

Modelowanie kształtu struktur tkankowych z wykorzystaniem skanerów laserowych mobilnych i systemów fringe optic

Streszczenie. Celem było porównanie dokładności odwzorowania kształtu struktur kostnych z wykorzystaniem następujących bezstykowych układów skanujących: mobilnego skanera laserowego i dwóch systemów fringe optic ze światłem strukturalnym. Procedura umożliwiła tworzenie modeli anatomicznych kości udowej i ubytków chrzęstno-kostnych na powierzchniach stawowych oraz analizę błędów ich odwzorowania. Dokładność pomiarów zależała od stopnia różnicowania kształtu oraz refleksyjności powierzchni badanego obiektu.

Abstract. The aim was to compare the accuracy of mapping the shape of the bone structures using the following non-contact scanning systems: the mobile laser scanner and two fringe optic systems with structured light. The procedure enabled the creation of anatomical models of the femur and osteochondral defects in the articular surfaces and the analysis of their mapping errors. The accuracy of the measurements depends on the degree of differentiation shape and reflectance of the surface of the test object. (**Modeling the shape of the tissue structures using a mobile laser scanners and fringe optic systems.**)

Słowa kluczowe: pomiary, skanowanie struktur tkankowych, dokładność.

Keywords: measurements, scanning of tissue structures, accuracy.

doi:10.12915/pe.2014.05.32

Wstęp

Optyczna metrologia współrzędnościowa umożliwia przestrzenne odtworzenie kształtu badanego obiektu na podstawie danych w postaci współrzędnych punktów określających powierzchnię [1-5]. Znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, a coraz częściej wspomaga diagnostykę medyczną. W artykule przedstawiono optyczne metody pomiarowe, które służą do pomiarów i odwzorowania kształtu struktur kostnych w warunkach prawidłowych i patologicznych.

Celem pracy było porównanie dokładności odwzorowania kształtu kości długich zakończonych powierzchniami stawowymi z zastosowaniem następujących bezstykowych układów skanujących: mobilnego skanera laserowego i dwóch systemów fringe optic ze światłem strukturalnym.

Materiał i metody

Materiał badań stanowiły: model kości udowej człowieka z kulistą powierzchnią stawową głowy oraz z kłykciami stawowymi na końcu dalszym, kości udowe zwierzęce, kule wzorcowe: \varnothing 25mm z materiału ceramicznego oraz stalowa kula \varnothing 30mm.

Elementy stanowiące materiał badawczy skanowano z zastosowaniem trzech systemów pomiarowych. Podstawą do uzyskania modeli wirtualnych były współrzędne punktów uzyskane z pomiarów metodami optycznymi oraz numeryczne procedury rekonstrukcyjne.

Ramię Omega 2025 firmy Romer wykorzystujące do badań współrzędnościową technikę pomiarową stanowi 6-cio osiowy system pomiaru położenia głowicy w przestrzeni [6-8]. Głowica skanująca R-Scan RX2 współpracowała z oprogramowaniem 3D Reshaper (rys.1).

Pomiar sondą z przetwornikiem laserowym polegał na analizie położenia punktów pomiarowych w oparciu o zasadę triangulacji. Procedura polegała na obserwowaniu projekcji plamki lasera na powierzchni pomiarowej za pomocą sensorów CCD, które spełniają rolę detektorów natężenia światła i akwizycji danych w przyjętym układzie odniesienia [2,9,10]. Dokładność głowicy skanującej wynosiła 0,07 mm, maksymalna prędkość skaningu to 20 linii/s przy zebraniu 640 punktów w linii. Głowica współpracowała z ramieniem pomiarowym o zakresie pomiarowym 1500 mm i dokładności pomiaru długości \pm 0,068 mm. Elementami wpływającymi na dokładność

systemu była: głowica laserowa, ramię oraz system obróbki chmury punktów - wykorzystywane w procesie pomiarowym [11-16].

Cykle badawcze polegały na akwizycji danych w postaci chmury punktów i ich optymalizacji poprzez eliminację punktów odległych, filtrację, triangulację i wygładzenie. Kolejnym etapem było wyznaczenie charakterystycznych wielkości geometrycznych [17,18]. Znaczący wpływ na jakość wykonywanego pomiaru miała refleksyjność powierzchni mierzonego obiektu. Najlepsze wyniki uzyskiwano podczas pomiaru matowych powierzchni. Powierzchnie błyszczące pokrywano odpowiednimi proszkami zmniejszającymi refleksyjność.



