

Adam WOŹNIAK, René MAYER, Mélissa CÔTÉ

UL. ŚW. A. BOBOLI 8, 02-525 WARSZAWA, POLSKA (INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, POLITECHNIKA WARSZAWSKA)
C.P. 6079, SUCC. CENTRE-VILLE, MONTREAL, CANADA (DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, ÉCOLE POLYTECHNIQUE)

Problemy związane z korekcją promienia końcówki pomiarowej podczas skaningowych pomiarów współrzędnościowych**Dr inż. Adam WOŹNIAK**

- adiunkt w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej. Sopiń doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2002. W latach 2005-06 pracował jako visiting professor w Ecole Polytechnique de Montréal w Kanadzie. Obecnie jest beneficjentem grantu Homing Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej. Zajmuje się metrologią geometryczną, a w szczególności współrzędnościową techniką pomiarową.

e-mail: wozniaka@mchtr.pw.edu.pl

**Prof. René MAYER**

Rene Mayer holds a B.Eng. (1983) in Mechanical Engineering from Ecole Polytechnique de Montréal and a Ph.D. (1988) in Laser tracking instruments for robot performance measurement from the University of Surrey (England). He is currently Professor at Ecole Polytechnique de Montréal conducting teaching and research on machine motion errors and part dimensional metrology.

e-mail: rene.mayer@polymtl.ca

**Ing. Mélissa Côté**

Mélissa Côté, engineer, is a research associate working in the Virtual Manufacturing Reserch Laboratory at École Polytechnique de Montréal. Among other projects in the past four years, she has handled CNC machines and parts-related metrology projects for both university and industry

e-mail: melissacote@polymtl.ca

**1. Wprowadzenie**

Współrzędnościowa technika pomiarowa to stosunkowo młoda (powstała w 1963 r.) dziedzina pomiarów wielkości geometrycznych, która obecnie przeżywa dynamiczny rozwój dzięki swoim głównym cechom, tj.: automatyzacji pomiarów i integracji z systemami CAD/CAM oraz możliwości komputerowej analizy i archiwizacji wyników pomiarów. Dziś można powiedzieć, że współczesna fabryka, zwłaszcza przemysłu motoryzacyjnego, nie może obejść się bez zastosowania tej techniki pomiarowej, która zapewnia kontrolę wymiarową w rytmie dostosowanym do produkcji.

Większość nowej generacji współrzędnościowych maszyn pomiarowych wyposażonych jest w mierzące głowice pomiarowe nazywane również sondami skaningowymi. Pojawienie się skaningu zrewolucjonizowało współrzędnościową technikę pomiarową. Dzięki niemu stała się możliwa kontrola nie tylko wymiarów, ale również odchyłek kształtu i położenia skomplikowanych geometrycznie części maszyn i urządzeń. Sondy skaningowe, podobnie jak specjalizowane urządzenia do pomiaru okrągłości czy kształtu profilu, pozwalają na pomiar dużej liczby punktów pomiarowych w czasie często dostosowanym do rytmu produkcji. Olbrzymie skrócenie czasu łącznej kontroli mierzonego przedmiotu jest możliwe, ponieważ nie zachodzi potrzeba zmiany przyrządu pomiarowego. Zatem w jednym zamocowaniu i w jednym procesie sprawdzania można wyznaczyć wszystkie możliwe wymiary i odchyłki. Dlatego, dysponując jednym urządzeniem, tj. współrzędnościową maszyną pomiarową, możemy zastąpić szerokie, specjalizowane do różnych zadań, instrumentarium pomiarowe.

Stosunkowo nowe urządzenia, jakimi są skaningowe sondy pomiarowe, oraz związana z tym technika skanowania posiadają pewne ograniczenia i niedoskonałości. Większość z nich dotyczy dokładności lokalizacji punktów zmierzonego przedmiotu w przestrzeni pomiarowej maszyny w danym zadaniu pomiarowym. Część błędów skaningowych głowic pomiarowych wynika z niedokładności ich przetworników pomiarowych. Jednak, jak zostanie wykazane w artykule, największe błędy pomiarów skaningowych mogą wynikać ze złej korekcji promienia końcówki pomiarowej. A ponieważ dokładność współrzędnościowej maszyny pomiarowej oraz dokładność zespołu sondującego są nierozdzielnie związane, problemy dokładności skaningu przekładają się bezpośrednio na jakość całego pomiaru.

