

Profilometr laserowy do odtwarzania geometrii powierzchni

Streszczenie. W artykule przedstawiono opracowany profilometr z laserową głowicą triangulacyjną i mechatronycznym układem pozycjonowania badanych obiektów. Podczas skanowania powierzchni z zastosowaniem techniki triangulacyjnej pojawiają się charakterystyczne zakłócenia związane głównie z występowaniem dużych obszarów cienia, w wyniku zjawiska przesłaniania. W opracowanym profilometrze zastosowano oryginalną metodę ograniczenia zakłóceń, polegającą na wielokrotnym skanowaniu powierzchni obiektu przy wybranych położeniach kątowych.

Abstract. The paper presents a profilometer equipped with a laser triangulation head and a mechatronic positioning system for tested objects. The triangulation technique produces characteristic disturbances - mainly related to the shadowed areas known as occlusions. In the presented approach the occlusions are eliminated by multiple scanning of the object in several different angular orientations of a scanning line sensor relative to the object in question. (*Laser profilometer for reconstruction of the surface geometry*).

Słowa kluczowe: technika triangulacji laserowej typu 2D, metoda ograniczenia zakłóceń pomiarowych.

Keywords: 2D laser triangulation technique, method for avoiding measurement disturbances.

doi:10.12915/pe.2014.08.35

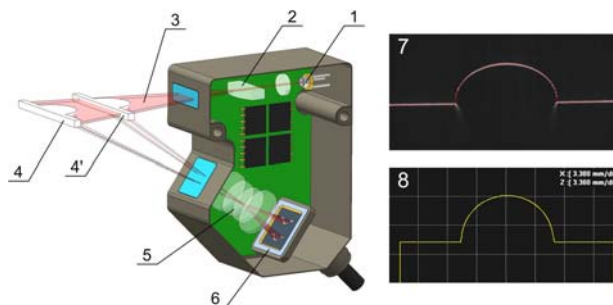
Wstęp

Profilometry wykorzystujące metodę stykową wymagają bezpośredniego kontaktu końcówki pomiarowej z powierzchnią obiektu. Ogranicza to możliwość badania delikatnych powierzchni niektórych materiałów, które mogą ulegać odkształceniu lub uszkodzeniu pod wpływem kontaktu z ostrzem pomiarowym [1]. Jako wady metody stykowej podaje się również małą prędkość pomiaru oraz łatwość uszkodzenia końcówki pomiarowej [2]. Z tego względu od szeregu lat prowadzone są prace, mające na celu opracowanie innych metod analizy geometrii powierzchni, alternatywnych wobec profilometrii stykowej. Wiodącą rolę odgrywają wśród nich techniki wykorzystujące światło jako nośnik informacji o mierzonych wielkościach. Jest to możliwe dzięki szybkiemu rozwojowi optoelektroniki oraz postępowi w technice mikroprocesorowej. Optyczne systemy bezstykowe wykorzystują zjawiska odbicia lub rozpraszania światła od powierzchni badanego obiektu [3]. Jedną z powszechnie stosowanych bezkontaktowych metod pomiarowych jest triangulacja laserowa. W metodzie tej stosowane są 2 typy głowic: 1D i 2D. Głowica pomiarowa typu 1D wykorzystuje punktową metodę skanowania, której głównym ograniczeniem jest długi czas trwania pomiarów powierzchni. W celu zwiększenia szybkości skanowania stosuje się triangulację laserową typu 2D, polegającą na projekcji i detekcji linii zamiast pojedynczego punktu świetlnego. Podczas skanowania powierzchni z zastosowaniem techniki triangulacyjnej pojawiają się charakterystyczne zakłócenia pomiaru związane głównie z występowaniem dużych obszarów cienia, w wyniku zjawiska przesłaniania (ang. occlusion) [4, 5] jednych obszarów powierzchni przez inne. W opracowanym profilometrze zastosowano oryginalną metodę ograniczenia tych zakłóceń, polegającą na wielokrotnym pomiarze powierzchni obiektu dla wybranych położenia kątowych [6, 7].

