

Fusion von 3D-Indoor- und Outdoor-Daten am Beispiel des Luftbildkamarasystems MACS und des Innenraum-Positionierungssystems IPS

Magdalena Linkiewicz, Björn Piltz, Adrian Schischmanow, Karsten Stebner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin- Adlershof
eMail: (Magdalena.Linkiewicz; Bjoern.Piltz; Adrian.Schischmanow;
Karsten.Stebner)@dlr.de
URL: <http://www.dlr.de>

Zusammenfassung. In dem vorliegenden Beitrag wird die Fusion von Indoor- und Outdoor-Punktwolken am Beispiel des luftgestützten Kamerasystems MACS und des Innenraum-Positionierungssystems IPS dargestellt. Dazu wurden für das Bürogebäude des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof sowohl die Außenhülle als auch die Innenräume optisch erfasst. Mit Hilfe eines kombinierten Passpunktfeldes wurden die resultierenden diskreten Raumpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Die geometrische Genauigkeit des erstellten 3D-Modells wurde anhand von punktuellen Messungen mit einem Laserentfernungsmessgerät validiert.

1 Einleitung

Für verschiedene Anwendungen wie Bauwerksinspektion, 3D-Dokumentation, Vermisstenortung und Simulation der energetischen Effizienz ist es wünschenswert, über vollständige geometrische 3D-Modelle von Gebäuden zu verfügen (1)(2). Hierunter versteht man ein Modell, das eine Abbildung sowohl der Innenräume als auch der Gebäudeaußenhülle beinhaltet.

Obwohl einige Systeme bereits in der Entwicklung sind, stellt die stufenlose Verbindung von Outdoor- und Indoor-Daten immer noch einen Gegenstand aktueller Forschung dar (3). Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) werden derzeit zwei Systeme zur Gewinnung von geometrischen Daten mittels optischer Technologien entwickelt. Das luftgestützte Modular Aerial Camera System (MACS) übernimmt hierbei die Aufnahme des äußeren Erscheinungsbildes der Gebäude, während das Integrated Positioning System (IPS) Daten der Innenräume erfasst.

In diesem Beitrag wird die Fusion von Punktwolken, die mit beiden Sensorsystemen erzeugt wurden, demonstriert. Die diskreten Raumelemente werden unter Zuhilfenahme eines kombinierten Passpunktfeldes in ein gemeinsames Koordinatensystem übertragen. Anschließend wird die dabei erzielte geometrische Genauigkeit der Datensätze in sich und zueinander evaluiert.

2 Modular Aerial Camera System (MACS)

Modular Aerial Camera System (MACS) bezeichnet eine Familie von hochspezialisierten Luftbildkameras des DLR, die auf einer Vielzahl von Trägerplattformen vom Strahlflugzeug bis hin zur unbemannten Drohne eingesetzt werden kann. Mit ihrem modularen Aufbau und den verwendeten fortschrittlichen optischen Technologien können die Vertreter der MACS-Familie an eine Vielzahl von Anwendungsfällen angepasst werden. Verschiedene Konfigurationen, u.a. mit multispektraler und Thermalsensorik wurden bereits in mehreren Projekten erfolgreich eingesetzt, etwa bei der Kartierung des Himalaya (MACS-HALE)(7) oder bei der Unterstützung von Rettungsteams im Katastropheneinsatz (MACS-SaR)(4). Abbildung 1 zeigt verschiedene Auslegungen des MACS.

