

Krzysztof BOJAROWSKI¹

**SCHEMATY ŁĄCZNEGO OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW
POZYSKANYCH METODAMI KLASYCZNYMI I SKANEREM LASEROWYM
W PROCESIE OCENY STANU GEOMETRYCZNEGO
OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH**

Streszczenie

Zastosowanie nowoczesnych metod pozyskiwania informacji przestrzennych o obiektach (np.: skaniny laserowe) wymaga innego niż dotychczas sposobu opracowania wyników. Związane jest to przede wszystkim z dużą ilością mierzonych punktów i ich losowym rozmieszczeniem. Łączne opracowanie wyników z kilku epok pomiarowych pozyskanych różnymi metodami, w których nie jest możliwe bezpośrednie porównanie np.: współrzędnych mierzonych punktów, wymaga również niestandardowych rozwiązań. W artykule przedstawiono propozycje schematów technologicznych opracowania wyników pomiarów wykonanych różnymi metodami, tak aby była możliwa ich łączna analiza i ocena obiektu. Proponowane rozwiązania opierają się na trójwymiarowym modelowaniu obiektów w systemach przestrzennych.

Słowa kluczowe: przemieszczenia i odkształcenia, analizy przestrzenne, modelowanie obiektów

1. Wstęp

Wyznaczenie przemieszczeń i deformacji obiektów jest jednym z ważnych zadań geodezji inżynierskiej, gdyż wyniki tych działań decydują w istotny sposób o bezpieczeństwie ludzi i trwałości konstrukcji. Rozwój nowych metod i technologii pomiarów umożliwił znaczne usprawnienie prac pomiarowych w tej dziedzinie oraz uzyskiwanie wyników pozwalających na wszechstronną ocenę ewentualnych zagrożeń. Odnotować należy zwłaszcza metody wyznaczeń przestrzennych, które umożliwiają łączne wyznaczenia przemieszczeń w trzech podstawowych kierunkach [1], [2]. Warto też zwrócić uwagę na nowe możliwości pozyskiwania, opracowania i prezentacji wyników wyznaczeń, których rozwój związany jest z rozwojem metod skaningu laserowego i zastosowaniami systemów przetwarzania informacji przestrzennych w geodezji inżynierskiej [3]. Wskazuje się zwłaszcza na systemy z grupy CAD, jako systemy szczególnie dostosowane do trójwymiarowej wizualizacji wyników pomiarów inżynierskich.

2. Charakterystyka zbiorów obserwacji

Możliwość wyznaczenia przemieszczeń badanego obiektu, powstałych w rozpatrywanym okresie czasu, jest uwarunkowana wykonaniem obserwacji wybranych punktów obiektu na początku i na końcu tego okresu. Przyjmując wyniki jednego z pomiarów za wyjściowe, a wyniki następnego za aktualne, można obliczyć wielkości przemieszczeń, które powstały w tymże okresie. Aby pomiary przemieszczeń spełniły swoje zadanie, harmonogram ich musi być ułożony z uwzględnieniem zarówno rodzaju obiektu, jak i przyczyn jego deformacji oraz dodatkowych okoliczności, a wyznaczone okresowo wielkości przemieszczeń powinny się odznaczać następującymi podstawowymi cechami:

¹dr inż., Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

1. Poprawnością, czyli zgodnością wyznaczanych wielkości z rzeczywistymi zmianami położenia obserwowanych punktów, w granicach wpływu błędów przypadkowych pomiarów.
2. Minimalną, uzasadnioną potrzebami dokładnością, ustaloną przez interpretatorów tych wielkości dla poszczególnych typów obiektów.
3. Aktualnością, charakteryzującą się tym, że okres czasu, między rozpoczęciem każdego okresowego pomiaru a przekazaniem tych wielkości interpretatorom, zostanie skrócony do uzasadnionego minimum.