Technika triangulacji laserowej typu 2D

W systemach wykorzystujących technikę triangulacji laserowej typu 2D na powierzchni badanego obiektu wyświetlana jest linia utworzona przez promieniowanie laserowe rzutowane przez układ soczewek. Odbite od powierzchni obiektu światło rzutowane jest następnie poprzez układ soczewek na światłoczułą matrycę CCD lub CMOS umieszczoną pod kątem w stosunku do kierunku rzutowania światła laserowego na badaną powierzchnię (Rys.1). Zmiana odległości punktów oświetlonej powierzchni względem głowicy pomiarowej powoduje

zmianę położenia obrazów tych punktów na światłoczułej matrycy. Na podstawie znajomości współrzędnych ww. obrazów punktów na detektorze oraz kąta między osią optyczną źródła światła, a osią detektora oraz ich wzajemną odległością, możliwe jest wyznaczenie odległości punktów powierzchni badanego obiektu od głowicy pomiarowej (jej powierzchni referencyjnej) [5]. Podczas pojedynczego skanowania otrzymuje się współrzędne XYZ punktów pomiarowych leżących na badanym obiekcie, oświetlonych rzutowanym na nie światłem laserowym [6, 7]. Optyczny układ oświetlający głowicy formuje wiązkę światła laserowego rozbieżną na jednym kierunku, a zbieżną na drugim, skupianą w formie linii na mierzonej powierzchni. Skutkuje to zmiennym zakresem pomiarowym wzdłuż projektowanej linii, w zależności od odległości płaszczyzny referencyjnej głowicy od powierzchni badanego obiektu.

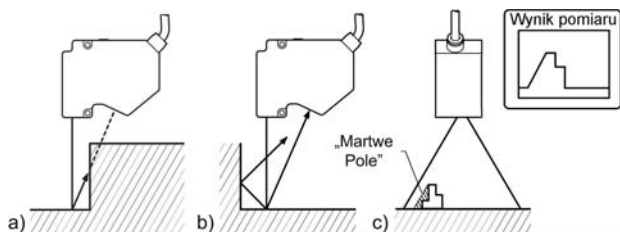


Rys.1. Zasada pomiaru z wykorzystaniem metody triangulacji laserowej typu 2D [6, 7, 9]: 1- laser półprzewodnikowy, 2- soczewki cylindryczne, 3- oświetlająca wiązka laserowa, 4- powierzchnia obiektu przy dwóch różnych położeniach, 5- optyczny układ odbiorczy, 6- matryca światłoczuła, 7- przykładowy obraz zarejestrowany za pomocą matrycy, 8- zmierzony profil

Podstawową zaletą metod optycznych, w tym również techniki triangulacji laserowej, jest bezkontaktowy charakter pomiaru umożliwiający skanowanie wyrobów elastycznych, delikatnych lub sypkich. Zaletą zastosowania głowicy pomiarowej typu 2D jest znaczne zwiększenie szybkości skanowania powierzchni w porównaniu z metodami punktowymi. Przykładowo, zastosowana w opracowanym profilometrze głowica pomiarowa firmy Keyence umożliwia jednoczesny pomiar współrzędnych XYZ dla 800 punktów pomiarowych [6, 7, 8].

Pomimo wielu zalet bezstykowej metody pomiarowej, przy zastosowaniu laserowej techniki triangulacyjnej występują również ograniczenia wynikające przede

wszystkim z geometrii pomiaru optycznego i charakteru powierzchni badanego obiektu (Rys.2).

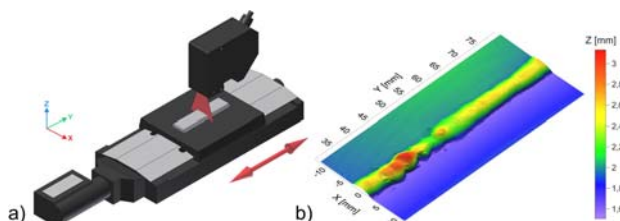


Rys.2. Zakłócenia danych pomiarowych występujące w metodzie triangulacji laserowej [8]: a) zaburzenie pomiaru w postaci tzw. „efektu cienia”, b) zakłócenie spowodowane efektem dodatkowych odbić od powierzchni o dużym współczynniku odbicia, c) zakłócenie w postaci tzw. „martwego pola”

