

I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Odtworzenie geometrii kręgosłupa z wykorzystaniem tomografii komputerowej i optycznego skanera współrzędnościowego

Reconstruction of spine geometry using computed tomography and optical 3D scanner

MIROŚLAW GRZELKA
 MICHAŁ JAKUBOWICZ
 MARIUSZ GACA*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.563

Ideą badań prowadzonych w temacie zastosowania tomografii komputerowej medycznej jest odtworzenie geometrii kręgosłupa porównanie wyników pomiarów z pomiarami na optycznym skanerze współrzędnościowym. Modelem badań jest odcinek piersiowy kręgosłupa pochodzący od „świni”. W artykule przedstawiono metodykę i analizę dokładności odwzorowania charakterystycznych elementów geometrycznych kręgosłupa. Osiągnięte wyniki z dokładnością na poziomie $\pm 0,5$ mm są satysfakcjonujące dla lekarzy identyfikujących anomalie i stany patologiczne tkanek miękkich, układów pokarmowego, krwionośnego oraz narządów wewnętrznych. Dla złamań z przemieszczeniem dokładność pomiarów $\pm 0,5$ mm jest wystarczająca dla poprawnej identyfikacji urazu. Dalsze prace badawcze prowadzone są w kierunku możliwości identyfikacji mikropęknięć z zastosowaniem najnowszych metod pomiarowych i algorytmów obliczeniowych

SŁOWA KLUCZOWE: Optyczna współrzędnościowa technika pomiarów, tomografia komputerowa, badania geometrii kręgosłupa.

The idea of research in the subject of use computed tomography from medical application is to reconstruct the geometry of spine and comparison results with those from measurements on optical 3D scanner. The model is thoracic spine derived from the "pig". The paper presents research methodology and analysis of accuracy of the reconstruction characteristic geometric elements of the spine. Achieved results with an accuracy of ± 0.5 mm is satisfactory for physicians who identify anomalies and pathological conditions of soft tissues, alimentary system, circulatory system and

*dr inż. Mirosław Grzelka (miroslaw.grzelka@put.poznan.pl), mgr inż. Michał Jakubowicz (michal.jakubowicz@put.poznan.pl), Mariusz Gaca (mariuszgaca@wp.pl), Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechaniczne, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych

inner organs. For fractures with a displacement the accuracy of ± 0.5 mm is sufficient for correct identification of injury. Further research concerns on ability to identify micro-cracks using the latest measurement methods and algorithms.

KEYWORDS: Optical Coordinate Measuring System, Computer Tomography, geometrical measuring of spine.

Wstęp

Tomografia komputerowa stała się podstawowym narzędziem diagnostycznym i pomiarowym w nowoczesnej medycynie. Ciągły rozwój tej techniki zorientowany na minimalizację promieniowania i uzyskiwanie jak największej ilości danych determinuje innowacyjność w tworzonych rozwiązaniach technicznych. Zastosowanie systemów tomografii komputerowej tylko dla diagnostyki to epoka miniona. Dzień dzisiejszy stawia coraz to nowe możliwości zastosowania tej bezinwazyjnej techniki pomiarowej nie tylko w medycynie ale również w archeologii, budowie maszyn, metrologii, kryminalistyce czy sztuce [1, 2, 3].

Kręgosłup to niezbędny filar do zdrowia. Nie tylko trzyma nasze ciało, ale dzięki niemu chodzimy i trzymamy się w pionie [4]. Dlatego, gdy odbieramy niepokojące sygnały od kręgosłupa i jego okolic warto wybrać się do lekarza. Im szybsze zdiagnozowanie schorzeń to tym większa szansa na ich wyleczenie. Zmiany zwyrodnieniowe mogą być pierwotne i wtórne (w następstwie zmian zapalnych, urazowych, wrodzonych, zmian nowotworowych itp.). Zmiany znajdujące się w kręgach można z obrazować przy pomocy tomografu komputerowego i rezonansu magnetycznego, który jest jeszcze bardziej dokładny

