

Ocena odwzorowania wybranych parametrów geometrycznych w tomografii komputerowej z zastosowaniem wzorców

Streszczenie. W artykule przedstawiono aplikację wzorców kulowych oraz wzorców typu Ball Bar do oceny odwzorowania przy obrazowaniu CT medycznej. Celem jest ocena wybranych procedur dokładności odwzorowania kształtu i wymiarów z zastosowaniem certyfikowanych wzorców oraz zaproponowanie parametrów metrologicznych umożliwiających porównanie urządzeń diagnostycznych pod kątem aplikacji pomiarowych. Błędy odwzorowania geometrii mogą być identyfikowane na podstawie systemów kontrolnych wykorzystywanych w CT przemysłowej.

Abstract. The paper presents the application patterns of ball and patterns of the Ball Bar type to evaluate mapping with medical CT imaging. The aim is to evaluation the selected procedures for assessing the accuracy of mapping shape and dimensions of the use of certified standards and proposing metrological parameters for the comparison of diagnostic equipment for measurement applications. Geometry mapping errors can be identified on the basis of the control systems used in industrial CT. (Evaluation of mapping of selected geometrical parameters in computer tomography using standards).

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa, wzorce, wymiar, kształt
Keywords: computer tomography, standards, dimension, shape

Wstęp

W zaawansowanych procedurach diagnostycznych i przedoperacyjnych z wykorzystaniem tomografii komputerowej (CT) wymagane jest nie tylko obrazowanie, ale rekonstrukcja przestrzenna struktur tkankowych z analizą wymiarowo-kształtową. Niezwykle ważnym problemem w obrazowaniu obiektu jest dokładność pomiaru, która stanowi podstawę do doboru implantów lub ustalenia planu niestandardowego zabiegu chirurgicznego. Dla zapewnienia odpowiedniej dokładności pomiaru tomograf poddawany jest kalibracji z wykorzystaniem specjalnych wzorców i fantomów. Dla CT medycznej problem ten wymaga aplikacji wzorców specjalnych oraz strategii pomiarowych. Na obecnym etapie obrazowania brak jest jednoznacznych uwarunkowań normatywnych określających dokładność metrologiczną funkcjonowania medycznych tomografów komputerowych.

Cel pracy

Celem pracy jest ocena wybranych procedur dokładności odwzorowania parametrów geometrycznych w medycznej CT z zastosowaniem wzorców oraz zaproponowanie parametrów metrologicznych umożliwiających porównanie urządzeń diagnostycznych pod kątem aplikacji pomiarowych.

Tomografia komputerowa a metrologia

Dokładność funkcjonowania tomografów komputerowych do zastosowań metrologicznych technicznych określają wytyczne normy VDI/VDE 2630 oraz normy pokrewne, które charakteryzują parametry w czterech grupach związanych z: błędem pomiaru długości, błędem skanowania, zależnościami wymiarowo-kształtowymi, oraz rozdzielczością [1-5]. Parametry te charakteryzują układy tomografów z płaską wiązką lub stożkową wiązką promieniowania rtg.

Parametr związany z błędem pomiaru długości, dla tomografii przemysłowej wyznaczany jest za pomocą wzorców materialnych długości [6]. Wyznaczona wartość tego parametru jest porównywana z granicznym dopuszczalnym błędem pomiaru długości MPE:

$$(1) \text{ MPE} = \pm(A+L/K) \mu\text{m}$$

gdzie: A – błąd wykonania wzorca, L – mierzona długość [mm], K – stała zależna od typu urządzenia

W przypadku medycznej CT zastosowanie wzorca długości w postaci płytek wzorcowych jest ograniczone z uwagi na specyfikę pomiaru (wiązka rtg przechodzi przez całą długość wzorca) i dlatego lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie kulowych wzorców długości. Norma VDI/VDE 2630 szczegółowo opisuje wynikającą z tego faktu korekcję w formie dwóch procedur A i B, z uwzględnieniem materiału, wielkości, kształtu, rozmieszczenia punktów pomiarowych itd. wzorca [5,7-10]. W aplikacjach medycznych dokładność pomiarowa może być oceniana na podstawie badań specjalnych fantomów. Składają się one z brył o określonych parametrach geometrycznych i z materiałów o znanym współczynniku tłumienia fal rentgenowskich. Sama jakość badania zależy w głównej mierze od stanu technicznego źródła promieniowania oraz aparatury wspomagającej. Celowe wydaje się wykorzystanie metod metrologii współrzędnościowej do oceny dokładności odwzorowania CT, zwłaszcza wzorców kulowych.

