

Magdalena Olszewska, Adam Gąska¹⁾

PORÓWNANIE RÓŻNYCH URZĄDZEŃ METROLOGICZNYCH WYKORZYSTYWANYCH W ZASTOSOWANIACH BIOMEDYCZNYCH

Streszczenie: Postęp w zaawansowanych technikach pomiarowych umożliwia tworzenie coraz to nowszych metod diagnostycznych w medycynie. W celu prawidłowego zdiagnozowania choroby, należy rozpatrzyć zarówno wewnętrzną strukturę narządów jak i ich budowę zewnętrzną poprzez określenie parametrów geometrycznych, wysokości, szerokości itp. Dlatego też szczególną uwagę należy zwrócić na urządzenia metrologiczne, które odgrywają sporą rolę w medycynie. Autorzy w pracy przedstawili wykorzystanie Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych (WMP) i Współrzędnościowych Ramion Pomiarowych (WRP) w ustaleniu struktury zewnętrznej, wymiarów oraz kształtu mierzonego obiektu (część kości i stawów). Przedstawione także zostało wykorzystanie tomografu komputerowego (TK) w zastosowaniach medycznych, a następnie zestawiono porównane wyniki pomiarów otrzymane na poszczególnych urządzeniach. Autorzy w pracy zwracają uwagę również na praktyczne znaczenie wyników pomiarów uzyskanych za pomocą tomografu komputerowego.

Słowa kluczowe: tomograf, ramię pomiarowe, WMP.

WSTĘP

Metrologia jest nauką, która rozwiązuje problemy dotyczące pomiarów z niemal wszystkich dziedzin nauk: technicznych, środowiskowych i medycznych. Obecnie istnieje coraz więcej zastosowań w metrologii biomedycznej i związanych z nią pomiarów geometrii narządów wewnętrznych istot żywych. Dlatego istnieje potrzeba skoncentrowania się na możliwościach, jakie daje metrologia biomedyczna. Postęp w zaawansowanych technikach pomiarowych umożliwia tworzenie coraz to nowszych metod diagnostycznych w medycynie. W celu prawidłowego zdiagnozowania choroby, należy poznać wewnętrzną i zewnętrzną strukturę narządów, ich parametry geometryczne, szerokość, wysokość, itp. W tym punkcie, szczególnie znacząca jest współpraca pomiędzy metrologią współrzędnościową i medycyną. Urządzenia metrologiczne mogą być z powodzeniem zastosowane w celach diagnostycznych w medycynie. Dzięki współrzędnościowym maszynom pomiarowym (WMP) i współrzędnościowym ramionom pomiarowym (WRP) możliwe jest określenie zewnętrznych konstrukcji, wymiarów i kształtu mierzonego obiektu (na przykład część kości lub stawów). W przypadku, gdy jest to niemożliwe lub nie zaleca się stosowania mierzenia obiektów za po-

¹⁾ Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, Politechnika Krakowska

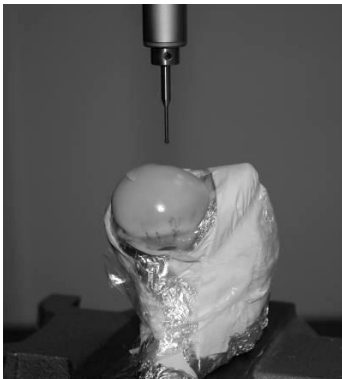
mocą sond stykowych, mogą one również wykonywać pomiary w sposób optyczny, bez fizycznego kontaktu z badanym obiektem. Tomografy komputerowe (TK), oprócz możliwości pomiaru zewnętrznej powierzchni narządu mogą także wykonywać pomiary jego wewnętrznej struktury [3].

