

Jerzy SŁADEK, Marek KOWALSKI, Andrzej RYNIIEWICZ, Kamila GACEK
POLITECHNIKA KRAKÓWSKA, LABORATORIUM METROLOGII WSPÓLRZĘDNOŚCIOWEJ
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

Charakterystyka porównawcza współrzędnościowej techniki pomiarowej i tomografii komputerowej

Dr hab. inż. Jerzy SŁADEK

Zorganizował i kieruje Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. Specjalizuje się w metrologii stosowanej w procesach wytwarzania a szczególnie w metrologii współrzędnościowej. Stale współpracuje z wieloma ośrodkami badawczymi oraz laboratoriami w Europie, w tym z PTB w Niemczech, w zakresie rozwoju metod kontroli dokładności pomiarów i wzorcowania współrzędnościowych systemów pomiarowych.



e-mail: sladek@mech.pk.edu.pl

Dr inż. Andrzej RYNIIEWICZ

Specjalizuje się w metrologii stosowanej w procesach wytwarzania a szczególnie w badaniach wpływu stabilizacji cieplnej urządzeń wytwórczych na proces technologiczny i dokładność geometryczną wyrobów, laserowe systemy pomiarowe, automatyzacja pomiarów, analiza dokładności geometrycznej wielkogabarytowych urządzeń technologicznych, wieloparametryczna ocena wyrobów dla potrzeb systemów zapewniania jakości, analiza kształtu powierzchni roboczych bioelementów z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej.



e-mail: ryniewicz@mech.pk.edu.pl

Dr inż. Marek KOWALSKI

Specjalizuje się w metrologii stosowanej w procesach wytwarzania a szczególnie w ocenie dokładności pomiarów, nadzorowaniu dokładności współrzędnościowych maszyn pomiarowych, zagadnieniach geometrycznej specyfikacji produktów (GPS), tolerancji geometrycznym makro- i mikrogeometrii powierzchni oraz statystycznym sterowaniu procesem produkcyjnym (SPC). Członek Komitetu Technicznego nr 48 Polskiego Komitetu Normalizacyjnego ds. Podstaw Budowy Maszyn.



e-mail: kowalski@mech.pk.edu.pl

Mgr inż. Kamila GACEK

Kieruje sprawami finansowymi i administracyjnymi laboratorium. Pełni również funkcję Kierownika ds. Jakości LMW. Specjalizuje się w zagadnieniach dotyczących akredytacji oraz zarządzania jakością wg ISO 9001 oraz ISO 17025. Zainteresowania naukowe: problematyka laboratoriów akredytowanych, walidacja metod pomiarowych.



e-mail: kgacek@mech.pk.edu.pl

Streszczenie

Niniejsze opracowanie jest związane z dwoma znacznie rozpowszechnionymi technikami pomiarowo-badawczymi o charakterze uniwersalnym, czyli takimi, które mogą być zastosowane w różnych dziedzinach np. w technice i medycynie. Za cel przyjęto wstępne porównanie techniki współrzędnościowej z tomografią komputerową. Obydwie obecnie stosowane techniki wykorzystują zaawansowane oprogramowanie, ale działają wg zupełnie różnych zasad. W pracy opisano schematy strukturalne działania obu urządzeń, wektory oddziaływań pól pomiarowych i ich cechy charakterystyczne co do układów współrzędnych. Te cechy zostały odniesione do oceny odwzorowania kształtu powierzchni z regularnymi wgłębieniami. Przeprowadzono badania wstępne oraz zamieszczono przykładowe rezultaty pomiarów w postaci graficznej. Dla głównych kryteriów metrologicznych sporządzono porównanie cech w formie tabelarycznej i sformułowano wnioski z zaakcentowaniem zastosowań medycznych. W przypadku zastosowania TK ocena liczbowa odstępstw od kształtu nominalnego odbywa się zasadniczo na drodze porównawczej i jest wyraźnie mniej precyzyjna od oceny metodą współrzędnościową ale dla zastosowań medycznych wystarczająca.

Słowa kluczowe: WMP, tomografia komputerowa, porównanie.

