

# Współczesna technologia skanowania laserowego 3D

## w monitorowaniu przemieszczeń i deformacji obiektów mostowych

**Krzysztof Karsznia**  
Katedra Inżynierii Budowlanej  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
SGGW

**Do prawidłowej oceny stanu obiektu inżynierskiego stosuje się w coraz szerszym stopniu różne techniki pozyskiwania danych, które podlegają następnie integracji. Obecny stan technologii informatycznych oraz możliwości, które oferuje nam współczesna metrologia, geodezja czy inżynieria budowlana, bez wątpienia kształtują nowy sposób rozumienia tematyki monitoringu badanych obiektów.**

**B**ezpieczeństwo infrastruktury drogowej i mostowej zależy od wielu czynników, takich jak stan techniczny, niezawodność użytkowania czy odpowiednia eksploatacja. Problematyka oceny poziomu bezpieczeństwa wiąże się bezpośrednio z zarządzaniem ryzykiem, a pośrednio – z zarządzaniem jakością. W przypadku ryzyka mówimy także o wielu aspektach z dziedzin życia społecznego i ekonomicznego. Pojęcie to ma charakter interdyscyplinarny, natomiast dziedzina zarządzania ryzykiem (z ang. *risk management*) stanowi obecnie jedną z dynamicznie rozwijających się dziedzin naukowych (3).

Badania nad tym zagadnieniem bazują na wielu źródłach informacji. O tym, że monitoring jest czymś więcej niż tylko zestawem pojedynczych informacji (obserwacji), pisano już wielokrotnie na łamach różnych czasopism – np. (7), (11), a także w „Mostach” (5), (6). Temat ten został również wyczerpująco opisany w opracowaniu branżowym Instytutu Techniki Budowlanej (2), a podana tam przez profesora Piotra Witakowskiego definicja pojęcia „monitoring” w sposób trafny i precyzyjny klasyfikuje zadania pomiarowe w aspekcie faktycznego monitorowania oraz standardowej kontroli okresowej.

W myśl wspomnianych wytycznych Instytutu Techniki Budowlanej monitoring nie jest samą tylko obserwacją, aczkolwiek w skład systemu monitoringu wchodzi obserwacja. Jak podaje autor definicji: „Monitoring (od łac. *monitor* – przypominający, ostrzegający) jest to działalność mająca na celu wykrywanie zagrożeń. Co za tym idzie, niezbędne przy monitoringu jest wcześniejsze ustalenie rodzaju zagrożenia – określenie warunku monitoringu – i dostosowania systemu monitorowania do tego zagrożenia oraz ustalenie sposobu informowania o zagrożeniu”. Widzimy zatem, że kluczowym elementem jest tutaj zidentyfikowanie sytuacji niebezpiecznej, zanim poznamy jej symptomy, a nie inwentaryzacja jej zaistniałych skutków.

Informowanie o zagrożeniu musi nastąpić na tyle wcześnie, by odpowiednie służby odpowiedzialne za utrzymanie badanej infrastruktury mogły podjąć odpowiednie kroki zaradcze lub też w odpowiednim czasie poinformować osoby znajdujące się w obszarze zagrożenia. Dodać należy, iż uchwyczone na podstawie pomiaru wielkości muszą zostać odpowiednio sklasyfikowane i skonfrontowane z modelem tak, by w sposób należyty ocenić ryzyko. Dane o obiektach pochodzący mogą, rzecz jasna, z różnych źródeł, o różnej częstotliwości „próbkowania”. W przypadku mostów możemy mieć do czynienia ze specjalistycznymi systemami. W pracy (10) autorzy opisali wyniki badań obciążeniowych mostu