Spośród czynników zakłócających pomiar najpoważniejsze ograniczenie związane jest z występowaniem dużych obszarów cienia oraz zakłóceniami w wyniku wielokrotnych odbić od silnie odbijających powierzchni [6, 7]. Zjawisko zwane „efektem cienia” spowodowane jest brakiem możliwości obserwacji przez sensor odbitego od powierzchni obiektu promienia lasera, z powodu zaślonięcia pola obserwacji przez krawędź obiektu lub inną przeszkodę (Rys.2.a) [3, 4, 5, 6, 7, 8]. W przypadku silnie odbijających powierzchni mogą wystąpić zakłócenia w postaci dodatkowych odbić światła. Na sensorze pojawiają się wówczas odbłyski, które zaburzają pomiar (Rys.2.b) [4, 5, 6, 7, 8]. W przypadku laserowych głowic triangulacyjnych typu 2D występuje dodatkowo zaburzenie pomiaru w postaci tzw. „martwego pola” (Rys.2.c). Zakłócenie to jest tym większe im dalej od środka linii wykonywany jest pomiar [6, 7, 8]. Krawędź obiektu uniemożliwia w tym przypadku poprawne oświetlenie całego obszaru profilu.

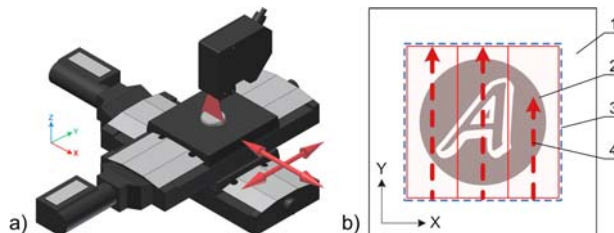
Metoda skanowania powierzchni

System pomiarowy firmy Keyence dostarczany jest z kontrolerem pozwalającym na wyznaczenie wybranych parametrów profilu powierzchni w sposób automatyczny bez dodatkowej jednostki nadrzędnej. Kontroler umożliwia zaprogramowanie algorytmów pomiarowych i może autonomicznie podejmować odpowiednią decyzję w zależności od otrzymanych wyników. Podstawowym trybem pracy głowicy pomiarowej w zastosowaniach do odtwarzania geometrii powierzchni jest jednak przesyłanie pełnej informacji o profilu (ang. profile waveform data) [8]. W celu zeskanowania fragmentu powierzchni wymagane jest dodatkowo zapewnienie przesuwu badanego obiektu względem głowicy pomiarowej. Informacja pochodząca z układu pomiarowego w połączeniu z informacją o położeniu stolika pozycjonującego umożliwia odtworzenie kształtu powierzchni badanego obiektu na podstawie zbioru zarejestrowanych pojedynczych profili. Skanowanie powierzchni o wymiarach nie przekraczających zakresu pomiarowego sensora, wymaga zastosowania pojedynczego napędu liniowego (Rys.3).



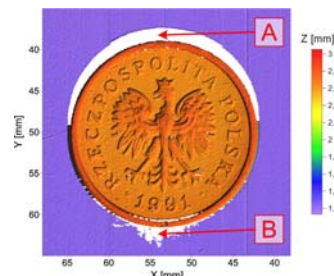
Rys.3. Prezentacja metody skanowania z zastosowaniem pojedynczego napędu liniowego [6]: a) koncepcja struktury profilometru, b) przykładowy wynik pomiaru fragmentu powierzchni ze spoiną czółową

W przypadku wykonywania pomiarów w większym zakresie wymiarowym, utrzymanie wysokiej dokładności pomiarów wiąże się z koniecznością wykonywania wielu fragmentarycznych skanów powierzchni, a następnie łączenia uzyskanych wyników w spójną całość. Wymaga to zastosowania dwóch napędów liniowych w układzie krzyżowym (Rys.4). Metoda skanowania z zastosowaniem stolika krzyżowego w układzie X-Y jest szeroko stosowana w konstrukcjach profilometrów [6, 7, 10, 11].



Rys.4. Prezentacja metody skanowania w większym zakresie wymiarowym za pomocą stolika krzyżowego X-Y [6, 7]: a) koncepcja struktury profilometru, b) metodyka skanowania: 1- obszar roboczy, 2- badany obiekt, 3- obszar skanowania, 4- trajektoria skanowania

Na rysunku 5 przedstawiono przykład pomiaru powierzchni monety, uzyskany w wyniku złożenia danych z dwóch sąsiadujących przebiegów pomiarowych. Przy pomiarach z zastosowaniem metody triangulacji laserowej występują charakterystyczne zaburzenia uzyskiwanych wyników. Zakłócenia objawiają się w postaci braku ciągłości rejestrowanych profili na krawędziach obiektu (białe obszary na prezentowanym wykresie). Na obrazie obiektu wskazano dwa główne obszary występowania zakłóceń pomiarowych, z których jeden (A) związany jest z występowaniem obszarów cienia, natomiast drugi (B) spowodowany jest efektem dodatkowych odbić od refleksyjnej krawędzi monety.

