

**Tomasz KOWALUK<sup>1</sup>, Eugeniusz RATAJCZYK<sup>2</sup>, Michał RAK<sup>1</sup>**<sup>1</sup> POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHATRONIKI, INSTYTUT METROLOGII I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ,

ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

<sup>2</sup> WYŻSZA SZKOŁA EKOLOGII I ZARZĄDZANIA, ul. Wawelska 14, 02-061 Warszawa**Badanie powtarzalności pomiarów geometrycznych na tomografii komputerowej CT****Mgr inż. Tomasz KOWALUK**

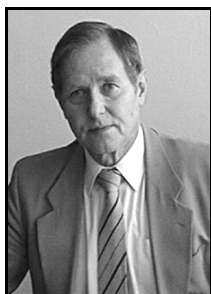
Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2011. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Obszar zainteresowań naukowych - przemysłowa tomografia komputerowa, współrzędnościowe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

**Mgr inż. Michał RAK**

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2011. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej a od stycznia 2013 doktorant również na École Polytechnique de Montréal, Département de Génie Mécanique w Kanadzie. W ramach pracy doktorskiej opracowuje metodę fuzji danych pochodzących z różnych metod pomiarowych, optycznych i stykowych.



e-mail: m.rak@mchtr.pw.edu.pl

**Streszczenie**

Przedstawiono wyniki badań powtarzalności pomiarów geometrycznych na przykładzie tzw. "kostki szkoleniowej" poprzedzając krótką charakterystyką przemysłowego tomografu komputerowego METROTOM 800 oraz oprogramowań. Programu METROTOM OS w którym ustawiane są parametry pomiarowe i wykonywane są pomiary oraz programu CALYPSO służącego do analizy uzyskanych z pomiaru chmur punktów. Przedstawiono wyniki pomiarów odległości płaszczyzn, średnic otworów oraz odległości między nimi. Strategia pomiarowa została oparta na modelu CAD a uzyskane wyniki z pomiarów tomograficznych w postaci chmury punktów zostały porównane z wymiarami zawartymi w modelu CAD. Porównanie odnosi się do wymiarów nominalnych jak i do pola tolerancji w funkcji odchyłek. Wyniki te pozwoliły również na ocenę dokładności "druku" w jakim to procesie wykonana została badana kostka. Kostka została wydrukowana z dostępnego modelu CAD. W badaniach porównano powtarzalność pomiarów elementów geometrycznych jak i odchyłki od wartości nominalnej kostki. W celu obliczenia parametrów statystycznych dokonano dziesięciokrotnego pomiaru kostki.

**Słowa kluczowe:** tomografia komputerowa, powtarzalność pomiarów, drukarki 3D, model CAD.

**The study of repeatability of geometric measurements on a computer tomography scanner****Abstract**

The results of tests of repeatability of geometric measurements on an example of the so-called "training cube" are presented in the paper. The short characteristics of the industrial computed tomography scanner METROTOM 800 is given. The software METROTOM OS, in which measurement parameters are set, and CALYPSO for analysis of the point clouds obtained from measurements are discussed. The results of measurements of surface distance, hole diameters and distances between them are presented. The measurement strategy was based on the CAD model and the results of tomographic measurements in the form of point clouds were compared with the dimensions contained in the CAD model. The comparison referred to the nominal dimensions and the tolerance field as a function of deviations. These results allowed the evaluation of the accuracy of "printing" process in which the tested "training cube" was

performed. The cube was printed from the available CAD model. The study compared the repeatability of the measurement of geometric elements and deviations from the nominal value of the cube. In order to calculate statistical parameters, the cube was measured ten times. The summary of the standard deviations and the ranges shows high repeatability of tomographic measurements. The value of standard deviations equaled 1 to 2.7 microns and the values of ranges were 3.3 to 8 microns.