W niniejszym artykule przedstawiony został opis i metodologia wykorzystania wspomnianych urządzeń. Ich zastosowanie zostanie zaprezentowane na przykładzie rzeczywistych pomiarów medycznych. W dalszej części artykułu przedstawione zostanie również porównanie wyników pomiarów uzyskanych na poszczególnych urządzeniach. Oprócz tego, artykuł dotyczy kwestii związanych z praktycznym znaczeniem wyników uzyskanych z pomiarów TK, tak więc poruszone zostaną problemy związane z odwzorowania kształtu i jego dokładnością. Głównym celem przeprowadzonych badań jest porównanie różnych urządzeń metrologicznych w zastosowaniach biomedycznych i ustalenie, które z nich najlepiej sprawdzają się w poszczególnych zadaniach pomiarowych. Celem tych badań jest również porównanie dokładności pomiarów wykonywanych za pomocą różnych urządzeń metrologicznych.

URZĄDZENIA METROLOGICZNE WYKORZYSTYWANE W ZASTOSOWANIACH MEDYCZNYCH

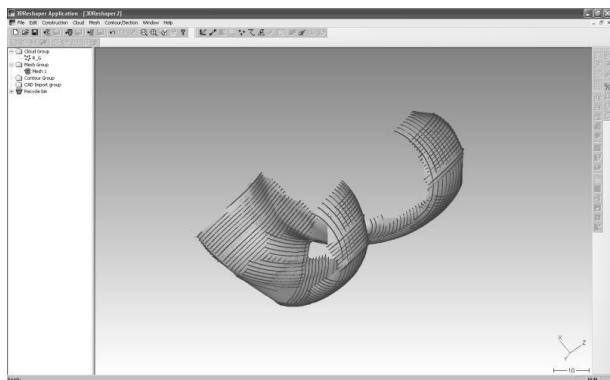
Współrzędnościowe maszyny pomiarowe

Podstawowym narzędziem współrzędnościowej techniki pomiarowej są maszyny pomiarowe, w których strukturze kinematycznej można wyróżnić trzy kinematyczne pary przesuwne we wzajemnie prostopadłych kierunkach (x, y, z w układzie kartezjańskim). Maszyny te mogą być również wykorzystywane w zastosowaniach biomedycznych, a ich dokładność jest najmocniejszym punktem takich pomiarów. Niektóre z nich (na przykład maszyna Leitz PMM 12106, której praktyczne zastosowania będą przedstawione w tym artykule) dają możliwość pomiaru obiektów z niepewnością niższą niż 1 μm . Możliwe jest również skanowanie powierzchni mierzonej za pomocą sondy skanującej.



Rys. 1. Pomiar przeprowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Leitz 12106
Fig. 1. Measurement of joint performed on Leitz 12106

Pomiar stawu kolanowego poprzez skanowanie wybranych powierzchni, przeprowadzono na Leitz 12106 PMM, której równanie niepewności wynosi: $U=0,8+L/400$ [μm]. Wyniki pomiarów następnie przeanalizowano w programie 3DReshaper. Wyniki otrzymane za pomocą WMP są najdokładniejsze biorąc pod uwagę wszystkie urządzenia przedstawione w tym artykule i dlatego też zostały one potraktowane jako wyniki odniesienia. Na rys. 2 zaprezentowane zostały wyniki pomiarów na WMP w postaci punktów kontrolnych i linii tworzących powierzchnie odniesienie modelu 3D kłycki kolana.



Rys. 2. Punkty pomiarowe uzyskane z pomiaru na WMP oraz model powierzchni kłycki kolana uzyskany z tych punktów.

