

Anwendungen von GPS in der Photogrammetrie

H. Schade und D. Fritsch
Institut für Photogrammetrie
Universität Stuttgart
Keplerstr. 11
70174 Stuttgart

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Aufsatz wird eine Übersicht über den aktuellen Stand der GPS-Nutzung in photogrammetrischen Anwendungen gegeben. GPS in der Photogrammetrie kann im wesentlichen in drei Themenbereiche gegliedert werden: Bildflugnavigation, die Kombination von Bild und Navigationsdaten zur Verringerung der Paßpunktanzahl bei der Bildauswertung (GPS-gestützte Aerotriangulation) und zuletzt die Erfassung der vollständigen äußeren Orientierung von abbildenden und nicht-abbildenden photogrammetrischen Sensoren mit GPS Multi-Antennensystemen. Für diese drei Anwendungsbereiche werden die Genauigkeitsanforderungen, die mathematischen Modelle und Auswertetechniken sowie eine Bewertung des augenblicklichen operationellen Status der Anwendung vorgestellt.

1. EINFÜHRUNG

Die geometrische Rekonstruktion räumlicher Objekte aus photogrammetrischen Aufnahmen erfordert neben Stereo-Luftbildern mit einer entsprechenden Überdeckung auch die Kenntnis der Parameter der äußeren Orientierung der Luftbildkamera. Im photogrammetrischen Aufnahme- und Auswerteprozess sind demnach die Position und Lage des photogrammetrischen Sensors zum Zeitpunkt der Aufnahme von zentraler Bedeutung. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Positionierung und Neigungsbestimmung des Sensors für die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung können in der Photogrammetrie sehr hoch sein. Abhängig vom verwendeten Bildmaßstab, der Kartiergenauigkeit und der Anwendung sind Positionierungsgenauigkeiten im Bereich von wenigen Zentimetern bis mehreren Metern erforderlich. Die Anforderungen an die Neigungsgenauigkeit liegen abhängig von der

Anwendung und der verwendeten Kamera im Bereich von wenigen mgon bis 0.2 gon. Eine einfache Abschätzung der geforderten Genauigkeit für die Neigungen $\Delta\alpha$ kann aus der Größe der Bildelemente (pel) und der verwendeten Kammerbrennweite (c) abgeleitet werden ($\Delta\alpha = \arctan(\text{pel}/c)$). Demnach läge die geforderte Neigungsgenauigkeit für eine typische photogrammetrische Befliegung für Punktbestimmungszwecke bei $\Delta\alpha = \arctan(25\mu\text{m}/0.153\text{m}) = 10 \text{ mgon}$. Neben der Maximalanforderung der photogrammetrischen Punktbestimmung treten jedoch auch Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsanforderungen zur Herstellung von Orthophotos (100 μm Pixelgröße) oder zur GIS-Datenerhebung mit digitalen Kameras (Brennweiten: 2-8 cm) zunehmend in den Vordergrund. Abb. 1 faßt die geforderten Positionierungs- und Neigungsgenauigkeiten zur äußeren Orientierung für einige typische photogrammetrische Anwendungen zusammen.

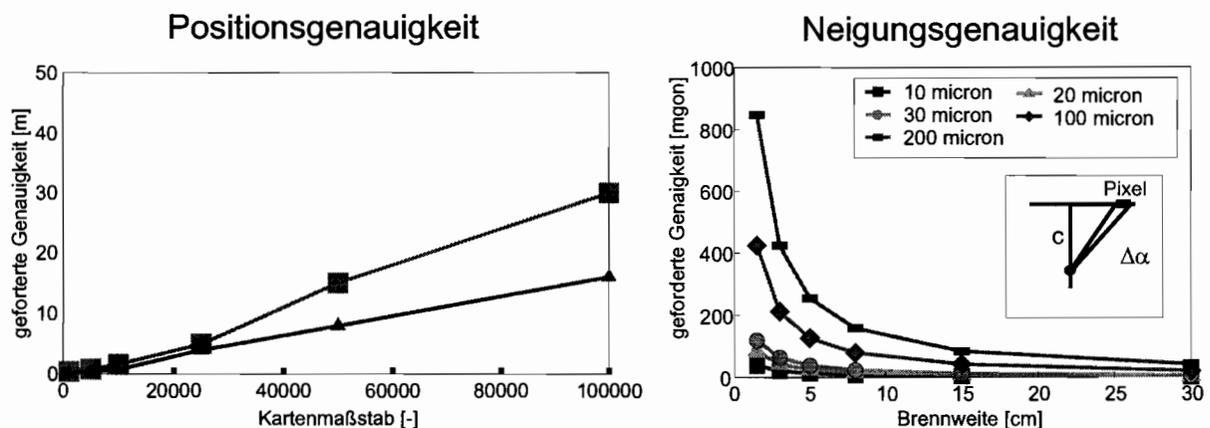


Abbildung 1 Anforderungen an Positions- und Neigungsgenauigkeit in der Photogrammetrie

