

Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder

THOMAS LÄBE¹ & WOLFGANG FÖRSTNER²

Zusammenfassung: Der Aufsatz präsentiert ein neues vollautomatisches Verfahren zur relativen Orientierung mehrerer digitaler Bilder kalibrierter Kameras. Es nutzt die in den letzten Jahren neu entwickelten Algorithmen im Bereich der Merkmalsextraktion und der Bildgeometrie und erfordert weder das Anbringen von künstlichen Zielmarken noch die Angabe von Näherungswerten. Es basiert auf automatisch ex-trahierten Punkten, die mit dem von D. Lowe (2004) vorgeschlagenen Verfahren zur Extraktion skaleninvarianter Bildmerkmale berechnet werden. Diese ermöglichen eine Punktzuordnung auch bei stark konvergenten Aufnahmen. Für die Bestimmung von Näherungswerten der abschließenden Bündelausgleichung wird bei der relativen Orientierung der Bildpaare das direkte Lösungsverfahren von D. Nister (2004) verwendet. Der Aufsatz diskutiert die praktischen Erfahrungen mit den verwendeten Algorithmen anhand von Beispieldatensätzen sowohl von Innenraum- als auch von Außenaufnahmen.

1 Einleitung

Die Orientierung von Bildern ist eine der grundlegenden Aufgaben der Photogrammetrie und ihre Automatisierung schon lange Forschungsthema. Für Luftbildverbände kann die Automatisierung der Orientierung als gelöst gelten. Verfahren sind kommerziell verfügbar (HATS von Helava/Leica, Phodis-AT von Zeiss, ISDM von Intergraph, MATCH-AT von INPHO). POLLEFEYS (1999) hat wohl als erster ein vollautomatisches Orientierungsverfahren vorgestellt, das von den digitalen Bildern ausgehend die Orientierungsdaten bestimmt, zudem keine Kenntnis über die Kalibrierung voraussetzt. HAO & MAYER (2003) verfolgen das gleiche Ziel. Angeregt durch die Aufgaben der ISPRS Arbeitsgruppe III/1 „Image Orientation“ (<http://www.ipb.uni-bonn.de/isprs/wg.html>) haben wir uns das Ziel gesetzt, ein System für die automatische Bild-Orientierung zu entwickeln, das von einem Nicht-Spezialisten bedienbar ist. Die Anforderungen an ein solches System sind hoch:

1. Das System soll Bilder kalibrierte wie unkalibrierte Kameras verarbeiten können.
2. Die Definition und Messung von Paßinformation soll flexibel sein.
3. Das System soll den Benutzer ggf. auf eine schwache Blockgeometrie hinweisen und ihm auf Wunsch Empfehlungen für weitere Aufnahmen machen.
4. Das System sollte echtzeitfähig sein.

Wir haben im Herbst 2004 mit der Realisierung eines Systems zur vollautomatischen Bestimmung der frei gelagerten Orientierung von Bildern kalibrierter Kameras begonnen. Wir wollen das Verfahren hier vorstellen und über erste Erfahrungen berichten.

¹ Dipl.-Inform.(FH) Thomas Läbe, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn, e-mail: laebe@ipb.uni-bonn.de

² Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn, e-mail: wf@ipb.uni-bonn.de

2 Beschreibung des Verfahrens

Eine Übersicht über das verwendete Verfahren zeigt Abb. 1. Als Eingabe dienen mehrere Digitalbilder. Die Kalibrierung wird als bekannt vorausgesetzt. Bei Verzeichnung sind die Bilder vorab zu entzerren. Das Verfahren bestimmt zunächst alle relative Orientierungen, transformiert sie in ein gemeinsames Koordinatensystem und gleicht alle unbekanntenen Orientierungsparameter und Objektpunktkoordinaten abschließend in einer freien Bündelausgleichung aus. Ergebnis ist ein relativ orientierter Bildverband. Die verwendeten Algorithmen werden im folgenden einzeln erläutert.

