

Pomiary skaningowe w technice współrzędnościowej

Eugeniusz Ratajczyk

Przedstawiono tendencje rozwoju pomiarów skaningowych, a właściwie głowic pomiarowych pracujących stykowo, stosowanych podczas wykonywania pomiarów ciągłych. Wyjaśniono istotę pomiarów skaningowych, scharakteryzowano głowice z przetwornikami pomiarowymi z podziałem na głowice aktywne i pasywne. Omówiono przykład pomiarów skaningowych trzeciej generacji, ilustrując opcję VAST Navigator i REVO™ Rescan5™. Na końcu podano parametry charakteryzujące skaning oraz sposób wyznaczenia niedokładności i czasu skaningu.

Pomiary skaningowe weszły na stałe do metod pomiarów współrzędnościowych. W ostatnich latach obserwuje się ich dynamiczny rozwój zarówno w zakresie budowy głowic pomiarowych jak i procedur, powiązanych z rozwojem układów sterowania i oprogramowania [1, 2].

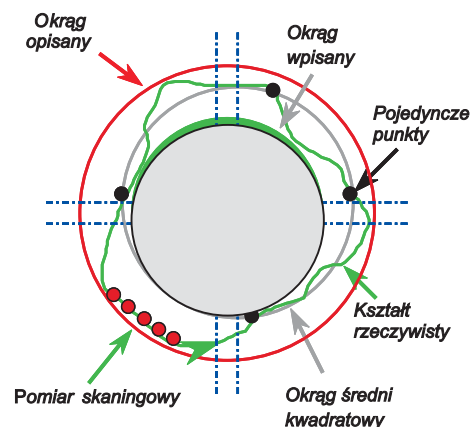
Zalety pomiarów skaningowych są oczywiste, bowiem uzyskuje się wartości współrzędnych większej liczby punktów pomiarowych w krótszym czasie. Duża liczba pomiarów pozwala także na ocenę odchyłek kształtu i położenia oraz funkcjonalną analizę wymiarów mierzonego przedmiotu. Czynnikiem czasu ma tym większe znaczenie, im bardziej pomiar jest bliższy produkcji, co wpływa na jej wydajność.

Postęp w rozwoju skaningu jest ściśle związany z powstawaniem nowych głowic pomiarowych, w których zastosowano przetwornik pomiarowy. W głowicach stykowych jest to przetwornik indukcyjny lub optoelektroniczny, a w głowicach bezstykowych przetwornik wykorzystujący światłoczułe matryce CCD, przy czym stosowana jest metoda oparta na analizie obrazu lub na triangulacji. W obu przypadkach źródłem światła jest laser półprzewodnikowy. W artykule przedstawiono postęp w budowie stykowych głowic pomiarowych przeznaczonych do pomiarów skaningowych oraz nowe opcje pomiarów z użyciem skaningu trzeciej generacji powiązane ze sterowaniem, tzw. skaningu dynamicznego, który umożliwia kompensację ugięć trzpieni pomiarowych i zapewnia nie tylko lepszą dokładność, ale i większe prędkości pomiarowe.

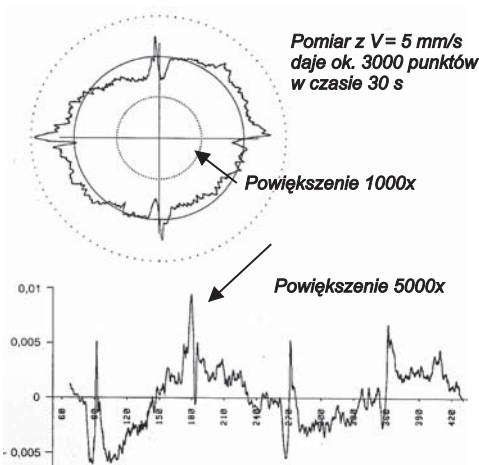
Ważnym zagadnieniem w technice skaningu jest dokładność i znormalizowany sposób jej wyznaczenia, co zostało w skrócie opisane. Przytoczone zostały parametry charakteryzujące dokładność i czas trwania testu skanowania przeprowadzanego na kuli badawczej wg wymagań normy PN-EN ISO 10360-4 [8].

Istota pomiarów skaningowych

Pomiar skaningowy polega na ciągłym pomiarze, a w przypadku głowic pracujących stykowo, na ciągłym styku końcówki trzpienia pomiarowego głowicy z powierzchnią przedmiotu. „Zbieranie” współrzędnych punktów odbywa się najczęściej z częstotliwością 100 Hz. Odległość między punktami zależy więc od prędkości przemieszczenia głowicy.



