

Georegistrierung mittels Minidrohnen erfasster Videosequenzen – Ansätze und Genauigkeitsanalyse

HANNES EUGSTER¹

Kurzfassung:

Dieser Beitrag beschreibt die Georegistrierung mittels Minidrohnen (engl. UAV = Unmanned Aerial Vehicle) erfasster Videosequenzen auf ein digitales 3D-Landschaftsmodell. Fluggeräte mit einem Abfluggewicht unter 30 Kilogramm fallen in diese UAV-Kategorie und enthalten meistens ein integriertes Fluglageregelungssystem. Diese Systeme setzen zur Bestimmung von Position und Orientierung der Plattform meist GPS- und IMU-Sensoren geringer Qualität ein. Die Herausforderung liegt nun darin, die erfassten Videosequenzen mit Hilfe der Informationen aus der Fluglageregelung und einem 3D-Landschaftsmodell mit bestmöglicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu georeferenzieren. Mögliche Anwendungen eines solchen Systems in Kombination mit einem 3D-Landschaftsmodell liegen bei der Echtzeit-Kartierung beliebiger Geobjekte. Mögliche Einsatzszenarien reichen von Überwachungsaufgaben bei Grossanlässen bis zur Erfassung der Schadenssituation als Entscheidungshilfe im Katastrophenmanagement.

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten Jahren erlebten leichtgewichtige UAV eine rasante Entwicklung. Die heutigen Systeme bieten die Möglichkeit zur autonomen oder benutzer-unterstützten Navigation. Trotz ihres geringen Startgewichts von wenigen Kilos, können diese Systeme zusätzliche Datenerfassungssensoren wie nichtmetrische Videokameras mitführen. Der Ansatz der direkten Georeferenzierung ist in der flugzeuggestützten Photogrammetrie gut untersucht und etabliert. Im Gegensatz dazu können in Minidrohnen aus Gewichts- und teilweise auch Kostengründen keine hochwertigen GPS- und IMU-Systeme mitgeführt werden, was eine verminderte Genauigkeit in der direkten Bestimmung der Elemente der äusseren Orientierung zur Folge hat. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der erreichbaren Genauigkeit ist der zusätzliche Einbezug photogrammetrisch bestimmter äusserer Orientierungselemente aus den Videodaten. Die Schätzung dieser Elemente kann mit Hilfe eines räumlichen Rückwärtsschnitts auf bekannte Objekte aus einem digitalen 3D-Landschaftsmodell für einzelne Bilder aus der Videosequenz erfolgen.

1.2 Aufbau Beitrag

Das zweite Kapitel beschreibt das für die Projektflüge eingesetzte Minidrohnen-system. Speziell werden die für die Videodaten-Georegistrierung relevanten Sensoren sowie die verwendete Videokamera beschrieben. Im zweiten Teil wird das gewählte Konzept zur Video – Fluglagedaten Zeitsynchronisation sowie die durchgeführten Projektflüge vorgestellt. Das dritte Kapitel beschreibt die Kalibrierung der Videokamera sowie die verwendeten Ansätze zur

¹ Hannes Eugster: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation

Georegistrierung der erfassten Videodaten. Dabei kommt die direkte- sowie die integrierte Georeferenzierung zum Einsatz. Das vierte Kapitel zeigt die erzielten Georegistrierungsgenauigkeiten auf und vergleicht und beurteilt die einzelnen verwendeten Auswertansätze. Zum Schluss wird ein Ausblick über weitere Entwicklungsschritte gegeben sowie eine mögliche Anwendung vorgestellt.

2 Ausgangslage

2.1 UAV Plattform – Sensoren

Die Erfassung der Videodaten erfolgte für diese Arbeit mit nachfolgend dargestelltem Minidrohnen-System der Firma weControl.

UAV-Kategorie:	Mini
Leergewicht:	8.5 kg
Maximale Nutzlast:	5.5 kg
Plattform (Hersteller):	Copter 1B (Survey Copter)
Fluglageregelung:	wePilot1000 (weControl)

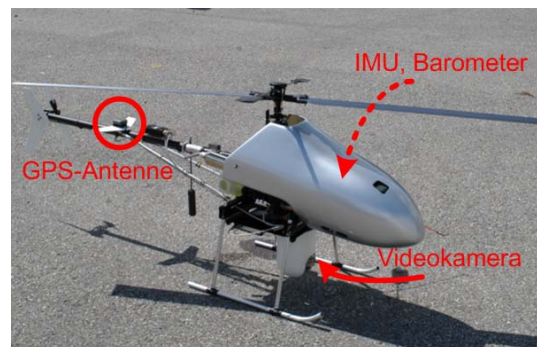


Abbildung 1: Minidrohnen-System Copter 1B / weControl

Die Plattform ist mit einem integrierten Fluglageregelungssystem ausgerüstet. Die Bestimmung der Fluglageparameter basiert auf den in Tabelle 1 aufgeführten Sensoren.