Potrzeba zapewnienia sposobom wyznaczeń przemieszczeń tych cech pociąga za sobą konieczność stosowania odpowiedniej metodyki pomiarów i obliczeń, jak również ustalonych zasad organizacji. Najczęściej stosowaną jest metoda trygonometryczna. Wynikiem jest określenie zmian położenia punktów, wyrażonych przez trzy składowe wektora przemieszczeń w stałym układzie odniesienia i przyjętym przedziale czasu, które następnie mogą być wykorzystane do wykonania analiz i studiów, a również do opracowań graficznych.

Dużym udogodnieniem w pozyskiwaniu danych przestrzennych jest zastosowanie technologii skaningu laserowego. W wyniku pomiaru uzyskuje się tzw. "chmurę punktów". Należy zaznaczyć, że w tym przypadku nie jest spełniony, dotychczas uważany za podstawowy, warunek obserwacji tych samych punktów w różnych epokach pomiarowych.

3. Schematy przetwarzania

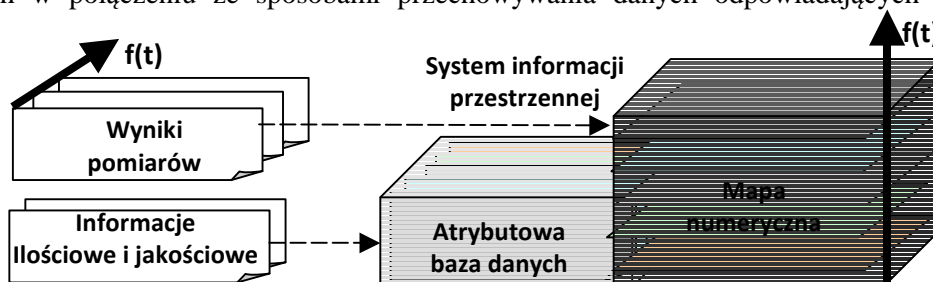
Opracowanie wyników pomiarów przemieszczeń obejmowało od początku zestawienia numeryczne i różnego typu wykresy, zazwyczaj prezentowane dwuwymiarowo profile przemieszczeń pionowych oraz szkice i mapy przemieszczeń poziomych. Nowe możliwości prezentacji i interpretacji wyników wyznaczeń przemieszczeń, powstały w związku z rozwojem metod wyznaczeń przestrzennych, czego przykładem może być wymieniona wcześniej metoda trygonometryczna. Równoczesne wyznaczanie składowych przemieszczeń w trzech podstawowych kierunkach, pozwoliło na ich trójwymiarową prezentację, w tym szkic trójwymiarowy. Opracowania takie były jednak do niedawna stosunkowo uciążliwe, ze względu na brak możliwości automatyzacji realizowanych zadań. Możliwości te rozwinęły się w ostatnich latach dzięki rozbudowie specjalistycznych systemów komputerowych, przeznaczonych do przetwarzania i wizualizacji informacji przestrzennych. Wśród tych systemów szczególne miejsce zajmuje system AutoCAD, który łączy funkcję przydatną w projektowaniu architektonicznym, z funkcjami umożliwiającymi geodezyjne opracowanie danych przestrzennych.

Dyskretyzacja zjawisk i obiektów powierzchniowych dokonywana w trakcie pomiaru, z reguły narzuca sposób przetwarzania danych, opracowania wyników i ich wizualizacji. Wykorzystanie numerycznego modelowania obiektów w znacznym stopniu rozszerza możliwości w tym zakresie, w szczególności w przypadkach, w których utrudniona jest powtórna lokalizacja punktów w kolejnych okresach pomiarowych.

Współczesne mapy numeryczne, podobnie zresztą jak wcześniej mapy analogowe, prezentują układ przestrzenny środowiska w konkretnym momencie czasowym, w którym zarejestrowane zostały informacje. Układ ten podlega jednak, co oczywiste, stałym zmianom, co pociąga za sobą konieczność aktualizacji. W czasach, gdy podstawowymi dokumentami były mapy analogowe, oznaczało to konieczność druku nowych, zaktualizowanych edycji, przy czym egzemplarze wcześniejszych wydań przechowywane były w archiwach. Rozwój systemów informacji przestrzennych i map numerycznych stworzył nowe możliwości w tym zakresie, zwłaszcza doboru sposobów sporządzania i przechowywania informacji z uwzględnieniem ich przeznaczenia [3], [4].

