

Airborne Laserscanning und direkte Sensororientierung

CHRISTOPH HUG, Poing

Keywords: aerial photogrammetry, airborne laserscanning, sensor orientation, GPS, IMU, IGI-AEROcontrol

Summary: *Airborne Laserscanning and Direct Sensororientation.* Airborne laserscanning as method for the three-dimensional survey of topography became operational only with the availability of accurate systems of direct sensor orientation based on dGPS and IMU. This paper discusses the relationship of airborne laserscanning and direct sensor orientation and analyses the requirements for sensor navigation systems arising from this application. It turns out that modern sensor navigation systems like the IGI AEROcontrol-IIId provide a level of accuracy that already exceeds the current requirements from airborne laserscanning.

Zusammenfassung: Airborne Laserscanning als Verfahren zur dreidimensionalen Topographieerfassung vom Flugzeug aus wurde erst durch hochgenaue Verfahren der direkten Sensororientierung mit dGPS und IMU operationell nutzbar. Dieser Artikel erläutert den Zusammenhang zwischen Airborne Laserscanning und direkter Sensororientierung und analysiert die Anforderungen, die sich aus dieser Anwendung an Sensor-Navigationssysteme ableiten. Es zeigt sich dabei, dass moderne Sensor-Navigationssysteme wie das IGI AEROcontrol-IIId eine Genauigkeit der direkten Sensororientierung bieten, die die aktuellen Anforderungen für Airborne Laserscanning deutlich überschreitet.

Einleitung

Airborne Laserscanning ist eine verhältnismäßig junge Methode, die Oberfläche und Topographie der Erde dreidimensional vom Flugzeug oder Hubschrauber aus zu erfassen. Als direktes, aktives, monoaxiales Messverfahren arbeitet es vielfach auch unter Bedingungen zuverlässig, bei denen andere Verfahren nicht oder nur eingeschränkt nutzbar sind. Airborne Laserscanning zeichnet sich durch eine weitgehend automatische, vollständig digitale Datenaufnahme und einen vollständig computerisierte Auswertung mit hohem Automatisierungsgrad aus. Dadurch erlaubt es eine sehr wirtschaftliche Aufnahme großer Flächen mit hoher Messpunktdichte und Genauigkeit.

Arbeitsweise

Die Aufnahme einer Oberfläche durch Airborne Laserscanning erfolgt durch punkt-

weise Entfernungsmessung und polares Anhängen – die Entfernung zwischen Sensor und Oberfläche wird durch Laufzeitmessung eines modulierten Laserstrahls bestimmt; die Orientierung des Messstrahls und seine Ursprungsposition werden gleichzeitig direkt und unabhängig von der Entfernungsmessung erfasst, um den angemessenen Oberflächenpunkt in ein festes räumliches Bezugssystem einzuordnen. Ein Airborne Laserscanning System besteht daher aus zwei Hauptkomponenten:

- dem Laserscanner, der die Entfernung zur Oberfläche misst und den Messstrahl quer zur Flugrichtung ablenkt, und
- einem Sensor-Navigationssystem zur direkten Sensororientierung, bestehend aus GPS-Empfänger zur Positions- und IMU (inertial measurement unit), zur Orientierungserfassung.

Im Unterschied zu photogrammetrischen und bildgebenden Verfahren arbeitet Laser-

scanning (bislang ausschließlich) durch sequenzielle Einzelpunktmessungen. Es besteht also keine zwingende innere geometrische Beziehung zwischen aufeinanderfolgenden Messungen, so wie sie bei den Pixeln eines Flächenbildes gegeben ist, aus der eine zumindest teilweise Rekonstruktion des Oberflächenverlaufs bzw. der Aufnahme-position allein anhand der Bilddaten möglich wäre. Daher ist Laserscanning auf eine unabhängige äußere Positions- und Orientierungserfassung angewiesen. Ähnlich wie bei Zeilenkameras sind für Laserscanning daher hohe Anforderungen an die Genauigkeit der direkten Sensor-Orientierung gestellt.

