

Analiza strategii pomiaru odchyłek kształtu elementów obrotowych

An analysis of strategies of form deviations' measurements of rotary elements

STANISŁAW ADAMCZAK
KRZYSZTOF STĘPIEŃ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.2.25>

W przypadku pomiaru odchyłek kształtu elementów obrotowych powszechnie stosowane są strategie równomiernego próbkowania. Jednak nie zawsze dają one pożądane rezultaty, jeśli na mierzonej powierzchni występują znaczne lokalne nierówności. Wówczas lepszym rozwiązaniem mogłyby być strategie nierównomiernego próbkowania, w których trajektoria skanowania zostaje dopasowana do przewidywanych lub wykrytych nierówności. W artykule przedstawiono krytyczny przegląd strategii opisywanych w normach oraz w literaturze naukowej, umożliwiających pomiar odchyłek kształtu elementów obrotowych.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiar, odchyłka kształtu, strategia adaptacyjna, nierównomierne próbkowanie

Uniform sampling strategies are commonly applied to measure form deviations of rotary elements. However, such strategies do not always provide desired results, if there are significant local irregularities on the surface. In such cases it is better to apply non-uniform sampling strategies that allow fitting the scanning trajectory to predicted or detected model of irregularities. The paper presents a critical review of strategies for measurements of form deviations of rotary elements that are described in international standards and in the scientific literature.

KEYWORDS: measurement, form deviation, adaptive strategy, non-uniform sampling

Elementy obrotowe stanowią znaczącą i liczną grupę części maszyn, występującą w wielu gałęziach przemysłu (np. w branży łożyskowej, samochodowej czy w przemyśle energetycznym). Najczęściej używanymi obrotowymi częściami maszyn są walce i elementy sferyczne, nieregularnie jednak tworzące powierzchnie elementów mogą kształt stożka, baryłki lub siódła. Wymagania dotyczące dokładności kształtowo-wymiarowej elementów obrotowych są bardzo wysokie. Dlatego ważne jest zastosowanie odpowiedniej metody pomiaru ich odchyłek kształtu. Zazwyczaj kontrola odchyłek kształtu elementów obrotowych jest przeprowadzana na podstawie analizy wyników pomiarów 2D.

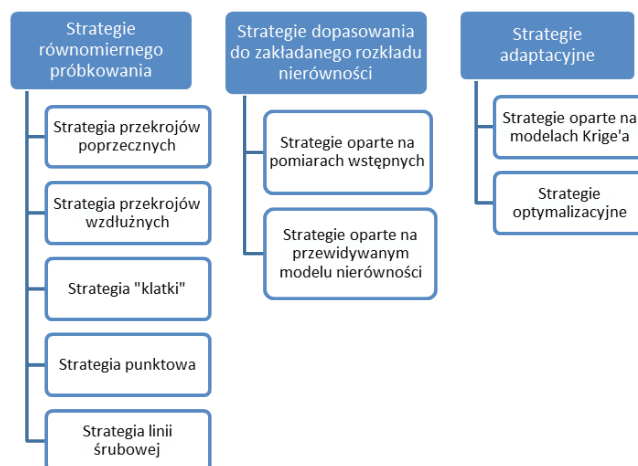
Mniej powszechny jest pomiar parametrów przestrzennych, które odnoszą się do całej powierzchni, a nie jedynie do zarysów 2D. Obecnie pomiary parametrów 3D są w praktyce ograniczone do pomiarów odchyłek walcowości. Zarysy walcowości są mierzone z użyciem specjalistycznych systemów wykorzystujących zasadę pomiaru zmian promienia. Nowoczesne systemy tego typu mogą być stosowane również do pomiaru prostoliniowości

tworzących oraz odchyłki płaskości płaszczyzny czołowej elementów. Przyrządy promieniowe mają bardzo wysoką dokładność, zwykle $< 1 \mu\text{m}$. Niemniej jednak obszar zastosowania tych systemów jest ograniczony do pomiarów okrągłości, walcowości oraz – w niektórych przypadkach, jak wspomniano – do pomiarów zarysów prostoliniowości tworzących, a także odchyłki płaskości płaszczyzn czołowych.

