

Universität für Bodenkultur Wien University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna Department für Bautechnik und Naturgefahren Department of Structural Engineering and Natural Hazards

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Betreuer: Univ.Doz. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Alexander Prokop

Berater:

Ao.Univ.Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Fuchs

NEUE METHODEN ZUR FILTERUNG TERRESTRISCHER LASERSCANDATEN

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität für Bodenkultur Wien

> Eingereicht von: Dipl.-Ing. Helmut Panholzer

> Gmunden, Dezember 2018

Danksagung

An erster Stelle ist es mir ein Anliegen, meinem Betreuer Prof. Dr. Alexander Prokop zu danken. Seit Beginn meiner Diplomarbeit vor 10 Jahren unterstützt er mich mit seiner Erfahrung und seinem Fachwissen. Besonders seine ruhige, besonnene Art lernte ich sehr schätzen. Wenn ich vor einem Problem stand, konnte ich mich jederzeit an ihn wenden, selbst wenn er gerade für seine Forschungstätigkeit in den Weiten der Arktis unterwegs war.

Mein Dank gilt auch Prof. Dr. Helmut Fuchs, der sich trotz Emeritierung als Berater und Gutachter zur Verfügung gestellt hat.

Dank meinen Studienkollegen Andreas, David, Georg, Martin und Mathias für die tolle Zusammenarbeit und die Kameradschaft auch abseits der Uni. Ohne ihre Informationen und selbstlosen Hilfen wäre mir das Studium neben der Arbeit wesentlich schwerer gefallen.

Dank auch meinen Eltern Dipl. Ing. Heinrich und Christine Panholzer die mir den gesamten, eher ungewöhnlich verlaufenen Bildungsweg über, unterstützend zur Seite standen. Meine Mutter sorgte zudem bei allen Arbeiten dafür, dass sich die Rechtschreib- und Grammatikfehler in Grenzen hielten.

Zu guter letzt möchte ich jenem Menschen danken, der mir aufgrund seiner natürlichen Fröhlichkeit und positiven Energie immer wieder ein Stück Heiterkeit schenkt und somit den grauen Alltag bunt aussehen lässt. Dieser besondere junge Mensch ist meine Tochter Theresa. Dir liebe Theresa möchte ich diese Arbeit widmen.

Vorwort

Der erste thematische Kontakt mit der Materie der Laserscanvermessung ergab sich im Rahmen der Diplomarbeit im Jahr 2009. Dr. Prokop, der zu diesem Zeitpunkt als einer der ersten Wissenschaftler intensiv an den Möglichkeiten der Laserscantechnik zur Bewertung von Naturgefahren forschte, sollte im Rahmen des EU-Alpine Space Interreg III B Projektes ClimChAlp evaluieren, inwieweit sich terrestrische Laserscanner, im Vergleich zu anderen Techniken, für ein Monitoring von Erdrutschungen eignen. Ein Teilbereich dieser Forschung war die Entwicklung einer einfachen Filtermethode für Laserscandaten (auf ArcGIS Basis) zur Berechnung eines Digitalen Geländemodelles. Durch Vergleich mehrerer digitaler Modelle konnte so eine Massenbewegung von instabilen Hängen nachgewiesen und dokumentiert werden.

Für das Monitoring von Naturgefahren bietet das Laserscanning ideale Voraussetzungen. Durch die hohe Punktdichte können großflächig sehr exakte Modelle erstellt werden. Die Aufnahme im Gelände kann in sehr kurzer Zeit durchgeführt werden. Ein weiterer großer Vorteil -speziell bei Aufnahmen im gefährlichen Gelände- ist, dass der unmittelbare Gefahrenbereich nicht betreten werden muss.

Alle diese Vorteile und Möglichkeiten haben mich dazu veranlasst, mich über die Aufgabenstellung der Diplomarbeit hinaus mit diesem Thema zu beschäftigen. Am meisten hat mich die ungeheure Zahl der Aufnahmepunkte in so kurzer Zeit beeindruckt. Neue Scanner sind heute in der Lage über eine Million Punkte innerhalb einer Sekunde zu messen. Durch die Leistungsfähigkeit dieser neuen Aufnahmegeräte verändert sich auch der Anspruch an die Auswertungsroutinen. Da hier speziell bei der Filterung von terrestrischen Laserscandaten noch Entwicklungspotential vorhanden ist, war es für mich ein Anspron, in diese Richtung zu forschen.

Kurzfassung

Ein digitales Höhenmodel (DHM) bildet die Grundlage für viele wissenschaftliche und planerische Anwendungen. Durch die relativ neue Technologie des Laserscannings bieten sich bei der Aufnahme von Geländeoberflächen neue Möglichkeiten in punkto Geschwindigkeit, Genauigkeit und Sicherheit. Bevor ein DHM erstellt werden kann, müssen die Nichtbodenpunkte durch Filterung von den Bodenpunkten getrennt werden. Erst mit diesen klassifizierten Daten kann ein naturgetreues, digitales Oberflächenmodell erzeugt werden.

Während größere Erdabschnitte meist in Form des sogenannten Airborne Laser Scannings (ALS) von einem Flugobjekt aus erfasst werden, erfolgt die Vermessung kleinerer Geländeabschnitte meist mittels Terrestrischen Laser Scannings (TLS) von der Erdoberfläche aus. Die meisten vorhandenen Filteralgorithmen gehen von Aufnahmedaten aus, welche aus dem ALS Verfahren gewonnen werden. Da die TLS Messung von einem statischen Zentrum aus erfolgt, unterscheiden sich die Aufnahmedaten hinsichtlich der räumlichen Verteilung stark von ALS-Daten. Die Position des Scanners innerhalb des führt einer Konzentration Aufnahmepunkte Zielbereiches zu der in der unmittelbaren Umgebung des Scanners. Durch die meist seitliche Aufnahmerichtung ergeben sich durch umstehende Objekte vollständig verdeckte Blickrichtungen und somit größere Gebiete ohne Aufnahmepunkte. Diese Schatten hinter Objekten (z.B.: Bäumen, Gebäude,...) sind für terrestrische Aufnahmen charateristisch. Sträucher. Die Verarbeitung dieser Daten zu einem DHM erweist sich dadurch meist als schwieriger gegenüber Daten aus einer Luftaufnahme.

In dieser Arbeit werden neue Ansätze präsentiert, welche die speziellen Faktoren einer TLS-Aufnahme in den Filterprozess mit einfließen lassen. Ein solcher Ansatz basiert auf der Annahme, dass sich über einer direkten Sichtverbindung zwischen Laserscanner und Bodenpunkt kein anderer Bodenpunkt befinden kann. Befindet sich ein Punkt in einem bestimmten Ausschlussbereich oberhalb dieser Sichtverbindung wird er als Nichtbodenpunkt klassifiziert. Aufgrund der keilförmigen Gestalt des Ausschlussbereiches wurde diese Methode als Wedge-Filterung bezeichnet.

Als Endziel wurde die Erstellung einer Vorgehensweise zur möglichst vollständigen Filterung von terrestrischen Laserscandaten angestrebt. Dabei sollte die Filterung nicht nur –wie bei vielen bestehenden Filteralgorithmen üblich- über den Z-Wert (Höhe) erfolgen, sondern auch über die Länge, also von der Seite her. Durch diese Kombination von Rauminformationen aus verschiedenen Richtungen sollten auch in Bereichen mit sehr wenigen Ausgangsdaten Nichtbodenpunkte richtig erkannt und entfernt werden. Hierzu entstand die Idee, anstatt der üblichen X,Y-Werte die Horizontal- und Vertikalwinkelbeträge zu verwenden, wodurch sich ein sehr gleichmäßiges Raster ohne große Lücken ergibt. Anstatt des Z-Wertes wird die Aufnahmelänge verwendet. Die Funktionswerte für die Filterung bilden somit die Messdistanzwerte. Die Methode wurde aufgrund des daraus resultierenden horizontal-vertikal Rasters als HOVE-Filterung bezeichnet.

Die gefilterte Punktwolke wurde Interpoliert und mit einer Referenzoberfläche verglichen. Durch die Kombination dieser beiden Filtersätze konnte die statistische Qualität des erzeugten DHMs jedenfalls deutlich erhöht werden. Sie könnten auch dazu beitragen, bestehende Filtermethoden zu erweitern. Dank der dadurch erhaltenen, zusätzlichen Rauminformationen könnte dies auch bei etablierten Anwendungen zu einer Qualitätssteigerung führen.

Schlagwörter: Laserscan, terrestrisch, Filterung, topografisches Modell, Höhenmodell.

Abstract

A digital elevation model (DEM) is the basis for many scientific and engineering applications. The relatively new technology of laser scanning offers new possibilities in terms of speed, accuracy and safety when recording terrain surfaces. Before a DEM can be created, the nonground points must be separated from the ground points by filtering. Only with these classified data it is possible to distinguish between points that are used for creating a DEM or a digital surface model (DSM)

While larger sections of the earth are usually detected in the form of the so-called airborne laser scanning (ALS) from a flying object, the measurement of smaller terrain sections is usually carried out by terrestrial laser scanning (TLS) from the earth's surface. Most existing filtering algorithms assume recording data obtained from the ALS method. Since the TLS measurement is from a static center, the spatial data distribution of these data is very different from ALS data. The position of the scanner within the target area results in a concentration of the collected points in the immediate vicinity of the scanner. Due to the mostly lateral recording direction the surrounding objects produce completely obscured lines of sights and thus larger areas without receiving points. These shadows behind objects (such as trees, shrubs, buildings ...) are characteristic for terrestrial recordings. Processing this data into a DEM usually proves to be more difficult than data from aerial recordings.

In this thesis, new approaches are presented, which incorporate the special properties of a TLS recording into the filtering process. Such an approach is based on the assumption that there can be no other ground point over a direct line of sight between the laser scanner and ground point. If a point in a certain exclusion area is above this line of sight, it is classified as a non-ground point. Due to the wedge-shaped form of the exclusion area, this method was called wedge filtering.

The final goal was to develop a procedure for filtering of terrestrial laser scan data as complete as possible. The filtering should not only be carried out by the Z value (height), as is usual with many existing filter algorithms, but also laterally using length values. Through this combination of spatial information from different directions, non-ground points should be properly detected and removed even in areas with very few original data. For this purpose, the idea was to use the horizontal angle values and the vertical angle value instead of the usual X, Y point values, resulting in a very uniform grid without large holes. Recording length is then used instead of the Z point value. The function values for the filtering thus provide the measured distance values. The method was called HOVE filtering because of the resulting horizontal-vertical raster.

The filtered point cloud was interpolated and compared to a reference surface. By combining these two sets of filters, the statistical quality of the DEM generated could be significantly increased in any case. The presented methods could also help to expand existing filtering methods. Thanks to the additional spatial information thus obtained, this could lead to an increase in quality even in established applications.

Keywords: Laser scanning, terrestrial, filtering, topographic model, elevation model.

Liste der Publikationen

Publikation I : Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides

Alexander Prokop, Helmut Panholzer

Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, 9, 1921–1928

Publikation II : Wedge-filtering of geomorphologic terrestrial laser scan data

Helmut Panholzer, Alexander Prokop

Sensors, 2013, 13, 2579–2594

Publikation III : HOVE-Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data

Helmut Panholzer, Alexander Prokop

Applied Sciences, 2018, 8, 263Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung						
	1.1	Problemstellung	9				
	1.2	Zielsetzung und Zweck der Studie	_10				
2	Da	itengrundlagen, Material und Methoden	12				
	2.1	Funktionsweise eines Laserscanners	_12				
	2.2	Prozessablauf eines terrestrischen Laserscannings	_13				
	2.3	Beschreibung topografischer Geländemodelle	_15				
	2.4	Bestehende Filterungsmethoden	_16				
	2.5	Spezielle TLS-Filterungsmethoden	_18				
	2.6	Berechnung und Visualisierung von Geländemodelle	_19				
3 Methoden							
4 Publikationen							
	4.1 Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow mo landslides						
	4.2	Wedge-filtering of geomorphologic terrestrial laser scan data	_33				
	4.3	HOVE-Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data	_50				
5	5 Ergebnisse und Diskussion 6						
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen6						
7	Lit	Literaturverzeichnis 7					
8	3 Abbildungsverzeichnis						
9	Le	Lebenslauf					

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Den meisten Anforderungen, die an Aufnahmen aus terrestrischen Laserscans (TLS) gestellt werden, ist es gemeinsam, dass topografische Modelle benötigt werden. Diese Modelle bilden oft Grundlage für weiterführende, ebenfalls automatisch ausführbare Anwendungen (z.B.: Höhenschichtlinien für topographische Karten, Überschwemmungssimulationen, ...) (PFEIFER, 2003). Da innerhalb kurzer Aufnahmezeit eine große Menge an Höhendaten gemessen werden können, stellt das Laserscannen für die Erstellung von topografischen Modellen, beispielsweise einem digitalen Höhenmodell (DHM), jedenfalls ein optimales Werkzeug dar.

Bei der Berechnung eines DHM müssen die Punkte auf der Erdoberfläche identifiziert und Nichtbodenpunkte, wie Vegetation, Gebäude und andere Konstruktionen über dem Boden, welche ebenso vom Laserstrahl getroffen wurden, entfernt werden. Dieses Entfernen unerwünschter Messungen, wird in diesem Zusammenhang als Filtern bezeichnet (AXELSSON, 2000).

Das Ergebnis einer Laserscanmessung ist eine unstrukturierte Ansammlung von Punkten. Der Mensch kann in dieser Unordnung aus den Höhenwerten, der Verteilung, der Struktur, usw. mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit die Geländeoberfläche erkennen und rekonstruieren. Es ist z.B. sehr unwahrscheinlich, dass sich die Oberfläche sprunghaft ändert. Je mehr ein Punkt gegenüber den umliegenden Punkten z.B.: in Höhe abweicht, desto wahrscheinlicher ist es kein Bodenpunkt. Schwierig wird es bei wenigen und ungleich verteilten Nachbarpunkten, welche nur gering voneinander abweichen, diese zu klassifizieren. Innerhalb einer anspruchsvollen Topographie haben viele Bodenfiltertechniken Schwierigkeiten, mit einigen Objekten wie kurzer Vegetation, steilen Hängen usw. umzugehen (BALTENSWEILER et al., 2017).

Die große Schwierigkeit bei der Filterung ist, dass jeder Punkt zu einem gewissen Grad mit jedem anderen Punkt in Beziehung steht. Bei der - häufig in diesem Zusammenhang angewandten Interpolationsmethode des Krigings (KRIGE, 1951) - wird beispielsweise versucht, genau diesen Umstand der gegenseitigen Beziehungen, auch über größere Distanzen hinweg, möglichst akkurat zu berücksichtigen. Sobald ein Punkt ausgeschieden wird, verändert er das geschätzte Oberflächenmodell für die Punkte in der näheren Nachbarschaft. Das Modell muss unter den neuen, veränderten Bedingungen neu berechnet werden. Gerade bei nicht eindeutigen Aufnahmebereichen, ergibt sich erst durch die schrittweise Eliminierung von Punkten für den menschlichen Betrachter eine - mit bestimmter Wahrscheinlichkeit - plausible Oberfläche. Da automatisierte Anwendungen meist im gewissen Maße einer menschlichen Denkweise zugrunde liegen, muss daher auch der Prozess der Punktwolkenfilterung fast zwangsläufig ein iterativer sein.

Während größere Erdabschnitte meist in Form des sogenannten Airborne Laser Scannings (ALS) von einem Flugobjekt (z.B.: Flugzeug oder Helikopter) aus erfasst werden, wird die Vermessung kleinerer Geländeabschnitte meist unter Zuhilfenahme des Terrestrischen Laser Scannings (TLS), also von einem stationären Vermessungsgerät aus, durchgeführt. ALS kann den Boden großflächig abbilden, wobei die Punktdichte normalerweise zwischen 2 und 20 Punkten pro Quadratmeter liegt. TLS hingegen ist in der Lage hochgenaue Punkte (Millimetergenauigkeit) mit typischerweise Hunderten von Bodenpunkten pro Quadratmeter (je nach Entfernung vom Scanner und den Geräteeinstellungen) zu generieren. Dadurch erhält man eine detailliertere Abbildung der Bodenoberfläche als dies mit ALS möglich ist. (MUIR, 2017) In Hinsicht der Genauigkeit von Vermessungs- und Geomorphologie-Anwendungen eignet sich TLS besser als ALS zur Entwicklung DHMs.

Die Aufnahmedaten des TLS unterscheiden sich stark vom ALS Daten. TLS ermöglicht die Erfassung hochaufgelöster Geodaten von Nahzielen. Nahbereichsabtastung bedeutet, dass

die intrinsischen Punktwolkendichten im Vergleich zu etablierten ALS-Daten erheblich variieren. Darüber hinaus unterscheiden sich die Scanentfernungen und -winkel vom Scannen aus der Luft. Die Position des Scanners innerhalb des Zielbereichs bedeutet, dass sich die räumliche Verteilung der gesammelten Punkte stark um die unmittelbare Umgebung des Scanners herum konzentriert. Besonders der Umstand, dass sich durch umstehende Objekte vollständig verdeckte Blickrichtungen und somit größere Gebiete ohne Aufnahmepunkte (Schatten) hinter diesen Objekten ergeben, ist für terrestrische Aufnahmen charakteristisch. (PUTTONEN et al., 2015) Durch die seitliche Aufnahmerichtung erreicht der Laserstrahl oft nicht den Boden. Es werden somit nur Teile der Oberfläche von Geländeobjekten erfasst. Im Gegensatz zum ALS, wo die Geländeoberfläche meist kontinuierlich verläuft, erfasst das TLS oftmals nur kleine Gelände- oder Objektbereiche, welche keinen räumlichen Bezug zueinander haben und scharfe Kanten bzw. Übergänge bilden.

Generell lässt sich feststellen, dass bei ALS Aufnahmen -bedingt durch die senkrechte Aufnahme- im X,Y-Koordinatenraum eine relativ gleichmäßig verteilte, geordnete Struktur der Aufnahmedaten vorhanden ist. Im Unterschied dazu wechseln sich bei TLS-Daten Regionen mit hoher Punktdichte mit fast punktlosen Arealen ab. Eine Filterung solcher Daten stellt sehr spezielle Ansprüche an den Filteralgorithmus. Bestehende Filtertechniken, welche erfolgreich bei ALS angewandt werden können, schlagen bei TLS-Daten fehl, da sie die Geländeoberfläche zu stark glätten und somit nicht ihre wirkliche Morphologie beibehalten (RODRIGUEZ-CABALLERO et al., 2016). Die Herausforderung ist es, neue bedarfsgerechte Ansätze zur Filterung von TLS-Daten zu finden. Aufgrund der oft spärlichen Informationslage ist es umso wichtiger, möglichst viele Parameter in den Berechnungsprozesse mit einfließen zu lassen.

1.2 Zielsetzung und Zweck der Studie

Die übergeordnete Zielsetzung war die Optimierung von Filterungsprozessen zur Erstellung von topografischen Modellen, speziell für Aufnahmedaten aus terrestrischer Laserscanvermessungen unter Beibehaltung möglichst vieler Bodenpunkte und der Steigerung der statistischen Qualität dieser Geländemodelle. Hierbei sollten die besonderen Strukturen, Eigenschaften und Voraussetzungen von Aufnahmedaten bedingt durch die terrestrische Aufnahmeform, im Filterprozess berücksichtigt werden.

Die spezielle Zielsetzung der einzelnen Publikationen ist jeweils unterschiedlich. Die Arbeit war im Nachhinein betrachtet ein Entwicklungsprozess, wobei sich der Anspruch an die Ergebnisse von einer Publikation zur nächsten steigerte.

Das Hauptaugenmerk der ersten Studie lang in der Erforschung von Möglichkeiten zur Bestimmung von Hangbewegungsmustern bei Erdrutschungen (PROKOP und PANHOLZER, 2009). Zur Auswertung der Aufnahmedaten sollte eine möglichst einfache, universell einsetzbare Filtermöglichkeit gefunden werden. Dabei wurde eine Kombination zwischen einer IDW (Inverse distance weighted) Interpolation und einer morphologischen Filterung gewählt.

