

## SKANOWANIE OBIEKTÓW 3D Z WYKORZYSTANIEM LASERA I KAMERY

Bartłomiej BINCZYK<sup>1</sup>, Dariusz ŚWISULSKI<sup>2</sup>

1. Asseco Poland S.A., ul. Branickiego 13, 02-146 Warszawa  
tel: 692 000 297 e-mail: bartlomiej.binczyk@asseco.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel: 58 347 13 97 fax: 58 347 17 26 e-mail: d.swisulski@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano projekt skanera 3D, wykonanego w oparciu o łatwo dostępne elementy. W procesie digitalizacji urządzenie wykorzystuje sterowany programowo, obrotowy stół oraz głowicę pomiarową, w której skład wchodzi laser punktowy oraz kamera cyfrowa. Ponadto, przedstawiono zaprojektowane oraz wykorzystane na etapie uruchomieniowym elementy mechaniczne oraz programowe. Zaprezentowana konstrukcja umożliwia wielokrotne wykonywanie skanu jednego elementu z użyciem różnych rozdzielczości oraz zaprezentowanie siatki jego powierzchni w środowisku graficznym typu CAD, umożliwiającym dalszą obróbkę.

**Słowa kluczowe:** skaner 3D, triangulacja optyczna.

## 1. WSTĘP

Skaner 3D to urządzenie mechaniczne o sterowaniu elektronicznym, którego zadaniem jest zbieranie informacji o zewnętrznym kształcie obiektu. Dostępne skanery 3D wykorzystują różne metody pomiarowe, posiadają różnorodne zastosowania oraz zwykle wysoką cenę.

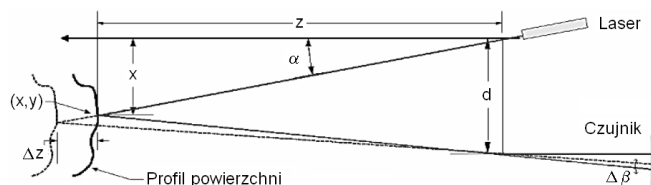
Rozwój komputerów znacząco wpłynął na rozwój skanerów 3D. Wraz z pojawianiem się szybszych jednostek obliczeniowych, pojawiały się szybsze maszyny skanujące. Skanery tego typu są obecnie szeroko stosowane w archeologii, medycynie i budownictwie oraz do kontroli jakości.

W zależności od rodzaju zadania można wyróżnić kilka cech charakteryzujących skanery: powtarzalność, rozdzielczość, zakres pomiarowy, odporność na wpływy środowiska zewnętrznego, nieinwazyjność oraz szybkość wykonania pomiaru. Wybór metody rejestracji danych zależy od doboru wymagań projektowych, dotyczących dokładności odwzorowywania mierzonego obiektu [1]. Wyróżniamy dwie podstawowe grupy: skanery dotykowe oraz bezdotykowe, które dzielą się na szereg podgrup. Grupa bezdotykowa obejmuje urządzenia, w których nie dochodzi do bezpośredniego kontaktu głowicy skanującej z powierzchnią obiektu podczas pomiaru geometrii. Do grupy tej należą urządzenia laserowe oraz urządzenia wykorzystujące inne metody wizyjne (skanery prążkowe oraz skanery wykorzystujące światło strukturalne). Wymienione urządzenia często opierają się na wykorzystaniu metody pomiarowej, zwanej triangulacją

optyczną. W przedstawionym rozwiązaniu zastosowano metodę skanowania bezdotykowego, wykorzystującą laser oraz kamerę.

Laserowa triangulacja jest jedną z szerzej stosowanych obecnie metod. Systemy tego typu bazują na wykorzystaniu projektora, który dokonuje projekcji widzianej plamki promienia lasera na powierzchni mierzonego obiektu, oraz detektora, który obrazuje światło odbite od obiektu przy wykorzystaniu elementu światłoczułego typu CCD, CMOS lub PSD. Każda zmiana pozycji emitowanej wiązki jest obrazowana w sposób ciągły, a następnie rejestrowana [1, 2]. Określenie wartości wielkości mierzonej dokonuje się dzięki nieskomplikowanym obliczeniom matematycznym, opartym na trygonometrii.

