

Anforderungen an die Auswertung UAV-gestützter Fernerkundungsdaten

URSULA KIRCHGÄSSNER¹, UWE PUTZE²,

MARIA VON SCHÖNERMARK³ & NORBERT HAALA⁴

Zusammenfassung:

Der Einsatz kleiner, ferngesteuerter Flugzeuge (UAV) bietet sich für die Fernerkundung in vielen Anwendungsbereichen an, da er eine kostengünstige und flexible Datenerfassung mit zeitlich und geometrisch hoher Auflösung verspricht. Am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart wurde in den letzten Jahren ein solches Flugzeug, der Stuttgarter Adler, entwickelt. Für die Fernerkundung wurde es mit verschiedenen Sensoren ausgestattet, welche die besonderen Anforderungen an Kosten und Gewicht erfüllen können.

Zur Unterstützung der Flugführung ist der Stuttgarter Adler mit einem Autopilotensystem ausgestattet. Zur Lagemessung werden Thermalsensoren eingesetzt, welche die Nick- und Rollwinkel des Flugzeugs aus dem Unterschied der Strahlungstemperatur von Himmel und Erdboden abzuschätzen erlauben. Die ermittelten Lagewinkel wurden mit denen einer Inertialmesseinheit verglichen. Anhand eines ersten Testfluges wurde ein Korrekturfaktor für die Winkelberechnung aus den Thermalsensoren ermittelt, unter dessen Verwendung der Schätzwert der Lagewinkel erheblich verbessert werden konnte.

Dennoch genügt die erreichte Genauigkeit nicht den Anforderungen konventioneller Softwarepakete zur automatischen Bündelblockausgleichung. In diesem Artikel wird eine alternative Vorgehensweise zur photogrammetrischen Auswertung der Bilddaten vorgestellt. Aus Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie bekannte Methoden zur Punktextraktion und Punktzuordnung sowie zur Näherungswertbestimmung werden eingesetzt, um eine Georeferenzierung und Orthophotoerstellung zu ermöglichen. Anhand der Bilddaten eines speziell dafür ausgelegten Messfluges wird gezeigt, welche Genauigkeit der geometrischen Auswertung mit Hilfe dieser Vorgehensweise erreicht werden kann.

1) Ursula Kirchgässner, Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, E-Mail: kirchgaessner@irs.uni-stuttgart.de

2) Uwe Putze, Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, E-Mail: putze@irs.uni-stuttgart.de

3) Maria von Schönemark, DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Raumflugbetrieb und Astronautentraining, D-82234 Wessling, E-Mail: maria.schoenermark@dlr.de

4) Norbert Haala, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

1 Einleitung

Für regelmäßige Bildflüge auf kleinen Flächen mit hoher Auflösung, wie sie in vielen Anwendungsbereichen benötigt werden, bietet sich ein unbemanntes Kleinflugzeug (UAV) an, da dies eine kostengünstige und flexible Datenerfassung mit zeitlich und geometrisch hoher Auflösung verspricht. An der Universität Stuttgart wurde der *Stuttgarter Adler* für zwei Aufgaben entwickelt und instrumentiert. Zum einen wird er für Grundlagenforschung im Bereich der winkelabhängigen Reflektanz, der so genannten *bidirektionalen Reflektanzverteilungs-*

funktion (bidirectional reflectance distribution function, BRDF), eingesetzt. Dafür muss ein bestimmtes Gebiet aus verschiedenen Winkeln aufgenommen werden, was durch Spiralflüge ermöglicht wird. Dies erfordert eine über bis zu 15 Minuten gleich bleibende Fluglage. Um die Instrumente auf das Zielgebiet auszurichten, muss der Rollwinkel des Flugzeugs während des Spiralfzugs bekannt sein.