Aus diesen Überlegungen heraus entstand das Ziel -unter Beibehaltung möglichst vieler Bodenpunkte- eine Ergänzung zu bereits bestehenden Filteralgorithmen zu finden. Dazu sollte ein neuer, zusätzlicher Faktor in den Filterprozess mit einfließen, welcher bei den üblichen, hauptsächlich für ALS entwickelten Filtermethoden, nicht berücksichtigt wurde. Dieser Faktor ist der Umstand, dass sich bei einem 2,5D Geländemodell kein Bodenpunkt über der Sichtverbindung zwischen Scanner und einem anderen Aufnahmepunkt befinden kann. Die sich daraus entwickelnde Filterung wurde aufgrund des keilförmigen Aussehens des Ausschlussbereiches über dieser Sichtverbindung als Wedge-Methode bezeichnet. Als nächster Schritt wurde die Erstellung eines Programmes zur vollständigen Filterung von terrestrischen Laserscandaten angestrebt. Dabei sollte die Filterung nicht nur über den Z-Wert (Höhe) erfolgen, welcher im Prinzip auch beim Wedge Ansatz der bestimmende Parameter ist, sondern auch über die Länge, also von der Seite her. Durch diese Kombination von Informationen aus verschiedenen Richtungen sollten auch in Bereichen mit sehr wenigen Ausgangsdaten Nichtbodenpunkte erkannt und ausgeschlossen werden. Hierzu entstand die Idee, anstatt der üblichen X,Y-Werte die Horizontalwinkelbeträge und die Vertikalwinkelbeträge und anstatt des Z-Wertes die Aufnahmelänge zu verwenden.

2 Datengrundlagen, Material und Methoden

2.1 Funktionsweise eines Laserscanners

Die elektronische Distanzmessung basiert auf dem Prinzip der Laufzeitmessung mit Laserimpulsen im nahen Infrarotbereich (Wellenlänge von 780 nm bis 1 μ m). Von einem Pulsgenerator werden periodisch elektrische Impulse an einen Halbleiter-Diodenlaser geschickt, der elektrische Energie mit hoher Effizienz in optische Energie umwandelt.

Trifft der ausgesandte Laserstrahl auf ein Hindernis wie die Erdoberfläche, Gebäude oder die Vegetation, wird ein Teil des Signals reflektiert und zur Empfangsoptik des Laserscanners zurückgestrahlt, wo dieses durch eine Photodiode aufgenommen wird. Dieses Signal wird nun an eine quarzstabilisierte Takt- und Zeitmesseinheit weitergesandt. Aus dem Zeitunterschied zwischen der Signalaussendung und dem Signalempfang lässt sich nun die Laufzeit berechnen. (REDL, 2005). Das Prinzip der optischen Impulslaufzeitmessung ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Prinzip der optischen Impulslaufzeitmessung (WAGNER, 2003)

Der Scanner besteht aus einem festen und einem drehbaren Teil. Ein von der Laserelektronik erzeugtes Signal wird über einen oszillierenden oder rotierenden Spiegel ausgesandt. Während sich der Scanner horizontal langsam um die eigene Achse dreht, wird der Strahl in der vertikalen Achse schnell abgelenkt. Aus Sicht des Aufnahmezentrums entsteht somit ein relativ gleichförmiges Raster (siehe Abbildung 2). Dieser Umstand spielt bei den weiteren Überlegungen eine große Rolle.



Abbildung 2: Aufnahme durch terrestrisches Laserscanning (www.riegl.com, leicht verändert)

2.2 Prozessablauf eines terrestrischen Laserscannings

Ziel des 3D-Laserscannings ist die Dokumentation von Objekten und deren Oberflächen. Von der Art der Aufnahme unterscheidet man grundsätzlich zwischen dem Airborne Laser Scanning (ALS) und dem Terrestrial Laser Scanning (TLS). Während beim ALS die Scaneinheit auf einem Flugobjekt (meist auf einem Flugzeug oder Helikopter) angebracht ist, handelt es sich beim TLS um ein stationäres, von der Erdoberfläche aus durchgeführtes Messverfahren.

In den meisten Fällen wird TLS beim Scannen von Objekten mittlerer Reichweite mit Entfernungen bis zu mehreren hundert Metern verwendet. Die vorhandenen Systeme variieren innerhalb ihrer Reichweite und Genauigkeit. Grundsätzlich senden alle einen Laserpuls aus, der von festen Oberflächen reflektiert wird. Beim Ablenken des Strahls entlang einer vertikalen Achse und drehen der Maschine um 360° wird die Umgebung abgetastet. Über einfache trigonometrische Beziehungen werden die erfassten Polarkoordinaten in kartesische Koordinaten umgewandelt. Das Ergebnis der Lasermessung wird als Punktewolke (point cloud) bezeichnet. Für jeden Punkt des Modells sind zumindest die X-, Y- und Z-Koordinaten und der Reflektivitätswert bekannt (BORNAZ und RINAUDO, 2004). Die Dichte der Wolke hängt von der Entfernung zwischen Objekt und Scanner und der eingestellten Auflösung ab. Im weiteren Verlauf der Auswertung können einzelne lokale Punktwolkensysteme miteinander verbunden (Co-Referenzierung) und eventuell auf ein übergeordnetes Koordinatensystem (Georeferenzierung im Falle von erdbezogenen Raumbezugssystemen) referenziert werden (LERMA, 2010). Für diese Berechnungen muss die Position des Scanners in Bezug auf ein globales Koordinatensystem exakt bekannt sein. Dazu werden heute unterschiedliche Methoden und Ansätze verfolgt. So kann der Laserscanner direkt mit einem entsprechenden Orientierungs- und Positionierungssystem verbunden werden (direkte Registrierung und Georeferenzierung), entsprechende Messmarken mit bekannten Objektkoordinaten einbezogen werden (indirekte Registrierung und Georeferenzierung) oder homologe Punkte in den Punktwolken identifiziert werden (datengetriebene Registrierung und Referenzierung) (REITERER et al., 2010).

Eine Punktwolke oder ein Punkthaufen ist eine Menge von Punkten eines Vektorraums, die eine unorganisierte räumliche Struktur ("Wolke") aufweist (OTEPKA et al., 2013). Die Aufnahmedaten enthalten sämtliche Punkte von Objekten, von welchen der Laserstrahl reflektiert wurde. Um mit den Daten weiter arbeiten zu können, ist es meist notwendig die Aufnahmedaten zu filtern. Die exakte Durchführung der Filterung ist wesentlich, um entsprechend richtige und aussagekräftige Grundlagen für die weitere Verwendung und Analyse zu erhalten. Die Erkennung von Objektoberflächen in Punktwolken ist häufig der erste Schritt, um Informationen aus Punktwolken zu extrahieren. Eine oft benötigte Anwendung von terrestrischen Laserscans ist beispielsweise die Berechnung von digitalen Höhenmodellen aber auch historischen Gebäuden, Denkmälern oder anderen Raumobjekten. Um diese Objekte für den Anwender visuell vorstellbar zu machen, ist es notwendig, eine grafische Oberfläche aus den Punktdaten zu generieren. Übliche Methoden einer solchen Visualisierung sind Vermaschung der Einzelpunkte zu einem TIN (triangulated irregular network) oder 2,5D Raster, welche durch Interpolation berechnet werden.

Abbildung 3 zeigt die Prozesskette beim terrestrischen Laserscanning.



Abbildung 3: Prozesskette beim terrestrischen Laserscanning (KERSTEN et al., 2008)

2.3 Beschreibung topografischer Geländemodelle

Die Nachverarbeitung von Daten aus einer Laserscan Aufnahme umfasst normalerweise Schritte wie das Entfernen unerwünschter Informationen und Rauschen, das Identifizieren und Isolieren auffälliger Merkmale und das Berechnen und / oder Modellieren der Eigenschaften jedes Merkmals. Aufgrund der langen Nachbearbeitungszeit im Vergleich zur schnellen Erfassungszeit liegt ein großer Schwerpunkt der Forschung im Bereich TLS darin, diese Prozesse zu automatisieren. Dies kann dazu beitragen, die anfallenden Kosten zu reduzieren und die Gesamteffizienz der Verwendung von TLS zu erhöhen. (BELTON und BAE, 2010)

Die Berechnung von topografischen Modellen ist eine der wichtigsten Anwendungen des Laserscannings. Im Folgenden eine grafische Veranschaulichung (siehe Abbildung 4) und eine kurze Auflistung nach PFEIFER (2003) von Definitionen für einige digitale Topografiemodelle (In Klammern sind die englischen Bezeichnungen angegeben):

DHM (DEM) : digitales Höhenmodell (digital elevation model). Ein DHM ist die Beschreibung der Höhe der Erdoberfläche, parametrisiert über geographischen Koordinaten (Länge, Breite) oder einem planimetrischen Referenzsystem (System der Landesvermessung oder lokale Systeme). Die Datenstruktur (regelmäßiges Raster, Triangulierung, ...) ist damit nicht festgelegt.

DGM (DTM) : digitales Geländemodell (digital terrain model). Ein DGM beschreibt – so wie ein DHM – die Höhen der Erdoberfläche. Der Begriff ist spezifischer als DHM, weil explizit festgelegt wird, welche Höhen, nämlich die Geländehöhen, modelliert werden. Teilweise wird der Unterschied zum DHM auch darin gemacht, dass ein DGM im Unterschied zum DHM Geländekanten und Strukturlinien enthält. Dementsprechend sind die verwendeten Datenstrukturen das "hybride Raster" (Kraus, 2000) (Gitter mit zusätzlichen Linien) und die Triangulierung. Ein Nachteil der Triangulierung ist, dass die zufälligen Messfehler direkt ins Geländemodell übernommen werden und durch die unregelmäßige Punktanordnung lange, schmale (und steile) Dreiecke entstehen, die das Gelände nur schlecht beschreiben.

DOM (DSM) : digitales Oberflächenmodell (digital surface model). Dabei handelt es sich um das Modell, das die oberste Fläche aus der Vogelperspektive beschreibt. Was offenes Gelände und Häuser betrifft, so ist dieser Begriff recht eindeutig: Im offenen Gelände ist das DOM gleich dem DGM, bei Häusern läuft es aber über die Dachfläche. In bewaldeten Gebieten wird die Oberfläche als jene Fläche definiert, die durch die in einander greifenden Baumkronen gebildet wird, wobei es natürlich verschiedene Generalisierungsstufen gibt. Unsicher wird der Begriff in jenen Fällen, wo die oberste Fläche starken Schwankungen unterliegt (z.B. Weizenfelder, jahreszeitliche Veränderung) oder klein ist (z.B. kleine Baumgruppe im offenen Gelände).



Abbildung 4: Oberflächenmodelle mit Punkteklassifikation (GAJSKI, 2004)

2.4 Bestehende Filterungsmethoden

Laserscanner registrieren Punkte auf jenen Flächen, die vom Laserstrahl getroffen und reflektiert werden. Das ist einerseits die Geländeoberfläche, aber auch Gebäude, Baumstämme, Blätter, usw. reflektieren den Laserstrahl. Ebenso sehr kleine Flächen, wie bspw. Stromleitungen, können ein Echo hervorrufen. Die so erhaltene Punktwolke enthält in erster Linie geometrische Information über die reflektierende Fläche, aber keine semantische Information. Um ein Modell des Geländes oder anderer Objekte abzuleiten, muss daher die Punktwolke klassifiziert werden (z.B. Trennung der Boden-(Gelände-)Punkte von den "Nicht-Boden"-Punkten). Diese Aufgabe wird als Filterung bezeichnet. (PFEIFER, 2003)

Die Erstellung einer genauen Bodendarstellung aus LiDAR hat sich als schwieriges Problem erwiesen, welches es zu lösen gilt (MONGUS und ŽALIK, 2012). Jeder Filter nimmt eine bestimmte Struktur der Bodenpunkte in einer lokalen Nachbarschaft an. Dies bildet das Konzept der Filter. Hinsichtlich der Filterkonzepte unterscheiden SITHOLE und VOSSELMAN (2003) zwischen hangbasierenden, Block-Minimum, oberflächenbasierenden und segmentierenden (Cluster) Methoden (siehe Abbildung 5):

Hangbasierenden Algorithmen

Bei Hangbasierenden Algorithmen wird die Steigung oder Höhendifferenz zwischen zwei Punkten gemessen. Wenn die Steigung oberhalb einer bestimmten Schwelle liegt, wird angenommen, dass der höchste Punkt zu einem Fremdobjekt gehört. Die Annahme basiert auf der Überlegung, dass Flächen mit großen Neigungsunterschieden wahrscheinlich nicht Teil der Geländeoberfläche sind.

Beispiel: Progressive TIN-Verdichtung (AXELSSON, 2000), (VOSSELMAN, 2000)

Zuerst wird eine Dreiecksvermaschung bzw. TIN (Triangular Irregular Network) auf Basis von wenigen, sicheren Bodenpunkten gebildet, welche die niedrigsten Punkte eines virtuellen groben Rasters darstellen. Die innerhalb eines Dreiecks liegenden Punkte werden nach und nach auf maximal erlaubte Winkel und Distanzen sowie maximale Kantenlängen geprüft. Dieser Vorgang erfolgt solange, bis keine neuen Punkte mehr gefunden werden.

Block-Minimum Algorithmen

Bei Block-Minimum-Algorithmen ist die Ausschlussfunktion eine horizontale Ebene mit einer entsprechenden Pufferzone darüber. Die Ebene lokalisiert die Pufferzone und die Pufferzone definiert eine Region im 3D-Raum, in der Bodenpunkte angenommen werden können.

Beispiel: morphologische Filter (KILIAN et al., 1996)

Der morphologische Filter arbeitet mit einem "Strukturelement", das die Geländehöhenunterschiede in Abhängigkeit von der Entfernung beschreibt. Je größer die horizontale Entfernung, umso größer darf auch der (positive) Höhenunterschied vom ersten zum zweiten Bodenpunkt sein (PFEIFER, 2003).

Oberflächenbasierende Algorithmen

Bei oberflächenbasierenden Algorithmen ist die Ausschlussfunktion eine parametrische Oberfläche mit einer entsprechenden Pufferzone darüber. Die Oberfläche lokalisiert die Pufferzone und wie zuvor definiert die Pufferzone eine Region im 3D-Raum, in der sich Bodenpunkte befinden sollen.

Beispiel: Robuste Interpolation (PFEIFER, 1998)

Für die robuste Interpolation wird zuerst aus der gegebenen Punktwolke eine approximierende Fläche mittels linearer Prädiktion berechnet. Anhand der Abstände zwischen den Punkten und der Fläche wird jedem Punkt ein Gewicht (positiv, wenn der Punkt über der Fläche liegt, negativ, wenn der Punkt darunter liegt) zugewiesen. Diese Gewichte werden für die nächste Bestimmung der Fläche herangezogen. Ein Punkt mit großem Gewicht zieht die Fläche näher heran, wohingegen ein Punkt mit kleinem Gewicht geringeren Einfluss auf den Verlauf der Fläche hat. In dieser Weise nähert sich die Fläche iterativ den Bodenpunkten an (PFEIFER, 2003).

Clustering oder Segmentierung

Der Grundgedanke des Clusterings oder der Segmentierung ist, dass alle Punkte, die ein Cluster umfasst, zu einem Objekt gehören müssen, wenn sich dieser Cluster von seiner Nachbarschaft abhebt. Damit ein solches Konzept funktionieren kann, müssen sich die Cluster / Segmente als gesamte Objekte und nicht als Teilbereiche von Objekten abgrenzen.



Abbildung 5: Filterkonzepte: hangbasierend (A), Block-Minimum (B) oberflächenbasierend (C) Segmentierenden/Cluster (D) Methoden (SITHOLE und VOSSELMAN, 2003)

2.5 Spezielle TLS-Filterungsmethoden

Nahezu alle TLS-Studien verwenden den Höhenwert (oder Z-Wert), wobei ein bestimmter Grenzwert über der –oft interpolierten Oberfläche- nicht überschritten werden darf (MUIR, 2017). Im Folgenden werden einige Filtermethoden vorgestellt. welche speziell für TLS-Daten entwickelt wurden.

Der einfachste Ansatz für die TLS-DTM-Generierung ist die Verwendung einer auf die Höhe des Scanners basierenden Höheneinstellung, welche aber nur bei flachem Gelände erfolgreich angewandt werden kann (CALDERS et al., 2014).

BRODU und LAGUE (2012) präsentieren eine überwachte Klassifizierungsmethode, basierend auf den geometrischen Eigenschaften der Aufnahme, bei der die Analyse in verschieden Maßstäben durchgeführt wird. Durch die Kombination dieser Informationen aus verschiedenen Maßstäben können an jedem Punkt Signaturen der Szene erstellt werden. Diese Signatur kann dann verwendet werden, um beispielsweise die Vegetation vom Boden zu unterscheiden.

PIROTTI et al. (2013) verwenden die Informationen eines Multireturn-TLS für die Vegetationskartierung. Zunächst wird, unter Berücksichtigung der Ordinalzahl und der Amplitude der Intensität, eine Auswahl an möglichen Bodenpunkten erstellt. Anschließend wird ein progressiver morphologischer Filter zur Erzeugung eines DTM und eines digitalen Oberflächenmodells (DSM) verwendet, wobei die maximalen und minimalen Z-Werte als Kriterien für die Anwendung eines Dilatations- und Erosionsoperators verwendet werden.

LAU et al. (2015) trennen Boden- von Nichtbodenpunkte mithilfe des RGB-Werts. Dabei werden für eine Spektralanalyse, anhand von ausgewählten Probenklassen, Spektralinformationen von farbigen Punktwolken extrahiert. Jene farbigen Punktwolken, die innerhalb der entsprechenden voreingestellten Spektralschwelle liegen, werden als spezifische Merkmalspunkte aus dem Datensatz identifiziert.

LIANG et al. (2011) entwickelte eine Kontinuitätssegmentierung der Scanlinie, die sich gut für die Erkennuna von Baumstämmen eignet. Der Ansatz basiert auf der dem Abstand Kontinuitätseigenschaft der Objektoberfläche, planaren und der horizontaler und Segmentierung in vertikaler Richtung. Die eindimensionalen Segmentierungen wurden zunächst unabhängig voneinander durchgeführt und dann zu Gruppen mit ähnlichen Abständen zum Scanner zusammengefasst.

CHE und OLSEN (2017) präsentieren eine schnelle Bodenfiltermethode für TLS-Daten mittels einer Scanlinien-Dichteanalyse. Der Prozess trennt zuerst die Bodenkandidaten, Dichtemerkmale und nicht identifizierten Punkte auf der Grundlage einer Analyse der Punktdichte innerhalb jeder Scanlinie. Dann wird ein Bereichswachstum unter Verwendung des Scanmusters durchgeführt, um die Punkte zu gruppieren. Schließlich kann, je nach Szenentypen und Anwendungen, durch eine optionale Verfeinerung der Boden-Cluster angepasst werden.

PUTTONEN et al. (2015) verwendet A-priori-Informationen der TLS-Konfigurationen und Scanner mittiger Koordinaten, um die Bodenhöhe zu bestimmen. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass eine hohe Punktdichte in der Nähe des Scanners zur genauen Bestimmung des Bodenniveaus verwendet werden kann. Wenn der Scanner das Koordinatenzentrum der Punktwolke bildet, kann die Bodenebene durch iterative Klassifizierung geschätzt werden.

2.6 Berechnung und Visualisierung von Geländemodelle

Ein DHM (Digitales Höhenmodell) aus einer Laserscanaufnahme weist die Form von unregelmäßig verteilten Punkten auf. Diese Punkte können durch Vermaschung zu nicht überlappenden Dreiecken verbunden werden (z.B.: durch Delaunay Triangulation), wodurch ein so genanntes TIN (triangulated irregular network) entsteht. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel einer Geländeoberflächendarstellung mit Hilfe eines TIN.