Comparative characterisation of coordinate measuring technique and computed tomography

Abstract

This study is connected with two much prevalent measurement and testing techniques of a universal character, namely those that can be applied to various fields such as engineering and medicine. The aim is the initial comparison of coordinate techniques with computer tomography. These two techniques use advanced software, but operate on entirely different principles. The paper describes structural diagrams of two devices: Coordinate Measuring Machines and Computer Tomography, vectors of measurement fields impacts and their characteristics as a coordinate system. These features were related to the assessment of surface mapping of a spherical shape. Preliminary studies were conducted, and examples of measuring results in graphic form were provided. For the main metrological criteria the comparison of the characteristics in tabular form was made and the conclusions with emphasis on medical applications were formulated. In the case of Computer Tomography, the numerical evaluation of deviations

from the nominal shape is primarily performed through the comparison and is clearly less precise than the evaluation with coordinate method but is sufficient for medical applications.

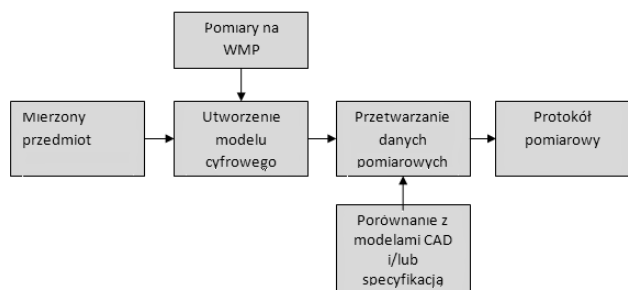
Keywords: CMM, computed tomography, comparison.

1. Wstęp

Produkty przemysłu maszynowego, motoryzacyjnego, lotniczego, elektrotechnicznego oraz tworzyw sztucznych to wyroby o zdecydowanie przestrzennym ukształtowaniu geometrycznym. Z tego powodu do oceny zgodności ich charakterystyk geometrycznych ze specyfikacją wymiarowo-geometryczną z reguły wykorzystuje się współrzędnościową technikę pomiarową. Ale nie jest to jedyna możliwość. W sytuacji, gdy powierzchnie pomiarowe albo tworzą geometrycznie skomplikowane struktury wewnętrzne pomocne może być zastosowanie tomografii komputerowej. Jej głównym przeznaczeniem jest co prawda diagnostyka medyczna [1], tym niemniej stale zwiększa się jej pole zastosowań w odniesieniu do aplikacji przemysłowych. Wiele zastosowań tomografii komputerowej wiąże się z koniecznością analizy kształtu badanego obiektu (np. w medycynie dotyczy to układu kostnego). Ta ocena bywa sprowadzana do wzrokowej obserwacji, co jest mało precyzyjne, a w badaniach porównawczych wyraźnie niewskazane. Obie wymienione techniki pomiarowe opierają się o przestrzenną identyfikację mierzonych obiektów. Przestrzenie pomiarowe są jednak odmiennie kształtowane i wykorzystywane, stąd pojawiają się nowe problemy, które w skrócie można łączyć z zagadnieniem oceny dokładności pomiarów. Podstawowe zagadnienia to czy można obie techniki opisać w sposób zbliżony do siebie, jakie czynniki warunkują dokładność pomiarów w obu przypadkach oraz jakimi wzorcami sprawdzać ich parametry metrologiczne.

2. Charakterystyka metody z wykorzystaniem Współrzędnościowej Techniki Pomiarowej

Jak powszechnie wiadomo idea WTP polega na utworzeniu cyfrowego modelu przedmiotu mierzonego. Ogólny schemat metody współrzędnościowej pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Schemat metody współrzędnościowej
Fig. 1. Diagram of coordinate method

Jak widać na wejściu do układu jest zbiór współrzędnych punktów pomiarowych. Punkty te można otrzymać poprzez użycie:

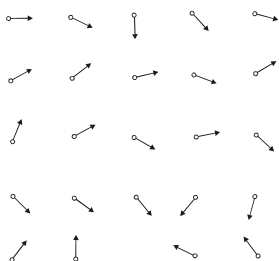
- Współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP)
- Ramienia pomiarowego (RP)
- Specjalnych układów interferometrii laserowej (np. systemy nadążne LSN)