Zum anderen werden Befliegungen zu landwirtschaftlichen und ökologischen Zwecken, wie der Ableitung von Boden- und Pflanzenparametern, durchgeführt. Im *Stuttgarter Adler* wird die Lagemessung aus Gewichts- und Kostengründen mit einer Methode durchgeführt, die nicht auf der Trägheitsnavigation beruht, sondern die Winkel mit Hilfe von Thermalsensoren schätzt. Diese Schätzwerte werden zur Navigation verwendet, genügen aber bisher wegen ihrer Ungenauigkeit weder zur Vororientierung der Bilder für die photogrammetrische Auswertung noch zur Ausrichtung der Kameras auf ein vordefiniertes Zielgebiet. Um die Genauigkeit dieser Schätzwerte zu verbessern und deren Grenzen zu ermitteln, wurde für Testflüge eine Inertialmesseinheit (IMU) in den *Stuttgarter Adler* eingebaut und deren Messwerte wurden mit den Schätzwerten der Thermalsensoren verglichen.

Da das im *Stuttgarter Adler* verwendete System bisher nicht die benötigte Genauigkeit liefert, sollte während der photogrammetrischen Auswertung optional auf die Nutzung gemessener Kamerastationen verzichtet werden. Somit gestaltet sich die Beschaffung von Näherungswerten für die Punktübertragung bei der angestrebten vollautomatischen Aerotriangulation schwierig. Außerdem unterscheidet sich die Fluggeometrie von Standardbefliegungen mit bemannten Flugzeugen aufgrund der Flugeigenschaften sowie der geringen Flughöhe des Kleinflugzeugs. Die Einhaltung von geplanten Standardüberdeckungen während des Fluges ist in der Regel nur bedingt möglich.

Die beim *Stuttgarter Adler* eingesetzten Kameras unterscheiden sich in ihren geometrischen Eigenschaften stark von gewöhnlich zur photogrammetrischen Datenerfassung eingesetzten Instrumenten. Aufgrund der geringen Größe ist die Pixelzahl der Sensoren beschränkt. Um dennoch eine größere Bodenauflösung zu erreichen, besitzen die Kameras einen engeren Öffnungswinkel.

Eine geometrische Auswertung der Luftbilder mit klassischen Softwarepaketen zur automatischen Bündelblocksauflösung ist aus diesen Gründen zunächst nicht möglich. Stattdessen werden aus Anwendungen der Nahbereichsphotogrammetrie bekannte Methoden zur Punktextraktion und Punktzuordnung sowie zur Näherungswertbestimmung eingesetzt. Die von SNAVELY ET. AL. (2006, 2007) entwickelte Methode, 3D-Informationen aus beliebigen Bildsammlungen zu rekonstruieren, werden auf die Daten aus Bildflügen mit dem *Stuttgarter Adler* angewendet, um eine Orientierung der Bilder untereinander zu berechnen. Anschließend werden Stereopunkte gemessen und eine Transformation der Bilder in Weltkoordinaten durchgeführt.

2 Der Stuttgarter Adler

2.1 Plattform

Der *Stuttgarter Adler* ist ein ferngesteuertes zweimotoriges Kleinflugzeug, das im Rahmen zweier Studienarbeiten (ALT & SCHWARZBACH 2004) speziell für die multispektrale

Fernerkundung entworfen wurde. Mit zwei elektrischen Antrieben und einem maximalen Startgewicht von 25 kg erreicht es eine Flugzeit von bis zu 30 Minuten. Es wurde für Messflüge mit einer Fluggeschwindigkeit von 10 – 20 m/s in einer Höhe von 300 m ausgelegt.

2.2 Autopilot

Zur Durchführung von Bildflügen verfügt der *Stuttgarter Adler* über einen Autopiloten, der in der Lage ist, das Flugzeug anhand eines vordefinierten Flugplans zu steuern. Hierfür kommt das Open-Source Projekt „Paparazzi“ zum Einsatz (BRISSET 2006). Bei diesem Projekt handelt es sich um ein kostengünstiges, offenes System, das von seiner Entwickler- und Nutzergemeinde stetig weiterentwickelt wird. Neben der Hardware und Flugsoftware enthält das System eine umfangreiche Bodenstationssoftware.