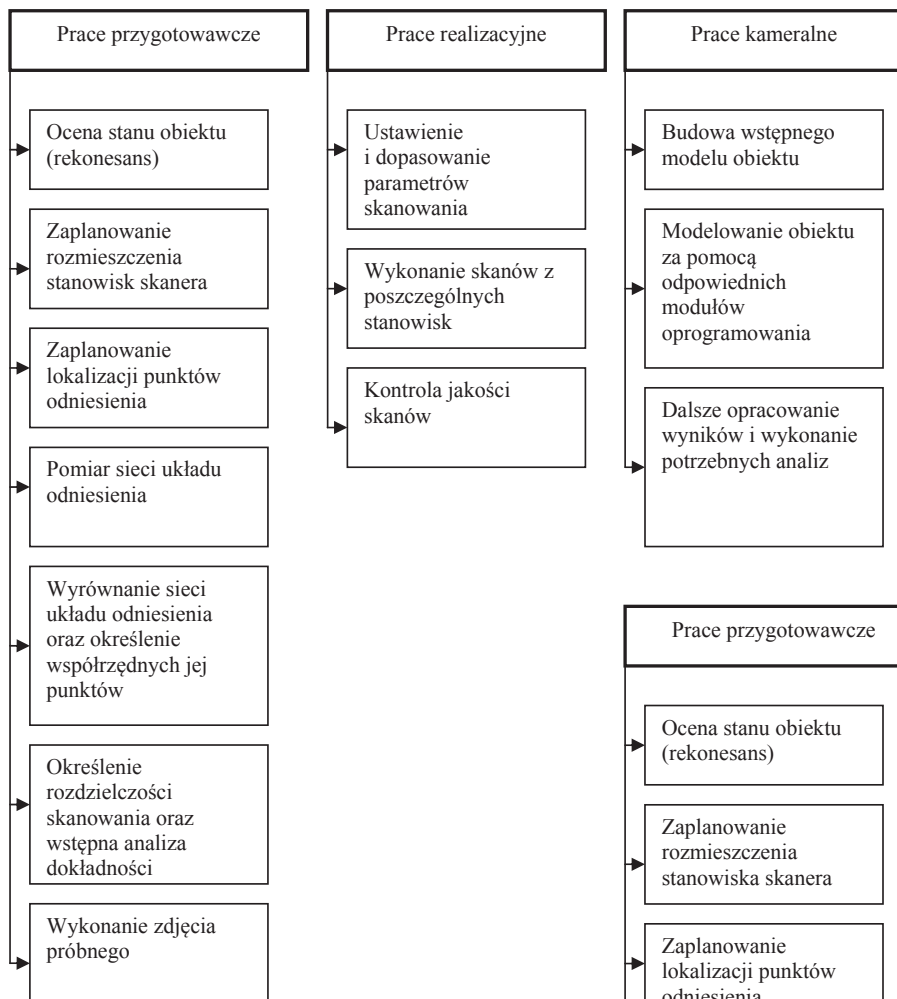


Fot. 1. Most Łazienkowski w Warszawie (fot. K. Karsznia)

drogowego z wykorzystaniem indukcyjnych czujników przemieszczeń, a także instrumentarium geodezyjnego (zautomatyzowany tachimetr elektroniczny oraz precyzyjny niwelator kodowy z zestawem łąt inwarowych). Inne opracowanie (1) przedstawia natomiast opracowaną przez specjalistów z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie technologię (system autorski) służącą do badania dynamiki konstrukcji mostowych z wykorzystaniem satelitarnych technik pozycjonowania w połączeniu z analizami fizycznymi. Otrzymane wartości ugięć zaprezentowano w postaci szeregu czasowego, którego przebieg autorzy porównali z modelem teoretycznym, uzyskując zbieżność potwierdzającą praktyczną użyteczność opracowanej technologii. Fakt występowania wielu różnych czynników wpływających na zachowanie się konstrukcji mostowych został wyczerpująco opisany w monografii (12).

Oprócz czynników wpływających na zachowanie się obiektów czy też warunkujących realizację pomiaru autor wnikliwie przeanalizował problematykę deformacji podłoża. Przedstawił między innymi kwestię uszkodzeń mostów wywoływanych przez takie deformacje oraz zaproponował metodykę monitoringu polegającą na powiązaniu wyników pomiarów z systemami zarządzania mostami. Przedstawił doświadczenia uzyskane na wielu obiektach w kraju. Ta bogata weryfikacja praktyczna potwierdza zasadność integracji wyników pomiarów oraz uzmysławia, jak ważnym problemem jest interoperacyjność systemowa, czyli możliwość współpracy między systemami bez utraty informacji.

