

Andrzej RYNIOWICZPOLITECHNIKA KRAKOWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, LABORATORIUM METROLOGII WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWEJ,
al. Jana Pawła II nr 37, 30-864 Kraków**Ocena dokładności odwzorowania kształtu powierzchni nieregularnych w tomografii komputerowej**

Dr inż. Andrzej RYNIOWICZ



Jest adiunktem na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej. Działalność naukowa dotyczy między innymi zastosowania laserowych systemów pomiarowych do oceny dokładności funkcjonowania obrabiarek, diagnozowania geometrii oraz struktur wewnętrznych biołozysk z wykorzystaniem tomografii komputerowej rentgenowskiej i rezonansu magnetycznego oraz metod oceny dokładności odwzorowania kształtu w tomografii komputerowej. Dziedzina naukowa: metrologia.

e-mail: andrzej@ryniewicz.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono wybrane aspekty dotyczące dokładności odwzorowania kształtu powierzchni nieregularnych w tomografii komputerowej TK. Zaproponowano wzorzec do badań, którego powierzchnię stanowi paraboloida eliptyczna. Kształt dobrano z uwagi na specyfikę tworzenia modeli przestrzennych w TK, bazującą głównie na kompilacji otrzymanych skanów w przyjętej skali szarości wg Hounsfielda. W pracy przedstawiono wyniki badań opracowanego wzorca na tomografie komputerowej oraz ocenę dokładności odwzorowania kształtu, przeprowadzoną metodą best fit, wynikającą z wykorzystywanych do tworzenia modeli wirtualnych oprogramowań.

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa, powierzchnia, odwzorowanie kształtu, dokładność, wzorzec.

Accuracy assessment of irregular surface shape mapping in computed tomography**Abstract**

Developing the correct opinion on a technical device, process technology and especially the issue of proper medical diagnosis is associated with the assessment or determination of the changes of parameters describing the analysed syndrom or disease (Fig. 1). In recent years, to evaluate the geometric parameters and internal structures of medical and technical tasks, the computed tomography (CT) has been used. Use of the CT as a system or metrological device cannot be made without estimating the accuracy of measurements realized with its use. Therefore the paper presents some aspects of the accuracy of shape mapping of irregular surfaces in computed tomography. The surface was described as an irregular surface characterised by an alternating angle relative to the plane of the measuring system determined by the CT gantry. The standard being examined is the surface of an elliptic paraboloid shape (Figs. 2, 3). The shape was chosen because of the specificity of spatial modeling in the CT, which is based mainly on compilation of the obtained scans in grayscale defined by Hounsfield. For a pattern established in this way, the scans represent parabolas or ellipses, depending on the scanning plane position determined by the gantry. The paper presents the measurement results of the standard developed by a computed tomography and assessment of the shape mapping accuracy carried out by the best fit method, which was implemented with use of software that was used to create virtual models (Figs. 5-7).

Keywords: computed tomography, surface, shape mapping, accuracy, measurement master.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach metrologia współrzędnościowa znajduje coraz szersze zastosowanie w naukach technicznych i medycznych, głównie z uwagi na specyfikę przebiegu samego procesu pomiarowego oraz rozwój metod i środków pomiarowych umożliwiających wyznaczenie współrzędnych punktów opisujących powierzchnie lub struktury wewnętrzne mierzonych elementów.

Metrologia współrzędnościowa umożliwia ponadto zapis kształtu powierzchni nieregularnych, zwłaszcza o zmiennej krzywiznie z dokładnością wymaganą przez zaplanowany proces oceny geometrii lub struktury wewnętrznej, zakres badań wytrzymałościowych lub analizę współpracy tribologicznej par kinematycznych [Sł, grant 2]. W ostatnich latach do oceny parametrów geometrycznych i struktur wewnętrznych zadań medycznych i technicznych stosowana jest tomografia komputerowa (TK) rentgenowska. Wykorzystywanie TK jako systemu lub przyrządu metrologicznego nie może być dokonywane bez oceny dokładności pomiarów lub dokładności odwzorowania kształtu.

