



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Photogrammetrie und Fernerkundung

Reconstruction of standing and fallen single dead trees
in forested areas from LiDAR data and aerial imagery

Przemyslaw Polewski

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende/-r:

- Prüfer der Dissertation:
1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla
 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer
Universität der Bundeswehr München
 3. Prof. Dr.-Ing. Peter Krzystek
Hochschule München

Die Dissertation wurde am _____ bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt am _____ angenommen.

Abstract

Dead wood constitutes an important component of forest ecosystems due to its various roles: preserving biodiversity, ensuring forest stand succession, as well as serving as a sink for sequestering greenhouse gas emissions. Therefore, the mapping of dead wood is an important issue for scientists studying forest environments. Currently, the predominant approach relies on time-consuming field inventories. On the other hand, during the last 15 years remote sensing techniques for surveying forested areas have become widespread. Particularly the advancement of laser scanning technology allows for an unprecedented level of detail in mapping the understory layer. The principal goal of this thesis is to develop methods for mapping various forms of dead wood under challenging scenarios, based on 3D laser scanning data complemented by aerial imagery, whose infrared spectral band is known to facilitate detection of dead vegetation.

First, the detection of fallen trees from point clouds was considered. A general framework is proposed for delineating elongated structures. Initially, equally-sized object *parts* (primitives) that are likely to form objects together are found through contextual classification using a conditional random field (CRF). Then, the primitives are merged into objects through a spectral clustering algorithm. The components of the CRF and the parameters of spectral clustering are learned from training data. This framework is then instantiated for detecting fallen stems in ALS point clouds. Regarding TLS data, an approach for cylinder reconstruction based on voting in parameter accumulation space is proposed. By utilizing a kernel density estimator to model the parameter space, the accumulation cell size is determined automatically. The method is then applied to TLS point clouds, where the cylindrical shapes of fallen stems are well-preserved.

In case of standing dead trees, three scenarios were studied. For detecting dead tree crowns only using aerial CIR imagery, a level set segmentation method with shape and intensity priors is adapted from a medical imaging application. Standing dead trunks without crowns were detected from ALS point clouds using a newly introduced 3D shape descriptor, the Free Shape Context (FSC), which generalizes cylindrical Shape Contexts by allowing a more heterogeneous structure. The combination of ALS data and aerial imagery was also considered for dead tree detection. This is done by segmenting the point cloud and projecting the clusters onto the image plane to obtain bounding polygons for each tree. Spectral features are derived from image pixels.

The problems of standing dead tree detection were studied in the context of semi-supervised and active learning, two techniques for accelerating the training of supervised models. The semi-supervised Shannon entropy-regularized logistic model is generalized to handle Renyi entropies. Also, a method for combining the two learning paradigms on the grounds of minimizing the entropy of class posterior probabilities is introduced, extending Expected Error Reduction.

Experimental results reveal that under a moderate overstory cover, fallen stems can be recovered quite reliably from ALS data. A considerable gain in detection quality can be associated with the CRF-based contextual classification, whereas the learned components of both the CRF and the spectral clustering showed good generalization abilities. The proposed cylinder detection method for TLS data led to an increased stem reconstruction quality compared to various sample consensus (SAC) baselines by up to 10 percentage points (pp). Overall, both the TLS and ALS processing pipelines achieved detection completeness over 75% with an error rate below 20%. The utility of the near infrared band for dead vegetation detection was confirmed, although the method utilizing only 2D imagery sometimes confused dead trees with open ground patches due to similar hues. This was remedied by including 3D information from the point cloud in the fused data scenario. The FSC descriptor was found to yield a good balance between feature space size and discriminative properties. Finally, the results show that a benefit from combining active and semisupervised learning of up to 10 pp is attainable, mainly for small training sets.

Zusammenfassung

Totholz ist ein wichtiges Element forstlicher Ökosysteme wegen seiner Rollen in der Erhaltung der Artenvielfalt, der Nachhaltigkeitssicherung von Baumbeständen sowie als Kohlenstoffspeicher für Treibhausgasemissionen. Die Kartierung von Totholz stellt daher im Bereich der waldökologischen Forschung ein hochaktuelles und interessantes Thema dar. Derzeit werden solche Informationen meistens durch aufwändige Inventuren bzw. manuelle Messkampagnen gewonnen. Andererseits haben sich Fernerkundungsmethoden bei der Charakterisierung von Waldstrukturen, vor allem das Laserscanning, in den letzten 15 Jahren sehr verbreitet. Das Hauptziel dieser Arbeit ist, Methoden für die automatische Kartierung verschiedener Formen von Totholz zu entwickeln, die auf Daten terrestrischer (TLS) und flugzeuggetragener (ALS) Laserscanner sowie multispektralen CIR Luftbildern basieren.