Efektywność systemów informacji przestrzennych w znacznym stopniu zależy od zaprojektowanych konstrukcji baz danych oraz organizacji dostępu do zgromadzonych w nich informacji, a także sposobów prezentacji i wizualizacji wyników przetwarzania. W szczególności dotyczy to systemów o charakterze dynamicznym, do których należą systemy rejestracji, gromadzenia, prezentacji i oceny zmian przestrzennego układu środowiska oraz badania przemieszczeń i odkształceń. Gromadzenie i wizualizacja danych, zawartych w tych systemach, wymaga bowiem uwzględnienia czynnika czasu, a zazwyczaj konieczna jest również prezentacja graficzna danych przestrzennych układzie trójwymiarowym.

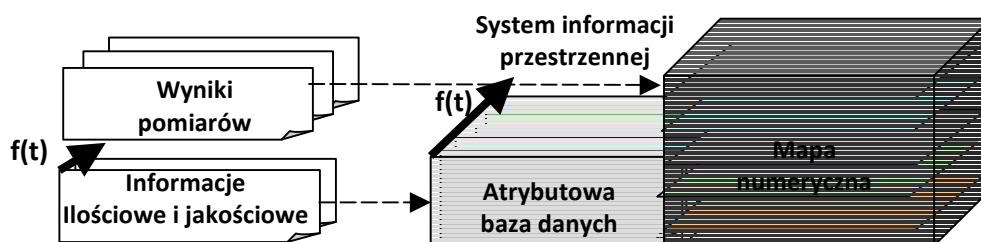
Wyróżnić można w zasadzie trzy główne schematy organizacyjne rejestracji informacji przestrzennych w połączeniu ze sposobami przechowywania danych odpowiadających kolejnym okresom.



Rys. 1. Struktura systemu - wariant I

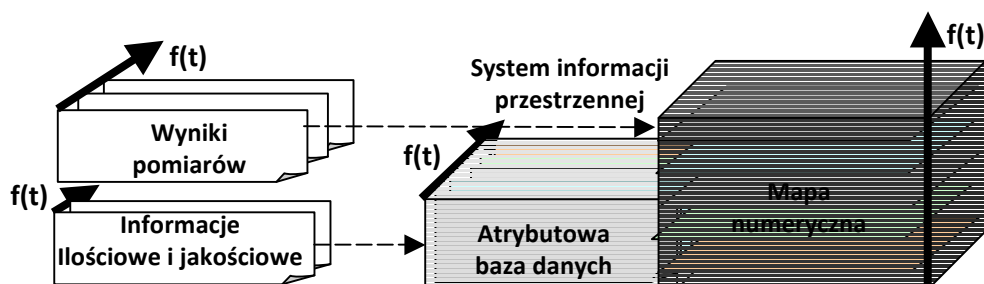
W pierwszym (rys.1) – aktualizacji podlega mapa numeryczna, której kolejne reprezentacje, w momentach $t_0, t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$, przechowywane są w odpowiednich warstwach. Wszystkim im odpowiada jedna baza opisowa, zarejestrowana w momencie t_0 lub zaktualizowana do momentu t_i . Pierwszy przypadek dotyczy sytuacji, w których podstawowe znaczenie ma mapa numeryczna, a baza opisowa pełni w stosunku do niej rolę służebną. Mapa numeryczna jest zatem tworzona ze szczególną starannością i sukcesywnie aktualizowana. Proces ten może być usprawniony dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu układu warstw, z wyróżnieniem nie tylko typów informacji, lecz również przebiegu ich dezaktualizacji. Oznacza to, że przy tworzeniu nowej reprezentacji mapy, w momencie t_i , wybrane warstwy podlegają aktualizacji zgodnie z przyjętymi dla nich warunkami, a inne mogą być przenoszone bez zmian.

