

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



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Rekonstrukcja szkieletu człowieka przy użyciu metod Inżynierii Odwrotnej oraz technik Rapid Prototyping

Reconstruction of a human skeleton using Reverse Engineering and Rapid Prototyping

MIROŚLAW GRZELKA
 GRZEGORZ BUDZIK
 MICHAŁ WIECZOROWSKI
 MICHAŁ JAKUBOWICZ
 LIDIA MARCINIĄK-PODSADNA
 BARTOSZ GAPIŃSKI
 KRZYSZTOF ŚREMSKI*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.562

W artykule zaprezentowano koncepcję procesu rekonstrukcji modeli szkieletu człowieka przy użyciu metod Inżynierii Odwrotnej oraz technik Rapid Prototyping (RP) ze szczególnym uwzględnieniem analizy dokładności odtworzenia geometrii na podstawie optycznych pomiarów współrzędnościowych. Opisano modele badawcze oraz metodykę wykonywania pomiarów. Podstawowymi celami prowadzonych badań było określenie dokładności z jaką odtworzony zostanie model elementu szkieletu człowieka oraz stwierdzenie czy uzyskana dokładność pozwala na stosowanie metody w praktyce medycznej. W badaniach użyto medycznego tomografu komputerowego. Zastosowanie tomografii komputerowej w procesie inżynierii odwrotnej jest rozwiązaniem nowatorskim, dlatego podjęta została próba określenia dokładności odtworzenia modelu tą techniką.

SŁOWA KLUCZOWE: Inżynieria odwrotna, Rapid Prototyping, optyczna współrzędnościowa technika pomiarowa, szkielet człowieka.

The paper presents concept of the reconstruction process of the human skeleton models using Reverse Engineering and Rapid Prototyping (RP), with particular focus on analysis of the geometry reconstruction accuracy based on measurement

*dr inż. Mirosław Grzelka (miroslaw.grzelka@put.poznan.pl), Grzegorz Budzik (gbudzik@prz.edu.pl), prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski (michal.wieczorowski@put.poznan.pl), mgr inż. Michał Jakubowicz (michal.jakubowicz@put.poznan.pl), dr inż. Lidia Marciniak-Podsadna (lidia.marciniakpodsadna@gmail.com), dr inż. Bartosz Gapiński (Bartosz.gapinski@put.poznan.pl) Krzysztof Śremski (krzysztof.sremski@o2.pl)

on tools of optical measuring technique. The research models and methodology of measurement are described. There are two main objectives of research, one is to determine the accuracy of reconstruction particular piece of human body skeleton, the second one is to specify if determined accuracy allow to use this method in medical practice. Medical CT was applied in the study. The use of computed tomography in the process of reverse engineering is an innovative solution, therefore an attempt to determine the accuracy of a model reconstruction with the technique was made.

KEYWORDS: Reverse Engineering, Optical Coordinate Technique, human skeleton models.

Wstęp

Inżynieria Odwrotna jest dziedziną nauki i techniki która w ostatnich latach znacznie zyskała na popularności. Atrakcyjność tej metodyki wzrosła na skutek szybkiego rozwoju technik komputerowych, systemów CAD [2], Rapid Prototyping oraz współrzędnościowych systemów pomiarowych. Dzięki metodom Inżynierii Wstecznej możliwe jest uzyskanie wirtualnych modeli obiektów fizycznych, przeprowadzenie ich modelowania oraz sporządzenie odpowiedniej dokumentacji technicznej. Korzystanie z narzędzi Inżynierii Odwrotnej znacznie zmienia tradycyjny proces projektowania konstruowania dając nowe, ogromne możliwości. Potencjał drzemący w technikach tej metody sprawił że jest ona obecnie szeroko stosowanym narzędziem w przemyśle, motoryzacji, informatyce, przemyśle zbrojeniowym, medycynie, sztuce i wzornictwie [8, 16, 17].

Innowacją wśród technik wytwarzania, której rozwój związany jest z Inżynierią Wsteczną są techniki Rapid Prototyping zwane również Technikiami Szybkiego Prototypowania. Systemy wytwarzania RP bazują na zasadzie wytwarzanie modelu warstwa po warstwie. Do ich głównych zalet zalicza się wysoką szybkość wytwarzania, dostępną szeroką gamę materiałów oraz niewielki koszt wytworzenia modelu. Głównie dzięki tym zaletom systemy szybkiego prototypowania są coraz częściej stosowane w procesach projektowania, przygotowania produkcji oraz wytwarzania. Wykorzystanie technik Rapid Prototyping znacznie redukuje koszty i skraca czas przygotowania prototypów czy procesu wytwarzania czy wyprodukowania gotowego wyrobu w stosunku do metod konwencjonalnych [1, 10, 11, 12],