Rys.1. Pomiar głowy kości udowej z wykorzystaniem ramienia Omega 2025 i bezstykowej głowicy skanującej R-Scan RX2

Alternatywę badawczą stanowiła metoda *fringe optic* oparta na projekcji prążków, która pozwala na uzyskanie informacji o całości powierzchni mierzonego elementu z zastosowaniem dwóch systemów pomiarowych: Optigo 3D oraz skanera Scan 3D [19-21]. W metodzie tej wykorzystywano światło strukturalne w postaci projekcji rastra lub jego sekwencji. Odształcenie rastra rejestrowane było i analizowane za pomocą transformacji Fouriera. Przetwarzanie danych w celu uzyskania rzeczywistej powierzchni polegało na wyznaczeniu fazy oraz skalowaniu.

Obrazowanie systemem Optigo 3D firmy Congi Tens, w którym identyfikacja kształtu polegała na analizie deformacji czarno białych rastrów świetlnych na badanej powierzchni przez trzy kamery CCD w tzw. aplikacji random pattern. Częstotliwość akwizycji danych wynosiła 1000 Hz, co eliminowało wpływ drgań otoczenia oraz umożliwiało realizację badań dynamicznych. Badania przeprowadzono dla pola obrazowania FOV 400x550 mm oraz 260x190mm, dokładność pomiaru wg danych producenta to 0,07mm.

Skaner Scan3D firmy SMARTTECH realizował pomiar deformacji prążków strukturalnego światła białego na powierzchni mierzonego obiektu - jednocześnie w całym polu widzenia [4]. Stosowanymi technikami skanowania były: metoda kodów Graya oraz metoda przesunięcia fazy. Techniki te umożliwiały określenie położenia lokalizowanych punktów w przestrzeni pomiarowej. Na niepewność pomiaru wpływały takie czynniki jak: błędne określenie parametrów układu projektor- detektor, niestabilność termiczna, oświetlenie, odległość między projektorem a detektorem. Dokładność pomiarowa wynosiła 0,08mm. Zaletami systemu była wysoka dokładność oraz rozdzielczość pomiaru oraz jego automatyzacja.

Metoda badań polegała na ocenie dokładności odwzorowania kształtu powierzchni badanych obiektów względem układu referencyjnego. Badania wstępne wykazały, że najmniejsze błędy określające dokładność odwzorowania występują przy systemie Optigo 3D. Z uwagi na specyfikę obiektu badań, wskazane było przeprowadzenie pomiarów bezstykowych. W związku z tym ramię pomiarowe wyposażono w laserową głowicę skanującą, której błędy odwzorowania położenia punktu na powierzchni badanej należało uwzględnić przy określaniu sumarycznej dokładności zestawu obejmującego ramię i głowicę.

Dla ramienia pomiarowego współpracującego z głowicą wyznaczono błędy odwzorowania kształtu poprzez obrazowanie powierzchni kuli wzorcowej. Na podstawie otrzymanych wyników określono średnicę kuli wzorcowej w porównaniu do jej wartości nominalnej określonej w świadectwie legalizacji. Wpływ refleksyjności powierzchni na dokładność odwzorowania kształtu określono poprzez pomiary kuli wzorcowej oraz tej samej kuli z pokryciem antyrefleksyjnym.

Strategia pomiarowa obejmowała realizację 10 cykli pomiarowych umożliwiających otrzymanie obrazu całej skanowanej struktury. Ilość przejść pomiarowych wynikała z metody obrazowania oraz przyjętego programu analizującego.

Niezależnie od systemu pomiarowego proces analizy danych był tożsamy. Polegał on na zebraniu danych w postaci współrzędnych chmury punktów. Dalsza obróbka polegała na usunięciu obszarów odbiegających zdecydowanie od całości uzyskanych pomiarów, filtracji poprzez usuwanie szumów i redukcję artefaktów. Po wykonaniu tych czynności określano układ współrzędnych. Chmurę punktów poddawano procesowi triangulacji wynikiem czego uzyskiwano powierzchniowy model siatkowy.