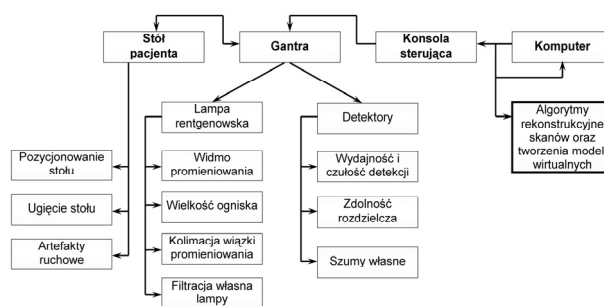
W referacie przedstawiono wybrane aspekty dotyczące dokładności odwzorowania kształtu powierzchni nieregularnych w tomografii komputerowej. Powierzchnię nieregularną określano jako powierzchnię charakteryzującą się zmiennym kątem nachylenia w stosunku do płaszczyzny pomiarowej wyznaczonej przez układ gantry tomografu komputerowego.

Do badań zaproponowano wzorzec, którego powierzchnię stanowi paraboloida eliptyczna. Kształt dobrano z uwagi na specyfikę tworzenia wirtualnych modeli w TK, bazującej głównie na kompilacji skanów i analizie skali szarości wg Hounsfielda. Dla tak przyjętego wzorca skany przedstawiają parabole lub elipsy, zależnie od położenia przyjętej płaszczyzny skanowania względem układu gantry.

W pracy przedstawiono wyniki badań opracowanego wzorca oraz wybrane aspekty oceny dokładności odwzorowania kształtu z zastosowaniem obrazowania TK, przeprowadzonej metodą best fit.

2. Odwzorowanie kształtu powierzchni nieregularnych obrazowanych metodami tomografii komputerowej

Analizując budowę tomografów komputerowych, ich różne generacje, a zwłaszcza wielorzędową tomografię sekwencyjną i spiralną określono ważniejsze zespoły i/lub ich parametry wpływające na dokładność odwzorowania kształtu, które przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Ważniejsze parametry wpływające na dokładność odwzorowania kształtu z zastosowaniem TK [1]

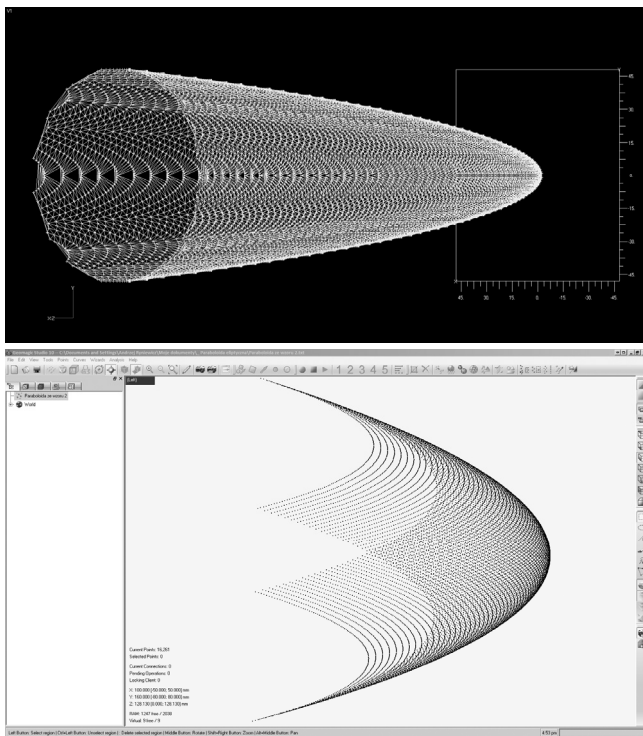
Fig. 1. Main factors influencing the shape mapping accuracy with use of CT [1]

Metodę oceny dokładności odwzorowania kształtu podzielono na cztery etapy [1, 2] obejmujące określenie dokładności:

1. wykonania wzorca
2. skanowania wzorca z wykorzystaniem obrazowania TK,
3. opracowania modelu wirtualnego wzorca na podstawie analizy numerycznej skanów,
4. odwzorowania poprzez porównanie kształtu wzorca z kształtem modelu wirtualnego otrzymanego z analizy skanów, z wykorzystaniem funkcji najlepszego dopasowania metodą best fit.