W technice współrzędnościowej stopień dokładności pomiarów jest kształtowany przez pole błędów o charakterze wektorowym. Błędy w fazie zbierania informacji o punktach pomiarowych wynikają z różnych przyczyn ale przy ocenie przebiegu odchyłek kształtu konieczne jest poznanie błędów tych punktów w postaci wektorowej, tworzących przestrzeń wektorową błędów. To pozwala również wybrać możliwe optymalne położenie produktu na stole WMP. Ogólna postać funkcji błędów w układzie ortokartezjańskim ma postać:

$$\vec{\delta} = f(x, y, z) \quad (1)$$

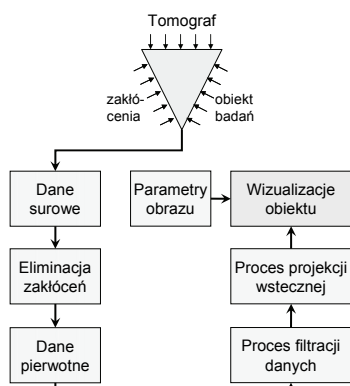
Przy czym: $\vec{\delta}$ – wektor błędu pozycji, f – funkcja błędów, x, y, z , – współrzędne mierzonego punktu.

Przykładowy zapis pola błędów we WTP pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Graficzne odwzorowanie pola błędów dla WMP
Fig. 2. Graphical representation of the field of errors for CMM

Należy zaznaczyć, że zmienność tego pola – zwłaszcza kątowna – zdecydowanie wpływa na rezultaty odwzorowania odchyłek kształtu profilu.



Rys. 3. Schemat procesu pomiarowego i otrzymywania obrazu za pomocą TK
Fig. 3. Diagram of the measuring process and obtaining the image with the CT

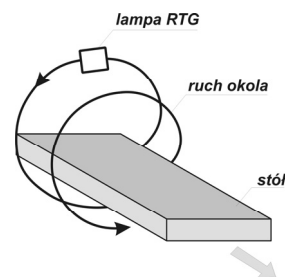
Współrzędnościowa technika pomiarowa umożliwia pomiar zarówno regularnych, jak i nieregularnych, nie dających się opisać analitycznie. Jest to bowiem głównie kwestia oprogramowania, a nie sprzętowa.

Zgodnie z wytycznymi dotyczącymi wykorzystania metody Monte Carlo zawartymi w [3], pierwszą czynnością, jaka musi zostać wykonana, jest opisanie rozpatrywanego problemu przy pomocy modelu matematycznego, łączącego wielkość wyjściową, którą w tym przypadku będzie zmiana wymiarów przedmiotu mierzonego pod wpływem temperatury, z wielkościami wejściowymi, czyli wszystkimi czynnikami, które na tą zmianę mają wpływ.

3. Charakterystyka metody tomografii komputerowej (TK)

Tomografia komputerowa jest techniką, w której wiązka promieniowania (rentgenowskiego) przenika pod różnymi kątami przez sprawdzany obiekt. Po uformowaniu przez kolimator odpowiedniej wiązki promieniowania obiekt jest prześwietlany, a odpowiednio rozmieszczone detektory mierzą osłabienie intensywności promieniowania. Do wyznaczenia osłabienia promieniowania w każdym punkcie¹ wewnątrz przekroju stosuje się matematyczną rekonstrukcję obrazu (metodą odwrotnej rekonstrukcji Radona), otrzymane wyniki są następnie przekształcane w obraz.

