

Jerzy SŁADEK, Marcin KRAWCZYK

POLITECHNIKA KRAKOWSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI PRODUKCJI

Metody oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych

dr hab. inż. Jerzy SŁADEK Prof. PK i PWSZ

Specjalizuje się w metrologii stosowanej w systemach wytwarzania a szczególnie metrologii współrzędnościowej. Zorganizował i kieruje Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej w Politechnice Krakowskiej. Autor kilkudziesięciu prac i monografii z zakresu pomiarów współrzędnościowych. Po raz pierwszy zastosował sztuczne sieci neuronowe do modelowania i oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych.



e-mail:sladek@mech

Streszczenie

W artykule zaprezentowano problematykę oceny dokładności pomiarów realizowanych przy zastosowaniu współrzędnościowych systemów pomiarowych. Przedstawiono metody wyznaczania niepewności pomiaru oraz problem relacji pomiędzy dokładnością urządzeń i systemów pomiarowych a dokładnością pomiaru. Opisano też metody wykorzystujące koncepcję modeli symulacyjnych - wirtualnych maszyn pomiarowych jako skutecznych narzędzi oceny on-line szacowania niepewności pomiarów.

Słowa kluczowe: metrologia współrzędnościowa, niepewność pomiaru

Methods of estimation of coordinate measurements

Abstract

This article presents the problems of estimating the accuracy of measurements made by using coordinate measuring machines. The methods of estimating the uncertainty of measurements and issues concerning the relation between the accuracy of instruments and measuring systems and the accuracy of measurement are described. Methods based on the concept of simulation models (Virtual Measuring Machines) as effective tools for on-line estimation of measurement uncertainty are also described.

Keywords: coordinate metrology, uncertainty of measurement

1. Wprowadzenie

Zgodnie z wymogami technologicznymi wyniki pomiarów są tylko wtedy przydatne, gdy są podawane z określeniem ich dokładności, to w przypadku współrzędnościowych technik pomiaru (WTP) jest to zadanie szczególnie trudne i nie zawsze jednoznaczne. Dlatego użytkownicy tej techniki, jak i producenci maszyn pomiarowych często pomijają problem dokładności realizowanego pomiaru, podając w zamian dokładność urządzenia pomiarowego, określoną dla realizacji wybranego zadania pomiaru długości (wymiarowo zbliżonej do wymiarów przedmiotu mierzonego). Tak określona dokładność znacznie różni się od dokładności rzeczywistego, (aktualnie realizowanego) zadania, prowadząc do błędnych informacji. Od metrologa wymaga się już powszechnie, kompletnej informacji z jaką niepewnością wykonano poszczególne pomiary. W przypadku WTP stanowi to poważny problem, gdyż konieczna jest specjalistyczna wiedza pozwalająca na określenie niepewności każdorazowo realizowanego pomiaru co jest szczególnie trudne w warunkach przemysłowych. Na Politechnice Krakowskiej prowadzone są od wielu lat prace nad opracowaniem metod oceny dokładności pomiarów współrzędnościowych zarówno w oparciu o metody porównawcze, wielopozycyjne jak i symulacyjne z wykorzystaniem modeli maszyn pomiaro-

dr inż. Marcin KRAWCZYK

Uzyskał stopień doktora w 2005r, adiunkt Politechniki Krakowskiej. Zajmuje się badaniami nad oceną niepewności pomiaru współrzędnościowego jak również oceną dokładności Maszyn Współrzędnościowych zwłaszcza odmian wielkogabarytowych.



e-mail:krawczyk@m6.mech.pk.edu.pl

wych tzw. maszyn wirtualnych. Opracowane są też metody oceny dokładności poszczególnych systemów współrzędnościowych, wyznaczanie błędów granicznych, zarówno maszyny pomiarowych jak i laserowych systemów śledzących (Laser Tracker Systems) czy też skanerów optycznych oraz systemów fotogrametrycznych ostatnio realizowane w ramach Projektu Badawczego Rozwojowego finansowanego ze środków na naukę w latach 2006-2009 nr R03 029 01.