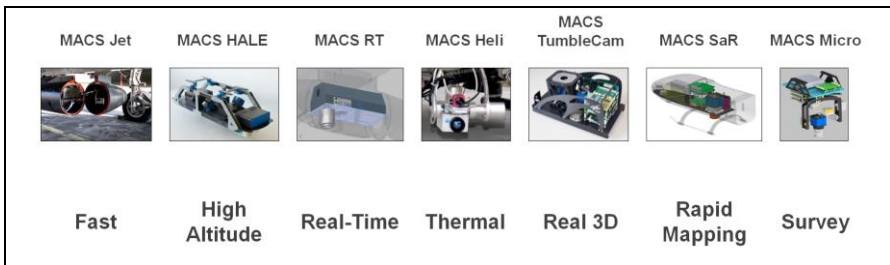


Abb. 1. Verschiedene Auslegungen des MACS

Für Rekonstruktion der äußeren Gebäudehülle wurde ein MACS-Aufbau mit senkrecht- und schrägblickenden multispektralen Sensoren verwendet (MACS-Oblique)(5). Das System verfügt über fünf synchron auslösende Kameraköpfe mit einer Auflösung von jeweils 4864x3232 bei 16 Bits pro Farbkomponente. Die drei senkrecht schauenden Kameras besitzen hierbei unterschiedliche Brennweiten (2 x 70 mm, 1 x 50 mm). Dabei überlappen sich die Aufnahmebereiche der Telekonfiguration, die zur Erstellung hochauflöser weiträumiger digitaler Oberflächenmodelle (DOMs) Verwendung findet (DOMCam1, DOMCam2). Zusätzlich überdecken sich die Sichtfelder der Teleobjektive mit dem der Weitwinkelkonfiguration (GeoCam). Dadurch vereinfacht sich die Lage- und Positionsbestimmung mittels klassischer Aerotriangulation, da diese pro Befliegung nur einmal für die GeoCam berechnet werden muss, während die relative Ausrichtung der DOM-Kameras anhand der konstruktiv bedingten relativen Orientierung direkt abgeleitet werden kann. Die Schrägaufnahmen werden von zwei 70mm-Kameramodulen realisiert (ObliqueCamV, ObliqueCamR). Die ObliqueCamR ist hierbei um 30° quer zur Flugrichtung zur rechten Seite angestellt. Die ObliqueCamV ist dagegen um 40° in Flugrichtung geneigt. Dadurch werden die Fassaden links und frontal zur Flugrichtung erfasst. Folglich kann eine vollständige Oblique-Aufnahme mit einer alternierenden Befliegung gewährleistet werden. Abbildung 2 zeigt die Kameraanordnung der MACS-Oblique.



Abb. 2. Aufbau des MACS-Oblique.

3 Integrated Positioning System (IPS)

Das Integrated Positioning System ist speziell für die Echtzeit-Eigenverortung und 3D-Kartierung in unbekanntem Indoor- und Outdoor-Umgebungen entwickelt worden, bei denen externe Verortungsinfrastruktur, z.B. Satellitenpositionierung (GNSS), Drahtlosnetzwerken (Wi-Fi), nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung steht (Abb. 3). Vorbild für das Konzept zur Eigenverortung ist der menschliche Orientierungssinn. Seh- und Gleichgewichtssinn werden mittels einer Stereokamera und einer inertialen Messeinheit (IMU) sensorisch nachgebildet, die Sensordaten in Echtzeit verarbeitet und fusioniert (6). Das Ergebnis sind Position und Lage im Raum, beschrieben durch die sechs Freiheitsgrade der äußeren Orientierung (6DoF). Aus den Einzelmessungen wird über die Laufzeit eine Trajektorie, d.h. der zurückgelegte Weg, abgeleitet. Bei Vorhandensein von GPS oder optischer Marker werden diese in die Navigation einbezogen. Damit werden die Kameraposen in Echtzeit in ein übergeordnetes lokales geodätisches oder globales (z.B. GPS) Koordinatensystem überführt. Aus den Stereobildern werden Tiefenbilder berechnet und mit den Navigationsdaten zu Punktwolken zusammengesetzt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Ansätzen ist ein Post-Processing damit nicht zwingend erforderlich, falls die Genauigkeitsanforderungen der Anwendungen bereits durch die IPS-Verortungsgenauigkeit (0,2% der zurückgelegten Wegstrecke) erreicht werden.



Abb. 3. IPS-Funktionsdemonstratoren

4 Kombiniertes Testpunktfeld

Zur Registrierung und Kontrolle der Datensätze aus beiden Aufnahmesystemen dient als einheitlicher Bezugsrahmen das Landeskoordinatensystem ETRS89 mit ellipsoidem Höhenanschluss. Gleichzeitig stellt das gewählte Referenzsystem sicher, dass auch zukünftige Datensätze über gemessene Passpunkte außerhalb des Gebäudes konsistent zu aktuellen Datenbeständen bleiben. Als Passpunkte werden dabei Schachtdeckelmitten und Bordsteinecken außerhalb sowie AprilTags innerhalb des Gebäudes verwendet (Abb. 4)(7). AprilTag ist ein 2D-Barcode-System ähnlich den bekannten QR-Codes, das sich besonders fürs maschinelle Erkennen eignet.