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizy teoretyczne i badania doświadczalne potwierdzające, że korekcja promienia końcówki pomiarowej może być istotnym źródłem błędów podczas skaningowych pomiarów przeprowadzanych na maszynach współrzędnościowych. Przedstawiono wyniki pomiarów przykładowego elementu na maszynie Mitutoyo LEGEX 910 CMM wyposażonej w sondę skaningową MPP-300, ze wskazaniem mechanizmów złej korekcji promienia końcówki pomiarowej.

Słowa kluczowe: Współrzędnościowa Maszyna Pomiarowa (WMP), sonda (głowica) skaningowa, korekcja promienia końcówki

Difficulties with the corrected measured point determination in coordinate metrology**Abstract**

Paper discusses an understanding for the compensation of the probe ball radius in a scanning process carried out by coordinate measuring machines (CMM). According to some initial trials of scanning measurement using the stylus tip radius correction built-in the CMM software, it was found, as will be shown in the paper, that the indigenous CMM software do not compensate the stylus tip radius well. As a result, the information about the real shape of the measured features can be distorted. The difficulties with the corrected measured point determination will be demonstrate on the basis of tests were carried out on a Mitutoyo LEGEX 910 CMM equipped with a MPP-300 scanning probe.

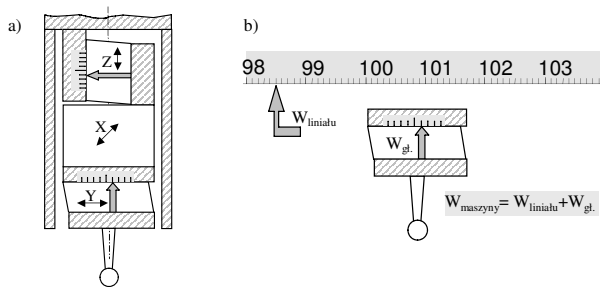
Keywords: Coordinate Measuring Machine (CMM), scanning probe, probe radius compensation

2. Działanie sondy skaningowej

Sonda skaningowa WMP to swego rodzaju mikromaszyna współrzędnościowa, posiadająca - tak jak sama maszyna - przetworniki pomiarowe w trzech osiach pomiarowych, jak to pokazano na rys. 1a). Dzięki temu możliwe jest nie tylko wykrycie styku końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzonego przedmiotu (jak w przypadku sond impulsowych), ale również wyznaczenie wartości współrzędnych punktu pomiarowego we własnym, niezależnym od linałów maszyny, układzie pomiarowym XYZ.

Nacisk pomiarowy realizowany jest najczęściej przez zespół sprężyn płaskorównoległych. W sondach skaningowych tzw. aktywnych dodatkowo występują układy elektromagnetyczne zapewniające stały, niezależny od wychylenia końcówki pomiarowej, nacisk. Możliwe jest również automatyczne wyważanie zespołu trzpieni pomiarowych.

Podczas pomiaru sygnał z przetworników pomiarowych głowicy dodawany jest do wartości współrzędnych jej położenia, zarejestrowanych przez komputer maszyny pomiarowej. Tak powstała suma dla wszystkich trzech osi pomiarowych jest dopiero wartością współrzędnych położenia końcówki sondy, jak na rys. 1b).



Rys. 1. Sonda skaningowa WMP a) schemat budowy, b) zasada wyznaczania wartości współrzędnych mierzonego punktu

Fig. 1. CMM scanning probe a) scheme, b) coordinates of measured point as a sum of probe and CMM readings

W odróżnieniu od pomiaru za pomocą sond przełączających, końcówka głowicy mierzącej nie traci kontaktu z powierzchnią mierzonego przedmiotu. Pozwala to na znaczne skrócenie czasu pomiaru i w konsekwencji przejście większej liczby punktów pomiarowych. Wychylenie końcówki powoduje przełączenie napędu maszyny i przesunięcie jej pinoli tak, aby wskazanie głowicy znajdowało w jej zakresie pomiarowym. Taka regulacja położenia sondy przez serwomechanizmy maszyny może odbywać się równocześnie w trzech osiach pracy maszyny współrzędnościowej.

