CZASOPISMO TECHNICZNE Ś
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 2-Ś/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6336

KRZYSZTOF BOJAROWSKI, DARIUSZ GOŚCIEWSKI*

ORGANIZACJA POMIARU SKANEREM LASEROWYM

ORGANIZATION OF MEASUREMENT WITH LASER SCANNER

Streszczenie

Technologia pomiaru z rejestracją dużej liczby punktów (np. skaning laserowy) stwarza nowe możliwości w zakresie pozyskiwania i wizualizacji przestrzennych parametrów mierzonych obiektów. O efektywności numerycznego modelowania pomierzonych w ten sposób obiektów decyduje również rozmieszczenie rejestrowanych punktów. Z reguły parametry rejestracji punktów określane są w systemie sterującym instrumentem, gdzie najczęściej ustalana jest rozdzielczość skanowania dla założonej odległości. Oznacza to, że obiekty położone bliżej niż zadeklarowana odległość ustawienia rozdzielczości będą rejestrowane z większą gęstością punktów, natomiast położone dalej z mniejszą. Przy pomiarze obiektów o dużym zróżnicowaniu odległości od instrumentu może to mieć znaczący wpływ na dokładność modelowania poszczególnych elementów obiektu.
W artykule zaproponowano dwa rozwiązania tego problemu. Pierwsze polega na takiej organizacji pomiarów, która pozwala uzyskać w pewnym założonym zakresie jednakową rozdzielczość przez ustalanie parametrów rejestracji niezależnie dla poszczególnych fragmentów mierzonego obiektu. Drugie rozwiązanie opiera się na wygenerowaniu za pomocą specjalnie opracowanego algorytmu regularnej siatki wykorzystywanej w dalszej kolejności do modelowania obiektu.

Słowa kluczowe: *skaning laserowy*, *numeryczne modelowanie obiektów*, *pomiar deformacji*

Abstract

Measurement technologies with recording of large numbers of points (e.g. laser scanning) create new possibilities in analysis of spatial parameters and visualization of objects measured. The effectiveness of digital modeling of objects measured in that way is also determined by positioning of points recorded. As a rule, parameters of recording of points are recorded in the control system of the instrument. In most cases the scanning resolution is determined set for the assumed distance. This means that objects situated closer than the declared distance of resolution setting are recorded with higher density of points while those situated further with a lower density. In case of measurement of objects characterized by large differences in the distance from the instrument that situation may have a significant influence on the accuracy of modeling of individual object elements.
The paper proposes two solutions of that problem. The first involves such organization of measurements that allows obtaining the same resolution within a certain set range by setting the measurement parameters independently for individual fragments of the object measured. The second solution is based on generating, using a specially developed algorithm, a regular grid used next for object modeling.

Keywords: *laser scanning*, *digital modeling of objects*, *deformation measurement*

* Dr inż. Krzysztof Bojarowski, dr inż. Dariusz Gościewski, Instytut Geodezji, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Pojawienie się na rynku nowych instrumentów geodezyjnych realizujących pomiary o charakterze ciągłym w układach trójwymiarowych wymaga ustalenia odmiennych niż dotychczas zasad przeprowadzania pomiaru oraz sposobu opracowania wyników [1]. W odróżnieniu od klasycznych metod pomiarowych, w których dobór punktów reprezentujących obiekt dokonywany jest przez geodetę i w głównej mierze wynika to z jego doświadczenia zawodowego, w pomiarach skanerem laserowym dobór rejestrowanych punktów wynika przede wszystkim z ustawień wpisanych do oprogramowania sterującego skanerem [2, 4]. Są to najczęściej wielkości liniowe lub kątowe określające przestrzenną rozdzielczość rejestrowanych punktów.

Taka organizacja prac ma swoje konsekwencje w charakterystyce uzyskanego zbioru obserwacji, co decyduje również o zakresie zastosowań tego typu pomiarów. Należy podkreślić, że w przypadkach, w których wymagane są pomiary powtarzalne tych samych punktów, np. pomiary przemieszczeń i odkształceń, należy stosować specjalne metody pomiaru (sygnalizować punkty specjalnymi tarczami) lub stosować takie sposoby opracowania wyników, które umożliwiają porównanie położenia badanych obiektów lub ich elementów w poszczególnych okresach pomiarowych. W wielu przypadkach wymagane jest również łączne opracowanie wyników pomiaru realizowanych metodami klasycznymi i pozyskanymi skanerem laserowym. Podstawowym warunkiem umożliwiającym opracowanie wyników pomiaru badanego obiektu jest realizacja pomiarów w jednolitym układzie odniesienia.