Testy kontrolne we współrzędnościowych systemach pomiarowych

W grupie normy ISO 10360 możliwe jest wyróżnienie obecnie trzech rodzajów testów, dla których wyznaczane są charakterystyki metrologiczne.

Pierwszy stanowi wyznaczenie zmienności błędów pomiaru długości. Test ten jest najczęściej wykonywany poprzez trzykrotny pomiar pięciu wzorców o różnych długościach równomiernie rozłożonych z tym warunkiem, aby ostatnia długość swoją wartością przekraczała 66 % długości weryfikowanej osi. Powtarzany jest w różnych orientacjach. Zaleca się aby wybrane orientacje były równoległe do danych osi oraz przekątnych przestrzeni pomiarowej. W przypadku współrzędnościowych maszyn pomiarowych najczęściej badanie to występuje w siedmiu różnych położeniach, trzech równoległych do osi X, Y, Z oraz czterech wzdłuż przekątnych przestrzeni pomiarowej.

W innych testach wykorzystywany jest wzorec w kształcie kuli. W tym przypadku wyznaczane są błędy kształtu oraz wymiaru. W przypadku błędu kształtu test

polega na pomiarze określonej liczby punktów, najczęściej 25 punktów równomiernie rozłożonych na półkuli wzorca, kolejnym krokiem jest wyznaczenie elementu zastępczego – kuli, metodą najmniejszych kwadratów. Następnie wyznaczany jest rozstęp pomiędzy wektorami wodzącymi poszczególnych punktów pomiarowych, których początek jest w środku wyznaczonej kuli. Test ten ma na celu określenie zmienności pomiaru punktów w zależności od kierunku ich akwizycji.

Ostatnim rodzajem jest test wymiaru. Wykonywany jest on zgodnie z poprzednio opisaną procedurą przy czym w tym przypadku porównuje się ze sobą średnicę kuli wyznaczonej z określonej liczby punktów do wartości poprawnej, odczytanej ze świadectwa wzorcowania wzorca.

Weryfikacja tomografów przemysłowych

Dzięki rozwojowi technik komputerowych związanych z analizą matematyczną oraz oprogramowaniem CAD pojawiła się możliwość zapisu geometrii wyrobów rzeczywistych jako informacji trójwymiarowej. Zapis ten podczas wykorzystania skanerów ze światłem strukturalnym pozwalał jedynie na zapis powierzchni zewnętrznych bez możliwości głębszej penetracji. Zastosowanie w tym celu tomografii pozwala na zapis obiektów trójwymiarowy wraz z ich strukturą wewnętrzną.

Wraz z możliwością pełnego opisu 3D obiektów pojawiła się kwestia ich wykorzystania do oceny wymiarów oraz problem oceny dokładności pomiaru. Prace nad tym zagadnieniem prowadzone były w wielu różnych ośrodkach badawczych, między innymi w Federalnym Instytucie Metrologii - PTB w Niemczech, gdzie opracowano projekt normy dotyczący metrologicznych aplikacji CT współpracujących ze współrzędnościową maszyną pomiarową (WMP) [6]. Zastosowanie tomografii przemysłowej w ocenie dokładności geometrycznej elementów badanych mogło zostać zrealizowane po opracowaniu algorytmów pozwalających na wyznaczenie krawędzi interesujących nas obiektów [11-14].



Rys. 1. Wzorce wykorzystane do wyznaczenia błędu długości [15]

Problem wykrycia krawędzi jest w tym przypadku o tyle bardziej skomplikowany, niż w CT medycznej, iż dla różnych materiałów skala szarości nie jest wyrażona w jednostkach i co za tym idzie nie jest możliwe przypisanie danego poziomu szarości do danego materiału [12,15].

Ze względu na podobieństwo uzyskiwanych rezultatów tomografów i WMP realizowane są prace nad przystosowaniem norm ISO 10360 do kontroli długości i kształtu w tomografach przemysłowych (rys.1) [6].

