



Aerotriangulation mit digitalen Bildern: Der Testblock Forssa der OEEPE

Franz Rottensteiner ¹, Reinhard Prinz ²

¹ *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

² *Anton Ebentheuerg. 3, A-3504 Krems-Stein*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **84** (2), S. 189–195

1996

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Rottensteiner_VGI_199631,  
Title = {Aerotriangulation mit digitalen Bildern: Der Testblock Forssa der  
OEEPE},  
Author = {Rottensteiner, Franz and Prinz, Reinhard},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {189--195},  
Number = {2},  
Year = {1996},  
Volume = {84}  
}
```





Aerotriangulation mit digitalen Bildern: Der Testblock Forssa der OEEPE

Franz Rottensteiner, Reinhard Prinz, Wien

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Beitrag des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien zu einem von der OEEPE initiierten internationalen Test, der dazu diente, die praktische Einsetzbarkeit digitaler Auswertemethoden für die Aerotriangulation zu untersuchen. Mit Hilfe von am Institut entwickelter Software wurde ein von der OEEPE vorgegebenes Testprojekt bearbeitet, wobei sich herausstellte, daß die Ergebnisse der digitalen Aerotriangulation in Hinblick auf ihre Genauigkeit mit jenen der analytischen Photogrammetrie konkurrieren können.

Abstract

The presented paper deals with the contribution of the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing at Vienna University of Technology to an international test which was initiated by the OEEPE in order to investigate the applicability of digital methods for aerial triangulation. A test project provided by the OEEPE was worked out using software developed at the institute. The results of digital aerial triangulation turned out to be comparable to the results of analytical photogrammetry with respect to their accuracy.

1. Einführung

Die digitale Photogrammetrie hat in den letzten Jahren einen starken Aufschwung genommen. Digitale Arbeitsstationen ermöglichen einen hohen Automatisierungsgrad bei der photogrammetrischen Auswertung, der sich aus der Anwendung von Verfahren der digitalen Bildverarbeitung, im Besonderen von Verfahren der digitalen Bildzuordnung ergibt. Die Anwendung digitaler Methoden für die Aerotriangulation ist seit einiger Zeit Gegenstand von Forschung und Entwicklung, und einige Systeme haben auf diesem Gebiet bereits Marktreife erlangt [1]. Um einen Überblick über den aktuellen Stand der Entwicklung von digitalen Methoden in der Aerotriangulation zu erhalten sowie um deren Einsatzmöglichkeit und Genauigkeitspotential zu untersuchen, wurde von der OEEPE (Organisation Européenne d'Etudes Photogrammetriques Experimentales) ein internationales Testprojekt initiiert, bei dem ein photogrammetrischer Block von den Teilnehmern mit digitalen Methoden zu bearbeiten war. Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien (I.P.F.) wurde dieser OEEPE-Testblock im Rahmen einer Diplomarbeit bearbeitet, die vor kurzem abgeschlossen werden konnte [2].

2. Anwendung digitaler Methoden in der Aerotriangulation

Digitale Methoden werden in der Aerotriangulation vor allem für die Messung von Bildkoordinaten eingesetzt.

Die Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Bildzuordnungsverfahren für die automationsunterstützte Bildkoordinatenmessung bei der Aerotriangulation zeigt Abbildung 1. Bei der Messung von Rahmenmarken, von signalisierten Punkten und von natürlichen Paßpunkten müssen Punkte, die im Bild- bzw. Objektraum vordefiniert sind, in den digitalen Bildern identifiziert und möglichst genau lokalisiert werden. Falls Näherungswerte mit ausreichender Genauigkeit vorhanden sind, genügt es, solche Punkte nur in einem Bild zu identifizieren; sie können dann in die anderen Bilder übertragen werden. Als Punktübertragung bezeichnet man die gegenseitige Zuordnung von homologen Punkten in zwei oder mehreren Bildern. Die Übertragung von natürlichen Verknüpfungspunkten ist jener Bereich der Aerotriangulation, der das höchste Automatisierungspotential aufweist [1].