W obszarze metrologii wielkości geometrycznych obserwowany jest dynamiczny rozwój metrologii współrzędnościowej. Rośnie dokładność współrzędnościowych maszyn pomiarowych i z tego powodu są one coraz częściej stosowane również w pomiarach odchyłek kształtu elementów obrotowych, jeśli oczywiście tolerancje mierzonych części są znacząco większe niż maksymalny dopuszczalny błąd maszyny.

Istotną kwestią w pomiarze parametrów 3D części obrotowych jest wybór strategii pomiarowej. Przez pojęcie to należy rozumieć rozkład punktów pomiarowych na mierzonej powierzchni. Zatem jest to termin ściśle związany z trajektorią, po której czujnik pomiarowy porusza się względem powierzchni elementu. Zastosowana strategia powinna zapewniać dokładne pokrycie powierzchni siatką punktów pomiarowych. Z drugiej jednak strony należy pamiętać, że im więcej pomiarów, tym dłuższy jest czas operacji.

Generalnie strategie pomiaru elementów obrotowych opisane w normach oraz literaturze naukowej można podzielić na trzy grupy (rys. 1): strategie równomiernego próbkowania, strategie, w których trajektoria skanowania jest dopasowana do przewidywanego modelu nierówności powierzchni, oraz tzw. strategie adaptacyjne.



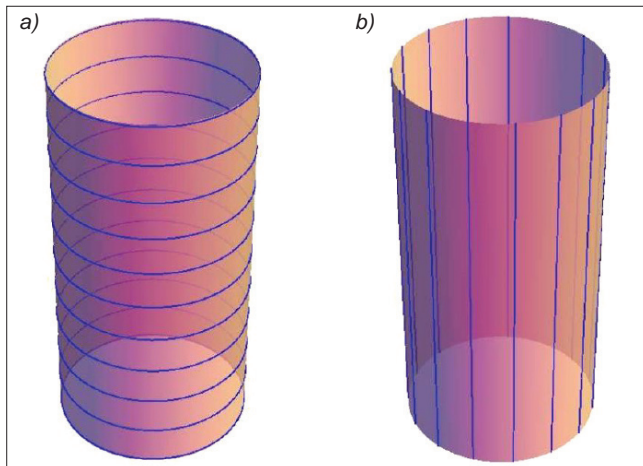
Rys. 1. Klasyfikacja strategii pomiaru elementów obrotowych

* Prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak dr h.c. (adamczak@tu.kielce.pl), dr inż. Krzysztof Stępień (kstepien@tu.kielce.pl) – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

Spośród przedstawionych na schemacie (rys. 1) jedynie strategię równomiernego próbkowania są powszechne w przemyśle. Strategie oparte na dopasowaniu do zakładanego rozkładu nierówności oraz strategie adaptacyjne są obiektem badań naukowców, dostępnym jako opcja w oprogramowaniu komercyjnych systemów pomiarowych.