Znany jest kąt padania promieni lasera  $\alpha$  oraz orientacja czujnika względem projektora  $d$ . Położenie mierzonego punktu z wyznaczone zostaje na podstawie zarejestrowanego obrazu promienia lasera na powierzchni badanego obiektu (rys. 1). Skanery wykorzystujące laser i triangulację należą do jednych z dokładniejszych urządzeń tego typu. Laserowe czujniki optyczne dokonują pomiaru z bardzo dużej odległości, zachowując przy tym wielkość plamki (punktu pomiarowego) [3]. Zasada laserowej triangulacji (rys. 1) jest dobrym rozwiązaniem w przypadku wykonywania szybkich pomiarów o wysokiej dokładności oraz rozdzielczości. Dokładność pomiaru zależy od rozdzielczości elementu światłoczułego oraz odległości przedmiotu od źródła emitowanej wiązki światła. Błąd pomiaru podaną metodą wynosi  $\pm 0,05$  mm [2].



Rys.1. Metoda triangulacji optycznej [4]

Mała wartość błędu pomiarowego oraz czas wykonania pomiaru wskazuje na wybór metody triangulacyjnej. Ponadto, w celu pełnego zautomatyzowania pomiaru urządzenie powinno zawierać elementy ruchome (obrotowy stół i głowicę skanującą), które umożliwiają zmianę orientacji przedmiotu oraz urządzenia pomiarowego w przestrzeni.

Urządzenie skonstruowane w oparciu o powyższe spostrzeżenia powinno umożliwić uzyskanie położenia każdego interesującego punktu w przestrzeni według wzorów (1).

$$\begin{aligned}x_p &= x - n_x t \\y_p &= x - n_y t \\z_p &= x - n_z t\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie:

$$t = \frac{y}{n_y} \quad (2)$$

Uzyskujemy przestrzenne położenie punktu zaznaczonego na obiekcie przez wiązkę lasera w danej chwili czasu  $t$ . Realizowane skanery punktowe cechują się dużą szybkością wymiarowania jednego punktu. Prędkość digitalizacji całego obiektu jest wolna, ale wystarczająca w typowych zastosowaniach [1, 4].

W wyniku analizy projektowej stwierdzono, że skaner pracujący na zasadzie wykorzystania lasera punktowego oraz kamery cyfrowej powinien posiadać konstrukcję składającą się z obrotowego stołu pracującego w płaszczyźnie XY oraz głowicy skanującej, poruszającej się wzdłuż osi Z. Obrotowy stół, poruszający się w odpowiednio zaprogramowanej sekwencji, ma służyć do poruszania obiektem mierzonym w procesie skanowania, wykonywanym sekwencyjnie przez głowicę skanującą.

Głowica skanująca (dalmierz) składa się z lasera emitującego punktową wiązkę światła oraz kamery z matrycą typu CMOS, odpowiedzialną za rejestrację wyemitowanej wiązki. Całość stanowi układ pomiarowy, a zaimplementowane w urządzeniu oprogramowanie pozwoli na wykonywanie projekcji oraz rejestrację plamki światła na obiekcie mierzonym.

Wykonywanie ruchu stołu obrotowego zależeć będzie od przekładni ślimakowej, a poruszanie głowicy skanującej uzależnione będzie od mechanizmu (koła zębatego i pasa klinowego), zmieniającego moment obrotowy silnika krokowego na ruch liniowy. Elementy mechaniczne oraz elektroniczne zostały umieszczone w obudowie, składającej się z aluminiowej ramy, zapewniającej odpowiednią sztywność całego urządzenia, oraz bariery ochronnej wykonanej z nieprzeźroczystego szkła akrylowego. Bariera ochronna separuje promienie wyemitowane przez laser wewnątrz skanera od otoczenia zewnętrznego.

