

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



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Analiza dokładności odwzorowania geometrii odcinka żuchwy wykonanego technologią FDM

The analysis of accuracy part of mandible manufactured with use FDM technology

GRZEGORZ BUDZIK
 TOMASZ DZIUBEK
 PAWEŁ TUREK
 JULIAN TRACIAK*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.550

Proces badawczy został przeprowadzony na 4 pacjentach. Wydruki modeli odcinków żuchwy, wykonano na drukarce Fortus 360 mc. Pomiar geometrii modeli, przeprowadzono na systemie optycznym Atos II Triple Scan. Proces weryfikacji dokładności i precyzji wykonania modeli, przeprowadzono na oprogramowaniu Focus Inspection.

SŁOWA KLUCZOWE: żuchwa, inżynieria rekonstrukcyjna, dokładność, światło strukturalne

The research process was performed on 4 patients. Models part of mandible were manufactured on the Fortus 360 mc printer. The measurements of models were made on an optical system Atos II Triple Scan. The final results which performs analysis accuracy and precision of manufactured models was made on Focus Inspection software

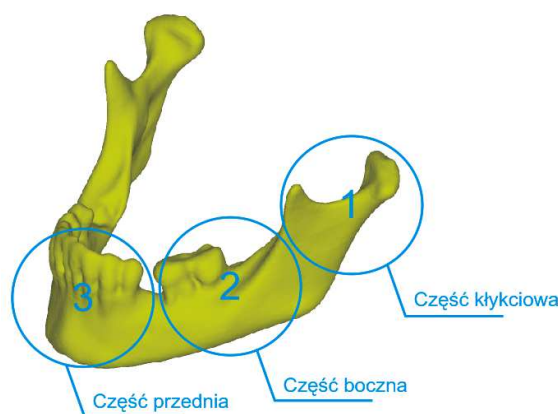
KEYWORDS: mandible, reverse engineering, accuracy, structure light

W ostatnim czasie obserwuje się coraz większy udział inżynierii rekonstrukcyjnej w budowie modeli medycznych [1, 2]. Proces ten polega na zastosowaniu różnego rodzaju metod pomiarowych (stykowych lub optycznych), których celem jest zdigitalizowanie obiektu rzeczywistego. Następnie obróbkę pozyskanych danych pomiarowych i na ich podstawie wytworzenie metodami przyrostowymi bądź ubytkowymi modelu fizycznego [3, 4]. Ze względu na złożoność zagadnienia, dokładność procesu wykonania modelu medycznego, uzależniona jest od właściwej korelacji czynników wynikających z zastosowanej metody pomiarowej, oprogramowania i dokładności algorytmów przetwarzających

* Prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik (gbudzik@prz.edu.pl), dr inż. Tomasz Dziubek (tdziubek@prz.edu.pl), mgr inż. Paweł Turek (pturek@prz.edu.pl), mgr inż. Julian Traciak (jtraciak@prz.edu.pl)

pozyskaną geometrię oraz zastosowanej technologii wytwarzania [5, 6, 7].

Szczególnie trudnym obszarem twarzoczaszki pod względem przeprowadzania zabiegu chirurgicznego jest żuchwa. Jest ona jedyną ruchomą kością twarzoczaszki, poddawaną wielokierunkowym obciążeniom dynamicznym podczas procesu gryzienia oraz żucia. W oparciu o jej trójwymiarową strukturę oraz zróżnicowane kierunki działania i natężenie sił czynnościowych, ubytki i złamania żuchwy zostały podzielone na 3 podstawowe grupy (rys.1).



Rys. 1. Główne obszary ubytków i złamań żuchwy

W wyniku przerwania ciągłości żuchwy, mięśnie nadgnykowe, pozbawione swojego przyczepu żuchwowego zapadają się, powodując upośledzenie drożności dróg oddechowych. Powyższe zmiany prowadzą do istotnego zaburzeń połykania, mowy i żucia oraz zniekształcenia dolnego odcinka twarzy. Taki stan znacząco pogarsza jakość życia pacjenta [8]. Ważne jest dla lekarza, aby w zaistniałej

sytuacji, mógł dysponować taką ilością informacji dotyczącej zmian chorobowych, która w połączeniu z liczbą dostępnych narzędzi, umożliwi precyzyjne wykonanie zabiegu. Aby zapewnić wymaganą dokładność modelu medycznego, niezbędne jest opracowanie i zastosowanie wysoko wydajnej metodyki RE/CAD/RP/CAM. Szczególnie ważnym zagadnieniem jest sprawdzenie metody wytwarzania pod kątem dokładności i precyzji wykonania gotowego modelu medycznego.

