

Streszczenie

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było opracowanie alternatywnej metody określania miąższości drzew stojących na powierzchniach próbnych z wykorzystaniem technologii naziemnego skanowania laserowego (ang. Terrestrial Laser Scanning, TLS). Nowatorski element proponowanej metody związany jest z pominięciem wykorzystania informacji o wysokości drzew i znajomości przebiegu oraz kształtu górnych części pni. Element ten ma kluczowe znaczenie w przypadku stosowania naziemnych technik teledetekcyjnych ze względu na niepełne odwzorowanie górnych partii koron drzew przy zastosowaniu tych metod. W pracy przetestowano opracowane rozwiązanie zarówno na poziomie pojedynczych drzew, jak i na poziomie powierzchni próbnych.

W pierwszej części analiz opracowano modele regresyjne do określania całkowitej miąższości grubizny drzew wykorzystując wyłącznie informację o miąższości dolnej części pnia. Proces ten został wykonany na obszernym zbiorze danych zawierającym referencyjne pomiary sekcyjne oraz dane TLS pozyskane dla pojedynczych drzew. W ramach analiz zbadano wpływ wykorzystania części pionowego rozkładu miąższości pnia i dodania informacji gatunkowej na dokładność określania całkowitej miąższości drzew przy pomocy opracowanych modeli. Dokładność metody została określona na podstawie pomiarów miąższości z referencyjnych pomiarów sekcyjnych oraz porównana z tradycyjną metodą określania miąższości drzew stojących, która bazuje na wzorach allometrycznych wykorzystujących informację o pierśnicy, wysokości oraz gatunku drzew.

W drugiej części rozprawy, opracowane rozwiązanie zostało zaimplementowane na zbiorze danych obejmującym 100 powierzchni próbnych. Dla tego zbioru danych porównano wyniki określania zasobności drzewostanów pomiędzy zaproponowanym rozwiązaniem a metodą tradycyjną bazującą na wzorach allometrycznych. W ramach analiz zbadano wpływ wybranych zmiennych drzewostanowych na dokładność proponowanej metody. Przeanalizowano następujące czynniki: grupę gatunkową (podział drzewostanów na iglaste i liściaste) i stopień skomplikowania struktury drzewostanu (podział na drzewostany o strukturze prostej, umiarkowanej oraz złożonej). Dodatkowo uwzględniono aspekt, związany z technicznymi ograniczeniami wykorzystania technologii TLS na powierzchniach próbnych – dokładność detekcji drzew. Wymienione wyżej czynniki przytaczane są w publikacjach naukowych jako

kluczowe w kontekście wpływu na dokładność określania miąższości powierzchni próbnymi metodami TLS.

Wyniki uzyskane w trakcie badań wskazują, iż opracowana metoda charakteryzuje się zbliżonymi lub niższymi błędami określania miąższości drzew w porównaniu do metody tradycyjnej. Pierwiastek błędu średniokwadratowego dla zaproponowanej metody wynosi 11-12 % dla gatunków iglastych i 21-24 % dla gatunków liściastych na poziomie pojedynczego drzewa. W badaniach wskazano, iż znając miąższość pnia co najmniej do 8-10 metrów jego wysokości, możliwe jest określenie miąższości całego drzewa na zbliżonym poziomie do metody tradycyjnej, która wykorzystuje informację o wysokości drzew. Zwiększenie progu wysokości powoduje dalszą poprawę dokładności oszacowania miąższości drzew zaproponowaną metodą. Dodanie informacji gatunkowej do opracowanych modeli nieznacznie poprawia ich dokładność (ok. 2,5 %) wskazując na brak potrzeby wykorzystania tej informacji do określania miąższości drzew, jednakże analizując całość otrzymanych wyników zalecane jest dodanie informacji gatunkowej co najmniej na poziomie grupy gatunkowej (iglaste/liściaste).