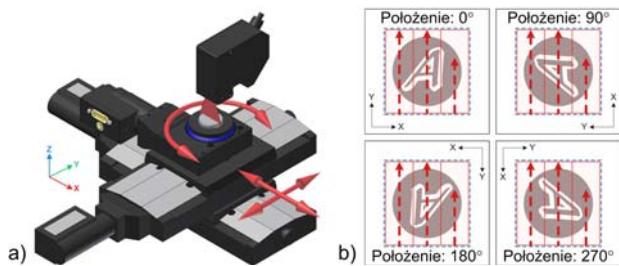


Rys.5. Przykładowy wynik skanowania monety uzyskany poprzez złożenie danych z dwóch sąsiadujących przebiegów pomiarowych

W dokumentacji systemu pomiarowego producent ostrzega przed tego typu zakłóceniami i jako rozwiązanie proponuje zmianę orientacji głowicy pomiarowej tak, aby krawędź obiektu lub inna przeszkoda nie blokowały wiązki lasera projektowanej lub odbitej od badanej powierzchni [8]. Rozwiązanie to może być w prosty sposób zastosowane przy pomiarach pojedynczych profili. Podczas skanowania powierzchni wyrobów niekorzystne usytuowanie głowicy pomiarowej względem niektórych krawędzi występujących na obiekcie jest często nieuniknione, co ogranicza zakres zastosowań prezentowanej metody.

Metoda wielokrotnego skanowania - Multiscan

W celu ograniczenia pojawiających się zakłóceń danych pomiarowych, opracowano metodę umożliwiającą wielokrotne skanowanie wyrobu, przy jego wybranych położeniach kątowych. Rozwiązanie polega na wprowadzeniu dodatkowego napędu zapewniającego obrót badanego obiektu wokół osi Z (rys.6).



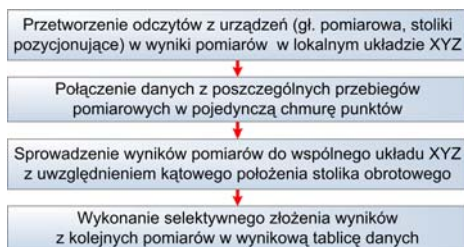
Rys.6. Prezentacja metody ograniczenia zakłóceń pomiarowych poprzez wielokrotne skanowanie detalu [6, 7]: a) koncepcja struktury profilometru, b) metodyka skanowania przy kolejnych położeniach kątowych obiektu

W wyniku obrotu wyrobu względem nieruchomej głowicy, zaburzenia otrzymywanych danych w kolejnych pomiarach występują w innych obszarach skanowanej powierzchni. Pozwala to na odtworzenie geometrii powierzchni na podstawie nałożenia wyników z kolejnych pomiarów, po wcześniejszej eliminacji obszarów zakłóconych. Dane z poszczególnych pomiarów uzupełniają się wzajemnie, co w efekcie umożliwia uzyskanie ciągłej powierzchni [6, 7].

Główną zaletą opracowanej metody jest znacząca redukcja pojawiających się zakłóceń pomiarowych, związanych zarówno z występowaniem obszarów cienia, jak i odbiciami od silnie refleksyjnych krawędzi i powierzchni badanych obiektów. Cykl pomiarowy powoduje czterokrotne wydłużenie czasu pomiaru w odniesieniu do pojedynczego skanowania. Jest to istotna niedogodność, szczególnie przy zastosowaniu powolnej metody skanowania punktowego. Przy wykorzystaniu głowic typu 2D wzrost czasu cyklu pomiarowego jest jednak mniej istotny.

Algorytmy przetwarzania danych pomiarowych

Dostarczony przez producenta sterownik głowicy laserowej został wyposażony w zbiór algorytmów przetwarzania danych pomiarowych. Z uwagi na specyfikę pracy profilometru i konieczność dalszej analizy uzyskiwanych profili, autorzy artykułu zastosowali własne algorytmy przetwarzania danych pomiarowych. Parametry systemu pomiarowego zostały tak ustawione w sterowniku głowicy laserowej, aby zminimalizować ich wpływ na dane wyjściowe. Wyłączono funkcje związane z filtracją i wygładzaniem uzyskiwanych profili. Ograniczono wartości parametrów odpowiedzialnych za interpolację danych w niezmiernych punktach, co pozwoliło na zwiększenie kontroli nad danymi pomiarowymi. Wyniki w punktach, w których głowica nie mogła zmierzyć powierzchni obiektu, zastępowane są wartościami z pomiaru tego punktu przy innym położeniu stolika obrotowego [6, 7, 12]. W sterowniku głowicy laserowej pozostawiono natomiast algorytmy korekcji nachylenia głowicy względem powierzchni stolika obrotowego. Kolejne etapy opracowanego algorytmu przetwarzania danych pomiarowych zostały przedstawione na rysunku 7.

