Wrocław University of Environmental and Life Sciences

Doctoral Thesis

Application of terrestrial laser scanning   
for the monitoring of changes in the   
mountain river bed

*Author* *Supervisors*

Agata Walicka Prof. dr hab. inż. Andrzej Borkowski†

Dr hab. inż. Grzegorz Jóźków

*Co-supervisor*

Prof. Dr Norbert Pfeifer

*A thesis submitted in the fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy   
at the*

Institute of Geodesy and Geoinformatics

The Faculty of Environmental Engineering and Geodesy

March 23, 2022

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

# Abstract

The study of sediment transport is a vital part of hydrological and geomorphological investigations, because of its high impact on river bed morphology and flow characteristics. The channel changes that are caused by movement of coarse fractions might endanger human activities and destroy the neighboring infrastructure.

Traditionally, sediment transport is investigated using sediment traps, acoustic sensors, tracers, and bedload transport equations. However, these methods do not provide full information about sediment transport since they do not enable measurement of long-term movements of individual grains. Moreover, the measurements are time-consuming and require direct contact with the river bed, which leads to disturbance in the natural morphological and hydrological conditions. Recently, the remote sensing techniques, such as terrestrial laser scanning, are also utilized for sediment transport monitoring. Usually, the data is acquired during two measurement campaigns. In the next step, for each measurement campaign, a digital elevation model (DEM) is calculated. Then, the DEMs are subtracted to acquire a DEM of differences. This product is then used to depict accumulation and erosion zones and to calculate total mass of transported rock material. A great advantage of this approach is relatively short time that needs to be spend for preparing and performing measurements. What is more, there is no need of direct contact with the river bed. As a result, the natural hydrological and geomorphological conditions of the river are preserved. However, similarly to the traditional techniques, the application of DEMs do not enable monitoring of horizontal movements of individual grains. Information about such movements can be supplied by direct analysis of 3D point clouds. However, the manual analysis of point clouds is time-consuming and prone to identification errors.

Therefore, the purpose of this research was to investigate the possibility to use terrestrial laser scanning for the sediment transport investigation and to develop an automatic method that enables determination of movement parameters of individual grains (translation and rotation). This thesis presents the results of the investigations performed in the framework of three work packages: (1) analysis of the possibilities to use terrestrial laser scanning for monitoring of movements of individual grains, determination of manual measurement accuracy and investigation of the possibility to reduce the amount of manual work that needs to be performed, (2) development and evaluation of the automatic algorithm for segmentation of individual grains, (3) development and evaluation of the algorithm for recognition of corresponding grains in multi-temporal point cloud and calculation of the movement parameters for each grain. The experiments performed in this thesis were based on real-world data set representing Łomniczka mountain river bed. The data was collected each year between 2011 and 2016. Mountain rivers are challenging research objects due to the complex topography around the river, the presence of a large number of grains of various sizes, and steep slope of a river bed. These issues prevent the placement of scanner stations in an appropriate locations that allow to collect optimal point cloud for further analysis. The consequence of these problems are large-scale shadows, which lead to difficulties during automatic processing of point clouds. Thus, the developed algorithms had to be robust to shadows present in the point cloud.

In the first work package, a manual approach for the measurement of individual grain displacementss was proposed. The method aimed at limitation of search area to the regions where changes occurred. Two methods for change detection were tested: subtraction of DEMs and subtraction of point clouds. The proposed approach was applied to manually detect movements of individual grains between six measurement campaigns. The accuracy of manual measurement was evaluated based on photogrammetric measurements performed on synthetic data set. The experiments revealed that application of point clouds for change detection provided more concise results than DEM-based approach. The manual analysis of individual grain displacements showed that most of the movements happened in the period of 2012-2013 and 2013-2014. The manual analysis of the point clouds showed that it was possible to recognize the corresponding grains if their size was larger than about 10 cm. The experiments performed using synthetic data set revealed that the manual accuracy of displacement measurement was ca. 4 cm.

