

Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie

Hans-Gerd Maas

Habilitationsschrift

Zürich, 1997

© 1997

Dr. Hans-Gerd Maas

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie

an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Alle Rechte vorbehalten

printed in Switzerland

ISBN 3-906467-00-7

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung der Arbeit	1
1.2. Gliederung der Arbeit	2
2. Trinokulare und multiokulare Zuordnungsverfahren	4
2.1. Prinzip der Kernlinie	5
2.2. Probleme bei der Zuordnung punktförmiger Merkmale	5
2.2.1. Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung	6
2.2.2. Verfahren zur Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten	6
2.3. Kernlinienschnittverfahren	8
2.4. Verallgemeinerung des Kernlinienschnittverfahrens	10
2.5. Erweiterung auf eine beliebige Anzahl von Bildern	13
2.6. Anwendungsbeispiele	14
2.6.1. 3-D PTV	15
2.6.2. Oberflächenmeßtechnik in der Nahbereichsphotogrammetrie	17
2.6.3. Anwendung im hybriden System	18
2.6.4. Automatische Generierung von digitalen Geländemodellen	18
2.7. Trinokulare Verfahren zur Punktzuordnung in der Literatur	19
2.8. Zuordnungsverfahren für linienförmige Elemente	21
2.8.1. Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung von Geradensegmenten	22
2.8.2. Trinokulare Zuordnung von Kanten in der Robotik	22
2.8.3. Multiokulare Linienzuordnung bei der Hausrekonstruktion	25
2.9. Flächenbasierte Zuordnungsverfahren	26
2.9.1. Einfache Korrelationsverfahren	26
2.9.2. Least Squares Matching	27
2.9.3. Zuordnung im Objektraum	29
2.9.4. Kombination mit Shading-Verfahren	30
2.9.5. Interagierende Partikel	32
2.9.6. Näherungswertunabhängige Verfahren	34
3. Orientierungs- und Kalibrierungsverfahren	37
3.1. Überbrückung passpunktloser Räume	37
3.2. Genauigkeitssteigerung und Selbstkalibrierung in Nahbereichsanwendungen	38
3.2.1. Kalibrierverfahren	39
3.2.1.1. Laborkalibrierung	40
3.2.1.2. Referenzfeldkalibrierung	40

3.2.1.3. Selbst- und Simultankalibrierung.....	41
3.2.1.4. Selbstkalibrierung mit geodätischer Zusatzinformation	43
3.3. Automatische Orientierungsverfahren.....	43
3.3.1. Automatische Verfahren in der Aerotriangulation.....	43
3.3.2. Automatische Verfahren in Nahbereichsanwendungen	45
3.3.2.1. Sequentielle Signalisierung.....	46
3.3.2.2. Hybride Ansätze.....	47
3.3.2.3. Diskussion	49
3.4. Linienphotogrammetrie	49
3.5. Zuverlässigkeitsaspekte	50
4. Bildsequenzen.....	54
4.1. Passive Navigation.....	55
4.1.1. Komplexitätsvergleich: passive Navigation - automatische Aerotriangulation	55
4.1.2. Modelle der passiven Navigation	57
4.1.2.1. Bewegungsmodelle	57
4.1.2.2. Objektmodelle	57
4.1.2.3. Beobachtungsmodelle	58
4.1.2.4. Sensormodelle	59
4.1.3. Beispiele praktischer Implementationen	60
4.1.3.1. Monokulare Bildsequenzen.....	60
4.1.3.2. Trinokulare Bildsequenzen	61
4.1.3.3. Binokulare Bildsequenzen mit spatiotemporaler Konsistenzprüfung	62
4.1.3.4. Systeme mit reduzierter Aufgabenstellung	62
4.1.3.5. Mobile Systeme zur GIS-Datenakquisition.....	63
4.2. Online-Triangulation	64
5. Oberflächenmeßverfahren mit strukturiertem Licht.....	66
5.1. Lichtschnitttriangulation.....	67
5.2. Moiré-Verfahren	68
5.3. Phasenschiebeverfahren.....	69
5.4. Dreiprojektorverfahren	71
5.5. Kodierter Lichtansatz.....	72
5.6. Hybride Codes	74
5.7. Farbkodierung.....	74
5.8. Orthogonale Streifensysteme.....	74
5.9. Fokussequenzen.....	75
5.10. Diskussion der Verfahren	75

6. Dreizeilenkameras	78
6.1. Konzept der Dreizeilenkamera	79
6.2. Mehrbildzuordnung bei Dreizeilenkameras	80
6.3. Diskussion des Potentials von Dreizeilenkameras.....	81
7. Mehrbild-basierte Datenakquisitionstechniken.....	83
7.1. Macro- und Microscanning Techniken	83
7.1.1. Macroscanning	84
7.1.2. Microscanning	84
7.1.3. Spiegelscannersysteme	84
7.1.4. Schwenk-Neigekamera.....	84
7.2. Laminographie	85
7.3. Akquisition von Tomographiedatensequenzen	87
8. Radiometrische Mehrbildverfahren	89
8.1. Farbbildgewinnung mit CCD Kameras	89
8.1.1. 3-Chip Kameras.....	90
8.1.2. Sequentielle Filtertechniken	90
8.2. Multi- und hyperspektrale Systeme für Klassifikationsaufgaben.....	90
8.2.1. Scannende Systeme mit mehreren diskreten Einzelsensoren.....	91
8.2.2. Scannende Systeme mit einem Zeilensensor.....	91
8.2.3. Pushbroom-Systeme mit mehreren Zeilensensoren	92
8.2.4. Bildgebende Spektrometer	94
8.2.5. Diskussion der Techniken	95
8.3. Shading-Verfahren	98
8.3.1. Shape-from-Shading.....	98
8.3.2. Photometric Stereo	99
8.3.3. Diskussion photometrischer Oberflächenmeßverfahren	101
9. Ausblick	102
10. Literaturangaben.....	104
11. Dank.....	118

Kapitel 1: Einleitung

Die Photogrammetrie als Verfahren zur Gewinnung von dreidimensionaler Information aus Bilddaten hat sich im Laufe ihrer Entwicklung in vielen Aspekten von einer Zweibildtechnik hin zu einer Mehrbildtechnik entwickelt. Dieser Prozeß hat - stimuliert durch Fortschritte in der Sensor- und Computertechnik - in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich an Dynamik gewonnen. Neue Impulse bezüglich der Anwendung von Mehrbildtechniken ergeben sich in der digitalen Photogrammetrie vor allem durch vollautomatische Auswerteverfahren, welche nicht an die binokulare Beschränkung eines Operateurs gebunden sind, sowie durch die Möglichkeiten der Akquisition digitaler Bilddaten durch prinzipbedingt für die Gewinnung von Bildsequenzen und Echtzeitanwendungen prädestinierte Halbleiterkameras. Damit erleichtern Methoden der digitalen Photogrammetrie einerseits im Vergleich zu konventionellen Verfahren die Anwendung von Mehrbildtechniken, andererseits basieren sie aber größtenteils auch auf der Verfügbarkeit von mehrbildfähigen Algorithmen, weil die Anwendung automatischer Meßverfahren und die Lösung neuer Meßaufgaben gänzlich neue Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit stellen.

1.1. Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit soll einen Überblick geben über geometrische und radiometrische Mehrbildtechniken in verschiedensten Gebieten der digitalen Photogrammetrie. Einem erweiterten Verständnis des Begriffes 'digitale Photogrammetrie' entsprechend sollen hierbei auch Techniken diskutiert werden, welche im Allgemeinen Bereichen wie Computer Vision, Machine Vision, Robot Vision, medizinischer Bildverarbeitung oder Fernerkundung zugeordnet werden. Ein wichtiges Ziel der Arbeit ist dabei die Herstellung von Analogien zwischen in verschiedenen Gebieten angewandten Prinzipien. Die Arbeit ist aus der Sicht eines Photogrammeters geschrieben; die Kenntnis wichtiger photogrammetrischer Verfahren wird als bekannt vorausgesetzt, während relevante Verfahren aus den o.g. Gebieten zum Teil einer etwas detaillierteren Diskussion bedürfen. Die Weite des Themas einschränkend werden unter dem Begriff Mehrbildtechniken im Sinne dieser Arbeit nur Verfahren verstanden, die durch die Akquisition und Verarbeitung einer Mindestanzahl von Bildern, welche größer als zwei ist, überhaupt erst möglich werden oder zumindest entscheidend an Zuverlässigkeit und Genauigkeit gewinnen. Techniken, die lediglich eine mehrfache Wiederholung eines Prozesses darstellen, welcher prinzipiell auch mit zwei Bildern durchführbar ist, sollen deshalb nicht weiter diskutiert werden.

Die gezeigten Beispiele veranschaulichen einerseits die Bedeutung von Mehrbildtechniken für die Lösung (in vielen Fällen sogar für die Lösbarkeit an sich) von photogrammetrischen Aufgabenstellungen, andererseits wurden sie aber zum Teil auch unabhängig von ihrer praktischen Relevanz in der speziellen Anwendung und der Existenz von erprobten Lösungsverfahren zur Demonstration der geometrischen Stärke von Mehrbildverbänden ausgewählt. Gleichzeitig soll die Arbeit, beginnend mit Problemstellungen der Nahbereichsphotogrammetrie und endend mit einem Überblick über instrumententechnische Entwicklungen bei satellitengestützten Systemen, eine Brücke über die verschiedenen Einsatzgebiete der Photogrammetrie schlagen mit der Anwendung von Mehrbildtechniken als gemeinsamen Charakteristikum.

1.2. Gliederung der Arbeit

Basierend auf algorithmischen sowie anwendungs- und instrumententechnischen Kriterien sollen geometrische und radiometrische Mehrbildtechniken der digitalen Photogrammetrie in den folgenden sieben Hauptkapiteln zusammengefaßt werden:

- Von herausragender praktischer Bedeutung in der digitalen Photogrammetrie sind Mehrbildtechniken bei Aufgaben der Punktzuordnung im Bildraum. In vielen Anwendungen kann durch die Verwendung eines dritten Bildes in einem trinokularen Ansatz die integrale Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung im Vergleich zum binokularen Ansatz um mindestens eine Größenordnung gesenkt werden, und eine weitere Stärkung der Zuverlässigkeit ergibt sich durch die Verwendung von multi-okularen Ansätzen. Frühe Mehrbildtechniken in der Literatur der digitalen Photogrammetrie betreffen insbesondere die adaptive Kleinste-Quadrate-Korrelation mit geometrischen Zusatzbedingungen, welche meist als flächenhaftes Zuordnungsverfahren angewandt wird. Flächenhaften Verfahren gegenüber zu stellen sind Verfahren der Mehrbildzuordnung punkt- oder linienförmiger diskreter Objekte, welche mittels geeigneter Operatoren im Bildraum detektiert und lokalisiert wurden und zwecks 3-D Koordinatenbestimmung zugeordnet werden müssen. Aufgrund ihrer großen Relevanz für die photogrammetrische Praxis und umfangreicher eigener Arbeiten des Autors auf diesem Gebiet, von denen einige bislang noch nicht ausführlich publiziert wurden, sollen diese in Kapitel 2.2 - 2.6 dargestellten Techniken in dieser Arbeit vergleichsweise großen Raum einnehmen.
- Historisch gesehen kommt in einer Abhandlung über Mehrbildtechniken in der Photogrammetrie sicherlich der Bündelblockausgleichung eine entscheidende Rolle zu. Neben dem ursprünglichen Zweck der Überbrückung passpunktloser Räume bekamen hier schon sehr bald die auch heute noch äußerst wichtigen Aspekte der Zuverlässigkeit und Genauigkeit photogrammetrisch bestimmter 3-D Koordinaten sowie der Bestimmbarkeit von Parametern in der Selbstkalibrierung primäre Bedeutung. Arbeiten in diesem Bereich stammen zum großen Teil aus den späten 60er bis frühen 80er Jahren. Dementsprechend sind die in diesem Zusammenhang gemachten Aussagen auch schon für die analytische Photogrammetrie von Bedeutung. Da sich durch die digitale Photogrammetrie hier jedoch sowohl neue Möglichkeiten wie auch neue Anforderungen beispielsweise hinsichtlich der Robustheit in teil- oder vollautomatischen Systemen ergeben, soll in Kapitel 3 auf einige Aspekte der Bündelblockausgleichung und der Selbstkalibrierung noch einmal kurz eingegangen werden.

Mehrbildtechniken in Form aktiver sequentieller Signalisierungsverfahren spielen ferner eine Rolle bei der automatischen Orientierung und Kalibrierung stationärer Mehrkamerasysteme in Anwendungen der allgemeinen Bewegungsanalyse, welche in Kapitel 3.3 diskutiert werden.

Desweiteren ist die Akquisition von mindestens drei Bildern Grundvoraussetzung für Verfahren der Linienphotogrammetrie zur relativen Orientierung anhand von Geradensegmenten (Kapitel 3.4), denen ebenfalls im Rahmen der digitalen Photogrammetrie zunehmende Bedeutung zukommt.

- Ein sehr weites Feld stellt die Akquisition und Verarbeitung von Bildsequenzen auf einem regelmäßigen Zeit- und/oder Ortsraster dar. Aus photogrammetrischer Sicht sind hier vor allem die in Kapitel 4 diskutierten Verfahren der passiven Navigation anhand von monokularen Bildsequenzen von Interesse, welche vielfältige Analogien zu Verfahren der automatischen Aerotriangulation aufweisen. In diesem Zusammenhang ergeben sich auch neue Anwendungsgebiete für sequentielle Schätzverfahren.
- Unter dem Sammelbegriff ‘Oberflächenmeßverfahren mit strukturiertem Licht’ werden in Kapitel 5 eine ganze Reihe von Verfahren zusammengefaßt, welche auf der Akquisition und Verarbeitung kurzer monokularer Bildsequenzen einer stationären Kamera und der Projektion von räumlich-zeitlich veränderlichen Mustern durch einen ebenfalls stationären Projektor im Sinne von Beleuchtungsalgorithmen zur eindeutigen Codierung von Koordinaten projizierter Streifen im Triangulationsverfahren basieren. Diese Verfahren weisen interessante Analogien zu multiokularen Zuordnungsverfahren und zu allgemeinen Prinzipien geodätischer Instrumente auf und haben eine weite Verbreitung in der industriellen Praxis gefunden.
- Auf der quasi-simultanen Akquisition von trinokularen Zeilenbildsequenzen basiert das Prinzip der Dreizeilenkamera (Kapitel 6), welche in Flugzeugen oder Raumfahrzeugen gleichförmig über einen aufzunehmenden Geländestreifen bewegt wird. Während hier der Aspekt der Bildsequenzen schon zur Akquisition der Rohdaten notwendig ist, kommt dem trinokularen Prinzip Bedeutung sowohl unter Aspekten der Orientierung wie auch der Zuordnung zu.
- Aufgrund ihrer Relevanz für die Praxis der Datenakquisition sollen in Kapitel 7 Verfahren zur Gewinnung hochauflösender Bilder durch Macro- oder Microscanningtechniken sowie Verfahren zur Tomographiedatengewinnung, welche ebenfalls als Mehrbildtechniken zu klassifizierend sind, kurz angesprochen werden.
- Nach diesen Mehrbildtechniken mit Zielsetzungen geometrischer Natur, welche in der Photogrammetrie traditionell eine dominante Rolle spielen, werden in Kapitel 8 auch radiometrische Mehrbildtechniken diskutiert. Hier sind insbesondere auf der Akquisition von multi- und hyperspektralen Daten durch flugzeug- oder satellitengestützte Systeme basierende Klassifikationsverfahren der Fernerkundung zu nennen.

Ebenfalls als radiometrische Mehrbildtechniken einzuordnen sind photometrische Verfahren, welche die Rekonstruktion von Oberflächenmodellen über die Bestimmung lokaler Oberflächenneigungen aus Grauwertsequenzen jedes einzelnen Pixels in mehreren aufeinanderfolgenden Bildern einer stationären Kamera unter unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen erlauben.

Kapitel 2: Trinokulare und multiokulare Zuordnungsverfahren

Die Herstellung von Zwei- oder Mehrbildkorrespondenzen als Voraussetzung für Orientierungs- und Punktbestimmungsaufgaben war schon immer eine zentrale Aufgabe der Photogrammetrie. Die Bedeutung von robusten Verfahren der Mehrbildzuordnung diskreter oder flächenhafter Bildelemente hat mit dem Aufkommen von teil- oder vollautomatischen Verfahren in der digitalen Photogrammetrie noch wesentlich zugenommen. Ziel dieses Kapitels ist es, zu zeigen, daß Zuordnungsaufgaben durch Mehrbildtechniken wesentlich erleichtert werden können und in einzelnen Fällen überhaupt erst ermöglicht werden. Kernpunkt dabei ist die geometrische Stärke von Mehrbildverbänden, welche über die Definition und Kombination von Kernlinien in mehreren Bildern den Entwurf von merkmals- und näherungswertunabhängigen Zuordnungsstrategien erlaubt. In den folgenden Ausführungen sei die komplette äußere und innere Orientierung als Grundlage für die Berechnung der Kernlinie als gegeben vorausgesetzt. Auf Möglichkeiten der automatischen Orientierung von Bildverbänden in Luftbild- und Nahbereichsanwendungen wird in Kapitel 3.3 näher eingegangen.

Zuordnungsverfahren werden üblicherweise in folgende drei Kategorien unterteilt:

- Merkmalsbasierte Verfahren
- Flächenbasierte Verfahren
- Relationale Verfahren

Das größte Potential für Mehrbildtechniken liegt dabei bei den merkmalsbasierten Verfahren, die aus diesem Grunde im folgenden am detailliertesten behandelt werden sollen. Dabei wird auf die Extraktion von Merkmalen, weil für die Zielsetzung dieser Arbeit weniger relevant, nur am Rande eingegangen. Kapitel 2.2-2.7 beschäftigt sich mit der Problematik der Zuordnung punktförmiger Merkmale; Kapitel 2.8 erweitert die Betrachtungen auf die Zuordnung linienförmiger Merkmale. Verschiedene Ansätze für flächenbasierte Zuordnungsverfahren werden in Kapitel 2.9 diskutiert. Auf relationale Verfahren (z.B. Shapiro/Haralick, 1987; Vosselman, 1992) soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.

2.1. Prinzip der Kernlinie

Bei bekannter äußerer und innerer Orientierung zweier Aufnahmen ergibt sich aus der Koplanaritätsbedingung

$$\overrightarrow{O_1O_2} \cdot (\overrightarrow{O_1P'} \times \overrightarrow{O_2P''}) = 0 \quad (1)$$

die Kernlinie (engl.: epipolar line), welche die Schnittgerade zwischen der Bildebene und der aus den beiden Projektionszentren O_1 , O_2 und einem Objektpunkt P gebildeten Kernebene darstellt (Abb. 1) und geeignet ist, den Suchbereich für korrespondierende Bildelemente vom zweidimensionalen Bildraum auf eine eindimensionale Linie zu

reduzieren. Addiert man zu dieser Linie eine durch die Genauigkeit der Bildkoordinatenbestimmung und der vorgegebenen Orientierungsparameter bestimmte Toleranz, so erhält man einen Suchbereich in der Form eines schmalen Kernlinienbandes, in dem das korrespondierende Bildelement liegen muß. Die Länge dieses Suchbereichs kann durch eventuelles a priori Wissen über den möglichen Tiefenbereich im Objektraum bzw. durch gegebene Näherungswerte beschränkt werden.

Bei der dichten Auswertung von digitalen Stereobildpaaren bietet sich die Berechnung von Epipolarbildern (Kreiling, 1976) an, weil hier die Kernlinien mit Bildzeilen identisch sind, was den Rechenaufwand für die Suche nach homologen Punkten deutlich reduzieren kann. Die Berechnung von Epipolarbildern erfolgt durch eine projektive Transformation, deren acht Parameter sich aus den Elementen der relativen Orientierung berechnen lassen, und anschließendes Resampling der Bilder. Bei Mehrbildverfahren kann die Verwendung von Epipolarbildern allerdings problematisch werden, weil bei strengen Verfahren im ungünstigsten Falle Epipolarbilder in allen Kombinationen zu berechnen wären, was bei einer größeren Anzahl von Bildern, wie sie bei einigen der in Kapitel 2.6 gezeigten Anwendungsbeispielen verwendet wird, den Rechenaufwand und den Speicherplatzbedarf stark in die Höhe treiben würde.

2.2. Probleme bei der Zuordnung punktförmiger Merkmale

Die einfachste Form eines zuzuordnenden Elementes stellt ein Punkt in einem Bild dar, der durch seine Bildkoordinaten (x', y') und eventuell weitere Merkmale charakterisiert ist. Diese Zuordnung punktförmiger Merkmale entspricht, soweit sie sich auf die Stereozuordnung beschränkt, noch weitgehend der Denkweise aus der analytischen Photogrammetrie. Durch die Option der Verwendung einer beliebigen Anzahl von Bildern in automatischen Meßprozessen ergeben sich hier in der digitalen Photogrammetrie gänzlich neue Problemstellungen und Möglichkeiten, die im folgenden diskutiert werden sollen.

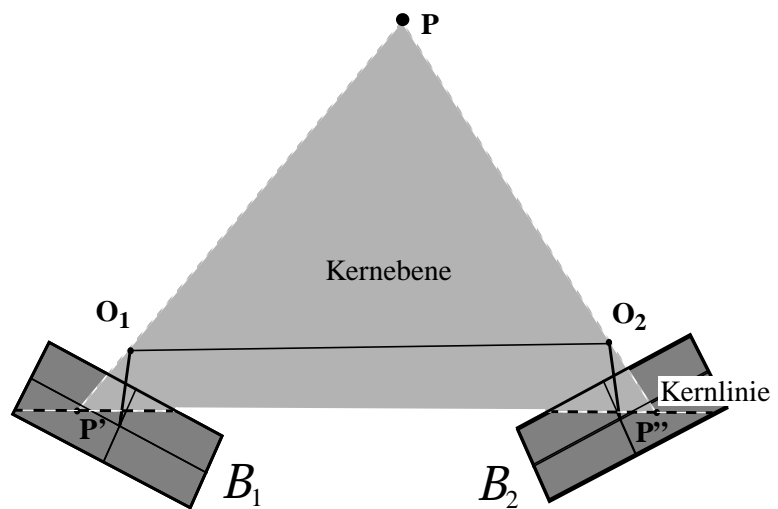


Abb. 1: Prinzip der Kernlinie

2.2.1. Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung

Die Länge des in Kapitel 2.1 definierten epipolaren Suchbereichs kann im Falle ungenauer Näherungswerte beträchtlich sein. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung, welche in einer Zweibildkonfiguration nicht allein durch geometrische Kriterien gelöst werden können. Die Wahrscheinlichkeit P_a solcher Mehrdeutigkeiten wurde in (Maas, 1992a) für zufällig im Objekt- bzw. Bildraum verteilte Punkte zu

$$P_a = 1 - e^{-\left(n \cdot \frac{f}{F}\right)} \quad \text{mit } F = \text{Bildfläche} \quad (2)$$

$n = \text{Anzahl Punkte im Bild}$
 $f = 2\varepsilon \cdot l_{12} = \text{Fläche des epipolaren Suchbereichs}$
 $l_{12} = \text{Länge des epipolaren Suchbereichs}$
 $\varepsilon = \text{seitliche Toleranz zur Kernlinie}$

abgeleitet. Damit erhält man in Abhängigkeit von der Anzahl Punkte pro Bild, der Kammerkonstante c , der Toleranz zur Kernlinie, der Basis im Objektraum b_{12} , der Sensorfläche und dem durch die Näherungswerte vorgegebenen Tiefenbereich im Objektraum ($Z_{min} < Z < Z_{max}$) die wahrscheinliche Gesamtzahl von Mehrdeutigkeiten in einem Bildpaar zu

$$N_a = (n^2 - n) \cdot \frac{2 \cdot c \cdot \varepsilon \cdot b_{12} \cdot (Z_{max} - Z_{min})}{F \cdot Z_{min} \cdot Z_{max}} \quad (3)$$

Die Anzahl der Mehrdeutigkeiten bei der Stereozuordnung in Kernlinienbändern wächst damit

- etwa quadratisch mit der Anzahl der Punkte im Bildraum,
- linear mit der Länge der Kernlinien und damit auch linear mit der Länge der Basis und etwa linear mit dem Tiefenbereich im Objektraum,
- linear mit der Toleranz ε senkrecht zur Kernlinie,

und kann in Anwendungen mit großen Punktmengen so groß werden, daß die Zuverlässigkeit des Verfahrens in Frage gestellt oder sogar die Lösbarkeit der Meßaufgabe veunmöglich wird. Die Schwäche des binokularen Ansatzes wird auch durch die Q_{VV} -Matrix wiedergegeben (vgl. Kapitel 3.5), welche für die Bildkoordinaten in Kernlinienrichtung Nullen aufweist.

2.2.2. Verfahren zur Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten

Zur Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten kann die Verwendung von Merkmalen der extrahierten Elemente bei der Zuordnung beitragen, wie zum Beispiel Form, Farbe, Größe und Helligkeit signalisierter Punkte oder durch Interestoperatoren extrahierte Merkmale; dabei ist allerdings die Zuverlässigkeit dieser Merkmale und ihre Invarianz gegenüber Abbildungen aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen, mit unterschiedlichen Bildmaßstäben und eventuell unter unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen zu prüfen. Bei Objekten mit kontinuierlicher Oberfläche können zusätzlich auch Nachbarschaftsbetrachtungen in Form maximaler lokaler Oberflächengradienten im Objektraum zur Lösung von Mehrdeutigkeiten herangezogen werden. Wenn solche Kriterien nicht zur Verfügung stehen oder sich als nicht ausreichend zuverlässig erweisen, müssen Strategien zur Verkleinerung des Suchbereichs angewandt werden. Dies kann, wie aus Gleichung (2) zu sehen ist, durch die Reduktion der Anzahl Punkte n im Bild erreicht werden. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn die Punkte im Bildraum so verteilt sind, daß die Wahrscheinlichkeit P_a für die Zuordnung von Mehrdeutigkeiten gering bleibt. Dies ist bei Objekten mit großer Oberfläche und geringer Toleranz ε zu erwarten.

chung (3) ersichtlich, am effizientesten durch eine Verringerung der Anzahl der Punkte im Bildraum erfolgen, was jedoch je nach den Anforderungen der jeweiligen Anwendung meist keine realistische Option darstellen wird. Auch die sich ebenfalls nach Gleichung (3) anbietende Verkleinerung der Basis stellt keine realistische Lösung dar, weil sich damit auch die Genauigkeit der Objektkoordinaten in Tiefenrichtung verschlechtert; allerdings kann eine kurze Basis, wie im folgenden in Kapitel 2.4 noch gezeigt werden wird, in Drei- oder Mehrkammersystemen durchaus eine interessante Option darstellen. Wenn auch die Toleranz zur Kernlinie und damit die Breite des Suchbereichs aufgrund der gegebenen Meßgenauigkeit im Bildraum und der Güte der Orientierungs- und Kalibrierungsparameter des Aufnahmesystems nicht reduziert werden kann, bleibt zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Stereozuordnung nur noch eine Verkürzung der Länge des Suchbereichs durch die Vorgabe besserer Näherungswerte.

Eine in der digitalen Photogrammetrie sehr häufig verwendete Methode zur sukzessiven Verbesserung von Näherungswerten ist die Verwendung von Bildpyramiden (z.B. Ackermann/Hahn, 1991). Diese sind insbesondere bei der Generierung von digitalen Geländemodellen geeignet, gänzlich ohne Vorgabe von Näherungswerten die Geländeoberfläche beginnend mit einer horizontalen Ebene sukzessive über mehrere Pyramidenebenen zu approximieren. Pyramidenverfahren werden sowohl in Verbindung mit flächenhaften Zuordnungsverfahren (z.B. Baltsavias, 1988) wie auch mit merkmalsbasierten Verfahren (z.B. Krzystek, 1991) verwendet. Bei Anwendungen mit ausschließlich signalisierten Punkten, wie sie in der Nahbereichsphotogrammetrie verbreitet sind, bieten sich Pyramidenverfahren jedoch kaum an, weil die Information der signalisierten Punkte auf höheren Pyramidenebenen weitgehend verschwinden wird. Auch bei der Verwendung von Luftbildern können bei hochfrequenten Texturen Probleme auftreten, indem ein zu starker Kontrastverlust in höheren Pyramidenebenen zu erheblichen Verlusten bei der Übertragung von Näherungswerten führt. Dies gilt sowohl für flächenbasierte Korrelationsalgorithmen wie auch für die Anwendung von Interestoperatoren auf mehreren Pyramidenebenen; in (Heikkilä, 1989) wurden zwar die guten Eigenschaften des Förstner-Operators (Förstner, 1986) im Maßstabsraum gezeigt, doch gilt dies nur bis zu einer bestimmten Pyramidenebene, weil viele kleine Strukturen gerade bei großmaßstäbigen Luftbildern in höheren Pyramidenebenen komplett verschwinden können. Das Problem der Beschaffung von Näherungswerten über Bildpyramiden ist also weniger der um $\frac{1}{3}$ gesteigerte Speicherplatzbedarf (bezogen auf einen Faktor zwei in der Pyramide) als vielmehr der Informationsverlust zwischen den einzelnen Pyramidenebenen, der in bestimmten Anwendungen die Übertragbarkeit von Näherungswerten durch die Pyramidenebenen limitieren kann. Dazu kann die Wirksamkeit der Methode durch große Diskontinuitäten im Objektraum beeinträchtigt werden.

Alle diese Verfahren zur Erzielung von Eindeutigkeit haben selbstverständlich ihre Berechtigung und sind in einer Reihe von praktischen Problemstellungen erfolgreich angewandt worden. Alle weisen jedoch unter - keineswegs sehr seltenen - Umständen nur eine beschränkte Wirksamkeit auf und können keinesfalls als allgemeingültige Ansätze zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung angesehen werden. Daher soll im folgenden die Verwendung von mehr als zwei Bildern unterschiedlicher äußerer Orientierung als robuste und allgemeingültige Methode zur Lösung von Zuordnungsaufgaben eingehend diskutiert werden.

2.3. Kernlinienschnittverfahren

Eine konsequente Lösung des Problems der Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung ist die Verwendung einer dritten Kamera mit dem Ziel, den Suchbereich von einem Kernlinienband auf den Schnitt von Kernlinienbändern zu reduzieren (Maas, 1990). Dazu bietet sich eine Aufnahmekonfiguration an, bei der die Projektionszentren von drei Kameras ein etwa gleichseitiges Dreieck parallel zur Hauptausdehnung des Objektraumes bilden und die Aufnahmeachsen zwecks Optimierung des gemeinsam abgebildeten Objektbereiches näherungsweise ein Tetraeder formen (Abb. 2). Diese Konfiguration erlaubt die Berechnung von Kernlinienschnitten, die wie in Abb. 3 gezeigt zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung genutzt werden können.

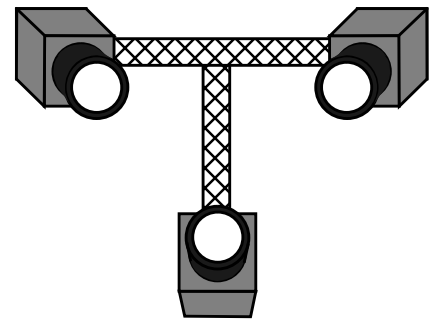


Abb. 2: Dreikameraanordnung für Kernlinienschnittverfahren

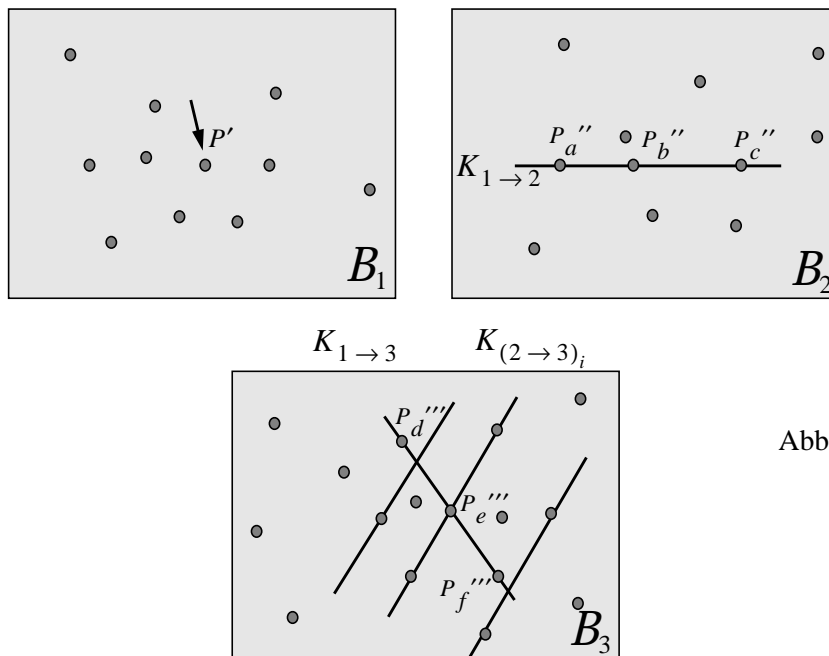


Abb. 3: Prinzip des Kernlinienschnittverfahrens (Maas, 1992a)

Ausgehend von einem beliebigen Punkt P' in einem Bild B_1 werden Kernlinien $K_{1 \rightarrow 2}$ ins Bild B_2 und $K_{1 \rightarrow 3}$ ins Bild B_3 berechnet, auf denen beispielsweise die Kandidaten P_a'' , P_b'' und P_c'' bzw. P_d''' , P_e''' und P_f''' gefunden werden. Eine eindeutige Bestimmung eines zu P' korrespondierenden Punktes ist ohne zusätzliche Merkmale in B_2 oder B_3 allein nicht möglich. Rechnet man nun jedoch die Kernlinien $K_{(2 \rightarrow 3)_i}$ für alle Kandidaten P_i'' in B_2 und schneidet sie in B_3 mit der Kernlinie $K_{1 \rightarrow 3}$, so wird mit großer Wahrscheinlichkeit nur einer der Schnittpunkte in der Nähe eines der Kandidaten in B_3 liegen (in Abb. 3: nur P_e'''). Somit wird also der Suchbereich für korrespondierende Punkte reduziert von einem schmalen Band in einem zweiten Bild auf Schnittflächen von Bändern einem dritten Bild. Implementiert wurde dieses Kernlinienschnittverfahren in (Maas, 1992a) durch einen Kombinatorik-Algorithmus, der zuerst alle Kernlinien $K_{1 \rightarrow 2}$, $K_{1 \rightarrow 3}$ und $K_{2 \rightarrow 3}$ berechnet, darauf alle möglichen Korrespondenzen zwischen je zwei Kameras herstellt und

schließlich aus diesen Korrespondenzen konsistente Tripel herausfiltert, d.h. Kandidentripel, bei denen die Zuordnung $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ mit der Zuordnung $1 \rightarrow 3$ übereinstimmt ($P' - P_b'' - P_e'''$ in Abb. 3).

Diese Herstellung von konsistenten Tripeln stellt eine notwendige, aber noch keine hinreichende Bedingung für eine korrekte Zuordnung dar. Erst konsistente Tripel, deren Mitglieder in keinem anderen konsistenten Tripel vorkommen, stellen eine notwendige und hinreichende Bedingung für eine korrekte Zuordnung dar. Auch im Bildtripeln ist jedoch mit verbleibenden, nicht lösbaren Mehrdeutigkeiten zu rechnen. Diese können erst durch die Konsistenzprüfung erkannt werden; die entsprechenden Zuordnungen sind dann zu eliminieren. Möglichkeiten und Wahrscheinlichkeiten von Mehrdeutigkeiten beim Kernlinienschnitt in drei Bildern werden (Maas, 1992b) diskutiert. Die wahrscheinliche Anzahl nicht lösbarer Mehrdeutigkeiten für eine Dreikameraanordnung im Kernlinienschnittverfahren ergibt sich danach zu

$$N_a = \frac{4 \cdot (n^2 - n) \cdot \varepsilon^2}{F \cdot \sin \alpha} \cdot \left(1 + \frac{b_{12}}{b_{23}} + \frac{b_{13}}{b_{23}}\right) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{ll} n: & \text{Anzahl Punkte pro Bild} \\ F: & \text{Bildfläche} \\ b_{12}, b_{13}, b_{23}: & \text{Basiskomponenten} \\ \alpha: & \text{Schnittwinkel in } B_3 \\ \varepsilon: & \text{Toleranz zur Kernlinie.} \end{array} \quad (4)$$

Dabei treten Mehrdeutigkeiten weniger durch das Vorhandensein von zwei Kandidaten in einem Suchbereich auf als durch zufällig in einen zweiten Suchbereich fallende Kandidaten. In (Maas, 1992a) wird gezeigt, daß die Anzahl nicht lösbarer Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung durch die Verwendung einer dritten Aufnahme im strengen Kernlinienschnittverfahren um mindestens eine Größenordnung verringert werden kann. Die Anzahl verbleibender Mehrdeutigkeiten wächst bei der Dreibildlösung nach Gleichung (4) wie auch bei der binokularen Lösung mit dem Quadrat der Anzahl von Punkten im Bildraum, wird aber weitgehend unabhängig von der Länge der Kernlinie und damit von der Verfügbarkeit von Näherungswerten und der Basislänge. Diese Betrachtungen gelten für zufällig im Bildraum verteilte Punkte; bei regelmäßiger Verteilung können sich je nach Verteilung und Kameraanordnung günstigere oder ungünstigere Verhältnisse ergeben, wie noch in Kapitel 2.6.2 an einem Beispiel (Abb. 14) gezeigt wird. Eine ähnliche Analyse - allerdings vereinfachend bezogen auf Epipolarbilder und ohne Berücksichtigung der Länge des Kernliniensegments - zeigen (Shen/Castan, 1987); allerdings geben Shen/Castan nur die Wahrscheinlichkeit an, daß in einem Bildpaar oder -tripel keine einzige Mehrdeutigkeit auftritt, was aus praktischer Sicht als wenig relevant erscheint.

Diese verbleibenden Mehrdeutigkeiten im Bildtripel stellen also diskrete, hauptsächlich von der Punktmenge und -verteilung abhängige Quellen grober Fehler dar, deren Potential durch die konventionellen statistischen Verfahren bei der Punktbestimmung in Vermessung und Photogrammetrie nicht detektiert wird. Die Q_{vv} -Matrix für den räumlichen Vorwärtsschnitt eines in drei Bildern mit in einem gleichseitigen Dreieck angeordneten Projektionszentren abgebildeten und zugeordneten Punktes (siehe Kapitel 3.5) zeigt eine akzeptable Detektierbarkeit von groben Fehlern in allen Bildkoordinaten, welche keinen Hinweis auf mögliche grobe Fehler durch eine falsche Zuordnung in Form eines inkonsistenten Tripels gibt.

Eine konsequente Erweiterung des Verfahrens zur Verringerung der Anzahl verbleibender Mehrdeutigkeiten ergibt sich durch die Verwendung einer vierten Aufnahme. Dies führt auf einen weiteren

Kernlinienschnitt und die Suche nach konsistenten Quadrupeln und bewirkt eine weitere Verringerung der Anzahl zu erwartender nicht lösbarer Mehrdeutigkeiten um mindestens eine Größenordnung.

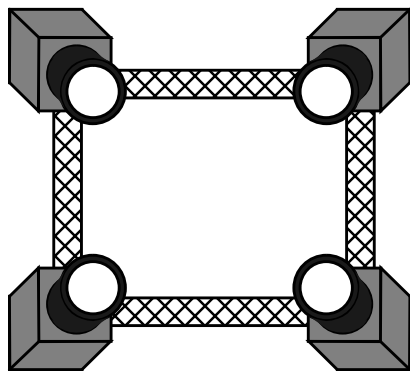
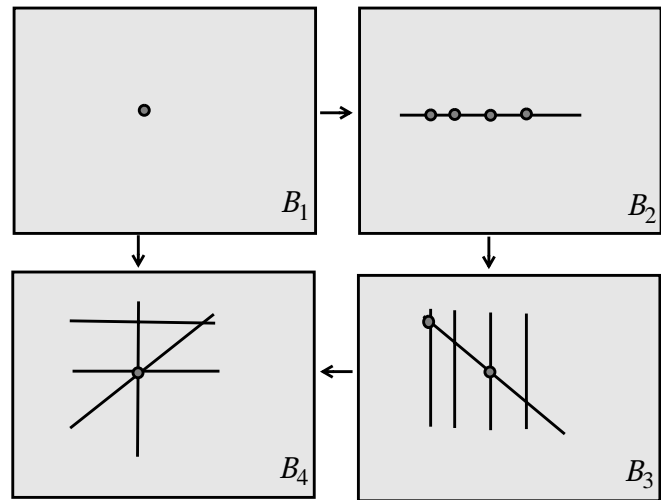


Abb. 4: Erweiterung des Kernlinienschnittverfahrens auf vier Kameras (Maas, 1992a)



Eine Erweiterung auf eine beliebige Anzahl von Bildern zwecks weiterer Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten wird in Kapitel 2.5 diskutiert.

2.4. Verallgemeinerung des Kernlinienschnittverfahrens

Geht man vom anschaulichen Schnitt von Kernlinien, wie er in Kapitel 2.3 gezeigt wurde, über auf eine Parametrisierung auf der Kernlinie, so gelangt man zu einem allgemeineren Verfahren der Nutzung eines dritten Bildes zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten, welche auch eine kollineare Konfiguration der drei Projektionszentren erlaubt. Am einfachsten läßt sich dies zeigen über die Verifikation von mehrdeutigen Zuordnungen zwischen zwei Kameras durch eine Abbildung über den Objektraum ins dritte Bild (Abb. 5).

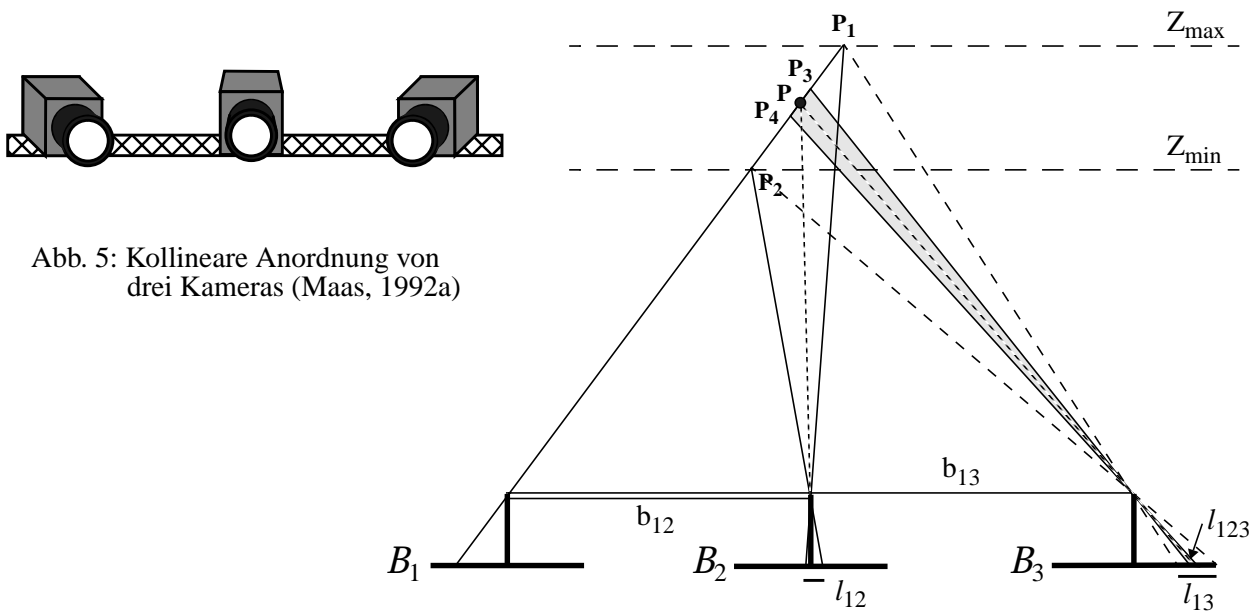


Abb. 5: Kollineare Anordnung von drei Kameras (Maas, 1992a)

(vgl. Abb. 6)

Die Zuordnung $B_1 \rightarrow B_2$ wird als Zweibildzuordnung wie bereits in 2.2 gezeigt aufgrund der Länge l_{12} der Kernlinie eine relativ große Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten aufweisen. Wird nun aus jeder möglichen Zuordnung $B_1 \rightarrow B_2$ ein Punkt im Objektraum rekonstruiert und in B_3 abgebildet, so ergibt sich dort abhängig von der Genauigkeit der Koordinaten des Punktes (also vor allem von der Länge der Basis b_{12}) sich so ein wesentlich reduzierter Suchbereich l_{123} , in dem ein korrespondierender Kandidat gefunden werden muß; wird in B_3 kein Kandidat gefunden, muß die entsprechende Zuordnung (1- \rightarrow 2) verworfen werden, ansonsten ist ein konsistentes Tripel analog zu dem in 2.3 gezeigten Verfahren etabliert. Im Bildraum ergibt sich somit entsprechend der Reduktion des Suchbereichs von einem Kernlinienband auf die Schnittflächen von Bändern in Kapitel 2.3 (Abb. 3) bei kollinearer Anordnung der Projektionszentren eine Reduktion des Suchbereichs auf kurze Segmente des Kernlinienbandes (Abb. 6).

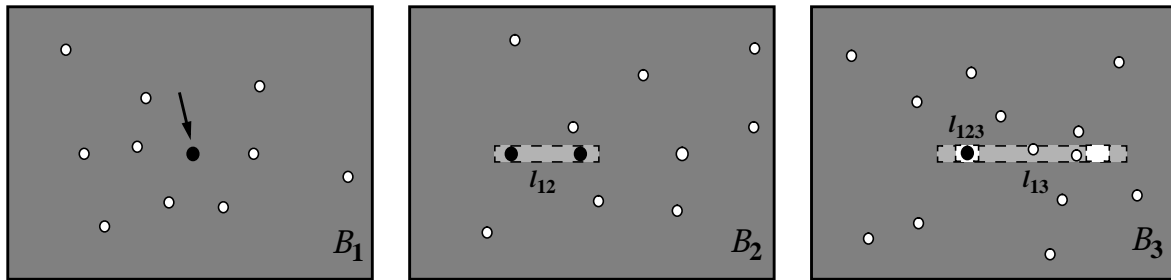


Abb. 6: Reduzierter Kernliniensuchbereich bei kollinearer Dreibildanordnung (vgl. Abb. 5)

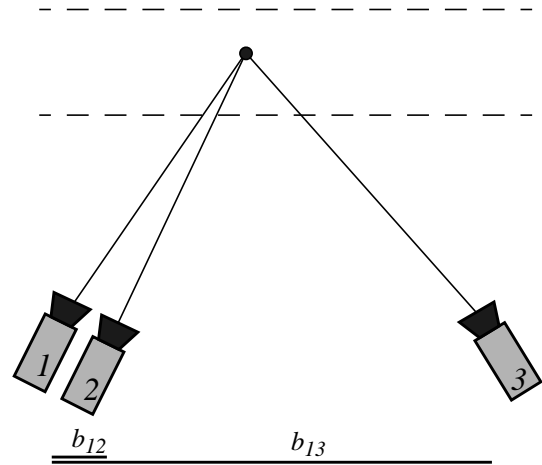
Nach (Maas, 1992b) ergibt sich die verbleibende Anzahl nicht lösbarer Mehrdeutigkeiten bei kollinearer Anordnung der Projektionszentren analog zu den Bezeichnungen in Gleichung (4) zu

$$N_a = \frac{4 \cdot (n^2 - n) \cdot \varepsilon^2 \cdot b_{13}^2}{F \cdot b_{12} \cdot (b_{13} - b_{12})}. \quad (5)$$

In (Maas, 1992b) wurde außerdem anhand von Gleichung (5) bewiesen, daß die optimale Anordnung dreier kollinearer Projektionszentren unter dem Aspekt der maximalen Reduktion der Anzahl nicht lösbarer Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung eine symmetrische Anordnung (wie in Abb. 5 dargestellt) ist. Abweichungen von dieser Konfiguration können bei nicht zufällig im Bildraum verteilten Punkten, wie sie sich beispielsweise bei der Projektion eines Punktrasters ergibt (vgl. Kapitel 2.6.2), sinnvoll sein. Eine asymmetrische kollineare Anordnung der drei Projektionszentren (Abb. 7) mit einer kurzen und einer langen Basis, die beispielsweise in (Matthies/Okutomi, 1989) und in (Lotz/Fröschle, 1990) gezeigt wird, kann sich auch unter Aspekten der Rechenzeitoptimierung anbieten, weil sie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Mehrdeutigkeiten reduziert, indem zunächst über eine kurze Basis mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten eine Zuordnung $B_1 \rightarrow B_2$ hergestellt wird und dann eine verkürzte Kernlinie in B_3 berechnet wird, wobei die Länge der Suchbereiche in B_2 und B_3 etwa gleich lang wird.



Abb. 7: Asymmetrische kollineare Kameraanordnung



Somit gewährleistet die kurze Basis b_{12} eine geringe Anzahl von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung, während die lange Basis b_{13} die Forderung nach einer guten Bestimmbarkeit auch der Tiefenkoordinate erfüllt. Es ist jedoch zu betonen, daß dieses Verfahren der asymmetrischen Anordnung zwar die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Mehrdeutigkeiten minimiert, jedoch nicht berücksichtigt, daß Mehrdeutigkeiten durch die Verifikation einer möglichen Zuordnung im dritten Bild auch gelöst werden können. Somit vermag es zwar den Rechenzeitaufwand zu verringern, was bei Echtzeitanwendungen von entscheidender Bedeutung sein kann, stellt jedoch hinsichtlich der Minimierung der verbleibenden Anzahl nicht lösbarer Mehrdeutigkeiten keine optimale Konfiguration dar.

Nach den Betrachtungen in Kapitel 2.3 und 2.4 ergeben sich somit vielfältige Möglichkeiten der Anordnung von drei oder vier Projektionszentren, welche je nach Anforderungen an Zuverlässigkeit und Rechenzeit und Bedingungen hinsichtlich Platzbedarf und Punktverteilung flexible Lösungen erlauben. In den meisten Fällen wird dabei die Anordnung der Projektionszentren im Dreieck bzw. im Quadrat die Vorteilhafteste sein.

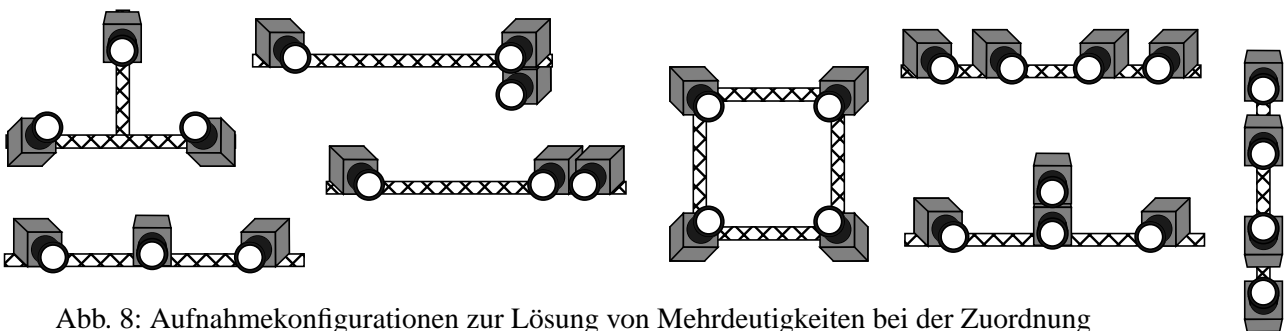


Abb. 8: Aufnahmekonfigurationen zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung

Der in 2.3 verwendete Begriff ‘Kernlinienschnittverfahren’ ist streng genommen nicht für alle gezeigten Varianten korrekt. Da jedoch auch die Zuordnung bei kollinearere Anordnung der Projektionszentren bei Parametrisierung auf der Kernlinie im weiteren Sinne als Schnittverfahren angesehen werden kann, soll dieser Begriff im Rahmen dieser Arbeit aus chronologischen Gründen als Oberbegriff über beide Verfahren beibehalten werden.

2.5. Erweiterung auf eine beliebige Anzahl von Bildern

Auch mit der in Kapitel 2.3 gezeigten Lösung mit vier Aufnahmen wird das Auftreten von nicht lösbaren Mehrdeutigkeiten nicht völlig vermieden. Zur weiteren Reduktion der Anzahl von Mehrdeutigkeiten bietet sich eine konsequente Erweiterung auf eine beliebig große Anzahl von Aufnahmen an. Die Handhabung der Kernlinien in allen Kombinationen, wie sie bei der Drei- und Vierkameralösung implementiert wurde (vgl. Abb. 3, Abb. 4) würde dabei allerdings zu einem nicht akzeptablen exponentiellen Anstieg des Rechenzeitbedarfs führen. Aus diesem Grund wurde eine reduzierte Lösung entwickelt, welche ausgehend von einem Punkt in einem beliebigen Bild die Kernlinie in ein zweites Bild rechnet und mögliche Zuordnungen auf dieser Kernlinie über den Objektraum durch Rückprojektion in alle anderen Bilder des Verbandes verifiziert. Die Anzahl erfolgreicher Verifikationen stellt dabei ein Wahrscheinlichkeitsmaß für die Richtigkeit der jeweiligen Zuordnungen dar. Die Vorgehensweise bei diesem Ansatz ist in Abb. 9 dargestellt, wobei wiederum der Kernlinienschnitt etwa gleichwertig durch einen tatsächlichen Schnitt im Bildraum oder durch die in Kapitel 2.4 diskutierte Parametrisierung auf der Kernlinie erfolgen kann.

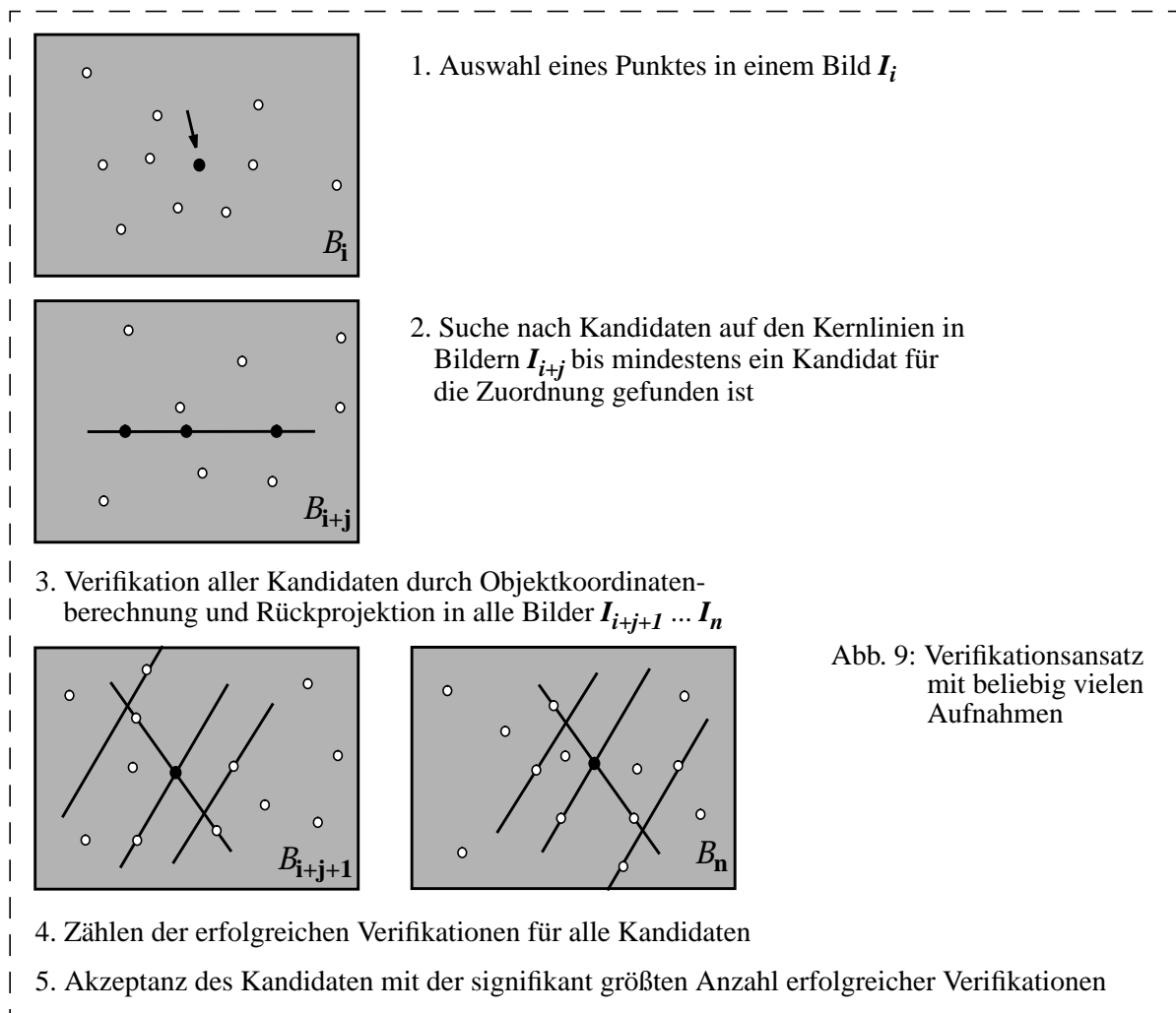


Abb. 9: Verifikationsansatz mit beliebig vielen Aufnahmen

Diese Vorgehensweise stellt in gewisser Hinsicht eine pragmatische Lösung dar, weil im Gegensatz zu den in 2.3 und 2.4 gezeigten strengen Lösungen aus Gründen der Rechenzeiterparnis nicht alle Kombinationen betrachtet werden und die Willkür bei der Reihenfolge der Bilder nicht vollständig

abgefangen wird. Aus diesem Grunde ist es möglich, daß Fehler erster oder zweiter Art auftreten, indem korrekte Zuordnungen verworfen oder falsche Zuordnungen akzeptiert werden. Die praktische Erprobung (vgl. Kapitel 2.6.3 und 2.6.4) ergab jedoch sehr gute Resultate.