Tomograf komputerowy TK

Tomograf komputerowy jest to urządzenie służące do badań obrazowania warstwy ciała ludzkiego, przy wykorzy-

staniu promieni rentgenowskich. Badanie tomografią komputerową polega na prześwietlaniu wybranego odcinka ciała wiązki promieni i pomiarze pochłaniania przez tkanki o różnej gęstości [5]. W celu uzyskania dokładniejszego obrazu stosuje się odpowiednie środki kontrastujące. Czas badania jest stosunkowo krótki, zależy od badanego narządu. Otrzymane zdjęcia posiadają różne odcienie szarości, co związane jest ze zjawiskiem osłabiania fal rentgenowskich przechodzących przez tkanki [2]. Aparaty tomografów znalazły również zastosowanie w przemyśle samochodowym. Służą one do prześwietlania pojedynczych podzespołów, ale również do całego nadwozia samochodowego. Promienie rentgena sprawdzają wykonanie: spawów, połączeń prasowanych, spawy laserowe oraz złącza zaciskane. Urządzenie to specjalnie jest skonstruowane dla przemysłu motoryzacyjnego. Niestety tylko jedna firma zdecydowała się na takie rozwiązanie, jest nią firma Audi w Neckarsulm [1, 3].

Optyczny skaner współrzędnościowy

Optyczny skaner 3D pozwala skanować przedmioty o wymiarach od kilku milimetrów aż do kilkudziesięciu metrów. Skaner optyczny wykorzystuje zasadę triangulacji polegającej na opisaniu skomplikowanych obiektów chmurą punktów i przekształcenie jej na siatkę trójkątów [6, 8]. Projektor głowicy wykonuje rzutowania sekwencji prążków na mierzony detal, a dwie kamery monitorują przebieg tych prążków. System z dużą dokładnością dokonuje obliczeń współrzędnych dla każdego piksela kamery. Wynikiem jednego pomiaru jest chmura punktów, a jej wielkość zależy od rozdzielczości kamery. Skanowanie 3D umożliwia szybkie i dokładne przemieszczenie do komputera trójwymiarowej geometrii przedmiotu fizycznego.

Kręgosłup

Urazy i uszkodzenia kręgosłupa są zaliczane do najcięższych obrażeń, które znajdują się w układzie kostnowązowym. Najwięcej obrażeń występuje w odcinku szyjnym kręgosłupa oraz w przejściu piersiowo-lędźwiowym. Stopień uszkodzeń zależy w największym stopniu od siły urazu i miejsca urazu. Zdeformowany kręgosłup może spowodować: wstrząs, uszkodzenie rdzenia kręgowego, urazy mózgu, zaburzyć prace narządów klatki piersiowej i jamy brzusznej [4].

Do urazów i uszkodzeń kręgosłupa zaliczamy: stłuczenia kręgosłupa, złamania trzonów łuków i wyrostków stawowych, złamania wyrostków poprzecznych i kolczystych, zwinięcia stawów międzykręgowych czy skręcenie stawów międzykręgowych z uszkodzeniem aparatu więzadłowego.



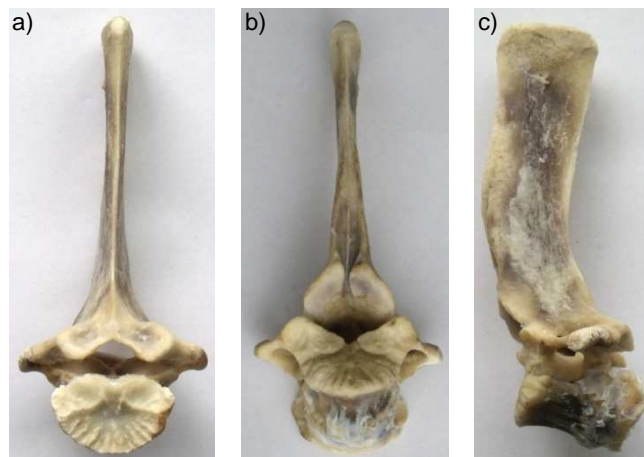
Rys. 1. Odcinek piersiowy kręgosłupa świni od strony lewej: 2 - trzon kręgu, 3 - wyrostek kolczysty, 4 - wyrostek poprzeczny, 5 - wyrostek poprzeczny z wyrostkiem suteczkowatym, 6 - wyrostek stawowy przedni z wyrostkiem suteczkowatym, 7 - dołek żebrowy przedni i wyrostka poprzecznego (połączone), 8 - dołek żebrowy przedni, 9 - dołek żebrowy tylni, 10 - otwór kręgowy boczny [4]

