Ein Mikroflugzeug zur genauen Kartierung ohne Passpunkte am Boden

Autor(en): **Skaloud, J. / Rehak, M. / Clausen, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio**

Band (Jahr): **112 (2014)**

Heft 9

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-389509

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Ein Mikroflugzeug zur genauen Kartierung ohne Passpunkte am Boden

Diese Studie soll das Potenzial von Navigationstechnologien aufzeigen. Diese Technologien werden zur Bestimmung der Position und der Ausrichtung von Mikrodrohnensystemen (Micro Aerial Vehicle, MAV) genutzt, deren Gewicht 5 kg nicht überschreitet. Diese MAVs sind sehr flexibel und können sich in unwirtlichen oder für den Menschen unzugänglichen Umgebungen fortbewegen. Die mangelnde Präzision in der Positionsbestimmung und der eigenen Ausrichtung verringert den Wert der von diesen MAVs aufgenommenen Bilder. Dieses Defizit beschränkt ihren Einsatz auf die indirekte Georeferenzierung.

Cette étude vise à démontrer le potentiel de technologies de navigation. Ces technologies servent à déterminer la position et la direction de systèmes de microdrones (Micro Aerial Vehicle, MAV) dont le poids ne dépasse pas 5 kg. Ces MAV sont très flexibles et capables de se mouvoir dans des environnements rudes et inaccessibles pour l'homme. La précision manquante de la détermination de la position et de sa propre direction diminue la valeur des images prises par ces MAV. Ce déficit limite leur utilisation à un géoréférencement indirecte.

Questo studio si prefigge lo scopo di illustrare il potenziale delle tecnologie di navigazione. Queste tecnologie sono impiegate per definire la posizione e l'allineamento dei sistemi di microdroni (Micro Aerial Vehicle, MAV) il cui peso non supera i 5 kg. Questi MAV sono estremamente flessibili e capaci di muoversi in ambienti inospitali o inaccessibili all'uomo. L'imprecisione nella determinazione della posizione e dell'allineamento limita il valore delle immagini scattate dai MAV. Questa carenza limita il loro impiego nella georeferenziazione diretta.

J. Skaloud, M. Rehak, P. Clausen

Einleitung

Ein Grossteil der heutigen MAVs, welche für Orthofotos gebraucht werden, nutzen die Indirekte Sensororientierung. Diese Methode ist weit verbreitet und effektiv, falls die Oberflächenbeschaffenheit automatische Beobachtungen einer grossen Anzahl von Passpunkten zulässt. Diese Methode ist recht präzise. Nichtsdestotrotz hängt die absolute Genauigkeit nicht nur von der Anzahl der Passpunkte am Boden ab, sondern auch von deren Verteilung innerhalb des Bildverbands (Block). Obwohl die Verwendung vieler Passpunkte am Boden dazu beiträgt, Modellverzerrung zu verhindern, stellt deren Errichtung einen grossen Teil der aufzuwendenden Arbeit dar.
Angesichts der Anforderungen bezüglich der Anzahl der Passpunkte am Boden und deren Verteilung sind Befliegungen in einem einzigen Streifen eher unpraktisch, obwohl sie theoretisch möglich sind. Die erreichbare Genauigkeit der Positionsbestimmung mit dem differentiellen kinematischen Trägerphasenverfahren liegt im 2 cm-Bereich. Es ist allgemein bekannt, dass das Hinzufügen dieser sehr präzisen Messungen zu Kameraperspektivenzentren die benötigte Anzahl an Passpunkten am Boden erheblich reduzieren kann (Colomina, 1999). Nichtsdestotrotz ist es möglich, dass Fehler in den Navigationsdaten auftreten (z.B. durch falsche Auflösung der Mehrdeutigkeiten), die schwer zu entdecken sind. Ihr möglicher Einfluss wird für gewöhnlich durch zusätzliche Modellierung (z.B. Verschiebungs- und Drift-Parameter) gemindert. Auf diese Weise werden weniger Passpunkte am Boden benötigt als mit der normalen Aerotriangulation (AT), wo keine luftgestützte Positionskontrolle existiert. Die Wahl dieser Modelle ist etwas willkürlich und stützt sich möglicherweise auf die falsche Annahme, dass erstens falsch bestimmte Mehrdeutigkeiten während des Fluges konstant bleiben und zweitens ihr Einfluss auf den Positionsfehler linear ist. Die GNSS-Signalqualität bei senkrecht startenden und landenden MAVs *(VTOL – Vertical Take-off and Landing)* ist recht pro-