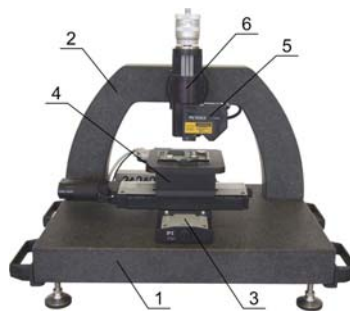


Rys.7. Przepływ procesu przetwarzania danych pomiarowych

Na podstawie odczytów z urządzeń wyliczana jest pozycja w przestrzeni każdego ze zmierzonych punktów. Dane z pojedynczych przebiegów są ze sobą łączone tak, aby każdej z czterech pozycji kątowych stolika obrotowego można było przypisać zmierzoną chmurę punktów. Dane z urządzeń pomiarowych są następnie sprowadzane do jednego układu pomiarowego, za pomocą ich rotacji względem wyznaczonego położenia osi obrotu. W każdym z punktów siatki uzyskuje się cztery pomiary dla poszczególnych położeniach kątowych. Odrzucane są błędne odczyty z głowicy, występujące w miejscach, dla których pomiar nie był możliwy. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że punkty znajdujące się na granicy cienia, pomimo dokonania odczytu przez głowicę pomiarową, obarczone są zakłóceniami. W celu uniknięcia tego zjawiska, w każdym punkcie pomiarowym, w którym dostępne są cztery wartości, odrzucana jest wartość najbardziej odbiegająca od średniej, a wynik jest średnią z pozostałych trzech punktów. Jeżeli natomiast zmierzonych wartości jest mniej niż cztery to nie jest odrzucany żaden punkt, a wynik jest średnią z serii [6, 12].

Budowa profilometru

Opracowany profilometr laserowy składa się z trzech głównych podzespołów: podstawy granitowej z portalem, modułu stolika X-Y wraz ze stolikiem obrotowym oraz modułu laserowej głowicy pomiarowej z układem pozycjonowania [6, 7] (Rys.8).



Rys.8. Budowa profilometru laserowego - Multiscan: 1- podstawa granitowa, 2- portal głowicy pomiarowej, 3- moduł stolików X-Y, 4- stolik obrotowy, 5- głowica pomiarowa, 6- moduł pozycjonowania głowicy pomiarowej

Modułowa struktura profilometru umożliwia przeprowadzenie przyszłych modyfikacji i rozbudowy urządzenia, na przykład poprzez montaż innego typu układów pomiarowych (np. głowicy konfokalnej) [1]. W celu zapewnienia dużej sztywności i niewrażliwości na drgania, jako podstawę profilometru zastosowano płytę granitową, która spoczywa na wibroizolatorach. Moduł stolika pozycjonującego zapewnia przemieszczanie liniowe skanowanego obiektu w płaszczyźnie X-Y oraz obrót w osi Z. Pozycjoner składa się z dwóch napędów liniowych w układzie krzyżowym oraz stolika obrotowego. Podstawowe parametry wytypowanych napędów zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry zastosowanych napędów [6, 13]

Parametr	Wartość	
	liniowy	obrotowy
rodzaj napędu	liniowy	obrotowy
zakres przemieszczeń	100 mm	360°
rozdzielczość	0,125 μm	32 μrad
jednokierunkowa powtarzalność	0,2 μm	50 μrad
dwukierunkowa powtarzalność	2 μm	-

Moduł układu pomiarowego składa się z głowicy laserowej, pozycjonera oraz wspornika nośnego, który osadzony jest na granitowym portalu. Podstawowe

parametry zastosowanej laserowej głowicy triangulacyjnej typu 2D przedstawiono w tabeli 2.

