

## Streszczenie

Wizja komputerowa, obejmująca zarówno pozyskiwanie, jak i analizę obrazów, stanowi często pierwszy etap procesów percepcji i sterowania w robotyce oraz systemach wspomagania decyzji. Choć obrazy RGB w paśmie widzialnym pozostają najczęściej wykorzystywanym źródłem danych i korzystają z najbardziej rozwiniętych metod przetwarzania, obrazowanie wielospektralne może dostarczyć dodatkowych informacji wykraczających poza możliwości ludzkiego wzroku. W wielu zastosowaniach, w tym w rolnictwie i ochronie środowiska, te dodatkowe pasma spektralne zawierają cenne informacje, których nie da się uchwycić przy użyciu wyłącznie obrazów RGB, zwłaszcza w przypadku monitorowania stresu roślin.

Obrazowanie wielospektralne może wspierać szeroki zakres zastosowań rolniczych i środowiskowych, takich jak wykrywanie chorób, segmentacja roślin lub szacowanie parametrów gleby. Takie możliwości są szczególnie ważne w rolnictwie precyzyjnym, gdzie mogą przyczynić się do poprawy plonów, zmniejszenia zużycia nawozów i podejmowania bardziej świadomych decyzji.

Systemy wizyjne wykorzystywane w tych zastosowaniach działają w szerokim zakresie skal przestrzennych i platform, od satelitów obserwujących znaczne obszary Ziemi, poprzez bezzałogowe statki powietrzne obrazujące pojedyncze pola uprawne, aż po roboty rolnicze obserwujące pojedyncze rośliny. Niniejsza rozprawa omawia wyzwania związane z przetwarzaniem danych wielospektralnych pozyskanych z tak różnorodnych systemów. Wyzwania te obejmują zmienność środowiskową wynikającą z położenia geograficznego, klimatu, warunków pogodowych czy rodzaju upraw, a także charakterystykę spektralną i przestrzenną pozyskanych danych. Ponadto każda platforma obrazowania wiąże się z własnymi ograniczeniami i kompromisami, wymagając dedykowanych metod pozyskiwania oraz analizy danych. W rozprawie przeanalizowano również techniki uczenia maszynowego mające zastosowanie do danych wielospektralnych oraz zbadano, w jaki sposób mogą one pomagać w rozwiązywaniu wspomnianych problemów. Szczególną uwagę poświęcono postępom osiągniętym w analizie obrazów wielospektralnych w porównaniu z tradycyjnymi podejściami opartymi na RGB.

Badania obejmują opracowanie i ocenę metod uczenia maszynowego do zastosowań rolniczych i środowiskowych. Przeprowadzone eksperymenty z wykorzystaniem zarówno obrazów wielospektralnych, jak i RGB pokazują wpływ informacji wielospektralnej na skuteczność modeli, biorąc pod uwagę nie tylko skuteczność predykcji, ale także ograniczenia związane z wdrożeniem, szczególnie w systemach robotycznych o ograniczonych zasobach. Zbadano również, w jaki sposób dane wielospektralne mogą być wykorzystane do zmniejszenia nakładu pracy wymaganego do ręcznego adnotowania danych. Ponadto przedstawiono eksperymenty dotyczące wyjaśnialności modeli i selekcji pasm spektralnych, których celem było uproszczenie wdrażania i zwiększenie praktycznej użyteczności systemów wielospektralnych.

Ponieważ publicznie dostępne zbiory danych i oprogramowanie wolnoźródłowe mają kluczowe znaczenie dla odtwarzalności wyników i rozwoju nauki, rozprawa wnosi wkład nie tylko poprzez wykorzystanie istniejących zbiorów danych, ale także poprzez pozyskanie i opracowanie nowych zbiorów danych. Ponadto w ramach badań opracowano i udostępniono kilka narzędzi open source. Jedno z tych narzędzi wzbudziło znaczne zainteresowanie społeczności badawczej i pomogło spopularyzować techniki uczenia maszynowego wśród specjalistów z pokrewnych dyscyplin.

Podsumowując, rozprawa potwierdza zasadność połączenia obrazowania wielospektralnego z nowoczesnymi metodami uczenia maszynowego, w szczególności głębokiego uczenia, w zastosowaniach rolniczych i środowiskowych. Oprócz poprawy skuteczności predykcji, przedstawione badania podkreślają podejścia, które ułatwiają praktyczne wdrożenie w warunkach rzeczywistych ograniczeń sprzętowych.

# Abstract

Computer vision, encompassing both image acquisition and image analysis, is often the first stage of perception and control pipelines in robotics and decision-support systems. While RGB imagery in the visible spectrum remains the most commonly used data source and benefits from the most mature processing methods, multispectral imaging can provide additional information beyond human vision. In many applications, including agriculture and environmental protection, these additional spectral bands contain valuable information that cannot be captured using RGB imagery alone, particularly for plant stress monitoring.

Multispectral imaging can support a wide range of agricultural and environmental applications, such as disease detection, plant segmentation, or estimation of soil parameters. Such capabilities are particularly important in precision agriculture, where they can contribute to improved yields, reduced fertiliser usage, and more informed decision-making.

Relevant vision systems operate across a wide range of spatial scales and platforms, from Earth-observation satellites monitoring large regions of the planet, through unmanned aerial vehicles surveying individual fields, to agricultural robots observing individual plants. This thesis discusses the challenges associated with processing multispectral data acquired from such diverse systems. These challenges include environmental variability resulting from geographical location, climate, weather conditions, or crop type, as well as the spectral and spatial characteristics of the acquired data. Furthermore, each imaging platform introduces its own constraints and trade-offs, requiring dedicated approaches to data acquisition and analysis. The thesis further analyses machine learning techniques applicable to multispectral data and investigates how they can address the aforementioned challenges. Particular attention is given to the progress achieved in multispectral image analysis in comparison with traditional RGB-based approaches.

The research includes the development and evaluation of machine learning methods for agricultural and environmental applications. The conducted experiments, using both multispectral and RGB imagery, demonstrate the impact of multispectral information on model performance, considering not only predictive performance but also deployment-related constraints, particularly in resource-limited robotic systems. The research further investigates how multispectral data can be utilised to reduce the effort required for manual annotation. In addition, experiments on model explainability and spectral band selection are presented, aiming to simplify deployment and improve the practical applicability of multispectral systems.

As publicly available datasets and open-source software are essential for reproducibility and scientific progress, this thesis contributes not only through the use of existing datasets but also through the collection and curation of new datasets. Furthermore, several open-source tools were developed and released as part of the research. One of these tools has attracted interest from the research community and helped to popularise machine learning techniques among specialists from related disciplines.

Overall, this thesis demonstrates the value of combining multispectral imaging with modern machine learning methods, particularly deep learning, for agricultural and environmental applications. Beyond improving predictive performance, the presented research highlights approaches that facilitate practical deployment under real-world hardware constraints.