Fig. 2. Measuring points performed on CMM and the surface of knee condyles

Współrzędnościowe Ramiona Pomiarowe

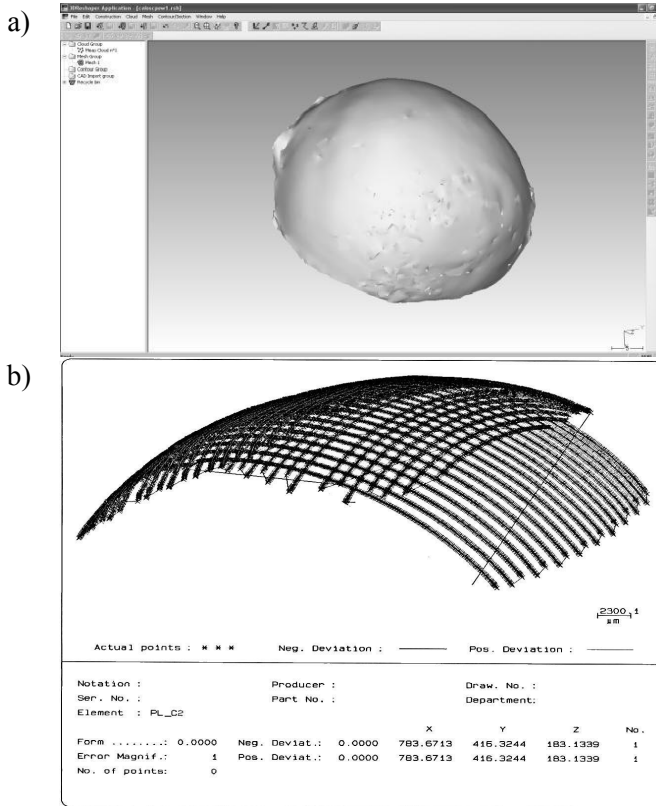
Współrzędnościowe Ramiona Pomiarowe są urządzeniami pomiarowymi wyposażonymi w kilka osi obrotowych (zwykle sześć), w każdej osi znajduje się enkoder mierzący kąt obrotu pary kinematycznej. Współrzędnościowe Ramiona Pomiarowe umożliwiają zarówno pomiary dotykowe, jak również pomiary optyczne (dzięki skanującym głowicom jak: G-SCAN lub RX2 Scan). Wyniki pomiarów stawu biodrowego wykonanych na WRP wyposażoną w głowicę RX2 Scan (rys. 3) porównano z innymi metodami.



Rys. 3. Pomiary wykonane na ramieniu Omega z pomocą skanującej głowicy RX2 Scan

Fig. 3. Measurements performed on Omega Arm with use of scanning head RX2 Scan

Przykładowe wyniki pomiarów stawu biodrowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. a) powierzchnia będąca wynikiem pomiarów na ramieniu Omega z wykorzystaniem głowicy skanin-gowej RX2 Scan, b) punkty uzyskane przez skanowanie na maszynie Leitz PMM 12106

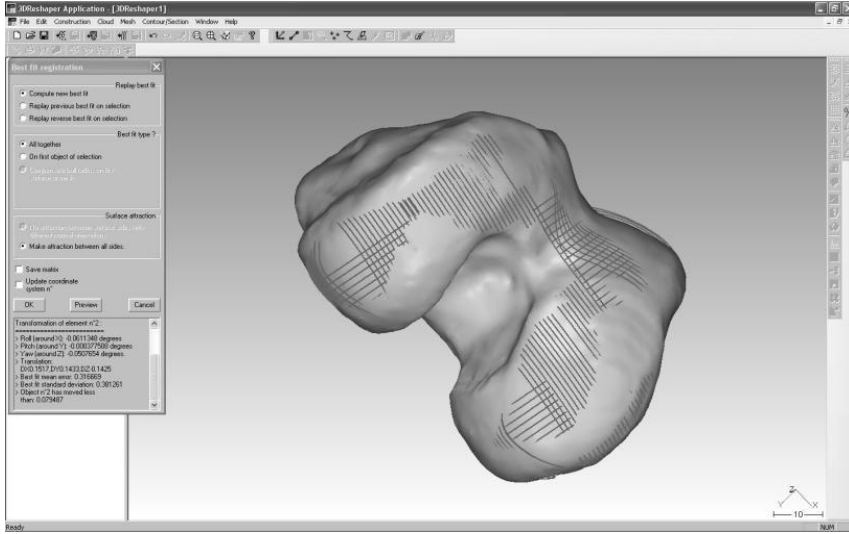
Fig. 4. a) surface being a result of measurements performed on Omega Arm with use of scanning head RX2 Scan, b) points obtained by scanning on Leitz PMM 12106 machine

