

GPS in der Photogrammetrie

Michael Cramer, Stuttgart

1. Einführung

Ähnlich wie die GPS Positionierung im Bereich der geodätischen Paßpunktbestimmung tiefgreifende Wirkung erzielte, hat sie auch weitreichenden Einfluß auf die photogrammetrische Praxis genommen. Dabei handelt es sich grundsätzlich um die kinematische Positionierung eines fliegenden Flugzeugs bzw. der Luftbildkamera und anderer flugzeuggetragener Sensoren, wobei zwischen verschiedenen Arten der Positionsbestimmung unterschieden werden muß:

- Die direkte, absolute Positionierung unter Verwendung von nur einem GPS Empfänger im Flugzeug, bzw. der relative, differentielle Ansatz (DGPS) mit zusätzlicher Bodenstation,
- die Echtzeit-Positionsbestimmung im Gegensatz zur post-processing Auswertung,
- und die Positionslösung mit eingeschränkter Genauigkeit (C/A-Code, Pseudorange Lösung) gegenüber der Trägerphasenauswertung hoher Genauigkeit.

GPS findet in der photogrammetrischen Praxis seine Anwendung in der Flugzeugnavigation und zur hochgenauen Positionsbestimmung des Kameraprojektionszentrums für die Aerotriangulation. Nur der Vollständigkeit halber sei in diesem Zusammenhang die Rolle des GPS zur Bestimmung der Paßpunktinformationen am Boden erwähnt.

Der erste Anwendungsbereich betrifft die GPS kontrollierte Bildflugnavigation. Diese ermöglicht dem Piloten oder Navigator des Bildfluges eine absolute Positionsbestimmung eingeschränkter Genauigkeit in Echtzeit, um jederzeit die aktuelle Position des Flugzeuges mit dem vorgegebenen Soll-Flugplan vergleichen zu können.

Das Hauptanwendungsgebiet von GPS in der Photogrammetrie ist derzeit die kinematische differentielle Positionierung der Luftbildkamera mit hoher Genauigkeit für die Zwecke der Aerotriangulation bzw. für die direkte absolute Positionierung flugzeuggetragener Sensoren. Diese hochgenaue Positionsbestimmung in der dynamischen Umgebung eines Flugzeugs ist technisch anspruchs-

voller als bei geodätisch-terrestrischen Anwendungen, da die verschiedenen terrestrischen Beobachtungsverfahren zur Erzielung hoher Genauigkeiten (z.B. "statische" Verfahren (static), "schnelle statische" Verfahren (rapid static), "stop and go" Verfahren) nicht zur Verfügung stehen. Um die hohen Genauigkeiten im Bereich von 1 dm zu erreichen ist die Auswertung der Trägerphasenbeobachtungen zwingend notwendig. Daher müssen die Mehrdeutigkeiten (engl. Ambiguities) der Phasenmessung zu Anfang des Fluges bzw. nach jeder Signalunterbrechung - verursacht z.B. durch Abschattungen in Kurvenflügen - bestimmt werden. Dazu sind zwei verschiedene Verfahren üblich:

- Näherungsweise Bestimmung der Mehrdeutigkeiten für jeden photogrammetrischen Flugstreifen ausgehend von einer Pseudorange Positionierung und anschließende Korrektur der systematischen Fehler der Positionsbestimmung - hervorgerufen durch die i.d.R. falsch bestimmten Mehrdeutigkeiten - in einer gemeinsamen Blockausgleichung,
- Verwendung von OTF ("on the fly") Algorithmen, zur exakten Bestimmung der Mehrdeutigkeiten aus den kinematischen GPS Daten und Restaurierung der vollständigen Flugbahn.

Auf beide Ansätze wird im Abschnitt 3 näher eingegangen.

Versuche, neben Positionsinformationen durch die Kombination von mehreren GPS Empfängern im Flugzeug bzw. durch spezielle Mehrantennen GPS Empfänger (z.B. Ashtech 3DF, Trimble TANS Vector) mit interferometrischen Methoden auch GPS Neigungen zu bestimmen, erreichen nicht die geforderten Genauigkeiten und sind daher für die allgemeine Anwendung in der Photogrammetrie nicht ausreichend (z.B. Schade et al. (1993), Schade & Cramer (1994), El-Mowafy (1994)). Deshalb ist im Hinblick auf eine hochgenaue direkte Bestimmung der vollständigen äußeren Orientierung das GPS System mit zusätzlichen Sensoren (z.B. Inertialnavigationssystemen (INS)) zu kombinieren. Das hohe Potential derartiger integrierter Systeme ist bereits vielfach in der Literatur nachgewiesen (z. B. Schwarz et al. (1993), Škaloud et al. (1996)).