Die sehr hohen Anforderungen an die Positions- und Neigungsgenauigkeit der äußeren Orientierung machten bisher eine direkte Messung dieser Orientierungsparameter unmöglich, da die bestehenden Navigationssysteme nur ungenügende Genauigkeitseigenschaften besaßen. Daher wurden die Orientierungsparameter herkömmlich über inverse photogrammetrische Verfahren mit Hilfe von Paßpunkten bestimmt. Die Beschaffung und Signalisierung der Paßpunkte ist im konventionellen photogrammetrischen Auswerteprozess nach wie vor noch einer der kostenintensivsten Bereiche.

Im Gegensatz zur äußeren Orientierung sind die Genauigkeitsanforderungen an Position und Neigung zur Navigation für die Gewährleistung der Bildüberdeckung eher gering. Die geforderte Genauigkeit der Positionierung ist im wesentlichen von dem Bildmaßstab und der benötigten Mindestüberdeckung abhängig. Typischerweise sollte die Überdeckung nicht mehr als 5% des Sollwertes variieren, was bei sehr großen Befliegungsmaßstäben etwa 50 m Positionierungsgenauigkeit und 5 gon Neigungsgenauigkeit entspricht. Bisher wurden bei der Bildaufnahme meist visuelle Navigationsverfahren oder niedrig bis mittel genaue Radiopositionierungsverfahren (z.B. Omega, Loran) verwendet. Trotz der geringen Anforderungen ist die Verwendung dieser Verfahren aufgrund des geringen Genauigkeitspotentials speziell bei großen Maßstäben und niedrigem Kontrast (Wasserflächen, ausgedehnte Wälder, Wüste, Schnee/Eis) kritisch.

Das NAVSTAR/Global Positioning System (GPS) wurde im Frühjahr 1994, nach dem Ausbau der vollen Satellitenkonstellation und nach einer mehrere Jahre dauernden Test- und Aufbauphase, für operationell erklärt. Dieses passive Satellitennavigationssystem ist weltweit kontinuierlich nutzbar und unabhängig von den bestehenden Wetterbedingungen. GPS bietet aufgrund der von den Satelliten ausgesendeten Funksignale die Möglichkeit, hochpräzise dreidimensionale Positionskoordinaten, Geschwindigkeitsvektoren und durch die Nutzung neuartiger Multi-Antennensysteme auch Neigungsinformation zu liefern. Im normalen Betriebszustand senden die GPS-Satelliten fünf Signaltypen aus. Zwei Trägerfrequenzsignale mit den Wellenlängen 0.192 m und 0.244 m, zwei "Pseudo-Random-Noise"-Codes mit 30 m (P-Code, nur militärisch nutzbar) und 300 m Chiplänge (C/A-Code, zivil nutzbar) und einer Statusmessage, die über den Betriebszustand des Satelliten Auskunft gibt. Die PRN-Codes und die Statusmessage sind auf die Trägerfrequenzen aufmoduliert. Die GPS-Signale bieten je nach Beobachtungsmodus (statisch, kinematisch, differentiell, absolut) und verwendetem Beobachtungstyp (Trägerphase, PRN-Codes) eine große Bandbreite verschiedener Genauigkeitsklassen. Entsprechend der erreichbaren Genauigkeit wurde das Potential von GPS für photogrammetrische Anwendungen bereits früh erkannt. Die Positions- und Neigungsinformation, die aus GPS-Beobachtungen abgeleitet werden können, spielen heute in der Photogrammetrie in den folgenden Bereichen eine wesentliche Rolle:

- Bildflugnavigation
- Kombination von Bild- und Navigationsdaten (GPS gestützte Aerotriangulation) zur gemeinsamen Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung
- Vollständige äußere Orientierung abbildender und nicht-abbildender Sensoren

Die zugrundeliegenden theoretischen Modelle, neue Testresultate und der aktuelle Status der drei genannten Anwendungen sind der wesentliche Gegenstand dieses Beitrags und werden im folgenden diskutiert.