Abbildung 6: Beispiel für ein Triangulated Irregular Network (SITHOLE und VOSSELMAN, 2003)

Eine andere Form einer DHM Visualisierung ist ein, durch Interpolation der originalen Punkte entstandenes, regelmäßiges Raster. Eine Raster Interpolation hat oft die Reduktion der Anzahl der Originalpunkte zur Folge. In Bezug auf Datenspeicherung, Analyse und Visualisierung ist diese Ausdünnung notwendig (HÖHLE und POTUCKOVA, 2011). Außerdem können in den zu interpolierenden Daten Löcher vorkommen. Die fehlenden Rasterwerte müssen bei der Interpolation abgeschätzt werden.

Digitale Höhenmodelle können als eine spezielle Form der interpolierten, kontinuierlichen Oberflächen angesehen werden. In diversen Studien wurden deterministische Interpolationsmethoden, wie IDW, Natural Neighbor oder Splines, mit den geostatistischen Methoden des Kriging oder TIN-basierten Ansätzen in Bezug auf die Interpolation von Höhenmodellen veralichen. wobei sich gewisse Methoden als geeigneter herauskristallisierten (BOHLI, 2010). Abbildung 7 zeigt die unterschiedlichen Ergebnisse von verschiedenen Interpolationsmethoden auf Basis desselben Datensatzes aus einer terrestrischen Laserscanaufnahme. Die Eignung der einzelnen Interpolationsmethoden hängt den ieweiliaen Datengrundlagen und Eigenschaften aber von des Untersuchungsgebietes ab (BURROUGH und McDONNELL, 2010). Eine generelle Festlegung auf eine optimale Interpolationsmethode kann es daher nicht geben. Die jeweils am besten geeignete Methode muss vielmehr für jede Anwendung separat gefunden werden.



Abbildung 7: Verschiedene Interpolationsmethoden auf Basis einer terrestrischen Laserscanaufnahme (HÖHLE und POTUCKOVA, 2011)

Bei Geländen mit scharfen Übergängen zwischen einzelnen Oberflächenstrukturen, wie dies bei terrestrischen Aufnahmen oft der Fall ist, muss der Interpolationsalgorithmus sehr lokal angewendet werden (SMITH et al., 2003) und die Interpolation sollte eine möglichst geringe Glättung der Oberfläche zur Folge haben (ZINGER, 2002). Die Natural Neighbor Interpolation hat den Vorteil, dass sie den Wert vorhandener Datenpunkte nicht ändert und sich die interpolierten Werte im Bereich der Eingabewerte bewegen (MUIR, 2017).

3 Methoden

Bei Publikation III wurden die Erfahrungen der ersten zwei Publikationen eingearbeitet. Die Methodik wird daher anhand diese dritten Studie erläutet. Zur Umsetzung und Verifikation dieser Methoden wurden entsprechende Algorithmen in einem Computerprogramm implementiert. Als Programmsprache diente Visual Basis (VB.NET). Neben einer kurzen Beschreibung der Programmeinzelschritte wurde der Prozessablauf in Abbildung 8 grafisch aufbereitet.

Der Aufnahmedatensatz des Testgebietes weist einige offensichtliche Messfehler auf. Um diese Punkte schon vor dem eigentlichen Filterverfahren entfernen zu können, wird eine Prüfroutine vorgeschaltet. Dabei werden die Winkeldifferenzen zu den direkten Nachbarpunkten im Horizontal Vertikalwinkelraster (HOVE-Raster) bestimmt und anhand eines Schwellenwertes ausgeschieden.

Für die Hauptprüfroutine wurde eine Kombination aus den zwei neuen Filteransätzen Wedge und HOVE Methode gewählt, wobei die Wedge Methode gegenüber Publikation II modifiziert wurde. In einem vorher definierten Bereich des HOVE-Rasters werden alle Punkte ermittelt, welche eine größere Aufnahmelänge als der zu untersuchende Punkt aufweisen. Unter den verbleibenden Punkten werden dann entsprechend einer Formel jeweils links und rechts die zwei Nachbarpunkte ermittelt. Zwischen dem zu untersuchenden Punkt und diesen zwei Punkten wird dann die Winkeldifferenz errechnet.

Bei der Methode der HOVE-Rasterfilterung werden anstatt der üblichen X,Y-Werte die Horizontalwinkelbeträge und die Vertikalwinkelbeträge in einem zweidimensionalen Koordinatenfeld aufgetragen. Wiederum werden in einem vorher definierten Bereich des HOVE-Rasters alle Punkte ermittelt, welche als Nachbarn in Frage kommen. Da jeweils die nächsten Punkte links und rechts sowie oben und unten im Raster gesucht werden, hat dieser Suchbereich die Form eines Kreuzes. Zwischen diesen vier Punkten werden dann ausgehend vom zu untersuchenden Punkt zwei Winkeldifferenzen errechnet.

Zudem werden in einem bestimmten Umkreis um den zu untersuchenden Punkt alle Nachbarpunkte gezählt und damit die Punktdichte bestimmt.

Anhand einer Formel wird für jeden Punkt mit diesen vier Parametern (3 Winkeldifferenzen + Punktdichte) ein Wahrscheinlichkeitswert hinsichtlich der Oberflächeneigenschaft berechnet. Wird ein bestimmter Schwellenwert überschritten, so wird dieser Punkt als Nichtbodenpunkt klassifiziert und aus dem weiteren Filterprozess ausgeschlossen. Diese Routine muss für alle Punkte mehrmals wiederholt werden, da sich durch die Ausschlüsse auch die Nachbarschaftsverhältnisse ständig ändern und neu berechnet werden müssen. Fällt die Anzahl der neu ausgeschlossenen Punkte unter einen bestimmten Wert, so wird auf eine weitere Wiederholung verzichtet.

Die verbleibenden Punkte stellen die Ausgangsdaten für ein DHM dar. Zur Visualisierung und weiteren Analyse wird auf Basis der Natural Neighbor Interpolation ein Höhenraster erstellt. Dieser Arbeitsschritt wurde aber nicht in das VB-Programm integriert, sondern mit Hilfe der Software ArcGIS umgesetzt. Die Desktop Erweiterung Spatial Analyst enthält zahlreiche Werkzeuge, um Rasterdaten zu erzeugen, modellieren und zu analysieren.



Abbildung 8: Grundsätzlicher Ablauf des Programmprozesses in Form eines Flussdiagramms

4 Publikationen

Publikation I

4.1 Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides

Alexander Prokop, Helmut Panholzer

Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, 9, 1921–1928

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1921–1928, 2009 www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1921/2009/ © Author(s) 2009. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 3.0 License.



Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides

A. Prokop and H. Panholzer

Institute of Mountain Risk Engineering, Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Peter Jordanstrasse 82, 1190 Wien, Austria

Received: 1 December 2008 - Revised: 6 August 2009 - Accepted: 15 October 2009 - Published: 19 November 2009

Abstract. Digital elevation models (DEM) are widely used to determine characteristics of mass movement processes such as accumulation and deposition of material, volume estimates or the orientation of discontinuities. To create such DEMs point cloud data is provided by terrestrial laser scanning (TLS) and recently used for analysis of mass movements. Therefore the reliability of TLS data was investigated in a comparative study with tachymetry. The main focus was on the possibility of determining movement patterns of landslides <100 mm. Therefore, several post processing steps are needed and the reliability of those were analyzed. The post processing steps that were investigated include: (1) The registration process is a crucial step considering long term TLS monitoring of an object and can be significantly improved using an iterative closest point (ICP) algorithm; (2) Filtering methods are necessary to create DEMs in order to separate favored laser points on the terrain surface (ground points) from topographically irrelevant points (non-ground-points). Therefore GIS tools were applied. Surfaces with and without vegetation cover were differentiated; (3) Displacement vectors are used to determine slope movement rates. They were created from TLS data after the computation of true orthophotos.

Using the methodology presented it was not possible to determine movement rates <50 mm per period. However, if the quality of the point density is described and areas with very low point density are detected, reliable conclusions can be made regarding slope movement patterns and erosion and deposition of material for changes <100 mm for the investigated slope.

1 Introduction

Landslides are a major natural hazard threatening the inhabitants of many mountainous regions. Population increase and extension of inhabited areas into potentially hazardous locations leads to a significant increase of potential losses in the case of a disaster (Oppikofer et al., 2008). Therefore, landslides have been investigated in various ways.

Terrestrial laser scanning (TLS) is used as an observation method in hazard assessment (e.g. Biasion et al., 2005; Prokop, 2008). Thereby, 3-D data from changing landscape surfaces is collected at different states to monitor hazardous processes. The point cloud data can be analyzed in various ways such as a point to point comparison (Oppikofer et al., 2008) or comparison after the creation of digital elevation models (DEM) (Abellan et al., 2006). To monitor mass movements differences in structural characteristics can be investigated, such as accumulation and deposition behaviour of material (Prokop and Panholzer, 2007), volume estimates or the orientation of discontinuities (Derron, et al., 2005).

Various data sources have been used in the past to create such DEMs, including photogrammetry (Dewitte and Demoulin, 2005; Voyat, et al., 2006) or radar interferometry (Pieraccini et al., 2003). While laser scanning provides 3-D information with greater density than alternative methods (Bitelli et al., 2004; Prokop and Panholzer, 2007), data obtained using a terrestrial laser scanner is represented as unstructured and scattered accumulations of points. Therefore, intensive post-processing of the data is required. Various approaches of filtering data obtained from airborne laser scanning exist: auto-regressive process (Lindenberger, 1993), mathematical morphology (Kilian et al., 1996), method of smallest squares robust interpolation (Pfeifer et al., 1998), convex-concave hull (Von Hansen et al., 1999), procedures based on a triangulation of the DEM using local terrain slope



Correspondence to: A. Prokop (alexander.prokop@boku.ac.at)

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

as a filtering criterion (Axelsson, 2000; Vosselmann, 2000; Vosselmann and Maas, 2001), gridding procedures determining a grid-DEM in a data pyramid by hierarchically including elevation values based on gradients (Wack and Wimmer, 2002; Sithole and Vosselmann, 2003). However, data filtering always means a loss of data and sometimes of information. The quality of the DEM created depends on the method applied and the structure of the landscape (Hamrah et al., 2006).

The relevance of such DEMs concerning the analysis of mass movement processes was investigated for airborne laser data (Schulz, 2007; Scheidl et al., 2008). For the terrestrial approach an investigation of automated filtering methods concerning the accuracy of DEMs created and the interpretation of mass movement processes has yet to be completed, although TLS data has been used for monitoring mass movements, e.g. for rock falls (Biasion, et al., 2005; Mikos, et al., 2005; Voyat, et al., 2006; Oppikofer, et al., 2008) and for landslide masses (Hsiao, et al., 2003; Bitelli, et al., 2004). The cited cases of mass movements involved large amounts of material moved by the process (movement rates >10 cm per investigated period). A thorough investigation of the laser data accuracy was therefore not necessary (most terrestrial laser scanners available on the market today measure ranges to objects of up to several hundred meters, with a single point accuracy of 1.4-15 mm at 50 m; Ingensand, 2006).

To be able to analyse the reliability, including post processing steps, of TLS data, it is necessary to perform the measurement with the greatest possible accuracy. The accuracy of TLS measurements in mountainous environments depends on several factors (Prokop, 2008b). According to those factors it was necessary for the test site to meet (and it did meet) the following conditions:

- 1. The distance between the scanner position and the slope monitored is within a range of ~ 100 m (expected accuracy of the measurement is within a range of 3 cm)
- 2. The expected movement rate within the test period is 5-15 cm
- 3. The test area is easy reachable by car, a power supply is available and the laser device is protected against external forces such as wind and solar radiation
- 4. The monitored slope is 70% free of vegetation
- 5. The incident angle of the laser beam on the slope is $<60^{\circ}$ (an incident angle of 0° indicates the laser beam is perpendicular to the ground; so that the footprint is a circle)
- 6. Comparison of TLS with tachymetry can be executed

An investigation of the accuracy of TLS data and applied post processing steps for DEM creation is needed for slow

moving landslides (movement rates <10 cm per investigated period). Accuracy limitations in the creation of DEMs and interpretation of TLS data concerning movement patterns of landslides are discussed and case examples are presented. The results are evaluated against tachymetry measurements (a reliable alternative surveying method) and a comparative study is given. A point to point comparison of TLS data for mass movement analyses has already been investigated by Oppikofer et al. (2008) and is therefore not the subject of this paper.

2 The "Galierm" landslide

The test site, "Galierm" landslide (Fig. 1), is located northeast of the town of Schruns in the area of Montafon (Vorarlberg, Austria) above the bank of Litz stream (Fig. 1a). The Montafon valley is located on the border between the northern limestone alps and the main core of the upper eastern alps, which arises in the crystalline bedrock of the Silvretta mountain ridge. In the area of the "Galierm" landslide there are gneisses including layers of white quarz.

A high water event at the Litz stream in 2005 (Fig. 1c: dashed light blue line) caused significant erosion of the bank. A weak section of the stream bank initiated significant movement of the whole slope above. The dimensions of the moving slope section are approximately 100×100 m (Fig. 1c: dashed yellow line).

3 Data acquisition

To monitor the movement patterns of the slope, the Riegl LMS z420i TLS device was used (http://www.riegl.com). For technical features of the device used see Table 1. Between March 2006 and September 2007 six data acquisitions in a time interval of approximately 5 months using both measurement methods, terrestrial laser scanning and tachymetry, were executed to monitor the moving slope, "Galierm". An additional survey was conducted one day after the first acquisition of data to test the reproducibility of the measurements (reproducibility is defined as the closeness of two measurements regarding the same object carried out under different measurement conditions). The data acquisition steps included:

- 1. Location of a stable scanner position allowing reasonable angles of incidence on the target surface
- 2. Installation of a rigid geodetic network (red points in Fig. 1c) allowing registration of both laser scanner position and tachymetry (registration is likely the most crucial step in long term TLS monitoring of an object, Prokop et al., 2008).



Fig. 1. The test site Galierm. (A) Location of the test site (cut of the Austrian Map 1:500 000 distorted). (B) Picture of the test site. (C) Map of test site location. (D) Point cloud of the test area.

3. Laser scanning process including image acquisition that is collected by cameras mounted on the scanning device to create orthophotos.

The whole test area was scanned by TLS using a point resolution of 3 cm at a distance of 100 m. The chosen resolution was slightly lower than the ideal point spacing of 86% of the beam width according to Lichti and Jamtsho (2006) due to the large amount of points per scan (approximately 5 000 000 points). Handling of point clouds consisting of a greater number of points is difficult when using GIS- tools.

To compare TLS with tachymetry, data targets (blue dots in Fig. 1c) were positioned within the test area and were measured by both methods. Furthermore, significant structures such as discernable rocks within the test area were selected, located and point measurements were executed by tachymetry using reflectors. For comparison, the position of the selected significant structures was identified within the laser data in a post processing step using orthophotos that were created.

4 Post processing

The data point cloud is heterogeneously distributed depending on the characteristics of the laser scanned target (e.g. different distances and angles of incidences). Furthermore vegetation and objects within the scanned area create points that **Table 1.** Technical features of the used long rang laser measuringsystem (Riegl, 2005).

Riegl LMS Z420i						
Range/good reflecting targets	1000 m					
Range/bad reflecting targets	350 m					
Wavelength	1.5 μm					
Measurement accuracy	10 mm					
Beam divergence	0.25 mrad					
Resolution (highest resolution in a range of 10 m)	1 mm					
Measurement rate	8000 Points/s					
Temperature range	0° C to $+50^{\circ}$ C					

do not belong to the ground surface of the investigated slope. After the creation of DEMs, post processing methods need to be established, which included the following steps for the Galierm landslide:

- 1. Registration using tie point targets (reflectors) of the geodetic network (red points in Fig. 1c)
- 2. Registration using iterative closest point (ICP) algorithm. The ICP algorithm is an iterative alignment algorithm that works in three phases: (1) establish correspondence between pairs of features in the two structures that are to be aligned based on proximity, (2) estimate the rigid transformation that best maps the first



Fig. 2. (A) Filtering procedure. (B and C) Influences of point density on surface creation. (B) Minimum surface creation depending on the chosen radius for surface calculations. (C) Inverse distance weighting surface creation depending on the chosen radius for surface calculations.

member of the pair onto the second and then (3) apply that transformation to all features in the first structure. These three steps are then reapplied until convergence is concluded (Besl and McKay, 1992). The ICP algorithm tool used was provided by the laser scanner software RiScan Pro called "Multi station adjustment" (http://www.riegl.com). The algorithm works best with the use of plane surfaces. A number of 30 plane surfaces were available due to the presence of a concrete road close to the test area, which was very stable in contrast to the moving slope.

- 3. Data quality check: Reproducibility tests of fixed objects within the scan area were executed (reproducibility is defined as closeness of the results of two measurements taken from the same object carried out under different measurement conditions. In this case, the different conditions included variations in scanner set-up, atmospheric conditions, time of day and discrete registration). In case of scan misalignment with respect to each other, scans are sorted out allowing a maximum deviation of 2 cm.
- 4. Data filtering: Separation of laser points on the terrain surface (ground points) from the topographically irrelevant points (non-ground-points): Two methods were applied: (1) Operator based: Knowing the test area very precisely, the operator manually deletes irrelevant points using the software RiScan Pro. This method is very time-consuming. (2) Automated: GIS (ArcGIS 9.2) tools were used to filter the data. The following

procedure was applied and can be seen in Fig. 2a: (a) Creation of inverse distance weighting (IDW) surfaces using 4 iteration steps, (b) Creation of a minimum surface followed by dilation (up-lift) of the minimum surface, (c) All points remaining under both surfaces are used for creation of the DEM. When creating the IDW and minimum surfaces the operator needs to defined a radius on the x,y plane as a basis for calculation to filter points on the height-axis. Differences in surface creation depending on the defined radius and the method applied can be seen in Fig. 2b and c. An example of a detail of the point cloud (tree including its measurement shadow) is shown for the two cases.

- 5. Interpolation and creation of DEMs: After using different types of geo-statistical methods involving GIS (ArcGIS 9.2) such as Kriging, Radial Basis Function, TO-POGRID and Natural Neighbour; Natural Neighbour was considered to be the optimal method concerning the existing sources (see also Hamrah et al., 2006). The DEMs created were used for analyses.
- 6. Creation of orthophotos: Colour information from digital pictures was used to texture the surfaces of the DEMs within RiScan Pro. It is necessary to create orthophotos to locate the positions of the same points on different surface hulls. Those orthophotos are computed within the scanner software by triangulating the filtered point cloud with a surface, which is further textured by colour information from digital pictures. Those textured DEMs were used to identify significant structures within the test area for analyzing slope movements by creating displacement vectors.

5 Analyses and calculation of slope movement patterns

Analyses concerning the accuracy of TLS in comparison to tachymetry data were executed for 6 datasets monitoring the moving slope in the following manners (one dataset was sorted out due to missing quality, determined by the data quality check):

- 1. The two different registration methods (tie points and ICP algorithm) were compared (3-D accuracy of the measured points)
- 2. 30 reflecting targets within the test area were measured by both TLS and tachymetry. Their coordinates were compared and the deviation was computed (point to point comparison).
- 3. 30 significant points on structures were measured by tachymetry and were compared to DEMs created from TLS data. The shortest deviation between the tachymetry point coordinates and the created surface (DEM) was computed (point to surface comparison).

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1921-1928, 2009

A. Prokop and H. Panholzer: Assessing TLS for slow moving landslides

Furthermore data was distinguished between surfaces with or without vegetation cover and manually or automatically filtered TLS data.