Zur Automatisierung der Punktlokalisierungs- bzw. Punktübertragungsaufgabe können verschiedene Arten von Bildzuordnungsverfahren angewendet werden. Flächenbasierte Zuordnungsalgorithmen beruhen auf dem direkten Vergleich der Grauwerte eines Referenzbildes mit jenen von einem oder mehreren Suchbildern. Das Referenzbild kann dabei künstlich generiert oder aus einem der Bilder ausgeschnitten werden. Der erste Fall tritt in der Aerotriangulation bei der Identifizierung von Rahmenmarken und signalisierten Punkten auf; der zweite Fall entspricht der Übertragung eines Punktes in die anderen Bilder. Zu dieser Verfahrensgruppe zählen

die Maximierung des Kreuzkorrelationskoeffizienten der Grauwerte und das wegen seines großen Genauigkeitspotentials häufig verwendete Least Squares Matching Verfahren (LSM) [3].

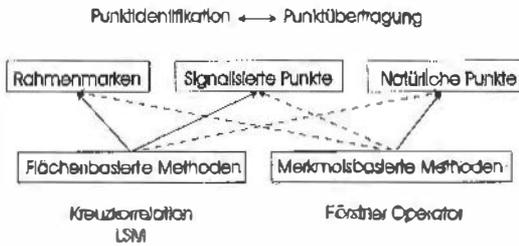


Abb. 1: Anwendung digitaler Bildzuordnungsmethoden für die Messung von Bildkoordinaten aus [2].

Bei den merkmalsbasierten Methoden werden zunächst mit Hilfe eines geeigneten Operators Merkmale, z. B. Punkte, aus den digitalen Bildern extrahiert. Nach der Merkmalsextraktion erfolgt die gegenseitige Zuordnung solcher Merkmale aus zwei oder mehreren Bildern [4]. Auf diese Weise kann die Messung von Verknüpfungspunkten für die Aerotriangulation vollständig automatisiert werden, weil keine über die Flugparameter hinausgehenden Näherungswerte benötigt werden [1]. Die Genauigkeit von merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren hängt von der Genauigkeit der Merkmalsextraktion ab und ist mit $\pm 0,25$ bis $\pm 0,5$ Pixel relativ gering. Dies wird allerdings durch den hohen Automatisierungsgrad wettgemacht, der die Bestimmung einer sehr großen Anzahl von Verknüpfungspunkten (bis zu 270 pro Bild) ermöglicht, sodass man die Orientierungsparameter der Bilder wiederum sehr genau erhalten kann [1].

3. Der Testblock FORSSA

Für die Durchführung der OEEPE-Studie wurde ein Gebiet um die Stadt Forssa in Südfinnland ausgewählt. Ein Testblock bestehend aus vier Streifen mit je sieben Bildern im Bildmaßstab 1:4000 war mit digitalen Methoden zu bearbeiten. Die Längsüberdeckung der Bilder betrug 60%; die Querüberdeckung zwischen den Streifen variierte zwischen 24% und 49% und lag im Mittel bei 34%. Die Aufnahmen wurden aus einer Flughöhe von 600 m über Grund mit einer Wild RC 20 gemacht, deren Kammerkonstante 15 cm betrug. Die 28 Farbbilder mit einem Format von $23 \times 23 \text{ cm}^2$ wurden am Landesvermessungsamt Baden-Württemberg in Stuttgart mit einem Zeiss/Intergraph Photo-

Scan 1 mit einem Digitalisierungsintervall von $15 \mu\text{m}$ gescannt. Aus diesem Datensatz wurde durch Mittelung der Grauwerte benachbarter Pixel ein weiterer mit einem Digitalisierungsintervall von $30 \mu\text{m}$ abgeleitet [5].

In dem vom Testblock überdeckten Gebiet (ca. $1,5 \times 2,5 \text{ km}^2$) existiert ein dichtes Netz von geodätisch vermessenen Punkten, die alle in der Natur durch weiße Kreuze signalisiert waren. Ein kleiner Teil dieser Punkte diente als Paßpunkte; ihre geodätisch bestimmten Koordinaten waren bekannt. Aufgabe der Teilnehmer war es nun, mit digitalen Methoden alle signalisierten Punkte in den Bildern zu lokalisieren sowie, falls erforderlich, weitere (natürliche) Verknüpfungspunkte zu bestimmen, um dann insgesamt acht verschiedene Varianten einer Bündelblockausgleichung zu berechnen, die sich hinsichtlich der Auflösung der Bilder, der Paßpunktanordnung und der Einführung zusätzlicher Parameter zur Kompensation systematischer Fehler unterscheiden. Aus dem Vergleich der photogrammetrisch bestimmten Koordinaten der Signale mit den geodätisch bestimmten sollten Aussagen über die äußere Genauigkeit der verwendeten Auswertverfahren abgeleitet werden [5].