W ostatnich latach w kręgach techników oraz inżynierów zauważalne stało się rosnące zainteresowanie tematyką biologiczną oraz medyczną. Coraz częściej rozwiązania stosowane w przemyśle adaptowane są z powodzeniem w medycynie. W chirurgii oraz transplantologii bardzo często zachodzi potrzeba zastąpienia lub uzupełnienia braków kostnych szkieletu człowieka materiałami zastępczymi. Głównym problemem tego typu działań jest odpowiednie przygotowanie i dopasowanie elementów wszczepianych [6]. Aby usprawnić ten proces koniecznym jest opracowanie specjalnej metodologii pozwalającej na zastąpienie elementów układu kostnego człowieka, znajdujących się wewnątrz ciała, przy użyciu metod Inżynierii Odwrotnej oraz techniki Rapid Prototyping. Podstawowymi celami prowadzonych badań jest określenie dokładności z jaką odtworzony zostanie model elementu szkieletu człowieka oraz stwierdzenie czy uzyskana dokładność pozwala na stosowanie metody w praktyce medycznej. Podstawą prowadzonych badań jest zastosowanie systemu optycznej techniki współrzędnościowej jako narzędzia inżynierii odwrotnej oraz narzędzia do wyznaczenia odchyłek. W toku prowadzonych badań wykorzystany został medyczny tomograf komputerowy jako system pomiarowy służący do pozyskania geometrii kośćca. Zastosowanie tomografii komputerowej w procesie inżynierii wstecznej jest rozwiązaniem nowatorskim, dlatego podjęta została próba określenia dokładności odtworzenia modelu tą techniką.

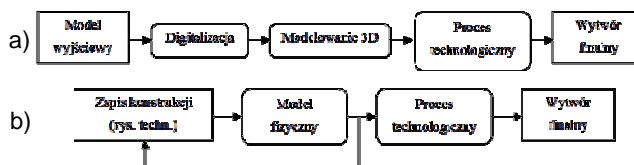
Zaproponowana metodyka odtworzenia elementów szkieletu człowieka przy osiągnięciu odpowiedniej dokładności może pozwolić na usprawnienie procesów wszczepiania implantów kostnych poprzez szybkie przygotowanie modeli wytworzonych w technice Rapid Prototyping. Szybkie i dokładne przygotowanie implantów może przyspieszyć proces leczenia lub nawet uratować życie.

Inżynieria odwrotna

W praktyce inżynierskiej często spotyka się sytuacje, gdzie zachodzi konieczność wykonania części zamiennej lub kopii pewnego elementu, które nie posiadają dokumentacji technicznej. W przypadkach takich, stosuje się metody inżynierii odwrotnej (wstecznej). Inżynierią odwrotną nazywamy proces w którym model fizyczny odtwarzanego obiektu jest elementem wyjściowym do realizacji procesu konstrukcyjnego. Tego typu podejście znacznie różni się od klasycznej metody konstruowania, gdzie elementem wyjściowym jest rysunek techniczny. Stosowanie inżynierii wstecznej wymaga wykorzystania szeregu różnego rodzaju technik pomiarowych, zaawansowanych programów CAD oraz CAx, technik komputerowych, technologii i oprogramowań inspekcyjnych oraz bardzo często maszyn CNC i metod Rapid Prototyping [16].

W procesie inżynierii odwrotnej wyróżnia się trzy podstawowe etapy [12] (rys. 1):

- Etap I - Digitalizacja,
- Etap II - Modelowanie 3D,
- Etap III - Wytwarzanie (proces technologiczny).



Rys. 1. Proces wytwarzania a) inżynieria odwrotna b) proces klasyczny

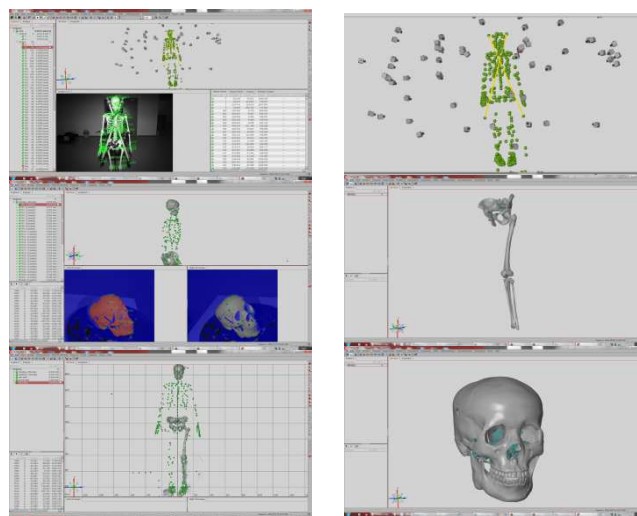
Elementem wyjściowym w procesie wytwarzania z użyciem inżynierii odwrotnej jest fizyczny model obiektu. Model ten na samym początku musi zostać poddany digitalizacji czyli zamianie jego fizycznej postaci na postać cyfrową. Celem tego procesu jest otrzymanie wirtualnego obrazu geometrii badanego obiektu, umożliwiającego jego edycję i przetwarzanie. Dane pomiarowe służące do zbudowania wirtualnego modelu można pozyskać kilkoma metodami do których między innymi należą: metody bezstykowe (skanery optyczne i laserowe, skanery fotogrametryczne, tomografy komputerowe, optyczne maszyny krawędziowe), oraz stykowe (współrzędnościowe maszyny pomiarowe, ramiona pomiarowe, obrabiarki sterowane numerycznie wyposażone w odpowiednie narzędzia pomiarowe) [9, 10, 11].