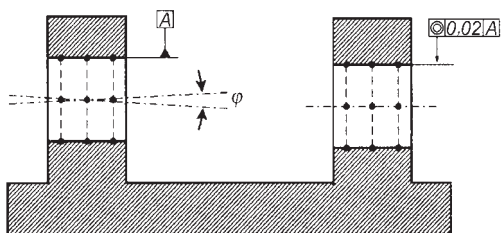
Rys. 1. Pomiar elementu tradycyjną metodą czterech punktów i metodą skaningową z dużej liczby punktów



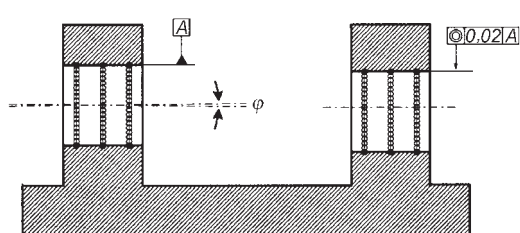
Rys. 2. Przykład pomiaru skaningowego i jego parametry

prof. dr inż. Eugeniusz Ratajczyk – Politechnika
Warszawska. Wydział Mechatroniki. Instytut
Metrologii i Inżynierii Biomedycznej,
Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie

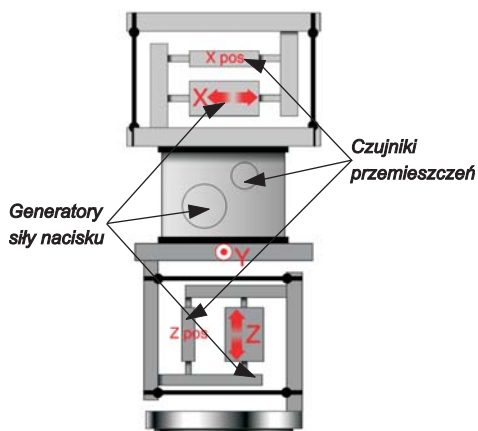
Dla krótkich otworów i 4 punktów pomiarowych otrzymuje się relatywnie dużą odchyłkę położenia i kierunku osi



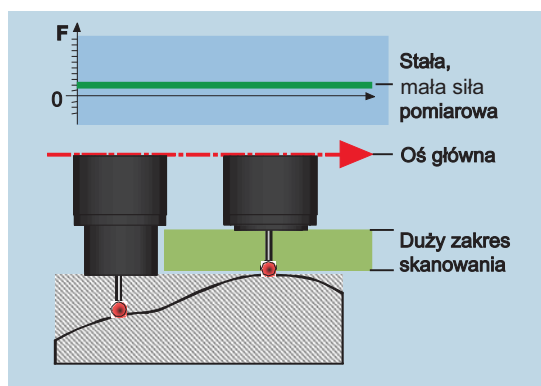
Dla 1000 punktów pomiarowych w każdym przekroju można dokładniej określić rzeczywistą odchyłkę współosiowości



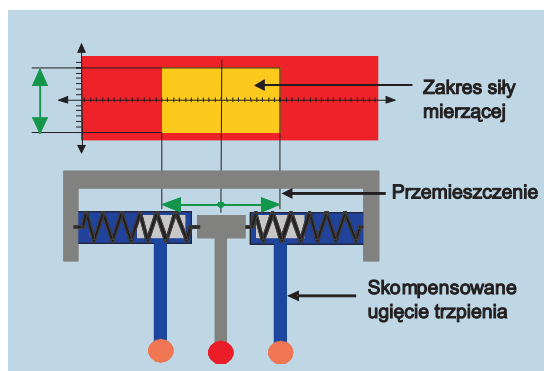
Rys. 3. Przykład wyznaczenia współosiowości dwóch otworów metodą tradycyjną i skaningową



Rys. 4. Schemat aktywnej głowicy skanującej



Rys. 5. Aktywny skaning – siła i zakres pomiarowy



Rys. 6. Aktywny skaning – kompensacja ugięć trzpienia pomiarowego

Tradycyjny pomiar punktowy opiera się na określonej, zwykle ograniczonej liczbie punktów. To wystarczy, by wyznaczyć wymiary przedmiotu, natomiast nie wystarczy, by uzyskać pełną informację o błędach kształtu. Na rys. 1 przedstawiony został wynik pomiaru tradycyjną metodą czterech punktów i wynik pomiaru skaningowego pokazujący kształt, zbliżony do rzeczywistego, wyznaczony skaningowo z dużej liczby punktów.

Rys. 2 ilustruje wyniki pomiaru skaningowego w ujęciu graficznym z uwzględnieniem parametrów przebiegu pomiaru. Pomiar przeprowadzono z prędkością 5 mm/s uzyskując z mierzonego okręgu 3000 wartości punktów w czasie 30 s. Wykres odchyłek okrągłości wykonano w układzie współrzędnych polarnych z powiększeniem 1000×, a w układzie współrzędnych prostokątnych – 5000×.