Klasycznym przykładem, który odpowiada pierwszemu schematowi, są systemy zawierające wyniki pomiarów przemieszczeń i odkształceń, ponieważ informacje geometryczne stanowią podstawową i najważniejszą część systemu. Podporządkowana jest jej baza opisowa, która, zapisana w momencie t_0 , może pozostać niezmienną lub podlegać, w miarę potrzeb, aktualizacji do momentu t_i .



Rys. 2. Struktura systemu - wariant II

W drugim (rys. 2) - mapa numeryczna rejestrowana jest w momencie t_0 , ewentualnie modyfikowana do momentu t_i , natomiast wszystkie zmiany rejestrowane są w bazie opisowej, której kolejne reprezentacje są przechowywane. Taka struktura bazy danych może mieć istotne znaczenie w przypadkach, w których istotnego znaczenia nabierają informacje opisowe np.: okresom pomiarowym przyporządkowane zostają dane charakteryzujące przyczyny deformacji, warunki pomiaru itp.



Rys. 3. Struktura systemu - wariant III

Najbardziej ogólny jest schemat trzeci, uwidoczniiony na rys. 3. Dotyczy on wszystkich tych przypadków, w których zachodzi konieczność archiwizacji wszystkich ustalonych informacji geometrycznych i opisowych. Klasycznym przykładem są tu systemy, w których rejestruje się zarówno zmiany geometryczne, jak i przyczynę ich powstawania. Pozwalają one na charakterystykę badanych zjawisk w ujęciu dynamicznym.

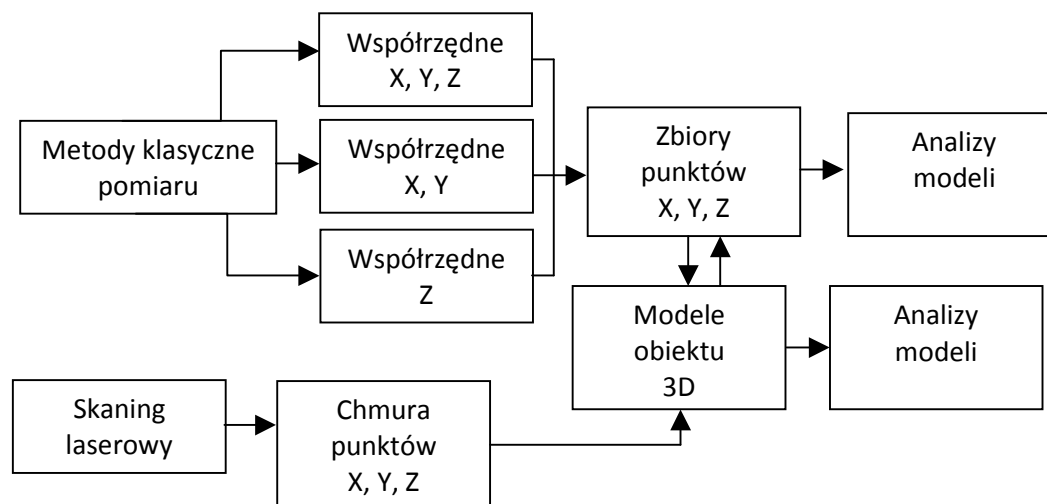
W klasycznych sposobach wyznaczenia przemieszczeń stosuje się metody geodezyjne, które pozwalają na określenie współrzędnych badanego obiektu w poziomym bądź pionowym układzie odniesienia. W zależności od rodzaju obiektu i warunków przestrzennych realizacji pomiarów, dobiera się stosowne metody pomiarowe. Należy zwrócić uwagę, że zazwyczaj niezależny pomiar współrzędnych X, Y oraz współrzędnej Z wiąże się z różną charakterystyką dokładnościową wielkości wyznaczanych w trzech podstawowych kierunkach układu współrzędnych.