2. Dokładność pomiarów współrzędnościowych

Wyznaczona w oparciu o niepewność standardową, niepewność rozszerzona jest faktycznie błędem granicznym pomiaru, który w pewnych warunkach (przy założeniu np. minimalizacji wpływu strategii pomiarowej i stabilizacji warunków zewnętrznych) można utożsamić z błędem granicznym przyrządu pomiarowego i powinna się ona zawierać dla prawidłowo działającego przyrządu w obszarze błędów granicznych dopuszczalnych (ang. Maximum Permissible Errors MPE of Measurement Instrument), np. wg ISO10360). W większości przyrządów pomiarowych błędy graniczne dopuszczalne podaje się w postaci liniowej.

Zakłada się przy tym, że błędy graniczne rzeczywiste nie przekroczą wartości błędów granicznych dopuszczalnych. W warunkach oceny dokładności powinno wyznaczać się błędy graniczne dla założonej procedury oceny i porównać z ustalonymi wcześniej (wg tej samej procedury) jako błędy graniczne dopuszczalne. Takie podejście zostało również przyjęte w opracowanych dotychczas procedurach oceny dokładności np. współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP).

W praktyce przemysłowej pomiar techniką współrzędnościową wykonuje się z reguły jednokrotnie, dlatego posługiwanie się modelem losowym a więc wyznaczanie niepewności pomiaru metodą A jest możliwe tylko w przypadku hipotetycznego sposobu powtarzania pomiaru, co może być wykorzystane w przypadku symulacji pomiarów realnych (z zachowaniem w tej symulacji warunków powtarzalności i odtwarzalności). Ogólnie jednak należy preferować stosowanie metody typu B, co wymaga opracowania uogólnionego modelu niepewności dla danego laboratorium wyposażonego w maszynę współrzędnościową. Inaczej wygląda to zagadnienie w przypadku stosowania współrzędnościowych systemów mobilnych takich jak laserowe systemy śledzące (Laser Tracker System) czy ramiona pomiarowe. Konstrukcja budżetu niepewności jest tu znacznie trudniejsza z uwagi na mniejszą stabilność warunków realizacji pomiarów.

3. Dokładność maszyn pomiarowych

Ocena dokładności WMP realizowana na podstawie pomiaru długości jest próbą przeniesienia metod oceny konwencjonalnych przyrządów pomiarowych.

Na tej właśnie koncepcji opierają się państwowe lub międzynarodowe wytyczne i normy: ANSI B89.12-90, BS6808-2, ISO10360-2, JIS B7440 oraz zalecenia: VDI/VDE2617, CMM.

Podstawową jednak wadą wszystkich omawianych metod jest niezgodność z teorią pomiarów współrzędnościowych, gdzie, jak wiadomo, przedmiotem bezpośredniego pomiaru nie jest długość, lecz współrzędna punktu na powierzchni przedmiotu mierzzonego. Opracowana przez Sładka Metoda Macierzowa (MM)[1] wychodzi naprzeciw temu problemowi i pozwala na wyznaczenie dokładności WMP w określonych punktach referencyjnych. Realizacja tej metody poprzez wykorzystanie laserowego systemu nadążnego przedstawiona została na Rys.1.