Jakość wykonania skanów wzorca opisująca z określoną dokładnością kształt wzorca wynika między innymi z przyjętej w TK koncepcji rozwiązania układu kinematycznego. Zadaniem tomografii jest zrekonstruowanie funkcji $u(x_r, y_r, z_r)$ oraz $u(x_i, y_i, z_i)$ określającej współczynnik pochłaniania promieniowania rtg po przejściu od punktu „r” do „i”. Obrazując rozkład współczynnika pochłaniania w danej płaszczyźnie programy rekonstrukcyjne przyjmują założenie, że dane pomiarowe dotyczą nieskończenie cienkich przekrojów, tak że zamiast wokseli można przyjąć pixele oraz że skanowanie obejmuje tylko przekroje równoległe. Ponadto rekonstrukcja przyjmuje prostoliniowe tory ruchu fotonów promieniowania pomiędzy generatorem a detektorami promieniowania. W rzeczywistości wiązka promieniowania rtg ma skończone rozmiary i rozbieżność kątową, a podczas przechodzenia przez badany fantom ulega tzw. „stwardnieniu”, wynikającemu z faktu, że cząstki promieniowania o niższych wartościach energetycznych są silniej pochłaniane, co powoduje, że do kolejnych punktów analizy przechodzi stosunkowo więcej cząstek promieniowania o wyższej energii. Równocześnie programy rekonstrukcyjne przyjmują, że współczynnik absorpcji w obszarze wiązki oraz jej rozbieżności kątowej jest jednorodny [3]. W tomografii wielorzędowej sekwencyjnej lub spiralnej, zarówno dla rozwiązań medycznych jak i technicznych dokładność odwzorowania kształtu lub położenia punktów charakterystycznych wzorca na otrzymanych skanach tj w etapie II, wynika przede wszystkim z błędów położenia płaszczyzny pomiarowej wyznaczonej przez układ gantry (generator – detektory promieniowania rtg) w stosunku do założonej w programach rekonstrukcyjnych trajektorii ruchu.

Dlatego też do badań przyjęto wzorec ograniczony powierzchnią paraboloidy eliptycznej (rys. 2) oraz obszar pomiarowy tomografu w formie walca [1].

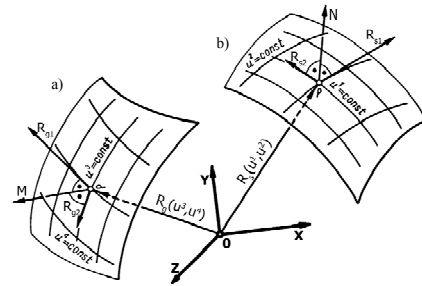


Rys. 2. Zaproponowane wzorce numeryczne do oceny dokładności odwzorowania kształtu

Fig. 2. Numerical standards proposed for evaluation of the shape mapping accuracy

W celu wyznaczenia rzeczywistego położenia płaszczyzny pomiarowej określono dokładności pozycjonowania wzorca lub jego trajektorii ruchu w odniesieniu do założeń przyjętych w programach analizujących, przyjmując lokalne bazy współrzędnych określające niedokładności trajektorii ruchu zespołu gantry – układ R_{g1} - R_{g2} - N oraz stołu pomiarowego – układ R_{g1} - R_{g2} - M (rys. 3).

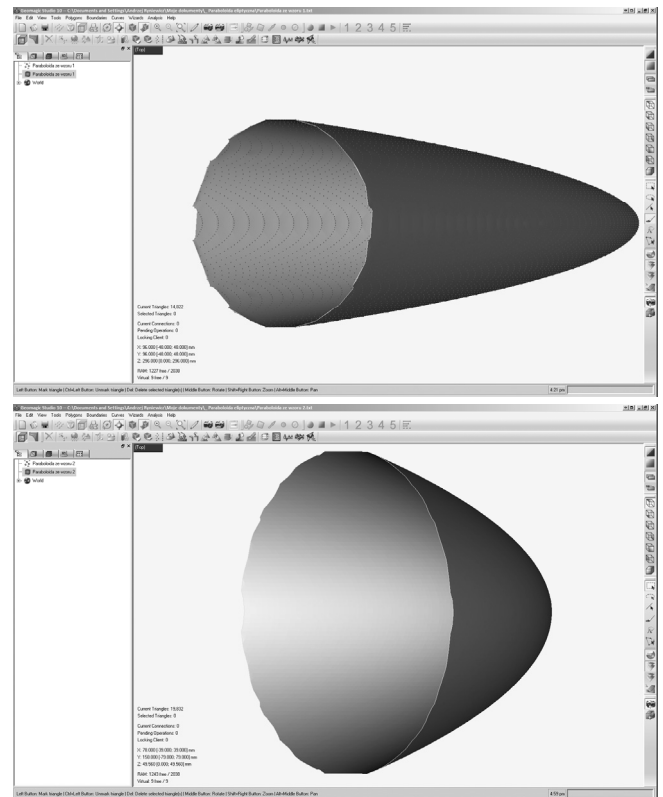
W tomografii komputerowej sekwencyjnej lub spiralnej położenie rzeczywistej płaszczyzny pomiarowej względem przedmiotu obarczone jest błędem wynikającym ze sumy wektorów błędów pozycjonowania zespołu gantry oraz stołu pomiarowego w podstawowym układzie odniesienia $X Y Z$ tj w układzie przyjętym za bazy przez system analizy komputerowej. W referacie przedstawiono część pracy dotyczącą **oceny niedokładności odwzorowania kształtu powierzchni nieregularnych, wynikającą z błędów wprowadzanych przez oprogramowania tworzące wirtualne modele przestrzenne w oparciu o analizę punktów szarości otrzymanych skanów wg skali Hounsfielda.**



