

**Zbigniew GOMÓŁKA, Bogusław TWARÓG**

Uniwersytet Rzeszowski, Polska

## **Analiza dokładności technologii pomiarowej dla skanerów światła spójnego i strukturyzowanego**

### **Optyczne metody digitalizacji obiektów 3D**

Optyczne metody pomiaru kształtu są narzędziem do opisywania powierzchni obiektów 3D. Ze względu na wykorzystywane techniki pomiarowe metody te pozwalają na osiągnięcie dużej rozdzielczości skanowanej sceny, zapewniając regulowany zakres pomiarowy jej objętości. Dostępne są różne techniki do wykonania pomiarów odległości, jak również badania makro- i mikrostruktury badanego obiektu, tj. metody polowe oraz metody punktowe (fotogrametria, triangulacja laserowa). Metody punktowe posiadają drobne wady, do których zalicza się m.in. ograniczenie w zakresie liczby punktów, jakie powinny być przetwarzane w momencie automatycznej obróbki pobranych danych, a także zbyt długi czas, który jest poświęcony ich przetwarzaniu. Znacznie większą grupę optycznych sposobów badań kształtu obejmują metody polowe. Ich jedną z najważniejszych zalet jest dostarczanie informacji o kształcie obiektu z całej powierzchni obrazu w tym samym czasie. Sposoby pomiaru mogą wykorzystywać np. analizę intensywności pola prążkowego, które jest projektowane na powierzchnię warstwę badanego obiektu.

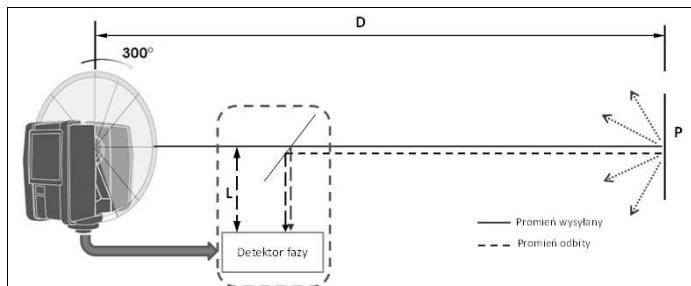
### **Specjalistyczne urządzenia skanujące**

Skanery to dość duża i różnorodna grupa urządzeń, w której można wyróżnić skanery stykowe i bezstykowe. Urządzenia stykowe charakteryzują się tym, iż pomiar dokonywany jest poprzez głowicę pomiarową umieszczoną na precyzyjnym ramieniu posiadającym spory zakres swobody. Dokładność otrzymanego pomiaru waha się w granicach od 0,25 do 0,005 mm. Pomiar ogranicza się do akwizycji danych na zasadzie zbioru punktów w charakterystycznych miejscach. Takie skanery posiadają pewne ograniczenia co do wielkości skanowanego obiektu oraz braku możliwości wykorzystania ich np. w dziedzinie kryminalistyki. Natomiast zaletą jest prosta budowa oraz brak skomplikowanego oprogramowania. Drugą grupę reprezentują skanery bezstykowe, których działanie polega na otoczeniu przedmiotu wiązką laserową lub światłem strukturyzowanym, a następnie na analizie zarejestrowanego obrazu lub obrazów. Wy różnić tu można grupę skanerów optycznych, gdyż charakteryzują się one dużą dokładnością pomiarową oraz szybkością działania. Najczęściej stosowanymi urządzeniami pomiarowymi są skanery laserowe oraz prążkowe, w których wyko-

rzystuje się technikę zniekształceń linii w formie promienia świetlnego oświetlającego skanowany obiekt. Fundamentalną różnicą między technikami skanowania obiektu za pomocą wiązki laserowej a za pomocą światła strukturyzowanego jest fakt występowania w czasie jednej sekwencji tylko jednego prążka danych w przypadku oświetlenia laserowego, zaś dla skanera wykorzystującego światło strukturyzowane występuje cały zbiór prążków włącznie z danymi pomiarowymi.

### Charakterystyka naziemnego skaningu laserowego

Skanery laserowe zbudowane są głównie ze źródła promieniowania (laser), które jest nośnikiem danych, oraz ruchomego lustra kierującego wiązkę w odpowiednim kierunku.