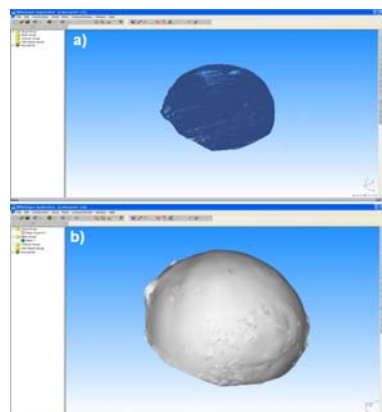
Wykorzystano programy komputerowe: Mesh 3D, 3DMax, ProEngineer, Poly Works, Catia, Geomagic Studio 2012.

Wyniki i ich omówienie

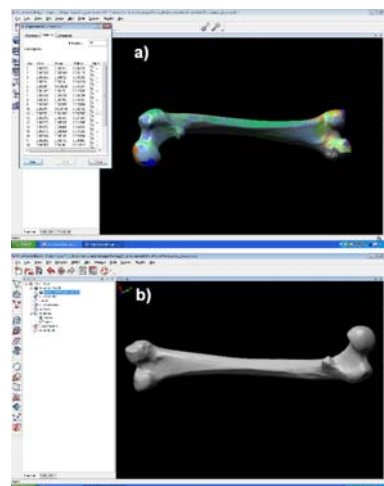
Wyniki badań przeprowadzonych z zastosowaniem współrzędnościowego ramienia pomiarowego Omega z optyczną głowicą skanującą RX2 Scan oraz określenie w programie 3D Reshaper współrzędnych punktów pozwoliło na utworzenie chmury punktów i wygenerowaniu: modelu powierzchniowego głowy kości udowej ludzkiej (rys.2) oraz modelu powierzchniowego kości udowej ludzkiej (rys.3).

Wyniki badań z zastosowaniem Optigo 3D, ramienia Omega 2025 z głowicą R-Scan RX 2 oraz Scan3D były podstawą do porównania dokładności odwzorowania powierzchni obiektów badań tymi systemami. Porównanie modeli numerycznych z systemu Optigo 3D i ramienia Omega 2025 przedstawiono na rysunku 4, a systemu Optigo 3D i systemu Scan3D przedstawiono na rysunku 5.

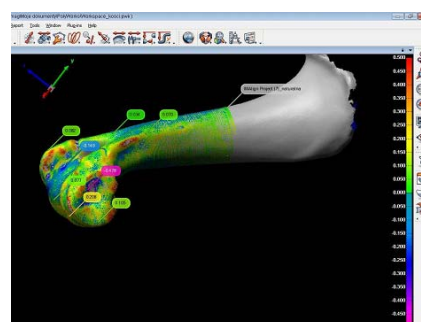
Błędy odwzorowania kształtu wynikające z porównania modeli numerycznych z systemu Optigo 3D i ramienia Omega 2025 (rys.4) dla 75% badanego obszaru mieściły się w granicach od +0,28mm do - 0,19mm, dla 25% dochodził do 0,45mm.



Rys.2. Rekonstrukcja głowy kości udowej ludzkiej wyznaczona na podstawie badań mobilnym ramieniem pomiarowym Omega 2025: a) faza wstępna tworzenia obrazu z chmury punktów, b) obraz końcowy



Rys.3. Rekonstrukcja kości udowej ludzkiej wyznaczona na podstawie badań mobilnym ramieniem pomiarowym Omega 2025: a) faza wstępna tworzenia obrazu z chmury punktów, b) obraz końcowy

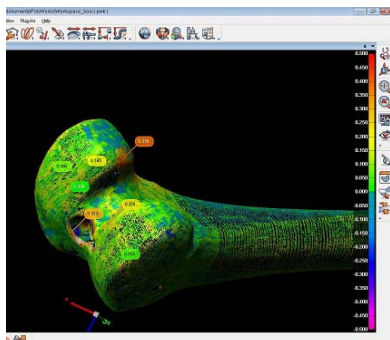


Rys.4. Porównanie modeli numerycznych kości udowej zwierzęcej z systemu Optigo 3D i ramienia Omega 2025

Błędy odwzorowania kształtu wynikające z porównania modeli numerycznych z systemu Optigo 3D i systemu Scan 3D (rys.5) dla 98% badanego obszaru mieściły się w granicach od +0,23mm do - 0,16mm, dla 2% dochodziły do 0,35mm.