In dieser Arbeit stellen wir ein selbstgebautes MAV vor, welches die vorgenannten Einschränkungen überwinden kann, indem es einen für Vermessungszwecke geeigneten GNSS-Empfänger nutzt. Als Erstes wird die Genauigkeit des Projektionszentrums der Kamera via GNSS berechnet. Weitere Analysen konzentrieren sich dann auf das Einbinden der absoluten und relativen Positionskontrolle aus der Luft und deren Vorteile bei der Kartierung. Wir können nachweisen, dass beide Verfahren effektiv sind: mithilfe der absoluten luftgestützten Positionskontrolle fallen Passpunkte am Boden weg, wogegen bei der relativen Positionskontrolle nur sehr wenige Passpunkte am Boden nötig sind. Das letztere Verfahren ist eine attraktive Alternative im Zusammenhang mit MAVs. Erstens stellt es ein vereinfachtes Verfahren dar, da der Hebelarm zwischen der Kameraperspektive und dem Antennenphasenzentrum nicht bestimmt werden muss. Des Weiteren erlaubt dieses Verfahren den Gebrauch einer Einfrequenz-Antenne mit einem Trägerphasen-GNSS-Empfänger. Auf diese Weise reduzieren sich die Kosten des Systems als auch die Nutzlast, was wiederum Einfluss auf die Flugdauer hat.

blematisch, denn die Qualität der Trägerphasendaten kann durch die Elektronik, Powerkabel, Kommunikationsverbindungen etc. erheblich beeinflusst werden. Daher sind solche vereinfachten Annahmen nicht mehr angemessen. Das ist der Grund, warum wir einen anderen Ansatz suchen, die GNSS Daten zu nutzen.

Relative und absolute luftgestützte Positionskontrolle

Die Einbeziehung der relativen Positionskontrolle aus der Luft ist ein recht neuer Ansatz in der Luftbildkartografie (Blázquez, 2008). Ihr Einsatz auf grossen luftgestützten Plattformen mit sehr genauen IMUs wurde erst kürzlich untersucht (Blázquez and Colomina, 2012). Das Prinzip besteht darin, die relative Orientierung des INS/GNSS-Systems direkt auf die relative Orientierung eines dazu starr befestigten Sensors zu übertragen. Dies findet zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitepochen statt. Obwohl das Konzept primär für die Kombination von INS- und GNSS-Beobachtungen verwendet wird, können nur relative Positionsmodelle in die Bündellösung eingeführt werden. Auf diese Weise kann man zwar die Bündelausgleichung nicht komplett weglassen, aber die Anzahl benötigter Passpunkte am Boden auf ein Minimum reduzieren. Des Weiteren können die Einflüsse der axialen Fehlausrichtung sowie auch der Bias in der Positionsbestimmung vernachlässigt werden. Da die Beobachtungen aus relativen Positionsvektoren zwischen den aufgenommenen Bildern bestehen, werden die zeitabhängigen Bias durch die Differenzbildung entfernt. Hier gilt die Hypothese, dass sich die Bias zwischen zwei Aufnahmen nicht ändern. Dies ermöglicht uns, die Basislinien innerhalb der Befliegungslinien zu beschränken, für welche die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen sehr kurz ist (typischerweise um die 5–10 s). Während dieser Zeit ändert sich die Satellitenkonstellation nur minimal. Wir können nun also das (evtl. vorhandene) Positions-Bias durch Differenzbildung eliminieren, ohne weitere Modellierungen vornehmen zu müssen, die unter Umständen nicht der Realität entsprechen (z.B. ist die Drift innerhalb einer Befliegungslinie nicht linear). Speziell auf die MAVs bezogen, kann das GNSS-Bias nicht nur auftreten, wenn die Mehrdeutigkeiten falsch aufgelöst werden, sondern auch bei instabiler Wetterlage. Des Weiteren können lokale Signalstörungen, verursacht durch die Steuerelektronik des MAV, einen geringeren Signalgeräuschabstand *(SNR)* zur Folge haben. Aus diesen Gründen widmen wir in diesem Bericht der Methode der relativen luftgestützten Positionskontrolle besondere Aufmerksamkeit.