2. BILDFLUGNAVIGATION

Wie bereits erwähnt, sind die Genauigkeitsanforderungen an die Bildflugnavigation eher gering. Der GPS Standard Positioning Service (SPS) mit dem C/A-Code garantiert eine Genauigkeit von mindestens 100 m oder besser mit 95 % Verfügbarkeit. Der SPS basiert auf einem Einfrequenzempfänger und C/A-Code-Beobachtungen auf nur einer Station. Eine Telemetrie-Verbindung zwischen der Referenzstation und dem bewegten Empfänger ist nicht vorhanden. Da die Auslösung der Kamera auf den Navigationsergebnissen basiert und die erforderliche Überlappung der Bilder direkt bei der Befliegung kontrolliert werden soll, ist die Positionierung in Echtzeit notwendig. Mit Ausnahme sehr großmaßstäbiger Befliegungen sind die erreichbaren Genauigkeiten mit diesem Positionierungsverfahren für die photogrammetrische Bildflugnavigation hinreichend. Die Neigungskomponente wird heute bei der Bildbefliegung mit bestehenden Navigationshilfen (z.B. künstlicher Horizont) bei der Bildaufnahme möglichst gering gehalten. Aufgrund der vorsichtigen Flugweise wird angenommen, daß es sich bei den aufgenommenen Bildern um Senkrechtaufnahmen handelt. Neigungen während der Bildaufnahme werden heute bei der Echtzeitkontrolle der Bildüberdeckung vernachlässigt. Eine Nutzung von GPS-Multiantennensystemen (siehe Kap. 4) zur Neigungsbestimmung und somit zur direkten Kontrolle der Bildüberdeckung ist noch nicht verwirklicht, aber durchaus denkbar. Die Nutzung von GPS für die Positionsbestimmung in der Bildflugnavigation ist dagegen in der praktischen Anwendung weitgehend akzeptiert. Intelligente Bildflugmanagementsysteme mit entsprechender Hard- und Software sind von verschiedenen Anbietern kommerziell erhältlich und können mittlerweile bei Befliegungen vorausgesetzt werden (z.B. Becker 1993). Mit der zunehmenden Verbreitung von GPS auch außerhalb der Photogrammetrie werden neue Permanent-Stationen errichtet, die GPS Korrektursignale auf bestehenden Radiofrequenzen senden. Durch die damit gegebene Möglichkeit der differentiellen Positionsbestimmung (erreichbare Genauigkeiten 10-20 m) können dann selbst großmaßstäbige Befliegungen mit voller Unterstützung von GPS durchgeführt werden.

3. GPS-GESTÜTZTE AEROTRIANGULATION

Wie bereits erwähnt, sind die Anforderungen an die direkte äußere Orientierung speziell bei großen Bildmaßstäben äußerst streng. Die geforderten Positionsgenauigkeiten im Zentimeterbereich können mit GPS nur unter Verwendung der Phasenbeobachtungen und differentiellen Beobachtungstechniken erreicht werden. Dabei ist der Schlüssel zu Zentimeter-Positionsgenauigkeiten die korrekte Bestimmung der Phasenvieldeutigkeiten. Im Prinzip können die Phasenvieldeutigkeiten am Beginn einer kinematischen Beobachtungssequenz durch eine statische Initialisierung oder mit konventionellen geodätischen Methoden bestimmt werden. Wenn während der gesamten Befliegung mindestens 4 Satelliten kontinuierlich mit ausreichender Beobachtungsgeometrie zu beobachten sind, ist die geforderte Positionierungsgenauigkeit im Zentimeterbereich erreichbar. Obwohl die Satellitenkonstellation mittlerweile voll ausgebaut ist, erlauben die Rahmenbedingungen einer photogrammetrische Befliegung nur in seltenen Fällen eine kontinuierliche Beobachtung von mindestens 4 Satelliten über den gesamten Flugweg. Die hohe Kinematik des Flugzeuges und Abschattungen der Satellitensignale im Kurvenflug machen "Cycle Slips" und Signalverluste bei einer Befliegung höchst wahrscheinlich. Es besteht demnach die Notwendigkeit, die Phasenvieldeutigkeiten während der Bewegung neu zu bestimmen, wozu dem GPS-Anwender heute im wesentlichen zwei Methoden zur Verfügung stehen:

- die "Ambiguity Resolution on the Fly" oder
- die Nutzung anderer Sensoren zur Bestimmung der Phasenvieldeutigkeiten

In der Regel basieren die Verfahren der Ambiguity Resolution on the Fly auf einer statistischen Analyse der Genauigkeit der Phasenbeobachtungen (Hatch 1990, Counselman/Gourevitch 1981). Das mathematische Modell zur Schätzung der Vieldeutigkeiten basiert auf der Annahme, daß die Phasenbeobachtungen unkorreliert und frei von systematischen Fehlern sind. Im Zusammenhang mit flugzeuggetragenen Anwendungen sind diese Forderungen jedoch sehr restriktiv und durch die gegebenen Rahmenbedingungen nicht oder nur selten einzuhalten. Durch die häufig große Distanz zwischen Referenzstation und Flugzeug (bis zu mehreren 100 km) werden nicht alle systematische Fehlereinflüsse (Orbit, Atmosphäre) durch die Differenzenbildung vollständig eliminiert. Darüber hinaus wird das Phasensignal durch Mehrwegsempfang in der stark reflektiven Umgebung des Flugzeugs weiter systematisch verfälscht. Die Annahme, daß die Phasenbeobachtungen systematisch unverfälscht sind, führt deswegen häufig dazu, daß das Lösungsverfahren zu einem falschen Satz von Phasenvieldeutigkeiten konvergiert. Obwohl erste Erfolge bei der Lösung der Phasenvieldeutigkeiten in der Bewegung auch unter photogrammetrischen Rahmenbedingungen (z. B. Schade 1992) erzielt wurden, ist zum jetzigen

Zeitpunkt noch nicht zuverlässig zu garantieren, daß unter allen gegebenen Umständen die korrekten Phasenvieldeutigkeiten geschätzt werden. Da die Kosten einer photogrammetrischen Befliegung jedoch meist sehr hoch sind, sollte die erfolgreiche Durchführung der Befliegung nicht von der korrekten Lösung der Vieldeutigkeiten, d.h. ausschließlich aus GPS-Beobachtungen abhängen. Robuste Verfahren zur korrekten Schätzung der Phasenvieldeutigkeiten unter der Zuhilfenahme weiterer Sensorinformation sind daher von zentraler Bedeutung in photogrammetrischen Anwendungen. In der Photogrammetrie liegt es nahe, das Potential der Luftbilddauswertung dazu zu nutzen, um eine robuste Methode zur Positionsbestimmung aus Bild- und GPS-Daten abzuleiten. Im folgenden soll das an der Universität Stuttgart entwickelte Verfahren der GPS-gestützten Aerotriangulation (Frieß 1990) vorgestellt werden, welches in einer kombinierten Ausgleichung von Bild- und GPS-Daten die Orientierungsparameter der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt.

Bevor die theoretischen Grundlagen der GPS-gestützten Aerotriangulation näher beleuchtet werden, ist es notwendig, die Fehlereigenschaften der GPS- Positionsbestimmung aufzuzeigen, wenn die Positionen mit einem falschen Satz von Phasenvieldeutigkeiten bestimmt werden. Abb. 2 zeigt die Positionsfehler einer statischen Messung, die in einem kinematischen Modus über ein Zeitintervall von ca. 1 Stunde prozessiert wurde. Die Phasenvieldeutigkeiten wurden für 3 von 6 Satelliten um jeweils plus zwei Wellenlängen absichtlich verfälscht. Die Sollwerte für die Positionslösung (und für die Phasenvieldeutigkeiten) wurden aus einer konventionellen GPS-Basislinienbestimmung aller statischen Daten berechnet.