2. Bildflugnavigation mit GPS

Wie bereits erwähnt, wird für die Bildflugnavigation mit GPS eine kontinuierliche Positionsbestimmung in Echtzeit angestrebt. Die geforderte Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt dabei unmittelbar vom resultierenden Bildmaßstab ab. Einer Faustregel folgend sollte der GPS Positionierungsfehler den Betrag

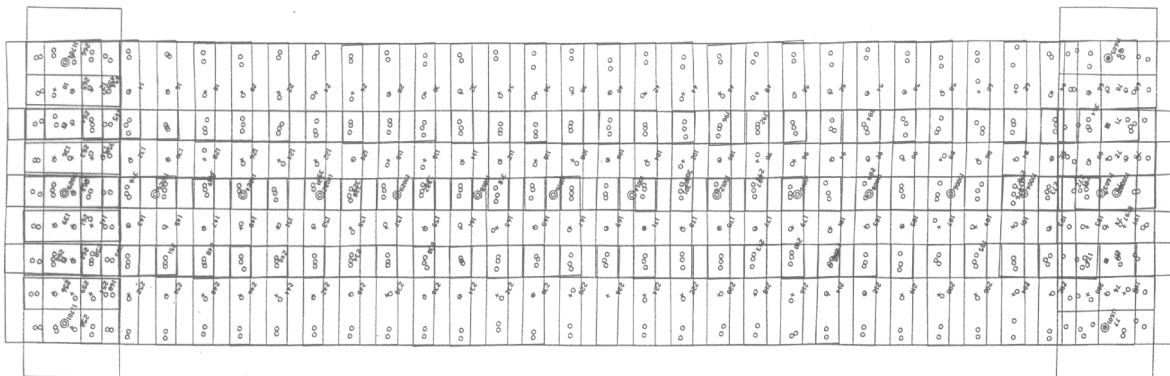


Abbildung 1, GPS kontrollierter Bildverband

von 5 mm im Bild nicht überschreiten. Demnach ist für Bildmaßstabbereiche von 1:6000 und kleiner die Genauigkeit der C/A-Code Pseudorange Navigationslösung von ca. 30-50 m ausreichend. Nur bei großmaßstäbigen Anwendungen mit höheren Positionierungsgenauigkeiten ist die differentielle Pseudorange Positionierung notwendig. In diesem Fall müssen die Messungen des Referenzempfängers am Boden über Funk zum Flugzeug übertragen werden.

Während der Befliegung bekommt der Pilot über eine eigene Anzeige fortwährend die aktuelle Abweichung seiner Position vom vorher festgelegten Sollflugplan angezeigt und kann entsprechend seinen Kurs korrigieren. Die Luftbildkamera wird automatisch ausgelöst, entweder gezielt an den in der Bildflugplanung vorausberechneten Aufnahmeorten (sog. "pin point photogrammetry"), oder in Serie entsprechend der gewählten Längsüberdeckung. Ein Beispiel für einen mittels GPS kontrollierter Bildflugnavigation aufgenommenen Bildverband zeigt Abbildung 1. Die Flugstreifen entsprechen in ihrer Lage der Planung, es treten keine Lücken im Bildverband auf, die vorgegebenen Überdeckungen in Längs- und Querrichtung werden eingehalten. Die Stereomodellbereiche der benachbarten Streifen schließen direkt aneinander an, was vorteilhaft für die spätere Auswertung der Luftbilder ist (Punktübertragung).

Eine solche GPS kontrollierte Bildflugnavigation ist heute Standard in der Bildflugdurchführung.

3. Hochgenaue Kamerapositionierung für die Aerotriangulation

Die Einbeziehung direkt gemessener Projektionszentrumskoordinaten in die Aerotriangulation erlaubt durch die signifikante Einsparung von Paßpunktinformationen am Boden eine wesentliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Auswerteprozesses. Deshalb ist die hochgenaue Positionsbestimmung des Projektionszentrums der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt derzeit von besonderem Interesse.