Od kilku lat obserwujemy dynamiczny rozwój technologii przestrzennego skanowania laserowego. Obecnie stanowi ono istotny element pozyskiwania danych w geodezji oraz w dziedzinach pokrewnych. Osoby za-

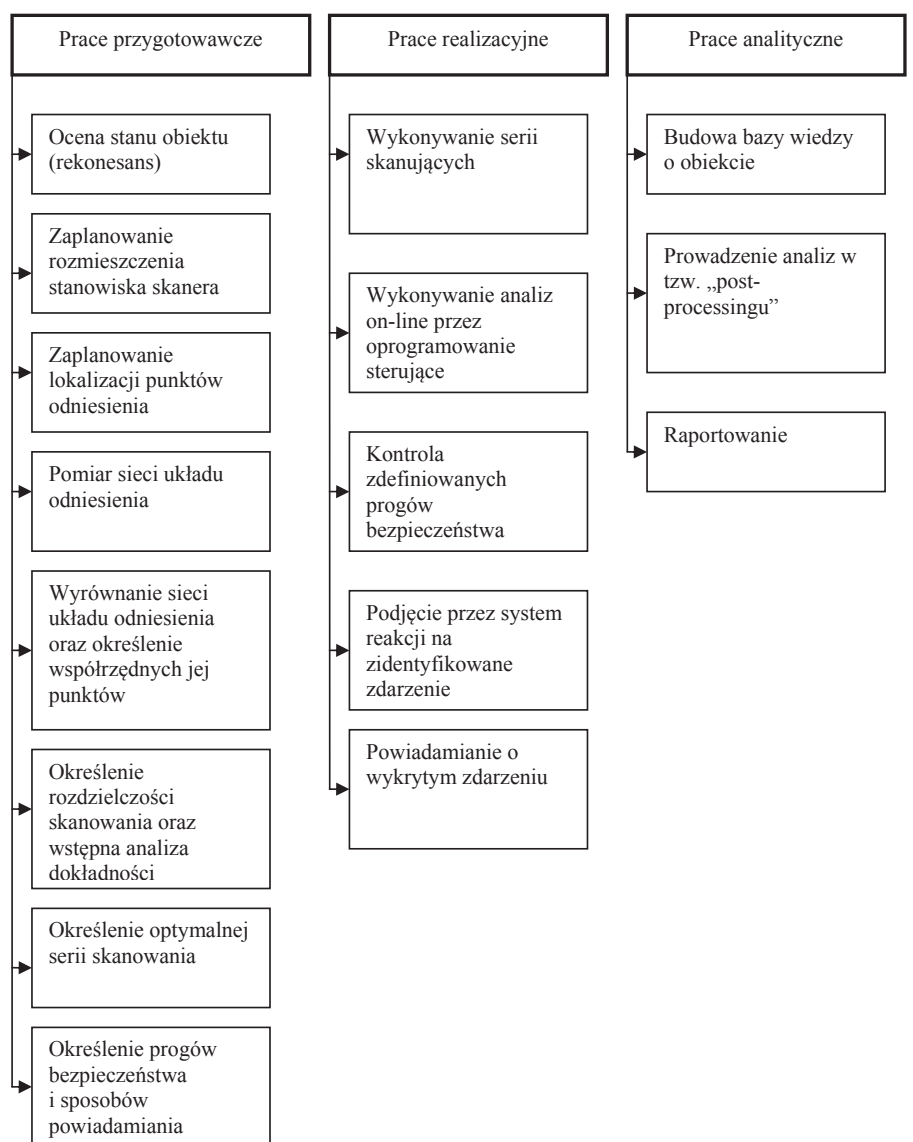


Rys. 1 Przykładowa struktura podziału pracy w projekcie skanowania laserowego (oprac. własne)