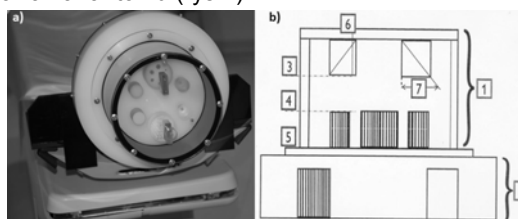
Badania nad możliwością wykorzystania w tym celu wzorców długości były prowadzone w wielu ośrodkach. Opracowano również inne rodzaje wzorców, w których koncepcja pomiarów referencyjnych opierała się na wyznaczeniu odległości pomiędzy środkami kul.

Kontrola jakości obrazu medycznych systemów CT

Kontrole jakości CT prowadzone są zgodnie z międzynarodowymi normami lub krajowymi zaleceniami. W Polsce przepisy te ujęte są w rozporządzeniu Ministra zdrowia z dnia 24 grudnia 2002 roku. Przepisy dotyczą zakładów opieki zdrowotnej posługujących się urządzeniami, które wykorzystują promieniowanie jonizujące. Minister nakłada tym samym obowiązek przeprowadzania wewnętrznych okresowych testów kontroli jakości urządzeń używanych w diagnostyce radiologicznej. Rozporządzenie określa wykaz oraz częstotliwość wykonywania testów.

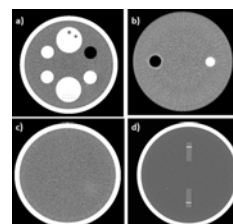
Kontrolę przeprowadza się za pomocą fantomu, który stanowi wzorec zawierający elementy z materiałów o wartościach w jednostkach Hounsfielda (HU) odpowiadających poziomem szarości tkankom ludzkim. Materiały do konstrukcji fantomów dobierane są tak, aby obejmowały cały zakres wartości rejestrowanych przez tomografy medyczne.

Działanie układu obrazowania podlega cyklicznej kontroli jakości. Sprawdzenie przeprowadza się za pomocą skanowania fantomu (rys.2).



Rys. 2. Fantom: a) widok ogólny, b) schemat

Fantom składa się z sekcji głowy (1) w skład której wchodzi elementy takie jak: warstwa fizyczna (3), warstwa wody (4), warstwa wieloigłowa (5), przewód miedziany (6) oraz klin pod kątem 45 stopni (7). Ta część wzorca wykonana jest z PVC i wypełniona jest wodą. Warstwa fizyczna przeznaczona jest do przeprowadzania testu rozdzielczości i grubości warstwy tomograficznej, warstwa wody służy do pomiaru szumu i jednorodności, natomiast do kontroli skali kontrastu wykorzystywana jest warstwa wieloigłowa. Całość tworzy walec o średnicy 200 mm. Drugą część fantomu – sekcję ciała (2) - tworzy dwuelementowy nylonowy cylinder o średnicy 300 mm. W skład fantomu wchodzi igła teflonowa oraz igła wodna. Istnieje kilka rodzajów kontroli. Wyróżniamy podstawowe codzienne lub comiesięczne testy jakości, jak i zaawansowane kontrole jakości.



Rys. 3. Reprezentatywne obrazy do kontroli jakości. a) wieloigłowa warstwa stosująca protokół kalibracji osiowej 2D dla głowy b) warstwa ciała stosująca protokół kalibracji osiowej 2 D dla ciała, c) warstwa wody stosująca protokół kalibracji osiowej 2 D dla głowy, d) warstwa szarości (protokół kalibracji osiowej 2D dla głowy)

Aby zapewnić najlepszą jakość obrazu skanowania wykonywane są codzienne testy kontroli jakości, które uwzględniają zarówno sekcję głowy (head section), jak i sekcję ciała (body section).

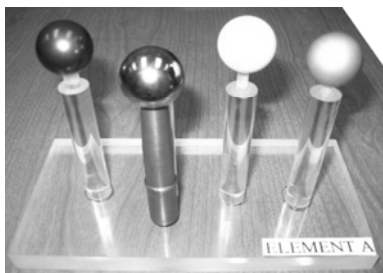
Dodatkowo obowiązują comiesięczne kontrole wykonywane przy pomocy fantomu sekcji głowy, sprawdzające skalę kontrastu i artefakty (contrast scale and

artefakt). Kontrola ta przeprowadzana jest przy użyciu warstwy wieloigłowej (rys.3).