Wyniki pomiarów realizowanych skanerem laserowym są najczęściej podstawą opracowania trójwymiarowych modeli mierzonych obiektów. Do tego celu stosowane są specjalistyczne aplikacje komputerowe umożliwiające opracowanie obiektów regularnych (typu walec, kula, stożek, płaszczyzna itp.) lub nieregularnych, w których wykorzystywane są programy realizujące funkcje podobne do tych, które stosowane są przy tworzeniu numerycznego modelu terenu. W pomiarach realizowanych przez urządzenia o działaniu ciągłym istotnym elementem jest ustalenie parametrów rejestracji punktów. Często należy określić pewien kompromis między liczbą zaobserwowanych punktów reprezentujących obiekt a dokładnością końcowych opracowań. Ważne jest również uzyskanie jednolitego zbioru pod względem rozmieszczenia punktów, tak aby nie przetwarzać zbędnie dużej liczby punktów, a utworzony na ich podstawie model był dostosowany do oczekiwanych wymagań dokładnościowych.

2. Opis eksperymentu pomiarowego

W niniejszym artykule przedstawiono propozycję organizacji pracy skanera laserowego oraz opracowania algorytmu przetwarzania wyników pomiaru, tak aby uzyskać jednolity pod względem przestrzennego rozmieszczenia zbiór punktów. Proces pomiarowy sterowany jest z komputera typu laptop, a parametry pracy instrumentu mogą być wstępnie ustalane i rejestrowane w pliku tekstowym. Innym rozwiązaniem jest przetwarzanie wyników pomiaru specjalnie opracowanymi aplikacjami umożliwiającymi interpolację siatki punktów o założonej wielkości kwadratu bazowego.

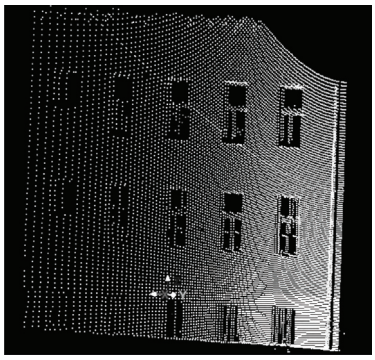
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 1. Warunki pomiaru w ramach eksperymentu
Fig. 1. Measurement conditions within the frameworks of the experiment

Takie rozmieszczenie punktów stwarza dogodne warunki modelowania obiektów powierzchniowych, przyczyniając się do zapewnienia jednakowej dokładności modelu na całej powierzchni, szczególnie gdy przetwarzaniu podlega numeryczny model terenu. Potrzeba ujednolicenia rozmieszczenia punktów pomiarowych ujawnia się głównie w przypadkach pomiaru wnętrz pomieszczeń ze względu na stosunkowo małą odległość instrumentu od obiektu. W tym przypadku bardzo szybko zmienia się odległość punktów skanowanych rejestrowanych na obiekcie od instrumentu.

Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcie ilustrujące warunki pomiaru w trakcie realizacji eksperymentu. Skaner laserowy ustawiono na przedłużeniu jednej ze ścian budynku w odległości ok. 5 m. Pomiar przeprowadzano na lewo od przedłużenia tej ściany. W pierwszej kolejności dokonano pomiaru całego obiektu z rozdzielczością 5 cm. Wynik pomiaru z rozmieszczeniem punktów przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wynik pomiaru skanerem laserowym
Fig. 2. Results of measurement with laser scanner

Nawet pobieżna analiza pozwala zauważyć, że ustawiona rozdzielczość, która została zachowana dla prawej strony obiektu, maleje wraz z przebiegiem pomiaru ku lewej stronie. Uzyskane w ten sposób wyniki poddane zostały przetwarzaniu za pomocą specjalnego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

programu z algorytmem interpolującym punkty w regularnej siatce. Przebieg i wyniki przetwarzania opisano w rozdz. 4.

Uzyskanie równomiernego rozmieszczenia punktów wymagało w dalszej kolejności takiego ustawienia parametrów pracy skanera, aby rozdzielczość rejestrowanych punktów zawierała się w założonym zakresie. Teoretyczne podstawy ustalania parametrów przedstawiono w rozdz. 3.

3. Organizacja pomiaru

Na rysunku 2 ukazano najprostszy przypadek, w którym pomiarowi podlega obiekt w formie płaszczyzny. Z reguły w tym przypadku podstawowym parametrem rejestracji punktów jest ustalona rozdzielczość pozioma i pionowa ustawiana dla wybranej odległości od skanera. Punkty położone dalej będą rejestrowane z mniejszą rozdzielczością, natomiast bliższe z większą. W związku z tym logiczne wydaje się podzielenie obszaru skanowania na strefy, w których rozdzielczość określająca zagęszczenie punktów zawierać się będzie w założonym przedziale wartości i ustalana będzie dla obliczanych dla danej strefy odległości.