Tomografia komputerowa

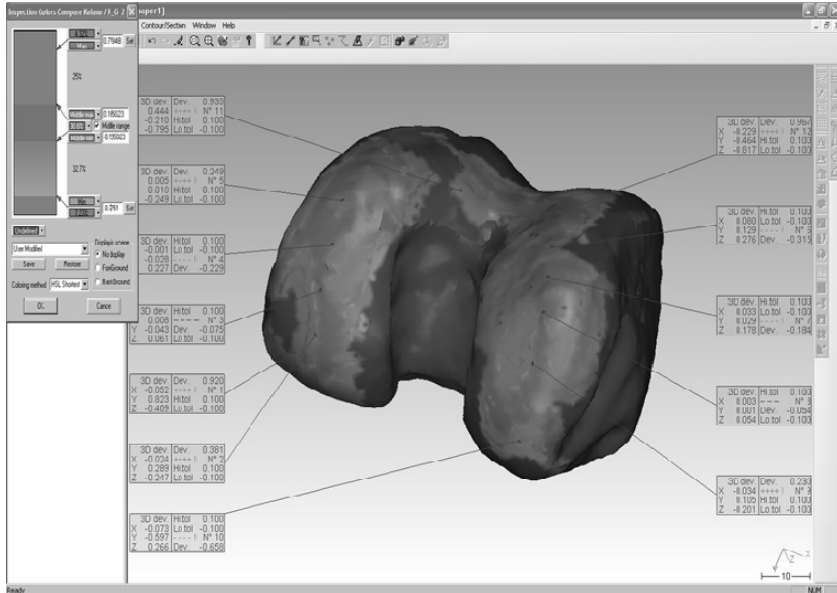
Tomografia komputerowa jest jedną z najnowszych technik diagnostycznych. Jest szczególnie ważna ze względu na coraz powszechniejsze jej zastosowanie w celach medycznych oraz przemysłowych. W obu z tych zastosowań tomografia komputerowa pozwala na kontrolę nie tylko parametrów geometrycznych przedmiotu, ale również umożliwia wniknięcie do wnętrza badanego obiektu i ocenę jego struktury wewnętrznej [1].

Z zastosowaniem TK dokonano pomiarów stawu kolanowego. Modele CAD kolana zostały wygenerowane za pomocą oprogramowania Amira i porównane z innymi metodami pomiarowymi omawianymi w artykule. Wyniki tego porównania przedstawione zostały na rys. 5 i rys.6.

Mapa odchylenia dokładności odwzorowania kształtu uzyskanego poprzez badania TK została przedstawiona na rysunku 6. Odchyłka dopasowania do powierzchni w 80% nie przekracza $\pm 0,5\text{mm}$. Maksymalne wartości (do $\pm 3\text{ mm}$) miały miejsce w obszarze skrzyżowania obu powierzchni kłykci i na czubkach kłykci.



Rys. 5. Staw kolonowy - nałożenie punktów pomiarowych z WMP na powierzchnię uzyskaną na podstawie pomiarów TK poprzez użycie metody "najlepszego dopasowania"
Fig. 5. Knee-joint - the imposition of measuring points from CMM on the surface obtained from measurements on CT using the 'best fit' method



Rys. 6. Staw kolonowy - mapy odchyleń odwzorowania kształtu jako porównanie nałożenia powierzchni uzyskanej w wyniku badania TK na powierzchnię referencyjną (otrzymaną poprzez pomiar na WMP)

