

Quantification of single-tree structure in mountain forests using terrestrial laser scanning

Examiner 1: Prof. Norbert Pfeifer

Technische Universität Wien, Department of Geodesy and Geoinformation

Examiner 2: Prof. Christian Heipke

Leibniz Universität Hannover, Institute of Photogrammetry and GeoInformation

Examiner 3: Dr. Kenneth Olofsson

Swedish University Of Agricultural Sciences, Department of Forest Resource Management

Di Wang

Abstract

Mountain forests provide a great deal of values, ranging from protection against natural hazards, timber production, biodiversity conservation, to carbon storage and climate change mitigation. Understanding and monitoring the detailed structure information at the single-tree level in mountain forests is equally important as area-wide assessments for sustainably managing these mountain forest services. Fine-scale three dimensional (3D) forest structures can be assessed by using terrestrial laser scanners (TLS), which provide accurate and high-resolution measurements (i.e., 3D point clouds) of objects. TLS has greatly advanced single-tree quantifications by successfully extracting attributes such as tree stem location, stem diameter, stem curve, stem volume and biomass components. However, existing approaches are mainly developed for managed forests or those in flat environments. Due to factors such as site fertility, spacing and light conditions, wind, and landslide events, mountain forests have more complex below-canopy structures mainly featuring multifarious understory, stems with non-vertical orientations and cross-sections that differ significantly from a circular shape. These impacts make it difficult to directly apply existing methods in mountain forests. This dissertation tackles such challenges by developing novel methods that overcome the high degree of complexity in processing TLS data acquired in mountain forests. The work in this dissertation focuses on methodology developments specifically associated to three scientific objectives; (a) separation of tree wood and leaf components; (b) tree stem detection and modeling in mountain landslide-affected forests; and (c) reconstruction of stem cross-sections. A side focus is also paid on smart point cloud structuring in order to assist the processing of large volume point cloud data. Firstly, an empirical study is carried out to examine the feasibility of four popular supervised machine learning methods and the impact of feature calculation. A follow-up work develops a novel approach that is fully automatic and unsupervised. Experiments confirm its strength in separating wood and leaf components for plot-level mountain forests. Second, a new method is introduced that detects and reconstructs tree stems with irregular vertical orientations. The reconstructed stems reach high accuracy compared to field references. Lastly, a new method

is developed to model the actual shape of stem cross-sections, which breaks down the assumption that the cross-section of tree stems is circular. These works conducted in this dissertation provide practical examples and guidelines for understanding mountain forest structures at the single-tree level, and at the same time demonstrate that the required data processing can be largely automated. These contributions can help to achieve more intelligent and sustainable mountain forest managements in the future.

Kurzfassung

Gebirgswälder stellen für eine Vielzahl von Bereichen einen Nutzen dar, von Schutz vor Naturgefahren über die Holzproduktion, den Erhalt der Biodiversität bis hin zu Kohlenstoffspeicherung und Milderung des Klimawandels. Für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Gebirgswälder ist dabei das Verständnis und die Überwachung der detaillierten Struktur auf Einzelbaum-Niveau von ebenso großer Bedeutung wie deren flächenbasierte Bewertung. Die feinskalige, drei-dimensionale (3D) Waldstruktur kann mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) ausgewertet werden, was genaue, hochauflösende Messungen (3D-Punktwolken) der Objekte liefert. Durch TLS konnten bisher große Fortschritte bei der Einzelbaum-Quantifizierung erzielt werden, da sich damit erfolgreich Attribute wie die Position des Stammes, der Durchmesser, die Stammkurve, das Stammvolumen und Biomasse-Komponenten ableiten lassen. Bisherige Ansätze wurden primär für bewirtschaftete Wälder oder Wälder in flachem Gelände entwickelt. Die hohe Komplexität von Gebirgswäldern (z.B. Wuchsleistung, Bestockungsdichte, Lichtverhältnisse, Wind, Schnee und Hangrutschungsereignisse) spiegeln sich oftmals in Stämmen mit nicht-vertikaler Ausrichtung und durch Stammquerschnitte von nicht-kreisförmiger Form wieder. Diese Eigenschaften erschweren die direkte Anwendung bestehender Methoden für Gebirgswälder. Diese Dissertation richtet sich auf die Bewältigung dieser erschwerenden Bedingungen, indem neue Methoden entwickelt werden, welche den hohen Komplexitätsgrad in der Verarbeitung von TLS Daten aus Gebirgswäldern meistern können. Die Arbeit der Dissertation fokussiert sich auf die Entwicklung von Methoden mit drei wissenschaftlichen Zielsetzungen; (a) der Unterscheidung zwischen Holz- und Blattkomponente des Baumes; (b) der Baumstamm-Detektion und -Modellierung in Gebirgswäldern, welche von Hangrutschungen beeinflusst sind; und (c) der Rekonstruktion der Stammquerschnitte. Zusätzlich wird ein Fokus auf eine intelligente Punktwolkenstrukturierung gelegt, um die Verarbeitung von sehr großen Punktwolken zu ermöglichen. Zuerst wird eine empirische Studie durchgeführt um die Verwendbarkeit von vier gängigen überwachten Klassifizierungsmethoden aus dem Machine-Learning sowie deren Einfluss auf die Merkmalsberechnung zu untersuchen. In einer anschließenden Arbeit wird dazu ein neuer, vollautomatischer und unüberwachter Klassifizierungsansatz entwickelt. Experimente bestätigen dessen Stärke in der Unterscheidung zwischen Holz- und Blattkomponenten. Zweitens wird eine neue Methode eingeführt, welche Baumstämme unregelmäßiger vertikaler Ausrichtung detektieren und rekonstruieren kann. Für die rekonstruierten Stämme lassen sich damit hohe Genauigkeiten im Vergleich zu im Feld erhobenen Referenzdaten erzielen. Zum Schluss wird eine neue Methode entwickelt, welche die tatsächliche Form der Stammquerschnitte modelliert und damit mit der Annahme runder Querschnitte der Baumstämme bricht. Die Arbeiten, welche in dieser Dissertation durchgeführt werden, liefern praktische Beispiele und Leitlinien für das Verständnis der Waldstruktur von Gebirgswäldern auf Einzelbaum-Niveau und demonstrieren gleichzeitig, dass die erforderliche Datenverarbeitung weitgehend automatisiert werden kann. Diese Beiträge können dabei helfen, in Zukunft eine intelligentere und nachhaltigere Bewirtschaftung von Gebirgswäldern zu erzielen.