Sensor	Typ	Sensorkategorie	Genauigkeit
GPS-Empfänger	µ-blox TIM-LP	Navigationsempfänger (Auswertung C/A-Code)	Navigation 2.5m CEP 5.0m SEP
			DGPS 2.0m CEP 3.0m SEP
IMU	Crossbow IMU400CD 100	6DOF MEMS-basiert	Bias roll,pitch,yaw $<\pm 1^\circ/\text{sec}$
Barometer			$\pm 2\text{m}$ (Druckänderung bei Flug)

Tabelle 1: Eingesetzte Sensoren

Die Sensordatenfusion in der Fluglageregelung ist durch einen erweiterten Kalman-Filter (EKF) realisiert. Aus Gewichts- und Kostengründen können für diesen Zweck auf solchen Plattformen lediglich MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) IMU-Systeme geringer Qualität und GPS-Navigationsempfänger mit der Möglichkeit für eine differentielle Code-Lösung verwendet werden. Die Qualität dieser Sensoren erlaubt die Stabilisierung sowie die autonome oder benutzer-gestützte Navigation der Plattform. Für die Georegistrierung der Videodaten können

die Fluglageparameter direkt verwendet werden, jedoch hängt die erreichbare Genauigkeit direkt von der Qualität der auf der Trägerplattform verfügbaren Sensoren ab.

Für die Videodatenerfassung wird auf dieser Plattform eine handelsübliche nicht-metrische SONY FCB-EX780BP Kamera eingesetzt. Diese Kamera liefert ein analoges PAL-Videosignal, welches mittels analogem Video-Daten-Link zur Bodenstation übertragen wird. (Abbildung 2)

2.2 Synchronisation Fluglagedaten – Video

Damit ein Video-Stream georegistriert werden kann, müssen die Parameter der äusseren Orientierung der Videokamera kontinuierlich vorliegen. Die Fluglageregelung stellt zu diesem Zweck die Flugtrajektorie sowie die Orientierung der Plattform zeitdiskret mit 5Hz zur Verfügung. Damit für jedes einzelne Videoframe die äussere Orientierung aus den Fluglagedaten abgeleitet werden kann, ist der Video-Stream mit einer Zeitreferenz zu ergänzen, welcher in Bezug zu den Daten aus der Fluglageregelung gesetzt werden kann. Folgende Abbildung illustriert das gewählte Konzept zur Integration der Zeitinformation in den Video-Stream.

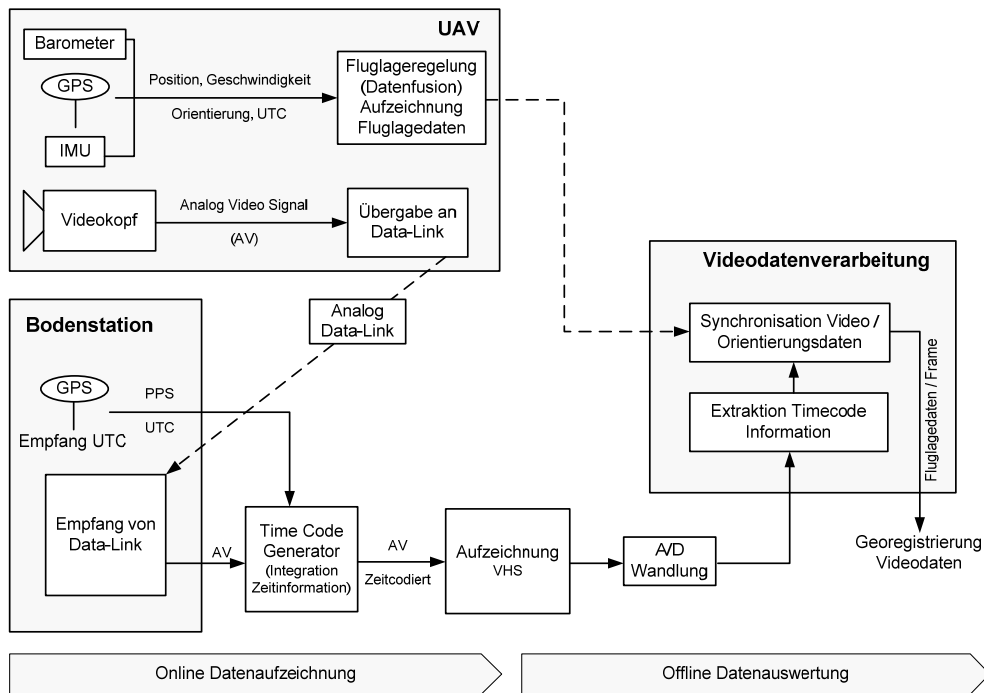


Abbildung 2: Datenerfassungskonfiguration und Integration Zeitinformation

Wie aus der Abbildung 2 ersichtlich, verwendet sowohl die Fluglageregelung wie auch der Time-Code-Generator, der in das analoge Videosignal die Zeitinformation integriert, als Zeitreferenz GPS-Time und daraus abgeleitet UTC. Der Fehler der Zeitsynchronisation zwischen Fluglagedaten und Videoframe hängt von der aktuellen Genauigkeit der Zeitbestimmung der beiden GPS-Empfänger sowie aus der Übertragung des analogen Videosignals, von der Plattform zur Bodenstation, resultierenden Latenzzeit ab. Der zweite Fehleranteil darf für Einsatzdistanzen solcher Plattformsysteme vernachlässigt werden, da das Videosignal über den analogen Daten-Link mit annähernd Lichtgeschwindigkeit übertragen wird.