Geschichtlicher Überblick

Seit den frühen siebziger Jahren arbeiteten verschiedene Forschungseinrichtungen an der Erfassung der Erdoberfläche durch Laser-Entfernungsmessung vom Flugzeug aus. Entscheidendes Problem blieb dabei allerdings stets die Erfassung der genauen Sensorposition, was zwar für Forschungsprojekte lokal durch aufwendige Tracking-Systeme gelöst werden konnte, für einen flächenhaften oder kommerziellen Einsatz des Verfahrens allerdings ein zu großes wirtschaftliches und logistisches Hindernis darstellte. So beschränkten sich viele der frühen Untersuchungen auf Anwendungen, bei denen die absolute Sensorposition eine untergeordnete Rolle spielte, wie in der Laserbathymetrie (KRABILL & HOGE 1979) oder der Baumhöhenmessung (NELSON et al. 1984), bei denen die relevanten Informationen aus den Laufzeitdifferenzen zwischen verschiedenen Zielen innerhalb jeder Messung (z. B. Wasseroberfläche-Gewässergrund, Baumkronen-Boden) abgeleitet werden konnte.

Schließlich schuf jedoch der vollständige Ausbau des Navstar Global Positioning Systems (GPS) in den frühen 90er Jahren sowie Entwicklungen zu dessen Nutzung für die hochgenaue kinematische Positionserfassungen (Trägerphasenauswertung, dGPS) die Voraussetzungen für eine hochgenaue, absolute und effiziente Positionserfassung an (fast) beliebigen Punkten der

Welt (SÖHNE et al. 1993). Die Integration von kinematischem dGPS und inertialer Messtechnik zu kommerziellen Sensornavigationssystemen zur direkten Sensororientierung, wie z. B. dem IGI AEROControl-System, führte schließlich dazu, dass ein wirtschaftlicher Einsatz von direkter Sensor-Positionierung und -Orientierung und damit ein operationeller Einsatz von Airborne Laserscanning möglich wurde.

Der erste abbildende Laserscanner in Europa wurde 1993 vorgestellt (ScaLARS, HUG 1994) und nutzte in verschiedenen Projekten ab 1996 das IGI AEROControl System. Das erste kommerzielle Airborne Laserscannersystem (Optech ALTM) kam 1994 auf den Markt. Seither verzeichnet der Markt für Airborne Laserscanning-Systeme und -Dienstleistungen ein rapides Wachstum mit inzwischen über 80 Systemen weltweit im Einsatz (BALTSAVIAS 1999, FLOOD 2003). Entscheidend für diesen Erfolg sind die mit dieser Technologie erreichbare hohe Genauigkeit und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Genauigkeit

Die Genauigkeit, mit der ein angemessener Oberflächenpunkt durch Airborne Laserscanning erfasst wird, wird beeinflusst durch

- die Entfernungsmessgenauigkeit und die Genauigkeit der Ablenkwinkelersfassung beim Laserscanner,
- die Genauigkeit der Positions- und Orientierungserfassung durch das Sensor-Navigationssystem (kinematisches dGPS, IMU).

Für Höhenfehler in Lasermessdaten sind primär Offsetfehler des Entfernungsmesssystems und Fehler aus der Höhenbestimmung durch GPS bestimmend. Lagefehler in Flugrichtung werden vor allem durch Zeitoffsetfehler zwischen Lasersystem und dem Sensornavigationssystem und Nickwinkelfehler verursacht. Lagefehler quer zur Flugrichtung ergeben sich überwiegend aus Fehlern in der Ablenkwinkel- und Rollwinkelersfassung. An den Spurrändern bewirken außerdem Ablenk- und Rollwinkelfehler

Höhenfehler, und Kurswinkelfehler wirken sich auf Lagefehler in Flugrichtung aus.

