

Stanisław MIKULSKI*

METODY TRIANGULACJI LASEROWEJ W SKANERACH TRÓJWYMIAROWYCH

Skanery trójwymiarowe znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach nauki (m. in. medycynie, grafice komputerowej, architekturze) oraz przemyśle. Istnieje bardzo dużo różnorodność metod skanowania obiektów, a ich dobór zależy przede wszystkim od rodzaju badanego obiektu, a także jego umiejscowienia. Do często stosowanych metod należy gałąź metod triangulacji laserowej. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metody triangulacji laserowej. Opisano w niej układ pomiarowy. W szczególności praca ta rozpatruje metody triangulacyjne oparte jedynie o układ pomiarowy z ruchem obrotowym badanego obiektu. Wynikiem takiego pomiaru jest chmura punktów opisana w układzie współrzędnych prostokątnych. W ramach pracy zostaną scharakteryzowane przykładowe modele matematyczne laserowych skanerów triangulacyjnych.

1. PODZIAŁ METOD INŻYNIERII REKONSTRUKCYJNEJ

W inżynierii rekonstrukcyjnej istnieje znaczna różnorodność zjawisk fizycznych wykorzystywanych do pobrania informacji o kształcie badanego obiektu. Sama zasada pomiaru skanera trójwymiarowego o konkretne zjawisko fizyczne nie precyzuje dokładnie jego metody pomiaru, gdyż w praktyce każdy skaner stosuje charakterystyczną metodę przetwarzania sygnałów pomiarowych na końcowy wynik pomiaru. Dlatego właśnie istnieje duża grupa prac naukowych zajmujących się uporządkowaniem metod pomiarowych inżynierii rekonstrukcyjnej.

Najbardziej ogólnym i podstawowym podziałem metod pomiarowych jest podział na metody stykowe i bezstykowe. W metodach stykowych określenie kształtu badanego obiektu wykorzystuje bezpośredni kontakt głowicy stykowej z obiektem. Wyróżnia się tutaj także metody destruktywne polegające na krojeniu obiektu w plastry i w konsekwencji jego zniszczenie.

Znacznie większe znaczenie dla inżynierii rekonstrukcyjnej mają natomiast metody bezstykowe. Metody te dzielone są na prześwietlające oraz bazujące na odbiciach. Metody prześwietlające znalazły swoje zastosowanie przede wszystkim w medycynie, gdzie wykorzystywane są do bezinwazyjnego badania narządów wewnętrznych pacjenta. Jest to tomografia komputerowa oraz rezonans magnetyczny[1, 3].

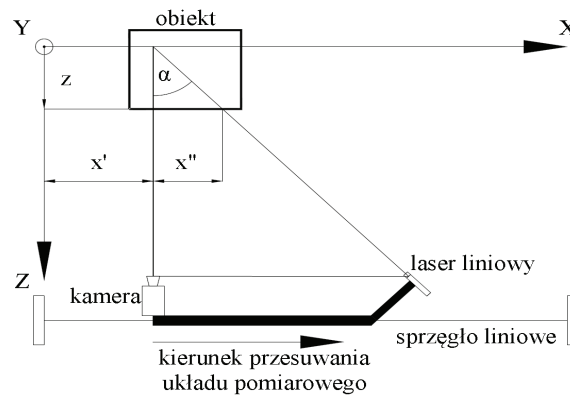
* Politechnika Poznańska.

Metody optyczne, do których zalicza się metody triangulacyjne są metodami bezstykowymi bazującymi na odbiciu światła od badanego obiektu i określeniu jego geometrii przy pomocy światłoczułego detektora. Dalszy podział metod optycznych jest uzależniony od źródła światła. W metodach optycznych pasywnych, wykorzystywana jest jedynie analiza obrazu obiektu z jednej lub wielu kamer. Do tych metod można zaliczyć fotogrametrię, która polega na analizie kształtu przy pomocy obrazu z kilku kamer, ustawionych w znanych położeniach. Celem zwiększenia efektywności takiego pomiaru, na badany obiekt nanoszone są specjalne znaczniki, które ułatwiają lokalizację punktu wspólnego obiektu na kilku różnych kamerach.