Rys. 3. Lokalne bazy układów odniesienia dla wyznaczenia błędów pozycjonowania: a) zespołu przesuwowego, b) układu gantry

Fig. 3. Local coordinate systems for evaluation of positioning errors of: a) moving table, b) gantry

3. Materiał i metoda



Rys. 4. Wzorce do oceny dokładności odwzorowania kształtu z wykorzystaniem TK

Fig. 4. Standards used for evaluation of the shape mapping accuracy

Materiałem do badań były wzorce (rys. 4) ograniczone powierzchnią w kształcie paraboloidy eliptycznej opisaną równaniem (1),

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 2Z \quad (1)$$

której skany wzdłużne lub poprzeczne wyznaczają równania kanoniczne parabol (2) lub elips (3)

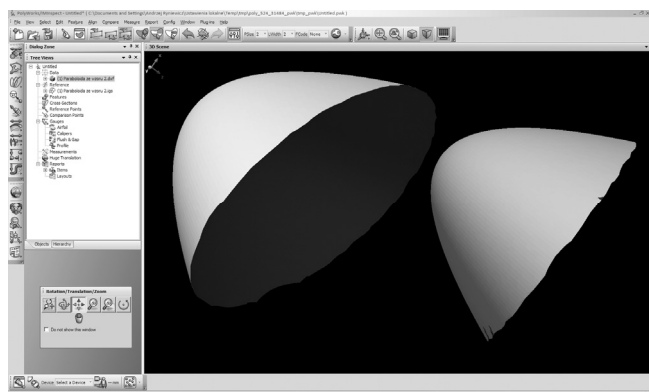
$$Y^2 = 2pZ \quad (2)$$

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

gdzie: p – parametr kierownicy oraz ogniska paraboli; a , b – parametry półosi dużej i półosi malej elipsy.

4. Omówienie wyników badań

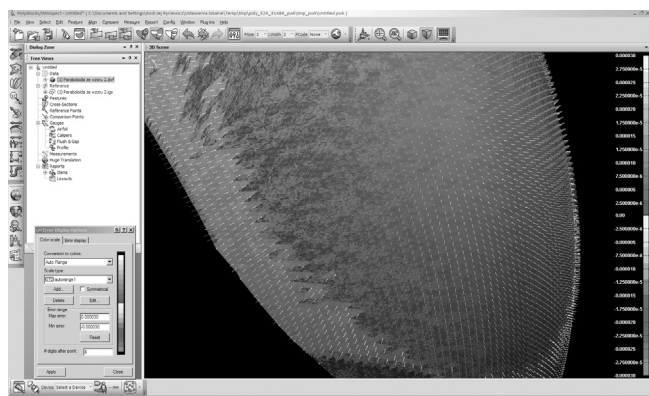
Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań oceny niedokładności odwzorowania kształtu paraboloidalno-elipsoidalnej powierzchni wzorca, wynikającą z błędów wprowadzanych przez oprogramowanie tworzące wirtualne modele przestrzenne wzorca, w oparciu o analizę punktów szarości skanów wg skali Hounsfielda. Ocenę dokładności odwzorowania opracowano poprzez porównanie kształtu wzorca numerycznego z kształtem modelu wirtualnego wzorca otrzymanego z analizy skanów, z wykorzystaniem funkcji najlepszego dopasowania best fit (rys. 5).



