

**Sławomir ZATOR, Paweł MICHALSKI**POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROWNI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH,  
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole**Możliwości wykorzystania skanera laserowego do pomiarów precyzyjnych****Dr hab. inż. Sławomir ZATOR**

Profesor na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. Autor i współautor ponad 170 publikacji, w tym 2 monografii i 2 książek. Członek Komisji Metrologii i Komisji Elektroniki Oddziału PAN w Katowicach. Jego działalność naukowa obejmuje miernictwo przemysłowe, w tym pomiary przepływów cieczy z wykorzystaniem anemometrii laserowej oraz diagnostykę instalacji i konstrukcji przemysłowych pod kątem ich deformacji z wykorzystaniem hybrydowych technik pomiarowych.



e-mail: s.zator@po.opole.pl

**Mgr inż. Paweł MICHALSKI**

Ukończył studia w 2010 r. na Politechnice Opolskiej na kierunku informatyka o specjalności Komputerowe Wspomaganie Projektowania. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.



e-mail: p.michalski@doktorant.po.opole.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania stacjonarnego skanera laserowego do wykonywania pomiarów precyzyjnych. Wykonano analizę wpływu zagęszczenia punktów w obszarze, przez zwiłokrotnienie skanowania, na niepewność pomiaru przesunięcia płaszczyzny. Otrzymane dane porównano z wartościami dostarczonymi przez producenta urządzenia. Na bazie przeprowadzonych analiz zaprezentowano możliwości zastosowania stacjonarnego skanera laserowego do pomiaru współosiowości elementów.

**Słowa kluczowe:** Skanowanie laserowe, pomiary precyzyjne, pomiar odległości.

**Possibilities of using a laser scanner for precise measurements****Abstract**

In this paper possibilities of using a desktop laser scanner for precise measurements are presented. Test parameters of the laser scanner for verification of the obtained results are given. In Section 3 the data structure obtained from the scan is shown. There is performed analysis of the accuracy of measuring the distance to the plane and the influence of local density of points in the scan. The data is represented as a single line which was scanned ten times from one scanner position. For the single scan data line an approximation was made using the linear regression method. The data obtained were compared with the values provided by a manufacturer. There is shown the difference between a dual scan and multiple scans performed independently, presenting the potential of both methods. In addition, the paper describes the applicability of a desktop laser scanner to measurements of the misalignment of components. There are also given limitations of application of the test scanner surface structure resulting from a test object.

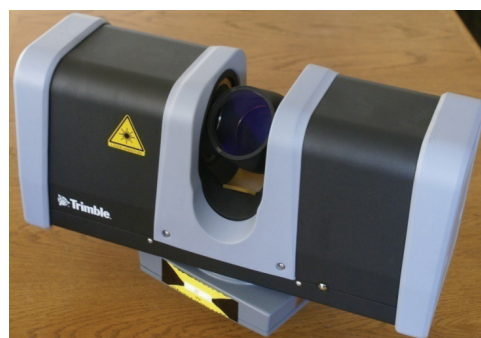
**Keywords:** laser scanning, precise measurements, distance measurement.

**1. Wstęp**

Aktualnie techniki skaningu laserowego są jedną z szybciej rozwijających się dziedzin metrologii. Urządzenia obecnie dostępne na rynku generują zbiory danych w postaci chmur punktów, z niepewnością (podawaną przez producentów) dochodzącą do dziesiątych części milimetra w odległości około 10 m. Techniki skaningu laserowego mogą znaleźć zastosowanie praktycznie we wszystkich pomiarach, w których istotna jest rekonstrukcja powierzchni obiektu np. w budownictwie [1] czy podczas wykonywania inwentaryzacji instalacji technicznych [2]. Podejście tak rozległej akwizycji niesie za sobą problem późniejszego przetwarzania uzyskanych danych. Chmury punktów rozległych obiektów mogą zawierać nawet kilkanaście mln punktów co komplikuje proces przetwarzania. Niepoddana obróbce chmura punktów dla większości aplikacji jest zbyt duża aby można ją było swobodnie przetwarzać [3]. Jednak przy użyciu dedykowanego oprogramowania może ona posłużyć do wykonywania prostych pomiarów obiektów, wizualizacji obiektu lub jego analizy pod kątem zgodności stanu faktycznego z projektowym [4].