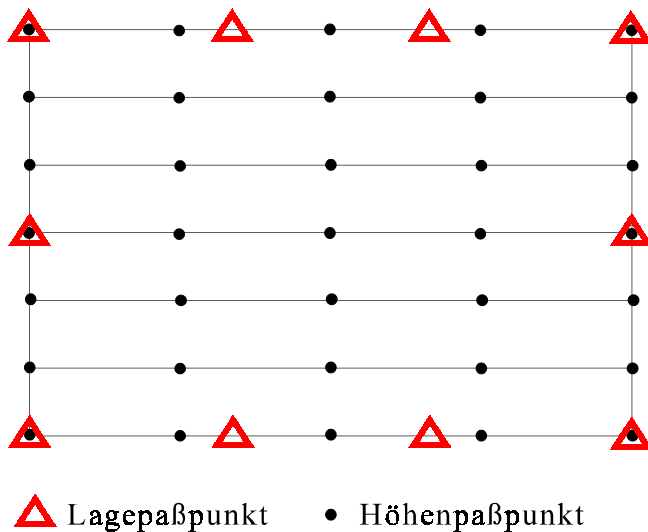


Abbildung 2, Schematische Paßpunktanordnung für eine konventionelle Blockausgleichung

Im Verfahren der klassischen Aerotriangulation wird über die Kollinearitätsgleichung der Zusammenhang zwischen Gelände- und Bildkoordinaten hergestellt. Dabei werden die Bildkoordinaten von bekannten Paßpunkten und Neupunkten beobachtet. Die benachbarten Bilder werden durch Messung homologer Punkte verknüpft und über diese Beobachtungen die unbekannt Parameter der äußeren Orientierung der Bilder (Position und Lagewinkel) berechnet (indirekte Bestimmung der äußeren Orientierung).

Die Anzahl und die Lage der Paßpunkte legen dabei in erster Linie die erreichbare Genauigkeit der Aerotriangulation fest. Eine schematische Paßpunktanordnung für eine konventionelle Blockausgleichung ist in Abbildung 2 gegeben.

Obwohl dieses Verfahren die methodischen Anforderungen erfüllt, ist es wegen des hohen manuellen Aufwandes bei der Bestimmung der Paßpunkte und Auswertung der Daten sehr zeit- und kostenintensiv. Daher hat es schon sehr früh verschiedene Ansätze gegeben, unter Einbeziehung von Hilfsdaten die notwendigen Paßpunktinformationen am Boden zu reduzieren. Der Erfolg war aber mit Ausnahme der APR- und Statoskop Anwendungen aufgrund hoher Kosten und mangelnder Genauigkeiten sehr eingeschränkt. Erst die Verfügbarkeit des GPS

liefert durch die direkte Positionsbestimmung der Kameraprojektionszentren mit hoher Genauigkeit die Möglichkeit der drastischen Paßpunktreduktion. Dazu müssen die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasenmessung richtig restauriert, und anschließend die räumliche und zeitliche Exzentrizität zwischen Kameraprojektionszentrum und GPS Messung entsprechend berücksichtigt werden.

3.1 Näherungsweise Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten

Für die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten - *das* zentrale Problem der Trägerphasenauswertung - sind verschiedene Methoden möglich. Bei den ersten GPS Anwendungen im Rahmen von photogrammetrischen Befliegungen wurde vor dem Start der Befliegung eine statische Basislinienbeobachtung zwischen Flugzeugempfänger und Referenzempfänger am Boden durchgeführt. In dieser Initialisierungsphase konnten dann die Mehrdeutigkeiten mit den zur Verfügung stehenden herkömmlichen Algorithmen sicher bestimmt werden. Während der anschließenden Befliegung wurde dann versucht, die gefundenen Mehrdeutigkeiten beizubehalten, d.h. den Flug möglichst ohne Signalabrisse und Cycle Slips durchzuführen. Allerdings lassen sich trotz aller Vorsicht Signalabrisse nicht gänzlich ausschließen, so daß u.U. keine kontinuierliche GPS Bahn mehr prozessierbar ist. Um dennoch für den vollständigen Flugweg GPS Positionen berechnen zu können, müssen nach Signalabrissen die Mehrdeutigkeiten neu gefunden werden. Damit kann dann aber auch auf die Initialisierungsphase zu Beginn des Fluges ganz verzichtet werden.

