

Aplikacja bezstykowych metod pomiarowych do oceny odwzorowania kształtu brył obrotowych

Streszczenie. Celem opracowania jest wyznaczenie dokładności odwzorowania modelowych brył obrotowych, których kształty i wymiary mają zastosowanie w diagnostyce medycznej, z wykorzystaniem trzech systemów pomiarowych ze światłem laserowym i strukturalnym. Zastosowanie techniki współrzędnościowej do analizy kształtu wzorców pozwoliło na porównanie systemów oraz wskazanie współrzędnościowej maszyny pomiarowej z kamerą laserową, jako najbardziej preferowaną do odwzorowania brył obrotowych.

Abstract. Aim of the study is to determine the accuracy of the mapping model of solids of revolution, whose shapes and sizes are used in medical diagnostics, using three measurement systems with laser light and structural. The use of coordinate technique for the analysis of the shape of patterns allowed the comparison of systems and an indication of coordinate measuring machine with laser camera, as the most preferred for mapping solids of revolution. (**Application of non-contact measurement methods for the evaluation of mapping the shape of solids of revolution**).

Słowa kluczowe: odwzorowanie, kształt, skanowanie, dokładność.
Keywords: mapping, shape, scanning, accuracy.

Wstęp

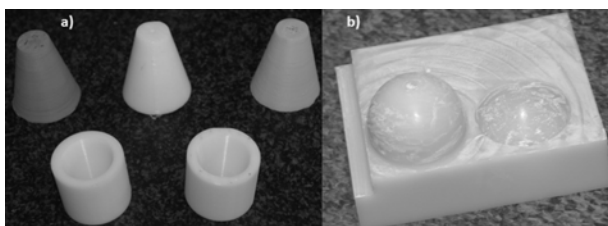
Bezstykowe metody pomiarowe znajdują coraz szersze zastosowanie w odwzorowaniu kształtu obiektów technicznych oraz struktur tkankowych. Optyczna metrologia współrzędnościowa umożliwia przestrzenne odtworzenie kształtu na podstawie danych w postaci współrzędnych punktów określających powierzchnię w rekonstrukcji trójwymiarowej tej powierzchni z wykorzystaniem metod numerycznych [1-5]. W opracowaniu zaprezentowano trzy systemy pomiarowe, które w procedurze skanowania obiektu wykorzystują światło laserowe i światło strukturalne oraz różne systemy i rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające wiarygodne przeprowadzenie pomiarów w współrzędnościowej.

Badania zrealizowano w akredytowanym Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej na: współrzędnościowej maszynie pomiarowej (WMP) LK CMM firmy Nikon Metrology z głowicą laserową LC60Dx, współrzędnościowym ramieniu pomiarowym (WRP) Romer Absolute Arm 7320SE firmy Hexagon Metrology z głowicą laserową HP-L-20.8 oraz na skanerze optycznym (SO) Scan 3D Qualify firmy Smartech 3D.

Celem jest wyznaczenie dokładności odwzorowania modelowych brył obrotowych, których kształty i wymiary mają zastosowanie w diagnostyce medycznej, z wykorzystaniem optycznej metrologii współrzędnościowej.

Materiał i metoda

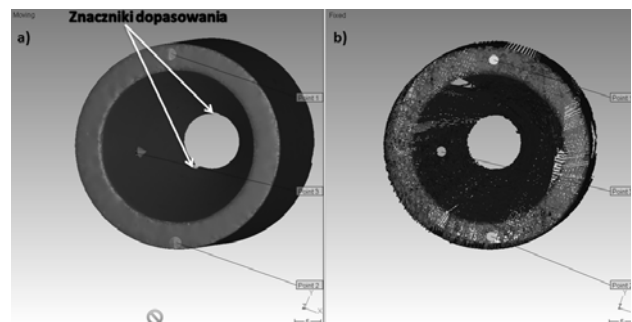
Materiałem badań były wzorce brył obrotowych: model walec-stożek i model kula-czasza wykonane z polimeru-styrenu alkilonitrylobutadienowego (ABS) specjalnie do oceny dokładności odwzorowania kształtów obiektów medycznych (rys.1).