interesowane tą technologią mogą korzystać z bardzo bogatych zasobów literatury, jak również konfrontować swoje doświadczenia w gronie specjalistów. Badania nad rozwojem instrumentarium oraz osiągnięcia fizyki, elektroniki czy optyki wnoszą coraz nowsze rozwiązania technologiczne do praktyki, oznaczające stały wzrost wydajności i – co najważniejsze – dokładności wykonywanych pomiarów (8). W świecie geoinformacji skanery 3D stały się urządzeniami popularnymi i produkowanymi na skalę masową. Oferują – w zależności od typu i przeznaczenia – pozyskiwanie od kilkunastu tysięcy do nawet kilku milionów punktów na sekundę, z nawet kilkumilimetrową dokładnością, odwzorowując tym samym rzeczywistość w sposób niezwykle wierny. Znane są również rozwiązania pozwalające skanować obiekty z dokładnościami rzędu  $\pm 1-2$  mm (np. <http://www.mantis-vision.com>), jednakże w takim przypadku istotną rolę odgrywa głównie zasięg, ograniczony do kilku metrów.

Inne rozwiązania stosowane powszechnie w geodezji, architekturze czy budownictwie dają możliwość budowania modeli obiektów z dokładnością 4-10 mm. Oferta handlowa dotycząca skanerów laserowych jest bardzo bogata, a liczba ich producentów stale rośnie (zainteresowanym polecam liczne portale internetowe, w tym [www.geoforum.pl](http://www.geoforum.pl) czy <http://www.laserowy-skaning.pl>).

Niemniej jednak wykorzystanie skanerów laserowych w monitoringu obiektów inżynierskich – rozumianym w myśl przytoczonej wcześniej definicji – było do niedawna nieco utrudnione. Z racji swej wydajności urządzenia te doskonale sprawdzały się podczas prac inwentaryzacyjnych i dokumentacyjnych oraz w realizacji pomiarów kontrolnych. Prowadzenie monitoringu



Rys. 2 Struktura podziału pracy w projekcie monitoringu obiektu inżynierskiego (oprac. własne)

ciągłego wymaga jednakże automatyzacji – pomiary wykonywane są sekwencyjnie w seriach z określonym interwałem. Skanowanie obiektów w sposób klasyczny odbywa się na ogół według procedury przedstawionej na rys. 1.

Jak łatwo spostrzec, proces skanowania obiektu poprzedzony jest wieloma czynnościami przygotowawczymi, które są czasochłonne i wymagają pewnego doświadczenia w realizacji podobnych prac. Ewentualne błędy popełnione na tym etapie skutkować będą osiągnięciem nieplanowanych efektów. Mogą też

## Piśmiennictwo

1. Figurski M., Chmielewski R., Kroszczyński K., Kamiński P., Gałuszkiewicz M., Wrona M.: *Wykorzystanie techniki satelitarnej GPS do badania konstrukcji mostowych*. „Geodeta – Magazyn Geoinformacyjny”, nr 12 (151), 2007, s. 31-35.
2. Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie (2009): *Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych*. System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, nr 443/2009.
3. Józwicki R.: *Technika laserowa i jej zastosowania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
4. Kaczmarek T.T.: *Zarządzanie ryzykiem, ujęcie interdyscyplinarne*. Wydawnictwo Difin SA, Warszawa 2010.
5. Karsznia K.: *Monitoring mostów – zastosowanie serwisów internetowych*. „Mosty”, nr 6/2012, s. 20-23.
6. Karsznia K.: *Geodezyjny monitoring obiektów mostowych*. „Mosty”, nr 6/2011, s. 36-43.
7. Karsznia K.: *Monitoring obiektów inżynierskich i zarządzanie jakością w geomatyce. System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Bezprzewodowe zarządzanie procesem budowlanym*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2011, s. 82-95.
8. Leica MS50/TS50/TM50 – Instrukcja obsługi.
9. Leica GeoMoS 6.0 – elektroniczny podręcznik użytkownika, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Szwajcaria.
10. Olszek P., Łagoda M.: *Próbne obciążenie mostu sposobem na uniknięcie awarii*. „Materiały Budowlane”, 10, 2011, (470).
11. Plichta A., Wyczałek I.: *Inżynierskie zastosowania geodezji*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
12. Salamak M.: *Obiekty mostowe na terenach z deformującym się podłożem w świetle kinematyki brył*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.