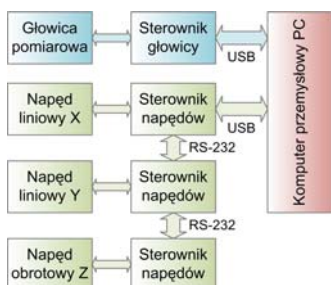
Tabela 2. Podstawowe parametry zastosowanej laserowej głowicy triangulacyjnej [6, 7, 8]

Parametr	Wartość	
	X	Z
zakres pomiarowy	20 ÷ 25 mm	20 mm
rozdzielczość	800 pkt. (33 μm)	1 μm
powtarzalność	5 μm	1 μm
nieliniowość pomiaru	-	± 0,1 % zakresu

Laserowa głowica triangulacyjna za pomocą adaptera zamocowana jest do precyzyjnego stolika, którego przesuw realizowany jest za pomocą śruby mikrometrycznej. Zespół stolika, umożliwia przemieszczanie głowicy pomiarowej prostopadle względem badanej próbki w zakresie 0÷50 mm. Adapter jest elementem wymiennym, zapewniającym możliwość zmiany typu czujnika pomiarowego.

System sterująco-pomiarowy

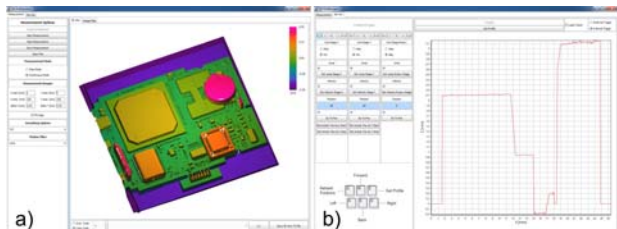
Głównym elementem systemu sterowania jest komputer przemysłowy klasy PC. Komunikuje się on z poszczególnymi urządzeniami za pośrednictwem interfejsu cyfrowego typu USB (Rys.9).



Rys.9. Ogólna struktura systemu sterowania profilometru [6, 7]

„Surowe” dane pomiarowe z laserowej głowicy triangulacyjnej przesyłane są do kontrolera. Po przetworzeniu dane przekazywane są do systemu komputerowego za pośrednictwem portu USB. Sterowanie pracą stolików liniowych oraz obrotowego, odbywa się za pośrednictwem trzech jednocanałowych kontrolerów połączonych w sieć. Komunikacja ze wszystkimi sterownikami napędów realizowana jest za pośrednictwem pojedynczego portu USB.

Na komputerze PC zainstalowano oprogramowanie realizujące sterowanie pracą profilometru. Interfejs użytkownika składa się z dwóch głównych zakładek: Measurement i Service (Rys.10).



Rys.10. Przykładowe okna programu do sterowania pracą profilometru: a) zakładka Measurement, b) zakładka Service

Do realizacji pomiarów i wizualizacji wyników służy zakładka Measurement (Rys.10.a). Po lewej stronie okna znajdują się komponenty służące do przeprowadzenia pomiaru oraz te związane z przetwarzaniem danych pomiarowych. Prawa strona zakładki Measurement służy do wizualizacji wyników pomiarowych. W zakładce 3D View po zakończeniu pomiaru wyświetlona zostaje trójwymiarowa

powierzchnia zmierzonego obiektu. Istnieje możliwość prezentacji wyników w postaci cieniowania powierzchni w skali szarości oraz pseudokolorowania ze skalą barwną zmian wysokości. Zakładka Service zapewnia niezależne sterowanie wszystkimi elementami sprzętowymi (Rys.10.b). Po lewej stronie okna widoczne są panele nawigacyjne umożliwiające niezależną obsługę stolików pozycjonujących. Po prawej stronie znajduje się panel obsługi głowicy pomiarowej zapewniający pobranie i wyświetlenie na wykresie aktualnego profilu zarejestrowanego przez system pomiarowy [6, 12].