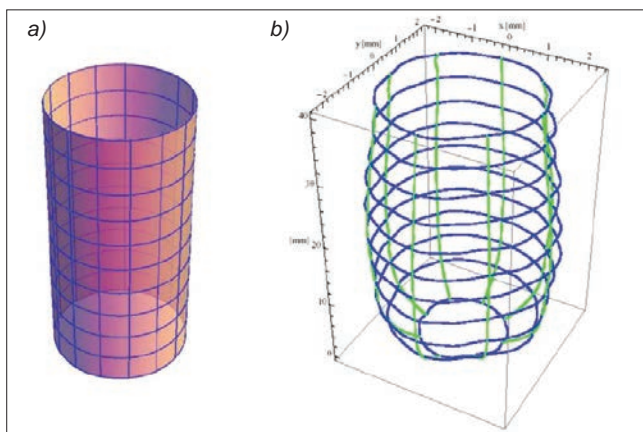
Strategie równomiernego próbkowania

Strategie równomiernego próbkowania są typowe dla pomiarów zarysów walcowości części maszyn. Najczęściej pomiary takie są przeprowadzane z wykorzystaniem strategii przekrojów poprzecznych lub strategii przekrojów wzdłużnych, które przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Najczęściej stosowane strategie pomiaru zarysów walcowości: a) strategia przekrojów poprzecznych, b) strategia przekrojów wzdłużnych

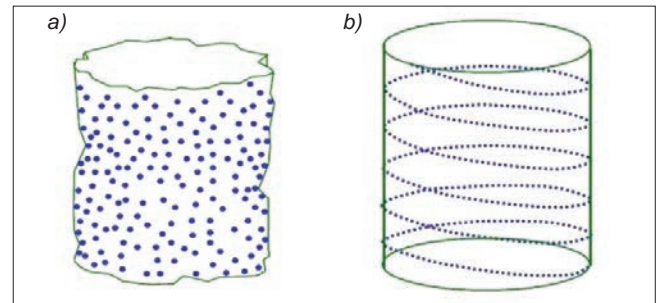
Dokładniejsze informacje o nierównościach mierzonej powierzchni uzyskuje się z wykorzystaniem tzw. strategii klatki. Stanowi ona złożenie strategii przekrojów poprzecznych oraz strategii przekrojów wzdłużnych.



Rys. 3. Strategia „klatki”: a) trajektoria skanowania, b) przykład zastosowania

Ze względu na trudności obliczeniowe strategia „klatki” przez długi czas nie była dostępna w oprogramowaniu systemów pomiarowych. Obecnie jednak są na rynku promieniowe systemy do pomiaru odchyłek okrągłości i walcowości z opcją pomiaru według strategii „klatki”. Najważniejszą zaletą tej strategii jest dokładne pokrycie powierzchni siatką punktów pomiarowych. Największym ograniczeniem jest z kolei długi czas pomiaru.

Strategia punktowa jest rzadziej stosowana do pomiaru odchyłek kształtu elementów obrotowych. Ze względu na niewielką liczbę punktów pomiarowych nie pozwala ona na uzyskanie dokładnej informacji o nierównościach analizowanej powierzchni.

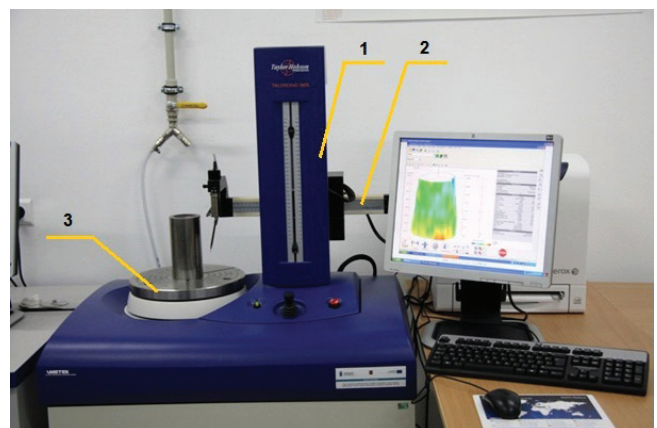


Rys. 4. Strategia punktowa (a) oraz strategia linii śrubowej (b) [1]

Strategia linii śrubowej nie została opisana w normach, ale stosunkowo często jest spotykana w praktyce. Stanowi ona kompromis pomiędzy strategią przekrojów poprzecznych i wzdłużnych. Strategia punktowa oraz strategia linii śrubowej zostały przedstawione na rys. 4.