Metodyka badań

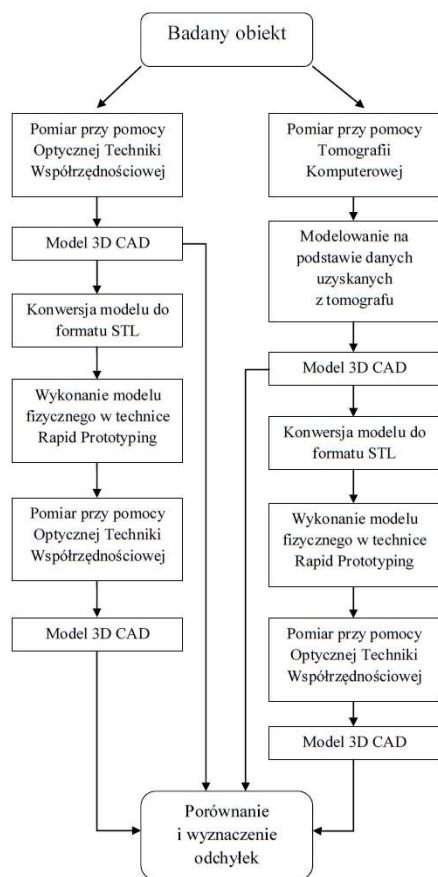
■ Schemat przeprowadzanych badań

Celem przeprowadzanych badań było wyznaczenie dokładności z jaką można odtworzyć elementy szkieletu człowieka (rys. 2., rys. 3.) na podstawie danych uzyskanych przy pomocy medycznego tomografu komputerowego [3, 10, 13, 14, 15], oraz dokładności odtworzenia modelu elementu szkieletu człowieka w technice Rapid Prototyping. W badaniach użyty został optyczny współrzędnościowy system pomiarowy w celu wykonania modeli referencyjnych [4].

Punktem początkowym badań był obiekt, który jest elementem układu kostno-szkieletowego człowieka.



Rys. 2. Pomiary szkieletu człowieka optycznym systemem fotogrametrycznym na podstawie, którego przeprowadzono pomiary geometrii skanerem współrzędnościowym



Rys. 3. Schemat prowadzonych badań

■ Obiekt badań

Obiektem przyjętym do wykonania badań jest czaszka szkieletu człowieka pochodząca ze szkieletu służącego do dydaktyki szkolnej (rys. 4).



Rys. 4. Obiekt użyty w pomiarach

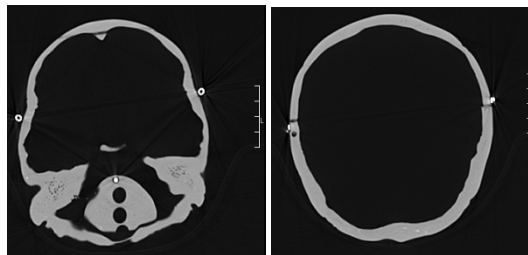
Czaszka człowieka jest jednym z najważniejszych zespołów kostnych w układzie szkieletu człowieka. Podstawowymi jej funkcjami są: ochrona mózgu, ochrona narządów zmysłu, oraz początkowych odcinków układu pokarmowego i oddechowego. Czaszkę człowieka można podzielić na dwie podstawowe części: mózgowiczaszkę oraz trzewioczaszkę. Mózgowiczaszka ma kształt kulisty i usytuowana jest nad twarzoczaszką. Zbudowana jest z płaskich kości w kształcie płytek. Twarzoczaszka zbudowana jest z kości o zróżnicowanym kształcie. Tworzą one głównie obudowę oczodołów, jamy ustnej oraz jamy nosowej. Cała czaszka zbudowana jest z 29 kości, 7 z nich tworzy mózgowiczaszkę natomiast 22 pozostałe twarzoczaszkę. Jedynymi ruchomymi kośćmi wchodzącymi w skład czaszki są kości nieparzyste czyli żuchwa wraz z zębami oraz kość gnykowa. Nieruchome kości czaszki połączone są ze sobą za pomocą szwów.

