

Sensorintegration GPS und INS

Michael Cramer
Institut für Photogrammetrie (ifp)
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Str. 24D
70174 Stuttgart
Tel: 0711-121 4118, Fax: 0711-121-3297
Email: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Die Kombination von GPS und INS-Sensoren zu integrierten Systemen erlaubt es die vollständige äußere Orientierung eines Sensors zum Zeitpunkt der Datenaufzeichnung direkt zu bestimmen. Daher finden integrierte GPS/INS-Systeme zur direkten Orientierungsbestimmung zunehmende Verbreitung im Bereich der Fernerkundung, zur Orientierung von neuen digitalen Kamerasystemen, aber auch in klassischen photogrammetrischen Anwendungen mit analogen Luftbildkameras.

Im Rahmen dieses Papers liegt der Schwerpunkt auf der direkten Orientierungsbestimmung für photogrammetrische Anwendungen. Im ersten Teil soll zunächst allgemein auf die jeweiligen Genauigkeitsanforderungen und den Prozess der Georeferenzierung von Bilddaten eingegangen werden. Anschließend werden die Grundprinzipien der GPS/INS-Integration erläutert. Das hohe Genauigkeitspotential, über das kommerziell verfügbare integrierte GPS/INS-Systeme bereits heute verfügen, wird im zweiten Teil exemplarisch anhand einer Testbefliegung verifiziert. Bei dem untersuchten GPS/INS-System handelt es sich um ein „high-end“ GPS/INS-System der Firma Applanix, Canada. Die erreichten Genauigkeiten definieren demnach die obere Schranke der momentan zu erzielenden Genauigkeiten für die direkte Messung der Orientierungselemente im Rahmen von post-processing Anwendungen.

1. Einleitung

Die Erfassung geometrischer und radiometrischer Informationen des Objektraums ist Hauptaufgabe der Fernerkundung. Dazu ist es notwendig den Raumbezug zwischen den aufgezeichneten Daten (z.B. Bilder) und dem Objekt in der Realität wiederherzustellen. Es muss eine geeignete Transformation gefunden werden, welche die Daten aus dem sensorspezifischen Koordinatensystem, in dem sie erfasst wurden, in das gewünschte übergeordnete Objektkoordinatensystem überführt: Die Daten sind zu georeferenzieren, zu geokodieren, bzw. die äußere Orientierung der Daten (Position und Lage des Sensors zum Zeitpunkt der Aufnahme) muss bestimmt werden. Im Rahmen der Georeferenzierung wird bei abbildenden Sensoren (z.B. analoge oder digitale Kamerasysteme) das Aufnahmestrahlenbündel in Bezug zum Objektkoordinatensystem gesetzt und die Position und Lage des Sensors zum Zeitpunkt der Datenaufzeichnung bestimmt. Die Georeferenzierung ist demnach für viele Anwendungen ein, wenn nicht sogar *der* grundlegende Verarbeitungsschritt bei der Prozessierung von Bild- oder allgemeiner Fernerkundungsdaten. Je nach Anwendungsgebiet ergeben sich unterschiedliche Anforderungen sowohl an die Genauigkeit als auch an die zeitliche Verfügbarkeit der Orientierungen in Echtzeit- oder im Post-Processing.

Die entsprechenden Genauigkeitsanforderungen für die verschiedenen Anwendungen lassen sich z.B. nach Skaloud et al. (1996) und Schwarz et al. (1994) in verschiedene Klassen zusammenfassen. Je nach gewünschter Objektraumgenauigkeit muss der Abbildungsstrahl im

Rahmen der Auswertung auch entsprechend genau rekonstruiert werden. So gelten für großmaßstäbige Anwendungen z.B. im Bereich der Luftbildphotogrammetrie sehr hohe Anforderungen mit Positionierungsgenauigkeiten bezogen auf das Geländekoordinatensystem $<0.1\text{m}$. Für große Bildmaßstäbe (z.B. $m_b=5000$) ergeben sich daher typische Genauigkeitsanforderungen für die äußere Orientierung im Bereich von 5-10cm für die Position und 10-20" für die Lagebestimmung des Sensors. Die Genauigkeitsanforderungen für kartographische Anwendungen ergeben sich in Abhängigkeit vom gewünschten Kartierungsmaßstab. Entsprechend ist für Anwendungen im Bereich der Landnutzungsklassifikation oder der Umweltüberwachung eine pixelgenaue Georeferenzierung zu gewährleisten und die geforderte Genauigkeit wird demnach durch die Bodenauflösung des Sensors festgelegt. Die Genauigkeitsanforderungen sind nicht so hoch und liegen je nach Anwendung im Bereich von 2-5m für die Positionsbestimmung. Die Neigungen sollten auf maximal 2-5' bekannt sein. Die jeweiligen Anforderungen bezüglich der Positionierungs- und Neigungsgenauigkeit sind ausschlaggebend für die Wahl der Sensorkomponenten des Orientierungsmoduls bzw. der Auswertestrategien, die für die direkte Orientierungsbestimmung verwendet werden sollen.

2. Georeferenzierung von Bilddaten

Georeferenzierung ist ein alternativer Begriff für den in der Photogrammetrie bekannten Prozess der Wiederherstellung der äußeren Orientierung von Luftbildern, d.h. der Bestimmung der Position (X_0, Y_0, Z_0) und der Orientierung eines Luftbildes (ω, φ, κ) zum Zeitpunkt der Aufnahme. Je nach Ansatz wird diese Georeferenzierung indirekt oder direkt realisiert.