Rys.1. Realizacja metody macierzowej z wykorzystaniem Laserowego Systemu Nadążnego LSW 840 Leica
Fig. 1. Realization of Matrix Method with the use of Lasertracker LTD840 Leica

4. Wyznaczenie niepewności pomiaru z wykorzystaniem obiektów wykalibrowanych

Istotą metody wykorzystującej obiekt wykalibrowany – metody porównawczej, jest przyjęcie zasady nieidentyfikowania przyczyny błędów, lecz przeprowadzenie ocen ich globalnych skutków w postaci zidentyfikowania odchyłek od wymiaru wzorcowego. Opiera się ona wykorzystaniu jako wzorców obiektów o prostej geometrii i spełnieniu wymogów podobieństwa oraz substytucji pozycji pomiarowej przedmiotu i wzorca. Przeprowadzenie pomiaru i określenie jego dokładności wymaga zastosowania odpowiedniego wzorca. W metodzie porównawczej WMP wykorzystywana jest jako komparator między niezbędnym tutaj wzorcem a przedmiotem mierzonym [1,3]; warunki komparacji podano w tabeli Tab. 1. [3].

Tab. 1. Dopuszczalne odchylenia między przedmiotem mierzonym a wzorcem użytym w metodzie porównawczej [3]

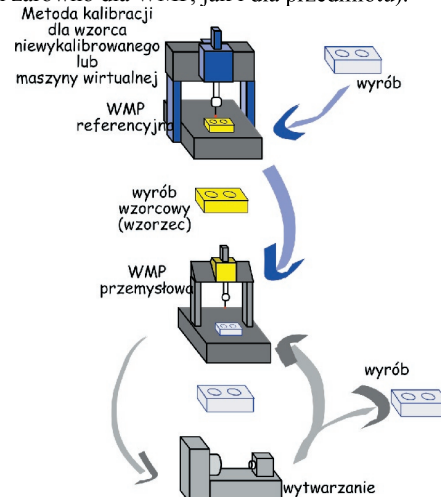
Tab.1. Similarity requirements for artifacts used for the comparison method

Rozpatrywany parametr	Dopuszczalna różnica między wzorcem a mierzonym przedmiotem oraz warunki realizacji pomiarów
Wymiary geometryczne	$\pm 10\%$ długości lub ± 25 mm (wybór większej z nich)
Materiał	musi być identyczny
Strategia pomiaru	musi być identyczna
Konfiguracja głowicy	musi być identyczna
Siła pomiarowa w punkcie styku	$\pm 20\%$

Jak łatwo zauważyć, największą zaletą tej metody jest prostota jej realizacji. Nie jest wymagana znajomość składowych błędów WMP, muszą być jednak, jak wspomniano wyżej, zachowane identyczne warunki realizacji pomiaru. Także maszyna nie musi mieć (teoretycznie) bardzo dużej dokładności, ale powinna odznaczać się dobrą powtarzalnością chwilową, którą, jak powszechnie wiadomo, łatwiej jest osiągnąć niż dużą (długoterminową) dokładność. W praktyce jednak metoda ta wymaga bardzo skomplikowanych systemów zapewniających stabilne warunki realizacji pomiarów i maszyny jednak o dużej dokładności, gdyż nie jest

opłacalne stosowanie WMP, którą należałoby często ponownie kalibrować. Stąd główne zastosowanie metody porównawczej to masowa kontrola sprawdzianów, realizowana w specjalnych laboratoriach kalibracyjnych – centrach pomiarowych.

Metoda ta może też być wykorzystywana w produkcji wielkoserijnej, gdzie z punktu widzenia ekonomiki pomiaru staje się opłacalna. Zapewnić jednak należy wtedy stałą kontrolę warunków realizacji pomiarów (konieczna jest kompensacja wpływów termicznych zarówno dla WMP, jak i dla przedmiotu).