Nowoczesne techniki pomiaru, w tym skaniny laserowe oraz metody tachymetryczne z bezlusterkowym pomiarem odległości umożliwiają wyznaczenie współrzędnych X, Y, Z w jednolitym trójwymiarowym układzie odniesienia. W przypadku skaningu laserowego wynikiem pomiaru jest tzw. chmura punktów. Wielkość zbioru obserwacji zależy od wielkości obiektu oraz od ustalonej rozdzielczości skanowania.

Schemat łącznego opracowania wyników pomiarów, w których obiekt reprezentowany jest zarówno przez zbiór punktów oraz przez „chmurę punktów” został przedstawiony na rys. 4. W przypadku, gdy analizie zmian położenia podlegają wybrane punkty (najczęściej są to punkty mierzone metodami klasycznymi), wówczas zbiory ze skaningu zostają zredukowane, a wartości współrzędnych w badanych punktach powinny być wyinterpolowane.

Drugi przypadek zakłada utworzenie numerycznych modeli obiektu. W związku z tym, że w obu przypadkach modele są generowane z danych pozyskanych różnymi metodami oraz z wykorzystaniem różnej liczby punktów, ich stopień generalizacji, a tym samym dokładność odwzorowania mierzonego obiektu będzie różna. Trzeba jednak zaznaczyć, wygenerowany model na ogół dokładniej reprezentuje badany obiekt niż zbiór punktów wykorzystany do jego tworzenia.

Jest jeszcze możliwe trzecie rozwiązanie polegające na tym, że zbiór współrzędnych punktów uzyskany na podstawie wyników pomiaru metodami klasycznymi jest analizowany z modelem obiektu utworzonym z chmury punktów. W tym przypadku, podobnie jak w tradycyjnych metodach badania przemieszczeń i odkształceń, uzyskuje się punktową charakterystykę zmian, najczęściej jako składowe wektorów przemieszczeń w głównych kierunkach układu współrzędnych.



Rys. 4. Schemat opracowania wyników

4. Opracowanie przykładu

Jako obiekt testowy wybrano budynek położony na terenie miasteczka akademickiego w Olsztynie. Prace polowe rozpoczęto od zaprojektowania i stabilizacji punktów osnowy. Położenie punktów zostało tak dobrane, aby możliwe było wykonanie pomiaru metodą wcięć przestrzennych oraz metodą skaningu laserowego.



Rys. 5. Obiekt testowy i wynik pomiaru skanerem laserowym

W skład osnowy wchodziło 11 punktów tworzących konstrukcję ciągu poligonowego zamkniętego. Osnowę pomierzono tachimetrem elektronicznym i wyrównano metodą ścisłą uzyskując średni błąd położenia punktu mniejszy niż 0.5 cm. W pierwszej części eksperymentu określenie położenia punktów na budynku wykonano metodą wcięć przestrzennych w dwóch okresach pomiarowych uzyskując zbiory współrzędnych X, Y, Z.

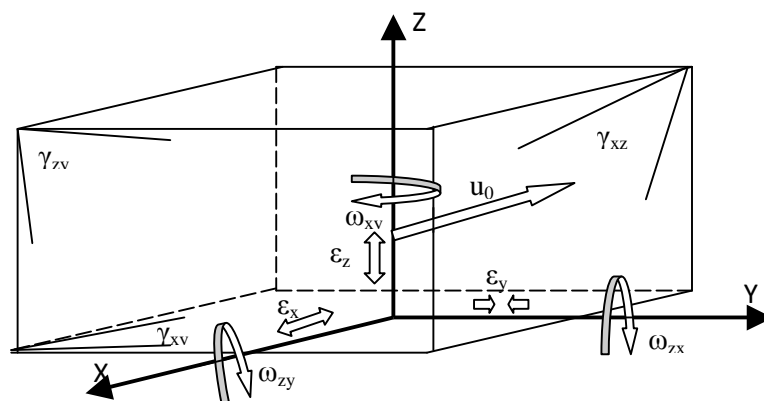
Opracowanie numeryczne tych zbiorów polegało na określeniu współczynników funkcji opisujących składowe wektora przemieszczeń i obliczeniu podstawowych wskaźników opisujących badane zjawisko. W tym celu dla każdej składowej wektora przemieszczenia i -tego punktu napisano równanie aproksymacyjne w postaci:

$$\begin{aligned}v_{xi} + a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3z_i &= u_{xi}, \\v_{yi} + b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3z_i &= u_{yi}, \\v_{zi} + c_0 + c_1x_i + c_2y_i + c_3z_i &= u_{zi}.\end{aligned}\tag{1}$$

