

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 162 (2011)
Heft: 6

Artikel: Verfahren zur Registrierung von Laserscannerdaten in Waldbeständen
Autor: Bienert, Anne / Pech, Katharina / Maas, Hans-Gerd
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097718>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Verfahren zur Registrierung von Laserscannerdaten in Waldbeständen

Anne Bienert

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden (DE)*

Katharina Pech

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden (DE)

Hans-Gerd Maas

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden (DE)

Methods for registration laser scanner point clouds in forest stands

Laser scanning is a fast and efficient 3-D measurement technique to capture surface points describing the geometry of a complex object in an accurate and reliable way. Besides airborne laser scanning, terrestrial laser scanning finds growing interest for forestry applications. These two different recording platforms show large differences in resolution, recording area and scan viewing direction. Using both datasets for a combined point cloud analysis may yield advantages because of their largely complementary information. In this paper, methods will be presented to automatically register airborne and terrestrial laser scanner point clouds of a forest stand. In a first step, tree detection is performed in both datasets in an automatic manner. In a second step, corresponding tree positions are determined using RANSAC. Finally, the geometric transformation is performed, divided in a coarse and fine registration. After a coarse registration, the fine registration is done in an iterative manner (ICP) using the point clouds itself. The methods are tested and validated with a dataset of a forest stand. The presented registration results provide accuracies which fulfill the forestry requirements.

Keywords: terrestrial laser scanning, airborne laser scanning, registration

doi: 10.3188/szf.2011.0178

* Helmholtzstrasse 10, DE-01062 Dresden, E-Mail anne.bienert@tu-dresden.de

Laserscanning ist ein Messverfahren, welches über Distanz- und Richtungsmessung zu Oberflächenpunkten innerhalb kürzester Zeit komplexe Geometrien genau und zuverlässig erfassen kann. Während das Flugzeuglaserscanning, auch Airborne Laser Scanning (ALS) genannt, bereits seit Ende der 1990er-Jahre für forstwissenschaftliche und forstwirtschaftliche Fragestellungen eingesetzt wird (Maas 2008), gewinnt mittlerweile auch das terrestrische Laserscanning (TLS) zunehmend an Bedeutung (Vosselman & Maas 2010). Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmeplattformen unterscheiden sich die beiden Datenakquisitionsverfahren unter anderem hinsichtlich der Auflösung, der Ausdehnung des Aufnahmegebietes und der Aufnahme- richtung. Während flugzeuggetragene Laserscanner grosse Waldbestände innerhalb kurzer Zeit aufnehmen, beschränken sich terrestrische Laserscannerinstrumente auf vergleichsweise kleine Gebiete. Dies liegt hauptsächlich an der beschränkten Reichweite sowie den durch die Vegetation verursachten Abschattungen und macht sich auch in der Punktdichte bemerkbar: Während flugzeuggestützte Laserscannerdaten je nach System, Flughöhe und Geschwin-

digkeit 0.2 bis 50 Punkte pro Quadratmeter (Pt/m²) aufweisen (Vosselman & Maas 2010), können terrestrische Punktwolken mehrere Tausend Punkte pro Quadratmeter haben. Aufgrund dieser Unterschiede ergeben sich unterschiedliche Auswerteverfahren und ableitbare Informationen. Eine Hauptanwendung des ALS im Waldbereich ist die Ableitung von Topografiedaten. Durch Filtermethoden werden aus den unorganisierten 3-D-Punktwolken Oberflächenmodelle wie zum Beispiel digitale Geländemodelle (DGM) und digitale Oberflächenmodelle (DOM) abgeleitet (Pfeifer 2005). Terrestrisches Laserscanning etablierte sich in den letzten Jahren zunehmend bei der Entwicklung von Automatisierungsverfahren zur Waldinventur (z.B. Simonse et al 2003, Aschoff & Spiecker 2004, Bienert et al 2007b). Diese Verfahren erlauben eine automatische Bestimmung forstinventurrelevanter Baumparameter, zum Beispiel die Detektion der Bäume mit Bestimmung von Baumposition, Baumhöhe, Brusthöhendurchmesser (BHD) und Stammprofilen (Bienert et al 2006).

Ein entscheidender Faktor ist die Georeferenzierung der Daten. Während ALS-Daten durch die Kombination von globalen Navigationssatelliten-

systemen (GNSS) und Inertialnavigationssystemen (INS) direkt georeferenziert werden, werden terrestrische Daten meist in einem lokalen Koordinatensystem aufgenommen. Über bekannte Passpunkte, die mit klassischen geodätischen Messverfahren bestimmt worden sind (tachymetrisch, Polygonzug, GPS), werden die Daten georeferenziert. Solche Verfahren sind aufgrund dichter Vegetation und der teilweise langen Wege zum Bestand nur bedingt bis gar nicht anwendbar. Eine weitere Variante ist die direkte Georeferenzierung mittels GPS, bei der der Standpunkt selbst bestimmt wird und über die Orientierung des Scanners ein Bezug zum globalen System aufgebaut wird. In Waldgebieten kann, wenn überhaupt, eine direkte Georeferenzierung aufgrund dichter Vegetation und damit verbundener Signalstörungen und Abschattungseffekte häufig nur mit erheblichem Genauigkeitsverlust vorgenommen werden. Untersuchungen von Czaja (2007) im Bayerischen Wald zeigen, dass derzeit mit Differenzial-GPS (dGPS) Genauigkeiten von circa 1 bis 3 m erreicht werden können.

Eine kombinierte Auswertung der komplementären Daten ermöglicht die Nutzung der Vorteile beider Aufnahmeplattformen. Zum einen ergänzen ALS-Daten Bereiche schlechter Kronen- und Bodenabdeckung der terrestrisch gewonnenen Daten infolge von Abschattungen, zum anderen komplettieren TLS-Daten die Stamm- und Astbereiche der ALS-Daten (Abbildung 1). Des Weiteren können die ALS-Daten zur Georeferenzierung der terrestrischen Daten beitragen. Beides setzt eine Registrierung beider Systeme voraus.

