

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE I TECHNOLOGIE GENERATYWNE W PLANOWANIU ZABIEGÓW REKONSTRUKCJI TWARZOWEJ CZĘŚCI CZASZKI

Małgorzata Muzalewska^{1a}, Bartłomiej Szczodry^{2a},
Danuta Samolczyk-Wanyura^{2b}, Marek Wyleżół^{1b}

¹ Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice

^a *malgorzata.muzalewska@polsl.pl*, ^b *marek.wylezol@polsl.pl*

² Klinika Chirurgii Czaszkowo-Szczękowo-Twarzowej, Chirurgii Jamy Ustnej i Implantologii
w Warszawie

^a *bartszczodry@gmail.com*, ^b *danuta_wanyura@op.pl*

Streszczenie

W artykule przedstawiono, na przykładzie trzech przypadków medycznych, procesy wykonywania modeli wirtualnych i fizycznych fragmentów twarzowej części czaszki. Obiektami wejściowymi do realizacji procesu były obrazy DICOM pochodzące z obrazowania medycznego. Na ich podstawie uzyskiwano trójwymiarowe modele 3D. Modele te – po wykonaniu transformacji strukturalnych – były edytowane za pomocą systemów klasy CAx w celu uzyskania pożądanej postaci. Przeznaczeniem tych modeli był wydruk 3D. Wykonane modele fizyczne posłużyły do planowania zabiegów medycznych.

Słowa kluczowe: planowanie zabiegów, technologie generatywne, rekonstrukcja, operacja twarzoczaszki

COMPUTER AIDED AND GENERATIVE TECHNOLOGIES IN PLANNING OF FACIAL RECONSTRUCTION PROCEDURES

Summary

The article, based on three examples of medical cases, presents the processes of performing virtual and physical models of the facial skeleton fragments. The input objects for the process were DICOM images derived from medical imaging. 3D triangular models were obtained on this basis. These models, after carrying out structural transformations, were edited by means of CAx class systems to obtain the desired form. The purpose of these models was the 3D print. The obtained physical models were used for planning the medical treatments.

Keywords: planning procedures, generative technologies, reconstruction, craniofacial surgery

1. WSTĘP

Współcześnie termin CA, Computer Aided, już dawno przestał dotyczyć wyłącznie wspomaganie technicznych działań inżynierskich, a w szczególności procesu projektowo-konstrukcyjnego. Komputerowe wspomaga-

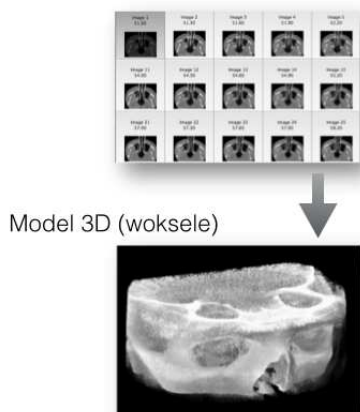
nie coraz powszechniej znajduje swoje zastosowanie również w innych dziedzinach, jak np. medycyna.

Współcześnie na rynku dostępnych jest wiele systemów komputerowych wspomagających pracę lekarza, w różnych tego aspektach.

Przykładem takiego wspomaganie jest komputerowe przetwarzanie danych obrazowych uzyskiwanych z tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego (rys. 1) [2, 8, 9]. Docelowym efektem przetwarzania takich danych jest wirtualny trójwymiarowy model wysegmentowanej tkanki (np. tkanki kostnej) [4, 7].

Artykuł dotyczy trzech przypadków medycznych, gdzie z powodzeniem zastosowano komputerowe wspomaganie w zakresie modelowania wirtualnego oraz technologie generatywne w zakresie wytworzenia użytkowych modeli fizycznych.

Obrazy 2D (standard DICOM)



Rys. 1. Od obrazów DICOM uzyskanych z obrazowania medycznego do modelu 3D

2. INŻYNIERSKIE PLANOWANIE ZABIEGÓW

Tekst rozdziału dotyczy opisu celowości uzyskiwania i używania modeli wirtualnych oraz ich zastosowania do wytwarzania generatywnego.