4. Die Bearbeitung des Testblocks FORSSA am I.P.F.

4.1 Vorverarbeitung

Beim Testblock FORSSA fielen 9,6 GB an Bilddaten an. Allerdings wird für die Aerotriangulation nur ein relativ kleiner Teil der Bilder benötigt, nämlich jene kleinen Bildausschnitte, in denen die Paßpunkte abgebildet sind sowie Gebiete, in denen Verknüpfungspunkte bestimmt werden müssen, also die „Gruber-Gebiete“. Um die Bilddaten leichter handhaben zu können, wurden daher diese sogenannten „Interessensgebiete“ aus den gescannten Bildern ausgeschnitten. Für die Aerotriangulation werden nur diese Interessensgebiete verwendet. Sie können entweder auf Grund von Näherungswerten oder interaktiv durch Digitalisieren am Bildschirm in den Bildern festgelegt werden. Im Falle des Testblockes FORSSA waren die genäherten Positionen der Signale sowie Gebiete, in denen natürliche Verknüpfungspunkte zu bestimmen waren, von der OEEPE vorgegeben. Rund um diese vorgegebenen Positionen wurden quadratische Bildfenster mit 150 Pixel Seitenlänge ausgeschnitten, wodurch sich der Speicherplatzbedarf auf ca 47 MB reduzierte [2].

Prinzipiell ist für die Aerotriangulation eine möglichst hohe Auflösung von Vorteil. Für die Folgeprodukte der Aerotriangulation, z.B. für Orthophotos, genügt es hingegen oft, die Bilder mit einer niedrigeren Auflösung zu digitalisieren. Da man bereits für einen relativ kleinen Block wie den vorliegenden bei einer Auflösung von $15\ \mu\text{m}$ ca. 7 GB Plattenpeicherplatz benötigt, liegt der Gedanke nahe, die Bilder zunächst nur in der für die Folgeprodukte nötigen Auflösung zu scannen bzw. nur einen Überblicksscan zu erzeugen. In diesen Bildern können die Interessensgebiete festgelegt werden, die man in der Folge mit hoher Auflösung scannt. Eine Voraussetzung für eine solche Vorgangsweise ist allerdings, daß der Sensor des Scanners, mit dem man die Bilder digitalisiert, einen vorgegebenen Bildausschnitt mit hoher Genauigkeit anfahren kann. Unter Umständen kann die Lage der Interessensgebiete auch aus den Flugparametern abgeleitet werden.

4.2 Lokalisierung der Signale

Die Lokalisierung der Signale erfolgte mit Hilfe von zwei flächenbasierte Bildzuordnungsalgorithmen, die am I.P.F. im Zuge von zwei Diplomarbeiten implementiert werden konnten [6], [2]. Beide Algorithmen verwenden ein aus einem Vektormodell des Signales abgeleitetes künstlich erzeugtes Referenzbild. Beim ersten Algorithmus wird das Referenzbild über einen auf Grund von Näherungswerten bestimmten Suchbereich mäanderförmig verschoben, wobei an jeder Position der Kreuzkorrelationskoeffizient der Grauwerte berechnet wird. Hat man die Position des Maximums der Kreuzkorrelationskoeffizienten gefunden, kann man die Kreuzkorrelationsfunktion in einer kleinen Umgebung um dieses Maximum durch eine Polynomfläche zweiten Grades approximieren. Aus der Position des Maximums dieser Polynomfläche ergibt sich dann die Position des Signals, die man so mit einer Genauigkeit von etwa ± 0.25 Pixel erhält [6]. Ein Problem dieses Algorithmus liegt darin, daß er nicht invariant gegenüber Rotationen des Signals ist. Dieses Problem kann umgangen werden, indem man die oben beschriebene Suche mit mehreren Referenzbildern durchführt, in denen das Signal in verschiedenen Rotationszuständen enthalten ist.

Der eben beschriebene Kreuzkorrelationsalgorithmus liefert die Koordinaten der Signale ausgehend von sehr groben Näherungswerten. Zur Genauigkeitssteigerung kann man diese Koordinaten noch mit Hilfe eines Least Squares Matching Algorithmus nach [3] verbessern [2]. Dieser

Algorithmus benötigt bereits auf wenige Pixel genaue Näherungswerte, liefert die gesuchten Signale aber mit einer (inneren) Genauigkeit von bis zu ± 0.05 Pixel, weil er in der Lage ist, kleine Rotationen und Maßstabsänderungen der Signale zu berücksichtigen [3], [2]. Das Referenzbild, das bereits zur Korrelation verwendet wurde, wird an der Näherungsposition über das Suchbild gelegt. Aus den Differenzen der Grauwerte korrespondierender Pixel werden durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen die Parameter einer Affintransformation zwischen Such- und Referenzbild so bestimmt, daß die Quadratsumme der verbleibenden Differenzen der Grauwerte minimal wird. Wegen der Nichtlinearität der auftretenden Verbesserungsgleichungen müssen die gesuchten Parameter iterativ berechnet werden [3].