2.1 Indirekter Ansatz

Klassischerweise wird die äußere Orientierung eines abbildenden Sensors indirekt bestimmt: Mittels gegebener Passpunktinformationen am Boden können die 6 unbekanntes Orientierungsparameter für jedes Bild bestimmt werden. Im Einzelbildfall geschieht dieses im Rahmen eines räumlichen Rückwärtsschnitts. Bei der Auswertung von Bildverbänden wird der Rückwärtsschnitt zur Aerotriangulation (AT) verallgemeinert. Benachbarte Bilder werden durch die Messung homologer Punkte miteinander verknüpft und durch das Einführen von Objektrauminformationen kann schließlich der Rangdefekt der Ausgleichung überwunden und die äußere Orientierung berechnet werden. Diese Methode, die sechs Parameter der äußeren Orientierung der Bilder nicht direkt zu messen sondern indirekt über Bildkoordinaten und Passpunktinformationen rechnerisch zu bestimmen wird auch als „Inverse Photogrammetrie“ bezeichnet. Simultan zu den Orientierungselementen werden im Rahmen der Blockausgleichung die Koordinaten der Neupunkte und ggf. zusätzliche Kalibrierungsparameter bestimmt.

Geht man, wie in der klassischen Photogrammetrie üblich, von einer zentralperspektivischen Abbildungsvorschrift zwischen Bild und Objekt aus, so findet man in Beziehung 1 die Transformation, welche den Bezug zwischen den Bildkoordinaten $x', y', -c$ im Bildkoordinatensystem p und den korrespondierenden Objektraumkoordinaten X, Y, Z im übergeordneten Objektkoordinatensystem m angibt. Aus der Gleichung kann durch Umformungen die bekannten Kollinearitätsgleichung gewonnen werden (z.B. Krauss (1990)).

gewünschte Projektionszentrum des abbildenden Sensors und die Achsausrichtung des Bildkoordinatensystems. Die entsprechende Sensorkonfiguration ist in der Abbildung 1 skizziert. Demnach sind sowohl GPS- und INS-Sensor räumlich gegenüber der Kamera verschoben. Daher müssen zwei konstante Korrekturterme $(\Delta X_{Kam}, \Delta Y_{Kam}, \Delta Z_{Kam})^T$ bzw. $(\Delta X_{GPS}, \Delta Y_{GPS}, \Delta Z_{GPS})^T$ berücksichtigt werden um die berechnete GPS/INS-Position auf das Kameraprojektionszentrum zu reduzieren. Diese Verschiebungen sind für jede Installation der Sensoren in einem Fahrzeug zu bestimmen. Sie bleiben konstant, sofern an der Gesamtsystemkonfiguration keine Veränderungen vorgenommen werden.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_m = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_m + R_b^m(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \left(\lambda R_p^b(\delta\omega, \delta\varphi, \delta\kappa) \begin{pmatrix} (x' - x'_0) \\ (y' - y'_0) \\ -c \end{pmatrix}_p + \begin{pmatrix} \Delta X_{Kam} \\ \Delta Y_{Kam} \\ \Delta Z_{Kam} \end{pmatrix}_b - \begin{pmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{pmatrix}_b \right) \quad (2)$$

Gleichermaßen muss Gleichung 1 durch eine Rotationsmatrix R_p^b um kleine Drehwinkel $\delta\omega, \delta\varphi, \delta\kappa$ erweitert werden, welche die Verdrehung des INS-Körperkoordinatensystems b gegenüber dem Bildkoordinatensystem p beschreibt. Diese Rotation wird notwendig, da es physikalisch nicht möglich ist die Sensorachsen des INS exakt mit den Bildkoordinatenachsen des abbildenden Sensors zur Deckung zu bringen. Weil sich die gemessenen Orientierungswinkel zunächst auf die INS-Achsausrichtungen beziehen, müssen diese Korrekturwinkel angebracht werden um den Bezug zum Bildkoordinatensystem herzustellen. Wie bei den translatorischen Offsets zwischen GPS, INS und Kamera bleiben diese Drehwinkel konstant, sofern sich die Systemkonfiguration nicht ändert. Da sowohl die physikalischen Sensorachsen des INS und der Kamera nicht unmittelbar beobachtet werden können, muss die Größe der Fehlausrichtung Kamera - INS während der Befliegung im Rahmen einer Kalibrierung bestimmt werden (z.B. durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt für den Einbildfall).

3. GPS/INS-Integration

In einem integrierten GPS/INS-System werden zwei auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhende Systeme miteinander kombiniert. Während GPS auf Streckenmessungen durch Laufzeitmessung von Signalen zu Satelliten basiert, werden von einem INS relativ zu einem Inertialsystem gemessene Drehraten und Linearbeschleunigungen geliefert. Ausgehend von einer bekannten Anfangsinitialisierung (Position, Geschwindigkeit, Neigung zum Startzeitpunkt) können aus den Messungen durch einen Integrationsprozess die aktuelle Position, Geschwindigkeit und Neigung bestimmt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Messverfahren verfügen GPS und INS auch über unterschiedliche Fehlercharakteristika. GPS-Messungen liefern im wesentlichen Positions- und Geschwindigkeitsinformationen, die über eine hohe Langzeitstabilität verfügen, über kurze Zeiträume aber ein hohes Messrauschen aufweisen. INS-Systeme liefern Positions-, Geschwindigkeits- und Neigungsinformationen mit einer hohen kurzzeitigen Genauigkeit und einer hohen Datenrate. Die Systemgenauigkeit bleibt aber nicht konstant, sondern verschlechtert sich durch die fortlaufende Integration der Messungen in Abhängigkeit von der Qualität der verwendeten Sensorkomponenten. INS werden daher nach dem jeweiligen Navigationsfehler nach einer Stunde ungestützter Navigation in verschiedene Genauigkeitskategorien eingestuft (z.B. Schwarz (1995)). Die systemspezifischen Fehler können nur durch externe Beobachtungen kontrolliert werden. In der klassischen Inertialvermessung werden folgende zwei Methoden zur Kontrolle des INS-Fehlerhaushalts verwendet:

- Geschwindigkeitsbeobachtungen: Durch den Vergleich der vom INS berechneten Geschwindigkeit mit einer Referenzgeschwindigkeit kann der Geschwindigkeitsfehler bestimmt werden. Im einfachsten Fall lässt sich dieser Geschwindigkeitsabgleich während statischer Messperioden durchführen, da dann die Referenzgeschwindigkeit den Wert 0 annimmt (sog. Nullgeschwindigkeitsupdates, „zero velocity update point (ZUPT)“).
- Koordinatenbeobachtungen: Durch den Vergleich mit unabhängig bestimmten Koordinaten von Referenzpunkten kann der Positionsfehler des INS bestimmt werden (sog. Koordinatenupdate, „coordinate update point (CUPT)“). Im einfachsten Fall wird das INS dazu über einem koordinatenmäßig bekannten Punkt angehalten und die Positionsdifferenz ermittelt. Gleichzeitig kann ein ZUPT durchgeführt werden.

In hochdynamischen Umgebungen z.B. während eines photogrammetrischen Bildflugs stehen die genannten Methoden zur Stützung des INS nicht zur Verfügung. Die erforderlichen Informationen müssen daher aus anderen, unabhängigen Messsystemen gewonnen werden, die es erlauben, während der Fahrzeugbewegung Referenzmessungen z.B. für Geschwindigkeit und Position mit hoher Absolutgenauigkeit zu gewinnen. Das GPS-System verfügt über dieses Potential und ist deshalb mittlerweile ein bevorzugter Sensor für die Stützung und Integration mit INS geworden.

Die mathematische Integration der GPS/INS-Messungen geschieht vielfach im Rahmen eines Kalman-Filters. Der Kalman-Filter erlaubt die optimale Schätzung der in einem Zustandsvektor gruppierten Systemfehler. Der Zustandsvektor beinhaltet die Navigationsfehler (Fehler in der Positions-, Geschwindigkeits-, Neigungsbestimmung) und Fehler der Sensorik der Messsysteme (z.B. Offset/Drift der INS-Drehratensensoren und Beschleunigungsmesser). Seit ca. 1960 hat sich die Kalman-Filterung vor allem in Navigationsanwendungen durchgesetzt. Dafür sind unter anderem folgende Gründe anzuführen (nach Brown & Hwang (1992)):

- Die Kalman-Filterung erlaubt eine Echtzeitauswertung der anfallenden Messdaten. Während der Messung können die Navigationsfehler durch Berücksichtigung von Kontrollinformationen bestimmt und verbessert werden.
- Für Navigationsanwendungen kommen vielfach multi-Sensor Systemkonfigurationen zur Anwendung, die verschiedene Ein- und Ausgangsdaten liefern (z.B. Position, Geschwindigkeit, Orientierung). Es handelt sich um multi-Ein- und Ausgabesysteme unterschiedlicher Genauigkeit, deren Informationen sich gegenseitig stützen können. Diese Informationen können in einem Kalman-Filter flexibel berücksichtigt werden.
- Die gewünschten Ausgangsgrößen sollen mit der höchsten Genauigkeit bestimmt werden, daher ist eine optimale Kombination der Eingangsgrößen in einem optimalen Filter notwendig.

Bei der Datenintegration in einem Kalman-Filter muss zwischen zentralen bzw. dezentralen Integrationsansätzen unterschieden werden (z.B. Wei & Schwarz (1990)). Beim zentralen Ansatz wird ein gemeinsamer Zustandsvektor verwendet um das Fehlerverhalten beider Systeme zu modellieren. Die unmittelbar anfallenden GPS-Messungen (Pseudorange, Phasenmessung, Doppler) und nicht erst die abgeleiteten Größen (Position, Geschwindigkeit) gehen zur Korrektur der Systemfehler in den Filter ein. Hinsichtlich der Prozessierungszeit ist dieser Ansatz empfehlenswert, selbst bei weniger als vier zur Verfügung stehende Satelliten können deren Beobachtungen zur Stützung des Gesamtsystems verwendet werden. Allerdings weist das zentrale Verfahren Nachteile bei einer späteren Erweiterung des Systems um zusätzliche Komponenten auf, da der gesamte Filter neu konzipiert werden muss um weitere Systemzustände im Zustandsvektor zu berücksichtigen. Alternativ werden in einem dezentralen Ansatz mehrere separate Filter formuliert, die parallel nebeneinander existieren und nur zu bestimmten Zeitpunkten miteinander korrespondieren. Für den Fall eines integrierten GPS/INS-Systems existieren zwei verschiedene Filter: Die GPS-Daten werden zunächst in einem eigenen lokalen Filter prozessiert, d.h. die GPS-Positionen und