Modele do badań wydrukowane zostały na systemie Rapid Prototyping uPrint firmy Dimension. Zdjęcia wydrukowanego modelu zamieszczono na rys. 5. Po wydrukowaniu modelu w technice FDM, został on przygotowany do pomiaru skanerem optycznym. Po wykonaniu digitalizacji modelu FDM, w pamięci komputera zapisany został model, gotowy do porównania z pozostałymi modelami.

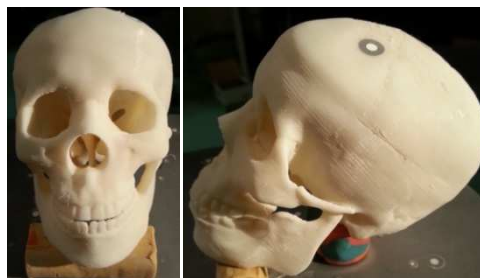


Rys. 5. Model czaszki wydrukowany w technice FDM na podstawie pomiarów skanerem optycznym

Drugi model czaszki opracowany został przy wykorzystaniu medycznego tomografu komputerowego SIEMENS Somatom Emotion 6. Zdjęcia tomograficzne (rys. 6) wykonane zostały przy najmniejszej możliwej grubości warstwy wynoszącej 0,63mm, w celu zebrania jak największej ilości danych, z których został opracowany model badanego obiektu (rys.7).



Rys.6. Wybrane warstwy badanego obiektu pochodzące z badania tomograficznego

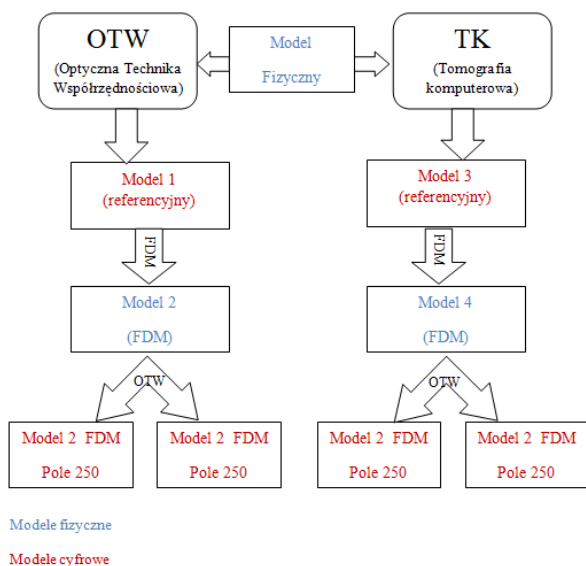


Rys. 7. Model czaszki zbudowany na podstawie zdjęć TK, wytworzony techniką FDM - widok z przodu i z tyłu

■ Porównanie modeli

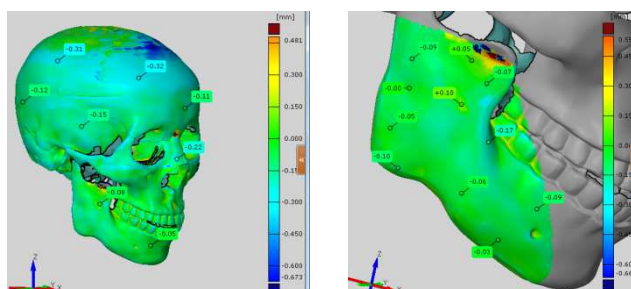
W trakcie przeprowadzania badań powstaną dwa modele fizyczne badanego obiektu, oraz kilka modeli wirtualnych. Modele wirtualne (cyfrowe) powstają na kilku etapach badań. Pierwsze dwa modele, to modele referencyjne utworzone przy pomocy skanera optycznego (model wiernie reprezentujący obiekt wyjściowy OTW) oraz tomografu komputerowego (TK) (rys. 8). Te dwa modele porównane zostaną w celu sprawdzenia odchyłek jakie powstają w trakcie rekonstrukcji danych z tomografu. Na podstawie tych modeli wydrukowano modele fizyczne, które następnie zmierzone zostały przy pomocy optycznej techniki współrzędnościowej.

Kolejnym porównaniem będzie sprawdzenie wszystkich czterech modeli końcowych wraz z modelami referencyjnymi, co pozwoli wyznaczenie odchyłek jakie wprowadza technika szybkiego prototypowania.



Rys. 8. Schemat powstawania modeli w trakcie badań

Metodyka wykonania porównania



Rys. 9. Okno projektu z wygenerowaną mapą odchyłek oraz naniesionymi punktami kontrolnymi

Rys.10. Lokalne wyznaczenie odchyłek

Wyświetlanie mapy odchyłek dla modelu pozycjonowanego całościowo daje ogólny pogląd na wartości odchyłek dla całego modelu i dla określonego elementu modelu odchyłka ta może mieć całkowicie inną wartość, dlatego w przypadku sprawdzenia odchyłki dla określonego obszaru lub elementu należy wykonać porównanie lokalne. Aby tego dokonać należy zaznaczyć pożądany obszar elementu i następnie dla danego zaznaczenia wykonać pozycjonowanie metodą „Best fit”. Po wykonaniu tego polecenia model ustawi się odpowiednio. Kolejnym krokiem jest ponowne zaznaczenie tego obszaru i dalej wyznaczenie jego odchyłek oraz wskazanie punktów inspekcyjnych (Rys. 10). W ten sposób wyznaczmy odchyłki dla określonego obszaru [2, 7, 18, 19].

