

DISS. ETH NO. 17036

Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

THORSTEN SCHULZ

Dipl.-Ing., Technical University of Berlin

born 24.02.1977

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hilmar Ingensand, examiner

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich, co-examiner

2007

Abstract

For several years now, terrestrial laser scanning has become an additional surveying technique in geodesy. Recent developments have improved several aspects of terrestrial laser scanners, e.g. the data acquisition rate, accuracy, and range. Since such instruments are relatively new and constructed by manufacturers who do not have advanced experience in surveying instruments, investigations are needed to assess the quality of the instrumental characteristics and the acquired data. In this way, manufacturers will understand the needs of geodesists and in turn enable geodesists to provide the necessary support in the development of improvements. This thesis has three objectives, the calibration and investigation of a terrestrial laser scanner, the post-processing of point clouds acquired by laser scanners, and applications of terrestrial laser scanning.

The first objective is a comprehensive calibration and investigation of a specific laser scanner, the Imager 5003 of Zoller+Fröhlich GmbH (Germany). The investigation and calibration procedures shall give a general impulse for all users of terrestrial laser scanning regarding instrumental and non-instrumental errors, the assessment of the quality of distance and angle measurements, and the influencing parameters. Laser scanners are a black box instrument that produces a huge number of 3D points in the form of a point cloud in a short time. However, it is the surveyor, who has to assess the reliability and quality of the resulting data. Therefore, the potential and the limitations of laser scanner systems must be identified. This is particularly important when a distance measurement is influenced by several parameters that can bias the data. Since laser scanning is an active surveying method, mostly independent of lighting conditions, distance measurements do not require prisms. Thus, surveying of almost every object is conceivable.

The second objective involves post-processing of the point clouds. Terrestrial laser scanning consists not only of data acquisition, but also processing of the acquired 3D data, which include an intensity value of the reflected laser beam. The point clouds define the objects and the data contains nearly all the information about the objects due to the high sampling interval of laser scanners. To produce the final result, data processing needs to be completed and this can be quite involving, e.g. registration, data filtering, noise reduction, triangulation, and modeling. The ratio between post-processing and data acquisition can be 10:1 or greater, which means ten (or more) days of post-processing follow one day of data acquisition. This aspect of post-processing applies for both static laser scanning and kinematic laser scanning. The only difference is that kinematic laser scanning requires a unique method of registration and geo-referencing.

The third objective examines the applications of terrestrial laser scanning. Laser scanning can be used in different fields of applications, e.g. industrial metrology, cultural heritage, reverse engineering, and engineering geodesy. Due to the increased requirements regarding accuracy engineering geodesy appears to be a challenging field. Therefore, three different applications are presented which verify the successful use of terrestrial laser scanning in engineering geodesy. The first application involves the field of urban water management. A road surface was scanned to derive catchment areas and water flow directions. The second application covers the field of engineering geology. A tunnel during and after excavation was scanned to characterize rock mass structures and to derive displacement maps of surfaces and object points. Since the first two applications are based on static laser scanning, which means the laser scanner did not change in position and orientation during scanning, the third application is a kinematic one, which means the laser scanner was in motion during scanning. Such kinematic applications are of great interest since the performance of laser scanning can be increased significantly. Tunnels and roads are especially appropriate for kinematic laser scanning. The potential of kinematic laser scanning is tested by moving the laser scanner along a track line. The quality is assessed by scanning reference points.

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren hat sich das terrestrische Laserscanning als eine zusätzliche Datenerfassungstechnik in der Geodäsie behaupten können. Die Entwicklungen in der nahen Vergangenheit haben terrestrische Laserscanner in vielerlei Hinsicht verbessern können, z.B. bezüglich der Aufnahmegeschwindigkeit, der Genauigkeit und der Reichweite. Da solche Instrumente jedoch einerseits relativ neu sind und andererseits von Herstellern produziert werden, die keine langjährige Erfahrung bezüglich geodätischer Instrumente aufweisen, ist es erforderlich, die Qualität sowohl seitens der Konstruktion der Laserscanner als auch von den erfaßten Daten zu beurteilen. Das Ziel ist es, den Herstellern die Wünsche und Bedürfnisse der Geodäten zu vermitteln und sie mit Ideen für Verbesserungen und Entwicklungen zu unterstützen. Die vorliegende Arbeit hat drei Zielsetzungen, die Kalibrierung und Untersuchung eines Laserscanners, die Datenbearbeitung und Datenauswertung von Punktwolken sowie Anwendungsmöglichkeiten von terrestrischem Laserscanning.