Strategie przedstawione na rys. 2–4 umożliwiają równomierne próbkowanie powierzchni. Oznacza to, że cała powierzchnia przedmiotu jest próbkowana w taki sam sposób. Zatem w przypadku strategii przekrojów poprzecznych, przekrojów wzdłużnych oraz strategii „klatki” odległości liniowe między przekrojami poprzecznymi oraz odległości kątowe między przekrojami wzdłużnymi są jednakowe. Także strategia linii śrubowej według danych literaturowych umożliwia równomierne próbkowanie, jako że parametr, który opisuje gęstość próbkowania, czyli kąt wzniosu linii śrubowej, pozostaje stały podczas pomiaru. Praktyczne zastosowanie strategii punktowej również wymaga w przybliżeniu równomiernego rozmieszczenia punktów pomiarowych. Zatem i ta strategia może być zaliczona do strategii równomiernego próbkowania. W tym przypadku punkty pomiarowe mogą być wybierane losowo lub z wykorzystaniem metod numerycznych, np. za pomocą sekwencji Hammersleya [2].

W przypadku pomiarów odchyłek kształtu wysoko precyzyjnych elementów tolerancji lub walcowości wynosi kilka mikrometrów, a nawet mniej. Stosuje się wówczas specjalistyczne systemy oparte na zasadzie pomiaru zmian promienia, np. przyrząd Talyrond 365 firmy Taylor Hobson – rys. 5.

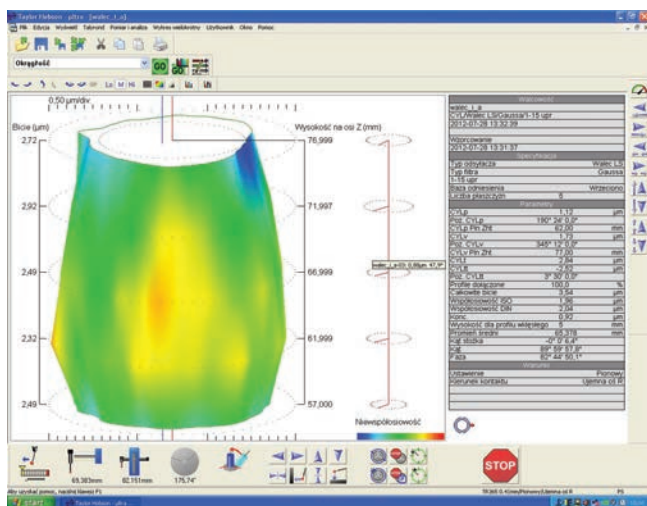


Rys. 5. Specjalistyczny system do pomiaru zarysów okrągłości i walcowości metodą promieniową Talyrond 365 firmy Taylor Hobson: 1 – kolumna, 2 – ramię poziome, 3 – stół obrotowy

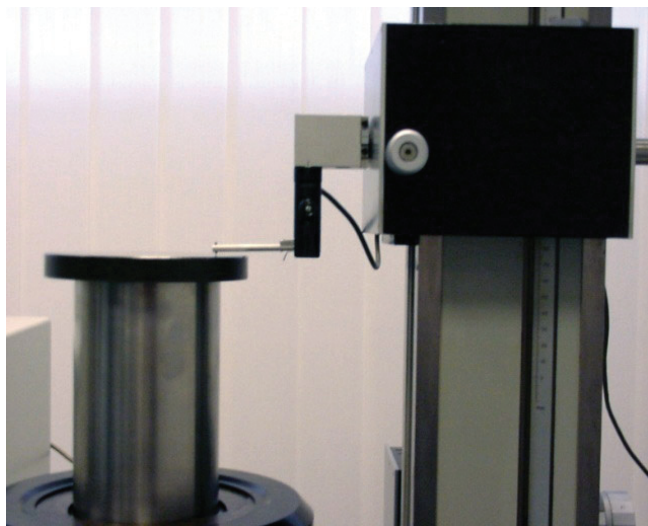
Przyrządy wykorzystujące zasadę pomiaru zmian promienia często nazywa się w skrócie promieniowymi. W tej grupie można wyróżnić systemy z obrotowym stołem oraz z obrotowym czujnikiem. Przedmiot mierzony jest umieszczony na stole pomiarowym. Ważne, aby oś obrotu przedmiotu pokrywała się z osią obrotu stołu lub czujnika (w zależności od tego, który z tych elementów może się obracać). Dlatego właściwy pomiar jest zawsze poprzedzony centrowaniem przedmiotu, a pomiar odchyłek walcowości – także poziomowaniem go.