Ogólny schemat kinematyki przemieszczeń dla tomografu przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat przemieszczeń TK
Fig. 4. Diagram of CT displacements

Zmiany w natężeniu promieniowania zarejestrowane przez detektory są wstępnie obrabiane. Celem tego wstępnego opracowania danych jest kompensacja niejednorodności w układzie detektorów. Dodatkowo dane należy skorygować (przy zastosowaniach metodycznych) z uwagi na efekt tzw. utwardzania promieniowania X podczas przenikania przez badany obiekt. Otrzymane w ten sposób dane tworzą zbiór danych pierwotnych (nieprzetworzonych). Taki zbiór może być użyty do celów rekonstrukcji obrazu, jednakże otrzymane obrazy dostarczyłyby bardzo nieostrych, skanów o rozmytych granicach, co w efekcie dałoby zbyt niedokładny zarys kształtu badanego obiektu. Dla wyeliminowania tego zjawiska należy stosować filtrację matematyczną, poprawiającą zarysy krawędzi. Ostatecznie przez zastosowanie projekcji wstecznej z danych przefiltrowanych dostarcza obrazu odpowiedniej rozdzielczości i ostrości. W TK obraz powstaje na bazie kwadratowej macierzy (od 256x256 do 1024x1024) pikseli, który może być dalej przetwarzany. Z uwagi na to, że obrazowana warstwa ma określoną grubość (określoną przez kolimację) każdy piksel jest w rzeczywistości elementem objętościowym tzw. wokselem. Dla większości przypadków wksel ma kształt zapalki, co oznacza, że wielkość piksela mierzona w płaszczyźnie przekroju jest co najmniej kilkanaście razy mniejsza od grubości warstwy mierzonej. Uzyskanie wksela o kształcie sześciennego wymaga zastosowania tomografów wielorzędowych. W procesie rekonstrukcji obrazu zostaje przydzielona każdemu wkselowi liczba CT o wartości proporcjonalnej do stopnia osłabienia pro-

¹ w rzeczywistości chodzi o mikroobszar (tzw. wksel)

mieniowania w obrębie woksela. Wyznaczenie tej wartości odbywa się wg poniższego wzoru [3]:

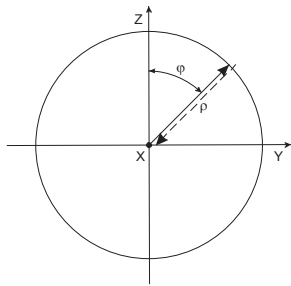
$$CT = \frac{(\mu - \mu_w)}{\mu_w} \cdot 1000 \quad (2)$$

przy czym: μ – współczynnik wypadkowy absorpcji promieniowania X dla badanego obiektu, μ_w – współczynnik absorpcji promieniowania X dla wody.

Liczba CT jest ściśle związana ze skalą szarości Hounsfielda. W tomografii komputerowej – dzięki oprogramowaniu – istnieją możliwości przetwarzania oraz obróbki poszczególnych skanów. Praktyczne znaczenie ma możliwość pomiaru miar liniowych i kątowych oraz kształtu.

Jak widać pomiary z wykorzystaniem TK istotnie różnią się od WTP. Zarówno w sferze rodzaju i przetwarzania informacji oraz ich obrazowania. W TK istnieje też czynnik mocno związany z budową samego tomografu. Dokładność odwzorowania cech geometrycznych (zwłaszcza kształtu) jest wypadkową czynników przedstawionych na rys. 5.

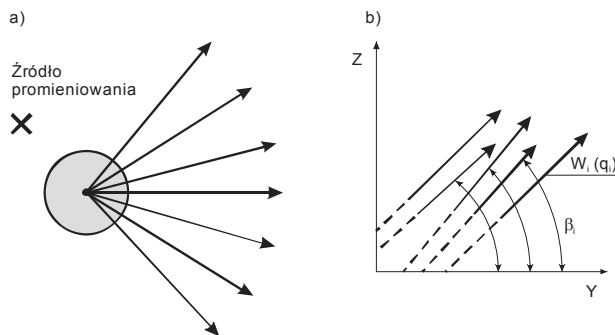
Z zasady działania TK wynika, że pole działania (i pole błędów) są określone w polu walcowym.



Rys. 5. Przestrzeń diagnostyczna dla tomografii komputerowej
Fig. 5. Diagnostic space for computer tomography

$$\delta = g(\varphi, \rho, z) \quad (3)$$

Wiązka skolimowana jest w zasadzie jednorodna, ale jeśli jej średnica jest dość duża pojawić się może rozbieżność kątowa i zróżnicowanie natężenia w podobszarze wiązki (rys. 6).