In the second work package, the automatic method for individual grain segmentation was proposed. The method was implemented as a classification followed by segmentation approach. The classification was performed based on geometric features using Random Forest algorithm together with custom feature selection strategy. Whereas for the segmentation, a DBSCAN clustering algorithm was used. These two main steps were supported by the preprocessing, post processing and rejection stages. The proposed method was developed and evaluated based on four data sets. The performed experiments showed that the proposed classification framework enabled to achieve the overall accuracy of up to 95%, depending on the test site. The proposed instance segmentation method enabled correct delineation of 67%-88% of individual grains. The resulting point cloud representing individual grains was characterized by ca. 88% point-based completeness.

In the last work package, the method for recognizing corresponding grains in the multi-temporal point clouds and calculation of displacement parameters for each of them was developed. The method was based on Iterative Closest Point (ICP) algorithm. The initial transformation parameters for the ICP algorithm were supplied by key points detection and matching procedure. The key points were selected as a local maximum of Gaussian curvature and were matched by a specifically designed set of geometric features. The matching procedure was performed using RANSAC algorithm. Moreover, the minimum movement that can be detected for the acquired data was estimated. The performed experiments revealed that there was a systematic shift of ca. 1.3 cm between the data sets. The analysis showed that this shift was caused by georeferencing inaccuracy rather than small movement of individual grains along the water course. Moreover, the investigation showed that the minimal displacement possible to detect is equal to about 2 cm. The experiments showed that the proposed method enables to correctly match 85% of the grains under consideration. The analysis of the results revealed that after the matching procedure, there was no shift present in the data. As a result, it was possible to state that the Gaussian curvature is a useful feature for key point detection performed for objects characterized by oblong and rounded shape.

To sum up, in this thesis the possibility of using TLS data for analysis of movement of individual grains was investigated and the method for automatic measurement of displacement of individual grains was developed, implemented and validated. The numerical experiments confirm that the method enables to achieve results of high accuracy.

Keywords: terrestrial laser scanning, sediment transport, Iterative closest point algorithm, point cloud classification, Random Forest, DBSCAN

# Streszczenie

Ze względu na znaczący wpływ na morfologię dna rzeki i charakterystykę przepływu, transport sedymentów rzecznych jest istotnym aspektem badań hydrologicznych i geomorfologicznych. Zmiany kanału rzecznego powodowane przez ruch frakcji gruboziarnistych mogą zagrażać działalności człowieka oraz prowadzić do zniszczenia pobliskiej infrastruktury.

Zwyczajowo, transport sedymentów jest badany z wykorzystaniem pułapek sedymentacyjnych, sensorów akustycznych, znaczników i równań przepływu. Jednakże, metody te nie pozwalają na uzyskanie pełnej informacji o tym zjawisku, ponieważ nie pozwalają na długoterminową analizę ruchów poziomych pojedynczych ziaren. Co więcej, pomiary te są czasochłonne i wymagają bezpośredniego kontaktu z dnem rzeki, co prowadzi do zaburzenia naturalnych warunków morfologicznych i hydrologicznych rzeki. W ostatnim czasie, do monitorowania transportu sedymentów, wykorzystuje się również techniki teledetekcyjne, takie jak naziemny skaning laserowy. Zwykle dane pozyskiwane są podczas dwóch kampanii pomiarowych. W kolejnych krokach, dla danych pozyskanych podczas obu kampanii pomiarowych, obliczane są numeryczne modele pokrycia terenu (NMPT). Następnie, NMPT są odejmowane od siebie w celu uzyskania modelu różnicowego. Ten produkt jest wykorzystywany do wykrycia stref akumulacji i erozji oraz do obliczenia całkowitej objętości przetransportowanego materiału skalnego. Dużą zaletą tego podejścia jest stosunkowo niewielki nakład czasu niezbędny do przygotowania i przeprowadzenia pomiarów. Co więcej, bezpośredni kontakt z dnem rzeki nie jest wymagany, dzięki czemu zachowane zostają naturalne warunki hydrologiczne i geomorfologiczne rzeki. Jednakże, podobnie jak w przypadku metod tradycyjnych, zastosowanie różnicowych modeli, nie pozwala na monitorowanie przemieszczeń pojedynczych ziaren. Takie informacje mogą być dostarczone przy pomocy bezpośredniej analizy trójwymiarowych chmur punktów. Manualna analiza chmur punktów jest jednak czasochłonna i podatna na błędy identyfikacyjne.