W równaniach tych niewiadomymi są współczynniki a_i , b_i , c_i oraz poprawki v_{xi} , v_{yi} , v_{zi} . Wartości współrzędnych x_i , y_i , z_i , przyjęto dla położenia i -tego punktu w pomiarze wyjściowym. Obliczenie niewiadomych wykonano metodą parametryczną. Ze względu na to, że układy równań dla poszczególnych składowych pola przemieszczeń są względem siebie niezależne, czyli nie posiadają wspólnych niewiadomych, każdy z układów równań można rozwiązać oddzielnie. Po wyrównaniu uzyskano następującą postać równań aproksymujących składowe wektorowego pola przemieszczeń.

$$\begin{aligned}u_x &= -3.221 + 0.023x - 0.061y - 0.073z, \\u_y &= 2.342 - 0.062x - 0.056y - 0.015z, \\u_z &= -1.441 + 0.005x + 0.013y - 0.005z.\end{aligned}\tag{2}$$

Wykorzystując wektorowe pole przemieszczeń do badania zmian obiektów należy zwrócić uwagę na zdefiniowanie układu współrzędnych, ponieważ realizowane obliczenia, począwszy od składowych wektora przemieszczeń w punktach pomiarowych, aż po obliczenie wskaźników realizowane są w odniesieniu do początku układu współrzędnych i nawiązaniu do kierunków osi. Wartości współczynników przy niewiadomych w równaniach opisujących składowe wektorowego pola przemieszczeń (1) są wykorzystywane do obliczania wskaźników charakteryzujących obiekt. Należy podkreślić, że w tym przypadku cała budowla jest traktowana jako obiekt monolityczny, a wspomniane wskaźniki, których wartości zostały zestawione w tablicy 1 i schematycznie przedstawione na rys. 5, odnoszą się całego obiektu.



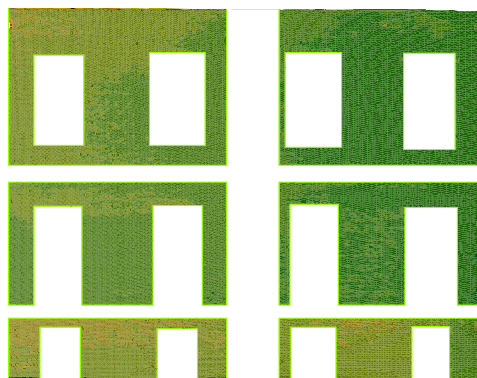
Rys. 6. Ilustracja wskaźników opisujących zmiany obiektu

Tablica 1. Zestawienie wartości wskaźników

Nazwa wskaźnika	Wzór	Wartość
translacja	$\vec{u}_0 = [a_0, b_0, c_0]$	$a_0 = -3.2 \text{ mm}$ $b_0 = 2.3 \text{ mm}$ $c_0 = -1.4 \text{ mm}$
zniekształcenia liniowe	$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \varepsilon_x$ $\frac{\partial u_y}{\partial y} = \varepsilon_y$ $\frac{\partial u_z}{\partial z} = \varepsilon_z$	$\varepsilon_x = 0,023$ $\varepsilon_y = -0,062$ $\varepsilon_z = 0,005$
zniekształcenia postaciowe	$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = \gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = \gamma_{yz} = \gamma_{zy}$ $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$	$\gamma_{xy} = -39,5^{\circ}$ $\gamma_{yz} = 1,3^{\circ}$ $\gamma_{zx} = -43,3^{\circ}$
obroty	$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = \omega_{xy}$ $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = \omega_{yz}$ $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = \omega_{zx}$	$\omega_{xy} = -0,3^{\circ}$ $\omega_{yz} = 17,8^{\circ}$ $\omega_{zx} = -49,6^{\circ}$