Dazu weist die praktische Implementation der Methode bei Verwendung einer ausreichenden Anzahl von Bildern eine Reihe von Vorteilen auf, die den Einsatz sehr flexibel machen können:

- Es kann eine beliebige Anzahl von mit unterschiedlicher Orientierung aufgenommenen Bildern verwendet werden. Praktische Tests wurden mit bis zu 50 Bildern durchgeführt.
- Es wird nicht verlangt, daß jeder Punkt in jedem Bild sichtbar ist. Punkte können in beliebigen Bildern fehlen aufgrund von Beschränkungen des Bildformates, Verdeckungen, Beleuchtungseinflüssen oder Unzulänglichkeiten bei der Detektion.
- Eventuell vorhandene Merkmale zur Beschreibung der Punkte können zur Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten verwendet werden, stellen aber keine Voraussetzung dar.
- Es sind keine Näherungswerte nötig, es werden keine Anforderungen an die Kontinuität der Objekt-oberfläche gestellt, Punkte dürfen beliebig im Objektraum verteilt sein; die Angabe eines großzügig bemessenen, das ganze Objekt einschließenden Tiefenbereichs im Objektraum reicht aus.

Als Steuerparameter sind lediglich anzugeben:

- Die seitliche Toleranz zur Kernlinie, welche von der Standardabweichung der Orientierungs- und Kalibrierungsparameter des Aufnahmesystems sowie von der Genauigkeit der Punktmessung im Bildraum abhängt.
- Die minimale Anzahl erfolgreicher Verifikationen zur Akzeptanz von Zuordnungen.
- Die geforderte Signifikanz des Verifikationsmaßes für die Akzeptanz von Zuordnungen, welche als Differenz zum Verifikationsmaß der anderen Zuordnungskandidaten definiert ist.

Die Anforderungen an die Aufnahmegeometrie stellen eine Untermenge der üblicherweise für die Bündelblockausgleichung gestellten Anforderungen dar: Es wird lediglich verlangt, daß jeder zuzuordnende Punkt in Bildern von mindestens drei Standorten mit ausreichend langen Basen aufgenommen wurde.

2.6. Anwendungsbeispiele

Zur Demonstration des Potentials der in Kapitel 2.3 - 2.5 diskutierten Verfahren seien im folgenden einige Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Bereichen der digitalen Photogrammetrie gezeigt. Diese Beispiele zeigen teilweise Anwendungen, die ohne die diskutierten Mehrbildverfahren nicht durchführbar wären, oder deren Zuverlässigkeit und Automatisierungsgrad durch die Verfahren beträchtlich gesteigert werden kann; daneben wurden weitere Beispiele unabhängig von der Existenz anderer Auswertestrategien ausgewählt, um die geometrische Stärke von Mehrbildverbänden hinsichtlich der Möglichkeiten der Punktzuordnung zu zeigen. Im Einzelnen umfassen die Beispiele:

- Die Bestimmung der dreidimensionalen Trajektorien von Partikeln in Strömungen (3-D PTV, particle tracking velocimetry) als extremes Beispiel einer dynamischen Anwendung mit einer hohen Zahl von beliebig ohne kontinuierliche Oberfläche im Raum verteilten Elementen mit weitgehend identischen Merkmalen (Kapitel 2.6.1).
- Auf der Projektion eines Punktrasters basierende Oberflächenmessung im Nahbereich als Beispiel einer Anwendung mit interessanten Analogien zu einigen der in Kapitel 5 gezeigten Oberflächenmeßverfahren aus dem Machine Vision Bereich (Kapitel 2.6.2).

- Eine quasi-statische Anwendung mit einer großen Anzahl von Bildern und signalisierten Punkten als Beispiel für die Optimierung von Automatisierbarkeit und Zuverlässigkeit in der Nahbereichsphotogrammetrie in industriellen und ingenieurtechnischen Anwendungen (Kapitel 2.6.3).
- Die Generierung von digitalen Geländemodellen aus Luftbildern als Beispiel für die Verwendung natürlicher Punkte mit interessanten Aspekten hinsichtlich der Notwendigkeit der Verfügbarkeit von Näherungswerten (Kapitel 2.6.4).

2.6.1. 3-D PTV

Ein klassisches Beispiel für das Auftreten und die Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung ist die photogrammetrische Bestimmung der dreidimensionalen Trajektorien von kleinen Partikeln in Strömungen (3-D PTV, particle tracking velocimetry - Maas, 1990). Zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern werden hier Strömungen in transparenten Medien mit kleinen, auftriebsneutralen Partikeln visualisiert.

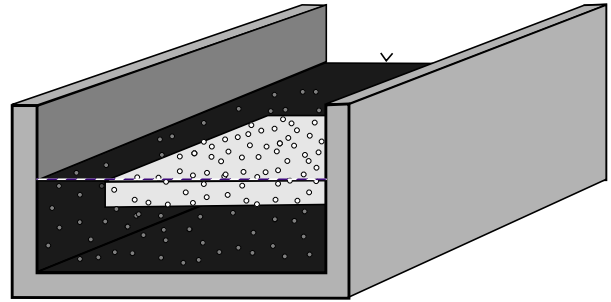


Abb. 10: Dreikamerasystem für 3-D PTV

Aus Bildsequenzen mehrerer Kameras werden dreidimensionale Partikelkoordinaten und -trajektorien bestimmt. Dabei sind zwei Zuordnungsprozesse nötig (Abb. 12): Eine Mehrbildzuordnung zur Herstellung der Korrespondenzen und 3-D Partikelkoordinaten und eine Zuordnung auf der Zeitachse (Tracking) zur Bestimmung von Geschwindigkeitsvektoren und Trajektorien (Papantoniou/Dracos, 1990). Dabei kann insbesondere die Mehrbildzuordnung kritisch sein: Mit völlig frei im Raum verteilten kleinen Objekten und ohne jegliche verbindende Oberfläche versagen nachbarschafts- und pyramidenbasierte Verfahren der Generierung von Näherungswerten, und selbst Vertauschungen auf der Kernlinie können auftreten (Abb. 11).

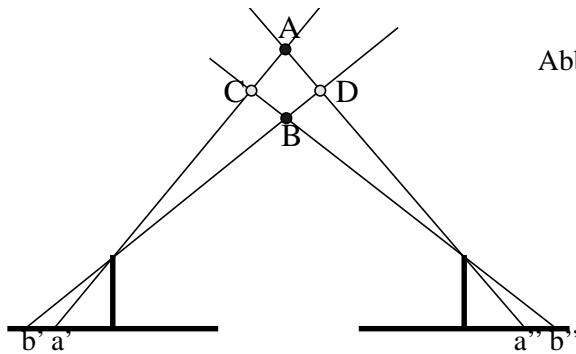


Abb. 11: Beispiel für eine Vertauschung auf der Kernlinie: Es könnten sowohl die Punkte A, B (bei Zuordnung $a' - a''$ und $b' - b''$) als auch C, D (bei Zuordnung $b' - a''$ und $a' - b''$) im Objektraum rekonstruiert werden. (Maas, 1992a)

Bei großer Tiefenausdehnung des Beobachtungsvolumens und hoher Partikelanzahl werden dementsprechend bei der Stereozuordnung in einem Zweikamerasystem sehr viele Mehrdeutigkeiten auftreten. In (Maas, 1992a) wird die Anzahl solcher Mehrdeutigkeiten in einem Experiment unter

realistischen Bedingungen mit 1000 Partikeln im Beobachtungsvolumen nach Gleichung (3) auf etwa 400 geschätzt.

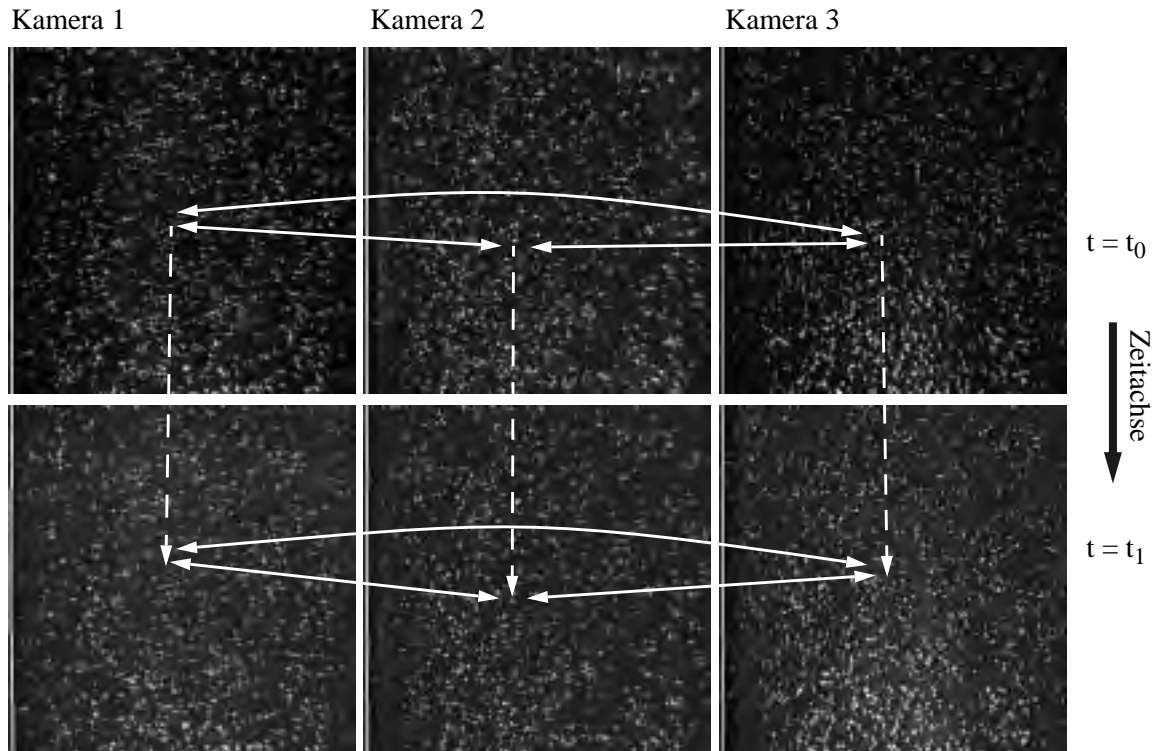


Abb. 12: Zwei aufeinanderfolgende Bildtripel beim 3-D PTV, raum-zeitliche Zuordnungen

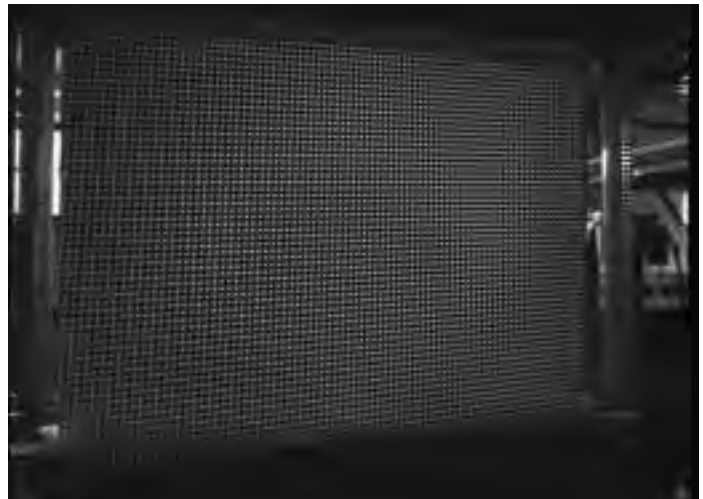
In der 3-D PTV Literatur findet man im Wesentlichen zwei Wege zur Lösung dieser Mehrdeutigkeiten:

- In (Chang et al., 1985) und in (Netzsch/Jähne, 1993) wird in binokularen Bildsequenzen zuerst das Tracking im Bildraum durchgeführt; danach werden Korrespondenzen zwischen Trajektorien hergestellt, wobei Merkmale der Trajektorie als zusätzliche Zuordnungskriterien verwendet werden können.
- In (Maas, 1990 und 1992a), (Kasagi/Nishino, 1990) und (Nilsen/Hådem, 1994) werden drei Kameras verwendet (Abb. 10), was die Anwendung des in Kapitel 2.3 gezeigten Kernlinienschnittverfahrens erlaubt. Dementsprechend wird in diesen Ansätzen zuerst die Mehrbildzuordnung und dann die Partikelverfolgung gelöst. Eine Erweiterung auf vier Kameras wird in (Maas, 1992b) gezeigt.

Die zweite Vorgehensweise weist den entscheidenden Vorteil auf, daß die Zuordnung auf der Zeitachse im Dreidimensionalen wesentlich besser definiert ist, weil keine Überschneidungen von Trajektorien auftreten können, welche im Zweidimensionalen bei ungünstigen Schnittwinkeln weitere Mehrdeutigkeiten verursachen können. In praktischen Anwendungen konnten mit diesem Ansatz in einem Vierkamarasystem Geschwindigkeitsvektoren von bis zu 1300 Partikeln bestimmt werden (Virant, 1996).

2.6.2. Oberflächenmeßtechnik in der Nahbereichsphotogrammetrie

Ein Beispiel für die Signalisierung einer Objektfläche mit strukturiertem Licht ist die Bestimmung von Sequenzen von Oberflächenmodellen eines Kohlefaserbauteils in Belastungstests (Maas, 1992c). Hier wurde die Oberfläche durch etwa 5000 aufprojizierte Punkten signalisiert (Abb. 13) und in einer Serie von Belastungszuständen mit drei CCD-Kameras aufgenommen. Korrespondenzen als Voraussetzung für die 3-D Koordinatenbestimmung der Punkte wurden wiederum im Kernlinien-schnittverfahren hergestellt.



Aufgrund der Regelmäßigkeit des aufprojizierten Musters und der ziemlich ebenen Oberfläche kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Mehrdeutigkeiten bei dieser Anwendung von den aus den Gleichungen (2) - (4) ermittelten Werten deutlich nach oben oder unten abweichen. Eine parallele Ausrichtung des projizierten Musters zu einer der Kamerabasens kann, wie in Abb. 14 (links) gezeigt, zu einer deutlichen Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten führen und sollte daher vermieden werden. Bei kollinear anordneter Projektionszentren empfiehlt sich aufgrund der relativ gleichmäßigen Punktabstände im Bild zudem eine auf den Punktabstand des projizierten Musters abgestimmte asymmetrische Anordnung der Kameras wie in Abb. 7 gezeigt.

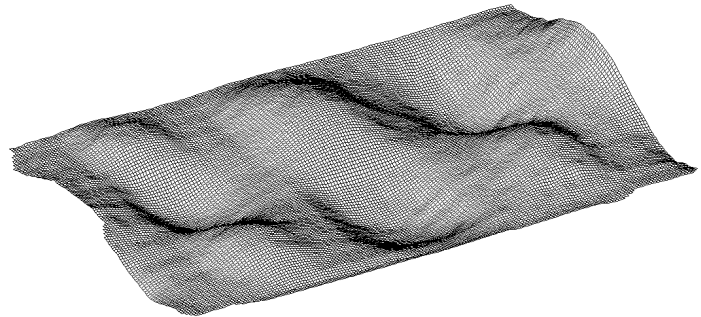


Abb. 13: Kohlefaserbauteil mit aufprojiziertem Punktraster, Verformungsmuster

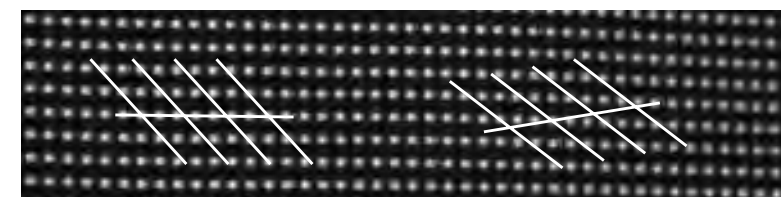


Abb. 14: Kernlinienverlauf bei paralleler und nicht-paralleler Ausrichtung von Projektor und Kamerabasis

Diese Anwendung stellt zugleich eine interessante Analogie zu den in Kapitel 5.4 gezeigten Oberflächenmeßverfahren dar: Beide Verfahren basieren auf der Projektion von strukturiertem Licht und auf der Anwendung von Mehrbildtechniken zur Erzielung von Eindeutigkeit bei der Zuordnung; während die in Kapitel 5 diskutierten Verfahren jedoch auf der Verwendung einer Kamera mit sequentieller Mehrbildakquisition beruhen, basiert das hier gezeigte Verfahren auf der simultanen Akquisition mehrerer Bilder und ist damit auch für dynamische Absolutmessungen geeignet. Zudem ist die Geometrie des Projektors hier unerheblich, weil er lediglich zur Signalisierung der Oberfläche verwendet wird.

2.6.3. Anwendung im hybriden System

Eine Anwendung mit Verwendung von retroreflektierenden Zielmarken in einem hybriden System höchster Genauigkeit wird in (Dold/Maas, 1994) gezeigt. Für Deformationsuntersuchungen wurden hier mit einer großformatigen filmbasierten Kamera (Rollei LFC) 18 Aufnahmen einer mit 380 Punkten signalisierten Betonwand gemacht und an einem digitalen Monokomparator (Rollei RS1-C) ausgemessen.



Abb. 15: Mit retroreflektierenden Zielmarken signalisierte Wand: Übersichtsbild und Ausschnitt aus einem Meßbild (Dold/Maas, 1994)

Die Detektion der signalisierten Punkte kann hier im extrem strukturierten Bild (Abb. 15 rechts) leicht durch ein Schwellwertverfahren erfolgen. Für das Kernlinienschnittverfahren hinreichend genaue Orientierungsdaten wurden in dieser Anwendung durch interaktive Messung weniger Punkte pro Bild mit anschließender Bündelblockausgleichung bestimmt. Durch das Anbringen weniger codierter Zielmarken ließe sich auch dieser Schritt leicht automatisieren (vgl. Kapitel 3.3). Die automatische Zuordnung aller Punkte in den 18 Bildern nach dem in Abb. 9 gezeigten Schema dauert etwa eine Sekunde (SUN SparcStation Ultra1); eine detaillierte Überprüfung der Resultate ergab 100% korrekte Zuordnungen.

2.6.4. Automatische Generierung von digitalen Geländemodellen

Die merkmalsbasierte Zuordnung von durch einen Interestoperator extrahierten diskreten Punkten stellt die Grundlage eines häufig verwendeten Ansatzes für die Bestimmung von digitalen Geländemodellen dar. Das Programmpaket MATCH-T (Krzystek, 1991) basiert auf diesem Ansatz: In Epipolarbildern werden diskrete Punkte durch eine eindimensionale Implementation des Förstner-Operators (Förstner, 1986) extrahiert und auf Kernlinien (die bei Epipolarbildern den Bildzeilen entsprechen) zugeordnet. Weil ohne Vorgabe guter Näherungswerte die Kernlinien sehr lang werden können und der Interestoperator nur wenige, nicht sehr zuverlässige Merkmale der extrahierten Punkte liefert, ergeben sich bei diesem Ansatz extrem viele Mehrdeutigkeiten, wenn nicht konsequent Pyramidenstrategien angewandt werden. Zusätzlich trägt eine sehr hohe Punktdichte (mehr als 500 000 Punkte in einem Modell) zusammen mit der Anwendung robuster Schätzer unter Annahmen

über die Stetigkeit der Oberfläche (Ackermann, 1994) zur Elimination von aufgrund von Mehrdeutigkeiten entstandenen groben Fehlern bei.

Die in Kapitel 2.2 diskutierten Nachteile des Pyramidenverfahrens werden bei der Generierung von digitalen Geländemodellen zwar eher selten auftreten, können aber keineswegs ausgeschlossen werden. In (Maas, 1996a) wird deshalb gezeigt, daß die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit guter Näherungswerte bei der Generierung von digitalen Geländemodellen durch die konsequente Anwendung von Mehrbildverfahren in der in Kapitel 2.5 gezeigten Vorgehensweise drastisch reduziert werden kann, und daß bei Abbildung jedes Punktes in mindestens sechs Bildern (was z.B. bei einer Befliegung mit 80% Längs- und 60% Querüberdeckung gegeben ist) auf Pyramidenverfahren in der merkmalsbasierten Zuordnung von durch einen Interestoperator extrahierten diskreten Punkten gänzlich verzichtet werden kann. In mehreren praktischen Beispielen (Maas 1996a, Maas 1997) wurden ohne Vorgabe von Näherungswerten, ohne die Anwendung von Pyramidenstrategien, ohne Verwendung robuster Schätzverfahren, ohne Annahmen über die Stetigkeit der Oberfläche und ohne jegliche Nachbearbeitung der Daten auch in gebirgigen Regionen durchweg Fehlerraten kleiner als 0,5% erreicht. Die dabei verwendeten Datensätze mit bis zu 50 Bildern und bis zu 21 Strahlen pro Punkt lassen auch Schlüsse über die Effizienz des von Interestoperatoren zu: In (Maas 1996a) wurde an einem Beispiel hergeleitet, daß die Wahrscheinlichkeit, daß der Förstner-Operator einen Punkt, der in einem Bild detektiert wurde, in einem zweiten Bild ebenfalls detektiert, bei etwa 65% liegt; mit anderen Interestoperatoren wurden noch ungünstigere Werte erreicht. Auch wenn diese Aussage nur für einen spezifischen Datensatz gilt, zeigt sie jedoch eine generelle Limitierung der Anwendung merkmalsbasierter Verfahren.

2.7. Trinokulare Verfahren zur Punktzuordnung in der Literatur

Seit etwa Mitte der 80er Jahre hat sich in der Computer Vision Literatur für Dreikamerasysteme zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Stereozuordnung der Begriff 'trinocular vision' eingebürgert.

Eine erste Implementation des trinokularen Sehens für die Zuordnung diskreter Punkte findet sich in (Yachida, 1986); die Anwendung hinter diesen Arbeiten ist die Generierung eines Tiefenmodells für einen autonomen Roboter durch passive Techniken. Die beschriebene Vorgehensweise (Abb. 16) entspricht im Prinzip der in Kapitel 2.3 gezeigten (Abb. 3); die Implementation ist jedoch bei Yachida sequentiell, so daß Fehler zweiter Art durch verbleibende Mehrdeutigkeiten im Bildtripel nicht detektiert und vermieden werden können. Yachida schlägt zwar eine Erweiterung auf ein 'tetranokulares' Verfahren vor, diskutiert dabei jedoch nur die Vergrößerung des gemeinsamen Gesichtsfeldes durch die Verwendung von vier Kombinationen von je drei Kameras und nutzt nicht die in Kapitel 2.3 gezeigten Möglichkeiten der Lösung verbleibender Mehrdeutigkeiten durch

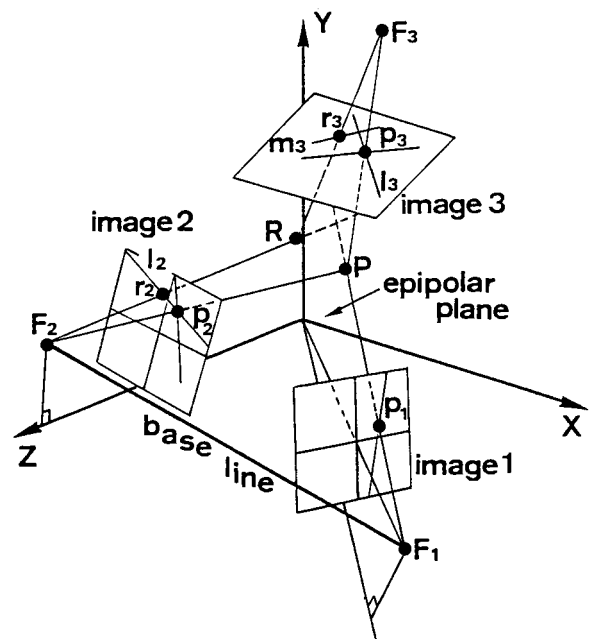


Abb. 16: Prinzip des trinokularen Sehens (Yachida, 1986)

einen zusätzlichen Kernlinienschnitt im vierten Bild (Abb. 4). Yachida zeigt ebenfalls eine Anwendung des trinokularen Prinzips in einem aktiven System mit einem Streifenprojektor und zwei Kameras. Im Gegensatz zu den in Kapitel 5 gezeigten aktiven Verfahren der Oberflächenmeßtechnik mit sequentieller Streifenprojektion handelt es sich hierbei um ein streng simultanes Verfahren, bei dem durch den Streifenprojektor mehrere (im gezeigten Beispiel allerdings nur etwa 15) Streifen gleichzeitig in den Objektraum projiziert werden. Dann werden Punkte P' an Streifenkanten im ersten Bild extrahiert; für diese Punkte werden auf der Kernlinie im zweiten Bild an Streifenkanten Kandidaten P_i'' gefunden; eine Zuordnung ($P' - P_i''$) wird dann akzeptiert, wenn der Schnitt der Kernlinien dieser beiden Punkte im Projektor, dessen innere und äußere Orientierung bekannt sein muß, ebenfalls auf eine Streifenkante fällt. Die Möglichkeit verbleibender Mehrdeutigkeiten bei dieser Vorgehensweise erwähnt Yachida zwar, löst sie jedoch weitgehend durch Annahmen über die Kontinuität im Objektraum.

Eine Anwendung des trinokularen Sehens mit einer Kamera und zwei statischen Streifenprojektoren zeigen (Blake et al., 1990). Mit vier Beobachtungen pro Punkt (zwei Bildkoordinaten der Kamera und je eine Koordinate aus den beiden Streifenprojektoren) ist diese Implementation jedoch nur sehr beschränkt zur Lösung von Mehrdeutigkeiten geeignet und nutzt das Potential des Prinzips bei weitem nicht aus.

Eine quantitative Kosten/Nutzen-Analyse zum trinokularen Ansatz findet sich in (Dhond/Aggarwal, 1991). Dhond/Aggarwal benutzen mit dem Argument der Ermöglichung einer quantitativen Qualitätskontrolle der Resultate synthetische Bildtripel, welche aus realen DTM-Daten unter der Annahme eines Lambert'schen Reflektionsmodells generiert wurden. In diesen Bilddaten extrahieren sie mittels eines Interestoperators diskrete Punkte, welche nur schwache Merkmale aufweisen. Anhand der Zuordnung dieser Punkte in einem binokularen und einem trinokularen Ansatz wird die Anzahl grober Fehler aus dem Vergleich der rekonstruierten Punkte mit dem vorgegebenen DTM ermittelt. Dhond/Aggarwal kommen zu dem Schluß, daß sich im trinokularen Ansatz die Anzahl grober Fehler um mehr als 50% gegenüber dem binokularen Ansatz verringert, während die Rechenzeit um 25% zunimmt. Untersuchungen dieser Art sollten allerdings keinesfalls verallgemeinert werden, wenn sie nur auf synthetischen Daten beruhen, zumal bei Dhond/Aggarwal der Einfluß des Interestoperators (vgl. Kapitel 2.6.4) nicht untersucht wurde und die Anzahl grober Fehler in beiden Ansätzen erstaunlich hoch ist.

Eine andere Formulierung des trinokularen Prinzips zeigen (Stewart/Dyer, 1988) für eine Anordnung dreier Kameras mit rechtwinkligen, gleich langen Basen und senkrecht zu den Basen orientierten Kameraachsen: Anstatt einen expliziten Kernlinienschnitt im dritten Bild zu berechnen, stellen Stewart/Dyer neben der binokularen Bedingung der Kernlinie noch eine trinokulare Bedingung auf, die sich als Forderung gleich großer Parallaxen für Kandidaten im zweiten und dritten Bild formulieren läßt. Ausgehend von einem Punkt im ersten Bild werden Parallaxen für alle Kandidaten auf den Kernlinien im

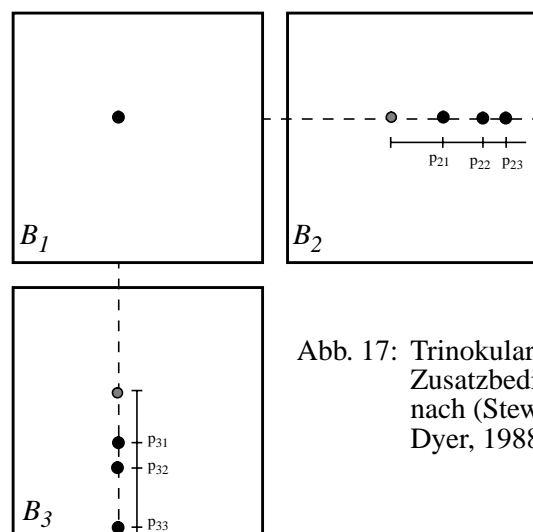


Abb. 17: Trinokulare Zusatzbedingung nach (Stewart/Dyer, 1988)

zweiten und dritten Bild berechnet; Punktripel mit gleicher Parallaxe (in Abb. 17: p_{21} - p_{31}) werden als korrekte Zuordnung akzeptiert. Die Darstellung ist gleichwertig mit der Formulierung des Kernlinienschnitts (vgl. Abb. 3 und Yachida, 1986) und läßt sich bei entsprechender Projektion der Parallaxen auch auf allgemeine trinokulare Anordnungen anwenden.

Eine der in Kapitel 2.3 gezeigten Vorgehensweise ähnliche Eindeutigkeitsprüfung wird auch in (Kearney, 1991) gezeigt. Kearney beschränkt sich auf die Darstellung eines Algorithmus zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zweibildzuordnung ohne konkrete Anwendung, bezieht sich aber zu Zwecken der Veranschaulichung auf die Zuordnung von Partikeln als Minimalobjekte mit einer Größe nahe der Auflösungsgrenze der Kamera und ohne weitere Merkmale, welche ohne kontinuierliche Oberfläche beliebig im Raum verteilt sein können (vgl. Kapitel 2.6.1). Er zeigt ebenfalls ein Beispiel für eine im Dreikamerasystem nicht auflösbare Mehrdeutigkeit, die zur Herstellung real nicht existierender 'Phantompartikel' führen kann. Solche Fehler zweiter Art werden durch eine iterative Vorgehensweise vermieden, welche sicherstellt, daß jeder Bildpunkt nur in einem konsistenten Tripel enthalten ist; anderenfalls werden die beteiligten Tripel - unter Inkaufnahme von Fehlern erster Art - verworfen. Dieses Prinzip entspricht der Implementation in (Maas, 1992a), wobei dort allerdings statt einer iterativen Vorgehensweise ein kombinatorischer Ansatz gewählt wurde.

2.8. Zuordnungsverfahren für linienförmige Elemente

Entsprechend der Anwendung auf diskrete Punkte lassen sich trinokulare und multiokulare Verfahren auch für die Zuordnung von linienförmigen Elementen formulieren. Geht man dabei davon aus, daß zuzuordnende Linien in komplexen Szenen im Allgemeinen nicht in allen Bildern komplett extrahiert werden können (d.h. daß insbesondere keine identischen Anfangs- und Endpunkte vorliegen), so stellt sich zunächst das Problem der Definition der Kernlinie. Diese kann entweder für einen beliebigen Punkt auf einer extrahierten Linie (z.B. den Mittelpunkt) berechnet werden oder durch ein aus den Kernlinien der beiden Endpunkte der Linie gebildetes breites Kernlinienband ersetzt werden, wobei die Länge des Suchbereichs gegebenenfalls wiederum durch Vorwissen über die Tiefenausdehnung im Objektraum beschränkt werden kann. In beiden Fällen werden bei der binokularen Zuordnung durch Prüfung auf Schnitte der Kernlinie mit Linien im zweiten Bild bzw. durch Prüfung auf die Existenz extrahierter Linien im Kernlinienband sehr viele Mehrdeutigkeiten entstehen. Wird dann analog zu der Vorgehensweise in Kapitel 2.3 nur die Existenz eines Objektes am Ort eines Kernlinienschnittes bzw. in der Schnittfläche der Kernlinienbänder im dritten Bild geprüft, so wird das Verfahren nur bei Anwendungen mit wenigen zuzuordnenden Elementen befriedigende Resultate liefern.

Als zusätzliches Merkmal für die Zuordnung von linienförmigen Elementen bieten sich jedoch Linienparametrisierungen an. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich hauptsächlich auf die Zuordnung von Geradensegmenten als einfachstem und am häufigsten verwendeten linienförmigen Element. Als zusätzliches geometrisches Zuordnungskriterium bietet sich bei Geradensegmenten die Verifikation von Linienparametrisierungen in Form der Orientierung der Geradensegmente im Bildraum an. Während dieses Merkmal aufgrund der Parametrisierung einer Geraden durch zwei Parameter im Bildraum und vier Parameter im Objektraum bei der binokularen Zuordnung mangels Redundanz wertlos ist (vgl. Kap. 3.4), kann es in trinokularen Verfahren durch die Projektion einer

aus einem hypothetischen Kandidatenpaar berechneten Orientierung im Objektraum ins dritte Bild eine wertvolle Hilfe zur Verifikation oder Zurückweisung möglicher Zuordnungen darstellen.

2.8.1. Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung von Geradensegmenten

Die Betrachtungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten und der optimalen Kameraanordnung analog zu den Betrachtungen in Kapitel 2.2 - 2.4 werden im Falle linienförmiger Elemente wesentlich komplexer. Neben den in Kapitel 2.2 genannten Eingangsparametern (Anzahl Elemente, Basiskonfiguration, Tiefenausdehnung im Objektraum und Meßgenauigkeit, vgl. Gleichungen (3)-(5)) gehen hier auch die durchschnittliche Länge der Liniensegmente, die Längenverteilung und die Orientierung der Liniensegmente relativ zur Orientierung der Basiskomponenten ein. Eine geschlossene quantitative Formulierung für die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung kann deshalb nur für anwendungsspezifische Sonderfälle aufgestellt werden. Qualitativ ergeben sich folgende Zusammenhänge:

- Lange Liniensegmente bewirken eine größere Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung im zweiten Bild, erlauben aber andererseits eine höhere Genauigkeit für die ins dritte Bild prädierten Linienparameter; kurze Liniensegmente bewirken weniger Mehrdeutigkeiten auf der Kernlinie, erlauben aber eine weniger genaue Prädiktion im dritten Bild. Da sowohl die Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung im zweiten Bild wie auch die Verbesserung der Prädiktion der Linienparameter im dritten Bild etwa linear mit der Länge der Liniensegmente eingehen, heben sich diese Effekte weitgehend auf. Dabei ist allerdings auch zu beachten, daß einerseits lange Liniensegmente durch zusätzliche Merkmale zuverlässiger charakterisiert werden können, was die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten reduziert; andererseits werden die Orientierungen von Liniensegmenten in stark strukturierten Umgebungen häufig gewisse Vorzugsrichtungen aufweisen, was den Wert von genau prädierten Linienparametern langer Liniensegmente als Zuordnungskriterium wiederum schmälert.
- Bei der Orientierung von Liniensegmenten bewirken senkrecht zur Kernlinie orientierte Segmente eine höhere Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten auf der Kernlinie im zweiten Bild; parallel zur Kernlinie orientierte Liniensegmente bewirken weniger Mehrdeutigkeiten im zweiten Bild, erfahren aber im dritten Bild eine geringere Lösbarkeit von Mehrdeutigkeiten, indem nur einer der beiden prädierten Linienparameter nutzbar ist. Auch hier heben sich die Effekte also teilweise auf.
- Zu berücksichtigen ist gegebenenfalls auch die Objektivverzeichnung, welche bewirkt wird, daß lange Objektgeraden im Bild gar nicht als gerade Linien abgebildet werden, sodaß zusätzliche Anforderungen an die Techniken zur Detektion von Liniensegmenten zu stellen sind; eventuell empfiehlt sich sogar ein Resampling der Bilder zur Vorkorrektur einer bekannten Objektivverzeichnung.

2.8.2. Trinokulare Zuordnung von Kanten in der Robotik

Eine erste Anwendung des Prinzips des trinokularen Sehens auf Liniensegmente findet sich bei (Ayache/Lustman, 1987). Zuordnungen werden hier durch den Schnitt der Kernlinie des Mittelpunktes einer Linie in einem Bild mit Liniensegmenten im zweiten Bild und Verifikation der sich so ergebenden hypothetischen Zuordnungen durch Kernlinienschnitt im dritten Bild bestimmt (vgl. Abb. 18), wobei Merkmale der Liniensegmente wie Länge oder Orientierung als zusätzliche Zuordnungskriterien eingehen. Ayache/Lustman geben für diesen Prozeß eine Fehlerrate von 10% an,

welche durch eine nachträgliche Filterung der Zuordnungen anhand der Forderung nach lokaler Kompatibilität auf 1% reduziert wird. Einen weitgehend identischen Ansatz zeigen auch (Yokoi et al., 1988).

Eine Anwendung des trinokularen Zuordnungsverfahrens auf durch den Sobel-Operator generierte Kantenbilder zeigen (Kitamura/Yachida, 1990). Allerdings werden dabei keine expliziten Kanten extrahiert, sondern es wird versucht, die einzelnen Pixel der Kantenbilder als Einzelpunkte zuzuordnen. Kitamura/Yachida erwähnen die Existenz verbleibender Mehrdeutigkeiten im Dreikamerasystem und geben eine Formel für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher Mehrdeutigkeiten an. Die gezeigte Vorgehensweise ist jedoch wie auch diejenige bei (Yachida, 1986) sequentiell, so daß Fehler zweiter Art durch verbleibende Mehrdeutigkeiten im Bildtripel nicht vermieden werden. Die gezeigten Resultate einer praktischen Anwendung weisen eine recht hohe Fehlerrate auf, was aufgrund der unterlassenen Eindeutigkeitsprüfung für konsistente Tripel und der großen Anzahl von Kantenpixeln ohne Nutzung der Nachbarschaft auch zu erwarten ist.

Die Erweiterung des trinokularen Zuordnungsverfahrens auf Linien wird auch in (Kearney, 1991) diskutiert. Kearney geht dabei allerdings davon aus, daß die zuzuordnenden Linien in beiden Bildern komplett extrahiert wurden und arbeitet dementsprechend mit Anfangs- und Endpunkt der Linien, wodurch er eine weitere Zusatzbedingung für die Zuordnung erhält, indem Paare von konsistenten Tripeln in allen Bildern dieselbe Topologie aufweisen müssen. Eine ähnliche Vorgehensweise, welche ebenfalls von den Endpunkten extrahierter Liniensegmente ausgeht, wird auch bei (Weckeresser et al., 1995) zur Unterstützung der Navigation eines autonomen Roboters gezeigt. Die Zuordnung von Anfangs- und Endpunkten bedingt allerdings eine vollständige Extraktion von Linien; dasselbe gilt für die Zuordnung von Mittelpunkten von Linien.

Diese Forderung nach vollständiger Extraktion von Linien ist in der Praxis in vielen Anwendungen als unrealistisch zu betrachten. Eine entsprechende Implementation, welche von einer unvollständigen Extraktion linienförmiger Elemente ausgeht, zeigt (Faugeras, 1993) basierend auf den Arbeiten von (Ayache/Lustman, 1987). Ausgehend von einer vorliegenden unvollständigen Segmentierung eines Bildtripels mit bekannter Orientierung in Liniensegmente und einer Anordnung der Projektionszentren in einem Dreieck zeigt Faugeras eine ebenfalls dem in Kapitel 2.3 gezeigten Verfahren entsprechende Vorgehensweise:

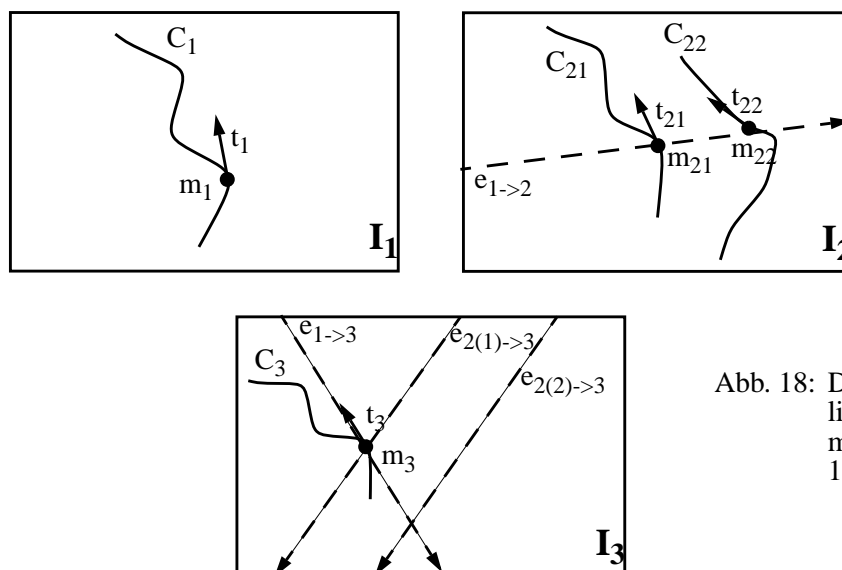


Abb. 18: Dreibildzuordnung linienförmiger Elemente (nach Faugeras, 1993)

Ausgehend von einem beliebig gewählten Punkt m_1 wird auf einem im Bild I_1 extrahierten Kurvensegment C_1 auf der Kernlinie $e_{1 \rightarrow 2}$ im Bild I_2 nach Schnitten mit den dort extrahierten Kurvensegmenten gesucht. Für alle so gefundenen Kandidaten C_{2i} wird die Kernlinie $e_{2(i) \rightarrow 3}$ von I_2 nach I_3 berechnet und mit der Kernlinie $e_{1 \rightarrow 3}$ von I_1 nach I_3 geschnitten. Somit ergibt sich im Bild I_3 eine Verifikation möglicher Zuordnungen über konsistente Tripel von Kurvenpunkten. Aufgrund der Vorgehensweise über einen beliebig gewählten Punkt auf C_1 müssen die in den drei Bildern extrahierten Kurvensegmenten nicht notwendigerweise vollständig vorliegen und müssen insbesondere keine identischen Anfangs- und Endpunkte aufweisen. Allerdings kann dies ohne die Definition einer weitergehenden Suchstrategie prinzipiell mögliche Zuordnungen verhindern, wenn der Punkt auf C_1 in einem Bereich ausgewählt wurde, in dem C_2 oder C_3 Lücken aufweisen. Auch die Parametrisierung auf den extrahierten Kurvensegmenten im Bildraum wird nicht angesprochen. Die in (Faugeras, 1993) gezeigten Ergebnisse mehrerer Szenen stellen noch ziemlich unvollständige Rekonstruktionen dar; auch zeigt sich, daß sich die Anzahl korrekter Zuordnungen signifikant vergrößert, wenn zusätzliche Information über die extrahierten Linienelemente (wie Tangentenrichtung und lokale Krümmung, welche freilich auch von der räumlichen Ausrichtung des Kurvensegments im Objektraum abhängen) zur Stützung der Zuordnung verwendet wird.

Einen globalen Ansatz zur Herstellung der Korrespondenzen zwischen extrahierten Kantenelementen in einem Bildtripel - im Gegensatz zu den in den meisten Publikationen zum trinokularen Sehen gezeigten sequentiellen Vorgehensweisen - zeigen (Yang/Illingworth, 1992): In einem ersten Schritt werden ohne Berücksichtigung der Orientierung im Bildraum alle möglichen Zuordnungen zwischen Liniensegmenten in drei Bildern hergestellt; diese Zuordnungen werden dann über eine auf der Konsistenz der Orientierungen der Liniensegmente in den drei Bildern basierende Kostenfunktion bewertet, welche in einem Optimierungsverfahren minimiert wird. Auf diese Weise wird zugleich auch die Konsistenz der Zuordnungen sichergestellt und grobe Fehler durch verbleibende Mehrdeutigkeiten werden vermieden, was bei der streng sequentiellen Vorgehensweise nicht der Fall ist.

Ein Dreikamerasystem zur Zuordnung von Kantensegmenten bei Anwendungen in einem intelligenten System zur Analyse des Straßenverkehrs in einem fahrenden Fahrzeug zeigen (Bergendahl et al., 1996). Sie verwenden eine symmetrische kollineare Anordnung von drei Kameras mit horizontaler Basis und beschränken sich auf die Extraktion von annähernd vertikalen Kanten, wobei das mittlere Bild zur Verifikation möglicher Zuordnungen zwischen den beiden äußeren Bildern dient. Um bei dem aufgrund der Montage in einem Fahrzeug prinzipiell ungünstigen Basis-Höhen-Verhältnis noch eine akzeptable Tiefengenauigkeit zu erzielen, wird Wert auf eine subpixelgenaue Kantenmessung gelegt, was bei einigen der im Vorigen beschriebenen Systemen auf autonomen Robotern aus Rechenzeitgründen vermieden wurde. Bergendahl et al. erwähnen die Empfindlichkeit ihres Systems auf periodische vertikale Muster, welche aufgrund der fehlenden Konsistenzprüfung zu groben Fehlern führt und die Schwäche eines Dreikamerasystems bei der Verwendung linienförmiger Merkmale mit annähernd gleicher Orientierung zeigt.

Überraschenderweise beschränken sich alle in der autonomen Robotik gezeigten Mehrbildverfahren zur Zuordnung von Kantensegmenten auf die Verwendung von drei Bildern, eine Erweiterung auf vier oder mehr Bilder analog zu den in Kapitel 2.3 und 2.5 gezeigten Ansätzen wird nirgendwo diskutiert. Das Argument, daß die Akquisition von Bildtripeln durch die Verwendung von drei monochromen CCD Kameras an einem RGB-framegrabber hardwaremäßig ideal unterstützt wird,

erscheint dabei wenig überzeugend. Eine Erweiterung auf mehr als drei Kameras bietet sich gerade bei der Zuordnung von linienförmigen Elementen aus mehreren Gründen an:

- Die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten wird bei der Zuordnung linienförmiger Elemente - je nach Länge und Orientierung der Elemente - meist deutlich größer sein als bei Zuordnung diskreter Punkte. Durch weitere Kernlinienschnitte und Verifikationen in zusätzlichen Bildern läßt sich diese Wahrscheinlichkeit auch hier deutlich reduzieren.
- Bei linienförmigen Elementen werden schleifende Schnitte der Kernlinien mit segmentierten Kurvenstücken nicht immer zu vermeiden sein. Bei nicht-kollinearer Anordnung von mehr als drei Kameras kann sichergestellt werden, daß für jeden Kurvenpunkt genügend Bilder nutzbar sind. Hierzu werden vier der Projektionszentren idealerweise wie in Abb. 4 gezeigt in einem Quadrat senkrecht zur Hauptblickrichtung angeordnet.
- Da Verfahren zur Linienextraktion häufig unvollständige Darstellungen liefern werden, besteht bei Verwendung von mehreren Bildern eine größere Wahrscheinlichkeit der kompletten 3-D Rekonstruktion von Linien.

2.8.3. Multiokulare Linienzuordnung bei der Hausrekonstruktion

Unter denselben Aspekten der Lösung von Mehrdeutigkeiten und der Vollständigkeit der Repräsentation spielt die Verfügbarkeit von mehr als zwei Bildern auch eine entscheidende Rolle bei dem in (Bignone et al., 1996) gezeigten Ansatz zur Rekonstruktion von Hausdächern aus Luftbildern. Der Ansatz stellt eine Mischung aus merkmals- und flächenbasierten Zuordnungsverfahren dar, indem eine Kante nur in einem Referenzbild (vorzugsweise einem nadirnahen Bild) explizit extrahiert wird und in den anderen Bildern durch die Optimierung eines zweiparametrischen flächenbasierten Kantenmaßes zugeordnet wird. Dieses Kantenmaß ergibt sich ähnlich zur Vorgehensweise bei der Hough-Transformation durch Resampling an diskreten Positionen entlang der Kernlinie des Mittelpunktes der extrahierten Kante unter ebenfalls über einen vorgegebenen Bereich diskret variierten Orientierungen (Bignone, 1995); es bildet ein scharfes Maximum und ist im Gegensatz zu explizit extrahierten Kanten robust gegen teilweise Verdeckungen der Kanten im Bild, solange die Kante im Referenzbild komplett extrahiert wurde. Kritisch ist dabei anzumerken, daß der Ansatz aufgrund der Kantenextraktion in einem Referenzbild asymmetrisch ist, und daß das implementierte Kantenmaß eine stark zentrumsbetonte Gewichtung

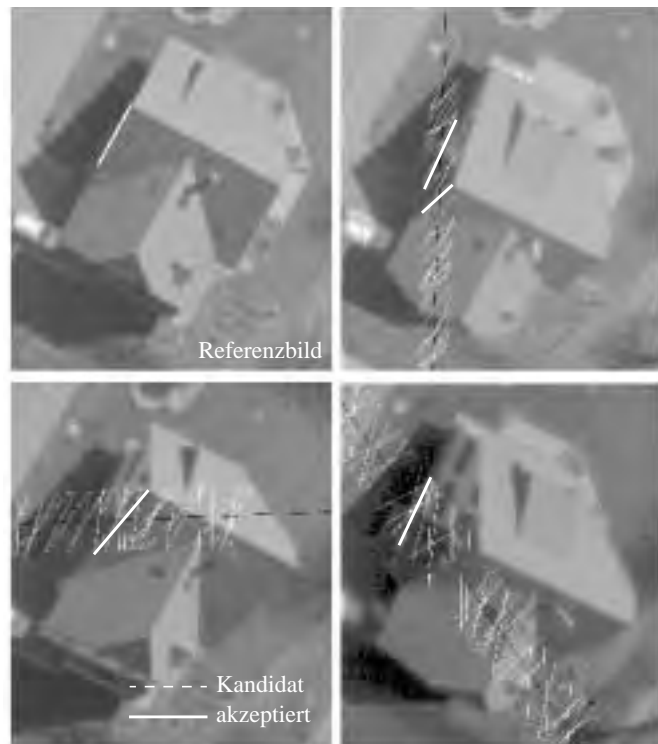


Abb. 19: Explizit extrahierte Kante im Referenzbild, Kandidaten für die Zuordnung auf den Kernlinien vor und nach Konsistenzprüfung mit korrekterweise zwei akzeptierten Zuordnungen (Bignone, 1995)

beinhaltet. Desweiteren ist der Rechenaufwand bei pixelweiser Abtastung langer Kernlinien in vielen Bildern über einen großen Orientierungswinkelbereich extrem hoch.

Näherungswerte werden bei dem Ansatz interaktiv durch Definition von Bildausschnitten in allen Bildern oder durch Definition eines Bildausschnittes im Referenzbild und Nutzung eines digitalen Geländemodells vorgegeben. Im Fall von - für die Hausrekonstruktion typischen - parallelen Strukturen wird das Kantenmaß dennoch häufig mehrere Maxima aufweisen. Durch bildpaarweise Konsistenzprüfungen bei Verwendung von mehr als zwei Bildern (in dem bei Bignone gezeigten Beispiel werden vier Bilder verwendet, vgl. Abb. 19) lassen sich diese Mehrdeutigkeiten jedoch deutlich reduzieren. Eine weitere Reduktion ergibt sich durch die zusätzliche Verwendung photometrischer und chromatischer Attribute für die Zuordnung. Aus den Parametern der explizit extrahierten Kante im Referenzbild sowie den Positions- und Orientierungsparametern für das konsistente Maximum des Kantenmaßes auf der Kernlinie lassen sich dann dreidimensionale Kanten bilden, die anschließend zu Dachteilen gruppiert werden. Im Gegensatz zu interaktiven Ansätzen zur Hausrekonstruktion wie z.B. dem 'One-eye Stereo System' (Lang/Förstner, 1996), welche Mehrbildverbände lediglich zur Vervollständigung der Repräsentation im Sinne einer Reduktion von Lücken im Datensatz bei Verdeckungen in einem Bildpaar verwenden, wird hier also die Mehrbildgeometrie aktiv zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung im Zuge der automatischen Rekonstruktion genutzt.

2.9. Flächenbasierte Zuordnungsverfahren

Im Gegensatz zu merkmalsbasierten Verfahren, bei denen in einem Vorverarbeitungsschritt extrahierte punkt-, linien oder seltener auch flächenhafte Merkmale zugeordnet werden, werden bei flächenhaften Zuordnungsverfahren Bildregionen anhand einer direkt auf den Grauwerten des Bildes (oder eines Gradientenbildes) basierenden Kostenfunktion zugeordnet. Flächenhafte Zuordnungsverfahren gelten für die meisten Anwendungen im Vergleich zu merkmalsbasierte Verfahren als genauer und zuverlässiger; dem gegenüber steht als Nachteil ein im Allgemeinen kleinerer Konvergenzbe- reich sowie bei vielen Ansätzen Glättungseffekte an Objektdiskontinuitäten.

2.9.1. Einfache Korrelationsverfahren

Die Maximierung eines Ähnlichkeitsmaßes zwischen einem fest gewählten Fenster in einem Bild und einem über einen bestimmten zweidimensionalen Suchbereich bewegten Fenster in einem zweiten Bild kann als das einfachste flächenhafte Korrelationsverfahren zur Herstellung von Korrespondenzen angesehen werden. Eine Übersicht und vergleichende Studie über 19 Korrelationsalgorithmen mit unterschiedlichen Ähnlichkeitsmaßen findet sich beispielsweise in (Aschwanden/Guggenbühl, 1992). Bei Kenntnis der Orientierungsparameter kann auch hier der Suchbereich durch Zwang auf die Kernlinie auf eine Linie reduziert werden.

Eine Erweiterung eines solchen Korrelationsverfahrens zu einem Mehrbildverfahren zeigt (Tsai, 1983). Als zu optimierendes Ähnlichkeitsmaß verwendet Tsai normalisierte Momente oder die Varianz über ein Fenster. Der Algorithmus geht von einem festgehaltenen Punkt im ersten Bild aus und berechnet bei der Verschiebung über den Suchbereich im zweiten Bild für jeden Schritt die Kernlinienschnitte in allen weiteren Bildern. Aus den sich so ergebenden Positionen in allen Bildern wird dann ein gemeinsames Ähnlichkeitsmaß berechnet. Tsai zeigt anhand von Simulationen, daß

bei dieser Vorgehensweise das Ähnlichkeitsmaß ein schärferes Maximum zeigt und daß die Zuverlässigkeit gesteigert wird. Er konzentriert sich im Wesentlichen auf Aspekte der Genauigkeit und Rauschabhängigkeit, zeigt jedoch keine Strategien für die Bestimmung von Näherungswerten und die Handhabung von multiplen Lösungen. Auch werden keine Resultate aus praktischen Anwendungen gegeben.