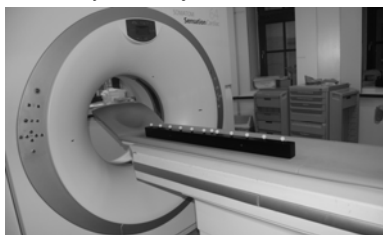
Istnieją również procedury, które mogą być przydatne przy rozwiązywaniu niezgodności ujawnionych przez kontrole codzienne. Są to bardziej złożone algorytmy, które obowiązują lekarzy specjalistów oraz inne osoby uprawnione. W ramach tej kontroli wykonywane są testy rozdzielczości, grubości warstwy i tolerancji grubości warstwy.

Material i metoda

Przedmiotem badań były wzorce kulowe: atestowana ceramiczna kula wzorcowa klasy 0, zestaw kul wzorcowych z różnych materiałów (węgiel spiekany, stal, ceramika korundowa, ceramika cyrkonowa), wzorzec typu Ball Bar firmy Unimetrix o długości 1 m (rys. 4 i 5). Wzorzec Ball Bar posiada certyfikat i charakteryzuje się dokładnością $U=(1,00+0,001L/1000) \mu\text{m}$ - stosowany jest do kontroli dokładności WMP.



Rys.4. Wzorce kulowe wykonane z różnych materiałów konstrukcyjnych (od lewej): z węgla spiekane, stali, ceramiki korundowej, ceramiki cyrkonowej



Rys.5. Wzorzec kulowy typu Ball Bar podczas badań CT techniką sekwencyjną i spiralną

Badania tomograficzne kul wzorcowych oraz wzorca typu Ball Bar przeprowadzono z zastosowaniem 64 warstwowego tomografu medycznego Siemens Somatom Cardiac (rozdzielczość 1024x1024 pikseli). Ocenę dokładności odwzorowań zrealizowano metodą porównania zrekonstruowanych modeli na podstawie obrazowania CT z parametrami geometrycznymi zawartymi w certyfikatach. Realizację porównania przeprowadzono metodą Best Fit z wykorzystaniem programów 3D Reshaper, Poly Works, Geomagic, Amira.

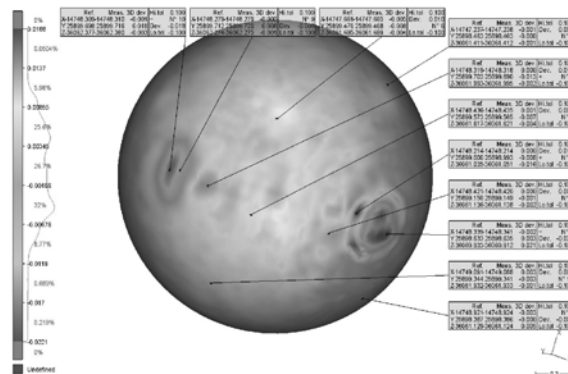
Wyniki pomiarów i ich omówienie

Wyniki oceny odwzorowania wybranych parametrów geometrycznych badanych wzorców przedstawiono w formie map dokładności odwzorowania powierzchni kul wzorcowych, wartości średnic oraz odchyłeń standardowych eksperymentalnych dla kul wykonanych z różnych materiałów i histogramów błędów odwzorowania kształtu powierzchni kuli. Ponadto wyznaczono dla wzorca Ball Bar niepewności pomiaru odległości pomiędzy środkami kul i niepewności pomiaru średnicy kul.

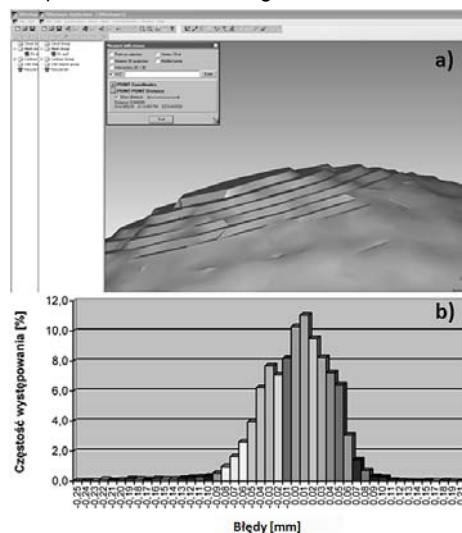
Przykładowa mapa dokładności odwzorowania powierzchni kuli ceramicznej badanej w CT i zrekonstruowanej w programie 3D Reshaper, w porównaniu do idealnego modelu CAD wskazuje na zwiększanie się błędów odwzorowania powierzchni kuli

wraz ze zmniejszaniem się okręgów fantomu w kolejnych płaszczyznach skanowania (rys.6).