2.1 ZASTOSOWANIE MODELU 3D

Posiadając model wirtualny (np. uzyskany na podstawie obrazowania medycznego) oraz specjalistyczny system komputerowy, można wykonać przedoperacyjne planowanie zabiegu, np. chirurgicznego. Całość takich działań odbywa się wtedy w „świecie wirtualnym”. Takie działania charakterystyczne są dla osób potrafiących łączyć biegłą znajomość możliwości dedykowanych systemów komputerowych z podstawową wiedzą medyczną, czyli dla bioinżynierów.

W wielu przypadkach medycznych występuje jednak sytuacja, gdy jednocześnie posiada się model wirtualny, np. fragment układu kostnego podlegającego rekonstrukcji, oraz rzeczywistą standardową płytkę rekonstrukcyjną, która powinna zostać odpowiednio dopasowana i zaimplantowana pacjentowi.

Jak zatem można wykorzystać wspomniany model wirtualny do odpowiedniego ukształtowania obiektu fizycznego?

Z pomocą przychodzą tu nowoczesne technologie generatywne, popularnie nazywane drukowaniem 3D. Dzięki nim, dysponując modelem wirtualnym, możliwe jest wytworzenie fizycznego modelu pożądanego fragmentu, np. układu kostnego. Dysponując obiektem fizycznym, jakim jest „wydrukowany” model fragmentu tkanki kostnej, można użyć go do wszelkich działań planowania zabiegu medycznego, w tym do dokładnego dopasowania do jego powierzchni np. płyty rekonstrukcyjnej jeszcze przed przystąpieniem do właściwego zabiegu [5, 6] (takie zastosowanie technologii generatywnych omówiono w dalszej części artykułu).

2.2 WYTWARZANIE GENERATYWNE

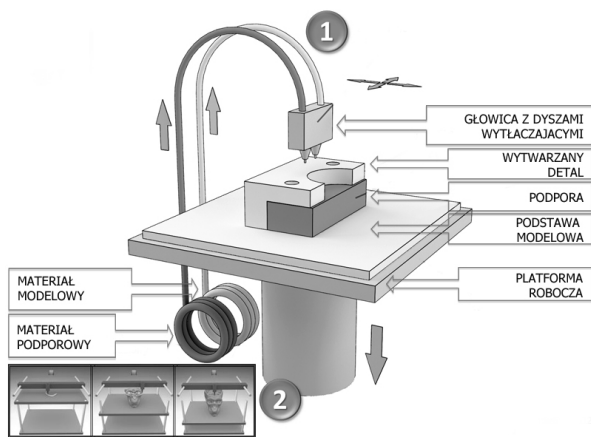
W opisanych przykładach wykonywania modeli fizycznych wykorzystano drukarkę 3D działającą w technologii FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) [3].

Ogólnie technologia FDM (rys. 2) polega na warstwowym nakładaniu przez dwa ekstrudery (głowice dyszowe) materiału modelowego i materiału podporowego (rys. 2).

Dwudyszowy ekstruder sterowany numerycznie powoduje nanoszenie na ruchomą platformę materiał modelowy oraz – jeśli istnieje taka potrzeba – również materiał podporowy. Po wykonaniu każdej warstwy platforma robocza jest opuszczana o wartość równą grubości nanoszonej warstwy w dół (zwykle jest to oś „z”). W ten sposób powstaje gotowy model fizyczny umocniony w wybranych miejscach materiałem podporowym. Wszystkie podpory po zakończonym procesie wytwarzania usuwa się. Usunięcie to może polegać albo na mechanicznym oderwaniu, albo za pomocą wypłukiwania (przy użyciu myjki ciśnieniowej) lub też za pomocą myjki ultradźwiękowej.