Aktywne metody optyczne polegają na projekcji na badany przedmiot określonego rodzaju światła i obserwacji światła odbitego. Metoda triangulacji laserowej polega na projekcji wiązki lasera. Znając odległość pomiędzy laserem i kamerą oraz kąt pomiędzy wiązką lasera, a płaszczyzną obrazu kamery można określić odległość punktu pomiarowego od obiektywu kamery. Pozyskana zostaje w ten sposób informacja o trzecim wymiarze obiektu, która w połączeniu ze współzrędnymi, obrazu daje pełne informacje przestrzenne o obiekcie. Jednym ze sposobów przyspieszenia pomiarów jest wyświetlenie na obiekcie linii lasera, dzięki temu przy pomocy jednego pomiaru (obrazu z kamery) układ pomiarowy może odczytać informację o punktach pomiarowych położonych na całej linii pomiarowej[1, 3].

2. METODA TRIANGULACJI LASEROWEJ

Układ pomiarowy każdej z metod triangulacji laserowej składa się ze źródła światła laserowego (punktowego lub w postaci linii), obiektu pomiarowego oraz odbiornika światłoczułego, najczęściej jest to kamera. W zależności od obiektu, zwłaszcza jego gabarytów oraz dostępności układ pomiarowy może być skonstruowany na kilka różnych sposobów. Podstawowym problemem projektowania każdego urządzenia pomiarowego jest określenie najbardziej odpowiedniego sposobu przesuwania wiązki światła laserowego po obiekcie. Można tu rozróżnić dwa podstawowe typy sterowania skanerem. Pierwszy typ skanerów to urządzenia, w których wiązka porusza się po nieruchomym obiekcie. Metoda taka sprawdza się najlepiej w przypadkach gdy interesuje nas obraz obiektu z określonej strony (np. odwzorowanie twarzy), jednak w sytuacjach gdy interesuje nas pełny obraz przestrzenny obiektu pomiary należy wykonać dla kilku położenia obiektu. Przykładowy schemat takiego urządzenia został przedstawiony poniżej. Układ pomiarowy składa się z lasera liniowego i kamery zamontowanych na ruchomym statywie. Znając stałą odległość pomiędzy źródłem światła, a kamerą oraz kąt pomiędzy płaszczyzną linii lasera, a płaszczyzną prostopadłą do obrazu kamery można odczytać informacje o głębokości obiektu w miejscu odbicia linii kamery od obiektu.



Rys 1. Schemat skanera trójwymiarowego mierzącego obiekt w układzie kartezjańskim XYZ

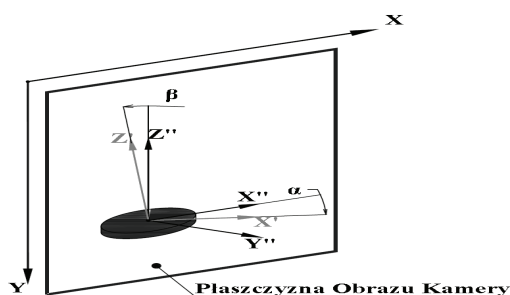
Otrzymany obraz można przekształcić na współrzędne przestrzenne przy pomocy następujących wzorów:

$$\begin{cases} X = x' + x'' \\ Y = k_Y y_{pic} \\ Z = ctg\alpha \cdot x'' \\ x'' = k_X x_{pic} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: X , Y , Z – są to współrzędne docelowego układu współrzędnych kartezjańskich, x' – położenie układu pomiarowego na sprężu liniowym, x'' – wynik pomiaru w kierunku osi X w jednostkach miary, x_{pic} , y_{pic} – współrzędne linii lasera odczytane z kamery w pikselach, k_X , k_Y – przeliczniki pikseli kamery na jednostki miary.

Drugi typ skanerów trójwymiarowych steruje położeniem obiektu względem lasera. Takie rozwiązanie związane jest najczęściej z komplikacją modelu matematycznego obiektu oraz mechanicznego układu pozycjonującego obiekt, daje też jednak większą pewność uzyskania poprawnych pomiarów.

Przykładem takiego skanera może być układ pomiarowy złożony z linii laserowej, kamery oraz tacki obrotowej na której znajduje się badany obiekt. Linia jest wyświetlana pionowo na obiekcie. Układ kamery i źródła światła jest nieruchomy, ruchoma natomiast jest taca obrotowa. Pomiar wykonywany jest po przesunięciu tacki obrotowej o stały kąt $d\theta$. Znając kąt α nachylenia pomiędzy płaszczyzną obrazu kamery, a płaszczyzną linii lasera oraz kąt β nachylenia płaszczyzny obrazu względem płaszczyzny tacki, istnieje możliwość zrzutowania współrzędnych obiektu na płaszczyźnie linii lasera rejestrowane przez kamerę, na płaszczyznę obrazu przechodzącą przez oś Z'' obrotu tacki. Sytuację tą przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Układy współrzędnych dla skanera z nieruchomym układem pomiarowym i tacką obrotową [2]:
gdzie: X, Y – układ współrzędnych obrazu kamery (w pikselach), X', Z' – układ współrzędnych
leżących na płaszczyźnie linii lasera, nachylonej pod kątem α do płaszczyzny obrazu,
 X'', Y'', Z'' – docelowy układ współrzędnych nachylony pod kątem β do płaszczyzny obrazu