**Keywords:** computer tomography, repeatability of measurements, 3D printer, CAD model.

**1. Wstęp**

Tomografia komputerowa oparta na promieniowaniu rentgenowskim jest rozpowszechnioną dziedziną w diagnostyce medycznej, a pierwsze medyczne tomografy zostały skonstruowane na początku lat 70 ubiegłego wieku. Poprzez zastosowanie silniejszych źródeł promieniowania rentgenowskiego możliwe jest przeniesienie tego obszaru techniki również do przemysłu. Dzięki jej zastosowaniu możliwa jest kontrola zróżnicowanych przedmiotów takich jak bloki silników, skrzynie biegów, dysze wtryskowe, łopatki turbin, itp. Pierwsze przemysłowe tomografy komputerowe pojawiły się pod koniec lat 80 ubiegłego wieku i używane były do badań nieniszczących. W przeciwieństwie do pomiarów na tradycyjnej maszynie współrzędnościowej [1], tomografia komputerowa umożliwia dostęp nie tylko do wymiarów zewnętrznych, ale również dostarcza informacji o strukturze i wymiarach wewnętrznych elementu.

Idea pomiarów polega na złożeniu trójwymiarowego obiektu przestrzennego z wielu obrazów płaskich powstałych w wyniku prześwietlania badanego obiektu w zadanych położeniach kątowych. Mierzony element ustawiany jest na obrotowym stole, który umożliwia przemieszczanie i pozycjonowanie liniowe oraz kątowe elementu. Przedmiot mierzony oświetlany jest wiązką promieniowania rentgenowskiego, a detekcja obrazu odbywa się na matrycy detektora w określonych położeniach kątowych stolika. Otrzymane obrazy przetwarzane są przez specjalistyczne oprogramowanie, przez co otrzymywane są pojedyncze radiogramy, a najczęściej trójwymiarowy model mierzzonego elementu umożliwiający generację przekrojów [2].

Mierzone przedmioty podczas pomiaru pochłaniają energię promieniowania rentgenowskiego, przez co wiązka rentgenowska zostaje osłabiona a różnica intensywności promieniowania przechodzącego przez obiekt jest rejestrowana na detektorze.

**2. Przemysłowy tomograf komputerowy METROTOM 800**

Badania w celu sprawdzenia powtarzalności pomiarów elementów geometrycznych zostały przeprowadzone na przemysłowym tomografie komputerowym METROTOM 800 firmy Carl Zeiss

(rys. 1) znajdującym się w laboratorium Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Do głównych zespołów tomografu komputerowego zalicza się źródło promieniowania rentgenowskiego - lampę rentgenowską o maksymalnej mocy 39W (przy parametrach zasilania: napięcie 130kV, natężenie 300 $\mu$ m) i minimalnym rozmiarze ogniskowej wynoszącej 5  $\mu$ m, matrycę detektorów promieniowania o rozdzielczości 1536x1920 pikseli (rozmiar pojedynczego piksela 127 x 127  $\mu$ m) oraz układ do pozycjonowania mierzonego elementu składający się z obrotowego stołu pomiarowego oraz prowadnic liniowych realizujących przemieszczenie przedmiotu w kierunkach X, Y i Z.

Graniczny dopuszczalny błąd wskazania  $MPE_E$  podczas pomiarów geometrycznych dla tomografu METROTOM 800 wynosi  $(4,5 + L/100)$   $\mu$ m, gdzie L oznacza wartość mierzonego wymiaru w milimetrach. Maksymalne powiększenie dla pomiarów 2D wynosi 45 natomiast dla pomiarów 3D wynosi 40. Układ pozycjonowania mierzonych elementów umożliwia przemieszczanie obiektu w zasięgu 700 mm dla osi X oraz 270 mm dla osi Z. Powtarzalność pozycji kątowej wynosi 0,5" a maksymalne bicie promieniowe i osiowe 0,2  $\mu$ m [3].