2.3 Datenerfassung – Projektflüge

Als Grundlage für die Untersuchungen in dieser Arbeit dienen Videodaten, welche mit der oben beschriebenen Zeitsynchronisation im Sommer 2006 in Langenbruck (Kanton Basel-Landschaft) und im Freilichtmuseum Ballenberg (Kanton Bern) aufgezeichnet wurden. Folgende beiden Systemkonfigurationen kamen dabei zum Einsatz:

- Flug 1 (Langenbruck): Positionsupdates der Fluglageregelung mit GPS-Navigationslösung (C/A-Code Lösung)
- Flug 2 (Ballenberg): Positionsupdates der Fluglageregelung mit DGPS-Lösung (differentielle C/A-Code Lösung mit Nutzung einer virtuellen Referenzstation)

Zusätzlich stehen in beiden Projektgebieten vollständige 3D-Landschaftsmodelle des Testgebiets, die im Rahmen von Studentenarbeiten mittels Tachymetrie und Nahbereichsphotogrammetrie erstellt wurden, als Referenz zur Verfügung. Die Genauigkeit der erfassten Gebäudemodelle kann mit 10cm angegeben werden. Die Videodatenaufzeichnung in beiden Testflügen erfolgte mit fester innerer Orientierung sowie fixierter Kameraaufhängung.

3 Georegistrierung Videodaten

Die erfassten Videodaten aus den beiden Projektflügen werden mit den in diesem Abschnitt dargestellten Verfahren, der direkten Georeferenzierung sowie der integrierten Georeferenzierung auf ein bestehendes 3D-Landschaftsmodell das im Referenzrahmen WGS84 zur Verfügung steht, georegistriert. Zuerst wird die Kalibrierung der Videokamera und der Sensorkonfiguration aufgezeigt, bevor detailliert die erwähnten Verfahren zur Georegistrierung diskutiert werden.

3.1 Kalibrierung

Damit die aufgezeichnete Videosequenz auf ein entsprechendes 3D-Landschaftsmodell georegistriert werden kann, muss die verwendete Videokamera sowie die Anordnung und Ausrichtung der eingesetzten IMU/GPS-Sensoren auf der Plattform vorgängig kalibriert werden.

3.1.1 Innere Orientierung Videokamera

Für die Schätzung der inneren Orientierungsparameter der Videokamera kommt eine On-the-job-Kalibrierung direkt im Projektgebiet zum Einsatz. Als räumliches Testfeld wird ein Gebäudemodell aus dem 3D-Landschaftsmodell mit zusätzlich am Boden angebrachten Messmarken verwendet. Idealerweise wird dafür ein Objekt ausgewählt, welches einen möglichst grossen Tiefenunterschied aufweist, und sich auf den gesamten Bildausschnitt ausdehnt. Aus ausgewählten Einzelbildern kann anschliessend die unbekannt innere Orientierung mit Hilfe einer Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern geschätzt werden. Eine optimale Anordnung der Einzelbilder über dem Testfeld ist aus (LUHMANN, 1999) zu entnehmen.

Die Schätzung der gesuchten Parameter der inneren Orientierung (einfaches Lochkameramodell) erfolgte mit dem Programmsystem Australis der Firma Photometrix Pty Ltd. Für die anschliessende direkte Georeferenzierung wurden bei der Schätzung der Kammerkonstante die Koordinaten der Projektionszentren aus der Fluglageregelung als hoch gewichtete

Beobachtungen mit eingeführt. Damit wird die Kammerkonstante optimal an das aktuelle Höhenniveau der Flugtrajektorie aus der Fluglageregelung angepasst. Im Gegensatz dazu wurde die Kammerkonstante für die integrierte Georeferenzierung ohne zusätzliche Beobachtungen aus reinen Bildbeobachtungen geschätzt.

3.1.2 Ausrichtung und Anordnung der Sensoren auf der Plattform

Damit die erfassten Daten aus GPS und IMU auf das Projektionszentrum bzw. auf das Kamerakoordinatensystem bezogen werden können, ist zum einen die Kenntnis der Anordnung der eingesetzten Sensoren zueinander sowie die Verdrehung zwischen Körperkoordinatensystem und Kamerakoordinatensystem Voraussetzung. Die Translation zwischen GPS-Antennenzentrum, Barometer- und IMU-Referenzpunkt kann direkt terrestrisch bestimmt werden und wird vom Fluglageregelungssystem mitberücksichtigt. Ebenfalls kann die Translation zwischen IMU-Referenzpunkt und Kameraprojektionszentrum direkt ermittelt werden. Dieser systematische Fehlereinfluss kann jedoch vernachlässigt werden, da dieser mit der nachfolgend beschriebenen Kameraeinbau-Fehlausrichtung stark korreliert ist.