Eine ähnliche Vorgehensweise mit trinokularer Anordnung zeigen (Ito/Ishii, 1986). Ausgehend von einem Kantenpunkt in einem Referenzbild werden über ein flächenhaftes Korrelationsmaß Kandidaten im zweiten Bild gesucht. Für alle Kandidaten wird dann auf dem Kernlinienschnitt im dritten Bild das Korrelationsmaß zwischen dem entsprechenden Punkt und dem Punkt im ersten Bild gerechnet und die Zuordnung mit dem besten Maß akzeptiert.

2.9.2. Least Squares Matching

Kleinste-Quadrate-Korrelation (Least Squares Matching) ist ein flächenhaftes Korrelationsverfahren, welches häufig von Photogrammetern zur Herstellung von Korrespondenzen zwischen Bildregionen oder zur Bestimmung der Bildkoordinaten signalisierter Punkte angewandt wird (Förstner 1984, Grün 1985b). Das Grundprinzip des Least Squares Matching liegt in der Minimierung der Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen zwischen zwei 'Patches' $g_1(x, y)$, $g_2(x, y)$ wählbarer Größe in zwei Bildern oder in einem Bild und einem künstlichen 'Template'. Für die geometrische Transformation zwischen g_1 und g_2 wird üblicherweise eine Affintransformation angesetzt; dabei sind aus photogrammetrischer Sicht für die Parallaxenmessung bzw. die Bildkoordinatenbestimmung letztlich nur die Verschiebungsparameter von Interesse, die Maßstabs-, Rotations- und Scherungsparameter der Affintransformation dienen lediglich zur besseren Anpassung der Bildregionen an die Abbildungsbedingungen. Die sechs Transformationsparameter der Affintransformation werden durch die Minimierung der Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen im Gauss-Markov Modell geschätzt. Neben den Parametern selbst erhält man dabei aus der Kovarianzmatrix auch Informationen über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Durch statistische Tests und eine geeignete Eliminationsstrategie (welche in photogrammetrischen Anwendungen die Verschiebungsparameter bevorzugen wird) können nicht-signifikante Parameter, welche aufgrund hoher Korrelationen die Interpretierbarkeit des Lösungsvektors einschränken können, eliminiert werden. Das Verfahren wird damit zum adaptiven Verfahren (Grün 1985b). Bei ausreichender Textur im Patch mit bandbreitenbegrenztem Signal und genügend guten Näherungswerten, welche - als Faustformel - um weniger als die halbe Patchgröße von der Lösung abweichen sollten, wird Konvergenz innerhalb weniger Iterationen erzielt. Zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens bei Bilddaten mit unterschiedlichen radiometrischen Eigenschaften (z.B. aufgrund von Beleuchtungs- oder Reflektionseinflüssen) kann das Modell optional noch um radiometrische Parameter erweitert werden. In praktischen Implementationen beschränkt sich diese Erweiterung üblicherweise auf die Ansatz eines additiven und eines multiplikativen Parameters für jedes Patch, welche aus Gründen der Stabilität oft nicht simultan mit den Parametern der Affintransformation bestimmt, sondern vorgängig oder zwischen den Iterationen angeglichen werden.

Bei gegebener äußerer und innerer Orientierung ergibt sich analog zur Zuordnung diskreter Punkte (Kapitel 2.1) ein Zwang der Lösung auf die Kernlinie, welcher als geometrische Zusatzbedingung in die Ausgleichung einbezogen werden kann und zu einer simultanen Lösung von Zuordnung und Objektkoordinatenbestimmung führt (Grün/Baltsavias, 1985). Durch den Ansatz eines Gewichts

kann die Zusatzbedingung an die Meßgenauigkeit und die Genauigkeit der Orientierungsparameter angepaßt werden. In (Baltsavias, 1991) werden zwei verschiedene Ansätze für die praktische Implementation des Zwangs auf die Kernlinie diskutiert: In einer Version 'XYZ' werden die Bildkoordinaten eines Punktes in einem Referenzbild festgehalten und die Objektkoordinaten ergeben sich durch Matching auf dem ins andere Bild abgebildeten Projektionsstrahl. In einer Version 'Z' werden die Lagekoordinaten eines Objektpunktes festgehalten und die Höhe des Punktes ergibt sich durch Matching in beiden Bildern unter Zwang der Projektion der Objektvertikalen des Punktes ins jeweilige Bild; diese Variante ist von Interesse für die Bestimmung von digitalen Geländemodellen auf einem regelmäßigen Objektraster. Entsprechend können auch Höhenlinien durch Festhalten der Höhenkoordinate von Punkten extrahiert werden. Durch Einbezug eines künstlichen Templates (beispielsweise einer Kante) ins Matching kann auch eine symmetrische Version 'XYZ' mit integrierter 3-D Merkmalsextraktion realisiert werden, bei der kein Bild als Referenzbild dient (Grün/Stallmann, 1991).

Ebenfalls in (Grün, 1985b) wird eine Erweiterung des Verfahrens auf eine beliebige Anzahl von Bildern (MPGC - Multiphoto geometrically constrained matching) gezeigt. Während diese Erweiterung ohne geometrische Zusatzbedingungen nur vergleichsweise geringfügige Verbesserungen mit sich bringt, sorgt sie im Zusammenhang mit dem Zwang der Lösung auf die Kernlinie zu einer entscheidenden Verbesserung des Konvergenzverhaltens, indem im Fall von multiplen Lösungen bei hochfrequenten repetitiven Mustern im Bildraum auch im Fall schlechter Näherungswerte eine eindeutige Lösung gefunden wird. Neben dem Zwang auf die Kernlinie, welcher Nebenmaxima seitlich der Kernlinie ausschließt, ergibt sich durch die Einbeziehung der Punktbestimmung in das Matchingverfahren in Analogie zu Kapitel 2.4 (Abb. 5) und Kapitel 2.7 (Abb. 17) auch ein funktionaler Bezug zwischen den Verschiebungsparametern entlang der Kernlinie in allen Bildern, was auch die Wahrscheinlichkeit von multiplen Lösungen auf der Kernlinie stark reduziert. Praktische Beispiele dazu werden in (Grün/Baltsavias, 1988) und (Baltsavias, 1991) gezeigt. Sonderfälle, bei denen aufgrund unglücklicher Konstellationen der Näherungswerte in den einzelnen Bildern keine Konvergenz erzielt wird, werden in (Baltsavias, 1991) diskutiert; durch die Analyse der Transformationsparameter und ihrer Kovarianzmatrix können solche Fälle jedoch erkannt und eliminiert werden. Das MPGC-Verfahren bietet somit lokal den in Kapitel 2.3 - 2.5 gezeigten Ansätzen für die Zuordnung diskreter Punkte vergleichbare Möglichkeiten der Lösung von Mehrdeutigkeiten. Allerdings weist es nicht dieselbe Unabhängigkeit von den Näherungswerten auf, wie sie bei der Zuordnung diskreter Punkte im Kernlinienschnittverfahren gegeben ist: Die Näherungswerte müssen beim MPGC im Konvergenzberich liegen (welcher je nach gewählter Patchgröße wenige Pixel groß sein wird) und gegebenenfalls durch Pyramidenstrategien sukzessive verbessert werden, während die in Kapitel 2.3 - 2.5 gezeigten merkmalsbasierten Ansätze wesentlich geringere Anforderungen an die Güte der Näherungswerte stellen bzw. sogar ganz ohne Näherungswerte auskommen können. Andererseits bietet MPGC gegenüber merkmalsbasierten Ansätzen Vorteile bei Bildern mit natürlicher Textur, weil die in Kapitel 2.6.4 diskutierten Probleme mit Interestoperatoren weitgehend wegfallen. Neben der Lösung von Mehrdeutigkeiten liegt ein weiteres Potential des Mehrbildansatzes im MPGC in der Steigerung der Zuverlässigkeit durch den Ansatz adaptiver Gewichtsfunktionen vor allem im Hinblick auf Verdeckungen in einzelnen Bildern aus Verbänden von mindestens drei Bildern. Diese Robustheit gegenüber Verdeckungen wird z.B. in einem modifizierten MPGC-Algorithmus zur semi-automatischen Extraktion linearer Merkmale durch 3-D LSB-Snakes mit Anwen-

dungen in der Extraktion von Straßen aus Luftbildern genutzt und an einem Beispiel anschaulich demonstriert (Grün/Li, 1996).

2.9.3. Zuordnung im Objektraum

Ein globaler flächenbasierter Ansatz zur Rekonstruktion im Objektraum, welcher eine Integration der Bildzuordnung, der Ableitung von Oberflächenmodellen sowie der Bestimmung von Orientierungs- und eventuell auch Kalibrierungsparametern darstellt, wurde etwa gleichzeitig von (Wrobel, 1987), (Ebner et al., 1987) und (Helava, 1988) vorgestellt. Der Ansatz beruht auf der Beschreibung der Oberfläche eines Objekts durch ein geometrisches Modell in Form von verknüpften Oberflächenmaschen und durch ein radiometrisches Modell, für welches (Ebner et al., 1987) Oberflächenelemente definieren, deren Größe etwa der in den Objektraum projizierten Pixelgröße der Bilddaten entspricht. Der Mittelpunkt jedes Oberflächenelements des radiometrischen Oberflächenmodells wird über die Kollinearitätsbedingung in den Bildraum projiziert, wo durch Resampling der entsprechende Grauwert erhalten wird. In der Beobachtungsgleichung wird dieser Grauwert als Funktion der Höhen der Eckpunkte der entsprechenden Oberflächenmasche, des Grauwerts des Oberflächenelements (also eines Grauwerts in einem simultan bestimmten Orthophoto), der Orientierungsparameter und eventuell noch weiterer radiometrischer Parameter für jedes Bild zur Kompensation von unterschiedlichen Abbildungs- oder Beleuchtungsbedingungen oder von Abweichungen vom Modell der Lambert'schen Reflektion ausgedrückt. In (Wrobel, 1987) wird das Resampling im Bild vermieden, indem die Oberflächenelemente des radiometrischen Modells durch größere Maschen auf der Objektoberfläche (welche jedoch kleiner sind als die Maschen des geometrischen Oberflächenmodells) ersetzt werden; die Maschen des radiometrischen Modells werden unter Annahme von Stetigkeit durch Polynome approximiert, deren Koeffizienten simultan mit den o.g. geometrischen und radiometrischen Parametern bestimmt werden.

Die Lösung des sich so ergebenden Systems erfolgt iterativ, Näherungswerte werden auch hier sukzessive durch Pyramidenverfahren im Bild- und Objektraum beschafft. Der Zwang auf die Kernlinie ergibt sich dabei implizit durch die Kollinearitätsbedingung. Der objektbasierte Ansatz weist Symmetrie auf für eine beliebige Anzahl von Bildern und eine beliebige Anzahl von Spektralkanälen. Zur Überbrückung texturarmer Regionen können zusätzliche Glattheitsbedingungen eingeführt werden.

Die Effekte des Übergangs von einem Bildpaar auf ein Bildtripel auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit werden in (Holm, 1994) anhand von monochromen Daten einer Hochbefliegung untersucht; die Unterschiede zwischen den beiden Konfigurationen sind im gezeigten Beispiel nicht signifikant, was möglicherweise auf die Glätte und die gute Textur des gewählten Geländeausschnittes zurückzuführen ist. Systematischere Betrachtungen hinsichtlich der Empfindlichkeit auf hochfrequente repetitive Muster, des theoretischen und praktischen Gewinns an Zuverlässigkeit und Genauigkeit durch die Verwendung von Mehrbildver-

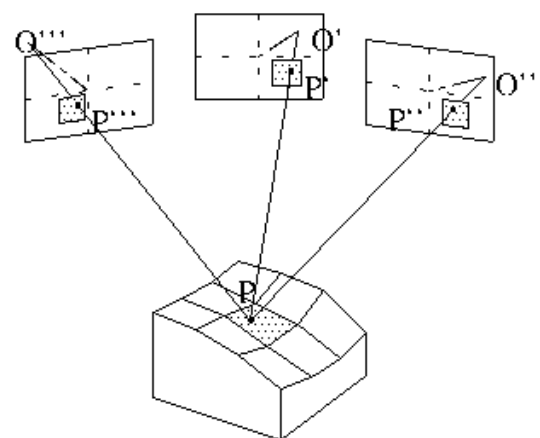


Abb. 20: Transformation Objekt -> Bildtripel (Holm, 1994)

bänden mit verschiedenen Basiskonfigurationen sowie des Effekts von starken Objektdiskontinuitäten stehen jedoch noch aus.

Eine Adaption des Ansatzes auf die Geometrie von Dreizeilenkameras (vgl. Kapitel 6) zeigen (Diehl/Heipke, 1992) anhand eines Beispiels mit simulierten Daten; im Gegensatz zur allgemeinen Formulierung wurden dabei die Orientierungsdaten der Dreizeilenkamera allerdings als gegeben angenommen. Die Ergebnisse zeigen, daß das Verfahren zwar eine geringe Empfindlichkeit gegen radiometrisches Rauschen im Bild aufweist, aber sehr empfindlich auf Fehler der Orientierungsparameter reagiert. Eine Anwendung mit echten Daten der MEOSS-Dreizeilenkamera zeigt (Diehl, 1994).

Insgesamt ist festzuhalten, daß der Ansatz zwar einerseits eine vollständige und flexible Formulierung für vielfältige Aufgabenstellungen in der Photogrammetrie darstellt, andererseits jedoch die Gefahr der Überparameterisierung birgt. Eine iterative Variante des Verfahrens, welche zwecks Regularisierung der Aufgabenstellung und Entkorrelation von Parametern die Bestimmung von Verschiebungsparametern im Bildraum, Orientierungsparametern und digitalem Geländemodell in separate Schritte trennt, wird in (Schenk/Krupnik, 1996) gezeigt. Der Ansatz ist für eine beliebige Anzahl von Bildern formuliert, wurde allerdings praktisch bislang nur in Aufgaben der automatischen Aerotriangulation mit guten Näherungswerten angewandt.

Rechentechnisch sind die Ansätze auch für moderne Computer noch als ziemlich aufwendig einzuschätzen. In der Literatur gezeigte praktische Anwendungen haben sich dementsprechend bislang auf kleine Gebietsausschnitte beschränkt. Unter dem Aspekt der Mehrbildtechniken ist ähnliches festzuhalten wie beim MPGC-Algorithmus: Der Ansatz stellt einen Mehrbildansatz für eine beliebige Anzahl von Bildern dar und weist Symmetrie hinsichtlich der Reihenfolge der Bilder auf, indem kein eigentliches Referenzbild zu definieren ist; der Zwang auf die Kernlinie ergibt sich durch die Verknüpfung im Objektraum implizit. Der Ansatz weist aber nicht die Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit guter Näherungswerte auf, wie sie für merkmalsbasierte Mehrbildzuordnungsverfahren in Kapitel 2.3 - 2.5 gezeigt wurde und bedarf iterativer Strategien zur Beschaffung von Näherungswerten.

2.9.4. Kombination mit Shading-Verfahren

Auf Intensitäten in Bildern basierende bild- oder objektraumgestützte binokulare oder multiokulare Zuordnungsverfahren bedingen das Vorhandensein von Textur auf der Objekt Oberfläche. In Nahbereichsanwendungen kann diese, wenn ausreichende natürliche Textur nicht vorhanden ist, gegebenenfalls durch Aufprojektion eines künstlichen Musters ersetzt werden (vgl. Kapitel 5); in Luftbilddanwendungen ist dies grundsätzlich nicht möglich. Eine Alternative zu intensitätsbasierten Korrelationsverfahren sind Shading-Verfahren (auch Photoklinometrie genannt), welche - unter Annahmen über ein Reflektionsmodell und unter der Voraussetzung konstanter Albedo der Oberfläche - aus der Intensität im Bild die lokale Neigung der Oberfläche bestimmen und durch Integration über die Neigung zu einer Oberflächenrepräsentation führen (Kapitel 8.3). Meist wird dabei von Lambert'schen Reflektionsverhalten ausgegangen, bei welchem die Intensität - unabhängig von der Blickrichtung - proportional zum Cosinus des Winkels zwischen der Richtung zu einer (punktförmigen) Lichtquelle und der Oberflächennormalen ist.

Mehrbildkorrelation und Photoklinometrie können aufgrund ihrer Anforderungen an die Oberflächentextur als komplementäre Verfahren angesehen werden und sind somit geeignet, sich gegenseitig zu ergänzen: In Regionen starker Oberflächentextur bietet die Mehrbildkorrelation ein hohes Genauigkeits- und Zuverlässigkeitspotential, während sie in texturschwachen Regionen weitgehend undefiniert ist. Dagegen basieren Shading-Verfahren in ihrer Grundform gerade auf der Annahme einer texturlosen Oberfläche und können entsprechend in solchen Regionen zur Oberflächenbestimmung herangezogen werden.

Eine Integration von Matchingverfahren und Shape-from-Shading Techniken im Objektraum zur Bestimmung von geometrischen und radiometrischen Parametern einer Oberfläche wird - ausgehend von einer vorgegebenen Unterteilung in Regionen konstanter Albedo und texturreiche Regionen - anhand von simulierten Bildpaaren in (Heipke, 1992) gezeigt.

Einen ebenfalls den in Kapitel 2.9.3 gezeigten Verfahren verwandten objektbasierten Ansatz, welcher neben der geometrischen Mehrbildkorrelation auch noch radiometrische Shading-Information benutzt, zeigen (Fua/Leclerc, 1995). Fua/Leclerc unterteilen in einer dreidimensionalen Modellierung eine Objektoberfläche in eine Dreiecksmaschenstruktur und bestimmen die 3-D Koordinaten aller Eckpunkte der Struktur simultan in einem Optimierungsprozeß. Die zu minimierende Kostenfunktion setzt sich aus gewichteten Anteilen von Komponenten geometrischer Mehrbildkorrelation, radiometrischer Shading-Information sowie Annahmen über die Kontinuität der Objektoberfläche zusammen. Die drei Komponenten sind dabei wie folgt definiert:

- Intensitätskomponente: Die Intensitätskomponente ergibt sich als Summe der Quadrate der Differenzen der Grauwerte zum Mittelwert, summiert über alle Samplingpunkte einer Dreiecksmasche in allen Bildern, summiert über alle Dreiecksmaschen der Objektoberfläche. Durch den objektbasierten Ansatz mit der Projektion einer in Samplingpunkte unterteilten Dreiecksmasche in alle Bilder ergibt sich hier ebenfalls eine Anpassung an die Oberfläche. Verdeckungen werden durch die Einbindung eines hidden-surface Algorithmus mit entsprechender Ausmaskierung verdeckter Regionen in den ins Bild projizierten Dreiecksmaschen berücksichtigt.
- Shadingkomponente: Unter der Annahme eines Lambert'schen Reflektionsmodells und einer sich über die Objektoberfläche nur langsam ändernden Albedo wird eine Shadingkomponente definiert, welche sich aus der Quadratsumme der Differenzen der aus den Grauwerten und der sich aus den Eckpunkten einer Dreiecksmasche ergebenden lokalen Neigung zurückgerechneten Albedo einer Dreiecksmasche zur Albedo der sechs Nachbarmaschen ergibt.

Die Intensität eines Objektpunktes im Bildraum ist bei Annahme Lambert'schen Reflektionsverhaltens unabhängig von der Blickrichtung. Aus diesem Grund leistet der Mehrbildansatz hier nur einen geringen Beitrag, indem die Redundanz bei der Mittelbildung über alle Bilder zur Ermittlung des Grauwertes für eine Facette, welcher für die Berechnung der Albedo der Facette benötigt wird, vergrößert wird. Hier würde es sich anbieten, den Mehrbildansatz konsequenter zu nutzen, indem ein komplexeres Reflektionsmodell angesetzt wird, welches auf weniger einschränkenden Annahmen basiert, indem auch eine blickwinkelabhängige Intensität zugelassen ist (z.B. Bakshi/Yang, 1994). Desweiteren kann die Shadingkomponente in dieser Implementation nur als unterstützende Bedingungsgleichung wirken und bietet allein nicht genügend Informationen zur Berechnung der beiden Komponenten der lokalen Oberflächenneigung. Neben den einschränkenden Annahmen über das Reflektionsmodell ist der Shading-Ansatz natürlich auch noch durch die Annahme über die Konstanz bzw. niederfrequente Variation der Albedo der Objektoberfläche

belastet, welche in der Praxis eine häufige und schwierig zu modellierende Fehlerquelle darstellen wird.

- Glättekomponente: Als Stabilisierungs- und Regularisierungsterm wird zudem unter der Annahme einer kontinuierlichen Objektoberfläche eine Glättekomponente beschrieben, welche als Quadratsumme der Abweichungen aller Dreiecksmaschen von einer vorgegebenen Ebene definiert ist.

Die generelle relative Gewichtung der einzelnen Komponenten basiert auf einer benutzerdefinierten Vorgabe. Die Gewichtung zwischen Intensitäts- und Shadingkomponente wird zudem innerhalb jeder einzelnen Dreiecksmasche durch ein Texturmaß verschoben, welches als normierte logarithmische Varianz der Grauwerte über eine in den Bildraum projizierte Dreiecksmasche definiert ist. Das Gewicht der Glättekomponente wird in den ersten Iterationen hoch angesetzt und dann sukzessive verkleinert, womit die Glättung der Oberfläche verringert wird. Alle drei Komponenten der Kostenfunktion sind über die Koordinaten der Punkte der Dreiecksvermaschung auf der Objektoberfläche definiert, welche in einem Optimierungsverfahren iterativ bestimmt werden. Die Rechenzeiten sind dabei als sehr hoch zu bezeichnen. Aufgrund der Definition der Gewichte zwischen Intensitäts- und Shadingkomponente in den einzelnen Dreiecksmaschen ist der ganze Ansatz nur sinnvoll, wenn gute Näherungswerte vorliegen. Der Konvergenzbereich beträgt nur wenige Pixel, und Näherungswerte werden - auch wieder unter Annahmen über die Kontinuität der Oberfläche - über eine sukzessive Verfeinerung der Oberflächenrepräsentation im Bildpyramidenverfahren bestimmt.

2.9.5. Interagierende Partikel

In einer Verallgemeinerung der im Vorigen diskutierten Methode geht Fua (Fua 1995, Fua 1996) von einer Repräsentation einer regulären Oberfläche durch eine Dreiecksvermaschung zu einer Repräsentation durch eine große Anzahl interagierender 'Partikel' über, welche durch ihre Koordinate senkrecht zur lokalen Tangentialebene und ihren Normalenvektor charakterisiert sind (Abb. 21a). Der Algorithmus geht davon aus, daß die Oberfläche in weiten Bereichen Kontinuität in der Tiefenkoordinate und im Normalenvektor aufweist; die Handhabung von Diskontinuitäten ist dabei jedoch durch die Abgewichtung der Kontinuitätsbedingung in Regionen großer Widersprüche möglich.

Die Partikel werden initiiert, indem der Objektraum in eine Voxelstruktur unterteilt wird (Abb. 21b); in einer sukzessiven bildpaarweisen Korrelation mit zweistufiger Bildpyramide werden 3-D Koordinaten der Oberfläche generiert und zunächst in diese Voxelstruktur gespeichert. Aufgrund der paarweisen Vorgehensweise erzeugt dieser Prozeß viele Doppel- und Mehrfachmessungen von Punkten und einen hohen Anteil von Ausreißern, was jedoch durch eine große Anzahl von Bildpaaren relativiert wird, indem im nächsten Schritt nur Voxel weitergeführt werden, welche eine Mindestanzahl von Punkten enthalten. In diesen Voxeln werden - zunächst für jedes Voxel unabhängig - Partikel generiert durch die Einpassung einer Polynomfläche zweiter Ordnung in die lokale Punktwolke mittels eines robusten Schätzverfahrens. Das Zentrum eines Partikels ergibt sich dabei als Projektion des Zentrums des jeweiligen Voxels auf die Polynomfläche, wobei Partikel, bei denen das projizierte Zentrum außerhalb des Voxels liegt, als grobe Fehler wieder eliminiert werden. Der Normalenvektor ergibt sich als Normale der Polynomfläche im Zentrum des Partikels.

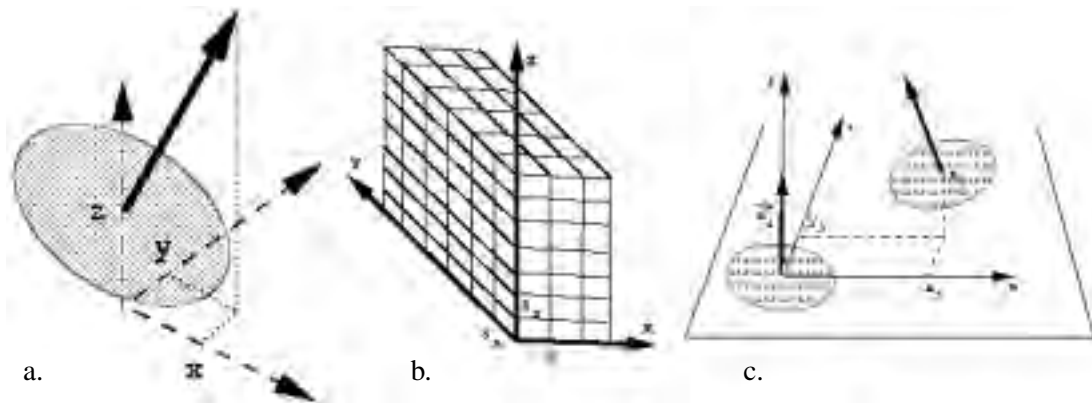


Abb. 21: Oberflächenrepräsentation durch interagierende Partikel (Fua, 1995)
(a: Partikel; b: Voxelstruktur; c: Partikelinteraktion)

Der robuste Schätzer allein produziert bei hoher Redundanz - in (Fua, 1995) wird ein Beispiel mit 40 Bildern gezeigt - über weite Bereiche schon überraschend gute Resultate. Da jedoch die einzelnen Zweibildkorrelationen - insbesondere bei Diskontinuitäten der Objektoberfläche - nicht in jedem Fall unkorrelierte Koordinaten erzeugen, sind systematische Fehler in den Punktwolken innerhalb der einzelnen Voxel und damit Fehler in den generierten Partikeln nicht vermeidbar.

Daher wird in einem weiteren Verarbeitungsschritt wiederum eine Kostenfunktion für das gesamte Objekt definiert, welche aus einer Korrelationskomponente in Form der Varianz der Grauwerte über die in alle Bilder rückprojizierten Partikel und einem auf der Koplanarität und Konormalität benachbarter Partikel (Abb. 21c) basierenden Konsistenzmaß besteht und in einem Optimierungsprozeß minimiert wird. Dabei werden Diskontinuitäten der Objektoberfläche zugelassen, indem bei großen Widersprüchen das Konsistenzmaß abgewichtet wird.

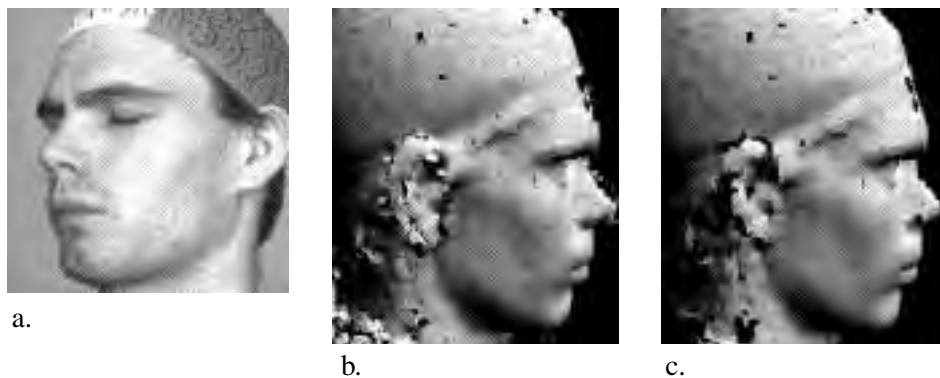


Abb. 22: Beispieldatensatz (Fua, 1995):
a. Originalbild aus einer Sequenz von 40 Aufnahmen mit 360°-Abdeckung
b. Rekonstruktion nach paarweiser Korrelation und robustem Schätzer
c. Endergebnis

Insgesamt beinhaltet die Methode einiges an Heuristik. Die in (Fua, 1995) gezeigten Resultate (Abb. 22) beweisen jedoch das Potential hinsichtlich einer vergleichsweise kompletten Objektrekonstruktion, wobei quantitative Angaben über die Güte der Ergebnisse allerdings fehlen. Als Kernstück der Methode ist, wie aus einem Vergleich von Abb. 22a und Abb. 22b ersichtlich wird, weniger die Definition und Handhabung der Partikel zu sehen als vielmehr die Akkumulation einer aufgrund des Mehrbildansatzes hochredundanten Punktwolke mit vielen groben Fehlern in Kombination mit

einem robusten Schätzer, was eine gewisse Analogie zu der Vorgehensweise bei Match-T (Krzystek, 1991) aufweist.

2.9.6. Näherungswertunabhängige Verfahren

Die nach Kenntnis des Autors erste Anwendung eines Mehrbildverfahrens zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Stereozuordnung findet sich in (Moravec, 1979). Für die Navigation eines autonomen Roboters wird hier eine Kamera sequentiell auf neun Positionen auf einer Basis gefahren. Zwischen den neun Bildern werden dann - wahlweise in einem flächen- oder merkmalsbasierten Verfahren - Zweibildzuordnungen in allen 36 Kombinationen berechnet. Die Zweibildzuordnungen werden zusammen mit ihren Standardabweichungen in einem Histogramm akkumuliert, aus welchem dann die wahrscheinlichste Distanz extrahiert werden kann (Abb. 23).

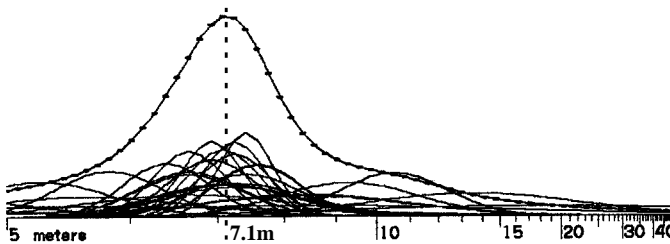


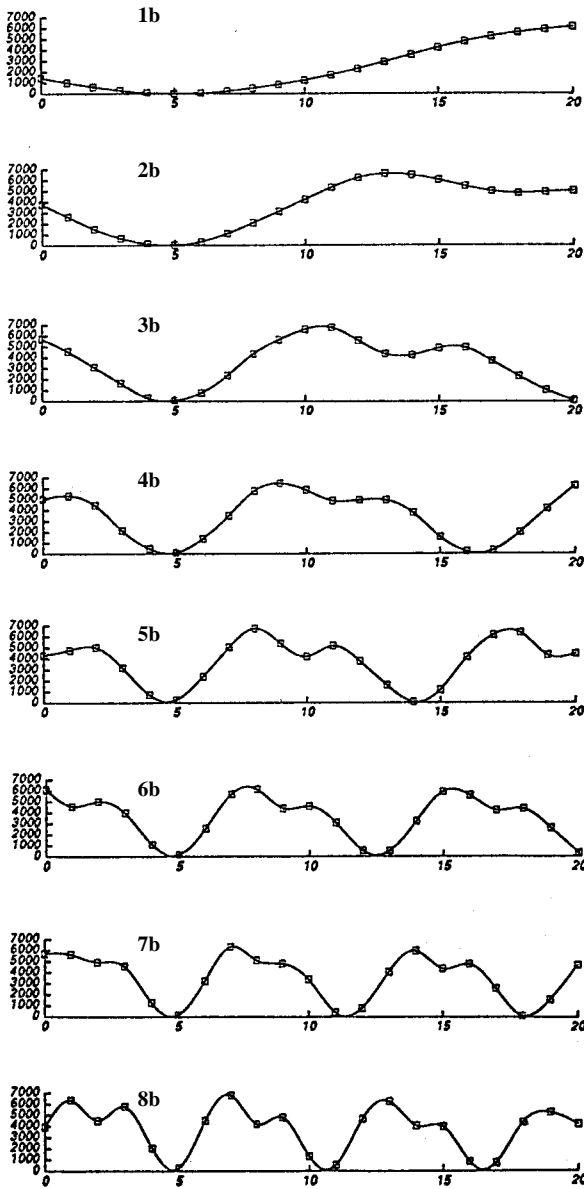
Abb. 23: Distanzhistogramm (Moravec, 1979): 36 Distanzen aus Stereopaaren und Maximum aus dem Histo-

Diese Vorgehensweise kann - insbesondere im Hinblick auf die 1979 verfügbare Rechnerleistung - nur als 'brute force' Methode angesehen werden und nutzt das Potential der neun Bilder bei weitem nicht aus.

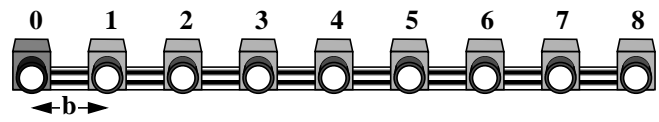
Ein interessanter flächenbasierter Ansatz, welcher nicht den limitierten Konvergenzbereich und die damit verbundenen Probleme der in Kapitel 2.9.2 und 2.9.3 diskutierten Verfahren zeigt, sondern wie die in Kapitel 2.3 - 2.5 gezeigten Ansätze für die Zuordnung diskreter Merkmale weitgehend unabhängig von der Vorgabe von Näherungswerten oder von speziellen Techniken zur Beschaffung von Näherungswerten ist, ist das Verfahren des 'Multi-Baseline Stereo' (Okutomi/Kanade, 1993). Das Verfahren basiert auf der bereits in Kapitel 2.4 diskutierten Kombination von langen Basen zur Erzielung guter Tiefengenauigkeiten mit kurzen Basen zur Herstellung eindeutiger Korrespondenzen. Im Gegensatz zu vielen anderen Verfahren vermeidet die gezeigte Vorgehensweise die Herstellung möglicher Zuordnungen zwischen zwei Bildern mit anschließender Verifikation oder Ablehnung durch Kernlinienschnitt in weiteren Bildern; stattdessen basiert sie auf einer Akkumulation von Evidenz für eine korrekte Zuordnung durch die Kombination der Ergebnisse paarweiser Zuordnungen in einer zu minimierenden Summenfunktion.

Bezogen auf die Annahme des Normalfalls mit mehreren senkrecht zu einer gemeinsamen Basis parallel ausgerichteten Kameraachsen (Abb. 24a) läßt sich die Vorgehensweise ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit wie folgt erklären: Ausgehend von der einfachen Parallaxenformel für den Normalfall $p_x = (b \cdot c) / Z$ wird für einen Punkt P' in einem Referenzbild B_1 in diskreten Schritten der inversen Tiefenkoordinate $1/Z$ die entsprechende Parallaxe $p_{x(i)}$ zwischen B_1 und allen weiteren Bildern $B_{(i)}$ bestimmt. An den entsprechenden Bildpunkten wird über ein vorgegebenes Fenster (welches bei Okutomi/Kanade eindimensional ist) die Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen (SSD - sum of squared differences) gebildet. Trägt man nun diese SSD für jedes Stereopaar ($B_1 - B_{(i)}$) über die inverse Tiefenkoordinate $1/Z$ auf, so ergibt sich in der Regel für kurze Basen ein schwaches Minimum an der Stelle der richtigen Tiefenkoordinate, während sich für lange Basen zwar

schärfere Kurvenverläufe ergeben, die aber oft mehrere etwa gleichwertige Minima (und somit Mehrdeutigkeiten) aufweisen werden (Abb. 24b). Kombiniert man nun mehrere oder alle Basen, was bei Okutomi/Kanade heuristisch über eine Summenbildung der SSD (SSSD - sum of sum of squared differences) erfolgt, so erhält man, wenn genügend Basen zur Verfügung stehen, ein ausgeprägtes Minimum an der Stelle der korrekten Zuordnung (Abb. 24c).

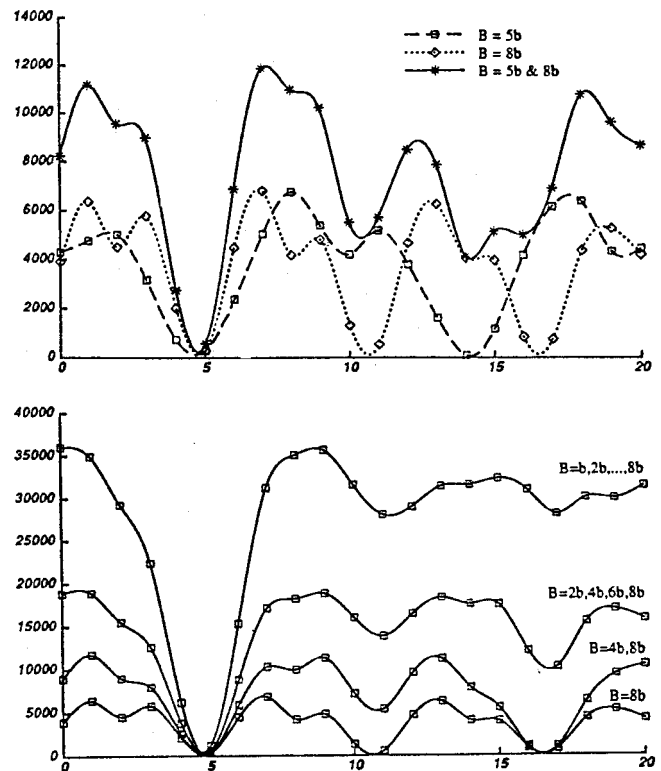


b.) Verlauf der SSD als Funktion der Inversen Distanz



a.) 9-Bild Kameraanordnung

Abb. 24: Multi-Baseline Stereo (Okutomi/Kanade, 1993)



c.) Summation der SSD für verschiedene Kombinationen von Basen

Basierend auf dem Ansatz von (Okutomi/Kanade, 1993) wird in (Kang et al., 1994) ein Vierkamera-Echtzeitsystem mit aktiver Streifenprojektion und paralleler Verarbeitungshardware gezeigt, wobei zwecks Optimierung des gemeinsamen Gesichtsfeldes der vier Kameras eine konvergente Anordnung mit Berechnung von paarweisen Epipolarbildern gewählt wurde.

Ein ebenfalls auf dem Prinzip des Multi-Baseline Stereo basierendes passives Echtzeitsystem zeigen (Oda et al., 1996). Mit einem 5-Kamera Kopf (Abb. 25) bestimmen sie für Anwendungen in Virtual Reality mit Videorate ein 200x200 Pixel Tiefenbild über einen Tiefenbereich von 2-15 Meter. Zur weiteren Rechenzeiterparnis wurde dabei von der SSD auf die SAD (sum of absolute differences) übergegangen. Allerdings werden für die Tiefenauflösung nur 5 bit angegeben, was auf das für größere Tiefenkoordinaten ungünstige Basis-Tiefenverhältnis des 5-Kamera Kopfes und den Verzicht auf Subpixelaufklärung zurückzuführen ist. Eine Demonstration des Systems zeigt grobe Fehler vor allem in Bereichen mit geringer Textur; diese Probleme sind bei der passiven Methode prinzipiell zu erwarten; grobe Fehler sollten dabei jedoch leicht durch eine Analyse der gefundenen Minima und eine Zurückweisung von Tiefenkoordinaten bei nicht ausgeprägtem Minimum der SSAD (sum of sum of absolute differences) vermeidbar sein.

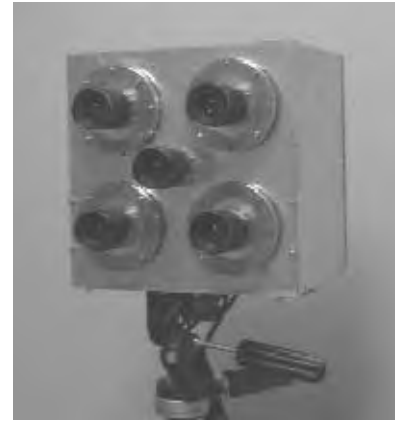


Abb. 25: 5-Kamera Kopf
(Oda et al., 1996)

Im Vergleich zu den in Kapitel 2.3 - 2.5 gezeigten Verfahren zeigt sich das Multi-Baseline Stereo durch eine geradlinige, schnelle und leicht parallelisierbare Implementation aus. Andererseits bietet die von einem vorgegebenen Referenzbild ausgehende Implementation eine geringere Flexibilität vor allem hinsichtlich Verdeckungen. Als flächenbasiertes Verfahren wirkt es bei Diskontinuitäten im Objektraum tendenziell glättend; auch weist es nicht die Möglichkeiten der Deformation des Suchfensters auf, was insbesondere bei konvergenter Kameraanordnung das Genauigkeitspotential reduzieren wird. Aus diesen Gründen bietet sich aus Sicht des Photogrameters eine Kombination beispielsweise mit Least-Squares Matching (Kapitel 2.9.2) an, indem Näherungswerte unabhängig von Vorwissen über den Objektraum und Strategien wie Bildpyramiden durch Multi-Baseline Stereo bestimmt werden und anschließend eine Feinmessung durch Least-Squares Matching durchgeführt wird.

Kapitel 3: Orientierungs- und Kalibrierungsverfahren

Im Rahmen der Bündelblockausgleichung sowohl in der Aerotriangulation wie auch in Nahbereichsanwendungen spielen Mehrbildtechniken bereits seit den Anfängen der analytischen Photogrammetrie eine entscheidende Rolle. Die klassischen Motivationen für die Anwendung von Mehrbildtechniken können grob in die folgenden vier Kategorien zusammengefaßt werden:

- Überbrückung passpunktloser Räume
- Steigerung der Genauigkeit
- Steigerung der Zuverlässigkeit
- Bestimmbarkeit von Parametern

Im Rahmen dieser Arbeit sollen keineswegs die im Wesentlichen in den 70er und frühen 80er Jahren erarbeiteten Grundlagen der Bündelblockausgleichung wiederholt werden (z.B. Brown 1976, Ebner 1976, Grün 1986), sondern lediglich im Rahmen der digitalen Photogrammetrie neu hinzukommende Aspekte diskutiert werden. Aus chronologischen Gründen und aufgrund ihrer Bedeutung für die heutige Praxis der digitalen Photogrammetrie sind hier vor allem die Steigerung der Genauigkeit und die Bestimmbarkeit von Parametern in Nahbereichsanwendungen zu nennen. In automatischen Systemen sowohl der Nahbereichsphotogrammetrie wie auch der digitalen Aerotriangulation kommen auch Zuverlässigkeitsaspekte hinzu.

Neben den Aspekten der Bündelblockausgleichung ist in diesem Kapitel im Zusammenhang mit vollautomatischen Meßsystemen auch auf aktive automatische Orientierungsverfahren einzugehen, bei welchen sequentielle Signalisierungsverfahren elegante Möglichkeiten der automatischen Orientierung von prinzipbedingt bildsequenztauglichen CCD-Kameras bieten. Desweiteren ist hier noch auf die Linienphotogrammetrie einzugehen, welche erweiterte Möglichkeiten der Orientierung bei Verwendung natürlicher Merkmale bietet und - soweit sie auf der Zuordnung von homologen Geraden basiert - mindestens die Verwendung von Bildtripeln bedingt.

3.1. Überbrückung passpunktloser Räume

Die Überbrückung passpunktloser Räume - zunächst mit Methoden der instrumentellen Aerotriangulation, später mit Verfahren der Modell- und Bündelblockausgleichung - stellt die älteste Anwendung von Mehrbildverfahren in der Photogrammetrie dar. Weil diese Verfahren in der Literatur bereits eingehend behandelt wurden und sich hier durch die digitale Photogrammetrie neben der in Kapitel 3.3.1 diskutierten Automatisierung keine wesentlichen neuen Aspekte im Hinblick auf die Anwendung von Mehrbildtechniken ergeben, soll dieses Thema hier nicht detaillierter behandelt

werden. Dasselbe gilt für klassische Nahbereichsanwendungen, wo beispielsweise in industriellen Anwendungen und in der Architekturphotogrammetrie bereits Hunderte von filmbasierten Teilmeßkammer-Aufnahmen trianguliert wurden. Neue Aspekte zu diesem Thema ergeben sich vor allem durch die zusätzliche Verwendung von Navigationssensoren (z.B. GPS und Trägheitsnavigationssysteme in der Aerotriangulation), welche eine wesentliche Reduktion der Passpunktanforderungen mit sich bringen. Neue Anwendungsbereiche gibt es beispielsweise in der Navigation von autonomen Robotern (vgl. Kapitel 4.1).

3.2. Genauigkeitssteigerung und Selbstkalibrierung in Nahbereichsanwendungen

Die Verwendung von nicht- oder halbmetrischen Kameras hat sich - vor allem aus Gründen der Flexibilität und der Kostenersparnis in Kombination mit den sich durch die Einführung analytischer Auswertegeräte ergebenden Möglichkeiten - in Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie seit Anfang der 80er Jahre weitgehend durchgesetzt. Klassische metrische Kameras sind zwar in der Praxis noch vereinzelt zu finden, spielen jedoch auf dem Markt keine Rolle mehr. Um mit nicht- oder halbmetrischen Kameras hohe Genauigkeiten erzielen zu können und um Kameraparameter im Zuge der Selbstkalibrierung bestimmen zu können, wurde hier eine konsequente Abkehr vom klassischen Normalfall der Stereoaufnahme hin zu konvergenten Mehrbildverbänden vollzogen. Grundlegende Arbeiten hierzu finden sich z.B. bei (Wester-Ebbinghaus, 1983).

Neue Aspekte ergeben sich hier in der digitalen Photogrammetrie vor allem mit dem Aufkommen von Stillvideokameras ('electronic photography', so benannt wegen der Aufnahme von Einzelbildern im Gegensatz zur permanenten Bildaufnahme bei konventionellen CCD Kameras) als Einsensorsystemen, mit denen anhand einer großen Anzahl von Aufnahmen 3-D Koordinaten an statischen Objekten bestimmt wurden (z.B. Fraser/Legac, 1994). Stillvideokameras waren zwar bereits seit 1987 auf dem Markt (Canon RC701), wiesen jedoch damals mit CCD Sensoren nach der NTSC Videonorm und analoger Speicherung der Bilddaten auf 2^{1/2}"-Disketten ein für die meisten photogrammetrischen Anwendungen nicht ausreichendes Genauigkeitspotential auf (Dähler, 1988). Einen Durchbruch erzielte hier 1993 die Kodak DCS200 mit einem 1524x1012 Pixel CCD Sensor, interner A/D Wandlung und Speicherkapazität für 50 unkomprimierte Bilder auf einer internen Harddisk. Diese Kamera stellte für die digitale Photogrammetrie erstmals ein autonomes, zumindest bedingt feldtaugliches System zur Akquisition von digitalen Bildern hoher geometrischer und radiometrischer Qualität dar. Die Anwendung solcher Stillvideo Kameras in der photogrammetrischen Koordinatenmeßtechnik, sowohl durch Firmen wie auch durch Hochschulinstitute, erfolgte unmittelbar nach ihrem Erscheinen auf dem Markt (u.a. van den Heuvel 1993, Peipe et al. 1993, Maas/Kersten 1994, Fraser/Shortis 1994). Mittlerweile ist die DCS200 (bzw. ihre Nachfolgemodelle DCS420 und DCS460) Kernstück verschiedener kommerziell verfügbarer photogrammetrischer Meßsysteme (z.B. Beyer 1995, Brown/Dold 1995). Vergleichbare Kameras sind auch von einer Reihe anderer Hersteller auf dem Markt (Nikon, Fuji, Minolta, Canon), und auch traditionelle Anbieter photogrammetrischer Produkte haben Kameras auf CCD Sensoren umgerüstet (Geodetic Services, Rollei). Das größte Bildformat bietet dabei derzeit die Rollei Q16 mit 4096x4096 Pixeln. Dieses Format ergibt zusammen mit Algorithmen zur subpixelgenauen Messung im Bildraum ein sehr hohes Genauigkeitspotential. Kameras dieser Art sind damit inzwischen konventionellen mittelformatigen Halbmeßkameras deutlich überlegen und konkurrieren in manchen Anwendungen mit theodolitbasierten Industriemeßsystemen (Gottwald, 1987).

Als Nicht-Meßkameras sind Stillvideokameras für photogrammetrische Anwendungen unbedingt zu kalibrieren. Die innere Geometrie der Kameras ist nicht bekannt und kann sich durch Fokussieren oder Objektivwechsel massiv verändern. Dazu kommen die Objektivverzeichnung, welche bei Weitwinkelobjektiven in den Bildecken mehr als 10 Pixel ausmachen kann, sowie Effekte des CCD Sensors und der A/D Wandlung des Bildes. Hier ist insbesondere ein horizontaler Maßstabsfaktor zu nennen, welcher in Echtzeitsystemen mit CCD Kameras nach Standardvideonormen, analogem Bilddatentransfer und Framegrabber aufgrund von Unterschieden in der Taktrate von Kamera und Framegrabber auftritt; bei modernen Stillvideokameras mit interner A/D Wandlung sollte dieser Effekt prinzipiell nicht mehr auftreten, konnte jedoch verschiedentlich signifikant nachgewiesen werden (z.B. Keller, 1995). Neben ihren offensichtlichen Vorteilen stellen Kameras dieses Typs damit auch neue Probleme, welche bei photogrammetrischen Anwendungen spezielle Berücksichtigung finden müssen.

Da eine geeignete Ausstattung für eine Laborkalibrierung in der Regel weder beim Benutzer noch beim Anbieter digital-photogrammetrischer Systems zur Verfügung steht - und eine Laborkalibrierung auch mangels zeitlicher Stabilität der Kameraparameter unpraktikabel wäre - werden Kameras in der Regel durch Testfeldaufnahmen oder Verfahren der Selbst- oder Simultankalibrierung (häufig mit geodätischer Zusatzinformation) kalibriert. Die Bestimmbarkeit der Kameraparameter stellt dabei spezielle Anforderungen an die Netzgeometrie, wobei die Theorie der 'gefährlichen Flächen' aus der analogen und analytischen Photogrammetrie deutlich komplexer wird.

3.2.1. Kalibrierverfahren

Während Photogrammeter häufig zwischen Kamerakalibrierung und -orientierung unterscheiden, verstehen Anwender unter dem Begriff der Kalibrierung eines photogrammetrischen Systems in der Regel die Bestimmung aller Systemparameter, also sowohl der Parameter der äußeren Orientierung wie auch der Kameraparameter. Da gerade bei den häufig benutzten Verfahren der Selbstkalibrierung tatsächlich alle Parameter gemeinsam bestimmt werden, ist diese Sichtweise in einem gewissen Grade auch berechtigt, wenngleich die Kalibrierungsparameter eines Systems unter geometrischen und physikalischen Gesichtspunkten in zwei Gruppen getrennt werden können und die gemeinsame Bestimmung aufgrund hoher Korrelationen teilweise zu Problemen führen kann.

Ein in der Nahbereichsphotogrammetrie sehr häufig verwendetes Sensormodell beinhaltet den Zusatzparametersatz nach (Brown, 1971), der zusätzlich zu den drei Parametern der inneren Orientierung drei Koeffizienten eines Polynoms für die radiale Objektivverzeichnung und zwei Koeffizienten für die Dezentrierverzeichnung enthält:

$$\begin{aligned} \bar{x}_i' &= x_i' + dx_i & \bar{y}_i' &= y_i' + dy_i \\ \text{mit} \quad dx_i &= x_i' \cdot (k_1 r_i'^2 + k_2 r_i'^4 + k_3 r_i'^6) + p_1 \cdot (r_i'^2 + 2x_i'^2) + 2p_2 x_i' y_i' \\ dy_i &= y_i' \cdot (k_1 r_i'^2 + k_2 r_i'^4 + k_3 r_i'^6) + 2p_1 x_i' y_i' + p_2 \cdot (r_i'^2 + 2y_i'^2) \\ \text{und} \quad r_i'^2 &= x_i'^2 + y_i'^2 \end{aligned} \tag{6}$$

k_1, k_2, k_3 : radiale Verzeichnung
 p_1, p_2 : Dezentrierverzeichnung

Für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie wurde dieser Parametersatz noch um zwei Parameter einer Affintransformation erweitert, welche einen horizontalen Maßstabsfaktor und die Nicht-Ortho-

gonalität der Bildkoordinatenachsen modellieren und vor allem Abweichungen der Pixelgröße von den Sollwerten und Effekte der A/D-Wandlung aufnehmen (z.B. El-Hakim, 1986; Beyer, 1987).

$$\tilde{x}_i' = a_1 \bar{x}_i' + a_2 \bar{y}_i' \quad \tilde{y}_i' = \bar{y}_i' \quad (7)$$

Die folgenden Betrachtungen beschränken sich auf diesen Parametersatz. Weitergehende Modelle berücksichtigen ansatzweise auch Sensorunebenheiten, welche jedoch bei den heute verfügbaren klein- bis mittelformatigen Halbleitersensoren bislang kaum signifikant nachgewiesen werden können.

Eine häufig zu findende Klassifizierung von Kalibrierverfahren in der Photogrammetrie unterscheidet folgende Techniken:

- Laborkalibrierung
- Testfeldkalibrierung
- Simultankalibrierung
- Simultankalibrierung mit geodätischer Zusatzinformation

Auch Kombinationen von Testfeld- oder Laborkalibrierung mit Verfahren der Simultankalibrierung sind in der Praxis zu finden.

3.2.1.1. Laborkalibrierung

Aufgrund der zeitlichen Instabilität der Kameraparameter bei nicht-metrischen Kameras (insbesondere der Abhängigkeit der inneren Orientierung von Fokussierzustand und eventuellem Objektivwechsel) und mangels der Verfügbarkeit geeigneter Laborausrüstung (Goniometer etc.) beim Benutzer spielen Verfahren der Laborkalibrierung in der heutigen photogrammetrischen Praxis kaum mehr eine Rolle - im Gegensatz zu Luftbildkameras und metrischen Kameras, welche werkseitig kalibriert werden und durch exakte (und schwere und teure) Mechanik sowie eventuell durch Zwischenringe zur Fokussierung stabil gehalten werden. Einzig bei der Firma Metronor findet man heute eine vollständige Laborkalibrierung von digitalen Kameras für Nahbereichsanwendungen (Pettersen, 1992). Die Kameras werden hier herstellerseitig nach einem patentierten und nicht publizierten Verfahren im Labor kalibriert und in der Applikation nach der Referenzstabmethode (Kapitel 3.3.2.2) nur noch orientiert. Der mit dieser Vorgehensweise einhergehende Verlust an Flexibilität hinsichtlich Fokussiermöglichkeit, Objektivwechsel und Blendeneinstellung kann bei den im Wesentlichen auf die Aufnahme von Leuchtdioden unter kontrollierten äußeren Bedingungen spezialisierten Metronor-Systemen toleriert werden.

3.2.1.2. Referenzfeldkalibrierung

Eine vergleichsweise einfach zu handhabende und robuste Methode der Kamerakalibrierung, welche schon früh auch zur Kalibrierung von nicht-metrischen Kameras verwendet wurde, ist die Kalibrierung anhand von Aufnahmen eines Testfeldes (z.B. Torlegard, 1967). Bei geeigneter Auslegung des Testfeldes (mit übergeordneter Genauigkeit bekannte Referenzkoordinaten, ausreichende Tiefenausdehnung, hohe Punktzahl) genügt ein räumlicher Rückwärtsschnitt im Bündel mit Zusatzparametern zur Kalibrierung einer Kamera anhand einer Einzelaufnahme. Wesentlich aufwendiger kann die Kalibrierung einer CCD-Kamera mit einem Zoomobjektiv werden: (Willson/Shafer, 1993) zeigen eine Prozedur, welche die sequentielle Aufnahme von 93 Bildern eines Kalibrierfeldes verlangt.

Generelle Nachteile von Testfeldverfahren sind jedoch die Verfügbarkeit und Mobilität geeigneter Testfelder sowie die durch die Wahl eines Testfeldes und damit eines Fokussierzustandes sich ergebenden Einschränkungen bezüglich der Ausdehnung aufzunehmender Objekte. Der Aufwand der Herstellung eines geeigneten, stabilen Testfeldes und der Bereitstellung von hinreichend genauen Referenzkoordinaten ist in der Regel nur für bestimmte, häufig am selben Ort wiederholte Anwendungen zu rechtfertigen.