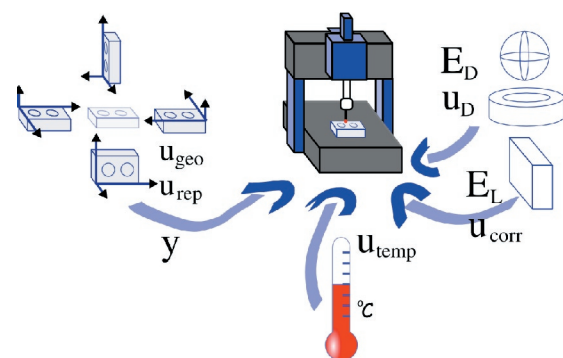
Rys. 2. Schemat wykorzystywania metody porównawczej do nadzoru jakości produkcji [4]

Fig. 2. Substitution method for management of production quality

Na Rys. 2. zaprezentowano taki właśnie sposób przemysłowego wykorzystania metody porównawczej. Na jej podstawie testowany jest określony procent produkcji, co zapewnia stabilizację dokładności, a jednocześnie nie powoduje zakłócenia jej toku. Największą jednak wadą tej metody jest jej niezwykle mała uniwersalność, a należy pamiętać, że cecha ta w przypadku WMP odgrywa bardzo ważną rolę. Wysoki relatywnie jest też koszt wykonania kalibracji i okresowego sprawdzania wzorców, by mogły pokryć swym zakresem całe spektrum produkcji. Dla produkcji małoseryjnej i jednostkowej złożonych geometrycznie przedmiotów metoda ta jest praktycznie nieprzydatna.

5. Niepewność oceniana z wykorzystaniem niewykalibrowanych obiektów pomiarowych i wielokrotnie powtarzaną strategią pomiarową

Schemat wyznaczania niepewności pomiaru opartego o ideę wzorca niewykalibrowanego pokazano na Rys.3.



Rys. 3. Schemat wyznaczania niepewności pomiaru w oparciu o wzorec niewykalibrowany [4]

Fig. 3. Estimation of measurement uncertainty on the base uncalibrated artifact base[4]

Polega on na wielokrotnym powtórzeniu pomiaru przedmiotu w czterech różnych orientacjach. Z tego pomiaru wyznaczone zostają następujące parametry niepewności:

u_{rep} niepewność uzyskanej powtarzalności pomiaru związanej z pomiarem tego samego elementu w różnych orientacjach. Wyznaczana zgodnie z zależnością:

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2} \quad (6)$$

gdzie n to liczba powtórzeń pomiaru, m — liczba różnych orientacji, w których element jest mierzony, s_j — odchylenie standardowe dla j -tej orientacji.

u_{geo} składowa niepewności związana z różnicami jakie uzyskamy w przypadku pomiaru obiektu dla różnych orientacji. Wyznaczana zgodnie z zależnością:

$$u_{geo} = \frac{1}{\sqrt{m}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2 - \frac{u_{rep}^2}{n}} \quad (7)$$

gdzie y_j to średnia pomiarów w j -tym położeniu, \bar{y} — średnia uzyskana ze wszystkich pomiarów.

y_{ij} to pojedynczy pomiar w i -tej serii i j -tej orientacji. Obie składowe niepewności są wystarczające do wyznaczenia niepewności błędu kształtu lub kąta elementu mierzonego. W przypadku pomiarów długości lub pozycji potrzebne jest wyznaczenie dodatkowych składowych niepewności pomiaru. W takim przypadku dokonywany jest pomiar wykalibrowanego wzorca długości i wyznaczana jest wartość błędu systematycznego E_L zgodnie z zależnością:

$$E_L = L \cdot E_{Lp} \quad (8)$$

gdzie błąd względny E_{Lp} zostaje odniesiony do długości wzorca:

$$E_{Lp} = \frac{1}{3 \cdot n_w} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_{ij} - L_c}{L_c} \right) \quad (9)$$

n_w jest to ilość pomiaru wzorca długości wzdłuż konkretnej osi WMP L_{ij} — wskazanie maszyny dla pojedynczego pomiaru,

L_c wartość wymiaru długości wzorca uzyskana podczas jego kalibracji.

Składowa niepewności związana z korekcją średniego błędu długości będzie wyznaczana jako:

$$u_{corr} = \frac{L}{L_c} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_c}{2} \right)^2 + \frac{u_w^2}{3 n_w}} \quad (10)$$

gdzie U_c jest niepewnością kalibracji wzorca, u_w — średnią odchylen standardowych wyznaczanych z pomiarów w poszczególnych położeniach.