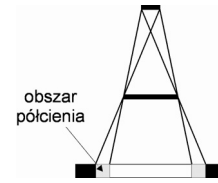


Rys. 6. Pole promieniowania Z w TK: a) źródło promieniowania pomiarowego, b) wiązka po kolimacji z cechami rozbieżności kątowej i zmiennym natężeniem q_i

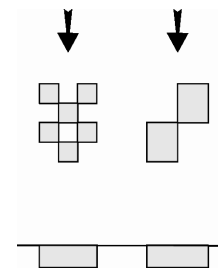
Fig. 6. Radiation field Z in CT: a) source of measuring radiation, b) beam after collimation with characteristics of the angular divergence and variable intensity q_i

Rozbieżność wiązki ma związek z lampą rentgenowską, która emituje wiązkę promieni X rozbieżną stożkowo, zamiast równoległą. Pomimo kolimacji część promieni pozostaje rozbieżna. Dodatkowo oddziałującej przestrzennej obszar ogniska lampy rentgenowskiej powodującej powstawanie pola promieniowania X (na zewnątrz od wiązki głównej) o zmniejszonym natężeniu promieniowania (tzn. obszar półcienia) [4], co przedstawiono na rys. 7.

Nadmienić również trzeba, że w promieniowaniu rentgenowskie jest w rzeczywistości zbiorem promieni różniących się długościami emitowanych fal, co wywiera wpływ na absorpcję tego promieniowania a poprzez to, na dokładność identyfikacji cech geometrycznych obiektu mierzzonego.



Rys. 7. Powstawanie obszaru półcienia
Fig. 7. Formation of the shadow area



Rys. 8. Powstawanie zjawiska nakładania się cieni
Fig. 8. Formation of phenomenon of overlapping shadows

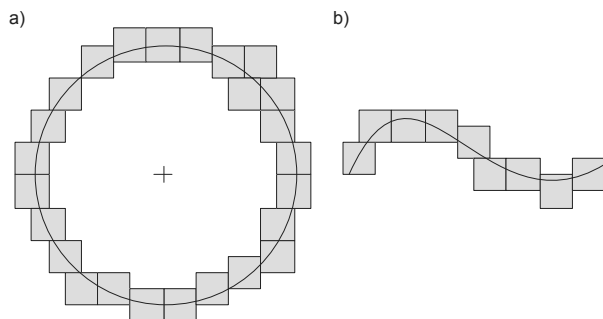
Oprócz powyższych przyczyn dokładność obrazowania granic obiektu zależy również od dokładności przesuwu stołu oraz obrotuokoła (gantry). Powyższe oddziaływania znajdują swoje odzwierciedlenie w postaci ujawniania się różnych stopni szarości i zakłóceń przebiegu kształtu badanego obiektu. W przypadku tomografii spiralnej (rys.4) warstwa obiektu objęta pomiarem wynika z nakładania się ruchuokoła z przesuwnem i pozycjonowaniem stołu. W celu oceny tych czynników przeprowadzono badanie dotyczące m.in. dokładności pozycjonowania układu przesuwnego tomografu oraz fluktuacji prędkości i przyspieszeń [1]. Te badania wykazały m.in., że każda pozycja stołu jest obciążona błędem pozycjonowania rzędu kilku dziesiątych mm. Można spodziewać się podobnego rzędu błędów dla prostoliniowości przesuwu stołu w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś podłużną urządzenia. Charakter nakładania się obu ruchów generuje spiralny charakter pola dla tomografii. Opis tego pola będzie wynikał z równania, które w postaci macierzowej można zapisać następująco:

$$\begin{pmatrix} x(\varphi) \\ y(\varphi) \\ z(\varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \\ R\varphi / 2\pi \end{pmatrix} \quad (4)$$

przy czym: x, y, z – współrzędne identyfikowanego punktu, P – względny skok spirali, R – promień pracy zespołu okolelampa rentgenowska, φ – kąt projekcji wiązki promieniowania w stosunku do mierzonego obiektu.