Um die Lage des Flugzeugs in Relation zum Horizont zu bestimmen, verwendet das System paarweise angeordnete Thermosensoren. Dazu werden zwei Sensorpaare, wie in Abb. 1 (links) dargestellt, über Kreuz horizontal angeordnet. Durch die deutliche Temperaturdifferenz zwischen Himmel und Erdboden können diese Sensorpaare ein Signal liefern, das abhängig von der Lage des Sensors gegenüber dem Horizont ist. Eine waagrechte Fluglage führt zu einem Temperaturgleichgewicht zwischen beiden Seiten der horizontal angeordneten Sensorpaare, während eine Abweichung davon zu einer Temperaturdifferenz innerhalb der Sensorpaare führt. Durch eine gekreuzte Anordnung zweier Sensorpaare kann das System Roll- und Nickbewegungen des Flugzeuges unterscheiden.

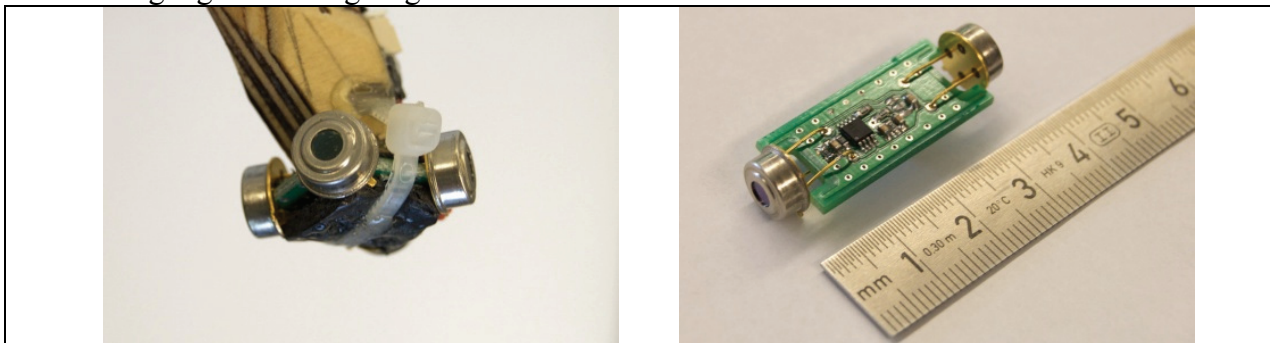


Abb. 1: Thermosensorpaare, horizontal (links) und vertikal (rechts)

Ein drittes, vertikal orientiertes Sensorpaar wie Abb. 1 (rechts) liefert einen Kontrastwert zwischen Erdboden und Himmel, der als Skalierungsfaktor für eine Winkelabschätzung herangezogen wird. Diese geschätzten Roll- und Nickwinkel werden als Regelgröße des Flugreglers verwendet. Gegenüber einem Kreiselssystem bietet dieses Verfahren neben der geringen Komplexität und niedrigen Kosten ein sehr robustes System, da die Thermalsensoren im Gegensatz zu einem Kreisel keine Drift aufweisen. Ein Nachteil ist allerdings, dass die benötigte Temperaturdifferenz von etwa 8 K zwischen Erdboden und Himmel bei bestimmten Wetterbedingungen, z.B. beim Auftreten relativ warmer Wolken, nicht erreicht wird.

2.3 Instrumente

Die Missionsnutzlast besteht wahlweise aus drei Kameras im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich (VIS/NIR) sowie einem Spektrometer, oder aus einer thermischen Infrarotkamera in Kombination mit einer der Kameras im sichtbaren Spektralbereich. Technische

Daten zu den Instrumenten sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die VIS/NIR-Kameras haben bei einer Brennweite von 17 mm, einer Pixelgröße von 4,65 μm und einem Bildformat von 1280 x 1024 Pixeln einen sehr schmalen Öffnungswinkel, um eine hohe Bodenauflösung zu ermöglichen. Bei einer Flughöhe von 300 m wird eine Pixelgröße am Boden von ca. 10 cm erreicht. Für die in Kapitel 4 präsentierte Untersuchung wurden Aufnahmen der Kamera mit rotem Filter verwendet.