Die Verdrehung zwischen Körperkoordinatensystem und Kamerakoordinatensystem wird zum einen verursacht durch die vom System aufgezeichneten Bewegungen der Kameraaufhängung (Gimbal) bezüglich dem Körperkoordinatensystem sowie der Fehlausrichtung zwischen Kamerakoordinatensystem bezüglich Gimbalssystem. Diese Fehlausrichtung (Misalignment) kann nicht direkt am System gemessen, sondern muss mit Hilfe eines Kalibrierungsflugs geschätzt werden. Mit Hilfe eines Kreuzflugs über ein Testfeld lässt sich die gesuchte Fehlausrichtung mit folgendem Verfahren bestimmen. In ausgewählten Einzelbildern aus der Kreuzflug-Videsequenz werden Bildbeobachtungen auf Passpunkte des Testfelds gemessen. Anschliessend können mit Hilfe einer Gauss-Newton-Optimierung die unbekannt drei Drehungen des Einbaufehlers ($\Delta\theta$, $\Delta\omega$, $\Delta\psi$) in Gleichung 2, aus den zur Verfügung stehenden Einzelbildern, geschätzt werden.

3.2 Direkte Georeferenzierung

Unter dem Begriff der direkten Georeferenzierung wird in der Photogrammetrie das direkte Messen der Elemente der äusseren Orientierung für jedes Frame verstanden. Dabei werden die gesuchten Parameter mit Hilfe von IMU und GPS direkt beobachtet. Dieser Ansatz wird beispielsweise in (CRAMER, 2001) detailliert beschrieben. In der Luftbildphotogrammetrie ist dieser Ansatz heute etabliert und untersucht. Jedoch werden in jenen Applikationen im Gegensatz zu dieser Arbeit zur direkten Messung der äusseren Orientierung meist qualitativ hochstehende Sensoren wie *navigation grade* IMU-Systeme und geodätische Zweifrequenz GPS-Empfänger eingesetzt (vgl. HAALA, 2005). Systematische Fehler verursacht durch nicht berücksichtigte Sensor-Shifts zwischen GPS-Antennenphasenzentrum, IMU und Kamera-Projektionszentrum und der Fehlausrichtung zwischen Körper- und Kamerakoordinatensystem sind bei der Auswertung zu berücksichtigen. Die Sensor-Shifts können durch terrestrisches Einmessen direkt bestimmt werden. Im Gegensatz dazu sind die drei Drehwinkel der Fehlausrichtung nicht direkt beobachtbar und können mit dem in Kapitel 3.1.2 dargestellten Verfahren geschätzt werden. (SKALLOUD, 1999) enthält eine Zusammenstellung der systematischen Fehlereinflüsse der direkten Georeferenzierung.

In dieser Arbeit wird das Konzept der direkten Georeferenzierung für die Georegistrierung mittels Minidrohnen systemen erfasster Videosequenzen untersucht. Die äussere Orientierung der Videokamera ist durch die integrierten IMU/GPS-Daten aus dem Fluglageregelungssystem durch die in Abbildung 3 illustrierte Transformationen gegeben. Mit der Multiplikation folgender Teilrotationen kann die gesuchte Gesamtroation zwischen Kamerakoordinatensystem und Weltkoordinatensystem hergestellt werden.

$$\mathbf{R}_{cam}^{wgs84} = \mathbf{R}_{nav}^{wgs84}(\Phi, \Lambda) \cdot \mathbf{R}_{body}^{nav}(\omega, \theta, \psi) \cdot \mathbf{R}_{gimb}^{body}(\alpha, \nu) \cdot \mathbf{R}_{cam}^{gimb}(\Delta\theta, \Delta\omega, \Delta\psi) \quad \text{eq. 1}$$

Dabei besteht die Gesamtroation aus folgenden einzelnen Drehwinkeln:

- Φ : geographische Breite (WGS84)
- Λ : geographische Länge (WGS84)
- θ : Pitch (Plattform)
- ω : Roll (Plattform)
- ψ : Yaw (Plattform)
- α : Pan (Gimbal)
- ν : Tilt (Gimbal)
- $\Delta\theta$: Einbauwinkelfehler Pitch
- $\Delta\omega$: Einbauwinkelfehler Roll
- $\Delta\psi$: Einbauwinkelfehler Yaw

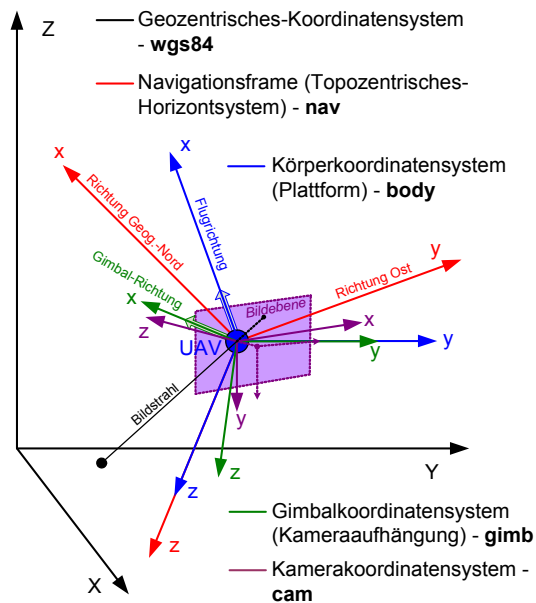


Abbildung 3: Koordinatensysteme

Mit Ausnahme der drei Drehwinkel die den Einbauwinkelfehler beschreiben, werden sämtliche benötigten Drehungen durch das Fluglageregelungssystem zur Verfügung gestellt. Damit lässt sich die Beziehung zwischen einem Objektpunkt im Weltkoordinatensystem und dessen Abbild im Kamerakoordinatensystem durch die Gleichung