ALS-Daten. Diese werden geometrisch aufeinander transformiert, wobei eventuelle Fehldetektionen durch die Anwendung robuster Schätzverfahren eliminiert werden. Im Folgenden wird der aktuelle Stand des Wissens zur Baumdetektion umrissen und der in der vorliegenden Studie verwendete Registrierungsprozess, welcher sich in die drei Einzelschritte Baumdetektion, Grobregistrierung und Feinregistrierung untergliedert, erläutert.

Stand der Forschung

Registrierung von TLS-Daten

Um ein Objekt oder Gebiet lückenlos mit terrestrischen Laserscannern zu erfassen, sind in der Regel mehrere Scannerpositionen notwendig. Dabei richtet sich die Anzahl der Standpunkte nach der Form, Komplexität und Ausdehnung des Objektes. Die Punktwolke eines jeden Standpunktes liegt, je nach Ausrichtung und Aufstellung des Scanners, in einem eigenen lokalen Koordinatensystem vor. Der Vorgang der Überführung der einzelnen Koordinatensysteme in ein einheitliches übergeordnetes Koordinatensystem wird als Registrierung bezeichnet.

Die bestehenden Ansätze zur Registrierung von TLS-Daten lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Zum einen gibt es die Registrierung unter Verwendung von signalisierten Verknüpfungspunkten. Dies können je nach Scannerhersteller planare runde oder eckige Zielmarken (z.B. mit Schachbrettmuster), Kugeln oder auch Zylinder sein. Die zweite Gruppe bilden die Registrierungsverfahren unter Verwendung von Objektgeometrien. Bei diesen Konzepten werden die Messdaten selbst verwendet und über eine Grob- und eine Feinregistrierung in ein übergeordnetes System überführt. In der hier vorliegenden Aufgabenstellung kommt die Registrierung über künstliche Verknüpfungspunkte, die als Standard in der Praxis des TLS angesehen werden kann, nicht infrage, da solche Punkte häufig in ALS-Daten nicht sichtbar sein werden. Die Anlage von Verknüpfungspunkten, die in beiden Datensätzen genau und zuverlässig detektierbar wären, wäre mit einem erheblichen technischen Aufwand verbunden. Daher kommt hier nur die Registrierung über die Objektgeometrie infrage, welche allerdings erheblich durch die sehr unterschiedlichen Blickrichtungen der ALS- und TLS-Daten erschwert wird. Im Folgenden wird ein Ansatz entwickelt und getestet, bei dem durch automatische Verfahren Baumstämme in den TLS-Daten und Baumkronen in den ALS-Daten detektiert werden. Auf Basis von deren Koordinaten werden dann unter Zuhilfenahme robuster Schätzverfahren aus der Statistik die Transformationsparameter zwischen den ALS- und den TLS-Daten bestimmt. Über diese können dann die TLS-Daten ins übergeordnete System der ALS-Daten transformiert werden.

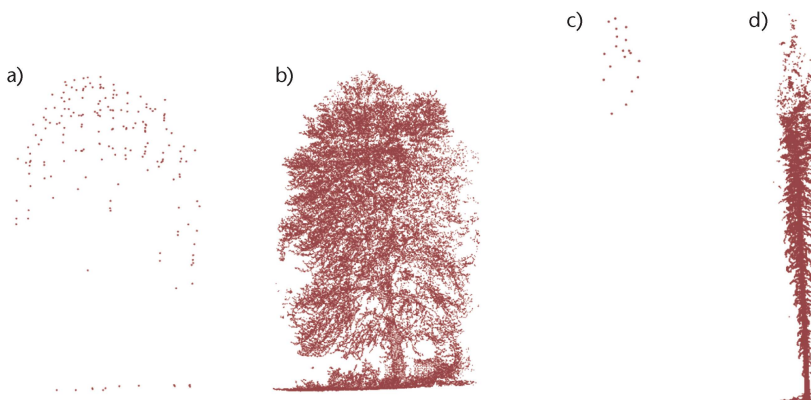


Abb 1 a) ALS-Punktwolke einer freistehenden Kastanie (*Aesculus hippocastanum*, 6 Pt/m²) im Frühjahr; b) TLS-Daten des gleichen Baumes im Herbst; c) ALS-Punktwolke einer Fichte (*Picea abies*) im Bestand (Frühjahr); d) TLS-Daten der Fichte (Sommer).

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren zur (semi)automatischen Registrierung von TLS- und ALS-Punktwolken von Waldgebieten, motiviert durch die oben aufgeführte Komplementarität beider Aufnahmeverfahren. Die Grundidee ist dabei die Detektion von Baumstämmen in den TLS-Daten und von Kronenmittelpunkten in den



Abb 2 Studiengebiet mit vier Türmen in West-Ost-Ausdehnung. Im Kreis befindet sich der Hauptturm. Quelle: ATKIS®-DOP, ©Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen 2010

Baumdetektionen

Die Einzelbaumerkennung aus ALS-Daten ist ein grundlegendes Verfahren in forstwirtschaftlichen Einsatzgebieten. Zur Segmentierung der Baumkrone wird häufig ein modifizierter Watershed-Algorithmus eingesetzt (Zhao & Popescu 2007, Rossmann et al 2007, Chen et al 2006). Ein weiterer Ansatz ist der Pouring-Algorithmus (Diedershagen et al 2003, Koch et al 2006). Dieser gibt eine gute Näherung der Baumkrone und breitet sich vom lokalen Maximum in Richtung der Täler aus. Eine Genauigkeitssteigerung bringt die Kombination dieser Verfahren mit Informationen der Charakteristik des Bestandes. So werden Baumkronendurchmesser, mittlere Baumabstände und Baumhöhen verwendet (Popescu & Wynne 2004, Chen et al 2006, Diedershagen et al 2003, Koch et al 2006), um die Detektionsrate zu optimieren. Während die bisher genannten Verfahren grösstenteils mit auf ein regelmässiges Raster interpolierten Daten arbeiten, verwenden Tiede et al (2005) die Punktwolke selbst. Die lokale Maximumsuche der Baumkronen basiert auf einem Algorithmus mit dynamischem Suchradius, der abhängig von der Baumhöhe ist. Die anschliessende Baumkronendelinierung erfolgt mit einem Region-Growing-Algorithmus. Falkowski et al (2006) verwenden zur Baumdetektion, Baumhöhen- und Kronendurchmesserbestimmung eine Technik, die auf der Spatial-Wavelet-Analyse basiert. Wang et al (2008) präsentieren die 3-D-Einzelbaummodellierung aus ALS-Daten auf Basis regelmässiger Gitterstrukturen (Voxeldaten).¹ Eine Gegenüberstellung und Validierung an unterschiedlichen Testgebieten von sechs verschiedenen Baumdetektionsalgorithmen erfolgt in Vauhkonen et al (2010).²

