

*Cezary Toś, Bogdan Wolski, Leszek Zielina\**

## INWENTARYZACJA OBIEKTU GEOTECHNICZNEGO NA PRZYKŁADZIE KOPCA IM. J. PIŁSUDSKIEGO W KRAKOWIE\*\*

---

### 1. Wstęp

Deformacje obiektów geotechnicznych takich jak obwałowania, skarpy, zbocza naturalne itd. wyznacza się na podstawie obserwacji liczby przemieszczeń punktów badawczych specjalnie w tym celu stabilizowanych na powierzchni obiektu. Pomiar wykonywany jest z dużą dokładnością, ale liczba punktów jest niewielka. Niekiedy metodą tachymetryczną, a więc bez stabilizacji punktów badawczych, obserwowana jest naturalna powierzchnia obiektu, najczęściej jednak stosuje się metodę polegającą na wykonywaniu obserwacji zmian geometrii obiektu w wytypowanych przekrojach. Podstawą każdej z wymienionych wyżej metod jest założenie, że deformacje modelu geometrycznego obiektu, jaki tworzy zbiór punktów, są reprezentatywne dla obiektu rzeczywistego. Sposób pomiaru deformacji obiektów ziemnych jest identyczny jak w przypadku typowych konstrukcji budowlanych. Podejście to nie jest poprawne, bowiem zwykle duże rozmiary obiektów oraz nieregularność powierzchni ograniczają możliwość budowania dokładnego modelu geometrycznego. Im większy jest stopień generalizacji, tym mniej zasadne jest zwiększanie dokładności obserwacji. Dokładność pomiaru deformacji obiektów jest określana na poziomie kilku centymetrów. Zbiór wyników jest więc niewielki i małej dokładności. W poprawnej interpretacji taki zbiór danych powinien być traktowany tylko jako statystyczna próba. Przydatność modelu geometrii obiektu i jego deformacji należy obecnie widzieć w kontekście coraz doskonalszych metod analizy konstrukcji. Te ostatnie są efektywne, ale pod warunkiem pozyskania odpowiednich danych.

W przekonaniu autorów skutki ograniczeń i uwarunkowań stosowanych obecnie metod inwentaryzacji i monitoringu deformacji obiektów ziemnych można znacznie zmniejszyć

---

\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Praca została wykonana w ramach projektu badawczego „Technologia budowy szczegółowych modeli 3D inżynierskich obiektów kubaturowych N N526 1628 33, umowa 1628/B/T02/2007/33 finansowanego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

optymalizując zadanie budowy modeli 3D, szczególnie jeśli dane pozyskiwane są metodą skanowania. W geodezji jest to nowa metoda pomiaru o skromnym jak dotąd piśmiennictwie [1, 5]. Możliwości i zakres aplikacji tej metody dla potrzeb inwentaryzacji oraz monitoringu deformacji obiektów budowlanych autorzy badają na przykładach różnych konstrukcji, stosując zrobotyzowane stacje pomiarowe [2–4]. Prezentowana praca ukierunkowana jest na obiekty ziemne, zawiera wyniki badań Kopca im. J. Piłsudskiego w Krakowie, konstrukcji wyjątkowej w sensie geotechnicznym i społecznym.

## **2. Kopiec im. Józefa Piłsudskiego w Krakowie**

Kopiec im. J. Piłsudskiego, zbudowany w latach 30., ma kształt stożka o wymiarach 34 m wysokości, 113 m średnicy i 355 m obwodu u podstawy. Obiekt nie przenosi obciążeń użytkowych, ale jest narażony na destrukcyjne oddziaływanie opadów atmosferycznych i roślinności. Wyraźnym skutkiem wieloletnich zaniedbań konserwacyjnych były widoczne zmiany kształtu i degradacja powierzchni. W latach 90. w ramach gruntownej renowacji obiektu konstrukcję wzmocniono, stosując technologię gruntu zbrojonego. Warunkiem bezpiecznej eksploatacji jest systematyczna konserwacja obiektu, w tym usuwanie lokalnych zniekształceń, gdy proces degradacji jest w stadium początkowym.