Urządzeniami wchodzącymi w skład skanera steruje mikrokontroler. Dobór rozdzielczości skanowania jest wykonywany się z poziomu komputera dzięki aplikacji typu GUI. Wizualizacja zmierzonej powierzchni odbywa się w aplikacji AutoCAD, wspomaganą przez program stworzony w języku Lisp (języku programowania wykorzystywanym w środowisku AutoCAD). Prace związane z budową urządzenia podzielono na trzy etapy: część mechaniczną, część elektryczno-elektroniczną oraz część programową. Ich realizację opisano w kolejnej części artykułu.

## 2. REALIZACJA PROJEKTU

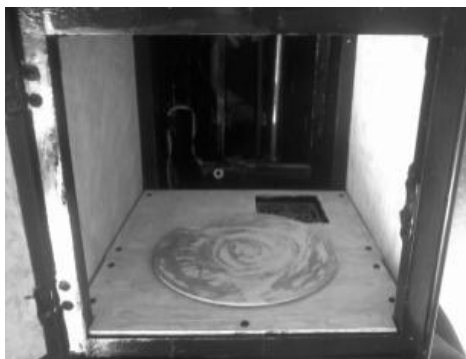
Aby wprawić elementy skanera w ruch, należało rozwiązać szereg problemów z różnych dziedzin: mechaniki, elektroniki, informatyki oraz automatyki. Wszystkie zaprojektowane, a następnie wykonane elementy wchodzące w skład budowy skanera muszą ze sobą współpracować oraz, przede wszystkim, spełniać zaplanowane funkcje.

W czasie projektowania urządzenia wykorzystano oprogramowanie, które pozwoliło na wykonanie projektu graficznego, rozmieszczenie elementów wewnątrz skanera, zaprojektowanie elektroniki (sterownik silników krokowych, moduł transmisji danych RS-232 i układ mikrokontrolera), oprogramowanie oraz obróbkę danych pomiarowych.

a)



b)



Rys. 2. Skaner: a) projekt, b) wnętrze komory skanowania

W celu przedstawienia sposobu digitalizacji 3D przy użyciu kamery i lasera zaprezentowana zostanie struktura oraz współpraca oprogramowania, pozwalająca na automatyczne uzyskanie danych pomiarowych, nazywanych chmurą punktów.

Aby spełnić zadania projektowe, stworzono w różnych środowiskach programistycznych trzy osobne, ale współpracujące ze sobą aplikacje:

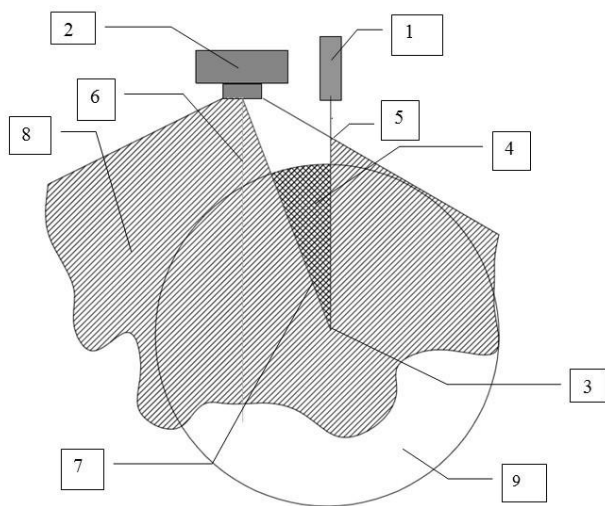
- oprogramowanie mikrokontrolera ATmega32, sterujące wszystkimi podzespołami skanera,
- oprogramowanie aplikacji będącej wizualnym komunikatorem użytkownika ze skanerem - GUI,
- oprogramowanie pozwalające na uzyskanie w aplikacji AutoCAD wirtualnej reprezentacji obiektu poddanego procesowi skanowania.

Aplikacje pozwalają na całkowite przejście przez proces skanowania, począwszy od zebrania informacji pomiarowych do uzyskania ich reprezentacji graficznej w środowisku AutoCAD.