Część doświadczalna

■ Przedmiot badany – kręgosłup

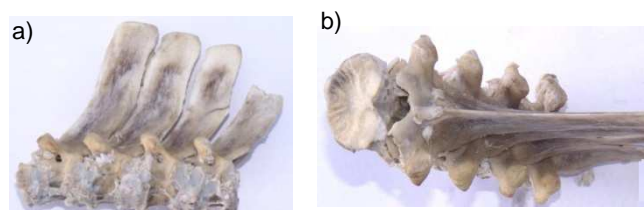
Przedmiotem badań jest kręgosłup pochodzenia zwierzęcego (część kręgosłupa świni). W celu zapobiegnięcia przed rozkładem części szkieletu zastał zanurzony w pojemniku z formaliną.

Pierwszy kręg odcinka piersiowego kręgosłupa świni posiada najdłuższy i najgrubszy wyrostek kolczysty. Pojedynczy badany element uwidacznia charakterystyczne elementy geometryczne kręgosłupa.



Rys. 2. Pierwszy kręg z dyskiem odcinka piersiowego kręgosłupa świni w widoku: a) z góry, b) z dołu, c) z boku

W zestawie, kręgi połączone są przy pomocy dysków. Na wszystkich stawach i trzonach kręgu znajduje się pozostałość po oczyszczeniu. Dwa kręgi są uszkodzone (rys. 3a). Jeden z nich ma nadpęknięcie wyrostka kolczystego, a drugi odłamany początek wyrostka kolczystego. Badana część kręgosłupa nie posiada rdzenia kręgowego. Dołek żebrowy pokryty jest chrząstką.



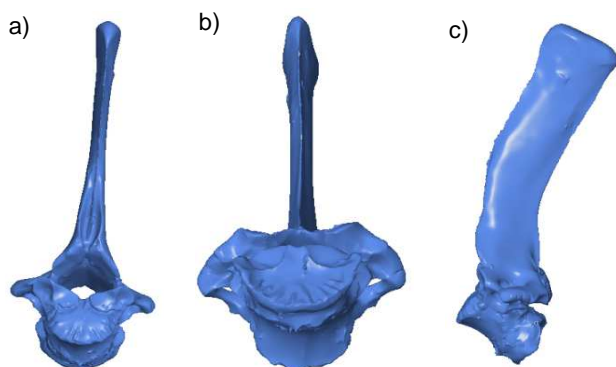
Rys. 3. Część kręgosłupa w widoku: a) w perspektywie, b) z góry

Wygenerowane końcowe modele 3D dwoma różnymi metodami są porównywane przy pomocy oprogramowania znajdującego się w optycznym skanerze pomiarowym 3D. Wyznaczone odchyłki geometryczne przedstawione są w postaci kolorowej mapy odchyłek.

■ Pomiar elementu optycznym skanerem współrzędnościowym

Do pomiaru optycznym skanerem współrzędnościowym poddano pojedynczy kręg połączony z dyskiem międzykręgowym. Geometria badanego przedmiotu jest bardzo skomplikowana.

Przed skanowaniem danego elementu należy przeprowadzić proces kalibracji systemu pomiarowego. Badany obiekt powinno się wyczyścić, a następnie nakleić znaczniki, które pełnią rolę punktów referencyjnych. Kolejne pojedyncze pomiary skanowanego przedmiotu uzupełniają budowę modelu 3D. Po przeprowadzeniu każdego kolejnego pomiaru, efektem jest chmura punktów sięgająca nawet kilku set tysięcy punktów. Zależy to od rozdzielczości kamery [6].



Rys. 4. Zeskanowany pierwszy kręgi z dyskiem odcinka piersiowego kręgosłupa świni w widoku: a) z dołu, b) z góry, c) z boku

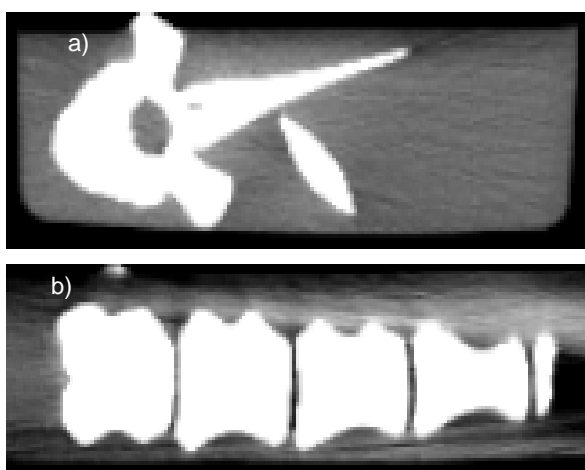
Model kręgu otrzymany z optycznego skanera współrzędnościowego posłuży jako model bazowy do dalszych badań. Oznacza to, że będzie uważany jako model odniesienia.