Monitoring deformacji konstrukcji Kopca, podobnie jak każdego obiektu ziemnego, ma kilka istotnych uwarunkowań. Głównym jest brak danych, które wskazywałyby na wielkość i miejsca, w których deformacje mogą się pojawić. Zauważmy, że w typowych badaniach odkształceń konstrukcji budowlanych prognozowanie takich deformacji stanowi podstawę projektu monitoringu. Po drugie, na powierzchni obiektu ziemnego, okresowo często pokrytego trawą, wykluczyć należy możliwość znalezienia odpowiedniej liczby punktów charakterystycznych, identyfikowalnych w kolejnych seriach obserwacji. Po trzecie, należy się liczyć z możliwością wystąpienia lokalnych deformacji, tzn. takich, których obszar nie będzie większy niż kilka metrów kwadratowych. Identyfikacja słabych miejsc ma duże znaczenie dla analizy konstrukcji. Najtrudniejszy warunek dotyczy dokładności, którą należy odnosić nie tylko do pomiaru, ale do wyznaczenia przemieszczenia dowolnego punktu wygenerowanego na modelu 3D. W takiej interpretacji dokładność pomiaru w terenie jest tylko składową znacznie większej dokładności wypadkowej, uwzględniającej dokładność aproksymacji powierzchni naturalnej za pomocą modelu 3D.

## **3. Inwentaryzacja kształtu powierzchni obiektu metodą tachimetrii skanującej**

Pomiar Kopca wykonano za pomocą tachimetru skanującego Topcon GPT-8200A Scan. Funkcję skanowania w tej stacji pomiarowej realizuje zespół utworzony przez dalmierz bezlustrowy, serwowator oraz komputer z programem sterującym pomiarem. Dalmierz pozwala

la na pomiar długości do dowolnego celu, nie sygnalizowanego lustrem. Serwomotor, sterowany komputerem, przesuwa automatycznie oś celową lunety w płaszczyźnie poziomej i pionowej według zaprogramowanej procedury. Komputer polowy FC-100 z firmowym oprogramowaniem Field Scan umożliwia sterowanie procesem pomiarowym, przechowywanie danych i wstępne opracowanie wyników.

Parametry skanowania oraz obszar skanowania definiowane są za pomocą komputera. W tym celu najpierw wykonuje się zdjęcie cyfrowe obiektu i wczytuje je do kontrolera. Orientację każdego zdjęcia wykonuje się w oparciu o co najmniej 4 punkty dostosowania. Na zdjęciu widocznym w kontrolerze definiuje się granice planowanych obszarów skanowania oraz gęstość skanowania w tych obszarach. W różnych obszarach obserwowanego obiektu można zaprogramować różny skok poziomy i pionowy, a tym samym planować różne gęstości skanowania. Zakres skanowania można również określić bez zdjęcia, podając graniczne wartości kąta poziomego i pionowego. Programowanie zakresu i gęstości skanowania stanowi ważny element optymalizacji procesu pomiarowego.

Wynikiem skanowania jest „chmura punktów”. Jakkolwiek pomiar realizowany jest automatycznie, to korzystnie jest obserwować, jak narasta zbiór danych tworzących chmurę. Na podstawie danych o aktualnym stanie skaningu pokazanych na bieżąco w wyświetlaczu komputera można w razie potrzeby korygować program pomiaru.

Skanowanie stanowi główne, ale nie jedyne źródło pozyskiwania danych. W części polowej wykonuje się pomiar osnowy oraz punktów orientujących zdjęcia, pomiar linii nieciągłości (krawędzi) metodą tachimetryczną oraz wykonuje zdjęcia cyfrowe. Wszystkie te dane są następnie przetwarzane pod kątem budowy modelu obiektu 3D.

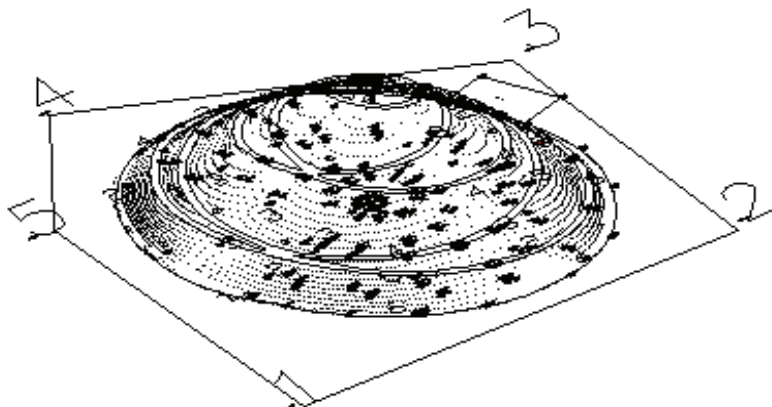
#### **4. Pomiary polowe Kopca im. J. Piłsudskiego**