Tab. 1: Nutzlastinstrumente

	VIS/NIR Kameras	Spektrometer	TIR Kamera
Hersteller und Modell	Vision Components GmbH VC4068	Avantes AvaSpec 128	DIAS Infrared GmbH Pyroview 320L Compact
Sensor	1280 x 1024 Pixel CCD	128 Pixel Photodioden Array	320 x 240 Pixel ungekühltes Bolometer
Spektralbereich	520, 630, 880 nm	400–1000 nm	8–14 μm
Blickwinkel (FOV)	ca. 20° x 16°	ca. 0,57° x 0,29°	30 x 23°
Gewicht	460 g pro Kamera	150 g	1600 g ohne PC

3 Messflüge

3.1 Bildflug

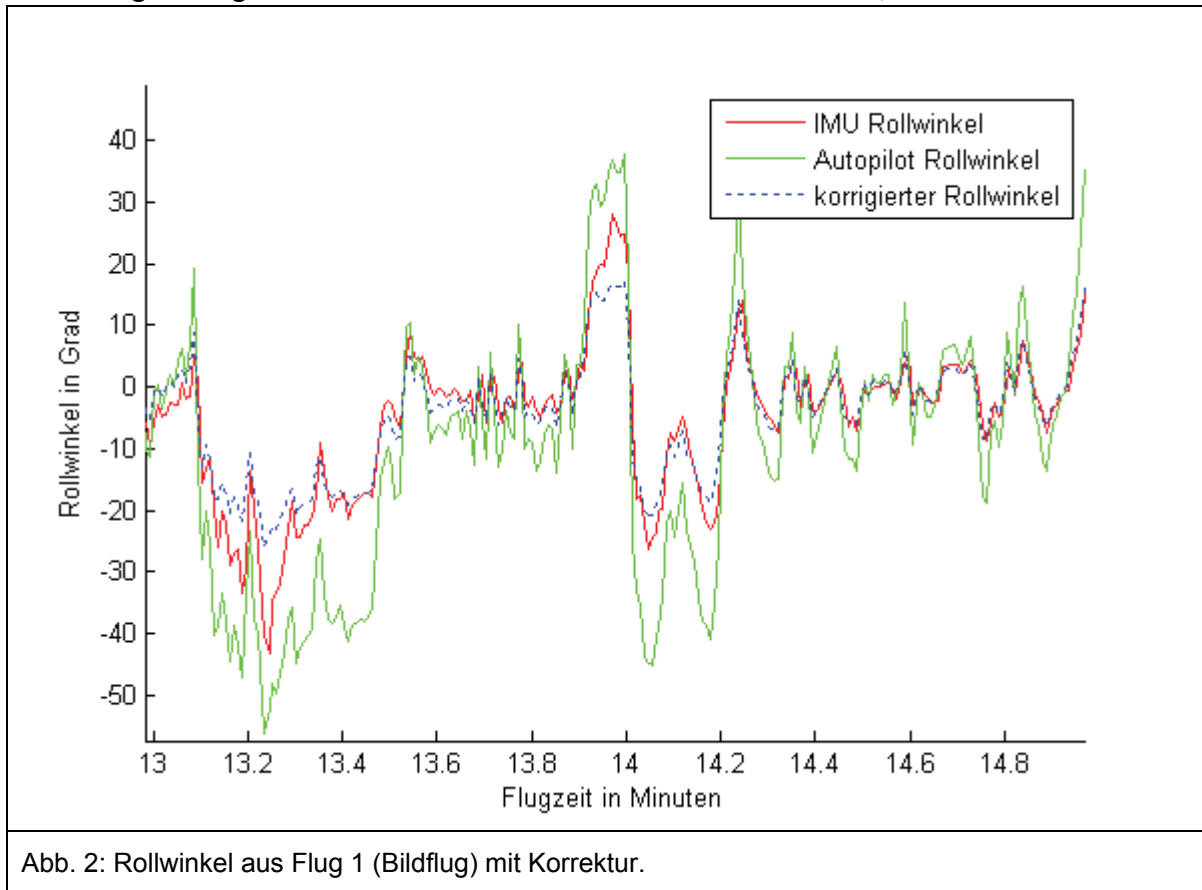
Am 20. April 2010 wurde über einer Fläche von ca. 200 m x 400 m ein Bildflug mit 3 Streifen durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 65 Bilder aufgenommen. Auf der Fläche waren 43 jeweils 25 cm x 25 cm große, weiße Signaltafeln ausgelegt. Die Objektkoordinaten der signalisierten Punkte wurden mit statischer differentieller GPS Phasenbeobachtung bestimmt, die Genauigkeit der Objektpunkte lag damit im Bereich von 1 cm in der Lage und 2 cm in der Höhe.