Bei der Messung der Koordinaten für die Rahmenmarken traten keine groben Probleme auf, weil diese in den Bildern radiometrisch sehr gut definiert waren. Auf die Bestimmung der Rotation konnte bei der Kreuzkorrelation verzichtet werden, weil die Bilder ausgekantet in den Scanner eingelegt wurden und die Signale somit immer gleich verdreht waren. Abbildung 2 zeigt zwei der Rahmenmarken aus dem hochauflösenden Datensatz. Es wurden acht Rahmenmarken pro Bild gemessen [2].

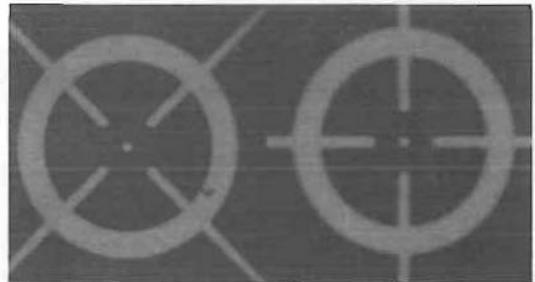
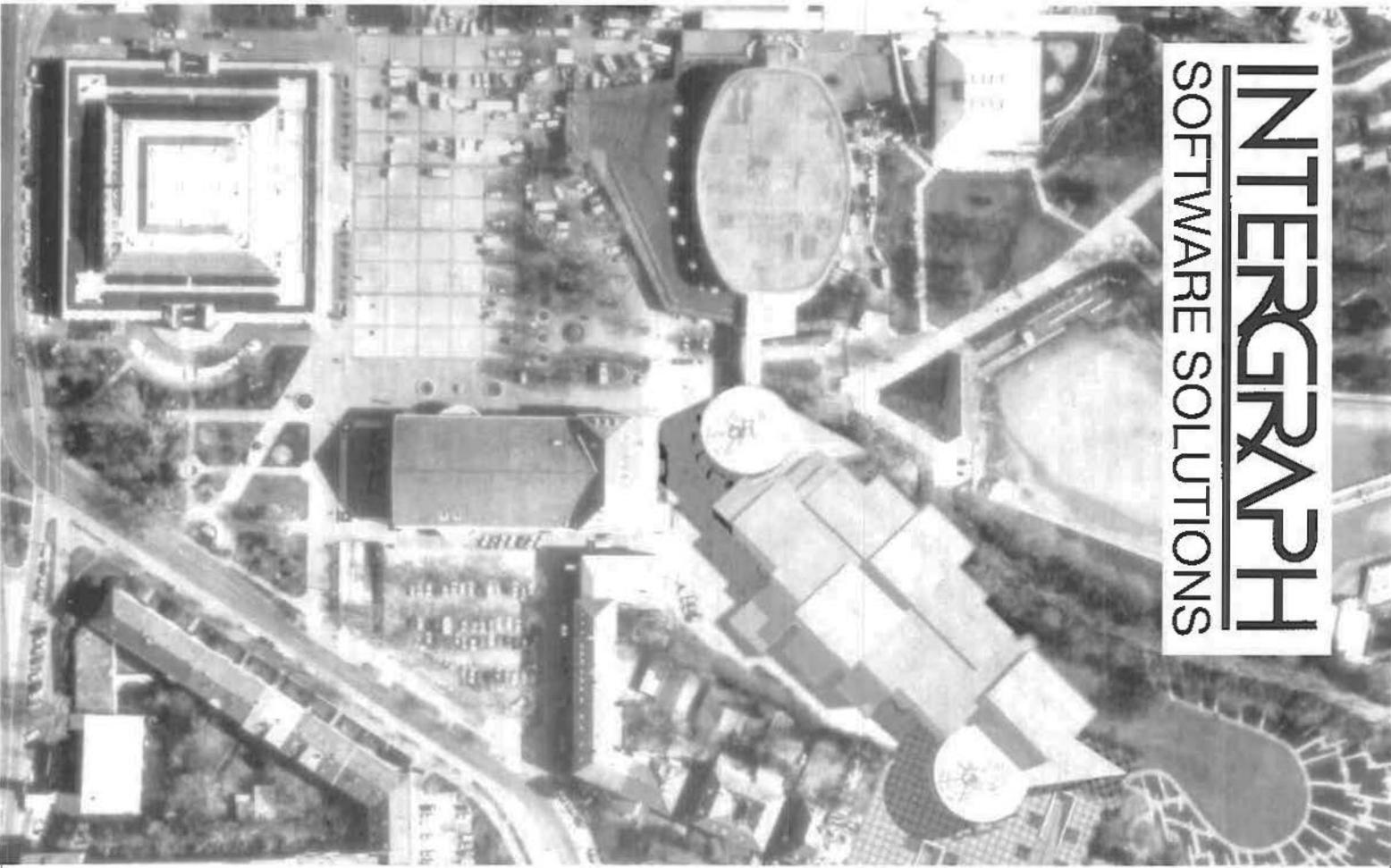


Abb. 2: Rahmenmarken mit $15\ \mu\text{m}$ gescannt.

