

**Autor:** Maria Elżbieta Kowalska  
**Tytuł:** Opracowanie metodyki przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich

Stron	178
Rysunków	109
Tabel	16
Pozycji bibliograficznych	75
Dodatków	0
Załączników	12

**Słowa kluczowe:** naziemny skaningu laserowy, pomiary kontrolne obiektów inżynierskich, obiekty betonowe, porównywania chmur punktów TLS

We współczesnym świecie kluczowe znaczenie przypisuje się bezpieczeństwu. Pomiary kontrolne obiektów inżynierskich wpisują się w ten trend dostarczając precyzyjnej, geometrycznej, informacji o stanie obiektu. Ze względu na swój charakter mogą one stanowić element składowy monitoringu strukturalnego stanu obiektu (ang. Structural Health Monitoring, SHM), który ma na celu kompleksowe zapewnienie bezpieczeństwa obiektu zarówno w aspekcie geometrycznym, jak i fizycznym. W ostatniej dekadzie do powszechnie wykorzystywanych w geodezji inżynierskiej metod pomiarowych dołączył naziemny skaningu laserowy (ang. Terrestrial Laser Scanning, TLS), który dostarcza quasi-ciągłej informacji o geometrii obiektu w postaci trójwymiarowej chmury punktów (współrzędne X, Y, Z) uzupełnionej informacją o intensywności odbicia wiązki laserowej w poszczególnych punktach.

Możliwości zastosowania danych przestrzennych w postaci chmur punktów TLS są bardzo szerokie, ale ich właściwe wykorzystanie wymaga znajomości szerokiej gamy czynników wpływających na jakość danych oraz sposobów odpowiedniego ich przetworzenia. W niniejszej pracy skoncentrowano się na wykorzystaniu naziemnego skanowania laserowego w pomiarach betonowych obiektów inżynierskich.

W ramach badań przeprowadzonych w trakcie przygotowywania niniejszej rozprawy przeanalizowano czynniki, których wpływ uznano za istotny w kontekście przedmiotu pracy. Podzielono je ze względu na wpływ związany z: parametrami technicznymi instrumentu, kątem padania wiązki laserowej, odległością od skanowanej powierzchni, właściwościami fizycznymi obiektu, tj. barwą, chropowatością, wilgotnością i refleksyjnością powierzchni, oraz warunkami atmosferycznymi. Dla każdej grupy czynników przeprowadzono badania literaturowe oraz badania własne w tym prace eksperymentalne.

W celu wykonania analiz wpływu rozkładu kąta padania wiązki laserowej oraz odległości punktów od instrumentu na jakość rejestrowanych danych, niezbędne było opracowanie własnych algorytmów w oprogramowaniu Matlab. Autorskie rozwiązania pozwalają nie tylko na wizualizację rozkładu analizowanych wielkości, ale również na selekcje punktów spełniających zdefiniowane przedziały wartości.

W rozprawie przeanalizowano ogólne zasady pozyskiwania oraz przetwarzania danych TLS w pomiarach kontrolnych. Przedstawiono stosowane metody orientacji chmur punktów oraz algorytmy wykorzystywane do ich filtracji i wyznaczania wzajemnej odległości chmur punktów. Przeprowadzono szereg eksperymentów z wykorzystaniem różnych powierzchni betonowych, które ukazały znaczenie właściwego doboru algorytmów filtracji oraz ich parametrów. W pracy przedstawiono też wady i zalety metod wyznaczania odległości pomiędzy

chmurami punktów oraz wykonano ich jakościową ocenę, która wskazała jako najwiarygodniejszy algorytm Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2).

Pozyskanie danych TLS cechujących się odpowiednią jakością jest istotne zarówno w kwestii spełnienia kryterium dokładności opracowania produktu końcowego, jak i porównywania danych z kolejnych cykli pomiarowych. Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano klasy obszarów jednorodnych zdefiniowane w podziale na oczekiwaną dokładność odwzorowania powierzchni.

Przygotowano kompleksową autorską metodykę wykorzystania danych z naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich. Obejmuje ona wszystkie etapy począwszy od pozyskiwania do ostatecznego przetworzenia danych TLS. Metodyka została opracowana w podziale na trzy grupy, dla których parametry wykonywania pomiaru są zależne od oczekiwanej dokładności opracowania końcowego.

W celu weryfikacji zaproponowanej metodyki, pozyskano oraz przetworzono chmury punktów fragmentu ściany szczelinowej obiektu Mennica Legacy Tower. Dane zostały pozyskane w dwóch cyklach pomiarowych, z dwumiesięcznym odstępem czasu. Chmury punktów ograniczono zgodnie z zaproponowanymi klasami obszarów jednorodnych, a następnie wyznaczono różnice ich odległości algorytmem M3C2. Porównano wyniki wyznaczenia różnic odległości na podstawie chmur punktów przetworzonych zgodnie z zaproponowaną metodyką oraz chmur punktów poddanych tylko filtracji. Wykonane porównanie pokazało, że nieprzetworzone właściwie dane TLS mogą wskazać niewystępujące na obiekcie zmiany. Jest to efekt wykorzystania do analizy danych pozyskanych pod zbyt dużym kątem padania wiązki laserowej, ze zbyt dużej odległości oraz z niewłaściwą gęstością. W celu niezależnej weryfikacji metodyki, otrzymane wyniki skonfrontowano z prognozowanym zachowaniem obiektu. Stwierdzono zgodność wielkości wyznaczonych i przewidywanych zmian, co potwierdza poprawność wykonanego opracowania. Dodatkowo przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania do określenia zmian geometrycznych obiektu danych archiwalnych pozyskanych dla zapory wodnej w Rożnowie. Przeprowadzona analiza potwierdziła konieczność właściwego przetworzenia danych w celu uzyskania wiarygodnych wyników.

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań możliwe było sformułowanie tezy zakładającej, że wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w pomiarach kontrolnych obiektów inżynierskich, wymaga opracowania odpowiedniej metodyki pozyskiwania i przetwarzania danych TLS obejmującej projektowanie sieci stanowisk instrumentu z uwzględnieniem wpływu czynników geometrycznych oraz właściwości fizycznych mierzonej powierzchni, a także wykorzystania dobranych do zadania algorytmów przetwarzania i porównywania chmur punktów. Właściwy sposób analizy wyników pomiarów kontrolnych umożliwia uzyskanie wiarygodnych informacji o zachodzących na obiekcie zmianach geometrycznych.

PRZEWODNICZĄCY  
RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY  
INŻYNIERIA LĄDOWA / TRANSPORT  
  
dr hab. inż. Konrad Lewczuk, prof. uczelni