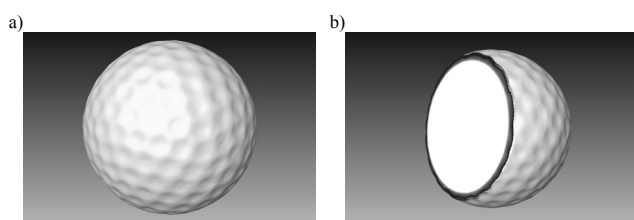
Nieuniknione zakłócenia w realizacji zakładanej trajektorii ruchu wywołane odchyłkami prostoliniowości zespołu prowadnic tomografu oraz niedoskonałościami obrotuokoła kumulują się, powodując, że w rzeczywistości mierzona warstwa jest niedokładnie identyfikowana (czyli promieniowanie pola skupia się na fragmencie leżącym w nieco innym miejscu niż się zakłada). Zatem parametry geometryczne zespołów ruchowych w tomografii powinny podlegać kontroli metrologicznej, analogicznie jak to ma miejsce dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Z kolei w tomografii komputerowej występuje takie zjawiska charakterystyczne dla tej techniki jak zjawisko sumowania się cieni oraz zjawisko zniekształcenia projekcyjnego [4]. Schemat obrazujący sumowanie się cieni pokazano na rys. 8. W efekcie oddziaływania czynników zakłócających obszary występowania

różnych odcieni szarości będą się różnić od rzeczywistego rozkładu stopni szarości. Jest oczywiste, że będzie to wpływało na ocenę kształtu badanego obiektu. Sposób oceny kształtu jest przedstawiony na rys. 9 i polega w ogólności na łączeniu pikseli o takim samym stopniu szarości.



Rys. 9. Sposób oceny kształtu dla zarysu o kształcie: a) okręgu, b) dowolnym
Fig. 9. The way to evaluate the shape of: a) circle, b) any outline

Przykład odwzorowania elementu geometrycznego o kształcie zbliżonym do kuli (z symetrycznymi deformacjami powierzchni) z użyciem techniki CT został przedstawiony na rys. 10. Taki wygląd powierzchni uzyskano przez wykorzystanie programu Amira.



Rys. 10. Odwzorowanie graficzne elementu o kształcie sferycznym z symetrycznymi wgłębieniami: a) dla całej powierzchni, b) dla półkuli celem zobrazowania struktury wewnętrznej

Fig. 10. Graphical representation element with a spherical shape and symmetrical dimple: a) for the whole surface, b) for the hemisphere to illustrate the internal structure

4. Opis podobieństw i różnic

Jak można zauważyć, istnieją zarówno podobieństwa jak i różnice dla porównywanych metod. Ważniejsze cechy obu metod zestawiono w tabeli 1.

5. Wnioski

Z przedstawionej w pracy analizy zagadnienia wynika, że współrzędnościowa technika pomiarowa i tomografia komputerowa są zupełnie różnymi technikami. Łączy je natomiast przestrzeny charakter pomiarów.

Z powodu innych zasad działania parametry metrologiczne są dla obu metod różne lub nie zawsze porównywalne.

Dokładność Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych – jeśli chodzi o pomiary głowicami stykowymi – jest wyraźnie (co najmniej kilkanaście razy) większa niż dla tomografii komputerowej, co dla diagnostyki medycznej układu kostnego jest często istotne. W odniesieniu do CMM pracujących z głowicami optycznymi te różnice stają się znacznie mniejsze.

Precyzyjne określenie dokładności dla pomiarów z użyciem tomografii komputerowej nie jest obecnie możliwe z wielu względów (m.in. brak jednoznacznych wyznaczników, czy też uznanej metodyki jej oceny) aczkolwiek niektóre wzorce stosowane do badania dokładności Maszyn współrzędnościowych mogą być stosowane w tym samym celu dla tomografów.

Problematyka poszukiwania optymalnych wzorców do kontroli dokładności tomografów staje się zagadnieniem bardzo aktualnym.