Rys. 1. Modele badawcze - bryły obrotowe: a) walec-stożek, b) kula-czasza

Modele referencyjne stanowiły te same bryły obrotowe zamodelowane wolumetrycznie w programie CAD na podstawie pomiarów na wzorcowej współrzędnościowej maszynie pomiarowej WMP Leitz PMM 12106 [6].

Metoda badań polegała na wykonaniu serii pomiarów brył obrotowych trzema systemami metrologii współrzędnościowej i rekonstrukcji przestrzennej tych obiektów na podstawie chmury punktów, w programie dedykowanym systemowi pomiarowemu. Numerycznie odwzorowane, na podstawie pomiarów bryły, porównano z obiektami referencyjnymi w CAD 3D metodą best fit (rys.2).

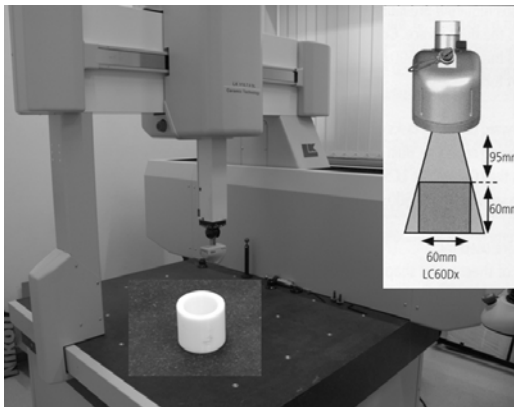


Rys.2. Procedura dopasowania kształtu wzorca walec-stożek: a) model referencyjny ze współrzędnościowej maszyny pomiarowej Leitz PMM 12106, b) model z ocenianego systemu pomiarowego

Pierwszy system pomiarowy stanowiła współrzędnościowa maszyna pomiarowa LK CMM firmy Nikon Metrology z triangulacyjną głowicą laserową LC60Dx firmy Nikon Metrology (rys.3).

Maszyna pomiarowa LK CMM z głowicą laserową LC60Dx ma stabilną budowę portalową. Posiada ceramiczne elementy nośne oraz granitowy stół, co pozwala na ograniczenie wpływu gradientu temperatury na dokładność pomiarów. Wzorcami pomiarowymi są układy inkrementalne. Konstrukcja maszyny stabilizowana jest poduszkami powietrznymi, a elementy ruchowe pracują na łożyskach powietrznych. Zakres pomiarowy wynosi 1000 mm x 1000 mm x 800 mm, a dokładność podawana przez producenta $MPE = 1,5 \mu m + L/375$. Do maszyny pomiarowej podłączono optyczną głowicę laserową LC60Dx, w której wykorzystywana jest zasada triangulacyjnego wyznaczania odległości. Podstawą

wyliczenia odległości przedmiotu pomiarowego od głowicy jest układ trójkątów prostokątnych. Wiązka światła wysyłana przez diodę laserową na obiekt pomiarowy, po przejściu przez układ optyczny, formowana jest w linię. Widok linii jest odtwarzany przez kolejny układ optyczny na fotolinijce. Kiedy zachodzi zmiana odległości głowicy od powierzchni obiektu, obraz liniiki przesuwa się wzdłuż fotolinijki, pełniąc rolę wzorca długości. Głowica posiadała następujące parametry: szerokość wiązki laserowej 60 mm, rozdzielczość 0,060 mm, zbieranie punktów 75000 pkt/s, błąd głowicy 0,009 mm (rys.3). Na dokładność systemu wpływała dokładność wykorzystanej maszyny pomiarowej i głowicy laserowej oraz zastosowane oprogramowanie do akwizycji danych i opracowania modelu 3D.



Rys.3. Pomiar współrzędnościową maszyną pomiarową LK CMM z głowicą LC60Dx w oprogramowaniu Focus

Kolejnym urządzeniem, na którym dokonano pomiarów było współrzędnościowe ramię pomiarowe (WRP) Romer Arm 7320SE firmy Hexagon Metrology ze skanerem HP-L-20.8 [7-9] (rys.4). WRP jest to urządzenie pomiarowe, które może wykonywać pomiary zarówno stykowe jak i bezstykowe. Jest urządzeniem mobilnym, ręcznym, redundantnym. W swej budowie posiada siedem par obrotowych, z których cztery posiadają pełny obrót 360°. W każdej parze zamocowany jest tarczowy układ pomiarowy kąta (en koder absolutny).