Pomiar skaningowy ma duże znaczenie w wyznaczaniu odchyłek położenia. Na rys. 3. pokazano jak można znacznie dokładniej, w porównaniu z metodą tradycyjną, wyznaczyć odchyłkę współosiowości dwóch otworów, gdy pomiar wykonywany jest czterema punktami i skaningowo tysiącem punktów.

W zależności od typu zastosowanej głowicy pomiarowej skaning można podzielić na pasywny i aktywny. Pod tym kątem pokazane zostaną głowice pomiarowe i ich parametry.

Rodzaje skaningu

Skaning aktywny

Aktywna głowica skaningowa generuje siłę nacisku pomiarowego, która kompensuje ugięcie trzpienia pomiarowego zapewniając tym samym stały nacisk końcówki na powierzchnię mierzonego przedmiotu. Na rys. 4 przedstawiono schemat ilustrujący budowę i działanie aktywnej głowicy skaningowej, a na rys. 5 i rys. 6 jej charakterystyki.

Siła jest generowana w każdej osi osobno, a nacisk pomiarowy na stałym poziomie jest dopasowywany w zależności od masy i sztywności trzpienia pomiarowego. Pozwala to tym samym stosować względnie długie trzpienie pomiarowe, a pomiary wykonywać z większymi prędkościami.

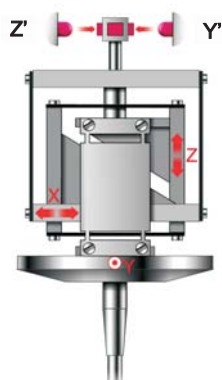
Przykładem aktywnych głowic skaningowych są głowice o nazwie VAST_{XT} i najnowsza głowica VAST Gold produkcji firmy C. Zeiss [1, 2, 3] oraz głowica firmy Renishaw o nazwie REVOTM. Na rys. 7 przedstawiono głowicę VAST_{XT}, a na rys. 8 głowicę REVOTM.



Rys. 7. Widok aktywnej głowicy skaningowej VAST_{XT} firmy C. Zeiss



Rys. 8. Widok aktywnej skaningowej głowicy REVO™ Renscan5™ firmy Renishaw



Rys. 9. Schemat budowy głowicy pasywnej

Głowica pomiarowa VAST_{XT} jest głowicą sześciokierunkową o zakresie pomiarowym od $\pm 0,3$ mm do ± 1 mm, maksymalny zakres wychyleń trzpienia pomiarowego wynosi ± 2 mm. Rozdzielczość indukcyjnych przetworników pomiarowych głowicy wynosi $0,05 \mu\text{m}$. Nacisk pomiarowy, w zakresie od $0,05$ N do 1 N, jest generowany elektronicznie. Pomiary skaningowe mogą się odbywać z prędkością do 200 punktów na sekundę. Maksymalna dopuszczalna długość trzpienia pomiarowego wynosi 500 mm.

Głowica pomiarowa REVO™, oparta na technice pięcioosiowego skaningu Renscan5™ i pracująca z uniwersalnym sterownikiem UCC2 firmy Renishaw, może wykonywać pomiary z prędkością 500 mm/s z maksymalną długością trzpienia pomiarowego 500 mm i z prędkością skanowania 6000 p/s. Cechą szczególną jest zapewnienie kompensacji ugięcia trzpienia pomiarowego w zakresie ok. $50 \mu\text{m}$ przy nacisku ok. 5 g poprzez zainstalowanie wewnątrz rurkowego trzpienia układu optoelektronicznego. W układzie tym wiązka laserowa odbija się od zwierciadła zamocowanego na końcu trzpienia. W wyniku ugięcia końcówki trzpienia, przy styku z mierzoną powierzchnią, przesuwa się zwierciadło, które zmienia położenie plamki odbitego światła laserowego. Tę zmianę położenia wykrywa układ PSD, kompensując ugięcie trzpienia pomiarowego o wartość przesunięcia.

Skaning pasywny

Głowice pasywne nie mają napędu silnikowego, a także mechanizmu blokowania i tarowania oraz elektronicznego tłumienia. Konstrukcja jest zatem mniej skomplikowana. Głowice te odznaczają się też mniejszą masą. Siła nacisku wytwarzana jest przez sprężyny i tym samym nacisk wzrasta wraz z wychyleniem trzpienia pomiarowego. W pewnym stopniu jest

kompensowany w procesie kalibracji głowicy na kuli referencyjnej. Na rys. 9 pokazany jest schemat budowy głowicy pasywnej, na którym zaznaczone są przemieszczenia układów pomiarowych w kierunku X, Y i Z oraz analogowy optyczny układ pomiarowy 3D oznaczony jako Z' i Y' (X' na rysunku nie jest zaznaczony). Natomiast na rys. 10 i rys. 11 przedstawiono charakterystyki głowicy pasywnej. Tego typu głowice pasywne wykonywane są w postaci zminiaturyzowanej, do połączeń z głowicą obrotowo-uchyłną lub jako urządzenia stacjonarne montowane bezpośrednio w pinoli.