Prezentowane w dalszej części modele wykonano z filamentu o średnicy 1,75 mm, gdzie tworzywem był ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren). Podczas wydruku stosowano grubość warstwy 0,2 mm.

Wejściowy model do realizacji wydruku był reprezentowany za pomocą siatki trójkątów (rys. 3) i zapisany w formacie STL (ang. *Stereolithography Interface Specification*) [1].



Rys. 2. Proces wytwarzania generatywnego według technologii FDM [3]

3. INŻYNIERSKIE PLANOWANIE ZABIEGÓW

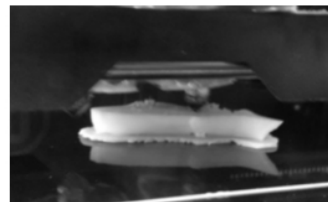
Jak już wspomniano, artykuł dotyczy wybranych przykładów zastosowań komputerowego wspomaganie w zakresie: cyfrowego przetwarzania obrazów reprezentowanych w standardzie DICOM [8] pochodzących z tomografii komputerowej, modelowania wirtualnego (w tym modelowania haptycznego) oraz zastosowania jednej z technologii generatywnych (FDM) do przedoperacyjnego planowania zabiegów chirurgicznych w obrębie twarzowej części czaszki. Zabiegi te dotyczyły resekcji i rekonstrukcji ubytku kości żuchwy oraz rekonstrukcji oczodołu [6].

Niniejsza praca powstała w wyniku współpracy Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej z Kliniką Chirurgii Czaszkowo-Szczękowo-Twarzowej, Chirurgii Jamy Ustnej i Implantologii w Warszawie.

Model wirtualny (siatka trójkątów)



Drukarka 3D (podczas wydruku)



Model fizyczny (ABS)



Rys. 3. Proces wytwarzania: od modelu wirtualnego do modelu fizycznego

3.1 PRZYPADEK 1

Przypadek pierwszy dotyczył pacjenta zakwalifikowanego do leczenia operacyjnego nowotworu złośliwego dziąsła dolnego jamy ustnej z naciekaniami kości żuchwy.

Pacjentowi wykonano szereg badań diagnostycznych, w tym tomografię stożkową (CBCT), dzięki której możliwe stało się wygenerowanie trójwymiarowego wirtualnego modelu żuchwy pacjenta. Model ten został poddany obróbce programowej, odpowiednio dostosowano go dla potrzeb lekarzy oraz przygotowano do wydruku 3D w technologii FDM (rys. 4).

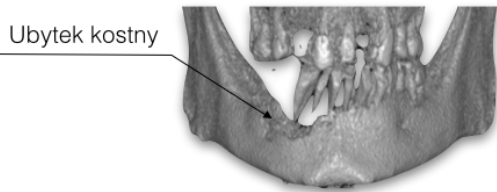
Wykorzystując metodę wytwarzania generatywnego, zbudowano model fizyczny żuchwy pacjenta. Model ten posłużył do trzech celów:

- zaplanowanie przebiegu linii odcięcia fragmentu zmienionej przez nowotwór kości żuchwy,
- dokładne dogięcie tytanowej płyty rekonstrukcyjnej do kształtu powierzchni przed właściwą operacją (rys. 5),
- zaplanowanie miejsc umieszczenia wkrętów kostnych.

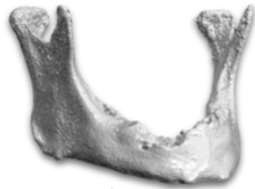
Operacja polegała na usunięciu układu chłonnego szyi w znieczuleniu ogólnym. Następnie wykonano resekcję guza dna jamy ustnej, dziąsła dolnego i tkanek spodu języka wraz z fragmentem trzonu żuchwy.

Ciągłość żuchwy zrekonstruowano ukształtowaną na modelu fizycznym tytanową płytą rekonstrukcyjną, mocując ją do kości żuchwy śrubami kostnymi.