Rys.4. Pomiar ramieniem Romer Arm 7320SE ze skanerem HP-L-20.8 w oprogramowaniu 3D Reshaper

Podczas pomiarów wykorzystano bezstykową głowicę triangulacji laserowej o następujących parametrach: laser klasy 2, odległość pracy 180±40 mm, częstotliwość liniowa 100 Hz, szerokość linii 104 mm, minimalny odstęp między punktami 0,013 mm, błąd układu głowicy typu Probing 0,009 mm, błąd układu głowicy-wartość dyspersji 0,036 mm, zbieranie punktów 150000 pkt/s. Parametry 7-osioowego ramienia ze skanerem były następujące: zakres

pomiarowy ±1000 mm, powtarzalność przestrzenna ±0,061 mm, dokładność systemu skanowania 0,079 mm.

Procedura pomiarowa 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 [2,10,11]. Elementami wpływającymi na dokładność systemu były: głowica laserowa, ramię oraz system obróbki chmury punktów – wykorzystywane w procesie pomiarowym [12-17].

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 [18,19]. 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.

Kolejną alternatywę badawczą stanowiła metoda *fringe projection* oparta na projekcji prążków, która pozwala na uzyskanie informacji o całości powierzchni mierzonego elementu z zastosowaniem skanera optycznego Scan 3D qualify firmy Smartech 3D (rys.5). System wyposażony był w stół obrotowy, który pozwalał na pomiar całego elementu, składając skany, w poszczególnych projekcjach, co 60°, w całość. W metodzie tej wykorzystywano światło strukturalne w postaci projekcji rastra lub jego sekwenji. Odształcenie rastra rejestrowane było i analizowane metodą dyskretnej zmiany fazy. Przetwarzanie danych w celu uzyskania rzeczywistej powierzchni polegało na wyznaczeniu fazy oraz skalowaniu.



Rys.5. Pomiar skanerem optycznym Scan 3D qualify w oprogramowaniu PCdmis Reshaper

Obrazowanie tym systemem polegało na analizie deformacji czarno białych rastrów świetlnych na badanej powierzchni. Częstotliwość akwizycji danych wynosiła 2 MHz, co eliminowało wpływ drgań otoczenia oraz umożliwiało realizację badań dynamicznych. Badania przeprowadzono dla pola obrazowania FOV 400 mm x 550 mm oraz 260 mm x 190 mm, dokładność pomiaru wg danych producenta to 0,07 mm.

Skaner Scan3D qualify realizował pomiar deformacji prążków strukturalnego światła białego na powierzchni mierzonego obiektu - jednocześnie w całym polu widzenia [4, 20-22]. Stosowanymi technikami skanowania były: metoda kodów Graya oraz metoda przesunięcia fazy. Wynikiem pomiarów była chmura punktów. 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 0,08 mm. Zaletami systemu była wysoka dokładność oraz rozdzielczość pomiaru oraz jego automatyzacja.

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 zakończeniu optymalizacji danych określano układ współrzędnych. Chmurę punktów poddawano procesowi triangulacji wynikiem czego uzyskiwano powierzchniowy model siatkowy.

Strategia badawcza obejmowała realizację 20 cykli pomiarowych umożliwiających otrzymanie obrazu całej skanowanej struktury. Ilość przejść pomiarowych wynikała z metody obrazowania oraz przyjętego programu analizującego.

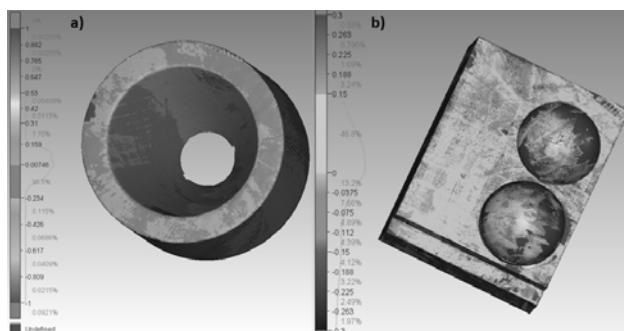
Wykorzystano programy komputerowe: Mesh 3D, 3DMax, ProEngineer, Poly Works, Catia, Geomagic Studio 2012.