Metodyka

Proces badawczy został przeprowadzony na 4 pacjentach, którzy zostali poddani skanowaniu na tomografie Somatom Sensation Open 40. Podczas procesu pomiarowego został zastosowany tradycyjny protokół skanowania przewidziany dla obszaru twarzoczaszki (tab.1).

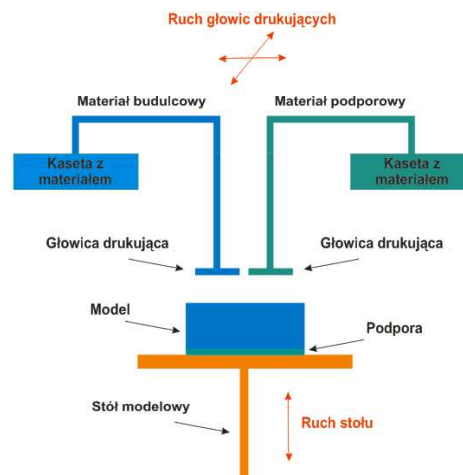
Tab. 1. Parametry akwizycji danych

Somatom Sensation 40 (Spiral Mode)	HeadSeq
kV	120 [kV]
mAs/Quality ref. mAs	380 [mAs]
Rotation time	1 [s]
Acquisition	24 x 1,2 [mm]
Slice collimation	1,2 [mm]
Feed/Scan	28,5 [mm]
Kernel	H31s
CTDI vol	53,0 [mGy]
Effective dose (mSv)	mężczyzna 1,97 [mSv] kobieta 2,12 [mSv]
Resolution	512 x 512 x 138 (0.4 mm x 0.4 mm x 1.5 mm)

W celu zwiększenia dokładności modeli, obrazy zostały poddane procesowi cyfrowej filtracji. W wyniku przeprowadzonych działań, zwiększono rozdzielczość kontrastową w strefach rozmycia. Parametry wyostrowienia oraz odszumiania zostały dobrane empirycznie w celu uzyskania jak najlepszego efektu. Na podstawie przygotowanych danych, dobrano wartość 200 HU jako wartość dolnego progu segmentacji. Względem niego przeprowadzono proces wyodrębnienia żuchwy. W procesie segmentacji użyto metodę region growing. Należy ona do grupy metod obszarowych, które polegają na wyborze pikseli o podobnym odcieniu i zakwalifikowaniu ich do jednej grupy określającej daną tkankę (obszaru jednorodności). Powstały w wyniku segmentacji zbiór zarysów 2D, stanowił trójwymiarową reprezentację badanej żuchwy. W celu zobrazowania modelu przestrzennego żuchwy, zastosowano metodę issosurface, która wchodzi w skład metod renderingu powierzchniowego. Bazuje ona na algorytmie maszerujących sześcianów [9]. Tak przygotowany model został zapisany i wczytany do oprogramowania CAD – Catia V5R18. Ze względu na występowanie nieproporcjonalnych trójkątów w powstałej siatce STL, przeprowadzono proces edycji powierzchni. Polegał on na utworzeniu siatki trójkątów składającej się z bardziej regularnych trójkątów. Końcowa część procesu przygotowania gotowych modeli, polegała na zdefiniowaniu płaszczyzny cięcia względem której otrzymano gotowe do wydruku cyfrowe modele odcinki żuchwy.