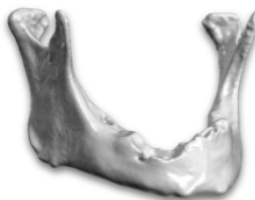
Efekt obrazowania medycznego (CBCT)



Model siatkkowy (n.p. CBCT)



Model siatkkowy (wygładzenie)



Model fizyczny (ABS)



Rys. 4. Proces powstania modelu wirtualnego i fizycznego

Ubytek tkanek w obrębie dna jamy ustnej zaopatrzone uszypułowanym płatem pierświm. Rany zaopatrzone szwami chirurgicznymi.



Rys. 5. Dopasowanie płyty rekonstrukcyjnej do kształtu modelu fizycznego żuchwy [4]

3.2 PRZYPADK 2

Przypadek kolejny dotyczył pacjenta, który zgłosił się do kliniki z izolowanym złamaniem dna oczodołu (ZIDO) (rys. 6), z objawami podwójnego widzenia.

Zaplanowanie zabiegu z użyciem komputerowego wspomaganie i zastosowaniem technologii generatywnych w tym przypadku polegało na wygenerowaniu wirtualnego modelu bazowego fragmentu twarzowej

części czaszki pacjenta, otrzymanego na bazie tomografii komputerowej.

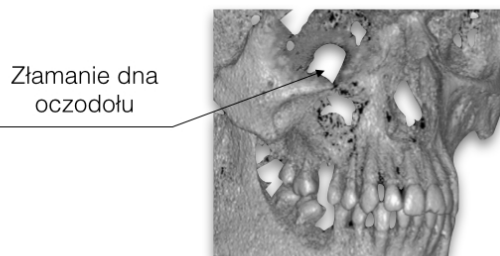
Model fragmentu twarzowej części czaszki zawierającego złamany oczodoł został poddany wielu zabiegom edycyjnym (związanym ze zmianami postaci geometrycznej oraz sposobami reprezentowania pliku modelu), w ramach których nadano mu postać zawierającą m.in. zrekonstruowane dno oczodołu (rys. 7).

Głównym problemem o charakterze modelowym (rekonstrukcyjnym) było to, w jaki sposób zamodelować brakujący fragment kości dna oka. W celu odtworzenia kształtu dna oka wykonano skomplikowaną sekwencję działań, gdzie pierwszym zabiegiem było dokonanie lustrzanego odbicia fragmentu „zdrowej” części twarzoczaszki z oczodołem. Jak się jednak okazało, zabieg ten nie był wystarczający, głównie ze względu na brak wystarczającej ciągłości powierzchni modelu fragmentu dna oka. Stosując odpowiednie narzędzia programowe systemu modelowania woksłowego realizowanego haptycznie [10, 11], wypełniono brakujące fragmenty modelu dna oka, przywracając ciągłość powierzchni. Końcową czynnością było wygładzenie powierzchni modelu oraz jego przycięcie do postaci koniecznej do zaplanowania operacji.

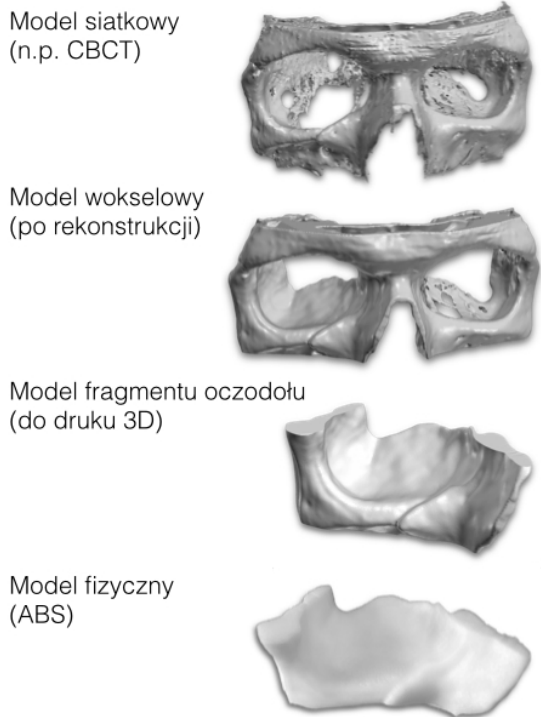
Tak uzyskany model wirtualny posłużył do wykonania wydruku 3D. Uzyskano w ten sposób użyteczny model fizyczny. Posłużył on do przedoperacyjnego ukształtowania i docięcia tytanowej siatki rekonstrukcyjnej (rys. 8), którą wykorzystano podczas zabiegu chirurgicznego. Przedoperacyjne ukształtowanie siatki rekonstrukcyjnej znacznie skróciło zabieg.