Wynikiem współpracy powyższego oprogramowania jest sekwencyjny proces skanowania 3D z wykorzystaniem kamery oraz lasera.

W zrealizowanym projekcie laser oświetla badany przedmiot promieniem światła równoległym do osi optycznej kamery cyfrowej. Odbity promień lasera pada na matrycę CMOS i aktywuje odpowiednie piksele. Miejsce jego wystąpienia jest zależne od odległości pomiędzy przedmiotem, a laserem. Następnie, na podstawie zarejestrowanego obrazu określony zostaje centralny piksel odczytanej plamki, a jego pozycja w obrazie zostaje pomnożona przez stałą odległości, ustaloną podczas kalibracji dalmierza.

Na rysunku 3 przedstawiono orientacyjne rozmieszczenie elementów dalmierza w skonstruowanym skanerze:



Rys. 3. Dalmierz: 1 - laser, 2 - kamera CMOS, 3 - środek obrotowej podstawy i początek zakresu pomiarowego, 4 - zakres pomiarowy, 5 - emitowany promień lasera przecinający granicę widoczności kamery, 6 - oś optyczna kamery, 7 - odbity promień lasera, 8 - zakres roboczy kamery, 9 - obrotowy stół

Dzięki swojej konstrukcji, skaner umożliwia pomiar odległości wzdłuż jednej prostej, na odcinku wyznaczonym przez punkty 3 i 5 (rys. 3). Ponadto, uniemożliwia układowi optycznemu wykrywanie odbitych lub rozproszonych w różnych kierunkach fałszywych punktów pomiarowych. Maksymalna wartość odległości przy uwzględnieniu obszaru pracy kamery wynosi 110 mm i wynika z rozstawu ramy. Tym samym, ustanowiony zostaje maksymalny zakres pracy dalmierza, który podczas skanowania mieści się w obrębie walca o średnicy  $d = 220$  mm i wysokości  $h = 210$  mm.

Na podstawie pomiaru odbitego punktu, którego położenie określa się przedstawionymi powyżej zależnościami, można wykonać obliczenia w celu całościowego zwymiarowania przedmiotu. Jak wspomniano wcześniej, pomiar ten przeprowadzany jest sekwencyjnie. Uwzględniając sekwencje pomiaru oraz wykorzystując równania (1), opracowano algorytm bazujący na współrzędnych biegunowych:

$$P_p(x, y, z)$$

$$x = r \cos \alpha$$

$$y = r \sin \alpha$$

$$z = nZ_i$$

(3)

gdzie:

$r$  – odległość plamki odbitej od centrum globalnego układu współrzędnych,  $r_{MAX} = 110$  mm,

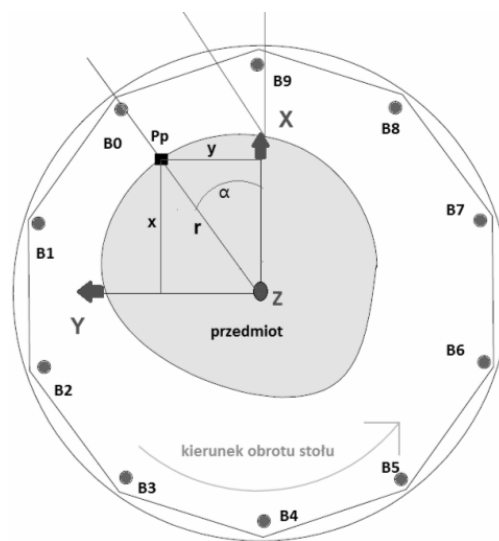
$n$  – liczba kroków głowicy skanującej w pionie,  $n_{MAX} = 210$  przy kroku 1 mm,

$Z_i$  – wartość jednego kroku posuwu,  $Z_{iMAX} = 1$  mm,

$i$  – krotność,

$\alpha$  – kąt, o jaki w każdym kolejnym kroku obraca się stół.