- 4. As for analysis of slope movements, displacement vectors are of great interest, the sizes and directions (trend and plunge) of vectors can be compared. After locating the same points (e.g. stones and rocks) the change of their position between two monitoring activities is described by displacement vectors. If the direction of the vectors were constant the sizes of those vectors were then compared to the tachymetry measurement to validate the quality of laser data. The determination of direction deviations was excluded from this work, since the displacement direction of the landslide was obviously not known in advance. For analysing landslide movement patterns knowing the directions of movements is a crucial factor. Ensuing future work will focus on accuracy determination of variable displacement directions as mentioned by Abellan et al. (2009).
- After DEM creation, erosion and deposition zones were detected by calculating differences in height (h-axis) or volume between two DEMs.

6 Results and discussion

Results of the accuracy of TLS measurements including post processing steps in comparison to tachymetry are shown in Table 2. The tachymetry measurement acts as the reference system (error of the tachymetry measurements is <15 mm, as determined by reproducibility tests) and deviations of the TLS measurement are recorded.

The first step was to analyse the registration process. The quality of the registration process could be improved by using an ICP algorithm leading to a reduction of the standard deviation could be reduced from 8 mm to 4 mm. It is important to mention that it was only possible to do that by using planar surfaces for running the ICP algorithm, such surfaces were provided by the geometry of a concrete road (Fig. 1). When using natural ground surfaces, such as rocks or trees, the ICP algorithm did not substantially reduce the registration error due to difficulties in defining planar surfaces from the given point cloud geometries.

Furthermore, the coordinates of reflecting targets that were measured by both TLS and tachymetry were compared. As expected, deviation between the two methods is limited (mean: 9 mm, max: 17 mm). The error is explained by the less accurate TLS measurement and inaccurately finding the exact centre of the target within the scanner software. However, the advantage of TLS, especially in comparison to tachymetry, is the spatial information over the whole land slide area, rather than precise point information as provided by tachymetry.



Fig. 3. Erosion and deposition of material for the investigated slope shown by differential maps.

The deviations of the DEM created from TLS data with the tachymetry point measurements are computed. Four different cases of DEM creations are shown. The first two deal with surfaces without vegetation cover. In one case manual and in the other case automated filtering of the scan data is applied. The manually filtered DEM shows slightly smaller deviations (mean: 23 mm, max: 51 mm) than the automatically filtered DEM (mean: 37 mm, max: 63 mm). The deviations are explained by the interpolation process of the filtered but unstructured point cloud rather than by the filter process itself, since almost only ground points exist on such surfaces. However, a certain smoothing effect of the automatically filtered DEM surface is likely to produce the larger deviations.

In final two cases surfaces with vegetation cover were filtered by the two respective methods. The deviations from tachymetry measurements increased significantly. While manually filtered surfaces delivered reasonable deviations (mean: 51 mm, max: 88 mm), the automatic filter applied did not satisfy an accuracy limitation of <100 mm (mean: 127 mm, max: 1875 mm). The reason for this outcome is the reduced point density and more unstructured distribution of the point cloud in vegetation zones. The automatic filter (for

	sample size per scan	sample size overall	mean deviation (mm)	maximum deviation (mm)
Registration TLS	8	40		
tie points	points	points	8	16
Registration TLS	10	50		
ICP-algorithm	planes	planes	4	14
Reflector coordinates	30	150		
TLS/tachymetry	points	points	9	17
Tachymetry point to TLS surface	20	100		
manual filter/no vegetation	points	points	23	51
Tachymetry point to TLS surface	10	50		
autom. filter/no vegetation	points	points	37	63
Tachymetry point to TLS surface	20	100		
manual filter/vegetation	points	points	51	88
Tachymetry point to TLS surface	10	50		
autom. filter/vegetation	points	points	127	1875
displacement vectors	20	80		
no vegetation	3-D-vectors	3-D-vectors	41	81
displacement vectors	10	40		
vegetation	3-D-vectors	3-D-vectors	56	78

Table 2. Deviations between TLS and tachymetry data.



Fig. 4. Interpretation of slope movement patterns: all pink framed zones can be neglected due to low point density. Area 1 (yellow framed area indicates middle point density quality) moved downwards to area 2 (green framed area indicates high point density). Approximately 130 m^3 of material was involved in the movement process.

creation of IDW-and a minimum surface) needs an operatordefined radius on the x, y plane as a basis for calculation to filter points on the height-axis. For creation of the final DEM this means that the available points for the filter calculation and definition of the radius size influence the final result. Finally, the sizes of displacement vectors were analysed. No significant difference in the deviation between TLS and tachymetry between areas with or without vegetation is visible. This is explained by the fact that only areas with high point cloud density were used to create displacement vectors, because the same points on the surface were located in consecutive scans. The existing error (mean: 41 mm and 56 mm, max: 78 mm and 81 mm) is explained by the difficulty in locating exactly the same point on the surface of two consecutive orthophotos.

For the whole area and monitoring period, the erosion and deposition of material was mapped in Fig. 3. To analyse the real mass balance of the slope, the point density must be taken into account. Figure 4 shows areas where the point density is low and the obtained DEM quality is uncertain (pink framed areas). This helps the operator make reliable conclusions about movement patterns. A volume of 124 m^3 eroded at area 1 (yellow framed area with middle point density quality) and 131 m^3 accumulated at area 2 (green framed area with high point density). All pink framed zones can be neglected due to low point density concerning slope movement patterns.

7 Conclusions

The capability of TLS to monitor slow moving landslides was assessed (movement rates <100 mm per period). In a comparative study with tachymetry, accuracy limitations were defined for a case example. The analyses included the process of registering the scanner position, raw data and post processed data delivered by TLS, which is a crucial step for considering long term TLS monitoring of an object. In the case presented, an ICP algorithm was applied to improve the registration process. The registration error could be reduced significantly. Comparing raw data from TLS (measurements were executed over distances of 100 m) to tachymetry the expected error due to decreased point accuracy of TLS measurements was approved (deviation <17 mm). The main focus of the presented investigation is the reliability of DEMs created from the TLS data concerning slope movement patterns. Filtering methods of point cloud data were investigated for slopes with and without vegetation cover. It can be concluded that if high accuracy is crucial for a monitoring project of slopes having vegetation cover, then manual filtering has advantages over automated filtering methods (mean deviation to tachymetry measurement: manually filtered: 51 mm, automated filtered: 127 mm). After analysis of the whole data set, including comparison of displacement vectors, it can be further concluded that using the presented methodology, including standard GIS tools for filtering applications, it is not possible to determine movement rates <50 mm per investigated period. However, if the point density (the basis for DEM creation) is analysed, reliable conclusions can be made regarding slope movement patterns and erosion and deposition of material.

Acknowledgements. The work was funded by the EU-Research Project ClimChAlp (Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the AlpineSpace), Work Package 6: Monitoring, Prevention and Management of Specific Effects of Climate Change on Nature and the Torrent and Avalanche Control Austria, section Vorarlberg. We thank Martina Mittelberger for some tachymetry measurements and Christina Delaney for assisting proof-reading. Moreover we thank Thierry Oppikofer and the anonymous reviewer whose comments substantially helped to improve the paper.

Edited by: M.-H. Derron Reviewed by: T. Oppikofer and another anonymous referee

References

- Abellán, A., Vilaplana, J. M., and Martínez, J.: Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain), Eng. Geol., 88, 136– 148, 2006.
- Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., and Vilaplana, J. M.: Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 365–372, 2009,

http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/365/2009/.

- Axelsson, P.: DEM generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models, Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, 33, Part B4/1, 110–117, 2000.
- Besl, P. J. and McKay, N. D.: A method for registration of 3-d shapes, IEEE Trans. Pat. Anal. and Mach. Intel., 14(2), 239–256, 1992.

- Biasion, A., Bornaz, L., and Rinaudo, F.: Laser scanning on disaster management. In: Geo-information for disaster management, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2005, 19–35, 2005.
- Bitelli, G., Dubbini, M., and Zanutta, A.: Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, XXXV, part B5, 246–251, 2004.
- Derron, M.-H., Jaboyedoff, M., and Blikra, L. H.: Preliminary assessment of rockslide and rockfall hazards using a DEM (Oppstadhornet, Norway), Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 5, 285–292, 2005,

http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/5/285/2005/.

Dewitte, O. and Demoulin, A.: Morphometry and kinematics of landslides inferred from precise DTMs in West Belgium, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 5, 259–265, 2005,

http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/5/259/2005/.

- Hamrah, M., Shojaee, D., and Mosavi, A.: Evaluation of DTM Generation in Surfer 8.0. E – Conference Proceedings of Map India 2006, http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/ 2006/student%20oral/mi06stu_128.htm, 2006.
- Hsiao, K. H., Yu, M. F., Liu, J. K., and Tseng, Y. H.: Change Detection of Landslide Terrains Using Ground -based Lidar Data, Proceedings of 2003 Annual Symposium of the Society of Chinese Association of Geographic Information, 2003.
- Ingensand, H.: Methodological aspects in terrestrial laser-scanning technology, Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, 22–24 May, Baden, Austria, On a CD, 2006.
- Kilian, J., Haala, N., and Eenglich, M.: Capture and evaluation of airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3. Vienna. 1996.
- Lichti, D. and Jamtsho, S.: Angular resolution of terrestrial laser scanners, Photogrammetric Record, 21(114), 141–160, 2006.
- Lindenberger, J.: Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme, DGK Reihe C, Heft Nr. 400, 1993.
- Mikos, M., Vidmar, A., and Brilly, M.: Using a laser measurement system for monitoring morphological changes on the Strug rock fall, Slovenia, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 5, 143–153, 2005, http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/5/143/2005/.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., and Keusen, H. R.: Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps, Nature Geoscience, 1, 531–535, 2008.
- Pfeifer, N., Köstli, A., and Kraus, K.: Interpolation and filtering of laser scanner data - implementation and first results, in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32(3/1), Columbus, 153–159, 1998.
- Pieraccini, M., Casagli, N., Luzi, G., Tarchi, D., Mecatti, D., Noferini, L., and Atzeni, C.: Landslide monitoring by ground based radar interferometry: a field test in Valdarno (Italy), Int. J. Remote Sens., 24(6), 1385–1391, 2003.
- Prokop, A.: The application of terrestrial laser scanning for monitoring natural hazards, International Research Society INTER-PRAEVENT (Hrsg.), In: Mikos, M., Hübl, J. (Eds.), Extended Abstracts, 11th Congress INTERPRAEVENT 2008, 26– 30 Mai 2008, Dornbirn, 332–334, 2008a.
- Prokop, A.: Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements, Cold Reg. Sci. Technol., 54, 155–163, 2008b.

- Prokop, A., Schirmer, M., Rub, M., Lehning, M., and Stocker, M.: A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes, Ann. Glaciol., 49, 210–216, 2008.
- Prokop, A. and Panholzer, H.: Monitoring landslides using terrestrial laser scanning. Final report: EU-Research Project Clim-ChAlp (Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the AlpineSpace), Work Package 6: Monitoring, Prevention and Management of Specific Effects of Climate Change on Nature, 31–34 and 108–112, 2007.
- Scheidl, C., Rickenmann, D., and Chiari, M.: The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 1113–1127, 2008, http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/8/1113/2008/.
- Schulz, W. H.: Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington, Engineering Geology, 89(1–2), 67–87, 2007.
- Sithole, G. and Vosselmann, G.: Report: ISPRS Comparison of Filters. Department of Geodesy, Faculty of Civil Engineering and GeoSciences, Delft University of Technology, 2003.

- Von Hansen, W. and Vögtle, T.: Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen, PFG 1999(4), 299–236, 1999.
- Vosselmann, G. and Maas, H.-G.: Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, 1–3 March, 2001.
- Vosselmann, G.: Slope-based filtering of laser altimetry data. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(B3/2), 935– 942, 2000.
- Voyat, I., Roncella, R., Forlani, G., and Ferrero, A. M.: Advanced techniques for geo structural surveys in modelling fractured rock masses: application to two Alpine sites. Proceeding: The 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS): "50 Years of Rock Mechanics – Landmarks and Future Challenges", Colorado, 2006.
- Wack, R. and Wimmer, A.: Digital terrain models from laser scanner data. A grid based approach. ISPRS Commission III, Symposium, 9–13 September, Graz, Austria, 2002.

Publikation II

4.2 Wedge-filtering of geomorphologic terrestrial laser scan data

Helmut Panholzer, Alexander Prokop

Sensors, 2013, 13, 2579–2594



Article

Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data

Helmut Panholzer * and Alexander Prokop

Department of Structural Engineering and Natural Hazards, Institute of Mountain Risk Engineering, BOKU-University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Peter Jordan-Str. 82, 1180 Vienna, Austria; E-Mail: alexander.prokop@boku.ac.at

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: hepan@gmx.at.

Received: 4 January 2013; in revised form: 4 February 2013 / Accepted: 8 February 2013 / Published: 20 February 2013

Abstract: Terrestrial laser scanning is of increasing importance for surveying and hazard assessments. Digital terrain models are generated using the resultant data to analyze surface processes. In order to determine the terrain surface as precisely as possible, it is often necessary to filter out points that do not represent the terrain surface. Examples are vegetation, vehicles, and animals. Filtering in mountainous terrain is more difficult than in other topography types. Here, existing automatic filtering solutions are not acceptable, because they are usually designed for airborne scan data. The present article describes a method specifically suitable for filtering terrestrial laser scanning data. This method is based on the direct line of sight between the scanner and the measured point and the assumption that no other surface point can be located in the area above this connection line. This assumption is only true for terrestrial laser data, but not for airborne data. We present a comparison of the wedge filtering to a modified inverse distance filtering method (IDWMO) filtered point cloud data. Both methods use manually filtered surfaces as reference. The comparison shows that the mean error and root-mean-square-error (RSME) between the results and the manually filtered surface of the two methods are similar. A significantly higher number of points of the terrain surface could be preserved, however, using the wedge-filtering approach. Therefore, we suggest that wedge-filtering should be integrated as a further parameter into already existing filtering processes, but is not suited as a standalone solution so far.

Keywords: terrestrial laser scanning; filtering; wedge

1. Introduction

Laser scanning provides point-sample elevation data, which enables the automated and fast generation of Digital Elevation Models (DEM) that can provide information on the morphological features of terrain, vegetation and buildings. A generic DEM normally implies elevations of the terrain (bare earth z-values) void of vegetation and manmade features [1]. To obtain a correct DEM all non-ground points have to be filtered out. The problem of segregating canopy and ground laser returns in laser scanning data is widely known.

Different approaches for filtering laser scanning data exist: the auto-regressive process [2], mathematical morphology [3], method of least squares, robust interpolation [4], convex-concave cover [5], and procedures that use, based on a triangular meshing (TIN) of the DEM, the local terrain inclination as filter criterion [6,7], gridding methods in which a grid DEM is calculated trough including gradient based height values determined in a hierarchical data pyramid [8–10], method of multiscale curvature classification [11].

These methods filter data obtained from airborne laser scanning. Aerial surveys are usually carried out directly over the site and provide relatively equally distributed measuring data. In contrast, terrestrial laser scans yield very irregularly distributed measuring data. First, because the distance between measured points increases in proportion to the measuring distance; second, it is difficult to avoid shadows caused by obstacles, such as trees, shrubs, or buildings. It is therefore more difficult to filter ground and non-ground points to calculate a digital elevation model (DEM). Currently, the following steps are recommended by different authors [12]: (a) manual cleaning of the TLS datasets, *i.e.*, removal of non-ground points, for example vegetation, wires and mobile objects. This step is time consuming, but necessary in most cases; (b) sometimes automatic algorithms for filtering non-ground points may be applied, looking either for differences in geometry [13,14] or in intensity of the returned signal [15]. The algorithms usually succeed in filtering of trees, but often fail to filter small plants and bushes, which need to be removed manually; (c) instrumental errors, *i.e.*, scattering of the TLS measurements around their true value, should be corrected when accurate measurements are necessary [16], for example noise reduction by filtering or averaging [17,18]. Prokop and Panholzer [14] propose to combine the principle of the robust interpolation with the process of morphological opening (IDWMO). The wedge-filtering method we describe here has a different approach than the existing algorithms, but can only be used for terrestrial laser scanning data.

2. Methods

In a static terrestrial laser scan, all measured points must be visible from the laser source of the scanner. Connecting each point with the laser source creates a line between the two, given that there were no obstacles along these lines. In case two connecting lines have the same horizontal angle, the connecting line with the larger vertical angle and smaller measuring distance (Figure 1, red line) compared to the connecting line with the smaller vertical angle and greater measuring distance (Figure 1, blue line) cannot lead to a ground point. Consequently, a point cannot be a ground point if there is a more distant point with a smaller vertical angle in the same direction.

Figure 1. Cross-section of a terrestrial laser scan showing connections between laser scanner and recorded points.



Only in a few cases, and often depending on the angular resolution of the scanner, two connecting lines have the same horizontal angle. To assess whether a point with a small vertical angle and a large measuring distance identifies another point with a greater vertical angle and a smaller measuring distance as a non-ground point, an elimination area must be defined in regard to the deviation of the horizontal angle. If the horizontal deviation increases proportionally to the difference of the vertical angle, the elimination area is V-shaped (Figure 2). In this paper we refer to the angle of the V-shape as filter angle .The further a point is over the connection line of another point, the more likely it is to be a vegetation point. Therefore the elimination area should have a greater filter angle.

Figure 2. Frontal view of a terrestrial laser scan recording. Marked is the V-shaped elimination area. The blue dots are further away from the laser scanner than the red dots. Part **A** shows a larger filter angle than part **B**.



For example: If the filter angle is 80 degrees; a point located one meter above the connecting line of another point would be classified as a non-ground point if a lateral deviation of 17.36 cm is not exceeded. A point only half a meter above the connecting line is classified as such only up to a lateral deviation of 8.68 cm. If a point is within this elimination area, it is marked as a non-ground point and is eliminated from further calculations. If a point is outside this elimination area, it is recognized as a ground point and used as a basis for a new elimination area.
The angle of the V-shape is the primary parameter for the filtering procedure. If the inclination of the elimination area is flatter than the terrain inclination, even terrain points are eliminated. For any point an upward open wedge is generated (Figure 3). Any point that falls into the wedge of another point is eliminated as non-ground point. The wedges in Figure 3 we present in a slightly oblique view to emphasize the V-shape. For the elimination areas, also forms other than the V-shape are possible, for example when the horizontal deviation increases exponentially or according to a specific function curve to the difference of the vertical angle.

Figure 3. Oblique view of a terrestrial laser scan. The elimination areas are shown three-dimensionally and thus appear in the form of wedges.



It is important to consider the different filtering behaviour for long and steep elements, for example for walls. For visualization, we present three laser scan records shown from above and from the side. Laser beams hit a slightly inclined wall (Figure 4, light blue line) from different horizontal angles.

Figure 4. Laser scan of a wall with three different horizontal angles; seen from the side (**A**) and from above (**B**).



If the recording beams hit the wall perpendicular (Figure 4(A,B), left), the filter angles have no influence on the wall and only exactly vertical and overhanging parts are eliminated (2.5 D filter). In case of the situation shown in the middle of Figure 4(A) and (B), the filter angle would have a larger influence. In the recording on the right side of Figure 4(A) and (B), where the wall is nearly in the direction of the laser beam, the wall would be filtered out if it was only minimally steeper than the filter angle.

3. Description of Test Areas

3.1. First Test Area

The test area is located near the village of Gries am Brenner in Tyrol, Austria. In addition to the automated filtering, we manually categorized points into ground and non-ground points. The manually filtered results are therefore suitable for comparison with results from automated filtering methods.

Figure 5. Test are ((A): ÖK 50; (B) aerial photo); image source: © Land Tirol, *tiris*, www.tirol.gv.at/tiris.



Figure 6. Inclination map of the test area, generated with the "slope" function of ArcGIS.



We undertook scanning from three positions. The surveyed areas only overlap slightly. For testing, we chose a record with 114,800 points. We took measurements of the south-facing slopes of the Padauner Kogel (Figure 5). The terrain in the approximately 1 km long area has a height difference between valley and mountain tops of approximately 450 m and covers an area of 0.3 km². Areas with vegetation alternate with up to 70 degree steep cliffs without vegetation. The terrain is diverse and has abrupt terrain transitions. Here, automated filtering of the laser scanning data is difficult. Most filtering methods work with angle thresholds and these thresholds must be high in order not to falsely eliminate the existing

natural terrain transitions. Figure 6 shows an inclination map of the test site. Flat areas are green to account for the prevailing forest cover. The mostly barren slopes with more than 60 degrees inclination remain blue. Two significant, large rock formations are on the upper side and at the left below.