Rys. 1. Przemysłowy tomograf komputerowy METROTOM 800  
Fig. 1. Industrial computer tomography scanner METROTOM 800

### 3. Opis oprogramowań

Do przeprowadzenia badań zastosowano dwa programy – METROTOM OS oraz CALYPSO. Pierwszy z programów służy do wykonywania pomiarów, drugi natomiast do analizy uzyskanych wyników. W programie METROTOM OS ustawiane są wszystkie parametry pomiaru. W pierwszej kolejności wykonywane jest centrowanie mierzonego elementu, następnie ustawiane jest odpowiednie powiększenie tak by cały mierzony element został uchwycony na detektorze.

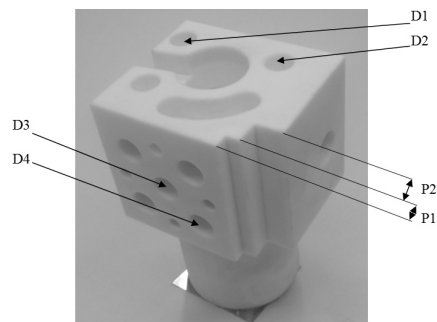
Obserwując histogram rozkładu promieniowania rentgenowskiego użytkownik programu ustawia parametry lampy rentgenowskiej oraz detektora. Możliwa jest zmiana dwóch parametrów zasilania lampy rentgenowskiej (napięcia i natężenia) oraz dwóch parametrów detektora (czasu integracji oraz wzmocnienia). W zależności od mierzonego obiektu istnieje możliwość zastosowania filtrów wykonanych z aluminium lub miedzi. Po ustawieniu wszystkich parametrów pomiaru należy ustawić liczbę projekcji na pełny obrót. W celu ograniczenia pojemności pliku możliwe jest wycięcie otaczającego powietrza.

Otrzymany plik wynikowy jest następnie przesyłany do drugiego komputera, na którym zainstalowany jest program do przetwarzania danych. Program CALYPSO jest dedykowanym programem do współrzędnościowych maszyn pomiarowych firmy Carl Zeiss. Dodatkowy moduł umożliwia wczytanie uzyskanej z pomiaru tomograficznego chmury punktów. CALYPSO pozwala na

wykonanie kompletnej analizy geometrycznej uzyskanej chmury punktów. Wykonania pomiarów takich elementów podstawowych jak punkty, okręgi, kule, płaszczyzny, stożki, walce, pomiary po krzywiznach, możliwe jest również określenie zależności pomiędzy zmierzonymi elementami takich jak odległości, kąty. Dodatkowym atutem w porównaniu z tradycyjnymi pomiarami na CMM jest możliwość wykonania kompleksowego porównania chmury punktów do modelu CAD z wprowadzeniem wartości odchyłek i pola tolerancji [4, 5].

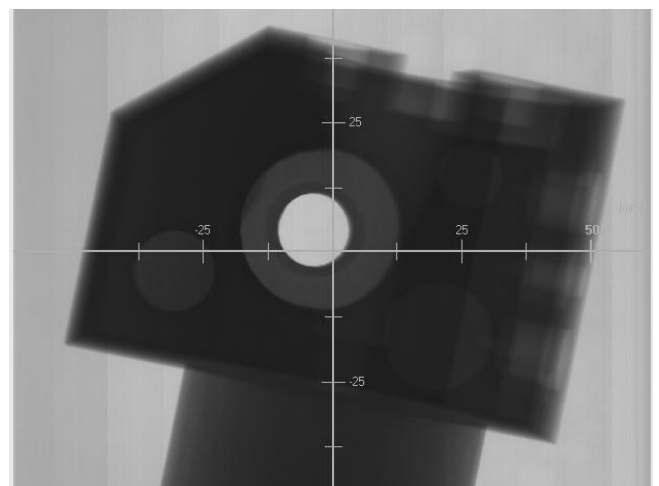
### 4. Projekt procedury badawczej, wyniki pomiarów z analizą i wnioskami

W celu określenia powtarzalności pomiarów geometrycznych tomografu komputerowego METROTOM 800 wykonano dziesięciokrotny pomiar kostki szkoleniowej. Pomiary pod kierownictwem i przy współdziałaniu autorów artykułu zostały wykonane przez Konrada Szyndlera oraz Michała Lipińskiego. W badaniu zostały wybrane cztery otwory, dwie odległości pomiędzy otworami (D1-D2) i (D3-D4) oraz dwie odległości między płaszczyznami przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Kostka szkoleniowa z zaznaczonymi elementami pomiarowymi  
Fig. 2. The training cube with selected measuring features