Während die Bäume der oberen Bestandes-schicht in den ALS-Daten über die Kronenform detektiert werden, wird die Information der Stämme in den TLS-Daten genutzt, um die Baummittelpunkte über den BHD zu bestimmen. Henning &

Radtke (2006, 2008) generieren in Punktwolken von Baumstämmen Schnitte in definierten Abständen. Über die Berechnung von ausgleichenden Kreisen werden die Stammmittelpunkte bestimmt, welche über den Iterative-Closest-Point(ICP)-Algorithmus mit den Stammmittelpunkten weiterer Standpunkte registriert werden. Simonse et al (2003) erzeugen Schnitte über der Geländeoberfläche, welche in 2-D-Bilder umgewandelt werden, um dann über eine Hough-Transformation die Baumdetektion durchzuführen. Király & Broly (2007) stellen eine Cluster-methode kombiniert mit einer halbkreisförmigen Objektsuche vor. Die Analyse auf Basis von Punktclustern in einem durch die Punktwolke gelegten horizontalen Schnitt (Voraussetzung: horizontierter Scannerstandpunkt) wurde unter anderem in Biernert et al (2007a) und Maas et al (2008) zur Detektion von Bäumen verwendet. Dieses Verfahren bildet die Grundlage für die Baumdetektion in diesem Beitrag und wird später näher erläutert.

Studiengebiet

Das Studiengebiet befindet sich im östlichen Teil des Tharandter Waldes circa 25 km südwestlich von Dresden in Sachsen, Deutschland (50°57'49"N, 13°34'01"O, 385 m ü. M.). Die Bestände erstrecken sich rund um eine 50 m × 90 m grosse Waldlichtung. Innerhalb des Untersuchungsgebietes befindet sich eine Ankerstation, die kontinuierlich Klimadaten (Feigenwinter et al 2004) erfasst. Bestandteil der Ankerstation ist auch ein 42 m hoher Turm östlich der Waldlichtung (Abbildung 2).

Die Vegetationsdaten wurden von Grünwald & Bernhofer (2007) dokumentiert, welche hier zur Bestandsbeschreibung kurz zusammengefasst werden. Die Lichtung wird von knapp 10% Lärche (*Larix decidua*) und 3% Laubbäumen umgeben. Der angrenzende Bestand setzt sich aus 72% Fichte (*Picea abies*) und 15% Kiefer (*Pinus sylvestris*) zusammen. Der Fichtenbestand im östlichen Teil der Lichtung (um den Hauptturm) wurde 1887 angelegt und wies im Jahre 2007 einen mittleren BHD von 33 cm und eine mittlere Baumhöhe von 26.5 m auf.

ALS-Daten

Für das Untersuchungsgebiet liegen Rohdaten einer Laserscannerbefliegung mit erstem und letz-

¹ WANG Y, WEINACKER H, KOCH B, STERENCZAK K (2008) Lidar point cloud based on fully automatic 3D single tree modelling in forest and evaluations of the procedure. In: ISPRS Congress Silk Road for information from imagery, 3–11 Jul, Beijing, China. ISPRS, Vol. 37, pp. 45–51.

² VAUHKONEN J ET AL (2010) Comparative testing of single-tree detection algorithms. In: Silvilaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, Freiburg, Germany.

tem Echo vor. Diese wurden im Frühjahr 2006 mit einem Laserscanner Riegl LMS-Q560 aufgenommen und haben eine mittlere Punktdichte von 1.3 bis 1.9 Pt/m². Der Laserscanner erfasst die reflektierten Echos nach dem Impulslaufzeitverfahren und hat eine Datenrate von 160 kHz.³ Der mittlere Punktfehler in der Höhe beträgt 0.2 m und in der Lage 0.5 m.⁴

TLS-Daten

Im Sommer und Herbst 2008 wurden die Bestände um die Lichtung an zwei windstillen Tagen mit einem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z 420i aufgenommen. Dieser Laserscanner verfügt über eine maximale Reichweite von 1000 m und hat ein Gesichtsfeld von 80° × 360°. Über das Impulslaufzeitverfahren werden bis zu 11 000 Punkte pro Sekunde mit einer mittleren Streckenmessgenauigkeit von 10 mm gemessen.⁵ Von insgesamt 18 verschiedenen Scannerpositionen, inklusive einer Aufnahme vom 42 m hohen Hauptturm, wurde ein Transekt entlang der Türme von 300 m × 120 m mit einem durchschnittlichen Punktabstand von 1.5 cm auf 10 m Entfernung aufgenommen. Über fünf retroreflektierende Zielmarken (Durchmesser 5 cm) und 13 retroreflektierende Zylinder (Durchmesser 5 cm, Höhe 5 cm), die im Bestand, auf der Lichtung und an den Türmen aufgestellt wurden, fand die Punktwolkenregistrierung statt.