Entwicklung der MAV-Plattform

Das individuelle Design eines senkrecht startenden MAV ermöglicht eine Befestigung aller erforderlichen Geräte, um moderne Photogrammetrie durchzuführen. Die Plattform wurde mit acht bürstenlosen Motoren ausgerüstet, um die Nutzlast und die Redundanz im Falle eines Motorenschadens zu erhöhen. Auf dem MAV sind verschiedenste Sensoren untergebracht. Unter anderem befindet sich auf der Plattform der von der gleichnamigen Gemeinschaft entwickelte Autopilot *Ardupilot APM 2.6,* welcher für die Stabilisierung zuständig ist und den autonomen Flug sicherstellt. Er besteht aus MEMS Gyroskopen und Beschleunigungssensoren, einem dreiachsigen Magnetsensor, einem barometrischen Drucksensor und einem kostengünstigen Einfrequenz-GPS-Empfänger. Das Zusammenwirken all dieser Navigationskomponenten erlaubt eine



Abb. 1: Oktokopter mit Ausrüstung (Durchmesser: 80 cm).

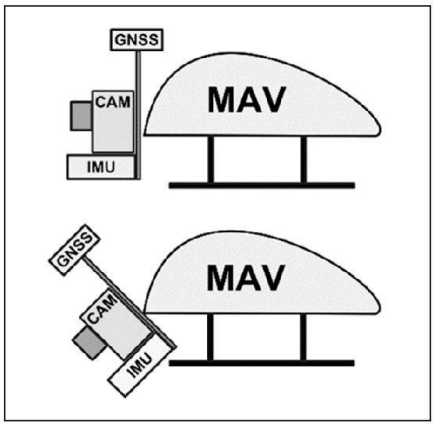


Abb. 2: Schematische Darstellung der stabilisierten Sensorhalterung für zwei unterschiedliche Neigungswinkel.

horizontale sowie vertikale Stabilisierung der Position/Ausrichtung des MAV. Darüber hinaus ermöglicht es Spezialfunktionen wie das Halten einer bestimmten Position, die Rückkehr zum Startplatz oder die Durchführung von Flugmissionen nach vorausgeplanten Trajektorien. Der Rahmen des MAV besteht aus Karbonrohren und Glasfaserplatten (Abb. 1). Besonderes Augenmerk galt der Kamerahalterung. Sie ist servo-betrieben und kreisel-stabilisiert. Sie hält die Kamera während des gesamten Fluges in der Waagerechten (oder in einer ausgewählten Neigung). Zugleich dämpft sie auch die Vibrationen der Motoren. Die Ausrichtung entlang der horizontalen Achse der Kamera kann beliebig ferngesteuert werden. Abbildung 2 zeigt schematisch die verschiedenen Navigationskomponenten und deren Anordnung auf dem MAV.