Lokalizacja największych błęd o wartościach -0,25 mm (rys.6 i 7) występowała w dwóch obszarach, które określono biegunami tomografii. Taki rozkład błędów odwzorowania w CT modelu kuli wzorcowej świadczył o deformacji polegającej na spłaszczeniu powierzchni w obszarach biegunów.



Rys.6. Mapa dokładności odwzorowania powierzchni kuli ceramicznej badanej w CT i zrekonstruowanej w programie 3D Reshaper, w porównaniu do idealnego modelu CAD



Rys.7. Błędy odwzorowania kształtu powierzchni ceramicznej kuli wzorcowej na podstawie CT: a) biegun tomograficzny, b) histogram błędów odwzorowania

Histogram błędów odwzorowania średnicy ceramicznej kuli wzorcowej w CT przeprowadzono na podstawie 100 pomiarów (rys.7b). Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że dla 90,7 % wyników błąd odwzorowania średnicy kulki z wykorzystaniem CT mieści się w przedziale $\pm 0,06$ mm, a dla 98 % mieści się w przedziale $\pm 0,12$ mm. Odchylenie standardowe wynosi 0,04 mm, a wartość średnia średnicy kuli to 24,97 mm.

Wyniki badań dokładności odwzorowania dla kul wzorcowych wykonanych z czterech materiałów wskazują, że błędy wynikające z porównania kul badanych w CT i odpowiednich kul referencyjnych w niewielkim stopniu zależą od materiału konstrukcyjnego kuli wzorcowej (tab.1). Wartości średnie błędów pomiarów średnic w dwóch prostopadłych kierunkach, rozrzuty wyników oraz odchylenia standardowe dla kul wykonanych z węgla spiekane i stali (klasy 0), ceramiki korundowej i ceramiki cyrkonowej (klasy K) świadczą o największych błędach odwzorowania dla kuli z węgla spiekane, największym rozrzucie wyników dla kuli stalowej, a najlepszym odwzorowaniem dla kuli z ceramiki korundowej.

Pomiary odległości środków kul oraz średnic wzorca kulowego typu Ball Bar z zastosowaniem CT wykazały, że dokładność ich odwzorowania jest zależna od usytuowania w przestrzeni pomiarowej, w stosunku do płaszczyzny wyznaczonej przez nadajniki i odbiorniki umieszczone w gantry tomografu. Rozrzut wyników odwzorowania odległości pomiędzy środkami kul zawierał się w przedziale od 0,02 mm do 0,10 mm, a rozrzut wyników odwzorowania średnic kul zawierał się w przedziale od 0,01 mm do 0,03 mm. Błędów tego pomiaru nie można rozpatrywać oddzielnie, ponieważ usytuowanie kul wzorcowych związane było z funkcjonowaniem zespołów przesuwnych CT. Wykazano, że znaczące są błędy pozycjonowania liniowego i kąтового stołu oraz błędy wynikające z jego fluktuacji prędkości i przyspieszeń.

Tabela 1. Zestawienie wyników dokładności pomiaru średnic kul wzorcowych wykonanych z przykładowych materiałów na podstawie 20 pomiarów dla każdego modelu uzyskane z CT z wykorzystaniem programów Geomagic, Quindos.

Rodzaj materiału kuli	Odchylenie standardowe eksperymentalne pomiaru średnicy w osi X [mm]	Odchylenie standardowe eksperymentalne pomiaru średnicy w osi Y [mm]	Odchylenie standardowe eksperymentalne średniej [mm]
Węgiel spiekany	0,08	0,1	0,02
Stal	0,07	0,09	0,02
Ceramika korundowa	0,05	0,06	0,01
Ceramika cyrkonowa	0,09	0,07	0,02

Jako najwłaściwszą estymatę niepewności wyniku pomiaru dla CT przyjęto odchylenie standardowe eksperymentalne i odchylenie standardowe eksperymentalne średniej. Przeprowadzone pomiary pozwoliły na wyznaczenie charakterystyki błędów granicznych dopuszczalnych MPE postaci:

$$(2) \quad MPE = \pm(W+L/K)A \cdot B \cdot C \quad [\mu\text{m}]$$

gdzie:

W – błąd wykonania wzorca, L – mierzona długość [mm],
 K – stała zależna od typu urządzenia,
 A - współczynnik określający wpływ warunków kształtowych fantomu, B - współczynnik określający wpływ właściwości materiałowych fantomu,
 C - współczynnik określający wpływ położenie fantomu (estymowanego parametru) względem płaszczyzny diagnozowania wyznaczonej przez zespół gantry.