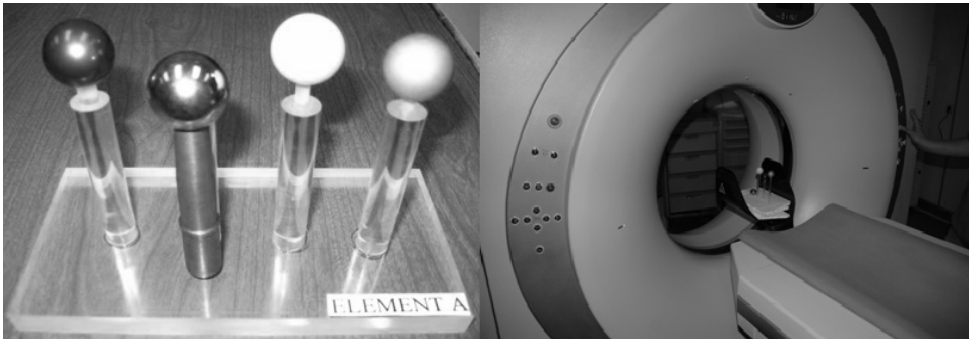
Fig. 6. Knee-joint – the map of deviations of shape mapping as the comparison of the imposition of the surface derived from the CT studies with the surface obtained from studies on CMM

DOKŁADNOŚĆ ODWZOROWANIA KSZTAŁTU

Problem oceny dokładności odwzorowania kształtu bioelementów, szczególnie chrząstek i tkanek kostnych i ich struktury wewnętrznej jest niezwykle ważny. Naukowcy starają się zgłębić ten problem od wielu lat w różnych dziedzinach. Najnowsze techniki odwzorowywania takie jak, spiralna tomografia komputerowa (STK) i rezonans magnetyczny (RM) częściowo rozwiązują ten problem, ale opis geometrii stwarza nadal wiele problemów. Techniki te nie umożliwiają, przy zachowaniu określonych przedziałów niepewności pomiaru, jednoczesnego wyznaczenia geometrii struktury kości i chrząstki w całym obszarze badań. Zagadnienie to jest szczególnie istotne dla oceny stopnia zaawansowania choroby zwyrodnieniowej stawów [2, 4]. Została zaproponowana nowa metoda oceny dokładności odwzorowania kształtu za pomocą wskaźników syntetycznych, która zostanie pokrótce przedstawiona poniżej.

Analiza dokładności odwzorowania kształtu za pomocą kulki ceramicznej

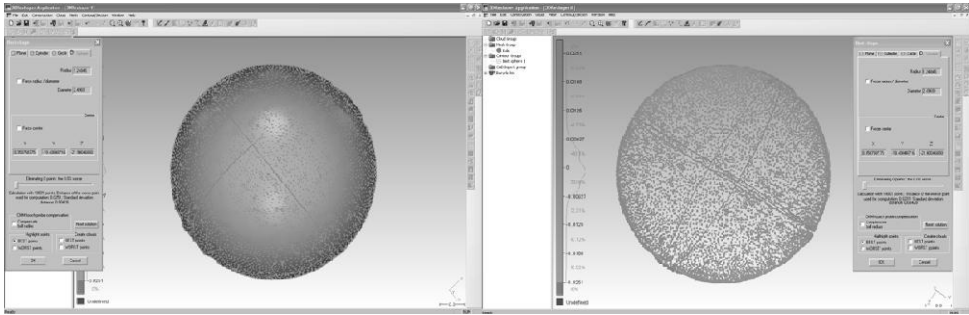
Analizę dokładności odwzorowania kształtu za pomocą tomografii komputerowej (CT) przeprowadzono dla dwóch przypadków: bazując na ceramicznej kulce referencyjnej (rys. 7) i naturalnym wzorcu - stawie kolanowym. Poniżej przedstawiono wyniki pierwszej z wymienionych wcześniej analiz.