Geschwindigkeiten werden optimal bestimmt. Der zweite Filter ist dann der eigentliche Haupt- oder Masterfilter, der die INS-Daten verarbeitet und die Positions-, Geschwindigkeits- und Neigungsinformationen für die Trajektorie liefert. Die aus den Rohmessungen abgeleiteten Ergebnisse des lokalen GPS-Filters gehen als „Pseudo“-Beobachtungen zur kontinuierlichen Stützung des INS in den Masterfilter ein und ermöglichen somit eine global gesehen optimale Zustandsschätzung für das Gesamtsystem. Ein dezentraler Ansatz ist vor allem im Hinblick auf die Erweiterung des GPS/INS-Systems um weitere Sensorkomponenten zu Multisensorsystemen vorteilhaft. Zusätzlich können durch die Vorprozessierung der Beobachtungen in den lokalen Unterfiltern grobe Fehler bereinigt werden, bevor diese als Stützungsinformationen in den Masterfilter eingehen.

Die prinzipielle Verfahrensweise der INS-Stützung im Rahmen eines Kalman-Filters soll an folgendem Beispiel kurz erläutert werden. Liegen zu einem bestimmten Zeitpunkt t_k Stützungsinformationen aus dem GPS vor so werden diese Informationen im Filter zur Schätzung der Fehler der INS-Bahnrechnung herangezogen. Die Eingangsgröße \underline{z}_k für den Kalman-Filter ergibt sich exemplarisch für den Fall eines GPS-Geschwindigkeitsupdates \underline{v}_{GPS} wie folgt (Gleichung 3). Sei \underline{v} die tatsächliche Geschwindigkeit, so bezeichnet $\delta\underline{v}_{GPS}$ den Fehler der GPS-Geschwindigkeit und $\delta\underline{v}_{INS}$ den Fehler der ungestützten INS-Geschwindigkeitsberechnung. Die INS-Geschwindigkeit ist aufgrund der langfristigen systematischen INS-Fehler verfälscht, das Geschwindigkeitsupdate aus dem GPS weist zufälliges Rauschen auf – die Fehler verhalten sich komplementär zueinander. Demzufolge kann durch eine geeignete Tiefpassfilterung aus der beobachteten GPS-INS-Geschwindigkeitsdifferenz \underline{z}_k eine Schätzung für den INS-Geschwindigkeitsfehler gewonnen werden. Im Rahmen der Filterung wird das zufällige Beobachtungsrauschen eliminiert. Die Glg. 3 zeigt, dass nur die Systemfehler $\delta\underline{v}_{GPS}$, $\delta\underline{v}_{INS}$ in die Filterung eingehen; die tatsächliche Geschwindigkeit \underline{v} wird durch die Differenzbildung eliminiert und bleibt unberücksichtigt. Das geschätzte Filterresultat verbessert die ungestützte INS-Bahn. Die korrigierte Bahn liegt nun mit einer Genauigkeit vor, die der absoluten Genauigkeit der verwendeten Stützungsinformationen entspricht.

$$\begin{aligned}\underline{z}_k &= \underline{v}_{GPS} - \underline{v}_{INS} \\ &= (\underline{v} + \delta\underline{v}_{GPS}) - (\underline{v} + \delta\underline{v}_{INS}) \\ &= -\delta\underline{v}_{INS} + \delta\underline{v}_{GPS}\end{aligned}\quad (3)$$

Die allgemeine Herleitung der Kalmanfiltergleichungen für zeitkontinuierliche Systeme kann der einschlägigen Literatur entnommen werden (z.B. Gelb (1974)). Für Navigationsanwendungen – die Bestimmung der äußeren Orientierung ist unter diesen Begriff zu fassen – ist der Algorithmus für den zeitdiskreten Fall von Bedeutung. Wesentliches Kriterium des Kalman-Filters ist die Filterung der Daten, d.h. die optimale Schätzung des Systemzustandes basierend auf allen bis zum aktuellen Zeitpunkt gemessenen Informationen. Der Filter greift dazu nur auf die vergangenen Messungen zurück, der aktuelle Systemzustand repräsentiert die Informationen aus den bisherigen Beobachtungen. Diese Methodik ergibt sich zwangsläufig aus der Echtzeitfähigkeit der Datenauswertung. Im Gegensatz zur Filterung stützt sich eine Glättung auf alle in dem Beobachtungsintervall von Beginn bis Ende der Messung angefallenen Messdaten (z.B. Schrick (1977)). Glättungsoperationen sind daher nicht mehr echtzeitfähig. Sie können nur im späteren Post-Processing durchgeführt werden, erlauben aber im Gegensatz zur Filterung die Einbeziehung aller Beobachtungen zur optimalen Zustandsbestimmung des Systems. Werden die im Rahmen einer Kalman-Filterung gewonnenen Zustandsgrößen einer anschließenden Glättung unterzogen, so lässt sich dadurch eine erhöhte Genauigkeit der Schätzwertbestimmung erzielen. Die Kombination einer Kalman-Filterung mit einer anschließenden Glättung ist daher vor allem im Hinblick auf die

Bestimmung der Trajektorie mit höchster Genauigkeit (z.B. für die Orientierungsbestimmung für photogrammetrische Anwendungen) notwendig.