Metoda testowania wykorzystywana w przemysłowych CT do oceny parametrów metrologicznych z zastosowaniem certyfikowanych wzorców geometrycznych może być zastosowana w medycznych systemach CT. Wydaje się szczególnie przydatna do oceny wymiarów, kształtów i dokładności odwzorowania powierzchni swobodnych, które są charakterystyczne dla struktur anatomicznych.

Wnioski

Wzorce kulowe ze zróżnicowaniem materiałowym oraz wzorce typu Ball Bar ze zróżnicowaniem odległości pomiędzy środkami kul mogą stanowić narzędzie do oceny aplikacji metrologicznych CT.

CT medyczna wprowadza błąd odwzorowania odwzorowania geometrii wynikający z wymiarów, kształtu i materiału, położenia skanowanej powierzchni kulistej

względem układu gantry oraz usytuowania obiektu w przestrzeni badawczej.

Błędy te mogą być identyfikowane przez certyfikowane fantomy, wzorowane na systemach kontrolnych w CT przemysłowej.

LITERATURA

- [1] ASTM E1441 – 11 Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging
- [2] Chlebus E., Ziółkowski G., Dybała B., Zastosowanie przemysłowej tomografii komputerowej w analizie złożeń, *Mechanik*, 86 (2013), nr.5-6, 422-424
- [3] Ratajczyk E., Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. IV. Oprogramowania, parametry dokładności i metody ich wyznaczania, *Mechanik*, 84 (2011), nr.5-6, 474-479
- [4] Kowaluk T., Ratajczyk E., Dokładność tomografów przemysłowych CT w wyznaczaniu wymiarów geometrycznych, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 59 (2013) nr.5, 462-465
- [5] VDI/VDE 2630. Blatt 1.3., *Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik*, Düsseldorf 2009
- [6] Projekt normy ISO 10360
- [7] Kirschner J., Shah K., Runde D., Newman D., Godbout B., Wiener D., Lee J., Patterns in computed tomography utilization among emergency physicians in an urban, academic emergency department, *Emergency radiology*, 21 (2014), nr.6, 577-581
- [8] Ryniewicz A., Accuracy assessment of shape mapping using computer tomography, *Metrology and Measurement Systems*, 17 (2010), nr.3, 481-49
- [9] Ratajczyk E., Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 57 (2011), nr.2, 220-223
- [10] Kowaluk T., Woźniak A., Study of porosity measurement using the computer tomography, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 16 (2012), nr.12, 82-86
- [11] Yagüe-Fabra J.A., Ontiveros S., Jiménez R., Chitchian S., Tosello G., Carmignato S., A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 62 (2013), nr.1, 531-534
- [12] Dewulf W., Kiekens K., Tan Y., Welkenhuyzen F., Kruth J.P., Uncertainty determination and quantification for dimensional measurements with industrial computed tomography, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 62 (2013), nr.1, 535-538
- [13] Shammaa M.H., Ohtake Y., Suzuki H., Segmentation of multi-material CT data of mechanical parts for extracting boundary surfaces, *Computer-Aided Design*, 42 (2010), nr.2, 118-128
- [14] Dewulf W., Tan Y., Kiekens K., Sense and non-sense of beam hardening correction in CT metrology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61 (2012), nr.1, 495-498
- [15] Kruth J.P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann A., Computed tomography for dimensional metrology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60 (2011), nr.2, 821-842

Autorzy: dr hab. inż. Andrzej Ryniewicz, Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, E-mail: andrzej@ryniewicz.pl, mgr inż. Renata Knapik, Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, E-mail: re.knapik@gmail.com, dr inż. Marcin Krawczyk, Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, E-mail: mkrawczyk@mech.pk.edu.pl, prof. dr hab. inż. Jerzy Śladek, Politechnika Krakowska, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, E-mail: sladek@mech.pk.edu.pl, mgr inż. Łukasz Bojko, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: lbojko@agh.edu.pl.