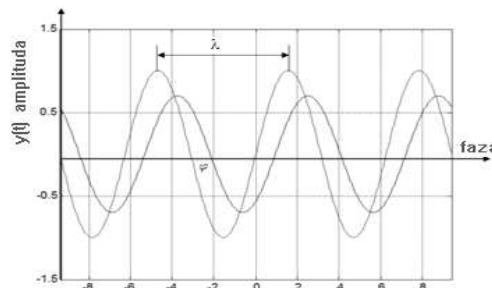


Rys. 1. Pomiar odległości w chwili  $t$

Na rozdzielczość oraz dokładność pomiaru ma wpływ wiązka lasera, która jest rozbieżna, a jej średnica zwiększa się wraz ze wzrostem odległości. Współrzędne biegunowe są przeliczane na kartezjańskie, natomiast współrzędne punktów obliczane są według zależności:

$$\begin{aligned} x &= D \cos \theta \cos \alpha \\ y &= D \cos \theta \sin \alpha \\ z &= D \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $D$  – odległość od skanowanego punktu,  $\theta$  – pionowy kąt,  $\alpha$  – poziomy kąt.



Rys. 2. Przesunięcie fazowe  $f$  sygnału odbitego

Oprócz współrzędnych rejestrowana jest jeszcze kolejna wartość odpowiadająca intensywności sygnału powracającego do skanera. Intensywność ta zależy od materiału (rodzaj, kolor, chropowatość), od którego wiązka jest odbijana. Skanery laserowe mogą różnić się systemem obliczania odległości – tzw. system elektryczny (impulsowy lub fazowy) oraz optyczny (triangulacyjny). Wykorzystany w badaniach system fazowy polega na pomiarze różnicy fazy między sygnałem wysyłanym a odbieranym. Jest to możliwe dzięki sinusoidalnej postaci światła laserowego. Odległość tę można opisać zależnością:  $d = (N\lambda + \varphi) / 2$ , w której  $\lambda$  – długość fali,  $\varphi$  – przesunięcie fazowe,  $N$  – wielokrotność długości fali. Dokładność w laserowych systemach skanujących uwarunkowana jest precyzją wyznaczania odległości oraz kątów. Uzależnione jest to od szeregu parametrów, m.in. warunków atmosferycznych, chropowatości powierzchni obiektu, zdolności poszczególnych materiałów do odbijania światła, odległości obiektu od skanera, a także samej jego jakości i funkcji.

### Wybrane zagadnienia z analizy obrazów prążkowych

Analiza obrazu prążkowego opiera się na kodowaniu informacji o badanym procesie lub obiekcie w rozkładzie intensywności  $I(x, y)$  i dotyczy wszystkich metod interferometrycznych. W większości systemów pomiarowych mamy do czynienia ze zmianami intensywności w przestrzeni mającymi charakter sinusoidalny, stąd też wzór opisujący analizę interferogramu ma postać:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (2)$$

gdzie:  $a(x, y)$  – wartość jasności tła w punkcie,  $b(x, y)$  – kontrast w punkcie,  $\varphi(x, y)$  – rozkład fazy,  $I(x, y)$  – wartość jasności w punkcie.

Analiza interferogramu składa się z dwóch podstawowych etapów: obliczeniu modulującej intensywność obrazu funkcji fazy  $\varphi(x, y)$  oraz przeskalowania do szukanej wielkości fizycznej  $h(x, y)$  fazy. Mierzony rozkład intensywności  $I(x, y)$  nie pozwala jednak na odtworzenie fazy, ponieważ mierzona funkcja fazy jest przesłaniana przez dwie nieznanne funkcje: jasności tła  $a(x, y)$  i kontrastu interferogramu  $b(x, y)$ , a więc jedno równanie z trzema niewiadomymi. Natomiast parzystość funkcji *cosinus* powoduje nieoznaczoność znaku fazy  $\cos(\varphi) = \cos(-\varphi)$ , a okresowość funkcji fazy jest określona przez  $\text{mod}(2\pi)$ , co powoduje ograniczenie zakresu wyniku.

W grupie metod intensywnościowych jako wielkość opisującą obraz przyjmuje się funkcję jasności  $I(x, y)$ , na podstawie której wykonuje się detekcję linii osiowych, czyli linii grzbietowych prążków. Szkielet mapy warstwicznej badanego obiektu tworzą wyszukane z obrazu lokalne minima i maksima funkcji

jasności. Istnieją 3 grupy metod detekcji linii osiowych. Są to metody: ścieniania brzegów prążków, gradientowo statystyczne oraz filtrów laplasjanowych.