Modele odcinków żuchwy zostały wykonane na drukarce Fortus 360 mc. Drukarka ta bazuje na technologii FDM (rys.2). Polega ona na warstwowym osadzaniu termoplastycznego tworzywa sztucznego, w wyniku czego powstaje gotowy model. Głównymi elementami urządzenia są ruchome głowice drukujące (poruszające się wzdłuż osi x i y) oraz podstawa modelowa ze stołem roboczym (poruszająca się wzdłuż osi z). Materiał dostarczony do głowic drukujących z kaset jest roztopiany i przetłaczany do podgrzanych końcówek drukujących [10]. Urządzenie sterowane numerycznie

na przemian nanosi na podstawę modelową materiał budulcowy (bazowy) i podporowy według kolejnych poziomów przekrojów. Po wykonaniu zadanej warstwy, podstawa modelowa wraz ze stołem roboczym obniża się o zadaną grubość warstwy, aż do momentu kiedy cały model zostanie ukończony. Materiał podporowy po wykonaniu procesu wydruku, zostaje usunięty mechanicznie lub rozpuszczony w specjalnie przygotowanym roztworze.



Rys. 2. Schemat technologii FDM

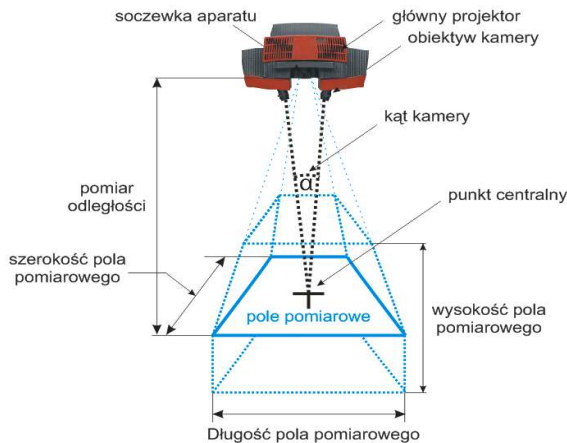
W procesie wydruku odcinków żuchwy, zastosowano głowice drukujące o oznaczeniu T16, które gwarantują uzyskanie pojedynczej grubości warstwy na poziomie 0,254 mm. Do wydruku użyto materiału ABS. Materiał podporowy po wykonaniu wydruku, został usunięty przy użyciu roztworu wody oraz wodorotlenek sodu. Do podgrzanego do temperatury 72°C roztworu, umieszczono model żuchwy. Po około godzinie czasu, materiał podporowy został rozpuszczony, a modele odcinków żuchwy zostały wciągnięte z roztworu i osuszone (rys.3). Podczas wydruku zachowano powtarzalne warunki wytwarzania dla każdego odcinka żuchwy.



Rys. 3. Modele odcinków żuchwy wykonane technologią FDM

W celu określenia dokładności wykonanych modeli, został użyty system pomiarowy Atos II Triple Scan Blue Light. Wykorzystuje on technikę pomiarową bazującą na świetle strukturalnym (rys.4). System składa się ze statywu na którym umieszczona jest głowica pomiarowa. Wyposażona jest ona w projektor oraz dwie kamery. Dodatkowo w skład systemu wchodzi stół obrotowy wraz z systemem komputerowym przetwarzającym dane pomiarowe. Odchylenie standardowe dla skanera podczas pomiaru odwzorowania kształtu sfery waha się w granicach od 0,003 mm do 0,005 mm. Atos II Triple Scan jest stosowany do weryfikacji dokładności i precyzji wykonania gotowych modeli w przemyśle lotniczym [11] jak i medycznym [2],[6],[43]. Przechwytywanie przez skaner informacji o położeniu punktów w przestrzeni, opiera się na zasadzie triangulacji czyli na obliczeniu miejsca przecięcia się w przestrzeni płaszczyzny utworzonej przez prążek światła strukturalnego i półpro-

stej wychodzącej ze środka piksela matrycy kamery. Obraz rastra odkształconego na powierzchni obiektu jest poddawany analizie komputerowej, w wyniku której uzyskuje się mapę wysokości.