**2. Badany skaner**

Pomiar geometrii obiektu został wykonany przy użyciu skanera laserowego Trimble FX zaprezentowanego na rys. 1. Urządzenie wykonuje pomiar odległości metodą przesunięcia fazowego wiązki laserowej.



Rys. 1. Zdjęcie skanera laserowego Trimble FX  
Fig. 1. Photograph of the Trimble FX laser scanner

W tab. 1 przedstawiono istotniejsze parametry charakteryzujące badany skaner z punktu widzenia realizowanych badań.

Tab. 1. Parametry badanego skanera Trimble FX  
Tab. 1. Parameters of the Trimble FX scanner

Parametr	Wartość
Pole widzenia	360° x 270°
Zasięg (pojedynczy skan)	60 m (refleksyjność 50%)
Zasięg (podwójny skan)	80 m (refleksyjność 50%)
Szybkość skanowania	216 000 punkt/s
Typowy czas skanowania	5 min
Niepewność pomiaru odległości pojedynczy skan podwójny skan	0,6 mm dla 11 m 0,45 mm dla 11 m
Średnica wiązki	2,3 mm dla 5 m 16,0 mm dla 46 m

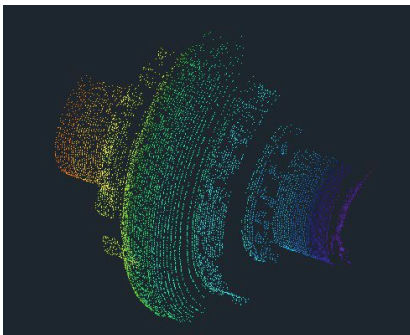
**3. Dane pomiarowe**

Dane pozyskane ze skanerów laserowych przyjmują postać chmury punktów, uporządkowanych kolejno wg współrzędnych. Każdy z punktów, w zależności od możliwości skanera, określony jest przynajmniej przez 3 współrzędne przestrzenne względne, w układzie kartezjańskim, przeliczone z układu sferycznego, oraz względną wartość intensywności odbitej wiązki. Istnieje możliwość wzbogacenia informacji pojedynczego punktu o wartości dodatkowe np. koloru RGB odpowiadającą odwzorowywanemu punktowi. Informację o barwie pozyskuje się z kamer bądź aparatów cyfrowych sprzężonych ze skanerem bądź pracujących niezależnie.

leżnie. Dane eksportowane ze skanera zapisywane są w formacie kodowanym *tzs*, wymagającym dedykowanego oprogramowania. Istnieje możliwość konwersji danych i zapisana ich w pliku tekstowym ASCII, w którym kolejne wiersze opisują współrzędne punktów rozdzielonych separatorami, co pozwala manipulować danymi bez dedykowanego oprogramowania. Skaner wykonuje pomiary obracając cały korpus o zadany kąt w płaszczyźnie poziomej, natomiast wirujące w płaszczyźnie pionowej lustro kieruje wiązkę w zadany obszar. Wynikiem takiego działania są dane pomiarowe w postaci punktów leżących na przecięciu pionowych płaszczyzn z obiektem. W przedstawionej pracy przedmiotem analizy była pojedyncza linia skanu rzutowana wielokrotnie na tę samą płaszczyznę. Dane punktów leżących na pojedynczej linii skanu można odfiltrować ręcznie z pliku danych, jednak dla dużej ilości danych zawartych w chmurze punktów proces ten jest mało precyzyjny, a w przypadku kilku skanów wskazanie dokładnie tej samej linii na kilku skanach jest często problematyczne. Dla potrzeb badań napisano oprogramowanie, które w szybki i precyzyjny sposób na bazie obliczania kątów pomiędzy punktami a położeniem skanera generuje pojedynczą wybraną linię.