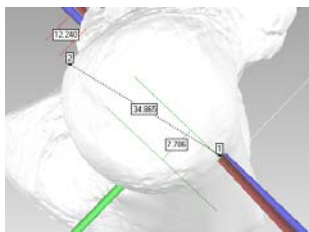
Na podstawie pomiarów otrzymano dla kości udowej zwierzęcej 2120750 punktów, które wykorzystano do opracowania modelu w programie Geomagic Studio 2012.

W celu sprawdzenia z jaką dokładnością został wykonany model skorzystano z funkcji *distance*, które posiada program Geomagic Studio 2012. Narzędzie to pozwala na wybranie dwóch punktów i pomiar odległości między nimi. Wykonano pomiary w różnych obszarach modelu.

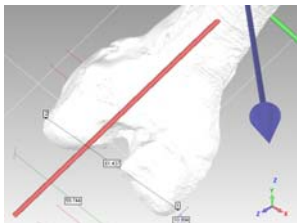


Rys.5. Porównanie modeli numerycznych kości udowej zwierzęcej z systemu Optigo 3D i systemu Scan 3D

Na podstawie serii 10 pomiarów parametrów geometrycznych, charakterystycznych dla kości udowej tj.: średnicy głowy S (rys.6) oraz maksymalnej odległości K pomiędzy punktami skrajnymi na powierzchniach zewnętrznych kłycki przyśrodkowego i bocznego końca dalszego kości udowej (rys.7) wyznaczono ich wartości średnie z zastosowaniem trzech układów pomiarowych (tab.1).



Rys.6. Pomiar średnicy głowy kości udowej (S)



Rys.7. Pomiar maksymalnej odległości (K) pomiędzy punktami skrajnymi na powierzchniach zewnętrznych kłycki przyśrodkowego i bocznego końca dalszego kości udowej

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów charakterystycznych kości udowej zwierzęcej

Mierzony parametr	System Optigo 3D	System Scan 3D	Ramię pomiarowe Omega z głowicą laserową
S [mm]	35,03	34,99	34,86
K [mm]	61,72	61,68	61,44

Stwierdzono, że wartości średnie wyników pomiarów – w przypadku ramienia pomiarowego są zaniżone o:

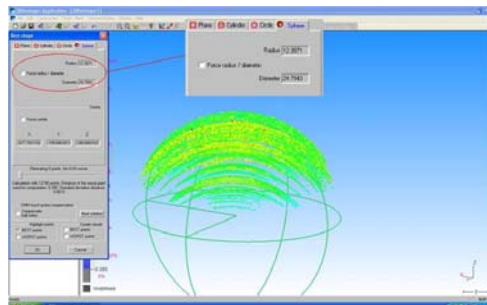
- 0.17mm dla parametru S,
- 0.28mm dla parametru K,

w porównaniu z wynikami otrzymanymi z systemem Optigo 3D.

Ocenę dokładności pomiarów przeprowadzono dla parametru K określając parametry precyzji pomiaru:

- na podstawie wyników z systemu Optigo 3D

- Odchylenie standardowe eksperymentalne: $s = 0,082$ mm
 - Niepewność pomiarowa rozszerzona $U = 0.163$ mm - na podstawie wyników z ramienia Omega 2025
 - Odchylenie standardowe eksperymentalne: $s = 0.106$ mm
 - Niepewność pomiarowa rozszerzona: $U = 0.212$ mm
- Ocenę dokładności odwzorowania sfery z pomiarów ramieniem pomiarowym Omega2025 przeprowadzono na podstawie pomiarów średnicy kuli ceramicznej $\varnothing 25$ (rys.8).



Rys.8. Chmura punktów z przykładowego przebiegu pomiarowego kuli ceramicznej

Wartość średnia z 30 pomiarów średnicy wynosiła $d = 24,886$ mm

Odchylenie standardowe dla pomiarów średnicy kuli ceramicznej na podstawie obrazowania z zastosowaniem ramienia $s = 0,092$ mm.

