

Tomasz KOWALUK¹, Eugeniusz RATAJCZYK²

¹ POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI, INSTYTUT METROLOGII I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

² WYŻSZA SZKOŁA EKOLOGII I ZARZĄDZANIA, ul. Wawelska 14, 02-061 Warszawa

Dokładność tomografów przemysłowych CT w wyznaczaniu wymiarów geometrycznych

Mgr inż. Tomasz KOWALUK

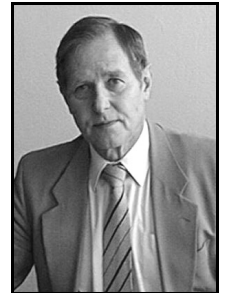
Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2011. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Obszar zainteresowań naukowych - przemysłowa tomografia komputerowa, współrzędnościowe techniki pomiarowe.



e-mail: t.kowaluk@mchtr.pw.edu.pl

Prof. dr inż. Eugeniusz RATAJCZYK

Profesor zwyczajny związany z Politechniką Warszawską (Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Zakład Metrologii i Inżynierii Jakości) oraz z Wyższą Szkołą Ekologii i Zarządzania w Warszawie. Wieloletni przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, od IX.2008 roku honorowy przewodniczący. Uprawiana dyscyplina: Metrologia interdyscyplinarna i techniczna - współrzędnościowa technika pomiarowa, przemysłowa tomografia komputerowa, maszyny i roboty pomiarowe.



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

Streszczenie

Zaprezentowano metodę w zakresie wyznaczania dokładności wymiarów geometrycznych przemysłowych tomografów komputerowych zgodnie z wytycznymi VDI/VDE 2630. Zaprezentowano propozycje sprawdzenia dokładności tomografu opartą na wzorcu składającym się z zestawu trzpieni z końcówkami kulistymi. Opisano wzorec zaprojektowany i skonstruowany w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Wzorec został wykalibrowany za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA firmy C. Zeiss. Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych wykonany został model CAD wzorca. Uzyskane podczas pomiarów tomograficznych chmury punktów zostały porównane z modelem CAD. Przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników oraz sprawdzono podawaną przez producenta dokładność pomiarów geometrycznych tomografu komputerowego METROTOM 800.

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa CT, wzorce geometryczne, dokładność pomiarów, model CAD.

The accuracy of industrial computer tomography scanners in determining geometric dimensions

Abstract

This paper presents the construction of a computer tomography scanner (CT). It discusses the principles of operation of CT. The parameters characterizing the accuracy are described. The proposed method for determining the geometric dimension accuracy of industrial computer tomography scanners according to VDI / VDE 2630 is discussed. The presented proposals can be used to verify the tomography scanner accuracy based on gauges consisting of a set of spherical stylus. A gauge to check the CT accuracy was designed and constructed at the Institute of Metrology and Biomedical Engineering, the Warsaw University of Technology. The gauge was calibrated using a coordinate measuring machine ACCURA 7 by C. Zeiss. Based on the measurement data a CAD model of the gauge was made. The measurement strategies were based on the CAD model. The point clouds for tomographic measurements were compared with the CAD model. The results of the two measuring devices were compared. Statistical analysis of the results was conducted. It showed statistically significant differences between the methods of measuring on the confidence level of 95%. It was also confirmed by the statistical parameters obtained for the both methods. The values of the range and standard deviations were approximately twice as high for the tomographic measurements. Also the accuracy specified by the manufacturer of CT METROTOM 800 was verified.

Keywords: computer tomography, geometric gauges, accuracy of measurements, CAD model.

