

Inżynieria rekonstrukcyjna w modelowaniu wyrobów medycznych

Reverse engineering in computer-aided engineering of medical products

KRZYSZTOF KARBOWSKI
RYSZARD CZEPKO
WITOLD SUJKA*

MARIUSZ BANACH
PRZEMYSŁAW MASŁOWSKI

Opisano zastosowanie metod inżynierii rekonstrukcyjnej (*reverse engineering*) w medycynie. Podano przykłady analizy obrazów uzyskanych metodami tomografii komputerowej oraz digitalizacji obiektów skanerem światła strukturalnego, wykonanych w celu zaprojektowania i przygotowania protezy rozległego ubytku kości czaszki.

SŁOWA KLUCZOWE: CAD, inżynieria rekonstrukcyjna, światło strukturalne, medycyna

The article describes application of reverse engineering techniques in medicine. The analysis of computed tomography images and 3-dimensional structured light scanning for preparing of the large skull bone's prosthesis are presented.

KEYWORDS: CAD, reverse engineering, structured light, medicine

Usunięcie płata kostnego jest powszechnie akceptowanym sposobem postępowania w wielu sytuacjach klinicznych – zabieg ten nosi nazwę „odbarczenia kostno-oponowego”. Zwykle do zastosowania tak radykalnego rozwiązania zmusza powiększenie objętości mózgu, będące wynikiem urazu mechanicznego – najczęściej wypadku komunikacyjnego. Konsekwencją takiego zabiegu jest konieczność przywrócenia naturalnego kształtu głowy i zapewnienia ochrony przed urazami mechanicznymi, co w opinii wielu chorych z ubytkiem kości jest ważnym psychologicznie czynnikiem. Zabieg ten zamyka dla chorego pewien etap leczenia, po którym następuje rehabilitacja i powrót do normalnej aktywności społecznej. Zabieg wypełnienia ubytku czaszki (kranioplastyka) [1, 5] – przeszczep autogenny (własna kość chorego) lub wszczepienie protezy (siatki tytanowej, polipropylenowo-poliestrowej, pochodnych syntetycznego hydroxyapatytu) – wykonywany jest w różnych ośrodkach w czasie od dwóch tygodni do sześciu miesięcy od pierwszego zabiegu. W Polsce, ze względu na biokompatybilność i niską cenę, używa się do tego celu sztywnej dzianiny polipropylenowo-poliestrowej o nazwie Codubix® [3].

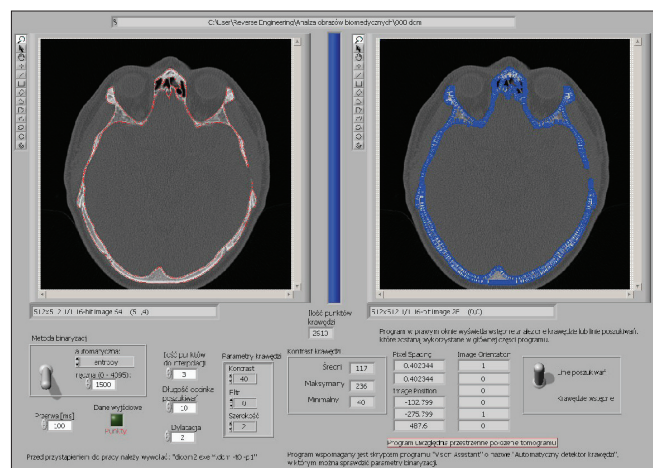
W pracy opisano procedurę projektowania protez rozległych ubytków kości czaszki opartą na rozwiązaniach inżynierii rekonstrukcyjnej: digitalizacji obrazów uzyskanych metodami tomografii komputerowej, modelowaniu wirtualnym oraz skanowaniu obiektów.

Opis przypadku

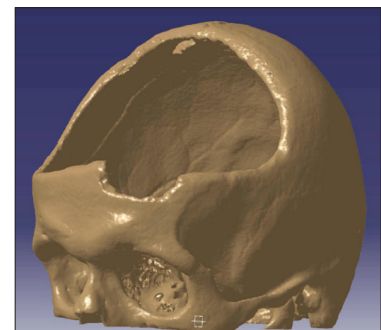
Inżynieria rekonstrukcyjna, zwana również inżynierią odwrotną, dostarcza narzędzia i metody projektowania bazujące na materialnym modelu wyrobu.