3.2. Second Test Site

The study area is located in the valley of Montafon near Schruns in Vorarlberg, Austria (Figures 7 and 8). We chose one scan position, at a distance of approximately 100 m to the scanned slope. The scan contains 196,932 points. In contrast to the first test area, the filtering is easier, because of significantly reduced vegetation. Only some fallen trees and tree trunks exist due to a landslide.

Figure 7. Aerial photos Galierm, 2001 (A) und 2006 (B); image source: © Land Vorarlberg, http://vogis.cnv.at.



Figure 8. Location of the two test areas; image source: © Geoland, www.geoland.at.



4. DEM Calculation of the Test Areas Using the Wedge-Filtering Method

To implement wedge-filtering in a computer program, we used the programming language VB.NET. The filter angle value is the only input parameter for the calculation (Figure 9).

🖳 LASERSC	ANNER FILTE	ERUNG			- D X
Datei B	Berechnung	Ansicht			
		Laserscanner Koordinate	n	×7	
	id x	У	z		
	1 21004	2.556 88837.407	1305.515	- Contractor of the State of th	
		Aufnahme Daten			
	id	x	у		
	1	210667.064	89064.934		
1	2	210667.238	89064.993		
3	3	210667.229	89064.985	3	. U
<	4	010007 040	00005 000		
w. Boden 3041 Shape Grid Ladefa Hangr	punkte: Win 67 aktor 0 neigung 0	kel < max. Wi: Winkel > r 15739 685 Parameter LängeBreite BrWi GridSize Länge min.	aax. Wi: n. ber. Pun 70 23 4 20 1 34.6823038		
Hangri	ichtung 0	Länge max	1000		
Filterw	inkel 60	Winkel min	317.483551		
Filterw	inkel2 80	Winkel max.	20.0181997		
				FullExtend Pan Zoom In Zoom Out	

Figure 9. Screenshot of the calculation using our own computer program.

For the evaluation we chose four different filter angles: 80, 70, 60 and 50 degrees. We omitted lower angles, because the slopes in the test areas are generally steeper. We classified every point of the point cloud by the following two steps:

(1) comparison of the horizontal distance of the line between laser scanner and the point to be verified with the distance between scanner to every other point:

$$distance_{pv} < distance_{pc} \tag{1}$$

where: $distance_{pv}$ is the horizontal distance between the laser scanner and the point to be verified, and $distance_{pc}$ is the horizontal distance between the laser scanner and the compared point.

If the distance to the point to be verified is longer than the distance to a compared point, the point to be verified cannot be in the wedge of the compared point. Therefore, we cannot determine whether it is a ground point or not. In this case we need to compare the next point of the point cloud. If the distance to the point to be verified is shorter than that to the compared point, the verifying point could be in the wedge of the compared point. In this case, we continue with step 2:

(2) The next step is verifying whether the point is in the wedge or not. We can calculate the angle between the two lines and assess if the angle exceeds the user-defined threshold filter angle:

$$Atan(\Delta\theta / [+/-]\Delta\varphi) > \lambda_{thres}$$
⁽²⁾

where: θ : azimuth-angles of the points with the origin in the laser scanner; φ : polar-angles of the points with the origin in the laser scanner, and λ_{thres} : threshold-angle which must be defined.

If this angle between the lines to the point to be verified and the compared point is larger than the defined filter angle, the point to be verified is located in the region of the wedge of the compared point

and therefore can be classified as a non-ground point. An ASCII file contains the result of the calculation including. X, Y, Z coordinates and a status value for each point. The value "0" indicates a ground point, the value "1" indicates a non-ground point.

To obtain a digital elevation model (DEM), we interpolate the ground points using ArcGIS by ESRI Inc. According to ESRI [19] the Natural Neighbour method is also well suited for distributed point clusters, for example from terrestrial laser scan recordings. Based on the computed results, we calculated four DEMs with a cell size of one meter. To evaluate the results we used DEMs of the test areas, which had been generated with manually filtered ground points. We calculated the difference between the newly calculated and the manually filtered DEMs.

Additionally to the results of the new filter approach we described above, we compared DEMs of the test areas with the results of the automated filter method described by Prokop and Panholzer [14].

To evaluate the accuracy to the reference DEMs, we calculated the mean error and the root-mean-square-error (RMSE). According to the ASPRS Guidelines [1] and Gianinetto and Fassi [20], the RMSE is often used to assess the accuracy of elevation data and is defined as:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta Z_i)^2}{n}}$$
(3)

where ΔZ_i are the elevation residuals (*i.e.*, the differences of the elevation measures with respect to reference data) and n is the number of measures. Höhle *et al.* further recommend to use the median, the normalized median absolute (NMAD), the standard deviation, the 68.3% quantile and the 95% quantile of absolute residuals for accuracy assessment of DEMs [21,22].

5. Results and Discussion

5.1. First Test Area

The centre of the first test area shows a low point density after we manually filtered the data. Because of the missing ground points, the significance of the filtering effect is low. Consequently, the statistical values for the entire recording area are distorted. To allow for more significant results and to obtain a better comparison, we additionally selected a specific area with a high point density for further analysis.

In Figure 10 we show the differences between the new calculated DEMs and the manually filtered DEMs (DoD = Differences of DEMs). The areas with warm colour indicate a good accordance between the two DEMs. The red areas indicate where the newly calculated DEMs are located above the reference model, resulting from an insufficient filtering effect. Blue areas show where the newly calculated DEM is lower than the reference model, as a result of incorrectly filtered ground points.

Figure 10. Differences of the first test area between the new calculated terrain models (filter angles 80, 70, 60 and 50 degrees) and the manually filtered terrain model (m). Red rectangle indicates the area of high point density.



We identified 39,659 ground points and 39,110 non-ground points using a filter angle of 80 degrees. The mean error of the two surfaces is 4.779 m, with a RMSE of 6.996 m and a standard deviation of 5.110 (Table 1). The red areas in the image indicate vegetation, which has not been filtered out. Looking at the pictures in decreasing filter angle order, a reduction in size and number of these red areas is visible. Especially in the forested areas in close proximity to the laser scanner, an area with high point density, a smaller filter angle yields a better filter effect, as indicated by the larger warm coloured zones in Figure 10. In the more distant forested areas the filtering effect is reduced, even when we use a filter angle of 50 degrees (recognizable by the large red areas in the centre of Figure 10). In this area we could only record the highest tops of the trees, since it is unlikely that the laser beam penetrates to the ground of such forested areas. Therefore effective filtering is difficult.

Value	Filter Angle of Wedge-Filtering				
value	80	70	60	50	ID W MO Wiethod
Ground points	39,659	34,108	29,229	24,398	12,326
Mean error	4.779	3.816	2.908	1.618	1.032
RMSE	6.996	5.996	5.284	5.316	3.333
Standard deviation	5.110	4.626	4.412	5.064	3.169
Median	3.304	2.096	1.277	0.747	0.166
NMAD	6.474	5.680	5.085	5.000	3.411
68.3% quantile	7.170	5.360	3.819	2.472	1.258
95% quantile	14.257	12.981	11.765	10.654	7.718

Table 1. Statistical values for the first test area.

When we use a filter angle of 50 degrees in the test record, the number of ground points is reduced to 24, 398 and the mean error is 1.618 m. This last result must be questioned, because the value of the RMSE is 5.316 m and thus higher than 5.284 m, which is the RMSE at an angle of 60 degrees. The standard deviation even raises from 4.412 m at an angle of 60 degree to 5.064 m at an angle of 50 degree. This decline in accuracy is a result of the steep rock walls at the left side of the recording (Figure 10, yellow lines). When we look at the pictures in decreasing order of the filter angle, the blue areas increase in size. This indicates that ground points were filtered out. This area has slopes partly exceeding 70 degrees. Because the face of the rock wall was measured from the side, the chosen filter angle affects the quality of the filter angle is 60 degrees. In the other rock wall (Figure 10, green lines) there are only small blue stripes visible in the picture, showing the results of a filter angle of 50 degrees. The differences between the area calculated with the IDWMO-method and the manually filtered DEM are also shown in Figure 10. The standard deviation is 3.169 m and the RMSE is 3.333 m.

In Figure 11 colour-separated point clouds compare the results of the point classification of the new model calculated using a filter angle of 50 degrees with the manually filtered terrain. The yellow and blue points were detected as ground points during the wedge-filtering. The 15,867 yellow dots correspond well with the results of the manually filtered terrain model. All 8,561 blue points are located more than 20 cm above the manually filtered terrain model and were thus classified falsely as ground points. The red and green points were classified as non-ground points. The 49,650 red points are all more than 20 cm above the manually filtered terrain model and were thus correctly classified as non-ground points. The 4,721 green points were classified as non-ground points, although they match with the manually filtered terrain model. As mentioned above, a filter angle of 50 degrees would be too low for the left side of the recording. In the area with mainly blue points in the upper third of the picture, however, a lower filter angle would probably yield better results.

Figure 11. First test area—point classification of the new calculated model (filter angle 50 degrees), compared with the manually filtered terrain model in the form of a colour-separated point cloud.



Table 2 shows the results of the classification using the filter angles 80, 70, 60 and 50 degree as described above. We can see an increasing filtering effectiveness by decreasing the filter angle from 80 degrees to 50 degrees. The number of undetected non-ground points decreases from 19,988 to 8,561. The number of falsely eliminated ground points increases from 894 at 80 degrees filter angle to 4,721 at 50 degrees filter angle, however.

	Manual filtering						
Filter Angle	Ground Points Wedge-Filtering: Ground Points	Non-Ground Points Wedge-Filtering: Non-Ground Points	Non-Ground Points Wedge-Filtering: Ground Points	Ground Points Wedge-Filtering: Non-Ground Points			
	19,671	38,216	19,988	894			
70°	19,156	43,252	14,952	1,409			
60°	17,884	46,862	11,345	2,678			
50°	15,837	49,650	8,561	4,721			

Table 2. Point classification of the four new calculated models (80, 70, 60 and 50 degree of filter angle) compared with the manually filtered terrain model.

5.2. Detail of First Test Area with a High Point Density

The objective of the following assessment is to understand how the wedge filter works under more homogeneous conditions. Therefore we calculated statistical values also for a sample area of the first test area (Figure 10, red rectangles). The resulting statistical values are summarized in Table 3.

A significant improvement can be seen by reducing the filter angle (see RMSE values in Table 3). The RMSEs of the wedge-filtering method for the entire test area are larger than the RMSEs using the

2590

IDWMO method. In the area with higher point density, however, the RMSE of the result using a 50 degree filter angle is 1.180 m the standard deviation 0.962 and therefore lower than RSME and the standard deviation of the IDWMO method with 1.366 m. A higher number of points of the terrain could be preserved using the wedge-filtering approach (see ground points in Table 3).

V - I	Filter Angle of the Wedge-Filtering				
value	80	70	60	50	
Ground points	3,427	3,172	3,014	2945	1,346
Mean error	2.293	1.923	1.296	0.862	0.361
RMSE	4.084	2.819	1.855	1.180	1.366
Standard deviation	3.380	2.353	1.537	0.962	1.366
Median	0.613	0.520	0.456	0.399	-0.054
NMAD	3.705	2.451	1.529	0.911	1.057
68.3% quantile	1.925	1.196	0.828	0.624	0.125
95% quantile	10.123	7.054	4.390	2.618	1.876

 Table 3. Statistical values for the detail area.

5.3. Second Test Area

We calculated, similarly to the first test area, four different DEMs using filter angles of 80, 70, 60 and 50 degrees and determined the difference between the newly calculated elevation models and the manually filtered elevation model (Figure 12 and Table 4). In Figure 12 two regions are highlighted with yellow and green color. The area marked yellow represents densely forested terrain. Applying a filter angle of 80 degrees, not all vegetation points were filtered, shown by the red areas. The filter angle of 50 degree delivered better results, indicated by the warm-coloured areas. The areas marked green represent steep walls. Using a filter angle of 50 degrees, we obtain some black blue, because parts of the wall were filtered out incorrectly (in contrast to the result at 80 degrees).

A filter angle of 70 degrees has proved to show the best results, with an RMSE of 0.387, where over 80,000 of the 196,932 points were filtered out. With the IDWMO method we obtain a RMSE of only 0.517. The higher point density and reduced vegetation result in a much lower average height and RMSE. The 95% quantile of 0.075 m is lower than the 95% quantiles of the wedge filtering. The reason is the morphological opening of the IDWMO method, where a minimum raster is used. As we can see by the low mean error of -0.126 m the IDWMO method tends to filter out more points than wanted. In case of wedge filtering using a filter angle higher than the steepest slope of the scanned area no ground point will by filtered out incorrectly. The high mean errors and 95% quantiles indicate non-ground points which had not been filtered out.

Figure 12. Differences of the second test area between the new calculated terrain models (filter angles 80, 70, 60 and 50 degrees) and the manually filtered terrain model (m).



 Table 4. Statistical values for the second test area.

Value	Filter Angle of Wedge-Filtering				
value	80	70	60	50	ID W MO Method
Ground points	122,975	116,824	108,186	97,426	120,299
Mean error	0.219	0.092	0.024	-0.030	-0.126
RMSE	0.768	0.387	0.446	0.464	0.517
Standard deviation	0.736	0.376	0.445	0.463	0.502
Median	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.058
NMAD	0.499	0.252	0.198	0.225	0.249
68.3% quantile	0.041	0.024	0.008	0.001	-0.035
95% quantile	1.256	0.619	0.412	0.272	0.075

6. Conclusions and Outlook

2592

We present a method particularly suited for filtering terrestrial laser scanning data. This method is based on the direct line of sight between the scanner and the measured point and the assumption that no other surface point can be located in the area above this connection line. The analysis of the method shows that even with a high filter angle and associated low error probability we can filter out a considerable number of non-ground points. To filter successfully, the selected filter angle must be as low as possible. The effect of the filter angle differs between measuring an object from the side or frontally. For measurements from the side, the filter angle should not be higher than the maximum inclination of the terrain. A possible approach to improve the quality of the presented filter is dividing a total area into small homogeneous subareas with similar inclination conditions and recording angles.

Our method is a new method for filtering terrestrial laser scanning data, rather than a stand-alone solution for calculating a digital terrain model. The method can be used as a supplement, for pre-filtering, or it can be helpful for the verification of results from other methods. The assumption of the direct line of sight between laser scanner and recorded point is an important additional filter parameter not yet used in other filtering methods. Using wedge-filtering, many points can already with good confidence-be classified as non-ground points. Especially with iterative methods, such as robust interpolation or inverse distance weighting, wedge-filtering can prevent that too many non-ground points are included in the first surface interpolation. Furthermore, wedge-filtering correctly removes some non-ground points, which other methods would incorrectly retain as ground points. For parts of the research area, the mean error as well as the RMSE between the results and the manually filtered reference surface of the compared methods are similar, but a significantly higher number of ground points could be preserved using the wedge-filtering approach.

We only describe the basic method of a new filter approach, however we propose that it is possible to achieve a complete filter based on the function of the wedge-filter, by accounting for additional criteria, even without the use of conventional filter methods. Consequently, in our current work we try to implement iterative calculation methods using thresholds for refractive angles to neighbouring points.

Acknowledgments

The TLS-surveying campaign was funded by OEBB, Infrastruktur Betrieb AG (Austrian Railways), section Tyrol (DI Peter Dirninger). We would like to thank to RIEGL Measurement Systems for their assistance and support and also Christina Delaney and Florian Singer for help with fieldwork. We thank Peter Schoen for proof-reading.

References

- ASPRS Guidelines-Vertical Accuracy Reporting for LiDAR Data. Available online: http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/Downloads/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_ Data.pdf (accessed on 1 February 2013).
- Lindenberger, J. Laser-Profilmessungen Zur Topographischen Geländeaufnahme. Ph.D. Thesis, Universität Stuttgart: Stuttgart, Germany, 1993.

- 3. Kilian, J.; Haala, N.; Englich, M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **1996**, *31*, 383–388.
- 4. Pfeifer, N.; Köstli, A.; Kraus, K. Interpolation and filtering of laser scanner data-implementation and first results. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **1998**, *32*, 153–159.
- 5. Von Hansen, W.; Vögtle, T. Extraktion der geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen laserscanner-aufnahmen. *PFG* **1999**, *4*, 299–236.
- 6. Axelsson, P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **2000**, *33*, 110–117.
- Vosselman, G. Slope-based filtering of laser altimetry data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 2000, 33, 935–942.
- 8. Wack, R.; Wimmer, A. Digital terrain models from airborne laser scanner data—A grid based approach. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **2002**, *35*, 293–296.
- 9. Sithole, G.; Vosselman, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2004**, *59*, 85–101.
- 10. Briese, C.; Pfeiffer, N.; Dorninger, P. Applications of the robust interpolation for DTM determination. symposium der ISPRS-comm. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **2002**, *34*, 55–61.
- 11. Evans, J.S.; Hudak, A.T. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2007**, *45*, 1029–1038.
- Lim, M.; Petley, D.N.; Rosser, N.J.; Allison, R.J.; Long, A.J.; Pybus, D. Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution. *Photogramm. Rec.* 2006, *20*, 109–129.
- Jaboyedoff, M.; Metzger, R.; Oppikofer, T. Couture, R.; Derron, M.H.; Locat, J.; Turmel, D. New Insight Techniques to Analyze Rock-Slope Relief Using DEM and 3D-Imaging Cloud Points: COLTOP-3D Software. In *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*; Eberhardt, E., Stead, D., Morrison, T., Eds.; Taylor & Francis: London, UK, 2007; pp. 61–68.
- 14. Prokop, A.; Panholzer, H. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2009**, *9*, 1921–1928.
- 15. Akca, D. Matching of 3D surfaces and their intensities. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2007, 62, 112–121.
- Biasion, A.; Bornaz, L.; Rinaudo, F. Laser Scanning Applications on Disaster Management. In *Geo-information for Disaster Management*; van Oosterom, P., Zlatanova, S., Fendel, E.M., Eds.; Springer Verlag: Berlin, Germany, 2005; pp. 19–33.
- Lindenbergh, R.; Pfeifer N. A Statistical Deformation Analysis of Two Epochs of Terrestrial Laser Data of a Lock. In *Proceedings of the 7th Optical 3-D Measurement Techniques*, Vienna, Austria, 3–5 October 2005; pp. 61–70.
- Abellán, A.; Jaboyedoff, M.; Oppikofer, T.; Vilaplana, J.M. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to a rockfall event. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2009, *9*, 365–372.
- 19. ESRI Education Services. Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst, 2005. Available online: http://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf (accessed on 20 October 2012).
- Gianinetto, M.; Fassi, F. Validation of cartosat-1 DSM generation for the salon de provence test site. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2008, *37*, 1369–1374.

- 21. Höhle, J.; Höhle, M. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2009**, *64*, 398–406.
- 22. Assessment of the Quality of Digital Terrain Models. Available online: http://www.eurosdr.net/ publications/60.pdf (accessed on 1 February 2013).

© 2013 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).