1. Wstęp

Przemysłowa tomografia komputerowa jest stosunkowo młodą gałęzią nauki, zaliczającą się do współrzędnościowej techniki

pomiarowej, mającą swe korzenie w diagnostyce medycznej [1]. W obydwu typach tomografów przemysłowych i medycznych do podstawowych zespołów zalicza się lampę rentgenowską, panele detektorów oraz system pozycjonowania [2]. Pod względem budowy tomografy przemysłowe charakteryzują się zastosowaniem mocniejszych lamp rentgenowskich (o napięciach w standardowych tomografach do 250-450kV) oraz detektorów o większej rozdzielczości (do 2000 x 2000 pikseli). Odmienna jest również realizacja systemu pozycjonowania mierzonego obiektu. Tomografy przemysłowe w większości przypadków wyposażone są w nieruchomą lampę rentgenowską oraz panelu detektorów (w medycznych elementy ruchome), natomiast manipulacja badanym obiektem odbywa się poprzez zastosowanie prowadnic liniowych oraz obrotowego stolika o wysokiej dokładności.

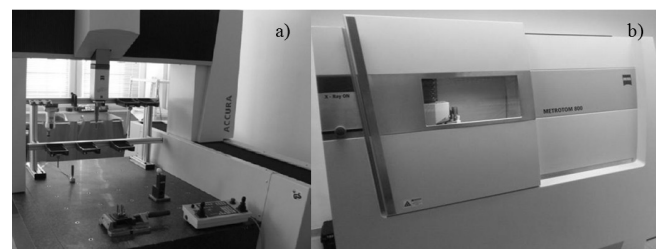
Mierzone przedmioty podczas pomiaru pochłaniają energię promieniowania rentgenowskiego, wiązka rentgenowska zostaje osłabiona a różnica intensywności promieniowania przechodzącego przez obiekt jest rejestrowana na panelu detektorów. Zmiana natężenia promieniowania równoległej wiązki o jednakowej energii, przy przejściu przez obiekt opisana jest zależnością:

$$I = I_0 e^{-\mu g}, \quad (1)$$

gdzie: I – natężenie promieniowania po przejściu przez obiekt, I_0 – początkowe natężenie promieniowania, μ – liniowy współczynnik absorpcji promieniowania, g – grubość badanego materiału.

Absorpcja promieniowania rentgenowskiego przez obiekt badany jest proporcjonalna do gęstości i budowy atomowej materiału oraz grubości ścian elementu [2].

Badania w celu ustalenia dokładności zostały przeprowadzone na współrzędnościowej maszynie pomiarowej ACCURA 7 (CMM) oraz tomografie komputerowym METROTOM 800 (CT) produkcji firmy Carl Zeiss (rys. 1). Badania przeprowadzono w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.



Rys. 1. Urządzenia pomiarowe: a) Współrzędnościowa maszyna pomiarowa ACCURA 7, b) przemysłowy tomograf komputerowy METROTOM 800
Fig. 1. Measuring equipment: a) Coordinate measuring machine ACCURA 7, b) industrial computer tomography scanner METROTOM 800

Współrzędnościowa maszyna pomiarowa ACCURA 7 firmy Carl Zeiss mająca zakres pomiarowy wynoszący 900 x 1200 x 700 mm, wyposażona jest w aktywną, skaningową głowicę pomiarową VAST gold. Graniczny dopuszczalny błąd wskazania MPE_E podczas pomiarów geometrycznych wynosi $(1,7 + L/333) \mu\text{m}$, gdzie L oznacza wartość mierzonego wymiaru w milimetrach [3]. Natomiast tomograf komputerowy METROTOM 800 wyposażony jest w lampę rentgenowską o mocy 39W (maksymalne napięcie 130kV) i minimalnym rozmiarze ogniskowej wynoszącym 5 μm , detektor o rozdzielczości 1536 x 1920 pikseli (rozmiar pojedynczego piksela 127 x 127 μm) i maksymalnym powiększeniu wynoszącym 45 dla pomiarów 2D i 40 dla pomiarów 3D oraz układ pozycjonowania umożliwiający przemieszczanie mierzonego obiektu w zasięgu 700 mm dla osi X, 270 mm dla osi Z. Powtarzalność pozycji kątowej wynosi 0,5" a maksymalne bicie promieniowe i osiowe 0,2 μm . Graniczny błąd pomiarów geometrycznych MPE_E dla tomografu METROTOM 800 wynosi $(4,5 + L/100) \mu\text{m}$ [4].