4. Empirische Genauigkeitsuntersuchungen

Um das Genauigkeitspotential der direkten Orientierungsbestimmung für flugzeuggestützte Anwendungen zu untersuchen können integrierte GPS/INS-Systeme in Kombination mit photogrammetrischen Luftbildkameras zur Befliegung entsprechend signalisierter Testfelder eingesetzt werden. Durch die standardmäßige Auswertung der aufgenommenen Luftbilder im Rahmen einer klassischen Aerotriangulation können für die diskreten Zeitpunkte, an denen Luftbilder aufgenommen wurden, Referenzwerte für die Parameter der äußeren Orientierung gewonnen werden. Die photogrammetrische Auswertung liefert unabhängige Kontrollinformationen zur Qualitätsüberprüfung der über GPS/INS bestimmten Positionen und Lagewinkel. Durch die Vergleiche der photogrammetrischen Orientierungen mit den GPS/INS-Orientierungsdaten kann die Absolutgenauigkeit der direkten Orientierungsbestimmung durch GPS/INS-Integration festgestellt werden.

In einem zweiten Schritt können in den Bildern gemessene Bildpunkte mit den aus der GPS/INS-Integration bekannten äußeren Orientierungsparametern im Objektraum koordiniert werden (direkte Georeferenzierung). Die Vergleiche mit den bekannten Kontrollpunktkoordinaten am Boden liefern Genauigkeitsaussagen über die erreichbare Genauigkeit der Punktbestimmung aus den direkt orientierten Luftbildern. Dieser Genauigkeitsvergleich ist umfassend, da sich sowohl Fehler in den Orientierungsparametern als auch eventuelle Restfehler des optischen Systems bzw. fehlerhafte Synchronisation zwischen den verschiedenen Messsystemen in den Differenzvektoren zu den bekannten Kontrollpunktkoordinaten zeigen.

4.1 Testflugdesign

Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts mit den Firmen Applanix Corporation (Markham, Canada) und Hansa Luftbild (Münster, Deutschland) ist im vergangenen Jahr ein gut kontrollierter GPS/INS-Genauigkeitstest durchgeführt worden. Dazu wurde das integrierte

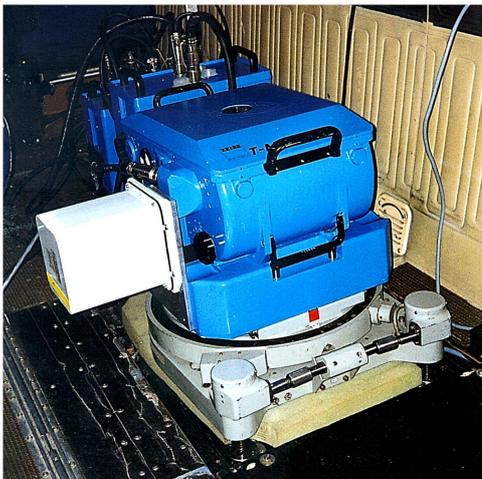


Abb. 2, INS montiert an Kamera

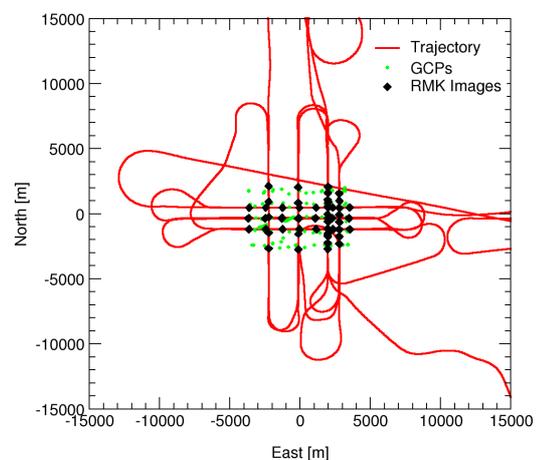


Abb. 3, Flugbahn (Testflug Vaihingen/Enz, 17.12.1998)

GPS/INS-System POS/DG 310 der Firma Applanix (Scherzinger (1997), Lithopoulos (1999)) zusammen mit einer Zeiss RMK-Top15 über dem vom Institut für Photogrammetrie eingerichteten Testfeld Vaihingen/Enz 25km nordwestlich von Stuttgart (ca. 150 Kontrollpunkte) eingesetzt.

Bei dem POS/DG-System handelt es sich um ein „high-end“ GPS/INS-System für photogrammetrische Anwendungen, das auf der Hardware-Seite aus drei wesentlichen Komponenten besteht: Einen 2-Frequenz GPS-Empfänger (Novatel Millenium GPS-Card), einem strap-down INS (Litton LR86) und einem Computer zur Bedienung bzw. Speicherung der anfallenden GPS- und INS-Daten. Diese Komponenten werden zusammen mit dem zu orientierenden Sensor im Flugzeug installiert. Die Abbildung 2 zeigt einen Teil des eingebauten Sensorsystems. Deutlich ist links das fest am Kamerakörper montierte INS zu erkennen. Die GPS-Antenne und der Rechner sind auf dem Bild nicht zu sehen. Alle Komponenten sind durch entsprechende Kabel miteinander verbunden, um den Datenaustausch und die Zeitsynchronisation zu gewährleisten.

Zur späteren differenziellen Auswertung der GPS-Daten müssen Daten einer Referenzstation zur Verfügung gestellt werden. Da im Rahmen dieses Tests der Einfluss der Basislinienlänge auf die Qualität der Orientierungselemente untersucht werden sollte, wurden parallel an insgesamt 7 Referenzstationen in unterschiedlicher Entfernung zum Testgebiet (0-380km) die entsprechenden GPS-Daten erfasst.