3.2.1.3. Selbst- und Simultankalibrierung

Bei der Selbstkalibrierung wird eine Kamera ohne Objektrauminformation lediglich aus photogrammetrischer Information, welche in Form von Strahlenschnitten aus gemessenen Bildkoordinaten vorliegt, kalibriert. Die Idee der Selbstkalibrierung wurde im Laufe der 60er Jahre von der Gruppe D. Brown entwickelt (Brown 1971, Kenefick et al. 1972), nachdem bereits in (Hallert, 1956) auf die Möglichkeit hingewiesen worden war, bei Luftbildern aus den Restparallaxen eines Stereomodelles auf die Objektivverzeichnung zu schließen. Brown zeigt, daß aus mindestens drei Aufnahmen einer Kamera in stark konvergenter Anordnung die Koordinaten des Bildhauptpunktes bestimmt werden können, und daß bei Kenntnis mindestens einer Distanz im Objektraum auch die Kammerkonstante bestimmt werden kann. Desweiteren führt er einen Satz von fünf Zusatzparametern zur Modellierung der radialsymmetrischen Verzeichnung und der Dezentrierverzeichnung ein (vgl. Kapitel 3.2.1) und geht konsequent von der Vorstellung ab, daß für hochgenaue photogrammetrische Meßaufgaben die Verwendung speziell verzeichnungskorrigierter Objektive notwendig sei. In (Kenefick et al. 1972) wird die Anwendung von Rotationsstrategien begründet, die zur Vermeidung von Korrelationen zwischen den Parametern der inneren Orientierung und Parametern der äußeren Orientierung bei mindestens einer Aufnahme die Kamera um 180° um ihre Achse drehen. Eine Formulierung der Selbstkalibrierung über die Koplanaritätsbedingung findet sich - beschränkt auf die Bestimmung der inneren Orientierung - in (Kölbl, 1972): Kölbl zeigt anhand von Genauigkeitsabschätzungen, daß für die Selbstkalibrierung einer nicht-metrischen Kamera Aufnahmen von mindestens drei Kamerastandorten notwendig sind, deren Aufnahmerichtungen nicht in einer Ebene liegen und einen Konvergenzwinkel von etwa 60° einschließen sollen, und daß die Objektiefe mindestens etwa 25% der Aufnahmeentfernung ausmachen sollte. Einen linearen, näherungswertunabhängigen Ansatz zur relativen Orientierung einschließlich der Bestimmung der inneren Orientierung zeigt (Niini, 1994). Der Ansatz basiert auf der projektiven singulären Korrelation und bedingt ebenfalls die Akquisition von mindestens drei Bildern eines Punktfeldes mit signifikanter Tiefenausdehnung durch eine Kamera von unterschiedlichen Kamerastandorten. Der lineare projektive Ansatz beinhaltet keine Möglichkeiten zur Modellierung nicht-linearer Effekte wie der Objektivverzeichnung und bietet sich daher in der Nahbereichsphotogrammetrie vor allem zur Bestimmung von Näherungswerten für eine anschließende Bündelblockausgleichung mit kompletter Selbstkalibrierung an.

Die Begriffe ‘Selbstkalibrierung’ und ‘Simultankalibrierung’ werden in der Literatur nicht einheitlich gehandhabt: Meist steht Selbstkalibrierung für die Tatsache, daß zur Kalibrierung einer Kamera lediglich photogrammetrische Information in Form Strahlenschnitten gemessener Bildkoordinaten verwendet wurde; Simultankalibrierung hingegen bedeutet, daß die Kamera in der Applikation kalibriert wird (d.h. daß die Kameraparameter zusammen mit den Orientierungsparametern und den zu bestimmenden Objektpunktkoordinaten bestimmt werden), sagt aber nichts über das eventuelle

Vorhandensein geodätischer Zusatzinformation aus (siehe auch Kapitel 3.2.1.4). In vielen Fällen werden beide Begriffe dieselbe Vorgehensweise beschreiben. Eine Reihe von Konfigurationen für die Simultankalibrierung mit und ohne Objektrauminformation an ebenen und räumlich ausgedehnten Objekten wird - ebenfalls beschränkt auf die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung - in (Wester-Ebbinghaus, 1985) gezeigt. Eine wesentliche Voraussetzung für lediglich auf Strahlenschnitten basierende Selbstkalibrierung ist danach entweder eine räumliche Ausdehnung des Objektes oder die Aufnahme in zwei Lagen mit um annähernd 180° um ihre Aufnahmeachse gedrehter Kamera.

Ein praktisches Schema für die Netzgeometrie bei der Selbst- oder Simultankalibrierung einer digitalen Kamera zeigt (Godding, 1993). Das Schema besteht aus sieben Aufnahmen; dabei gewährleisten die Aufnahmen $I_1 - I_4$ (Abb. 26) eine gute Strahlenschnittgeometrie für die Neupunktbestimmung, während die gegeneinander gedrehten Aufnahmen $I_5 - I_7$ die Bestimmbarkeit der Kameraparameter gewährleisten: Die Drehung um 180° entkorreliert die Koordinaten des Hauptpunktes (Parameter gerader Ordnung) von den Parametern der äußeren Orientierung (Kenefick et al. 1972), die

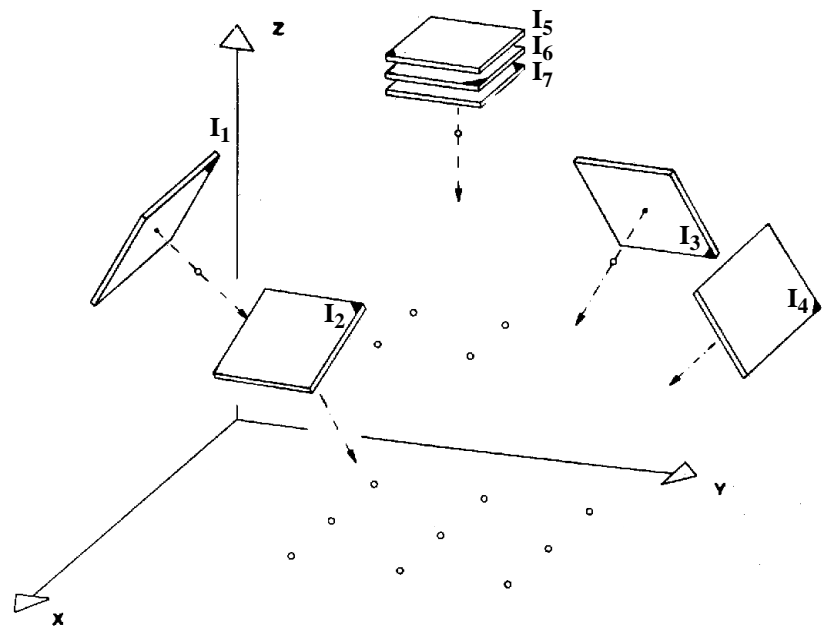


Abb. 26: Schema für die Netzgeometrie bei Selbstkalibrierung (Godding, 1993)

Drehung um 90° entkorreliert den horizontalen Maßstabsfaktor der Affintransformation (Parameter ungerader Ordnung, vgl. Kapitel 3.2.1), welcher nur auf die Bildkoordinaten in horizontaler Richtung wirkt, von Koordinaten im Objektraum. Derselbe Effekt ergäbe sich auch durch zwei zusätzliche Drehungen um $\pm 90^\circ$. Die Aufnahme von sieben Bildern zur Kalibrierung einer Kamera stellt dabei keine Minimalversion dar, ein beispielsweise um die Aufnahmen I_2, I_3 reduzierter Bildverband würde für die Bestimmbarkeit der Kameraparameter ausreichen, und für die gleichzeitige Kalibrierung mehrerer Kameras reicht die Akquisition von drei Bildern je Kamera aus (Dold, 1994). Jedoch kann festgehalten werden, daß die in der Praxis der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie häufig auftretende Notwendigkeit der simultanen Bestimmung eines linearen horizontalen Maßstabsparameters von CCD-Kameras im Vergleich zur Kalibrierung von filmbasierten Kameras mindestens die Aufnahme eines zusätzlichen Bildes mit um 90° gedrehter Kameraachse erfordert.

Der positive Effekt zusätzlicher Aufnahmen mit gedrehter Kameraachse auf die Korrelationen vor allem zwischen Zusatzparametern und Objektkoordinaten wird auch anhand von praktischen Beispielen in (Grün/Beyer, 1992) gezeigt. Ein aufschlußreiches Beispiel für die Auswirkungen des horizontalen Maßstabsfaktors findet sich bei Fraser/Shortis (1994): Hier wurde ein mit 60 retroreflektierenden Punkten signalisiertes Flugzeugbauteil ($4.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ mit geringer Tiefenausdehnung) mit einer Kodak DCS200 aufgenommen. Von sechs Kamerastationen wurden je acht Bilder

aufgenommen, davon vier mit 180° rotierter Kamera. Wurde bei dieser Netzgeometrie der horizontale Maßstabsfaktor als Unbekannte eingeführt, so vergrößerten sich die Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten um einen Faktor 4-7; dagegen wurden die durch Vergleich mit Theodolitmessungen ermittelten praktischen Genauigkeiten um 10-20% besser. Der Grund hierfür sind hohe Korrelationen zwischen dem horizontalen Maßstabsfaktor und den horizontalen Objektkoordinaten sowie Parametern der inneren Orientierung in der Bündelausgleichung. Durch Rotationen der Kamera um 90° und/oder 270° hätten diese Korrelationen deutlich reduziert werden können. Das o.g. Anwendungsbeispiel ist gleichzeitig auch ein Beispiel für die häufig zu findende Diskrepanz zwischen theoretischer, aus Gewichtseinheitsfehler und Kovarianzmatrix ermittelter, und praktischer, aus externen Referenzwerten ermittelter Genauigkeit: beide Werte klaffen hier um einen Faktor 4 auseinander. Gründe für Diskrepanzen solcher Art sind Abweichungen vom mathematischen oder statistischen Modell. Insbesondere bei Stillvideokameras findet man häufig Instabilitäten der inneren Orientierung, welche die Annahme eines über den Zeitraum der Aufnahmen zur Simultankalibrierung stabilen Zusatzparametersatzes verletzen und zu starken systematischen Fehlern führen können; diese Probleme sind aus den Ergebnissen der Bündelblockausgleichung manchmal nicht ersichtlich (Keller 1995, Grün et al. 1995, Maas/Niederöst 1997) und schränken die Tauglichkeit von Stillvideokameras für photogrammetrische Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen deutlich ein.

3.2.1.4. Selbstkalibrierung mit geodätischer Zusatzinformation

Falls zusätzlich zu einem stabilen Punktfeld Objektrauminformation mit adäquater Genauigkeit vorliegt, kann diese in vielen Bündelprogrammen zur Stärkung der Netzgeometrie hinzugenommen werden. Damit läßt sich in vielen Fällen vor allem die Bestimmbarkeit von Parametern der inneren Orientierung verbessern. Objektrauminformation kann in vielerlei Form vorliegen: Paßpunkte, Distanzen, Richtungen, rechte Winkel, Koordinatendifferenzen, Geradheits- und Ebenheitsbedingungen, parametrisierte Linien und Flächen, GPS-Information (Projektionszentren) und Information aus Trägheitsnavigationssystemen (Rotationen). Das Verfahren der Testfeldkalibrierung (Kapitel 3.2.1.2) kann dabei als eine (extreme) Form der Kalibrierung mit zusätzlicher Objektrauminformation in Form von Passpunkten angesehen werden. Auch hybride Ansätze in sequentiellen Orientierungsverfahren für statische Mehrkamerasysteme (Kapitel 3.3.2.2) basieren auf der Integration von geodätischer Zusatzinformation.

3.3. Automatische Orientierungsverfahren

Ein im Vergleich zu den in Kapitel 2 diskutierten Zuordnungsverfahren mindestens gleich komplexer Teil der photogrammetrischen Datenverarbeitung ist die relative und absolute Orientierung von Bildern bzw. Bildverbänden. In vielen digital-photogrammetrischen Systemen erfolgt die Orientierung heute noch durch Interaktion des Benutzers. Ein wesentlicher Schritt hin zu vollautomatischen photogrammetrischen Systemen und größerer Akzeptanz vor allem auch bei industriellen Anwendern ist deshalb gegenwärtig die Automatisierung der Orientierung.

Hier ergeben sich wesentliche Unterschiede zwischen Luftbildanwendungen und Nahbereichsphotogrammetrie. Die Bündelblockausgleichung basiert zwar in beiden Bereichen prinzipiell auf demselben mathematischen Modell der Kollinearitätsbedingung (Schmid, 1958), jedoch ergeben sich bezüglich der Netzgeometrie und des verwendeten Aufnahmematerials wesentliche Unter-

schiede: Während Luftbildanwendungen in der Regel als Flächenflug mit homogener Bildanordnung, annähernd senkrechter Aufnahmeachse und kalibrierter metrischer Kamera geflogen und häufig noch zusätzlich durch GPS-Informationen gestützt werden, sind Nahbereichsanwendungen durch wesentlich komplexere, flexiblere Netzgeometrien, für die oft keine explizite Netzplanung vorliegt, sowie die Verwendung nicht- oder halbmetrischer Kameras gekennzeichnet. Andererseits erlaubt die Zugänglichkeit des aufzunehmenden Objektes in Nahbereichsanwendungen in vielen Fällen ingenieurmäßige Vorgehensweisen, indem Probleme beispielsweise durch aktive automatische Orientierungsverfahren vereinfacht werden können. Da solche Verfahren zum Teil auf der Akquisition und Verarbeitung von Bildsequenzen basieren, sollen sie hier schwerpunktmäßig diskutiert werden.

3.3.1. Automatische Verfahren in der Aerotriangulation

In der Luftbildphotogrammetrie sind in den vergangenen Jahren recht erfolgreiche Ansätze für die Automatisierung wesentlicher Teilaspekte des Orientierungsproblems gezeigt worden. Die innere Orientierung (der Bezug zwischen dem Koordinatensystem des Bildes und dem Maschinenkoordinatensystem des Scanners) kann über die automatische Erkennung und Messung von Rahmenmarken an den Bildrändern oder in den Bildecken relativ leicht erfolgen (Schickler 1994, Häring 1995). Die automatische relative Orientierung eines Bildpaares anhand der Suche nach homologen Punkten nach vorgegebenen Schemata in einem Pyramidenansatz mit anschließender Detektion von Ausreißern durch robuste Schätzverfahren (z.B. Tang/Heipke, 1993) ist heute in kommerziell verfügbaren Systemen enthalten, wenngleich sie noch nicht für alle auftretenden Probleme als gelöst angesehen werden kann. Zur automatischen absoluten Orientierung dagegen ist die Erkennung und Messung von signalisierten Passpunkten (Gülch, 1995) oder anderen koordinatenmässig bekannten Objekten im Bild (Vosselman/Haala 1992, Schickler 1992) notwendig, was hohe Anforderungen an die Datenrepräsentation und an die Objekterkennung stellt und bei weitem noch nicht als praxistauglich gelten kann.

Programmpakete für die automatische digitale Aerotriangulation von Luftbildblöcken - beschränkt auf die Identifikation und Messung von Verknüpfungspunkten - sind inzwischen für digitale photogrammetrische Stationen kommerziell erhältlich. Auch hier findet man die grundsätzliche Unterscheidung nach flächen- und merkmalsbasierten sowie relationalen Zuordnungsverfahren:

- Das als 'Stuttgarter Ansatz' bekannte Verfahren der automatischen digitalen Aerotriangulation basiert vor allem aus Gründen der größeren Robustheit gegenüber schlechten Näherungswerten auf merkmalsbasierter Zuordnung. Das Verfahren wird in (Tsingas, 1992) detailliert beschrieben: Zunächst werden durch einen Interestoperator diskrete Punkte in allen Bildern des Blocks extrahiert; danach werden aufgrund der Ähnlichkeit von Merkmalen der extrahierten Punkte bildpaarweise vorläufige Zuordnungen erstellt und durch eine Affintransformation mit robuster Ausgleichung verifiziert; schließlich erfolgt die Mehrbildzuordnung, wobei ein Modell der Graphentheorie und Methoden der binären Programmierung zur Detektion von fehlerhaften Zuordnungen und zur Lösung von Mehrdeutigkeiten verwendet werden. Zur sukzessiven Verbesserung von Näherungswerten wird das Verfahren auf drei Pyramidenebenen angewandt. Der Effekt der geringeren Lokalisierungsgenauigkeit merkmalsbasierter Verfahren im Vergleich zu flächenbasierten Verfahren - als Erfahrungswerte für gescannte Luftbilder werden z.B. in (Ackermann, 1994) ca. 0.3-0.4 Pixel gegenüber 0.1 Pixel angegeben - auf die Genauigkeit der Orientie-

rungsparameter wird dabei zumindest teilweise durch eine hohe Anzahl von Verknüpfungspunkten kompensiert. Optional ist natürlich auch eine zweistufige Vorgehensweise denkbar, bei der zunächst eine Zuordnung im merkmalsbasierten Verfahren durchgeführt wird, welche dann in einem zweiten Schritt durch einen flächenbasierten Ansatz verfeinert wird. Ergebnisse der Anwendung des Verfahrens auf der OEEPE-Testblock 'Forssa' werden in (Fritsch et al., 1994) gezeigt: In einem Block mit vier Streifen zu je sieben Bildern ergaben sich im Mittel 272 Verknüpfungspunkte pro Bild; in 6% der Überlappungsgebiete (größtenteils Wald- oder Siedlungsgebiete) wurde manuelle Interaktion des Operateurs notwendig; der Gewichtseinheitsfehler der Bündelblockausgleichung lag bei 0.4 Pixel.

Eine ähnliche Vorgehensweise, bei welcher nach einer vorläufigen bildpaarweisen Zuordnung von Gruppen von Verknüpfungspunkten in den Regionen der Gruberpunkte über heuristische Verfahren mehrfach verknüpfte Punkte gesucht werden, welche anschließend über robuste Schätzer in der Bündelblockausgleichung bereinigt werden, wird in (Krzystek et al., 1995) gezeigt; eventuell vorhandene GPS/INS Information oder ein gegebenes grobes DTM können zur Stützung des Prozesses herangezogen werden. Auch hier ist eine optionale Verfeinerung durch Least Squares Matching auf der feinsten Pyramidenebene vorgesehen; aufgrund der hohen Redundanz sind die Standardabweichungen der Orientierungsparameter in praktischen Anwendungen mit 30µm-Bildmaterial mit einer Auswertung am analytischen Plotter vergleichbar (Krzystek et al., 1996).

Auch der in (Braun et al., 1996) gezeigte Ansatz beruht auf merkmalsbasierter Zuordnung, welche allerdings als nachträglich ausgedünnte Merkmalsverfolgung im Bildraum realisiert wurde und ebenfalls durch einen flächenbasiertes Verfahren verfeinert wird. Verbleibende grobe Fehler (Braun et al. berichten eine Fehlerrate von 4%) werden auch hier durch robuste Schätzer in der Bündelblockausgleichung eliminiert.

- HATS (Helava automated triangulation system) basiert auf der Definition eines regelmäßigen Musters von üblicherweise 3x3 oder 3x5 Verknüpfungspunkten, welche in einem flächenbasierten Ansatz im Pyramidenverfahren zugeordnet werden; die Redundanz ist hier somit wesentlich kleiner als bei den o.g. Ansätzen. (DeVenecia et al., 1996) erzielten in praktischen Anwendungen Erfolgsraten von 79-94%; (Kersten/O'Sullivan, 1996) berichten Erfolgsraten von 71-78% und einen hohen Zeitbedarf von 20-30 Minuten pro Bild. Damit kann das Paket kaum als automatische, sondern eher als teil-automatisierte Aerotriangulation bezeichnet werden. Der Gewichtseinheitsfehler der Bündelblockausgleichung lag bei (Kersten/O'Sullivan, 1996) bei etwa 0.4 Pixel.
- Auf der Zuordnung linearer oder flächenhafter Elemente sowie auf relationalen Verfahren basierende automatische Orientierungsverfahren werden in (Förstner, 1995) diskutiert, können aber noch nicht als anwendungsreif gelten. Ein hybrides Verfahren, welches zunächst auf der obersten Pyramidenstufe extrahierte Kanten merkmalsgestützt zuordnet, dann anhand charakteristischer Punkte auf diesen Linien Bildpaare relativ orientiert und schließlich im so generierten Blocksystem Verknüpfungspunkte in einem flächenbasierten Ansatz identifiziert und zuordnet, beschreibt (Schenk, 1995).

Vorteilhaft im Vergleich zur manuellen Aerotriangulation am analytischen Auswertegerät ist in der automatischen Aerotriangulation allgemein die Genauigkeitssteigerung durch die höhere Redundanz sowie die Objektivierung der Punktübertragung in Bereichen von Mehrfachüberdeckung im Streifen und zwischen Streifen, welche letztlich auch ein Potential der Genauigkeitssteigerung beinhaltet.

Die oben gezeigten Ansätze stellen allerdings streng genommen keine Mehrbildtechniken im Sinne dieser Arbeit dar, weil der Erfolg oder die Anwendbarkeit der Methoden nicht von einer Mindestzahl von Bildern größer als zwei abhängt; aus diesem Grunde sollen sie hier nicht detaillierter diskutiert werden.

Generell können Luftbildaufnahmen aus zwei Gründen als für die automatische Orientierung relativ gutmütig bezeichnet werden: Das Objekt Erdoberfläche weist einen weitgehend kontinuierlichen Verlauf auf, Verdeckungen und Diskontinuitäten treten - abgesehen von vergleichsweise kleinen Objekten wie Gebäuden und Bäumen - nur selten auf. Zudem sind Luftbildverbände meist durch eine regelmäßige Anordnung der Projektionszentren und weitgehend parallele Aufnahmeachsen gekennzeichnet; die Parameter der Flugplanung sind bekannt, was die Suche nach korrespondierenden Punkten wesentlich erleichtert. Weitere Vereinfachungen ergeben sich bei der optionalen Verwendung von Kamerastabilisierungstechniken und Navigationsdaten, welche heute in der Lage sind, Projektionszentren mit Subdezimetergenauigkeit zu bestimmen.

3.3.2. Automatische Verfahren in Nahbereichsanwendungen

Dagegen müssen Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie im Hinblick auf eine automatische Orientierung als deutlich kritischer gelten. Wesentlich flexiblere Aufnahmeanordnungen mit häufig starker Konvergenz, uneinheitlicher Rotation der Kameras und ungleichmäßiger Verteilung der Aufnahmestandorte erschweren hier die Definition von Suchstrategien nach homologen Punkten. Außerdem weisen die aufgenommenen Objekte in Nahbereichsanwendungen häufig insofern eine höhere Komplexität auf, als ihre Oberflächen starke Diskontinuitäten aufweisen (oder im Extremfall gar keine eigentliche Oberfläche existiert), was flächenbasierte Zuordnungsverfahren wenig geeignet erscheinen läßt. Die Möglichkeit der passiven automatischen Orientierung von Bildverbänden in Nahbereichsanwendungen nach den in Kapitel 3.3.1 gezeigten Ansätzen wird sich deshalb auf Ausnahmefälle beschränken.

Andererseits aber sind in der Nahbereichsphotogrammetrie aufgrund der Dimension und der besseren Zugänglichkeit der Objekte aktive Verfahren im Sinne ingenieurmäßiger Vorgehensweisen sehr verbreitet. Als Beispiele sind hier die Signalisierung zu messender Punkte durch retroreflektierende Zielmarken bei Anwendungen in der industriellen 3-D Koordinatenmeßtechnik oder die Verwendung von strukturiertem Licht (Kapitel 5) zu nennen. Diese aktiven Methoden lassen sich in einer Weise erweitern, daß eine automatische relative und auch absolute Orientierung ermöglicht wird. Diese Erweiterungen können grob in zwei Kategorien unterteilen werden, welche auf der Verwendung von codierten Zielmarken und auf Verfahren der sequentielle Signalisierung basieren. Diese Techniken sind geeignet, den allgemeinen Meßprozess, der durch die Detektion, Lokalisation, Identifikation und Zuordnung von Objekten im Bildraum gegeben ist, wesentlich zu erleichtern. Sie bedingen jedoch den Einsatz von aktiven Methoden und beschränken sich damit bis auf Ausnahmefälle auf Nahbereichsanwendungen. Die Verwendung von codierten Zielmarken (z.B. van den Heuvel/Kroon 1992, Niederöst/Maas 1997) erlaubt eine vollautomatische Messung, Identifikation und damit auch Zuordnung von Punkten; sie ist jedoch unabhängig von der Anzahl verwendeter Bilder und soll daher hier nicht weiter diskutiert werden. Die sequentielle Signalisierung basiert dagegen auf der Akquisition einer Mindestzahl von mehr als zwei Bildern mit einem aus mindestens zwei Kameras bestehenden Meßsystem und soll daher im Folgenden näher beschrieben werden. Dabei beschränkt sich diese Arbeit auf die Identifikation und Zuordnung von Objekten im Bildraum.

Für die Bestimmung von Näherungswerten sei auf die Literatur verwiesen (z.B. Fellbaum/Godding 1995, Kruck/Trippler 1995, Niini 1994), und auch auf die sensorgestützte Bestimmung von Orientierungselementen mittels GPS- oder Trägheitsnavigationstechniken soll hier nicht weiter eingegangen werden.

3.3.2.1. Sequentielle Signalisierung

Die Aufgabe der relativen Orientierung läßt sich darauf reduzieren, daß Strahlenschnitte an einer Anzahl von Punkten im Objektraum hergestellt werden müssen. Bei statisch angeordneten Kameras, wie man sie beispielsweise in Mehrkamarasystemen zur photogrammetrischen Überwachung dynamischer Prozesse findet, kann dies auch sequentiell erfolgen. Eine interessante Möglichkeit zur automatischen relativen Orientierung von zwei oder mehr Kameras stellt somit eine sequentielle Signalisierung dar, bei welcher in Bildsequenzen aller beteiligten Kameras nur je ein Punkt pro Bild erkennbar wird, wodurch sich die Aufgabe der Bildzuordnung von selbst löst. Diese Vorgehensweise wird durch die Eignung von Halbleiterkameras zur Akquisition von Bildsequenzen und Echtzeitverarbeitung optimal unterstützt. Zur praktischen Realisierung der sequentiellen Signalisierung bieten sich verschiedene Optionen an:

- Projektion eines Einzelpunktes mittels eines in zwei Richtungen ablenkbaren Laserstrahles.
- Sequentielles Schalten aktiver Zielmarken (z.B. Leuchtdioden).
- Bewegung eines einzelnen Objektes (z.B. retroreflektierende Zielmarke oder Leuchtdiode) durch den Objektraum.

Ein bestechender Vorteil dieser Methoden ist ihre Simplizität hinsichtlich der Zuordnung im nicht-orientierten System: Die Aufgabe der Zuordnung wird ersetzt durch die Erkennung eines eindeutig markierten Punktes in allen Bildern oder auf eine Punktverfolgung in den Bildsequenzen der beteiligten Kameras. Ein Nachteil ist jedoch die eingeschränkte Eignung für die photogrammetrische Selbstkalibrierung, welche bei fehlender Passpunktinformation im Objektraum in der Regel mehrere Aufnahmen eines statischen Punktfeldes mit derselben Kamera unter verschiedenen Orientierungen bedingt (vgl. Kapitel 3.2.1.3); diese Vorgehensweise ist hier vor allem bei der sehr flexiblen Methode des bewegten Einzelpunktes in Ermangelung eines statischen Punktfeldes nicht möglich. Eine zumindest teilweise Vorkalibrierung der Kameras ist deshalb bei dieser Vorgehensweise unumgänglich. Außerdem erlauben die Methoden natürlich nur die relative Orientierung; eine automatische absolute Orientierung kann - falls in der Anwendung verlangt - beispielsweise durch die Verwendung von codierte Zielmarken ermöglicht werden.

3.3.2.2. Hybride Ansätze

Als hybride Methode, die eine Mischung aus sequentieller Signalisierung und bekannter Objektanordnung darstellt, kann die Verwendung eines Maßstabes bekannter Länge mit zwei signalisierten Punkten angesehen werden, welcher sequentiell an eine Reihe von Positionen und Orientierungen in den Objektraum bewegt wird. Hier ist die Aufgabe der Punktidentifizierung und -zuordnung zwar nicht mehr trivial, kann jedoch durch Vorgaben für die Orientierungen der Kameras und des Maßstabes - welche sich im Wesentlichen auf die Vermeidung von 180°-Rotationen reduzieren lassen - leicht gelöst werden. Eine eindeutige Punktidentifizierbarkeit läßt sich zudem leicht durch die asymmetrische Anordnung eines dritten Punktes (wie in Abb. 28 gezeigt) erreichen. An jeder Position des Stabes wird mit jeder der zu kalibrierenden Kameras eine Aufnahme gemacht. Durch

geeignete Signalisierung (z.B. mit retroreflektierenden Zielmarken, Leuchtdioden, konzentrischen Kreisen oder kodierten Zielmarken) kann die Detektion und Identifikation dieser Marken im Bildraum dabei wesentlich vereinfacht werden.

Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der in Kapitel 3.3.2.1 gezeigten sequentiellen Einzelpunktorientierung ist eine wesentlich verbesserte Maßstabskontrolle in der Bündelblockausgleichung durch Einführung der bekannten Länge des Referenzstabes als zusätzliche geodätische Beobachtung, was vor allem auch bessere Möglichkeiten der kompletten Kamerakalibrierung mit sich bringt. Der Vorteil gegenüber den in Kapitel 3.2.1.3 diskutierten Verfahren der Simultankalibrierung anhand mehrerer Aufnahmen einer statischen Punktconfiguration ist neben der vollen Automatisierung des Orientierungs- und Kalibrierungsprozesses die Vermeidung der Installation eines temporär stabilen Punktfeldes sowie die Tatsache, daß jede Kamera nur einmal aufgestellt werden muß.

In (Heikkilä, 1990) wird anhand von Simulationen gezeigt, daß eine lediglich auf Strahlenschnitten an 141 Punkten im Objektraum basierende sequentielle Kalibrierung (Kap. 3.3.2.1) eines Vierkamerasytems nicht in der Lage ist, die innere Orientierung zu bestimmen, während durch die zusätzliche Einführung von 38 Distanzbeobachtungen die Bestimmung aller 10 Zusatzparameter (vgl. Kap. 3.2.1) ermöglicht wird. In weiteren Simulationen wird - als relativ schwaches Kriterium - die Abhängigkeit der Kondition des Normalgleichungssystems von der Anzahl der Distanzbeobachtungen und der Anzahl der Kameras analysiert, wobei sich für drei und vier Kameras nahezu identische Resultate ergeben, während sich ein Zweikamerasystem als unzureichend für eine vollständige Kalibrierung erwies.

In (Maas, 1996b) wird eine Anwendung des Verfahrens zur Kalibrierung von drei Sony XC77 Kameras in einer Pilotstudie zur Roboterkalibrierung beschrieben. Durch den zu kalibrierenden Roboter läßt sich dabei der Stab leicht nach einem vorgegebenen Schema durch den Objektraum bewegen (Abb. 27), wobei aufgrund der Sollwerte für die - im Rahmen der Messung zu bestimmenden - Roboterparameter gleichzeitig gute Näherungswerte vorliegen. In der beschriebenen Anwendung wurde an 27 verschiedenen Positionen und Orientierungen des Referenzstabes je ein Bildtripel aufgenommen, wodurch eine komplette Orientierung und Kalibrierung der drei Kameras ermöglicht wurde.



Abb. 27: Referenzstab zur Maßstabsdefinition bei der Selbstkalibrierung eines photogrammetrischen Systems zur Roboterkalibrierung (Maas, 1996b)

Beispiele für die Anwendung eines bewegten Referenzstabes zur Kameraorientierung in kommerziellen Systemen sind Zweikamerasysteme der Firma Metronor (Pettersen, 1992) und Mehrkamera-Bewegungsanalysesysteme der Firma Motion Analysis Corp. (Abb. 28). Im bereits in Kapitel 3.2.1.1 erwähnten Metronor-System wird dabei aufgrund der vorgegebenen Laborkalibrierung nur die äußere Orientierung der zwei Kameras bestimmt, während bei Motion Analysis die komplette Orientierung und Kalibrierung von bis zu 16 Kameras vollautomatisch bestimmt wird (Maas, 1995),

wobei vorab Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung aus Aufnahmen einer festen Punkt-konfiguration (welche aus nur 11 Punkten besteht und nur etwa $\frac{1}{10}$ der Ausdehnung des Objekt-raumes abdecken muß) via DLT bestimmt werden.

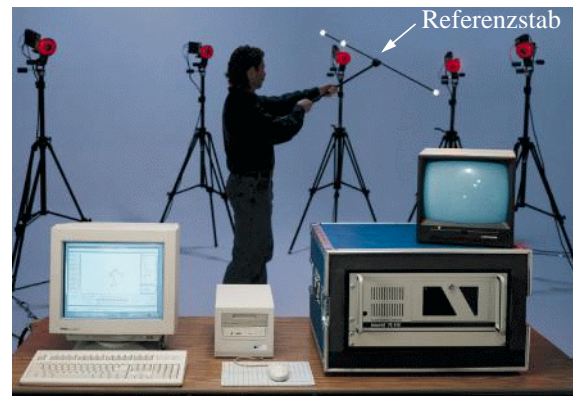


Abb. 28: Mehrkamera-Bewegungsanalysesystem, Referenzstab (Motion Analysis Corp.)

3.3.2.3. Diskussion

Auch wenn die vollautomatische Orientierung von Bildverbänden in komplexen Anwendungen der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie zur Zeit bei weitem noch nicht als gelöst angesehen werden kann, so ist doch bereits eine Reihe von aktiven Verfahren verfügbar, welche gute Möglichkeiten zur automatischen relativen und auch absoluten Orientierung bieten. Die Tatsache, daß alle diese Methoden in irgendeiner Form auf aktiver Signalisation basieren, kann in Ingenieurprojekten der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie in den meisten Fällen akzeptiert werden. Die Anwendung passiver Verfahren zur vollautomatischen Orientierung erscheint dagegen in Nahbereichsanwendungen mit häufig sehr komplexen Objekten und unregelmäßigen Netzgeometrien deutlich kritischer, und die sensorgestützte Bestimmung von Orientierungselementen wird häufig aus Gründen der Zugänglichkeit der Kamerastationen oder auch aus Kostengründen unpraktikabel sein.

3.4. Linienphotogrammetrie

Alle im Vorigen in diesem Kapitel gemachten Aussagen bezüglich Orientierung und Kalibrierung beziehen sich auf die Messung und Zuordnung von diskreten Punkten bzw. punktförmigen Objekten. Im Gegensatz dazu beschäftigt sich die Linienphotogrammetrie mit der Orientierung anhand von im Bildraum extrahierten linienförmigen Objekten. Dabei liegen die Linien in vielen Fällen nicht in Form von Anfangs- und Endpunkt oder als Folge diskreter Punkte vor, sondern als parametrische Kurvenbeschreibungen, auf welchen in der Regel weder Anfangs- und Endpunkt noch sonstige diskrete Punkte bekannt sind. Die Orientierung geschieht also über homologe Linien, auf denen keine homologen Punkte gegeben sind. Im einfachsten (und für die Praxis relevantesten) Fall handelt es sich bei den Linien um Geraden, welche beispielsweise durch die Hough-Transformation extrahiert wurden (Illingworth/Kittler, 1988).

Eine Gerade kann im Bildraum durch zwei Parameter (Achsenabschnitt und Steigung oder zwei Achsenabschnitte) beschrieben werden; im Objektraum sind zur Beschreibung einer Geraden vier Parameter (zwei Projektionen von Achsenabschnitten und zwei Steigungen oder vier Koordinaten der Schnitte mit zwei Koordinatenebenen) notwendig. Im Gegensatz zu einem diskreten Punkt, welcher mit je zwei Beobachtungen im Bildraum und drei Unbekannten im Objektraum eine redundante Information zur relativen Orientierung eines Bildpaares beisteuert, leistet eine in zwei Bildern gemessene Gerade also keinen Beitrag zur Orientierung eines Bildpaares (vgl. auch Kapitel 2.8). Erst die Messung derselben Geraden in einem dritten Bild gibt einen Beitrag zur Orientierung des Bildtripels: bei elf Unbekannten der relativen Orientierung eines Bildtripels und einer Redundanz von zwei für jede im Bildtripel gemessene Gerade sind sechs Geraden für die relative Orientierung des Bildtripels notwendig. Somit ist die Linienphotogrammetrie mit Geraden als Mehrbildtechnik im Sinne dieser Arbeit anzusehen.

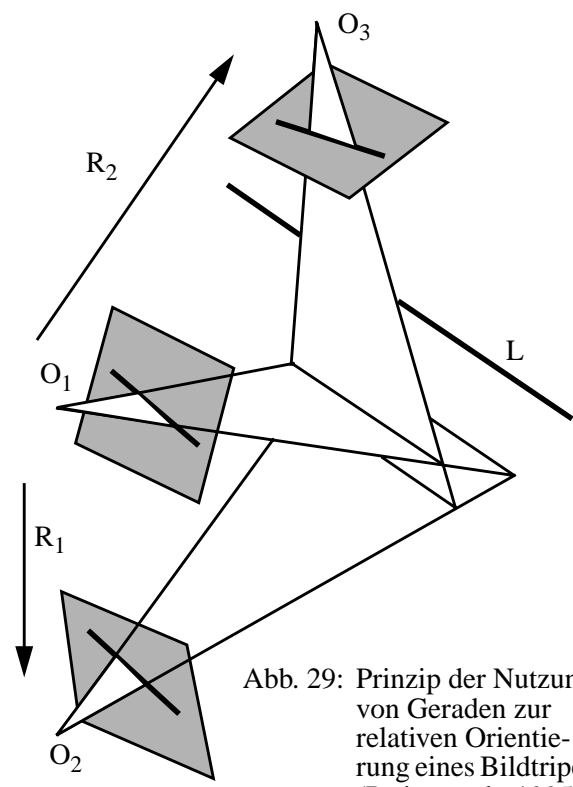


Abb. 29: Prinzip der Nutzung von Geraden zur relativen Orientierung eines Bildtripels (Patias et al., 1995)

Die Betrachtungen hinsichtlich der relativen Orientierung anhand von Geraden sind keineswegs neu, sondern gehen schon auf Arbeiten von (Finsterwalder, 1937) zurück. In der digitalen Photogrammetrie mit vielfältigen Möglichkeiten der Extraktion von Linien in digitalen Bildern erhält sie jedoch erstmals auch praktische Relevanz. In (Finsterwalder, 1941) werden auch schon unbestimmte Konfigurationen identifiziert, welche auftreten, wenn bei Kollinearität der drei Projektionszentren eine der sechs Geraden der Minimalkonfiguration koplanar mit der Verbindungslinie der Projektionszentren ist, oder wenn zwei der sechs Geraden der Minimalkonfiguration koplanar sind, was insbesondere bei Luftbildanwendungen über ebenem Gelände der Fall sein wird. Weitere unbestimmte oder teilweise unbestimmte Fälle werden in (Patias et al., 1995) beschrieben. Eine deutliche Verbesserung der Standardabweichungen von aus der Zuordnung von Linien erhaltenen Orientierungsparametern durch die Einführung von Linienschnittbedingungen im Objektraum zeigt (Zielinski, 1992). Für kreisförmige Objekte wird in (Strunz, 1992 und 1993) gezeigt, daß die Messung von zwei Kreisen, welche (allgemein als Ellipsen) in zwei Bildern abgebildet werden, für die relative Orientierung ausreicht; die Standardabweichungen der Elemente der relativen Orientierung eines Bildpaares anhand von kreisförmigen Elementen werden im Vergleich zur Orientierung anhand von Punkten in (Strunz, 1992) analysiert, wobei sich deutlich bessere Ergebnisse für die Orientierung anhand von Punkten zeigen.

Das Problem der Extraktion von Linien und der Herstellung von Korrespondenzen in mehreren nicht orientierten Bildern analog zu der in Kapitel 3.3.2 angesprochenen Problematik bleibt bei diesen Betrachtungen selbstverständlich noch offen. Jedoch bietet die Benutzung von linienförmigen anstelle von punktförmigen Elementen hier grundsätzlich weitgehendere Möglichkeiten der Nutzung

von Merkmalen. Da die Notwendigkeit der Verwendung eines dritten Bildes in der digitalen Photogrammetrie im Allgemeinen nicht als Nachteil angesehen werden kann und die Möglichkeiten der Extraktion von linienförmigen Elementen bei Anwendungen ohne künstliche Signalisation häufig größer sind als die der Extraktion punktförmiger Elemente, wird die Linienphotogrammetrie in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen.

3.5. Zuverlässigkeitsaspekte

Unter Zuverlässigkeit im geodätischen Sinne versteht man die Fähigkeit eines Schätzmodells, Modellfehler aufzudecken, wobei zwischen systematischen Fehlern und groben Fehlern unterschieden wird. Anwender photogrammetrischer Systeme verstehen den Begriff der Zuverlässigkeit dagegen eher im Hinblick auf die Qualität eines Endproduktes - unabhängig davon, ob eine Bereinigung von groben Fehlern anhand von statistische Analysen des Datenmaterials oder durch globale Annahmen über das Objekt stattgefunden hat. Der Aspekt der Zuverlässigkeit in der photogrammetrischen Modellblockausgleichung (Förstner 1978) und der Bündelblockausgleichung in Luftbildanwendungen (Grün 1978a, 1986) und Nahbereichsanwendungen (Grün, 1978b) ist in der Literatur bereits eingehend behandelt worden. Neue Aspekte ergeben sich in der digitalen Photogrammetrie bezüglich der Robustheit vollautomatischer Meßsysteme, welche zwar andere typische Fehlerquellen aufweisen als ein Operateur, aber keineswegs per se als zuverlässiger gelten können. Einerseits bedürfen vollautomatische Systeme interner Kontrollmöglichkeiten, um als zuverlässig angesehen werden zu können, andererseits bieten Mehrbildtechniken der digitalen Photogrammetrie vielfältige Möglichkeiten der Steigerung der Redundanz im Sinne der Detektierbarkeit und Lokalisierbarkeit grober Fehler.

Ein einfaches, aber dennoch aussagekräftiges Maß für die innere Zuverlässigkeit ergibt sich aus der Gegenüberstellung der Kovarianzmatrizen der Residuen für verschiedene Kamerakonfigurationen, aus der sich z.B. nach (Baarda, 1968) der Grenzwert für einen gerade noch erkennbaren groben Fehler ermitteln läßt:

$$Q_{vv} = P^{-1} - A Q_{xx} A^T \quad (8)$$

Für den räumlichen Vorwärtsschnitt eines Punktes im orientierten Bildverband erhält man in Abhängigkeit von der Kamera- bzw. Aufnahmeconfiguration folgende Q_{vv} -Matrizen:

- Zweikamerakonfiguration mit Basis in Richtung der x' -Bildkoordinatenachse

$$Q_{vv} = \begin{vmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.500 & 0.000 & -0.500 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & -0.500 & 0.000 & 0.500 \end{vmatrix}$$

- Dreikamerakonfiguration in symmetrischer kollinear Anordnung mit Basis in Richtung der x' -Bildkoordinatenachse

$$Q_{vv} = \begin{vmatrix} 0.167 & 0.000 & -0.333 & 0.000 & 0.167 & 0.000 \\ 0.000 & 0.667 & 0.000 & -0.333 & -0.000 & -0.333 \\ -0.333 & 0.000 & 0.667 & 0.000 & -0.333 & 0.000 \\ 0.000 & -0.333 & 0.000 & 0.667 & -0.000 & -0.333 \\ 0.167 & 0.000 & -0.333 & 0.000 & 0.167 & 0.000 \\ 0.000 & -0.333 & 0.000 & -0.333 & -0.000 & 0.667 \end{vmatrix}$$

- Dreikamerakonfiguration mit Anordnung der Basen im gleichseitigen Dreieck

$$Q_{vv} = \begin{vmatrix} 0.416 & -0.144 & -0.083 & -0.144 & -0.333 & 0.289 \\ -0.144 & 0.583 & 0.144 & -0.417 & -0.000 & -0.167 \\ -0.083 & 0.144 & 0.416 & 0.144 & -0.333 & -0.289 \\ -0.144 & -0.417 & 0.144 & 0.583 & -0.000 & -0.167 \\ -0.333 & -0.000 & -0.333 & -0.000 & 0.667 & 0.000 \\ 0.289 & -0.167 & -0.289 & -0.167 & 0.000 & 0.334 \end{vmatrix}$$

- Vierkamerakonfiguration mit Anordnung der Basen im Quadrat

$$Q_{vv} = \begin{vmatrix} 0.625 & -0.125 & -0.125 & -0.125 & -0.375 & 0.125 & -0.125 & 0.125 \\ -0.125 & 0.625 & 0.125 & -0.375 & -0.125 & -0.125 & 0.125 & -0.125 \\ -0.125 & 0.125 & 0.625 & 0.125 & -0.125 & -0.125 & -0.375 & -0.125 \\ -0.125 & -0.375 & 0.125 & 0.625 & -0.125 & -0.125 & 0.125 & -0.125 \\ -0.375 & -0.125 & -0.125 & -0.125 & 0.625 & 0.125 & -0.125 & 0.125 \\ 0.125 & -0.125 & -0.125 & -0.125 & 0.125 & 0.625 & -0.125 & -0.375 \\ -0.125 & 0.125 & -0.375 & 0.125 & -0.125 & -0.125 & 0.625 & -0.125 \\ 0.125 & -0.125 & -0.125 & -0.125 & 0.125 & -0.375 & -0.125 & 0.625 \end{vmatrix}$$

Unter dem Aspekt der Zuverlässigkeit können pauschal folgende Anforderungen an die Q_{vv} -Matrix formuliert werden:

- Zur Detektierbarkeit grober Fehler sollen auf der Hauptdiagonalen der Q_{vv} -Matrix möglichst große Elemente stehen.
- Zur Lokalisierbarkeit grober Fehler sollen möglichst kleine Elemente außerhalb der Hauptdiagonalen stehen, um geringe Korrelationen der Residuen $Q_{vv_{ij}} / (\sqrt{Q_{vv_{ii}}} \cdot \sqrt{Q_{vv_{jj}}})$ zu garantieren.

Aus dem Vergleich der Q_{vv} -Matrizen für die oben genannten Konfigurationen lassen sich folgende Aussagen über die Zuverlässigkeit ableiten:

- In einer binokularen Konfiguration ist keine Detektierbarkeit grober Fehler in Kernlinienrichtung gegeben; Lokalisierbarkeit grober Fehler ist überhaupt nicht gegeben.
- In einer trinokularen Konfiguration mit kollinearere Anordnung der Projektionszentren parallel zur x' -Bildkoordinatenrichtung wird die Detektierbarkeit grober Fehler in y' -Bildkoordinatenrichtung verbessert; in x' -Bildkoordinatenrichtung ist nur für die Messung im mittleren Bild eine gute Detektierbarkeit gegeben, während die Detektierbarkeit für die beiden äußeren Bilder ziemlich schwach ist. Lokalisierbarkeit grober Fehler ist nur in y' -Bildkoordinatenrichtung gegeben, da z.B. $Q_{vv_{13}} / (\sqrt{Q_{vv_{11}}} \cdot \sqrt{Q_{vv_{33}}}) = Q_{vv_{35}} / (\sqrt{Q_{vv_{33}}} \cdot \sqrt{Q_{vv_{55}}}) = -1$ ist.
- Etwas homogenere Verhältnisse erhält man für trinokulare Systeme mit Anordnung der Projektionszentren im gleichseitigen Dreieck: Hier ist Detektierbarkeit und Lokalisierbarkeit grober Fehler für alle Bildkoordinatenmessungen gegeben; allerdings ist die Lokalisierbarkeit auch hier teilweise schwach.
- Gute Detektierbarkeit und Lokalisierbarkeit grober Fehler findet man bei der Vierkamerakonfiguration mit Anordnung der Projektionszentren im Quadrat.

Volle Detektierbarkeit und Lokalisierbarkeit grober Fehler ist also erst in Verbänden ab vier Bildern gegeben. Meßfehler in Richtung der Kernlinie können dagegen bei der Auswertung eines Stereopaars weder detektiert noch lokalisiert werden. Während man dies beispielsweise bei der Meßwert- erfassung für digitale Geländemodelle am analytischen Plotter zwangsläufig in Kauf nimmt und

durch eine eingehende visuelle Analyse durch den Operateur zu kompensieren versucht, ergeben sich hier in der digitalen Photogrammetrie durch die Anwendung von Mehrbildtechniken in automatischen Auswerteverfahren gänzlich neue Möglichkeiten. Umso erstaunlicher ist, daß beispielsweise kommerzielle DTM-Pakete auf digitalen photogrammetrischen Stationen heute ausschließlich mit Zweibildtechniken arbeiten. Hier wird das Potential der digitalen Photogrammetrie bei weitem noch nicht ausgenutzt.

Kapitel 4: Bildsequenzen

Die Akquisition und automatische Auswertung von Bildfolgen hat in vielen Bereichen von Computer Vision, Machine Vision und Robot Vision seit den Anfängen eine bedeutende Rolle gespielt. Auch in klassisch photogrammetrischen Bereichen wie z.B. der automatisierten Aerotriangulation, Deformationsmessungen oder dreidimensionalen Messungen in dynamischen Prozessen kommen Bildsequenzen zur Anwendung.

Während ein Einzelbild als

$$I(x, y)$$

mit diskreten, durch das Sensorformat beschränkten Pixelkoordinaten (x, y) dargestellt werden kann und Mehrbildverbände in der Form

$$I_n(x, y) \quad \text{mit} \quad n = 1 \dots N$$

und endlichem N vorliegen, kann eine Bildfolge dreidimensional als

$$I(x, y, t)$$

definiert werden, wobei die Zeitkoordinate t diskret (mit durch die Bildrate der Kamera oder die Anforderungen der Anwendung vorgegebenen Diskretisierungsintervall), aber nicht notwendigerweise endlich ist. Die in der Computer Vision Literatur teilweise zu findende Unterscheidung zwischen kontinuierlichen und diskreten Bildfolgen erscheint aus praktischer Sicht irrelevant, da aufgrund der Akquisitionstechnik jedes Bild einer Bildfolge in der Bildebene und in der Zeit diskret vorliegen wird; Langzeitbelichtungen können im Allgemeinen nicht als Bildfolgen angesehen werden. Bildsequenzen unterscheiden sich von den meisten anderen in dieser Arbeit diskutierten Mehrbildtechniken außerdem durch ein regelmäßiges Zeit- und/oder Ortsraster bei der Akquisition. Auf dieser Regelmäßigkeit beruht auch die häufig zu findende Darstellung von Bildsequenzen als Bildblock mit der Zeit in der dritten Dimension (z.B. Baker 1987, Jähne 1993). Ein weiteres Charakteristikum in vielen Anwendungen ist die Unmöglichkeit der Rekursion und eine Erschwerung von simultanen Lösungen in Echtzeitanwendungen, bei denen Bildsequenzen nicht oder nur in Teilen abgespeichert werden können.

Aus dem weiten Feld der Anwendungen von Bildsequenzen sollen hier nur einige Beispiele diskutiert werden. Wegen der Relevanz aus photogrammetrischer Sicht soll in diesem Kapitel vor allem auf Verfahren der passiven Navigation autonomer Roboter (Abb. 30) oder Fahrzeuge anhand einer monokularen Bildsequenz eingegangen werden. In diesem Zusammenhang kommt auch Verfahren der Online-Triangulation (Kapitel 4.2) eine grosse Bedeutung zu. Einige der in Kapitel 5 diskutierten

Verfahren basieren zwar ebenfalls auf der Gewinnung und Verarbeitung von Bildsequenzen, nehmen aber aufgrund ihrer Gemeinsamkeiten hinsichtlich des Anwendungsbereichs, der Verwendung von Beleuchtungsalgorithmen und der im Vergleich zu allgemeinen Bildsequenztechniken prinzipbedingt limitierten und vergleichsweise kleinen Anzahl von Bildern im Rahmen dieser Arbeit eine Sonderstellung ein. Verfahren der Aerotriangulation - der ältesten photogrammetrischen Anwendung von Bildfolgen - werden in Kapitel 3.3.1 behandelt. Von großer aktueller Bedeutung hinsichtlich der Anwendungen in der Datenübertragungen (TV, digital video, multimedia) sind auf zeitlichen Grauwertgradienten in Bildsequenzen basierende Kompressionsverfahren wie z.B. MPEG, welche wesentlich höhere Kompressionsraten erlauben als die Komprimierung von Einzelbildern. Auch wenn diese Techniken zum Teil ansatzweise Verfahren der Bewegungsschätzung beinhalten, sollen sie jedoch wegen ihrer vergleichsweise geringen Bedeutung für technisch-wissenschaftliche Anwendungen hier nicht weiter diskutiert werden. Auch auf die sehr umfangreiche Literatur zur Erkennung, Verfolgung und Klassifikation bewegter Objekte in monokularen Bildfolgen einer stationären Kamera soll hier nicht weiter eingegangen werden.

4.1. Passive Navigation

Verfahren der automatischen Navigation autonomer Roboter oder Fahrzeuge anhand von Bildern einer mitbewegten Kamera (bzw. eines Kamerapaars oder -tripels) werden in der Literatur je nach primärer Aufgabenstellung unter Oberbegriffen wie 'passive Navigation', 'visuelle Navigation', 'Depth from Motion' oder 'Structure from Motion' behandelt. In allgemeiner Formulierung verlangen diese Aufgaben sowohl die Bestimmung der Orientierungsparameter der Kamera wie auch eine sukzessive Objektmodellierung, wobei die in Kapitel 2 und 3 angenommene und in der klassischen Photogrammetrie in den meisten Anwendungen gehandhabte Trennung zwischen Orientierung einerseits und Zuordnung und Punktbestimmung von Massenpunkten andererseits nicht mehr oder nur noch eingeschränkt möglich ist. Andererseits verringert sich die Komplexität der Aufgabe bei genügend hoher zeitlicher Auflösung der Datenerfassung, wenn sich die Kamera zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen auf einer differenzierbaren Bahn nur geringfügig bewegt, wodurch Parallaxen und Parallaxendifferenzen beschränkt werden und sich die Aufgabe der Herstellung von Korrespondenzen auf eine Trackingaufgabe mit beschränktem Suchbereich im Bildraum reduziert.