Die Bestimmung der Koordinaten der signalisierten Punkte gestaltete sich auf Grund der Verdrehung der Signale als schwieriger. Die kreuzförmigen Signale waren für die Anwendung digitaler Methoden nicht optimal; kreisförmige Signale hätten diesem Zweck eher entsprochen. Außerdem zeigten die Signale, wie in Abbildung 3 ersichtlich, große Unterschiede in Form und Kontrast. Ein Teil der Punktmarkierungen wurden schon vor der Befliegung durch Fremdeinwirkung in der Natur zerstört (Punkt 6002). Solche Punkte konnten schon während der Messung durch Vergleich des Korrelationskoeffizienten mit einem Schwellwert von einer weiteren



INTERGRAPH
SOFTWARE SOLUTIONS

Intergraph GmbH (Österreich), A-1030 Wien, Modecenterstraße 14, Block A
Tel.: 0222/797 35-0 Fax: 0222/797 35-35 <http://www.intergraph.com>

Bearbeitung ausgeschlossen werden. Im Schnitt wurden in beiden Datensätzen 11 Signale pro Bild lokalisiert, wobei der Suchbereich für den Kreuzkorrelationsalgorithmus eine Ausdehnung von 150 x 150 Pixeln hatte [2].

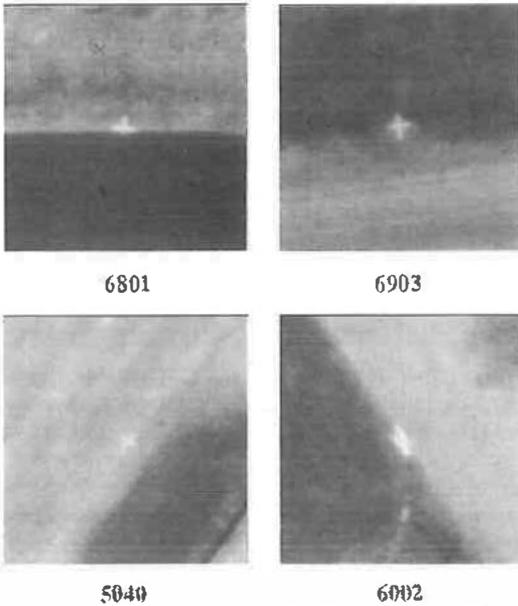


Abb 3: Signalisierte Punkte aus dem mit 15 μm geschnittenen Datensatz. Größe der Ausschnitte: 150 x 150 Pixel.

4.3 Natürliche Verknüpfungspunkte

Der OEEPE-Test war vor allem auf die Untersuchung der Genauigkeit der Bestimmung der signalisierten Punkte ausgelegt. Es waren etwa 100 signalisierte Punkte im Gebiet des Blockes vorhanden, die größtenteils als Verknüpfungspunkte dienten. Allerdings war die Verteilung dieser signalisierten Punkte im Block nicht optimal, sodaß die Bestimmung zusätzlicher Verknüpfungspunkte notwendig wurde. Aus Zeitgründen konnte am I.P.F. nur eine halbautomatische Methode zur Lösung dieser Aufgabe implementiert werden, bei der zunächst mit Hilfe des Förstner-Operators [4] signifikante Punkte in den Interessensgebieten extrahiert und mit Subpixelgenauigkeit bestimmt wurden. Die Zuordnung homologer Punkte verschiedener Bilder erfolgte interaktiv durch den Operateur, nachdem homologe Bildausschnitte, in denen die extrahierten Punkte markiert waren, am Bildschirm dargestellt worden waren. Die Punktauswahl und die Feinmessung erfolgte also automatisch; die Zuordnung erfolgte interaktiv. Im Durchschnitt wurden etwa 10 natürliche Verknüpfungspunkte pro Bild bestimmt [2].