2.1 Merkmalsextraktion

Der erste Schritt einer automatischen Orientierung besteht in der automatischen Extraktion von Bildmerkmalen und der automatischen Zuordnung, die jedem Bilddetail eine eigene Nummer zuweist. Da wir das Verfahren auf relative orientierte Bildpaare stützen, verwenden wir als Bildmerkmale punktartige Bildstrukturen. Wir verwenden den Punktoperator, der von D. LOWE (2004) vorgeschlagen wurde. Er erfüllt eine für die Punktzuordnung uneingeschränkter Orientierungen wesentliche Voraussetzung: er ist rotations- und skaleninvariant.

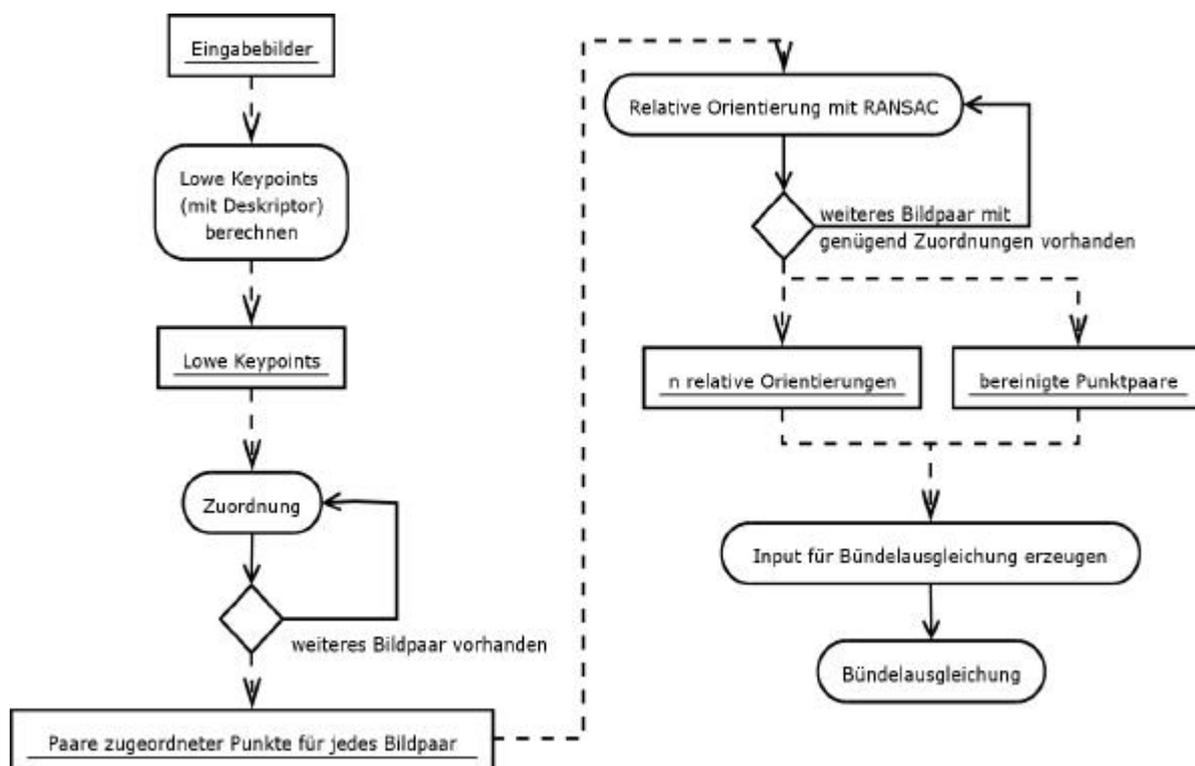


Abb. 1: UML-Aktivitätsdiagramm zum Gesamtverfahren zur automatischen relativen Orientierung mehrerer digitaler Bilder. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden in Kapitel 2 erläutert.