Fot. 2. Tachimetr skanujący wysokiej wydajności MS50 serii „Nova” (fot. K. Karsznia)

► przyczynić się do zupełnego fiaska całego projektu. Sama czynność skanowania z użyciem instrumentu jest zatem pochodną procesu przygotowawczego, a czas jej trwania zależy od przyjętej rozdzielczości i liczby stanowisk. Pozyskane chmury punktów odwzorowujących obiekt należy następnie odpowiednio opracować, modelując je za pomocą specjalistycznego oprogramowania. Ta czynność jest najbardziej czasochłonna i uzależniona od doświadczenia wykonawcy. W tym przypadku ewentualne błędy spowodują zafalszowanie obrazu skanowanego obiektu i uniemożliwią przeprowadzenie prawidłowych analiz.

Jak już wspomniano, monitoring polega na zdefiniowaniu zagrożeń, doborze odpowiedniej technologii oraz takim skonfigurowaniu systemu, by informował o zaistniałych zagrożeniach, zanim te przerodzą się w sytuacje niebezpieczne czy wręcz katastrofy. Łatwo więc wywnioskować, że przedstawiony na rys. 1 schemat nie spełnia wymogów szybkiego i efektywnego reagowania na występujące zdarzenia – np. zmianę trendu osiadań czy wykrytych przemieszczeń. Aby zatem monitoring obiektu inżynierskiego z użyciem skanerów laserowych miał sens, należałoby postąpić według innej, nieco zmodyfikowanej procedury (rys. 2).

Także w tym przypadku najbardziej czasochłonna będzie faza pierwsza, czyli prace przygotowawcze. Jest to tzw. projekt monitoringu, poparty sporządzeniem niekiedy obszernej dokumentacji oraz będący wynikiem wnikliwych analiz i konsultacji. Sama realizacja natomiast przebiega według przyjętego schematu z zachowaniem standaryzacji. Obiekt skanowany jest w sposób powtarzalny, a wyniki poszczególnych pomiarów analizowane są przez system komputerowy. Ponadto, w zależności od zdefiniowanych progów bezpieczeństwa (progów krytycznych), system wykonuje odpowiednią, wcześniej zaprogramowaną reakcję w postaci wysłania powiadomienia bądź też automatycznego wykonania innej czynności.

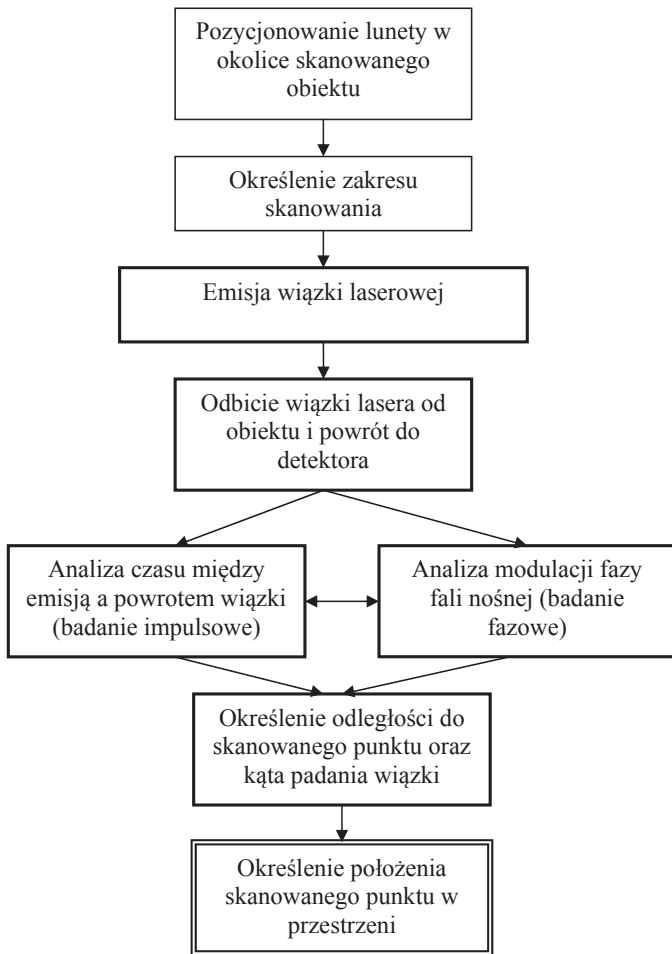
Ponieważ możliwości zintegrowanych systemów monitoringu są od wielu lat znane i rozwijane tak przez ośrodki naukowe, jak też dostawców technologii geoinformacyjnych, praktycznej weryfikacji należałoby poddać samo skanowanie obiektu *online*. Test taki przeprowadzono