Rys. 7. Referencyjne kulki odniesienia i ich badanie z użyciem tomografii komputerowej
Fig. 7. Reference balls and their test using computer tomography

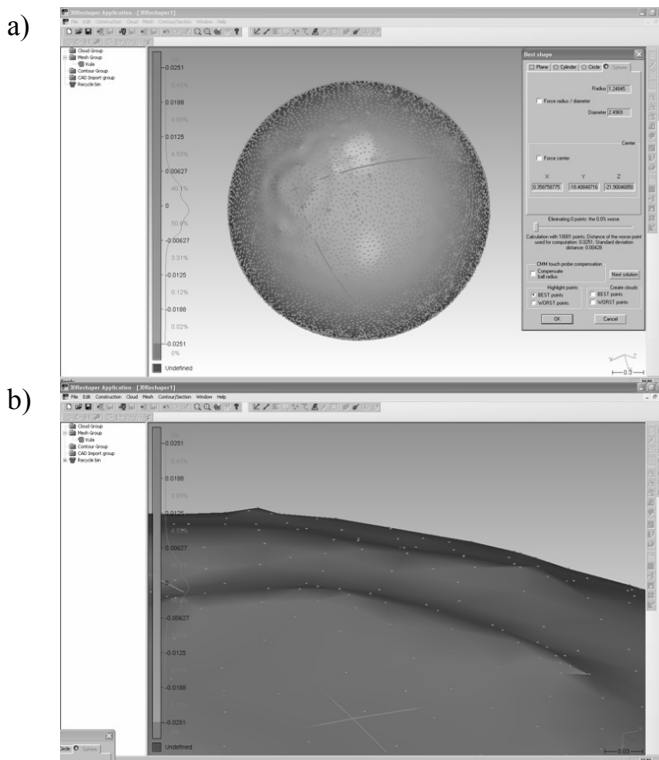
Strategia pomiarowa zawiera serię 3 cykli pomiarowych, a dla kulek ponadto dodatkowe pomiary w dwóch prostopadłych kierunkach. Pomiary były wykonywane na TK (rys. 7). Ocena dokładności odwzorowania kształtu kuli została przeprowadzona w oparciu o numeryczny wzorec sfery [4].

W przypadku pomiarów naturalnych artefaktów pomiary przeprowadzono na tomografie Siemens i na współrzędnościowej maszyny pomiarowej (WMP).



Rys. 8. Odchylenie odwzorowania powierzchni ceramicznych kulek referencyjnych wynikających z błędów pomiaru przeprowadzonych przy użyciu tomografii komputerowej w widoku bocznym i transparentnym.

Fig. 8. Mapping deviations of the surface of ceramic reference ball resulting from the errors of measurement performed on computer tomography in the side view and transparent view.



Rys. 9. a) Odchylenia odwzorowanie powierzchni ceramicznych kulek referencyjnych wynikających z błędów pomiaru promienia wykonywane na TK - widok w centrum polarnym TK, b) faliste powierzchnie modelu 3D w pobliżu bieguna CT.

Fig. 9. a) Mapping deviations of the surface of ceramic reference ball resulting from the errors of measurement of the radius performed on computer tomography - a view in the polar axis of CT, b) wavy surface on the 3D model in the vicinity of the pole CT

Do oceny dokładności odwzorowania stawu kolanego wykorzystano technikę TK, element odniesienia został opracowany na podstawie wyników pomiarów na WMP. Wyniki badań tomografii oraz analiza dokładności odwzorowania

kształtu opracowano za pomocą metody "najlepszego dopasowania" w programie 3D Reshaper. Wyniki pomiarów zostały przedstawione jako: odchylenia odwzorowania powierzchni ceramicznych kulek referencyjnych wynikających z błędów pomiaru przeprowadzonych z wykorzystaniem tomografii komputerowej (rys. 8), odchylenia odwzorowania powierzchni ceramicznych kulek odniesienia wynikające z błędów pomiarów promienia wykonane na tomografii komputerowej (rys. 9). Rysunek 9b przedstawia również falistą powierzchnię na modelu 3D, który został uzyskany w pobliżu bieguna tomografu komputerowego.