2. Testy sprawdzania dokładności tomografów komputerowych

Przemysłowa tomografia komputerowa jest stosunkowo młodą techniką pomiarową dla której nie zostały jeszcze opracowane normy ISO badania dokładności. Istnieje wiele zróżnicowanych propozycji konstrukcji wzorców do sprawdzania dokładności pomiarów geometrycznych [5]. Zaproponowany w badaniach wzorec umożliwia wykonanie testów sprawdzania dokładności przemysłowych tomografów komputerowych według wytycznych VDI/VDE 2630. Blatt 1.3. „Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik“ [6]. Wytyczne obejmują kryteria oceny tomografów dla czterech grup parametrów:

- 1) parametry związane z błędem skanowania (PF , PS),
- 2) parametry związane z błędem pomiaru długości (E),
- 3) parametry określające zależności wymiarowo – materiałowe (GS , GF , GG),
- 4) parametry określające rozdzielczość (Dg) [7].

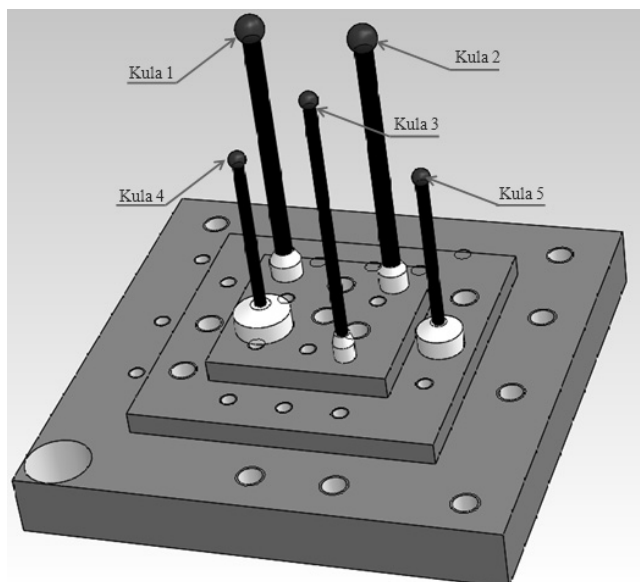
VDI/VDE podają wytyczne do stosowania normy ISO 10360 [8] dla tomografów komputerowych. Proponują analogiczne sposoby wyznaczania odpowiednich odchylek tak jak ma to miejsce w przypadku sprawdzania standardowych maszyn CMM.

Wytyczne VDI/VDE 2630 [6] definiują rozdzielczość struktury jako graniczną średnicę najmniejszej kuli dla której możliwe jest wyznaczenie podanej przez producenta wartości granicznej MPE błędu skanowania kształtu PF oraz błędu skanowania wymiaru PS . Błąd skanowania PF wyznaczany jako różnica między maksymalną i minimalną odległością skanowanego punktu od środka kuli teoretycznej (wyznaczonej obliczeniowo) $PF = R_{max} - R_{min}$, natomiast błąd skanowania wymiaru PS określany jest jako różnica pomiędzy zmierzoną średnicą a średnicą wzorcową ze świadectwa wzorcowania kuli $PS = (D_a - D_V)$.

Wytyczne proponują wykorzystanie wzorców kulowych do wyznaczania błędów skanowania. Do wyznaczania błędów granicznych przy pomiarze długości wytyczne zalecają stosowanie wzorców krańcowych - kulowych wzorców prętowych. Możliwe jest również stosowanie płytowych i sześciennych wzorców kulowych. W artykule przedstawiono propozycję budowy wzorca kulowego do wyznaczania błędu granicznego przy pomiarze długości. Do sprawdzania wpływu zależności materiałowo-geometrycznych zalecane jest stosowanie wzorca w postaci stopniowanego cylindra z minimum pięcioma i maksymalnie dziesięcioma znacząco różniącymi się średnicami zewnętrznymi z współosiowym przelotowym otworem [2].