Liczba oferowanych rodzajów głowic pasywnych jest stosunkowo duża. Można tu wymienić głowice o symbolach SP25M, SP80 firmy Renishaw czy głowice serii VAST XXT firmy C. Zeiss. Na rys. 12 przedstawiono głowicę VAST XXT w połączeniu z głowicą obrotowo-uchyłną RDS firmy C. Zeiss [4].

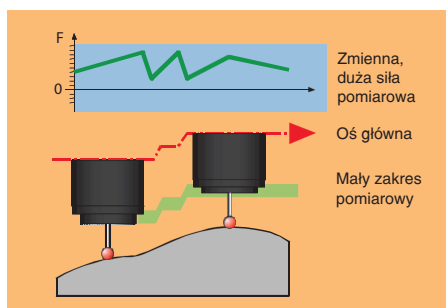


Rys. 12. Pasywna głowica skaningowa VAST XXT firmy C. Zeiss

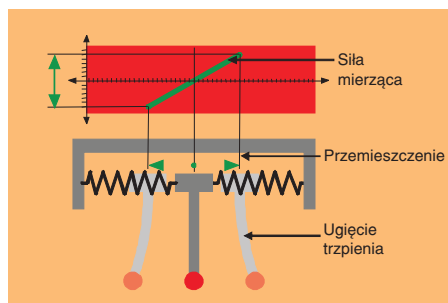
Głowica VAST XXT jest głowicą pasywną o układzie kinematycznym umożliwiającym wyposażanie jej w trzpienie pomiarowe o długości od 50 mm do 250 mm. Zastosowanie kontrolera MCC800 umożliwia stosowanie jej do maszyn, które dotąd używały głowic impulsowych. Głowica ze względu na swoje gabaryty może być łączona z głowicą obrotowo-uchyłną, np. RDS firmy C. Zeiss.

Również głowica SP25M firmy Renishaw może być łączona z głowicą obrotowo-uchyłną. Na uwagę zasługuje ze względu na rodzaj zastosowanego w niej przetwornika i modułową budowę. Na rys. 13 przedstawiono widok głowicy i jej budowę.

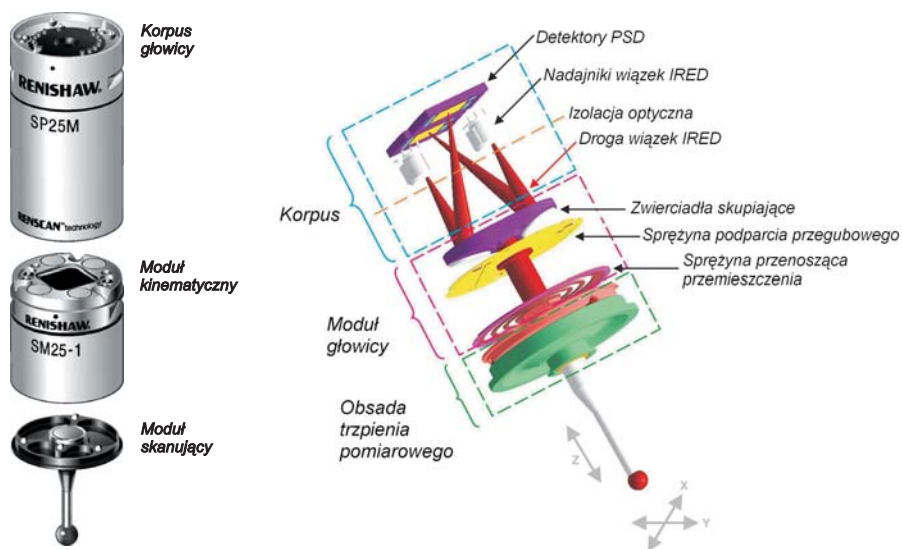
Korpus głowicy o średnicy 25 mm zawiera układ elektroniczny oraz dwie z trzech części składowych, które tworzą system przetwornika optoelektronicznego. Górna część korpusu zawiera złącze pozwalające na połączenia z głowicą pomiarową obrotowo-uchyłną. Wymiana zespołów nie wymaga rekaliibracji. Natomiast dolna część korpusu umożliwia mocowanie trzech rodzajów modułów kinematycznych (SM25-1, SM25-2 i SM25-3), do których można przyłączać moduły skanujące w postaci obsad z mocowanymi do nich trzpieniami pomiaro-



Rys. 10. Skaning pasywny - siła i zakres pomiarowy



Rys. 11. Skaning pasywny - możliwe ugięcia trzpienia pomiarowego



Rys. 13. Widok głowicy SP25M firmy Renishaw oraz jej budowa

wymi o różnych długościach w przedziale od 20 mm do 200 mm. Moduły kinematyczne są dobierane dla trzpieni pomiarowych określonej długości.