Najpopularniejsze przyrządy promieniowe umożliwiają zastosowanie strategii równomiernego próbkowania, takich jak: strategia przekrojów poprzecznych, strategia przekrojów wzdłużnych oraz strategia linii śrubowej. Strategia „klatki” jest dostępna tylko w oprogramowaniu wybranych przyrządów, np. w systemie Hommel Etamic Roundscan 535 lub przyrządach Talycenta firmy Taylor Hobson modernizowanych w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

Przyrządy promieniowe umożliwiają wszechstronną analizę wyników pomiarów, zarówno jakościową, jak i ilościową. Co więcej, w przypadku przeprowadzenia serii pomiarów możliwe jest dokonanie analizy statystycznej wyników. Przykładowy protokół pomiaru odchyłek walcowości wygenerowany przez system Talyrond 365 pokazano na rys. 6.



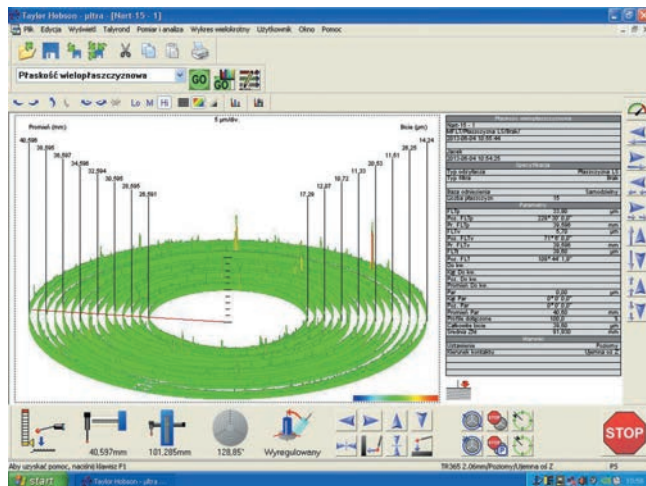
Rys. 6. Protokół pomiaru odchyłek walcowości wygenerowany przez oprogramowanie przyrządu Talyrond 365



Rys. 7. Pomiar płaskości czoła elementu walcowego na przyrządzie promieniowym

Nowoczesne systemy promieniowe umożliwiają także zmianę położenia osi czujnika pomiarowego z pionowej na poziomą. Poziome położenie czujnika ułatwia zmierzenie odchyłki prostoliniowości lub płaskości czoła elementu walcowego, co widać na rys. 7.

Protokół pomiaru odchyłki płaskości wykonanego na przyrządzie promieniowym przedstawiono na rys. 8. Podczas takiego pomiaru przedmiot wykonuje ruch obrotowy, natomiast czujnik przemieszcza się liniowo. Złożenie tych dwóch ruchów umożliwia próbkowanie punktów z czoła przedmiotu po torze spiralnym.