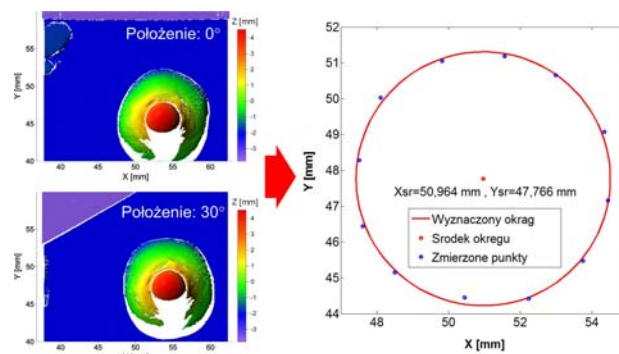
Wyniki badań

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie osi obrotu stolika pozycjonującego, koniecznej do precyzyjnego złożenia wyników pomiarów cząstkowych. W układzie współrzędnych związanych ze stolikami przesuwными oraz głowicą pomiarową występuje dodatkowo przesunięcie pomiędzy teoretyczną, a rzeczywistą osią stolika obrotowego. Położenie osi obrotu wyznaczone jest za pomocą kalibracji systemu pomiarowego. Procedura ta powinna być wykonywana każdorazowo po demontażu stolików pozycjonujących lub głowicy pomiarowej. W tym celu dokonano pomiaru powierzchni sferycznej obiektu kalibracyjnego (Rys.11), przy różnych położeniach kątowych stolika obrotowego.



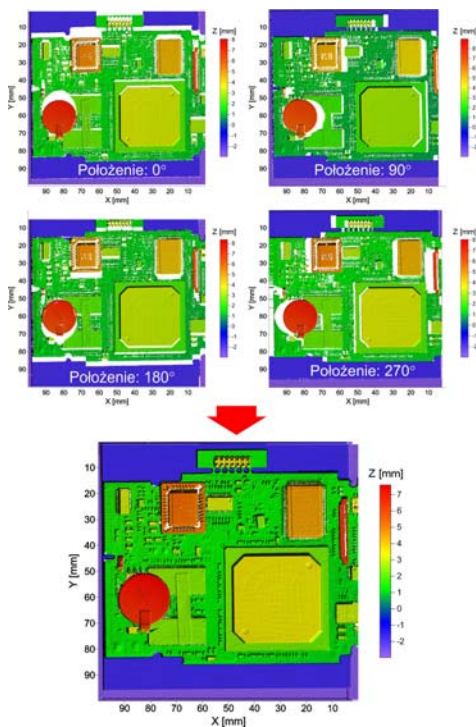
Rys.11. Widok obiektu kalibracyjnego [6, 12]

Położenie kątowe było zmieniane w zakresie 0÷360° z krokiem 30°. Po wykonaniu skanowania powierzchni sferycznej wyznaczono położenie wierzchołka sfery, w każdym zestawie danych pomiarowych. Do otrzymanych współrzędnych, dopasowano okrąg metodą najmniejszych kwadratów (Rys.12). Środek okręgu określił rzeczywiste położenie osi obrotu stolika pozycjonującego.



Rys.12. Przykładowe wyniki pomiaru wzorca uzyskane przy kolejnych położeniach stolika obrotowego oraz okrąg wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów na podstawie położenia wierzchołka sfery dla kolejnych położeniach kątowych obiektu

Przeprowadzono serię badań eksperymentalnych, których celem było sprawdzenie zaproponowanej metody ograniczenia zakłóceń pomiarowych. Pomiaru powierzchni wykonano dla różnych obiektów różniących się kształtem, rozmiarem, rodzajem materiału. W artykule zaprezentowano wyniki pomiaru układu elektronicznego (Rys.13). Obszar skanowania obejmował pełen zakres przemieszczeń stolika pozycjonującego XY wynoszący 100 mm, natomiast krok skanowania wynosił 50 μm.



Rys.13. Wyniki skanowania powierzchni układu elektronicznego dla czterech położeń kątowych stolika obrotowego oraz efekt złożenia danych z pomiarów cząstkowych

Pomimo znaczącej redukcji obszarów nieciągłości w wyniku łączenia danych z czterech pomiarów cząstkowych występują obszary, w których profilometr nie jest w stanie wyznaczyć poprawnej wartości. Obszary te można pozostawić niezmienione lub wyeliminować za pomocą metody interpolacji danych na podstawie wartości punktów sąsiednich [6, 7, 12].

Podsumowanie

Wyniki badań potwierdziły poprawność opracowanej metody i zastosowanych algorytmów, a także ich przydatność do pomiaru kształtu powierzchni. W zarejestrowanych wynikach uzyskanych z pojedynczego skanowania, zaobserwowano dużą ilość punktów, dla których pomiar nie był możliwy. W wyniku zmian położenia kąтового obiektu względem głowicy, zaburzenia danych w kolejnych pomiarach występują w innych obszarach skanowanej powierzchni. Zastosowanie operacji przetwarzania danych, na podstawie czterech pomiarów cząstkowych, umożliwia znaczną redukcję obszarów nieciągłości. Wykonanie złożenia wyników zapewnia również zmniejszenie szumu pomiarowego ze względu na proces uśredniania.