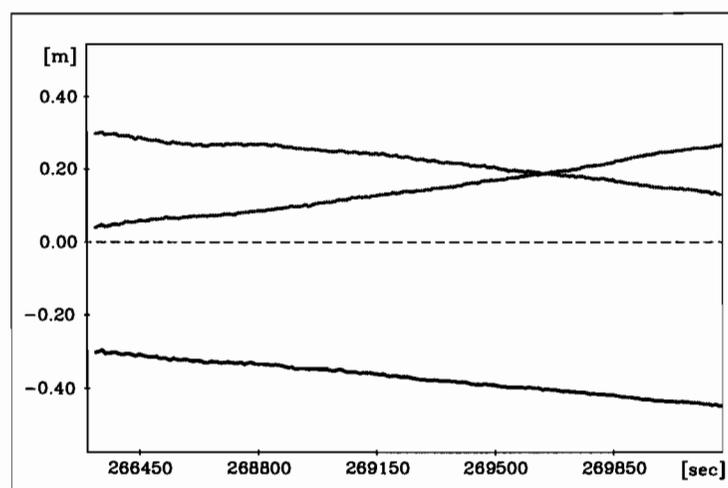


Abbildung 2 Positionsfehler mit inkorrekten Phasenvieldeutigkeiten

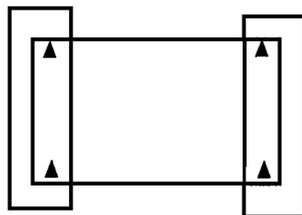
Wie aus Abb. 2 ersehen werden kann, sind die Positionsfehler die durch die inkorrekten Phasenvieldeutigkeiten entstehen, in erster Näherung durch eine Verschiebung und einen zeitabhängigen linearen Anteil charakterisierbar. Die Verschiebung ist die Konsequenz der um einen konstanten Betrag verfälschten Strecke, die zu den Satelliten beobachtet werden. Wenn sich die geometrische Konfiguration zwischen den Satelliten und dem Empfänger nicht ändern würde, wäre diese Verschiebung zeitlich konstant. Da sich jedoch sowohl die Satelliten als auch der Empfänger im Raum bewegen, ändert sich die Geometrie ständig, was der Grund für die zeitliche Komponente in der beobachteten Fehlerkurve ist. Da die Satellitenbahnen jedoch in der Regel sehr glatt sind, kann das Fehlerverhalten der GPS-Positionierung zumindest über kürzere Zeiträume (<15 min) linear als Funktion der Zeit angenähert werden. Ein analoges Fehlerverhalten konnte in zahlreichen weiteren kinematischen und statischen Datensätzen nachgewiesen werden.

Mit der Kenntnis dieses Fehlerverhaltens können die berechneten GPS-Positionen mit dem folgenden funktionalen Modell in einer konventionellen Blockausgleichung genutzt werden, unabhängig davon ob die Positionen mit den korrekten oder inkorrekten Phasenvieldeutigkeiten berechnet wurden.

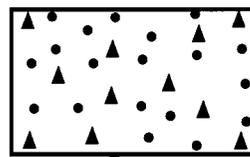
$$\begin{bmatrix} X_{PC} \\ Y_{PC} \\ Z_{PC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} + \mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} X_{AO} \\ Y_{AO} \\ Z_{AO} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{OFF} \\ Y_{OFF} \\ Z_{OFF} \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Der Vektor \mathbf{X}_{GPS} (Vektoren und Matrizen sind fett notiert) bezeichnet die beobachtete Position der GPS-Antenne, \mathbf{X}_{PC} sind die zu bestimmenden Koordinaten des Projektionszentrums und die Transformation $\mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) \mathbf{X}_{AO}$ beinhaltet die Korrektur für den Antennen-Offset, der in einer terrestrischen Kalibrierungsmessung bestimmt werden kann. Die Fehleranteile, die von den falschen Phasenvieldeutigkeiten herrühren, sind in dem konstanten Vektor \mathbf{X}_{OFF} und dem zeitabhängigen Term $\Delta t \mathbf{a}$ zusammengefaßt. Selbst wenn die GPS-Positionen mit falschen Phasenvieldeutigkeiten berechnet wurden, bleiben die insgesamt 6 Fehlerparameter \mathbf{X}_{OFF} und \mathbf{a} konstant, solange nur ein Satz von Vieldeutigkeiten für die Positionsberechnung verwendet wird. Nur wenn eine neue Kombination von Phasenvieldeutigkeiten im Rahmen des Positionierungsprozesses berechnet werden muß, ändern sich die zu bestimmenden Fehlerparameter. In photogrammetrischen Anwendungen werden meist pro Streifen ein Satz dieser 6 Fehlerparameter geschätzt. Während des Streifens fliegt das Bildflugzeug möglichst gerade und ruhig, so daß Signalabriß oder "Cycle Slips" unwahrscheinlich werden. Im Gegensatz