Wyniki badań

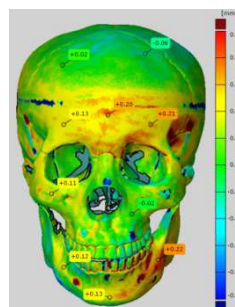
W poniższym rozdziale zamieszczono wyniki przeprowadzonych badań w postaci kolorystycznych map odchyłek. Kolejno zaprezentowane zostaną porównania określonych modeli wykonane na drodze procesu opisanego w metodyce badań. Na każdej mapie naniesione zostały etykiety z wartościami odchyłek reprezentujące jej wartość w określonych punktach dodatkowo przy każdej mapie znajduje się

skala koloru określająca wartość odchyłki dla danej barwy (rys. 9 i 10). Mapy odchyłek zamieszczone zostały w następującej kolejności:

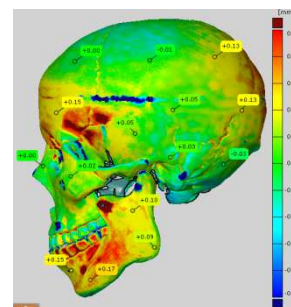
- Porównanie modeli referencyjnych (model ze skanera i model z Tomografii) przedstawiają rys. 11 do 14).
- Porównanie modelu stworzonego w polu pomiarowym 250 dla elementu wykonanego techniką RP, na podstawie modelu referencyjnego ze skanera z modelem referencyjnym wykonanym przy użyciu skanera, (Rys. 16 do 19).
- Porównanie modelu stworzonego w polu pomiarowym 250 dla elementu wykonanego techniką RP, na podstawie modelu referencyjnego z Tomografii Komputerowej, z modelem referencyjnym wykonanym przy użyciu Tomografii Komputerowej (Rys. 20 do 23).

Dokładność Tomografii Komputerowej

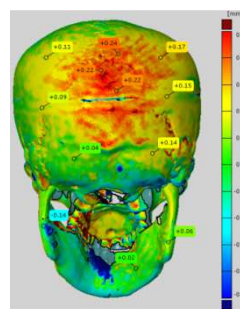
Analizując mapy odchyłek zawarte na rysunkach od 6.1 do 6.4, można stwierdzić, że dokładność odtworzenia modelu na podstawie badań wykonanych medycznym tomografem komputerowym zawiera się w przedziale $\pm 0,2$ mm. Kolorem dominującym w mapach jest zielony co oznacza, że w zdecydowanej większości odchyłka waha się w okolicach zera.



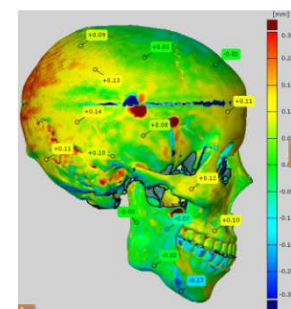
Rys 11. Odchyłki Tomografii komputerowej, widok z przodu



Rys 12. Odchyłki Tomografii komputerowej, widok z lewej strony



Rys 13. Odchyłki Tomografii komputerowej, widok z tyłu

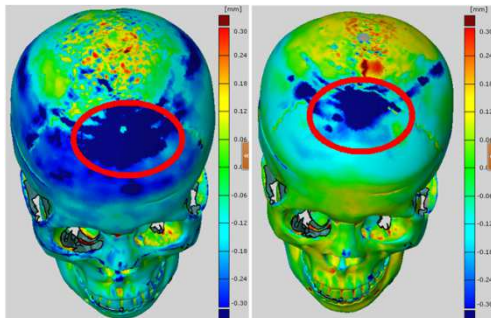


Rys 14. Odchyłki Tomografii komputerowej, widok z prawej strony

Dokładność techniki Rapid Prototyping

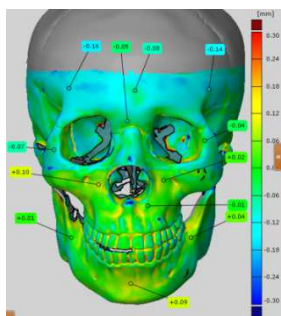
Podczas przeprowadzania pomiarów modeli wykonanych przy użyciu systemu Rapid Prototyping stwierdzono wystąpienie błędów na powierzchni obydwu wytworzonych modeli. W przedniej części mózgowcaszki powstały niewielkie zagłębienia powierzchni wprowadzające odchyłki o dużej wartości (Rys 15). Błąd ten znacznie wpływał na wartość odchyłek modelu przy wykonywaniu dopasowania globalnego. Z racji że błąd ten powstał wskutek nieprawidłowego przeprowadzenia procesu wytworzenia elementu i nie stanowi on niedokładności systemu RP, został on uznany jako błąd grubo-

W wyniku tego postanowiono nie brać pod uwagę odchyłek górnej części czaszki we wszystkich porównaniach modeli RP. Wzajemne pozycjonowanie modeli oraz generowanie map odchyłek zostanie wykonane nie biorąc pod uwagę górnej części modeli.