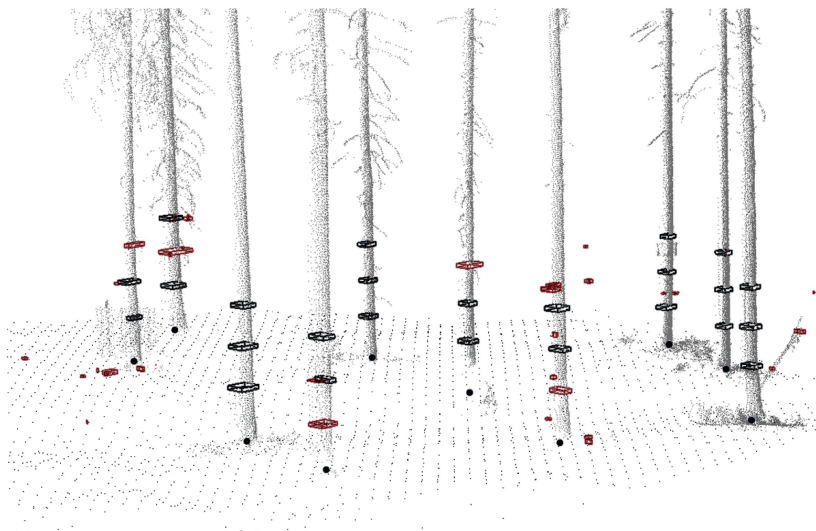


Abb 3 Segmentierungsergebnis der Baumdetektion innerhalb dreier horizontaler Schnitte, schwarz: als Baum detektierte Objekte, rot: zurückgewiesene Objekte.

Baumdetektion

In diesem Abschnitt werden zwei Verfahren zur Baumdetektion aus TLS- und ALS-Daten vorgestellt. Als Baumposition werden in den TLS-Daten die Mittelpunkte des BHD und in den ALS-Daten der höchste Punkt in der Baumkrone detektiert. Im Anschluss daran werden diese Punkte auf das DGM reduziert und fliessen in eine Helmert-Transformation ein.

TLS-Daten

Zur Detektion der Bäume aus der Laserscannerpunktwolke wird ein modifizierter Separieralgorithmus angewendet, der in Bienert et al (2007b) detailliert vorgestellt wurde. Nach der DGM-Generierung werden drei horizontale Profile (Dicke 10 cm, Abstand 1 m) parallel ab 1.30 m über der ausgleichenden Ebene der DGM-Punkte aus der Punktwolke gefiltert.

Innerhalb eines Schnittes sucht ein Strukturelement definierter Grösse s nach Punkthäufungen. Punktcluster werden separiert, sobald eine Mindestpunktzahl n_{Min} erreicht ist und der Abstand zum benachbarten Punktcluster grösser als $s/2$ ist. Kleinere Punkthäufungen, verursacht durch Äste oder Bodenvegetation mit einer Punktzahl kleiner n_{Min} , werden somit von vornherein ausgeschlossen. Die separierten Punktcluster werden in einem nächsten Schritt einer Kreisausgleichung unterzogen. Anhand der Standardabweichung σ_0 und des berechneten Durchmessers werden die Objekte klassifiziert und Bäume detektiert. Objekte mit einem Durchmesser oberhalb der Derbholzgrenze und einer Standardabweichung kleiner als ein vorgegebener Grenzwert werden als Bäume detektiert (Bienert et al 2007b). In Abbildung 3 sind die Cluster dreier horizontaler Schnitte dargestellt. Schwarz sind die Objekte, die als Baum klassifiziert wurden, und rot die zurückgewiesenen Objekte aufgrund von abgehenden Ästen oder Punkten von Bodenvegetation.

ALS-Daten

Zunächst wurden die Laserscannerrohdaten (erstes und letztes Echo) mit dem Programm Terra Scan über eine progressive TIN-Verdichtung (Pfeifer 2005) als Boden- und Nichtbodenpunkte klassifiziert. Im Anschluss daran werden aus den klassifizierten Punkten in Terra Modeler das DGM und das digitale Oberflächenmodell DOM abgeleitet. Mit den klassifizierten Bodenpunkten wird ein trianguliertes Oberflächenmodell erstellt, um durch eine visuelle Kontrolle Fehlklassifizierungen auszuschliessen und zu beseitigen. Letztendlich werden die Bodenpunkte als regelmässiges Raster exportiert. Die Erstellung des DOM geschieht analog dazu.

Es wurde ein Routine entwickelt, die anhand der Laserscannerrohdaten, des Vegetationshöhenmodells (VHM = DOM–DGM) mit einer Rasterweite von 0.20 m und des DGM (Raster 0.50 m) automatisch die Baumkronenpositionen aus den ALS-Daten ableitet. Bei der Berechnung des VHM wurden Höhen ab 10 m über DGM berücksichtigt. Dies hat den

3 www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produkt-detail/product/scanner/6/ (10.3.2011)

4 www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/atkis/dgm/dgm_detail.html (29.6.2010)

5 www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produkt-detail/product/scanner/4/ (10.3.2011)

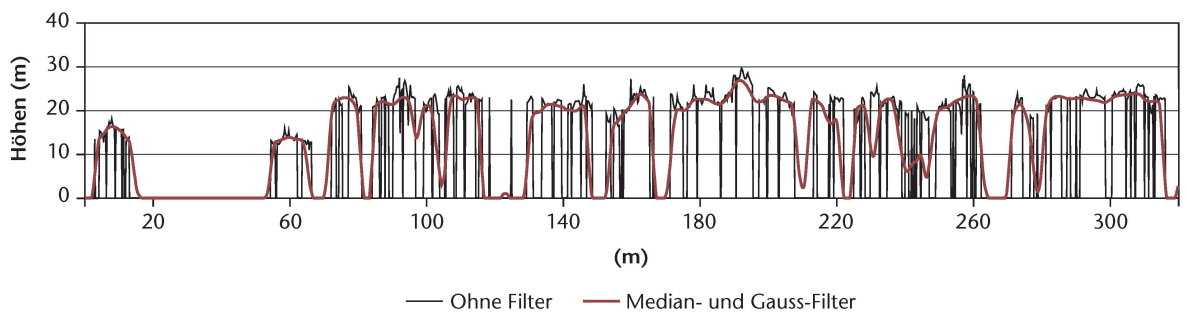


Abb 4 Ungefilterte und gefilterte Daten ab 10 m Höhe eines 20 cm breiten Profils des Vegetationshöhenmodells (VHM) entlang der West-Ost-Ausrichtung.