Punkty pomiarowe takiego układu można opisać przy pomocy wzorów:

$$\begin{cases} z'' = y_0 - (y - (x' - x_0)) \tan \alpha \\ x'' = x - x_0 + (y' - y_0) \tan \beta \\ y'' = 0 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie: y_0 i x_0 – oznaczają współrzędne piksela odpowiadającego środkowi tacki obrotowej.

Łączenie wyników pomiarów z poszczególnych obrotów tacki dokonuje się przez obrót otrzymanych powyżej punktów pomiarowych o kąt θ względem osi Z'' . Macierz obrotu względem osi Z'' ma postać:

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

stąd wzory końcowe:

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (4)$$

W ten sposób otrzymane wyniki tworzą wstępną chmurę punktów, przedstawiającą badany obiekt.

3. DETEKCJA LINII LASERA

Proces detekcji linii lasera jest niezwykle istotnym elementem pracy skanera. Pierwszym problemem napotykanym w procesie identyfikacji linii lasera jest jej szerokość. Większość modeli matematycznych w procesie analizy zakłada, że linia

lasera jest albo nieskończenie cienka, albo w każdym przypadku jej szerokość wynosi 1 piksel. W rzeczywistych układach linie zawsze mają szerokość od kilku do kilkunastu pikseli i wymiar ten jest zmienny. Różnice w szerokości linii lasera wynikają z dwóch czynników. Pierwszy (stały, niezależny od badanego układu) to niedokładność układu optycznego rozszczepiającego laser punktowy na linię laserową. Drugim czynnikiem jest kąt pod jakim światło lasera pada na powierzchnię obiektu.

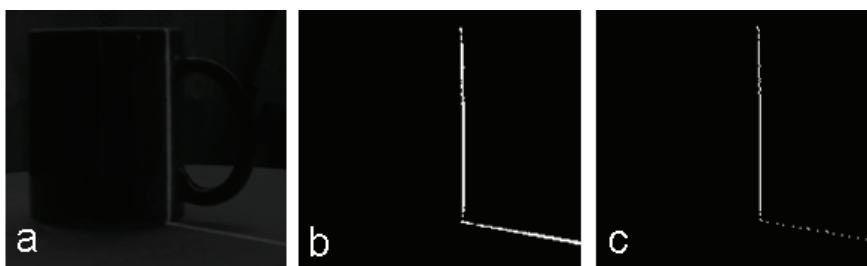
Na początku procesu detekcji linii należy wyznaczyć luminancję każdego piksela obrazu kamery. Następnie obraz zostaje poddany progowaniu, jest to proces transformacji obrazu zgodnie ze wzorem :

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & L(x, y) > t \\ 0, & L(x, y) \leq t \end{cases} \quad (5)$$

Powyższy wzór przedstawia progowanie z progiem pojedynczym, nazywane binaryzacją. Czasami stosowane jest progowanie z progiem wielokrotnym np. z progiem podwójnym, opisane wzorem:

$$B(x, y) = \begin{cases} 0, & L(x, y) > t_2 \\ 1, & t_2 \geq L(x, y) > t_1 \\ 0, & L(x, y) \leq t \end{cases} \quad (6)$$

W wyniku progowania otrzymujemy obraz linii złożony z pikseli białych (piksele o wartości 1) oraz obraz tła złożony z pikseli czarnych. Tak powstałą linię lasera należy uśrednić do szerokości jednego piksela. Ostatecznie współrzędne pikseli należących do uśrednionej linii lasera zostają przeliczone przy pomocy wzorów (2) i (4) na współrzędne obiektu. Poszczególne etapy detekcji linii przedstawia rysunek 3 [4].