W związku z tym, celem tej dysertacji było zbadanie możliwości wykorzystania naziemnego skaningu laserowego do monitorowania transportu sedymentacyjnego oraz opracowanie automatycznej metody pozwalającej na wyznaczenie parametrów przemieszczeń pojedynczych ziaren (parametry translacji i rotacji). W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych w ramach trzech aspektów badawczych, tj.: (1) analiza możliwości wykorzystania naziemnego skaningu laserowego do monitorowania przemieszczeń pojedynczych ziaren, wyznaczenie dokładności analizy manualnej i badania dotyczące możliwości redukcji ilości pracy manualnej jaka musi być wykonana w celu wyznaczenia przemieszczeń, (2) opracowanie i przetestowanie automatycznego algorytmu pozwalającego na segmentację pojedynczych instancji ziaren, (3) opracowanie i przetestowanie metody pozwalającej na rozpoznanie odpowiadających sobie ziaren w wieloczasowych chmurach punktów oraz obliczenie parametrów przemieszczenia dla poszczególnych ziaren. W każdym z etapów eksperymenty były przeprowadzone na danych rzeczywistych reprezentujących rzekę górską – Łomniczkę. Dane były pozyskiwane co roku w latach 2011-2016. Rzeki górskie stanowią wymagające obiekty badawcze ze względu skomplikowane ukształtowanie terenu wokół rzeki, obecność dużej liczby ziaren o różnej wielkości oraz strome nachylenie koryta rzeki. Problemy te uniemożliwiają umieszczenie skanera w odpowiednich lokalizacjach pozwalających na zebranie optymalnej chmury punktów do dalszej analizy. Konsekwencją tych problemów są rozległe cienie, które prowadzą do trudności podczas automatycznego przetwarzania chmur punktów. Dlatego algorytmy opracowane w niniejszej dysertacji muszą być odporne na występowanie cieni w przetwarzanych chmurach punktów.

W ramach pierwszego aspektu badawczego opracowano podejście pozwalające na manualne wyznaczenie przemieszczeń pojedynczych ziaren. Celem opracowanej metody było ograniczenie obszarów przeszukiwania do obszarów, które podlegały zmianom pomiędzy kampaniami pomiarowymi. Przetestowano dwie metody wykrycia zmian: różnicowanie NMPT oraz różnicowania chmur punktów. Podejście to zostało następnie wykorzystane do manualnego wyznaczenia przemieszczeń pomiędzy sześcioma kampaniami pomiarowymi. Dokładność manualnych pomiarów została oszacowana z wykorzystaniem pomiarów fotogrametrycznych dla danych syntetycznych. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne wykazały, że wyniki otrzymane na podstawie różnicowania chmur punktów były bardziej spójne niż w przypadku wykorzystania różnicowych modeli pokrycia terenu. W wyniku manualnej analizy przemieszczeń pojedynczych ziaren stwierdzono, że większość przemieszczeń wystąpiła w latach 2012-2013 i 2013-2014 a rozpoznanie odpowiadających sobie ziaren było możliwe, gdy ich rozmiar był większy niż ok. 10 cm. Eksperymenty numeryczne wykonane na danych syntetycznych wykazały, że dokładność manualnego pomiaru przemieszczeń wynosi ok. 4 cm.