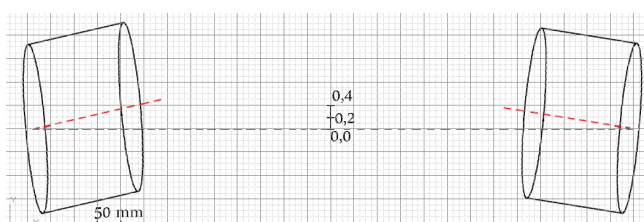
#### 4. Specyfika i cel badań

Celem prowadzonych badań była ocena możliwości podniesienia dokładności pomiarów położenia obiektów poprzez zwiększenie liczby skanów obiektu z jednej bazy w stosunku do skanu pojedynczego. Do określenia zmiany położenia obiektu wymagana jest duża powtarzalność pomiarów, rozumiana np. jako zgodność ze sobą wyników kolejnych pomiarów tej samej wielkości wykonanych w tych samych warunkach. Badania prowadzono głównie w celu stwierdzenia możliwości uzyskania dużej powtarzalności pomiaru, która umożliwiłaby wykorzystanie skanera do pomiarów takich jak np. ocena współosiowości wałów dwóch sprzężonych ze sobą maszyn. Badanie wymaga wyznaczenia równań opisujących powierzchnie walcowe, odwzorowujące wały po obu stronach sprzęgła. Przykład skanu obiektu, dla którego można wykonać takie badanie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Skan prezentujący potencjalny obiekt pomiarowy  
Fig. 2. Scan of the potential measurement object

Odtworzenie ze skanów powierzchni wałów, np. metodą krigingu normalnego we współrzędnych cylindrycznych, pozwala na wyznaczenie osi każdego z nich oraz sprawdzenie ich współosiowości. Na rys. 3 zaznaczono wyniki pomiaru odchyłań uzyskane po wykonaniu pojedynczego skanu.



Rys. 3. Wynik odchylenia wałów od osi (nie w skali)  
Fig. 3. Deviation result of the shafts (not in scale)

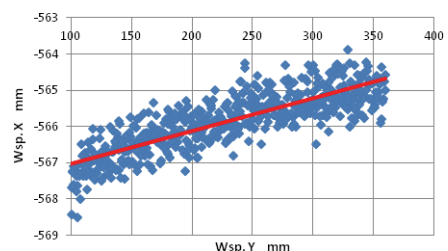
Promienie ruchu precesyjnego wałów wyniosły około 0,3 mm. Mieszczą się one jednak w granicach niepewności pomiaru. Oczekiwano, że wykonując wielokrotny pomiar zwiększyć będzie można dokładność odwzorowania płaszcza wału.

#### 5. Uzyskane wyniki

Dla celów testowych wykonano serię 10 pomiarów skanem z jednej pozycji bazowej badanego fragmentu płaszczyzny. W tym miejscu należy zaznaczyć różnicę pomiędzy dwukrotnym skanem wykonywanym dla obiektu oraz skanem podwójnym, dostępnym w skanerze. W stosunku do pojedynczego skanu, który w tym przypadku będzie punktem odniesienia, niezależny skan dwukrotny wynikowo daje dwukrotnie więcej punktów pomiarowych. W przypadku skanu podwójnego, cykl pomiarowy polega na dwukrotnym przeskanowaniu obiektu oraz odrzucaniu punktów, dla których różnica pomiędzy pierwszym i drugim pomiarem jest nadmierna. Proces ten jest zaimplementowany w oprogramowanie sterujące skanerem i praktycznie uniemożliwia operatorowi weryfikację wyników, czy choćby analizę zastosowanych algorytmów. Dlatego do pomiarów wykorzystywano wielokrotne skany pojedyncze.

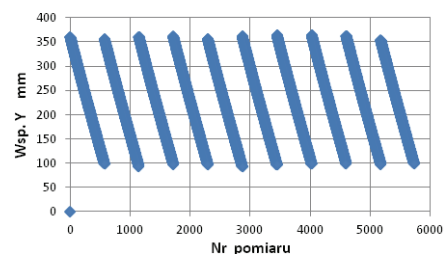
Z uzyskanych danych wydzielano pojedynczą linię skanu przebiegającą przez płaszczyznę i w efekcie uzyskano serię danych wynoszącą po około 570 próbek dla każdej z kolejnych 10 linii. Korzystając z metody regresji liniowej wyznaczono równanie najlepiej dopasowanej prostej do punktów pomiarowych, określone równaniem  $y = ax + b$ .