W opisywanym przypadku punktem wyjścia w procesie modelowania są obrazy uzyskane metodami tomografii komputerowej, przedstawiające kształt czaszki pacjenta. Obrazy

te wymagają przeprowadzenia analizy. Jej celem jest znalezienie krawędzi kości czaszki, które zostaną użyte do przygotowania wirtualnego modelu obiektu. Detekcja krawędzi kości czaszki została wykonana w specjalnie opracowanym programie komputerowym, wykorzystującym analizę obrazów (rys. 1). Program ten został szczegółowo opisany w [2] oraz w [4]. Generuje on chmurę punktów, na podstawie której w systemie modelowania komputerowego budowany jest wirtualny model czaszki (rys. 2).



Rys. 1. Detekcja krawędzi kości czaszki



Rys. 2. Wirtualny model czaszki

Kolejnym etapem jest zaprojektowanie wypełnienia ubytku kości czaszki. Jeśli ubytek znajduje się z boku czaszki, można zrobić lustrzane odbicie niezdeformowanych kości i wykorzystać je w procesie modelowania. Trudności pojawiają się w przypadku ubytku kości czołowej. Tego typu wypełnienie można przygotować na podstawie wyników tomografii komputerowej, wykonanej przed zabiegiem usunięcia kości czaszki – o ile taka jest dostępna. Inną metodą jest ekstrapolacja niezdeformowanych struktur kostnych – takie podejście jest skuteczne w przypadku niewielkich ubytków kości. Jeszcze innym sposobem projektowania jest zastosowanie metod modelowania haptycznego [4, 6].

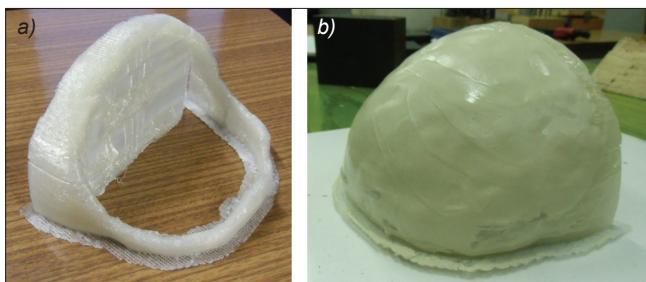
Gdy żadna z powyższych metod nie może być zastosowana, zostaje zaprojektowanie wypełnienia, którego kształt zależy od inwencji projektanta.

* Dr hab. inż. Krzysztof Karbowski, prof. PK (karbowski@mech.pk.edu.pl) – Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, lek. med. Mariusz Banach (marban13@yahoo.pl), dr hab. med. Ryszard Czepko (rczepko@poczta.onet.pl), lek. med. Przemysław Masłowski (przemomas@gmail.com) – Szpital św. Rafała w Krakowie, dr inż. Witold Sujka (witold.sujka@tricomed.com) – Tricomed S.A

W przypadku pacjenta, którego model czaszki pokazano na rys. 2, nie była dostępna tomografia sprzed urazu. Kolejnym problemem w procesie projektowania była rozległość ubytku. Zaprojektowanie wypełnienia w systemie modelowania komputerowego było utrudnione ze względu na problem z przestrzenną oceną kształtu wypełnienia, które powinno tworzyć z czaszką estetyczną całość. Efekt ten można uzyskać metodami rzeźbiarskimi – uformowanie czaszki z masy plastycznej pozwala ocenić kształt materialnego, a nie wirtualnego modelu.

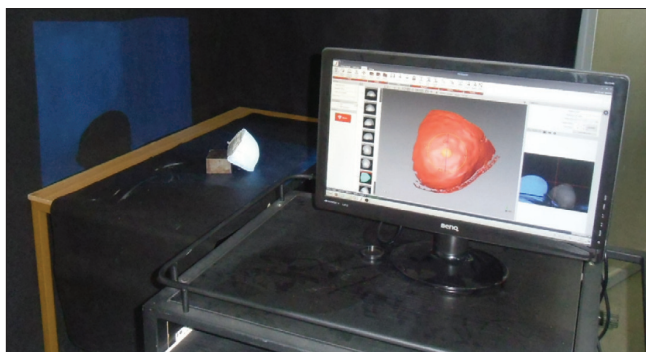
Proteza

Modelowanie kształtu wypełnienia ubytku kości czaszki wykonano z masy plastycznej. W tym celu metodą wydruku przestrzennego w technologii FDM (*Fused Deposition Modelling*) wykonano model fragmentu czaszki, a następnie ręcznie uformowano wypełnienie (rys. 3).