Analizując wyniki uzyskane na wszystkich powierzchniach próbnymi nie wykazano statystycznie istotnych różnic pomiędzy porównywanymi metodami (wartości statystyki $p = 0,06-0,15$, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$). W pracy wykazano, iż opracowana metoda dostarcza niższych różnic dla drzewostanów iglastych - 3,5 % (11-13 m³/ha) niż dla drzewostanów liściastych - 15-17 % (61 - 70 m³/ha). Wśród czynników analizowanych na powierzchniach próbnymi, największy wpływ na dokładność metody miał czynnik technologiczny, czyli dokładność detekcji drzew. Wskazuje to na potrzebę zwiększenia liczby stanowisk pomiarowych TLS lub pozyskania danych inną techniką teledetekcji bliskiego zasięgu, która zapewni pełną detekcję drzew.

Kluczowym wnioskiem płynącym z niniejszej pracy jest stwierdzenie, iż możliwe jest określenie zasobności drzew za pomocą technologii TLS na poziomie powierzchni próbnej z dokładnością porównywalną do stosowanej aktualnie metody z założeniem detekcji wszystkich drzew oraz pomiaru ich pni do wysokości co najmniej 8-10 metrów.

Summary

The objective of this dissertation was to develop an alternative method for determining the volume of standing trees and sample plots using Terrestrial Laser Scanning (TLS) technology. The innovative aspect of the proposed method lies in the elimination of the use of tree height information and the knowledge of the shape and course of the upper parts of the trees. This element is crucial when using ground-based remote sensing techniques, since the upper crown parts of the trees are incompletely represented by these methods. The developed solution was tested in the study both at the level of individual trees and at the level of sample plots.

In the first part of the analyses, regression models were developed to determine the total merchantable volume of the trees, using only information on the volume of the lower part of the stems. This process was conducted using a large data set that included reference sectional measurements and TLS data for individual trees. Analyses examined the effect of using a portion of the vertical stem volume distribution and adding tree species information on the accuracy of determining total tree volume with the developed models. The accuracy of the method was determined using volume measurements from reference sectional measurements and compared to the conventional method for determining the volume of standing trees, which is based on allometric formulas with information on breast height diameter, height, and tree species.

In the second part of the thesis, the developed solution was implemented on a data set of sample plots and compared with the results of the conventional method. The analyses examined the influence of stand factors on the accuracy of the proposed method. The following factors were analysed: Species group (classification of stands into coniferous and deciduous) and complexity of stand structure (classification into simple, medium and complex stands). In addition, an aspect related to the technical limitations of using TLS technology on sample plots was considered - the accuracy of tree detection. The above factors are cited in scientific publications as crucial for their influence on the accuracy of TLS volume determination.

The results obtained in the study show that the developed method has similar or lower errors than the conventional method in determining tree volume. The root mean square error for the proposed method is 11-12% for coniferous species and 21-24% for deciduous species at the individual tree level. The study showed that by knowing the

volume of the stem up to a height of 8-10 metres, the volume of the whole tree can be determined at a similar level as the conventional method using tree height information. Increasing the height threshold further improves the accuracy of estimating tree volume with the proposed method. Adding species information to the developed models improves their accuracy slightly (about 2.5%), indicating that it is not necessary to use this information to determine tree volume. However, when analysing the overall results obtained, it is recommended to add the species information at least at the species group level (coniferous/deciduous).

The analysis of the results obtained on all sample plots showed no statistically significant differences between the compared methods (statistical values $p = 0.06-0.15$, with a significance level $\alpha = 0.05$). The work shows that the developed method has smaller differences - 3.5% (11-13 m³/ha) - for coniferous stands than for deciduous stands - 15-17% (61-70 m³/ha). Of the factors analysed in the sample plots, the technological factor, i.e. tree detection accuracy, had the greatest influence on the accuracy of the method. This suggests the need to increase the number of TLS survey points or to collect data using another close-range remote sensing technology that allows for complete tree detection.

An important conclusion of this work is that it is possible to determine tree volume using TLS technology at the sample plot level with comparable accuracy to the currently used method, provided that all trees are detected and their stems are measured to a height of at least 8-10 metres.