Dodatkowymi składowymi jakie mogą być wyznaczone podczas wyznaczania niepewności tego rodzaju pomiaru to składowe związane z pomiarem stykowym WMP E_D wyznaczana w podobny sposób jak E_L . W tym przypadku jednak mierzony jest pierścień wzorcowy oraz kula kalibracyjna. Składowa E_D jest tutaj wartością większą z ich obu. Drugą jest niepewność wyznaczenia odpowiednich parametrów u_D wyznaczana w podobny sposób jak u_{corr} .

Kolejnym parametrem może być wyznaczenie wpływu korekcji temperatury na pomiar.

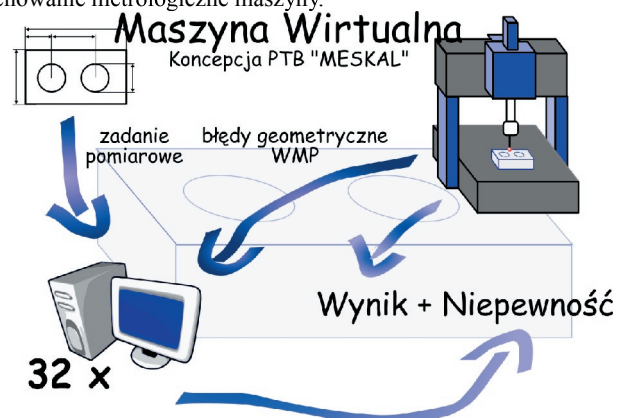
Ostatecznie równanie niepewności przyjmie następującą postać:

$$u = |E_D| + |E_L| + k \cdot \sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2 + u_{corr}^2 + u_D^2 + u_{temp}^2} \quad (11)$$

gdzie k jest współczynnikiem rozszerzającym równanie niepewności na odpowiedni stopień ufności.

6. Wyznaczanie niepewności pomiarów z wykorzystaniem symulacji przy pomocy VCMM (wirtualnej WMP)

Na podstawie prac [1,2,4] można stwierdzić, że zagadnienie oceny dokładności dowolnego pomiaru realizowanego na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (WMP) może znaleźć skuteczne rozwiązanie na podstawie symulacji pomiarów i określenia dla nich błędów z zastosowaniem kopii wirtualnej ocenianej przez WMP. Kopia wirtualna ma maksymalnie wiernie odtwarzać zachowanie metrologiczne maszyny.



Rys. 4. Koncepcja maszyny wirtualnej opracowanej w PTB z zastosowaniem do wyznaczania on line niepewności pomiaru

Fig. 4. Virtual CMM made by PTB for on-line estimation of uncertainty

Na Rys.4. zaprezentowano koncepcje modelu opracowanego w PTB [2,4]. System ten zainstalowano w połowie lat dziewięćdziesiątych na Politechnice Krakowskiej i na jego podstawie zbudowano modele wirtualne wielu maszyn pomiarowych. Błędy składowe identyfikowano w oparciu o pomiary z wykorzystaniem płyty kulowej i oprogramowania Kalkom [2]. W ślad za tymi badaniami także na Politechnice Krakowskiej opracowano nowy komputerowy model realizujący wirtualną WMP (w ramach projektu PB1367/T07/95/08). Najnowszy model dedykowany do maszyn o dużych zakresach pomiarowych Laserowy Wzorzec Stopniowy opracowany został w ramach pracy [5].