Laserscanner arbeiten heute mit Entfernungsauflösungen von 0,5–2 cm bei einer typischen Unsicherheit der Einzelmessung auf eine ebene Oberfläche von 3 cm. Die Unsicherheit des Ablenkwinkels liegt systemabhängig zwischen 0° – $0,02^\circ$. Die absoluten Fehler liegen in der gleichen Größenordnung. Hierbei ist festzustellen, dass Ablensysteme ohne mechanische Komponenten im optischen Pfad die höchste Stabilität und damit geringste Unsicherheit des Ablenkwinkels haben (Faserscanner beim TopoSys-System), Schwingspiegelsysteme (z. B. Optech ALTM) in der Praxis die größte Unsicherheit im Ablenkwinkel aufweisen, während kontinuierlich rotierende Polygonspiegelscanner dazwischen liegen (RIEGL LMS Q 280).

Die Genauigkeit der besten heute erhältlichen kommerziellen Sensornavigationssysteme liegt laut Herstellerangaben bei $0,005^\circ$ für die Roll- und Nickwinkel und bei $0,008^\circ$ für den Kurswinkel. Die Positionsgenauigkeit wird hauptsächlich durch das GPS-System, die Satellitenkonstellation und atmosphärische Bedingungen beeinflusst und liegt bei Tests meist bei 5–10 cm (SUJEW et al. 2002).

Für eine typische Flughöhe von 1000 m und einen Scanwinkelbereich von $\pm 20^\circ$ ergeben sich damit im ungünstigsten Fall die

in untenstehender Tabelle aufgeführten Fehlerwerte.

Diese Gegenüberstellung zeigt, dass die Fehlereinflüsse, die auf die direkte Sensor-Orientierung zurückgehen, bei den meisten Laserscanner-Systemen von den Fehlern des Laserscanners, insbesondere den Ablenkwinkelfehlern, dominiert werden. Setzt man schließlich diese Fehlerwerte in Beziehung zu den Messpunkt-Durchmessern, die je nach System bei der angenommenen Flughöhe von 1000 m bei 0,3 bis 1,0 m liegen, so ist offensichtlich, dass die heute erreichte Genauigkeit der Sensor-Navigationssysteme für die Anwendung in aktuellen Airborne Laserscanning-Systemen ausreicht.

Wirtschaftlichkeit

Die hohe Wirtschaftlichkeit des Airborne Laserscannings als Messverfahren resultiert aus einem weitgehend automatischen Messvorgang, der vollständig digitalen Aufnahme- und Verarbeitungskette und einem hohen Automatisierungsgrad bei der Auswertung. Eine Signalisierung oder die Ausbringung und Einmessung von Referenzmarken ist nicht erforderlich, typischerweise werden lediglich einzelne Referenzen zur Güteprüfung der Messdaten eingemessen.

Die tatsächlich erreichbare Wirtschaftlichkeit hängt allerdings auch von den bei der Auswertung doch erforderlichen manu-

Fehler	Größe	Lage [m]				Höhe [m]	
		in Flugrichtung		quer zur Flugrichtung		Spurmitte	Spurrand
		Spurmitte	Spurrand	Spurmitte	Spurrand	Spurmitte	Spurrand
Entfernung	0,03 m	–	–	0,00	0,01	0,03	0,03
Ablenkwinkel	$0,02^\circ$	–	–	0,35	0,35	0,00	0,13
Orientierung							
Rollwinkel	$0,005^\circ$	–	–	0,09	0,09	0,00	0,03
Nickwinkel	$0,005^\circ$	0,09	0,09	–	–	0,00	0,00
Kurswinkel	$0,008^\circ$	–	0,05	–	0,00	–	–
Position (x, y, z)	0,08 m	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Summe		0,17	0,22	0,52	0,53	0,11	0,27

ellen Eingriffen ab, die sich aus der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Daten der direkten Sensor-Orientierung ergeben. In der Praxis zeigt sich, dass insbesondere bei der Auswertung der dGPS-Daten auch heute noch manueller Aufwand erforderlich ist, um ein optimales Ergebnis zu erreichen. So müssen die aktiven Satelliten und die Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten häufig interaktiv optimiert werden, um Spürhöhenversätze zu vermeiden.