3.2 Lagewinkel

Zur Evaluierung der Schätzwerte für Roll- und Nickwinkel aus den Messungen der Thermosensoren wurde ein Vergleich mit einer inertialen Messeinheit (IMU) vom Typ „MTi-G“ der Firma „Xsens Technologies B.V.“ angestellt. Bei dieser IMU handelt es sich um ein kompaktes, integriertes System basierend auf MEMS-Sensoren, welche Beschleunigungen und Drehraten messen, sowie einem GPS Empfänger. Zusätzlich verfügt die IMU über ein 3D-Magnetometer, ein Barometer und einen Temperatursensor. Ein integrierter Mikroprozessor wendet eine Kalmanfilterung an, um die dreidimensionale Lage und Position in Echtzeit zu berechnen. Die Genauigkeit der Roll- und Nickwinkel wird vom Hersteller mit 1 ° quadratischer Mittelwert (QMW) angegeben (XSSENS TECHNOLOGIES B.V. 2009).

Mit den Daten des oben beschriebenen Bildflugs wurden die Rollwinkel der beiden Systeme Autopilot und IMU verglichen. Demnach wurde der Rollwinkel durch den Autopiloten im Mittel um den Faktor 2,16 zu groß geschätzt. Der QMW-Wert der Differenz zwischen dem von IMU und Autopilot gemessenen Rollwinkel beträgt 11,4 °. Da die geschätzten Winkel proportional zum Skalierungsfaktor des vertikalen Thermosensorpaares sind, wurde hier ein Korrekturfaktor eingeführt, welcher die geschätzten Werte denen der IMU angleicht. Die Messwerte und die

korrigierten Werte sind anhand eines Flugabschnitts in Abb. 2 dargestellt. Der Mittelwert der Abweichung verringert sich durch den Korrekturfaktor zunächst auf $6,2^\circ$.



Nachdem der Korrekturfaktor im Autopiloten eingeführt war, wurde ein weiterer Flug mit IMU durchgeführt. Der Rollwinkel von IMU und Autopilot unterscheidet sich dann im Mittel noch um $3,8^\circ$. Der Korrekturfaktor wird automatisch auch auf den Nickwinkel angewendet, da dieser derselben Skalierung durch das vertikale Thermopaar unterliegt. Hier besteht allerdings außer der Skalierung offensichtlich noch ein Versatz zwischen den Messwerten. Dieser ist bedingt durch den Einbau der Sensoren im Flugzeug. Nachträglich wurde festgestellt, dass auch der Rollwinkel einbaubedingt einen Versatz zwischen der IMU und den Autopilotenwerten aufweist. In der letzten Zeile von Tab. 2 ist daher für Flug 1 eine neue Winkelkorrektur angegeben, bei welcher ein Versatz von $-5,7^\circ$ zwischen den Rollwinkeln von Autopilot und IMU berücksichtigt wurde. Hierdurch verbessert sich die Genauigkeit auf $5,1^\circ$ RMS. Die unverändert gebliebenen Werte sind in Grau dargestellt.

Die erreichbare Genauigkeit der Winkelmessung mit den beschriebenen Thermopaaren liegt somit bei etwa 5° . Dies genügt nicht als Vororientierung für die Auswertung der Luftbilder in konventionellen Softwarepaketen. Aber die Instrumente können voraussichtlich exakt genug ausgerichtet werden, um ein vordefiniertes Zielgebiet im Blickfeld zu behalten, wie für die Messung der BRDF erforderlich.