Po zabiegu wszyczenia siatki rekonstrukcyjnej wykonano ponownie tomografię komputerową. Badanie to wykazało poprawne dopasowanie i zamocowanie płytki rekonstrukcyjnej w oczodole pacjenta (rys. 9). Badanie okulistyczne wykonane po zabiegu operacyjnym wykazało ustąpienie podwójnego widzenia i prawidłową ruchomość gałki ocznej.

Obraz tomograficzny przed zabiegiem



Rys. 6. Złamanie dna oczodołu – efekt obrazowania medycznego z użyciem CT

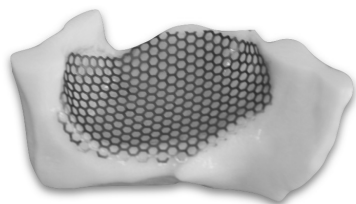


Rys. 7. Proces powstania modelu wirtualnego i fizycznego

Zaznaczenie na powierzchni modelu obszaru osadzenia siatki rekonstrukcyjnej

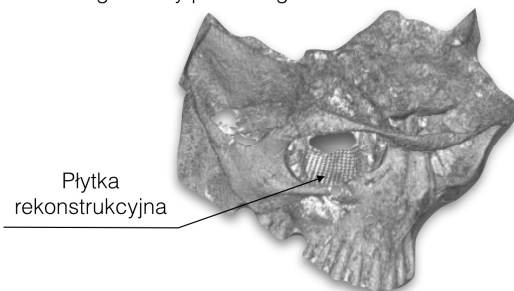


Dopasowana siatka rekonstrukcyjna na powierzchni modelu fizycznego



Rys. 8. Dopasowanie siatki rekonstrukcyjnej do modelu fizycznego

Obraz tomograficzny po zabiegu

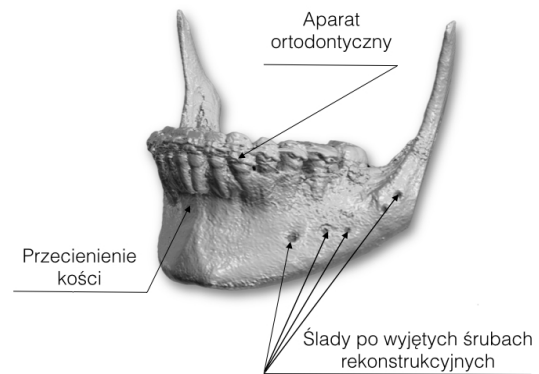


Rys. 9. Obraz z tomografii komputerowej po zabiegu

3.3 PRZYPADEK 3

Trzeci przypadek dotyczył pacjentki z przecienioną kością żuchwy. Przecienienie kości żuchwy w przedniej części najprawdopodobniej wynika z nieprawidłowo realizowanego leczenia ortodontycznego.

Za pomocą tomografii stożkowej (wykonanej w jednej z Klinik Chirurgii Szczękowo-Twarzowej w Polsce¹) otrzymano bardzo gęsty zbiór obrazów DICOM [8], na podstawie których wykonano trójwymiarowy, wirtualny model żuchwy pacjenta reprezentowany w postaci siatki trójkątów (rys. 10) i zapisany w formacie STL.