Vorteil, dass Sträucher von vornherein ausgeschlossen werden. Frühere Literaturquellen zeigen, dass bei einer solchen Vorgehensweise neben den richtigen Baumpositionen auch fehlerhaft detektierte Baumkronenpositionen zu erwarten sind. Daher ist das Ziel der Methode mehr auf die Richtigkeit der Baumkronenpositionen ausgerichtet als auf die vollständige Erfassung aller Baumpositionen. In einem ersten Schritt werden Näherungswerte der Baumpositionen anhand des Rasterbildes des VHM bestimmt. Dies hat den Vorteil, dass vorhandene Bildverarbeitungswerkzeuge genutzt werden können. Ein Vorteil der Nutzung des VHM ist, dass Bäume kleiner als eine vordefinierte Mindestgrösse von der Auswertung ausgeschlossen werden können.

Mit einem Fenster von 3×3 Rasterzellen wird nach lokalen Maxima im Rasterhöhenbild gesucht. Dabei bildet das Mittelpixel des Fensters ein Maximum, wenn es grösser als seine acht Nachbarn ist. Da die direkte Suche aufgrund der vielen Höhenvariationen und Lücken zu viele Maxima innerhalb einer Baumkrone detektieren und somit eine Übersegmentierung bewirken würde, werden zunächst zwei Filter auf das VHM angewendet. Die Kombination aus einem Median- und einem Gauss-Filter (Persson

2001, Koch et al 2006) bewirkt eine Glättung der Daten (Abbildung 4).

In einem zweiten Schritt werden die gefundenen lokalen Maxima auf Nachbarschaft geprüft. Befinden sich mehrere Maxima innerhalb eines zuvor definierten Radius r_N , wird nur der höchste Baum zur Auswertung verwendet, die kleineren Bäume werden verworfen. Letztendlich werden die Erstecho-Daten verwendet und alle Punkte innerhalb eines bestimmten Suchradius r_P um die genäherten Baumkronenpositionen analysiert. Ist eine hinreichende Punktzahl vorhanden, werden aus den n grössten Punkten über Mittelwertbildung die endgültigen Lagekoordinaten der Baumspitze (Abbildung 5, schwarze Punkte) bestimmt. Die Höheninformation der Krone soll zukünftig über das Einpassen einer Parabel in die n grössten Punkte ableitbar sein. Diese wird, wie eingangs bereits erwähnt, noch auf die Geländehöhe reduziert.

Registrierung

Der Registrierungsprozess setzt homologe Baumpaare in den ALS- und TLS-Daten voraus. Die automatische Bestimmung von homologen Punktpaaren aus zwei unterschiedlichen Datensätzen verlangt aufgrund der verschiedenen Aufnahmerichtungen und Detektionsalgorithmen ein robustes Verfahren. Bei der Bestimmung der Baumkrone spielen die Wuchsform, der Windeinfluss und das Aufnahmeverfahren eine entscheidende Rolle, was dazu führt, dass die Koordinaten des Stammes und der Krone nicht notwendigerweise übereinstimmen. Ein weiterer Aspekt ist, dass aufgrund von abgeschatteten und nicht detektierten Bäumen im TLS-Datensatz und Fehldetektionen im ALS-Datensatz nicht jeder Baum in einem Datensatz einen Partner im anderen hat.

Ransac (Fischler & Bolles 1981) ist ein Algorithmus, der zur robusten Parameterschätzung verwendet wird und auch bei einer sehr grossen Anzahl von Ausreissern funktioniert. Dieser Algorithmus wurde für Zwecke der Herstellung von Punktkorrespondenzen in eine 3-D-Helmert-Transformation in-

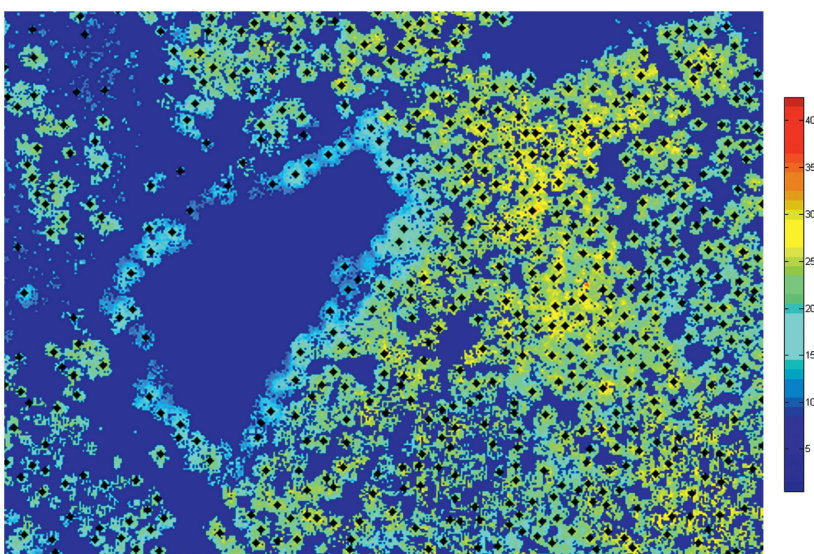


Abb 5 Vegetationshöhenmodell (VHM) ab 10 m Höhe (Raster: 0.2 m) mit detektierten Baumkronenpositionen (schwarze Punkte), Höhenskala in Meter.

tegiert. Die Helmert-Transformation benötigt drei identische Punkte in beiden zu registrierenden Datensätzen. In einem ersten Schritt werden aus den vorliegenden ALS- und TLS-Baumpositionen jeweils drei zufällige Punkte ausgewählt. Anhand dieser Punkte werden die sechs Helmert-Transformationsparameter (drei Translationen, drei Rotationen) bestimmt und alle TLS-Baumpositionen transformiert. In einem zweiten Schritt werden die TLS-Baumpositionen n_{Baum} gezählt, die sich innerhalb eines zuvor festgelegten Abstandes d zur nächsten ALS-Baumkronenposition befinden. Ein hohes n_{Baum} bestätigt die Richtigkeit der gewählten Punkte. Diese beiden Schritte werden bis zum Erfüllen des Abbruchkriteriums (Überschreiten der vorgegebenen Anzahl an Bäumen oder maximale Iterationszahl i_{max}) wiederholt. Iterativ werden die drei homologen Punktpaare immer wieder zufällig herausgegriffen, bis eine Lösung ein Maximum an homologen Baumpositionen aufweist. Die Iteration mit den meisten übereinstimmenden transformierten Baumpositionen liefert die Beobachtungen für die endgültige Transformation über die strikte Methode der kleinsten Quadrate. Ransac erlaubt bei vorliegendem Wissen über die Zuverlässigkeit des automatischen Detektions- und Zuordnungsalgorithmus eine Vorabschätzung der notwendigen Anzahl von Iterationen zur erfolgreichen Extraktion der korrekten Zuordnungskonstellation mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit.