Er beschreibt die Umgebung jeden Punktes mit rotations- und skaleninvarianten Merkmalen, sog. SIFT-Merkmalen („Scale-Invariant Feature Transform“). Dieser Deskriptor beschreibt die Umgebung mit 16 Richtungshistogrammen und enthält 128 Werte im Wertebereich 0 bis 255. Da sich die projektive Verzerrung der Bilder zueinander lokal fast immer sehr gut durch ein Rotation und Skalierung approximieren lässt, erlaubt die Verwendung von SIFT-Merkmalen eine fast beliebige Anordnung der Kamerastandpunkte und Blickrichtungen, sofern genügend homologe Punkte auf den Bild-

paaren vorhanden sind. Dies ist ein wichtiger Vorteil gegenüber Verfahren, die eine einfache Punktextraktion mit anschließender Berechnung des Korrelationskoeffizienten oder einer Kleinste-Quadrate-Zuordnung ("LSM") benutzen. Solche Verfahren funktionieren nur zuverlässig, falls z. B. keine zu große (z.B. 15°) Drehung der Bilder relativ zueinander vorhanden ist (vgl. den Ansatz von HAO & MAYER (2004)).

2.2 Zuordnung

Wir nehmen an, dass keine Vorabinformation über die gegenseitige Lage der Bilder im Raum vorliegt. Daher wird die Zuordnung homologer Punkte für *jedes* mögliche Bildpaar berechnet. Als Gütemaß für die Zuordnung zweier Punkte verwenden wir den euklidischen Abstand ihrer Deskriptor-Vektoren (LOWE, 2004). Je kleiner der Abstand der Deskriptor-Vektoren ist, um so wahrscheinlicher ist es, dass es sich um ein homologes Punktepaar handelt. Da diese Berechnung für ein einzelnes Paar sehr effizient ist, kann sie für alle Punktepaare durchgeführt werden, was bei den gegebenen Voraussetzungen auch erforderlich ist. Für die Zuordnung bieten sich 2 mögliche Strategien an:

Zuordnungsstrategie I: Für jeden Punkt im ersten Bild eines Bildpaars werden die beiden besten Zuordnungen im zweiten Bild gesucht. Ist das Gütemaß des zweitbesten um einen gewissen Prozentsatz (z.B. 60%) schlechter als das Gütemaß des besten Punktes, dann wird die Zuordnung des besten als sicher angenommen und weiter verarbeitet.

Zuordnungsstrategie II: Alle Zuordnungen, deren Gütemaß eine gewisse Schwelle unterschreitet, werden zunächst angenommen. Ergeben sich für einen Punkt mehr als n homologe Punkte im anderen Bild, dann gelten diese Zuordnungen als zu unsicher und werden gelöscht.

Strategie I hat den Vorteil, dass sie recht sicher ist; sie liefert aber nur maximal eine Zuordnung für einen Punkt im ersten Bild, würde daher evtl. zu wenig Punktepaare liefern. Strategie II sollte sich bei Bildern mit wiederholenden Strukturen (z. B. Fenstern bei Fassadenaufnahmen) bewähren, da es hier der nachfolgenden relativen Orientierung überlassen werden kann, welche von den von den n Zuordnungen eines Punktes sich als richtig erweist. Die Beurteilung der beiden Strategien wird anhand von Experimenten im Abschnitt 3 vorgenommen.

Der Schwellwert für die Gütemaße in bei Zuordnungsstrategie I ist relativ leicht zu setzen, da er gut interpretierbar ist. Aber auch für Strategie II kann man die Schwelle für den maximalen Abstand zweier Deskriptoren unabhängig vom Bildmaterial setzen, da die Merkmale des Deskriptors immer im Wertebereich 0 bis 255 liegen. Den Schwellwert kann man recht einfach aus dem Histogramm des Gütemaßes von guten Zuordnungen ablesen, s. das Histogramm Abb. 2 aus mehreren gerechneten Beispielen.