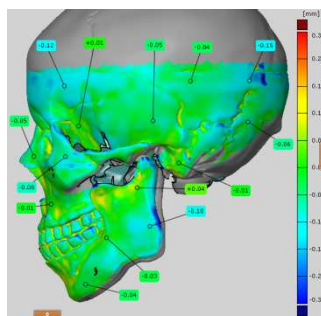


Rys. 15. Błąd powstały w modelach wytworzonych techniką Rapid Prototyping

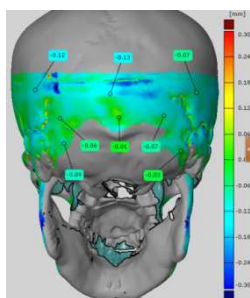
■ Porównanie modelu referencyjnego z modelem RP zmierzonym na polu 250 mm



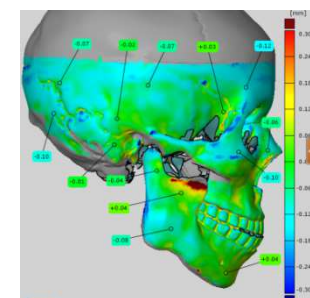
Rys.16. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze techniki współrzędnościowej



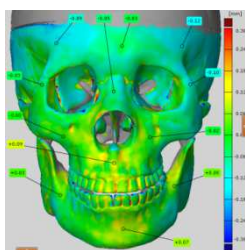
Rys.17. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze techniki współrzędnościowej



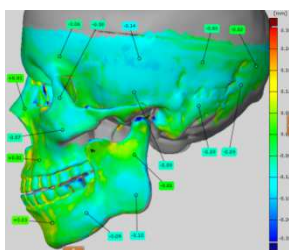
Rys.18. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze techniki współrzędnościowej



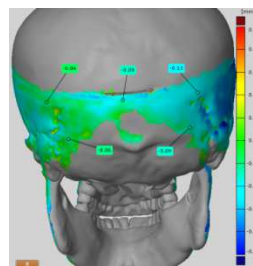
Rys.19. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze techniki współrzędnościowej



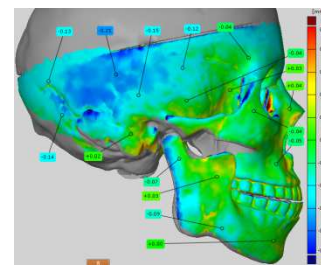
Rys.20. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze Tomografii Komputerowej



Rys.21. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze Tomografii Komputerowej



Rys.22. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze Tomografii Komputerowej



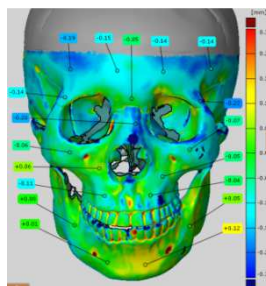
Rys.23. Dokładność techniki RP, model powstały na drodze Tomografii Komputerowej

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wartości odchyłek zawierają się w przedziale $\pm 0,2\text{mm}$.

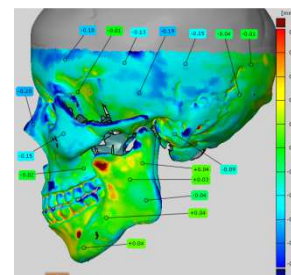
Dokładność procesu odtworzenia

■ Porównanie globalne

Przeprowadzona analiza odchyłek wykazuje, że zawierają się one w przedziale $\pm 0,2\text{mm}$. Można zauważyć inne wartości odchyłek na powierzchni obiektu, co jest następstwem dwuetapowości procesu rekonstrukcji. Pierwsze odchyłki zostały powstały na etapie modelowania ze zdjęć tomograficznych, drugie na etapie wytwarzania modelu techniką FDM. Wartości odchyłek przyjmują ekstrema w miejscach o dużej szczegółowości geometrii. Elementy obiektu mniej szczegółowe zostały odtworzone z mniejszą odchyłką zawierającą się w przedziale $\pm 0,1\text{mm}$ (rys. 24 i 25).