Współczynniki równania, dla pierwszej linii przyjmują wartości pokazane na rys. 4, na którym ponadto zaznaczono prostą aproksymującą opisaną równaniem.



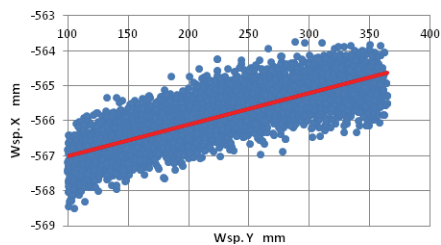
Rys. 4. Rozkład punktów dla pojedynczej linii w płaszczyźnie XY  
Fig. 4. Distribution of points for a single line in the XY plane

Na rys. 5 przedstawiono wynik pomiaru zmian współrzędnej Y dla dziesięciu linii pomiarowych.



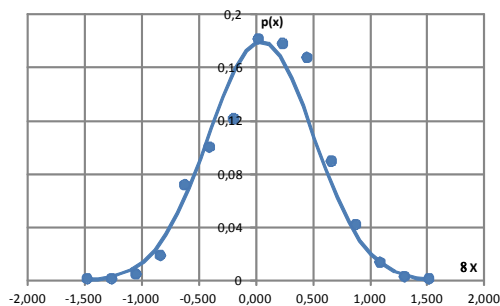
Rys. 5. Wynik uzyskany dla 10-krotnego skanowania pojedynczej linii  
Fig. 5. The result obtained for the scan repeated 10 times for a single line

Obliczenia powtórzono dla kolejnych linii oraz dla danych zgromadzonych z 10 linii, dla których wyniki przedstawiono na rys. 6. Wyliczono odchylenia punktów od wyznaczonej prostej regresji (zakładając, że odwzorowuje jedną z linii płaszczyzny) oraz wyznaczono rozkład gęstości prawdopodobieństwa i porównano go z rozkładem normalnym.



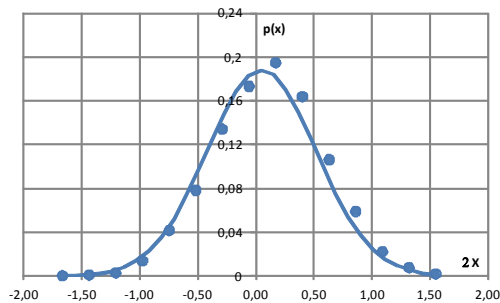
Rys. 6. Rozkład punktów dla 10-krotnego skanu linii w płaszczyźnie XY  
Fig. 6. Distribution of points for the tenfold scan of a line in the XY plane

Rozkład empiryczny wyznaczono dla 30 przedziałów zarówno dla pojedynczej linii (rys. 7) jak i całej serii linii (rys. 8).



Rys. 7. Rozkład empiryczny odchyłek pomiaru odległości dla pojedynczej linii na tle krzywej rozkładu normalnego

Fig. 7. Empirical distribution of the distance measurement deviations for a single line on the background of the normal distribution curve



Rys. 8. Rozkład empiryczny odchyłek pomiaru odległości dla 10 linii na tle krzywej rozkładu normalnego

Fig. 8. Empirical distribution of the distance measurement deviations for 10 lines on the background of the normal distribution curve