Ausgehend von einer C/A-Code Positionslösung werden die Mehrdeutigkeiten näherungsweise neu bestimmt. Diese Lösung stimmt in der Regel nicht mit der exakten Lösung überein - die daraus berechneten GPS Positionen sind demnach verfälscht. Die Fehler sind jedoch systematisch und lassen sich in erster Näherung in Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation (PDOP), der Basislinienlänge (bis 500 km) und des Zeitintervalls (bis 20 Minuten) mit einem Offset und einer linearen Drift approximieren. Die GPS Koordinaten können daher zunächst akzeptiert und im Rahmen der anschließenden Blockausgleichung über die Schätzung von zusätzlichen Parametern für Offset (a_0, b_0, c_0) und Drift (a_1, b_1, c_1) korrigiert werden. Das entsprechend erweiterte mathematische Modell der Blockausgleichung (sog. GPS gestützte Aerotriangulation) ist in Gleichung 1 gegeben (Frieß (1990), Ackermann & Schade (1993)). Mit x_{ij}, y_{ij} werden die Bildpunktkoordinaten, mit X_i, Y_i, Z_i die Geländekoordinaten, mit X_i^0, Y_i^0, Z_i^0 die Koordinaten des Projektionszentrums, und mit a_{ij} die Elemente der

$$\begin{aligned}
x_{ij} + v_{x_{ij}} &= \frac{a_{11}^j(X_i - X_0^j) + a_{12}^j(Y_i - Y_0^j) + a_{13}^j(Z_i - Z_0^j)}{a_{31}^j(X_i - X_0^j) + a_{32}^j(Y_i - Y_0^j) + a_{33}^j(Z_i - Z_0^j)} \\
y_{ij} + v_{y_{ij}} &= \frac{a_{21}^j(X_i - X_0^j) + a_{22}^j(Y_i - Y_0^j) + a_{23}^j(Z_i - Z_0^j)}{a_{31}^j(X_i - X_0^j) + a_{32}^j(Y_i - Y_0^j) + a_{33}^j(Z_i - Z_0^j)}
\end{aligned}
\tag{1}$$

$$\begin{aligned}
X_j^{GPS} + v_{X_j^{GPS}} &= X_0^j + (a_0 + a_1 t_j)_k & i = \text{Geländepunktindex} \\
Y_j^{GPS} + v_{Y_j^{GPS}} &= Y_0^j + (b_0 + b_1 t_j)_k & j = \text{Bildindex} \\
Z_j^{GPS} + v_{Z_j^{GPS}} &= Z_0^j + (c_0 + c_1 t_j)_k & k = \text{Streifenindex}
\end{aligned}$$

Rotationsmatrix bezeichnet. Die GPS Positionen werden so als zusätzliche Beobachtungen für das Projektionszentrum mit in den Ausgleichungsprozeß einbezogen. Entsprechend der Gleichung können die Korrekturterme für jeden photogrammetrischen Streifen neu angesetzt werden.

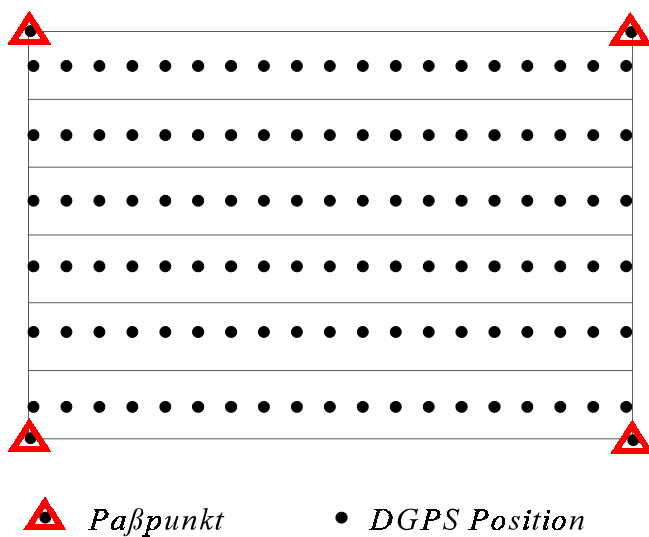


Abbildung 3, Schematische Paßpunktanforderungen für einen GPS gestützten Bildverband