Druga część eksperymentu polegała na wykonaniu pomiaru badanego obiektu skanerem laserowym i opracowaniu z wykorzystaniem standardowych funkcji systemów przestrzennych. Zbiory punktów będące wynikiem skanowania posiadają współrzędne X, Y, Z w lokalnym układzie współrzędnych definiowanym przez instrument. Wstępna obróbka wyników pomiaru przeprowadzona z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania Cyclone v.5.8.1 polegała na usunięciu punktów, które nie reprezentowały obiektu (tzw. "czyszczenie skanu"). Następnie na wymodelowanej powierzchni ściany (rys. 6) wyznaczono współrzędne punktów odpowiadających punktom pomierzonych z wykorzystaniem wcięcia przestrzennego. Umożliwiło to w następnym etapie prac

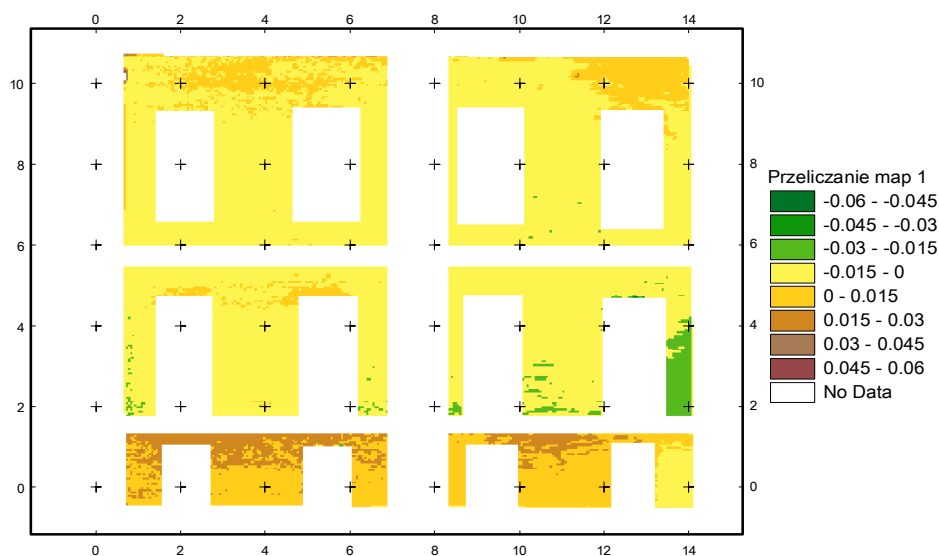
utworzenie zbiorów punktów pomierzonych dwoma metodami w tym samym układzie współrzędnych.



Rys. 7. Model powierzchni ściany

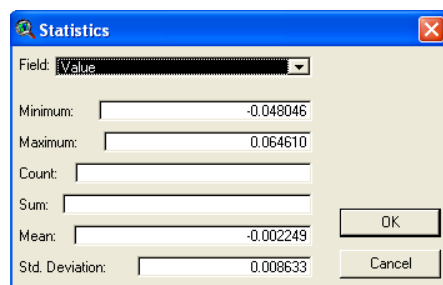
Kolejne etapy prac realizowane były z wykorzystaniem oprogramowania ArcView v. 3.2 z nakładkami 3D Analyst i Spatial Analyst. Utworzony model ściany jako powierzchnię typu TIN poddano edycji usuwając z niego te fragmenty, które nie leżały w rozpatrywanej płaszczyźnie (gzymsy, otwory okienne). Podobny model wygenerowano również z wykorzystaniem zbioru punktów pomierzonych metodą klasyczną. Aby można było wykorzystać standardowe funkcje analiz przestrzennych programu ArcView, położenie ściany w układzie współrzędnych tak zmodyfikowano, aby powierzchnia utworzona przez dwa najniższe skrajne punkty i linia pionu pokrywała się z płaszczyzną X, Y.