Sensoren

Die Sony Kamera «NEX-5N» wurde auf dem MAV montiert. Die Qualität als auch die Strapazierfähigkeit dieser Kamera wurden schon mehrfach unter Beweis gestellt, da sie unter anderem auch auf Missionen mit Ultraleichtflugzeugen zum Einsatz kam (Akhtman et al., 2013). Die Kamera misst 111 x 59 x 38 mm und wiegt nur 210 g (nur das Gehäuse ohne das Objektiv). Obwohl sie leicht und klein ist, bietet diese Kamera eine ähnliche Bildqualität, wie sie von grösse-

ren und schwereren *SLR (single-lens reflex)*-Kameras zu erwarten ist. Dank diesem verminderten Gewicht und reduzierter Grösse eignet sich die Kamera bestens für MAV-Anwendungen. Das verwendete Objektiv ist von Sony und hat eine feste Brennweite von 16 mm. Seine optischen Eigenschaften sind für das Gewicht und die Grösse angemessen. Somit bietet sie eine hinreichende Stabilität der Parameter der inneren Orientierung (IO) während eines Einsatzes. Ein für geodätische Zwecke geeigneter GPS/Glonass/Galileo-Mehrfrequenzempfänger von Javad mit einer entsprechenden Antenne wurde eingebaut. Der Empfänger hat eine Abtastrate von 10 Hz und eignet sich für RTK-Messungen. Eine ähnliche Anordnung wurde als Basisstation für die Auswertung differentieller Trägerphasenmessungen aufgestellt.

Datenerfassung

Das Kalibrierungsfeld

Das Kalibrierungsfeld (Abb. 3) wurde für den Zweck dieser Studie errichtet. Es misst 30 m x 20 m und besitzt unterschiedliche Höhendifferenzen von bis zu 2 m. Das Feld wurde mit 90 digital codierten Zielpunkten versehen, welche gleichmässig auf dem Feld verteilt sind. Die genauen Koordinaten von 25 dieser Zielpunkte wurden mit einem Tachymeter bestimmt und dienen als Pass-/Kontrollpunkte am Boden. Mit einer solchen Anordnung erzielten wir eine hohe Redundanz und eine ausgezeichnete Verteilung der Messpunkte in der Bildebene.

Messkampagnen

Es wurden zwei Flüge durchgeführt: an verschiedenen Tagen und mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Der erste Flug diente in erster Linie der Kalibrierung der Kamera. Dabei wurden insgesamt 92 Bilder aufgenommen, und zwar aus zwei unterschiedlichen Flughöhen (5 m und 8 m) und mit verschiedenen Konvergenzwinkeln der Kamera. Der Zweck der Kamerakalibrierung ist die Ermittlung der IO-Parameter. Diese Parameter beinhalten die Bildweite (Kammerkonstante), den Hauptpunktabstand und die Parameter des Bildverzeichnungsmodells, insbesondere diejenigen des Modells der radialen Objektivverzeichnung. Im vorliegenden Beispiel wurden alle Passpunkte am Boden zusammen mit den Bildmessungen ausgewertet, und zwar mit einer Software zur Bündelausgleichung (Lichti & Chapman 1997). Die unebene Oberfläche des Kalibrierungsfeldes, die Änderungen der Konvergenzwinkel der Kamera als auch die unterschiedlichen Flughöhen über dem Feld führten zu einer abnehmenden Korrelation zwischen den IO/EO-Parametern.



Abb. 3: Kalibrierungsfeld an der EPFL.

Das Flugmuster des zweiten Fluges mit einer zum Nadir gerichteten Kamera ähnelte mehr einem traditionellen photogrammetrischen Flug. Hierbei wurden 68 Bilder aus einer Höhe von 10 m aufgenommen. Die folgende Bearbeitungskette ähnelt sehr derjenigen, die in der klassischen Luftbildauswertung mit Unterstützung differentieller Trägerphasen-GNSS-Messungen angewendet wird. Nach der Bildaufnahme und der Bildverarbeitung wurden die Bildmessungen zusammen mit den gemessenen Kamerapositionen in eine Bündelausgleichung eingegeben. Letztere wurden durch eine Interpolation zwischen den 10 Hz GNSS-Lösungen der differentiellen Trägerphasenmessungen gewonnen, wobei die professionelle Software *GrafNav* zum Einsatz kam. Des Weiteren wurden selbst geschriebene *Matlab*-Skripte genutzt, welche die Bilder automatisch den vom Empfänger exportierten Ereignissen zuordnen. Der Hebelarm zwischen der Kamera und der GNSS-Antenne wurde mit einem Messschieber bestimmt. Für die Berechnungen wurden fixe IO-Parameter verwendet, welche schon einige Monate zuvor während einer Selbstkalibrierung ermittelt worden waren.