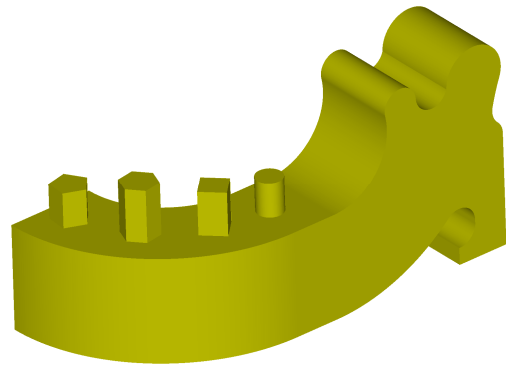


Rys. 4. Schemat metody pomiarowej

Proces weryfikacji dokładności i precyzji wykonania modeli, przeprowadzono na oprogramowaniu Focus Inspection. Dopasowanie modelu nominalnego uzyskanego na etapie projektowania RE/CAD oraz modelu odniesienia powstałego na etapie pomiaru przy użyciu systemu optycznego, zrealizowano metodą best fit z dokładnością do 0,001 mm.

W ramach przedstawionych badań, przeprowadzono test oceniający normalność rozkładu prawdopodobieństwa danych poddanych analizie. W celu stwierdzenia tego faktu użyto test Shapiro – Wilka ze względu na jego silną moc w porównaniu do innych testów. Ocenie zostały poddane 4 modele odcinków bocznych żuchwy oraz zaprojektowany w środowisku Catia V5R18 teoretyczny model badawczy CAD (rys.5).

W wyniku przeprowadzonego testu, uzyskana wartość statystyczna wyniosła 0,064 co daje nam podstawę do nie odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu. Od tej chwili uzyskane w badaniach rozkłady traktowane są jako rozkłady normalne.



Rys. 5. Model CAD zaprojektowany w środowisku oprogramowania Catia

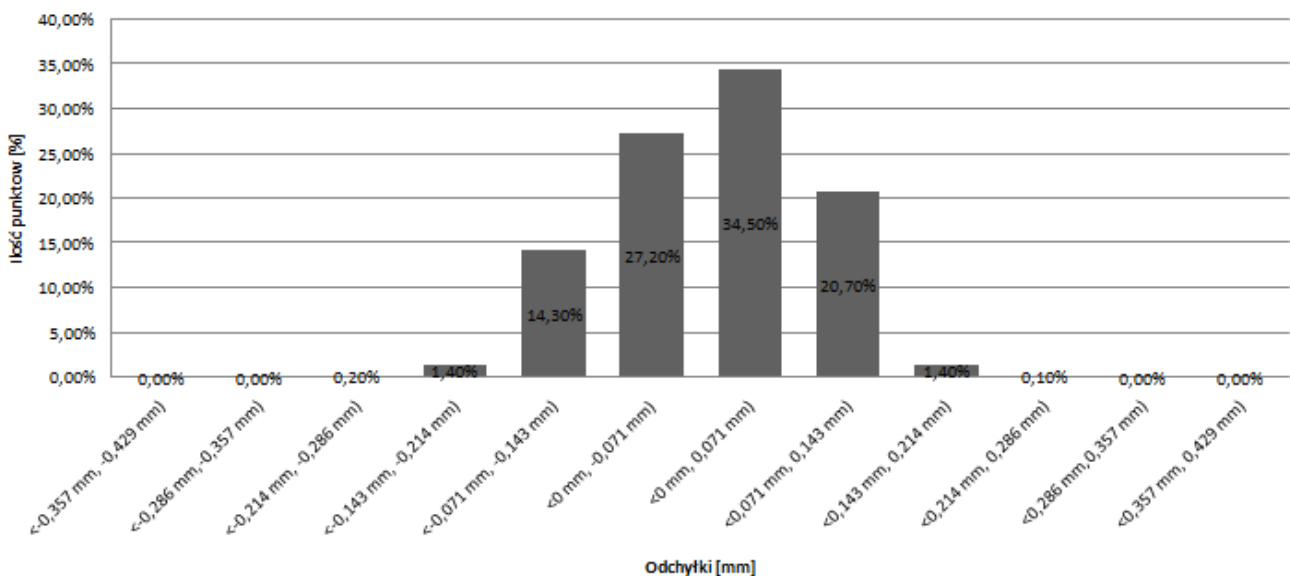
Wyniki

W przypadku modelu zaprojektowanego w środowisku oprogramowania Catia, odchyłka średnia wyniosła -0,009 mm, a odchylenie standardowe 0,074 mm. Większa część punktów znajduje się w tolerancji +/- 0,071 mm. Odnosząc się do reguły trzech sigm można stwierdzić, że 95% punktów mieści się w tolerancji +/- 0,15 mm (rys.6).