■ Opracowanie zdjęć z medycznego tomografu komputerowego

Obrazowanie kręgosłupa zostało wykonane na medycznym tomografie komputerowym udostępnionym przez firmę KIE Sp. z o.o. w Gnieźnie. Jest to tomograf komputerowy 16 rzędowy, co umożliwia podczas jednej projekcji lampy rentgenowskiej otrzymanie 16 warstw pomiarowych jednocześnie.

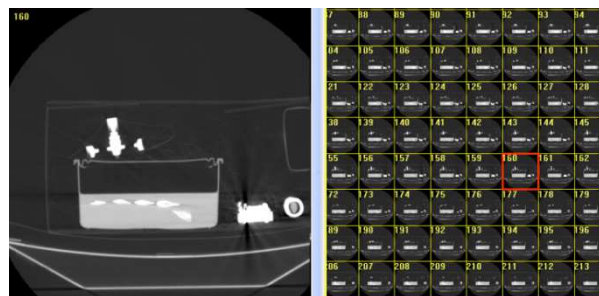
Na rysunku 5a przedstawiono przekrój pojedynczego kręgu. Otaczający go szary kolor, przedstawia obraz formality, w której został zanurzony.

Obraz z tomografu komputerowego (rys.5b) przedstawia przekroje poszczególnych trzonów kręgowych.

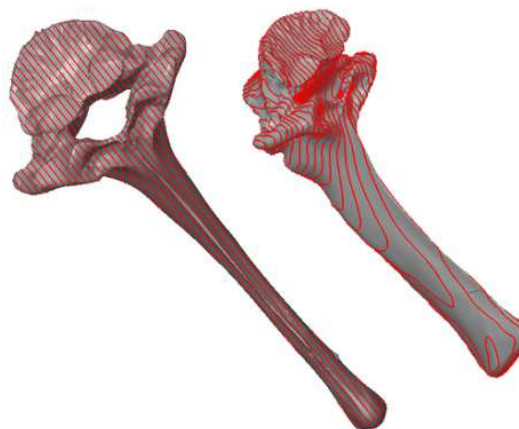


Rys. 5. Zdjęcie z medycznego tomografu komputerowego

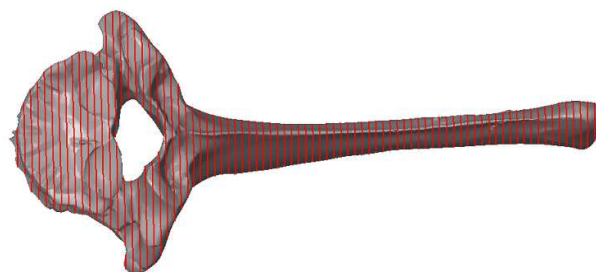
Wszystkie różne kolory i odcienie kolorów obserwowane na zdjęciach (rys.5a, 5b) wynikają z różnego pochłaniania promieniowania przez tkankę



Rys. 6. Zestawienie poszczególnych zdjęć z tomografu komputerowego



Rys. 7. Pokazany kierunek wykonywania zdjęć (prześwietleń) w płaszczyźnie równoległej do osi wyrostka kolczystego i jednocześnie równoległej do osi kręgosłupa

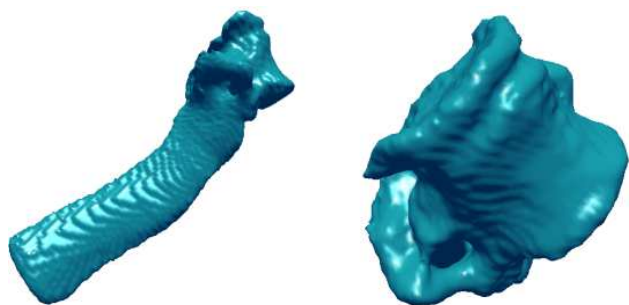


Rys. 8. Pokazany kierunek wykonywania zdjęć (prześwietleń) w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego

■ Kręgosłup 3D

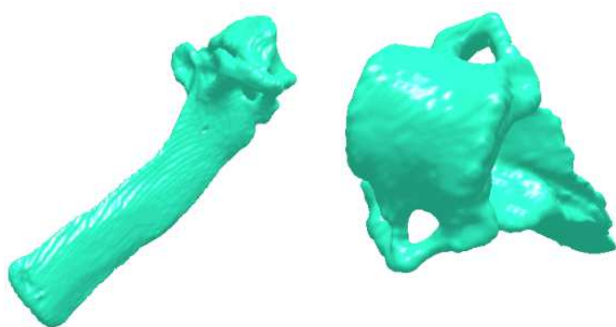
Obrazy 2D, które przy najbardziej optymalnym sposobie muszą być zespolone w bryłę 3D. Otrzymana struktura warstwowa początkowego modelu 3D jest podstawowym źródłem odchyłek geometrycznych. Dla tak skomplikowanego kształtu jakim jest kręgosłup duży wpływ na dokładność odtwarzania geometrii mają: odległość poszczególnych zdjęć, wielkość pojedynczego piksela oraz ostrość zarysu uzależniona od gęstości tkanki [6]. Trzeba pamiętać aby uzyskane obrazy z tomografu były w skali 1:1.

Odwzorowanie kręgu przy pomocy tomografu wykonano z wykorzystaniem zdjęć (rys. 7) zrobionych w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego przedstawiono na rysunku 8.

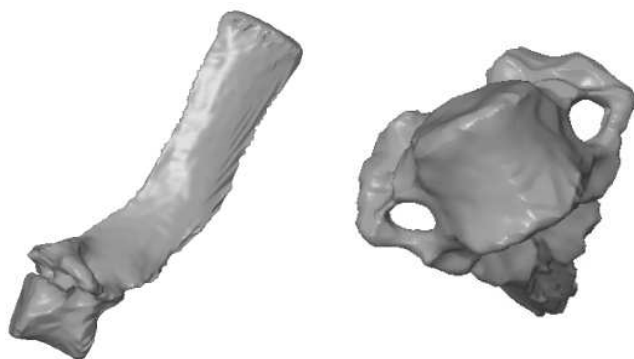


Rys. 9. Zrekonstruowany pierwszy kręgi z dyskiem z odcinka pierśowego kręgosłupa świni – na podstawie zdjęć z tomografu wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego

Na rysunku 10 przedstawiono wstępne modele. Zostały one utworzone z obrazów wykonanych prostopadłe do osi wyrostka kolczystego.



Rys. 10. Odtworzony kręgi kręgosłupa z obrazów z tomografu (zdjęcia wykonane w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego)



Rys. 11. Wygładzony kręgi (na podstawie zdjęć tomograficznych wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego)

Kolejnym krokiem w procesie generowania modeli 3D jest modyfikacja powierzchni 3D. Oprogramowanie pomiarowe skanera współrzędnościowego umożliwiło wygładzanie powierzchni 3D. Opracowany model poddany jest procesowi poligonizacji. Po modyfikacji powierzchni 3D kręgi nie widać karbów (schodków). Gładzenie powierzchni bryły z modelowania warstwowego wykorzystuje tolerancje uśrednioną.

Wyniki badań i ich omówienie

■ Zestawienie i omówienie wyników badań

W celu sprawdzenia dokładności odtworzenia kręgosłupa wykonano kilka serii porównań modeli powstałych z optycznego skanera współrzędnościowego i tomografu komputerowego. Do tego wykorzystano program znajdujący się w wyposażeniu optycznego skanera pomiarowego 3D. Wyniki porównań (odchyłki geometryczne) dwóch brył przedstawione są w postaci mapy odchyłek.