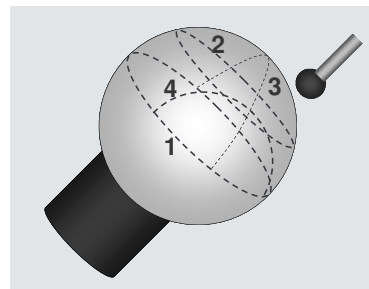
3. Dokładność pomiaru skaningowego

Dokładność maszyn współrzędnościowych wyrażona przez błąd graniczny dopuszczalny wskazania CMM w pomiarze wymiaru MPE_E wg normy PN-EN ISO 10360 [1] wynosi od kilkunastu mikrometrów (dla wielkogabarytowych maszyn niższej dokładności) do dziesiątych części mikrometra (dla najwyższej dokładności maszyn pracujących w laboratoriach zapewniających stabilność termiczną i izolację od drgań). W przypadku pomiarów skaningowych dodatkowym parametrem przewidzianym przez normę [1] jest błąd graniczny dopuszczalny głowicy pomiarowej skaningowej MPE_{Tij} , którego wartość sięga dziesiątych części mikrometra dla maszyn najwyższej klasy. Wartość błędów głowicy pomiarowej skaningowej uzyskuje się przeprowadzając pomiary kilku przekrojów specjalnej kuli badawczej o odpowiedniej średnicy i dokładności wykonania. Procedura testowania sond skaningowych polega na pomiarze kształtu i promienia wzorca w czterech płaszczyznach skanowania kuli badawczej, jak na rys. 2. Prawidłowo

przeprowadzony pomiar umożliwia obliczenie metodą najmniejszej sumy kwadratów środka kuli Gaussa (element skojarzony), używając wszystkich punktów skanowanych dla wszystkich czterech skorygowanych przekrojów skanowania. Dla każdego zmierzonego punktu oblicza się odległość promieniową R . Następnie wylicza się błąd głowicy pomiarowej skaningowej T_{ij} jako rozstęp obliczonych odległości promieniowych R . Występują cztery błędy głowicy pomiarowej skaningowej, oparte na różnych kombinacjach wysokiej lub niskiej gęstości punktów pomiarowych oraz skanowania ze zdefiniowaniem i bez zdefiniowania toru skanowania. Metodą oceny jest stwierdzenie, czy WMP może mierzyć w zakresie nieprzekraczającym ustalonych wartości: błędów granicznego (dopuszczalnego) głowicy pomiarowej MPE_{Tij} przez określenie zakresu odległości promieniowej na kuli badawczej oraz maksymalnego czasu trwania testu MPT_r przez pomiar czasu badania.

Inne znane metody badania dokładności pracy głowicy skaningowych, np. oparte o wytyczne VDI/VDE [2] czy amerykańską normę ANSI/ASME [3], są zbliżone do tych proponowanych przez normę ISO. Polegają najczęściej na pomiarze wzorca o znanych wymiarach i pomijalnym w stosunku do rozdzielczości maszyny współrzędnościowej błędzie kształtu. W wyniku pomiaru uzyskuje się dane, które przy założeniu pomijalnych błędów wzorca i maszyny współrzędnościowej opisują błędy zespołu sondującego. Stosowanie tego typu metod jest stosunkowo szybkie oraz nie wymaga specjalistycznych przyrządów pomiarowych, co czyni je metodami niezbyt kosztownymi. Możliwe jest badanie istotności wpływu różnych czynników pracy sondy takich, jak prędkości pomiarowej czy konfiguracji trzpieni i końcówek. Istotną wadą jest brak jednoznaczności przy negatywnych wynikach testu, czy uszkodzeniu uległa sprawdzana sonda, czy też maszyna WMP.

Niestety w przypadku rzeczywistych pomiarów skaningowych części maszyn i urządzeń, szczególnie tych o nieznanym dla maszyny geometrii (tzn. nieopisanym modelem matematycznym typu CAD), jak również w przypadku pomiaru kształtu precyzyjnych krawędzi (np. ostrzy narzędzi skrawających [4]), dokładność całego procesu pomiarowego może być wielokrotnie gorsza od tej wynikającej z testów dokładności, np. wg normy PN-EN ISO 10360 [1] czy innych wymienionych metod badania dokładności skaningu [2,3].