Badania pozwalają na stwierdzenie, że dla 90,7% wyników błąd pomiarowy promienia kuli przy użyciu TK znajduje się w zakresie $\pm 0,063\text{mm}$, a dla 98,5% mieści się w $\pm 0,125\text{mm}$. Odchylenie standardowe wynosi $0,0428\text{mm}$, a średnia wartość średnicy kuli 24.969mm .

WNIOSKI

Przedstawione wyniki pokazują, że rozwój technik współrzędnych pozwala na pomiary i analizę narządów ludzkich w bardziej komfortowy sposób. Dzięki narzędziom pomiarowym oraz nowoczesnym rozwiązaniom w zakresie oprogramowania możliwa jest analiza dokładności odwzorowania kształtu różnych bioelementów z wykorzystaniem różnych rodzajów technik. Najczęstszym odwzorowaniem elementów w medycynie jak do tej pory były i nadal są metody związane z zastosowaniem tomografu. Głównym powodem tej sytuacji jest to, że TK pozwala na pomiar obiektów w sposób bezinwazyjny, a także pozwala diagnozować wewnętrzne struktury mierzonych narządów.

Dlatego też dokładność odwzorowania kształtu przy wykorzystaniu TK jest tak ważna. Autorzy przedstawili sposób szacowania tej dokładności. Opracowany system pozwala na ocenę urządzeń opartych na TK i do określenia jakości całego urządzenia opartego na dominacji parametrów lub właściwości, w odniesieniu do ich funkcji albo według niektórych zespołów. Jednocześnie system ten może być użyty do porównania liczby urządzeń funkcjonalnie podobnych z punktu widzenia wybranych cech lub charakterystyk. Określenie wskaźników syntetycznych pozwala na wyznaczenie wpływu wybranych parametrów (geometrycznych lub kinematycznych) na analizowane cechy użytkowe. System ma budowę modułową, może współpracować z każdym urządzeniem pomiarowym wyposażonym w interfejs umożliwiający przesyłanie danych do komputerowej kontroli i oceny urządzenia.

PIŚMIENNICTWO

1. Cierniak R.: Computed Tomography. Algorithms of reconstruction, Warsaw 2005.
2. Flohr T. et al.: Performance evaluation of a 64 slice CT system with z-flying focal spot. Fortschr. Rbntgenstr 2004, 176 1803-1820.

3. Hofer M.: Teaching Manual of color duplex tomography, 2nd edition, Tieme, New York 2004.
4. Ryniewicz A.: Traceability needs for geometrical identification of form of biobearing working surface and defect of joint cartilage. Wydział ELSEVIER MEASUREMENT ISSN 0263-2241, vol. 42. nr 10, 2009, page 1463-1469, meas. nr 1198.

COMPARISON OF DIFFERENT METROLOGICAL DEVICES USED IN BIOMEDICAL APPLICATIONS

Summary

Thanks to the progress in examination of human body, it is possible to create new methods of diagnostics. To diagnose diseases properly, one should recognize the internal and external structure of organs, their geometrical parameters, width, height, etc. And this is a place, in which cooperation between coordinate metrology and medicine is the most strong. Metrological devices could be used in this area, in a variety of uses. Paper shows usage of Coordinate Measuring Machines (CMM) and Coordinate Measuring Arms (CMA) in determination of external structure, dimensions and shape of measured objects (part of bones and joints). Also use of Computed Tomographs (CT) in medical applications will be presented. Then the comparison of results of measurements performed on each device will be made. Apart from this, article puts attention on practical meaning of results obtained from CT measurements. Problem of the shape mapping and its accuracy will also be discussed.

Keywords: tomography, measuring arm, CMM.