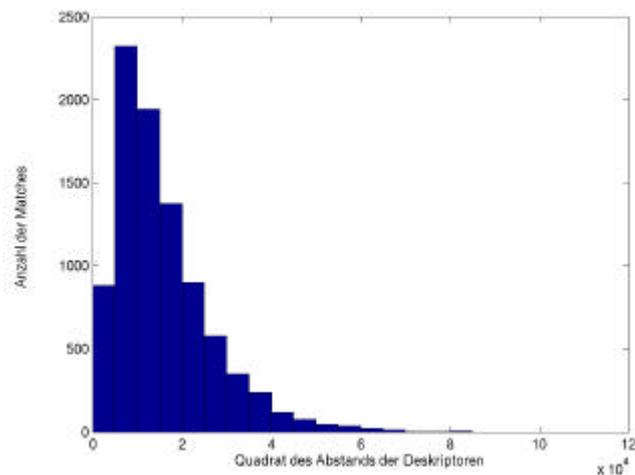


Abb. 2: Verteilung des Quadrates der Abstände der Deskriptoren der extrahierten korrekten Bildpunktpaare. Sie wurden mit Strategie I bestimmt und durch die gesamte Orientierungsbestimmung aus 37 Bildpaaren aus 3 Datensätzen bestätigt. Ein sinnvoller Schwellwert liegt danach ca. zwischen ca. 6×10^4 und 8×10^4 .

2.3 Relative Orientierung der Bildpaare

Für jedes Bildpaar, für das genügend Kandidaten für homologe Punkte gefunden wurden, wird nun eine relative Orientierung berechnet. Da bei der Zuordnung mit einer u. U. hohen Ausreißerquote (z.B. 60% oder mehr) zu rechnen ist, muss ein robustes Verfahren, das zudem ohne gegebene Näherungswerte arbeitet, eingesetzt werden. Wir benutzen dazu das RANSAC-Verfahren ("Random Sample Consensus") nach FISCHLER&BOLLES (1981), das zufällig 5 Kandidaten für Zuordnungen auswählt, die relative Orientierung berechnet und mit Hilfe der übrigen Punkte die Qualität dieser Lösung aus der Einhaltung der Koplanaritätsbedingungen bestimmt und unter allen Versuchen die beste Lösung ausgewählt. Das Verfahren enthält im Kern die vor kurzem von D. NISTER (2004) gefundene direkte Lösung der relativen Orientierung aus 5 Punktepaaren. Das Ergebnis ist prinzipiell nicht eindeutig, man erhält maximal 10 verschiedene Lösungen. In der Praxis treten meist 4 oder 6 Lösungen auf. Einige können zusätzlich aufgrund der Bedingung, dass alle Objektpunkte vor den Kameras liegen, ausgeschlossen werden. Für die übrigen Lösungen wird die Qualität bestimmt. Die Anzahl der Versuche, die man durchführen sollte, hängt von der erwarteten Ausreißerquote und der Wahrscheinlichkeit ab, mit der eine richtige Lösung gefunden werden soll. Beispielweise beträgt die Anzahl der Versuche bei 60% Ausreißerquote und 95% Wahrscheinlichkeit für eine richtige Lösung 292 (MCGLONE, 2004, S. 107). Aufgrund der ermittelten relativen Orientierung kann jetzt die Liste der Zuordnungskandidaten bereinigt werden, indem alle Zuordnungen gelöscht werden, die die Lösung nicht unterstützen. Das Ergebnis dieses Schrittes sind insgesamt also photogrammetrische Modelle von Bildpaaren mit den Parametern der relativen Orientierungen mit dazugehörigen als richtig betrachteten Korrespondenzen.

2.4 Bündelausgleichung

Der abschließende Schritt des Orientierungsverfahrens ist eine Bündelausgleichung. Zunächst werden die photogrammetrischen Modelle der Bildpaare in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert. Auf der Basis der Korrespondenzen aller Bildpaare kann man entscheiden welche Modelle verwendet werden können. Das Koordinatensystem der besten relativen Orientierung, d. i. diejenige

mit der größten Zahl q korrespondierender Punkte, wird als Objektkoordinatensystem verwendet. Die übrigen Bilder werden sukzessive in den bestehenden Bildverband integriert. Dazu dient ein photogrammetrisches Modell, das das neue Bild und ein bereits orientiertes Bild enthält. Gemeinsame Objektpunkte im bestehenden Bildverband und in dem aktuellen photogrammetrischen Modell dienen der Maßstabsübertragung. Finden sich keine entsprechenden Dreifach-Punkte, so muss ein anderes photogrammetrisches Modell benutzt werden.