W grupie metod fazowych istotą analizy obrazu prążkowego i głównym założeniem jest fakt, że informacja o mapie warstwicznej obiektu zawarta jest w fazie wydobywanej z mierzonej funkcji jasności. Na podstawie metody dyskretnej zmiany fazy zakłada się, że:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2\pi f_0 x] \quad (3)$$

gdzie:  $2\pi f_0 x$  opisuje prążki pionowe pochodzące od siatki dyfrakcyjnej lub generowane przez odpowiednie urządzenie projekcyjne, tzw. prążki pasożytnicze. W związku z obecnością 3 niewiadomych należy wykonać co najmniej 3 pomiary w formie dyskretnej, uwzględniając krokowo zmianę fazy w każdym z pomiarów. Rozkład fazy oblicza się poprzez wyliczenie pierwszych sinusowych i kosinusowych harmonicznych w szeregu Fouriera. Do obliczeń wykorzystuje się zależności:

$$\alpha_1(x, y) = \sum_{n=0}^k I_n(x, y) \cos\left(\frac{2\pi n}{k+1}\right), \quad \beta_1(x, y) = \sum_{n=0}^k I_n(x, y) \sin\left(\frac{2\pi n}{k+1}\right) \quad (4)$$

gdzie:  $I_n(x, y)$  – wartość jasności w punkcie zmierzona w  $n$ -tym pomiarze,  $k$  – liczba pomiarów przy zmianach fazy.

Funkcja fazy liczona jest z:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{\beta_1(x, y)}{\alpha_1(x, y)}\right) \quad (5)$$

Jeżeli zastosuje się liczbę przesunięć fazy ustaloną o wartość np.  $0,5\pi$ , uzyskuje się uproszczenie wzoru w postaci:

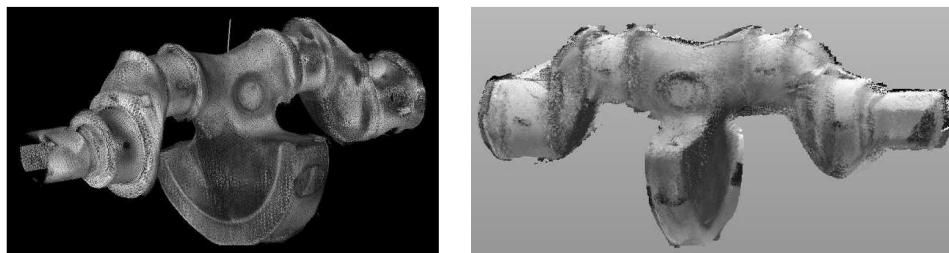
$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (6)$$

gdzie:  $I_1, I_2, I_3, I_4$  – to jasności kolejnych obrazów po zmianie fazy.

### Pomiary i analiza otrzymanych modeli 3D

Do celów porównania dwóch różnych technik skanowania 3D wykorzystano samochodowy silnikowy wał korbowy, którego charakterystyczna budowa oraz wielkość dały możliwość zaobserwowania istoty skaningu wiązką światła strukturyzowanego i spójnego. Przed wykonaniem pomiarów dla każdego z użytych urządzeń dobrano objętości pomiarowe oraz odpowiednie parametry skanowania, tj. określenie odległości pomiaru, miejsca jego wykonania, rozdzielczości wykonywanego pomiaru, obszaru skanowania. Skanowany obiekt pokryto środkiem matującym, który znacząco eliminuje szkodliwy efekt pojawiania się refleksów na elementach błyszczących obiektu.

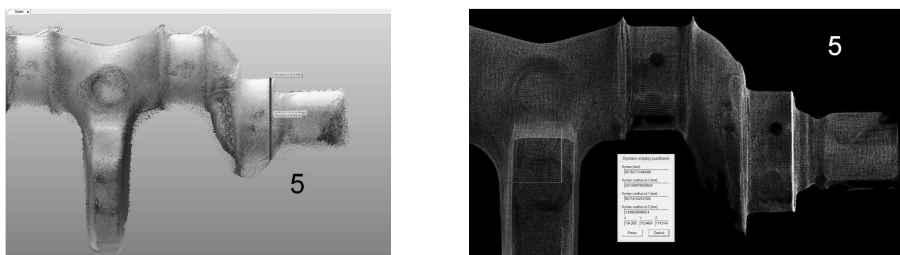
Wykorzystując skaner światła strukturyzowanego, otrzymano trójwymiarową chmurę punktów odzwierciedlającą skanowany model (rys. 3a).



**Rys. 3. Trójwymiarowy obiekt otrzymany z wykorzystaniem skanera światła:**  
a) strukturyzowanego oraz b) laserowego

Kolejno uzyskano model 3D obiektu z wykorzystaniem skanera laserowego (rys. 3b), dokonując 6 pomiarów ze zmiennych pozycji wokół przedmiotu z wykorzystaniem punktów referencyjnych. Oczyszczono otrzymaną chmurę punktów ze zbędnych elementów oraz nadano odpowiednią kolorystykę, która jest dokładnym odzwierciedleniem skanowanych obiektów.