Publikation III

4.3 HOVE-Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data

Helmut Panholzer, Alexander Prokop

Applied Sciences, 2018, 8, 263





Article HOVE-Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data

Helmut Panholzer^{1,*} and Alexander Prokop²

- ¹ Department of Structural Engineering and Natural Hazards, BOKU, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Peter Jordan-Str. 82, Vienna 1190, Austria
- ² Department of Arctic Geology, University Centre in Svalbard (UNIS), P.O. Box 156 N-9171, Longyearbyen N-9171, Norway; alexander.prokop@unis.no
- * Correspondence: hepan@gmx.at

Received: 28 December 2017; Accepted: 6 February 2018; Published: 9 February 2018

Abstract: Terrestrial laser scanning has become an important surveying technique in many fields such as natural hazard assessment. To analyse earth surface processes, it is useful to generate a digital terrain model originated from laser scan point cloud data. To determine the terrain surface as precisely as possible, it is often necessary to filter out points that do not represent the terrain surface. Examples are vegetation, vehicles, and animals. In mountainous terrain with a small-structured topography, filtering is very difficult. Here, automatic filtering solutions usually designed for airborne laser scan data often lead to unsatisfactory results. In this work, we further develop an existing approach for automated filtering of terrestrial laser scan data, which is based on the assumption that no other surface point can be located in the area above a direct line of sight between scanner and another measured point. By taking into account several environmental variables and a repetitive calculation method, the modified method leads to significantly better results. The root-mean-square-error (RSME) for the same test measurement area could be reduced from 5.284 to 1.610. In addition, a new approach for filtering and interpolation of terrestrial laser scanning data is presented using a grid with horizontal and vertical angular data and the measurement length.

Keywords: terrestrial laser scanning; filtering; ground points; digital terrain model (DTM)

1. Introduction

For the generation of a digital terrain model (DTM), it is necessary to identify the terrain points on the bare earth surface. Thus, all non-terrain-points such as vegetation, buildings and other constructions above the ground must be removed, which is referred to as filtering in this context [1].

There are different approaches for filtering laser scanning data. Some examples of basic algorithms, which have been modified in many ways, are mathematical morphology [2,3], interpolation-based [4], and triangulated irregular network (TIN)-densification. By using geometrical values such as distances and angles as filter criteria [5], algorithms progressively densify the digital terrain model (DTM) to approximate the bare earth [6,7].

These common ground modelling methods have been manly developed for airborne laser scanning (ALS) data and are not optimally suited for ground level determination from terrestrial laser scanning (TLS) data.

The intrinsic point cloud densities, scanning distances, the distribution of noise points and the backscattering geometry of TLS data vary significantly when compared to ALS data. As a terrestrial laser scanner is located within the target area, complete occlusion to some viewing directions is highly probable. The spatial distribution of TLS points are heavily concentrated around the immediate vicinity of the scanner, resulting in excessively high point cloud densities near the scanner that become detrimental for the point cloud processing [8].

Further, many ground filtering techniques are limited in application within challenging topography and experience difficulty coping with some objects such as short vegetation, steep slopes, and so forth. Lastly, due to the large size of point cloud data, operations such as data traversing, multiple iterations, and neighbour searching significantly affect the computation efficiency [9].

Some methods have been developed especial for TLS data to segment into ground and non-ground points.

Brodu and Lague [10] present a supervised classification method using multi-scale dimensionality analysis based on the geometric characteristics of the scene. Combining this information from different scales can build signatures of the scene at each point. This signature can then be used to discriminate vegetation from soil for example.

Pirotti et al. [11] use the information of a multireturn TLS for vegetation mapping. First, the thresholds of the return number and the normalized amplitude of intensity are set to determine possible ground points. Subsequently, a progressive morphological filter is adopted for generating a DTM and digital surface model (DSM) where the maximum and minimum *Z* values are used as criteria to apply a dilation and erosion operator.

Lau et al. [12] separate ground and non-ground of TLS data by using the RGB value.

Liang et al. [13] developed a scan line continuousness segmentation well suited for trunk detection. The approach is based on the continuity property of the object surface, planar distance and segmentation in horizontal and vertical directions. The one-dimensional segmentations were first performed independently and then combined to groups with similar distances to the scanner.

Che and Olsen [9] present a fast ground filtering method for TLS data via a Scanline Density Analysis. The process first separates the ground candidates, density features, and unidentified points based on an analysis of point density within each scanline. Then, a region growth using the scan pattern is performed to cluster the ground candidates and further refine the ground points (clusters).

The method of Panholzer and Prokop [14] and Puttonen et al. [8] uses a priori information of the TLS configurations and scanner-centred coordinates to determine the ground level. Integrating these coordinates in the filtering process is an important additional filter parameter.

Some of these methods need additional data that are not always available or are made for a special purpose such as tree location mapping. The method presented here is intended to show a way—including new filter information—of distinguishing soil from non-soil points only with basic data (point cloud and coordinates of laser scanner).

2. Materials and Methods

2.1. Preconditions for Filtering Terrestrial Laser Scanning Data

The great difficulty of filtering earth surface point cloud data is that each point is related to some extent to any other point. In the case of Kriging [15], an attempt is made to take this fact into consideration as far as possible. As soon as a point is removed, it changes the estimated surface model for the points in the closer neighbourhood. The model has to be recalculated under the new, changed conditions. Particularly in the case of non-unambiguous recording areas, a step-by-step elimination of points results in a surface which is plausible for the human observer with certain probability. The process of point cloud filtering must therefore almost necessarily be an iterative process.

The human being can derive when manually filtering point cloud data a certain probability with regard to the correct surface from height values, the distribution, the structure, etc. It is, e.g., very unlikely that there is an abrupt change in the surface. However, in the case of TLS, more than in the case of ALS, it must be taken into account that objects are usually recorded only from one side, resulting in sharp edges as well as larger areas without recorded points (shadows) behind these objects.

The more a point deviates from the surrounding points (e.g., in height), the more likely it is not a ground point. It is difficult to classify these points with a few and unequally distributed neighbouring points. In these areas, the filter process can be at best a rough estimate.

In this extended approach of the HOVE-Wedge-filtering, an attempt was made to simulate the human perceived probability estimates in the form of algorithms by the help of a computer model which is as universally applicable as possible.

2.2. Wedge Iterative (Modified Model)

The work presented is based upon "Wedge-filtering of geomorphologic terrestrial laser scan data" [14], where the general procedure of the Wedge Absolute method is described. In the following, we explain our modifications that led to the Iterative Method while the basic principle of Wedge Absolute is briefly reproduced for understanding.

In a static terrestrial laser scan, all measured points must be visible from the laser source of the scanner. Figure 1A shows a point cloud of terrain from the view of the laser scanner. Connecting each point with the laser source creates a line between the two (blue line in Figure 1B), given that there were no obstacles along these lines. In the case two connecting lines have the same horizontal angle, the connecting line with the larger vertical angle and smaller measuring distance compared to the connecting line with the smaller vertical angle and greater measuring distance cannot lead to a ground point. Consequently, a point cannot be a ground point if there is a more distant point with a smaller vertical angle in the same direction.



Figure 1. View to terrain from the centre of scanner (A); and cross-section of a terrain (B).

Of course, it is rare that two connection lines have exactly the same direction. Thus, you need to define a threshold. The basic idea is that, for each point, two adjacent points are searched, which are further from the recording point than the point to be checked. The angle is calculated between the connecting line from the recording centre to the recording point and the connecting lines to the adjacent points. The angles are calculated using Equation (1):

$$\alpha_{li,re} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_{vert}}{abs \ (\Delta_{horz})} \right) \tag{1}$$

where $\alpha_{li,re}$ is the left or right wedge angle; Δ_{vert} is the difference of the vertical angle; and Δ_{horz} is the difference of the horizontal angle.

For the Wedge Absolute method, if the angular values are greater than a previously defined threshold value, the corresponding recording point is recognized as a non-ground point and will be erased (Equation (2)).

$$\alpha_{li} \cap \alpha_{re} > \lambda_{TLV} \tag{2}$$

where $\alpha_{li,re}$ is the left or right wedge angle; and λ_{TLV} is the threshold limit value.

Because the section for the two angle thresholds looks like a wedge (Figure 1A, blue dashed), we called it the wedge-method. As mentioned in our previous work [14], this filtering method is

not a stand-alone solution for calculating a digital terrain model because it has some weaknesses. The Wedge Absolute method on its own provides satisfactory filtering results only for terrain, without steep inclines.

In contrast to the absolute method in the iterative method, the angle difference to the two adjacent points is calculated for all points. This angle difference is compared with a predefined threshold value. Therefore, an angle difference of 180° means that the point lies precisely in a plane with the two adjacent points. A value greater than 180° indicates that the point is not likely to be deleted. A very small value (acute angle) again indicates a vegetation point. The method to find the two adjacent points is explained in Section 2.3.3. If the angle difference is less than a certain threshold, the point will be erased (Equation (3)):

$$\theta_{diff} < \lambda_{TLV} \tag{3}$$

where θ_{diff} is the difference of left (from right adjacent point) and right (from left adjacent point) wedge angle; and λ_{TLV} is the threshold limit value.

2.3. Theory of Filtering over Vertical Horizontal (HOVE) Angular Grid

The method of HOVE grid offers a wide range of possibilities for effective point filtering. Normally, in the case of surface computation, the points are plotted in an *X*, *Y* coordinate field. Interpolation then takes place with the inclusion of the *Z*-coordinate (height). Since the point cloud of terrestrial laser scanners results in a very irregular *X*, *Y* coordinate distribution, large areas have to be interpolated or estimated during the generation of height-grid.

A terrestrial laser scanner measures the terrain with a constant angle step in a strip-like manner. If instead of the *X* coordinate, we use the horizontal angle (ϕ) values and instead of the *Y* coordinate, use the vertical angle (θ) values, an almost perfect, gap-free raster is normally obtained (Figure 1A). This approach is very similar to the method described by Liang et al. [13]. An interpolation involving the recording length has several advantages:

- The output grid contains no gaps.
- It is easier to find terrain structures (e.g., terrain edges).
- Quick recalculation of adjacent points is easily computable.
- 3D filtering is possible.

All information on the search area of the adjacent points can be made in the form of grid spacing, which is normally constant. The grid spacing corresponds to the angle step (θ and ϕ) of the laser scanner.

The HOVE grid has been used in the following ways.

2.3.1. Horizontal and Vertical Angles within the HOVE Grid

Figure 1A shows a horizontal–vertical angles (HOVE) gird, while Figure 2 represents a small sector of such a grid. Within the point grid, the closest points above and below as well as to the left and right of the point to be examined are determined (Figure 2, blue points). For this purpose, the corresponding search area must be defined. Within these search areas, the point with the smallest angular distance to the point to be examined is searched. Subsequently the angle from the examined point to the adjacent points is calculated using Equation (4):

$$\alpha_{wi} = \tan^{-1} \left(\frac{\left(L_{puex} - L_{puad} \right) \times 2}{\sin\left(\beta_{puex} - \beta_{puad} \right) \times \left(L_{puex} + L_{puad} \right)} \right)$$
(4)

where α_{wi} is the angle from examined point to adjacent point; L_{puex} is the length from laser scanner to examined point; L_{puad} is the length from laser scanner to adjacent point; and β_{puex} is the angle from laser scanner to examined point; β_{puad} : angle from laser scanner to adjacent point.

In addition to the closest points, the points with the lowest α_{wi} below the point to be examined are determined (Figure 1, green points).



Figure 2. Horizontal-vertical (HOVE) grid and search area for horizontal and vertical angles.

From the angles found, the respective angle difference can be calculated. If no angle could be calculated for one side due to lack of points, the average of the negative angles of the next and after next point on the opposite side was taken for this side. If no closed point angle could be determined fir both sides, the difference of points with the lowest α_{wi} will be used for calculation.

With the help of these angle differences, the following statements on the terrain model can be made.

Find Distance Measurement Errors

The dataset used includes some points that are obviously measurement errors. Even points which have a remarkably large length must be removed before the ending filtering. These points would otherwise be responsible for removing a lot of correct ground points. To identify these points, in a specific search range for each point, the horizontal as well as vertical back angle-difference to its neighbouring points is calculated. The left side of Figure 3 shows a schematic representation of the terrain cross-section, where the grey lines correspond with the vertical angles—to the adjacent points above and below the point to analyse—in Figure 2. The right side should give you an idea how these points could be situated in a cross-section of a measured point cloud.



Figure 3. Terrain view from the side with measurement error.

If this angle difference is greater than a previously defined threshold value, this point is prematurely removed as a measurement error point from the further calculation (Equation (5)):

$$\theta_{dive} \cap \theta_{diho} > \lambda_{TLV} \tag{5}$$

where θ_{dive} is the difference of the vertical back-angles; θ_{diho} is the difference of the horizontal back-angles; and λ_{TLV} is the threshold limit value.

Reduction to a 2.5-Dimensional Terrain

In this step, all points above a connecting line from other points below are removed from a three-dimensional point cloud (Figure 4). From the remaining points, a 2.5-dimensional terrain can be expected. These points would also be eliminated by Wedge Filtering. Since the filtering is only done iteratively via the wedge angle, the reduction with HOVE grid is more effective.



Figure 4. 2.5D reduction with max. angle below threshold line.

As described in Section 2.3.1, beneath the angles to the adjacent points the angle to the point with the lowest α is also calculated. If you take a small cross-section such as the red area in Figure 1A, points with a higher θ and shorter length (Figure 1B) are with high probability vegetation points. The lowest α_{wi} of such points is less zero. If the angle to the point below with the lowest α_{wi} is less zero, the examined point will be eliminated:

$$x_{wi \ vert \ below} > \lambda_{TLV}$$
(6)

where $\alpha_{wi vert below}$ is the angle from examined point to adjacent point below; and λ_{TLV} is the threshold limit value.

Eliminate Vegetation Points

The expected angular difference in flat terrain or a constant steepness is 180°; the smaller this difference angle, the more the relevant point protrudes from its adjacent points. With the decrease in the angle difference, the likelihood of a vegetation point increases correspondingly (Figure 5).



Figure 5. Terrain view from the side with vegetation points.

2.3.2. Determination of the Point Density

The output data form a homogenously distributed grid. Due to the repeated filtering, larger holes are normally occurring in some areas and the initial structure is retained in other areas. Where, after repeated filtering, the initial structure is retained, this indicates a continuous terrain surface without much vegetation. These points should be maintained in the further filtering process. Areas which have large gaps in the grid after some filter repeats, however, indicate that the area is generally flatter and has vegetation. A precise distinction between ground and non-ground point is virtually impossible without precise knowledge of the terrain. An automated algorithm can only calculate with probabilities. The probability of a ground point in areas with low grid point density after few iterative filtering is significantly lower than in areas were high grid point density retained. It therefore makes sense to gradually reduce the threshold value of the Wedge Filtering in these areas depending on the grid point density. A HOVE raster is ideal for determining the point density.

Particularly important is this additional information for small objects, such as hills or edges protruding from the surrounding surface. Such terrain elements are a problem with all filter methods. A remaining high point density after iterative filtering within a certain angular segment and therefore many similar neighbouring points indicates a natural surface even with sharp edges.

Rodriguez-Caballero et al. [16] propose a method to filter terrestrial laser scanner point clouds using morphological filters and spectral information to conserve surface micro-topography.

2.3.3. Finding the Adjacent Points for Iterative Wedge Filtering

The key point and the great difficulty of wedge filtering are finding the most meaningful neighbours for each point. Within a particular search area of the HOVE grid, all points are determinate which are behind the point to be examined. Therefore, all points with a smaller distance to the recording centre are excluded. Among the remaining points, the right and left sides are searched for the point (Figure 6) which has the lowest value according to the Equation (7):

$$min_{li,re} = \Delta_{vert} + (1 + Abs \ (\Delta_{horz}))^{fakt} + diwi \times \Delta_{len} \tag{7}$$

 $min_{li,re}$ is the minimum value; Δ_{vert} is the difference of the vertical angle (from laser scanner); Δ_{horz} is the difference of the horizontal angle (from laser scanner); *fakt* is the factor for Δ_{horz} ; *diwi* is the average HOVE raster resolution; and Δ_{len} is the difference of length (from laser scanner).

If in the HOVE grid the adjacent point is above the point to be examined (positive vertical difference), the formula value increases. If the neighbouring point lies below the point to be examined (negative vertical difference), the formula value decreases. By the factor, the influence ratio of the horizontal and vertical difference can be weighted. The distance to the point behind is also taken into account by the length difference, whereby the multiplication with the average raster resolution ensures the size adaption to the angle differences.



Figure 6. Adjacent points for iterative wedge filtering.

3. Results

3.1. Description of the Test Area

The test area is located in the hamlet Lueg near the village of Gries am Brenner in Tyrol, Austria. We took measurements of the south-facing slopes of the Padauner Kogel. Below this mountain slope runs the railway track of the Brennerbahn, which is today a part of one of the most important railway connections between Germany and Italy. It connects Munich via Innsbruck with Verona on the shortest route. This section of the track is strongly endangered by rockfall and is protected by numerous protective structures. Due to their rapid evolution, high velocity and impact energy and proximity to infrastructure, mass movements can pose a significant natural hazard. Such mass movements of different types have been surveyed extensively by terrestrial laser scanning in the past [17–19]. According to Abellan et al. [20], the key insights into the use of terrestrial laser scanning (TLS) in rock slope investigations include: (a) the capability of remotely obtaining the orientation of slope discontinuities, which constitutes a great step forward in rock mechanics; and (b) the possibility to monitor rock slopes which allows not only the accurate quantification of rockfall rates across wide areas but also the spatio-temporal modelling of rock slope deformation with an unprecedented level of detail. The purpose of this laser scanning is to be able to carry out an improved risk analysis for this area by means of a very detailed surface model.

In addition to the automated filtering, we manually categorized points into ground and non-ground points. The manually filtered results are therefore suitable for comparison with results from automated filtering methods.

The surveyed slope is approximately 1 km long and has a height difference between valley and mountain tops of approximately 450 m. Most of the area has vegetation, manly the steep parts are rock without vegetation with slope up to 70°. Because of the diverse terrain, automated filtering of laser scanning data is difficult.

Figure 7 shows an inclination map [21] of the test site. Flat areas have brighter colours as mostly barren slopes with more than 60° inclination. Two significant, large rock formations are on the upper side and at the left below.



Figure 7. Test area (inclination map); image source: © Land Tirol, tiris, www.tirol.gv.at/tiris.

For the calculation of the new filter method, the VB.NET program mentioned in the article "Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data" [14] was further developed.

Figure 8a shows a screenshot of the VB.Net program, in which a small section of the test area view is seen from the side (blue arrow in Figure 7). The vegetation points are still in green colour. In Figure 8b, these vegetation points are no longer shown for the same section. The points, which are shown in brown colour, remain, which were classified as soil points in the filter process and give a homogeneous surface structure.



Figure 8. Screenshot of the computer program with vegetation points (**a**); and screenshot of the computer program only with ground points (**b**).

Steps of Calculation

- Calculate the horizontal and vertical angles as well as the length distances from the recording centre to every single point.
- Determine the average raster spacing of the horizontal-vertical angle grid.
- Eliminate measuring errors, as described in Section 2.3.1, Point (a). An angle of 179° was chosen as the threshold value.
- Reduce to 2.5D, as described in Section 2.3.1, Point (b). With this step, approximately 40% of the points are eliminated from the further calculation.
- Perform HOVE-Wedge Filtering as described in Section 2.3. This process is carried out iteratively, until no further point is eliminated. The wedge angles (see Section 2.3.3), horizontal and vertical angles of the HOVE-grid (see Section 2.3.1) and point density (points within a certain angular segment, see Section 2.3.2) have influence in Equation (8):

$$\begin{pmatrix} (\theta_{wedge} - 180) \times F + (\theta_{vert} - 180) \times F + (\theta_{hori} - 180) \times F) \times -density > \lambda_{TLV} \\ \rightarrow classification \ as \ non - ground \ point$$

$$(8)$$

where θ_{wedge} is the difference of wedge angle; θ_{vert} is the difference of vertical angle from HOVE-Raster; θ_{hori} is the difference of horizontal angle from HOVE-Raster; *F* is the weight factors; λ_{TLV} is the threshold limit value; and *density* is the value of point-density from HOVE-Raster.

As threshold limit value, we used 200. With the factors, it would be possible to weight the difference. In the calculation, all factors were set to one.

To obtain a digital elevation model (DEM), we interpolate the calculated ground points using ArcGIS by ESRI Inc. (380 New York Street, Redlands, CA 92373, USA). According to ESRI [22], the Natural Neighbour method is also well suited for distributed point clusters, for example from terrestrial laser scan recordings.