Wir haben verschiedene Netzausgleichungen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Beobachtungen auf die Kartierungsgenauigkeit im Hinblick auf 22 Kontrollpunkte zu untersuchen. Die Qualität der Positionsbestimmung per GNSS wurde unabhängig überprüft, und zwar hinsichtlich der aus der AT abgeleiteten Kamerapositionen bei Verwendung aller 25 Passpunkte am Boden.

Fallstudien

Die erste Studie ist auf die Methode der indirekten Sensororientierung gerichtet, die beim Kartieren mit MAVs am häufigsten angewendet wird. Obwohl die Vorteile dieses Konzepts unbestritten sind, kann es doch vorkommen, dass die zu kartierende Fläche unzugänglich ist und daher nur eine begrenzte Anzahl an Passpunkten am Boden eingerichtet werden kann, oder dass die Verteilung sehr schlecht ist, sodass nur ein Teil der Fläche abgedeckt wird. Dieser Fall wurde hier simuliert: nur 3 Passpunkte aus ei-

nem Viertel der kartierten Fläche wurden genutzt. Das Resultat der Bündelausgleichung ist in Tab. 1 ersichtlich.
Sie zeigt klar die hohen Restfehler (Residuen), die auf den geringen Abstand der Passpunkte am Boden zurückzuführen sind, welche dann ihrerseits die Kartierungsgenauigkeit im restlichen Bild verringert. Dies ist sehr markant in der Höhenkomponente bemerkbar. Unter idealen Bedingungen, wenn die Passpunkte optimal verteilt sind, sollten diese Residuen nur 3–4 cm betragen. Im vorliegenden Fall sind sie jedoch 2–3 mal höher verglichen mit dem optimalen Szenario mit 25 Passpunkten.

Residuum	X (m)	Y (m)	Z (m)
MAX	0.072	0.073	0.221
MEAN	-0.029	0.012	0.064
RMS	0.038	0.030	0.103

Tab. 1: Zusammenfassung der indirekten Sensororientierung (AT + 3 nahe Passpunkte am Boden) mit 22 Kontrollpunkten.

Die zweite Bündelausgleichung wurde ohne jegliche Passpunkte durchgeführt, wobei nur absolute GNSS-Beobachtungen für die Kameramittelpunktpositionen benutzt wurden. Wie bereits erwähnt, ist die zeitliche und räumliche Stabilität zwischen der Kamera und den Navigationssensoren eine Voraussetzung.

Residuum	X (m)	Y (m)	Z (m)
MAX	0.028	0.043	0.079
MEAN	0.012	0.009	0.019
RMS	0.022	0.010	0.044

Tab. 2: Residuen von 25 Kontrollpunkten mit den per GNSS ermittelten Kamerapositionen ohne Verwendung von Passpunkten am Boden.

Dies wurde durch eine starre Befestigungsvorrichtung zwischen der GNSS-Antenne und der Kardan-Aufhängung der Kamera erreicht. Die Halterung garantiert die zueinander relativen Positionen während des gesamten Fluges bei verschiedenen Geschwindigkeiten (Abb. 4). Die Verteilung der Messpunkte gibt keinen Hinweis auf bestimmte Muster. Somit können wir davon ausgehen, dass keine Synchronisationsprobleme existieren. Diese würden sich nämlich in einem mit der Fluggeschwindigkeit korreliertem Positionsfehler niederschlagen. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung per GNSS wurde mittels AT bestätigt. Diese Messungen wurden in einem separaten Projekt durchgeführt, welches 25 Passpunkte am Boden und die erneut geschätzten inneren Orientierungsparameter einschloss.