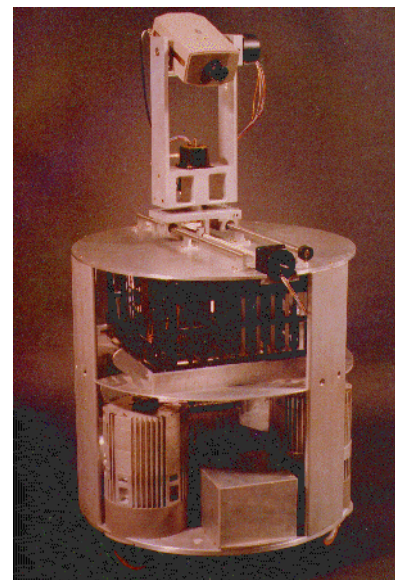


Abb. 30: Autonomer Roboter mit CCD-Kamera (Pluto, CMU)

4.1.1. Komplexitätsvergleich: passive Navigation versus automatische Aerotriangulation

Die Aufgabe bei der passiven Navigation anhand einer monokularen Bildsequenz beinhaltet die simultane Bestimmung von Orientierungs- und Punktparametern aus Beobachtungen im Bildraum und entspricht im Prinzip weitgehend der Aufgabenstellung bei der automatischen Aerotriangulation (vgl. Kapitel 3.3.1). Genauso wie bei dieser läßt sich prinzipiell auch bei der passiven Navigation die Bewegung der Kamera und die Objektpunktinformation bis auf durch Passinformation zu bestimm-

mende Datumparameter bestimmen. Unterschiede hinsichtlich der Komplexität der Aufgabe ergeben sich in folgenden Punkten:

- Die Bildrate und damit die Überlappung aufeinanderfolgender Bilder wird bei der passiven Navigation meist größer sein als in der automatischen Aerotriangulation, wodurch die Größe der Parallaxen beschränkt wird. Dadurch vereinfacht sich die Beschaffung von Näherungswerten bei der Prädiktion von Bildkoordinaten homologer Punkte in aufeinanderfolgenden Bildern.
- Ein autonomes Vehikel bewegt sich in einer dreidimensionalen Umgebung, welche eventuell selbst auch nicht als statisch angesehen werden kann; dagegen bewegt sich die Kamera bei der automatischen Aerotriangulation über einer als weitgehend statisch anzusehenden $2^{1/2}$ -D Welt. Die im Objekt auftretenden Diskontinuitäten werden bei der passiven Navigation meist größer sein, was zu größeren zu erwartenden lokalen Parallaxendifferenzen führen wird. Bei komplexen Umgebungen sind zudem deutlich mehr Zuordnungsprobleme aufgrund von Verdeckungen zu erwarten.
- In der passiven Navigation wird die Kamera in vielen Fällen einen einzelnen, komplexen Bildstreifen mit großen Rotationen um mindestens eine Koordinatenachse aufnehmen, während in der automatischen Aerotriangulation normalerweise aus mehreren geradlinigen, parallelen Streifen bestehende Bildverbände aufgenommen werden. Die Verknüpfung und damit die Stabilität des Verbandes wird daher bei der automatischen Aerotriangulation meist homogener sein.
- Die Blickrichtung der Kamera wird bei der passiven Navigation meist der Bewegungsrichtung entsprechen, während die Kamera bei der automatischen Aerotriangulation senkrecht zur Trajektorie ausgerichtet ist.
- Zusätzliche Navigationsdaten können bei beiden Anwendungen verwendet werden. Während dies bei der automatischen Aerotriangulation GPS Messungen zur Bestimmung der Projektionszentren und eventuell noch Trägheitsnavigationsdaten sein werden, kommen in der autonomen Navigation neben Trägheitsnavigationssystemen vor allem eindimensionale Geschwindigkeitsmesssysteme und elektronische Neigungsmesser zum Einsatz. Auch die Kombination mit aktiven Techniken wie beispielsweise Ultraschall, Radar, Laserscannern oder taktilen Sensoren ist in der Navigation weit verbreitet. Unter dem Aspekt der Fehlerfortpflanzung in langen Sequenzen wirken sich die absoluten GPS-Messungen am günstigsten auf die Lösung aus.
- Die Notwendigkeit gelegentlicher Interaktionen eines Operateurs in Problemfällen kann in der automatischen Aerotriangulation akzeptiert werden (und tritt in kommerziellen Systemen noch recht häufig auf, vgl. Kapitel 3.3.1); in der passiven Navigation hingegen wird eine volle Automation gefordert.
- Für die praktische Anwendung der passiven Navigation ist eine Echtzeitauswertung unumgänglich, was starke Anforderungen an den Rechenzeitbedarf von Algorithmen stellt; die automatische Aerotriangulation erfolgt dagegen bislang in aller Regel off-line nach Aufnahme und Scannen der Bilddaten. Dementsprechend erfolgt auch die Parameterschätzung in der automatischen Aerotriangulation off-line als Simultanlösung, während in den meisten Aufgaben der passiven Navigation Orientierungs- und Strukturparameter on-line für Entscheidungen hinsichtlich weiterer Aktionen benötigt werden, was die Anwendung sequentieller Schätzverfahren bedingt.
- Die maximale Länge der Bildsequenzen ist in der passiven Navigation im Prinzip unbegrenzt, während in der automatischen Aerotriangulation selten mehr als einige hundert Bilder trianguliert werden.

-
- Während in der automatischen Aerotriangulation extrem große Bildformate zu bearbeiten sind, werden in der passiven Navigation meist CCD-Kameras mit vergleichsweise kleinen Bildformaten nach der Videonorm verwendet.

Insgesamt ist die Aufgabenstellung in der passiven Navigation in allgemeinen Anwendungen im Vergleich zur automatischen Aerotriangulation als eher komplexer und aufgrund des weiten Anwendungsspektrums auch als heterogener anzusehen. Da eine vollständige Abhandlung dieses Themenbereichs den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen würde, soll hier lediglich auf einige Grundlagen der geometrischen und statistischen Modellierung eingegangen werden. Dazu werden in Kapitel 4.1.3 typische Anwendungen diskutiert.

4.1.2. Modelle der passiven Navigation

Grundlage für die algorithmische Behandlung von Aufgaben der passiven Navigation ist die Aufstellung von Modellen für das Objekt, die Bewegung des Sensors, den Sensor selbst und die Art der Beobachtungen. Zu jedem dieser Aspekte findet man in der Literatur eine große Anzahl von Publikationen, die zum Teil allgemeingültige Modellierungen ohne konkrete Anwendung zeigen, sich aber größtenteils auf an eine vorgegebene Aufgabe angepaßte Modelle spezialisieren. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten Aspekte der Modellierung gegeben werden.

4.1.2.1. Bewegungsmodelle

Das aufzustellende Bewegungsmodell enthält im Allgemeinen Annahmen über die Art der Bewegung der Kamera und die Gleichförmigkeit der Bewegung, welche beispielsweise durch Näherungswerte für Translations- und Winkelgeschwindigkeiten und Grenzwerte für Translations- und Winkelbeschleunigungen angegeben werden können. In vielen praktischen Anwendungen kann auch mit einem reduziertem Bewegungsparametersatz gearbeitet werden, indem beispielsweise nur Translationen zugelassen werden oder eine Bewegung auf einer zweidimensionalen Bezugsebene angenommen wird, welche nur zwei Translationen und eine Rotation zuläßt. Die Modelle werden häufig über einen Kalmanfilter implementiert, welcher - nach Vorgabe von Startwerten - Modelle für Prädiktion und Filterung sowie die Glättung der Trajektorie enthält. Das Ausgleichungsproblem wird damit zum dynamischen System, in dem die jeweils aktuell zu schätzenden Parameter in einem Zustandsvektor zusammengefaßt sind. Der Systemzustand des Kalmanfilters bleibt dabei auf die 12 Orientierungsparameter eines Bildpaares und die Koordinaten der momentan verfolgten Objektpunkte beschränkt (vgl. auch Kapitel 4.2). Die Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierung in nicht-linearen Modellen wird durch die Prädiktion in der Regel problemlos abgedeckt; wesentlich kritischer ist dagegen - insbesondere bei starken Rotationen - die Qualität der Näherungswerte hinsichtlich der Herstellung von Korrespondenzen zwischen aufeinanderfolgenden Bildern der Sequenz und der Punktbestimmung in nicht-linearen Modellen.

4.1.2.2. Objektmodelle

Bei der Rekonstruktion der Trajektorie des Projektionszentrums aus Beobachtungen in einer Bildsequenz fällt zwangsläufig auch eine dreidimensionale Beschreibung der Umgebung an. Je nach Anwendung kann diese Objektbeschreibung ein irrelevantes Nebenprodukt oder primäres Ziel der passiven Navigation sein. Dementsprechend wird sich der Aufwand der Objektmodellierung beträchtlich unterscheiden:

-
- Bei primärem Interesse an der Bestimmung von Bewegungsparametern wird die Modellierung sich auf die Generierung einer unstrukturierten Punktwolke geringer Dichte im Objektraum beschränken.
 - Bei Anwendungen, bei denen die Kollisionsvermeidung ohne weitere Aufgaben der Objekterkennung von primärem Interesse ist, wird man sich auf die Generierung einer dichten, unstrukturierten Tiefenkarte der Umgebung konzentrieren.
 - Steht die Objektmodellierung selbst im Mittelpunkt der Anwendung, so wird eine detaillierte Strukturierung der Umgebung notwendig. Die dazu notwendige dichte Objektbeschreibung erfolgt meist anhand extrahierter linienförmiger Merkmale oder anhand des optischen Flusses (Kapitel 4.1.2.3). Anschließend sind noch Techniken der Objekterkennung im Objekt- und/oder Bildraum notwendig.

Im Gegensatz zu den weitgehend präzifizierbaren Näherungswerten der Bewegungsparameter wird die Näherungswertbestimmung für die Punktbestimmung in nicht-linearen Modellen aufgrund der zu erwartenden Diskontinuitäten manchmal Probleme aufwerfen. Dies gilt vor allem auch hinsichtlich der Bestimmung von Tiefenkoordinaten neu detektierter Punkte bei durch eine hohe Bildrate bewirkten kurzen Basen und etwa quadratischer Zunahme der Standardabweichung der Tiefenkoordinate mit der Tiefe.

4.1.2.3. Beobachtungsmodelle

Beobachtungen in der passiven Navigation anhand einer monokularen Bildsequenz sind in die Bildebene projizierte Geschwindigkeiten, welche aufgrund der Diskretisierung auf der Zeitachse als Verschiebungsvektoren erscheinen, die sich letztlich aus Bildkoordinatendifferenzen homologer Punkte in aufeinanderfolgenden Bildern einer Bildsequenz ergeben. Die Komplexität der Zuordnung in der Bildsequenz weist dabei zwei wesentliche Unterschiede zu den in Kapitel 2 diskutierten Zuordnungsverfahren auf:

- Aufgrund der nicht bekannten Orientierung der Kamera kann keine Kernlinie berechnet werden; durch die Prädiktion der Trajektorie ergibt sich lediglich eine angenäherte Kernlinie. Dementsprechend sind auch die in Kapitel 2.4 gezeigten Verfahren der Mehrbildzuordnung mit eingeschränkten eindimensionalen Suchbereichen bei kollinearen Basiskomponenten nur begrenzt anwendbar.
- Die hohe zeitliche Auflösung bewirkt kurze Basen und limitiert so die Größe der Parallaxen und damit die Länge des zweidimensionalen Suchbereichs für homologe Punkte in der Sequenz. In vielen Fällen kann dieser auf wenige Pixel eingeschränkt werden.

Wie auch in anderen Zuordnungsaufgaben üblich, können hier flächen- und merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren unterschieden werden; letztere werden in der Computer Vision Literatur im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Bildsequenzen oft als 'token tracking' bezeichnet. Zudem wird in verschiedenen Ansätzen der optische Fluß (oder Bildfluß) als gradientenbasiertes Verfahren verwendet.

- Die Modellierung der Bewegung eines autonomen Roboters in einer statischen Umgebung anhand des optischen Flusses findet sich in (Horn, 1986). Der optische Fluss stellt in seiner Grunddefinition eine Zuordnung einzelner Pixel auf Linien gleichen Grauwerts in aufeinanderfolgenden Bildern einer Bildsequenz dar (Horn/Schunck, 1981). In dieser Form ist der optische Fluss hochgradig unterbestimmt; die Berechnung bedarf entweder zusätzlicher geometrischer Bedingungen

(z.B. in Form der Kernlinie) oder globaler Lösungen mit regularisierenden Annahmen insbesondere über die Nicht-Deformierbarkeit der Objekte in der Szene. Einschränkungen hinsichtlich der Interpretierbarkeit des optischen Flusses ergeben sich auch dadurch, daß seine Definition die Ursache der Grauwertänderung (welche z.B. auch in Änderungen der Beleuchtungsbedingungen oder Deformationen des Objekts liegen kann) nicht beinhaltet.

- Flächenhafte Korrelationsverfahren basieren im Gegensatz zum optischen Fluss auf der Zuordnung lokaler Bildbereiche mit einer Ausdehnung von mehr als einem Pixel anhand der Optimierung eines Korrelationsmaßes und können in Bildregionen geeigneter Textur eine lokale Lösung liefern. In Regionen unzureichender Textur, beispielsweise entlang von Kanten, erlauben auch sie ohne weitere Informationen oder Annahmen nur Teillösungen. Hier bietet sich zum Beispiel die Anwendung von Least-Squares-Matching an, weil es adaptiv gestaltet werden kann und neben der Bestimmung des Verschiebungsvektors im Bild auch die Analyse der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der bestimmten Parameter erlaubt.
- Als Alternative zu flächenhaften Korrelationsverfahren bietet sich auch hier als merkmalsbasierter Ansatz die Zuordnung von durch einen Interestoperator extrahierten diskreten Punkten in der Sequenz an. Den Vorteilen des größeren Konvergenzbereichs und unter Umständen geringeren Glättungseffekten stehen hier Nachteile hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit gegenüber.
- In häufig stark strukturierten Innenraumumgebungen in der passiven Navigation bietet sich oft auch die Zuordnung linienförmiger Elemente an. Im Vergleich zu punktförmigen Elementen erhöhen diese die Zuverlässigkeit vor allem durch die erheblich größeren Möglichkeiten der Charakterisierung der Merkmale; außerdem erlauben sie eine wesentlich detailliertere und effizientere Modellierung des Objektraumes in Anwendungen, bei denen die Bestimmung der Strukturparameter von primärem Interesse ist. Die meisten Anwendungen beschränken sich auf die Verwendung von Geradensegmenten, was zur Orientierung und zur zuverlässigen Zuordnung die Extraktion und Zuordnung in mindestens drei Bildern voraussetzt (vgl. Kapitel 2.8.2 und 3.4).

Ist die Aufgabe der passiven Navigation lediglich die Orientierungsbestimmung der Kamera ohne Anforderungen hinsichtlich der Modellierung oder gar Erkennung der Umgebung, so wird die aus der Bestimmung des optischen Flusses erhaltene Information häufig viel zu dicht sein und einen unnötig hohen Rechenaufwand bedingen. In solchen Fällen ist die zuverlässige Verfolgung weniger Einzelpunkte vorzuziehen. Generell ist zur Verbesserung der Stabilität von Orientierung und Punktbestimmung die Verfolgung von Punkten oder Merkmalen durch möglichst viele aufeinanderfolgende Bilder anzustreben.

4.1.2.4. Sensormodelle

Das Sensormodell der autonomen Navigation anhand monokularer Bildsequenzen wird in den meisten Fällen auf der Annahme eines zentralperspektiven flächenhaften Halbleitersensors beruhen, für den je nach Genauigkeitsanforderungen die in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie üblichen Zusatzparametersätze angesetzt werden können. Bei den meisten in der Literatur publizierten Anwendungen wird von einem vorkalibrierten Sensor mit stabilem Sensormodell ausgegangen. Entsprechend den in Kapitel 3.2.1 diskutierten Verfahren der Selbstkalibrierung ist natürlich auch eine Erweiterung der Modellierung hinsichtlich einer Simultankalibrierung der Kamera möglich. Viele Anwendungen der passiven Navigation gehen über die Akquisition einer Monosequenz hinaus,

indem simultan Bildpaare oder -tripel aufgenommen werden (Abb. 31). Dies erlaubt prinzipiell vor allem eine wesentlich bessere Maßstabskontrolle bei der Szenenrekonstruktion in Anwendungen mit geringer Passpunktstützung und bietet nebenbei auch noch eine höhere Redundanz für die Bewegungsschätzung. Zudem reduzieren sich auch die Ansprüche hinsichtlich der minimalen Anzahl von Verknüpfungspunkten zwischen aufeinanderfolgenden Zeitpunkten von sechs auf drei. Bei der Verwendung vorkalibrierter Mehrkammersysteme wird meist auch die als stabil angenommene relative Orientierung der Kameras zueinander Teil der Kalibrierung sein.



Abb. 31: Autonome Roboter mit binokularem Kamerasystem (Neptune, CMU) und trinokularem Kamerasystem (INRIA)

4.1.3. Beispiele praktischer Implementationen

Aus der sehr umfangreichen Literatur zur autonomen Navigation werden im folgenden einige repräsentative und im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit diskutierten Verfahren aus photogrammetrischer Sicht relevante Systeme diskutiert.

4.1.3.1. Monokulare Bildsequenzen

Die umfangreichste Abhandlung zur passiven Navigation anhand einer monokularen Bildsequenz aus photogrammetrisch-geodätischer Sichtweise findet sich in (Hahn, 1995). Hahn konzentriert sich vor dem Hintergrund der Navigation eines Straßenfahrzeugs auf die Zuordnung von durch Interestoperatoren extrahierten markanten Einzelpunkten einer als statisch angenommenen Umgebung; sein Ansatz beinhaltet die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geschätzten Bewegungs- und Strukturparameter und eine Analyse der Meßdaten im Hinblick auf grobe Fehler. Im Gegensatz zu anderen Autoren modelliert er konsequent in einem stationären, objektfesten Koordinatensystem, was im Vergleich zu einem mitbewegten kamera- bzw. fahrzeugfesten Koordinatensystem mit ständigem Datumwechsel die statistische Modellierung vereinfacht. Prädiktion und Bewegungsschätzung erfolgen simultan mit der Strukturparameterbestimmung im Kalmanfilter. Bedingt durch die typischen kurzen Basen, die Bewegung in Blickrichtung und die praktisch unbeschränkte Objektiefe ergibt sich bei der rekursiven Vorgehensweise ein Problem bei der Bestimmung der Näherungswerte von neu detektierten Verknüpfungspunkten, welches nur durch die Vorgabe von Näherungswerten

für die Projektionszentren (die bei Anwendungen in der Fahrzeugnavigation z.B. aus GPS-Beobachtungen stammen können) in einem durch vergleichsweise viele Passpunkte gestützten Netz gelöst werden kann. In einem praktischen Test erschienen die extrahierten Merkmale in minimal einem Bild und maximal 45 Bildern, wobei aufgrund der problematischen Strahlenschnitte Punkte erst nach der Detektion und Zuordnung in vier Bildern in den Kalmanfilter aufgenommen wurden. Im data-snooping im Kalmanfilter wurden 30-35% der merkmalsbasierten Zuordnungen als Ausreißer eliminiert. Das Genauigkeitsniveau ist insgesamt eher niedrig, was vor allem auf die geringe Bildmeßgenauigkeit (angegeben wird eine Standardabweichung von 1.5 Pixel) zurückzuführen ist; während die erreichte Genauigkeit der geschätzten Bewegungsparameter für viele Anwendungen in der Navigation als ausreichend angesehen werden kann, ist die Genauigkeit der Strukturparameter ungenügend.

4.1.3.2. Trinokulare Bildsequenzen

Sehr umfangreiche Entwicklungen vor allem im Bereich binokularer und trinokularer Systeme zur passiven Navigation autonomer Roboter haben in den 80er und frühen 90er Jahren am INRIA in Frankreich stattgefunden. Der von (Zhang/Faugeras, 1992a) gezeigte Ansatz zur passiven Navigation eines autonomen Roboters in Innenräumen basiert auf einem Dreikamerasystem, welches die trinokulare Zuordnung extrahierter Liniensegmente an jedem diskreten Zeitpunkt der Bildtripelsequenz erlaubt (Ayache/Lustman, 1987, vgl. auch Kapitel 2.8). Zhang/Faugeras erweitern den Ansatz der passiven Navigation hin zur Navigation eines bewegten Roboters in einer Umgebung mit mehreren unabhängig voneinander bewegten Festkörpern, welche durch die Analyse der Geschwindigkeiten von Gruppen von Merkmalen detektiert werden. Dabei ist die Tatsache, daß das trinokulare System allein schon die Bestimmung von Strukturparametern in einem lokalen System erlaubt, von entscheidender Bedeutung. Für die Prädiktion bei der Verfolgung der Liniensegmente und die Schätzung der Bewegungsparameter des Roboters wird auch hier ein Kalmanfilter verwendet. Die Prädiktion der Strukturparameter erfolgt anhand von kinematischen Modellen für die detektierten Festkörper. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei einer monokularen Bildsequenz erfolgt hier also die Schätzung von Bewegungs- und Strukturparametern wieder getrennt. Die Verknüpfung aufeinanderfolgender Bildtripel beschränkt sich auf Koordinatentransformationen, weil eine Verknüpfung über Objektpunkte im Sinne von Verknüpfungspunkten in der Bündelblockausgleichung sich aufgrund der angenommenen Bewegung im Objektraum verbietet. Die in monokularen Bildsequenz auftretenden Probleme der Bestimmung von Näherungswerten entfallen weitgehend aufgrund der begrenzten Tiefenausdehnung in Innenräumen und der bekannten Geometrie des Dreikamerasystems. In der praktischen Realisierung des Systems mit Implementation rechenzeitaufwendiger Algorithmen in Hardware wurde in der Echtzeitverarbeitung eine zeitliche Auflösung von 5Hz erreicht.

Eine Variation dieses Ansatzes hinsichtlich der Verbesserung der Schätzung der Liniensegmente durch Aufnahme der Linienparameter in den Kalmanfilter in einem als statisch angenommenen Objektraum zeigen (Zhang/Faugeras, 1992b). Eine Erweiterung zur Selbstkalibrierung zeigt (Viéville, 1994): Viéville's Ansatz beruht auf der Verfolgung von zwei Punkten in vier aufeinanderfolgenden Aufnahmen bei definierter Rotation der Kamera um eine bekannte Achse; er schließt nur die innere Orientierung und die Affinität ein (vgl. Kapitel 3.2) und berücksichtigt nicht die Objektivverzeichnung, was die praktische Relevanz deutlich einschränkt.

4.1.3.3. Binokulare Bildsequenzen mit spatiotemporaler Konsistenzprüfung

Navab/Zhang (1992) zeigen anhand von Bildsequenzen eines mit einem Zweikamerasystem ausgestatteten autonomen Roboters in einer statischen Umgebung, daß die Kombination der monokularen Zuordnung innerhalb der Bildsequenz mit der Stereozuordnung innerhalb des Bildpaares sowohl zu einem Gewinn an Robustheit wie auch zu einer Ersparnis von Rechenzeit führen kann. Aufbauend auf einer vorgegebenen Initialisierung der Struktur- und Bewegungsparameter werden in beiden Bildsequenzen zunächst unabhängig voneinander Hypothesen für die Zuordnung extrahierter Linien-segmente zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten t_1 , t_2 aufgestellt. Anschließend wird durch die Zuordnung über die Kernlinie im Bildpaar des Zeitpunkts t_2 die Konsistenz dieser Zuordnungen auf der Zeitachse verifiziert. Nicht-konsistente Zuordnungen werden verworfen. Nach diesem Schritt verbleibt eine ausreichende Anzahl konsistenter Zuordnungen zur vorläufigen Bewegungsschätzung. Mit dem Ergebnis der Bewegungsschätzung wird dann die Prädiktion der Linien-segmente im Bildraum verbessert, was die Robustheit der Zuordnung auf der Zeitachse steigert und die iterative Bestimmung weiterer konsistenter Zuordnungen innerhalb beider Bildsequenzen erlaubt. Die Schätzung der Struktur- und Bewegungsparameter erfolgt auch hier im Kalmanfilter. Der Rechenzeitgewinn im Vergleich zu auf der Zuordnung im Bildpaar basierenden Ansätzen ist dabei hauptsächlich auf die kleinere Anzahl möglicher Zuordnungen im durch die Prädiktion reduzierten Suchbereich zurückzuführen.

Eine spatiotemporale Konsistenzfilterung der merkmalsbasierten Zuordnung zwischen den Bildern zweier Kameras eines autonomen Fahrzeuges und der Punktverfolgung durch die Bestimmung des optischen Flusses in den beiden Bildsequenzen zeigen auch (Baker/Bolles, 1994); unter dem Aspekt der Echtzeitverarbeitung redundanter Zuordnungen wurde die Konsistenzprüfung dabei in der Form implementiert, daß eine Zuordnung dann verworfen wird, wenn ein aus den beiden binokularen Zuordnungen und den beiden Zuordnungen in der Sequenz zweier aufeinanderfolgender Bildpaare gebildeter Kreis im Bildraum einen Schleifenschlußfehler von mehr als einem Pixel aufweist (Abb. 32).

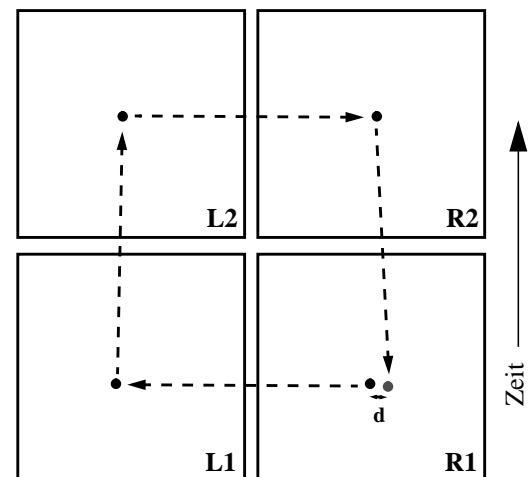


Abb. 32: Spatiotemporaler Schleifenschlußfehler (Baker/Bolles, 1994)

4.1.3.4. Systeme mit reduzierter Aufgabenstellung

Insgesamt ist festzuhalten, daß trotz sehr umfangreicher Arbeiten und vielfältiger Ansätze das Thema des passiven Navigation bei weitem noch nicht als gelöst angesehen werden kann. Operationelle Systeme für allgemeine Anwendungen sind derzeit noch nirgendwo verfügbar. Wesentlich weiter fortgeschritten sind demgegenüber aktive Systeme, welche beispielsweise auf Ultraschall, Radar oder Laserscannern basieren. Auch Verfahren der Oberflächenbestimmung mit strukturiertem Licht, welche in Kapitel 5 behandelt werden, sind erfolgreich in Navigationsaufgaben eingesetzt worden.

Einen zumindest teilweise als operationell zu bezeichnenden Status haben auch Systeme der passiven Navigation erreicht, welche sich auf die Bestimmung eines reduzierten Bewegungsparame-

tersatzes in einer geeignet strukturierten Umgebung beschränken. So wurde beispielsweise bereits durch (Dickmanns/Gräfe, 1988) ein autonom mit 100km/h auf einer abgesperrten Autobahn fahrendes Fahrzeug vorgestellt, welches sich mit Hilfe einer Zeilenkamera am markant weißen rechten Fahrbahnbegrenzungstreifen orientiert. Ein sich anhand von leicht erkennbaren Passpunkten in einer Fabrikhalle orientierendes System wird in (Hock, 1991) vorgestellt. Bei beiden Systemen reduziert sich die Orientierungsbestimmung auf ein zweidimensionales Problem mit drei zu bestimmenden Orientierungsparametern; desweiteren entfällt die Aufgabe der Rekonstruktion des Objektraumes, und die Orientierung wird durch vorgegebene Objektmodelle mit leicht extrahierbarer Passpunktinformation erleichtert.

4.1.3.5. Mobile Systeme zur GIS-Datenakquisition



Abb. 33: Fahrzeug mit Stereokamera- und GPS-System (Transmap)

Ebenfalls auf der Aufnahme von binokularen Bildfolgen basieren verschiedene hybride Systeme zur Akquisition von GIS-Daten entlang von Verkehrswegen mittels eines auf einem Fahrzeug montierten Zweikamerasystems und integrierten GPS- und INS-Systemen (z.B. Bossler et al. 1991, Schwarz et al., 1993, Heister et al. 1995). Während in der passiven Navigation häufig die primäre Zielsetzung in der Navigation des Fahrzeuges liegt, ist das Ziel hier ausschließlich die Bestimmung von Strukturparametern; die Steuerung des Fahrzeuges erfolgt ausschließlich durch den Fahrer. Dementsprechend stellt die Echtzeitverarbeitung keine Notwendigkeit dar, die Bilddaten

können zwischengespeichert und off-line verarbeitet werden; dabei sind Interaktionen eines Operateurs, welche insbesondere bei Erkennungsaufgaben notwendig werden können, tolerierbar.

Ein System mit gleicher Zielsetzung, welches jedoch aus acht CCD-Kameras besteht, zeigt (El-Sheimy, 1996). Die Kameras sind dabei allerdings in zwei Gruppen zu je vier Kameras mit lagemäßig etwa gleichem Projektionszentrum angeordnet; sie dienen primär der Erweiterung des Gesichtsfeldes des Systems und werden dementsprechend vornehmlich paarweise zur interaktiven oder halbautomatischen Auswertung verwendet. Eine Projektion in weitere Bilder ist zwar vorgesehen (Li et al., 1996), bringt aber aufgrund der Anordnung der acht Kameras in zwei Gruppen keinen großen Gewinn; wesentlich effizienter unter dem Gesichtspunkt der (teil-)automatischen Auswertung der Daten und der Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung (welche bei Anwendung auf Verkehrswegen mit typischen großen Diskontinuitäten im Objektraum sehr häufig auftreten werden) wäre eine Anordnung der Kameras in einer Reihe analog zu der in Abb. 24 gezeigten Anordnung.

Wird bei Systemen dieser Art die Position und Orientierung des Kamerasystems lediglich aus GPS- und INS-Daten bestimmt, so reduziert sich die photogrammetrische Aufgabe auf die Auswertung einer großen Anzahl von Stereopaaren ohne Verknüpfung von aufeinanderfolgenden Bildpaaren auf der Zeitachse. Die Verwendung mehrerer aufeinanderfolgender Stereobildpaare zur Genauigkeitssteigerung der Objektkoordinatenbestimmung - jedoch ohne simultane Bestimmung von Orientierungsparametern - zeigen (El-Sheimy/Schwarz, 1994). Eine Studie zur Bestimmung der Position durch sequentielle Schätzung in der Folge von Bildpaaren mittels Givens-Transformation (vgl.

Kapitel 4.2) zur Überbrückung von kurzen Zeiträumen mit GPS-Signalverlust zeigen (Edmundson/Novak, 1992) anhand simulierter Daten. Auch wenn hier die Daten im Gegensatz zur passiven Navigation bislang ausschließlich off-line verarbeitet werden und Rechenzeitaspekten keine sehr große Relevanz zukommt, weist diese Vorgehensweise im Vergleich zur Simultanlösung Vorteile vor allem hinsichtlich der Prädiktion in (teil-)automatischen Systemen auf.

4.2. Online-Triangulation

Die meisten der in der Computer Vision Literatur vorgestellten Systeme zur passiven Navigation mit simultaner Objektmodellierung (vgl. Kapitel 4.1) vermeiden aus Gründen des Rechenaufwandes und teilweise auch wegen der nur temporären Verfügbarkeit der Daten auf eine strenge Simultanlösung im Sinne einer Bündelblockausgleichung. Viele Systeme basieren auf der Anwendung eines Kalman-Filters, andere auf kombinierten Rück- und Vorwärtsschnitten mit dementsprechend ungünstiger Fehlerfortpflanzung. Eine effiziente Methode zur Vermeidung extrem hohen Rechenaufwandes für die kontinuierliche Berechnung der Orientierung einer bewegten Kamera anhand von Aufnahmen einer Bildsequenz stellt die Anwendung von sequentiellen Schätzern dar. Der ursprüngliche Hauptzweck der Anwendung von Verfahren der Online-Triangulation war die Erkennung grober Fehler mit der Möglichkeit unmittelbarer Neumessungen bei der Triangulation großer Blöcke am analytischen Plotter. Wesentlich darüber hinaus gehende Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich jedoch in der passiven Navigation autonomer Roboter. Die Grundidee bei der Online-Triangulation ist die Vermeidung von rechenaufwendigen Simultanlösungen durch eine kontinuierliche Aufdatierung des Normalgleichungssystems, wobei in größeren Zeitabständen durchgeführte Simultanlösungen die Abweichungen der Bewegungs- und Strukturparameter im Vergleich zu nach jedem Bild gerechneten strengen Lösungen klein halten.

Frühe Arbeiten zur Online-Triangulation (Grün, 1982) basierten auf einem triangular-factor-update Algorithmus, welcher direkt das Normalgleichungssystem aufdatiert. Grün zeigt die Überlegenheit des triangular-factor-update im Vergleich zum Kalman-Filter hinsichtlich Rechenzeit- und Speicherplatzbedarf. In späteren Arbeiten wurde durch (Grün, 1985a) und (Runge, 1987) die Überlegenheit der Givens-Transformation (Blais, 1983) bewiesen. Eine Anwendung sequentieller Schätzer auf die Schätzung der Orientierung während der Bewegung einer Kamera entlang eines statischen Punktfeldes zeigen (Grün/Kersten, 1992). Interessant ist dabei vor allem die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Rechenzeiten: Während die Einführung eines Neupunktes unmittelbar nach einer strengen Bündellösung 0.01 Sekunden dauerte, wuchs der Zeitbedarf dafür nach 88 Bildern ohne Neuberechnung der Bündellösung auf 1.54 Sekunden; eine Aufdatierung in Videoechtzeit war (bezogen auf die Rechenleistung einer SUN SparcStation 1+) während der ersten 10 Bilder nach einer Simultanlösung möglich. Hierin liegt ein Nachteil im Vergleich zum Kalmanfilter, bei dem die Dimension des Systemzustandes und damit der Rechenaufwand in den meisten Implementationen weitgehend konstant bleibt (Hahn, 1995). Eine Systematik in den Abweichungen der aufdatierten Lösung zur strengen Lösung war über diesen Zeitraum nicht zu beobachten.

Eine Suboptimalität des Kalmanfilters hinsichtlich der Parameterschätzung in nicht-linearen Systemen bei Anwendungen in der autonomen Navigation anhand einer monokularen Bildsequenz, diskutieren (Weng et al., 1993). Diese Problematik gilt prinzipiell für alle sequentiellen Schätzverfahren. Sie wird verursacht durch die Abhängigkeit der Systemmatrizen von den zu schätzenden

Parametern selbst und bewirkt in vielen Fällen eine frühe Divergenz der Trajektorie des Projektionszentrums, welche im weiteren Verlauf der Bildsequenz nur sehr langsam wieder korrigiert wird; gleichzeitig sind die geschätzten Standardabweichungen der Parameter systematisch zu klein. Weng et al. bevorzugen daher statt des Kalmanfilters ein als ‘recursive-batch solution’ bezeichnetes Verfahren, welches ähnlich dem triangular-factor-update das Normalgleichungssystem einer Simultanlösung nach neuen Beobachtung kontinuierlich aufdatiert. Dabei werden Glattheitsbedingungen für die Trajektorie als zusätzliche Bedingungen eingeführt, welche gleichzeitig das Modell für die Prädiktion bestimmen. Aus denselben Gründen wird bei (Grün/Kersten, 1992) in regelmäßigen Abständen eine vollständige Simultanlösung berechnet.

Kapitel 5: Oberflächenmeßverfahren mit strukturiertem Licht

In der industriellen 3-D Meßtechnik wurden im Laufe der letzten Jahre eine Reihe von auf der Verwendung von strukturiertem Licht und Mehrbildtechniken basierenden Verfahren zur Generierung von dreidimensionalen Repräsentationen von Oberflächen im Nahbereich - manchmal auch als 'topometrische 3-D Meßtechnik' bezeichnet - entwickelt. Im Unterschied zu den in Kapitel 2 behandelten multiokularen Zuordnungsverfahren basieren die hier gezeigten Verfahren in ihrer Grundform auf der Akquisition kurzer Bildsequenzen mit einer stationären Kamera unter räumlich-zeitlich variierender Beleuchtung durch einen stationären Projektor im Sinne einer spatio-temporalen Codierung von Beleuchtungsrichtungen im Triangulationsverfahren. Diese Methoden sind auch deshalb in einem gesonderten Kapitel zusammengefaßt, weil sie traditionell eher aus dem Bereich 'Machine Vision' stammen und von Photogrammetern manchmal als 'exotische' Methoden betrachtet werden. Dennoch sind die diskutierten Verfahren im Sinne eines weiteren Verständnisses des Begriffes 'Photogrammetrie' jedenfalls als photogrammetrische Verfahren anzusehen und erlauben unter dem Aspekt der Mehrbildtechniken interessante Vergleiche zu etablierten photogrammetrischen Verfahrensweisen.

Die automatische, berührungslose Vermessung von Oberflächen verschiedenster Objekte ist eines der wichtigsten Anwendungsgebiete des Machine Vision Bereichs. Im Verlauf der vergangenen ca. 20 Jahre ist eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Verfahren und Systemen entwickelt worden, von denen inzwischen mehrere einen hohen Reifegrad erreicht haben und als kommerzielle Systeme erhältlich sind. Anwendungsbereiche liegen z.B. in der industriellen Qualitätskontrolle, bei der Digitalisierung von Freiformflächen im Rapid Prototyping, in der plastischen Chirurgie, Zahnmedizin und Orthopädie sowie in der Archäologie bei der Herstellung von Kopien von Kulturgütern. Auch die Generierung von Tiefenbildern für autonome Roboter oder Robotergreifer in nicht-deterministischen Umgebungen stellt ein Anwendungsgebiet mit zunehmender Bedeutung dar. Die Anwendung klassischer photogrammetrischer Verfahren scheidet hier oft aufgrund der Anforderung nach kürzesten Rechenzeiten. Daneben weisen die zu messenden Oberflächen häufig keine oder nur unzureichende natürliche Textur auf. Eine flexible und leicht implementierbare Methode zum Aufbringen einer Textur ist die Projektion von strukturiertem Licht. Dieses kann z.B. in Form eines Kreuz- oder Punktrasters oder auch als Zufallsmuster auf eine texturlose Oberfläche projiziert werden, um die Zuordnung homologer Punkte in Zwei- oder Mehrkameranysystemen zu ermöglichen. Zur Optimierung des Verfahrens bietet es sich jedoch häufig an, den Projektor als aktives Element in das Verfahren einzubeziehen und durch die die Geometrie des projizierten Musters die Auswertbarkeit zu optimieren.

Eine Klassifikation von Oberflächenmeßmethoden findet sich in Abb. 34. Einige dieser Verfahren, welche unter dem Aspekt der Mehrbildverfahren von Interesse sind, werden im folgenden diskutiert.

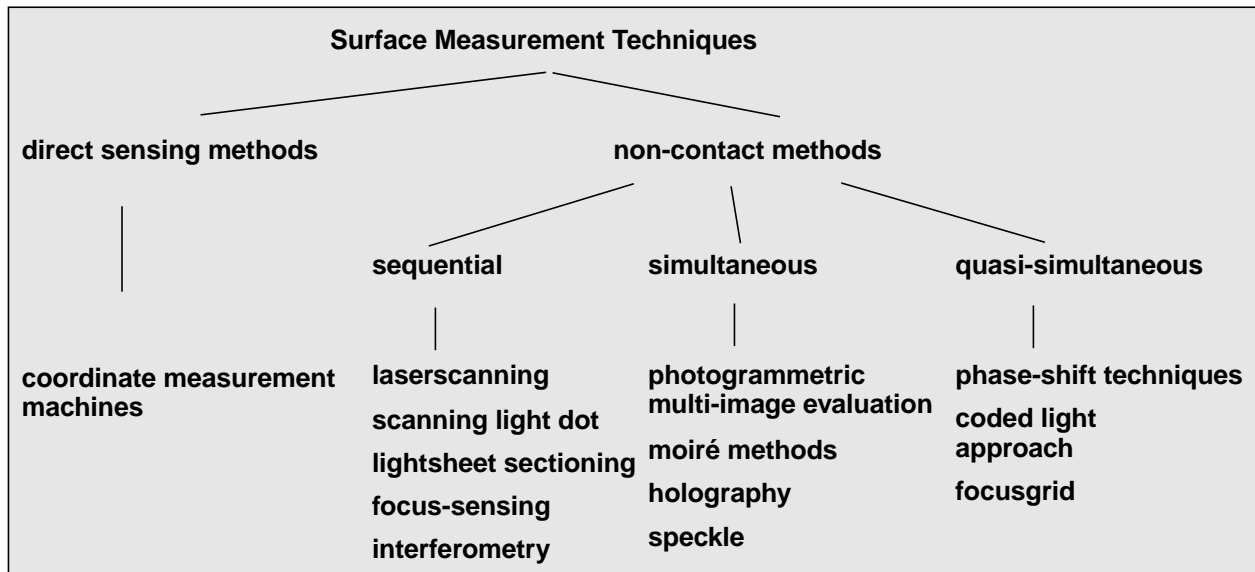


Abb. 34: Klassifikation von Oberflächenmeßmethoden (Maas, 1992d)

5.1. Lichtschnitttriangulation

Ein sehr einfaches Verfahren der Oberflächenbestimmung durch strukturiertes Licht ist die Lichtschnitttriangulation. Bei dieser Methode wird eine Lichtschicht (generiert z.B. durch einen über eine Zylinderlinse aufgeweiteten Laserstrahl) auf die Oberfläche projiziert und von einer Kamera unter einem Triangulationswinkel abgebildet (Abb. 35). Bei durch ein geeignetes Kalibrierverfahren gegebener Aufnahme- und Projektionsgeometrie kann damit ein dreidimensionales Profil auf dem Objekt berechnet werden.

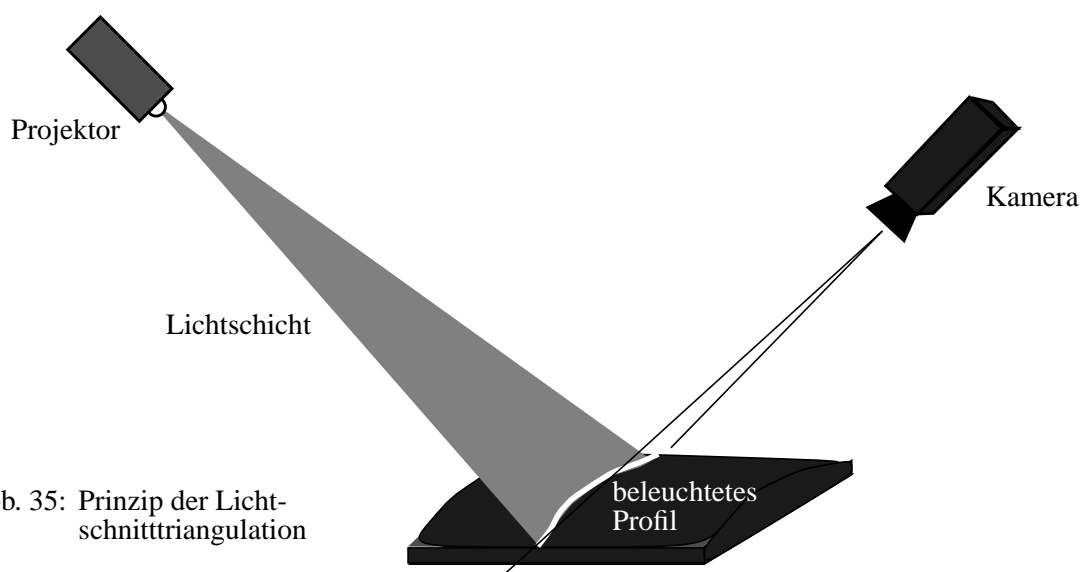


Abb. 35: Prinzip der Lichtschnitttriangulation

Der Aufwand für die technische Realisierung des Verfahrens und die automatische Auswertung ist sehr gering, erste Anwendungen findet man bereits in den frühen 70er Jahren (z.B. Shirai/Suwa,

1972). Eine wesentliche Beschleunigung der Rechenzeit ergibt sich, wenn der Flächensensor in Abb. 35 durch einen Zeilensensor mit einer diagonalen Maskierung je zweier benachbarter Pixel (Abb. 36) ersetzt wird (Kramer et al., 1990): Bei dieser Maskierung können y' -Koordinaten durch den Vergleich der Intensitäten je zweier benachbarter Pixel der Zeile berechnet werden, was die Bestimmung eines gesamten Profils durch die Auswertung einer Zeile erlaubt und somit bei geringstem rechnerischen Aufwand Echtzeitauswertungen ermöglicht.

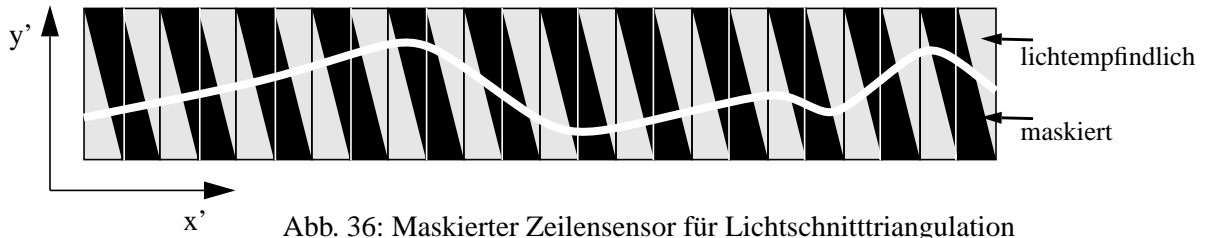


Abb. 36: Maskierter Zeilensensor für Lichtschnitttriangulation

Das Lichtschnittverfahren bietet sich besonders zur Anwendung über Fließbändern in der industriellen Qualitätskontrolle oder über Förderbändern (Mollath/Fatehi, 1994) an. Insofern basiert das Verfahren zwar auf der Auswertung von Bildsequenzen, stellt aber im Sinne des Verständnisses dieser Arbeit kein eigentliches Mehrbildverfahren dar, solange die einzelnen Profile völlig unabhängig voneinander ausgewertet werden.

5.2. Moiré-Verfahren

Wird statt einer einzelnen Lichtschicht ein Gitter auf eine Objektoberfläche projiziert und über ein Referenzgitter abgebildet, erhält man den bekannten Moiré-Effekt (Abb. 37), welcher manchmal auch als 'mechanische Interferenz' bezeichnet wird (Seib/Höfler, 1990). Das Referenzgitter vor der Kamera kann dabei durch einen CCD-Sensor vom Typ 'interline transfer', dessen Struktur selbst schon ein Gitter darstellt, ersetzt werden, wenn die Anzahl der projizierten Linien auf die Auflösung des Sensors abgestimmt wird.

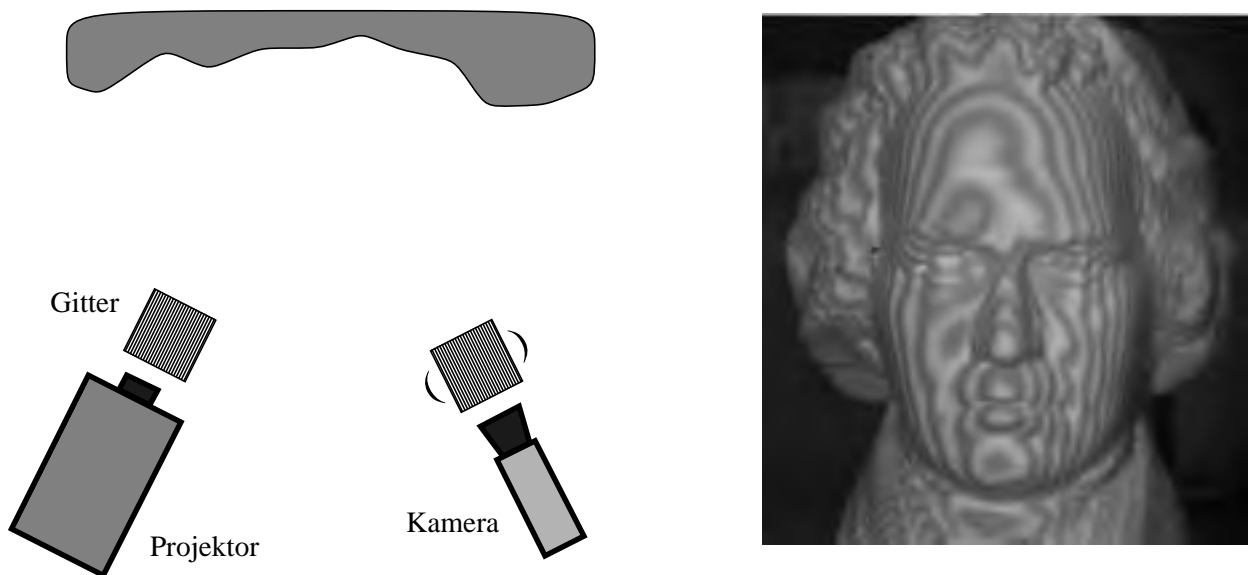


Abb. 37: Moiré-Verfahren - Konfiguration und Beispiel

Das Moiré-Bild, das von der Kamera aufgenommen wird, enthält ohne jegliche Verarbeitung oder auch nur A/D-Wandlung des Bildes schon Tiefenschichteninformation und kann 'live' auf einem Monitor betrachtet werden, so daß die Methode - zumindest für eine visuelle Interpretation - als analoge Echtzeitmethode angesehen werden kann und sich hervorragend zur dynamischen qualitativen Visualisierung von Deformationsvorgängen eignet. Die Ableitung quantitativer, metrischer Tiefeninformation verlangt jedoch noch eine Systemkalibrierung und ein Streifenauswerteverfahren zur Bestimmung der Phasenlage an jeden auszuwertenden Pixel und - als absolutes Meßverfahren - auch der Vielfachen der Wellenlänge. Dabei ist im Einzelbild aufgrund der unbekanntenen lokalen Intensität und Reflexionseigenschaften der Oberfläche die Rekonstruktion der Phase nicht ohne Annahmen und auch nur ungenau möglich. Zudem muß die Rekonstruktion aufgrund der normalerweise nicht gegebenen Äquidistanz der Flächen gleicher Phasenlage von einem Punkt ausgehen, dessen Lage im durch Kamera und Projektor definierten lokalen Koordinatensystem bekannt ist. Des weiteren verlangt die Rekonstruktion stetigen Anschluß; die Bestimmung der Vielfachen der Wellenlänge ist an Diskontinuitäten der Objektoberfläche nicht definiert und führt, wie auch in Abb. 37 ersichtlich, auch in steilen Regionen der Objektoberfläche zu Problemen. Aus diesen Gründen sind für eine metrische Auswertung von Moirébildern verfeinerte Techniken notwendig, von denen die Wichtigsten im folgenden beschrieben werden.

5.3. Phasenschiebeverfahren

Die am häufigsten zur Auflösung der Phasenlage angewandte Technik ist das Phasenschiebeverfahren (Andresen, 1986). Bei diesem Verfahren werden sequentiell drei Bilder aufgenommen, bei denen die Phasenlage des projizierten Gitters um je 120° verschoben wird. Für jedes Pixel erhält man so drei Grauwerte g_1, g_2, g_3 :

$$\begin{aligned} g_1 &= I_H + I_K \cdot \cos \alpha \\ g_2 &= I_H + I_K \cdot \cos(\alpha + 120^\circ) \\ g_3 &= I_H + I_K \cdot \cos(\alpha - 120^\circ) \end{aligned} \quad (9)$$

Aus diesen lassen sich die additive Hintergrundintensität I_H und der multiplikative Interferenzkontrast I_K leicht eliminieren, und die Phasenlage α ergibt sich zu

$$\alpha = \arctan \frac{\sqrt{3} \cdot (g_1 - g_2)}{2 \cdot g_1 - g_2 - g_3}. \quad (10)$$

Damit läßt sich die Phasenlage innerhalb einer Streifenordnung auf ca. $1/25$ auflösen, wenn der Abstand zwischen zwei Moiréordnungen mindestens 4-5 Pixel beträgt (Seib/Höfler, 1990). Aus den Gitterkonstanten und lassen sich dadurch bei bekannter Geometrie des Aufbaus Objektkoordinaten für jedes Pixel berechnen. Die Flächen gleicher Phasenlage sind dabei im idealen Fall bei paralleler optischer Achse von Projektor und Kamera sowie Verwendung verzeichnungsfreier telezentrischer Optiken eben und äquidistant, bei parallelen optischen Achsen und zentralperspektiver Optik eben, aber nicht mehr äquidistant und im allgemeinen Fall mit konvergenter Anordnung und nicht zu vernachlässigender Objektivverzeichnung gekrümmt und nicht äquidistant.

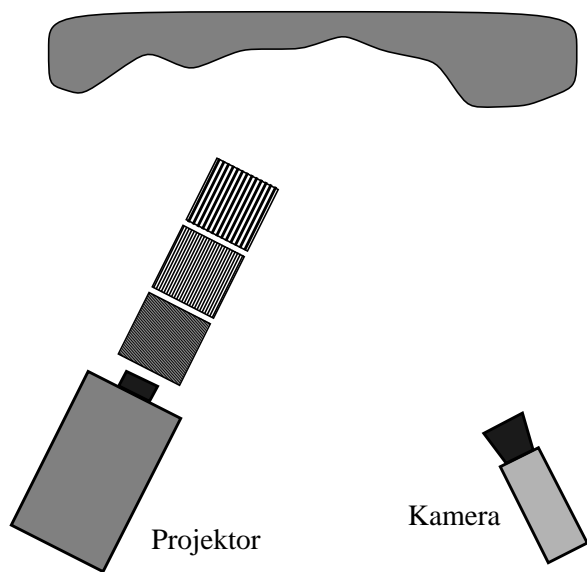


Abb. 38: Sequentielle Projektion von drei Gittern

Durch das Phasenschiebeverfahren wird zwar die Phasenlage in jedem einzelnen Pixel mit guter Genauigkeit bestimmt, nicht jedoch die absolute Streifenordnung. Dazu müssen noch Verfahren der Phasendemodulation angewandt werden, welche jedoch in steilen Regionen der Oberfläche mit geringem Streifenabstand im Bild fehlerkritisch sind und bei Diskontinuitäten der Oberfläche oder Regionen mit unzureichendem Kontrast ganz versagen werden. Zur zuverlässigen Lösung der Vielfachen des Streifenabstandes bieten sich hierarchische Verfahren an, welche sequentiell Gitter unterschiedlicher Gitterkonstanten projizieren und somit Mehrdeutigkeiten über einen in Grob- und Feinmessung unterteilten Prozeß lösen.

Technisch realisiert werden kann die Phasenverschiebung beispielsweise durch einen programmierbaren LCD-Streifenprojektor oder auch mechanisch durch die Verschiebung des Projektionsgitters durch einen Piezomotor oder eine planparallele Platte. Eine sequentielle hierarchische Projektion mehrerer Gitterkonstanten für die Grob- und Feinmessung kann entweder ebenfalls durch einen LCD-Streifenprojektor oder beispielsweise durch die vertikale Verschiebung einer Gitterplatte mit mehreren Gitterkonstanten (Abb. 39) realisiert werden. Zur Tiefenschärfenoptimierung bei der Projektion von vertikalen Streifen bietet sich die Verwendung einer parallel zur Streifenrichtung angeordneten Schlitzblende an, welche in Richtung der Gitterteilung einen ausreichenden Tiefenschärfebereich sicherstellt und senkrecht dazu in Streifenrichtung eine maximale Lichtausbeute zuläßt. Eine weitere Möglichkeit zur Vergrößerung des Tiefenschärfebereichs ist eine Anordnung nach der Scheimpflugbedingung.

Phasenlage und Streifenordnung können bei dem hier beschriebenen Verfahren also in jedem Pixel als Absolutwert unabhängig von den Nachbarpixeln berechnet werden. Das Verfahren ist dabei mit mindestens sechs Bildern (bei zwei Hierarchiestufen) als Mehrbildverfahren zu klassifizieren. Die Rechenzeiten für die Bestimmung der Phasenlage betragen, unterstützt durch spezielle Prozessoren, bei heutigen kommerziellen Systemen etwa $1\mu\text{s}$ pro Punkt. Weil der Moiréeffekt hier keine Rolle mehr spielt (und je nach

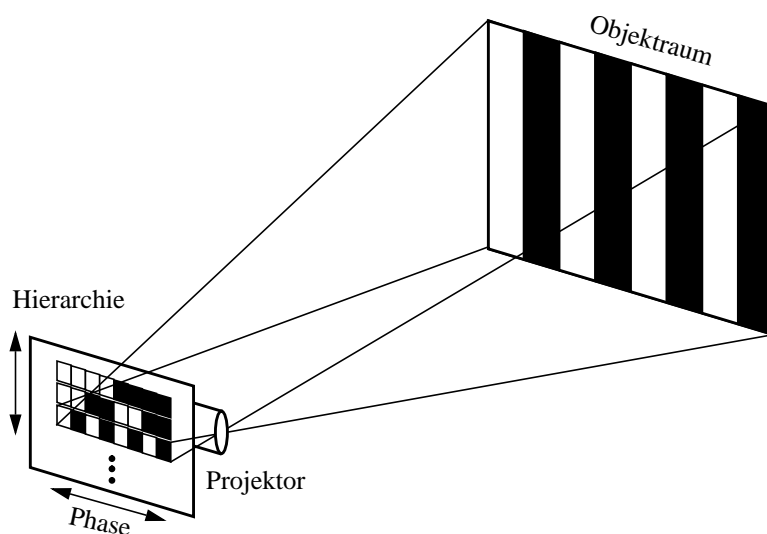


Abb. 39: Schema eines hierarchischen Phasenschiebeverfahrens (Breuckmann, 1995)

Konfiguration optisch auch gar nicht mehr auftritt), werden die nach diesem Prinzip arbeitenden Verfahren allgemein als hierarchische Phasenschiebeverfahren bezeichnet.