Zgodnie z zależnościami ukazanymi na rys. 3 kąt środkowy dla pomierzonej odległości od mierzonego obiektu i ustawionej rozdzielczości wynosi

$$\hat{\alpha} = \frac{r}{D}$$

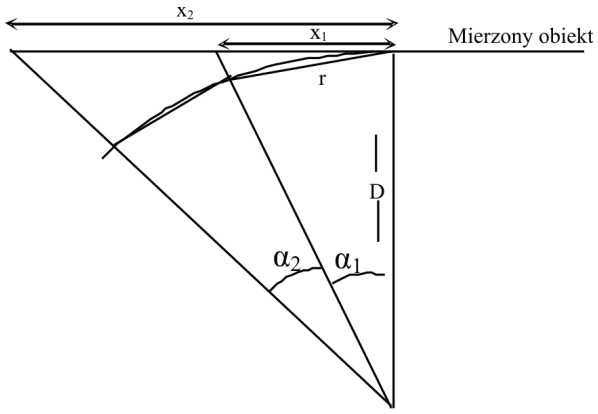
gdzie:

r – ustalona rozdzielczość skanowania,

D – odległości instrumentu od obiektu,

Natomiast odpowiednia odległość profilu na obiekcie wynosi

$$x_1 = D\,\mathrm{tg}\alpha$$



Rys. 3. Odległość między profilami pomiarowymi
Fig. 3. Distance between measurement profiles

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Odległość między kolejnymi profilami może być obliczana na podstawie wzorów

$$\Delta x_{1-2} = x_2 - x_1 = D\,\mathrm{tg}(\alpha_1 + \alpha_2) - D\,\mathrm{tg}(\alpha_1)$$

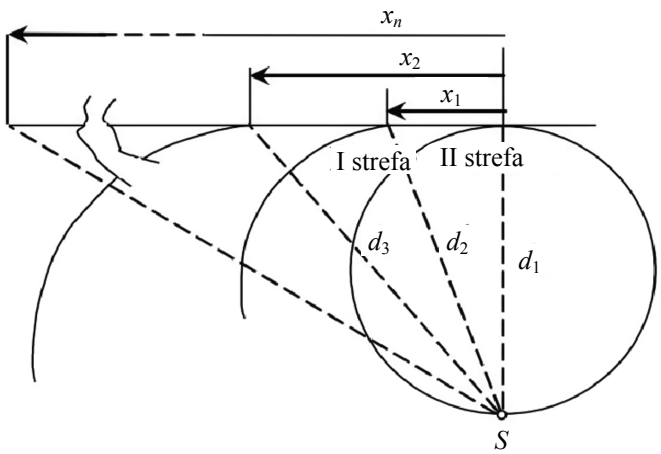
Zgodnie z przedstawionym schematem wzór ogólny dla odległości między dwoma dowolnymi przekrojami wyraża się wzorem

$$\Delta x_{n-(n-1)} = D[\mathrm{tg}n\,\alpha - \mathrm{tg}(n-1)\alpha]$$

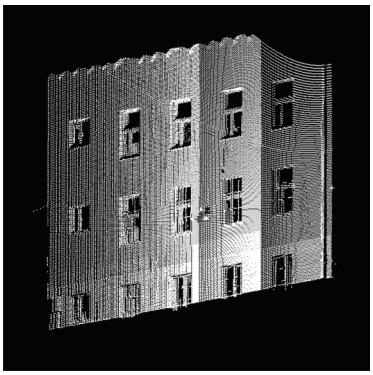
Według założeń proponowanego sposobu pomiaru strefowego należy zweryfikować warunek zapisany powyższym wzorem, sprawdzający czy nie przekracza on ustalonych wartości, które wynikać powinny z przyjętej rozdzielczości i założonej tolerancji, co możemy zapisać jako

$$\Delta x < r + Tr = r(1+T)$$

gdzie T to tolerancja wyrażona w części ustalonej rozdzielczości.