Rys 3. Detekcja linii lasera: a) obraz początkowy b) binaryzacja obrazu c) uśrednienie linii lasera

4. POMIARY WYKONANE PRZY POMOCY METODY TRIANGULACJI LASEROWEJ

Przedstawiony w rozdziale 2 model matematyczny skanera stosującego metodę triangulacji laserowej, posłużył do zbudowania układu pomiarowego. Układ ten przedstawiony jest na rysunku 4. W jego skład wchodzi wysokiej rozdzielczości

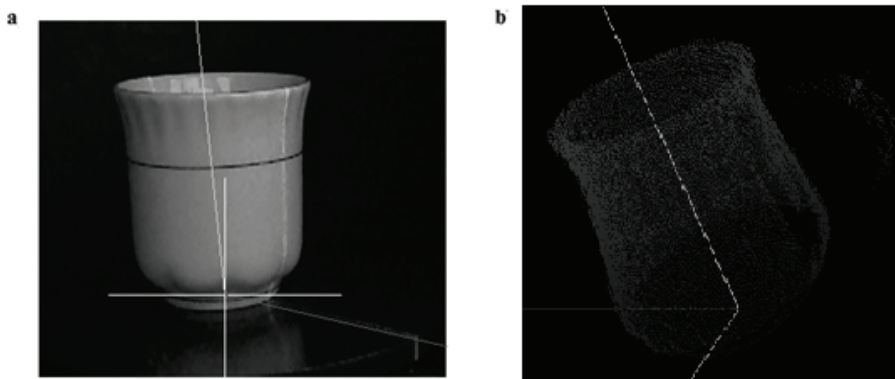
kamera (z maksymalną rozdzielczością 1920 na 1080 pikseli), laser liniowy koloru czerwonego, taca z układem napędowym, oraz obudowa. Do sterowania tacką obrotową wykorzystano silnik krokowy o kroku $1,8^\circ$, co pozwala uzyskać 200 pomiarów na pełny obrót. Taka rozdzielczość pomiarów nie była zadowalająca dlatego do sterowania silnika zastosowano sterowanie mikrokrokowe o podziale kroku $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$ i $1/32$. Dało to możliwość zwiększenie ilości pomiarów na obrót tacki maksymalnie do 6400 pomiarów.



Rys 4. Obraz układu pomiarowego [2]

W ramach projektu stworzono także program komputerowy sterujący silnikiem krokowym oraz analizujący obraz z kamery. W programie można jednocześnie ustawić rozdzielczość kamery, dobrać ilość kroków oraz wyświetlić powstałą, w wyniku przetworzenia obrazu z kamery, chmurę punktów. Dodatkowo w trakcie pomiarów w programie wyświetlony jest podgląd obrazu z kamery. Program opracowano w środowisku Microsoft Visual Studio C# 2010 z zastosowaniem technologii DirectX 10 (prezentacja obiektu).

Na rysunku 5 przedstawiono pomiary przykładowego obiektu. Wyniki pomiarów świadczą o poprawności zastosowanej metody pomiarowej.



Rys 5. Wyniki pomiarów przykładowego obiektu [2]

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono obszar zastosowania metody skanowania obiektów. Opisano klasyfikację tych metod oraz podstawowe zjawiska fizyczne, na których dana grupa metod pomiarowych bazuje. W szczególności skupiono się na grupie metod triangulacji laserowej. Przedstawiono przykładowe modele matematyczne wykorzystując triangulację laserową, dla układu kartezjańskiego XYZ oraz układu z ruchem obrotowym obiektu.

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki pomiarów i ich analizę dla stanowiska pomiarowego opartego o metodę triangulacji laserowej opisaną w artykule. Otrzymane wyniki świadczą o poprawności metody. Wyznaczona na podstawie pomiarów obiektu wzorcowego dokładność pomiarów wyniosła 0.1 mm, przy rozdzielczości obrazu kamery 1200 x 800 pikseli.

LITERATURA

- [1] Karbowski K., Reconstruction of pictures in reverse engineering system, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Vol. 29, No. 3, 2005, s. 35-46.
- [2] Latuszek B., Mikulski S. "Projekt i realizacja trójwymiarowego skanera laserowego" – Praca Magisterska 2012.
- [3] Varady T., Martin R.R., Cox J., *Reverse engineering of geometric models – an introduction*, *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, 1997, s. 255-268.
- [4] Wojnar L., Majorek M., *Komputerowa analiza obrazu*, Fotobit Design, Kraków 1994.

TRIANGULATION METHOD FO THREE-DIMENSIONAL LASER SCANNERS

Three-dimensional scanners are becoming widely used in various fields of science (among others. Medicine, computer graphics, architecture) and industry. There are a variety of methods for scanning objects and their selection depends mainly on the type of the object and its location. To frequently used methods to branch laser triangulation methods. The objectives of this work is to present a method of laser triangulation. It was described in the measurement system. In particular, this work examines triangulation method based only on the measurement system of the rotary motion of the object. The result of such a measurement is a cloud of points described in the Cartesian coordinate system. The work will be characterized examples of mathematical models of laser triangulation scanner.