Rys. 8. Protokół pomiaru odchyłki płaskości czoła

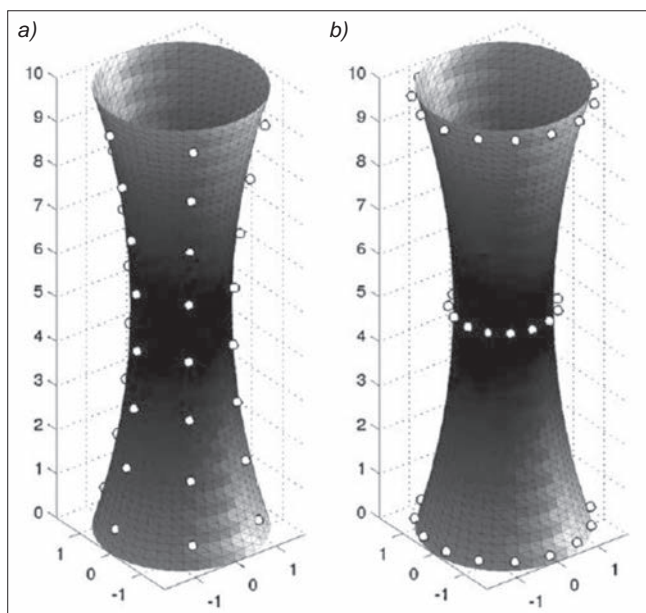
Strategie równomiernego próbkowania są niezwykle użyteczne, jeśli analizowana powierzchnia cechuje się w miarę regularnym rozkładem nierówności. Niemniej jednak w niektórych przypadkach znaczące nierówności występują jedynie na pewnych obszarach powierzchni. Taki obszar powinien być próbkowany przy użyciu większej liczby punktów niż pozostałe fragmenty. W licznych ośrodkach badawczych trwają prace nad opracowaniem strategii, które umożliwiłyby gęstsze próbkowanie powierzchni w obszarach, w których mogą występować znaczne lokalne nierówności powierzchni.

Strategie dopasowania do zakładanego rozkładu nierówności

Strategie te polegają na tym, że rozmieszczenie punktów pomiarowych jest dopasowywane do mierzonej powierzchni na podstawie przewidywanego rozkładu nierówności. Informacje o procesie technologicznym, w wyniku którego powstała analizowana powierzchnia, w wielu przypadkach umożliwiają przewidywanie najbardziej prawdopodobnych lokalizacji nierówności. Przykładowo: w przekrojach poprzecznych elementów cylindrycznych poddanych procesowi toczenia i umieszczonych podczas tej obróbki w trójszczekowym uchwycie samocentryującym bardzo często dominującą jest trzecia składowa harmoniczna. Innym przykładem są elementy umieszczone podczas obróbki w kłach. Wówczas obserwuje się odchyłkę siodłowości wzdłuż tworzącej elementu.

Przykład zastosowania strategii opartej na przewidywanym błędzie siodłowości przedstawiono na rys. 9.

Strategie dopasowania do przewidywanego modelu nierówności mogą być projektowane w oparciu o dane z pomiarów wstępnych lub zakładany rozkład nierówności. Przykładem pierwszej z tych metod jest koncepcja dopasowania harmonicznych opisana w pracy [4].



Rys. 9. Strategia pomiaru zarysu kształtu elementu z dominującym błędem siódlowości: a) strategia stosowana zazwyczaj, b) strategia opracowana na podstawie przewidywanego modelu nierówności [3]

Wykorzystuje ona statystyczną ocenę charakterystyki poszczególnych składowych Fouriera zarysu do zdefiniowania jak najmniej licznych zbioru danych punktów pomiarowych, który umożliwiłby wiarygodną ocenę odchyłków kształtu badanej powierzchni. Druga metoda została przedstawiona w pracy [5]. Tutaj zakładany jest wstępny model błędów kształtu powierzchni. Model ten jest opisany matematycznie za pomocą kombinacji zbioru funkcji bazowych (np. wielomianów, składowych Fouriera lub funkcji własnych). Zostaje on następnie użyty do wygenerowania współrzędnych punktów pomiarowych. Po przeprowadzeniu pomiaru, na podstawie wartości zarysu we wcześniej zdefiniowanych punktach, obliczane są współczynniki założonego modelu kombinacji liniowej (z uwzględnieniem niepewności dopasowania). Współczynniki te są używane do zrekonstruowania obrazu całej powierzchni.

