

Diss. ETH No. 14045

**Investigation and Improvement of
Airborne Laser Scanning Technique for
Monitoring Surface Elevation Changes of Glaciers**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
ETIENNE FAVEY
Dipl. Verm. Ing. ETH
born October 26, 1971
citizen of Stäfa, ZH, Pompaples, VD and Eclépens, VD

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H.-G. Kahle, examiner
Prof. Dr. A. Grün, co-examiner

Zurich 2001

Abstract

Headlines of global warming and melting glaciers predict sustainable climate changes for future generations. How much mass the glaciers actually loose, has been—despite its importance—investigated only for a few glaciers, as in-situ measuring methods are time-consuming and usually under-sampled.

Airborne laser scanning is a young technology opening new possibilities for qualitative and quantitative determination of surface elevation changes of glaciers. Its rise was possible through the combination of several modern measuring methods, such as high-precision DGPS positioning in kinematic mode, attitude measurements using inertial systems, and laser distance measurements to non-cooperative targets.

This work investigates the feasibility and possible improvements of the airborne laser scanning technique with respect to the special circumstances of determining surface elevation changes of glaciers. This consists of an error analysis of the method as well as the scrutiny of its limitations, and its application to remote, alpine areas without the need of in-situ measurements.

The key problem consists in bringing together all necessary elements for georeferencing the laser data, where the quality of each contributing part has to be monitored regarding accuracy and systematic effects. The quality of the GPS trajectory can be degraded by various factors like atmospheric refraction, radio frequency interference, or obstruction of satellite visibility. The reliable identification of the integer-valued carrier phase ambiguities can be hindered or even made impossible by such effects. The attitude solution was realized using an inertial measurement unit. A separate attitude solution with lower accuracy using a GPS multi-antenna array was developed and used to control and correct IMU drift and offset errors. A self-calibration procedure for determining boresight misalignment angles was elaborated. The used laser scanning system showed increased blunder effects with low received signal power. An approach for detecting and removing blunder was implemented.

Using the laser scanning solution presented in this work, a height accuracy of 0.3 m could be realized flying over a runway at 500 m above ground. Higher flying height above ground and turbulences impede the realization of this data quality in the mountains; it amounts to about 0.5 m.

In the test area at Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland, measurements for a temporal analysis were repeatedly made using the laser scanning technique. For the lower parts of Unteraargletscher, digital surface models originating from photogrammetry are available for comparison. The determination of the surface elevation change distribution was shown to be feasible with an accuracy of 0.5–0.7 m.

The areas covered by airborne laser scanning are located between 2500 and 3400 m above sea level. For the period 1998–1999, a surface elevation increase of 2–4 m was

measured. This positive change can be related to the immense amount of snowfall during the winter 98/99.

The coverage of Unteraargletscher with measurements of surface elevation change could be completed up to the remote firn areas thanks to the airborne laser scanning technique. It is available for mass balance and flow modeling calculations.

Zusammenfassung

Pressemeldungen von globaler Erwärmung und schmelzenden Gletschern prophezeien nachhaltige Klimaveränderungen für kommende Generationen. Wieviel die Gletscher tatsächlich an Masse verlieren, wurde — trotz seiner Wichtigkeit — aufgrund der zeitaufwändigen und örtlich beschränkten Messmethoden vor Ort bisher nur für wenige Gletscher gemessen.

Fluggestütztes Laserscanning, eine junge Technologie möglich durch die Vereinigung moderner Messmethoden wie hochpräziser kinematischer GPS-Positionierung, Lagewinkelbestimmung durch inertielle Messsysteme, und reflektorlose Laserdistanzmessungen, eröffnen neue Möglichkeiten für die qualitative und quantitative Erfassung von Höhenveränderungen von Gletschern.

Diese Arbeit untersucht die Durchführbarkeit und Verbesserungsmöglichkeiten der fluggestützten Laserscanning-Technik im Hinblick auf die speziellen Umstände, die bei der Erfassung von Höhenänderungen von Gletschern vorliegen. Dies beinhaltet eine Fehleranalyse der Methode an sich, sowie die Erforschung ihrer Grenzen und ihrer Anwendbarkeit auf entfernte, alpine Regionen ohne notwendige Bodenmessungen im Zielgebiet selbst.

Das zentrale Problem besteht im Zusammenfügen aller nötigen Elemente zur Georeferenzierung der Laserdaten, wobei die Qualität der beitragenden Systeme hinsichtlich Genauigkeit und systematischer Effekte überprüft werden muss. Die Qualität der GPS Trajektorie kann durch verschiedene Faktoren wie atmosphärische Refraktion, Störsignale, oder Abschattungseffekte stark beeinträchtigt werden, da die Lösbarkeit möglichst vieler Phasenmehrdeutigkeiten dadurch verringert oder gar verunmöglicht wird. Für die Lagewinkelbestimmung wurde eine Lösung aus mehreren GPS-Antennen realisiert, um die Drift- und Versatzeffekte des Inertialsystems zu bestimmen und zu korrigieren. Für die Bestimmung der Einbauwinkel des Lasersystems relativ zum Inertialsystem wurde eine Selbstkalibration anhand der gemessenen Daten realisiert. Das verwendete Lasersystem zeigte zudem Fehlereffekte bei niedriger Empfangssignalstärke. Für deren Erkennung und Elimination wurde ebenfalls ein Algorithmus entwickelt.

Mit der Laserscan-Lösung, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, konnte bei einer Flughöhe von 500 m über einer Flugpiste eine Höhenmodell-Genauigkeit von 0.3 m realisiert werden. Im Gebirge gestaltet sich aufgrund der höheren Flughöhe über Grund und Turbulenz-Effekten zwischen den Bergen die Realisierung der Datenqualität etwas schwieriger und bewegt sich im Bereich von 0.5 m. Im Testgebiet Unteraargletscher wurden Messungen mit der Laserscan-Technik für temporale Analysen wiederholt realisiert. Für die tiefergelegenen Teile des Unteraargletschers stehen digitale Höhenmodelle aus der Photogrammetrie zum Vergleich zur Verfügung. Für die Messungen der Höhenänderungsverteilung auf dem Gletscher zeigte sich eine Genauigkeit von 0.5–0.7 m als realisierbar.

Als Höhenänderung konnte in den gemessenen Gebieten des Unteraargletschers ein Zuwachs von 2–4 m für die Periode 1998–1999 festgestellt werden. Die Gebiete liegen zwischen 2500 und 3400 m über Meer. Dieser lokale Zuwachs kann mit den heftigen Schneefällen des Winters 98/99 in Verbindung gebracht werden.

Die Abdeckung des Unteraargletschers mit Höhenänderungsmessungen wurde dank der Lasertechnik erstmals bis in die obersten Firngebiete erweitert, und steht für weitere Massenbilanzberechnungen und Fliessmodellierungen zur Verfügung.