Rys. 5. Koncepcja VCMM PK opracowana w PK z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i Metody Macierzowej identyfikacji dokładności w punktach referencyjnych [1,4]

Fig. 5. Virtual CMM PK made by CUT with the use neural network and Marix Method

Najnowocześniejszą koncepcją maszyny wirtualnej jest model Virtual Neuro CMM [1] pozwalający na wyznaczenie błędów WMP z wykorzystaniem różnych orientacji i pozycji płyty kulo-

wej jako podstawa budowy siatki punktów retencyjnych i Metody Macierzowej. Metoda ta nie wymaga wyznaczania błędów geometrycznych WMP i identyfikuje dokładność w poszczególnych punktach. Uzyskane wyniki są wykorzystywane przez oprogramowanie Virtual Neuro CMM oparte o sztuczne sieci neuronowe. Koncepcja ta zaprezentowana została na Rys. 5.

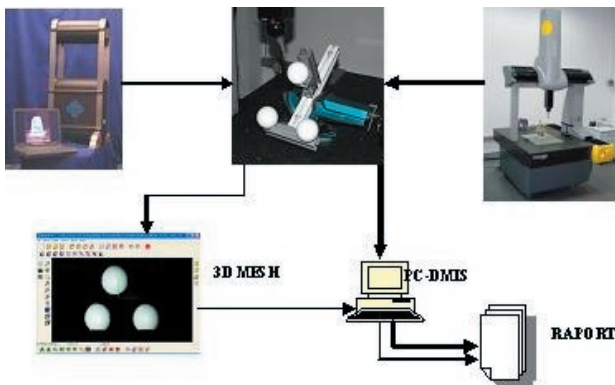
7. Wyznaczanie niepewności pomiarów w optycznych systemach współrzędnościowych

Problem niepewności pomiarów realizowanych z wykorzystaniem skanerów optycznych wykorzystujących światło strukturalne jest zadaniem jakie pojawiło się w obszarze pomiarów współrzędnościowych stosunkowo niedawno. Zadanie to może zostać realizowane tylko w przypadku przeprowadzenia wzorcowania takich systemów z wykorzystaniem wzorców przestrzennych np. płyt z elementami przestrzennymi, których charakterystyka metrologiczna uzyskana została w wyniku wzorcowań na dokładnej WMP [7].

W ramach projektu badawczego finansowanego ze środków na naukę w latach 2005-2007 realizowanego przez z Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej. Opracowano system oparty na tej koncepcji pomiarów hybrydowych nazwano OMMM (Opto-Mechanical Measurement Machine). Podstawową jego zaletą jest możliwość uzyskania znacznie większej liczby punktów pomiarowych (rzędu setek tysięcy, milionów) i relatywnie krótki czas pomiaru w stosunku do klasycznych pomiarów współrzędnościowych. Pozwala to, na pomiar wytwarzanych części maszyn nawet ze 100% modelem kontroli.. Naturalnym odbiorcą tej metody jest produkcja seryjna przemysłu motoryzacyjnego, AGD czy elektroniki użytkowej.

Zasada działania OMMM jest następująca: dla mierzonego obiektu wyznaczany jest układ współrzędnych metoda stykową i na nim bazuje pomiar realizowany w następnej sekwencji gdzie obiekt jest wstępnie mierzony za pomocą optycznego systemu pomiarowego. Wynikiem pomiaru jest chmura punktów, czyli współrzędna x,y,z każdego pomierzonego punktu obiektu. Identyfikowane są też te elementy które nie zostały odwzorowane w sposób zadowalający lub jest to inny typ wymiaru np. wewnętrzny i istnieje konieczność realizacji pomiaru stykowego za pomocą maszyny współrzędnościowej. Dlatego tak istotne jest by obydwa urządzenia dokonywały pomiaru z wykorzystaniem tego samego układu odniesienia bazującego na elementach mierzonego obiektu lub trwale z nim związanych.

Koncepcja systemu zaprezentowana jest na Rys.6.