Die Anlage des Referenzfeldes erfolgte vor Beginn der Datenerfassung in mehreren Teilschritten. Zunächst wurden an den Grenzen des Messgebietes Anschlusspunkte vermarkt und mittels GNSS-Verfahren unter Nutzung des erdgestützten Positionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) mit einer Lagegenauigkeit von 1-2 cm und Höhengenaugigkeit von 2-3 cm bestimmt. Anschließend folgte die tachymetrische Aufnahme der Passpunkte im Außenbereich. Hierzu wurden mindestens vier Anschlusspunkte für jeweilige freie Stationierungen pro Standpunkt verwendet. Während dieser Aufnahme erfolgte parallel die Bestimmung von Anschlusspunkten für die Vermessung im Gebäude. Bei geöffnetem Fenster wurden diese auf den Fensterbänken innenliegend so vermarkt, dass sie für freie Stationierungen im Gebäude mit ebenso mindestens vier Anschlusspunkten flexibel verwendet werden konnten. Insgesamt wurden für die aktuellen und zukünftigen Untersuchungen rund 50 Passpunkte außerhalb und innerhalb des Gebäudes mit einer absoluten Genauigkeit im Bereich der GNSS-Güte und einer relativen Genauigkeit im Bereich von wenigen Millimeter bestimmt.



Abb. 4. AprilTags

5 Datenprozessierung und -fusion

Zur dreidimensionalen Modellierung der äußeren Hülle des DLR-Bürogebäudes wurden insgesamt 100 RGB-Bilder der MACS-Oblique mit der Software AgiSoft PhotoScan prozessiert. Die Bodenauflösung der Bilder beträgt rund 10 cm. Als

Eingangswerte in die Bündelblockausgleichung gehen drei terrestrisch vermessene Vollpasspunkte, die inneren Orientierungen der Kameras sowie die Näherungswerte der äußeren Orientierung ein. Zwischen den Aufnahmen wurden 0,7 Mio. Verknüpfungspunkte automatisch gemessen. Der Reprojektionsfehler nach der Ausgleichung beträgt im Mittel ein halbes Pixel über alle Verknüpfungspunkte. Zur Überprüfung der absoluten Genauigkeit wurden abschließend mehrere Kontrollpunkte gemessen. Die absolute Abweichung in der Lage beträgt dabei 3 cm und in der Höhe 3,5 cm. Aus dem triangulierten Datensatz wurde anschließend eine dichte Punktwolke berechnet. Diese besteht aus 21 Mio. 3D-Punkten. Ein Teil der Fassaden war verglast und durch Spiegelungen somit schwieriger zu erfassen. Hier betrug die Streuung der Punkte ca. 25 cm.

Zum Modellieren der inneren Gebäudehülle wurde das System IPS-Mini aus dem Jahr 2012 verwendet. Der Abstand der Stereobasis beträgt bei diesem System 20 cm und ist geeignet für visuelle Odometrie und die dreidimensionale Erfassung von Objekten bis zu einer Entfernung von ca. 10 m. Auf einem Flur des Testgebäudes wurde das IPS-Mini per Hand mit Schrittgeschwindigkeit getragen. Die Messdauer betrug zweieinhalb Minuten. In dieser Zeit wurde eine Strecke von 78 m zurückgelegt und 2500 Stereo-Graustufenbilder erzeugt (Abb. 5). Die Bodenauflösung der Bilder beträgt 0,47 cm.

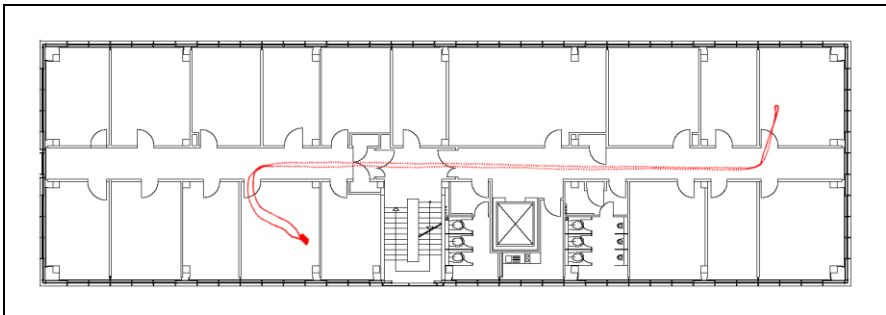


Abb. 5. IPS-Trajektorie im Testgebäude

Da das für den Testlauf verwendete IPS-Modell die platzierten AprilTags noch nicht automatisch detektieren konnte, musste die Prozessierung der Punktwolke extern auf Basis des erfassten Bildmaterials erfolgen. Daher wurde eine Teilmenge von 480 Bildern mit der Software Pix4D prozessiert, die im Gegensatz zu PhotoScan automatisch generierte Listen mit aus den AprilTags abgeleiteten Passpunkten einlesen kann. Die Erstellung der Listen mit den 3D-2D-Korrespondenzen erfolgt hierbei mit einer frei verfügbaren Software, welche von den Erfindern des Markierungssystems zur Verfügung gestellt wird. Das darin implementierte Detektionsverfahren arbeitet mit einer Kombination aus Binarisierung mit adaptiven Schwellwerten, Segmentierung und Kantendetektion und ermöglicht eine subpixelgenaue Lokalisierung der Tags im Bild.