Insgesamt konnten während der ca. 90-minütigen Befliegung 104 analoge Luftbilder in den Bildmaßstäben 1:6000 (Flughöhe $h_g=1000\text{m}$, 32 Bilder) und 1:13000 ($h_g=2000\text{m}$, 72 Bilder) aufgenommen werden. Durch die Auswertung dieser Bilder in einer herkömmlichen Aerotriangulation über Passpunkte standen somit zusätzlich zu den Kontrollpunkten im Gelände an 104 diskreten Zeitpunkten Referenzorientierungen für die Genauigkeitsuntersuchungen zur Verfügung. Die theoretische Genauigkeit der Referenzorientierungen aus der AT ist abhängig vom Bildmaßstab, daher werden die absoluten Genauigkeitsuntersuchungen auch für die jeweiligen Maßstäbe getrennt durchgeführt. Die Abbildung 3 zeigt die Bahn des Flugzeugs während der Blockbefliegung und die Lage der Kameraprojektionszentren bzw. der Kontrollpunkte am Boden.

Zur post-processing Auswertung der GPS/INS-Daten wurde die Applanix PosPac-Software verwendet. Diese Software beruht auf einem dezentralen Ansatz zur GPS/INS-Integration. Als Stützungsinformationen für den Kalman-Filter werden die zuvor mit einer separaten GPS-Prozessierungssoftware berechneten GPS-Geschwindigkeiten und Positionen verwendet. Die GPS/INS-Orientierungselemente nach der Filterung werden in einem zweiten Schritt durch eine Glättung weiter optimiert und stehen dann für die Genauigkeitsuntersuchungen zur Verfügung.

4.2 Interne Genauigkeitsvergleiche

Um die Genauigkeit der Orientierungsparameterbestimmung in Abhängigkeit von der Basislinienlänge zu untersuchen wird zunächst die innere Übereinstimmung der von den verschiedenen Referenzstationen aus berechneten GPS/INS-Positionen und Neigungen analysiert. Dabei wird die von der Station S2 in 25km Entfernung zum Testgebiet berechnete Lösung als Referenzlösung angenommen. Demnach ergeben sich insgesamt 6 Differenzen zu den anderen Stationen in 0km (V), 25km (S1), 130km (F), 210km (M), 230km (B) und schließlich 380km (H) Entfernung zum Testgebiet. Die statistische Analyse dieser Differenzen ist in der Tabelle 2 angegeben.

Die von den unterschiedlichen Referenzstationen aus berechneten GPS/INS-Orientierungen zeigen eine hohe Übereinstimmung. Es lassen sich praktisch keine entfernungsabhängigen Effekte feststellen. Für die Positionsbestimmung liegen die RMS-Werte der Differenzen im Bereich von 1dm in der Lage und von 1-2dm für die Höhenkomponente. Die maximalen

Diff.	Position						Neigung					
	RMS [cm]			Max.Abw. [cm]			RMS [10^{-3} °]			Max.Abw. [10^{-3} °]		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ω	φ	κ	ω	φ	κ
S2-V	1.9	4.1	9.4	4.5	36.5	17.8	(0.4)	(4.1)	(4.3)	(3.5)	(56.6)	(30.4)
S2-S1	1.0	1.5	8.5	3.6	7.9	13.5	<0.1	<0.1	0.3	0.3	0.5	0.8
S2-F	2.8	5.1	17.2	6.5	14.7	39.0	0.1	0.2	0.9	0.8	1.8	2.4
S2-M	9.5	6.0	21.9	26.1	16.1	47.0	0.3	0.4	1.2	1.8	2.4	3.3
S2-B	10.9	5.5	8.1	18.0	14.3	22.6	0.2	0.3	0.7	1.4	1.3	2.2
S2-H	6.2	8.3	12.1	16.6	19.7	25.3	0.1	0.2	1.0	0.7	1.2	2.8

Tab. 2, Interne Genauigkeit der GPS/INS-Orientierungen

Differenzen liegen selbst für die 380km lange Basis unterhalb von 50cm. Die Neigungsdifferenzen sind ebenfalls sehr konsistent. Die RMS-Werte für alle Basislinien sind kleiner als 0.001° , die Maximaldifferenzen liegen unter 0.004° . Ausnahme bildet die von der Referenzstation im Testgebiet berechnete Basislinie V. Es treten im Vergleich zu den anderen Differenzen deutlich größere RMS- und Maximalwerte in den Winkeln auf. Das liegt daran, dass zur Berechnung der GPS/INS-Orientierungselemente auf ein unzureichende Anfangsinitialisierung der Winkel zurückgegriffen werden musste, da wegen logistischer Probleme von dem entsprechenden GPS-Referenzempfänger nicht für den gesamten Befliegungszeitraum GPS-Daten aufgezeichnet werden konnten.

4.3 Absolute Genauigkeiten

Für die externen Genauigkeitsvergleiche müssen die aus GPS/INS abgeleiteten äußeren Orientierungen mit den Referenzorientierungen aus der AT verglichen werden. Dazu ist die genaue Korrektur der zeitlichen und räumlichen Offsets zwischen den Orientierungskomponenten und dem abbildenden Sensor unbedingt erforderlich. Nichtbereinigte Exzentrizitäten wirken sich zwangsläufig auf die Qualität der verwendeten Orientierungselemente und damit auch die Qualität der Punktbestimmung im Objektraum aus. Während die zeitliche Exzentrizität durch geeignete Interpolation der POS/DG-Orientierungen auf die registrierten Kameraauslösezeitpunkte leicht zu beseitigen ist, muss die Fehlausrichtung zwischen INS und Kamerakoordinatensystem (siehe Abschnitt 2) durch den Vergleich mit den Referenzorientierungen aus der AT im Rahmen einer Kalibration bestimmt werden. Bei dieser Untersuchung wurde jeweils für den 1:6000 und 1:13000 Bildverband ein Satz von Korrekturwinkeln $\delta\omega$, $\delta\varphi$, $\delta\kappa$ zur Beseitigung der Fehlausrichtung bestimmt und die POS/DG-Neigungswinkel um diese Werte korrigiert.