Vor der Integration eines neuen Bildes werden die Dreifach-Punkte auch auf Konsistenz geprüft. Denn die Zuordnung von drei Punkten in drei Bildern kann falsch sein, obwohl alle drei Koplanaritätsbedingungen erfüllt sind. Hierfür wird ein Vorschlag aus (MCGLONE, 2004, S. 268) benutzt. Er basiert auf dem Schnitt von vier Ebenen im Raum, die durch die Projektionsstrahlen der drei Beobachtungen gehen und durch die Epipolarlinien definiert sind. Sind die drei Beobachtungen homolog, so schneiden sich diese vier Ebenen in einem Punkt. Dies kann durch einen statistischen Test geprüft werden, ohne dass der 3D-Punkt bestimmt werden muss. Es werden also so lange Bilder hinzugefügt, bis alle Bilder in das Gesamtsystem transformiert worden sind oder keine relativen Orientierungen, die als Anschluss benutzt werden können, mehr vorhanden sind. Im diesem Fall kann nur ein Teil der Bilder gemeinsam orientiert werden. Anschließend werden Näherungswerte für die Objektkoordinaten durch räumlichen Vorwärtsschnitt berechnet. Um die nachfolgende Bündelausgleichung effizient in Bezug auf Rechenzeit und Speicherbedarf zu halten, kann an dieser Stelle noch eine Ausdünnung der Punkte durchgeführt werden. Hierfür teilen wir die Bilder in Bereiche ("patches") auf, in denen wir pro Bereich ein Mindestanzahl von Punkten - falls vorhanden - garantieren. Es werden zunächst alle möglichen 2-fach-, dann 3-fach-Punkte u.s.w. gelöscht, so dass die die Geometrie wesentlich stabilisierenden Mehrfachpunkte möglichst erhalten bleiben. Die abschließende Bündelausgleichung erlaubt eine Beurteilung des Ergebnisses durch Analyse der Genauigkeiten.

Das Programm ist im wesentlichen in MATLAB implementiert. Auch für die Bündelausgleichung benutzen wir eigene, in MATLAB geschriebene Software. Der Punktoperator sowie die beiden Zuordnungsverfahren sind in C geschrieben. Für den Vorwärtsschnitt benutzen wir noch eine eigene Java-Bibliothek.

3 Ergebnisse

3.1 Beispiele

Das Verfahren ist mit vielen Datensätzen, die hier aus Platzgründen nicht alle dargestellt werden können, getestet worden. Wir haben für diese Tests Consumer-Digitalkameras eingesetzt, die nicht für photogrammetrische Zwecke gebaut worden sind, die unter bestimmten Bedingungen jedoch eine stabile innere Orientierung aufweisen (LÄBE & FÖRSTNER, 2004). Angaben über 7 Datensätze sind in Tab. 1 zu finden.

Tab. 1 Die Abb. 3, Abb. 4 und Abb. 5 zeigen das Ergebnis der Orientierungsbestimmung als 3D-Visualisierung der Datensätze 5, 6 und 7. Abb. 3 und Abb. 4 sind Aufnahmen einer Karte an einer Wand und zeigen deutlich, dass der Algorithmus mit Drehungen der Kamera (jeweils ca. 90°-Drehungen bei Abb. 3) und mit verschiedenen Skalen (Abb. 4) umgehen kann.

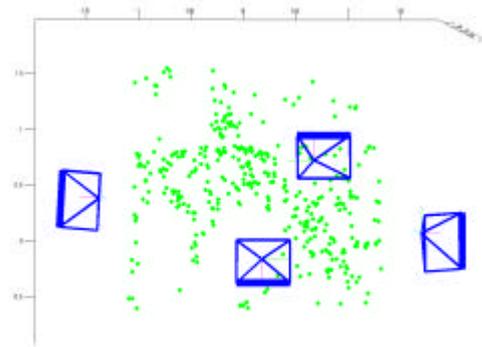


Abb. 3: 3D-Visualisierung der Kamerastandorte und Objektpunkte des Datensatz 5 (Bilder mit 3 Megapixel, 1. Pyramidenstufe, Kamera: HP 435)