In (Seib/Höfler, 1990) wird gezeigt, daß mit einem modifizierten CCD-Sensor mit einer Auflösung von 512x512 Pixeln, auf den zusätzlich ein feines Gitter mit einer Gitterweite von $\frac{1}{3}$ Pixel aufgebracht wurde, eine Tiefengenaugigkeit von bis zu $\frac{1}{30'000}$ der Objektgröße erzielt werden kann.

5.4. Dreiprojektorverfahren

Ein weiteres Verfahren zur Lösung der Mehrdeutigkeiten der Streifenordnung wird in (Hof et al., 1992) gezeigt. Im Gegensatz zu dem in 5.3 beschriebenen Verfahren basiert es nicht auf der sequentiellen Projektion von Gittern verschiedener Gitterkonstante, sondern auf der Verwendung von drei Projektoren mit identischen Gittern, welche wie in Abb. 40 gezeigt asymmetrisch um eine Kamera angeordnet sind.

Durch Differenzbildung von im Phasenschiebeverfahren ermittelten Phasenlagen für die einzelnen Projektoren entstehen virtuelle Tiefenschichtsysteme im Objektbereich (Abb. 40). Bei paralleler Lage der projizierten Gitter und vernachlässigbarer Objektivverzeichnung stellen die Flächen gleicher Phasenlage parallele, nicht äquidistante Ebenen dar. Der Abstand der Flächen wird durch die Gitterkonstante der Projektoren und die Geometrie ihrer Anordnung unabhängig von der Kameraorientierung bestimmt. Die Kombination der Projektoren P1 und P2 in Abb. 40 ergibt eine lange Schwebung λ_{eff} , welche als Grobmessung zur Lösung der Mehrdeutigkeiten verwendet wird. Die Kombination der Projektoren P1 und P3 oder P2 und P3 ergibt kurze Schwebungen, welche für eine Feinmessung geeignet sind.

Aufgrund der endlichen Größe der Projektoroptiken sind in der praktischen Implementation die beiden Projektoren P1 und P2 um wenige Millimeter seitlich versetzt übereinander angeordnet, wodurch sich eine einzige Schwebung zur eindeutigen Absolutmessung über den ganzen Meßbereich in Tiefenrichtung ergibt. Die Meßgenauigkeit in der langen Schwebung ist dabei hoch genug, um die Ordnung der kurzen Schwebung eindeutig zu definieren.

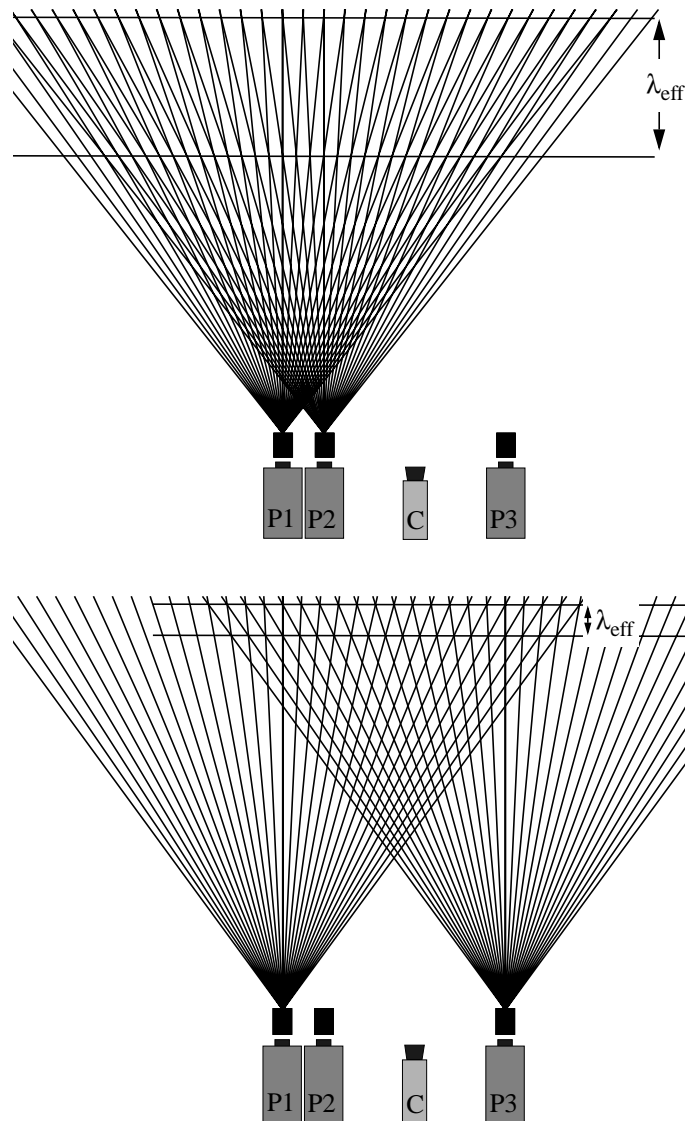


Abb. 40: Virtuelle Schwebungen bei asymmetrischer Dreiprojektoranordnung (nach Hof et al., 1992)

Das System ist bei Zeiss zur Vermessung von Brillengläsern im Einsatz; es bietet über ein Arbeitsvolumen von $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ eine Tiefenmeßgenauigkeit von $3 \mu\text{m}$ (Küchel, 1995) und kann die Koordinaten von 512×512 Objektpunkten bei Einsatz eines Videorechners mit einer Pipelinestruktur, welche teilweise parallele Datenpfade aufweist, in Videoechtzeit bestimmen.

Die Analogie des gezeigten Dreiprojektorsystems zu der in Abb. 7 gezeigten asymmetrischen Anordnung von drei Kameras ist augenfällig. Kurze Epipolarlinien und damit eine geringe Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten, wie sie sich aus Abb. 7 ergeben, entsprechen einer langen Schwebung und damit eindeutiger Tiefenbestimmung in Abb. 40. Andererseits entsprechen ungünstige Strahlenschnittbedingungen und damit einhergehende schlechte Tiefengenauigkeit in Abb. 7 der begrenzten Tiefenauflösung auf der langen Schwebung in Abb. 40; dies wird in Abb. 7 durch eine zusätzliche Kamera und in Abb. 40 durch einen zusätzlichen Projektor, jeweils mit großer Basis, kompensiert. Auch wird hier λ_{eff} mit zunehmender Tiefe größer, was dem mit dem Quadrat der Entfernung zur Basis zunehmenden Tiefenfehler bei Triangulationsverfahren entspricht. Insgesamt kann das hier gezeigte Verfahren somit als Oberflächenmeßverfahren mit strukturiertem Licht klassifiziert werden, bei welchem gegenüber einer konventionellen photogrammetrischen Anordnung Signalisierung und Bildakquisition vertauscht wurden.

Neben diesen Analogien zeigen die in 5.3 und 5.4 dargestellten Verfahren auch noch interessante Analogien zum in der konventionellen Vermessung bekannten Verfahren der elektrooptischen Entfernungsmessung nach dem Phasenvergleichsverfahren auf, wo ebenfalls mehrere Grob- und Feinmaßstäbe zur Bestimmung der Mehrfachen der Wellenlänge und zur genauen Phasenmessung eingesetzt werden.

5.5. Kodierte Lichtansatz

Die für die 3-D Koordinatenbestimmung im Triangulationsverfahren notwendige Indexierung der Projektionsrichtung kann sehr einfach beispielsweise durch die Projektion eines linearen Graukeils erfolgen. Die unbekannte lokale Intensität und die Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche können auch hier über die Akquisition von zusätzlichen Hell- und Dunkelbildern erfaßt werden, und die Bestimmung der Projektionsrichtung reduziert sich auf die Bildung von Intensitätsquotienten (Carrhill/Hummel, 1985). Allerdings läßt sich auf diese Weise aufgrund der beschränkten radiometrischen Auflösung selbst guter Halbleiterkameras und vor allem aufgrund der nur bedingt möglichen Modellierbarkeit des Reflexionsverhaltens der Objektoberfläche nur eine sehr begrenzte Genauigkeit und Zuverlässigkeit erzielen.

Aus diesem Grunde wird ein Graukeil vorteilhafterweise sequentiell als Binärkode projiziert. Eine sehr leistungsfähige Methode zur Lösung des Korrespondenzproblems bei der Zuordnung von Bildpunkten zu projizierten Linien ist das nach diesem Prinzip arbeitende codierte Lichtverfahren, welches zuerst von (Altschuler et al., 1979) vorgeschlagen wurde und u.a. von Wahl (z.B. Stahs/Wahl, 1990) weiterentwickelt wurde. Das Verfahren stellt eine aktive Triangulationsmethode dar, welche eine robuste und schnelle Lösung des Korrespondenzproblems implizit beinhaltet und eine effiziente, hardwareunterstützte Implementation erlaubt.

Eine raum-zeitliche Codierung durch die aufeinanderfolgende Projektion von n verschiedenen Linienmustern (Abb. 41) erlaubt die Unterscheidung von 2^n verschiedenen Projektionsrichtungen, welche durch spezielle hell/dunkel Sequenzen bzw. im Bildspeicher durch einen n Bit tiefen Code charakterisiert sind. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit an den bit-Grenzen im Kamerabild der groben Codes bietet es sich dabei an, aufeinanderfolgende Codes phasenverschoben zu projizieren (Abb. 42), so daß die projizierten Muster eine Grauwertkodierung der Beleuchtungsrichtung darstellen und Fehlmessungen auch an den bit-Grenzen der groben Codes nur einen Fehler von einem bit in der Richtungsbestimmung bewirken.

Die Graucodes werden vorteilhaft von einem LCD-Streifenprojektor erzeugt, und das Objekt mit dem deformierten Streifenmuster wird unter einer Parallaxe von einer CCD-Kamera aufgenommen. Zur Unterstützung der Bestimmung des Schwellwertes bei der Binärisierung werden zudem je ein Bild bei unbeleuchteter und bei komplett ausgeleuchteter Szene aufgenommen. Binärisierte Bilder jedes projizierten Codes werden danach als Bit-Ebenen im Bildspeicher summiert, wo nach n Projektionen jeder Bildpunkt einen Grauwert hat, welcher eine aus den 2^n möglichen Projektionsrichtungen für den zugehörigen Objektpunkt codiert. Bei aus einer Kalibrierung gegebener Aufnahmegeometrie können daraus - wiederum im Triangulationsverfahren - Objektkoordinaten für jedes Pixel des Bildes gerechnet werden. Sowohl die Akkumulation der Codierung im Bildspeicher wie auch die Triangulation kann hardwaremäßig unterstützt werden. Bei optimiertem, justiertem Aufbau kann die 3-D Koordinatenberechnung nach Ermittlung des Codeswortes für jedes Bildpixel auf eine Operation in einer eindimensionalen Lookup-Tabelle reduziert werden, was die Generierung eines kompletten Tiefenbildes in deutlich weniger als einer Sekunde erlaubt.

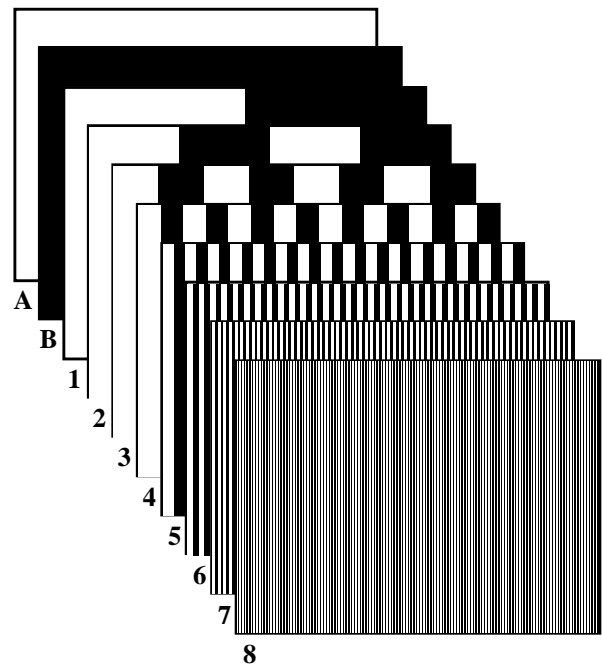


Abb. 41: Kodesequenz beim kodierten Lichtansatz

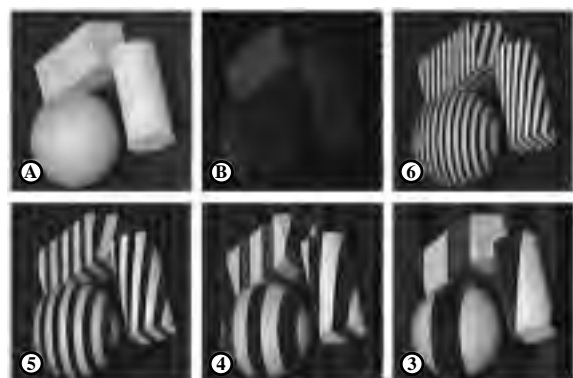
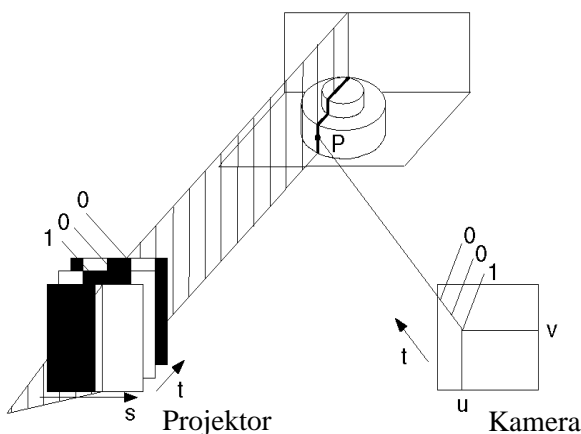


Abb. 42: Kodierter Lichtansatz - Aufbau und Beispiel (Trobina, 1995)

Da n verschiedene Muster nacheinander projiziert werden müssen, kann die Methode ebenfalls nur als eine quasi-simultane Methode angesehen werden. Die Tiefengenauigkeit des Verfahrens ist aufgrund der limitierten Anzahl von Projektionsrichtungen bei üblicherweise acht hierarchischen Streifenmustern beschränkt und liegt in der Praxis bei etwa 1% der Tiefenausdehnung des Objektraumes. Daher bietet es sich bei hohen Genauigkeitsanforderungen an, das letzte und feinste der Gitter zusätzlich noch zweimal phasenverschoben zu projizieren, um auch hier eine Feinmessung durch Auflösung der Phase wie in Kapitel 5.3 beschrieben zu ermöglichen.

5.6. Hybride Codes

Hybride Codes zur Optimierung der Leistungsfähigkeit von Streifenprojektionsverfahren werden in (Malz, 1989) gezeigt. Sie stellen eine Kombination aus digitalen Binärcodes und analogen Markierungsfunktionen dar und nutzen die Tatsache aus, daß Binärcodes weniger störanfällig sind, aber andererseits zur Erzielung einer gewünschten hohen Tiefenauflösung eine wesentlich größere Wortlänge benötigen als analoge Markierungsfunktionen mit sinus- oder dreiecksförmiger örtlicher Intensitätsmodulation, welche prinzipiell ein größeres Genauigkeitspotential bieten. Beim trapezförmigen MZX-Code, welcher aufgrund seiner inneren Symmetrie leicht zu decodieren ist, reicht zur Lösung der Mehrdeutigkeiten und Feinmessung eine Sequenz von nur sechs Codes aus, welche durch einen Laserprojektor mit quasi-analogen Eigenschaften projiziert werden.

5.7. Farbkodierung

Ein weiteres Verfahren zur eindeutigen Indexierung der Projektionsrichtung wird in (Boyer/Kak, 1987) gezeigt: Statt eines binären Gitters oder eines graukodierten Musters wird hier ein farbiges Gitter projiziert, welches mit einer 3-Chip Kamera (vgl. Kapitel 8.1.1) aufgenommen wird. Die Bestimmung der Projektionsrichtung kann damit in jedem Bildpixel durch eine Farberkennung im RGB-Raum erfolgen. In der praktischen Implementation betrug die Anzahl der farbigen Gitterlinien bei Boyer/Kak allerdings nur etwa 100, was die Genauigkeit des Verfahrens ziemlich einschränkt. Probleme können auch durch die Farbeigenschaften der Oberfläche selbst auftreten, da bei nicht-grauen Oberflächen die Farbindizierung systematisch verfälscht wird.

Ebenfalls auf der Projektion von Farbe basiert das farbcodierte Phasenschiebeverfahren, bei welchem die drei Aufnahmen des Phasenschiebeverfahrens (5.3) nicht sequentiell belichtet, sondern gleichzeitig durch die drei Sensoren einer 3-Chip Kamera gewonnen werden; nachteilig ist dabei allerdings, daß aufgrund der in den einzelnen Kanälen unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Oberfläche das Genauigkeitspotential reduziert wird (Klicker, 1994).

5.8. Orthogonale Streifensysteme

Ein genereller Nachteil aller in Kapitel 5.3 - 5.7 gezeigten Verfahren ist die Tatsache, daß zwar in Tiefenrichtung gute Genauigkeiten erreicht werden können, lateral jedoch nur Pixelgenauigkeit gegeben ist, was bei starken Oberflächenmodulationen zu entsprechenden Interpolationsfehlern führen wird. Ein Ansatz zur Beseitigung dieser Inhomogenität wird in (Kowarschik et al., 1993) gezeigt: Durch die Projektion von drei Streifensystemen aus drei möglichst orthogonalen Raumrichtungen (Abb. 43) mit hierarchischem Phasenschiebeverfahren an allen drei Projektoren können alle

drei Objektkoordinaten mit der gleichen, durch das Phasenschiebverfahren gegebenen Genauigkeit bestimmt werden.

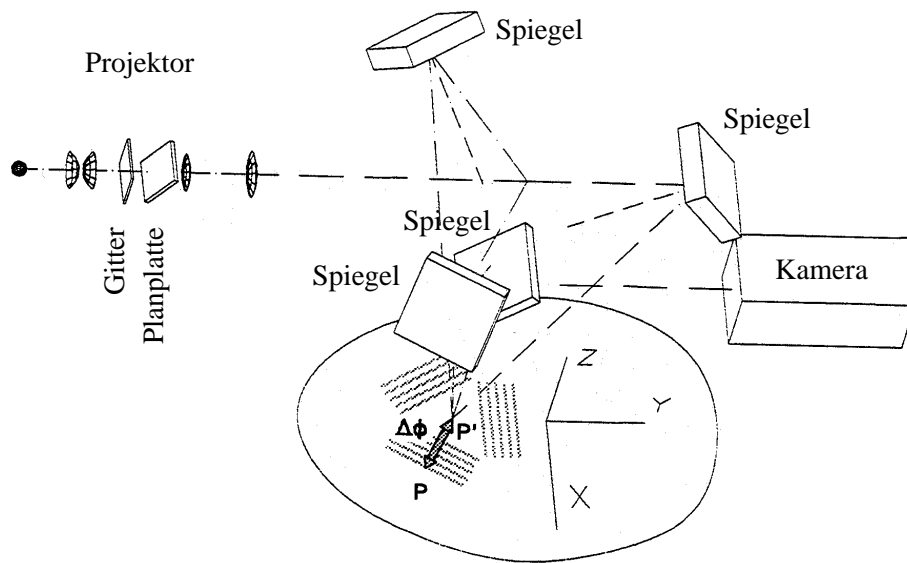


Abb. 43: Drei orthogonale Streifensysteme (Kowarschik et al., 1993)

Die zu den jeweiligen Objektpunkten gehörenden Pixelkoordinaten sind bei diesem Verfahren unerheblich und gehen nicht in die Objektkoordinatenberechnung ein. Soll das Verfahren als absolut messendes Verfahren eingesetzt werden, wird im hierarchischen Phasenschiebverfahren die sequentielle Akquisition von mindestens 18 Bildern notwendig.

5.9. Fokussequenzen

Ein geringer Tiefenschärfebereich, der bei manchen Anwendungen mit konvergenter Anordnung von Kamera und Projektor als Nachteil auftritt, kann bei Anwendungen im extremen Nahbereich auch als Meßverfahren genutzt werden: Die Tatsache, daß die Ausdehnung des Tiefenschärfebereichs mit dem Quadrat der Vergrößerung abnimmt, kann zur Bestimmung von Tiefenkoordinaten aus der Analyse der lokalen Unschärfe eines Bildes genutzt werden. Wird ein Gitter auf eine Oberfläche projiziert, so werden bei limitierter Tiefenschärfe jeweils nur bestimmte Tiefenbereiche der Objektoberfläche scharf abgebildet. Ein Maß für die Schärfe kann dabei durch einfache lokale Gradientenverfahren gebildet werden. Wird nun die Optik der Kamera (oder des Projektors) über den ganzen Tiefenbereich im Objektraum durchfokussiert, erhält man über die Gradientenbildung und geeignete Interpolationstechniken Tiefeninformationen über das gesamte Bild. In (Blais/Rioux, 1986) wird ein System vorgestellt, bei dem durch mechanische Fokussierung in 24 Stufen eine Auflösung von $1/250$ der Tiefenausdehnung eines Objekts erzielt wurde; durch direkte Verarbeitung auf dem analogen Videosignal betrug die Rechenzeit dabei weniger als eine Sekunde.

5.10. Diskussion der Verfahren

Alle in Kapitel 5.3 - 5.8 gezeigten Verfahren basieren auf der Anwendung von strukturiertem Licht in Kombination mit sequentiellen Mehrbildtechniken zur Erzielung von Eindeutigkeit bei der Zuordnung im Triangulationsverfahren. Die meisten der Verfahren dienen letztlich lediglich dazu, im

Triangulationsverfahren zu den Bildkoordinaten (x', y') jedes Pixels in der Kamera eindeutig und möglichst genau eine Streifenkoordinate x'' im Projektor zu bestimmen. Die Minimalanforderungen hinsichtlich der Anzahl zu akquirierender Bilder und die charakteristischen Eigenschaften der diskutierten Verfahren sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Verfahren	Anzahl Bilder	Zuverlässigkeit	Genauigkeit
Moiré-Einzelbild (5.2)	1	gering	mittel
Phasenschiebeverfahren (5.3)	≥ 6	hoch	hoch
Farbkodierung (Boyer/Kak, 5.7)	1 (RGB)	mittel	gering
Intensity-ratio sensor (5.5)	3	mittel	gering
Dreiprojektorverfahren (5.4)	6	hoch	hoch
Codierter Lichtansatz (Wahl, 5.5)	10 (bei 8 bit)	hoch	gering
MZX-Codes (Malz, 5.6)	6	hoch	hoch
Orthogonale Streifensysteme (5.8)	≥ 18	hoch	hoch
Fokussequenzen (5.9)	~ 25	hoch	gering

Ein deutliches Unterscheidungsmerkmal aller im Vorigen diskutierten Verfahren gegenüber photogrammetrischen Verfahren im engeren Sinne liegt in der Redundanz des Meßprozesses: Während photogrammetrische Systeme als Mehrbildtechniken in aller Regel mit redundanter Information arbeiten und somit die Detektion und Lokalisierung grober Fehler in den gemessenen Bildkoordinaten ermöglichen, arbeiten alle in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren - zumindest in ihrer Grundversion - trotz des Mehrbildansatzes ohne redundante Information. Erst über die Dichte der Meßwerte und (einfachste) Annahmen über die Stetigkeit der vermessenen Oberfläche wird die Erkennung und Elimination von grob fehlerhaften Punkten möglich. Durch Verwendung redundanter Codes oder beispielsweise die Projektion von vier oder fünf statt drei Phasenlagen im Phasenschiebeverfahren - und entsprechende Akquisition weiterer Bilder - können alle hier diskutierten Verfahren allerdings auch gegen grobe Fehler in den Messungen abgesichert werden. Systematische Modellfehler, wie sie zum Beispiel durch eine unzureichende Systemkalibrierung bewirkt werden können, werden jedoch auch dann nicht aufdeckbar.

Eine weitere Einschränkung betrifft den Einsatzbereich der Systeme: Aufgrund der limitierten Lichtleistung von Projektoren ist ihr Einsatz realistischweise auf Objektausdehnungen von maximal etwa 2m x 2m beschränkt. Andererseits haben insbesondere hierarchische Phasenschiebeverfahren heute einen Reifegrad und eine Rechenzeitoptimierung erreicht, die sie derzeit in der industriellen Praxis engeren Sinne gegenüber herkömmlichen photogrammetrischen Systemen überlegen scheinen läßt und zu einer Akzeptanz in vielen Bereichen geführt hat. Phasenschiebeverfahren findet man vorwiegend bei der Digitalisierung von Freiformflächen und bei Qualitätskontrollen mit hohen Genauigkeitsanforderungen, während der kodierte Lichtansatz seine Anwendung vor allem in der

Robotik findet, zum Beispiel bei der Generierung von lokalen Tiefenbildern für die Navigation autonomer Roboter oder die Steuerung von Greifern (Trobina, 1995).

Zur weiteren Steigerung der Zuverlässigkeit der Meßverfahren bietet sich - allerdings in aller Regel auf Kosten der Rechenzeit - eine Kombination mit strengen photogrammetrischen Prinzipien an.

Diese wird beispielsweise in (Strutz, 1993) und (Riechmann, 1995) in Bezug auf den codierten Lichtansatz diskutiert: Sowohl die Kamera wie auch der Projektor werden hier durch einen strengen zentralperspektiven Ansatz unter Berücksichtigung der Objektivverzeichnung modelliert; dies wird erleichtert durch die Verwendung eines LCD-Projektors, welcher sowohl die Projektion von vertikalen wie auch horizontalen Streifen erlaubt. Bei diesem Verfahren werden die Objektkoordinaten von durch den Projektor auf eine Oberfläche projizierten Gitterkreuzen durch vier Aufnahmen mit einer CCD-Kamera photogrammetrisch bestimmt. Auf diese Weise kann der Projektor in einer Bündellösung, in die die Gitterkreuze auf dem LCD als Bildkoordinaten für den Projektor eingehen, vollständig kalibriert werden. Dazu bietet sich, wie in Kapitel 5.5 diskutiert, die Steigerung der Genauigkeit der Feinmessung durch eine Phasenverschiebung bei der letzten Projektion oder eine Subpixelmessung der Streifenkanten an (Trobina, 1995), wobei letztere allerdings nicht mehr einen Tiefenwert für jedes Bildpixel liefert. Alternativ dazu kann auch mehr als eine Kamera für die Oberflächenbestimmung verwendet werden, wodurch der Projektor unter Vernachlässigung seiner Geometrie nur noch zur Generierung von Näherungswerten über die eindeutige Herstellung von Korrespondenzen mittels einer verkürzten Codesequenz benutzt wird; durch die Verwendung mehrerer Kameras können dann flächenhafte Matchingverfahren benutzt werden, was ein dem Phasenschiebep Verfahren vergleichbares Genauigkeitspotential ergibt, allerdings nicht mehr einen Tiefenwert für jedes Pixel, sondern eine deutlich reduzierte Meßwertdichte liefert. Gleichzeitig vermeidet dieser Ansatz auch die aufwendigere Kalibrierung eines Projektors und beeinflusst die Systemkosten in der Regel nur unerheblich.

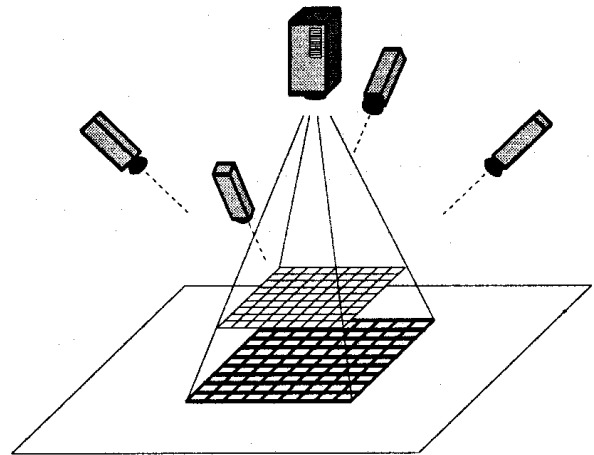


Abb. 44: Photogrammetrische Kalibrierung eines Projektors (Strutz, 1993)

Kapitel 6: Dreizeilenkameras

Aufgrund der größeren Stabilität gegenüber mechanischen Spiegelscannersystemen und ihrer im Vergleich zu flächenhaften Halbleitersensoren noch deutlich höheren Auflösung bieten sich CCD-Zeilensensoren, welche im 'pushbroom'-Prinzip quer zur Flugrichtung angeordnet sind, für die Anwendung in Satelliten zur Erd- und Planetenbeobachtung an. Wird bei dieser Anordnung die Ausleserate des Zeilensensors an die Flughöhe über Grund, die Sensorgröße, die Objektivbrennweite und die Geschwindigkeit des Kameraträgers angepaßt, ergibt sich eine lückenlose Abbildung eines beliebig langen Geländestreifens. Gemäß den Betrachtungen in Kapitel 4 nehmen Zeilenkameras in Satelliten oder Flugzeugen also Sequenzen von Zeilenbildern auf einem regelmäßigen Orts- und Zeitraster auf. Die erste Kamera nach diesem Prinzip im Weltraum war 1983 MOMS-01; große Bekanntheit erreichte vor allem der französische SPOT (satellite pour l'observation de la terre), welcher mit einer aus vier einzelnen Zeilensensoren zu je 1500 aktiven Pixeln zusammengesetzten Zeilenkamera ausgerüstet ist (Chevrel et al., 1981).

Stereomöglichkeiten sind beim SPOT durch schräge Visuren mittels einer seitlichen Verschwenkung der Kameraachse über einen Spiegel um bis zu 24° nach rechts und links und zeitversetzte Aufnahme desselben Streifens von unterschiedlichen Orbits gegeben (Abb. 45).

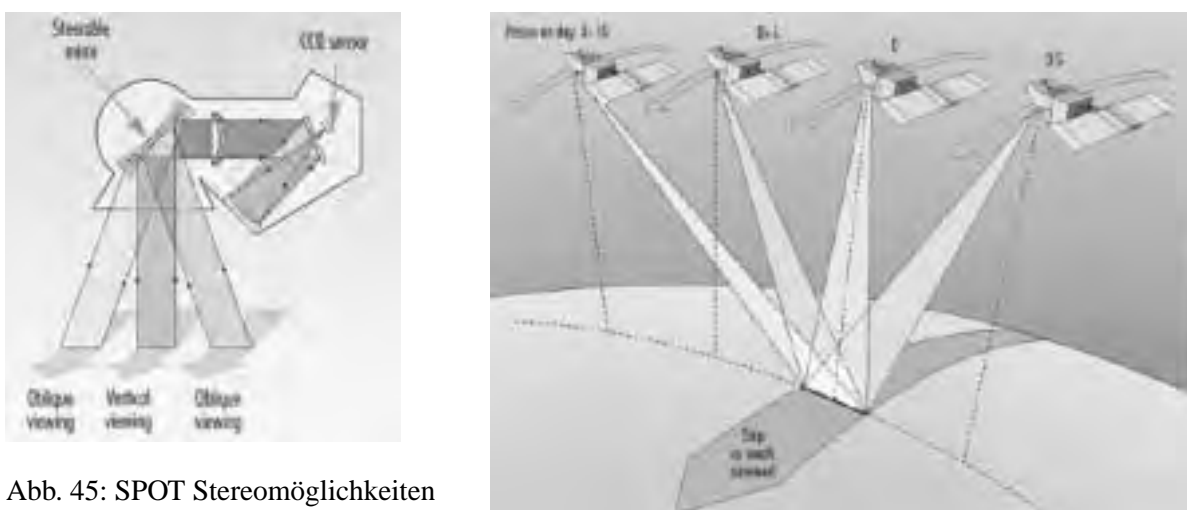


Abb. 45: SPOT Stereomöglichkeiten

Dies bringt jedoch den Nachteil mit sich, daß die Zeiten zwischen den Stereoaufnahmen sehr lang sein können (minimal ein Tag, im ungünstigsten Fall einige Monate), was die Auswertung aufgrund von unterschiedlichen Beleuchtungs- und Wetterkonditionen oder unterschiedlichem Zustand natür-

lichen oder landwirtschaftlichen Bewuchses wesentlich erschweren oder in Extremfällen gar unmöglich machen kann.

6.1. Konzept der Dreizeilenkamera

Den Nachteil der langen Zeiten zwischen den Stereoaufnahmen vermeidet das Konzept der Dreizeilenkamera mit 'along-track stereo' Möglichkeiten (Hofmann et al., 1982). Nach diesem Konzept, bei dem auf der Fokalplatte einer Kamera drei Zeilensensoren so angeordnet sind, daß ein Sensor in Nadirrichtung und je einer geneigt nach vorn und hinten ausgerichtet sind (Abb. 46), wurden inzwischen mehrere Kameras entwickelt (z.B. MEOSS, Lanzl 1986; MOMS-02, Ackermann et al. 1989; HRSC und WAOSS, Albers et al. 1992; TLS, Murai et al. 1995; WAAC, Sandau/Eckardt 1996; DPA, Hahn et al. 1996). In Abhängigkeit von Flughöhe und Stereowinkel ergeben sich hier lediglich Zeitabstände in der Größenordnung einiger Sekunden zwischen den einzelnen Aufnahmen.

Gemäß der in den vorigen Kapiteln verwendeten Terminologie werden hier also trinokulare, quasi-simultane Zeilenbildsequenzen auf einem regelmäßigen Orts- und Zeitraster aufgenommen. Die spezielle Geometrie von bewegten Zeilensensoren mit Zentralperspektive in Zeilenrichtung und Parallelprojektion in Flugrichtung erfordert streng genommen die Bestimmung einer eigenen äußeren Orientierung für jedes einzelne Dreizeilenbild. Dies bedingt die Verfügbarkeit genauer Navigationsdaten oder entsprechende Techniken der Sensormodellierung und der kinematischen oder dynamischen Orientierung unter Einbezug einer regularisierten Trajektorie (Hofmann et al. 1982, Konecny/Wu 1986, Ebner/Müller 1986, Ohlhof 1996) sowie der Systemkalibrierung (u.a. Ohlhof/Kornus, 1994).

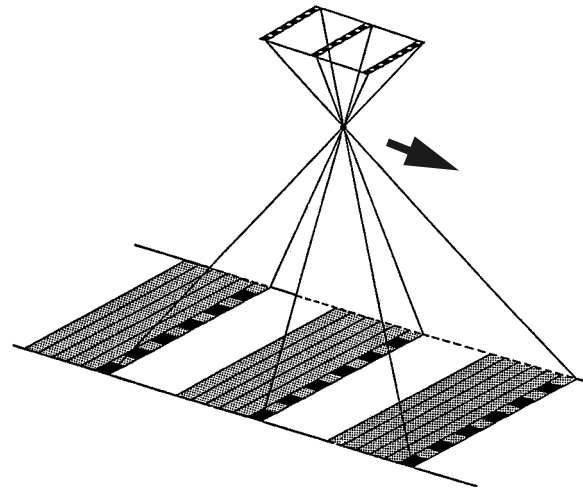


Abb. 46: Prinzip der Dreizeilenkamera

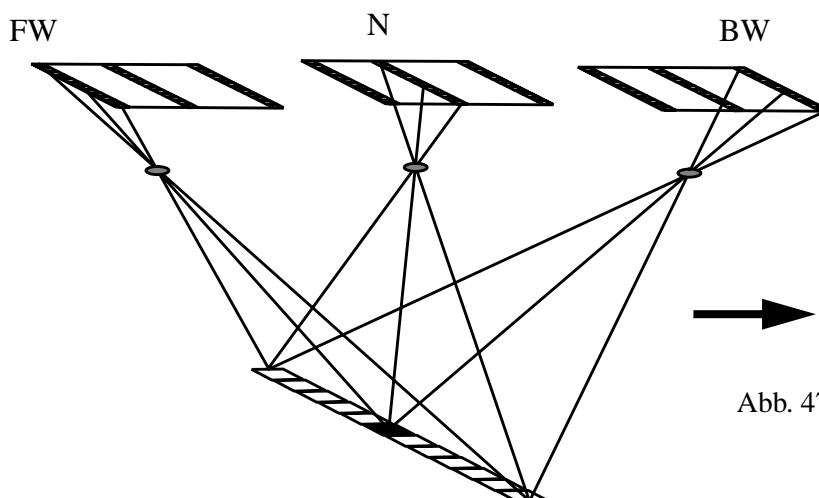
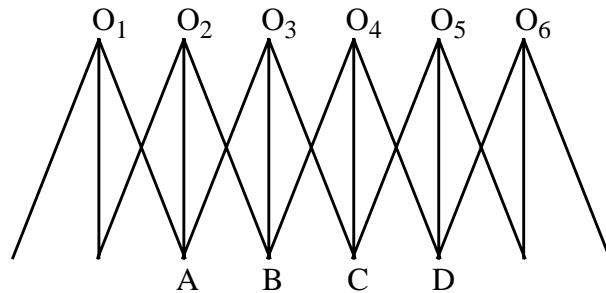


Abb. 47: Schnittgeometrie bei Dreizeilenkameras (nach Hofmann et al., 1982)

Dem ursprünglich auf (Derenyi, 1970) zurückgehenden Dreizeilenkonzept kommt dabei entscheidende Bedeutung bei der Orientierung der Kamera zu: In Analogie zum statischen Bild eines flächenhaften Sensors wird hier eine Streifenauswertung mit Maßstabsanschluß möglich; bei einem gestörten Flug über einem bewegtem Geländeprofil werden die Bodenprofilpunkte quer zur Flugrichtung jeweils so in den Zeilenfolgen der Vorwärts-, Senkrecht- und Rückwärtsbildstreifen abgebildet, daß sich je drei durch die entsprechende Bildzeile und das jeweilige Projektionszentrum gebildete Ebenen in homologen Punkten schneiden (Wu, 1986).

Abb. 48: Verknüpfung bei Dreizeilenkameras (nach Derenyi, 1970)



Die Trajektorie der Kamera wird in die Bestimmung der Orientierung einbezogen und beispielsweise durch Polynome zweiten oder dritten Grades modelliert. Zusätzlich bietet sich die Stützung der Orientierung durch Navigationssysteme wie GPS und INS sich an und ist in vielen heutigen Implementationen verwirklicht, soweit sie nicht den Anwendungsbereich des GPS verlassen. Beim flugzeugbasierten Einsatz von Dreizeilenkamera bieten sich zur Stützung der Orientierung und Punktbestimmung auch Kreuzbefliegungen an (Ebner et al. 1992, Heipke et al, 1994). In (Hofmann, 1986) wird zudem eine leichte Verdrehung der beiden äußeren Sensoren oder eine Neigung des Kameraträgers quer zur Flugrichtung zur Stabilisierung bei Aufnahmen über weitgehend ebenem Gelände bzw. zur Reduktion der Paßpunktanforderungen vorgeschlagen; in (Ebner et al., 1991) wird der Nutzen dieser Verdrehung anhand von Simulationen bewiesen.

Das Konzept einer Dreizeilenkamera als fahrzeuggestütztes System zur Aufnahmen von Gebäudefassaden für 3-D Stadtmodelle zeigen (Maresch/Duracher, 1996). Auch hier wird zur Stabilisierung der Orientierung eine Drehung der beiden äußeren Zeilen um 10° vorgeschlagen; dazu ist die Benutzung eines Flächensensors für die automatische Orientierung sowie die Hinzunahme von geodätischen Messungen und Geschwindigkeitsmessungen zur Rekonstruktion der Trajektorie des Fahrzeugs vorgesehen.

Die Generierung von Epipolarbildern der beiden äußeren Zeilen von MOMS-02 zur stereoskopischen Betrachtung bei Kartierungsanwendungen an einer digitalen Station zeigen (Wang et al., 1994); die Verwendung von paarweise umschaltbaren Dreizeilenbildern für interaktive Messungen an einer digitalen photogrammetrischen Station mit iterativer Echtzeitschleife wird in (Dörstel/Ohlhof, 1996) gezeigt.

6.2. Mehrbildzuordnung bei Dreizeilenkameras

Entsprechend dem geometrischen Modell können für Dreizeilenbilddaten Kernlinien definiert werden, welche im allgemeinen Fall mit torsierter, nicht geradliniger Bahnkurve des Kameraträgers gekrümmt sein werden. Die Strahlenschnittgeometrie bei Dreizeilenkameras (Abb. 47) führt hier zu

denselben Möglichkeiten der Lösung von Mehrdeutigkeiten bei punkt- oder flächenhaften Zuordnungsverfahren wie sie bereits bei den trinokularen Zuordnungsverfahren in Kapitel 2 gezeigt wurden. Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung können über den Objektraum mittels Verifikation möglicher Zuordnungen zwischen zwei Kameras durch Rückprojektion des entsprechenden Objektpunktes ins Bild der dritten Zeile oder direkt im Bildraum durch die Definition reduzierter Suchbereiche auf der Kernlinie gelöst werden.

Verwendet wird die sich aus dieser Geometrie ergebende Bedingung beispielsweise bei der Generierung von digitalen Geländemodellen aus MOMS-02 Daten (Ackermann et al., 1996): Hier wird zunächst in einem merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren die Konsistenz der Zuordnung von durch einen Interestoperator extrahierten Punkten zwischen den Zeilen (BW \rightarrow N und N \rightarrow FW, vgl. Abb. 47) mit der Zuordnung zwischen (BW \rightarrow FW) geprüft; trotz des Mehrbildansatzes mit diskreten Punkten, der eigentlich weitgehend näherungswertunabhängig sein sollte, wird hier allerdings noch ein Pyramidenverfahren verwendet. Zur Genauigkeitssteigerung wird anschließend, basierend auf den Ergebnissen der merkmalsbasierten Zuordnung, in einem weiteren Verarbeitungsschritt noch ein flächenhaftes Zuordnungsverfahren angewandt. Sowohl beim merkmalsbasierten wie auch beim flächenbasierten Ansatz ist noch die unterschiedliche Auflösung der Kanäle (4.5m im Nadir, 13.5m im vor- und rückblickenden Sensor) zu berücksichtigen.

Eine analog zu dem in (Stewart/Dyer, 1988) gezeigten trinokularen Ansatz (Kapitel 2.7, Abb. 17) über einen Parallaxenvergleich der Zuordnungen (BW \rightarrow N und N \rightarrow FW) verwirklichte Konsistenzprüfung zeigen (Lehner/Gill, 1992) für die Generierung von digitalen Geländemodellen aus MEOSS-Daten. Auch hier werden allerdings Näherungswerte über ein Pyramidenverfahren bestimmt, so daß die Mehrbildgeometrie nicht zur Lösung von Mehrdeutigkeiten, sondern nur zur nachträglichen Erkennung und Elimination grober Fehler im Sinne der Steigerung der Zuverlässigkeit ausgenutzt wird. Das Kriterium dabei ist die Differenz der Parallaxen eines Punktes bei der Zuordnung zwischen dem Nadirsensor und dem vor- und dem rückblickenden Sensor, welche einen vorgegebenen Schwellwert nicht überschreiten darf. Eine ähnliche Konsistenzprüfung der Zuordnung zwischen je zwei Zeilen zeigen (Wu/Murai, 1997) bei der Anwendung einer Dreizeilenkamera im Nahbereich zur Oberflächenbestimmung archäologischer Fundstücke.

Trinokulare Ansätze für die Verifikation möglicher Zuordnungen zwischen zwei Bildstreifen von SPOT-Daten in durch Nadiraufnahme sowie Rechts- und Linksverschwenkung der Optik dreifach überdeckten Bereichen zeigen (Shibasaki/Murai, 1988); allerdings werden die bereits angesprochenen Probleme der Simultanität bei der Akquisition von Stereodaten mit SPOT durch diesen Ansatz noch vergrößert.

6.3. Diskussion des Potentials von Dreizeilenkameras

Die konsequente Ausnutzung der geometrische Stärke von Dreizeilenkameras für die Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung findet man in der Literatur noch erstaunlich selten; viele Autoren (z.B. Baltsavias/Stallmann, 1996) beschränken sich auf die Auswertung der Bilder von zwei der drei Zeilen. Allerdings ist anzumerken, daß bei den typischen satellitengestützten Anwendungen (mit großer Flughöhe und vergleichsweise geringer Höhenausdehnung der Objektoberfläche) Mehrdeutigkeiten eher selten auftreten werden; für flugzeuggestützte Anwendungen (z.B. Sandau/

Eckardt, 1996) dürfte die Möglichkeit der Lösung von Mehrdeutigkeiten daher von wesentlich größerem Interesse sein.

Der halbe Konvergenzwinkel beträgt bei Dreizeilenkameras üblicherweise 20-25°, was einem Basis/Höhenverhältnis von etwa 0.8 : 1 für die beiden äußeren Zeilen entspricht. Betrachtungen über die Optimierung des Winkels zwischen den Blickrichtungen finden sich - allerdings ohne Berücksichtigung der Lösbarkeit von Mehrdeutigkeiten - bei Börner (1996). Die in allen Dreizeilenkameras gewählte symmetrische Anordnung der drei Zeilen entspricht den Betrachtungen bezüglich der kollinearen Anordnung von drei Kameras in Kapitel 2.4

Das Genauigkeitspotential von Dreizeilenkameras wird aufgrund der Orientierungsproblematik demjenigen von Kameras mit flächenhaften Sensoren jedenfalls nachstehen. Der Vorsprung von Zeilensensoren gegenüber Flächensensoren hinsichtlich der Auflösung dürfte sich in Zukunft eher verringern. Auf dem Markt verfügbar sind heute Zeilensensoren mit bis zu 12'000 Pixeln und Flächensensoren mit bis zu 4096x4096 Pixeln; Entwicklungen mit ca. 8000x8000 Pixeln haben Laborstatus erreicht. Bedenkt man, daß bei einer Limitierung von heutigen Waferproduktionsstraßen auf 6 Zoll und einer aufgrund der Licht- und Abbildungsverhältnisse bei Luftbildaufnahmen und der gegebenen Empfindlichkeit von Silizium realistischerweise zu fordernden Pixelgröße in der Größenordnung von 10µm Zeilensensoren von mehr als 15'000 Pixel und Flächensensoren von mehr als 10'000x10'000 Pixel zumindest nicht aus einem Stück herstellbar sind, muß man schließen, daß beide Typen zumindest auf mittelfristige Sicht an eine Grenze stoßen werden. Damit dürften in Luftbildanwendungen mit geometrischer Aufgabenstellung Flächensensoren mittelfristig das größere Potential aufweisen. Wesentlich günstiger erscheint das Potential von Mehrzeilenkameras dagegen bei Aufgabenstellungen radiometrischer Natur, wo sich durch die Kombination mehrerer Zeilensensoren leicht multispektrale Systeme konstruieren lassen (vgl. Kapitel 8.2.3). Da multispektrale Systeme zur Akquisition von georeferenzierten Daten in der Umweltbeobachtung ein bisher nur ansatzweise ausgeschöpftes Potential aufweisen, dürfte hier zukünftig ein Schwerpunkt bei der Entwicklung von Mehrzeilenkameras liegen.

Selbst in neueren satellitengestützten Systemen (EarthWatch EarlyBird mit vier 1024x1024 Kodak CCD-Sensoren) findet man inzwischen bereits Flächensensoren. Hierzu ist allerdings anzumerken, daß aufgrund der üblicherweise bei satellitengestützten Systemen verwendeten kleinen Öffnungswinkel die Strahlenschnittgeometrie bei einem einzelnen flächenhaften Nadirsensor ziemlich schlecht sein wird, so daß auch Flächensensoren in satellitengestützten Systemen auf Mehrsensorprinzipien basieren oder eine Verschwenkung des Sensors erlauben müssen, wenn Stereofähigkeiten verlangt sind. Beim EarlyBird wird dies beispielsweise durch eine Verschwenkung des Sensors über einen Spiegel um bis zu 30° in Flugrichtung oder seitlich zur Flugrichtung erreicht, was quasi-simultane Mehrbildakquisition und Stereofähigkeiten allerdings nur für beschränkte Gebiete bietet. Aus diesem Grunde und auch aufgrund des bereits erwähnten radiometrischen Potentials und wegen der wesentlich geringeren Bahnstörungen werden Drei- oder Mehrzeilenkameras in satellitengestützten Systemen ihre Vorherrschaft gegenüber Flächensensoren vermutlich behaupten können.

Kapitel 7: Mehrbild-basierte Datenakquisitionstechniken

Im Sinne der in Kapitel 4 gegebenen Definition von Bildsequenzen können unter dem Aspekt der Mehrbildtechniken auch Verfahren zur Gewinnung hochauflösender digitaler Bilder durch Macro- oder Microscanningtechniken sowie Verfahren zur Tomographiedatengewinnung durch Aufnahme von Bildsequenzen diskutiert werden. Zwar handelt es sich dabei nicht um Algorithmen, sondern um auf Mehrbildtechniken beruhende Verfahren der Datenakquisition. Weil diese jedoch in einigen Anwendungsbereichen erhebliche praktische Bedeutung haben, sollen sie im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls kurz vorgestellt werden.

7.1. Macro- und Microscanning Techniken

Die geometrische Auflösung der in der Frühzeit der digitalen Photogrammetrie verfügbaren CCD Sensoren erwies sich für viele Anwendungen als unzureichend. Aus diesem Grunde wurden verschiedene Techniken zur Erhöhung der Auflösung durch bewegte Sensoren oder bewegte Optiken entwickelt, welche allerdings heute aufgrund der zunehmend auf dem Markt angebotenen hochauflösenden CCD Sensoren an Bedeutung verlieren.

Die Methoden können in folgende Kategorien klassifiziert werden:

- Macroscanning
- Microscanning
- Spiegelscannersysteme
- CCD Sensoren in Theodoliten

Ein gemeinsamer Nachteil aller auf sequentieller Aufnahme basierender Verfahren zur Akquisition von hochauflösenden digitalen Bildern wie auch der in Kapitel 8.1.2 erwähnten sequentiellen Filtertechniken ist die nicht-simultane Aufnahme. Dies macht ihre Verwendung bei Applikationen mit bewegten Objekten oder bewegter Kamera weitgehend unmöglich, was insbesondere auch die Anwendung des Prinzips in Luftbildkameras ausschließt. Selbst bei statischen Anwendungen im Freien treten häufig Probleme auf, weil Beleuchtungsänderungen - beispielsweise bei teilweise bewölktem Himmel - zu radiometrischen Effekten im Bild führen, welche auch durch eine aufwendige Nachbearbeitung nicht immer vollständig korrigiert werden können. Der Markt für solche Kameras ist daher eher klein geblieben und mit Ausnahme vereinzelter Anwendung in photogrammetrischen Systemen in der Industrie vor allem auf statische Reproduktionsaufgaben mit kontrollierter Beleuchtung fokussiert.

7.1.1. Macroscanning

Das Prinzip des Macroscanning beruht auf der Verschiebung eines Halbleitersensors mit limitierter Auflösung zur sequentiellen Abtastung eines größeren Bildbereichs. Frühe Entwicklungen vor allem in der digitalen Studiotechnik basierten auf vertikal oder horizontal verschobenen Zeilensensoren, konnten sich jedoch vor allem wegen der geringen mechanischen Positionierungsgenauigkeit des Sensors in der Photogrammetrie nicht durchsetzen. In der Photogrammetrie wurde Macroscanning vor allem durch das Prinzip des Reséauscannings (Luhmann/Wester-Ebbinghaus 1986, Riechmann 1990) in der Reséauscanningkamera Rollei RSC bekannt. Bei dieser wird ein flächenhafter CCD Sensor sequentiell über das Bildformat einer Mittelformatkamera verschoben, wobei die limitierte Positionierungsgenauigkeit der Schrittmotoren durch den Bezug aller Bildkoordinaten auf Reséaukreuze verbessert wird; gleichzeitig erlaubt diese Technik beliebiges Fokussieren für jeden Bildausschnitt durch Verschiebung des Sensors in Tiefenrichtung und Affintransformation aller Bildkoordinaten in die jeweilige Reséaumasche.

7.1.2. Microscanning

Im Gegensatz zur Verschiebung des Sensors über einen größeren Bildbereich beim Macroscanning beruht das Prinzip des Microscanning (Lenz, 1989) auf der Vervielfachung der Pixelauflösung durch eine mehrfache Verschiebung des Sensors (bzw. des Sensors mitsamt einer die Pixelgröße verkleinernden Maske) um Bruchteile eines Pixels in beiden Bildkoordinatenrichtungen, wodurch Auflösungen bis zu 4500x3500 Pixel mit Standard CCD Sensoren erreicht werden konnten (Goldschmidt/Richter, 1993) und gleichzeitig volle RGB-Auflösung bei CCD Sensoren mit Filtermasken erzielt werden kann (vgl. Kapitel 8.1). Bekanntheit in der Photogrammetrie erlangten vor allem die ProgRes 3000 (Lenz, 1989) und die JenScan 4500 (Goldschmidt/Richter, 1993). In einer Kombination von Micro- und Macroscanning wurde sogar eine Auflösung von mehr als 20'000x20'000 Pixel erreicht (Lenz/Lenz, 1993).

7.1.3. Spiegelscannersysteme

Analog zum Prinzip eines Laserscanners können größere Bildformate auch bei unbewegtem Sensor durch eines Zweiachsspiegel abgetastet werden. Solche Systeme sind auf dem Markt für Überwachungsaufgaben mit Auflösungen bis zu 20'000x20'000 Pixel verfügbar, haben sich jedoch wegen der geometrischen Eigenschaften so generierter Bilder in der Photogrammetrie nicht durchsetzen können.

7.1.4. Schwenk-Neigekamera und Videotheodolite

Ebenfalls auf rotatorischer statt auf translatorischer Abtastung eines größeren Objektbereichs basiert das Konzept der Schwenk-Neigekamera (Uffenkamp, 1993), welches die Integration eines CCD Sensors in die Mechanik eines Theodoliten zur hochauflösenden Abtastung eines größeren Objektbereichs darstellt. Aufgrund des Genauigkeitspotentials von Theodoliten ist dieses Konzept im Gegensatz zu dem unter 7.1.3 genannten durchaus für Meßzwecke einsetzbar. Trotz der Vorteile eines praktisch unlimitierten Gesichtsfeldes und sehr hoher Auflösung hat sich dieses Konzept aufgrund der hohen Kosten, der umständlichen Handhabung und des mit der Erzielung einer guten Netzgeometrie verbundenen Aufwandes bisher in der Praxis nicht durchsetzen können.

Ebenfalls in diese Kategorie gehören - wenn auch nicht primär für photogrammetrische Aufgabenstellungen angewandt - Videotheodolite, für die sich in Kombination mit Verfahren der Bildererkennung und subpixelgenauen Bildkoordinatenbestimmung große Anwendungspotentiale in der Automatisierung konventioneller geodätischer Meßaufgaben ergeben.

7.2. Laminographie

Eine frühe Technik in der dreidimensionalen Röntgenbildanalyse stellt die Computerlaminographie dar. Bei der Laminographie handelt es sich um ein tomographisches Verfahren, bei welchem eine Schicht aus einem Volumendatensatz durch Abbildungen unter verschiedenen Projektionen einer rotierenden Röntgenquelle rekonstruiert werden.