Wykonane testy zgodności rozkładów  $\chi^2$  potwierdziły zgodność z rozkładem normalnym. Obliczone wartości parametrów linii zestawiono w tab. 2. Odchylenia standardowe pojedynczego pomiaru kolejnych linii znajdowały się w przedziale (0,43-0,46) mm. Odchylenie obliczone dla sumy punktów wynosiło 0,47mm. Wyznaczone odchylenie płaszczyzny pionowej dla kolejnych linii znajdowało się w przedziale (0,50-0,55)° a różnice w odniesieniu do wartości średniej nie przekraczały 0,025°. Podobnie niewielkie różnice występują pomiędzy początkami kolejnych linii ( $\pm 0,21$  mm) W związku z takimi wynikami założona na początku hipoteza, że poprzez wielokrotne wykonanie skanów z jednego punktu bazowego można uzyskać będzie zmniejszenie niepewności pomiarów wydaje się prawdziwa. Obawiano się, że zwiększenie analizowanej liczby skanów będzie jednocześnie zwiększać odchylenie standardowe i tym samym niepewność wyznaczania współrzędnych. W wyniku pomiarów uzyskano niepewność typu A zbliżoną do zadeklarowanej przez producenta, przy pojedynczym skanie. Natomiast wykonanie serii skanów pozwala na poprawienie niepewności pomiaru dotyczącej wartości średniej wyniku. Odbywa się to oczywiście kosztem wydłużenia czasu wykonania pomiaru, ale w pewnych sytuacjach, jak przedstawi-

nych we wstępie, pomiar skanerem pozwala na wykonanie bardzo precyzyjnych pomiarów.

Tab. 2. Parametry linii dla kolejnych serii pomiarów  
Tab. 2. Line parameters for the measurement series

Nr linii	$\sigma_x$	$X_{sr}$	Nachylenie	$X_0$
	mm	mm	°	mm
1	0,457	0,0001	0,52	0,00
2	0,427	-0,1746	0,55	-0,06
3	0,442	0,0434	0,52	0,04
4	0,451	0,0069	0,51	-0,04
5	0,456	-0,233	0,53	-0,2
6	0,447	0,2139	0,51	0,19
7	0,452	0,0019	0,50	-0,06
8	0,451	0,0002	0,50	-0,07
9	0,447	0,1206	0,51	0,08
10	0,459	-0,2426	0,52	-0,23

## 6. Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki pokazują, że niepewność pomiaru odległości może zostać w znaczny sposób podniesiona poprzez wykonanie serii pomiarów wykonywanych z jednego punktu bazowego. Lepszym podejściem, jeśli chodzi o uzyskanie mniejszej niepewności pomiaru, jest wykonanie serii skanów niezależnych niż wykorzystywanie skanów z podwójnych, oferowanych w skanerze przez producenta. Przeprowadzone badania mogą zostać wykorzystane do wykonywania pomiarów dla rzeczywistych obiektów ze znacznie zmniejszoną niepewnością, w odniesieniu do pojedynczego skanu.

Pomimo niewątpliwych zalet jakie oferują stacjonarne skanery laserowe należy pamiętać, że są one obarczone pewnymi ograniczeniami, które w niektórych przypadkach warunkują sensowność wykonywania pomiaru. Stosowanie skanu podwójnego w badanym skanerze nie nadaje się do pomiarów obiektów będących w ruchu takich jak np. przewody energetyczne, czy wszelkiego rodzaju obiekty, w których występują drgania powierzchni. Kolejnym ograniczeniem są powierzchnie refleksyjne, które zbyt mocno odbijają wiązkę lasera lub powierzchnie zbyt mocno pochłaniające promieniowanie. Aby chmurę można było przetworzyć należy wykonać szereg działań składających się na preprocessing, takich jak np. filtracja w celu niwelowania szumu, czy segmentacja chmury na istotne fragmenty, poddane dalszej analizie.



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadre naukowe województwa opolskiego współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

## 7. Literatura

- [1] Kamiński W., Bojarowski K., Dumalski A., Mroczkowski K., Trystuła J.: Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego scanstation firmy Leica w badaniu deformacji obiektów budowlanych. Czasopismo techniczne, Oficyna Wyd. Politechniki Krakowskiej 2008.
- [2] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych, Wyd. Naukowo-Techniczne Warszawa. 2004, s 299-301.
- [3] Moening C., Dodgson N. A.: A new point cloud simplification algorithm, 3rd IASTED International Conference on Visualization, and Image Processing, 2003, pp. 1027-1033.
- [4] Zator S., Kabza Z., Kwiatkowski L.: Hybrydowe techniki pomiaru przemieszczeń obiektów instalacji technicznych. Energetyka nr 2-3/2011, s.144-146.