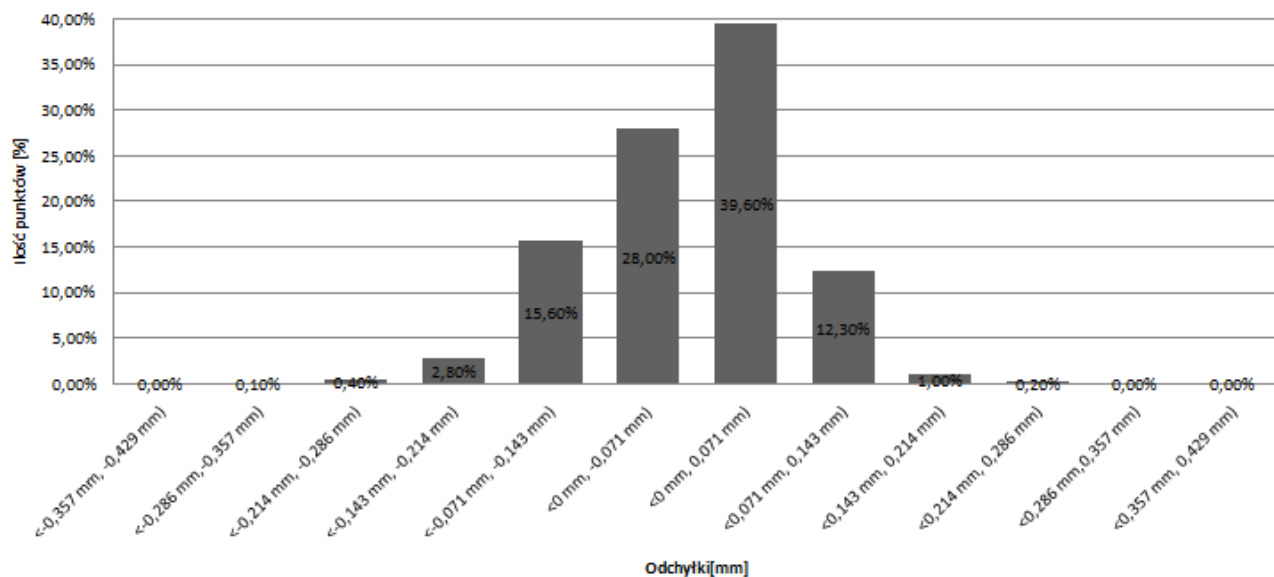
Dla pierwszego odtworzonego modelu poddanego analizie, także większa część punktów definiujących geometrię odcinka żuchwy znajduje się w tolerancji +/- 0,071 mm (rys.7). Uzyskana na etapie generowania raportu odchyłka średnia wyniosła -0,003 mm, a odchylenie standardowe 0,076 mm.

W przypadku drugiego modelu, rozkład punktów nie jest już tak skoncentrowany w zakresie tolerancji +/- 0,071 mm. W wyniku czego można zaobserwować wzrost odchylenia standardowego, które wynosi 0,111 mm, Z przedstawionego raportu wynika iż 95% punktów definiujących badaną geometrię mieści się w zakresie +/- 0,2 mm (rys.8).