W ramach drugiego obszaru badawczego, opracowano automatyczną metodę pozwalającą na segmentację pojedynczych ziaren. Zaimplementowana metoda to segmentacja poprzedzona klasyfikacją. Klasyfikację wykonano z użyciem algorytmu Random Forest i oparto na cechach geometrycznych, które zostały dobrane z użyciem niestandardowej metody selekcji cech. Do segmentacji natomiast wykorzystano algorytm klasteryzacji – DBSCAN. Te dwa główne kroki przetwarzania zostały wsparte przez etapy preprocessingu, postprocessingu i odrzucenia. Zaproponowana metoda została opracowana i przetestowana na podstawie czterech zestawów danych. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne pokazały, że zaproponowana metoda klasyfikacji wraz z selekcją cech pozwoliła na otrzymanie całkowitej dokładności do 95%, w zależności od obszaru testowego. Zaproponowana metoda segmentacji natomiast pozwoliła na prawidłową segmentację 67%-88% pojedynczych ziaren. Wynikowa chmura punktów charakteryzowała się kompletnością ok. 88%.

W ramach trzeciego obszaru badawczego, opracowano metodę pozwalającą na automatyczne rozpoznanie odpowiadających sobie ziaren w wieloczasowych chmurach punktów oraz na obliczenie parametrów przemieszczenia dla każdego z nich. Metodę oparto na algorytmie Iterative Closest Point (ICP). Początkowe parametry transformacji niezbędne do prawidłowego działania algorytmu ICP zostały obliczone z wykorzystaniem procedury wykrycia i połączenia odpowiadających sobie punktów charakterystycznych. Punkty charakterystyczne zostały zidentyfikowane na podstawie lokalnych maksimów krzywizny Gaussa i opisane poprzez wartości specjalnie zaprojektowanego zestawu cech geometrycznych. Procedura połączenia odpowiadających sobie punktów charakterystycznych została oparta na algorytmie RANSAC.   
W ramach tego obszaru badawczego wyestymowano również minimalne przemieszczenie jakie może zostać wykryte podczas analizy posiadanych danych. Po przeprowadzeniu eksperymentów numerycznych okazało się, że w testowych chmurach punktów występuje systematyczne przesunięcie o ok. 1.3 cm pomiędzy danymi pozyskanymi w różnych kampaniach pomiarowych. Analiza wykrytych przemieszczeń pokazała, że przesunięcie to nie jest spowodowane powolnym przesuwaniem się pojedynczych ziaren wraz z nurtem rzeki, a wynika z niedokładności georeferencji. Oszacowano również minimalne możliwe do wykrycia przesunięcie wynoszące ok. 2 cm. Przeprowadzone eksperymenty pokazały również, że z pomocą opracowanej metody możliwe jest prawidłowe rozpoznanie odpowiadających sobie ziaren z dokładnością 85%. Analiza wyników wykazała również, że po zastosowaniu opracowanej metody nie obserwuje się występowania wcześniej zaobserwowanego przesunięcia. W związku z tym, stwierdzono, że krzywizna Gaussa jest użyteczną cechą pozwalającą na wykrycie punktów charakterystycznych, zwłaszcza na powierzchni obiektów o podłużnym i zaokrąglonym kształcie.

Podsumowując, w niniejszej dysertacji przebadano możliwość zastosowania danych naziemnego skaningu laserowego do wykonania analizy przemieszczeń poszczególnych ziaren na dnie rzeki oraz opracowano, zaimplementowano i przetestowano metodę pozwalającą na automatyczny pomiar przemieszczenia pojedynczych ziaren. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne potwierdziły wysoką dokładność opracowanej metody.

Słowa kluczowe: naziemny skaning laserowy, transport sedymentacyjny, algorytm Iterative closest point, klasyfikacja chmur punktów, Random Forest, DBSCAN