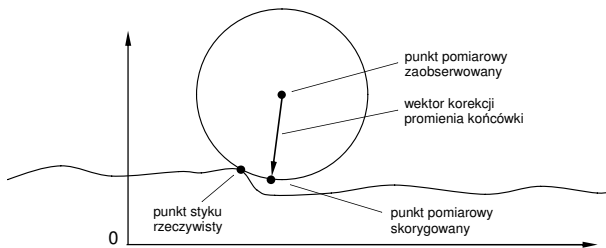
Rys. 2. Pomiar czterech przekrojów kuli badawczej zgodnie z ISO 10360
Fig. 2. Measurements of four sections of test sphere as per ISO 10360

4. Mechanizmy złej korekcji promienia końcówki pomiarowej sondy

Jak wynika z badań autorów, największym źródłem błędów w procesie skanowania przy pomocy współrzędnościowych maszyn pomiarowych może być zła korekcja promienia końcówki pomiarowej sondy. Przyjrzyjmy się zatem tej procedurze.

Maszyna współrzędnościowa rejestruje tzw. punkty pomiarowe zaobserwowane, tj. określone punkty zespołu głowicy pomiarowej, których współrzędne są wskazane w chwili wykonania próbkowania. Tym określonym punktem jest zwykle środek lub punkt bliski środka końcówki trzpieni pomiarowego, jak na rys. 3. Natomiast punkt pomiarowy skorygowany, będący

estymacją rzeczywistego punktu zmierzonego na powierzchni przedmiotu, obliczany jest na podstawie punktu pomiarowego zaobserwowanego. Zatem, aby punkt pomiarowy skorygowany przybliżył w możliwie najlepszym stopniu rzeczywisty punkt styku, konieczna jest precyzyjna informacja o wektorze korekcji promienia końcówki. Długość tego wektora jest właściwie znana. Jest to promień obliczony w czasie procedury kalibracji głowicy pomiarowej wraz z zespołem trzpienia. Trudność pozostaje jednak przy wyznaczeniu kierunku wektora korekcji promienia końcówki. Powinien to być kierunek normalny do powierzchni mierzonego przedmiotu w punkcie styku z końcówką pomiarową.



Rys. 3. Punkt pomiarowy skorygowany jako translacja punktu pomiarowego zaobserwowanego o wektor promienia końcówki [1]
Fig. 3. Calculation of corrected measured point as offset vector, which is added to the indicated measured point [1]

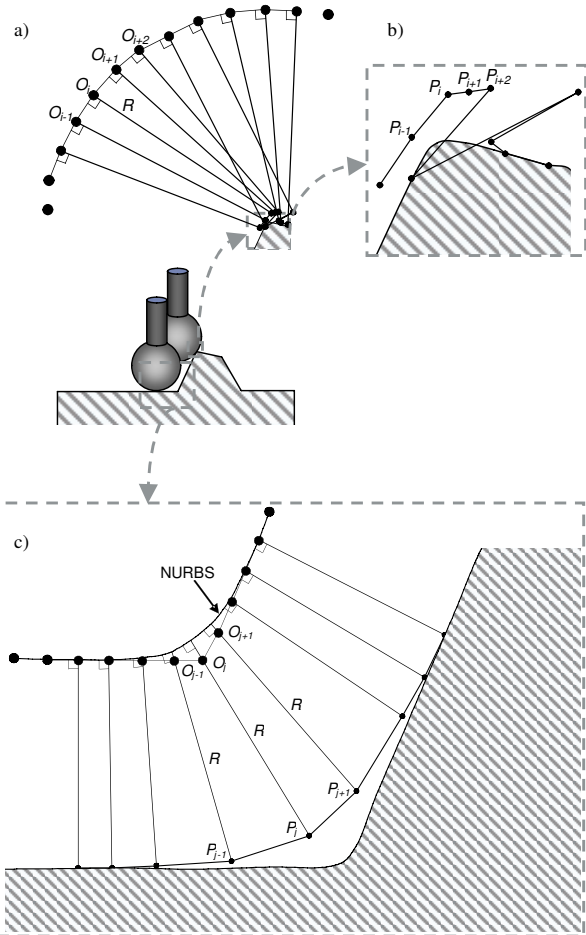
W przypadku znanej nominalnej geometrii mierzonego przekroju łatwo jest wyznaczyć wektor normalny do powierzchni mierzonej w danym punkcie pomiarowym, a następnie wyznaczyć punkt skorygowany poprzez dodanie do punktu pomiarowego zaobserwowanego wektora korekcji o długości równej obliczeniowemu promieniowi końcówki pomiarowej. W przypadku nieznannej krzywizny elementu mierzonego kierunek wektora korekcji wyliczany jest najczęściej na podstawie wzajemnego położenia punktów zaobserwowanych [3-11]. Ponieważ punkty zaobserwowane obciążone są błędami wynikającymi z błędów geometrycznych maszyny współrzędnościowej, nie jest możliwe precyzyjne wyliczenie kierunku wektora korekcji promienia końcówki.