Wykorzystane środowiska do łączenia chmur punktów posiadają możliwość opracowania pomiarów długości między wybranymi elementami. W celu porównania dokładności technik skanowania przeprowadzono pomiary rzeczywiste detali obiektu badanego, a następnie porównano je z otrzymanymi podczas procesu skanowania wynikami. Dokładność pomiarowa zastosowanego skanera światła strukturyzowanego firmy SmartTech sięga od kilku do kilkunastu mikrometrów, zaś w przypadku skanera laserowego wartości podawane są w przeliczeniu do jednego milimetra. W związku z powyższym zaokrąglono otrzymane wyniki do dwóch miejsc po przecinku. Zestawiono charakterystyczne miejsca na wale silnikowym, które zostały zmierzone za pomocą narzędzia pomiarowego w programie Mesh3D oraz Faro SCENE, a także podręcznej suwmiarki. Wyniki otrzymanych pomiarów zaprezentowano w tabeli 1. Na rys. 4 przedstawiono jeden z wybranych elementów mierzonych.



**Rys. 4. Pomiar średnicy czopu wału korbowego w programie: a) Faro SCENE  
oraz b) MESH 3D**

Tabela 1

## Wyniki pomiarów wybranych elementów wału korbowego

Nr pomiaru	Wynik pomiarów (mm)		
	Suwmiarka	Mesh3D	Faro Scene
Odległość pomiędzy czopami głównymi (nr 1)	71,95	71,87	73,00
Szerokość powierzchni czopu korbowego (nr 2)	30,10	30,24	30,00
Średnica czopu korbowego (nr 3)	54,05	54,16	53,00
Szerokość przeciwiężaru wału (nr 4)	24,65	25,21	21,00
Średnica czopu głównego (nr 5)	50,85	50,78	51,00

Skaner światła laserowego przeznaczony jest przede wszystkim do wykonywania pomiarów dużych powierzchni, takich jak struktury budynków czy kształty elementów konstrukcyjnych. Skanery te przystosowane są do tworzenia wizualizacji i dokumentacji przedmiotów 3D dla systemów typu CAD. Mimo doboru odpowiednich parametrów w ustawieniach urządzenia skaner nie jest w stanie przedstawić odwzorowania wału silnikowego tak dokładnie jak podczas wykonywania pomiarów z wykorzystaniem skanera światła białego, który dzięki możliwości pracy w dwóch trybach rozdzielczości pozwalających na optymalizację ilości pobieranych danych jest w stanie dokładniej odwzorować dany obiekt.

## Literatura

- Dybała M. (2013): *Integracja i spójność modeli w inżynierii odwrotnej: wybrane aspekty technicznych i medycznych zastosowań Reverse Engineering*, Wrocław
- Gomółka Z. (2000): *Sieci neuronowe w analizie obrazów prążkowych*, rozprawa doktorska, Kraków.
- Inglot A. (2015): *Digitalizacja i wizualizacja 3D budynku z wykorzystaniem technologii skanowania 3D*, praca inżynierska, Rzeszów.
- Kawa Ł. (2015): *Digitalizacja wału korbowego silnika spalinowego z wykorzystaniem skanerów światła spójnego i strukturyzowanego*, praca inżynierska, Rzeszów.
- Patorski K., Kujawińska M., Sałbut L. (2005): *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*, Warszawa.
- Mokrzycki W.S. (2010), *Wprowadzenie do przetwarzania informacji wizualne. Percepcja, akwizycja, wizualizacja*, Warszawa.
- Rychlik M. (2007): *Skanery – wrota do wirtualnego świata*, Warszawa.

## Streszczenie

W artykule przedstawiono przykład porównania jakości pomiarów obiektów trójwymiarowych za pomocą dwóch typów urządzeń skanujących: skanera światła spójnego z wiązką laserową oraz urządzenia skanującego wykorzystującego

strumień światła strukturyzowanego. W ramach analizy porównawczej przeprowadzono skanowanie wału korbowego w celu oszacowania dokładności pomiarowej obu skanerów.

**Słowa kluczowe:** restytuowanie scenarii 3D, skaner światła spójnego, skaner światła strukturyzowanego, chmura punktów, przesunięcie fazowe.

## **The Accuracy Measurement Technology Analysis for Scanners of Coherent and Structured Light**

### **Abstract**

The article presents an example of comparative measurements of three-dimensional objects using two types of scanning devices: coherent light scanner with a laser beam and structured light scanning device. As part of a comparative analysis the scan of the crankshaft was performed in order to assess the accuracy of measurement for both scanners.

**Keywords:** 3D scenery restitution, coherent light scanner, a structured light scanner, point clouds.