4.4 Bündelblockausgleichung

Die Berechnungen der verschiedenen Varianten des Testblockes erfolgte mit Hilfe des Programmpaketes ORIENT [7]. Es wurden insgesamt 16 verschiedene Versionen einer Bündelblockausgleichung berechnet, nämlich jede der acht von der OEEPE verlangten Versionen sowohl für die Ergebnisse der Kreuzkorrelation als auch für jene des LSM-Verfahrens. Das mathematische Modell der Ausgleichung entspricht jenem der Bündelblockausgleichung. Bei acht Varianten wurden zusätzliche Parameter zur Kompensation systematischer Fehler als Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt. Es zeigte sich, daß nur zwei Parameter, die einen Maßstabsunterschied in den beiden Koordinatenrichtungen und eine Scherung beschrieben sowie die Koeffizienten dritten und fünften Grades eines Polynomes für die radiale Komponente der Verzerrung signifikant bestimmbar waren [2].

Das stochastische Modell der Ausgleichung stützte sich auf die Genauigkeitsmaße für die Beobachtungen. Für den mit 15 μm digitalisierten Datensatz wurde der mittlere Bildkoordinatenfehler eines Signals mit $\pm 5 \mu\text{m}$ angenommen, jener der natürlichen Verknüpfungspunkte mit $\pm 10 \mu\text{m}$. Für den mit 30 μm digitalisierten Datensatz betragen die entsprechenden mittleren Fehler $\pm 8 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 16 \mu\text{m}$. Der mittlere Fehler der Paßpunktkoordinaten wurde von der OEEPE mit $\pm 20 \text{mm}$ angegeben. Das Verhältnis der mittleren Fehler von Signalen zu jenem der natürlichen Punkte von 1:2 wurde im Zuge der Bündelblockausgleichung durch eine Varianzkomponentenschätzung bestätigt. ORIENT verfügt über die Möglichkeit, grobe Fehler in den Daten durch robuste Schätzung und/oder Data Snooping zu eliminieren [7]. Auf diese Weise wurden bei der Bündelblockausgleichung in jeder Version etwa 2.5 % der Beobachtungen eliminiert [2]. Die Charakteristika der Ausgleichungen können aus Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1 enthält auch die inneren Genauigkeiten der Bildkoordinaten der Signale (m_s) und der Koordinaten der Neupunkte. Man erkennt, daß bei der Kreuzkorrelationsmethode der mittlere Fehler der Bildkoordinaten nur wenig vom Digitalisierungsintervall abhängt, und auch die zusätzlichen Parameter haben relativ geringen Einfluß auf das Ergebnis. Die Einführung zusätzlicher Parameter hat nur bei voller Paßpunktfiguration einen Sinn. Großen Einfluß auf die innere Genauigkeit hat, ähnlich wie in der analytischen Photogrammetrie, die Paßpunktconfiguration. Ein etwas anderes Bild ergibt sich bei den Ergebnissen der Bündelblocktriangulierung mit

Version			Kreuzkorrelation				LSM					
PG [μm]	PP	ZP	m_0 [μm]	Signale		Nat. Punkte		m_0 [μm]	Signale		Nat. Punkte	
				$m_{x,y}$ [mm]	m_z [mm]	$m_{x,y}$ [mm]	m_z [mm]		$m_{x,y}$ [mm]	m_z [mm]	$m_{x,y}$ [mm]	m_z [mm]
15	D	N	4.1	17	45	40	70	3.5	14	36	26	60
15	D	J	3.7	15	43	35	65	3.1	14	35	25	58
15	S	N	4.2	35	60	55	90	3.1	26	41	33	62
15	S	J	4.1	35	65	65	95	3.5	32	52	43	75
30	D	N	4.6	18	55	40	80	5.5	21	55	41	96
30	D	J	4.5	18	53	40	75	5.4	22	56	42	96
30	S	N	4.5	35	65	60	95	5.6	44	75	60	115
30	S	J	4.5	37	37	75	95	5.2	48	80	65	117

Tabelle 1: Charakteristische Zahlen der verschiedenen Varianten der Bündelblockausgleichung; PG: Pixelgröße; PP: Paßpunktconfiguration (Dicht/Spärlich); ZP: zusätzliche Parameter (Ja/Nein); m_0 : Mittlerer Gewichtseinheitsfehler a posteriori; $m_{x,y}$, m_z : Mittlere Fehler in der Lage bzw. Höhe, getrennt für signalisierte und natürliche Punkte. Die Anzahl der Beobachtungen betrug im Schnitt 1200; die Redundanz lag im Mittel bei 410

den LSM-Koordinaten. Die Abhängigkeit der inneren Genauigkeit des LSM-Algorithmus von der Pixelgröße ist deutlich zu erkennen. Verglichen mit der Kreuzkorrelationsmethode ergibt sich eine Genauigkeitsverbesserung bei der höheren Auflösung; bei dem Datensatz mit der niedrigeren Auflösung verschlechtert sich die Genauigkeit.