Osnowę pomiarową tworzył pięciopunktowy ciąg zamknięty zastabilizowany wokół Kopca, jak na rysunku 1. Taka liczba stanowisk wystarczała dla przeprowadzenia skanowania i definiowania obszarów skanowania. Osnowę zastabilizowano trwałymi znakami, tak aby w przyszłości cykliczne pomiary były prowadzone z tych samych stanowisk i w tym samym układzie odniesienia. Na powierzchni Kopca rozmieszczono i zasygnalizowano tarczami 30 punktów do orientacji zdjęć. Metodą tachimetryczną z użyciem lustra pomierzono krawędzie ścieżek, stanowiące linie nieciągłości powierzchni oraz punkty orientacyjne.

Zdjęcia wykonano za pomocą aparatu cyfrowego Minolta, wcześniej testowanego programem PiCalib. Na każdym stanowisku wczytywano do komputera polowego FC-100 zdjęcie wykonane z danego stanowiska i wyniki testu kamery. Orientację zdjęć wykonano celując kolejno na 6 punktów, wskazując równocześnie te punkty na zdjęciu.

Programując skanowanie przyjęto jednakowy skok 1 grada dla kąta pionowego i poziomego, przy którym spodziewano się realizować siatkę skanującą o oczkach  $0,5 \div 1,0$  m. W praktyce, z uwagi na różne odległości skanowanych punktów, powstała siatka nieregularna. Nieregularność była szczególnie duża w obszarach, na których nakładały się punkty

pomierzone z różnych stanowisk. Jest to właściwość charakterystyczna dla obiektów o kształcie kołowym i stożkowym. Aby zmniejszyć wpływ kulistości na efekt skanowania należy zwiększyć liczbę stanowisk pomiarowych, dzieląc skanowaną powierzchnię na mniejsze fragmenty. Metodą skanowania pozyskano ok. 3000 punktów powierzchni Kopca.



**Rys. 1.** Chmura punktów uzyskana techniką skanowania i metodą tachimetryczną (ścieżki)

Pomiar osnowy, punktów orientujących, punktów charakterystycznych, a przede wszystkim krawędzi stanowiących linie nieciągłości wykonano metodą biegunową z dużą dokładnością (punkty osnowy 2 mm, pozostałe 3÷5 mm) przy pomocy tachimetru skanującego, tj. instrumentu Topcon GPT-8200A.

## 5. Opracowanie wyników pomiaru

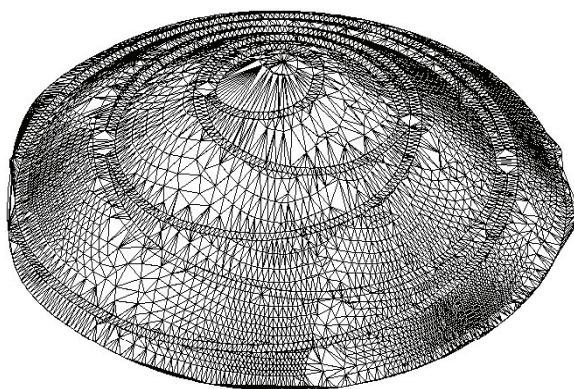
Powstała w wyniku skanowania „chmura” punktów, uzupełniona liniami nieciągłości i punktami charakterystycznymi stanowi, obszerny zbiór danych o kształcie i geometrii obiektu. Zbiór danych opracować można na różne sposoby w zależności od rodzaju obiektu, wymaganej dokładności, szczegółowości jego zapisu oraz od celu opracowania.

Opracowanie wyników pomiaru przedstawioną technologią generuje dwa rodzaje problemów. Pierwszy, w przypadku pojedynczego pomiaru, obejmuje wybór modelu obiektu, stopień jego dokładności, integrację wyników uzyskanych różnymi technikami pomiaru. Drugim jest porównanie wyników cyklicznych inwentaryzacji. Porównanie modeli, wyznaczanie i interpretacja zachodzących zmian wymagają indywidualnych rozwiązań uwzględniających rodzaj obiektu, dokładność pomiaru i geometrię deformacji.

W zastosowanej technologii dane pomiarowe razem ze zdjęciami zapisane są w komputerze polowym FC-100 w programie Field Scan. Dane transmitowane są do komputera stacjonarnego i przetwarzane przy wykorzystaniu firmowego (Topcon) programu Pi 3000. Nałożenie na model naturalnej faktury stanowi ważną zaletę prezentowanej technologii.