Das Prinzip der Laminographie beruht auf einer Röntgenquelle S und einem Röntgendetektor D, welche synchron in parallelen Ebenen um 180° phasenversetzte Kreisbahnen beschreiben (Abb. 49). Das Objekt wird kontinuierlich während des gesamten Umlaufs durchstrahlt, wodurch die Abbildung auf dem Detektor eine Integration über die Kreisbahn darstellt. Dabei wird, wie aus Abb. 49 ersichtlich, eine zu den beiden Ebenen parallele Schicht, die Fokusebene der Laminographie, scharf abgebildet, während der Rest der Objekts unscharf abgebildet wird. Somit erhält man - ohne jede Bildverarbeitung - auf Röntgenfilm ein Schichtbild des Objektes, welches zur Verbesserung der Interpretierbarkeit

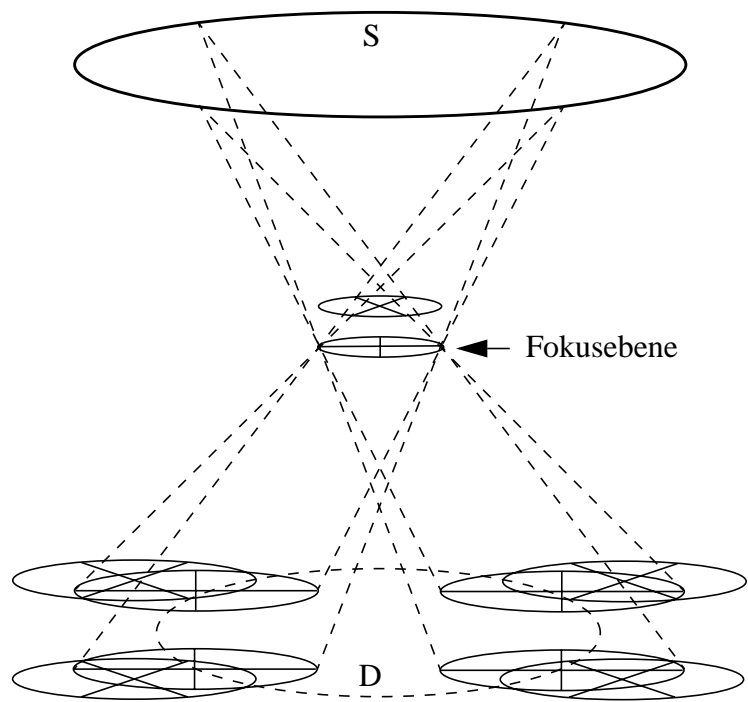


Abb. 49: Prinzip der Laminographie

durch geeignete Filteroperationen und Kontrastoptimierungen aufbereitet werden kann. Alternativ zu der Rotationsbewegung von Sensor und Detektor kann dasselbe Prinzip auch durch eine Translation von Sensor und Detektor oder durch eine Bewegung des Objekts realisiert werden.

Soweit kann das Verfahren nicht als Mehrbildtechnik, sondern nur als Akkumulationsverfahren zur Gewinnung eines einzelnen Schichtbildes angesehen werden; für die Akquisition weiterer Schichtbilder ist eine weitere Rotation von Strahlungsquelle und Sensor mit entsprechend vertikal verschobenen Aufbau nötig. Eine dreidimensionale Objektrepräsentation erhält man erst durch Verfahren der Computerlaminographie (Ewert et al., 1994): Statt der kontinuierlichen Durchstrahlung geht man hier über zur Akquisition von Röntgenbildern an diskreten Punkten (S, S', S'', \dots) der Kreisbahn von Strahlungsquelle und Sensor. Die einzelnen Projektionen werden dabei nicht in einem Einzelbild akkumuliert, sondern als Bildsequenz abgespeichert. Die Gewinnung von Schichtbildern kann dann als einfache Addition der Projektionen erfolgen. Wie aus Abb. 50 ersichtlich, erhält man dabei zunächst wie in der zweidimensionalen Laminographie ein Bild einer mittleren Schicht des Objekts.

Führt man nun weitere Additionen der Projektionen unter unterschiedlichen gegenseitigen Verschiebungen der Bilder durch, so erhält man Schichtbilder weiterer Fokusebenen. Bei Verwendung mehrerer Röntgenquellen und Detektoren ist auch eine simultane Aufnahme in dynamischen Prozessen möglich.

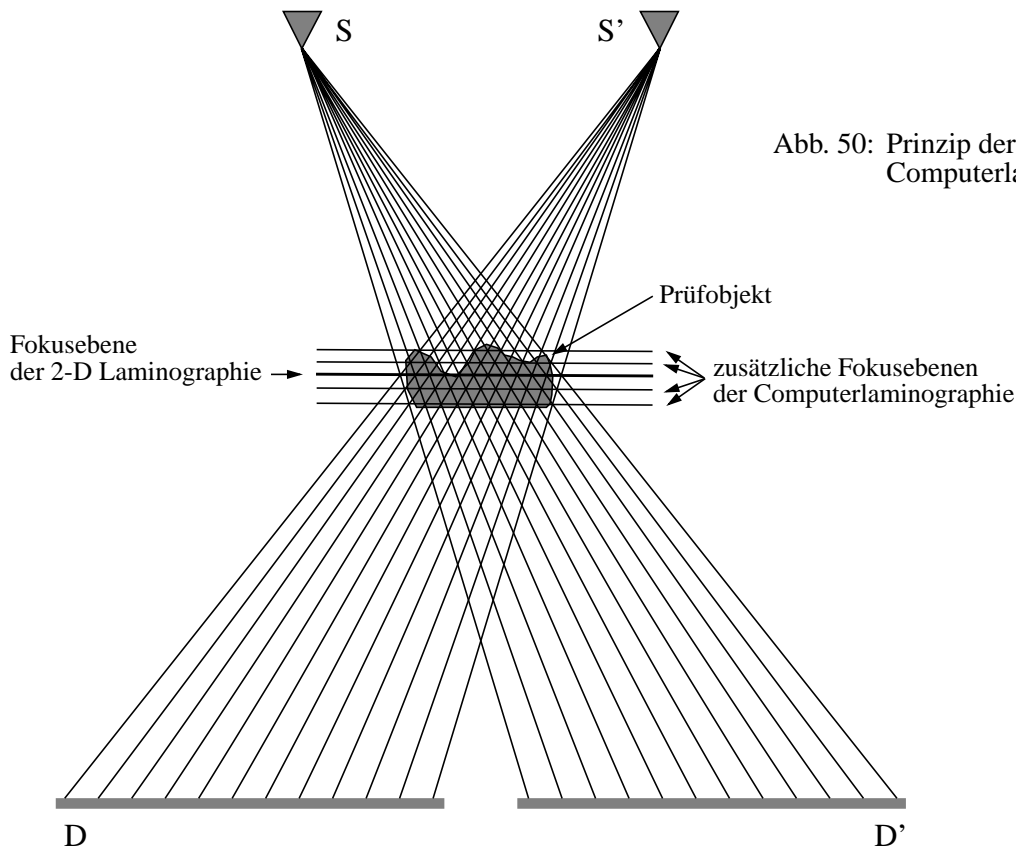


Abb. 50: Prinzip der Computerlaminographie

Die Bildakquisition erfolgt dabei beispielsweise durch eine mit einem Röhrenverstärker ausgerüstete CCD Kamera; seit kurzer Zeit sind auch röntgenempfindliche Halbleiterkameras verfügbar, welche die üblicherweise mit der Verwendung von Röhren verbundenen Driftprobleme vermeiden.

Während die in ihrem Grundprinzip seit den 30er Jahren bekannte Laminographie in der medizinischen Tomographie durch die (nicht unmittelbar auf bildgebenden Verfahren basierende und daher hier nicht weiter diskutierte) Computertomographie verdrängt wird, findet sie in Form der Computerlaminographie in der industriellen Qualitätskontrolle zunehmend Anwendungen. Kommerzielle Systeme mit einer Auflösung in der Größenordnung von bis zu 1 : 10'000 befinden sich im praktischen Einsatz beispielsweise bei der visuellen oder automatischen tomographischen Inspektion von Leiterplatten auf versteckte Kurzschlüsse (Kalukin et al., 1996). Vorteile des Verfahrens sind die algorithmische Einfachheit und die Tatsache, daß aus einem Satz von Projektionen mehrere

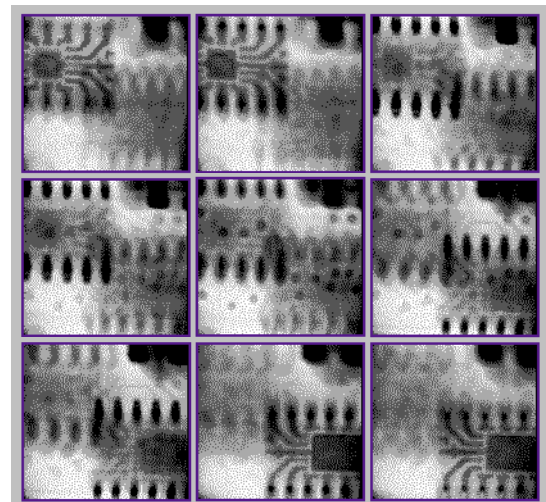


Abb. 51: Computerlaminographie einer Leiterplatte, Tiefenbereich 3mm

Schichten rekonstruiert werden können, was den Zeitaufwand und die Strahlenbelastung gering hält; nachteilig sind die durch die unscharf abgebildeten Bereiche oberhalb und unterhalb der jeweiligen Fokusebene verursachte Kontrastarmut der Abbildungen und eine Anfälligkeit für Artefakte bei bestimmten Objektformen, welche ohne vorherige Kenntnis des Prüfobjekts nicht als solche identifiziert werden können.

7.3. Akquisition von Tomographiedatensequenzen

Im Gegensatz zur herkömmlichen Computertomographie findet man in der Strömungsmechanik auf der Akquisition von Bildsequenzen basierende Tomographieverfahren. Die Ansätze beruhen auf der Markierung von transparenten Flüssigkeiten mit Fluoreszin in sehr niedrigen Konzentrationen.

Fluoreszin hat die Eigenschaft, Licht einer bestimmten Wellenlänge zu absorbieren und dabei Licht einer anderen Wellenlänge zu emittieren. Wird eine mit Fluoreszin markierte Flüssigkeit durch eine Laserlichtschicht mit geeigneter Wellenlänge beleuchtet, so wird das in der Lichtschicht befindliche Fluoreszin deutlich sichtbar werden, während das darüber befindliche, nicht angeregte Fluoreszin für eine senkrecht zur Lichtschicht angeordnete Kamera unsichtbar bleibt. Wird nun ein dreidimensionales Beobachtungsvolumen

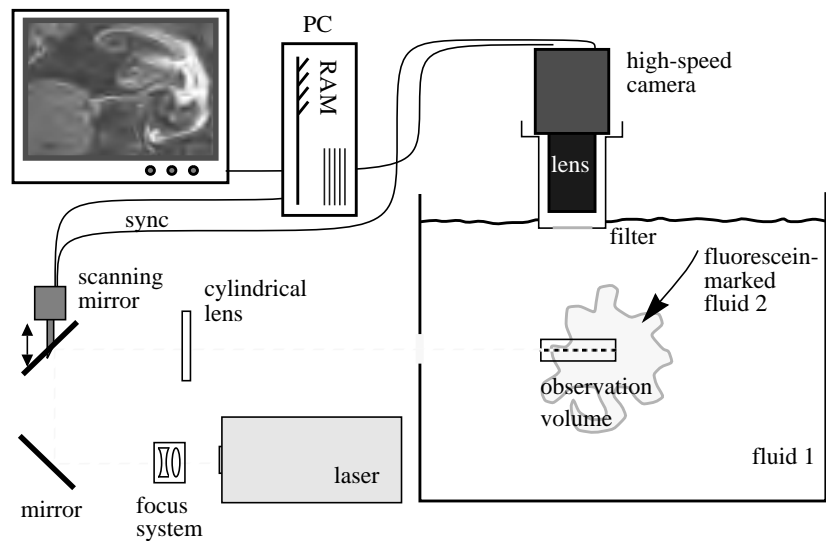


Abb. 52: Systemkonfiguration zur Akquisition von Tomographiedatensequenzen in Mischvorgängen (Maas, 1993)

durch eine in Tiefenrichtung verschobene Lichtschicht abgetastet und synchron mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit genügend hoher Bildrate aufgenommen (Abb. 52), können quasi-simultan Volumendaten beispielsweise von chemischen Mischvorgängen in turbulenten Strömungen gewonnen werden. Durch Abtasten mit einem Sägezahnmuster auf der Zeitachse (Abb. 53) können so Sequenzen von Tomographiedatensätzen gewonnen werden. Ein erstes nach diesem Prinzip realisiertes System, bei dem allerdings der Aspekt der Akquisition von Tomographiedatensequenzen aufgrund der niedrigen zeitlichen Auflösung damals verfügbarer halbleiterbasierter Hochgeschwindigkeitskameras nur beschränkt zur Geltung kam, wurde in (Dahm et al., 1990) gezeigt. Eine Realisation desselben Prinzips, welche die Akquisition von maximal 20 aufeinanderfolgenden Volumendatensätzen mit $256 \times 256 \times 50$ Voxeln bei einer zeitlichen Auflösung von 10Hz erlaubt, wird in (Maas, 1993) und (Maas et al., 1994) gezeigt.

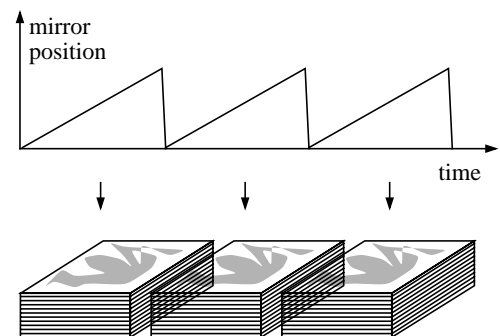


Abb. 53: Scanprofile zur Tomographiedatensequenzakquisition

Basierend auf diesen Tomographiedatensequenzen wird in (Maas, 1993) und (Maas et al., 1994) eine Erweiterung des Least Squares Matchings (vgl. Kapitel 2.9.2) auf Voxeldaten für die Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern durch Matching zwischen Fluidelementen in aufeinanderfolgenden Datensätzen (Abb. 54) gezeigt. Durch den Ansatz einer 12-parametrischen dreidimensionalen Affintransformation können dabei simultan auch Deformationsparameter von Fluidelementen bestimmt werden, welche Rückschlüsse beispielsweise auf Scherkräfte in der Strömung erlauben. Der Mehrbildaspekt kommt bei dieser Implementation neben der Bildung der Volumendatensätze aus Bildsequenzen auch in der optionalen Einbeziehung von mehr als zwei aufeinanderfolgenden Datensätzen im dreidimensionalen Least Squares Matching unter Annahmen über die zeitliche Entwicklung des Geschwindigkeits- und Deformationsfeldes zwecks Regularisierung in texturarmen Regionen zum Tragen.

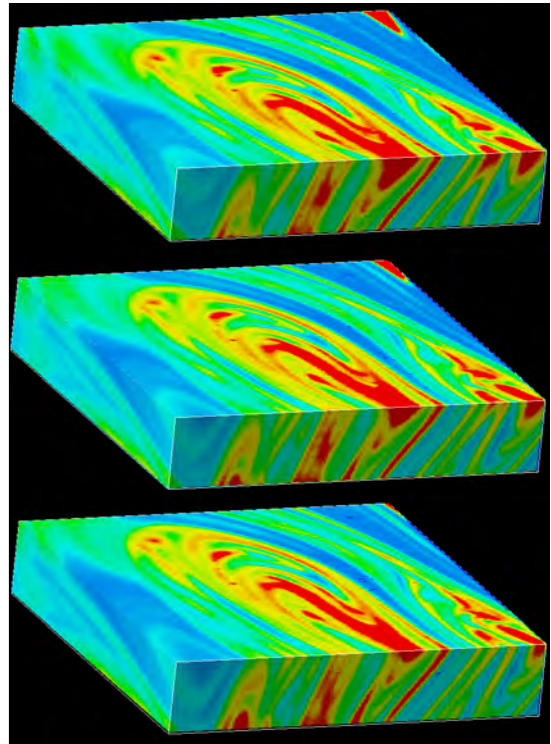


Abb. 54: Tomographiedatensequenz in einem turbulenten Mischvorgang

Kapitel 8: Radiometrische Mehrbildverfahren

Neben den in den vorigen Kapiteln behandelten geometrischen Aspekten sind Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie auch unter radiometrischen Aspekten von Interesse. Hier sind vor allem multi- und hyperspektrale Kameras sowie multisensorielle Systeme in der satelliten- und flugzeuggestützten Fernerkundung zu nennen, bei welchen Mehrbildtechniken zur Erzielung radiometrischer Eindeutigkeit bei Klassifikationsaufgaben angewandt werden. Desweiteren sind vor allem in der Nahbereichsphotogrammetrie die Gewinnung von Farbbildern mit Dreichipkameras und sequentiellen Filtertechniken zu nennen.

Ebenfalls als radiometrische Techniken anzusehen sind Shading-Verfahren, bei denen Objektoberflächen aus Intensitäten im Bildraum und Kenntnissen über die geometrische Anordnung von Kamera und Lichtquelle(n) sowie Annahmen über das Reflektionsverhalten und die Beschaffenheit der Oberfläche rekonstruiert werden.

8.1. Farbbildgewinnung mit CCD Kameras im Nahbereich

Halbleitersensoren basieren auf dem Prinzip, daß einfallende elektromagnetische Strahlung (in Form von Photonen) in einer Siliziumstruktur Elektronenlochpaare generiert, welche sich über eine definierte Integrationszeit als Ladungen in einem Potentialtopf sammeln und durch geeignete Auslesetechniken gemessen werden. Auch wenn Licht verschiedener Wellenlängen unterschiedlich tief in Silizium eindringt (Licht unter 400nm wird gespiegelt, grünes Licht dringt etwa $1\mu\text{m}$ tief in den Sensor ein, rotes Licht $5\text{-}8\mu\text{m}$, für Wellenlängen über $1100\mu\text{m}$ ist Silizium transparent), ist dieser Prozeß prinzipiell ein monochromer Prozeß, bei welchem Lichtintensitäten gemessen und als Bild ausgelesen und visualisiert oder gespeichert werden können, nicht jedoch spektrale Eigenschaften der abgebildeten Szene. Um diese Limitierung zu überwinden wurden verschiedene Techniken entwickelt:

- 1-Chip Maskentechniken
- 3-Chip Kameras
- sequentielle Filtertechniken

Während 1-Chip Maskentechniken auf der Anbringung von roten, grünen und blauen Filtermasken vor einzelnen Pixeln oder Zeilen des Sensors basieren und aufgrund von Interpolationstechniken und der damit verbundenen (oft anisotropen) Limitierung der geometrischen und radiometrischen Qualität der Bilddaten für photogrammetrische Anwendungen wenig geeignet erscheinen, sind die anderen beiden Techniken als Mehrbildtechniken anzusehen. Im folgenden seien Techniken zur

Akquisition flächenhafter Mehrfarbenbilder kurz beschrieben. Auf multi- und hyperspektrale Techniken, welche das Spektrum einer Zeile simultan aufnehmen und zur Gewinnung flächenhafter Bildinformation bewegt werden müssen, wird in Kapitel 8.2 eingegangen.

8.1.1. 3-Chip Kameras

Eine häufig angewandte Technik zur simultanen Akquisition eines RGB-Bildes in voller geometrischer und radiometrischer Auflösung ist die Verwendung eines Strahlenteilerwürfels mit dichroitischen Spiegeln und drei identischen CCD-Sensoren mit Filtern für Rot, Grün und Blau im Strahlengang der einzelnen Sensoren (Abb. 55). Aufgrund der limitierten Positionierungsgenauigkeit während der Herstellung verlangen solche Kameras Kalibrierungstechniken, bei denen zumindest die Koordinaten des Hauptpunktes, oft aber auch noch weitere Parameter, für jeden der drei Sensoren individuell zu bestimmen sind. Dies gilt nicht nur für messtechnische Anwendungen, sondern kann auch schon für einfache TV- und drucktechnische Anwendungen nötig sein. Die Simultanität der Aufnahme und die qualitative Überlegenheit gegenüber Ein-Chip Kameras mit Filtermaskentechniken hat diese Technik jedoch zum Standard für Studiokameras gemacht.

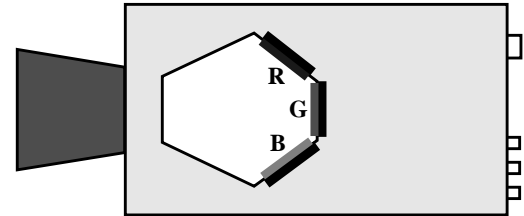


Abb. 55: 3-Chip CCD Kamera

8.1.2. Sequentielle Filtertechniken

Als preiswertere und flexiblere Alternative zu 3-Chip Kameras bieten sich Techniken der sequentiellen Aufnahme mehrerer spektraler Kanäle an. Diese haben den Vorteil, daß die Anzahl der Spektralkanäle nicht durch die Anzahl der Sensoren limitiert ist, und daß die spektralen Eigenschaften des Systems z.B. für Klassifizierungsaufgaben durch die Wahl von Filtercharakteristiken fast beliebig beeinflußt werden können. Als Nachteil steht dem der Verlust der simultanen Farbbildgewinnung gegenüber, was bei Anwendungen mit bewegtem Sensor oder bewegtem Objekt spezielle Vorkehrungen zur Referenzierbarkeit der einzelnen Spektralkanäle bedingt. Als Filter, welche hier in der Regel vor dem Objektiv, seltener auch zwischen Objektiv und Sensor angebracht werden, sind auf dem Markt eine ganze Reihe von Techniken verfügbar: Filterräder, Beugungsgitter, akusto-optische Beugungsgitter oder Flüssigkristalle erlauben eine mehr oder weniger flexible Einstellung von Empfindlichkeitsmaxima und Bandbreite einzelner Kanäle, deren Intensität sequentiell durch einen monochromen CCD Sensor aufgenommen wird. In statischen Anwendungen kann auf diese Weise bei Verwendung von kaskadierten doppelbrechenden Flüssigkristallfiltern (LCTF - liquid crystal tunable filter) eine sehr hohe spektrale Auflösung mit justierbaren Bandbreiten im Nanometerbereich über einen weiten Spektralbereich realisiert werden.

8.2. Multi- und hyperspektrale Systeme für Klassifikationsaufgaben

Analog zu den in Kapitel 8.1 gezeigten Möglichkeiten der sequentiellen oder simultanen Farbbildgewinnung mit CCD-Kameras gibt es eine ganze Reihe von multi- und hyperspektralen flugzeug- oder satellitengestützten Sensorsystemen, in denen Mehrbildtechniken zur simultanen oder sequentiellen Akquisition mehrerer Spektralkanäle in unterschiedlicher Form verwirklicht sind. Da eine vollständige Abhandlung dieser Systeme den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, seien hier nur einige

typische Beispiele diskutiert. Eine grobe Klassifikation multispektraler Sensoren nach den in dieser Arbeit diskutierten Prinzipien ergibt vier unterschiedliche Typen von Sensoren:

- Scannende Systeme mit mehreren diskreten Einzelsensoren
- Scannende Systeme mit einem Zeilensensor
- Pushbroom-Systeme mit mehreren Zeilensensoren
- Pushbroom-Systeme mit einem Flächensensor

Diese Klassifikation stellt zugleich auch eine chronologische Auflistung der Sensorprinzipien dar, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

8.2.1. Scannende Systeme mit mehreren diskreten Einzelsensoren

Ein frühes Beispiel für ein multispektrales satellitengestütztes Sensorsystem ist das amerikanische Landsat Programm, welches seit 1965 besteht und seit 1972 Fernerkundungsdaten liefert. Landsat 1 und 2 waren mit einer RGB-Röhrenkamera und einem vierkanaligem Multispektralscanner (MSS) mit 80m Bodenauflösung im visuellen und nahen Infrarotbereich ausgerüstet; bei Landsat 3 kam ein zusätzlicher Kanal mit 240m Bodenauflösung im thermischen Infrarot hinzu. In Landsat 4 und 5 wurde die Röhrenkamera durch den Thematic Mapper (TM) mit sieben Kanälen im sichtbaren Bereich sowie im nahen, mittleren und thermischen Infrarot abgelöst, welcher bis zu 30m Bodenauflösung bot, wobei die Steigerung der radiometrischen Auflösung für die meisten Benutzer von größerer Bedeutung war als die gesteigerte geometrische Auflösung.

Sowohl MSS wie auch TM stellen optomechanische Scannersysteme dar (Abb. 56), was das geometrische Genauigkeitspotential und aufgrund der limitierten Anzahl von Sensoren auch die radiometrische Auflösung beschränkt. Ohne Stereofähigkeiten ist zudem die Georeferenzierbarkeit der Bilddaten nicht unmittelbar gegeben.

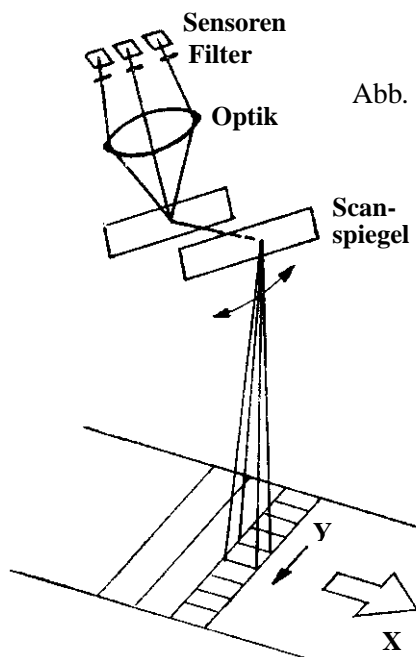


Abb. 56: Prinzip eines Multispektralscanners

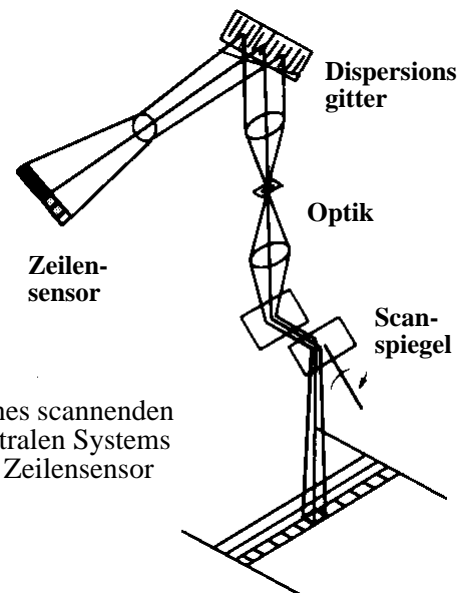


Abb. 57: Prinzip eines scannenden hyperspektralen Systems mit einem Zeilensensor

8.2.2. Scannende Systeme mit einem Zeilensensor

In späteren Entwicklungen (z.B. AVIRIS bei JPL) wurden die diskreten Einzelsensoren durch einen zeilenförmigen Halbleitersensor ersetzt (Abb. 57), auf den das von einem optomechanische Scanner

aufgenommene Licht eines Bodenpunktes über ein dispersives Element spektral zerlegt abgebildet wurde, was die hyperspektrale Aufnahme mehrerer hundert benachbarter Wellenlängenbereiche mit einer spektralen Auflösung in der Größenordnung von 10 Nanometer erlaubt. Das dispersive Element in einem solchen Spektrometer kann dabei im einfachsten Fall ein Prisma sein, bessere Möglichkeiten der Spektralzerlegung sind jedoch durch ein Dispersionsgitter gegeben. Als Zeilensensor bietet sich, solange im Bereich des sichtbaren Lichts gearbeitet werden soll, ein CCD-Sensor an. Für Spektralbereiche jenseits von 1200nm kommen Indiumantimonid-Sensoren oder Sensoren auf der Basis von dotiertem Silizium zur Anwendung. Bei Systemen, welche sowohl den sichtbaren als auch den infraroten Wellenlängenbereich abdecken sollen, ist mehr als ein Sensor und - wenn auch thermisches Infrarot erfaßt werden soll - auch mehr als eine Optik notwendig. Nachteilig ist jedoch auch hier das Prinzip des optomechanischen Scanners, welches aufgrund der im Vergleich zum pushbroom-Prinzip wesentlich kürzeren Belichtungszeiten in Kombination mit einem Zeilensensor mit begrenzter Pixelgröße die radiometrische Genauigkeit limitiert.

8.2.3. Pushbroom-Systeme mit mehreren Zeilensensoren

Mehrere neue Entwicklungen auf dem Gebiet multispektraler satellitengestützter Systeme basieren auf der Verwendung mehrerer Zeilensensoren im 'pushbroom'-Prinzip. MOMS-02 (Abb. 58) beispielsweise weist neben den drei panchromatischen Sensoren für die stereoskopische Streifenaufnahme nach dem Dreizeilenprinzip (Kapitel 6) auch noch vier multispektrale Sensoren im Nadir mit 13.5m Auflösung im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot auf (Abb. 59), deren Bänder auf die spektralen Signaturen von Vegetation, Chlorophyll und eisenhaltigem Gestein abgestimmt sind (Abb. 60).



Abb. 58: MOMS-02

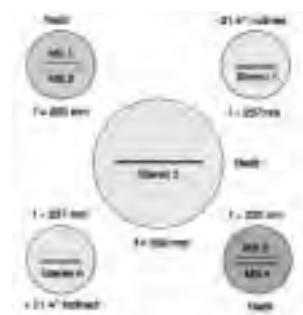
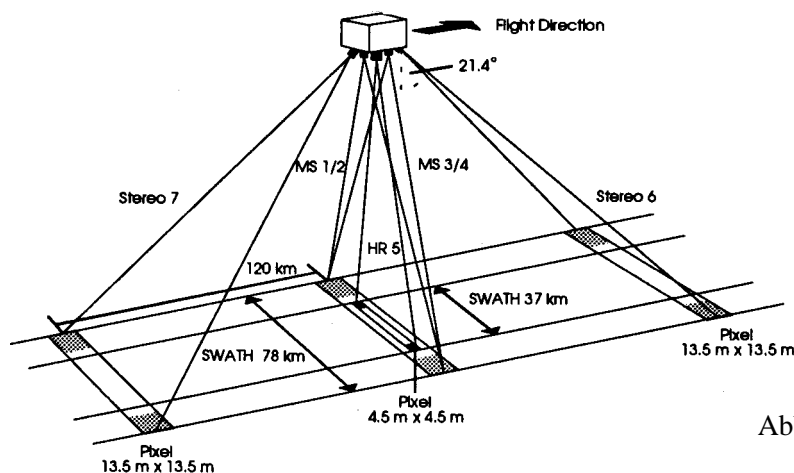


Abb. 59: MOMS-02 - Prinzip und Sensoranordnung (Bodechtel/Zilger, 1996)

Dadurch wird prinzipiell die Kombination der stereoskopischen Aufnahme mit multispektralen Ansätzen zur Objektklassifikation und damit eine direkte Georeferenzierbarkeit möglich. Die Georeferenzierung erfolgt dabei zweckmäßigerweise über die Generierung eines digitalen Geländemodells aus den Bilddaten der drei panchromatischen Sensoren, welches zusammen mit den Orientierungsparametern der Kamera als Basis für ein multispektrales Orthophoto aus den Bilddaten der multispektralen Sensoren dient (z.B. Allison/Muller, 1992). Aufgrund der limitierten Datenrate von

100Mbit pro Sekunde konnten bei MOMS-02 allerdings bislang nur insgesamt vier Kanäle gleichzeitig übertragen und gespeichert werden, was die Möglichkeiten ziemlich einschränkt.

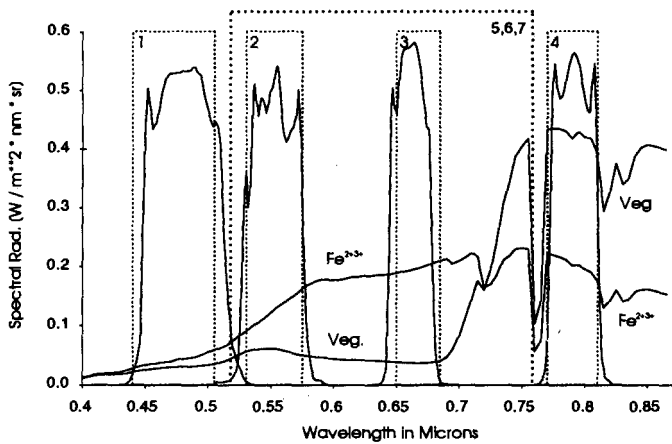


Abb. 60: Spektrale Charakteristik von MOMS-02 (Kaufmann et al., 1996)

Band	λ [μm]	Charakteristik
1	440-505	Blau-Absorption von Vegetation, Durchdringung von Wasser, aufsteigende Schulter der Absorption von eisenhaltigem Gestein
2	530-575	Grünes Maximum von Vegetation
3	645-680	Absorptionsmaximum von Chlorophyll
4	770-810	Infrarotes Maximum von Vegetation, Absorption von Eisen

Eine Anwendung dieser Kombination von stereoskopischer Aufnahme mit multispektralen Verfahren auf der Basis von MOMS-02 Daten wird in (Stöhr et al., 1996) anhand einer Abschätzung von Bodenverlusten durch Erosion in Äthiopien gezeigt. Hierzu werden anhand eines aus den vor- und rückblickenden Sensoren sowie dem roten Nadirsensor bestimmten Geländemodells lokale Geländeneigungen berechnet und mit aus der Kombination von rotem und infrarotem Kanal abgeleiteten Bodenbedeckungsinformationen sowie durch visuelle Interpretation der Bilddaten bestimmten Bodentyparten in einem GIS zu einem Erosionsmodell kombiniert.

Ebenfalls über das Dreizeilenprinzip hinaus ist beispielsweise die HRSC (Albertz et al., 1992) mit insgesamt neun CCD-Zeilensensoren ausgestattet (Abb. 61). Neben einem panchromatischen Nadirsensor und den beiden äußeren panchromatischen Sensoren für die Stereofähigkeit ist die HRSC mit sechs weiteren Zeilensensoren ausgestattet, welche mit Filtermasken für unterschiedliche Bereiche des sichtbaren Lichtes sowie des nahen Infrarot versehen sind. Diese stehen für multispektrale Aufgabenstellungen und Interpretationszwecke zur Verfügung, können aber bei Bedarf - z.B. bei steilen Geländebeziehungen - auch für geometrische Zwecke der Orientierung und DTM-Generierung herangezogen werden, wobei allerdings zu beachten ist, daß die Sensoren auch hier unterschiedlich hohe Auflösungen aufweisen, und daß die neun Sensoren auf drei Fokalebene untergebracht sind und somit Gruppen von je drei Sensoren unterschiedliche Orientierungsparameter aufweisen werden. Umgekehrt kann selbstverständlich auch hier das aus den panchromatischen Kanälen erhaltene Geländemodell zur Georeferenzierung der multispektralen

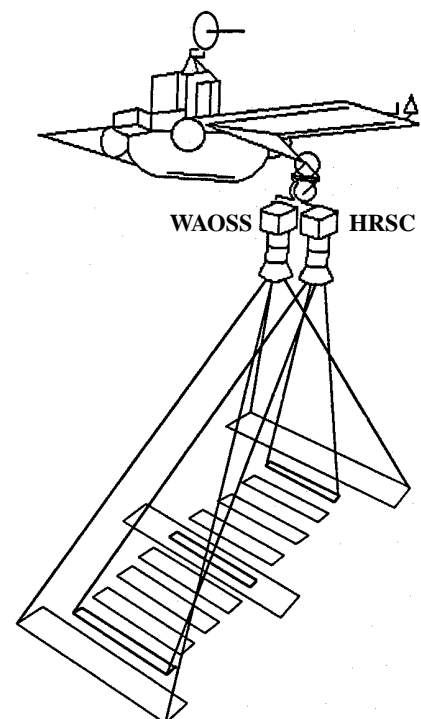


Abb. 61: Sensoranordnung bei HRSC/WAOSS (Albertz et al., 1992)

Sensordaten verwendet werden. Vergleichbare Möglichkeiten der direkten Georeferenzierung multispektraler Daten bieten auch die flugzeuggestützte DPA mit einem dreizeiligen Stereomodul und einem vierzeiligen Spektralmodul (Hahn et al. 1996) sowie die für die EOS-Mission geplante MISR mit neun Zeilensensoren (Jovanovic et al., 1996).

Die Anzahl der Spektralkanäle und die spektrale Auflösung sind bei diesem Prinzip natürlich beschränkt, und die Spektralkanäle werden nicht streng simultan aufgenommen, was bei blickrichtungsabhängigem Reflexionsverhalten zu Einschränkungen der Interpretierbarkeit der Daten führen kann. Simultane Belichtung könnte zwar prinzipiell bei entsprechender Sensoranordnung durch Strahlenteiler erzielt werden, ginge dann aber wieder mit einer reduzierten Signalintensität einher.

8.2.4. Bildgebende Spektrometer

Über die in 8.2.2 diskutierten Möglichkeiten der multispektralen Bilddatenakquisition noch hinaus geht das Prinzip des bildgebenden Spektrometers. Dabei wird ebenfalls nach dem ‘pushbroom’-Prinzip ein Geländestreifen senkrecht zur Flugrichtung aufgenommen und über eine Eingangsoptik, einen Spalt und eine Kollimatoroptik auf ein dispersives Element (Prisma oder Dispersionsgitter) abgebildet, welches das Licht spektral auffächert und des Spektrum des abgebildeten Streifens auf die Fokalebene abbildet.

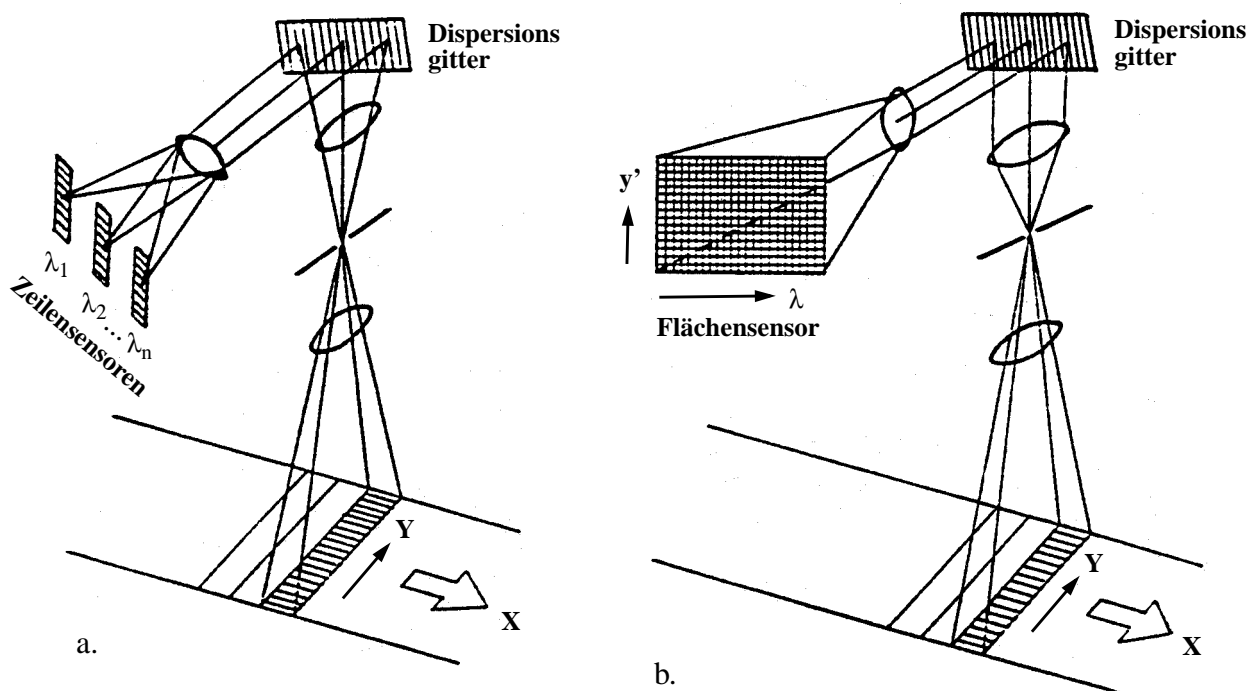


Abb. 62: Auf Zeilen - und Flächensensoren basierende bildgebende Spektrometer

In der Fokalebene können nun nach Belieben mehrere Zeilensensoren angeordnet sein, wobei die Lage der Sensoren die registrierten Wellenlängen des Spektrums bestimmt und die Pixelbreite auf den einzelnen Sensoren die Breite der registrierten Spektralbereiche definieren (Abb. 62a). Die Anzahl der registrierten Wellenlängenbereiche ist dabei durch die spektrale Auffächerung auf diskrete Zeilen limitiert. Eine Erweiterung des Prinzips zu einem hyperspektralen System ergibt sich, wenn statt mehrerer Zeilensensoren ein Flächensensor verwendet wird: in diesem Fall wird das komplette Spektrum des aufgenommenen Bodenstreifens auf die Spalten des Sensors abgebildet,

was eine Aufspaltung des Spektrums in mehrere hundert Spektralkanäle bedeuten kann (Abb. 62b). Über die multispektrale Aufnahme des Zeileninhaltes und die Vorwärtsbewegung des Sensors entsteht ein Bildwürfel $I(x, y, \lambda)$ mit dem diskretisierten Spektrum jedes Pixels in der dritten Dimension (Abb. 63). Die dabei anfallende Datenmenge ist natürlich enorm groß, so daß man sich häufig auf das selektive Auslesen weniger für die jeweilige Anwendung relevanter Spalten des Flächensensors beschränken wird.

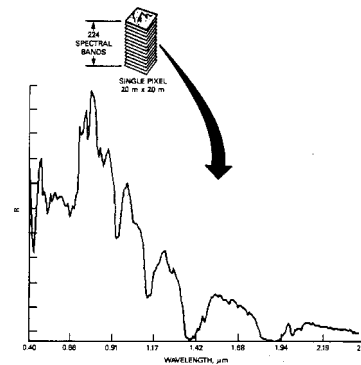
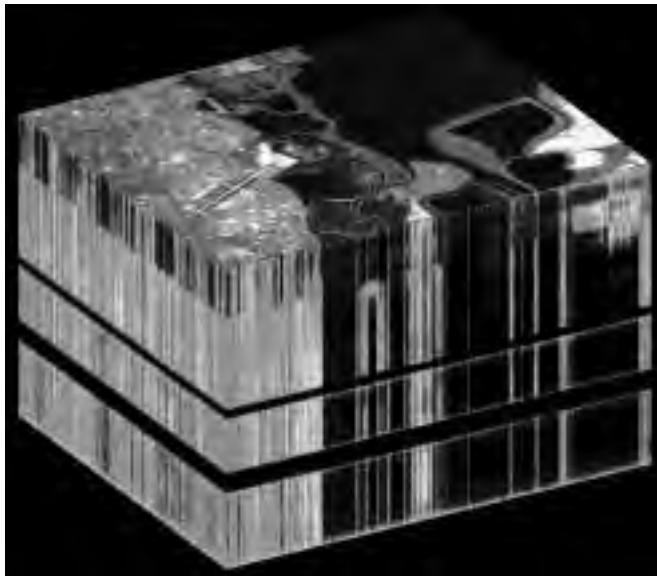


Abb. 63: Hyperspektraler Bildwürfel und spektrale Signatur eines Pixels (AVIRIS)

Beispiele für bildgebende Spektrometer auf der Basis von zeilen- und flächenhaften Sensoren sind MOS (modular optoelectronic scanning spectrometer) und ROSIS (reflective optics system imaging spectrometer) (Bach et al., 1991). Ein Beispiel für ein hyperspektrales bildgebendes Spektrometer, das auch den Bereich des mittleren Infrarot abdeckt, ist HYDICE (Lewotzky, 1994) mit einem 320x210 Pixel Indiumantimonidsensor, welcher eine spektrale Auflösung von 10nm über den Bereich von 400nm - 2.5µm erlaubt.

8.2.5. Diskussion der Techniken

Einsatzbereiche von multi- und hyperspektralen Scannern und bildgebenden Spektrometern finden sich vor allem bei Aufgaben der Umweltbeobachtung, Biologie und Geologie, z.B. in der Bestimmung des Gehalts von Phytoplankton in Ozeanen, der Chlorophyllanalyse, der Ernteabschätzung, der Lagerstätten erkundung und der Atmosphärenforschung. Für die Georeferenzierbarkeit der Bilddaten bietet sich, wenn Geländemodelle nicht aus anderer Quelle gegeben sind, die Kombination bildgebender Spektrometer beispielsweise mit Dreizeilensensoren an.

Im Gegensatz zu den in den Kapiteln 2 und 5 diskutierten Verfahren zur Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der geometrischen Zuordnung diskreter oder flächenhafter Bildelemente dienen in der (bildgebenden) Spektrometrie Mehrbildtechniken zur Herstellung von Eindeutigkeit bei Klassifizierungsaufgaben anhand der spektralen Signaturen aufgenommener Objekte. Aus dem radiometrischen Inhalt der spektralen Signaturen ergeben sich Merkmale in einem mehrdimensionalen Merkmalsraum, in welchem sie in überwachten oder unüberwachten Klassifizierungsverfahren (z.B. Albertz 1991, Hildebrandt 1996) zur Objekterkennung beitragen. Analog zu den in Kapitel 2 disku-

tierten flächen- und merkmalsbasierten geometrischen Zuordnungsverfahren findet man auch in der Spektrometrie eindimensionale Matching-Verfahren zum Vergleich von spektralen Signaturen mit Mustersignaturen (Mazer et al., 1988) und auch merkmalsbasierte Verfahren, die Klassifikationsaufgaben anhand von aus Spektren extrahierten Merkmalen lösen (Vane/Goetz, 1988).

Zur zuverlässigen Klassifikation kommt der Verfügbarkeit einer möglichst großen Anzahl von Spektralkanälen zur Auswahl von für die jeweilige Objektklasse geeigneter Wellenlängenbereichen eine große Bedeutung zu. Aufgrund der typischen Bandbreite spektraler Merkmale vieler terrestrischer Materialien von ca. 20-40nm (Vane/Goetz, 1988) ist dazu eine spektrale Auflösung in der Größenordnung von 10nm notwendig; diese bieten in der Regel nur bildgebende Spektrometer, nicht aber multispektrale Systeme wie MSS oder TM. Der primäre Interessenbereich geht dabei weit über das sichtbare Licht hinaus bis ins thermische Infrarot, wobei insbesondere das nahe und mittlere Infrarot (bis ca. 2500nm) aufgrund der spektralen Charakteristik von Vegetation in diesem Wellenlängenbereich von Interesse ist (Abb. 64). Darüber hinaus ergeben sich in Kombination mit mehreren multispektralen Aufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten und multitemporalen Klassifizierungsverfahren weitere Entscheidungskriterien insbesondere für Klassifizierungsaufgaben in landwirtschaftlich genutzten Gebieten.

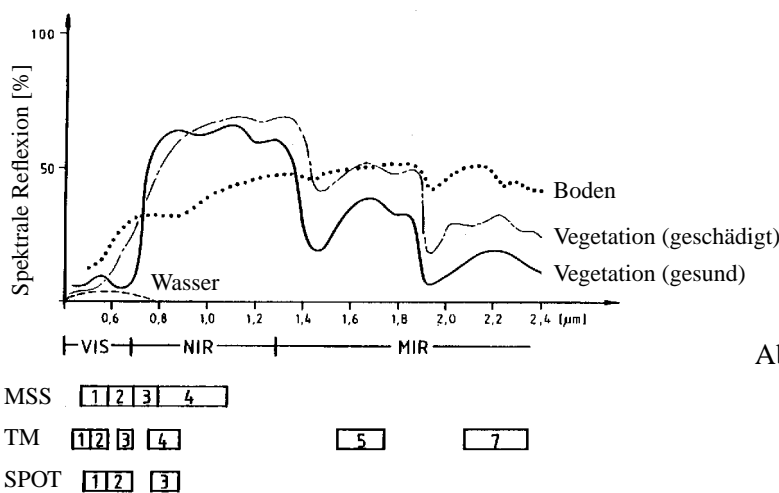


Abb. 64: Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächenbedeckungen, Spektralbereiche multispektraler Satellitensensoren (Bähr/Vögtle, 1991)

Im Unterschied zu den in Kapitel 8.1 diskutierten Möglichkeiten der Farbbildgewinnung mit CCD-Sensoren wird bei allen hier diskutierten multispektralen Techniken das Bild nicht simultan, sondern punkt- oder zeilenweise gewonnen, während die spektrale Signatur für jedes Pixel bei den meisten Systemen simultan aufgenommen wird. Eine nicht streng simultane Aufnahme der Spektralkanäle aus verschiedenen Blickrichtungen, welche teilweise mit mehrzeiligen Systemen im Pushbroom-Prinzip einhergeht (Kapitel 8.2.3), kann sich bei blickrichtungsabhängigem Reflexionsverhalten zu Einschränkungen der Interpretierbarkeit führen; diese Effekte heben sich erst bei Differenz- oder Verhältnisbildung verschiedener Kanäle unter der Annahme der Richtungsunabhängigkeit der spektralen Verteilung des Reflexionsgrades auf (Kraus, 1990, S. 479). Aus denselben Überlegungen ergeben sich auch Einschränkungen hinsichtlich der Interpretierbarkeit von absoluten Intensitätswerten in verschiedenen Bildbereichen aufgrund der Abhängigkeit von der lokalen Geländeneigung, was wiederum für eine strenge Georeferenzierung anhand eines gegebenen oder simultan bestimmten Geländemodells spricht. Neben diesen Aspekten der Beziehung zwischen geometrischen und radio-

metrischen Parametern kann auch der Aufwand zur radiometrischen Kalibrierung der Sensoren selbst erheblich sein.

Erkauft wird die hohe radiometrische Auflösung hyperspektraler Systeme durch eine geringere geometrische Auflösung, weil die Gesamtintensität eines Bodenpunktes auf eine gesamte Sensor-spalte aufgeteilt wird und die Größe jedes einzelnen Sensorpixels schon daher vergleichsweise groß gewählt werden muß, um ein ausreichendes Signal-Rausch Verhältnis zu gewährleisten. Dementsprechend findet man in der terrestrischen Spektroskopie mit statischen Szenen und unbewegten Aufnahmeplattformen zeilenförmige Halbleitersensoren mit nicht-quadratischen Pixeln von bis zu $2.5\mu\text{m} \times 2.5\text{mm}$, die gleichzeitig in Zeilenrichtung hohe spektrale Auflösung und aufgrund der großen Pixelbreite hohe Lichtempfindlichkeit bieten.

In Kapitel 8.2.1 - 8.2.4 sind nur die Prinzipien der verschiedenen Typen von Spektrometern zusammengestellt, soweit sie unter dem Aspekt der Mehrbildtechniken von Interesse sind. Auf technische Daten und Detailkonzepte sei hier nicht weiter eingegangen. Nähere technische Angaben zu mehreren Dutzend flugzeug- und satellitengestützten Spektrometern finden sich beispielsweise bei (Kramer, 1994). In der folgenden Tabelle sind die charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Verfahren vergleichend zusammengestellt:

Verfahren	geometrische Simultanität	spektrale Simultanität	geometrische Auflösung	spektrale Auflösung
3-Chip Kameras	Fläche	ja	mittel	sehr gering
sequentielle Filtertechniken	Fläche	nein	hoch	gering - hoch
Spektrometer mit Einzelsensoren	Punkt	ja	mittel	gering - mittel
Spektrometer mit Zeilensensor	Punkt	ja	mittel	hoch
Mehrzeilenkamera	Linie	nein	sehr hoch	gering
Bildgebendes Spektrometer mit Zeilensensoren	Linie	ja	mittel	gering - mittel
Bildgebendes Spektrometer mit Flächensensor	Linie	ja	mittel	hoch

8.3. Shading-Verfahren

Shading-Verfahren stellen ein weit verbreitetes Werkzeug der Computergraphik zur Darstellung von Oberflächen dar. Die Umkehrung dieses Prinzips bestimmt Oberflächenneigungen aus Grauwertinformationen im Bild. Im Gegensatz zu den in Kapitel 2.6.2 und Kapitel 5 gezeigten triangulationsbasierten Meßverfahren sind die Meßgrößen hier Grauwerte (und nicht Bildkoordinaten oder binäre Streifeninformation wie beispielsweise im in Kapitel 5.5 gezeigten codierten Lichtansatz), so daß das Verfahren als photometrisches Verfahren anzusehen ist. Die früheste Publikation zu diesem Thema findet sich in (Rindfleisch, 1966) und spezialisiert sich auf die Bestimmung der Topographie des Mondes.

8.3.1. Shape-from-Shading

Die Umkehrung des Shading-Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion wird seit (Horn, 1970) als 'Shape-from-Shading' bezeichnet und erlaubt die Bestimmung von Oberflächen aus einem Einzelbild. Diese Umkehrung ist allerdings mit zwei Komponenten der lokalen Oberflächenneigung und nur einem Grauwert nicht eindeutig und führt zu einem unterbestimmten System, zu dessen Lösung zusätzliche Informationen oder Annahmen nötig sind.

Zur Behebung dieser Unterbestimmtheit bei der Rekonstruktion der lokalen Oberflächenneigung wurden seit Beginn der 70er Jahre in der Computer Vision Literatur eine ganze Reihe von Lösungen vorgestellt (für eine Übersicht siehe Horn/Brooks, 1989). Diese Lösungen basieren im Wesentlichen auf zwei Grundprinzipien:

- Das in (Horn, 1970) gezeigte Verfahren basiert auf der Analyse von Linienscharen maximaler Grauwertänderungen und den sich daraus ergebenden Oberflächenneigungen. Die Rekonstruktion beginnt an einem Punkt mit bekannter Oberflächenneigung und pflanzt sich von dort aus sternförmig über die Oberfläche fort. Der Startpunkt kann auch automatisch als Tangentialebene senkrecht zur Beleuchtungsrichtung im absoluten Grauwertmaximum des Bildes gewählt werden, falls eine solche Tangentialebene existiert. Aus den so bestimmten Oberflächenneigungen kann durch Integrationstechniken ein Oberflächenmodell rekonstruiert werden.
- Eine Übersicht über Ausgleichungsverfahren und Variationsrechnungen wird in (Horn/Brooks, 1986) gegeben. Diese Verfahren bestimmen ein die Oberfläche repräsentierendes regelmäßiges Gitter iterativ durch die Minimierung einer Kostenfunktion, welche aus der Differenz der gemessenen Bildintensitäten zu aus den Oberflächenneigungen errechneten Sollwerten gebildet wird, und verwenden dabei Annahmen über die Kontinuität der Oberfläche zur Stützung des unterbestimmten Systems.

Beide Grundprinzipien basieren sehr stark auf Annahmen über die zu rekonstruierende Oberfläche. Diese beinhalten neben der Annahme eines Beleuchtungs- und eines Reflektionsmodells auch Annahmen über die Stetigkeit der Oberfläche und teilweise sogar Annahmen über die Grundform der Oberfläche selbst. In den meisten Fällen wird von Oberflächen mit bekannter Albedo und Lambert'schen Reflektionsverhalten (blickwinkelunabhängige diffuse Reflektion) ausgegangen. Shape-from-Shading kann damit keinesfalls als allgemein anwendbares Werkzeug zur Oberflächenrekonstruktion angesehen werden.

8.3.2. Photometric Stereo

Ein auf der Erweiterung des Shape-from-Shading zu einem Mehrbildverfahren basierender Ansatz zur Behebung der Unterbestimmtheit bei der Oberflächenrekonstruktion durch Shape-from-Shading wurde unter der Bezeichnung 'Photometric Stereo' in (Woodham, 1978) vorgestellt. Das Ansatz basiert auf dem Schnitt von Kurvenscharen gleicher Grauwerte (und damit gleicher Oberflächenneigung relativ zur Lichtquelle) aus mehreren, mit einer stationären Kamera unter verschiedenen punktförmigen Lichtquellen sequentiell aufgenommenen Bildern. Prinzipiell lassen sich dabei aus zwei Bildern beide Komponenten der Oberflächenneigung bestimmen, wobei die beiden Lichtquellen und die Kamera nicht auf einer Geraden liegen dürfen und idealerweise einen Winkel von 90° einschließen. Die Orientierung der Kamera und die Koordinaten der Lichtquellen müssen bekannt sein. Da sich bei nicht-linearen Kurvenscharen Mehrdeutigkeiten in Form mehrerer Kurvenschnitte ergeben können (vgl. Abb. 65), ist zur Erzielung von Eindeutigkeit noch ein drittes Bild mit einer dritten Lichtquelle notwendig. Im Gegensatz zu den in Kapitel 8.3.1 diskutierten globalen Ansätzen handelt es sich beim Photometric Stereo um ein lokales Verfahren, welches Oberflächenneigungen in jedem Pixel unabhängig vom Rest der Oberfläche rekonstruiert. Für die Herstellung eines Oberflächenmodells aus den Oberflächenneigungen ist aber dennoch die Anforderung nach Integrierbarkeit der Oberfläche zu stellen. Simultan mit den beiden Komponenten der Oberflächenneigung wird bei dem Dreibildansatz auch die Albedo des entsprechenden Oberflächenpunktes bestimmt. Dies stellt einen weiteren bedeutenden Vorteil gegenüber Einzelbild-Shadingverfahren dar, weil deren Voraussetzung bekannter Albedo in der Praxis in den meisten Fällen nicht erfüllt sein wird. Die Akquisition der drei Bilder erfolgt beim Photometric Stereo sequentiell; durch die Verwendung von drei Lichtquellen unterschiedlicher Farbe und einer 3-Chip Farbkamera (Kapitel 8.1.1) wird eine simultane Bildakquisition möglich.