Rys.6. Koncepcja systemu OMMM
Fig. 6. Concept of OMMM system

Model niepewności pomiaru realizowany z wykorzystaniem systemu OMMM uwzględnia zarówno niepewność pomiaru WMP

jak i problem dokładności systemu skanera wykorzystującego światło strukturalne, gdzie istotną rolę odgrywa zagadnienie refleksyjności mierzonej powierzchni i jej relacji w stosunku do refleksyjności powierzchni wzorców użytych do kalibracji systemu. Koncepcja wyznaczenia niepewności pomiaru oparta jest o metodę wielopozycyjną opisana w rozdziale 5.

8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane metody obliczenia dokładności pomiarów realizowanych metodami współrzędnościowymi. Stosowanie tych metod oparte jest na wieloletnim doświadczeniu w realizacji pomiarów i szacowaniu niepewności. Metody te zgodne są też z wymogami normy ISO 15530; jej poszczególnych części, tych które zostały opublikowane i tych które są jeszcze przedmiotem dyskusji na form grupy roboczej WG10 ISO. Zaprezentowano procedury oparte o wykorzystanie metody wielopozycyjnej z wykorzystaniem obiektów niekalibrowanych, metody stosującej obiekty kalibrowane z metodą porównawczą oraz symulację pomiarów z zastosowaniem maszyny wirtualnej (VCMM). Przed laboratorium pomiarowym staje więc pytanie jaką metodę wybrać? Odpowiedź na to pytanie nie może być jednoznaczna, zależy od bardzo wielu czynników i wymaga analizy nie tylko zadania pomiarowego ale i warunków laboratorium oraz wymogów produkcji i technologia zlecającego pomiary. Ponadto realizacja procedury wyznaczania niepewności wymaga specjalistycznej wiedzy i dużego doświadczenia. Innym aczkolwiek kosztowym rozwiązaniem jest instalacja oprogramowania maszyny wirtualnej VCMM pozwalającej na obliczanie on-line niepewności realizowanych pomiarów. Systemami takimi dysponują jednak nieliczne laboratoria na świecie w tym Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej. Politechniki Krakowskiej

Ponadto istotną rolę w przypadku oceny niepewności pomiarów odgrywa tu nadzorowanie błędów wskazania systemu współrzędnościowego. W ramach projektu badawczo rozwojowego Nr R03 029 01. opracowywany jest system nadzoru dokładności systemów współrzędnościowych wykorzystujące wzorce przestrzenne typu Tetraedr. System ten w założeniu powiązany jest z europejskim systemem nadzoru opracowanym w ramach projektu TRACES.

9. Literatura

- [1] Śladek J. *Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych*, - Monografia Politechnika Krakowska .Kraków, 2001
- [2] Trapet E. *Traceability of Coordinate Measurements According to Method of Virtual Measuring Machine*. PTB F-35, Braunschweig 1999.
- [3] Trapet E., Wäldele F., *Substitution method to make traceable measurements with CMMs*. Working paper ISO/TC3/WG10, 1996.
- [4] Śladek J: *The Relationship Between Measuring Machines Performance Specifications and their real Capability to solve given Measurement Tasks* - METROMEET 2005 International Conference on Industrial Dimensional Metrology Bilbao (Spain), April 7- 8, 2005 Euskalduna Jauregia Referat Zapraszany
- [5] Krawczyk M. *Metoda oceny dokładności WMP z zastosowaniem Laserowego Wzorca Stopniowego*, Praca doktorska. Kraków 2005.
- [6] Śladek J., Krawczyk M, i inni. *The assessment of the coordinate measurement accuracy based on Matrix Method with use of artificial neural networks*- 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing Specification and Verification for Assemblies March 21st - 23rd, 2007 in Erlangen, Germany
- [7] Śladek, J, Sitnik R, Kupiec M, Błaszczak P.: *The New Hybrid Method for Fast and Precise Measurement*, Proceedings of XVIII World Congress – Metrology for Sustainable Development – Sept 17-22, 2006 Rio de Janeiro , Brazil

Artykuł recenzowany