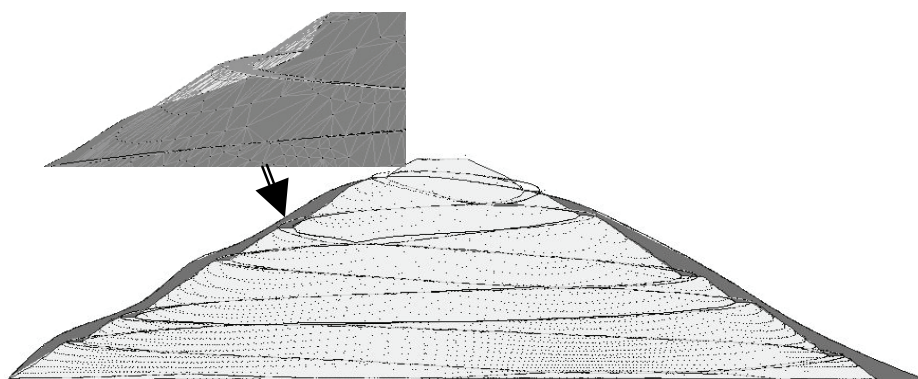
Mając na uwadze fakt, że program Pi 3000 jest kosztowny, w prezentowanych badaniach zastosowano bardziej dostępne rozwiązanie. Dane z pomiaru polowego z tachimetru transmitowano w postaci samego pliku tekstowego ze zbiorem współrzędnych chmury punktów i dalej przetwarzano w programie graficznym Land Desktop 2005. Niezależnie od danych transmitowanych z komputera FC-100, do programu wczytano zdjęcia Kopca wykonane ze stanowisk pomiarowych. Zdjęcia, stanowiące płaskie obrazy rastrowe, zostały skalibrowane w oparciu o punkty orientacyjne oglądane w widoku jak ze stanowiska. W efekcie uzyskano dla każdego stanowiska obraz chmury punktów na tle zdjęcia. W oparciu o chmury punktów oraz pomierzone granice nieciągłości (krawędzie ścieżek) zbudowano w programie Land Desktop powierzchniowy model Kopca w postaci siatki TIN. W pierwotnej postaci powstała w ten sposób siatka była nieregularna, z dużą liczbą nienaturalnych zniekształceń. Przyczyną tego były punkty, które np. poprzez przypadkowe odbicie sygnału od przeszkód terenowych zostały automatycznie włączone do zbioru danych, chociaż nie leżały na powierzchni Kopca. Eliminacji tych punktów dokonano w procesie filtracji w oparciu o zdjęcia cyfrowe. Procedura filtracji jest trudna, przeprowadzona jest arbitralnie. Jej poprawność w dużym stopniu zależy od jakości i liczby zdjęć cyfrowych. Doświadczenia autorów pokazują, że w przypadku badań obiektów budowlanych „ręczna” filtracja jest bardziej efektywna od procedur komputerowych automatyzujących proces filtracji; jest ona pracochłonna, ale wiarygodna.

Procedura filtracji może dotyczyć danych błędnych lub zbędnych, jak to nadmieniono wyżej, ale może też mieć bardziej wyrafinowany charakter. Tak będzie w przypadku, gdy jej celem jest skorygowanie zbioru danych pomierzonych poprawnie, ale obciążonych błędem systematycznym. W przypadku Kopca źródłem takiego błędu była wysoka trawa. Skorygowane dane posłużyły do ponownego odtworzenia powierzchni 3D w formie siatki TIN (rys. 2). Model w formie siatki TIN jest najodpowiedniejszą formą prezentacji bryły obiektu. Aproksymuje powierzchnię z dużą dokładnością i w takiej postaci może być wykorzystany w wytrzymałościowych analizach konstrukcji.



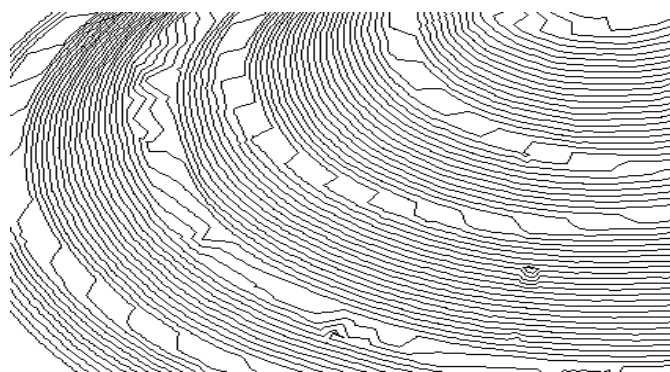
Rys. 2. Model powierzchniowy w postaci siatki TIN

Deformacje obiektu można wyznaczać porównując niezależnie wykonane przekroje modelu (rys. 3). Przy konstrukcji rysunku 3 zbiór danych pokazujących stan obiektu w przeszłości z konieczności wygenerowano.