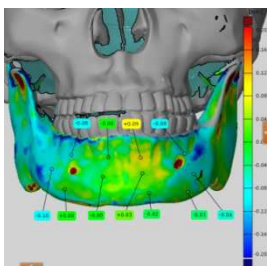
Rys. 24. Odchyłki procesu rekonstrukcji geometrii badanego elementu, porównanie globalne - widok z przodu



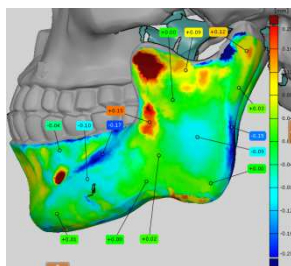
Rys. 25. Odchyłki procesu rekonstrukcji geometrii badanego elementu, porównanie globalne - widok z lewej strony

■ Porównanie lokalne

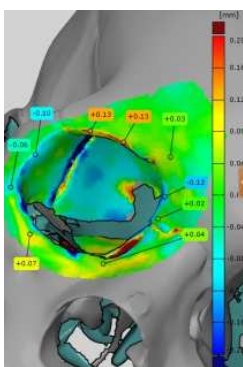
Lokalne porównanie poszczególnych elementów modelu pozwala nam na wyznaczenie dokładniejszych odchyłek danego elementu. Jak widać na mapach odchyłek żuchwy (Rys 26 i 27) dokładność jej odtworzenia sięga $\pm 0,15\text{mm}$. W zdecydowanej większości błąd odtworzenia przyjmuje wartości bliskie zeru co świadczy o wysokiej dokładności procesu rekonstrukcji. Widoczne w obrazie brązowe obszary nie zostały poddane analizie gdyż są to miejsca zaczepu klamer usztywniających model rzeczywisty nie występujące w realnym modelu czaszki. Podczas modelowania miejsca te zostały wygładzone co wpłynęło na taką wartość odchyłki.



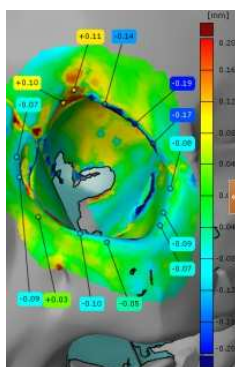
Rys. 26. Odchyłki żuchwy - dopasowanie lokalne



Rys. 27. Odchyłki żuchwy - dopasowanie lokalne

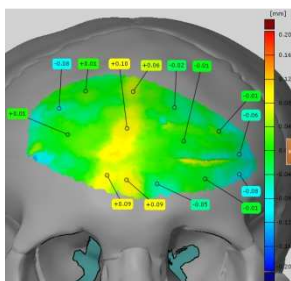


Rys. 28. Odchyłki prawego oczodołu

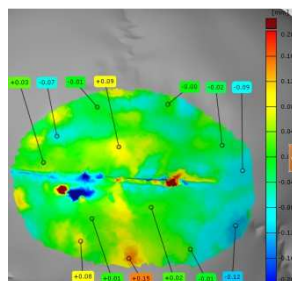


Rys. 29. Odchyłki lewego oczodołu

Analizując mapy odchyłek dla oczodołów (rys. 28 i 29) można zauważyć, że odchyłki przyjmują największe wartości na jego krawędzi i zawierają się w przedziale $\pm 0,2\text{mm}$. Okolice wokół oczodołu charakteryzują się o wiele niższą odchyłką, balansującą w okolicach zera.



Rys. 30. Odchyłki fragmentu mózgowcaszki (czoło)



Rys. 31. Odchyłki fragmentu mózgowcaszki (potylica)

Analiza map odchyłek zawartych na rysunkach 30 i 31 wykazuje że proces odtworzenia geometrii przedstawionych obszarów mózgowcaszki charakteryzuje się dokładnością na poziomie $\pm 0,1\text{mm}$.

Wnioski

Po szczegółowej analizie przeprowadzonego procesu rekonstrukcji elementu szkieletu człowieka oraz wszystkich otrzymanych modeli i map odchyłek można przedstawić następujące wnioski:

- Dokładność odtworzenia geometrii wybranego elementu szkieletu człowieka w zaproponowanym procesie rekonstrukcyjnym wynosi $\pm 0,2\text{mm}$ w porównaniu globalnym.
- Dokładność odtworzenia poszczególnych elementów badanego obiektu w dopasowaniu lokalnym wynosi odpowiednio $\pm 0,15\text{mm}$ dla żuchwy i oczodołów oraz $\pm 0,1$ dla wybranych fragmentów mózgowcaszki.