Eine Feinregistrierung wird mit dem Programm Geomagic Studio durchgeführt. Hierzu werden die Punktwolken über die klassifizierten Bodenpunkte beider Punktwolken mit einem ICP-Algorithmus (Besl & McKay 1992) neu ausgerichtet. Der ICP-Algorithmus minimiert die Summe der Quadrate der Entfernungen zweier Datensätze. Voraussetzung für den Algorithmus ist ein genügend grosser Überlappungsbereich identischer Datensätze und eine gute Näherungsausrichtung der Daten aus der Grobregistrie-

rung. Eine Bedingung hierfür ist ein coupirtes Gelände, da nur dieses zu eindeutigeren Registrierungsergebnissen führt. Bei der Verwendung der Bodenpunkte in ebenem Gelände können nur drei der sechs Transformationsparameter (die Z-Komponente der Translation und die zwei Rotationswinkel um die X- und Y-Achse) im Zuge dieser Feinregistrierung verbessert werden.

Ergebnisse

Aus den vorliegenden Datensätzen konnten aus den ALS-Daten 1403 Bäume und aus den TLS-Daten 358 Bäume automatisch detektiert werden. Letztendlich wurden der Bereich um die Lichtung ausgewählt und die detektierten Bäume aus der Flugzeugaufnahme auf 226 Bäume und jene aus den TLS-Daten auf 172 Bäume begrenzt. Insgesamt flossen 85 Bäume, die das Kriterium der Distanz von $d = 2.5$ m nach der Transformation mit nur drei Punkten erfüllten, als Beobachtung in die Transformation ein. Unter Zuhilfenahme dieser 85 Punkte wurden erneut Transformationsparameter berechnet und die Punkte als endgültige Beobachtung gefiltert, die der halben Distanz ($d = 1.25$ m) entsprachen. Letztendlich wurde die Transformation mit 59 homologen Punktpaaren, jeweils reduziert auf die Geländehöhe, mit einer Standardabweichung σ_0 von 0.49 m durchgeführt. Dies entspricht einer Nutzung von 34% der Baumpositionen aus den TLS-Daten. Mit Geomagic wurden über einen ICP-Algorithmus die zuvor klassifizierten Bodenpunkte im Umkreis der Laserscannerstandpunkte neu ausgerichtet und die endgültigen Transformationsparameter zur Korrektur der TLS-Daten verwendet. In Abbildung 6 sind die Abweichungen der transformierten TLS-Bodenpunkte von den ALS-Bodenpunkten dargestellt. Bei Betrachtung aller klassifizierten Bodenpunkte liegen die TLS-Daten im Mittel 21 cm über dem Gelände der ALS-Daten. Werden nur die Bodenpunkte im Umkreis der Scannerstandpunkte verwendet, treten Abweichungen von 3 mm auf, was auch in Abbildung 6 an den gelben bis hellblauen Stellen ersichtlich wird. Für die orangen bis roten Bereiche über dem Gelände wurde die Geländeinformation aufgrund des ungünstigen Auftreffwinkels des Laserstrahles beim TLS und der vorhandenen Bodenvegetation nicht exakt erfasst, die Reflexionen resultieren hier häufig vom Unterholz. An diesen Stellen ist die Zuverlässigkeit der Geländemodellierung aus den TLS-Daten daher gering. Deshalb sollte jeweils nur die nähere Umgebung der Scannerposition in die Transformation eingehen.

Zur Validierung der Registrierungsgenauigkeit wurden die transformierten TLS-Daten mit den ALS-Daten eines $9 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 3.4 \text{ m}$ grossen Gebäudes auf der Lichtung analysiert und visualisiert. Wie Abbildung 7 zeigt, konnte durch Anwendung des ICP-Al-

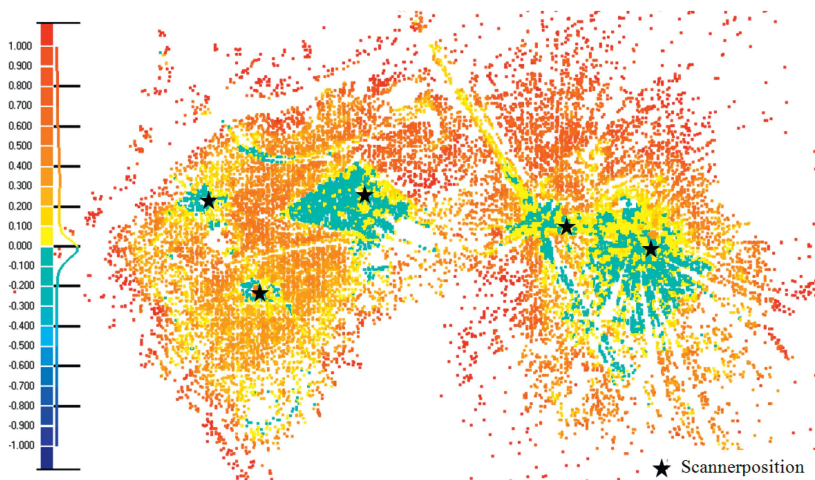
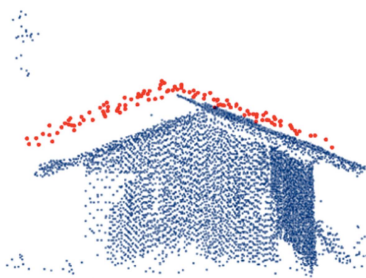
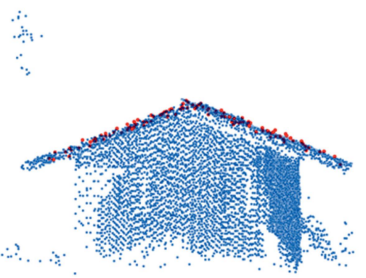
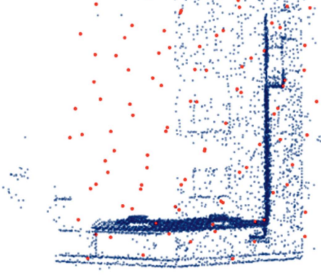