5. Vergleich der Ergebnisse mit den geodätisch bestimmten Koordinaten

Zur Überprüfung der äußeren Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung wurde ein Vergleich mit den geodätisch bestimmten Punktkoordinaten angestellt. Dabei wurde der mittlere Fehler der Koordinatendifferenzen berechnet. Eine Aufstellung dieser mittleren Fehler kann Tabelle 2 entnommen werden.

Auch hier erweist sich die Verwendung des LSM-Verfahrens bei hochauflösendem Bildmaterial (15 μm) als vorteilhaft. Die äußere Genauigkeit der Lage liegt bei der genauesten Version um etwa 10% unter jener der Kreuzkorrelationsmethode. Auch die Zuverlässigkeit der Lokalisierung nimmt zu. Beim 30 μm - Datensatz zeigt sich jedoch eine Verschlechterung um ungefähr 20%. Dies liegt vor allem daran, daß die Signale in diesem Datensatz nur noch verschwommen abgebildet sind und ihre geometrische Struktur verloren geht. Sie sind zwar noch zu lokalisieren, jedoch nur noch schwer als Kreuze zu erkennen. Als Konsequenz dieser Tatsache kann die Verdrehung der Signale mit dem LSM-Verfahren nur mehr sehr unsicher bestimmt werden. Andererseits führt die Tatsache, daß die Signale nun schon kreisähnlich abgebildet werden, dazu, daß der Kreuzkorrelationsalgorithmus die Signale sehr gut lokalisieren kann. Beim hochauf-

Version			Kreuzkorrelation						LSM					
PG [μm]	PP	ZP	$m_{\Delta X}$		$m_{\Delta Y}$		$m_{\Delta Z}$		$m_{\Delta X}$		$m_{\Delta Y}$		$m_{\Delta Z}$	
			[mm]	el.	[mm]	el.	[mm]	el.	[mm]	el.	[mm]	el.	[mm]	el.
15	D	N	28	2	25	4	53	4	25	1	25	2	40	2
15	D	J	27	3	24	5	37	1	23	1	24	1	37	1
15	S	N	40	2	34	4	63	2	25	1	29	1	42	1
15	S	J	37	2	37	4	64	4	28	1	28	1	58	2
30	D	N	24	2	31	2	33	1	36	2	41	2	43	3
30	D	J	23	1	30	1	35	2	36	2	36	2	48	3
30	S	N	42	1	42	1	49	2	46	3	45	2	56	3
30	S	J	40	1	46	2	45	2	53	3	51	4	75	2

Tabelle 2: Mittlere Fehler der Differenzen zwischen photogrammetrisch und geodätisch bestimmten Koordinaten. PG: Pixelgröße; PP: Paßpunktconfiguration (Dicht/Spärlich); ZP: zusätzliche Parameter (Ja/Nein); el.: Anzahl der eliminierten Koordinaten. Im Durchschnitt wurden 80 Koordinatenpaare verglichen.