Als Eingangswerte in die Bündelblockausgleichung gehen daraufhin die IPS-Navigationsdaten, die innere Orientierungen der Kameras sowie vier terrestrisch

vermessene Vollpasspunkte zur Aufhängung im georeferenzierten Gebäudekoordinatensystem ein. Zwischen den Aufnahmen wurden 2,3 Mio. Verknüpfungspunkte automatisch bestimmt. Der Reprojektionsfehler beträgt hierbei 0,313 Pixel. Anschließend wurde die 3D-Punktwolke aus den Bilddaten berechnet. Diese besteht aus 1,3 Mio. Punkten (Abb. 6).



Abb. 6. IPS-Mini 3D-Punktwolke.

Die beiden Punktwolken von MACS-Oblique und IPS-Mini wurden mit dem frei verfügbaren Programm CloudCompare zusammengefügt. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis mit der visuell konsistenten Lage der fusionierten Datensätze.

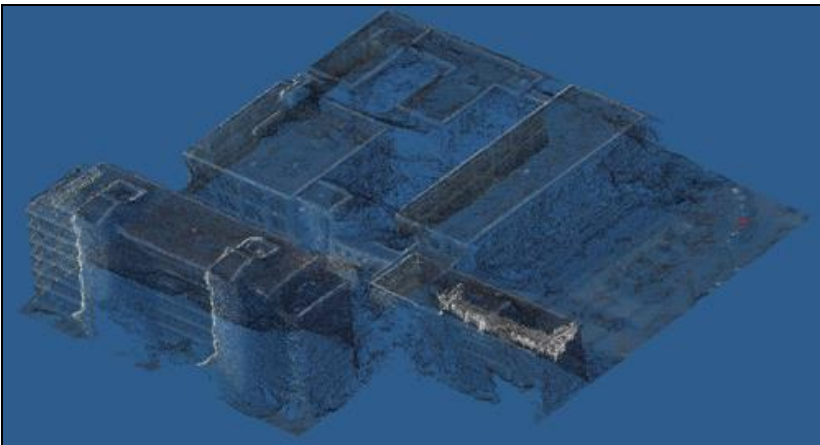


Abb. 7. Fusionierte 3D-Punktwolken von MACS-Oblique und IPS-Mini

6 Ergebnisse

Um die geometrische Genauigkeit des Modells zu validieren, wurden punktuelle Distanzmessungen mit einem Laserentfernungsmesser durchgeführt und mit den Abständen in der fusionierten georeferenzierten Punktwolke verglichen. Die Messgenauigkeit der Sollwerte bei der laserbasierten Entfernungsmessung beträgt hierbei normalerweise 1 cm. Eine Ausnahme stellt die Gebäudehöhe dar. Aufgrund der schlechten Erfassbarkeit der Dachfläche vergrößert sich der Messfehler auf 20 cm.

Die Istwerte werden direkt auf der fusionierten Punktwolke in der Software CloudCompare bestimmt. Die Streuung der Punkte der äußeren Gebäudehülle, die ursprünglich aus den MACS-Daten stammt, beträgt ca. 25 cm. Die Streuung in der aus den IPS-Bildern abgeleiteten Punktwolke beträgt dagegen 1-5 cm. Die Gebäudeaußenlänge und -breite bezogen auf das Streuzentrum in der Punktwolke weichen von den eingemessenen Sollwerten um 9 respektive 2 cm ab. In der Höhe beträgt die Abweichung vom Referenzwert 22 cm. Bei den Dimensionen des aufgenommenen Innenflurs liegt die Differenz bei 3 cm.