Tab. 2: Winkelgenauigkeit mit Thermopaaren

	Ermittelter Korrekturfaktor	QMW der Rollwinkel-differenz	Versatz zwischen Rollwinkeln	RMS der Rollwinkel-differenz nach Korrektur	Versatz zwischen Nickwinkeln	QMW der Nickwinkel-differenz	QMW der Nickwinkel-differenz nach Korrektur
Flug 1	2,16	11,4279 °	--	6,1797 °	13,5861 °	15,693 °	3,1589 °
Flug 2	--	3,8027 °	2,4818 °	2,8812 °	7,3791 °	7,8561 °	2,7793 °
Flug 1 neu	1,80	11,4279 °	-5,7464 °	5,1242 °	13,5861 °	15,693 °	3,1589 °

4 Geometrische Auswertung der Bilddaten

Die geometrische Auswertung der Bilddaten durch eine automatische Bündelblockausgleichung erfolgt zunächst durch das Programmsystem Bundler. Dieses System wurde innerhalb des Projektes Photo Tourism entwickelt (Snively et. al. 2006), das mittlerweile in die 3D Photoverwaltungssoftware Photosynth von Microsoft aufgegangen ist. Photosynth erlaubt es seinen Nutzern Bildersammlungen eines Objekts ins Netz laden, die nach der Prozessierung mit einem Online-Bildbrowser in 3D betrachtet werden können. Die in Bundler realisierte näherungswertfreie Bündelblockausgleichung beruht zunächst ausschließlich auf Verknüpfungspunkten. Für die Merkmalsberechnung und Zuordnung der Verknüpfungspunkte wird der SIFT Algorithmus (Lowe, 2004) eingesetzt. Durch die Beschränkung der Beobachtungen auf Verknüpfungspunkte beziehen sich die berechneten äußeren Orientierungen der Kamerastandpunkte zunächst auf ein Modellkoordinatensystem. In der zur Auswertung der Adler-Bilder realisierten Implementierung erfolgt der Übergang in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem entweder basierend auf GPS-Messungen der Kamerastandpunkte oder durch Stereomessung von Passpunkten. Dadurch kann jeweils eine 7-Parametertransformation vom Modell- ins Objektkoordinatensystem bestimmt werden.

Abb. 3 zeigt die Entzerrung des aufgenommenen Bildblocks mit den automatisch berechneten Bildorientierungen nach der Transformation in das Objektkoordinatensystem. Überlagert sind die Positionen der signalisierten Punkte, die zur Kontrolle des Ergebnisses verwendet wurden. Die Entzerrung erfolgt dabei zunächst durch Projektion auf eine ausgleichende Ebene, die aus den 3D Koordinaten der Verknüpfungspunkte bestimmt wurde. Dies ist zunächst für eine Kontrolle der angestrebten Flächenbefliegungen im Feld ausreichend.