Rys. 5. Ocena dokładności odwzorowania kształtu paraboloidy elipsoidalnej metodą best fit

Fig. 5. Evaluation of the shape mapping accuracy of elliptical paraboloid with best fit method

Na rys. 6 przedstawiono mapę rozkładu i wielkości wektorów błędów niedokładności odwzorowania kształtu wynikających z przeprowadzonej komputerowej analizy porównawczej wzorca numerycznego i jego modelu wirtualnego.



Rys. 6. Mapa rozkładu i wielkości wektorów błędów niedokładności odwzorowania kształtu wynikających z przeprowadzonej komputerowej analizy wzorca numerycznego i jego modelu wirtualnego

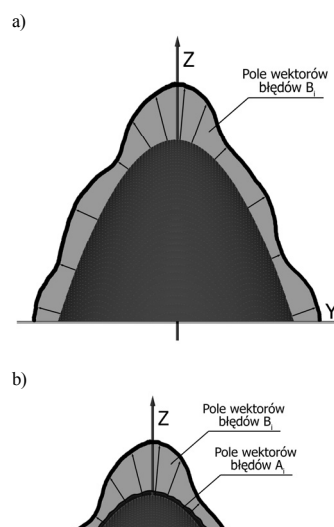
Fig. 6. Map of distribution and values of vectors of shape mapping errors obtained from computer analysis of the numerical standard and its virtual model

Rysunek 7a i 7b przedstawia pola wektorów błędów niedokładności odwzorowania kształtu w przykładowym przekroju w płaszczyźnie Y-Z; dla dwóch przypadków uwzględniając:

a) błędy niedokładności odwzorowania kształtu wykonania skanów wzorca i ich rekonstrukcji na podstawie obrazowania TK – pole wektorów błędów B_i ,

b) błędy opracowania wirtualnego modelu wzorca na podstawie analizy numerycznej kształtu wzorca – pole wektorów błędów A_i .

W oparciu o przeprowadzone badania stwierdzono, że błędy generowane przez oprogramowania rekonstrukcji skanów w znacznym stopniu zależą od geometrii układu tomograficznego, między innymi od kąta nachylenia powierzchni badanego fantomu względem płaszczyzny pomiarowej w TK (rys. 7), a także od jego fluktuacji podczas cyklu badawczego. Natomiast błędy wynikające z oprogramowania tworzącego modele wirtualne fantomów stanowią od 8 do 15 % wartości błędów rekonstrukcji skanów.



Rys. 7. Pola wektorów dokładności odwzorowania kształtu wzorca wynikających z błędów wprowadzanych przez oprogramowanie: a) wykonania i rekonstrukcji skanów wzorca na podstawie obrazowania TK – pole wektorów błędów B_i , b) opracowania wirtualnego modelu wzorca na podstawie jego analizy numerycznej – pole wektorów błędów A_i

Fig. 7. Vector fields of shape mapping accuracy of the standard caused by errors introduced by software used for: a) creation and reconstruction of standard scans – vector field of errors B_i , b) creation of virtual model of standard by its numerical analysis - vector field of errors A_i

5. Podsumowanie

Podsumowując można stwierdzić, że przy analizie geometrii oraz struktur wewnętrznych przedmiotów o skomplikowanych kształtach z wykorzystaniem tomografii komputerowej rentgenowskiej celowym jest przeprowadzanie cykli badawczych w kilku wybranych kierunkach skanowania w odniesieniu do układu gantry tomografu, w celu zminimalizowania błędów wprowadzanych przez oprogramowania rekonstrukcyjne TK.

6. Literatura

- [1] Ryniewicz A.: Analiza dokładności odwzorowania kształtu powierzchni roboczych biołożysk z zastosowaniem wzorców przestrzennych i modeli odwrotnych. Projekt badawczy KBN nr 4083/B/T02/2008/34 Politechnika Krakowska 2010.
- [2] Ryniewicz A.: Traceability needs for geometrical identification of form of biobearing working surface and defect of joint cartilage Measurement, Wydawnictwo Elsevier ISSN 0263-2241, vol 42. nr10. 2009 page 1463-1469, meas. nr 1198.
- [3] Raport International Atomic Energy Agency, Commissioning and quality assurance of computerized planning systems for radiation treatment of cancer. Printed by the IAEA in Austria, Vienna October 2004.
- [4] Ratajczyk E.: Dokładność tomografów komputerowych CT do zastosowań przemysłowych, XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Metrology in Production Engineering, materiały konferencyjne, Warszawa Pułtusk 11-14.09.2011.

otrzymano / received: 16.10.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.12.2011

artykuł recenzowany / revised paper