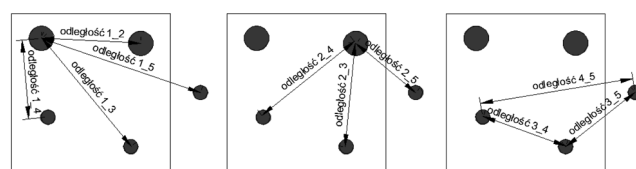
3. Projekt wzorca

W celu sprawdzenia dokładności pomiarów geometrycznych tomografu komputerowego MRROTOM 800 został zaprojektowany przez Przemysława Chojnackiego pod kierunkiem autorów artykułu specjalny wzorec przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Model CAD wzorca
Fig. 2. CAD model of the gauge

Wzorec został wykonany z dwóch komponentów – podstawy wykonanej ze stali S235 oraz zestawu trzpieni pomiarowych dobranych z maszyny współrzędnościowej. Zastosowano trzpień z włókna węglowego z rubinowymi końcówkami pomiarowymi. Podstawą jest stopniowany kwadrat o boku 84,85 mm i wysokości stopni odpowiednio 11 mm, 15 mm, oraz 19 mm. W stalowej płycie nawiercono 16 otworów M5 oraz 19 otworów M3 w które mogą zostać wkręcone trzpień pomiarowe. Dodatkowo został wykonany otwór o średnicy 11,5 mm umożliwiający przymocowanie śrubą wzorca do stołu pomiarowego maszyny współrzędnościowej. Do przeprowadzenia badań w podstawie wzorca zamontowano pięć trzpieni których końcówki pomiarowe o dwóch wartościach średnic znajdowały się na trzech wysokościach względem płaszczyzny podstawy co pozwoliło na uzyskanie dziesięciu odległości wzorcowych pomiędzy środkami rubinowych kul zilustrowanych na rys. 3.



Rys. 3. Zestawienie odległości wzorcowych
Fig. 3. Reference distances

4. Projekt procedury badawczej, wyniki pomiarów z analizą i wnioskami

Aby zapewnić powtarzalność zbierania punktów pomiarowych podczas wzorcowania w pierwszej kolejności wykonano wstępne pomiary wzorca na maszynie współrzędnościowej ACCURA 7. Na podstawie uzyskanych wyników zbudowano model CAD wzorca.

Strategia pomiaru wzorca została oparta na stworzonym modelu CAD. Dla każdej kulistej końcówki pomiarowej zebrano po pięć punktów, jeden na biegunie i cztery punkty rozmieszczone co 90 stopni na równiku. Układ współrzędnych został zacementowany w środku kuli nr 1, oś X przechodziła przez środki kul nr 1 i 2 a płaszczyzna Z została skonstruowana z punktów odpowiadających środkom trzech kul o numerach 1, 2 i 3 znajdujących się na płaszczyźnie równoległej do podstawy wzorca. Wykonano dziesięciokrotny pomiar każdej z kul referencyjnych. Na podstawie

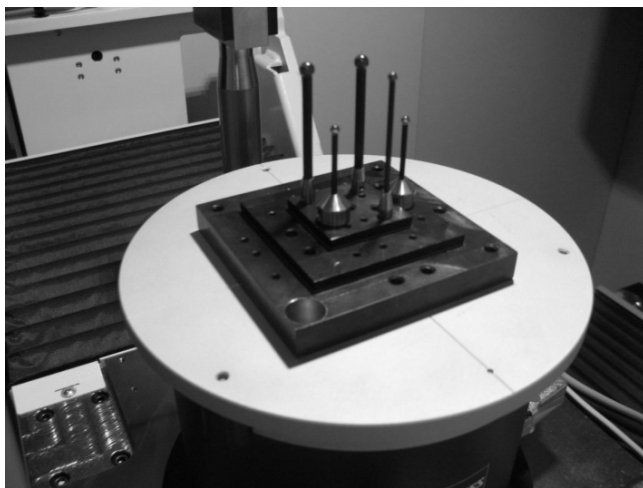
uzyskanych wartości średnich wprowadzono poprawki do modelu CAD. Proces wzorcowania odbył się z zastosowaniem poprawionego modelu CAD w celu zminimalizowania wpływu przesunięcia kul wzorcowych względem modelu CAD. Podczas wzorcowania dokonano jedenastokrotnego pomiaru każdego z pięciu trzpieni z końcówkami kulistymi. Wartości średnie uzyskane z serii pomiarów wpisano jako nominały wzorca. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wyniki uzyskane z pomiarów na CMM ACCURA 7
Tab. 1. The results obtained from measurements on CMM ACCURA 7