Im ersten Teil der Arbeit wird die Segmentierung von liegenden Stämmen aus Laserscanner-Punktwolken behandelt, wobei ein Framework zur Erkennung von länglichen Strukturen vorgeschlagen wird. Zuerst werden Objektteile, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zusammen ein Objekt bilden, durch kontextuelle Klassifikation mittels Conditional Random Fields (CRF) gefunden. Danach werden die Teile anhand einer spektralen Clusteranalyse in Objekte zusammengefügt. Die Parameter des Clusterverfahrens sowie der CRFs werden aus Trainingsdaten gelernt. Das Framework wird anschließend für die konkrete Aufgabe der Erkennung von liegenden Stämmen aus ALS-Daten instanziiert. Für TLS-Daten wird ein Verfahren zur Rekonstruktion von Zylinderformen aus dichten Punktwolken eingeführt, das auf der Modellierung des Parameterraums mittels eines Kerndichteschätzers beruht. Das Verfahren wird auf TLS-Punktwolken angewendet, in denen die Zylinderform der gefallenen Stämme gut repräsentiert wird.

Im Weiteren werden drei Szenarien zur Erkennung von stehenden toten Bäumen untersucht. Im ersten Szenario werden lediglich CIR Luftbilder als Eingangsdaten benutzt und mit einem Level-Set-Segmentierungsverfahren mit Form- und Intensitäts-Apriori-Wissen verarbeitet. In einem zweiten Verfahren wird für die Erkennung stehender Stämme ohne Krone aus ALS-Punktwolken der Freie Form-Kontext als ein neuer 3D-Formdeskriptor eingeführt, der eine Verallgemeinerung von zylindrischen Form-Kontexten mit heterogener Struktur darstellt. Schließlich wird die Totholzerkennung mit ALS-Daten und Luftbildern behandelt. Die Punktwolke wird in Einzelbäume segmentiert, deren Umringe auf die Bildebene projiziert werden und somit eine Umgebung zur Ableitung spektraler Baummerkmale aus Pixelwerten bilden.

Die Methoden zur Erkennung von stehendem Totholz werden mittels aktivem und teilüberwachtem Lernen untersucht. Das logistische, mit Shannon-Entropie regularisierte Regressionsmodell wird zur Familie von Renyi-Entropien verallgemeinert. Des Weiteren wird eine Methode zur Verbindung des aktiven und teilüberwachten Lernens innerhalb eines Verfahrens basierend auf der Entropieminimierung von a posteriori Klassenwahrscheinlichkeiten als Erweiterung des Expected Error Reduction Algorithmus eingeführt.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass liegende Stämme bei moderater Abdeckung durch das Kronendach mit guter Genauigkeit aus ALS-Daten rekonstruiert werden können. Die Anwendung von CRFs führte zu einer beträchtlichen Qualitätssteigerung der Ergebnisse, während die gelernten Teile des CRFs und der spektralen Clusteranalyse gutes Verallgemeinerungsvermögen aufwiesen. Das eingeführte Verfahren zur Zylinderrekonstruktion zeigte bei TLS-Daten eine Verbesserung von bis zu 10 Prozentpunkten (pp) gegenüber Sample-Consensus-Methoden. Für beide Datenquellen (ALS und TLS) konnte eine Erkennungs-Sensitivität von über 75% bei einer Fehlerrate unter 20% erreicht werden. Die Nützlichkeit des infraroten Bildkanals bei Erkennung toter Vegetation wurde bestätigt, obwohl tote Bäume mit Bereichen offenen Bodens aufgrund ähnlicher Pixelfarben verwechselt werden können. Dieses Problem wurde mit der Einführung von 3D-Informationen im Datenfusionsszenario verringert. Der Freie Form-Kontext bietet ein Balance zwischen der Größe des Merkmalsraums und Unterscheidungsvermögen. Die Ergebnisse weisen auch darauf hin, dass das Kombinieren des aktiven und teilüberwachten Lernens für kleine Datensätze einen Mehrwert von bis zu 10 pp erbringt.