Najprostszym, a jednocześnie najbardziej obrazowym sposobem oceny utworzonych modeli jest ich bezpośrednie porównanie. Modele typu TIN przekonwertowano na modele typu GRID tworząc powierzchnie statystyczne. Wykorzystując funkcje tzw. przeliczania map wyznaczono różnice modeli (rys. 6). Wartości różnic podano w metrach.



Rys. 8. Powierzchnia różnicowa modeli

Utworzona powierzchnia różnicowa, której podstawowe statystyki ukazane zostały na rys. 7, obrazuje rozkład zmian modeli. Uzyskane wartości średniej zmiany rzędu 2 mm i odchylenia standardowego 8 mm świadczy o wysokiej zgodności modeli i występowaniu lokalnych odchyleń o dużych wartościach. Część z nich może być spowodowana fakturą ściany, jednak w znacznej mierze wynika to z dużej generalizacji modelu utworzonego na podstawie wyników pomiaru metodą klasyczną.



Rys. 9. Statystyka powierzchni różnicowej

Podjęta w artykule problematyka wynika z wprowadzania nowych technologii pomiarowych umożliwiających pomiary i analizy obiektów w układach trójwymiarowych. Dotyczy to zwłaszcza możliwości przestrzennego modelowania obiektów i ich oceny na podstawie czytelnych wskaźników opisujących geometryczne zależności w kolejnych epokach pomiarowych.

Należy stwierdzić, że możliwe jest stosowanie tych metod opracowania, w których analizowane są pojedyncze punkty, a pomiar realizowano skanerem laserowym. W tym przypadku ważnym jest określenie zasad lokalizacji punktów w modelach reprezentujących kolejne okresy pomiarowe.

Możliwość łącznego opracowania wyników pomiaru pozyskanych różnymi metodami ma duże znaczenie w przypadku, gdy klasyczne pomiary zostają zastąpione pomiarami skanerem laserowym. Opracowanie takie opierać powinno się na analizie modeli przestrzennych. Należy pamiętać jedynie, że modele utworzone na podstawie wyników pomiarów metodami klasycznymi są w dużym stopniu zgeneralizowane.

Literatura

- [1] WASILEWSKI A. 1989: Przestrzenna sieć geodezyjna jako osnowa realizacyjna. *Acta Acad. Agricult. Tech. Olszt., Geod. Ruris Regulat.*, 18, Olsztyn.
- [2] WÓJCIK M., WYCZAŁEK I., SZTUKIEWICZ W. 1989: Wyznaczanie przemieszczeń przestrzennych konstrukcji i budowli metodą trygonometryczną. *Wydawnictwo wewnętrzne PPGK „Geopoz”*, Poznań, 1989.
- [3] BOJAROWSKI K., SZACHERSKA M.K., WASILEWSKI A.: Systemy informacji przestrzennej w projektowaniu i geodezyjnej obsłudze inwestycji. *Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy automatyzacji w geodezji inżynierskiej”*. Warszawa, 1997.
- [4] BOJAROWSKI K., SZACHERSKA M.K., Schematy wykorzystania systemów LIS, GIS i CAD w geodezji inżynierskiej. *Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy Automatyzacji w Geodezji Inżynierskiej”* Warszawa, 2001.

DIAGRAMS FOR COMBINED PROCESSING OF MEASUREMENT RESULTS OBTAINED WITH THE USE OF CONVENTIONAL METHODS AND LASER SCANNING TECHNIQUES IN THE PROCESS OF EVALUATING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF CIVIL ENGINEERING OBJECTS

Summary

Advanced methods for acquiring spatial information about objects (e.g. laser scanning) require innovative data processing techniques due to a very high number of measured points and their random distribution. Combined processing of results obtained in various measurement epochs with the use of different methods that do not support direct comparison of e.g. the coordinates of the measured points, also requires non-standard solutions. This paper proposes diagrams for processing measurement results obtained by different methods, which support combined analysis of the acquired data and object evaluation. The proposed solutions rely on the technique of 3D object modeling in spatial systems.

Key words: displacement and deformation, spatial analysis, object modeling