Die gemessenen GPS Positionen der Kameraprojektionszentren übernehmen somit die Rolle der herkömmlichen Paßpunkte, d.h. sie wirken wie ein dichtes Paßpunktfeld und bestimmen die Absolutgenauigkeit der Blöcke durch die Kontrolle der Fehlerfortpflanzung. Die verbleibende Paßpunktinformation im Gelände kann wie in Abbildung 3 dargestellt auf ein Mindestmaß reduziert werden. Sie dient dann nur noch zur Datumstransformation bzw. zur Kontrolle der Auswertung.

Der Ansatz der GPS gestützten Aerotriangulation beseitigt die linearen systematischen Fehler der GPS Positionierung und erlaubt die gemeinsame robuste Ausgleichung aller Beobachtungen inklusive einer konventionellen Selbst-

kalibrierung zur Beseitigung von systematischen Restfehlern in den Bilddaten. Allerdings kann die Blockausgleichung durch die zusätzliche Bestimmung der linearen Korrekturterme schwach bestimmt oder sogar singulär sein. Daher müssen zur Abhilfe am Streifenanfang bzw. -ende Höhenpaßpunktketten vorgesehen werden. Damit ist die notwendige Anzahl der Geländepaßpunktinformationen wieder zu erhöhen. Alternativ können zusätzliche GPS gestützte Querstreifen am Blockanfang und -ende wie in Abbildung 1 bereits angedeutet geflogen werden.

3.2 OTF Algorithmen zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten

Der zusätzliche Flug- oder Paßpunktaufwand kann umgangen werden, verwendet man die in neuerer Zeit entwickelten schnellen Verfahren zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten (sog. OTF Algorithmen). Diese rechentechnischen Verfahren erlauben die vollständige Berechnung einer absoluten Flugbahn auch nach Signalabrissen, d.h. die Mehrdeutigkeiten werden während der Bewegung des Empfängers zahlenmäßig richtig neu bestimmt (z.B. Hatch (1990), Landau & Euler (1992), Han & Rizos (1997)). Die berechneten Positionen sind somit im Idealfall durch keine Offset- bzw. Driftfehler mehr verfälscht, die Bahn ist absolut gesehen richtig restauriert. Die ersten erfolgreichen Anwendungen dieser Algorithmen sind bereits durchgeführt und in der Literatur dokumentiert (z.B. Tiberius et al. (1997)).

Die Zuverlässigkeit dieser Algorithmen in Abhängigkeit von der Länge der Basislinie zwischen bewegtem Empfänger im Flugzeug und Referenzstation am Boden ist allerdings noch unklar. Bei kurzen Basislinien im Bereich von 30-50 km kann in der Regel mit guten Ergebnissen gerechnet werden; inwieweit dieses aber auch für die in der Photogrammetrie üblichen Basislinienlängen von u.U. mehreren 100 km und unter photogrammetrischen Flugbedingungen gültig ist, bleibt fraglich.

Daher ist es das Ziel einer von der "Europäischen Organisation für Experimentelle Photogrammetrische Forschung (OEEPE)" durchgeführten Testreihe, die Qualität und die Zuverlässigkeit der in verschiedenen kommerziellen Softwarepaketen implementierten OTF Algorithmen unter operationellen Bedingungen als Funktion der Basislinienlänge zu analysieren. Im Rahmen dieser Untersuchungen sind über zwei photogrammetrischen Testgebieten (Testgebiet Vaihingen/Enz bei Stuttgart, Testgebiet Frederikstad bei Ås, Norwegen) mehrere

Flugstreifen geflogen worden. Neben der Datenaufzeichnung im Flugzeug (C/A-Code, L1/L2-Phase) wurden gleichzeitig von bis zu 15 Referenzempfängern in unterschiedlicher Entfernung die GPS Daten registriert. Parallel dazu wurden während der Streifenflüge mit einer Luftbildkamera Bilder aufgenommen, so daß in einer konventionellen Blockausgleichung zu den Belichtungszeitpunkten Referenzwerte für die Kameraprojektionszentrumskordinaten berechnet werden können. An diesen diskreten Punkten können dann die Abweichungen zwischen den aus der Aerotriangulation gewonnenen Kamerastandpunkten und den in der OTF Prozessierung entsprechend bestimmten Positionen ermittelt werden. Diese Abweichungen erlauben eine Aussage über die externe Genauigkeit der GPS Positionierung. Zusätzlich geben die internen Vergleiche der verschiedenen Flugbahnen, von unterschiedlichen Referenzempfängern gerechnet, ein Maß für die innere Übereinstimmung der Lösungen an.