■ Porównanie geometrii modelu 3D uzyskanego z tomografu komputerowego z modelem ze skanera współrzędnościowego

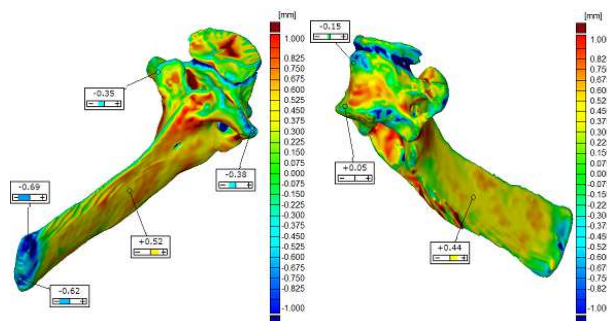
W każdym z porównań, obiektem referencyjnym jest model uzyskany z optycznego skanera pomiarowego 3D. Na rysunkach 11, 12, 13 i 14 wybrano kilka punktów charakterystycznych dla przedstawienia odchyłek geometrii kręgi.

Powierzchnia szara występująca na trzonie kręgi w części górnej (rys. 12, 14) oznacza brak danych. Spowodowane jest tym, że model pochodzący referencyjny posiadał element kręgi z dyskiem. Dlatego dla celów porównawczych takiego zestawienia odcinana jest warstwa związana z obecnością dysku i początek górnej warstwy trzonu kręgowego.

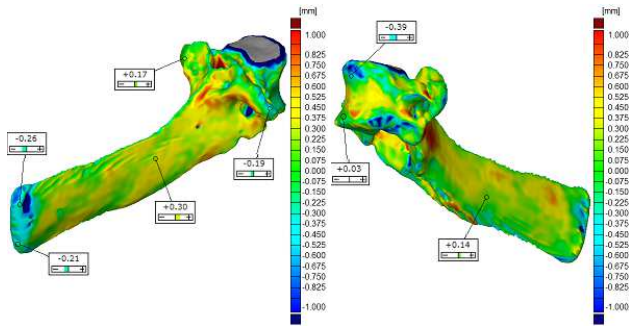
Modele kręgi z dyskiem międzykręgowym (rys.11, 13) zdecydowanie gorzej został odtworzony, niż kształt sam model kręgi. Spowodowane jest to tym, że podczas tworzenia zarysu konturu na obrazie 2D trzeba uwzględnić inne odcienie kolorów związanych z gęstością różnych materiałów. Sprężysta międzykręgowych chrząstka posiada dużo mniejszą gęstość od kości kręgosłupa. Dlatego należy wybrać uśrednioną wartość zakresu gęstości, tak aby był widoczny zarys dwóch elementów.

Porównując opracowane modele 3D ze zdjęć z tomografu (badanie tomografu przeprowadzono w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego) model kręgi bez dysku przedstawiony na rysunku 12 posiada co najmniej dwa razy mniejsze odchyłki niż model kręgi z dyskiem znajdujący się na rysunku 11.

Do analizy odchyłek modeli (rys.11, 12) wykorzystano modele wygenerowane ze zdjęć z tomografu, wykonane w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego.



Rys.11. Mapa odchyłek odtworzenia geometrii kręgi z dyskiem (do utworzenia modelu wykorzystano obrazy z tomografu zrobione w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego)



Rys.12. Mapa odchyłek odwzorzenia geometrii kręgu (do utworzenia modelu wykorzystano obrazy z tomografu zrobione w płaszczyźnie prostopadłej do osi wyrostka kolczystego)

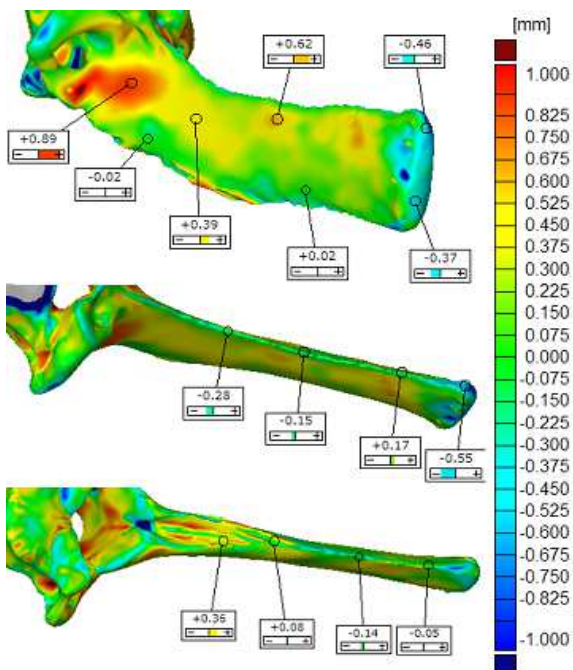
■ Dokładność odwzorowania charakterystycznych elementów geometrycznych kręgosłupa

Dokładność odwzorowania wyrostka kolczystego kręgu nie przekracza 0,5 mm. Najlepiej odwzorzony został „grzbiet” wyrostka kolczystego, gdzie dokładność oscyluje na granicy 0,4 mm.