**Rys. 3.** Monitorowanie deformacji na podstawie zmian w przekrojach pionowych (na rysunku pokazano cały obiekt, a także wyeksponowano jego fragment)

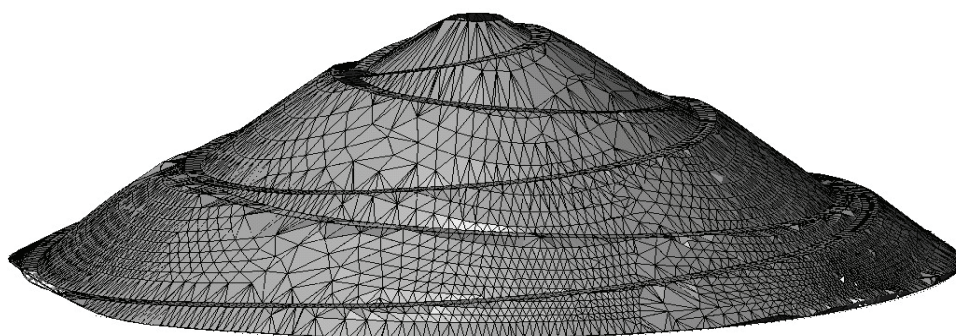
Inną postacią modelu 3D Kopca jest mapa warstwic o małym skoku (rys. 4). Model warstwiczny dobrze opisuje kształt obiektu geotechnicznego pod warunkiem, że jest to powierzchnia regularna. W przypadku gdy na powierzchni wystąpią obszary nieciągłości w postaci kawern, nisz czy lokalnych obsunięć gruntu, model warstwiczny nie wyeksponuje kształtu powierzchni we właściwym stopniu.



**Rys. 4.** Wizualizacja powierzchni za pomocą warstwic

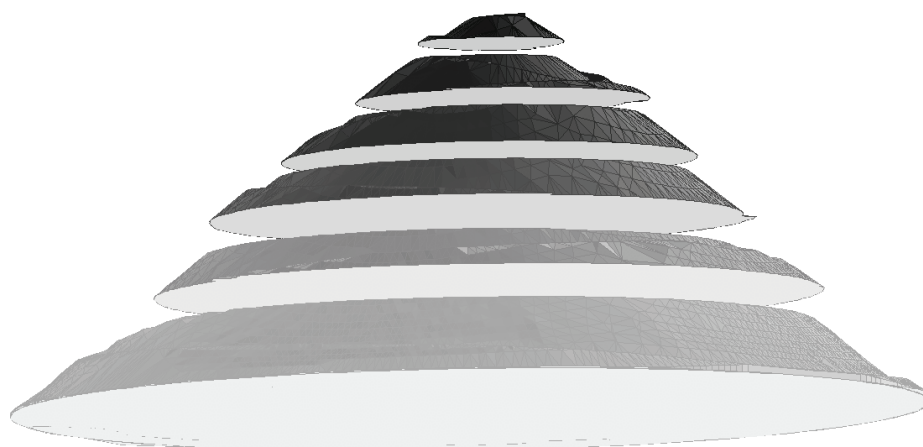
Najpełniej konstrukcję odtwarza model bryłowy i to nie tylko dlatego, że konstrukcja jest bryłą. Zaletą tego modelu jest możliwość operacji na bryłach, które można dodawać, odejmować i mnożyć. Ta właściwość daje najwięcej możliwości przetwarzania modelu

i tworzenia różnorodnych form przydatnych przy interpretacji danych. Do budowy modelu można zastosować różne techniki, pozwalające na uzyskiwanie rezultatów o różnym stopniu generalizacji rzeczywistości. W prezentowanym przykładzie, mając na uwadze opis deformacji, zastosowano technikę pozwalającą na budowę modelu bryły obiektu poprzez wypełnienie przestrzeni ograniczonej powierzchnią siatki TIN (rys. 5).