Während der Befliegung des Testgebiets Vaihingen/Enz am 26. Juli 1995 sind insgesamt 11 Flugstreifen mit 67 Luftbildern aufgenommen worden. Die GPS Referenzdaten wurden auf 5 verschiedenen Referenzstationen in bis zu 386 km Entfernung vom Testgebiet aufgezeichnet. Die Berechnung der Flugbahn aus den verschiedenen GPS Daten wurde mit zwei Standard Softwarepaketen vorgenommen: Das Programm GPSurvey 2.0 der Firma Trimble (nachfolgend mit Software SW 1 bezeichnet) bzw. die Geotracer 3.0 Software der Firma Geotronics (nachfolgend SW 2). Auf die detaillierten Testbedingungen kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden, dazu sei auf Ackermann (1996) und Schiele (1997) verwiesen.

Mit der SW 1 werden bei allen Basislinien sämtliche auftretende Signalabrisse überbrückt; somit liegen durchgehende Flugtrajektorien vor. Die SW 2 hat über die längeren Basislinien Schwierigkeiten bei der Positionierung, weshalb in diesen Fällen nur Teilsegmente der Flugbahn restauriert werden können. Vergleicht man die interne Übereinstimmung der verschiedenen Flugbahnen gerechnet von den einzelnen Referenzstationen, so lassen sich mit SW 1 über große Bereiche Übereinstimmungen der Lösungen feststellen. Die mit SW 2 erzielten Ergebnisse zeigen für diejenigen Segmente der Basislinien >100 km, in denen eine Positionierung durchgeführt werden konnte, große Abweichungen im Bereich einiger dm und mehr. Offensichtlich ist SW 2 nicht in der Lage über diese Entfernungen die Mehrdeutigkeiten zuverlässig zu bestimmen und eine zuverlässige Positionierung durchzuführen. Aber auch in den mit SW 1 berechneten Trajektorien treten Unterschiede zwischen den einzelnen Lösungen auf. Deutliche Offsets bis zu einigen dm zeigen sich vor allem in Bereichen

kurzer Bahnsegmente während der Kurvenflüge aber auch während der photogrammetrischen Streifenflüge. Im einzelnen treten diese für die 22 km Basis während der ersten 4 Flugstreifen, für die 106 km Basis während des 6. Streifens und für die 130 km Basis im 4. Flugstreifen auf. Offensichtlich stehen der Software SW 1 nicht genügend Beobachtungen zur Verfügung, um die Mehrdeutigkeiten zuverlässig zu schätzen.

Die Offsets während der Bildstreifen treten auch in den Genauigkeitsvergleichen mit den Referenzpositionen der Projektionszentren aus der Aerotriangulation voll zu Tage. Die Tabelle 1 zeigt daher die mittleren Abweichungen der GPS Positionen von den photogrammetrischen Referenzwerten bezogen auf den gesamten photogrammetrischen Block in Abhängigkeit von der Basislinienlänge und der verwendeten Software. Die Horizontalabweichungen sind in einem flugzeugbezogenen Koordinatensystem in Flugrichtung und quer dazu angegeben. Da von den drei weiter entfernten Referenzstationen nicht für die gesamte photogrammetrische Blockbefliegung GPS Daten erfaßt wurden, sind für die 106 km Basis die Vergleiche nur für 6 (entsprechend 32 diskrete Punkte), für die 130 km Basis nur für 10 (60 Punkte) und für die 386 km Basis nur für 9 (53 Punkte) von insgesamt 11 Flugstreifen möglich. Die Vergleiche sind für SW 2 nur für die beiden kurzen Basislinien durchgeführt, da für die längeren Basislinien die Flugbahnpositionierung schon durch die internen Vergleiche als falsch erkannt werden konnte. Die geklammerten Werte der SW 1 Lösung ergeben sich, wenn die ebenfalls in den internen Genauigkeitsvergleichen als fehlerhaft erkannten Flugstreifen von den externen Genauigkeitsbetrachtungen ausgeschlossen werden.