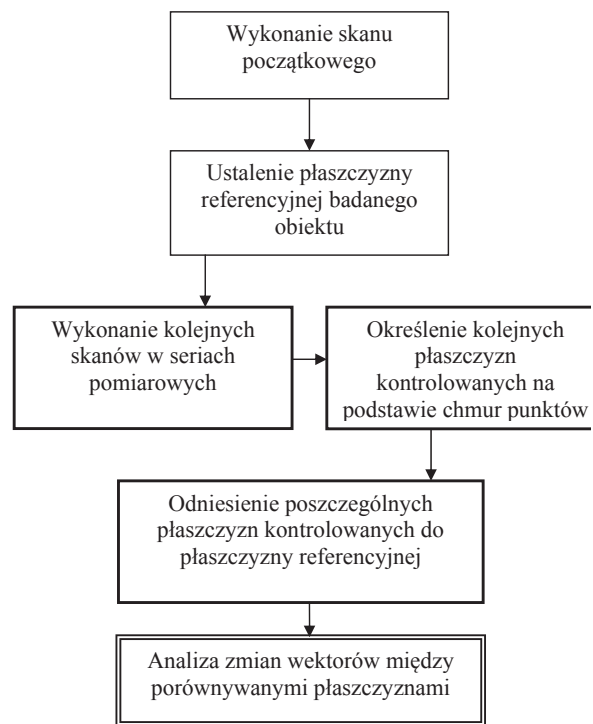
Fot. 3. Oprogramowanie Leica GeoMoS, posiadające stałe połączenie ze skanerem (fot. K. Karsznia)

między innymi w Warszawie na Moście Łazienkowskim (fot. 1), wykorzystując technologię firmy Leica Geosystems. Ten znany w świecie producent instrumentarium geodezyjnego i zaawansowanego oprogramowania analitycznego od niedawna posiada w swojej ofercie niezwykle innowacyjny i dostosowany do potrzeb monitoringu tachimetr skanujący wysokiej wydajności MS50 serii „Nova” (8) (fot. 2).