Rozważmy serię punktów pomiarowych zaobserwowanych O_j podczas skaningu przekroju przedmiotu o nieznannej geometrii, jak na rys. 4. Na rys. 4 a) i b) przedstawiono przypadek pomiaru krawędzi zewnętrznej, natomiast na rys. 4 c) przypadek pomiaru kształtu wklęsłego. Punkt pomiarowy skorygowany P_j obliczany jest przez przesunięcie punktu pomiarowego zaobserwowanego o wektor o długości obliczeniowego promienia końcówki i kierunku wyznaczonym na podstawie sąsiednich punktów pomiarowych zaobserwowanych. Zatem minimalne błędy położenia punktów pomiarowych zaobserwowanych, wynikające np. z niedoskonałości przetworników pomiarowych sondy lub samej maszyny współrzędnościowej, przekładają się na błędne obliczenie kierunku wektora korekcji. Zjawisko to spotegowane jest tym, że w przypadku pomiarów precyzyjnych elementów z dużą gęstością punktów pomiarowych odległość między kolejnymi zaobserwowanymi punktami pomiarowymi jest znacznie mniejsza od promienia końcówki pomiarowej. W konsekwencji dostajemy błędnie obliczone punkty pomiarowe skorygowane, często w zmienionej kolejności, jak na rys. 4 b).

Aby zminimalizować błędy wynikające ze złego kierunku wektora korekcji, stosuje się matematyczne krzywe (najczęściej typu NURBS), które jednak prowadzą do uśredniania położenia punktów pomiarowych skorygowanych. Taki efekt jest doskonale widoczny, gdy mierzymy element wklęsły, jak na rys. 4 c). Oczywiście w takim przypadku występuje geometryczna filtracja wynikająca z faktu, że materiałna końcówka pomiarowa nie jest w stanie spenetrować krzywizn wewnętrznych o promieniu mniejszym od promienia jej samej. Wtedy maszyna powinna raczej pozostawić dany obszar pomiarowy niezmierny, niż

generować przypadkowe błędne punkty pomiarowe, fałszując tym samym obraz mierzonej powierzchni

W opisanych przypadkach niedokładność odtwarzania rzeczywistego profilu mierzonego przedmiotu w procesie skanowania przez nawet najdokładniejszą maszynę pomiarową może sięgać nawet kilkaset mikrometrów, z czego niejednokrotnie użytkownik współrzędnościowej maszyny pomiarowej nie zdaje sobie sprawy, mając w pamięci wyniki badań skaningu przeprowadzone na kuli badawczej zgodnie z [1].



Rys. 4. Nieprawidłowe obliczenie punktów pomiarowych skorygowanych wywołane błędnym wektorem korekcji promienia końcówki
Fig. 4. The deviation of corrected measured point's position resulting from wrongly estimated normal vectors during CMM correction of stylus tip radius