Rys. 4. Istota strefowego pomiaru skanerem laserowym
Fig. 4. Nature of zonal measurement with laser scanner



Rys. 5. Rezultat pomiaru strefowego
Fig. 5. Result of zonal measurement

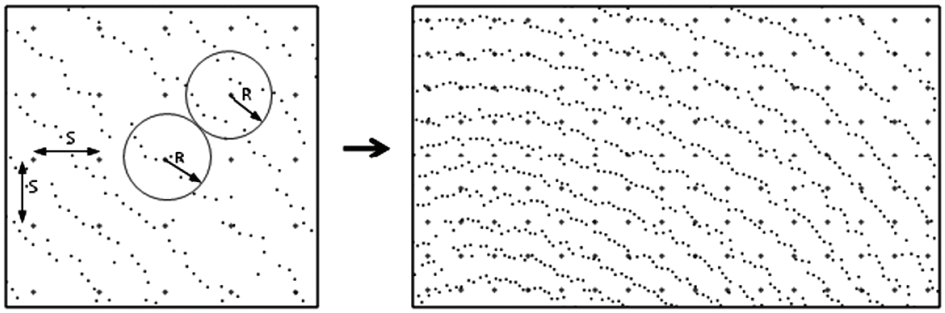
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Spełnienie powyższego warunku nie powoduje zmian ustawień pracy skanera. Przekroczenie wartości rozdzielczości z uwzględnieniem tolerancji prowadzi do ustalenia nowej strefy skanowania. W praktyce powoduje to realizację nowych ustawień rozdzielczości skanowania dla innej odległości mierzonej od początku nowo ustalonej strefy (rys. 4).

Wynik pomiaru z wykorzystaniem zmiany parametrów skanowania w poszczególnych strefach przedstawiono na rys. 5.

4. Przetwarzanie wyników pomiaru

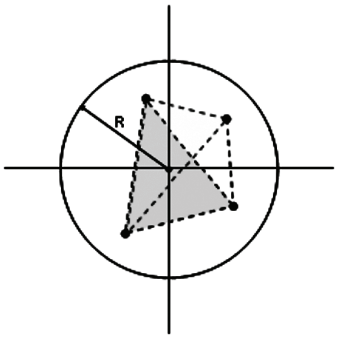
Zbiór punktów pomiarowych pozyskanych w procesie skanowania charakteryzuje się niejednorodnym rozmieszczeniem na analizowanej powierzchni. Taka sytuacja powodowana jest, jak już zaznaczono, różną odległością skanera od obiektu. Bezpośrednie wykorzystanie takiego zasobu umożliwia odtworzenie kształtu obiektu, jednak przeprowadzenie kompletnych analiz porównawczych jest utrudnione. Dodatkowym problemem staje się porównywanie kształtu obiektu na podstawie zbiorów pomiarowych pozyskanych w różnym czasie, dla różnych stanowisk skanera i przy różnych ustawieniach rozdzielczości skanowania. W celu dokonania analiz porównawczych zasoby pomiarowe pozyskiwane w różnym czasie można przekształcić do jednolitej postaci. Jednym ze sposobów organizacji zbiorów pomiarowych jest przekształcenie ich do postaci siatki kwadratów o założonej wielkości boku *S* (rys. 6) [3, 6]. Takie działanie umożliwia uzyskanie równomiernego rozmieszczenia analizowanych punktów na badanym obiekcie. Dodatkowo następuje redukcja ilości danych i ograniczona zostaje ich redundancja.



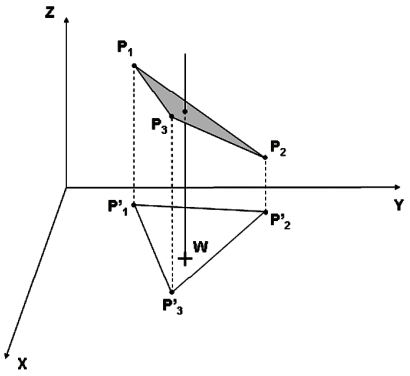
Rys. 6. Konstrukcja siatki kwadratów
Fig. 6. Design of the grid of squares

Podczas przekształcenia zbioru punktów pomiarowych do siatki kwadratów wartości w punktach węzłowych są wyliczane na podstawie punktów otaczających węzeł w drodze interpolacji. Przed właściwą interpolacją należy w odpowiedni sposób przygotować zbiór pomiarowy. Ze zbioru należy usunąć punkty, które mogą w negatywny sposób wpłynąć na wynik interpolacji. Są to wszelkiego rodzaju „szumy pomiarowe", punkty leżące na krawędziach obiektu oraz zbędne punkty np. w obrębie okien budynku. Interpolacja powinna być poprzedzona odpowiednim doborem punktów pomiarowych. Można to zrealizować, stosując odpowiedni algorytm poszukiwań punktów wokół węzła (rys. 7).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 7. Lokalizacja punktów wokół węzła
Fig. 7. Location of points around the node