dazu wird das Satellitensignal bei Kurvenflügen zwischen den Streifen durch die starken Rollwinkel häufig abgeschattet, weshalb eine Reinitialisierung der Vieldeutigkeiten notwendig wird. Aus diesem Grund werden heute die GPS-Beobachtungen meist streifenweise prozessiert, wobei am Anfang des Streifens die Phasenvieldeutigkeiten näherungsweise aus Pseudorangebeobachtungen geschätzt werden. Mit diesen genäherten Phasenvieldeutigkeiten sind dann die Positionen des Streifens mit den Trägerphasendaten zu berechnen. Die systematischen Verfälschungen der Position durch die falschen Phasenvieldeutigkeiten werden dann mit dem Ansatz aus Formel (1) in der Blockausgleichung korrigiert. Obwohl die Anzahl der Unbekannten durch dieses Verfahren pro Block um $n \cdot 6$ (n =Anzahl der Streifen) steigt, sind die Vorteile durch die direkten $\text{anz_bild} \cdot 3$ (anz_bild = Anzahl der Bilder) Beobachtungen der Projektionszentren naheliegend. Die beobachteten Projektionszentren wirken in der Blockausgleichung wie zusätzliche beobachtete Paßpunkte, was eine außerordentliche Stärkung der Blockgeometrie bewirkt. Diese Stärkung ist so dominant, daß die tatsächliche Anzahl von Paßpunkten auf ein Minimum von vier Paßpunkten in den Blockecken reduziert werden kann. Durch die starke Verminderung der Paßpunktanzahl und die zusätzlich zu bestimmenden Fehlerparameter ist es jedoch zusätzlich erforderlich, am Blockrand Querstreifen zu befliegen, um Singularitäten in der Normalgleichungsmatrix während der Blockausgleichung zu vermeiden. Abb. 3 zeigt ein typisches Befliegungsgebiet mit Flugschema und Paßpunktbesetzung wie es mit GPS und ohne GPS befliegen werden kann.



- 4 Paßpunkte (hor./ vert.)
- 2 Querstreifen
- lineare Parameter pro Streifen



- 11 Paßpunkte (hor.)
- 18 Paßpunkte (vert.)
- keine Querstreifen

Abbildung 3 Flugschema und Paßpunktbesetzung für Befliegungen mit und ohne GPS

Die Genauigkeitseigenschaften photogrammetrischer Blöcke mit GPS und 4 Paßpunkten oder ohne GPS und voller Paßpunktbesetzung sind sehr ähnlich. Der oben abgebildete Block wurde mit den beiden verschiedenen Verfahren ausgeglichen, wobei die theoretische Genauigkeit des

Blockes in beiden Varianten keine signifikanten Unterschiede zeigt. Im Falle der Rechnung mit GPS standen für diesen Block die nicht verwendeten Paßpunkte als zusätzliche Kontrollpunkte zur Verfügung. Sie konnten für eine unabhängige Genauigkeitskontrolle genutzt werden, welche die theoretisch bestimmten Genauigkeitseigenschaften bestätigt. Abb. 4 stellt die Ergebnisse der kombinierten Blockausgleichung dem konventionellen Verfahren gegenüber.