Aplikacja ramienia do pomiarów średnicy wykazała, że wyniki są zaniżone. Występuje błąd systematyczny. Można zaobserwować charakterystyczny trend wzrostu wartości średnich serii pomiarów oraz że wartości średnie czterech pierwszych serii pomiarowych znajdują się poza granicą niepewności pomiarowej przyrządu.

Wpływ refleksyjności powierzchni na wynik pomiaru określono na podstawie analizy wyników 30 pomiarów średnicy kuli wzorcowej stalowej o średnicy $\varnothing 30$ mm dla dwóch rodzajów tej powierzchni. Wyniki wartości średnich serii pomiarów były następujące:

- bez środka antyrefleksyjnego $D = 29,881$ mm, odchylenie standardowe $s = 0,678$ mm,
- z warstwą środka antyrefleksyjnego $D = 30,238$ mm, odchylenie standardowe $s = 0,178$ mm.

Wyniki badań przy obrazowaniu z zastosowaniem ramienia pomiarowego, wskazują na:

- zaniżanie wartości rzeczywistych parametrów geometrycznych w modelach numerycznych,
- wpływ refleksyjności powierzchni diagnozowanej na dokładność pomiarów.

Przedmiotem kolejnej analizy były ubytki chrzęstno-kostne w strefie powierzchni stawowych końca dalszego kości udowej zwierzęcej (rys.9).



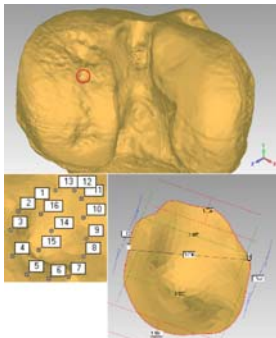
Rys.9. Fotografia ubytków chrzęstno-kostnych w strefie powierzchni stawowych na kłycku przyśrodkowym kości udowej

Wielkość i kształt dwóch wybranych ubytków chrzęstno-kostnych określono na podstawie obrazowania z zastosowaniem ramienia Omega 2025 z głowicą laserową R-Scan RX2.

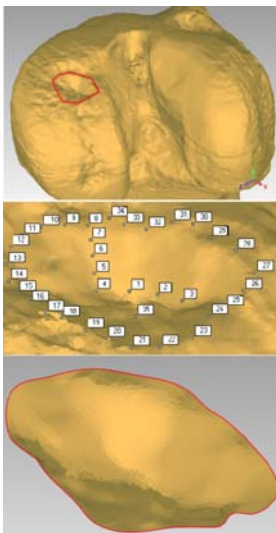
Na opracowanym modelu końca dalszego kości udowej wskazano punkty charakterystyczne wyznaczające ubytek nr.1 (rys.10) oraz ubytek nr.2 (rys.11).

Współrzędne punktów po segmentacji ubytków pozwoliły na ich wizualizację 3D.

Określono wymiary gabarytowe ubytków, ich głębokość oraz powierzchnie, na podstawie wartości średnich z serii 10 pomiarów.



Rys.10. Analiza geometryczna ubytku nr 1: wymiary gabarytowe: długość 3,91mm, szerokość 3,72mm, głębokość 0,98mm; uszkodzona powierzchnia stawowa 13,68mm²



Rys.11. Analiza geometryczna ubytku nr.2: wymiary gabarytowe: długość 5,73mm, szerokość 5,21mm, głębokość 2,98mm; uszkodzona powierzchnia stawowa 27,68mm²

Podsumowanie

Bezstykowe układy skanujące pozwalają na stworzenie modelu powierzchniowego struktur kostnych i chrzęstno-kostnych. Są one szczególnie przydatne do obrazowania powierzchni podatnych na naciski końcówek pomiarowych.

Przedstawiona procedura tworzenia modelu umożliwia analizę kształtów anatomicznych oraz analizę kształtu ubytków chrzęstno-kostnych w warunkach degradacji chrząstki na powierzchniach stawowych.

Dokładność pomiarów zależy od stopnia zróżnicowania kształtu oraz właściwości rozpraszających powierzchni mierzonego przedmiotu. Dokładność weryfikowano z wykorzystaniem kul wzorcowych.

Testy kontrolne pozwoliły na dokonanie oceny dokładności głowicy laserowej oraz na sprawdzenie czy układ pomiarowy został prawidłowo skalibrowany.