Die erste Zielsetzung umfaßt eine eingehende Kalibrierung und Untersuchung eines bestimmten Laserscanners, des Imager 5003 von Zoller+Fröhlich GmbH (Deutschland). Die vorgestellten Untersuchungen und Kalibrierungen sollen einen Denkanstoß für all diejenigen geben, die sich mit terrestrischem Laserscanning beschäftigen. Diese umfassen instrumentelle Fehler wie nicht-instrumentelle Fehler als auch die Beurteilung der Qualität der Distanz- und Winkelmessungen sowie anderer Einflussfaktoren. Der Laserscanner repräsentiert eine Black-Box, die in kurzer Zeit eine grosse Anzahl von 3D Daten erfaßt, die Punktwolken genannt werden. Der Geodät sollte jedoch in der Lage sein, diese erfaßten Daten zu beurteilen bezüglich Zuverlässigkeit und Qualität. Dazu muss er die Stärken und Schwächen eines Laserscanner-Systems identifizieren. Besonders die Distanzmessung ist von mehreren Parametern beeinflusst, die verrauschte Daten erzeugen. Da es sich beim Laserscanning um eine aktive Datenerfassung handelt, ist es nahezu unabhängig von der Umgebungsbeleuchtung und basiert auf reflektorloser Distanzmessung. Damit ist es möglich, nahezu jedes Objekt zu erfassen.

Die zweite Zielsetzung beschäftigt sich mit den Aspekten der Datenbearbeitung und Datenauswertung, denn terrestrisches Laserscanning bedeutet nicht nur Datenaufnahme. Die erfaßten 3D Daten inklusive einem Intensitätswert des reflektierten Laserstrahls müssen aufbereitet werden. Zwar definieren die Punktwolken das Objekt und jede Information kann aus der Punktwolke entnommen werden aufgrund der hohen Abtastrate des Laserscanners. Aber es gibt darüber hinaus jede Menge Arbeit, um die Daten zu prozessieren und das Endprodukt abzuleiten, z.B. die Registrierung, die Datenfilterung, die Reduzierung des Messrauschens, die Dreiecksvermaschung, die Modellierung. Das Verhältnis zwischen Datenaufbereitung und Datenauswertung einerseits und der Datenaufnahme andererseits kann bis zu einem Verhältnis von 10:1 ansteigen; dies bedeutet, daß zehn Tage mit Datenaufbereitung und Datenauswertung von einem Tag Datenerfassung anfallen. Der Aspekt der Datenaufbereitung gilt dabei sowohl für statische Laserscanning-Aufnahmen als auch kinematische Laserscanning-Aufnahmen. Der einzige Unterschied liegt in der speziellen Art der Registrierung und Georeferenzierung bei kinematisch erfaßten Laserscanning-Daten.

Die dritte Zielsetzung umfaßt die Anwendungsmöglichkeiten des terrestrischen Laserscannings. Laserscanning wird für verschiedenste Bereiche genutzt, z.B. industrielle Meßtechnik, Denkmalschutz und Kulturgüter, Flächenrückführung und Nachbau und Ingenieurvermessung. Aufgrund der hohen Genauigkeitsforderungen stellt die Ingenieurvermessung eine interessante Herausforderung dar. Daher werden drei verschiedene Beispiele aus dem Bereich der Ingenieurvermessung vorgestellt, in denen terrestrisches Laserscanning erfolgreich angewendet wurde. Das erste Beispiel kommt aus dem Bereich der Siedlungswasserwirtschaft. Die Oberfläche einer Straße wurde gescannt und anschließend wurden Einzugsbereiche und Fließrichtungen der Abflußströme vom Regenwasser abgeleitet. Das zweite Beispiel kommt aus dem Bereich der Ingenieurgeologie. Ein Tunnel wurde während und nach dem Ausbruch mittels terrestrischem La-

scanning aufgenommen. Basierend auf diesen Daten wurden Strukturen verschiedener Gesteinsschichten sowie Deformationen des Tunnels flächenhaft und in diskreten Punkten abgeleitet. Während die ersten beiden Beispiele statische Applikationen darstellen, d.h. der Laserscanner wurde während der Datenerfassung nicht bewegt, stellt das dritte Beispiel eine kinematische Anwendung dar, d.h. der Laserscanner wurde während der Datenerfassung bewegt. Solche kinematischen Anwendungen sind von großem Interesse, da die Arbeitsleistung beträchtlich gesteigert werden kann. Speziell für Tunnels und Straßen ist kinematisches Laserscanning geeignet. Das Potential für kinematische Anwendungen wurde getestet, indem der Laserscanner auf einer Messbahn entlang bewegt wurde. Die Qualität wurde mittels Referenzpunkten beurteilt.