Przetwornik optoelektroniczny składa się z dwóch nadajników wiązek podczerwieni IRED, które generują wiązki w kierunku dwóch zwierciadeł skupiających. Wchylenia kątowe zwierciadeł, wykonywane w ślad przemieszczenia trzpienia pomiarowego, odbijają wiązki skierowując je do dwóch detektorów PSD, które wykrywają i mierzą wychylenie trzpienia pomiarowego dając informację ilościową o współrzędnych punktów pomiarowych podczas skaningu.

Trzy moduły zostały skonstruowane w taki sposób, aby największe odchylenie kątowe zapewniało maksymalną efektywność przetwornika w razie zastosowania najkrótszego z przewidzianych trzpienia pomiarowego, a także by przy maksymalnej dopuszczalnej długości trzpienia, parametry głowicy utrzymywane były na optymalnym poziomie. Zakres pomiarowy wynosi 0,5 mm dla każdego kierunku i dla wszystkich orientacji przestrzennych głowicy. Rozdzielczość układu pomiarowego jest mniejsza niż 0,1 μm . Tzw. ruch jałowy trzpienia wynosi 2 mm dla $\pm X$, $\pm Y$, a 1,2 mm dla $+Z$. Nacisk pomiarowy wynosi ok. 0,2 N/mm dla długich i ok. 0,6 N/mm dla krótkich trzpieni pomiarowych.

Aktywny skanowanie dynamiczne

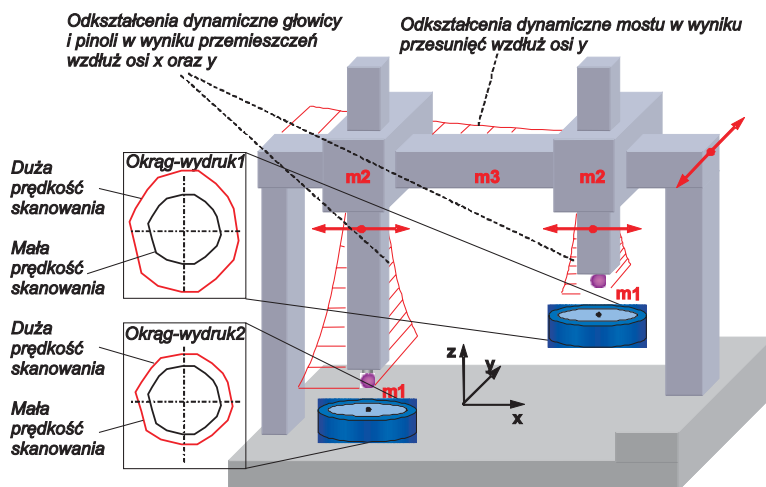
Przykładem aktywnego pomiaru skaningowego, zwanego również skanowaniem trzeciej generacji, jest VAST Navigator, realizowany m.in. z użyciem głowicy VAST Gold, kontrolera i oprogramowania VAST NAVIGATOR związane z oprogramowaniem podstawowym CALYPSO [1, 2, 5, 6, 7].

Głównym źródłem błędów pomiarów skaningowych są odkształcenia powstające w wyniku działania zmiennych sił (rys. 14). Zadaniem technologii VAST Navigator jest zredukowanie tego wpływu.

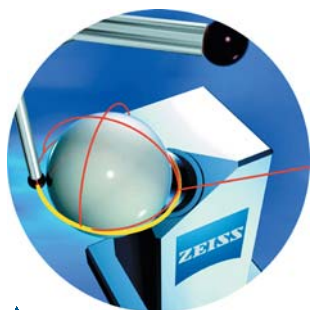
Aby skutecznie korzystać z technologii VAST NAVIGATOR, w oprogramowaniu CALYPSO wprowadzono szereg ułatwień, które zebrano w pakiecie „Calypso Navigator”. Pakiet ten tworzą: dodatkowe opcje związane z kalibracją trzpieni pomiarowych, moduł automatycznego obliczania optymalnych parametrów skanowania, opcja wyboru specjalnych ścieżek dojazdu do mierzonego elementu oraz ścieżek pomiarowych.

Pierwszą czynnością niezbędną do pełnego wykorzystania możliwości pakietu jest wykonanie dynamicznej kalibracji końcówki pomiarowej. Kalibracja dynamiczna polega na zmierzeniu końcówki w trybie tensorowym (pomiar statyczny z użyciem dwóch różnych nacisków pomiarowych, na podstawie którego obliczana jest strzałka ugięcia kalibrowanego trzpienia pomiarowego), a następnie na skaningu kuli wzorcowej w trzech kierunkach, z dwiema różnymi prędkościami pomiarowymi (rys. 15). Na podstawie tak przeprowadzonej kalibracji obliczane są: sztywność końcówki, dynamiczne odchylenie standardowe oraz dynamiczna strzałka ugięcia.