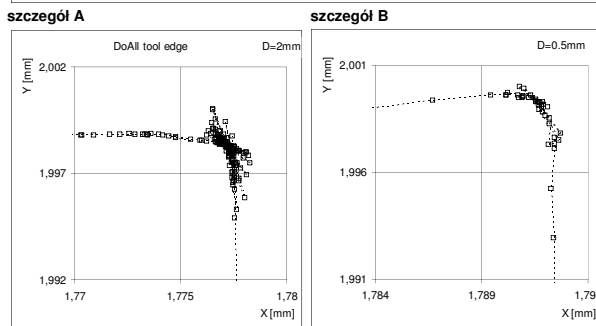
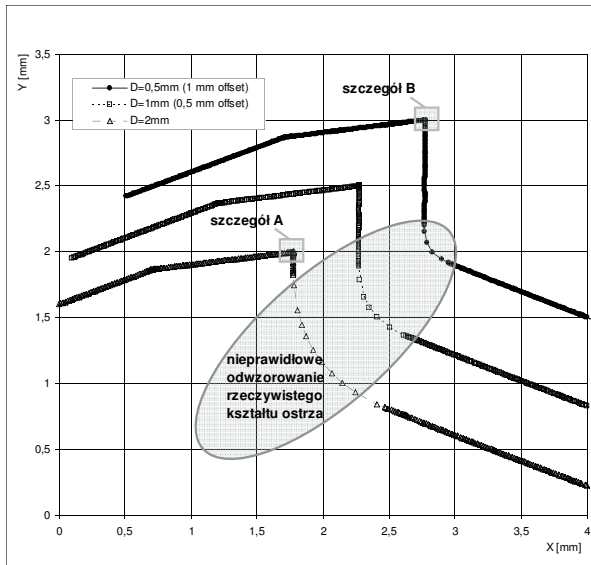
5. Badania eksperymentalne i dyskusja wyników

Aby zilustrować doświadczalnie problemy związane z korekcją promienia końcówki pomiarowej, przeprowadzono pomiary skaningowe narzędzia stosowanego w obróbce skrawaniem, w przekroju prostopadłym do jego krawędzi tnącej. Taki obiekt badań zawiera jednocześnie ostre krawędzie (o promieniu od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów), jak i wklęsłe krzywizny. Pozwala zatem na pokazanie obydwu typów opisanych wcześniej problemów z korekcją.

Badania wykonano na jednej z najdokładniejszych na świecie maszyn współrzędnościowych Mitutoyo Legex 910 z głowicą skaningową MPP-300. Błąd graniczny dopuszczalny wskazania tej maszyny w pomiarze wymiaru, zgodnie z [1] wynosi $MPE_E = 0.48 + L/1000 \mu\text{m}$, gdzie L oznacza mierzoną długość podaną w metrach. Błąd graniczny dopuszczalny głowicy pomiarowej skaningowej zgodnie z [1] wynosi $MPE_{Tij} = 0.32 \mu\text{m}$.

Specyfikowana dokładność wskazuje, że nie ma przeszkód, aby tego typu maszyna mogła być przeznaczona do precyzyjnego pomiaru kształtu ostrza narzędzi skrawających.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki skanowania opisanego wcześniej narzędzia, używając trzech trzpieni pomiarowych o średnicach końcówek: 0,5 mm, 1 mm i 2 mm. Wszystkie trzy pomiary wykonano w tym samym przekroju mierzonego elementu. Dla większej przejrzystości prezentowanych wykresów kolejne charakterystyki na rys. 5 przesunięto o 0,5 mm względem siebie. Dodatkowo pewne fragmenty dwóch wykresów zostały powiększone i przedstawione osobno jako szczegóły A i B. Obszary te odpowiadają wynikom pomiaru krawędzi tnącej narzędzia.



Rys. 5. Wyniki pomiarów przekroju ostrza narzędzia skrawającego przy użyciu końcówek pomiarowych o średnicach: 0,5; 1 i 2 mm

Fig. 5. The results of tool geometry measurement in a plane section by 0,5; 1 and 2 mm sapphire ball

Analizując otrzymane wyniki pomiarów, można stwierdzić, że odwzorowanie rzeczywistego kształtu mierzonego elementu nie jest prawidłowe. Oczywiście podczas pomiaru części wklęsłej przedmiotu następuje geometryczna filtracja wynikająca z tego, że fizyczna końcówka pomiarowa (kulka) nie jest w stanie zagłębić się wystarczająco, aby zmierzyć pewne niedostępne dla niej obszary mierzonego przedmiotu. Jednak fakt, że końcówka nie jest w stanie spenetrować pewnych obszarów mierzonego przekroju, powinien objawiać się tym, że nie ma tam zarejestrowanych punktów pomiarowych. W analizowanych danych pomiarowych jest inaczej. Nieznany dla maszyny obszar punktów niedostępnych dla danej końcówki maszyna obrazuje jako prawidłowo zmierzony, nie sygnalizując w żaden sposób, że występuje tu jakakolwiek nieciągłość pomiarów. Widać wyraźnie, że kształt tego odwzorowania zmienia się zależnie od średnicy końcówki pomiarowej. W opisanym przypadku błędy

miaru skaningowego są kilkaset razy większe od specyfikowanego błędu granicznego sondy zgodnie z ISO [1].