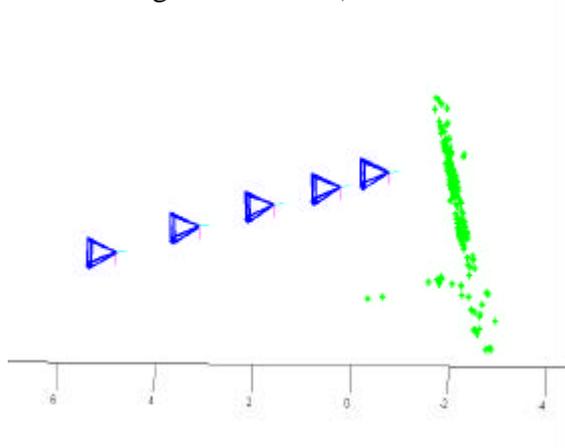


Abb. 4: 3D-Visualisierung der Kamerastandorte und Objektpunkte des Datensatz 6 (Bilder mit 3 Megapixel, 1. Pyramidenstufe, Kamera: HP 435)

Unsere Erfahrung zeigt, dass nicht so sehr die Aufnahmeanordnung (genügend Überlappung vorausgesetzt) für den Erfolg des Verfahrens eine entscheidende Rolle spielt, sondern vor allem die Textur auf den aufgenommenen Objekten. Sie ist im Idealfall sehr vielfältig, wie beispielsweise auf Postern oder Gemälden mit vielen Details. Datensatz 5 beinhaltet 429 Objektpunkte (von 1579 vor der Ausdünnung für die Bündelausgleichung), Datensatz 6 254 Punkte (von 1153). Abb. 5 zeigt, dass auch große Blöcke gerechnet werden können. Dieser Datensatz enthält 32 Bilder und 3000 Objektkoordinaten.

3.2 Vergleich der zwei Zuordnungsstrategien

Die im Kapitel 2 beschriebenen Zuordnungsstrategien I (Prüfung des Erst- und Zweitbesten) und II (Schwellwertverfahren) wurden bei 6 verschiedenen Datensätzen auf ihren praktischen Nutzen hin evaluiert. Dabei wurden jeweils die beiden Strategien mit 2 verschiedenen Parametern (60% bzw. 80% Unterschied bei Strategie I, Zulassen von $n = 2$ bzw. $n = 4$ mehrfachen Zuordnungen bei Strategie II) untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zu finden. Die

Daten zeigen deutlich, dass Strategie I in der Lage ist, Zuordnungen mit sehr geringer Ausreißerzahl zu liefern. Bei 60% Unterschied zwischen bester und zweitbesten Zuordnung liegt die Ausreißerquote sogar unter 10%; allerdings werden in den meisten Fällen so wenig Punktepaare geliefert, dass keine Orientierung möglich ist. Daher ist Strategie I mit 60% nicht allgemein einsetzbar. Strategie II liefert durchweg höhere Ausreißerquoten, aber auch durchweg mehr Zuordnungen. Vergleicht man die *richtigen* Zuordnungen miteinander, so stellt man fest, dass Strategie II, $n = 2$ bis auf Datensatz 2 weniger richtige Zuordnungen ergibt als Strategie I, 80%. Der Vergleich mit $n = 4$ ergibt in 4 Fällen eine ähnliche Anzahl an richtigen Zuordnungen, einmal sind es weniger (Datensatz 5) und einmal deutlich mehr (Datensatz 2 mit sich wiederholenden Strukturen bei einem Metallgitter). Benutzt man Strategie II, dann sollte man $n = 4$ (oder zumindest $n > 2$) wählen, denn bei $n = 4$ zeigen sich in allen Fällen eine höhere Anzahl von richtigen Zuordnungen, wobei die Ausreißerquoten allerdings ebenfalls etwas steigen. Dies kann aber durch eine höhere Anzahl von Versuchen des RANSAC-Algorithmus ausgeglichen werden.