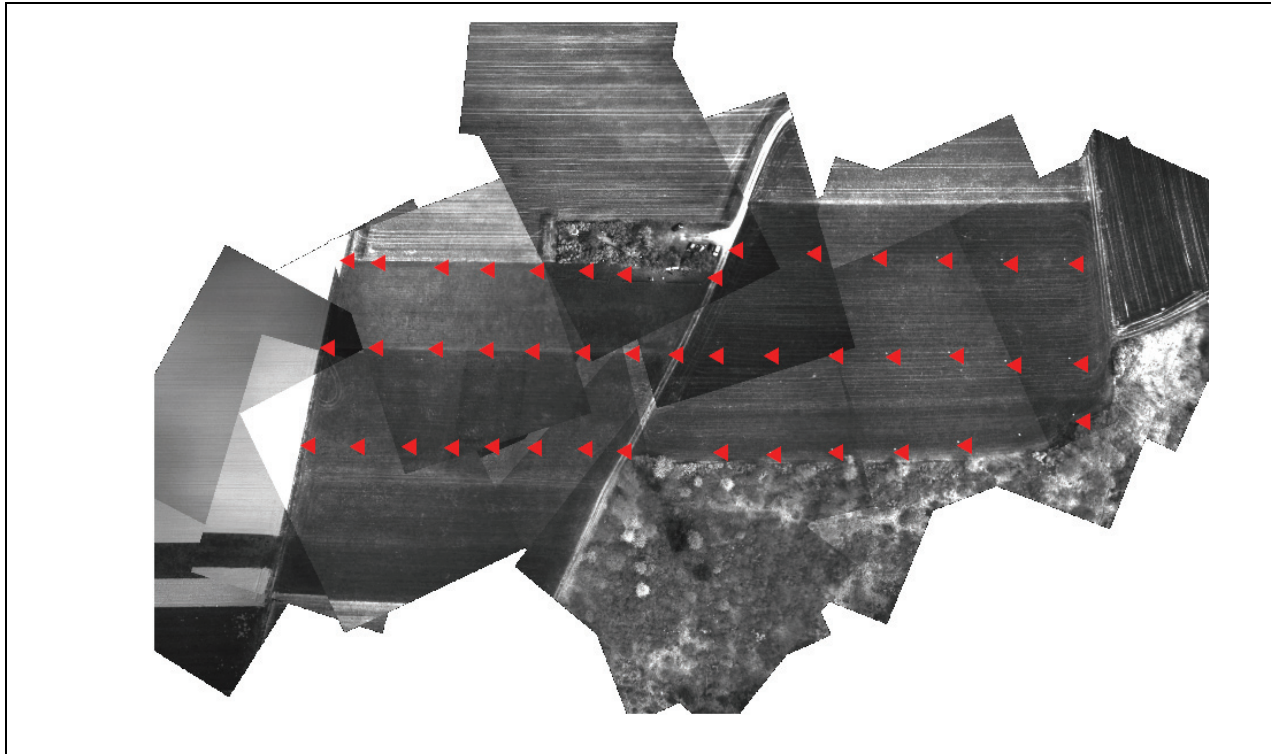


Abb. 3: Entzerrter Bildverband mit verfügbaren Passpunkten

Eine weitergehende geometrische Auswertung der Bilddaten einschließlich einer integrierten Kamerakalibrierung erfolgte mit dem Programmsystem DGAP (STALLMANN 2008), wobei hierfür die zunächst berechneten Orientierungsparameter als Näherungswerte verwendet wurden.

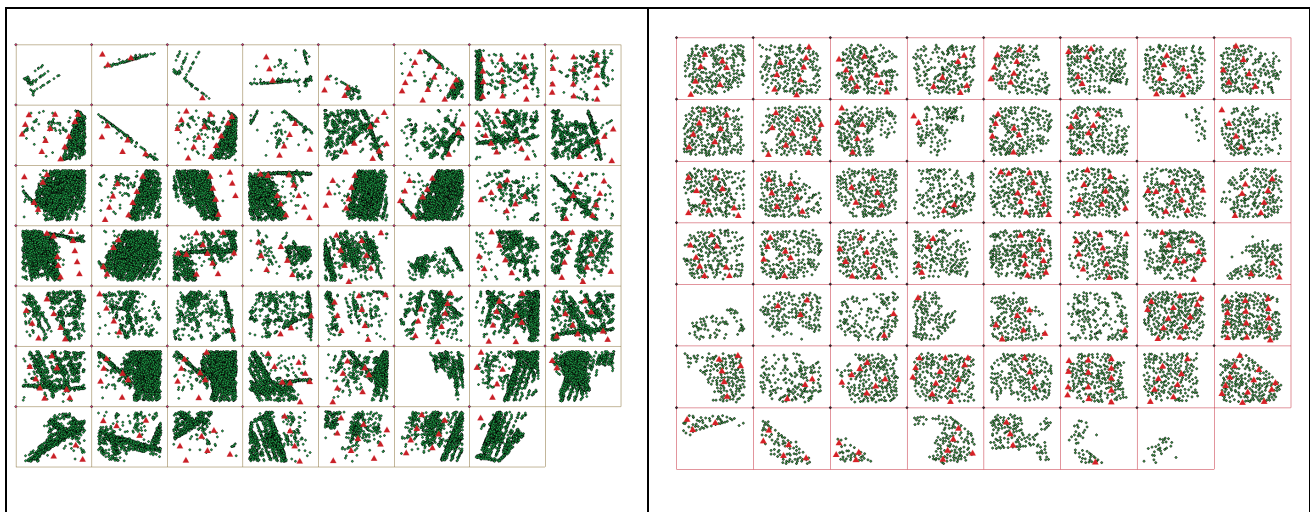


Abb. 4: Verteilung der Verknüpfungspunkte aus der automatischen Aerotriangulation für Programmpakete Bundler (links) und MATCH-AT (rechts)

Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Abb. 4 dargestellt. Die grünen Punkte repräsentieren die in den einzelnen Bildern des orientierten Blocks vorhandenen Verknüpfungspunkte, als rote Dreiecke sind die Positionen der signalisierten Punkte dargestellt. Auf der linken Seite der Abb. 4 sind die Verknüpfungspunkte der Bundler-Software dargestellt, rechts ist analog dazu das Ergebnis der automatischen Verknüpfungspunktbestimmung für die Software MATCH-AT (SIGLE & HEUCHEL 2001) abgebildet. Im Gegensatz zur Prozessierung mit Bundler war für diese Prozessierung die Bereitstellung von Näherungswerte für die Bildorientierungen erforderlich, die jedoch bei Standardbildflügen in erforderlicher Genauigkeit bereits aus Daten der Flugplanung zur Verfügung stehen. Die auf den SIFT-Deskriptoren beruhende Zuordnung in Bundler ermöglicht eine vollkommen näherungswertfreie Auswertung. Abb. 4 (links) zeigt allerdings eine teilweise unregelmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte. Im Gegensatz dazu sind die durch MATCH-T automatisch erzeugten Verknüpfungspunkte in Abb. 4 (rechts) regelmäßig verteilt. Insgesamt ergibt sich dadurch auch eine etwas höhere Genauigkeit, die Standardabweichung (RMS) der Objektkoordinaten (innere Genauigkeit) ergibt sich für Bundler zu $X=0.056\text{m}$, $Y=0.048\text{m}$ $Z=0.383\text{m}$, für MATCH-AT $X=0.035\text{m}$, $Y=0.024\text{m}$, $Z=0.212\text{m}$. Im Rahmen der Selbstkalibrierung wurden in der Bündelblockausgleichung lediglich radialsymmetrische Verzeichnung der Kamera bestimmt.

5 Ausblick

Die für BRDF-Messungen erforderliche konstante Fluglage kann für die IMU problematisch sein, da diese bei Bewegungen mit geringer Dynamik die Kreiseldrift nur unzureichend kompensieren kann. Die Winkelmessung mit Thermosensoren, die keine Drift aufweisen, könnte für die Einhaltung solcher Fluggeometrien von Vorteil sein. Ob die erreichte Verbesserung der geschätzten Winkel zur kontinuierlichen Ausrichtung der Instrumente auf ein Zielgebiet ausreicht, wird in weiteren Bildflügen mit spiralförmiger Geometrie gezeigt werden.

Das im Programm Bundler verwendete Verfahren eignet sich zur Näherungswertfindung für die geometrische Auswertung von Bilddaten unkonventioneller Fluggeometrien bis hin zu völlig unstrukturierten Bildsammlungen. Dies ermöglicht die Aerotriangulation von Luftbildern völlig ohne Vororientierung durch eine IMU. Gegebenenfalls kann das Ergebnis durch eine Weiterverarbeitung mit klassischen Programmpaketen verbessert werden.

6 Literaturverzeichnis

- ALT, B., SCHWARZBACH, M., 2004. "Auslegung eines Modellflugzeuges fuer die Fernerkundung". Studienarbeit, Universitaet Stuttgart, Institut für Raumfahrssysteme. IRS-04-S35.
- BRISSET, P., 2006. "The Paparazzi solution". In Micro Air Vehicle Conference 2006. URL www.recherche.enac.fr/paparazzi/papers_2006/mav06_paparazzi.pdf.
- LOURAKIS, M.I.A., A.A. ARGYROS, 2004. The Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. Tech. Rep. 340, Inst. of Computer Science-FORTH, Heraklion, Crete, Greece. URL <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba>.

- LOWE, D. 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints In: International Journal of Computer Vision. Vol. 60, No. 2, pp. 91-110.
- SIGLE, M., HEUCHEL, T. 2001: MATCH-AT: Recent Developments and performance, Photogrammetric Week 01, pp. 189-194.
- SNAVELY, N., SEITZ, S., SZELISKI, R. 2006: Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006).
- SNAVELY, N., SEITZ, S., RICHARD SZELISKI. Modeling the World from Internet Photo Collections. International Journal of Computer Vision, 2007.
- STALLMANN, D. DGAP Notes, 2008. URL <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/openbundle/index.html>
- XSENS TECHNOLOGIES B.V., "MTi-G User Manual and Technical Documentation", Document MT0137P, Revision G, 27 May 2009.