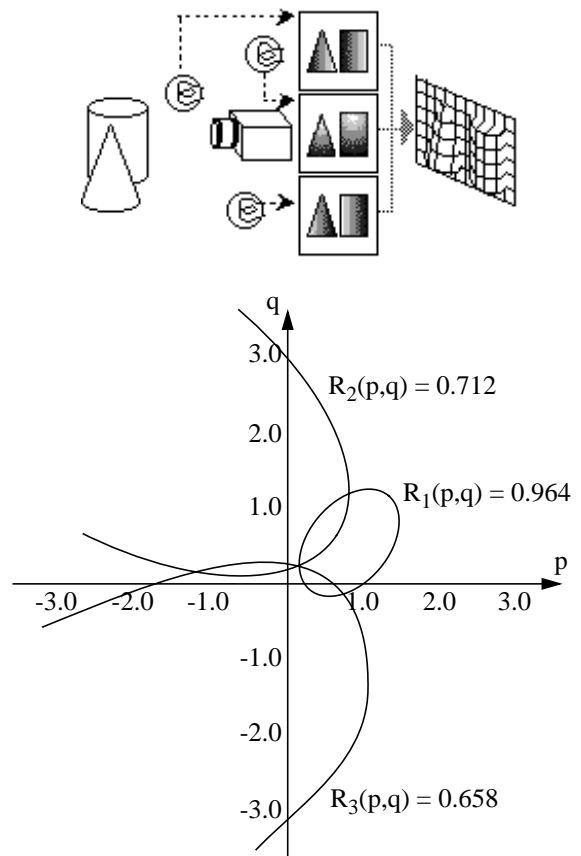


Abb. 65: Grundprinzip des Photometric Stereo (Woodham, 1978)

Der von Woodham gezeigte Ansatz basiert auf der Annahme eines Lambert'schen Reflektionsmodells. Eine Erweiterung des Ansatzes zur Messung auf hybriden, nicht-Lambert'schen Oberflächen zeigen (Coleman/Jain, 1982); diese Erweiterung basiert auf der Verwendung von vier Lichtquellen und der Annahme, daß bei in geeigneter Anordnung der Lichtquellen ein Oberflächenpunkt in jeweils nur einem Bild spiegelnde Reflektionen hervorrufen wird. Coleman/Jain bestimmen die Albedo eines Oberflächenpunktes in allen vier Kombinationen von drei der vier Lichtquellen. Bei Lambert'schem Reflektionsverhalten werden alle vier Albedowerte etwa gleich groß sein, während bei spiegelnder Reflektion die drei Tripel, welche die die Spiegelung hervorrufende Lichtquelle enthalten, deutlich höhere Werte ergeben werden als das von der Spiegelung unbeeinflusste Tripel;

das Tripel mit der kleinsten Albedo kann dann zur Bestimmung der Oberflächenneigung verwendet werden. Dieser Ansatz erlaubt zwar Messungen auf hybriden Oberflächen, ist aber limitiert auf ein Reflektionsverhalten, bei dem die Lambert'sche Komponente gegenüber der spiegelnden Komponente deutlich überwiegt.

Eine Erweiterung des Photometric Stereo, welche Messungen auf Lambert'schen, hybriden und spiegelnden Oberflächen erlaubt, wird in (Nayar/Ikeuchi, 1989) gezeigt. Im Gegensatz zum in (Coleman/Jain, 1982) gezeigten Verfahren basiert dieser Ansatz nicht auf einer Strategie zur Vermeidung von Messungen in spiegelnden Bildregionen, sondern auf der simultanen Bestimmung der Reflektionseigenschaften der Oberfläche in jedem Punkt zusammen mit den Oberflächenneigungen und der lokalen Albedo. Da die Reflektionseigenschaften im Wesentlichen von der Oberflächenrauigkeit abhängen (diffuse Reflektion bei rauher Oberfläche, Spiegelung bei glatter Oberfläche, deren Strukturen kleiner als die Lichtwellenlänge sind), erlauben diese Reflektionseigenschaften als interessantes Nebenprodukt für industrielle Inspektionsaufgaben auch Aussagen über die Oberflächenrauigkeit.

Lambert'sches und spiegelndes Reflektionsverhalten werden dabei anhand ihres unterschiedlichen Verhaltens in Abhängigkeit von Beleuchtungs- und Blickrichtung unterschieden:

- Die Lambert'sche Komponente der Reflektion ergibt sich aus dem Cosinus des Winkels zwischen der Oberflächennormalen und der Beleuchtungsrichtung, unabhängig von der Blickrichtung.
- Die Spiegelungskomponente ergibt eine Impulsantwort an Stellen, an denen der Einfallswinkel in Bezug auf die Oberflächennormale gleich dem Ausfallswinkel ist. In der Praxis wird die Impulsantwort durch Oberflächenirregularitäten und die endliche Ausdehnung der Lichtquelle leicht abgeschwächt.

Aufgrund des eng begrenzten Ausfallswinkels bei der spiegelnden Reflektion wäre zur kompletten Modellierung einer spiegelnden Oberfläche eine sehr große Anzahl punktförmiger Lichtquellen nötig; in (Nayar et al.,

1990) wird durch die Verwendung von 127 Lichtquellen ein Schritt in diese Richtung unternommen. Neben der meist unzureichenden Anzahl von Lichtquellen treten dabei zusätzlich Probleme mit dem dynamischen Bereich und der Aussteuerung einer CCD-Kamera auf, da die Intensitäten in den spiegelnden Bereichen um ein Vielfaches höher sind als in Regionen mit Lambert'schem Reflektionsverhalten. Nayar/Ikeuchi lösen diese Probleme durch die Verwendung von acht sequentiell geschalteten Lichtquellen, welche durch einen Diffusor zu flächenhaften Lichtquellen erweitert werden. Durch

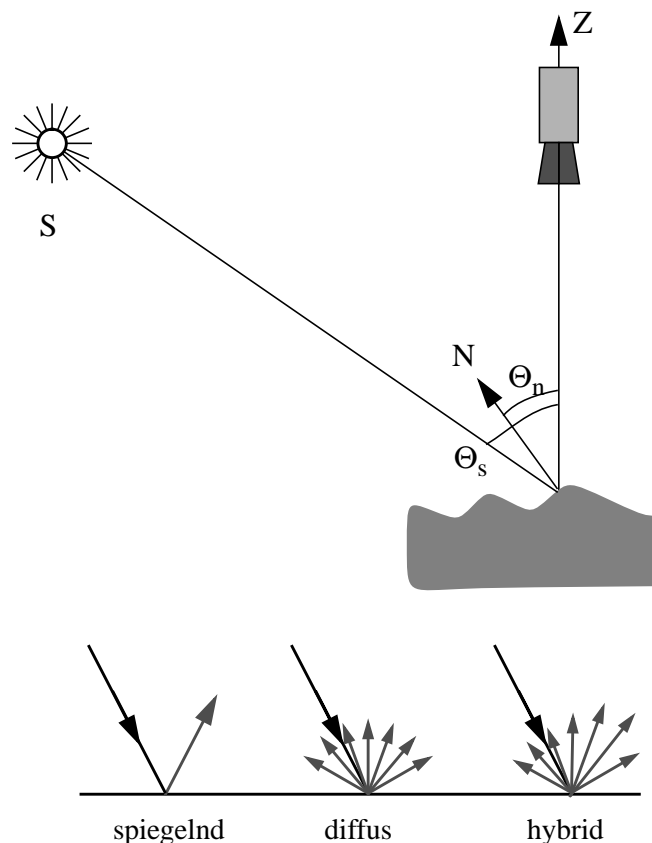


Abb. 66: Beleuchtungs- und Abbildungsgeometrie bei punktförmiger Lichtquelle

diese Maßnahme reduzieren sie zum einen die Anzahl nötiger Lichtquellen, zum anderen werden die Intensitäten zwischen spiegelnder und Lambert'scher Reflektion balanciert. Im mathematischen Modell wird die Abweichung von einer punktförmigen Lichtquelle durch Integrationen über die Lichtquelle berücksichtigt. Durch die Analyse des Intensitätsverlaufs jedes einzelnen Pixels in der Sequenz von acht Bildern lassen sich damit sowohl die Oberflächenneigungen als auch die Albedo und die Anteile von Lambert'scher und spiegelnder Reflektion ermitteln.

Oberflächenmodelle werden beim Photometric Stereo ebenso wie bei den meisten Shape-from-Shading Ansätzen durch Integrationsverfahren bestimmt. Ein Genauigkeitstest bei Nayar/Ikeuchi ergab eine Standardabweichung von etwa 2° für die Oberflächenneigung, was bei der Integration zu einem Oberflächenmodell aufgrund der Fehlerfortpflanzung zu einem mit Triangulationsverfahren nicht konkurrenzfähigen Genauigkeitspotential führt. Aufgrund des Cosinus des Einfallswinkels bei der Lambert'schen Reflektion ist zudem das Genauigkeitspotential in der Lichtquelle zugewandten Bereichen der Objektfläche geringer. Aus diesem Grund eignen sich photometrische Verfahren besser für Anwendungen, bei denen Oberflächenneigungen zu bestimmen sind, als zur Bestimmung von dreidimensionalen Oberflächenmodellen.

8.3.3. Diskussion photometrischer Oberflächenmeßverfahren

Photometrische Verfahren und photogrammetrische Mehrbildverfahren können aus mehreren Gründen als komplementäre Techniken angesehen werden: Korrelationsbasierte Mehrbildverfahren in der Photogrammetrie basieren auf dem Vorhandensein von Oberflächentextur, während photometrische Verfahren in texturlosen Regionen die besten Ergebnisse zeigen. Während Messungen mit Triangulationsverfahren auf texturlosen Oberflächen im Nahbereich auch durch die Aufprojektion von strukturierten Licht ermöglicht werden können (Kapitel 5), können Shading-Verfahren als ergänzende Informationsquelle für texturlose Regionen in Luftaufnahmen herangezogen werden (vgl. Kapitel 2.9.4). Ein gemeinsamer Vorteil aller photometrischen Verfahren ist der Wegfall des Korrespondenzproblems. Andererseits ist das Genauigkeitspotential photometrischer Verfahren prinzipbedingt begrenzt, und eine strenge radiometrische und geometrische Kalibrierung bedingt einen großen Aufwand. Die meisten Autoren gehen auf Aspekte der Genauigkeit und Kalibrierung überhaupt nicht ein und verwenden bei der Auswertung vereinfachende Annahmen wie die Verwendung einer Parallelprojektion bei Aufnahmen mit langbrennweitigen Objektiven. Insgesamt ist festzuhalten, daß die Anwendbarkeit und die Robustheit von Shading-Verfahren durch viele Annahmen und Vereinfachungen ziemlich limitiert werden.

Kapitel 9: Ausblick

Die Anwendung von Mehrbildtechniken hat mittlerweile in fast allen Bereichen der Photogrammetrie eine große Bedeutung erlangt. Dies gilt sowohl für die Bereiche der klassischen Unterteilung der Photogrammetrie in Nahbereichsphotogrammetrie, Luftbildanwendungen und Fernerkundung wie auch für eine Reihe von angrenzenden Gebieten wie Computer Vision, Machine Vision, Robot Vision und medizinische Bildverarbeitung, welche im Sinne eines erweiterten Verständnisses ebenfalls unter den Begriff 'digitale Photogrammetrie' fallen.

Der Schritt vom Bildpaar zum Bildtripel ist für die Robustheit von automatischen Systemen von entscheidender Bedeutung, da erst im Bildtripel die Detektierbarkeit und - beschränkt - Lokalisierbarkeit von groben Fehlern in den Bildkoordinaten gegeben ist. Zudem läßt sich in Anwendungen mit dichten Punktfeldern oder repetitiven Mustern im Objektraum durch die Verwendung von Bildtripeln die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung um mindestens eine Größenordnung reduzieren. Konsequenterweise ist danach die Erweiterung vom trinokularen zum multiokularen Ansatz, welcher weitere Gewinne hinsichtlich der Zuverlässigkeit, der Genauigkeit und der Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung bietet, und der vor allem in von 'klassisch-photogrammetrischer Seite' entwickelten Systemen realisiert wurde. In merkmalsbasierten Verfahren ergibt sich dabei gleichzeitig eine weitgehende Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit guter Näherungswerte, welche bislang noch in relativ wenigen Anwendungen konsequent genutzt wurde.

Durch die Natur von Halbleiterkameras, insbesondere von CCD-Kameras nach der Videonorm, liegt in der digitalen Photogrammetrie die Akquisition und Verarbeitung von Bildfolgen nahe, wodurch sich über die Aerotriangulation hinaus eine Reihe neuer Anwendungsgebiete, beispielsweise in der passiven Navigation, in Oberflächenmeßsystemen und in aktiven automatischen Orientierungs- und Kalibrierungsverfahren, erschließen. Diese Möglichkeiten der Verarbeitung von Bildsequenzen werden in Zukunft parallel zu der Entwicklung schneller Prozessoren und effizienter Bildspeichermedien weiter an Bedeutung gewinnen.

Die Aspekte der Steigerung der Zuverlässigkeit und auch der Genauigkeit sowie der Vollständigkeit der Objektrepräsentation haben bereits zu entscheidenden Entwicklungen in der photogrammetrischen Praxis geführt. Hier sind insbesondere photogrammetrische Systeme für 3-D Koordinatenmeßtechnik in industriellen Anwendungen zu nennen, welche auf der Akquisition einer großen Anzahl von Bildern des aufzunehmenden Objekts mit einer digitalen Stillvideokamera und der Koordinatenbestimmung signalisierter Punkte durch Bündelblockausgleichung mit Simultankalibrierung

basieren. Auch optische Systeme für Aufgaben der industriellen Oberflächenmeßtechnik basieren heute größtenteils auf Mehrbildtechniken. Demgegenüber fällt die Entwicklung bei digitalen photogrammetrischen Arbeitsstationen zurück, welche - mit Ausnahme von Modulen zur automatischen Aerotriangulation - noch weitgehend auf die Auswertung von Bildpaaren beschränkt sind. Das nahe liegende Argument der Limitierung der visuellen stereoskopischen Betrachtung durch einen Operateur auf zwei Bilder kann dabei nicht akzeptiert werden, da betrachtungstechnische Limitierungen nicht notwendigerweise zu algorithmischen Einschränkungen führen müssen und zusätzliche Bilder auch ohne Betrachtungsmöglichkeiten im Speicher gehalten und bei der automatischen oder halb-automatischen Verarbeitung verwendet werden können. Insofern beruhen heutige digitale photogrammetrischen Arbeitsstationen noch weitgehend auf Prinzipien der analytischen Photogrammetrie und nutzen das Potential der digitalen Photogrammetrie bei weitem nicht aus.

Neben geometrischen Problemstellungen zeigt sich auch bei Aufgabenstellungen radiometrischer Natur ein großes Potential für Mehrbildtechniken. Hier sind insbesondere neue Entwicklungen hinsichtlich flugzeug- oder satellitengestützter multi- und hyperspektraler Sensorsysteme zu nennen, welche gänzlich neue Möglichkeiten für Klassifikationsaufgaben in der Umweltbeobachtung bieten. Durch die Integration beispielsweise in Dreizeilenkameras erlauben diese Systeme zudem eine simultane Bestimmung von geometrischen Oberflächenmodellen und radiometrischen Oberflächenbeschreibungen.

Literaturangaben:

1. Ackermann, F., Bodechtel, J., Lanzl, F., Meissner, D., Seige, P., 1989: MOMS-02 - Ein multi-spektrales Bildaufnahmesystem für die zweite deutsche Spacelab Mission D2. *Geo-Informationen-Systeme* Vol. 6, No. 4, pp. 5-11
2. Ackermann, F., Hahn, M., 1991: Image pyramids in digital photogrammetry. *Digital Photogrammetric Systems* (Eds.: Ebner, H., Fritsch, D., Heipke, C.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 43-58
3. Ackermann, F., 1994: Digital elevation models - techniques and application, quality standards, development. *IAPRS* Vol. 30, Part IV, pp. 421-432
4. Ackermann, F., Fritsch, D., Hahn, M., Schneider, F., Tsingas, V., 1996: Automatic generation of digital terrain models with MOMS-02/D2 data. *Proceedings MOMS Symposium Cologne* (Ed. F. Lanzl), pp. 79-86
5. Albertz, J., 1991: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. *Wiss. Buchges., Darmstadt*
6. Albertz, J., Scholten, F., Ebner, H., Heipke, C., Neukum, G., 1992: The camera experiments HRSC and WAOSS on the Mars 94 mission. *IAPRS* Vol. 29, Part B1, pp. 130-137
7. Allison, D., Muller, J.-P., 1992: An automated system for sub-pixel correction and geocoding of multi-spectral and multi-look aerial imagery. *IAPRS* Vol. 29, Part B2, pp. 275-285
8. Altschuler, M., Altschuler, B., Taboada, J., 1979: Measuring surfaces spacecoded by a laser-projected dot matrix. *Imaging Applications for Automated Industrial Inspection and Assembly, SPIE Proceedings Series* Vol. 182
9. Andresen, K., 1986: Das Phasenshiftverfahren zur Moiré-Bildauswertung. *Optik*, Vol. 72, No. 3
10. Aschwanden, P., Guggenbühl, W., 1992: Experimental results from a comparative study on correlation-type registration algorithms. *Robust Computer Vision* (Eds.: Förstner/Ruwiedel), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 268-289
11. Ayache, N., Lustman, F., 1987: Fast and reliable passive trinocular stereovision. *First International Conference on Computer Vision*, Computer Society Press, London, pp. 422-427
12. Baarda, W., 1968: A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks. *The Netherlands Geodetic Commission*, Vol. 2, No. 5
13. Bach, E., van der Piepen, H., Schmitz-Pfeiffer, A., Zimmermann, G., 1992: Optoelectronic imaging spectrometers: German concepts for remote sensing. *IAPRS* Vol. 29, Part B1, pp. 138-144
14. Bähr, H.-P., Vögtle, T., 1991: Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. *Wichmann Verlag, Karlsruhe*
15. Baker, H., 1987: Multiple-image computer vision. *Vorträge der 41. Photogrammetrischen Woche, Schriftenreihe IfP Universität Stuttgart*, Heft 12, pp. 7-19

-
16. Baker, H., Bolles, R., 1994: Realtime stereo and motion integration for navigation. IAPRS Vol. 30, Part 3/1, pp. 17-24
 17. Bakshi, S., Yang, Y., 1994: Shape from shading for non-lambertian surfaces. IEEE International Conference on Image Processing, Vol. II, pp. 130-135
 18. Baltsavias, E., 1988: Hierarchical multiphoto matching and DTM generation. IAPRS Vol. 27, Part B11, pp. 476ff
 19. Baltsavias, E., 1991: Multiphoto geometrically constraint matching. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 49
 20. Baltsavias, E., Stallmann, D., 1996: Geometric potential of MOMS-02/D2 data for point determination, DTM and orthoimage generation. IAPRS Vol. 31, Part B4, pp. 110-116
 21. Bergendahl, J., Masaki, I., Horn, B., 1996: Three-camera stereo vision for intelligent transportation systems. Transportation Sensors and Controls: Collision Avoidance, Traffic Management, and ITS, SPIE Photonics East, Boston
 22. Beyer, H., 1987: Some Aspects on the Geometric Calibration of CCD-Cameras. Proceedings Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Schweiz, 2-4 Juni, pp. 68 - 81
 23. Beyer, H., 1995: Digital Photogrammetry in Industrial Applications. IAPRS Vol. 30 Part 5W1, pp. 373-378
 24. Bignone, F., 1995: Segment stereo matching and coplanar grouping. Technical Report BIWI-TR-165, Image Sciences Lab, ETH Zurich
 25. Bignone, F., Henricsson, O., Fua, P., Stricker, M., 1996: Automatic extraction of generic house roofs from high resolution aerial imagery. Computer Vision -- ECCV'96 (Eds. B. Buxton, R. Cipolla), Springer Verlag, pp. 85-96
 26. Blais, J., 1983: Linear least-squares computations using Givens transformations. The Canadian Surveyor, Vol. 37, No. 4, pp. 225-233
 27. Blake, A., McCowen, D., Lo, H., Konash, D., 1990: Epipolar geometry for trinocular active range-sensors. Proceedings British Machine Vision Conference, Oxford
 28. Bodechtel, J., Zilger, J., 1996: MOMS - history, concept, goals. Proceedings MOMS Symposium Cologne (Ed. F. Lanzl), pp. 12-25
 29. Börner, A., 1996: The optimization of the stereo angle of CCD-line-scanners. IAPRS Vol. 31, Part B1, pp. 26-30
 30. Bossler, J., Goad, C., Johnson, P., Novak, K., 1991: GPS and GIS map the nation's highways. GeoInfo Systems Magazine, March issue, pp. 26-37
 31. Boyer, K., Kak, A., 1987: Color-encoded structured light for rapid active ranging. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 1, pp. 14-28
 32. Braun, J., Tang, L., Debitsch, R., 1996: PHODIS AT - an automated system for aerotriangulation. IAPRS Vol. 31, Part B2, pp. 32-37

-
33. Breuckmann, B., 1990: Optische 3D-Meßsysteme für Online-Anwendungen. *Technisches Messen*, 57/10, S. 389 - 394
 34. Breuckmann, B., 1995: Bildverarbeitung für die Prototyperstellung und Fertigung. *Bildverarbeitung '95* (Hrsg. R.-J. Ahlers), Technische Akademie Esslingen, S. 399-408
 35. Brown, D., 1971: Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866
 36. Brown, D., 1976: The bundle adjustment - progress and prospects. *IAPRS Vol. 21, Part 3*
 37. Brown, J., Dold, J., 1995: V-Stars - A system for digital industrial photogrammetry. *Optical 3-D Measurement Techniques III* (Eds.: Grün, A, / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 12-21
 38. Carrihill, B., Hummel, R., 1985: Experiments with the intensity-ratio depth sensor. *Computer Vision, Graphics, Image Processing Vol. 32*, pp. 337-358
 39. Chang, T., Watson, A., Tatterson, G., 1985: Image processing of particle motions as applied to mixing and turbulence flow. *Chemical Engineering Science*, Vol 40, No. 2, pp 269-285
 40. Chevrel, M., Courtois, M., Weill, G., 1981: The SPOT satellite remote sensing mission. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 47, No. 8*, pp. 1163-1171
 41. Coleman, E., Jain, R., 1982: Obtaining 3-dimensional shape of textured and specular surface using four-source photometry. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 18, No. 4, pp. 309-328
 42. Dähler, A., 1988: Photogrammetrische Punktbestimmung an einem Rutschhang aus digitalen Bildern einer CCD Still Video Kamera. Diplomarbeit an der Abt. VIII der ETH Zürich
 43. Derenyi, E., 1970: An exploratory investigation concerning the relative orientation of continuous strip imagery. Ph.D. thesis, University of New Brunswick
 44. Dahm, J., Southerland, K., Buch, K., 1990: Four-dimensional laser induced fluorescence measurements of conserved scalar mixing in turbulent flows. 5th Int. Symposium on the Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 9.-12.7.1990
 45. DeVenecia, K., Miller, S., Pacey, R., Walker, S., 1996: Experiences with a commercial package for automated aerial triangulation. *Proceedings ASPRS/ACSM Annual Convention, Baltimore, 22.-25. April 1996*
 46. Dickmanns, E., Gräfe, V., 1988: Dynamic modular machine vision. *Machine Vision Applications Vol. 1*, pp. 223-261
 47. Diehl, N., Heipke, C., 1992: Surface reconstruction from data of digital line cameras by means of object based image matching. *IAPRS Vol. 29, Part B3*, pp. 287-294
 48. Diehl, H., 1994: Object based DTM generation by data of the MEOSS 3-line camera. *IAPRS Vol. 30, Part 3/1*, pp. 183-187
 49. Dhond, U., Aggarwal, J., 1991: A cost-benefit analysis of a third camera for stereo correspondence. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 6, Part 1, pp. 39-58

-
50. Dold, J., 1994: A strategy for photogrammetric multiple camera calibration without additional object information. IAPRS Vol. 30, Part V, pp. 61-64
 51. Dold, J., Maas, H.-G., 1994: An application of epipolar line intersection in a hybrid close range photogrammetric system. IAPRS Vol. 30, Part V, pp. 65-70
 52. Dörstel, C., Ohlhof, T., 1996: Processing and display of three-line imagery at a digital photogrammetric workstation. IAPRS Vol. 31, Part B2, pp. 72-77
 53. Ebner, H., 1976: Self calibrating block adjustment. IAPRS Vol. 21, Part 3
 54. Ebner, H., Fritsch, D., Gillesen, W., Heipke, C., 1987: Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie. BuL Vol. 55, Heft 5, S. 194-203
 55. Ebner, H., Kornus, W., Strunz, G., Hofmann, O., Müller, F., 1991: A simulation study on point determination using MOMS-02/D2 imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57, No. 10, pp. 1315-1320
 56. Ebner, H., Kornus, W., Ohlhof, T., 1992: A simulation study on point determination for the MOMS-02/D2 space project using an extended functional model. IAPRS Vol. 29, Part B4, pp. 458-464
 57. Ebner, H., Müller, F., 1986: Processing of digital three line imagery using a generalized model for combined point determination. IAPRS Vol 16, Part 3/1, pp. 212-222
 58. Edmundson, K., Novak, K., 1992: On-line triangulation for autonomous vehicle navigation. IAPRS Vol. 29, Part B5, pp. 916-922
 59. El-Hakim, S., 1986: A real-time system for object measurement with CCD cameras. IAPRS Vol. 26, Part V
 60. El-Sheimy, N., Schwarz, K.-P., 1994: Integrating differential GPS with an inertial navigation system (INS) and CCD cameras for a mobile GIS data collection system. IAPRS Vol. 30, Part 2, pp. 241-248
 61. El-Sheimy, N., 1996: A mobile multi-sensor system for GIS applications in urban centers. IAPRS Vol. 31, Part B2, pp. 95-100
 62. Ewert, U., Robbel, C., Bellon, C., Schumm, A., Nockemann, C., 1994: Digital laminography. Proceedings International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications, DGZfP, pp. 148-159
 63. Faugeras, O., 1993: Three-dimensional computer vision - a geometric viewpoint. MIT Press, Cambridge/London
 64. Fellbaum, M., Godding, R., 1995: Economic solutions in photogrammetry through a combination of digital systems and modern estimation techniques. Optical 3-D Measurement Techniques III (Eds.: Grün, A., / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 362-371
 65. Finsterwalder, S., 1937: Die gemeinsame Orientierung einer Mehrzahl von Aufnahmen des gleichen Geländes. BuL 12(4), S. 142-150

-
66. Finsterwalder, S., 1941: Die gemeinsame Koppelung dreier Luftaufnahmen desselben Geländes. Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Abteilung, Sonderdruck, S. 175-193
 67. Förstner, W., 1978: Die Suche nach groben Fehlern in photogrammetrischen Lageblöcken. DGK Reihe C, Heft 240, München
 68. Förstner, W., 1984: Quality assessment of object location and point transfer using digital image correlation techniques. IAPRS Vol. 25, Part A3a, pp. 197-217
 69. Förstner, W., 1986: A feature based correspondence algorithm for image matching. IAPRS Vol. 26, Part 3/3, pp. 150-166
 70. Förstner, W., 1991: Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung. DGK Reihe C, Heft 370
 71. Förstner, W., 1995: Matching strategies for point transfer. Photogrammetric Week '95 (Eds. D. Fritsch, D. Hobbie), Wichmann Verlag, Stuttgart, pp. 173-184
 72. Fraser, C., Legac, A., 1994: Industrial applications of single-sensor vision metrology. IAPRS Vol. 30, Part V, pp. 82-86
 73. Fraser, C., Shortis, M., 1994: Vision metrology in industrial inspection: A practical evaluation. IAPRS Vol. 30, Part V, pp. 87-91
 74. Fritsch, D., Tsingas, V., Schneider, W., 1995: Von der Blockausgleichung zur automatischen Aerotriangulation. ZPF 6/94, S. 214-223
 75. Fua, P., Leclerc, Y., 1995: Object-centered surface reconstruction: Combining multi-image stereo and shading. International Journal of Computer Vision, Vol. 16, pp. 35-56
 76. Fua, P., 1995: Surface reconstruction using 3-D meshes and particle systems. Third International Workshop on High Precision Navigation, Dümmler-Verlag, Karlsruhe
 77. Fua, P., 1996: From multiple views to multiple 3-D surfaces. SRI International, AIC tech note 550
 78. Godding, R., 1993: Ein photogrammetrisches System zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. ZPF 2/93
 79. Goldschmidt, R., Richter, U., 1993: Neue Hardwarekomponenten für die Nahbereichsphotogrammetrie. ZPF 61, Nr. 2, S. 71-75
 80. Gottwald, R., 1987: Kern E2-SE - Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung? AVN 4/87, S. 3-10
 81. Grün, A., 1978a: Progress in photogrammetric point determination by compensation of systematic errors and detection of gross errors. Presented paper ISP Com. III Symposium, Moscow
 82. Grün, A., 1978b: Accuracy, reliability and statistic in close-range photogrammetry. Presented paper ISP Com. V Symposium, Stockholm
 83. Grün, A., 1982: An optimum algorithm for online-triangulation. IAPRS Vol. 24, Part 3

-
84. Grün, A., 1985a: Algorithmic aspects in online-triangulation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* Vol. 51, no. 4, pp. 419-436
 85. Grün, A., 1985b: Adaptive Least Squares Correlation - A Powerful Image Matching Technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote sensing and Cartography* Vol.14, No. 3
 86. Grün, A., Baltsavias, E., 1985: Adaptive least squares correlation with geometrical constraints. *SPIE Proceedings Series*, Vol. 595, pp. 72-82
 87. Grün, A., 1986: *Photogrammetrische Punktbestimmung nach der Bündelmethode*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 40
 88. Grün, A., Baltsavias, E., 1988: Geometrically Constrained Multiphoto Matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 5, pp. 633 - 641
 89. Grün, A., Stallmann, D., 1991: High accuracy edge matching with an extension of the MPGC-matching algorithm. *Industrial Vision Metrology*, *SPIE Proceedings Series* Vol. 1526
 90. Grün, A., Beyer, H., 1992: System calibration through self-calibration. Workshop 'Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision', Washington D.C., 2. Aug. '92
 91. Grün, A., Kersten, Th., 1992: Sequential estimation in robot vision. *IAPRS* Vol. 29, Part B5, pp. 923-931
 92. Grün, A., Maas, H.-G., Keller, A., 1995: Kodak DCS200 - a camera for high accuracy measurements? *SPIE Proceedings Series* Vol. 2598, pp. 52-59
 93. Grün, A., Li, H., 1996: Linear feature extraction with LSB-Snakes from multiple images. *IAPRS* Vol. 31, Part B3, pp. 266-272
 94. Gülch, E., 1995: Automatic control point measurement. *Photogrammetric Week '95* (Eds. D. Fritsch, D. Hobbie), Wichmann Verlag, Stuttgart, pp. 185-196
 95. Hahn, M., 1995: *Bildsequenzanalyse für die passive Navigation*. DGK Reihe C, Nr. 433
 96. Hahn, M., Stallmann, D., Stätter, C., Müller, F., 1996: The DPA-sensor system for topographic and thematic mapping. *IAPRS* Vol. 31, Part B2, pp. 141-146
 97. Hallert, B., 1956: Über die Bestimmung der radialen Verzeichnung von Luftaufnahmen. *ZfV* 81, S. 139-142
 98. Häring, S., 1995: *Automatisierung der Inneren Orientierung*. Semesterarbeit am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich
 99. Heikkilä, J., 1989: Multiscale representation with Förstner operator. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 11, No. 2
 100. Heikkilä, J., 1990: Update calibration of a photogrammetric station. *IAPRS* Vol. 28, Part 5/2, pp. 1234-1241
 101. Heipke, C., 1992: Integration of digital image matching and multi image shape from shading. *IAPRS* Vol. 29, Part B3, pp. 832-841
 102. Heipke, C., Kornus, W., Pfannenstein, A., 1994: The evaluation of ME OSS airborne 3-line scanner imagery - processing chain and results. *IAPRS* Vol. 30, Part 4, pp. 239-250
-

-
103. Heister, H., Caspary, W., Hock, C., Klemm, J., Sternberg, H., 1995: KiSS - A hybrid measuring system for kinematic surveying. Proceedings 3rd International Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart
 104. Helava, U., 1988: Object-space least-squares correlation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 54, No. 6, Part 1, pp. 711-714
 105. van den Heuvel, F., Kroon, R., 1992: Digital close range photogrammetry using artificial targets. IAPRS, Vol. 29, Part B5, pp. 222-229
 106. van den Heuvel, F., 1993: Automated 3-D measurement with the DCS200 digital camera. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds. Gruen/Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 63-71
 107. Hildebrandt, G., 1996: Fernerkundung und Luftbildinterpretation. Wichmann Verlag, Karlsruhe
 108. Hock, C., 1991: Landmark navigation with ATHENE. 5. International Conference on Advanced Robotics, Pisa, Italy
 109. Hof, A., Hanßen, A., Küchel, M., Schütz, J., 1992: Streifenprojektionsmethoden in der 3D-Meßtechnik. VDI Berichte Nr. 1006, S. 67-80
 110. Hofmann, O., Navé, P., Ebner, H., 1982: DPS - a digital photogrammetric system for producing digital elevation models (DEM) and orthophotos by means of linear array scanner imagery. IAPRS Vol. 24, Part B3, pp. 216-227
 111. Hofmann, O., 1986: Dynamische Photogrammetrie. BuL Vol. 54, Heft 5
 112. Holm, M., 1994: Global image matching and surface reconstruction in object space using three aerial images. IAPRS Vol. 30, Part 3/1, pp. 379-386
 113. Horn, B., 1970: Shape from shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. Ph.D thesis, Dept. of Electrical Engineering, MIT; Technical Report TR-232, MIT-AI
 114. Horn, B., Schunck, B., 1981: Determining optical flow. Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 185-203
 115. Horn, B., 1986: Robot Vision. MIT Press, Cambridge/Massachusetts
 116. Horn, B., Brooks, M., 1986: The variational approach to shape from shading. Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 33, No. 2, pp. 174-208
 117. Horn, B., Brooks, M., 1989: Shape from shading. MIT Press, Cambridge/London
 118. Illingworth, J., Kittler, J., 1988: A survey on the Hough Transform. Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 44, pp. 87-116
 119. Ito, M., Ishii, A., 1986: Three-view stereo analysis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 4, pp. 524-532
 120. Jähne, B., 1993: Spatio-temporal image processing: Theory and scientific applications. Springer Verlag, Berlin

-
121. Jovanovic, V., Smyth, M., Zong, J., 1996: Autonomous and continuous georectification of multi-angle imaging spectro-radiometer. IAPRS Vol. 31, Part B2, pp. 176-181
 122. Kalukin, A., Sankaran, V., Chartrand, B., Millard, D., Kraft, R., Embrechts, M., 1996: An Improved Method for Inspection of Solder Joints Using X-Ray Laminography and X-Ray Microtomography. SEMICON Southwest 96 IEMT Symposium
 123. Kang, S., Webb, J., Zitnick, L., Kanade, T., 1994: An active multibaseline stereo system with realtime image acquisition. Internal Report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, CMU-CS-94-167
 124. Kasagi, N., Nishino, K., 1990: Probing turbulence with three-dimensional particle tracking velocimetry. Proceedings International Symposium on Engineering Turbulence - Methods and Measurements, Dubrovnik, September 24-28
 125. Kaufmann, H., Berger, M., Meissner, D., Süssenguth, G., 1996: Design and validation of spectral and panchromatic modules. Proceedings MOMS Symposium Cologne (Ed. F. Lanzl), pp. 12-25
 126. Kearney, J., 1991: Trinocular correspondence for particles and streaks. Dept. of Computer Science, The University of Iowa, Technical Report 91-01
 127. Keller, A., 1995: Kalibrierung der hochauflösenden Still Video CCD Kamera Kodak DCS200. Diplomarbeit an der Abt. VIII der ETH Zürich
 128. Kenefick, J., Gyer, M., Harp, B., 1972: Analytical self-calibration. Photogrammetric Engineering, Vol. 38, No. 11, pp. 1117-1126
 129. Kersten, Th., O'Sullivan, W., 1996: Experiences with the Helava automated triangulation system. IAPRS Vol. 31, Part B3
 130. Kitamura, Y., Yachida, M., 1990: Three-dimensional data acquisition by trinocular vision. Advanced Robotics, Vol. 4, pp. 29-42
 131. Klicker, , 1994: Triangulation als Basis für die 1D-, 2D- und 3D-Objektvermessung. GMA-Bericht 23 'Optisches Messen von Länge und Gestalt', S. 185-194
 132. Kölbl, O., 1972: Selbstkalibrierung von Aufnahmekammern. BuL 1/71, S. 31-37
 133. Konecny, G., Wu, J., 1986: Analytische Streifen-Aerotriangulation für Stereo-Dreiliniens-abtaster. BuL Vol. 54, No. 5, pp. 179-194
 134. Kowarschik, R., Kühmstedt, P., Schreiber, W.: 3-D coordinate measurements with structured light. Proceedings of the 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Bremen, Akademie Verlag
 135. Kramer, H., 1994: Observation of the Earth and its environment. Springer Verlag
 136. Kramer, J., Seitz, P., Baltes, H., 1990: 3D-Sensor für die Tiefenbilderfassung in Echtzeit. 12. DAGM-Symposium Oberkochen-Aalen, 24.-26.9.1990; in Großkopf, R. (Ed.): Mustererkennung 1990, Springer Verlag, Berlin
 137. Kraus, K., 1990: Fernerkundung - Band 2. Dümmler Verlag, Bonn
-

-
138. Kreiling, W., 1976: Automatische Auswertung von Stereobildpaaren durch digitale Korrelation. IAPRS Vol. 21, Part 3, paper 31
 139. Kruck, E., Trippler, S., 1995: Automatic computation of initial approximations for bundle block adjustment with program RELAX. Optical 3-D Measurement Techniques III (Eds.: Grün, A, / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 203-212
 140. Krzystek, P., 1991: Fully automatic measurement of digital terrain models. Proc. of the 43. Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany, pp. 203-214
 141. Krzystek, P., Heuchel, T., Hirt, U., Petran, F., 1995: A new concept for automatic digital aerial triangulation. Photogrammetric Week '95 (Eds. D. Fritsch, D. Hobbie), Wichmann Verlag, Stuttgart, pp. 215-223
 142. Krzystek, P., Heuchel, T., Hirt, U., Petran, F., 1996: An integral approach to automatic aerial triangulation and automatic DEM generation. IAPRS Vol. 31, Part B3, pp. 405-413
 143. Küchel, M., 1995: Dreidimensionale Meßverfahren. Bildverarbeitung '95 (Hrsg. R.-J. Ahlers), Technische Akademie Esslingen, S. 315-348
 144. Lang, F., Förstner, W., 1996: 3D-city modelling with a digital One-Eye-Stereo system. IAPRS Vol. 31, Part B4, pp. 261-266
 145. Lanzl, F., 1986: The monocular electro-optical stereo scanner (MEOSS) satellite experiment. IAPRS Vol. 26, Part 1, pp.617-620
 146. Lehner, M., Gill, R., 1992: Semi-automatic derivation of digital elevation models from stereoscopic 3-line scanner data. IAPRS Vol. 29, Part B4, pp. 68-76
 147. Lenz, R., 1989: Digitale Kamera mit CCD-Flächensensor und programmierbarer Auflösung bis zu 2994x2320 Bildpunkten pro Farbkanal. Mustererkennung 1989 (Eds. H. Burkhardt, K. Höhne, B. Neumann), Springer Verlag, S. 411-415
 148. Lenz, R., Lenz, U., 1993: New developments in high resolution image acquisition with CCD area sensors. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds.: Grün, A, / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 53-62
 149. Lewotsky, K., 1994: Hyperspectral imaging: Evolution of imaging spectrometry. OE Reports 11/94
 150. Li, R., Chapman, M., Qian, L., Xin, Y., Tao, C., 1996: Mobile mapping for 3D GIS data acquisition. IAPRS Vol. 31, Part B2, pp. 232-237
 151. Lotz, R., Fröschle, E., 1990: 3D-Vision mittels Stereobildauswertung bei Videobildraten. 12. DAGM-Symposium Mustererkennung, Informatik Fachberichte 254, Springer Verlag
 152. Luhmann, T., Wester-Ebbinghaus, W., 1986: Rolleimetric RS - a new digital image processing system. IAPRS Vol. 26, Part 2
 153. Maas, H.-G., 1990: Digital photogrammetry for determination of tracer particle coordinates in turbulent flow research. SPIE Proceedings Series Vol 1395, Part 1
 154. Maas, H.-G., 1992a: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik. ETH Zürich - Dissertation Nr. 9665
-

-
155. Maas, H.-G., 1992b: Complexity analysis for the determination of image correspondences in dense spatial target fields. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 29, Part B5, pp. 102-107
 156. Maas, H.-G., 1992c: Robust Automatic Surface Reconstruction with Structured Light. *IAPRS Vol. 29, Part B5*, pp. 482-485
 157. Maas, H.-G., 1992d: Schnelle Oberflächenvermessung mittels optischer Sensoren. *Ingenieurvermessung 92* (Hrsg. H. Matthias, A. Grün), Dümmler Verlag, Karlsruhe
 158. Maas, H.-G., 1993: Determination of velocity fields in flow tomography sequences by 3-D least squares matching. *Optical 3-D Measurement Techniques II* (Eds.: Grün, A, / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 366-376
 159. Maas, H.-G., Kersten, Th., 1994: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie bei der Endmontage im Schiffsbau. *ZPF 3/94*
 160. Maas, H.-G., Stefanidis, A., Grün, A., 1994: From Pixels to Voxels - Tracking volume elements in sequences of 3-D digital images. *IAPRS Vol. 30, Part 3/2*
 161. Maas, H.-G., 1995: Conclusions and Recommendations for Motion Analysis system calibration using the bundle technique. Internal Report, Motion Analysis Corp., Santa Rosa
 162. Maas, H.-G., 1996a: Automatic DEM generation by multi-image feature based matching. *IAPRS Vol. 31, Part B3*, pp. 484-489
 163. Maas, H.-G., 1996b: Photogrammetrische Kalibrierung von Industrierobotern. *Ingenieurvermessung 96* (Hrsg. G. Brandstätter, F. Brunner, G. Schelling), Dümmler Verlag, Karlsruhe, Bd. 2/A6
 164. Maas, H.-G., 1997: Aerotriangulation und DTM-Generierung mit Bilddaten hochauflösender CCD-Kameras. *Tagungsband Jahrestagung DGPF '96*, Oldenburg
 165. Maas, H.-G., Niederöst, M., 1997: The accuracy potential of large format stillvideo cameras. *Videometrics V* (Ed. S. el Hakim), SPIE Proceedings Series Vol. 3174
 166. Malz, R., 1989: Adaptive light encoding for 3-D-sensing with maximum measurement efficiency. *Mustererkennung 1989* (Eds. H. Burkhardt, K. Höhne, B. Neumann), Springer-Verlag
 167. Maresch, M., Duracher, P., 1996: The geometric design of a vehicle based 3 line CCD camera for data acquisition of 3D city models. *IAPRS Vol. 31, Part B1*. pp. 121-127
 168. Matthies, L., Okutomi, M., 1989: A Bayesian foundation for active stereo vision. *Sensor Fusion II: Human and Machine Strategies*, SPIE Proceedings Series Vol. 1198, pp. 62-74
 169. Mazer, A., Martin, M., Lee, M., Solomon, J., 1988: Image processing software for image spectrometry data analysis. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, No. 1, pp. 201-210
 170. Mollath, G., Fatehi, D., 1994: Anwendung des Lichtschnittverfahrens zur Überwachung von Förderbändern. *GMA-Bericht 23 'Optisches Messen von Länge und Gestalt'*, S. 33-46
 171. Moravec, H., 1979: Visual mapping by a robot rover. 6. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Tokyo, Vol. 1, pp. 598-600
-

-
172. Murai, S., Matsumoto, Y., Li, X., 1995: Stereoscopic imagery with an airborne 3-line scanner (TLS). IAPRS Vol. 30, Part 5W1, pp. 20-25
 173. Navab, N., Zhang, Z., 1992: Fusion of visual data through dynamic stereo-motion cooperation. IAPRS Vol. 29, Part B5, pp. 932-939
 174. Nayar, S., Ikeuchi, K., 1989: Photometric sampling: A method for determining shape and reflectance of surfaces. Machine Vision for Inspection and Measurement (Ed. H. Freeman), Academic Press San Diego, pp. 137-184
 175. Nayar, S., Sanderson, A., Weiss, L., Simon, D., 1990: Specular surface inspection using structured highlight and Gaussian images. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 2, pp. 208-218
 176. Netzsch, T., Jähne, B., 1993: Ein schnelles Verfahren zur Lösung des Stereokorrespondenzproblems bei der 3D-Particle Tracking Velocimetry. Mustererkennung 1993 (Hrsg. J. Pöpl, H. Handels), Springer-Verlag
 177. Niederöst, M., Maas, H.-G., 1997: Codierte Zielmarken in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie. Tagungsband Jahrestagung DGPF '96, Oldenburg
 178. Niini, I., 1994: Relative orientation of multiple images using projective singular correlation. IAPRS Vol. 30, Part 3/2, pp. 615-621
 179. Nilsen, J., Hådem, 1994: Photogrammetric tracking of tracer particles in modelled ocean flows. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol., 49, No. 6, pp. 9-20
 180. Oda, K., Tanaka, M., Yoshida, A., Kano, H., Kanada, T., 1996: A video-rate stereo machine and its applications to virtual reality. IAPRS Vol. 31, Part B5, pp. 411-415
 181. Ohlhof, T., Kornus, W., 1994: Geometric calibration of digital three-line CCD cameras. IAPRS Vol. 30, Part 1, pp. 71-81
 182. Ohlhof, T., 1996: Lokale, regionale und globale Punktbestimmung mit Dreizeilenbilddaten und Bahninformationen der Mars 96-Mission. DGK Reihe C, Nr. 445
 183. Okutomi, M., Kanade, T., 1993: A multiple-baseline stereo. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 353-362
 184. Papantoniou, D., Dracos, T., 1990: Analyzing 3-D turbulent motions in open channel flow by use of stereoscopy and particle tracking. Advances in Turbulence 2 (Eds. H. Hernholz, H. Fiedler), Springer Verlag, Heidelberg
 185. Patias, P., Petsa, E., Streilein, A., 1995: Digital line photogrammetry. ETH Zürich - IGP Bericht Nr. 252
 186. Peipe, J., Schneider, C.-Th., Sinnreich, K., 1993: Digital photogrammetric station DPA - A measurement system for close range photogrammetry. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds. Gruen/Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 292-300.
 187. Pettersen, A., 1992: Metrology Norway System - an on-line industrial photogrammetric system. IAPRS, Vol. 29, Part B5, p. 43
-

-
188. Riechmann, W., 1990: The Reseau-Scanning camera system, conception and first results. IAPRS Vol. 28, Part 5/2, pp. 1117-1125
 189. Riechmann, W., 1995: Fast object recording by means of structured light and photogrammetric techniques. IAPRS Vol. 30 Part 5W1, pp. 195-201
 190. Rindfleisch, T., 1966: Photometric method for lunar topography. Photogrammetric Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 262-277
 191. Runge, A., 1987: The use of Givens transformation in on-line triangulation. Proceedings ISPRS Conference 'Fast Processing of Photogrammetric Data', Interlaken, Switzerland
 192. Sandau, R., Eckardt, A., 1994: The stereo camera family WAOSS/WAAC for spaceborne/airborne applications. IAPRS Vol. 31, Part B1, pp. 170-175
 193. Schenk, T., 1995: Zur automatischen Aerotriangulation. ZPF 3/95, S. 137-144
 194. Schenk, T., Krupnik, A., 1996: Ein Verfahren zur hierarchischen Mehrfachbildzuordnung im Objektraum. ZPF 1/96, S. 2-11
 195. Schickler, W., 1992: Feature matching for outer orientation of single images using 3-D wire-frame control points. IAPRS Vol. 29, Part B3
 196. Schickler, W., 1994: Ein operationelles Verfahren für automatische innere Orientierung von Digitalbildern. 14. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF, TU Dresden, 5-7. Okt. 1994
 197. Schmid, H., 1958: Eine allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. BuL 4/58, S. 103-112 und Bul 1/59, S. 1-12
 198. Schneider, C.-T., Sinnreich, K., 1992: Optical 3-D measurement systems for quality control in industry. IAPRS Vol. 29, Part B5, pp. 56-59
 199. Schwarz, K.-P., Martell, H., El-Sheimy, N., Li, R., Chapman, M., Cosandier, D., 1993: VISAT - a mobile highway survey system of high accuracy. IEEE-IEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Ottawa, pp. 476-481
 200. Seib, M., Höfler, H., 1990: Überblick über die verschiedenen Moiré-Techniken. Vision & Voice Magazine, Vol. 4, No. 2, S. 145-151
 201. Shapiro, L., Haralick, R., 1987: Relational matching. Applied Optics, Vol. 26, No. 10, pp. 1845-1851
 202. Shen, J., Castan, S., 1987: A new strategy for multi-camera stereo vision. Proceedings 5th Scandinavian Conference on Image Analysis, Stockholm
 203. Shibasaki, R., Murai, S., 1988: Improvement of mapping accuracy by applying triplet matching to SPOT imagery. IAPRS Vol. 27, Part B10, pp. IV/264-274
 204. Shirai, Y., Suwa, T., 1972: Recognition of polyhedra with a range finder. Pattern Recognition Vol. 4, pp. 243-250
 205. Stahs, T., Wahl, F., 1990: Fast and robust range data acquisition in a low-cost environment. IAPRS Vol. 28, Part 5/2

-
206. Stewart, C., Dyer, C., 1988: The trinocular general support algorithm: A three-camera stereo algorithm for overcoming binocular matching errors. Proceedings 2nd International Conference on Computer Vision, pp. 134-138
 207. Stöhr, H., Reusing, M., Schneider, Th., Kornus, W., Lehner, M., 1996: Mapping of erosion risk zones in the Lake Tana region of Ethiopia. Proceedings MOMS Symposium Cologne (Ed. F. Lanzl), pp. 193-200
 208. Strunz, G., 1992: Image orientation and quality assessment in feature based photogrammetry. Robust Computer Vision (Eds.: Förstner/Ruwiedel), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 27-40
 209. Strunz, G., 1993: Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen. DGK Reihe C, Heft 408, München
 210. Strutz, T., 1993: Ein genaues aktives Bildtriangulationsverfahren zur Oberflächenvermessung. Dissertation an der Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau
 211. Tang, L., Heipke, C., 1993: An approach for automatic relative orientation. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds.: Grün, A, / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 347-354
 212. Torlegard, K., 1967: On the determination of interior orientation of close-up cameras under operational conditions. Dissertation, Universität Stockholm
 213. Trobina, M., 1995: From planar patches to grasps: A 3-D robot vision system handling unmodeled objects. ETH Zürich Diss. No. 11326
 214. Tsai, R., 1983: Multiframe image point matching and 3-D surface reconstruction. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-5, No. 2, pp. 159-172
 215. Tsingas, V., 1992: Automatisierung der Punktübertragung in der Aerotriangulation durch mehrfache digitale Zuordnung. DGK Reihe C Heft 392, München
 216. Uffenkamp, V., 1993: Conception of a digital turning and tilting camera. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds.: Grün, A, / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 72-80
 217. Vane, G., Goetz, A., 1988: Terrestrial imaging spectroscopy. Remote Sensing of Environment, Vol. 24, No. 1, pp. 1-29
 218. Viéville, T., 1994: Auto-calibration of visual sensor parameters on a robotic head. Image and Vision Computing, Vol. 12
 219. Virant, M., 1996: Anwendung der dreidimensionalen "Particle-Tracking-Velocimetry" auf die Untersuchung von Dispersionsvorgängen in Kanalströmungen. ETH Zürich, Dissertation Nr. 11678
 220. Vosselman, G., 1992: Relational matching. Lecture Notes in Computer Science 628, Springer Verlag, Berlin
 221. Vosselman, G., Haala, N., 1992: Erkennung topographischer Paßpunkte durch relationale Zuordnung. ZPF 6/92
 222. Wang, Y., Siebe, E., Schiewe, J., 1994: Generation of epipolar images from MOMS-02 linear scanner images. IAPRS Vol. 30, Part 3/2, pp. 902-907
-

-
223. Weckesser, P., Dillmann, R. Elbs, M. Hampel, S., 1995: Multiple sensorprocessing for high-precision navigation and environmental modeling with a mobile robot. Proceedings International Conference on Intelligent Robots and Systems
 224. Weng, J., Huang, T., Ahuja, N., 1993: Motion and Structure from image sequences. Springer Verlag, Series on Information Sciences
 225. Wester-Ebbinghaus, W., 1983: Ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern. DGK Reihe C, Nr. 289
 226. Wester-Ebbinghaus, W., 1985: Verfahren zur Feldkalibrierung von Photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich. DGK Reihe B 275, S. 106-114
 227. Willson, R., Shafer, S., 1993: A perspective projection camera model for zoom lenses. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds.: Grün, A. / Kahmen, H.), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 149-158
 228. Woodham, R., 1978: Photometric stereo: A reflectance map technique for determining surface orientation from image intensity. SPIE Proceedings Series, Vol. 155, pp. 136-143
 229. Wrobel, B., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. BuL Vol. 55, Heft 3, S. 93-101
 230. Wu, J., 1986: Geometrische Analyse für Bilddaten stereoskopischer Dreifach-Linearzeilenabtaster. Wiss. Arb. Vermessungswesen Universität Hannover, Nr. 146
 231. Wu, X., Murai, S., 1997: Image matching using a three line scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol., 52, No. 1, pp. 20-32
 232. Yachida, M., 1986: 3D data acquisition by multiple views. Robotics Research: the Third International Symposium (Eds.: O. Faugeras, G. Giralt), MIT Press, pp. 11-18
 233. Yang, D., Illingworth, J., 1992: Line based trinocular stereo. British Machine Vision Conference (Eds. D. Hogg, R. Boyle), pp. 327-335
 234. Yokoi, S., Medioni, G., Nevatia, R., 1988: Segment-based trinocular vision. Proceedings of the USA-Japan Symposium on Flexible Automation, Minneapolis, Vol. 2, pp. 817-821
 235. Zhang, Z., Faugeras, O., 1992a: Three-dimensional motion computation and object segmentation in a long sequence of stereo frames. International Journal of Computer Vision, Vol. 7, No. 3, pp. 211-241
 236. Zhang, Z., Faugeras, O., 1992b: A 3D world model builder with a mobile robot. International Journal of Robotics Research, Vol. 11, No. 4, pp. 269-285
 237. Zielinski, H., 1992: Line photogrammetry with multiple images. IAPRS Vol. 29, Part B3, pp. 669-676

Dank:

Für die Übernahme des Referats für diese Arbeit und manche Diskussion im Verlauf der letzten Jahre möchte ich Herrn Prof. Dr. A. Grün, für die Übernahme der Korreferate Herrn Prof. Dr.-habil. D. Fritsch und Herrn Prof. Dr. H. Ingensand herzlich danken.

Desweiteren danke ich meinen Arbeitskollegen am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich sowie der Verwaltungsgruppe und den technischen Mitarbeitern, insbesondere Herrn Ing. B. Rüedin, die durch ihre motivierte Arbeitsweise dazu beitragen, die Basis für effiziente Forschungsarbeit zu schaffen.

Danken möchte ich an dieser Stelle auch einer Reihe von Kollegen, die durch die Bereitstellung von Datenmaterial und Literatur sowie durch gute Hinweise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders nennen möchte ich an dieser Stelle Dr. J. Dold, Prof. Dr. W. Förstner, A. Gadre, Dipl.-Ing. R. Godding, Prof. Dr. H. Haggren, Dr. O. Henricsson, Dipl.-Ing. T. Kersten, Dr. P. Krzystek, Dr. M. Shortis, Dr. M. Virant und Prof. Dr. B. Wrobel.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die meinen langen Bildungsweg immer unterstützt haben, und meiner Lebensgefährtin Maria Hennes, die manche geistige Abwesenheit zu erdulden hatte.