Basislänge [km]		0	22	106	130	386
Längs [cm]	SW1	11.7	12.5 (9.2)	-2.7 (10.5)	14.6 (9.6)	13.8
	SW2	7.6	8.1	-	-	-
Quer [cm]	SW1	25.3	25.0 (27.6)	52.4 (26.3)	25.0 (28.9)	26.6
	SW2	25.8	25.9	-	-	-
Vertikal [cm]	SW1	-48.2	-27.0 (-44.2)	-22.8 (-58.2)	-42.2 (-48.8)	-25.1
	SW2	-50.9	-45.5	-	-	-

Tabelle 1, Mittlere Positionsdifferenzen für den gesamten Bildverband in Abhängigkeit von Basislänge und Software (Flugzeugempfänger #1)

Die Zahlen der Tabelle 1 lassen sich wie folgt kurz interpretieren: Die mit SW 1 erzielten Resultate zeigen nach der Berücksichtigung der 6 fehlerhaften Streifen eine hohe Konsistenz und sind praktisch entfernungsunabhängig. Gleiches gilt für die Ergebnisse von SW 2 für die beiden kurzen Basislinien. Es zeigen sich jedoch signifikante Offsets zwischen den Kameraprojektionszentren und den GPS Positionen, die aber relativ konstant sind. Sie betragen im einzelnen für die Längskoordinate 10.1 cm ($\sigma = 2.0$ cm (RMS)), für die Querkordinate 26.6 cm ($\sigma = 1.3$ cm (RMS)) und für die Vertikalkomponente -45.8 cm ($\sigma = 10.9$ cm (RMS)).

Die Ergebnisse beweisen das hohe Potential der OTF Algorithmen, die eine vollständige Restaurierung der gesamten Flugbahn mit hoher absoluter Genauigkeit auch über längere Basislinien erlauben. Allerdings zeigt der angeführte Vergleich zwischen den GPS Positionen und dem photogrammetrischen Kamerasystem auch, daß die Ergebnisse von der Wahl der Software und der jeweiligen Aufnahmesituation abhängig sind. Die Resultate einer OTF Lösung müssen demnach unbedingt für jeden Einzelfall auf ihre Zuverlässigkeit hin überprüft werden. Das obige Beispiel zeigt einerseits, daß es auch bei relativ kurzen Basislinien durch falsch bestimmte Mehrdeutigkeiten zu systematisch verfälschten GPS Positionen kommen kann. Andererseits können selbst bei richtig gelösten Mehrdeutigkeiten noch konstante oder systematische Fehler in der Positionsbestimmung auftreten. Diese werden z.B. durch eine unzureichende Kalibrierung des Aufnahmesystems verursacht.

Können die Systematiken ausgeschlossen werden, so ist es im Prinzip möglich, eine Aerotriangulation ganz ohne Paßpunkte durchzuführen. Aufgrund der photogrammetrischen Verknüpfungspunkte sind sämtliche Bilder eines Bildverbandes auch in ihrer Lage vollständig orientiert, ohne daß ein Rückgriff auf Paßpunktinformationen notwendig wäre. Dieses gilt allerdings nur für vollständige Blöcke, nicht für Einzelstreifen bzw. einzelne Bildpaare (Ackermann (1997)).

Ein weiterer bisher nicht angesprochener Punkt neben dem Problem der verbleibenden systematischen Fehler, die ohne Paßpunkte nicht behoben werden können, ist die Frage der Kontrollierbarkeit und Zuverlässigkeit einer derartigen Auswertung ohne Paßpunkte. Ohne Paßpunktinformationen gibt es keinerlei Möglichkeit, eventuelle grobe Fehler zu erkennen und zu beseitigen. Die Zuverlässigkeit einer Aerotriangulation ohne Paßpunkte ist gleich null - ein Fall der bei allen Aufnahmesystemen strikt verboten ist!