**Rys. 5.** Model bryłowy zbudowany na podstawie siatki TIN

Modele bryłowe dają wiele możliwości prezentowania zachodzących zmian kształtu. Odejmując dwa modele, pokazuje się deformacje. Na podstawie grubości powstałej bryły można wygenerować warstwy oznaczające wielkości deformacji. Interesujące wnioski można wyciągać na podstawie analizy porównawczej elementów bryły. Przykładowo na rysunku 6 bryłę kopca podzielono na sześć warstw płaszczyznami o wysokości 5, 10, 15, 20, 25 i 30 m.



**Rys. 6.** Model bryłowy podzielony na warstwy

Dla każdej warstwy łatwo jest wyznaczyć położenie środka masy, objętość i powierzchnię. Porównywanie tych elementów i śledzenie ich zmian powinno dostarczyć wielu ciekawych spostrzeżeń dotyczących zachodzących odkształceń. Gdy zmniejszy się objętość warstwy, ale środek masy pozostanie na takiej samej wysokości, będzie to znaczyło, że grunt ulega zagęszczeniu. W przypadku zjawisk osuwiskowych górne warstwy będą traciły masę kosztem warstw niższych, a środki warstw będą się obniżać. Tak wyznaczone wskaźniki opisują proces deformacji w postaci miar ogólniejszych niż obserwacje przemieszczeń w poszczególnych punktach obiektu.

## 6. Uwagi końcowe i wnioski

Zaprezentowana metoda monitoringu deformacji obiektu geotechnicznego stanowi aplikację nowej technologii inwentaryzacji opartej na technice skanowania. Stosowana dla badań różnych obiektów technologia ta ma wiele szczególnych właściwości. Doświadczenia, jakie autorzy zdobyli wykonując pomiar Kopca im. J. Piłsudskiego w Krakowie, a także innych obiektów budowlanych, pozwalają na sformułowanie ogólniejszych wniosków [3–5]. Najważniejsze z nich można streścić następująco:

- Dla technologii tachimetrii skanującej nie ma alternatywy, jeśli celem pomiaru jest pozyskanie dużych zbiorów danych i subcentymetrowej dokładności, a więc w przypadkach, gdy przedmiotem pomiaru są powierzchnie obiektu, a nie tylko pojedyncze punkty.
- W monitoringu deformacji powierzchni obiektu geotechnicznego, ale również każdej innej konstrukcji, efektywność metody skaningu jest niewielka, jeśli stosowana jest autonomicznie. Prezentowaną metodę należy traktować jako technologię pomiaru opartą na tachimetrii skanującej przy założeniu, że integralną jej częścią jest wykonanie zdjęć cyfrowych oraz pomiar linii nieciągłości metodą biegunową dalmierzem bezlustrowym.
- Proces filtracji danych nie może być całkowicie zautomatyzowany. W każdym przypadku końcową weryfikację danych należy wykonać „ręcznie” konfrontując dane ze zdjęciami.
- Dokładność, z jaką model odtwarza naturalną powierzchnię, jest zawsze kilkakrotnie mniejsza od dokładności pomiaru elementów chmury punktów. Pomimo że dokładność położenia punktów powierzchni w węzłach siatki wynosi 2–4 mm, to zbudowanie modelu o dokładności aproksymacji na poziomie 2–3 cm wymaga dodatkowo starannego planowania programu obserwacji, gęstej siatki skanowania i starannej filtracji danych.
- Przy opracowaniu modelu można stosować zarówno firmowy program Pi 3000, jak i inne realizujące przedstawiony zakres przetwarzania danych, np. Land Desktop.
- Wybór modelu uzależnić należy od zadania pomiarowego. W przypadku złożonej analizy procesu deformacji warto zwrócić uwagę na korzyści, jakie dają przedstawione w artykule modele bryłowe.



#### LITERATURA

- [1] *Mierzwa W., Rzonca A.*: Skanowanie powierzchni jako nowa metoda rejestracji i interpretacji szczegółów architektonicznych. Wrocław, Arch. Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 13B, 2003
- [2] *Toś C., Wolski B., Zielina L.*: Monitoring skarp i zboczy metodą skanowania. Inżynieria Morska i Geotechnika. 2006/3, 105–109
- [3] *Toś C., Wolski B., Zielina L.*: Inventory surveys of historical structures by scanning tacheometry. Reports on Geodesy, No. 2(77), 2006, Warsaw University of Technology, 219–226
- [4] *Toś C., Wolski B., Zielina L.*: Monitoring deformacji powierzchni obiektów kubaturowych metodą tachimetrii skanującej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Budownictwo, 2007
- [5] *Wunderlich T.*: Terrestrial laser scanners — Performance and Application. Bratislava, INGEO 2002, 2002