Tab. 1. Porównanie metod
Tab. 1. Comparison of the methods

Metoda z wykorzystaniem	
współrzędnościowej maszyny pomiarowej	tomografii komputerowej CT – TK
Kryterium porównawcze	
Metoda standardowa	
stykowa opcja: bezstykowa	wyłącznie bezstykowa
Funkcja opisująca przestrzeń pomiarową	
w przestrzeni ortokartezjańskiej $\delta = f(x, y, z)$	w układzie walcowym opcja: układ spiralny $\delta = g(\rho, \rho, z)$
Rodzaje przedstawienia danych pomiarowych	
zbiór punktów pomiarowych przekształcany w odpowiedni zarys elementu geometrycznego przy zastosowaniu przyjętego kryterium (protokół z wykresem)	zbiór punktów pomiarowych przekształcany w odcienie szarości w skali Hounsfielda dla poszczególnych pikseli i obrazowany graficznie
Wzorce dokładności odwzorowania kształtu	
Wzorce materiałne: pierścień kontrolny, kula wzorcowa, płytki wzorcowe	Wzorce materiałne: zwykłe i wielowarstwowe
Uzyskiwane przeciętne dokładności odwzorowania kształtu	
rzędu kilku μm	rzędu kilku dziesiątych mm
Stopień, możliwości pomiarowe w zakresie geometrii elementów układu kostnego	
duży Zalety: uniwersalność, dokładność Wady: konieczność pomiaru bezpośrednio na diagnozowanym organie (np. kości) co wymaga interwencji chirurgicznej, stykowy charakter pomiaru powoduje zniekształcenie warstwy chrzęstnej	Zalety: uniwersalność, nie wymaga interwencji chirurgicznej Wady: metoda szkodliwa dla zdrowia, konieczność przekształcenia w obraz o zmiennej szarości, mniej dokładna od współrzędnościowej
Sposób oceny dokładności urządzenia	
Wzorce materiałne w postaci: – zestawów płytek wzorcowych – wzorców schodkowych (<i>step-gauge</i>) – płyt otworowych i kulowych – wzorców typu <i>ball-bar</i> oraz konstrukcji typu czworosłian, sześciian itp. – wzorców falowych (interferometri laserowe)	Wzorce: – kształtu – jedno i wielowarstwowe – hybrydowe – naturalne – odwrotne
Możliwości łączenia wyników pomiarowych zlokalizowanych w różnych miejscach przestrzeni pomiarowej	
przez zastosowanie łączenia danych z poszczególnych podobszarów	przez zastosowanie przemieszczenia stołu z obiektem badanym co $0,4 \pm 0,2 \text{ cm}$ lub techniką spiralną

Tomografia może w pewnych sytuacjach znaleźć zastosowanie w kontroli kształtu elementów przemysłowych zwłaszcza nieregularnych ale w dalszym ciągu jej podstawowym zadaniem pozostanie diagnostyka medyczna jako metoda bezinwazyjna.

Z kolei Współrzędnościowa Technika Pomiarowa nie jest w stanie dokonywać pomiarów medycznych, na przykład elementów układu kostnego bez ich wyizolowania zewnętrznego z ciała, co wiązałoby się z zaistnieniem szeregu zagrożeń dla pacjenta.

Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego Nr 4083/B/T02/2008/34 finansowanego przez KBN.

6. Literatura

- [1] Ryniewicz A.: Traceability needs for geometrical identification of form of biobearing surface and defect of joint cartilage. Wyd. Elsevier Measurements, Issn 0263-2241, Vol. 42, Nr10 2009.
- [2] Ryniewicz A.: Metrologia współrzędnościowa w ocenie geometrii powierzchni roboczych biołożysk. VIII Coordinate Measuring Technique. April, 2008. Zeszyty Naukowe Ath Isbn 978-83.
- [3] Prokop M., Galanski M.: Tomografia komputerowa spiralna i wielonarządowa. Wyd. Thieme. Warszawa, 2007.
- [4] Praca zbior. pod red. B. Pruszyńskiego: Diagnostyka obrazowa. Wyd. Lekarskie PZWL Warszawa, 2000.

otrzymano / received: 11.05.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2010

artykuł recenzowany