Anschließend lassen sich die Absolutvergleiche an den 72 bzw. 32 Bildern durchführen und es ergeben sich die in den Abbildungen 3 und 4 gezeigten Abweichungen zwischen den GPS/INS-Positionen und Winkeln verglichen mit den Referenzen aus der AT. Für die Absolutgenauigkeiten wurden exemplarisch die GPS/INS-Ergebnisse der S2-Basislinie verwendet. Die Differenzen sind in den Abbildungen zunächst für die 72 Bilder im Maßstab 1:13000 (Bildnummer 1-72) und dann für die 32 1:6000 Bilder (Bildnr. 80-112) dargestellt. Da die Genauigkeiten abhängig vom Bildmaßstab sind, werden sie für die beiden Maßstäbe getrennt angegeben. Die RMS-Werte für die Positionen liegen bei 15cm für die horizontalen und 30cm für die vertikalen Koordinaten (1:13000). Für die an den 32 großmaßstäbigen Bildern berechneten Differenzen ergeben sich entsprechende RMS-Werte von 10cm bzw. 15cm. In der Höhenkomponente lässt sich zusätzlich ein signifikanter Offset erkennen. Dieser Offset ist korreliert mit dem Bildmaßstab und beträgt ca. 30cm für die 13000er Bilder und ca.

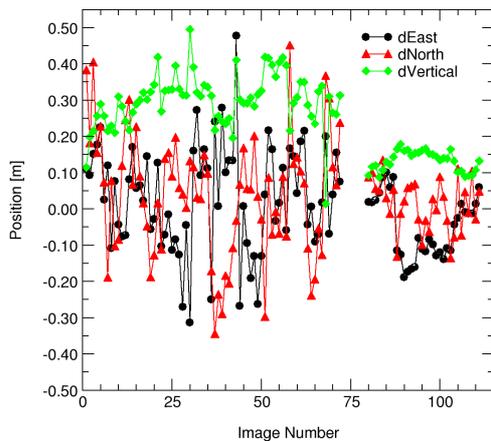


Abb. 3, Absolute Genauigkeiten
GPS/INS-Positionen

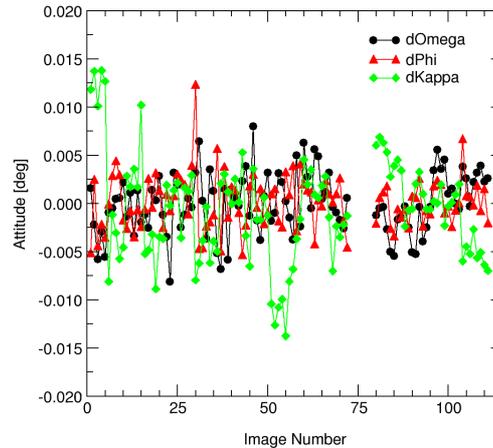


Abb. 4, Absolute Genauigkeiten
GPS/INS-Neigungen

13cm für die 6000er Bilder. Die Korrelation zwischen Vertikaloffset und Bildmaßstab zeigt, dass dieser systematische Fehler nicht durch Fehler der GPS/INS-Bahnbestimmung hervorgerufen wird sondern durch die photogrammetrischen Referenzwerte verursacht ist. Ein Höhenfehler in Abhängigkeit des Bildmaßstabs deutet auf Restfehler in der inneren Orientierung der Luftbildkamera (Kammerkonstante) hin. Derartige Fehler treten auf, wenn sich die im Rahmen der photogrammetrischen AT angenommenen Parameter der inneren Orientierung von den tatsächlichen Größen während der Befliegung unterscheiden. Wird die Kammerkonstante nachträglich um $-20\mu\text{m}$ korrigiert, kann der maßstabsabhängige Fehler behoben werden. Nach dieser Korrektur liegen die Genauigkeiten der Vertikalkoordinate erwartungsgemäß im Bereich von 5cm (1:6000) bzw. 10cm (1:13000). Die Genauigkeiten der Winkelbestimmung werden in Abhängigkeit vom Bildmaßstab im Bereich von 0.003° , 0.002° und 0.004° für ω , φ , κ (1:6000), bzw. 0.003° , 0.003° und 0.006° (1:13000) bestimmt. Die maximalen Abweichungen liegen unter 0.007° (1:6000) bzw. 0.013° (1:13000).

Durch die Absolutvergleiche an den Projektionszentren konnten sehr gute Genauigkeiten erzielt werden. Insgesamt sind die verbleibenden Differenzen zwischen GPS/INS und Referenzwerten zufällig verteilt. Nach Korrektur der Kammerkonstante lassen sich für den untersuchten Zeitraum von ca. 90min keine systematischen Fehler mehr feststellen. Die im Rahmen der GPS/INS-Integration vorgenommene Stützung durch die GPS-Beobachtungen konnte demnach die systemimmanenten INS-Fehlereigenschaften vollständig eliminieren.