W związku z powyższym, globalny układ współrzędnych XYZ można przedstawić jak na rysunku 4.



Rys. 4. Sekwencje mechanizmu obrotowego

Punktem odniesienia, a zarazem początkiem globalnego układu współrzędnych jest środek obrotowego stołu. Na rysunku 4 zilustrowano proces obrotu stołu w kolejnych sekwencjach (B0-B9). Załóżmy, że głowica skanująca wykonuje  $n = 10$  kroków w osi Z z przesunięciem 10 mm. Po rozpoczęciu skanowania stół znajduje się w pozycji B0, głowica skanująca porusza się w pionie o dziesięć kroków co 10 mm, a dalmierz laserowy wykonuje pomiar dziesięciu odcinków o zmiennej długości  $r$ . Każdy zmierzony odcinek  $r$  jest miarą odległości skanowanego przedmiotu w danym momencie  $t$ , wyrażonym współrzędnymi  $x, y, z$ , przekształconymi programowo na współrzędne biegunowe (równania (3)), które określają punkt  $P_p$  (punkt w przestrzeni). Po osiągnięciu przez głowicę wysokości 110 mm, głowica skanująca powraca do pozycji wyjściowej. Następnie, stół obraca się o wartość kąta  $\alpha$  do pozycji B1 i proces ulega powtórzeniu, aż do osiągnięcia przez obrotowy stół pozycji B9.

Rozdzielczość skanowania wzrasta wraz ze zwiększeniem liczby kroków głowicy skanującej oraz liczby ustanowionych kroków B obrotu stołu o zadany kąt. Przedstawiona metoda pozwala na zmianę rozdzielczości od 414 do 75950 punktów pomiarowych w pełnym zakresie pomiarowym. Liczba punktów pomiarowych zależy od doboru parametrów sekwencji w aplikacji GUI.

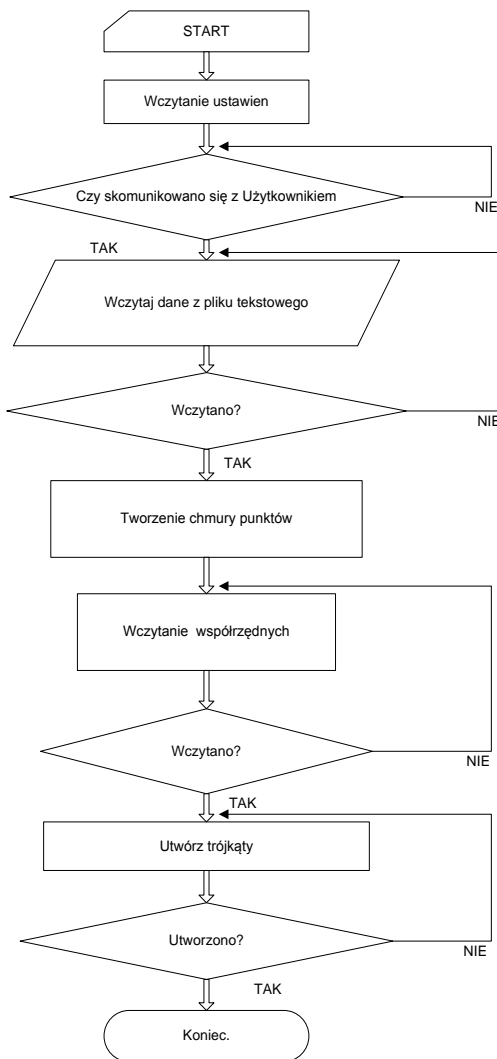
Opisany proces realizują wspólnie dwa programy: program mikrokontrolera (w języku C) oraz program sterujący GUI (w języku C#). Po zakończeniu etapu pomiarowego zebrana chmura punktów zostaje zapisana do pliku tekstowego. Plik wynikowy służy do dalszej obróbki w programie AutoCAD.