- Analiza map odchyłek odtworzenia geometrii badanego elementu wykonanego w technice Rapid Prototyping wyniosła $\pm 0,25\text{mm}$.
- Porównanie modeli referencyjnych stworzonych na drodze Optycznej Techniki Współrzędnościowej oraz Tomografii Komputerowej wykazało, że odchyłki modelu zbudowanego na drodze rekonstrukcji zdjęć tomograficznych i późniejszego modelowania zawierają się w przedziale $\pm 0,2\text{mm}$.
- Bezpośredni wpływ na wartość odchyłek modelu ma grubość warstw podczas badania tomograficznego oraz procesu wytwarzania RP a także usytuowanie modelu w trakcie trwania tych procesów. Warstwowość techniki badania i wytwarzania powoduje powstanie schodkowości na powierzchni modeli, co jest przyczyną powstawania odchyłek.
- Wykorzystanie w przeprowadzonych badaniach Medycznego Tomografu Komputerowego udowodniło, że możliwe jest wykorzystanie tego urządzenia jako narzędzia inżynierii odwrotnej dostarczającego danych pomiarowych o określonej dokładności.
- Dokładność odtworzenia geometrii elementu kostnego człowieka na poziomie $0,1\text{mm} - 0,2\text{mm}$ (co wykazano w przeprowadzonych badaniach) jest bardzo wysoką dokładnością akceptowaną przez lekarzy i implantologów.
- Opracowana metodyka może zostać wykorzystana w procesie produkcji implantów układu szkieletowego człowieka.
- Udoskonalenie zaproponowanej metodyki o systemy Rapid Prototyping wykorzystujące metale jako środki budulcowe, pozwoliłoby na bezpośrednią produkcję implantów gotowych do wykorzystania w medycynie.
- Aby osiągnąć jeszcze wyższą dokładność korzystając z zaproponowanego procesu rekonstrukcji, należałoby użyć tomografu komputerowego o mniejszej grubości badanej warstwy, oraz systemu Rapid Prototyping o mniejszej grubości wytwarzanej warstwy.

LITERATURA

1. Chee Kai Chua, Kah Fai Leong, C. Chu Sing Lim: „*Rapid Prototyping: Principles and Applications*”, Singapur, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2010, wydanie III.
2. Chlebus E.: „*Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji*”, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, 2000.
3. Cierniak R.: „*Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne*”, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2005.
4. Rumiński J.: „*Rentgenowska tomografia komputerowa*”, *Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000*, pod red M. Nałęczca, Tom 8 „*Obrazowanie biomedyczne*”, (2003), Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, s. 241-305.
5. Tadeusiewicz R. red., Augustyniak P. red.: „*Podstawy inżynierii biomedycznej*”, Kraków, Tom 1, Wydawnictwa AGH, 2009.
6. Adolf S., Thesing J.: „*Full surface 3-D measurements facilitate pattern making and provide numerous benefits to foundries*”, *Casting Plant & Technology*, nr. 3/2011, str. 42-46.
7. Brajlilh T., Tasic T., Drstvensek I., Valentan B., Hadzistevic M., Pogacar V., Balic J., Acko B.: „*Possibilities of using three-dimensional optical scanning in complex geometrical inspection*”, *Journal of Mechanical Engineering*, nr. 57 (2011)11, str. 826-833.
8. Budzik G., Pająk D.: „*Metody inżynierii odwrotnej*” *STAL Metale & Nowe Technologie*, (2010)11/12, str. 66-67.
9. Grzelka M., Trafarski A.: „*Metrologiczna analiza dokładności odtworzenia kształtu badanego elementu nieinwazyjną metodą tomografii komputerowej z wykorzystaniem współrzędnościowych pomiarów optycznych*”, materiały z konferencji Modelowanie i pomiary w medycynie, Krynica, 10-14 maja 2009.

10. Miecielica M.: „Techniki szybkiego prototypowania”, *Przegląd Mechaniczny*, (2010)2, str. 39-45.
11. Oczóś K., Cena I.: „Rapid Inspection - metody pomiarowo-kontrolne adekwatne do rapid-technologii”, *Mechanik*, (2008)3, str. 165-176.
12. Pandey P.M.: „Rapid prototyping technologies, applications and part deposition planning” Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, Artykuł on-line: http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/RP_document.pdf.
13. Ratajczyk E.: „Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych” *Mechanik*, nr. (2011)2, str. 112-117
14. Senczyk D., Moryksiewicz S.: „Przemysłowa Rentgenowska Tomografia Komputerowa”, *Badania Nieniszczące*, (2006).
15. Smolik W. : „Tomografia rentgenowska”, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, (2000)4, s. 63-91.
16. Szelewski M., Grzelka M.: „Wykorzystanie współrzędnościowej techniki pomiarowej oraz systemów CAD 3D w inżynierii odwrotnej”, *Pomiary Automatyka Kontrola*, (2004)2, str. 26-27.
17. Wieczorowski M., Radke M.: „Inżynieria odwrotna i kontrola jakości w pomiarach form i elementów z tworzyw sztucznych”, *OBERON*, (2007)1, str.6-7.
18. Wieczorowski M.: „Weryfikacja pierwszej sztuki na przykładzie obudowy telefonu komórkowego”, *OBERON*, (2008)4, str.44-45.
19. Wieczorowski M.: „Wykorzystanie skanera optycznego w produkcji narzędzi”, *OBERON*, (2006)1, str.8-9.