Lp.	Wielkość mierzona	Średnia, mm	Rozstęp, mm	Odchylenie standardowe, mm
1.	dystans1_2	19,8927	0,0004	0,0001
2.	dystans1_3	28,4288	0,0012	0,0004
3.	dystans1_4	22,1812	0,0010	0,0003
4.	dystans1_5	38,9714	0,0004	0,0001
5.	dystans2_3	21,1277	0,0004	0,0001
6.	dystans2_4	28,3538	0,0004	0,0001
7.	dystans2_5	24,9529	0,0004	0,0001
8.	dystans3_4	24,0663	0,0002	0,0001
9.	dystans3_5	27,0070	0,0005	0,0001
10.	dystans4_5	31,3034	0,0002	0,0001

Na podstawie uzyskanych wyników dla każdego z dystansów zostały wyliczone wartości średnie, wartości minimalne oraz maksymalne, rozstęp oraz odchylenie standardowe. Rozstęp jako miara rozrzutu mierzonych wartości uzyskanych za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej nie przekracza $1,3 \mu\text{m}$ natomiast wartości odchyleń standardowych zawierają się w przedziale $0,07 - 0,45 \mu\text{m}$ co pozwala stwierdzić iż wyniki pomiarów wykonane na maszynie współrzędnościowej ACCURA były powtarzalne w czasie przeprowadzania wszystkich serii pomiarowych.

Przed wykonaniem serii pomiarów na przemysłowym tomografie komputerowym przeprowadzono procedurę kalibracji detektora oraz kwalifikację geometrii i osi tomografu. Następnie wzorzec został zamontowany na stole obrotowym tak jak przedstawiono na rys. 4.



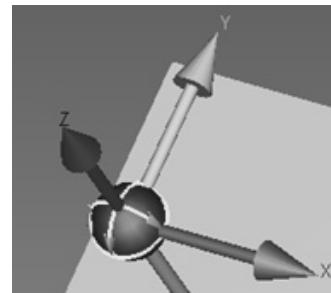
Rys. 4. Widok wzorca zamontowanego na stole obrotowym tomografu METROTOM 800

Fig. 4. View of the gauge mounted on the rotary table of the computer tomography scanner METROTOM 800

W oprogramowaniu METROTOM OS wycentrowano mierzony wzorzec, ustawiono minimalną wartość voxela ($32 \mu\text{m}$, odległość w osi X od lampy rentgenowskiej 190mm) przy której podczas pełnego obrotu były widoczne wszystkie końcówki trzpieni pomiarowych. Ponieważ średnica wiązki promieniowania w ognisku lampy rentgenowskiej podczas pomiaru powinna być mniejsza od wielkości pojedynczego voxela dobierano moc lampy aby nie przekroczyć wartości 16 W (średnica wiązki promieniowania w ognisku $20 \mu\text{m}$, powyżej 16 W średnica wiązki promieniowania w ognisku wynosi $40 \mu\text{m}$). Dobór parametrów pomiaru odbywa się poprzez analizę histogramu. Obserwując histogram skali odcieni szarości dobrano następujące parametry pomiaru: napięcie 100 kV, natężenie $160 \mu\text{A}$, czas integracji 1000 ms oraz wzmocnienie detektora 2,5 x. Ustawiono liczbę projekcji dla pełnego obrotu wynoszącą 1500 i włączono opcję sprawdzania ogniska lampy rentgenowskiej. Wzorzec został dziesięciokrotnie zmierzony przy zachowaniu identycznych parametrów pomiaru.