Die hohe Genauigkeiten der über GPS/INS bestimmten Parameter der äußeren Orientierung zeigt sich auch im Objektraum. Werden ausgehend von den gemessenen Bildkoordinaten der Kontrollpunkte und den Orientierungsparametern aus POS/DG die entsprechenden Geländekoordinaten durch Vorwärtseinschnitt neu bestimmt, lassen sich Horizontalgenauigkeiten im Bereich von 8-15cm und Vertikalgenauigkeiten in der Größenordnung von 10-25cm erzielen ($m_b=13000$, $h_g=2000\text{m}$). Die Variationen in den Genauigkeiten ergeben sich in Abhängigkeit von der untersuchten Blockgeometrie. Je mehr Bildstrahlen an der Punktbestimmung Anteil haben, umso größer die Redundanz und die resultierende Objektraumgenauigkeit. Werden demnach die 142 Kontrollpunkte unter Verwendung aller Bilder bestimmt, liegen aufgrund der vielfachen Überdeckung sehr starke Verknüpfungen vor und die höheren Genauigkeiten sind zu erwarten. Beschränkt man sich dagegen auf die Auswertung eines einzelnen Flugstreifens, so treten nur 2-3-fach verknüpfte

Punkte auf und die Genauigkeiten verschlechtern sich entsprechend auf 15-25cm. Weitere Details über diesen Testflug können Cramer (1999) entnommen werden.

5. Zusammenfassung

In diesem Paper konnte die prinzipielle Vorgehensweise der GPS/INS-Integration und das Potential der direkten Positions- und Neigungsbestimmung über GPS/INS aufgezeigt werden. Mit dem getesteten POS/DG-System im Verbund mit einer herkömmlichen analogen Luftbildkamera konnten Objektpunkte mit einer Genauigkeit von 1-2dm aus einer Flughöhe von 2000m ü.G. bestimmt werden. Diese Genauigkeiten sind für viele Anwendungen ausreichend. Allerdings konnte in dem Test auch nachgewiesen werden, dass bei der direkten Georeferenzierung mit vollständigem Verzicht auf Passpunktinformationen die korrekte Kalibrierung des Gesamtsystems an Bedeutung gewinnt. Nicht erfasste Restfehler z.B. in der inneren Orientierung des zu orientierenden Sensors oder in den räumlichen und zeitlichen Exzentrizitäten zwischen den verschiedenen Sensorkomponenten führen zwangsläufig zu Fehlern in der Objektpunktbestimmung. Für höchste Genauigkeitsanforderungen müssen diese Restfehler aufgedeckt und beseitigt werden. Dazu müssen Kontrollinformationen vorgesehen werden, die z.B. in einer entsprechend modifizierten AT verwendet werden können.

Wegen der Komplexität des Themengebiets GPS/INS-Sensorintegration konnten mit den hier gemachten Ausführungen viele Fragen nur kurz angerissen werden. Bestimmte Bereiche wie z.B. die notwendigen Konfigurationen zur real-time Orientierung bzw. Steuerung von Sensoren wurden gar nicht behandelt. Daher sei der Leser zur weiteren vertieften Behandlung auf entsprechende Spezialliteratur verwiesen.

Literatur

- Brown, R. und P. Hwang (1992): Introduction to Random Signals and applied Kalman Filtering, John Wiley and Sons, New York.
- Cramer, M. (1999): Direct Geocoding – is aerial triangulation obsolete?, in Fritsch/Spiller (eds.): Photogrammetric Week 1999, Wichmann Verlag, S. 59-70.
- Gelb, A. (1974): Applied Optimal Estimation, MIT Press, Cambridge, USA.
- El-Mowafy, A. (1994): Kinematic Attitude Determination from GPS, UCGE Report 20074, University of Calgary, Canada.
- Kraus, K. (1994): Photogrammetrie I, 5. Ausgabe, Dümmler Verlag.
- Lithopoulos, E. (1999): The Applanix Approach to GPS/INS-Integration, in Fritsch/Spiller (eds.): Photogrammetric Week 1999, Wichmann Verlag, S. 53-57.
- Lu, G. (1995): Development of a GPS Multi-Antenna System for Attitude Determination, UCGE Report 20073, University of Calgary, Canada.
- Schade, H. und M. Cramer (1994): Airborne Kinematic Attitude Determination with GPS for Photogrammetry and Remote Sensing, in Proceedings International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS94), Banff, Canada.
- Scherzinger, B. (1997): A Position and Orientation Post-Processing Software Package for Inertial/GPS Integration (POSProc), in Proceedings International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS97), Banff, Canada.
- Skaloud, J., M. Cramer und K.P. Schwarz (1996): Exterior Orientation without Ground Control, in Proceedings ISPRS Kongress, Kommission III, S. 125-130, Wien.
- Schrick, K. (1977): Anwendungen der Kalman-Filter-Technik, Oldenburg Verlag, München, Wien.

-
- Schwarz, K.P., M. Chapman, E. Cannon, P. Gong und D. Cosandier (1994): A Precise Positioning and Attitude System in Support of Airborne Remote Sensing, in Proceedings ISPRS Meeting, Kommission II, S. 191-201, Ottawa, Canada.
- Schwarz, K.P. (1995): Integrated airborne navigation systems for photogrammetry, in Fritsch/Hobbie (eds.): Photogrammetric Week 1995, Wichmann Verlag, S. 139-154.
- Wei, M. und K.P. Schwarz (1990): Testing a Decentralized Filter for GPS/INS-Integration, in Proceedings of the IEEE PLANS, S. 429-435, Las Vegas, USA.