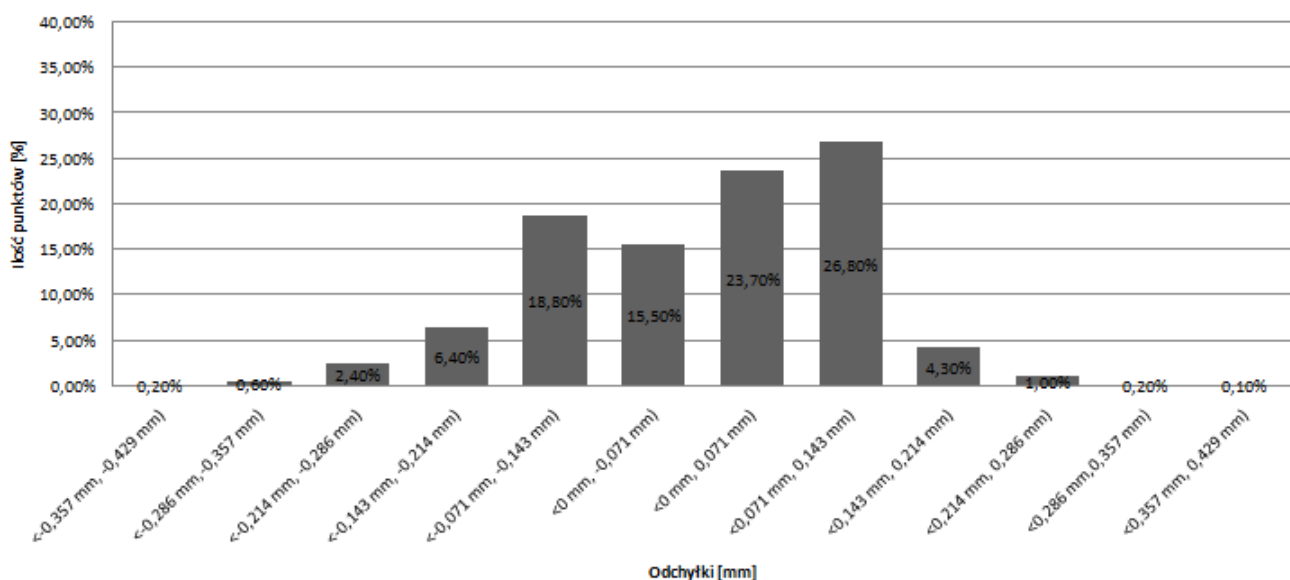
Dla trzeciego i czwartego modelu odcinka żuchwy rozkład punktów jest zbliżony (rys. 9,10). Wartość odchylenia standardowego dla modelu trzeciego wynosi 0,085 mm.



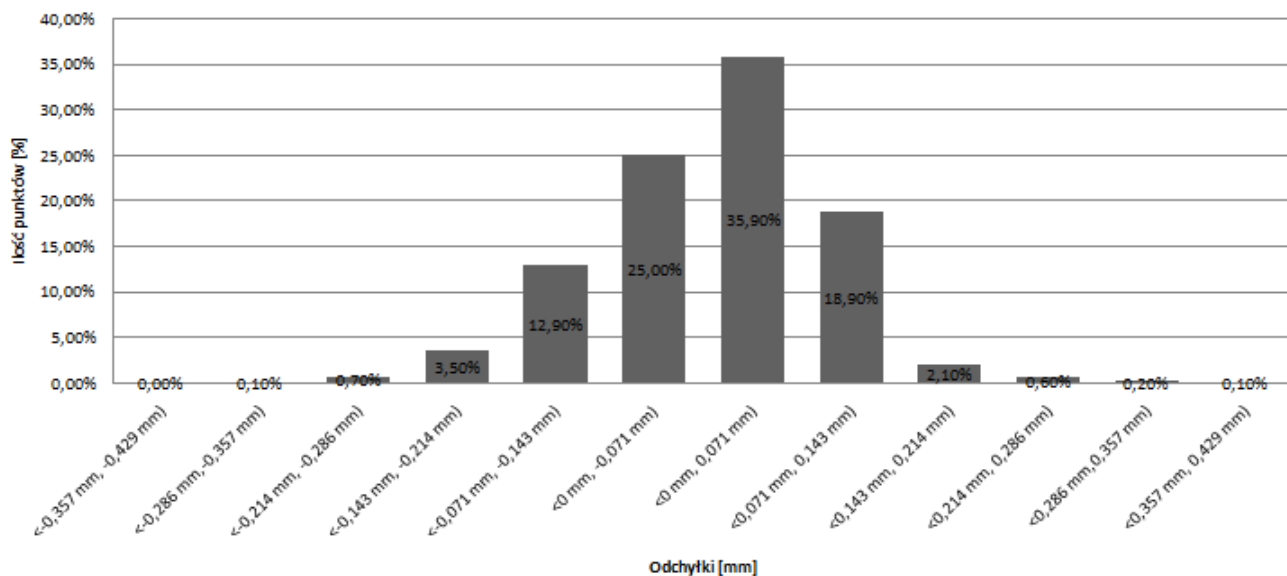
Rys. 6. Raport dokładności odwzorowania dla modelu zaprojektowanego w środowisku oprogramowania Catia