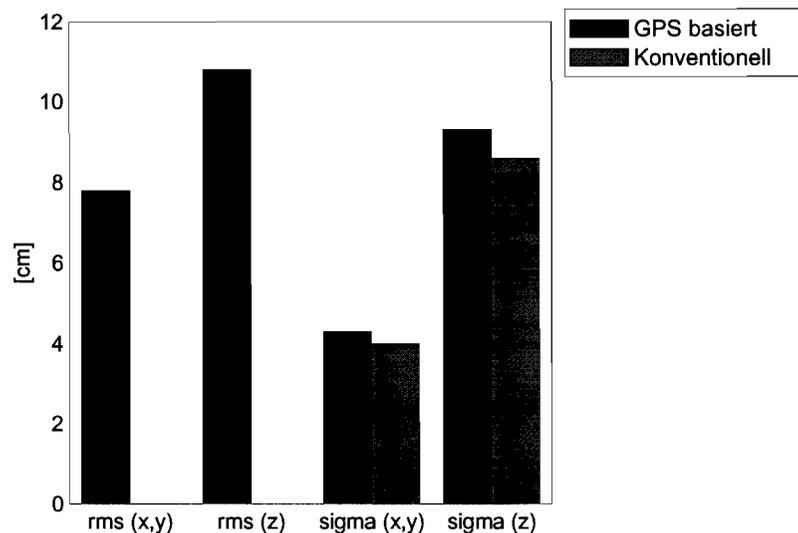


Abbildung 4 Vergleich der kombinierten mit der konventionellen Blockausgleichung

Die in diesem Block erreichten Ergebnisse wurden in der jüngsten Vergangenheit durch eine große Anzahl von Pilotprojekten mit verschiedenen Blockgrößen und Befliegungsmaßstäben bestätigt (Ackermann/Schade 1993). Das einfache und robuste Verfahren wird in der praktischen Photogrammetrie zunehmend angenommen, da die entstehenden Kostenvorteile durch den reduzierten Paßpunktbedarf und Signalisierungsaufwand überzeugend sind.

4. VOLLSTÄNDIGE ÄÜßERE ORIENTIERUNG MIT GPS

Neben der Bereitstellung und Signalisierung der Paßpunkte sind im Rahmen des photogrammetrischen Orientierungsprozesses die Bildverknüpfung und die Messung der Paßpunkte zeit- und kostenintensive Komponenten. Die drastische Reduzierung der Paßpunktanzahl durch GPS-Positionen wurde im vorhergehenden Kapitel diskutiert. Eine Reduktion der Bildverknüpfung ist jedoch nur dann möglich, wenn die Neigungskomponenten der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt werden können. Neben der Reduktion der Verknüpfung im konventionellen Luftbildfall werden in neueren digitalen Aufnahmesystemen

zunehmend CCD-Zeilensensoren (z.B. Hofmann 1988, Babey/Anger 1989) und nicht abbildende Sensoren (z.B. Lindenberger 1993) eingesetzt, die konventionelle Verfahren der Bildverknüpfung nicht erlauben. Der Schlüssel für eine erfolgreiche geometrische Auswertung derartiger Bilder ist die Möglichkeit der direkten Neigungsbestimmung während der Befliegung. Auch zeit- und kostenkritische Anwendungen profitieren von der direkten Messung der Orientierungsparameter. In der Regel erfordern diese Anwendungen einen hohen Automatisierungsgrad des photogrammetrischen Orientierungsprozesses, was in naher Zukunft nur dann möglich ist, wenn erfolgreich die Neigungskomponenten mit direkten Meßverfahren bestimmt werden können.

Durch die Entwicklung neuartiger Multiantennen-Systeme besteht nun auch die Möglichkeit, mit GPS Neigungskomponenten zu bestimmen. Die Neigungsbestimmung basiert auf interferometrischen Phasenbeobachtungen. Die Phasendifferenz $\Delta\phi$ eines Satellitensignals, die an zwei Antennen gemessen werden kann, ist im wesentlichen abhängig von der Winkellage des Satelliten relativ zu den Antennen und der Basislänge zwischen den Antennen. Da die Distanz zwischen dem Satelliten und dem Antennenpaar sehr groß ist, im Vergleich zur kurzen Basislinie zwischen den Antennen, kann angenommen werden, daß das Satellitensignal an beiden Antennen parallel einfällt. Der Raumwinkel der Basis bezüglich des Satelliten kann dann über die einfache Beziehung (2) berechnet werden (z.B. Hartl/Wehr 1986). Für die Bestimmung aller drei Raumwinkel einer photogrammetrischen Kamera müssen mindestens 3 Antennen gekoppelt sein, da aus einem ebenen Interferometer nur 2 Raumwinkel bestimmt werden können:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\Delta\phi \lambda}{2\pi B}\right) \quad (2)$$

Für die Bestimmung der Neigungen ist es notwendig, die Phasenbeobachtung zu verwenden und die höchstmögliche Meßgenauigkeit anzustreben, denn bereits kleine Fehler in der Phasendifferenz ergeben große Fehler in dem zu bestimmenden Winkel (z. B. 1 cm Meßfehler auf einer 10 m Basis ergibt einen Winkelfehler von 0.06°). Die theoretische Meßgenauigkeit moderner Empfänger für die Messung von Phasendifferenzen liegt im Bereich von 0.5-1 mm. Unter operationellen Bedingungen ist dies jedoch nicht erreichbar, da das Satellitensignal systematischen Fehlern unterliegt. Bedingt durch die kurze Basislinie auf dem Flugzeug und die interferometrische Beobachtungsanordnung sind jedoch nicht die konventionellen GPS-Fehler wie Orbit, Atmosphäre oder Selective Availability ausschlaggebend. Vielmehr sind die Fehlereffekte limitierend, die sich auf die Antennen trotz der kurzen Basis unterschiedlich