The equation for the Natural Neighbour (NN) interpolation is:

$$G(x,y) = \sum_{i=1}^{n} w_i f(x_i, y_i)$$
(9)

where G(x,y) is the NN estimation at (x,y); *n* is the number of nearest neighbours used for interpolation; $f(x_i,y_i)$ is the observed value at (x_i,y_i) ; and w_i is the weight associated with $f(x_i,y_i)$.

Based on the computed results, we calculated a digital elevation model (DEM) with a cell size of one meter. For the evaluation of the results, we used a DEM of the test areas, where the non-ground points had been filtered out manually by optical valuation before. We calculated the difference between the automated filtered DEM and the manually filtered DEM.

In addition to the results of the new filter approach we described, we compared DEMs of the test areas with the results of the automated filter methods described by Prokop and Panholzer [14].

To evaluate the accuracy to the reference DEMs, we calculated the mean error and the root-mean-square-error (RMSE). According to the ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Guidelines [23] and Gianinetto and Fassi [24], the RMSE is often used to assess the accuracy of elevation data and is defined as (10):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta Z_i)^2}{n}}$$
(10)

where ΔZi are the elevation residuals (i.e., the differences of the elevation measures with respect to reference data); *n* is the number of measures.

Höhle et al. [25,26] further recommend using the median, the normalized median absolute (NMAD), the standard deviation, the 68.3% quantile and the 95% quantile of absolute residuals for accuracy assessment of DEMs.

3.4. Results of the Test Area

Figure 9 shows the individual differences between the newly calculated DEMs and the manually filtered DEM (DoD = Differences of DEMs). The areas with warm colour indicate a good match between the DEMs. The red areas indicate where the newly calculated DEMs are above the reference model, resulting from an insufficient filter effect. Blue areas indicate where the newly calculated DEM is lower than the reference model due to faulty filtered ground points.

After the manual filtering of the point data, only a few points remained in the centre of the test area. Due to the lack of ground points, the significance of the filter effect in this area is low. Consequently, the statistical values are distorted for the entire recording area. Therefore, we have selected a specific area with a high point density for further analysis. In this area, the statistical inaccuracies are largely avoided and thus more significant results are achieved.

As a result of the HOVE-wedge-filtering, we identified 23,135 ground points and 55,634 non-ground points. The mean error of the two surfaces is -0.07 m with a RMSE of 1.610 and a standard deviation of 1.609 (Table 1).

Especially in the forested areas near the laser scanner, an area with high point density, we see a better filter effect, as indicated by the larger warm coloured zones in Figure 9. In the more distant forested areas, the filtering effect is reduced, recognizable by the large red areas in the centre of Figure 9.

In this area, only the highest tops of the trees could be recorded, since it is unlikely that the laser beam penetrates to the ground of such forested areas. Therefore, effective filtering is difficult.



Figure 9. DoDs of different filtering methods and image source: © Land Tirol, tiris, www.tirol.gv.at/tiris.

Statistic	Modified Wedge-Filtering	Wedge Absolute-Filtering (60°)	IDWMO Method
Groundpoints	23,135	29,229	12,326
Mean error	-0.070	2.908	1.032
RMSE	1.610	5.284	3.333
Standard deviation	1.609	4.412	3.169
Median	-0.138	1.277	0.166
NMAD	1.498	5.085	3.411
68.3% quantile	0.242	3.819	1.258
95% quantile	2.707	11.765	7.718

Table 1. Statistical values for the first test area.

Looking at the figure, we can see that in the part of the HOVE-wedge there are fewer dark red areas than in the other two filtering methods. This indicates that vegetation has been filtered out well.

In Figure 10, some areas with great optical significance for quality of the filtering were worked out. Detail 1 shows a protruding formation sloping to three sides. In such terrain forms, the filtering is extremely difficult, since high angular differences caused by the terrain edges have influence to the calculation formula. If the threshold value is set too low, this rock ledge is incorrectly removed during filtering. The blue points in Detail 1 show the result at a threshold of 160, the yellow points show the points which are not eliminated with a threshold of 200, the red which are not eliminated at a threshold of 240. For Detail 2, the results from the calculation with a threshold of 160 (blue points) are compared with the results from the calculation with a threshold value of 240 (red points). These points are very difficult to detect as ground points by an automated analysis, since the terrain in this area drops sharply (high angle difference) and only a few neighbouring points are present (small density factor). The optical evaluation classification as probable ground points is only possible with the inclusion of

remote environmental parameters. It is difficult to automate an inclusion of such remote environmental parameters because the inclusion of wrong (e.g., not yet properly filtered) point regions would affect the filter result negatively. Hence, the dilemma is, for an optimal filtering of the individual points one needs already filtered and thus meaningful environmental parameters, which at that time but not yet exist. A step-by-step approach to the best result seems therefore necessary. Detail 3 marks a relatively flat, densely wooded section. A very small threshold value would be advantageous as mentioned above. Due to the extremely small number of points, it is not possible to opt for any terrain shapes. A distinction in ground points and non-ground points in this area is often only speculation. An automated analysis with low error probability is thus not possible here.



Figure 10. Detail of the test area.

Detail of Test Area with a High Point Density

The objective of the following assessment is to understand how the wedge filter works under more homogeneous conditions. Therefore, we calculated statistical values for a sample of the first test area (Figure 9, yellow rectangles). The resulting statistical values are summarized in Table 2.

Table 2. Statistical values for the detail are
--

Statistic	Modified Wedge-Filtering	Wedge Absolut-Filtering (60°)	IDWMO Method
Groundpoints	2703	3014	1346
Mean error	-0.142	1.296	0.361
RMSE	0.555	1.855	1.366
Standard deviation	0.536	1.537	1.366
Median	-0.061	0.456	-0.054
NMAD	0.510	1.529	1.057
68.3% quantile	0.053	0.828	0.125
95% quantile	0.509	4.390	1.876

When looking at the statistical evaluation, it can be seen that the extent of the qualitative improvement of the results with the HOVE-Wedge method in the area with a high point density

is even a little bit higher than in the results of the overall recording. Thus, the standard deviation from 1.537 (Wedge Absolute) or 1.366 (IDWMO) could be reduced to 0.536, which corresponds to an improvement of 186 (Wedge Absolute) or 155 (IDWMO) percent. The percentage improvement of the standard deviation over the entire test area is only 174 percent versus the absolute wedge method and 97 percent versus the IDWMO method.

4. Discussion

The fact that the improvement of the detail area is better than over the entire test area is explained by the fact that the iterative calculation in combination with sufficient environmental information by close neighbouring points can lead to good prediction about the probability of the point status. In areas with few or no neighbouring points and thus poor environmental information, no good predictions can be made. Therefore, many non-ground points are not recognized as such.

The inclusion of the HOVE grid allows additional, valuable conclusions about the real terrain. As mentioned, this approach is very similar to the method described by Liang et al. [13] where the point cloud data were also plotted with the horizontal angle (θ) values and the vertical angle (ϕ) values. In difference to the HOVE method, where filtering is done with the angles to the adjacent points, the filtering of the tree trunks bases on the principles of scan line segmentation [27]. The method of scan line segmentation is suitable to find planar objects, but it is difficult to segment uneven surfaces with few points left.

The HOVE method alone can also be used for three-dimensional filtering. While, in the HOVE grid, the angular deviation is calculated from the measuring lengths, the angle calculation in the Wedge method is done using the height value or the Z-coordinates. Since the lengths of the TLS are usually measured from the side, the combination of these two methods provides information from two sides. This leads to more meaningful results. A more accurate analysis of adjacent grid point data to each other in the form of interpolation would be a next step toward increasing accuracy. However, interpolation is not easy in this case. Because of the irregular distribution of the points, a non-directional method (e.g., IDW) is not useful. The spline method would probably be a suitable interpolation method.

Because terrestrial laser scans are usually taken from the side, a HOVE-grid window can contain points of two different terrain formations (e.g., small hill before large mountain). The points of the frontal formation may not be included in the interpolation of the formation behind. A preliminary separation of the points of the respective formation via the recording lengths or automated edge detection is therefore necessary before an interpolation can be made.

A further improvement could be achieved by the combination of point clouds measured from different recording directions. A small change of the recording centre could already lead to a large information gain.

In any case, there is still potential for further development with the HOVE-Wedge method.

5. Conclusions

We have developed a new filtering method for terrestrial laser scanning data. The assumption of the direct line of sight between laser scanner and recorded point and the filtering over the angles to the adjacent points in a Vertical–Horizontal (HOVE) Angular Grid are important additional filter parameters not yet used in other filtering methods. Using these filtering methods, many points can already—with high probability—be classified as non-ground points. The resultant DEM creation could be significantly improved because our new filter was able to classify non-ground points even in areas with few neighbour points and therefore little information of the terrain. We suggest that applications of terrestrial laser scanning data in the field of geomorphology consider using our filter for removing non-ground points. Acknowledgments: The laser scanning survey was funded by OeBB Infrastruktur Betrieb AG and access to the laser scanner used was provided by Snow Scan GmbH.

Author Contributions: Helmut Panholzer has developed the new filtering approach for terrestrial laser scanning data (HOVE-Wedge), has tested the new method and analysed the results, he also wrote the paper. Alexander Prokop has developed the research project, organised funding for the terrestrial laser scanning survey, executed the terrestrial laser scanning survey and delivered all data used. He also commented on several versions of the paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Axelsson, P. Processing of laser scanner data—Algorithms and applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 1999, 54, 138–147. [CrossRef]
- 2. Kilian, J.; Haala, N.; Englich, M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **1996**, *31*, 383–388.
- Vosselman, G. Slope-based filtering of laser altimetry data. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2000, 33, 935–942.
- 4. Pfeifer, N.; Köstli, A.; Kraus, K. Interpolation and filtering of laser scanner data—Implementation and first results. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **1998**, 32, 153–159.
- 5. Axelsson, P. DEM generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2000**, *33*, 110–117.
- 6. Elmqvist, M. Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2002**, *34*, 114–118.
- Wack, R.; Wimmer, A. Digital Terrain Models from Airborne Laser scanner Data—A Grid Based Approach. In Proceedings of the 2002 Symposium of ISPRS Commission III, Graz, Austria, 9–13 September 2002; pp. 293–296.
- 8. Puttonen, E.; Krooks, A.; Kaartinen, H.; Kaasalainen, S. Ground Level Determination in Forested Environment with Utilization of a Scanner-Centered Terrestrial Laser Scanning Configuration. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2015**, *12*, 616–620. [CrossRef]
- 9. Che, E.; Olsen, M.J. Fast ground filtering for TLS data via Scanline Density Analysis. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2017**, *129*, 226–240. [CrossRef]
- Brodu, N.; Lague, D. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2012, 68, 121–134. [CrossRef]
- 11. Pirotti, F.; Guarnieri, A.; Vettore, A. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2013**, *76*, 56–63. [CrossRef]
- 12. Lau, C.L.; Halim, S.; Zulkepli, M.; Azwan, A.M.; Tang, W.L.; Chong, A.K. Terrain extraction by integrating terrestrial laser scanner data and spectral information. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2015**, *1*, 45–51. [CrossRef]
- 13. Liang, X.; Litkey, P.; Hyyppä, J.; Kaartinen, H.; Kukko, A.; Holopainen, M. Automatic plot-wise tree location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *Photogramm. J. Finl.* **2011**, *22*, 37–48.
- 14. Panholzer, H.; Prokop, A. Wedge-filtering of geomorphologic terrestrial laser scan data. *Sensors* **2013**, *13*, 2579–2594. [CrossRef] [PubMed]
- 15. Krige, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* **1951**, *52*, 119–139. [CrossRef]
- Rodriguez-Caballero, E.; Afana, A.; Chamizo, S.; Solé-Benet, A.; Canton, Y. A new adaptive method to filter terrestrial laser scanner point clouds using morphological filters and spectral information to conserve surface micro-topography. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2016, *117*, 141–148. [CrossRef]
- 17. Prokop, A.; Schon, P.; Singer, F.; Pulfer, G.; Naaim, M.; Thibert, E.; Soruco, A. Merging terrestrial laser scanning technology with photogrammetric and total station data for the determination of avalanche modeling parameters. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2015**, *110*, 223–230. [CrossRef]
- 18. Prokop, A.; Panholzer, H. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2009**, *9*, 1921–1928. [CrossRef]

- 19. Abellán, A.; Oppikofer, T.; Jaboyedoff, M.; Rosser, N.J.; Lim, M.; Lato, M.J. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surf. Process. Landf.* 2013, *39*, 80–97. [CrossRef]
- 20. Abellán, A.; Calvet, J.; Vilaplana, M.; Blanchard, J. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology* **2010**, *119*, 162–171. [CrossRef]
- 21. Land Tirol. Tiris—Tiroler Rauminformationssystem. Available online: www.tirol.gv.at/tiris (accessed on 18 December 2017).
- 22. Childs, C. Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst ESRI Education Services. 2005. Available online: http://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf (accessed on 18 December 2017).
- 23. ASPRS. Guidelines—Vertical Accuracy Reporting for LiDAR Data. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. Available online: http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/ Downloads/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_Data.pdf (accessed on 18 December 2017).
- 24. Gianinetto, M.; Fassi, F. Validation of Cartosat-1 DSM generation for the Salon de Provence test site. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2008**, *37*, 1369–1374. [CrossRef]
- 25. Höhle, J.; Höhle, M. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2009**, *64*, 398–406. [CrossRef]
- 26. Höhle, J.; Potuckova, M. Assessment of the Quality of Digital Terrain Models, Report of EuroSDR. No. 60. 2012. Available online: http://www.eurosdr.net/publications/60.pdf (accessed on 18 December 2017).
- 27. Jiang, X.; Bunke, H. Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. *Mach. Vis. Appl.* **1994**, *7*, 115–122. [CrossRef]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

5 Ergebnisse und Diskussion

Diese Dissertation geht der Frage nach, wie sich speziell auf Aufnahmedaten von terrestrischen Laserscanning (TLS) abgestimmte Filteralgorithmen erzeugen bzw. verbessern lassen. Ziel ist die möglichst saubere Trennung von Boden- und Nichtbodenpunkten zur Generierung genauer, wirklichkeitsnaher topographischer Modelle. Es wurde versucht, bisher nicht berücksichtigte Umstände und Faktoren in die Berechnung einfließen zu lassen und somit Nichtbodenpunkte, welche bisher nicht als solche erkannt wurden, richtig zu klassifizieren und aus der weiteren Berechnung auszuschließen.

Das Hauptaugenmerk von Publikation I lag in der Erforschung von Möglichkeiten zur Bestimmung von Bewegungsmustern von Erdrutschungen. Als Filtermethode wurde die inverse distance weighting (IDW) Interpolation in Kombination mit erweiterten morphologischen Operationen gewählt (IDWMO). Die zu verschiedenen Zeitpunkten erzeugten Geländeaufnahmen konnten miteinander verglichen und die Art und Größe der Massenverschiebungen ermittelt werden. Vorteil dieses einfachen Filteransatzes ist die relativ leichte Berechnung mit Hilfe der weit verbreiteten Software ArcGIS. Es konnte gezeigt werden, dass die Technik des TLS in Verbindung mit einer geeigneten Filtermethode mehrere Vorteile hinsichtlich der Genauigkeit, Schnelligkeit und Vollständigkeit gegenüber herkömmlichen Aufnahmetechniken bietet. Ein weiterer Vorteil ist, dass die unmittelbare Gefahrenzone bei der Aufnahme nicht betreten werden muss.

Zahlreiche herkömmliche Filtermethoden verwenden diesen morphologischen Filteransatz, wie er bei Publikation I verwendet wurde. Diese Art der Filterung hat allerdings den Nachteil, dass es zu einer Ausdünnung und somit Reduktion (ZHANG et al., 2003, HÖHLE und POTUCKOVA, 2011) der Bodenpunkte kommt. Bei der Visualisierung des DHM muss also aufgrund dieser Ausdünnung auf einige Informationen verzichtet werden.

Die Publikation II geht dann konkret auf die Problemstellung der Filterung ein. Ziel war es, einen neuen, zusätzlichen Faktor in den Filterprozess mit einfließen zu lassen, welcher bei den üblichen, hauptsächlich für ALS entwickelten Filtermethoden, nicht berücksichtigt wurde. Auch sollte darauf geachtet werden, dass keine Bodenpunkte unnötig der Filterung zum Opfer fallen. Ergebnis war eine schnelle Möglichkeit zur Vorfilterung von TLS-Daten und somit vorzeitige Entfernung von Nichtbodenpunkten, welche im weiteren Filterverlauf eventuell nicht mehr erkannt werden. Es handelt sich bei der Methode um eine Ergänzung zu bestehenden Filterroutinen und keinesfalls um eine eigenständige Gesamtlösung zur vollständigen Filterung von Aufnahmedaten.

In Publikation III wurde die Wedge-Methode modifiziert und als Ergänzung eine Möglichkeit der Filterung über den horizontal-vertikal (HOVE) Raster vorgestellt. Der Anspruch dieser Publikation war, eine geeignete Methode zur möglichst vollständigen Filterung von terrestrischen Laserscandaten zu präsentieren.

Bei der Methode der HOVE-Rasterfilterung werden anstatt der üblichen X,Y-Werte die Horizontalwinkelbeträge und die Vertikalwinkelbeträge in einem zweidimensionalen Koordinatenfeld aufgetragen. Der Vorteil war in diesem Fall ein sehr gleichmäßiges Raster ohne große Löcher. Da aus Gründen der seitlichen Aufnahme in vielen Fällen keine gleichmäßig verlaufende Oberfläche sondern zahlreiche kleine, nicht zusammenhängende Oberflächenteile vorhanden waren, wurde von der Verwendung eines räumlich weit ausareifenden Filterverfahrens abgesehen und meist nur die nächstliegenden Nachbarpunkte bei der Beurteilung Bodenpunkt – Nichtbodenpunkt herangezogen. Als weiteres Kriterium diente die Punktdichte. Der Filterprozess verläuft iterativ, wobei bei jeder Wiederholung sämtliche Punkte auf einen Schwellenwert hin überprüft und gegebenenfalls ausgeschieden werden.

Die Ergebnisse wurden mit einem manuell gefilterten und ausgewerteten Referenzmodell verglichen. Dazu wurden aus beiden Punktdatensätzen mit Hilfe einer Natural Neighbor Interpolation Höhenraster erstellt und die jeweiligen Differenzwerte berechnet. Zur besseren Veranschaulichung wurden die Höhenunterschiede auf einer Karte farblich hervorgehoben. Die Qualität der Filtergenauigkeit wurden mit folgenden statistischen Parameter ausgewertet: Anzahl der Bodenpunkte, mittlerer Fehler, Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE), Standardabweichung, Medianwert, normalisierte absolute Medianabweichung (NMAD), 68.3% und 95% Quantil. Tabelle 1 zeigt den Vergleich der statistischen Parameter von verschiedenen Filtermethoden für ein Testgebiet in Tirol mit ca. 80.000 Aufnahmepunkten auf Basis des Höhendifferenzrasters.

	HOVE-Wedge-Filterung	Wedge-Absolut-Filterung	IDWMO Methode
Bodenpunkte	23.135	29.299	12.326
Mittlerer Fehler	-0,070	2,908	1,032
RMSE	1,610	5,284	3,333
Standardabweichung	1,609	4,412	3,169
Median	-0,138	1,277	0,166
NMAD	1,498	5,085	3,411
68,3% Quantil	0,242	3,819	1,258
95% Quantil	2,707	11,765	7,718

Tabelle 1: Vergleich	statistischer	Parameter	verschiedener	Filtermethoden	(PANHOLZER und
PROKOP 2018)					•

Es zeigt sich anhand der Auswertung, dass die statistische Qualität der Filterung deutlich erhöht werden konnte. So konnte beispielsweise die Qualität der Standardabweichung gegenüber der Wedge-Absolut-Filterung um 174% gesteigert werden.