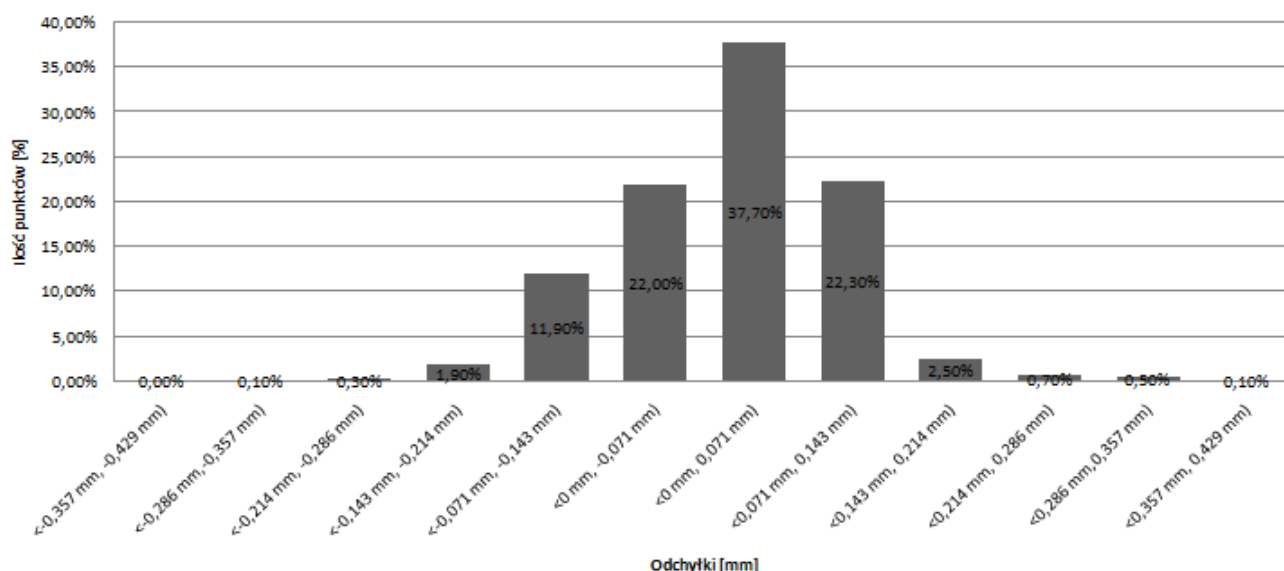
Rys. 7. Raport dokładności odwzorowania dla pierwszego odcinka żuchwy



Rys. 8. Raport dokładności odwzorowania dla drugiego odcinka żuchwy



Rys. 9. Raport dokładności odwzorowania dla trzeciego odcinka żuchwy



Rys. 10. Raport dokładności odwzorowania dla czwartego odcinka żuchwy

W przypadku modelu czwartego 0,083 mm. Dodatkowo z przedstawionych raportów wynika iż 95% punktów definiujących badane geometrie mieści się w zakresie +/- 0,17 mm. Jedyną różnicą dotyczy wyznaczonych odchyłek średnich, które wynoszą odpowiednio 0,009 mm i 0,022 mm dla trzeciego i czwartego modelu.

Większość modeli odcinków żuchwy branych pod uwagę, wykazuje w swoich rozkładach asymetrię lewostronną. Oceniając stopień skupienia danych, zaobserwowano większą koncentrację punktów odwzorowujących odcinek boczny żuchwy w zakresie tolerancji +/- 0,071 mm. Tylko w przypadku drugiego odcinka żuchwy, rozkład jest bardziej spłaszczony.