Kolejnym elementem charakterystycznym jest opcja próbkowania stycznego – *tangential probing*. Polega na tym, że trzpień pomiarowy zbliża się do mierzonego zarysu w kierunku stycznym, a nie normalnym. Dzięki temu eliminowane są błędy powstające przy gwałtownej zmianie kierunku ruchu

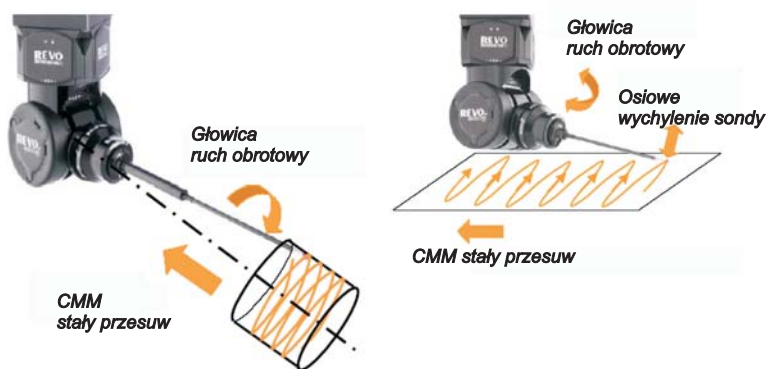
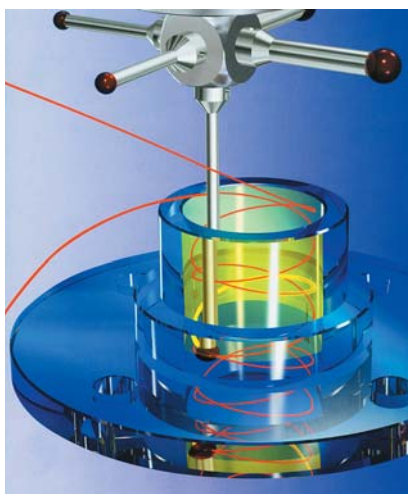


Rys. 14. Wpływ dynamicznych odkształceń na kształt mierzonego profilu



Rys. 15. Kalibracja dynamiczna na kuli wzorcowej

Rys. 16. Przykład pomiaru elementu cylindrycznego z użyciem skaningu VAST Navigator



Rys. 17. Przykłady aktywnego dynamicznego skanowania z użyciem głowicy REVO™

trzęsienia oraz jego przyspieszaniu – w trakcie dużych przyspieszeń na początku oraz na końcu pomiaru danego elementu generowane są największe błędy dynamiczne.

Przykładem może być pomiar elementu cylindrycznego – rys. 16, na którym widoczne są tory pomiarowe wynikające ze skanowania wzdłuż tzw. linii Helix, polegającym na skanowaniu wzdłuż podwójnej linii spiralnej. Dzięki tak opracowanej ścieżce pomiarowej możliwe jest zebranie w jednym pomiarze wyników z liczby punktów wystarczającej do oceny wszystkich charakterystyk definiowanych dla elementów walcowych, a więc uzyskanie informacji nie tylko o odchyłkach okrągłości, lecz również o odchyłkach walcowości i o przestrzennym obrazie ich ułożenia.

Stosowanie systemu dynamicznego aktywnego skaningu w systemie VAST Navigator przynosi wymierne korzyści. Błąd związany z dużą prędkością pomiarową, a tym samym dużymi odkształceniami dynamicznymi jest kilkunastokrotnie mniejszy niż w przypadku pomiarów tradycyjnych.

Pomiary skaningowe w trybie dynamicznym mogą być również przeprowadzane z zastosowaniem głowicy REVO™ firmy Renishaw, pracującej w systemie pięcioosiowego skaningu.

Na rys. 17 pokazano przykłady dynamicznego skanowania za pomocą głowicy REVO™ pracującej w systemie Renscan5™. Enkodery kąta o rozdzielczości 0,08 arcsec zamontowane w głowicy zapewniają szybkie i dokładne pozycjonowanie zsynchronizowane z pozycjonowaniem maszyny pomiarowej. Głowica zapewnia wykonywanie obrotów w obu płaszczyznach, dzięki wyposażeniu jej w łożyska powietrzne i bezszczotkowe silniki. Skanowanie jest możliwe zarówno wewnątrz otworu, jak i na powierzchni elementów walcowatych, przy czym podczas skanowania pinola maszyny przemieszcza się ze stałą prędkością wzdłuż osi elementu walcowatego, a trzpień wykonuje ruchy po obwodzie np. otworu, jak to widać na rys. 17. Skanowanie określonych powierzchni, niekoniecznie płaskich, odbywa się ruchem wahadłowym.