Uzyskane chmury punktów zostały wczytane do programu CALYPSO który jest programem przeznaczonym do współpracy ze współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi. Wersja 5.2. posiada rozbudowany dodatkowy moduł CT umożliwiający analizę powierzchniową chmur punktów uzyskanych z pomiarów tomograficznych.

Aby zachować powtarzalność zbieranych punktów pomiarowych dla każdej z analizowanych chmur punktów strategię pomiarową napisano bazując na wcześniej stworzonym modelu CAD wzorca z wprowadzonymi wartościami nominalnymi. Układ bazy został wyznaczony w analogiczny sposób jak podczas procesu wzorcowania na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Dla każdej z kul pomiarowych ustawiono identyczną strategię pomiarową składającą się z trzech wycinków okręgów (po 50 punktów pomiarowych dla każdego). Punkty zostały zebrane na całości równika oraz na dwóch połówkach okręgów przechodzących przez biegun krzyżujących się pod kątem 90 stopni wzdłuż osi X i Y. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na kuli przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na kuli
Fig. 5. Distribution of points on the sphere

Dla każdej z jedenastu uzyskanych na tomografie chmur punktów zmierzono dziesięć odległości pomiędzy środkami kul. Wyników wraz z uzyskanymi wartościami średnimi, rozstępami i odchyleniami standardowymi zestawiono w tab. 2.

Na podstawie uzyskanych wyników zostały wyliczone wartości średnie, minimalne oraz maksymalne, rozstępy oraz odchylenia standardowe dla każdego dystansu. Rozstęp jako miara rozrzutu uzyskanych wartości przy pomiarach tomografem METROTOM 800 nie przekracza $1,9 \mu\text{m}$ natomiast wartości odchyleń standardowych zawierają się w przedziale $0,09 - 0,67 \mu\text{m}$

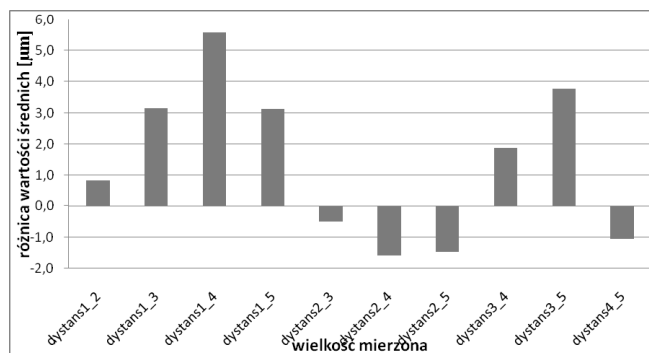
Różnice pomiędzy wynikami pomiarów uzyskanych za pomocą maszyny współrzędnościowej i tomografu komputerowego zostały zestawione w tab. 3. Na podstawie otrzymanych wyników stworzono wykres (rys. 6) przedstawiający różnice średnich wartości mierzonych odległości na maszynie współrzędnościowej oraz na tomografie rys. 6.

Tab. 2. Wyniki uzyskane z pomiarów na CT METROTOM 800
 Tab. 2. The results obtained from measurements on CT METROTOM 800

Wielkość mierzona	Średnia, mm	Rozstęp, mm	Odchylenie standardowe, mm
dystans1_2	19,8919	0,0010	0,0003
dystans1_3	28,4256	0,0005	0,0002
dystans1_4	22,1756	0,0009	0,0003
dystans1_5	38,9682	0,0019	0,0007
dystans2_3	21,1282	0,0010	0,0004
dystans2_4	28,3554	0,0008	0,0003
dystans2_5	24,9544	0,0013	0,0004
dystans3_4	24,0644	0,0003	0,0001
dystans3_5	27,0033	0,0012	0,0004
dystans4_5	31,3044	0,0019	0,0007

Tab. 3. Różnice pomiędzy uzyskanymi wartościami średnimi (CT i CMM)
 Tab. 3. Differences between the mean values (CT and CMM)

Wielkość mierzona	Różnica wartości średnich (CMM-CT), μm
dystans1_2	0,8
dystans1_3	3,2
dystans1_4	5,6
dystans1_5	3,1
dystans2_3	- 0,5
dystans2_4	- 1,6
dystans2_5	- 1,5
dystans3_4	1,9
dystans3_5	3,8
dystans4_5	- 1,0