Strategie oparte na przewidywanym modelu nierówności nie są rozpowszechnione w przemyśle. Są one cały czas przedmiotem badań w różnych ośrodkach naukowych. W literaturze naukowej z reguły stosuje się te strategie w oparciu o zbiory danych uzyskane podczas pomiarów przedmiotów z użyciem współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

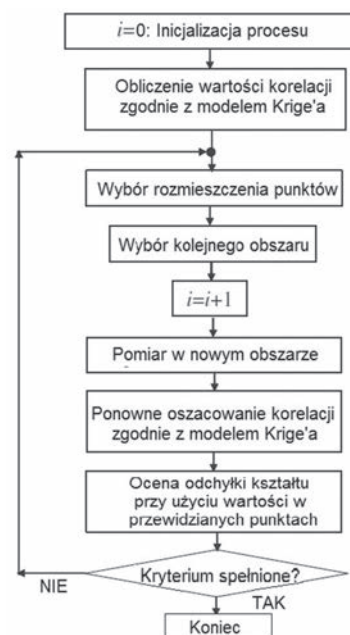
Strategie adaptacyjne

Opisane w literaturze naukowej strategie adaptacyjne mają charakter iteracyjny. W strategiach tego typu próbkowanie jest przeprowadzane w kilku etapach. Pierwszym z nich jest pomiar wstępny z wykorzystaniem równomiernego próbkowania. Następnie, na podstawie uzyskanych danych pomiarowych, zostaje zastosowany algorytm, dzięki któremu wyszukiwane są obszary powierzchni, w których zachodzi ryzyko wystąpienia znacznych lokalnych nierówności. Kolejnym etapem jest przeprowadzenie dodatkowych pomiarów w tych obszarach. Następnie wyliczany jest wcześniej założony współczynnik, którego wartość wskazuje, czy pomiary mają być zakończone, czy też konieczne jest ich kontynuowanie z zastosowaniem gęstszego próbkowania.

Taki sposób postępowania bardzo często wykorzystuje się tzw. modele Krige'a. Nazwa tych modeli pochodzi od

południowoafrykańskiego inżyniera, który jako pierwszy zastosował je w latach sześćdziesiątych XX w. Obecnie modele Krige'a służą do przewidywania lokalizacji kolejnych punktów pomiarowych. Sygnał jest w nich modyfikowany za pomocą zbioru funkcji bazowych i ich współczynników uzupełnionych przez składową losową o wartości oczekiwanej równej 0, dla której kowariancja sygnałem wejściowym i wyjściowym pozostaje stała [6].

Na rys. 10 znajduje się algorytm przedstawiający zastosowanie modelu Krige'a w ocenie odchyłków kształtu za pomocą strategii adaptacyjnej, zaproponowany w pracy [6]



Rys. 10. Algorytm zastosowania modelu Krige'a do opracowania strategii adaptacyjnej pomiaru odchyłki kształtu, zaproponowany w pracy [6]

Poza modelami Krige'a wyszukiwanie współrzędnych punktów, w których powierzchnia ma być próbkowana, może być przeprowadzane z użyciem technik optymalizacyjnych, np. metod Tabu Search czy Hybrid Search [7].

Opisane strategie adaptacyjne nie wyszły poza fazę badań laboratoryjnych. Podobnie jak w przypadku strategii opartych na przewidywanym modelu nierówności w literaturze naukowej opisane jest przede wszystkim zastosowanie tych strategii do pomiarów odchyłków kształtu za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