Rys. 8. Algorytm interpolacji
Fig. 8. Interpolation algorithm

Przestrzeń wokół węzła dzielona jest na 4 sektory, w których odnajdywany jest punkt pomiarowy leżący najbliżej. Następnie na bazie tak odnalezionych punktów budowane są trójkąty opisujące węzeł. Z utworzonych trójkątów wybierany jest ten, którego suma kwadratów odległości wierzchołków od węzła jest najmniejsza. Interpolacji można też dokonać, opierając się na obu trójkątach, a wynik uśrednić. Przy doborze parametrów interpolacji należy zwrócić uwagę na odstęp *S* między węzłami siatki, który zależy od zagęszczenia punktów pomiarowych i pożądanej dokładności opracowania. Duże znaczenie ma również odpowiedni dobór promienia poszukiwań punktów wokół węzła (*R* na rys. 6 i 7). Przy ustalaniu tego promienia należy brać pod uwagę zarówno założony odstęp między węzłami,



Rys. 9. Rezultat po opracowaniu siatki kwadratów
Fig. 9. Result after squares grid processing

jak również odległości pomiędzy punktami pomiarowymi wynikające z rozdzielczości skanowania [5]. Istnieje wiele algorytmów interpolacyjnych, które mogą być wykorzystane do realizacji takiego zadania [7]. W omawianym przykładzie mamy do czynienia ze ścianą budynku, która tworzy teoretycznie powierzchnię płaską. Do interpolacji na takiej powierzchni można zastosować algorytm płaszczyzny i prostej, gdzie wartość w węźle jest wyznaczana jako wynik rozwiązania układu równań: płaszczyzny przechodzącej przez trzy

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

najbliższe punkty pomiarowe otaczające węzeł i prostej prostopadłej do płaszczyzny *xy* (w omawianym przypadku płaszczyzny ściany budynku) przechodzącej przez ten węzeł (rys. 8). Po dokonaniu interpolacji na wszystkich punktach węzłowych dotychczasowa baza rekordów pomiarowych zamieniana jest na bazę rekordów obliczeniowych. Uzyskane w ten sposób jednolite rozmieszczenie punktów na badanej powierzchni pozwala na dokonywanie wszechstronnych analiz. Dodatkowo po przekształceniu w taki sposób wszystkich zbiorów pomiarowych pochodzących z różnych epok można dokonać analiz zmian kształtu obiektu w czasie. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe opracowanie wyników pomiaru po zamianie punktów pomiarowych na węzły siatki kwadratów.

5. Podsumowanie

Stosowanie nowoczesnych metod pomiarowych, a w szczególności takich, które w dużym zakresie są zautomatyzowane, wymaga opracowania odmiennych niż dotychczas zasad pomiaru oraz schematów przetwarzania wyników. W artykule zaproponowano dwa sposoby przestrzennej organizacji mierzonych punktów. W pierwszym przypadku obliczane są parametry sterujące pracą skanera, które pozwalają na ustalanie rozmieszczenia mierzonych punktów, w drugim interpolowane są wartości współrzędnych punktów w regularnej siatce. Oba rozwiązania prowadzą do generowania zbiorów punktów z ustaloną stałą gęstością, co ma duże znaczenie dla efektywności pozyskiwania danych i dokładności modelowania obiektów, szczególnie w badaniach deformacji.

Literatura

[1] Axelsson P., *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam 2000.

[2] Bojarowski K., Gościewski D., Szacherska M.K., *Wizualizacja zmian ukształtowania dna morskiego jako etap modelowania procesów w systemach przestrzennych*, Materiały XII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Rola nawigacji w zabezpieczeniu działalności ludzkiej na morzu", Gdynia 2000.

[3] Burrough P., McDonnell R., *Principles of Geographical Information Systems – Spatial Information Systems and Geostatistics*, Oxford University Press, Oxford, UK 1998.

[4] Gościewski D., *Optymalizacja struktury i wielkości zbiorów obserwacji wykorzystywanych do tworzenia numerycznego modelu dna*, Materiały XIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Rola nawigacji w zabezpieczaniu działalności ludzkiej na morzu", Gdynia 2002.

[5] Gościewski D., *Influence of measuring point location on selection of interpolation algorithms*, The 6th International Conference: Environmental Engineering, Gediminas Technical University Press, Vilnius 2005.

[6] Maune D.F., *Digital Elevation Model Technologies and Applications*: *The DEM Users Manual*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD 2001.

[7] Oksanen J., Jaakkola O., *Interpolation and Accuracy of Contour–based Raster DEM's*, Reports of the Finnish Geodetic Institute 2000, Finnish Geodetic Institute, Kirkkonummi, Finland 2000.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