Rys. 6. Wykres różnic wartości średnich (CT i WMP)
 Fig. 6. Graph of differences of the mean values (CT and CMM)

Różnice te zawierają się w przedziale od 0,5 μm do 5,6 μm . Maksymalna różnica pomiędzy wartościami średnimi przekracza wartość błędów MPE_E dla tomografu wynoszącą $(4,5 + L/100)$ μm , maksymalna wartość błędów dla dystansu1_4 nie powinna przekro-

czyć 4,72 μm . Wartość graniczna została przekroczona o 0,88 μm co może być spowodowane ugięciem trzpieni pomiarowych podczas pomiarów stykowych (podczas procesu wzorcowania). Ponadto analizie poddano wyniki pomiarów bez uwzględnienia niepewności wzorcowania. Aby zweryfikować poprawność uzyskanych danych należy dokonać ponownego wyzorcowania złożonego wzorca na urządzeniu charakteryzującym się dokładnością o rząd wielkości wyższą od dokładności tomografu. Ponadto należałoby wyeliminować wpływ ugięcia trzpieni z końcówkami kulistymi podczas pomiarów stykowych. Dopiero wtedy można dokonać porównania otrzymanych wartości odchyłek, na podstawie uzyskanych w doświadczeniu wyników zaobserwowano nie spełnienie wymagań dokładnościowych podanych przez producenta dla jednego ze wzorcowych dystansów.

Dla potwierdzenia istotności zaobserwowanych różnic przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników przy pomocy programu Statgraphics Centurion XVI. W pierwszym etapie usunięto wyniki pomiarów odbiegających pod względem statystycznym od całej serii przy pomocy wykresów „Box and Whisker”. Następnie potwierdzono normalność rozkładów przy pomocy testów Shapiro-Wilks, Skośności oraz Kurtozy.

Występowanie statystycznych różnic pomiędzy wynikami pomiarów z maszyny współrzędnościowej ACCURA a tomografem METROTOM 800 sprawdzono przy pomocy trzech testów: testu t w celu porównania wartości średnich, testu F w celu porównania odchyłek standardowych oraz testu W w celu porównania median. Wyniki testów wykazały istotne statystyczne różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami na poziomi ufności wynoszącym 95%. Wyniki testów są zgodne z wnioskami wynikającymi z porównania uzyskanych wartości statystycznych. Średni rozstęp wyników uzyskany na maszynie ACCURA wynosi 0,5 μm , a na maszynie METROTOM 800 1,1 μm . Z kolei, średnie wartości odchylenia standardowego dla maszyny ACCURA osiągnęły wartość 0,2 μm a dla maszyny METROTOM 800 0,4 μm . Widać zatem, że są to wartości w przybliżeniu dwukrotnie większe.

5. Literatura

- [1] Ratajczyk E.: Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D. Pomiary Automatyka Kontrola PAK vol. 57, nr 2/2011 s. 220-223.
- [2] Ratajczyk E.: Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Mechanik nr 2/2011, s.112-117; nr 3/2011, s.226-231; nr 4/2011 s.326-331.
- [3] <http://www.zeiss.pl>
- [4] METROTOM 800. Operating Instructions. Zeiss.
- [5] Kowaluk T., Woźniak A.: Study of porosity measurement using the computer tomograph. Pomiary Automatyka Robotyka (PAR) nr 12/2012 s. 82-86.
- [6] VDI/VDE 2630. Blatt 1.3. „Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik“, Düsseldorf 2009.
- [7] Kowaluk T, Woźniak A.: Study of computer tomography resolution using image quality indicators. X-th International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biała, Poland, April 2012, Accuracy in coordinate metrology, eds. Woźniak A. et al, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2012, pp. 96-103
- [8] PN-EN ISO 10360-2 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 2: CMM stosowane do pomiaru wymiarów.

otrzymano / received: 26.02.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.04.2013

artykuł recenzowany / revised paper