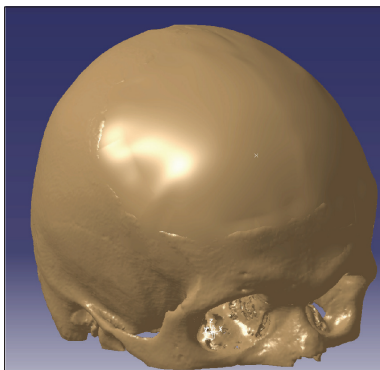
Rys. 3. Model a) fragmentu kości czaszki, b) wypełnienia ubytku

Kolejnym etapem projektowania protezy była digitalizacja modelu wypełnienia. Wykonano ją skanerem światła strukturalnego (rys. 4).



Rys. 4. Digitalizacja modelu wypełnienia ubytku

Zdigitalizowany model wypełnienia przesłano do systemu modelowania komputerowego, w którym dopasowano go do wirtualnego modelu czaszki pacjenta (rys. 5).



Rys. 5. Model wypełnienia

Po wykonaniu wirtualnego modelu wypełnienia ubytku kości czaszki przystąpiono do projektowania protezy oraz matrycy do jej kształtowania. Formę wykonano ze stopu aluminium technologią frezowania trzyosiowego (rys. 6).

Rys. 6. Forma do kształtowania protezy



Forma została wykorzystana przez producenta wyrobów medycznych, firmę Tricomed S.A. z Łodzi, do uformowania protezy czaszkowej, pokazanej na rys. 7. Protezę wszczepiono pacjentowi oddziału neurochirurgii Szpitala św. Rafała w Krakowie.



Rys. 7. Proteza do kranioplastyki

Podsumowanie

W analizowanym przykładzie zastosowano metody inżynierii rekonstrukcyjnej i szybkiego prototypowania:

- **do digitalizacji czaszki pacjenta:** tomografię komputerową wraz z metodami analizy obrazów, które pozwoliły na detekcję krawędzi kości czaszki, a następnie na przygotowanie wirtualnego modelu czaszki pacjenta;
- **do wydruku przestrzennego:** technologię FDM polegającą na układaniu roztopionych warstw tworzywa sztucznego (w tym przypadku polimeru PLA – polilaktydu), która umożliwiła wykonanie modelu fragmentu czaszki z ubytkiem; następnie ręcznie wypełniono go masą plastyczną. Wybór metody modelowania był podyktowany tym, że w przypadku tak rozległego ubytku czaszki projektowanie wypełnienia w systemie modelowania komputerowego nie dało spodziewanych efektów estetycznych.
- **do digitalizacji modelu wypełnienia ubytku:** skaner światła strukturalnego. Wyniki skanowania – wirtualny model wypełnienia – dopasowano do wirtualnego modelu czaszki, a następnie opracowano projekt protezy i matrycy do jej formowania.

Zastosowanie opisanych metod pozwoliło na wykonanie i wszczęcie protezy czaszkowej. Wypełniła ona ubytek kości oraz dała bardzo dobry efekt estetyczny.

LITERATURA

1. Chen J-J., Liu W., Li M-Z., Wang C-T., "Digital manufacture of titanium prosthesis for cranioplasty", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2006) 27, pp. 1148÷1152.
2. Karbowski K. „Podstawy rekonstrukcji elementów maszyn i innych obiektów w procesach wytwarzania”. Monografia 367, Seria Mechanika. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2008.
3. Karbowski K., Moskała M., Polak J., Sujka W., Urbanik A. „Zastosowanie tomografii komputerowej do opracowania protezy CODUBIX na indywidualne zamówienie pacjenta”. *Acta Clinica et Morphologica*, 2/2012. s.10÷16.
4. Karbowski K., Urbanik A., Wyleźoł M. „Analiza obrazów i modelowanie wirtualne w konstruowaniu protez kości czaszki”. *Mechanik* 8–9(2010), s. 620÷622.
5. Maji P.K., Banerjee P.S., Sinha A., "Application of rapid prototyping and rapid tooling for development of patient-specific craniofacial implant: an investigative study". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2008) 36, pp. 510÷515.
6. Wyleźoł M. „Zastosowanie metod haptycznych w modelowaniu i analizach inżynierskich – przykłady”, *Mechanik* nr 11(2009), s. 948. ■