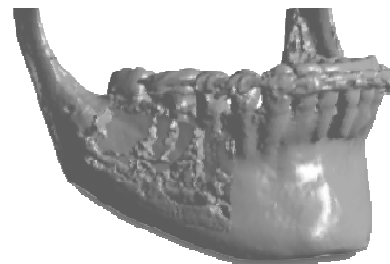


Rys. 10. Wirtualny model żuchwy

Tak uzyskany model wymagał jednak wielu operacji edycyjnych, gdyż zawierał wiele zbędnych artefaktów, pochodzących głównie od zakłóceń spowodowanych stale zamontowanym na uzębieniu aparatem ortodontycznym.

Po wykonaniu serii badań diagnostycznych modelu okazało się również, że jest on zbudowany nie tylko z pożądanej zewnętrznej siatki trójkątów (format STL), lecz posiada również bardzo rozbudowaną powierzchnię wewnętrzną (bardzo dokładna rekonstrukcja modelu doprowadziła do odwzorowania nie tylko powierzchni zewnętrznej, ale również struktury wewnętrznej tkanki kostnej, rys. 11).

Używając stosownych narzędzi edycyjnych systemu klasy CAx, dokonano usunięcia wszystkich wewnętrznych trójkątów, otrzymując w ten sposób poprawny model zbudowany wyłącznie z trójkątów tworzących powierzchnię zewnętrzną.



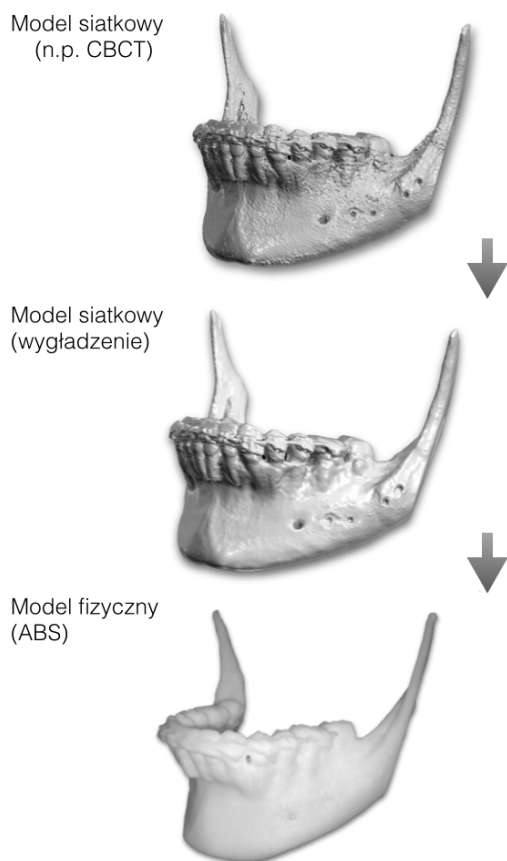
Rys. 11. Widok wnętrza modelu żuchwy (usunięta widoczność fragmentu powierzchni zewnętrznej)

¹ Dokładna nazwa kliniki została zastrzeżona przez pacjentkę.

Poza tym powierzchnię modelu stosownie wygładzono (rys. 12), aby lepiej dostosować postać modelu do późniejszego procesu wytwarzania generatywnego. Należy tu również wspomnieć, że redukcja liczby trójkątów z początkowych 6.419.530 wyniosła 353.080, czyli prawie 95% przy zachowaniu wymaganej szczegółowości postaci modelu. Tak udoskonalony postaciowo wirtualny model żuchwy stał się podstawą wytworzenia jego fizycznego odpowiednika (rys. 12) z użyciem – wspomnianej już – technologii FDM.

Wytworzony model fizyczny żuchwy dostarczono pacjentce. Posłużył on do lepszego zrozumienia i zobrazowania skutków jej choroby.