W celu wyeliminowania szumów pojawiających się na górnej płaszczyźnie podczas skanowania sześciennych elementów kostkę przyklejono do metalowej podstawki pod kątem ok. 15°. Szumy pojawiają się w sytuacji kiedy na matrycy rejestrowane są skokowe zmiany wartości natężenia wiązki rentgenowskiej. Ustawienie elementu mierzonego pod kątem eliminuje powstawanie dodatkowych szumów na górnej płaszczyźnie (występowanie menisku). Kostka po zamocowaniu do stołu obrotowego tomografu została wycentrowana w programie METROTOM OS. Następnie ustawiono powiększenie (pozycję w osi X) tak by cała kostka była widoczna na matrycy detektorów jak przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Widok wycentrowanej kostki szkoleniowej na panelu detektorów  
Fig. 3. View of the centered training cube on the panel of detectors

Następnie analizując histogram przedstawiony na rys. 4 dobrano parametry lampy rentgenowskiej oraz detektora.



Rys. 4. Widok histogramu skali odcieni szarości  
Fig. 4. View of the histogram of the grayscale value

Zmieniając parametry pomiaru należy cały czas obserwować histogram skali odcieni szarości. W celu uzyskania rekonstrukcji bez szumów należy tak dobrać parametry, aby histogram w całości znajdował się w centralnym szarym polu. Pík odpowiedzialny za powietrze II (rys. 4) powinien być przesunięty w prawą stronę do granicy obszaru II jednakże nie powinien jej przekraczać, natomiast pik odpowiedzialny za materiał I o najwyższym współczynniku pochłaniania promieniowania rentgenowskiego powinien znajdować się symetrycznie po lewej stronie. Zarówno po lewej, jak i prawej stronie znajdują się "czerwone obszary" (ciemniejsze obszary po lewej i prawej stronie histogramu). W przypadku, gdy część histogramu znajduje się w obszarach I i II, wtedy podczas rekonstrukcji otrzymywane są szумы i błędy rekonstrukcyjne.

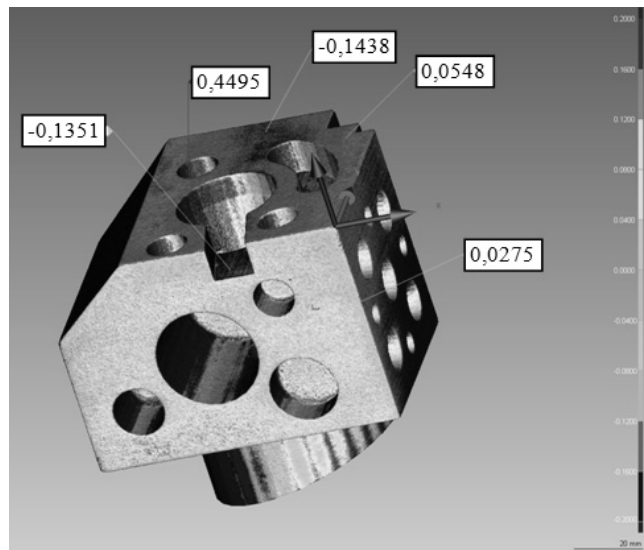
Dla badanej kostki szkoleniowej dobrano następujące parametry pomiaru: napięcie zasilania lampy 130 kV, natężenie prądu 300  $\mu$ A, czas integracji 1000 ms, wzmocnienie 2,5. Dodatkowo zastosowano fizyczny filtr miedziany o grubości 0,50 mm. W celu uzyskania wysokiej dokładności pomiaru włączono opcję sprawdzania ogniska lampy rentgenowskiej podczas pomiaru oraz ustawiono 1500 projekcji na pełny obrót mierzonego elementu. Kostka została dziesięciokrotnie zmierzona z zachowaniem identycznych parametrów pomiarowych.