Aby wykonać odpowiedni program umożliwiającą wirtualną reprezentację przestrzenną zeskanowanego obiektu, należało posłużyć się zasadami tworzenia bryły powierzchniowej z wykorzystaniem metody triangulacji łączenia punktów (trzy punkty pomiarowe łączymy odcinkami). W wyniku tego otrzymujemy trójkąt, którego wierzchołki tworzą punkty pomiarowe.

Program przygotowano w języku Lisp. W algorytmie programu można wyróżnić cztery podstawowe funkcje:

- potwierdzenie komunikacji z użytkownikiem,
- wczytanie pliku tekstowego o rozszerzeniu (\*.txt) z lokalizacji wskazanej przez użytkownika,
- utworzenie listy filarów (filarem nazywamy każdą kolejną pozycję obrotowego stołu. Na rysunku 4. filary oznaczono symbolami B0-B9),
- utworzenie i wyświetlenie bryły powierzchniowej skanowanego obiektu.

Kolejne etapy wykonywania programu zobrazowano w następujący sposób:

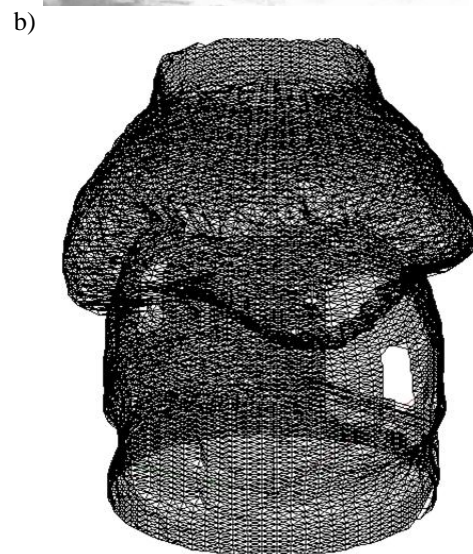


Rys. 5. Uproszczony algorytm programu Lisp

Czas trwania powyższego procesu zależy od liczby skanowanych punktów. Figura uzyskana z małej liczby punktów zostaje przedstawiona użytkownikowi już po kilku sekundach. Przy skanowaniu w maksymalnej rozdzielczości czas ten wydłuża się do kilkudziesięciu sekund.

### 3. PRZYKŁADOWE WYNIKI

Za pomocą skonstruowanego urządzenia możliwe jest otrzymanie bliskiej ideałowi, wirtualnej kopii powierzchni obiektu skanowanego. W zależności od doboru rozdzielczości, można uzyskać powierzchnię będącą wyłącznie zarysem kształtu (niskie rozdzielczości) albo stosunkowo dobre odwzorowanie (przy rozdzielczości 5x3; 5 stopni obrotu stołu i 3 mm posuwu głowicy). Maksymalna najwyższa rozdzielczość możliwa do uzyskania to 1x1. Należy jednak pamiętać, że charakteryzuje się ona bardzo długim czasem skanowania (kilkadziesiąt minut). Podczas testów utworzono wirtualne kopie powierzchni kilku obiektów. Przedmioty różniły się między sobą kształtem i rozmiarem, a także materiałem, z których je wykonano. W celu sprawdzenia dokładności odwzorowania powierzchni, przeprowadzono próby digitalizacji z różnymi rozdzielczościami. Efekty pracy urządzenia, wraz z fotografiami skanowanych przedmiotów przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



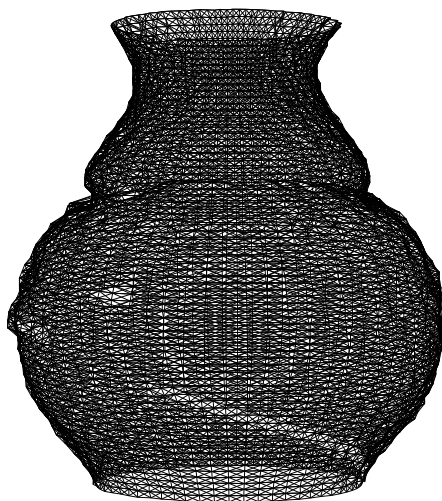
Rys. 6. Przykład 1: a) obiekt skanowany, b) siatka przestrzenna - rozdzielczość 5x2



a)



b)



Rys. 7. Przykład 2: a) obiekt skanowany, b) siatka przestrzenna - rozdzielczość 2x2

Obserwując rezultaty stwierdzono, że wyniki uzyskane przy pomocy skonstruowanego skanera 3D są zadawalające. Urządzenie pozwala na skanowanie obiektów obrotowych, np. wazonu lub rzeźby.