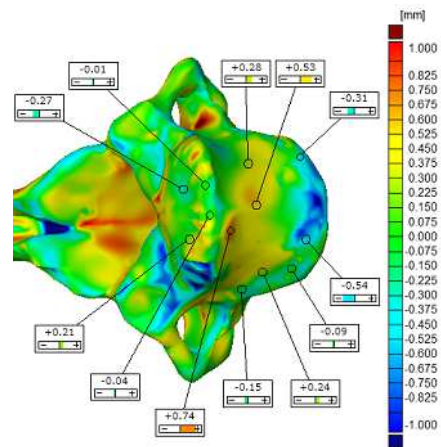
Podobnie jest z odwzorowaniem trzonu kręgowego, którego dokładność nie przekracza zakresu +/-0,5 mm. Zdecydowanie lepiej odwzorzona jest dolna powierzchnia trzonu kręgowego od powierzchni bocznej.

Dla powierzchni wyrostka poprzecznego dokładność mieści się na poziomie 0,4 mm. Znacznie gorzej jest dla otworu kręgowego i tam dokładność jest na poziomie 0,7 mm.

Nie można zapomnieć o występujących ekstremach w postaci punktów lub bardzo małych obszarów. Wynika to z istniejących szumów na zdjęciach 2D z tomografu, które należało dokładnie odfiltrować w procesie opracowywania modeli 3D.



Rys.4.7. Mapa odchyłek geometrycznych dla wyrostka kolczystego kręgu



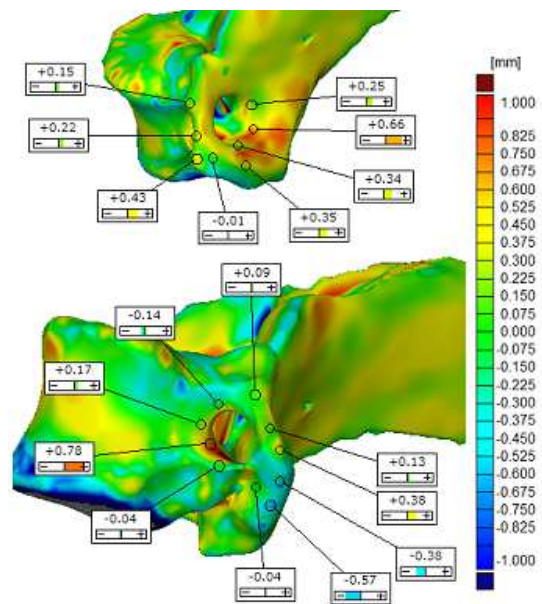
Rys.4.8. Mapa odchyłek geometrycznych dla trzonu kręgowego

Podsumowanie i wnioski końcowe

Odtworzenie geometrii kręgosłupa jest bardzo trudne. Każdy kręgosłupa posiada inne wymiary charakterystycznych elementów geometrycznych. Znajduje się tam duża ilość łuków i powierzchni swobodnych o różnej wielkości a przekrój takiego kręgu (w zależności od kierunku) jest mały.

Obrazy uzyskiwane z tomografu komputerowego wykonywane są w różnej skali. Otrzymane zdjęcia są analizowane przez lekarzy w znacznym powiększeniu. Często o przydatności badania decyduje dokładność odwzorowania kształtu oraz czytelność zdjęcia, ponieważ chirurg podczas operacji (zabiegu) musi być pewny jak wygląda dany uraz, guz, krwiak itd.

Dokładność odwzorowania elementu geometrycznego kręgosłupa jest na poziomie +/-0,5 mm. Analiza odwzorowania powierzchni charakterystycznych niektórych elementów kręgu jest na poziomie +/-0,4 mm. Dla lekarzy osiągnięcie takiej dokładności jest wystarczające.