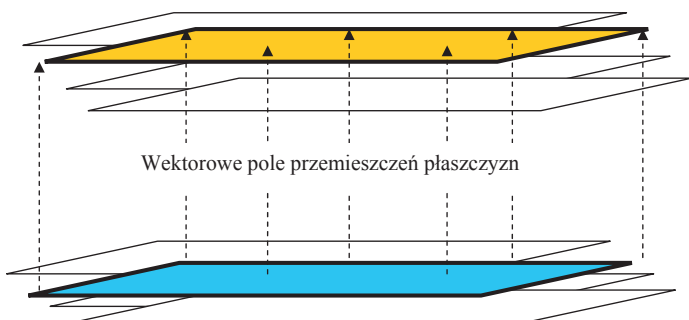
Zasada działania stacji skanującej odbywa się według schematu zamieszczonego na rys. 3. Szczegółowe zasady działania skanerów laserowych wraz z fizycznymi podstawami emisji wiązek oraz ich modulacji można znaleźć w licznych publikacjach, między innymi w (3) i (13). Jak podają autorzy opracowania (13), podczas skanowania obiektów decydującymi czynnikami są: szybkość skanowania, rozdzielczość, wielkość plamki, pole widzenia, konstrukcja sygnałów referencyjnych, kamery CCD, barwa chmury punktów, a także sama dokładność pomiaru odległości możliwa do osiągnięcia danym instrumentem. Pozyskane w ten sposób chmury punktów będą następnie podlegały modelowaniu przy użyciu specjalistycznego oprogramowania typu CAD. Jeżeli jednak technologia ta ma umożliwić użytkownikowi dostrzeżenie dynamicznie zmieniających się wartości i pojawiających się trendów zmian geometrii obiektu (przemieszczenia, odkształcenia), skanowanie musi przebiegać według schematu przedstawionego na rys. 4.



Rys. 3. Schemat pomiaru wykonywanego przy użyciu skanerów laserowych (oprac. własne)



Rys. 4. Schemat wykorzystania skaningu laserowego w monitorowaniu obiektów inżynierskich (oprac. własne)



Stan wyjściowy (pierwsza płaszczyzna skanowania)

Rys. 5. Schematyczne ujęcie zasady wyznaczenia wektorowego pola przemieszczeń skanowanego obiektu inżynierskiego (oprac. własne na podstawie [9])



Rys. 6. Zrzut ekranowy z programu Leica Cyclone

W praktyce analiza zmian wektorów między płaszczyznami sprowadzana jest do prowadzenia ciągłej oceny zmian objętości wirtualnej bryły (9) utworzonej przez te płaszczyzny (rys. 5).

Dodać należy, że realizacja poszczególnych płaszczyzn (kontrolnej – referencyjnej – oraz kolejnych – kontrolowanych) wykonywana jest z wielokrotną kontrolą, a kolejne płaszczyzny budowane są jako średnie z kilkukrotnego pomiaru. Postępowanie takie jest możliwe, ponieważ zgodnie z danymi technicznymi (8) częstotliwość próbkowania wynosi około 20 Hz. Analizy *online* prowadzone są w komputerze sterującym (służy do tego np. oprogramowanie Leica GeoMoS), który posiada stałe połączenie ze skanerem (fot. 3).

Upowszechnienie skanerów laserowych oraz spowodowany możliwościami współczesnej informatyki wzrost mocy obliczeniowych dają możliwość prowadzenia monitoringu zmian geometrycznych obiektów mosto-

wych praktycznie w czasie rzeczywistym. Postęp technologiczny wpływa również na zmianę dotychczasowego podejścia do tematyki kontroli obiektów inżynierskich i zarządzania ryzykiem. Przepisy i normy branżowe, choć nadal aktualne, wymagają uwzględnienia pojawiających się nowoczesnych rozwiązań w realizacji zadań inżynierskich. Stąd też potrzeba ciągłego uzupełniania tzw. „bazy wiedzy” o obiektach oraz warunkach realizacji współczesnych pomiarów. Istotnym elementem jest również integracja wielu technologii, które dotychczas działały raczej niezależnie od siebie. Budowa zintegrowanych modeli stanowi zatem klucz do prowadzenia prawidłowej oraz wiarygodnej oceny stanu istniejącej infrastruktury. □

Autor dziękuje firmie Leica Geosystems Sp. z o.o. za udostępnienie instrumentarium i oprogramowania niezbędnego do przeprowadzenia testu skanera na Moście Łazienkowskim w Warszawie.

13. Toś C., Wolski B., Zielina L.: *Tachimetry skanujące. Aplikacje technologii skanowania w budowie szczególnych modeli obiektów inżynierskich*. Monografia 374, Politechnika Krakowska, 2010.

14. Witakowski P.: *Zdalne monitorowanie obiektów budowlanych podczas budowy i eksploatacji*. „Czasopismo Techniczne”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2007.