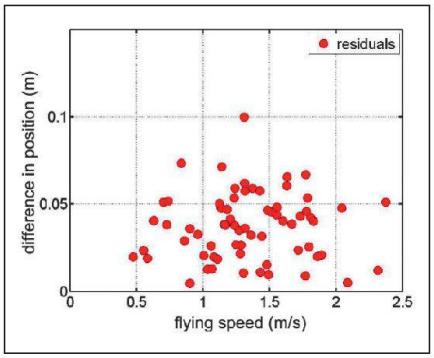


Abb. 4: Unterschiede zwischen den per GNSS bestimmten Kamerapositionen (Vektorlänge) und den mittels AT bestimmten Positionen als Funktion der Fluggeschwindigkeit (indirekte Orientierung mit 25 Passpunkten am Boden).

Die dritte Studie beschäftigte sich mit dem Einfluss eines unerkannten Bias in den per GNSS ermittelten Positionen. Dieses Bias kann verschiedene Gründe haben, im Kontext der MAV etwa falsche Mehrdeutigkeiten. Die Witterungsverhältnisse sowie auch die Elektronik des MAV haben einen negativen Einfluss auf die Signale und führen somit zu einem kleineren SNR. Falls das Bias nicht bemerkt wird, beeinträchtigt es die gemessenen Kamerapositionen und kann unter Umständen eine unerwünschte Verzerrung der Kartierung herbeiführen.
Das zusätzliche Einbeziehen eines Passpunkts am Boden erhöht die Redundanz, obwohl es nicht absolut notwendig ist. Ausserdem trägt es so zu einer besseren (erneuten) Bestimmung der Brennweite bei. Dieser letzte Punkt ist eine zweckmässige Vorsichtsmassnahme, da nicht davon auszugehen ist, dass die Brennweite für die Dauer einer Mission konstant bleibt. Sie muss immer wieder neu bestimmt werden, da sich z.B. die Umweltbedingungen ändern und das Kameraobjektiv nur begrenzte Stabilität aufweist. Beim Vergleich der Tabellen 3 und 2 fällt auf, dass ein unerkannter Bias in den GNSS-Daten zu einem markanten Anstieg der Residuen führte.

Residuum	X (m)	Y (m)	Z (m)
MAX	0.115	0.079	0.150
MEAN	0.032	-0.037	0.047
RMS	0.055	0.046	0.073

Tab. 3: Zusammenfassung der integrierten Sensororientierung in Projekten mit Bias in der Positionsbestimmung per GNSS (AT + 1 Passpunkt am Boden + abs. GNSS + Bias).

Die letzte Ausgleichung wiederholte den ersten untersuchten Fall, in dem die GNSS-Beobachtungen der Kamerastandpunkte mit Bias einer relativen Bearbeitung unterzogen werden. Daher werden die 61 abgeleiteten Beobachtungen zwar aus GNSS-Positionen minderer Qualität entnommen, aber als relative Positionskontrolle aus der Luft eingeführt. Im Vergleich zum dritten Fall sind die Residuen an den Kontrollpunkten (siehe Tab. 4) nun für die horizontale Komponente 5–10 mal kleiner (< 1 cm!) und in der Höhe 2 mal kleiner. Ähnliche Vergleiche lassen sich im Hinblick auf Tab. 1 anstellen.

Residuum	X (m)	Y (m)	Z (m)
MAX	0.012	0.020	0.087
MEAN	0.002	0.000	-0.007
RMS	0.005	0.007	0.036

Tab. 4: Zusammenfassung integrierte Sensororientierung (AT + 3 nahe Passpunkte am Boden + 61 relative GNSS + GNSS Bias) mit 22 Kontrollpunkten.