Das Testgebiet wurde so gewählt, dass darin sowohl Areale mit hoher Punktdichte, als auch –meist stark bewaldete- Areale mit geringer Punktdichte vorhanden waren. Um speziell die Filterwirkung in überwiegend homogenen (gleich verteilten) Arealen mit hoher Punktdichte zu prüfen, wurde ein kleines Testgebiet mit diesen Bedingungen gewählt und ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Qualität der Filterwirkung unter guten Bedingungen sogar etwas besser ausfällt. So konnte hier die Qualität der Standardabweichung gegenüber der Wedge-Absolut-Filterung um 186% gesteigert werden.

Bei der Bewertung der Oberflächeneigenschaft wurden mit den jeweils nächstliegenden Punkten bewusst hauptsächlich Information der nächsten Nachbarschaft herangezogen. Auch bei der Dichte stellte sich durch Versuche heraus, dass die Ergebnisse unter Einbeziehung zu vieler umliegender Punkte eher schlechter als besser werden. Gerade im Fall zweier räumlich voneinander getrennter Objekte (z.B.: kleine Geländekuppe und dahinter liegendem Hang), welche aber im Aufnahmepunktraster (bzw. HOVE-RASTER) eng nebeneinander liegen, fließen Informationen beider Objekte ein. Dieses Miteinfließen verschiedener Objekte zu einer Information, führt zwangsläufig zu einer Verfälschung der Ergebnisse. Dies ist auch der Grund warum bewährte Interpolationsverfahren (z.B.: Kriging), welche gezielt umgreifend die Beziehung der Punkte zueinander in Verbindung setzen und dadurch normalerweise wichtige räumliche Aussagen über die Oberflächeneigenschaften ermöglichen, in diesem speziellen Fall nicht verwendet wurden.

Diese globaleren räumlichen Informationen wären trotz dieser Überlegungen sicherlich ein sehr wichtiger Faktor zur korrekten Einordnung und Beurteilung von Gelände- und Objektstrukturen. Eine Möglichkeit zu einer weiter ausgreifenden Informationssammlung ohne dabei die lokale Aussage zu verfälschen, wäre die Bestimmung von Geländeübergängen und Kanten. Die Methode der Kantendetektion ist schon lange Forschungsgebiet der Laserscantechnik (BRIESE et al., 2002). RABAH et al. (2013) präsentieren sogar eine auf terrestrische Laserscandaten abgestimmte Lösung. Die Schwierigkeit ist aber, dass bei bereits gefilterten Daten eine Kantendetektion gut möglich ist. Im Studienfall sollten aber die Geländekanten als Grundlage für den Filterprozess -also schon vorher- bekannt sein. Gerade bei sehr abgeschatteten Bereichen mit wenigen verbleibenden Bodenpunkten ist eine Kantenauffindung im Vorfeld aber sehr schwierig.

Es wurde versucht über den Längenwert eine räumliche Trennung vorzunehmen. Weiter voneinander entfernte Objekte (auch wenn sie im HOVE-Raster eng beieinander liegen) können somit erkannt und bei der weiteren lokalen Berechnung schon vorzeitig ausgeschlossen werden. Es erfolat somit eine Kantendetektion über die Längenunterschiede. In der Praxis stellte sich dies als nicht einfach heraus, da wieder ein Schwellenwert definiert hätte werden müssen. Weil die Punktdichte aber im Zentrumsbereich wesentlich größer ist, als weiter von Zentrum entfernt, macht ein einheitlich gesetzter Schwellenwert über das gesamte Aufnahmegebiet wenig Sinn. Ein sich jeweils automatisch berechnender, flexibler Schwellenwert wäre eine Lösung. Ein solcher wurde aber nicht verwendet, da durch die zunehmende Komplexität die allgemeine Nachvollziehbarkeit der Filterwirkung abgenommen hätte. Eine Lösung zur vorzeitigen Erkennung und Trennung von verschiedenen Objekten, noch bevor der eigentliche Filterprozess einsetzt, wäre aber sicherlich eine wesentliche Qualitätssteigerung.

Ein weiterer Ansatz ist eine entsprechende Segmentierung oder Gruppierung der Punktdaten. Die auf einzelnen Punkten basierende Klassifizierung verwendet Attribute, welche für jeden Punkt gesammelt und gespeichert werden (z.B.: Koordinatenwerte, Intensität, Zeitstempel, Scanwinkel oder Rückgabetyp und –nummer). Bei einem gruppenbasierten Klassifizierungsansatz werden nicht nur Punkt-zu-Punkt Beziehungen analysiert, sondern auch geometrische Merkmale innerhalb und zwischen Punktgruppen. Attribute wie die Entfernung über dem Boden, die Ebenheit von Punkten, das Verhältnis von Form und Breite zur Höhe, die Punktdichte und -verteilung der jeweiligen Gruppe sowie der Abstand zwischen Punktgruppen bestimmen die Zugehörigkeit zu einer Gruppe. Die statistische Analyse von Punktattributwerten (z.B.: Farbkanäle oder Intensitätswerte) in einer Gruppe können zusätzliche Informationen für Klassifizierungsaufgaben bereitstellen. (SCHWARZBACH, 2018)

Durch optische Betrachtung und Erfahrung ist es Menschen möglich, auch in ungeordneten Punkthaufen eine solche Vorsegmentierung -zumindest ansatzweise- durchzuführen und getrennte Objekte voneinander zu unterscheiden. So ist es für ihn meist ein Leichtes, zwischen künstlichen Objekten wie Häusern, Stützmauern, Straßen,... zu unterscheiden und eine Aussage betreffend Geländeoberfläche oder nicht Geländeoberfläche zu machen. Der nächste logische Schritt ist somit weg von den starren Filterroutinen hin zu künstlicher Intelligenz, welche diese menschliche Denkweise übernimmt und abbildet (SCHWARZBACH, 2018). Eine solche, durch Erfahrungswerte sich ständig selbst verbessernde Anwendung, wäre für eine solch komplexe Aufgabenstellung wohl bestens geeignet.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit werden neue Ansätze präsentiert, die die speziellen Eigenschaften einer Terrestrischen Laserscan (TLS) Aufnahme in den Filterprozess mit einfließen lassen. Die einzelnen Publikationen sind als Kombination und schrittweise Weiterentwicklung dieser neuen Ansätze zu sehen. Die Filterung der Punktdaten erfolgt im Wesentlichen über die Aufnahmerichtung. Bei TLS-Messungen erfolgt die Aufnahme typischerweise von der Seite her. Das Filterkriterium ist im Gegensatz zu den meisten bestehenden Filteralgorithmen nicht der Z- bzw. Höhenwert sondern die Aufnahmelänge. Durch Anwendung der Wedge-Methode wird aber auch der Z-Wert auf Basis der direkten Sichtverbindung zwischen Laserscanner und Geländepunkte mitberücksichtigt. Durch diese Kombination von Rauminformationen aus verschiedenen Richtungen können auch in Bereichen mit sehr wenigen Ausgangsdaten Nichtbodenpunkte richtig erkannt und entfernt werden.

Als besonders schwierig stellte sich die Beibehaltung von kleinen hervorstehenden Geländekuppen heraus. Gerade bei morphologischen Berechnungen oder bei weit ausgreifenden Interpolationen kann es zu einer ungewollten Entfernung solcher Bereiche kommen. Da diese "Kappungen" oft nur sehr kleinflächig sind, haben sie keine große Auswirkung auf die statistischen Werte, womit hier oft eine zusätzliche optische Prüfung notwendig war. Durch Einbeziehung der Punktdichte als Parameter können die meisten dieser Geländekuppen als solche erkannt und beibehalten werden.

Das Ziel, eine alternative, erweiterte Vorgehensweise zur möglichst vollständigen Filterung von terrestrischen Laserscandaten aufzuzeigen, wurde für die Daten der Testgebiete weitestgehend erreicht. Es zeigt sich anhand der Auswertung dieser Daten, dass die statistische Qualität der Filterung deutlich erhöht werden konnte. So reduzierte sich durch die HOVE-Methode kombinierte Anwendung der Wedgeund beispielsweise die Standardabweichung von 4,412 (Wedge Absolut-Methode) auf 1.610, der mittlere Fehler von 2.908 auf -0,070. Ein zusätzlicher Vorteil gegenüber der morphologischen Filterung ist, dass diese besseren Ergebnisse unter Beibehaltung von 23.135 als Boden klassifizierten Punkten (mehr als doppelt so vielen Bodenpunkten im Vergleich zur IDWMO-Methode) erfolgen konnten.

Die vorgestellte Arbeit bietet sicher noch nicht die eine optimale und finale Filtermethode für terrestrische Laserscandaten, zeigt aber eine zusätzliche Filtermöglichkeit unter Berücksichtigung neuer Parameter auf, welche aber auch für sich alleine gesehen schon sehr gute Ergebnisse liefert. Es existieren neben diesem Ansatz sehr viele unterschiedliche, viel versprechende Ansätze mit Stärken und Schwächen, je nach Datengrundlage und Anwendungsbereich. Durch Kombination bestehender Methoden und Weiterentwicklung von automatisierten Klassifizierungstechniken wäre jedenfalls noch Potential für Verbesserungen und Verfeinerungen vorhanden. Die wissenschaftliche Forschung an der Problemstellung der Filterung von terrestrischen Laserscandaten ist somit noch voll im Gange.

Summery and Conclusion

In this work, new approaches are presented, which incorporate the special properties of a TLS recording in the filtering process. The individual publications can be seen as a combination and gradual further development of these new approaches. The filtering is primarily carried out via the recording direction. In TLS recordings, the survey is typically taken from the side. In contrast to most existing filter algorithms, the filter criterion is not the Z point or height value but the recording length. However, the wedge method also takes into account the Z point value by including the information of the direct line of sight between the laser scanner and terrain points. Through this combination of spatial information from different directions, non-ground points can be correctly found and removed even in areas with very few original data.

The preservation of small protruding parts of the terrain turned out to be particularly difficult. Especially morphological calculations or far-reaching interpolations can lead to an unwanted removal of such areas. Since such often very small removals have no great impact on the statistical values, here often a visual examination was necessary. By including point density as a parameter, most of these small terrain summits can be recognized and maintained as such.

The goal of demonstrating an alternative, extended approach for filtering terrestrial laser scan data as completely as possible was largely achieved for the data of the test areas. It can be seen from the evaluation of the test area data that the statistical quality of the filtering could be increased significantly. For example, the combined use of the wedge and HOVE method reduced the standard deviation from 4,412 (Wedge-Absolute-method) to 1,610, the mean error from 2,908 to -0,070. An additional advantage over morphological filtering is that these better results could be achieved while maintaining 23,135 classified ground-points (more than twice as many ground-points compared to the IDWMO method).

The presented work certainly does not yet offer the one optimal and final filter method for terrestrial laser scan data, but shows an additional filter possibility considering new parameters, which, however, also provides very good results on its own. In addition to this approach, there are many different, promising approaches with strengths and weaknesses depending on the data basis and scope. By combining existing methods and further developing automated classification techniques, there would still be potential for improvement and refinement. Scientific research into the problem of filtering terrestrial laser scan data is still in progress.

7 Literaturverzeichnis

- AXELSSON, P. (2000): DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. 33, 110–117.
- BALTENSWEILER, A.; WALTHERT, L.; GINZLER, C.; SUTTER, F.; PURVES, R.S.; HANEWINKEL, M. (2017): Terrestrial laser scanning improves digital elevation models and topsoil pH modelling in regions with complex topography and dense vegetation. Environ. Model. Softw. 95, 13–21.
- BELTON, D.; BAE, K.-H. (2010): Automating post-processing of terrestrial laser scanning point clouds for road feature surveys. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 38, 74–79.
- BOHLI, R. (2010): Ein Prozess zur Interpolation von Höhenmodellen aus unterschiedlichen Datenquellen. Masterarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich, 14.
- BORNAZ, L.; RINAUDO, F. (2004): Terrestrial Laser Scanning Data Processing, XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, Commission 5, 514-520.
- BRIESE, C.; KRAUS, K.; PFEIFER, N. (2002): Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten in Laser-Scanner-Daten. In: Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Meier, TU Dresden, Inst. für Planetare Geodäsie, Germany, 47-52.
- BRODU, N.; LAGUE, D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 68,121–134.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. (2005): Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 31.
- CALDERS, K.; ARMSTON, J.; NEWNHAM, G.; HEROLD, M.; GOODWIN, N. (2014): Implications of sensor configuration and topography on vertical plant profiles derived from terrestrial LiDAR. Agric. For. Meteorol. 194, 104–117.
- CHE, E.; OLSEN, M. J. (2017): Fast ground filtering for TLS data via Scanline Density Analysis. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 129, 226–240.
- GAJSKI, D. (2004): Rasterbasierte Geländeoberflächenanalysen. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien. Wien, 157.
- HÖHLE, J.; POTUCKOVA, M. (2011): Assessment of the Quality of Digital Terrain Models. European SpatialData Research,Official Publication n. 60. Amsterdam
- KERSTEN T.; STERNBERG H.; MECHELKE K.; LINDSTAEDT M. (2008): Datenfluss im terrestrischen Laserscanning - Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung, Conference: Terrestrisches Laserscanning (TLS2008), Schriftenreihe des DVW, 54, Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda, Wißner-Verlag, Augsburg, 31-56.
- KILIAN, J.; HAALA, N.; ENGLICH, M. (1996): Capture and evaluation of airborne laser scanner data. Int. Arch.Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 31, 383–388.
- KRAUS, K. (2000): Photogrammetrie, Band 3 (Topographische Informationssysteme). Dümmler Verlag, Bonn.
- KRIGE, D. G. (1951): A statistical approach to some basic mine valuation problems on theWitwatersrand. J. South. Afr. Inst. Min. Metall. 52, 119–139.
- LAU, C. L.; HALIM, S.; ZULKEPLI, M.; AZWAN, A. M.; TANG, W. L.; CHONG, A. K. (2015): Terrain extraction by integrating terrestrial laser scanner data and spectral information. ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat.Inf. Sci. 1, 45–51.

- LERMA, J.; NAVARRO, S.; CABRELLES, M.; VILLAVERDE, V. (2010): Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. In: Journal of Archaeological Science. Bd. 37, 3.
- LIANG, X.; LITKEY, P.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; KUKKO, A.; HOLOPAINEN, M. (2011): Automatic plot-wise tree location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. Photogramm. J. Finl. 22, 37–48.
- MONGUS, D.; ŽALIK, B. (2012): Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation. ISPRS J.Photogramm. Remote Sens. 67, 1–12.
- MUIR, J.; GOODWIN, N.; ARMSTON, J.; PHINN, S.; SCARTH, P. (2017): An accuracy assessment of derived digital elevation models from terrestrial laser scanning in a sub-tropical forested environment. Remote Sensing, 9(8), 843.
- OTEPKA, J.; GHUFFAR, S.; WALDHAUSER, C.; HOCHREITER, R.; PFEIFER, N. (2013): Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management. In: ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2, 1038–1065.
- PANHOLZER, H.; PROKOP, A. (2013): Wedge-filtering of geomorphologic terrestrial laser scan data. Sensors 13, 2579–2594.
- PANHOLZER, H.; PROKOP, A. (2018): HOVE-Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data. Appl. Sci. 8(2), 263.
- PFEIFER, N.; KOSTLI, A.; KRAUS K. (1998): Interpolation and filtering of laser scanner dataimplementation and first results. Int. Arch. of Photogramm. Remote Sens. 32, 153-159.
- PFEIFER, N. (2003): Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation. 4, 243-252.
- PIROTTI, F.; GUARNIERI, A.; VETTORE, A. (2013): Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 76, 56–63.
- PROKOP, A.; PANHOLZER, H. (2009): Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 1921–1928.
- PUTTONEN, E.; KROOKS, A.; KAARTINEN, H.; KAASALAINEN, S. (2015): Ground Level Determination in Forested Environment with Utilization of a Scanner-Centered Terrestrial Laser Scanning Configuration. IEEE Geosci.Remote Sens. 12, 616–620.
- RABAH, M.; ELHATTAB, A.; FAYAD, A. (2013): Automatic concrete cracks detection and mapping of terrestrial laser scan data. NRIAG J. Astron. Geophys. 2(2), 250–255.
- REDL, T. (2005): Einsatz von Photogrammetrie und Laserscanning zur Dokumentation von Bauwerken, Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien
- REITERER, A.; PREDEHL, K.; LEIDINGER, M. (2017): Die Entwicklung von Laserscannern – Herausforderungen bei neuartigen Anwendungen, Schriftenreihe des DVW Band 88.
- RODRIGUEZ-CABALLERO, E.; AFANA, A.; CHAMIZO, S.; SOLÉ-BENET, A.; CANTON, Y. (2016): A new adaptive method to filter terrestrial laser scanner point clouds using morphological filters and spectral information to conserve surface micro-topography. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 117, 141–148.
- SCHARZBACH F. (2018): Automatic Object Detection in Point Clouds, Classification Approaches and Method Comparison. www.gim-international.com. Letzter Zugriff 31.3.2004
- SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. (2003): Report: ISPRS comparison of filters, ISPRS commission III, working group, 3.
- SMITH, S.L.; HOLLAND, D.A.; LONGLEY, P.A. (2003): Interpreting Interpolation: The Pattern of Interpolation Errors in Digital Surface Models Derived from Laser Scanning Data. CASA Working Paper 66, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, London
- VOSSELMAN, G. (2000): Slope-based filtering of laser altimetry data. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. 33, 935–942.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; BRIESE, C. (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberflache, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation(VGI), Jg. 91, 4, 223-235.
- ZHANG, K. Q.; CHEN, S. C.; WHITMAN, D.; SHYU, M. L.; YAN, J. H.; ZHANG, C. C. (2003): A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data. IEEE Geosci.Remote Sens 41(4), 872-882.
- ZINGER, S.; NIKOLOVA, M.; ROUX, M.; MAÎTRE, H. (2002): 3D resampling for airborne laser data of urban areas. Int. Arch. of Photogramm. Remote Sens. 34, 55-61.

Internetquelle:

http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_Z420i_03-05-2010.pdf

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip der optischen Impulslaufzeitmessung (WAGNER, 2003)12
Abbildung 2: Aufnahme durch terrestrisches Laserscanning (www.riegl.com)12
Abbildung 3: Prozesskette beim terrestrischen Laserscanning (KERSTEN et al., 2008)14
Abbildung 4: Oberflächenmodelle mit Punkteklassifikation (GAJSKI, 2004)16
Abbildung 5: Filterkonzepte: hangbasierend (A), Block-Minimum(B) oberflächenbasierend (C) Segmentierenden/Cluster (D) Methoden (SITHOLE und VOSSELMAN, 2003)17
Abbildung 6: Beispiel für ein Triangulated Irregular Network (SITHOLE und VOSSELMAN, 2003)
Abbildung 7: Verschiedene Interpolationsmethoden auf Basis einer terrestrischen Laserscanaufnahme (HÖHLE und POTUCKOVA, 2011)20
Abbildung 8: Grundsätzlicher Ablaufes des Programmprozesses in Form eines Flussdiagramms

9 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Helmut Panholzer
Geburtstag	11.04.1976
Geburtsort	Ohlsdorf
Land	Österreich
Staatsbürgerschaft	Österreich
Familienstand	Ledig
Universität	Universität für Bodenkultur
Ausbildung	
Seit 2011	Doktorats-Studium
	(Universität für Bodenkultur Wien)
2005-2009	Master-Studium "Mountain Risk Engineering"
	(Universität für Bodenkultur Wien)
	Masterthesis: "Monitoring von Hangrutschungen mittels terrestrischen Laserscannings"
2002-2005:	Bakkalaureats-Studium "Geografie"
	(Paris Lodron-Universität Salzburg)
1991-1995	Externisten-Reifeprüfung Dr. Roland Wien
1987-1991	Gymnasium Gmunden

Beruflicher Werdegang

Seit 1991	Landesbediensteter beim Amt der
	Oberösterreichischen Landesregierung in
	verschiedenen Fachbereichen
	(Grundzusammenlegung, Almwirtschaft,)