Abb 6 Abweichung der klassifizierten TLS-Bodenpunkte von den ALS-Bodenpunkten in der Höhe. Die Punkte in der Nähe eines Scannerstandpunktes zeigen eine hohe Zuverlässigkeit in der Geländemodellierung aus TLS-Daten. Höhenskala in Meter.



Grobregistrierung



Feinregistrierung

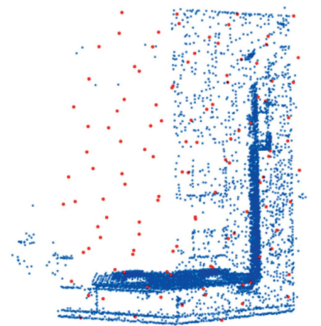


Abb 7 Visualisierung der ALS- (rote Punkte) und TLS-Daten (blaue Punkte) im Grund- und Aufriss nach der Grobregistrierung mit Ransac (oben) und nach der Feinregistrierung mit ICP (unten).

gorithmus die Genauigkeit in Abhängigkeit von der Grobregistrierung gesteigert werden.

Diskussion und Ausblick

Im Beitrag wurden Algorithmen zur Baumdetektion aus ALS- und TLS-Daten und zur geometrischen Registrierung dieser beiden Datensätze vorgestellt. Mit den gewonnenen Baumpositionen kann unter Zuhilfenahme von robusten Schätzern eine automatische Registrierung der Daten durchgeführt werden. Dies stellt eine Grundlage für eine kombinierte Auswertung dar. Die Ergebnisse zeigen, dass die erreichten Registrierungsgenauigkeiten den Anforderungen an Fragestellungen im Waldbereich gerecht werden. Die Registrierung der Datensätze wurde mit einer Standardabweichung von 0,49 m durchgeführt, die über die Feinregistrierung (ICP) noch verbessert wurde. Da die Kronenpunkte der ALS-Daten den richtigen Baumpositionen der TLS-Daten zugewiesen werden können, ist eine Genauigkeitssteigerung in der Bestimmung der Baumhöhe aus den registrierten Daten zu erwarten. Mit den Baumpositionen des reinen Fichtenbestands östlich der Lichtung wurde ebenfalls eine Registrierung durchgeführt. Selbst in homogenen Beständen ohne markante Lichtung oder Waldwege führt das Verfahren zu einem erfolgreichen Ergebnis. Einschränkend ist festzuhalten, dass die Geradlinigkeit der Bäume (Kronenmittelpunkt über Baumfusspunkt) und die Verwendung selektierter Bodenpunkte in der Nähe

des Scannerstandpunktes das Registrierungsergebnis beeinflussen.

Hinsichtlich der Registrierungsmethode mit Ransac soll zukünftig neben der geometrischen Lageinformation ein Merkmalsvektor (mit Baumhöhe, Kronendurchmesser etc.) die Kombinatorik einschränken und damit die Zuordnung beschleunigen. Die Nutzung von Full-Waveform-Daten bietet zusätzlich die Möglichkeit der Erfassung von Stämmen und Ästen innerhalb der Krone. Neben den Bodenpunkten von ebenem Gelände können zusätzlich die Stammpunkte im ICP-Algorithmus verwendet werden und – auch in ebenem Gelände – eindeutigere Ergebnisse hinsichtlich der Lage liefern. ■

Eingereicht: 14. Juli 2010, akzeptiert (mit Review): 10. März 2011

Dank

Die terrestrischen Laserscanneraufnahmen sind im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1276 MetStröm im Projekt «Turbulente Austauschprozesse zwischen Waldflächen und der Atmosphäre (TurbEFA)» entstanden. Des Weiteren danken die Autoren Ronald Queck (Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden) für die Unterstützung bei der Turmaufnahme. Die Daten der flugzeuggetragenen Laserscanneraufnahme wurden vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen im März 2010 bezogen.

Literatur

- ASCHOFF T, SPIECKER H (2004) Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/ASCHOFF.pdf (10.3.2011)
- BESL PJ, MCKAY ND (1992) A method for registration of 3-D shapes. *IEEE T Pattern Anal* 14: 239–256.
- BIENERT A, SCHELLER S, KEANE E, MULLOOLY G, MOHAN F (2006) Application of terrestrial laserscanners for the determination of forest inventory parameters. www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/1270_Dresden06.pdf (10.3.2011)
- BIENERT A, SCHELLER S, KEANE E, MOHAN F, NUGENT C (2007A) Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laser scanner point clouds. www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/ls2007.pdf (10.3.2011)
- BIENERT A, SCHELLER S, KEANE E, MULLOOLY G, MOHAN F (2007B) Automatische Erfassung forstinventur-relevanter Geometrieparameter von Waldbäumen aus terrestrischen Laserscannerdaten. In: Luhmann T, editor. *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2007*. Offenbach: Wichmann. pp. 216–225.
- CHEN Q, BALDOCCHI D, GONG P, KELLY M (2006) Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint LiDAR data. *Photogramm Eng Rem S* 72: 923–932.
- CZAJA J (2007) Ein sensorgestütztes mobiles GIS am Beispiel des Nationalparks Bayerischer Wald. München: Techn Univ München, Dissertation. 195 p.