erfaßbare Neigungsinformation speziell für die mittlere bis niedrig genaue Bildorientierung wesentliche Vorteile bringen kann. In Verbindung mit einem low-cost Inertialnavigationssystem ist die direkte Bestimmung der vollständigen äußeren Orientierung photogrammetrischer Sensoren selbst für hohe Genauigkeitsanforderungen denkbar. Zur Nutzung der Neigungsmessung mit GPS und zur Integration mit Inertialnavigationssystemen besteht zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch Forschungsbedarf.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung von GPS hat die Verfahren der photogrammetrischen Bildorientierung und die Bildflugnavigation wesentlich beeinflusst. Es hat sich gezeigt, daß die GPS-Positionierung speziell in Verbindung mit bestehender Bildinformation ein äußerst robustes und zuverlässiges Verfahren ist. Der wirtschaftliche und operationelle Vorteil der Nutzung von GPS in der Photogrammetrie, durch eine signifikante Reduktion der Paßpunkte hat dazu geführt, daß die GPS-Positionierung in der Praxis zunehmend akzeptiert wird. Die Methoden der GPS-gestützten Aerotriangulation und die GPS-Bildflugnavigation sollten heute als Standardverfahren eingesetzt werden.

Neben der GPS-Positionierung tritt die Neigungsbestimmung mit GPS zunächst auf der Forschungsebene in den Vordergrund. Erste Versuche haben gezeigt, daß die vollständige Bildorientierung mit GPS-Multiantennensystemen zumindest mit niedriger bis mittlerer Genauigkeit möglich ist. Besonders in der vollständigen Automatisierung des Bildorientierungsprozesses werden derartige Navigationsverfahren eine Schlüsselrolle spielen. Darüber hinaus werden heute integrierte GPS/INS Verfahren für die Orientierung nicht-abbildender Sensoren oder CCD-Zeilensensoren überprüft. Weitere praktische Untersuchungen zur Neigungsbestimmung mit GPS und integrierten GPS/INS Systemen werden in der nahen Zukunft am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart durchgeführt.

6. LITERATUR

Ackermann F., Schade H.: *"Application of GPS for Aerial Triangulation"*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing PE&RS, Vol. 59, No. 11, pp. 1625-1632, 1993

- Babey S.K., Anger C.D. [1989]: *A Compact Airborne Spectrographic Imager - CASI*, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1028- 1031, Vancouver, Canada, 1989
- Becker R. [1993]: *Experience with a Modern Photoflight Navigation System*, In: Photogrammetric Week '93 (Fritsch/Hobbie (Eds.)), Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1993
- Counselman C.C., Gourevitch S.A. [1981] : *Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying: Ambiguity and Multipath with Global Positioning System*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-19, No 4, 1981, pp. 244-252
- Frieß P. [1990]: *Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR/Global Positioning System*, DGK, Serie C, Nr. 359
- Hartl P., Wehr A. [1986]: *Coordinate Transformation Procedures for GPS-Attitude Control*, Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium on Progress in Imaging Sensors, ESA SP-252, Stuttgart, Germany, pp. 215-226, 1986
- Hatch R. [1990] : *Instantaneous Ambiguity Resolution*, Proceedings of the IAG Symposium 107 Kinematic Systems in Geodesy Surveying and Remote Sensing, Banff, Canada, 1990, pp. 299-308
- Hofmann O. [1988]: *A Digital Three Line Stereo Scanner System*, International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Proceedings of the Commission II Symposium, pp. 206-213, 1988
- Lindenberger J. [1993]: *Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme*, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 400, München 1993
- Schade H. [1992]: *"Reduction of Systematic Errors in GPS-Based Photogrammetry by Fast Ambiguity Resolution Techniques"*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXIX, Part B1, pp. 223-228, 1992
- Schade H. [1994]: *"Neigungsbestimmung photogrammetrischer Sensoren mit dem NAVSTAR/Global Positioning System"*, ZPF - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 62. Jahrgang, S. 199-207, Heft 6, 1994