lösenden Datensatz (15 μm) liegen die Verhältnisse genau umgekehrt: Hier sind die Kreuze gut als solche zu erkennen, und der LSM-Algorithmus kann gut restliche Verdrehungen und Maßstabsunterschiede bestimmen, während die Verwendung des Kreuzkorrelationsalgorithmus unter diesen Umständen problematisch ist. Die LSM-Koordinaten sind daher in diesem Fall genauer und zuverlässiger. Überraschend erscheint die geringe Abhängigkeit des Ergebnisses von der Pixelgröße. In jedem Fall kann gesagt werden, daß die Genauigkeit der Ergebnisse jenen

des Automatisierungspotentials der digitalen Methoden damit gerechnet werden, daß sie in den nächsten Jahren zunehmend die analytischen Methoden verdrängen werden. Vom operationellen Standpunkt wäre eine stärkere Integration der verschiedenen im Rahmen einer Aerotriangulation verwendeten Komponenten wünschenswert. Es wäre z. B. von Vorteil, die durch die Bündelblockausgleichung eliminierten Beobachtungen für eventuelle Nachmessungen mit einfachen Mitteln am Bildschirm darstellen zu können.

	Teilnehmer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	IPF
15 μm	$m_{\Delta X}$ [mm]	29	21	21	32	68	24	19	21	21	20	25	19	23
	$m_{\Delta Y}$ [mm]	26	22	20	30	177	29	25	20	20	25	21	22	24
	$m_{\Delta Z}$ [mm]	54	36	40	73	63	59	24	47	67	52	53	40	37
30 μm	$m_{\Delta X}$ [mm]	50	31	22	47	29	27	18	27	19	-	36	25	23
	$m_{\Delta Y}$ [mm]	45	69	24	45	27	32	21	26	24	-	35	33	30
	$m_{\Delta Z}$ [mm]	73	68	30	83	54	79	30	37	61	-	97	37	35

Tabelle 3: Mittlere Fehler der Differenzen zwischen photogrammetrisch und geodätisch bestimmten Koordinaten im internationalen Vergleich nach [5] und [2].

der analytischen Photogrammetrie entspricht: Unter der Annahme, daß geodätisch bestimmte und photogrammetrische Koordinaten gleich genau sind, entspricht ein mittlerer Fehler der Differenz einer Lagekoordinate von 23 mm einem mittleren Koordinatenmeßfehler von 4 μm im Bild; ein mittlerer Fehler der Differenz der Höhe von 37 mm entspricht etwa 0.004% der Flughöhe.

Zum Abschluß sollen die am IPF erreichten Genauigkeitswerte mit jenen der anderen Teilnehmer verglichen werden. Aus Platzgründen werden nur die Versionen mit voller Paßpunkt-konfiguration und zusätzlichen Parametern dazu herangezogen (Tabelle 3). Beim Datensatz mit 30 μm Pixelgröße wurden die Daten aus dem Kreuzkorrelationsalgorithmus verwendet und beim hochauflösenden Datensatz jene aus dem LSM-Verfahren. Die nicht am IPF gewonnenen Daten stammen aus [5].

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der OEEPE-Test über digitale Methoden in der Aerotriangulation hat gezeigt, daß mit diesen neuen Methoden Genauigkeiten erreicht werden können, die denen der analytischen Photogrammetrie entsprechen. Zwar haben erst wenige Systeme Marktreife erreicht, doch kann auf Grund

Literatur

- [1] Tsingas, V.: Operational Use and Empirical Results of Automatic Aerial Triangulation. Photogrammetric Week 1995 S. 207-214.
- [2] Prinz, R.: Aerotriangulation mit digitalen Bildern. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien, 1995
- [3] Achermann, F.: High Precision Digital Image Processing. Proceedings of the 39th Photogrammetric Week at Stuttgart University. Heft 9, S. 231-243, Stuttgart 1984
- [4] Förstner, W.: A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 26 Part 3/3, Rovaniemi, Finland 1988
- [5] Jaakkola J., Sarjakoski, T.: Aerotriangulation Using Digitized Images. Abschlußbericht des OEEPE Projekts FORSSA, 1995 (liegt als Rohfassung vor)
- [6] Rottensteiner, F.: Flächenbasierte Korrelation von Rahmenmarken in abgetasteten Bildern. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien, 1993
- [7] Kager, H.: Orient: A Universal Photogrammetric Adjustment System. In: Gruen, Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1989, S. 447-455

Diese Arbeit wurde vom Forschungsschwerpunkt S7004-MAT, Theory and Applications of Digital Image Processing and Pattern Recognition, Project IV: Stereovideometry and Spatial Object Recognition, unterstützt.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. Franz Rottensteiner, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, Gußhausstr. 27-29, A-1040 Wien
 Dipl.-Ing. Reinhard Prinz, Anton Ebentheuer g. 3, A-3504 Krenns-Stein