Rys.4.9. Mapa odchyłek geometrycznych dla otworu kręgowego boczno i wyrostka poprzecznego kręgu

Osiągnięte wyniki z taką precyzją są satysfakcjonujące dla lekarzy identyfikujących anomalie i stany patologiczne tkanek miękkich, układu pokarmowego, krwionośnego oraz

narządów wewnętrznych. Dla złamań z przemieszczeniem dokładność wykonania modelu na poziomie $\pm 0,5$ mm jest wystarczająca dla poprawnej identyfikacji urazu. Natomiast taka dokładność jest zbyt mała aby poprawnie zidentyfikować pęknięcie kości, mikropęknięcie lub złamanie bez przemieszczeń. Ponieważ podczas procesu tworzenia modelu 3D taki uraz może być wygładzony [7].

Wdrożenie do medycyny tomografów komputerowych znacznie pomogło zwiększyć jakość diagnozowania pacjenta. Z reguły tomografia odtwarzała miejsce i rodzaj urazu kręgosłupa przed operacją. Dopiero po wprowadzeniu polimerowych implantów kręgosłupa można było obserwować proces łączenia się kości z implantem. Przy pomocy takiej metody obrazowania można przed operacją wykonać gotowy implant (m. in. koszyk, sztuczny dysk, czopy międzytrzonowe).

Zachowanie w takim zakresie dokładności odwzorowania części kręgosłupa w wykonaniu wirtualnego modelu 3D lub prototypu, umożliwi postępowanie w poszukiwaniu nowych rozwiązań implantów. Posiadając modele kręgów 3D jesteśmy w stanie projektować nowe rozwiązania mocowań elementów protez w kości kręgosłupa.

Proces odtworzenia dowolnej powierzchni bryły wymaga skomplikowanych algorytmów, oprogramowania i sprzętu pomiarowego. Do tego rodzaju działań, badań i analiz stosuje się tomograf komputerowy wspierany współrzędnociową techniką pomiarową, gdzie z określoną dokładnością można dokonywać analizy elementów geometrycznych. Główną zaletą połączenia tych metod jest ich bezinwazyjność [7].

Rozważając otrzymane wyniki można stwierdzić, że na dokładność odtworzenia samego kręgu mały wpływ w jakiej płaszczyźnie (do osi wyrostka kolczystego) zostanie przeprowadzone badanie tomografii komputerowej. Należy tylko pamiętać, że nie wolno tworzyć w jednej operacji modelu 3D, składający się z różnych gęstości materiału. Powodować to będzie duże odchyłki w stosunku do modelu wyjściowego.

LITERATURA

1. Bucher L. J. (editor): "The Metrology Handbook, Second Edition", ASQ 2012, ISBN 978-0-8738-6.
2. Christoph R., Neumann H.J.: "X-ray Tomography in Industrial Metrology, Precise, Economical and Universal". Verlag Moderne Industrie 2011, ISBN 978-3-86236-020-8.
3. Ratajczyk E.: „Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych, Cz. I. Idea pomiarów, główne zespoły i ich funkcje”. Mechanik nr 2, 2011, 112-117.
4. Popesko P., „ATLAS anatomii topograficznej zwierząt domowych”, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1983.
5. Ratajczak R., „Tomografia komputerowa, Budowa urządzeń CT, Algorytmy rekonstrukcyjne”, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2005.
6. Grzelka M., Trafarski A., „Metrologiczna analiza dokładności odtworzenia kształtu badanego elementu nieinwazyjną metodą tomografii komputerowej z wykorzystaniem współrzędnościowych pomiarów optycznych”, IX Sympozjum „Modelowanie i Pomiary w Medycynie” MPM'2009, Krynica 10-14 maja 2009r
7. Kruth J-P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann A.: "Computed tomography for dimensional metrology, keynote paper". CIRP Annals 61/2, 2011.
8. Gapinski B., Wieczorowski M., Marciniak-Podsadna L., Dybala B., Ziolkowski G.: "Comparison of Different Method of Measurement Geometry using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D". Procedia Engineering 69, 2014, 255 – 262.

9. Gapinski B., Zachwiej I., Kołodziej A. "Comparison of different coordinate measuring devices for part geometry control". Digital Industrial Radiology and Computed Tomography 22-25 June 2015, Belgium, Ghent - www.ndt.net/app.DIR2015.