- DIEDERSHAGEN O, KOCH B, WEINACKER H (2003)** Automatic estimation of forest inventory parameters based on lidar, multi-spectral and fogis data. In: Proc Optical 3D Measurement Techniques, 22–25 Sep 2003, Zurich. www.natscan.uni-freiburg.de/suite/pdf/040212_1809_1.pdf (10.3.2011)
- FALKOWSKI MJ ET AL (2006)** Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. Can J Remote Sens 32: 153–161.
- FEIGENWINTER C, BERNHOFER C, VOGT R (2004)** The influence of advection on the short term CO₂-Budget in and above a forest canopy. Bound-Lay Meteorol 113: 201–224.
- FISCHLER MA, BOLLES RC (1981)** Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Commun ACM 24: 381–395.
- GRÜNWALD T, BERNHOFER C (2007)** A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. Tellus B 59: 387–396.
- HENNING JG, RADTKE PJ (2006)** Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. For Sci 52: 67–80.
- HENNING JG, RADTKE PJ (2008)** Multiview range-image registration for forested scenes using explicitly-matched tie points estimated from natural surfaces. ISPRS J Photogram 63: 68–83.
- KIRÁLY G, BROLLY G (2007)** Tree height estimation methods for terrestrial laser scanning in a forest reserve. www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/ls2007.pdf (10.3.2011)
- KOCH B, HEYDER U, WEINACKER H (2006)** Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. Photogram Eng Remote S 72: 357–363.
- MAAS HG (2008)** Laserscanning in forstwissenschaftlichen und forstwirtschaftlichen Anwendungen. www.tu-dresden.de/ipf/photo/publikationen/2008/Maas_DVWFulda2008.pdf (19.3.2011)
- MAAS HG, BIENERT A, SCHELLER S, KEANE E (2008)** Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laserscanner data. Int J Remote Sens 29: 1579–1593.
- PERSSON A (2001)** Extraction of individual trees using laser radar data. Göteborg: Chalmers Univ Technol, Master Thesis EX013. 28 p.
- PFEIFER N (2005)** Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Österr Z Vermessung Geoinformation 4: 243–252.
- POPESCU SC, WYNNE RH (2004)** Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. Photogram Eng Remote S 70: 589–604.
- ROSSMANN J, SCHLUSE M, BÜCKEN A, KRAHWINKLER P (2007)** Using airborne laser scanner data in forestry management: A novel approach to single tree delineation. www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/ls2007.pdf (10.3.2011)
- SIMONSE M, ASCHOFF T, SPIECKER H, THIES M (2003)** Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laserscanning. www.natscan.uni-freiburg.de/suite/pdf/030916_1642_1.pdf (19.3.2011)
- TIEDE D, HOCHLEITNER G, BLASCHKE T (2005)** A full GIS based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W24/papers/CMRT05_Tiede_et_al.pdf (10.3.2011)
- VOSSELMAN G, MAAS HG (2010)** Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Dunbeath: Whittles. 336p.
- ZHAO K, POPESCU S (2007)** Hierarchical watershed segmentation of canopy height model for multi-scale forest inventory. www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/ls2007.pdf (10.3.2011)

Verfahren zur Registrierung von Laserscannerdaten in Waldbeständen

Laserscanning ist ein Messverfahren, welches über Distanz- und Richtungsmessung zu Oberflächenpunkten innerhalb kürzester Zeit komplexe Geometrien genau und zuverlässig erfassen kann. Für forstwirtschaftliche Fragestellungen wächst neben dem Flugzeuglaserscanning zunehmend auch das Interesse am terrestrischen Laserscanning. Im Beitrag werden Verfahren zur automatischen geometrischen Referenzierung von Flugzeuglaserscannerdaten und terrestrischen Laserscannerdaten vorgestellt. Dazu werden in einem ersten Schritt Kronenmittelpunkte in den Flugzeuglaserscannerdaten und Stammpositionen in den terrestrischen Laserscannerdaten bestimmt. Danach erfolgt die Suche nach Punktkorrespondenzen mit anschließender Transformation. Den Kernpunkt bildet dabei die Anwendung des Ransac-Verfahrens zur zuverlässigen Zuordnung in fehlerbehafteten Teildatensätzen. Die Registrierung wird in eine Grob- und eine Feinregistrierung eingeteilt. Nach der Grobregistrierung über die Baumpositionen erfolgt eine Feinregistrierung über das ICP-Verfahren. Die Verfahren werden getestet und an einem Datensatz von einem Fichtenbestand mit angrenzender Waldlichtung im Tharandter Wald (Deutschland) validiert. Die vorgestellten Methoden ermöglichen eine zuverlässige Datenregistrierung in einem Genauigkeitsbereich, der den Ansprüchen im Waldbereich gerecht wird.

Enregistrement de données issues du balayage laser dans les peuplements forestiers

Le balayage laser est un procédé qui permet de relever en un court laps de temps, de manière fiable et précise, des géométries complexes à partir de mesures de distances et de directions. Pour les problématiques forestières, à côté du balayage laser aéroporté, l'intérêt pour les balayages laser terrestres est grandissant. Cette contribution présente les procédures pour le référencement géométrique automatique des données issues de balayage laser aéroporté et terrestre. Dans une première étape, la position du centre de la couronne est déterminée à partir des données laser aéroportées, et la position du tronc à partir des données terrestres. Sont recherchées ensuite les correspondances entre les points et leur transformation. Le point crucial est l'utilisation du processus de Ransac pour l'attribution fiable au sein de blocs partiels de données empreints d'erreurs. L'enregistrement est attribué à un enregistrement grossier et à un enregistrement détaillé. Après l'enregistrement grossier de la position de l'arbre, un enregistrement fin est effectué par le processus ICP. Les processus ont été testés et validés à l'aide d'un jeu de données d'un peuplement d'épicéa appartenant à une clairière dans la forêt de Tharandt (Allemagne). Les méthodes présentées ici permettent un enregistrement fiable des données avec un degré de précision convenant aux exigences du secteur forestier.