Skanowanie elementów o bardziej skomplikowanych kształtach przysparza wiele problemów, ponieważ odwzorowanie nie jest wystarczająco dokładne. Mimo to, uzyskany pomiar może posłużyć do dokończenia modelu wirtualnego przez projektanta. W przypadku obiektów o powierzchni silnie odbijającej lub pochłaniającej światło (np. obiekty barwy czarnej) zauważalną niedogodnością jest większy błąd pomiaru. Taki pomiar jest niedokładny, a utworzona płaszczyzna mało realistyczna. W związku z tym, zaprezentowane rozwiązanie charakteryzuje się

najlepszymi parametrami, gdy procesowi skanowania zostaje poddana bryła obrotowa (rys. 7) lub obiekt o nieskomplikowanych kształtach (rys. 6).

Zakres pomiarowy jest mierzony na odległości 110 mm od środka obrotowego stołu. Jeżeli punkt zostanie zwymiarowany poza tym obszarem, to oprogramowanie automatycznie przyrównuje go do zera, co w następstwie powoduje jego wyeliminowanie podczas tworzenia siatki w programie AutoCAD. Wykorzystanie środowiska CAD umożliwia utworzenie wirtualnej kopii powierzchni, a jej eksport do różnych formatów graficznych pozwala na edycję w innych aplikacjach i umożliwia wprowadzanie zaplanowanych zmian. Jest to zaletą zaproponowanego rozwiązania.

#### 4. PODSUMOWANIE

Parametry skonstruowanego urządzenia są satysfakcjonujące. Umożliwia ono wykonanie pomiarów danego elementu w różnych rozdzielczościach, co pozwala na dobór odpowiednich parametrów dogodnych dla użytkownika. Podczas wykonanych prób ustalono, że optymalna rozdzielczość mieści się w przedziale (5x2 ... 2x2) i umożliwia wykonanie stosunkowo szybkiego pomiaru przy zachowaniu wiernego odwzorowania próbkowanej płaszczyzny. Zaprezentowany skaner umożliwia wykonanie pomiaru, zobrazowanie wyników oraz ich edycje w środowisku graficznym typu CAD.

Budowę urządzenia zrealizowano przy wykorzystaniu niskich nakładów finansowych. Stosunek ceny do uzyskanych wyników jest zadowalający i motywuje do przeprowadzania dalszych badań.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Karboński K.: Podstawy rekonstrukcji elementów maszyn i innych obiektów w procesach wytwarzania, Politechnika Krakowska, Kraków 2008
2. Langbein F. C.: Beautification of Reverse Engineered Geometric Models, Cardiff University Department of Computer Science, June 2003, <http://www.langbein.org/fileadmin/research/solids/borg/beautification.pdf>, 15.05.2011
3. Várady T., Martin R. R., Cox J.: Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction, Computer Aided Design, May 1996, <http://www.ralph.cs.cf.ac.uk/papers/Geometry/RE.pdf>, 5.04.2011
4. Ratajczyk F.: Instrumenty optyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002

### SCAN 3D OBJECTS USING LASER AND CAMERA

**Key-words:** scanner 3D, optical triangulation

The aim of the article is to present the design of a low-priced 3D scanner. During digitization process, the device makes use of a program-controlled rotating table and a measurement head that consists of a point laser and a digital camera. Mechanical and programmed elements, which have been designed and used during booting, are also presented herein. The device in question enables to scan an object with the use of various resolutions as well as present its grid in CAD graphical environment, which allows for further processing.