Metoda badania dokładności skaningu

Wymagania dotyczące charakterystyk metrologicznych

Błąd wskazania głowicy pomiarowej skaningowej T_{ij} nie powinien przekroczyć błędu granicznego dopuszczalnego głowicy pomiarowej skaningowej $MPE_{T_{ij}}$ podanego przez producenta, w przypadku

badania odbiorczych lub przez użytkownika, w przypadku badań okresowych [8].

Czas trwania testu skaningowego τ wyrażony w sekundach nie powinien przekroczyć maksymalnego dopuszczalnego czasu trwania testu skanowania MPT_{τ} podanego przez producenta, w przypadku badań odbiorczych, lub przez użytkownika, w przypadku badań okresowych.

Warunki temperaturowe, wilgotność powietrza i drgania w miejscu zainstalowania maszyny powinny być podane albo przez producenta, albo przez użytkownika w przypadku badań okresowych.

Do przeprowadzenia badań powinna być używana końcówka kulista z nominalną średnicą kulki równą 3 mm. Konfiguracja trzpieni powinna być taka, aby wszystkie osie głowicy oraz współrzędnościowej maszyny pomiarowej (CMM) były podczas skanowania wykorzystywane równocześnie.

Badania odbiorcze i okresowe – zasady badań

Można wyróżnić następujące rodzaje badań, zwane sekwencjami:

- skanowanie na zdefiniowanej trasie w celu zebrania dużej liczby punktów – *HP* lub zebrania małej liczby punktów – *LP*

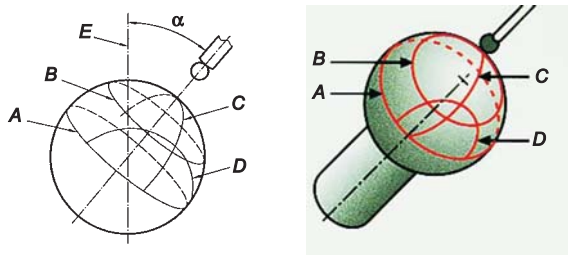
b) skanowanie na niezdefiniowanej trasie w celu zebrania dużej liczby punktów – *HN* lub zebrania małej liczby punktów – *LN*.

Skanowanie w celu zebrania dużej liczby punktów jest szczególnie uzasadnione, kiedy potrzebna jest informacja na temat odchyłki kształtu. Skanowanie w celu zebrania małej liczby punktów może być odpowiednie w przypadku optymalizacji prędkości, gdy potrzebna jest informacja o charakterystyce elementu skojarzonego. W żadnej sytuacji za pomocą tego badania nie można zdefiniować wszystkich parametrów maszyny CMM używanej do pomiarów kształtu albo do obliczeń elementów skojarzonych.

Zasadą metody oceny jest stwierdzenie, czy CMM może mierzyć w zakresie nieprzekraczającym ustalonych wartości:

- błędu granicznego dopuszczalnego głowicy pomiarowej skaningowej MPE_{Tij} przez określenie wartości odległości promieniowej R na kuli badawczej
- maksymalnego dopuszczalnego czasu trwania testu skanowania MPT_{τ} , przez pomiar czasu badania.

Środek i promień kuli badawczej wyznacza się przez jej skanowanie w czterech płaszczyznach (rys. 18).



Rys. 18. Płaszczyzny i linie skanowania na kuli badawczej

Błąd głowicy pomiarowej skaningowej Tij czyli zakres wartości promienia między mierzonym środkiem i wszystkimi punktami skanowania jest obliczany jako bezwzględna różnica między największym i najmniejszym wynikiem wartości uzyskanych z pomiaru.

Do badań należy zastosować kulę wykonaną ze stali o promieniu nominalnym równym 25 mm, o chropowatości powierzchni wyrażonej parametrem Ra nie większej niż $0,05 \mu m$ i twardości nie mniejszej niż HV 800. Należy zmierzyć średnicę i kształt kuli badawczej, a ich odchyłki powinny być uwzględnione w ocenie zgodności ze specyfikacją.

Pomiary kuli przeprowadza się na równiku – płaszczyzna skanowania A (rys. 18), następnie na równoleżniku w odległości 8 mm od równika – płaszczyzna B. Kolejne pomiary przeprowadza się prostopadłe do równika – płaszczyzny C i D, przy czym tor pomiaru C przechodzi przez biegun, a tor pomiaru D w odległości 8 mm od bieguna.

Zalecane odległości między punktami skanowania są ograniczone wymiarami, których wartości są podane w tab. 1.

Każdy z czterech rodzajów skanowania powinien rozpocząć się w punkcie pośrednim, w którym trzpień pomiarowy jest odległy od powierzchni kuli badawczej co najmniej o 10 mm. Z tak wyznaczonego punktu startowego trzpień pomiarowy zbliża się do kuli, wzdłuż powierzchni prostopadłej, z określoną prędkością. Każdy z czterech rodzajów skanowania powinien kończyć się w punkcie pośrednim, odległym od kuli badawczej co najmniej o 10 mm. Czas τ trwania testu skanowania liczy się od początkowego punktu startu pierwszej sekwencji skanowania do końcowego punktu po czwartej sekwencji. Zaleca się, aby zastosowane algorytmy i parametry były takie same, jak dla normalnego pomiaru na maszynie. Nie stosuje się dodatkowego filtrowania i optymalizacji.