W przypadku wykonywania pomiarów w większym obszarze wymiarowym, przekraczającym zakres pomiarowy sensora typu 2D, występuje dodatkowo problem skali, w którym rozdzielczość pomiarowa jest ściśle związana z zakresem pomiarowym. Opracowana metoda umożliwia skanowanie sąsiadujących obszarów, a następnie ich łączenie w spójną całość, dzięki czemu zapewnia utrzymanie wysokiej rozdzielczości wyników w całym zakresie obszaru pomiarowego.

W opracowanym profilometrze oprócz podstawowego trybu pracy związanego z przesyłaniem pełnej informacji o profilach, pozostawiono funkcjonalność systemu

pomiarowego firmy Keyence. Możliwe jest programowanie algorytmów pomiaru w celu automatycznej analizy pojedynczych profili przez kontroler głowicy pomiarowej bez udziału komputera PC. Dzięki temu urządzenie może być zastosowane do realizacji badań eksperymentalnych, których celem jest sprawdzenie poprawności działania systemu do kontroli jakości określonych wyrobów. W tym trybie pracy stoliki umożliwiają pozycjonowanie badanych wyrobów np. poprzez przesuw symulujący ruch taśmy transportowej w warunkach przemysłowych.

Opracowany profilometr jest urządzeniem uniwersalnym, o dużych możliwościach dalszej rozbudowy i modyfikacji. Planowane jest rozszerzenie funkcjonalności profilometru o możliwość montażu głowic konfokalnych działających w oparciu o zjawisko aberracji chromatycznej podłużnej. Zaletą metody konfokalnej jest bardzo duża rozdzielczość pomiaru (rzędu nanometrów) niemożliwa do uzyskania w przypadku laserowych sensorów wykorzystujących metodę triangulacyjną [1]. Ograniczeniem jest natomiast długi czas skanowania związany z punktową metodą pomiaru.

Praca naukowa została wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka).

LITERATURA

- [1] Czajka P., Wykorzystanie metody konfokalnej do odtwarzania kształtu powierzchni w układzie współrzędnych walcowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją*, 16 (2011), nr 2, 5-18
- [2] Wieczorowski M., Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, (2009)
- [3] Kupiec M., Optyczno - stykowa metoda pomiarów współrzędnościowych, *Biblioteka Cyfrowa Politechniki Krakowskiej*, (2007)
- [4] Bradshaw G., Non - contact surface geometry measurement techniques, *Technical Report TCD-CS*, (1999)
- [5] Reiner J., Stankiewicz M., Eliminacja zniekształceń geometrycznych obrazu w metodzie triangulacji laserowej, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 56, (2010), nr 1
- [6] Czajka P. (red.), Rozwój metod pomiarowych w profilometrii laserowej 3D, *Sprawozdanie końcowe, ITEE-PIB Radom*, (2012)
- [7] Czajka P., Mizak W., Application of a laser 2D triangulation method for reconstruction of surface geometry, *Problemy Eksploatacji*, 89 (2013), nr 2, 83-96
- [8] High - accuracy 2D Laser Displacement Sensor, LJ-G Series User's Manual, Keyence, (2010)
- [9] Materiały firmy Keyence, <http://www.keyence.eu>
- [10] Materiały firmy NanoFocus AG, <http://www.nanofocus.com>
- [11] Materiały firmy Nanovea, <http://www.nanovea.com>
- [12] Galas J. (red.), Opracowanie modułów oprogramowania do sterowania rekonfigurowalnego dwuosowego manipulatora pomiarowego, *Raport końcowy, INOS Warszawa*, (2012)
- [13] Materiały firmy Physik Instrumente, <http://www.physikinstrumente.com>

Autorzy: mgr inż. Piotr Czajka, mgr inż. Wojciech Mizak, Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Mechatroniki, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, E-mail: piotr.czajka@itee.radom.pl; dr inż. Jacek Galas, dr Adam Czyżewski, mgr inż. Maciej Kochanowski, dr inż. Dariusz Litwin, mgr inż. Maciej Socjusz, Instytut Optyki Stosowanej imienia prof. Maksymiliana Pluty, ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa, E-mail: jgalas@inos.pl.