Najlepszą dokładność w modelowaniu kształtu struktur kostnych uzyskano przy wykorzystaniu systemu pomiarowego Optigo 3D i Scan 3D. Odchylenie standardowe dla Optigo 3D wynosiło 0,08mm dla Scan 3D 0,09mm. Dla ramienia Omega z głowicą laserową wynosiło

0,25mm, przy czym zwiększenie wartości odchylenia standardowego wynikało z konieczności zastosowania głowicy do pomiarów bezstykowych.

LITERATURA

- [1] Ratajczyk E., Współrzędnościowe ramiona pomiarowe w zastosowaniach przemysłowych. *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 16 (2012), 33-39.
- [2] Sitnik R. Karaszewski M., Optimized point cloud triangulation for 3D scanning systems, *MG & V*, 17 (2008), 349-371.
- [3] Rodger G., Flack D., MacCarthy M., A review of industrial capabilities to measure free-form surfaces - NPL REPORT - DEPC-EM 014 Jan 2007.
- [4] Materiały informacyjne firmy Smarttech, <http://www.smarttech.pl>
- [5] Chen F., Brown G.M., Song M., Overview of 3-D shape measurement using optical methods, *Opt. Eng.*, 39 (2000), 10-22.
- [6] Ratajczyk E., Ramiona pomiarowe-pomiary skaningowe i specjalne, pomiary w rozszerzonym zakresie, oprogramowania, *Mechanik*, 82 (2009), 38-42.
- [7] Ratajczyk E., Koperska A., Porównanie testów dokładności współrzędnościowych ramion pomiarowych, *Mechanik*, 83 (2010), 588-594.
- [8] Kovač I., Frank A., Testing and calibration of coordinate measuring arms, *Precision Engineering*, 25 (2001), 2, 90-99.
- [9] Zawacki M., Metody sprawdzania dokładności ramion pomiarowych, *Przegląd Mechaniczny*, 9 (2007), 175-279.
- [10] Wojtyła M., Niepewność pomiaru przewodów metalowych giętych z wykorzystaniem ramienia pomiarowego z głowicą bezstykową typu V. *Przegląd Mechaniczny*, 9 (2007), 170-174.
- [11] Ratajczyk E., Ramiona pomiarowe: Testy dokładności, *Mechanik*, 82 (2009), 104-107.
- [12] Śladek J., Ostrowska K., Gąska A., Wirtualne Współrzędnościowe Ramię Pomiarowe (WWRP), *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 56 (2010), 75-77.
- [13] Śladek J., Sokal G., Ostrowska K., Kmita A., Wzorcowanie współrzędnościowych ramion pomiarowych (WRP), *Acta mechanica et automatica*, 1 (2007), 53-58.
- [14] Pingping W., Yetai F., Shenwang L., Calibration technology of a flexible coordinate measuring arm. *JOURNAL-XIAN JIAOTONG UNIVERSITY*, 40 (2006), 3, 284.
- [15] Śladek J., Gąska A., Olszewska M., Ostrowska K., Ryniewicz, A., Metoda oceny dokładności pomiarów realizowanych za pomocą ramion pomiarowych wyposażonych w optyczne głowice skanujące, *Mechanik*, 85 (2012), 133-135.
- [16] Ratajczyk E., Coordinate measuring arms and their accuracy tests, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), 5, 181-186.
- [17] Storch B., Wierucka I., Optyczne pomiary zarysów powtarzalnych wykorzystaniem technik przetwarzania obrazu, *Acta mechanica et automatica*, 1 (2007), 59-62.
- [18] Stefańczyk M., Kornuta, T., Akwizycja obrazów RGB-D: metody, *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 18 (2014), 82-90.
- [19] Mayinger F., Feldmann O., Optical measurements: techniques and applications, *Optical Measurements: Techniques and Applications*, Berlin Heidelberg: Springer, 2001.
- [20] Kowarschik R., et al., Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light, *Opt. Eng.*, 39 (2000), 150-158.
- [21] Gühring J., Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components, *Photonics West, Videometrics VII*, Vol. 4309, SPIE, San Jose, USA, 2000

Autorzy: dr hab. inż. Andrzej Ryniewicz, Politechnika Krakowska, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, E-mail: andrzej@ryniewicz.pl, mgr inż. Renata Knapik, Politechnika Krakowska, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, E-mail: re.knapik@gmail.com, 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