Obliczanie wyników (metodą najmniejszych kwadratów) polega na wyznaczeniu środka kuli Gaussa (element skojarzony) z użyciem wszystkich punktów skanowanych dla wszystkich czterech skorygowanych linii skanowania. Dla każdego zmierzonego punktu oblicza się odległość promieniową R . Następnie oblicza się błąd głowicy pomiarowej skaningowej Tij jako rozstęp obliczonych odległości promieniowych R oraz oblicza się maksymalną bezwzględną różnicę między każdym obliczonym promieniem R i połową certyfikowanej średnicy kuli badawczej.

Zgodność ze specyfikacją w zakresie badań odbiorczych i okresowych. Parametry współrzędnościowej maszyny pomiarowej używanej do pomiarów skaningowych są zweryfikowane, jeśli:

- błąd głowicy pomiarowej skaningowej Tij jest nie większy niż błąd graniczny dopuszczalny głowicy pomiarowej skaningowej MPE_{Tij} ustalony przez producenta w badaniach odbiorczych lub przez użytkownika w badaniach okresowych, z uwzględnieniem niepewności pomiaru zgodnie z PN-EN ISO 14253-1:2000
- bezwzględna maksymalna różnica między każdym obliczonym promieniem i połową certyfikowanej wielkości średnicy kuli badawczej jest nie większa niż MPE_{Tij} ustalona przez producenta w badaniach odbiorczych lub ustalona przez użytkownika w badaniach okresowych, uwzględniając niepewność pomiaru
- czas trwania testu skanowania τ jest nie większy niż maksymalny dopuszczalny czas trwania testu skanowania MPT_{τ} , ustalony przez producenta w badaniach odbiorczych lub ustalony przez użytkownika w badaniach okresowych, uwzględniając niepewność pomiarów.

Tab. 1. Odległości między punktami skanowania

Rodzaje skanowania (sekwencje)	Odległość między kolejnymi punktami skanowania	Zalecana maksymalna odległość od płaszczyzny skanowania
<i>HP</i> i <i>HN</i>	0,1 mm	0,2 mm
<i>LP</i> i <i>LN</i>	1 mm	0,2 mm

Ze względu na to, że większość kul wzorcowych ma certyfikowaną średnicę, a nie promień, pozycja b) nie ustanawia dodatkowego określenia błędu wskazań CMM w przypadku pomiarów wymiaru E . Niemniej porównanie obliczonych promieni z połową certyfikowanej średnicy wprowadza przydatne ograniczenie znaczących błędów systematycznych podczas pomiaru wymiaru.

Badania odbiorcze mogą być wykorzystane do weryfikacji parametrów CMM używanej w trybie skaningu, w odniesieniu do błędów granicznych MPE_{Tij} w sposób uzgodniony przez dostawcę z klientem w umowie zakupu, nadzoru serwisowego, naprawy, przebudowy, unowocześnienia itp. Jeśli dostawca nie uzgodni żadnych ograniczeń, podany błąd graniczny dopuszczalny głowicy pomiarowej skaningowej MPE_{Tij} dotyczy każdej orientacji końcówki i dowolnego położenia oraz orientacji kuli badawczej na CMM.

Bibliografia

1. Neuman H.J.: Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten. Expert-Verlag, Renningen, 2004.
2. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
3. Legner N., Imkamp D.: Conquering the Future: The New PRISMO VARIO. Innovation SPECIAL Metrology nr 4, Carl Zeiss, 2002, p. 14–15.
4. Boucky O.: VAST XXT – The “Other” Scanning Probe Head from Carl Zeiss. Innovation SPECIAL Metrology nr 6, Carl Zeiss, 2004, p. 25.
5. Bernhard R., Imkamp D., Müller H.: The VAST Navigator for increased productivity on coordinate measuring machines. Innovation SPECIAL Metrology nr 6, Carl Zeiss, 2004, p. 4–7.
6. Smith A.: Scanning CMM Eliminates Bottleneck and Increases Productivity. Innovation SPECIAL Metrology nr 7, Carl Zeiss, 2005, p. 40–41.
7. Müller H., Schwarz W.: VAST Navigator. 3rd Generation Scanning. Innovation SPECIAL Metrology nr 5, Carl Zeiss, 2003, p. 40–43. VAST-Navigator – skaning trzeciej generacji. Mechanik nr 3/2004, s. 140–142.
8. PN-EN ISO 10360-4:2002+AC:2005 Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) – Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM) – Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego.