Zur weitergehenden Automatisierung dieses Vorgangs liegt in einer stärkeren Verzahnung der GPS-Auswertung mit den IMU-Daten und der Rückführung der Ergebnisse der Laserdatenauswertung in die GPS-Auswertung noch Entwicklungspotenzial.

Resümee

Direkte Sensor-Orientierung ist ein wesentlicher Bestandteil moderner Airborne Laserscanning-Systeme. Erst sie ermöglicht einen wirtschaftlichen Einsatz dieses Messverfahrens. Die aktuell hochwertigsten Systeme zur direkten Sensororientierung erfüllen die Genauigkeitsanforderungen weitestgehend, die heute durch Airborne Laserscanning-Systeme gestellt werden. Schwächen sind technisch eher bei den Laserscannern selbst zu suchen. Der Trend zu kombinierten Systemen aus Laserscanner und Zeilenkamera (Toposys) oder digitaler Flächenbildkamera (Optech u.a.) stellt zwar höhere Genauigkeitsanforderungen an die direkte Sensororientierung als Laserscanner alleine dies tun, allerdings sind aktuelle Sensor-Navigationssysteme auch diesen Anforderungen heute im Allgemeinen bereits gewachsen.

Eine Erhöhung des Automatisierungsgrads bei der Auswertung der Daten der direkten Sensor-Orientierung, insbesondere der GPS-Daten, ist zur weiteren Steigerung der Wirtschaftlichkeit wünschenswert.

Literatur

- BALTSAVIAS, E. P., 1999: Airborne laser scanning: Existing systems and firms and other resources. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54** (2–3): 164–198.
- FLOOD, M., 2003: Airbornelasermapping.com Industry News. – Internet: www.airborne-laser-mapping.com/ALMBrief.htm#BR#2, Aktualisierungsstand 25. 04. 2003, zuletzt abgerufen am 29. 04. 2003
- HUG, C., 1994: The Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor – An Instrument for Efficient 3D Terrain Survey. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **30** (1): 100–107.
- HUISING, J. & GOMES PEREIRA, L., 1998: Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **53** (5): 245–261.
- KRABILL, W. B. & HOGE, F. E., 1979: Application of the airborne oceanographic lidar to shoreline mapping. – Proceedings of the ASP-ACSM 39th Annual Convention, Washington D. C., 180–188.
- NELSON, R., KRABILL, W. B. & MACLEAN, G., 1984: Determining Forest Canopy Characteristics Using Airborne Laser Data. – Remote Sensing of the Environment **15**: 201–212.
- SÖHNE, W., HEINZE, O., HUG, C. & KÄLBERER, U., 1993: Positioning and Orientation of a Laser/Radar-Altitude Survey Flight with GPS and INS. – Proceedings of the Gyro Symposium, Stuttgart, September 1993.
- SUJEW, S., SCHOLTEN, F., WEWEL, F. & PISCHEL, R., 2002: GPS/INS-Systeme im Einsatz mit der HRSC – Vergleich der Systeme Applanix POS/AV-510 und IGI AEROcontrol II-d. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), **2003** (5): 333–340.
- VOSSELMAN, G. & MAAS, H. G., 2001: Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. – OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, 01–03 March, Stockholm, Sweden: 62–72.

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. CHRISTOPH HUG
GeoLas Consulting, Sultenstraße 3
D-85586 Poing, Tel.: +49-8121-977342
Fax: +49-89-92185-445
e-mail: hug@geolas.com

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003