Drugi nieprawidłowo zmierzony obszar dotyczy pomiaru przekroju samej krawędzi tnącej narzędzia. Pokazują to szczegóły A i B. W tym przypadku ujawnia się mechanizm złej korekcji promienia końcówki pomiarowej, przedstawiony wcześniej schematycznie na rys. 4 a) i b). Zarówno podczas pomiaru ostrza końcówką o średnicy 2 mm, jak również 0,5 mm, obserwuje się chaotyczną lokalizację punktów pomiarowych skorygowanych. Punkty te występują w zmienionej kolejności i pewnym rozrzucie. Zaobserwowano również, że większe błędy występują w przypadku większej średnicy końcówki pomiarowej, co potwierdza rozważania teoretyczne przedstawione wcześniej. W przypadku tej części mierzonego przekroju błędy skaningu sięgają kilku mikrometrów, co również stanowi znaczne przekroczenie wartości parametru MPE_{Tij} . Obserwowana przypadkowa zmiana kolejności punktów pomiarowych skorygowanych niesie wiele niedogodności w późniejszej analizie danych pomiarowych czy próbach modelowania skanowanych przekrojów przy pomocy funkcji matematycznych.

W literaturze związanej ze współrzędnościową techniką pomiarową wiele uwagi poświęca się identyfikacji błędów (szczególnie tzw. geometrycznych) maszyn pomiarowych. Przedstawione w artykule badania teoretyczne i doświadczalne wykazały, że często pomijana w analizach procedura korekcji promienia końcówki pomiarowej może być istotnym źródłem błędów podczas skaningowych pomiarów współrzędnościowych. Informacja ta może być szczególnie cenna dla użytkowników maszyn współrzędnościowych, którzy nie zdają sobie sprawy z tego, że rzeczywiste błędy pomiaru skaningowego mogą być znacznie większe od tych uzyskanych w badaniach odbiorczych czy okresowych przeprowadzanych zgodnie z ISO czy VDI/VDE.

6. Literatura

- [1] PN-EN ISO 10360-4: Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego, 2002
- [2] VDI/VDE 2617: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung, 1986-1993, VDI-Verlag
- [3] ANSI/ASME B89.1.12M: Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines; American Society for Mechanical Engineering, New York, 1990
- [4] Woźniak A., Mayer R., Bałaziński M.: Investigation into precise measurement of cutting tool edges using coordinate measuring machine. CIRP 2nd International Conference on High Performance Cutting, Vancouver, Canada, June 12 and 13, 2006, Proceedings
- [5] Zhongwei Y., Yuping Z., Shouwei J.: Methodology of NURBS surface fitting based on off-line software compensation of errors of a CMM. Precision Engineering 27, 2003, pp. 299-303
- [6] Duffie N.A., Feng S.C.: Modification of bicubic surface patches using last squares fitting techniques. Computer in Mechanical Engineering, CIME Research Supplement 8 (3), 1985, 57-65
- [7] Liang S.R., Lin A.C.: Probe-radius compensation for 3D data points in reverse engineering. Computers in industry 48, 2002, 241-251
- [8] Mayer R., Mir Y.A., Vafaeseefat A., Balazinski M.: Touch probe radius compensation for coordinate measurement using kriging interpolation. Proc. Inst. Mech. Eng., 211 (Part B), 1997, pp. 11-18
- [9] Xiong Z., Li Z.: Probe radius compensation of workpiece localization. Journal of Manufacturing Science and Engineering 125, 2003, pp.100-104
- [10] Li Z.X., Gou J.B., Chu X.Y.: Geometric algorithms for workpiece localization. IEEE Trans. Rob. Autom. 14 (6), 1996, pp. 864-878
- [11] Lin Y.C., Sun W.L.: Probe radius compensated by the multi-cross product method in freeform surface measurement with touch trigger probe CMM. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 21, 2003, pp. 902-909

Artykuł recenzowany