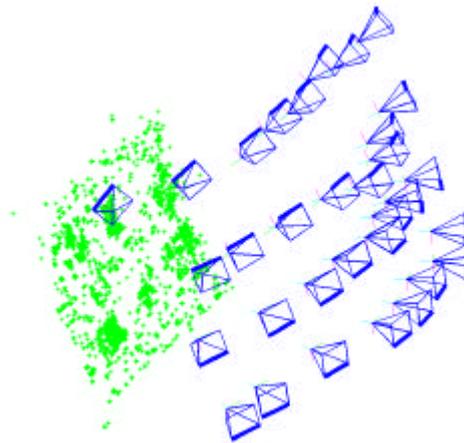


Abb. 5: Datensatz 7 mit 32 Bildern und 3000 zur Orientierung benutzten Objektpunkten

Tab. 1: Angaben über die verwendeten Testdatensätze. Bilder der Pyramidenstufe 1 besitzen die halbe Originalauflösung.

Datensatz	Kamera	Auflösung in Megapixel	Pyramidenstufe	# Bilder	Szene
1	HP 435	3	2.	6	Bürotisch
2	HP 435	3	2.	3	Regelmäßiges Metallgitter an der Wand und Stuhl
3a	HP 435	3	1.	4	Großes Foto und Karton
3b			2.		
4a	Canon EOS1 Ds	11	2.	4	Hausfassade mit großem Abstand zwischen den Bildern
4b			3.		
5	HP 435	3	1.	4	Karte an der Wand
6	HP 435	3	1.	5	Karte an der Wand
7	HP 435	3	1.	32	Kartons und Bücher auf dem Boden

Da von den bis zu n^2 photogrammetrischen Modellen der n Bilder nur die $n-1$ besten für die Bestimmung der Näherungswerte verwendet werden, stören die hohen Ausreißerquoten das Verfahren i. a. nicht. Bei Datensatz 4 ist zu beachten, dass es durch den großen Aufnahmeabstand sehr schwierig ist, im Bildtripel gemeinsame Punkte (mit 3 Beobachtungen) zu finden, so dass dieser Datensatz generell schwierig zu orientieren ist und somit die nicht erfolgte Orientierung bei Strategie II kein Grund dafür ist, diesen Zuordnungsalgorithmus generell abzulehnen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Strategie II, $n = 4$ die allgemein gesehen beste Strategie darstellt, da sie wie erwartet

bei sich wiederholenden Strukturen besser geeignet ist. Mit Strategie I, 80% erhält man ebenfalls ähnlich gute Ergebnisse.

Tab. 2: Erfolg der Zuordnungsstrategien I (60 und 80% Unterschied zwischen erster und zweiter Zuordnung) und II (n = Anzahl der zugelassenen Mehrfachzuordnungen). Pro Datensatz sind die durchschnittliche Anzahl von Zuordnungen pro Bildpaar und die durchschnittliche Ausreißerquote angegeben. Fehlen die Angaben, konnte keine Orientierung aller Bilder erstellt werden.

Datensatz	Strategie I, 60%		Strategie I, 80%		Strategie II, $n=2$		Strategie II, $n=4$	
1	-	-	84	30%	62	61%	76	70%
2	-	-	48	38%	62	53%	105	59%
3a	1135	0.9%	1829	5%	1559	27%	1837	43%
3b	578	0.5%	823	4%	764	18%	870	32%
4a	-	-	78	63%	-	-	-	-
4b	-	-	44	57%	-	-	-	-
5	207	6%	160	36 %	93	65%	108	74%
6	313	1%	494	7%	465	41%	510	54%

4 Zusammenfassung und Ausblick

Unser Ziel ist es, ein möglichst breit einsetzbares Tool für die vollautomatische Orientierungsbestimmung zu entwickeln. Die ersten Erfahrungen mit einem Verfahren für die relative Orientierung von Verbänden kalibrierter Bilder sind ermutigend und bestätigen, dass vollautomatische Verfahren auch für die Orientierung von Bildern im Nahbereich realisierbar sind.