Analiza wyników została przeprowadzona w programie CALYPSO. Strategię pomiarową oparto na dostępnym modelu CAD z którego została wydrukowana kostka. Dla każdego z mierzonych okręgów ustawiono po 150 punktów pomiarowych, natomiast dla pomiaru płaszczyzn po 400 punktów. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawia tab. 1.

Tab. 1. Wyniki uzyskane z pomiarów na CT METROTOM 800  
Tab. 1. The results obtained from measurements on CT METROTOM 800

Lp.	Wartość nominalna [mm]	Średnia [mm]	Różnica [mm]	Odchylenie standardowe [mm]	Rozstęp [mm]
D1	12,0000	11,8891	0,1109	0,0014	0,0036
D2	12,0000	11,8368	0,1632	0,0013	0,0047
D1-D2	47,4000	47,3643	0,0357	0,0013	0,0041
D3	12,0000	11,9287	0,0713	0,0027	0,0080
D4	12,0000	11,9018	0,0982	0,0022	0,0073
D3-D4	21,0000	21,0145	-0,0145	0,0019	0,0064
P1	6,0000	5,9938	0,0062	0,0010	0,0033
P2	16,0000	15,9536	0,0464	0,0022	0,0072

Kostka szkoleniowa została wykonana w technice druku 3D, dokładność deklarowana przez producenta wynosi  $\pm 200 \mu\text{m}$ . Analizując otrzymane wyniki zestawione w tab. 1 można stwierdzić iż wszystkie badane elementy mieszczą się w tolerancji wykonania kostki. Maksymalna różnica pomiędzy otrzymaną wartością średnią a nominalną wyniosła 163  $\mu\text{m}$ . Tomografia komputerowa umożliwia wykonanie globalnego porównania uzyskanej chmury punktów z modelem CAD. W programie CALYPSO przypisano układ bazowy chmurze punktów zgodnie z modelem CAD. Następnie obliczono odchyłki od wartości nominalnych dla wszystkich punktów, uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Widok porównania chmury punktów z modelem CAD  
Fig. 5. View of comparison of point cloud with CAD model

Na rys. 5. przedstawiono wyliczone odchyłki od wartości nominalnej naniesione na model CAD kostki szkoleniowej. Poszczególne wartości przypisano kolory zgodnie ze skalą przedstawioną po prawej stronie rysunku. Kostce przypisano wartości tolerancji zgodnie z deklarowaną przez producenta drukarki dokładnością wynoszącą  $\pm 0,2\text{mm}$ . Na rysunku widać iż płaszczyzną dla których wykonano bazowanie chmury punktów mieszczą się w założonych granicach tolerancji. Analiza widoku rozkładu odchyłek na otworach wykazała iż chmura punktów jest przesunięta w stronę płaszczyzny bazowania. Po lewej stronie otworów występują odchyłki dodatnie natomiast po prawej stronie odchyłki ujemne. Centralna część otworów znajduje się w polu tolerancji i posiada odchyłki zbliżone do 0. Aby wyeliminować wpływ przesunięcia chmury punktów na ocenę poprawności należy zastosować inny tryb bazowania np. najlepszego dopasowania. Na podstawie aktualnego bazowania należy stwierdzić iż kostka została wykonana z dokładnością 0,5mm i nie spełnia podawanych przez producenta drukarki 3D dokładności.

Zestawienie wartości odchyłek standardowych oraz rozstępów wskazuje na wysoką powtarzalność pomiarów tomograficznych. Wartości odchyłek standardowych mieszczą się w przedziale od 1 do 2,7  $\mu\text{m}$  natomiast wartości rozstępów w przedziale od 3,3 do 8  $\mu\text{m}$ .

## 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] Kowaluk T., Woźniak A.: Study of porosity measurement using the computer tomograph. Pomiary Automatyka Robotyka (PAR) nr 12/2012 s. 82-86.
- [5] 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.