Podsumowanie

W wyniku uśredniania uzyskanych badań przeprowadzonych na odcinkach bocznych żuchwy, można zaobserwować normalność rozkładu prawdopodobieństwa. Dodatkowo w większości przypadków rozkłady wykazują asymetrię lewostronną i są skoncentrowane głównie w zakresie tolerancji +/- 0,071 mm. Odnosząc się do reguły trzech sigm można stwierdzić iż 95% punktów definiujących badaną geometrie, znajduje się w tolerancji +/- 0,16 mm. Uzyskane modele wykonane w technologii FDM są wysoce funkcjonalne - łatwo poddają się obróbce (np. wierceniu lub szlifowaniu). Dodatkowo są trwałe i odporne na działanie wody, substancji chemicznych oraz temperatury co sprawia, że mogą one posłużyć jako modele medyczne dla lekarza podczas wykonywania zabiegu.

LITERATURA

- Mehra Pushkar, Miner Jeremy, D'Innocenzo Richard, Nader-shah Mohammed. "Use of 3-d stereolithographic models in oral and maxillofacial surgery" *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, (2011), 10(1), s. 6-13.
- Budzik Grzegorz, Burek Jan, Dziubek Tomasz, Markowska Olimpia, Turek Paweł, Pakla Paweł. „Zastosowanie technologii Rapid Prototyping w procesie rekonstrukcji obszarów twarzoczaszki” *Mechanika w Medycynie* 12, (2014), s. 16-29.
- Markowska Olimpia, Budzik Grzegorz. „Innowacyjne metody wytwarzania implantów kostnych za pomocą inżynierii odwrotnej (RE) oraz technik szybkiego prototypowania (RP)”, *Mechanik* 85, (2012), 2CD.
- Budzik Grzegorz, Burek Jan, Dziubek Tomasz, Gdula Michał, Płodzień Marcin, Turek Paweł. „Analiza dokładności modelu kości

jarzmowej, wykonanego na 5-osiowym centrum obróbkowym” *Mechanik* 88 (2015), 2CD.

- Burek Jan, Turek Paweł. "Dokładność kształtu modelu szczęki dolnej wykonanego metodą technologii przyrostowej". *Mechanik* (2012), 85, nr 5-6, s. 510-513.
- Budzik Grzegorz, Turek Paweł, Dziubek Tomasz, Markowska Olimpia. „Wpływ zmiany grubości warstwy na dokładność odwzorowania geometrii żuchwy wykonanej metodą FDM” *PAK* (2014), nr 12, s. 1174-1177.
- El-Katany Ihab, Masood S.H., Morsi Y.S. "Error analysis of FDM fabricated medical replicas" *Rapid Prototyping Journal* (2010), 16/1, s. 36-43.
- Dąbrowski Jarosław, Przybysz Jan, Piętka Tomasz, Domański Wojciech, Chloupek Aldona, Krzymański Grzegorz. „Titanowe płyty rekonstrukcyjne w odtwarzaniu ciągłości żuchwy” *Czas Stomatologii* (2010), 63, 11, s. 663-67.
- Newman Timothy, Yi Hong. "A survey of the marching cubes algorithm" *Computers and Graphics* (2006), 30 (5), s. 854-879.
- Jain Pranja, Kuthe A. M. "Feasibility Study of Manufacturing Using Rapid Prototyping: FDM Approach" *Procedia Engineering* (2013), 63, s. 4-11.
- Marciniak Adam, Budzik Grzegorz, Dziubek Tomasz, Sobolewski Bartłomiej, Zaborniak Małgorzata. „Determine the precision of aviation bevel gear, made by the selected incremental techniques and using an optical scanner Atos II Triple scan” *Diagnostyka* (2015), Vol. 16, No.1, s. 63-66.
- Kudasik Tomasz, Markowska Olimpia, Miechowicz Sławomir. „Wykorzystanie optycznych pomiarów współrzędnościowych w określeniu dokładności geometrycznej prototypów implantów czaszkowych wykonanych technologią RP” *PAK* (2014), nr. 04, s. 195-198.