Die Implementation ist allerdings noch in verschiedener Hinsicht vorläufig:

- *Robustheit des Verfahrens.* Um auch Bilder mit geringerer Überlappung aber genügend guten Zuordnungen bearbeiten zu können sind zusätzliche Prüfungen erforderlich. Z. B. kann man für ein Bildtripel die drei relativen Orientierungen auf Konsistenz prüfen: das Produkt der drei Rotationsmatrizen muss die Einheitsmatrix ergeben und die drei Basisvektoren müssen koplanar sein (TRAUTWEIN ET AL, 1999).
- *Bündelausgleichung mit Dämpfung.* Um den Konvergenzradius der Bündelausgleichung zu erhöhen, kann man eine Dämpfung einführen (BÖRLIN ET AL, 2004); dies führt zu einer erheblichen Reduktion divergierender Ausgleichungen.
- *Bündelausgleichung mit robuster Schätzung.* Die Empfindlichkeit der Tests während der Bestimmung der Näherungswerte ist nicht optimal, so dass kleine grobe Fehler nicht entdeckt werden. Dies sollte in der abschließenden Ausgleichung erfolgen, etwa mit einer robusten Schätzung.
- *Optimierung der Rechenzeiten.* Das Programm ist derzeit nicht optimiert. Etwa beträgt die Rechenzeit für den Bildverband der Datensätze 5 und 6 derzeit 5.5 bzw. 4.2 Minuten auf einem PC mit Pentium I V-CPU und 2.2 GHz Taktfrequenz, der Datensatz 7 benötigte ca. 4 Stunden. Insbesondere ist wegen der Bestimmung aller relativen Orientierungen die Rechenzeit quadratisch in der Zahl der Bilder. Hier kann man durch Verwendung der meistens vorhandenen Information über Verknüpfungen über die Bildnummer noch wesentliche Reduktion der Rechenzeiten erreichen. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, verschiedene Pyramidenstufen für eine Laufzeitverbesserung zu verwenden. Auf der Originalauflösung kann man

dann die Epipolargeometrie nutzen und auf die Bestimmung der relativen Orientierung der Bildpaare verzichten.

Neben diesen Erweiterungen sind natürlich die in der Einleitung genannten insgesamt schwierigeren Probleme zu lösen: die Nutzung unkalibrierter Kameras bzw. die Bereitstellung eines vollautomatischen Kalibriermoduls, das ohne Marker auskommt, die flexible Integration von Paßinformation und die für den fachfremden Nutzer erforderlicher Selbstdiagnose einschließlich Hinweisen für weitere Aufnahmen.

Insgesamt betrachten wir diese Entwicklung als ersten Schritt der Lösung des Problems der Orientierung digitaler Bilder für die Nachbardisziplinen, den technisch interessierten Laien und später für Jedermann.

5 Danksagung

Wir danken Herrn D. Lowe, Kanada, für die Bereitstellung des Punktoperators. Weiterhin gilt unser Dank unseren Kollegen Herrn M. Luxen für die Implementierung der Bündelausgleichung und Herrn C. Beder für die Implementierung des Nistér-Algorithmus.

6 Literaturverzeichnis

- BÖRLIN, N., GRUSSENMEYER, P. ERIKSSON, J. LINDSTRÖM, P., 2004: Pros and Cons of Constrained and Unconstrained Formulations of the Bundle Adjustment Problem. In: International Archives of ISPRS, Volume XXXV, ISPRS Congress Istanbul 2004, S. 589-594.
- FISCHLER, R., BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Comm. of the ACM, Vol. 24, S. 381-395
- HAO, X., MAYER, H., 2003. Orientation and Auto-Calibration of Image Triplets and Sequences. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. (34) 3/W8, S. 73-78.
- LÄBE, T., FÖRSTNER, W. 2004: Geometric Stability of Low-Cost Digital Consumer Cameras. Proc. International Archives of ISPRS, Volume XXXV, ISPRS Congress Istanbul 2004, S. 528-535.
- LOWE, D., 2004: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 60, 2, S. 91-110.
- MCGLONE, J. C., editor, 2004: Manual of Photogrammetry. - Fifth edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA.
- NISTÉR, D., 2004: An efficient solution to the five-point relative pose problem. - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 26(6): S. 756-770.
- POLLEFEYS, M., KOCH, R., AND VAN GOOL, L. 1999: Self-Calibration and Metric Reconstruction in spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters, International Journal of Computer Vision, 32(1), 7-25.
- TRAUTWEIN, S., MÜHLICH, M., FEIDEN, D. UND MESTER, R. 1999: Estimating Consistent Motion From Three Views: An Alternative To Trifocal Analysis. LNCS, vol.1689, Springer Verlag.