$$\mathbf{x}_{cam} = \frac{1}{\lambda} \cdot \mathbf{R}_{cam}^{wgs84} \mathbf{T} (\mathbf{X}_{wgs84} - \mathbf{X}_0) \quad \text{eq. 2}$$

beschreiben. Mit

- λ : Massstabsfaktor
- \mathbf{x}_{cam} : Bildpunkt im Kamerakoordinatensystem
- \mathbf{X}_{wgs84} : Objektpunkt im Weltkoordinatensystem
- \mathbf{X}_0 : Projektionszentrum im Weltkoordinatensystem

Das Projektionszentrum der Kamera lässt sich ebenfalls direkt aus der Positionsinformation der Fluglagedaten ableiten. Die gesuchten Elemente der äusseren Orientierung werden anschliessend aus den zur Verfügung stehenden 5Hz Fluglagedaten mit einer linearen Interpolation für jedes Frame der Videosequenz berechnet. Aufgrund der reduzierten Genauigkeit der eingesetzten Sensoren kann das etablierte Konzept der direkten Georeferenzierung nicht ohne entsprechende Anpassungen und Einschränkungen übernommen werden. Speziell die Kalibrierung des

Kameraeinbaufehlers und die Handhabung systematischer Fehlereinflüsse ist zu untersuchen und benötigt zur Lösung neue Ansätze und Verfahren.

3.3 Integrierte Georeferenzierung

Im Unterschied zum Ansatz der direkten Georeferenzierung werden bei diesem Konzept, zu den direkt mit IMU und GPS gemessene äusseren Orientierungselemente, Bildmessungen auf bekannte Passpunkte zur bestmöglichen Bestimmung des Sensormodells mit verwendet. Mit Hilfe von zusätzlichen Bildmessungen auf bekannte Passpunkte sollen verbleibende nicht berücksichtigte systematische Fehler der direkten Georeferenzierung korrigiert werden. In (HAALA, 2005) und (CRAMER, 2001) werden die Verfahren streifenweiser Integrationsansatz und Orientierungsbildansatz für die integrierte Georeferenzierung beschrieben. Jedoch eignen sich beide Ansätze für die Daten in dieser Arbeit aus unterschiedlichen Gründen nur bedingt. Nachfolgendes Konzept beschreibt kurz den in dieser Arbeit gewählten Ansatz.