4. Zusammenfassung

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, daß GPS eine nicht mehr wegzudenkende Rolle im Rahmen der Photogrammetrie eingenommen hat. Die GPS kontrollierte Bildflugnavigation ist hocheffizient und hat sich in der Praxis durchgesetzt. Das Verfahren der GPS gestützten Aerotriangulation mit zusätzlichen Drift Parametern ist sehr robust und zuverlässig, erlaubt die Reduktion auf einen minimalen Paßpunktaufwand, besitzt einen großen Wirkungsradius und hat sich in den letzten Jahren bewährt. Allerdings entsteht ein zusätzlicher Mehraufwand durch die Querstreifen, die benötigt werden, um die Stabilität der Bündelblöcke zu gewährleisten. Daher ist die OTF Mehrdeutigkeitslösung anzustreben, um den notwendigen Flugaufwand zu minimieren. Die hohe Genauigkeit dieser Algorithmen ist bestätigt, allerdings gibt es momentan noch Probleme. Wenige Paßpunkte sind dennoch vorzusehen, um konstante Fehler im Rahmen einer Datumstransformation zu beseitigen und die Auswertung kontrollieren zu können.

Vom heutigen Standpunkt aus sollte man, da die OTF Algorithmen vor allem über längere Basislinien noch nicht zuverlässig genug arbeiten, sicherheits- halber Querstreifen fliegen, diese aber nur falls erforderlich auswerten. Allgemein sind die hohen Genauigkeitsanforderungen in der Praxis erfüllt, die drastische Paßpunktreduktion ist bestätigt und die Wirtschaftlichkeit ist in fast allen Fällen gegeben.

Die GPS gestützte Aerotriangulation sollte daher in Zukunft *das* Standard- verfahren der photogrammetrischen Bildtriangulation sein!

Literatur

- Ackermann, F. und H. Schade (1993): Application of GPS for Aerial Triangulation, *PE & RS - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 59, Nr. 11, S. 1625-1632, 1993.
- Ackermann, F. (1996): Experimental Tests on Fast Ambiguity Solutions for Airborne Kinematic GPS Positioning, Proc. of the International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS, Vol. XXXI/B6, S. S1-S6, Wien, Österreich, Juli 1996.

- Ackermann, F. (1997): Geo-Kodierung ohne Paßpunkte, *GIS - Journal for Spatial Information and Decision Making*, Vol. 10, S. 28-32, April 1997.
- El-Mowafy, A. (1994): Kinematic Attitude Determination from GPS, Report No. 20074, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada, 1994.
- Frieß, P. (1990): Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR/Global Positioning System. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 359, München, 1990.
- Han, S. und C. Rizos (1997): Comparing GPS Ambiguity Resolution Techniques, *GPS World*, Vol. 8, Nr. 10, Oktober 1997.
- Hatch, R. (1990): Instantaneous Ambiguity Resolution, International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation - KIS90, S. 299-308, Banff, Canada, Springer Verlag, 1990.
- Landau, H. und H.-J. Euler (1992): On-the-Fly Ambiguity Resolution for Precise Differential Positioning, Proc. of the ION GPS-92, The Institute of Navigation, S. 607-613, Alexandria, USA, 1992.
- Schade, H., E. Cannon und G. Lachapelle (1993): An Accuracy Analysis of Airborne Kinematic Attitude Determination with the NAVSTAR/Global Positioning System, *Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation (SPN)*, Nr. 3/93, S. 90-95, 1993.
- Schade, H. und M. Cramer (1994): Airborne Kinematic Attitude Determination with GPS for Photogrammetry and Remote Sensing, Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation - KIS94, S. 315-322, Banff, Canada, 1994.
- Schiele, O. (1997): Genauigkeitsuntersuchung zur kinematischen GPS Positionierung in der Luftbildphotogrammetrie, Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, unveröffentlicht, 1997.
- Schwarz, K.P., M.A. Chapman, M.E. Cannon und P. Gong (1993): An Integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data, *PE & RS - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 59, Nr. 11, S. 1667-1674, 1993.
- Škaloud, J., M. Cramer und K.P. Schwarz (1996): Exterior Orientation without Ground Control, Proc. of the International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS, Commission III, S. 125-130, Wien, Österreich, Juli 1996.
- Tiberius, C., P. Teunissen und P. de Jonge (1997): Kinematic GPS: Performance and Quality Control, International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation - KIS97, S. 289-300, Banff, Canada, Juni 1997.