Schlussbemerkung

Diese Forschungsarbeit hatte als Ziel, neue Ansätze für die Datenerfassung mittels MAV vorzuschlagen und zu untersuchen. Die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung bestätigten die Richtigkeit der vorausgegangenen Entwicklungsarbeit bezüglich der Kamera/GNSS-Integration. Der anspruchsvollste Teil der Sensorintegration und -synchronisation auf dem relativ kleinen und kostengünstigen MAV konnte realisiert werden. Die Halterung isoliert die einzelnen Messgeräte von den auftretenden Vibrationen und hält deren räumliche Abstände konstant. Diese Arbeit zeigt ebenfalls die Vorteile präziser luftgestützter Positionskontrolle im Zusammenhang mit kleinen UAVs. Ähnlich wie in Untersuchungen auf grösseren Plattformen, erlaubt die Einbeziehung der präzisen Messungen der Kamerapositionen des MAV, die Passpunkte am Boden für einen Block von Bildern vollkommen wegzulassen oder zumindest deren Anzahl deutlich zu reduzieren. Die Genauigkeit der Kamerapositionskontrolle beläuft sich auf ca. 2–5 cm, was etwa der kinematischen Genauigkeit eines differentiellen Trägerphasen-GNSS entspricht. Das Prinzip der integrierten Sensororientierung erlaubt eine Kartierung mit cm-Genauigkeit, ohne dass Passpunkte am Boden benötigt werden. Die Ergebnisse sprechen für den Ansatz der integrierten Sensororientierung mit einer minimalen Anzahl von Passpunkten am Boden und relativer Positionskontrolle. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Qualität der Positionsbestimmung per GNSS nicht sehr hoch ist, sei es infolge einer nur geringen Anzahl verfügbarer Satelliten, ihrer sub-optimalen Verteilung oder eines geringen SNR. Im Fall der MAV hat die relative Positionsbestimmung einen weiteren grossen Vorteil: sie erlaubt den Gebrauch eines Einfrequenz-Trägerphasen-GNSS-Empfängers, der wesentlich kleiner und preisgünstiger ist. Künftige Forschungen werden sich auf die erreichbare Genauigkeit der Winkelorientierung (Ausrichtung) der redundanten MEMS IMUs an Bord des MAV konzentrieren.

Referenzen:

Lichti, D. & Chapman, M.A., 1997: Constrained FEM self-calibration. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 63 (9): 1111 – 1119.

Y. Akhtman, A. Garg and J. Skaloud. MAV-based real-time localisation of terrestrial targets with cm-level accuracy: Feasibility study. UAV-g 2011 – Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland, ISPRS Archives XXXVIII-1/C22, 2011.

J. Skaloud, M. Rehak and D. Lichti. Mapping with MAV: Experimental Study on the Contribution of Absolute and Relative Aerial Position Control. European Calibration and Orientation Workshop, Castelldefels, Spain, 2014.

M. Rehak, R. Mabillard and J. Skaloud. A micro-UAV with the capability of direct georeferencing. UAV-g, Rostock, Germany, 2013.

Blázquez, M., 2008. A new approach to spatio-temporal calibration of multi-sensor system. Presented at the ISPRS Congress, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, pp. 481–486.

Colomina, I., 1999. GPS, INS and Aerial Triangulation: what is the best way for the operational determination of photogrammetric image orientation? Presented at the ISPRS Conference Automatic Extraction of GIS Objects Digital Imagery, München.

Dieser Bericht ist eine Zusammenfassung und Übersetzung folgender zwei Artikel:
J. Skaloud, M. Rehak and D. Lichti. Mapping with MAV: Experimental Study on the Contribution of Absolute and Relative Aerial Position Control presented at European Calibration and Orientation Workshop, Castelldefels, Spain, 2014 and M. Rehak, R. Mabillard and J. Skaloud. A micro-UAV with the capability of direct georeferencing. UAV-g, Rostock, Germany, 2013.

Dr. Jan Skaloud
Ing. Martin Rehak
Ing. Philipp Clausen
École Polytechnique Fédérale
de Lausanne
Geodetic Engineering Laboratory (TOPO)
CH-1015 Lausanne
jan.skaloud@epfl.ch
martin.rehak@epfl.ch
philipp.clausen@epfl.ch