Die Lage der beiden Punktwolken relative zueinander wurde an 6 Datenpunkten bestimmt und mit den Entfernungsmessungen verglichen. Die Distanzabweichungen betragen 2 bis 22 cm (Abb. 8). Diese Werte entsprechen im Mittel in etwa den gröber aufgelösten MACS-Daten. Interessant ist hierbei die stärker Abweichung auf der südöstlichen Seite des Testgebäudes (Datenpunkte 3, 4 und 5), die möglicherweise aus größeren lokalen Restfehlern in der Bildorientierung resultiert.

Nr.	Soll [m]	Ist [m]	Δ [m]
1	6,04	6,07	0,03
2	6,07	6,05	-0,02
3	5,99	6,05	0,06
4	5,99	6,21	0,22
5	6,00	6,12	0,12
6	5,99	5,97	-0,02

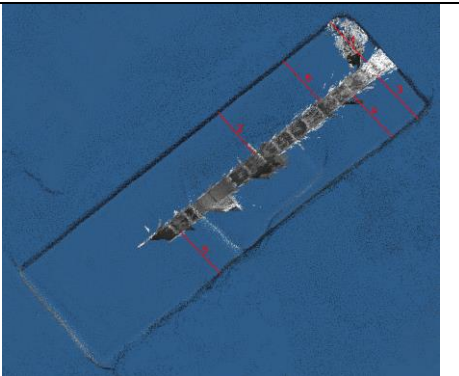


Abb. 8. Relative Genauigkeit der horizontalen Lage

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fusion von Indoor- und Outdoor-Daten wurde am Beispiel des luftgestützten Aufnahmesystems MACS und des handgetragenen Verortungssystems IPS mit Hilfe eines kombinierten Passpunktfeldes durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt,

dass die visuelle und messtechnische Konsistenz der aus den jeweiligen Bilddatensätzen generierten 3D-Punktwolken gegeben ist. Die Einmessung und Übertragung der Referenzpunkte in ein gemeinsames übergeordnetes Koordinatensystem ist jedoch sehr aufwendig und muss gewissenhaft und systematisch durchgeführt werden. Hier kann der manuelle Arbeitsaufwand reduziert werden, wenn sich der Aufnahmebereich des IPS-Geräts zeitweise mit dem des luftgestützten Kamerasystems überdeckt und eine gemeinsame Ausgleichung wenigstens partiell erfolgt. Aktuell in der Entwicklung von IPS befindet sich die automatische Detektion der AprilTags. Diese ermöglicht zukünftig die Verwendung der direkt im Gerät erzeugten Punktwolke und deren absolute Verortung mit nur wenigen zuvor georeferenzierten Passmarken.

Literatur

1. Wilken, M.; Cabos, C.; Baumbach, D.; Buder, M.; Choinowski, A.; Griefsbach, D.; Zuev, S. (2015) : IRIS - An Innovative Inspection System for Maritime Hull Structures. International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, ICCAS 2015, 29. Sept. - 2.Oct 2015, Bremen, Germany. ISBN 978-1-909024-43-4.
2. Gorzalka, P.; Estevam Schmiedt, J.; Dahlke, D.; Frommholz, D.; Göttische, J.; Hoffschmidt, B.; Israel, M.; Linkiewicz, M.; Patel, D.; Plattner, S.; Prah, C.; Schorn, C. (2018): Building Tomograph – From Remote Sensing Data of Existing Buildings to Building Energy Simulation Input. EBC. Fifth expert meeting. Innsbruck, Austria.
3. Yu, K. (Herausgeber) (2018): Positioning and Navigation in Complex Environments. IGI Global. United States of America.
4. Hein, D.; Bayer, S.; Berger, R.; Kraft, T.; Lesmeister, D. (2017): An Integrated Rapid Mapping System for Disaster Management. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, XLII-1 (W1), Seiten 499-504. Copernicus Publications. ISPRS Hannover Workshop: HRIGI 17 (Volume XLII-1/W1), 6.-9. Jun. 2017, Hannover, Deutschland. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-499-2017.
5. Lehmann, F.; Berger, R.; Brauchle, J.; Hein, D.; Meißner, H.; Pless, S. (2011): MACS - Modular Airborne Camera System for generating photogrammetric high-resolution products. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 435-446.
6. Börner, A.; Baumbach, D.; Buder, M.; Choinowski, A.; Ernst, I.; Funk, E.; Griefsbach, D.; Schischmanow, A.; Wohlfeil, J.; Zuev, S. (2017): IPS – a vision aided navigation system. Advanced Optical Technologies, vol. 6, pp. 121-130. ISSN 2192-8576.
7. Olson, E. (2011): A robust and flexible visual fiducial system. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. IEEE, pp. 3400-3407.