Podsumowanie

Strategie równomiernego próbkowania są dobrze rozpoznane i łatwe do zastosowania. Mają jednak pewne wady. Przede wszystkim duże zagęszczenie punktów próbkowanych znacznie wydłuża czas pomiaru, co jest efektem niepożądanym, zwłaszcza na linii produkcyjnej. Z tego względu w wielu ośrodkach badawczych trwają prace nad strategiami, które umożliwiłyby gęstsze próbkowanie jedynie w wybranych obszarach, bez utraty informacji o błędach kształtu powierzchni. Przedstawione strategie oparte na założonym modelu nierówności nie wyszły jak dotąd poza fazę testów laboratoryjnych. Mają wiele zalet, ale także poważne ograniczenia. Przede wszystkim w rzeczywistych procesach technologicznych występują zakłócenia, które mogą powodować, że rozkład nierówności przedmiotu będzie odbiegał od przewidywanego (szczególnie gdy proces staje się statystycznie nieregulowany).

Z kolei strategie adaptacyjne mają charakter iteracyjny, są zatem złożone pod względem obliczeniowym. Ich zastosowanie na współrzędnościowych maszynach pomiarowych może być kłopotliwe ze względu na ryzyko wystąpienia kolizji końcówki pomiarowej z mierzonym elementem [8–10]. Wynika ono z tego, że punkty próbkowane mogą być w ogólnym przypadku różne dla elementów, których wymiary nominalne są takie same. Co więcej, większość maszyn współrzędnościowych jest wyposażona w głowice skanujące, umożliwiające pomiar zarysu w bardzo dużej liczbie punktów w stosunkowo krótkim czasie. Zatem metody, w których poszukiwane są obszary wymagające gęstszego próbkowania na zarysach 2D powoli stają się bezużyteczne. Znajdują jeszcze zastosowanie w przypadku pomiarów głowicami elektrostatycznymi, jednak głowice te są obecnie szybko wypierane przez głowice skanujące.

Można stwierdzić, że zagadnienie opracowania strategii pomiarowych, które uwzględniałyby rozkład nierówności powierzchni, wymaga wyłożonych prac badawczych zarówno teoretycznych, jak i eksperymentalnych.

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego pt. „Teoretyczno-eksperymentalne problemy zintegrowanych przestrzennych pomiarów powierzchni przedmiotów”, nr 2015/19/B/ST8/02643, ID: 317012, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

LITERATURA

1. "Taylor Hobson – training materials". URL: <http://www.taylorhobson-serviceusa.com/training-materials.html> (dostęp: 30.11.2017).
2. Adamczak S., Stępień K., Zmarzły P. "An analysis of strategies of measurement of 3D rotary elements". *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Zadar, Chorwacja (11.2017).
3. Colosimo B.M., Moroni G., Petro S. "A tolerance interval based criterion for optimizing discrete point sampling". *Precision Engineering*. 34 (2010): s. 745–754.
4. Capello E., Semeraro Q. "The harmonic fitting method for the assessment of the substitute geometry estimate error. Part I: 2D and 3D theory". *Int J Mach Tools Manuf.* 41, 8 (2001): s. 1071–1102.
5. Summerhays K.D. et al. "Optimizing discrete point sample patterns and measurement data analysis on internal cylindrical surfaces with systematic form deviations". *Precision Engineering*. 26 (2001): s. 105–121.
6. Pedone P., Vicario G., Romano D. "Kriging-based sequential inspection plans for coordinate measuring machines". *Appl. Stochastic Models Bus. Ind.* 25, 2 (2009): s. 133–149.
7. Chen J., Ren Y., Zeng G. "An improved multi-harmonic sine fitting Algorithm based on Tabu Search". *Measurement*. 59 (2015): s. 258–267.
8. Poniatowska M. „Research on spatial interrelations of geometric deviations determined in coordinate measurements of free-form surfaces". *Metrology and Measurement Systems*. 16, 3 (2009): s. 501–510.
9. Weckenmann A., Knauer M., Kunzmann H. "The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 47, 1 (1998): s. 451–454.
10. Gapiński B., Rucki M. "The roundness deviation measurement with CMM". *AMUEM 2008 – International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement*. Sardinia, Trento, Włochy (21–22.07.2008): s. 108–111. ■