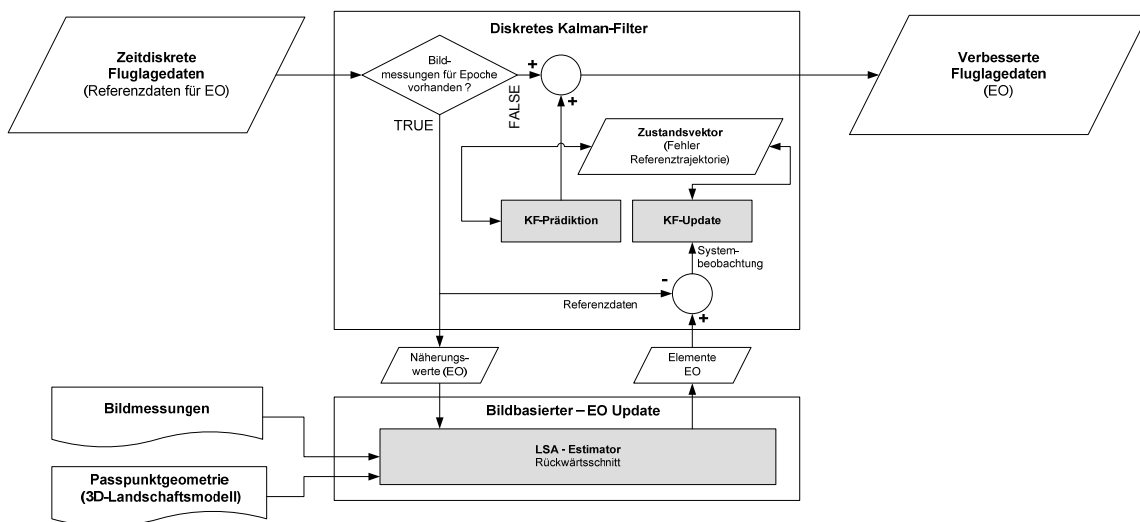


Abbildung 4: Konzept Datenintegration integrierte Georeferenzierung

Grundsätzlich soll der Fehler in den Fluglagedaten mit Hilfe von unabhängig bestimmten äusseren Orientierungselementen bestmöglich geschätzt und entsprechend korrigiert werden. Mit Hilfe von Bildmessungen in ausgewählten Einzelbildern aus der Videosequenz auf Objektpunkte aus dem 3D-Landschaftsmodell, lassen sich die Elemente der äusseren Orientierung mit Hilfe eines räumlichen Rückwärtsschnitts unabhängig bestimmen. Mit Hilfe eines diskreten Kalman-Filters, wird für die aus der Fluglageregelung mit hoher Frequenz zur Verfügung stehenden Parameter der äusseren Orientierung, mit den zusätzlich bestimmten Rückwärtsschnitten ein entsprechendes Fehlermodell geschätzt. Abbildung 4 verdeutlicht die gewählte Datenintegrationsstrategie in der vorliegenden Arbeit. Das gewählte Design basiert auf dem komplementären *feedforward* Kalman-Filter. Der Zustandsvektor enthält die systematischen Fehleranteile der Fluglagedaten sowie deren ersten Ableitungen. Zusätzlich ist der Fehler der photogrammetrisch bestimmten äusseren Orientierungselemente enthalten. Die Systembeobachtungen für einen Update berechnen sich aus der komponentenweise gebildeten Differenz zwischen den aus Rückwärtsschnitten geschätzten äusseren Orientierungselementen

und den als Referenz verwendeten Fluglagekomponenten. Die Systembeobachtungen stehen funktional mit den Komponenten des Zustandsvektors, aus der Addition der systematischen Fehleranteile der Fluglagedaten mit den Fehlern der äusseren Orientierungselemente geschätzt aus Rückwärtsschnitten, zusammen. Die Systemdynamik beschreibt für die Fehler der Fluglagedaten einen integrierten Random-Walk und für die Fehler der Elemente der äusseren Orientierung aus den Rückwärtsschnitten einen stark gedämpften Gauss-Markov-Prozess. Das gewählte stochastische Modell gewichtet die Systembeobachtungen im Vergleich zum dynamischen Modell stark. Detaillierte Informationen über das implementierte Filterdesign finden sich in (BROWN, 1983).

4 Erreichte Resultate

Die in diesem Kapitel präsentierten Resultate basieren auf den Daten der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Testflüge. Für den Nachweis der erreichten Georegistrierungsgenauigkeit werden ausgewählte Checkpunkte aus dem 3D-Landschaftsmodell verwendet. Die ausgewiesene Georegistrierungsgenauigkeit im Bild- bzw. Objektraum ergibt sich aus der Rückprojektion (vgl. Gl. 2) der Checkpunkte in ausgewählte Einzelbilder der Videosequenz, mit den Parametern der äusseren- und inneren Orientierung. Damit eine unabhängige Beurteilung der einzelnen Datenerfassungs- und Auswertekonfigurationen möglich ist, werden Videosequenzen aus den Testflügen verwendet, die nicht in Zusammenhang mit dem Testfeldobjekt und der Kalibrierung der Einbauwinkelfehler stehen. Für den Genauigkeitsnachweis der integrierten Georeferenzierung werden Einzelbilder verwendet, die zwischen den Rückwärtsschnitt basierten Kalman-Filter Updates liegen.

4.1 Genauigkeiten

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die erreichten Georegistrierungsgenauigkeiten für folgende Datenerfassungs- und Auswertekonfigurationen:

- a Fluglagedaten basieren auf GPS-Navigationslösung (C/A-Code Lösung), IMU und Barometer. Georegistrierung mit dem Ansatz der **direkten Georeferenzierung**. (Projektflug Langenbruck)
- b Fluglagedaten basieren auf DGPS-Lösung mit virtueller Referenzstation (Korrekturdatendienst: swipos/NAV swisstopo), IMU und Barometer. Georegistrierung mit dem Ansatz der **direkten Georeferenzierung**. (Projektflug Ballenberg)
- c Fluglagedaten basieren auf DGPS-Lösung mit virtueller Referenzstation (Korrekturdatendienst: swipos/NAV swisstopo), IMU und Barometer. Georegistrierung mit dem Ansatz der **integrierten Georeferenzierung** mit ~1Hz Kalman-Filter Updates. (Projektflug Ballenberg)

4.2 Beurteilung und Potential

Abbildung 5 illustriert die Georegistrierungsgenauigkeit der Ansätze direkte- und integrierte Georeferenzierung (Konfiguration **b2** und **c**) für die gleichen Einzelbilder der Videosequenz. Eindeutig kann die in Tabelle 2 nachgewiesene signifikant verbesserte Georegistrierungsgenauigkeit der integrierten- gegenüber der direkten Georeferenzierung anhand

der Differenzvektoren zwischen den manuell durchgeführten Bildmessungen und den rückprojizierten Checkpunkten visualisiert werden. Auffallend im Differenzvektorbild der direkten Georeferenzierung ist ein verbleibender, trotz Kalibrierung und Berücksichtigung des Kameraeinbauwinkelfehlers, nicht korrigierter systematischer Fehleranteil. Zudem ist die erreichte Genauigkeit verglichen mit dem resultierenden RMS aus der Kalibrierung des Einbauwinkelfehlers um den Faktor zwei geringer. Diese Resultate stützen die Annahme, dass beim eingesetzten Verfahren zur Kalibrierung des Einbauwinkelfehlers hauptsächlich zeitlich korrelierte systematische Fehleranteile der Fluglagedaten aus GPS/IMU kompensiert und nicht die gewünschten Einbauwinkelfehler geschätzt werden. Eine Erklärung für diesen Effekt liefert die hohe Korrelation zwischen einem systematischen Fehler in den Elementen der äusseren Orientierung und den drei Drehungen die den Einbauwinkelfehler beschreiben. Auch das Differenzvektorbild bestätigt diese Aussage, da im analysierten Ausschnitt der Videosequenz ebenfalls ein zeitlich systematischer Fehleranteil in den Fluglagedaten vorliegt, der aber nicht mit den aus der Kalibrierung geschätzten Einbauwinkelfehlern kompensiert werden kann.