Wyniki i ich omówienie

Parametry geometryczne modeli badawczych wyznaczono na podstawie serii 10 pomiarów (dla każdego modelu) na maszynie współrzędnościowej stanowiącej wyposażenie Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej PK – WMP Leitz PMM 12106 ($MPE = (0,8+L/1000) \mu m$).

Wymiary modeli były następujące: model walec-stożek – średnica walca $\varnothing 35$ mm, wysokość walca 35 mm, średnice charakterystyczne stożka $\varnothing 25$ mm i $\varnothing 12$ mm, wysokość stożka 35 mm (rys.1a); model kula-czasza – promień kuli SR 17,5 mm, kąt rozwarcia kuli 180° , promień czaszy SR 17,5 mm, kąt rozwarcia czaszy 160° (rys.1b). Odchylenie standardowe $s=0,004$ mm. Na podstawie pomiarów WMP Leitz PMM 12106, dla wytypowanych wzorców wyznaczono modele referencyjne wygenerowane w programie CAD.

Numeryczne modele badawcze uzyskane z trzech systemów pomiarowych wykorzystujących światło laserowe i światło strukturalne, porównano do odpowiednich modeli referencyjnych w programie 3D Reshaper.

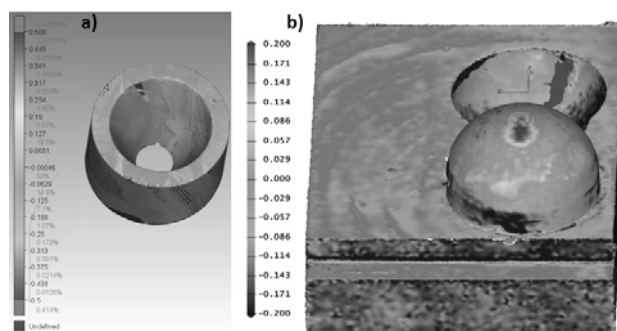


Rys.6. Rozkład błędów odwzorowania kształtu w pomiarach na WMP LK CMM z głowicą LC60Dx modelu: a) walec-stożek, b) kula-czasza

Błędy odwzorowania kształtu wynikające z porównania modeli otrzymanych na WMP LK CMM z głowicą LC60Dx w porównaniu do modeli referencyjnych zawierają się w następujących przedziałach: dla modelu walec-stożek od +1,000 mm do +0,175 mm dla 1,35 %, od +0,175 mm do -0,135 mm dla 94 %, od -0,135 mm do -0,325 mm dla 2,15

%, od -0,325 mm -1,000 mm dla 0,86 %; dla modelu kula-czasza od +0,300 mm do +0,150 mm dla 5,6 %, od +0,150 mm do -0,037 mm dla 60 %, od -0,037 mm do -0,075 mm dla 7,66 %, od -0,075 mm do -0,155 mm dla 9,28 %, od -0,155 mm do -0,300 mm dla 11,8 %. Dla modelu walec-stożek 98,5 % odchyłek mieściło się w przedziale +0,155 mm do -0,110 mm. W przypadku modelu kula-czasza odchyłki maksymalne wystąpiły w rejonie wierzchołka powierzchni kulistej, symetrycznie do odchyłek minimalnych, co może wskazywać na występowanie błędów osobowych. W tym systemie pomiarowym zaobserwowano około 13 % obszarów niezmiernych. W przypadku modelu walec-stożek odchyłki ujemne stanowiły 99 %, a dodatnie 0,5 % (rys.6).

Błędy odwzorowania kształtu wynikające z porównania modeli otrzymanych na WRP Romer Arm 7320SE ze skanerem HP-L-20.8 w porównaniu do modeli referencyjnych zawierają się w następujących przedziałach: dla modelu walec-stożek od +0,505 mm do +0,254 mm dla 0,6 %, od +0,254 mm do +0,127 mm dla 11,82 %, od +0,127 mm do -0,063 mm dla 63,5 %, od -0,063 mm do -0,188 mm dla 22 %, od -0,188 mm do -0,500 mm dla 0,82 %; dla modelu kula-czasza od +0,200 mm do +0,114 mm dla 8,5 %, od 0,114 mm do -0,057 mm dla 75 %, od -0,057 mm do -0,114 mm dla 7,5 %, od -0,114 mm do -0,171 mm dla 3 %. Dla modelu walec-stożek 88 % odchyłek mieściło się w przedziale +0,020 mm do -0,188 mm. Wartości maksymalnych odchyłek występowały w miejscach zmiany kierunku ruchu głowicy skanującej oraz na powierzchni stożkowej. Artefakty występowały głównie na powierzchni walcowej i stożkowej przylegającej do stołu maszyny. Dla modelu kula-czasza odchyłki maksymalne występowały w tzw. biegunach skanowania, usytuowanych na wierzchołku kuli. Minimalne odchyłki oraz artefakty występowały na powierzchni kuli, której styczna jest prostopadła do powierzchni stołu. W przypadku pomiaru WRP Romer Arm 7320SE ze skanerem HP-L-20.8 odchyłki dodatnie wynosiły 47 %, a odchyłki ujemne 52 %. Pozostała część powierzchni nie została zdefiniowana przez układ pomiarowy (rys.7).