Dodatkowo lekarze chirurdzy z Kliniki Chirurgii Szczękowo-Twarzowej wyrazili duże zainteresowanie zaobserwowanym przypadkiem zaniku kości, ponieważ pojawił się pomysł przeprowadzenia augmentacji kości i/lub przeszczepu kości z kolca biodrowego w celu odbudowy prawidłowej struktury kości żuchwy.



Rys. 12. Proces powstania modelu wirtualnego i fizycznego żuchwy

4. WNIOSKI I UWAGI

- Dzięki metodom obrazowania medycznego możliwe jest wykonywanie wirtualnych trójwymiarowych modeli struktur anatomicznych.
- Modele wirtualne oraz ich fizyczne odpowiedniki pozwalają na dokładne planowanie zabiegów operacyjnych.
- Stosowanie modeli fizycznych struktur anatomicznych daje możliwość dokładniejszego skonsultowania danego przypadku medycznego z innymi lekarzami przed rozpoczęciem zabiegu.
- Stosowanie modeli wirtualnych oraz ich fizycznych odpowiedników znacznie skraca czas zabiegów medycznych, np. dzięki możliwościom dopasowania implantowanych elementów jeszcze przed zabiegiem.
- Zastosowanie planowania przedoperacyjnego znacznie skraca czasu zabiegu, a co za tym idzie:
 - skróceniu ulega czas znieczulenia ogólnego,
 - następuje zmniejszenie utraty krwi podczas zabiegu,
 - liczba ewentualnych komplikacji śródoperacyjnych ulega zmniejszeniu.
- Efekt synergicznego stosowania konwencjonalnych systemów klasy CAx (służących do modelowania powierzchniowego, bryłowego oraz siatek trójkątów) i wokselowych, realizowanych haptycznie, jest znacznie większy niż w przypadku stosowania tylko jednego rodzaju systemu modelowania wirtualnego.
- Modele wirtualne i fizyczne stanowią swego rodzaju ogniwo łączące świat inżynierii ze światem medycyny.

Literatura

1. Chen Y.H., Ng C.T., Wang Y.Z.: Generation of an STL file from 3D measurement data with user-controlled data reduction. "Int. J. Adv. Manuf. Technol." 1999, No. 15, p. 127-131.
2. Cierniak R.: Tomografia komputerowa: budowa urządzeń CT, algorytmy rekonstrukcyjne. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2005.
3. E-prototypy, <http://www.e-prototypy.pl> (dostęp lipiec 2014).

4. Karbowski K.: Podstawy rekonstrukcji elementów maszyn i innych obiektów w procesach wytwarzania. Monografia 367, s: Mechanika. Kraków: Wyd. Pol. Krak., 2008.
5. Kozakiewicz M., Elgalal M., Loba P., Komuński P., Arkuszewski P., Broniarczyk-Loba A., Stefańczyk L.: Clinical application of 3D pre-bent titanium implants for orbital floor fractures. „Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery” 2009, 37, p. 229 - 234.
6. Otrębska M., Szczodry B., Samolczyk-Wanyura D.: Planowanie zabiegu resekcji i rekonstrukcji żuchwy z użyciem komputerowego wspomaganie oraz technologii generatywnych. „Mechanik” 2014, 2, CD
7. Otrębska M., Wyleżoł M.: Modelowanie implantów w kranioplastyce - od tomografii komputerowej do modelu wirtualnego. „Mechanik” 2014, 2 (dysk optyczny), s. 1 - 9.
8. Piętka E.: Standard DICOM w archiwizacji i transmisji obrazów medycznych, sieci komputerowe. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 1999, s. 651 - 660.
9. Tadeusiewicz R., Korohoda P.: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów. Kraków: Wyd. Fundacji Postępu Telekomunikacji, 1997.
10. Wyleżoł M.: Zastosowanie metod haptycznych w modelowaniu i analizach inżynierskich: przykłady. „Mechanik” 2009, nr 11, s. 948.
11. Wyleżoł M.: Metodyka modelowania na potrzeby inżynierii rekonstrukcyjnej. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2013.