Die ausgewerteten Testflugdaten zeigen im Weiteren die Georegistrierungsgenauigkeit auf, die mit dem Ansatz der direkten Georeferenzierung, mit dem eingesetzten Minidrohnsystem erreicht werden kann. Die Resultate der Testflüge (Konfiguration **a** und **b**) zeigen, dass die Nutzung von Pseudorange-Korrekturen lediglich eine minimale Verbesserung der direkten Georeferenzierung zur Folge hat. Hauptsächlich kann mit der DGPS-Konfiguration die absolute Genauigkeit der Vertikalkomponente der Projektionszentren signifikant gesteigert werden. Jedoch kann mit angepasster Schätzung der Kammerkonstante, bei gleich bleibender Objektdistanz über die gesamte Flugmission, ein vorhandener Höhenshift in der Vertikalkomponente grösstmöglich kompensiert werden. Möchte die Genauigkeit der direkten Georeferenzierung signifikant verbessert werden, müssen neue Ansätze wie der in diesem Beitrag aufgezeigte Ansatz der integrierten Georeferenzierung für die Prozessierung der Daten verwendet werden. Dieser Ansatz ermöglicht mit Hilfe des 3D-Landschaftsmodells eine fortlaufende Schätzung und Kompensation des systematischen Fehlers der äusseren Orientierung und behandelt darin Einbauwinkelfehler und systematische Fehler der Fluglagedaten als stark korrelierter einziger Fehlerterm.

	Konfiguration a	Konfiguration b1	Konfiguration b2	Konfiguration c
	Fehlausrichtung berücksichtigt		Fehlausrichtung berücksichtigt	
Bildmassstab	1:32'000	1:16'000	1:16'000	1:16'000
RMS Bildraum	114.1 µm	144.12 µm	119.4 µm	35.3 µm
Objektdistanz	100 m	50 m	50 m	50 m
RMS Objektraum	3.8 m	2.4 m	2.0 m	0.59 m