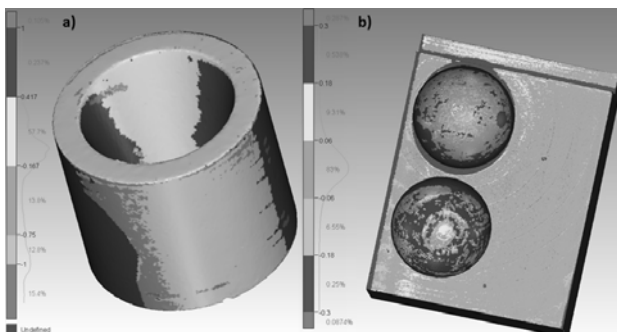


Rys.7. Rozkład błędów odwzorowania kształtu w pomiarach na WRP Romer Arm 7320SE ze skanerem HP-L-20.8 modelu: a) walec-stożek, b) kula-czasza

Błędy odwzorowania kształtu wynikające z porównania modeli otrzymanych na skanerze optycznym Scan 3D qualify w porównaniu do modeli referencyjnych zawierają się w następujących przedziałach: dla modelu walec-stożek od +1,000 mm do +0,417 mm dla 0,24 %, od +0,417 mm do -0,167 mm dla 57,7 %, od -0,167 mm do -0,750 mm dla 13,8 %, od -0,750 mm do -1,00 mm dla 12,8 %; dla modelu kula-czasza od +0,3 mm do +0,060 mm dla 9,85 %, od +0,060 mm do -0,060 mm dla 83 %, od -0,060 mm do -0,180 mm dla 6,55 %, od -0,180 mm do -0,300 mm dla 0,25 %. Dla modelu walec-stożek 70 % odchyłek mieściło się w przedziale +0,400 mm do -0,250 mm. Dla modelu walec-

stożek, występujące obszary o odchyłkach dodatnich, znacząco różniące się od odchyłek w obszarach sąsiednich - przy zachowaniu kształtu badanej powierzchni - można uznać za artefakty wynikające z metody pomiaru. Dla modelu kula-czasza wartości maksymalne wystąpiły na wierzchołkach badanych powierzchni. Charakterystyczny był pierścieniowy rozkład obszarów o zbliżonych wartościach odchyłek kształtu oraz obszarów nieokreślonych.

Odchylenia standardowe z przeprowadzonych serii pomiarów wynoszą odpowiednio: dla systemu współrzędnościowej maszyny pomiarowej LK CMM z głowicą LC60Dx 0,051 mm, dla współrzędnościowego ramienia pomiarowego Romer Absolute Arm 7320SE ze skanerem laserowym HP-L-20.8 0,069 mm, natomiast dla skanera optycznego Scan 3D qualify bez obrotu stolika 0,072 mm, a z obrotem stolika 0,098 mm (rys.8).



Rys.8. Rozkład błędów odwzorowania kształtu w pomiarach na skanerze optycznym Scan 3D qualify modelu: a) walec-stożek, b) kula-czasza

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań w trzech systemach pomiarowych, stwierdzono różne charakterystyki rozkładu błędów odwzorowania uzależnione od kształtu modeli.

W systemach ze skanerami laserowymi zaobserwowano:

- dla modelu walec-stożek - występowanie 90-92 % odchyłek ujemnych oraz stosunkowo nieduże (3-5 %) obszary niezidentyfikowane usytuowane losowo.
- dla modelu kula-czasza - występowanie odchyłek dodatnich i ujemnych oraz występowanie obszarów niezidentyfikowanych usytuowanych w przyjętym układzie odniesienia, na powierzchni kuli w odległości $z < 6$ mm od płaszczyzny xy.