Tabelle 2: Erreichte Genauigkeiten Georegistrierung

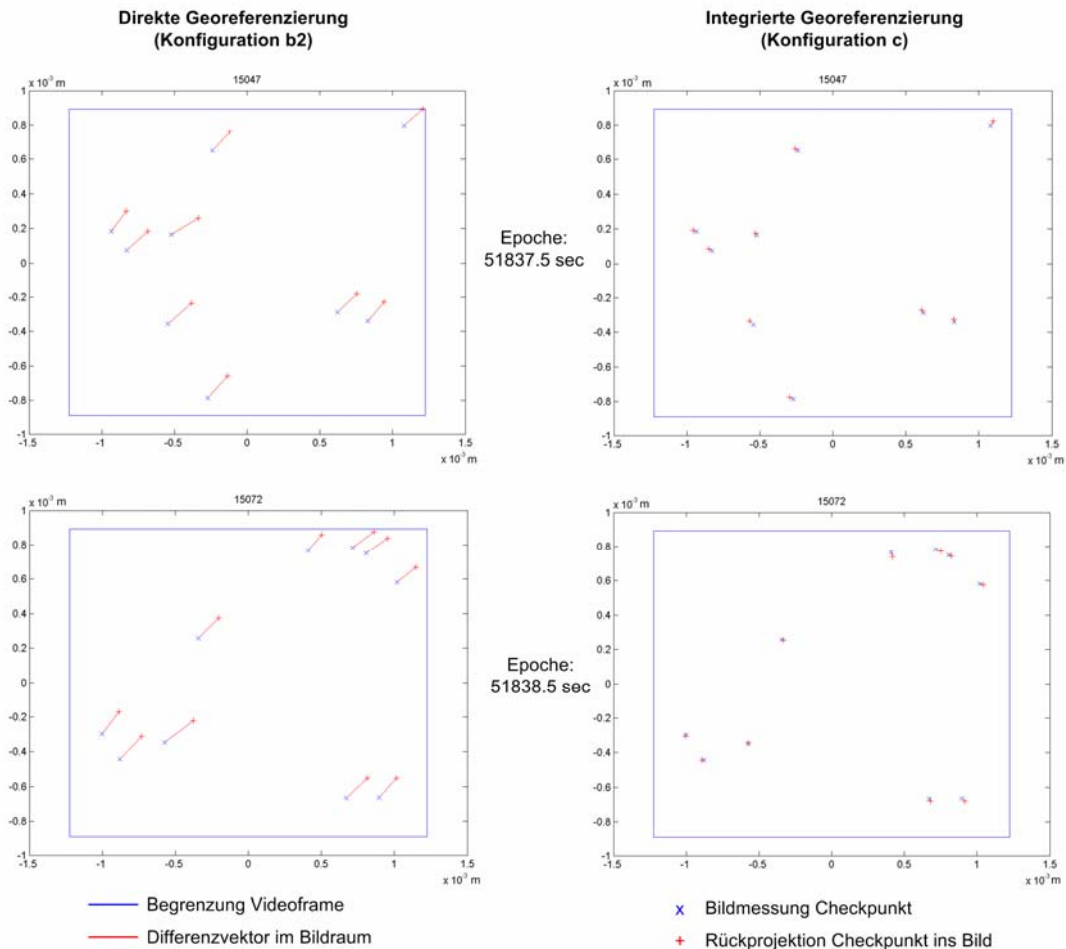


Abbildung 5: Differenzvektoren in der Bildebene direkte- vs. integrierte Georeferenzierung

5 Ausblick und Anwendungen

Künftig soll die bis anhin manuell durchgeführte Bildmessung auf Objekte aus dem 3D-Landschaftsmodell in den Einzelbildern der Videosequenz mit Hilfe geeigneter Bildzuordnungsverfahren sowie Objektverfolgungsalgorithmen automatisiert werden. Im Endausbau sollen die aufgezeigten Verfahren der direkten- sowie integrierten Georeferenzierung für Echtzeitanwendungen zur Verfügung stehen.

Ein solches Mini- oder Mikrodrohnsystem ausgerüstet mit Videokamera könnte als mobiles Echtzeit-Kartierungssystem eingesetzt werden. Eine solche Systemlösung würde es erlauben die erfassten Videodaten direkt in ein 3D-Geoinformationsdienst zu integrieren. Denkbar ist zum einen das "aufmappen" der erfassten Texturinformation aus den Videodaten direkt auf das Terrain des 3D-Landschaftsmodells. Ebenfalls könnte der georegistrierte Video-Stream mit beliebigen Informationen aus dem 3D-Landschaftsmodell überlagert werden. Damit lassen sich auf einfache Weise beliebige Geoobjekte kartieren wie auch über eine Video-Sequenz verfolgen. Denkbar ist eine Anwendung in welcher der reale Zustand mit einem Modellzustand verglichen

werden kann. Hilfreich könnte ein solches System, z.B. bei der schnellen und effizienten Erfassung und Beurteilung eines Schadensbildes nach einer Naturkatastrophe, eingesetzt werden.

6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag untersucht die Georegistrierung mittels Minidrohnen-System erfasster Videosequenzen. Die Georegistrierung erfolgt aufgrund der zur Verfügung stehenden Fluglagedaten geringer Qualität mit dem Ansatz der direkten Georeferenzierung sowie der integrierten Georeferenzierung. Beim Ansatz der direkten Georeferenzierung hängt die Genauigkeit direkt von den auf der Plattform zur Fluglagerregelung eingesetzten GPS, IMU und Barometer-Sensorsystemen ab. Aufgrund Testflugdaten, erfasst mit einem Minidrohnen-System, konnte eine Georegistrierungsgenauigkeit von 2 bis 4m aus einer Aufnahmehöhe von 50 bis 100m nachgewiesen werden.

Möchte die Genauigkeit signifikant gesteigert werden, müssen neue Verfahren wie die in diesem Beitrag präsentierte integrierte Georeferenzierung weiterentwickelt und eingesetzt werden. Dieser Ansatz nutzt zusätzlich zu den direkt durch IMU und GPS gemessenen Fluglageparametern zur Georegistrierung photogrammetrisch geschätzte äussere Orientierungselemente. Erste Resultate zeigen auf, dass die Georegistrierungsgenauigkeit um den Faktor vier gesteigert werden kann. Wird zusätzlich berücksichtigt, dass die dafür benötigten äusseren Orientierungsupdates aus automatisch durchgeführten Bildmessungen im Video-Stream berechnet werden, ist eine Georegistrierungsgenauigkeit in der Grössenordnung von 1m realistisch. Diese Genauigkeit ist für viele neue Anwendungen ausreichend, welche mit kostengünstigen Mini- oder Mikrodrohnen-Systemen realisiert werden können.

7 Danksagung

Diese Arbeit wird von der schweizerischen Förderagentur für Innovation KTI finanziell mitunterstützt. Weiter bedankt sich der Autor bei der Firma weControl (Dübendorf, Schweiz) für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung der Projektflüge.

8 Literaturverzeichnis

BROWN, R. AND HWANG, P., 1983: Introduction to random signal analysis and Kalman filtering. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.392-418.

CRAMER, M., 2001: Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Dissertation, Universität Stuttgart.

HAALA, N., 2005: Multi-Sensor-Photogrammetrie. Habilitation, Universität Stuttgart.

LUHMANN, T., 1999: Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 495-501.

SKALLOUD, J., 1999: Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment. ISPRS Workshop on 'Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation' WG III/1, Barcelona 25-26, 1999.