W systemie ze światłem strukturalnym stwierdzono:

- dla modelu walec-stożek – charakterystyczny pasmowy rozkład odchyłek dodatnich, ujemnych oraz obszarów niezidentyfikowanych wynikających ze złożenia kilku projekcji
- dla modelu kula-czasza – pierścieniowy rozkład odchyłek dodatnich i ujemnych z wyraźnym usytuowaniem biegunów odchyłek maksymalnych.

W analizowanych systemach pomiarowych, najbardziej preferowanym bezstykowym układem do odwzorowania kształtu brył obrotowych jest współrzędnościowa maszyna pomiarowa LK CMM ze skanerem laserowym LC60Dx.

LITERATURA

- Ratajczyk E., Współrzędnościowe ramiona pomiarowe w zastosowaniach przemysłowych, *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 16 (2012), nr.3, 33-39
- Sitnik R. Karaszewski M., Optimized point cloud triangulation for 3D scanning systems, *MG & V*, 17 (2008), nr.4, 349-371
- Rodger G., Flack D., MacCarthy M., A review of industrial capabilities to measure free-form surfaces, *National Physical Laboratory*, 14 Jan 2007
- Materiały informacyjne firmy Smarttech, <http://www.smarttech.pl>
- Chen F., Brown G.M., Song M., Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods, *Opt. Eng.*, 39 (2000), nr.1, 10-22
- Seria Norma ISO 10360 – Sposoby oceny dokładności maszyn współrzędnościowych.
- Ratajczyk E., Ramiona pomiarowe-pomiary skaningowe i specjalne, pomiary w rozszerzonym zakresie, oprogramowania, *Mechanik*, 82 (2009), nr.1, 38-42
- Ratajczyk E., Koperska A., Porównanie testów dokładności współrzędnościowych ramion pomiarowych, *Mechanik*, 83 (2010), nr.8-9, 588-594
- Kovač I., Frank A., Testing and calibration of coordinate measuring arms, *Precision Engineering*, 25 (2001), nr.2, 90-99
- Zawacki M., Metody sprawdzania dokładności ramion pomiarowych, *Przegląd Mechaniczny*, 9S (2007), 175-179
- Wojtyła M., Niepewność pomiaru przewodów metalowych giętych z wykorzystaniem ramienia pomiarowego z głowicą bezstykową typu V. *Przegląd Mechaniczny*, 9S (2007), 170-174
- Ratajczyk E., Ramiona pomiarowe: Testy dokładności, *Mechanik*, 82 (2009), nr.2, 104-107
- Śladek J., Ostrowska K., Gąska A., Wirtualne Współrzędnościowe Ramię Pomiarowe (WWRP), *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 56 (2010), nr.1, 75-77
- Śladek J., Sokal G., Ostrowska K., Kmita A., Wzorcowanie współrzędnościowych ramion pomiarowych (WRP), *Acta mechanica et automatica*, 1 (2007), nr.2, 53-58
- Pingping W., Yetai F., Shenwang L., Calibration technology of a flexible coordinate measuring arm. *JOURNAL-XIAN JIAOTONG UNIVERSITY*, 40 (2006), nr.3, 284
- 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), nr.2, 133-135
- Ratajczyk E., Coordinate measuring arms and their accuracy tests, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr.5, 181-186
- Storch B., Wierucka I., Optyczne pomiary zarysów powtarzalnych wykorzystaniem technik przetwarzania obrazu, *Acta mechanica et automatica*, 1 (2007), nr.2, 59-62
- Stefańczyk M., Kornuta, T., Akwizycja obrazów RGB-D: metody, *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 18 (2014), nr.1, 82-90
- Mayinger F., Feldmann O., Optical measurements: techniques and applications, *Optical Measurements: Techniques and Applications*, Berlin Heidelberg: Springer, 2001
- Kowarschik R., et al., Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light, *Opt. Eng.*, 39 (2000), nr.1, 150-158
- 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, dr inż. Ksenia Ostrowska, Politechnika Krakowska, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, E-mail: kostrowska@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, 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.