

REKONSTRUKCJA GEOMETRII OBIEKTÓW PRZESTRZENNYCH PRZY ZREDUKOWANEJ ILOŚCI DANYCH POMIAROWYCH

GEOMETRY RECONSTRUCTION OF THE THREE- DIMENSIONAL OBJECTS WITH LIMITED QUANTITY OF MEASUREMENT DATA

Budowa trójwymiarowych modeli używanych w systemach CAx, wymaga precyzyjnych danych geometrycznych. W zależności od aplikacji, konieczne jest pozyskanie (oprócz danych geometrycznych) dodatkowych danych takich jak: gęstość, tekstura powierzchni, itp. Autor prezentuje metody rekonstrukcji trójwymiarowych modeli w programach CAD i przedstawia koncepcję praktycznego zastosowania POD (Proper Orthogonal Decomposition). Trójwymiarowa rekonstrukcja POD bazuje na modach statystycznych opisujących obiekt 3D.

Słowa kluczowe: rekonstrukcja 3D, skanery 3D, oprogramowanie CAD, POD (Proper Orthogonal Decomposition).

The construction of three-dimensional models used in CAx systems, to require precision geometrical data of the real object is presented. Depending on application, it is necessary to obtain (besides geometrical dimensions) additional data such as: volume density, texture of the surface, etc. Author shows method of reconstruction 3D models in CAD software and presents conception of practicable Proper Orthogonal Decomposition (POD). The POD 3D reconstruction bases on the statistical modes which describe the 3D object.

Keywords: 3D reconstruction, 3D scanners, CAD software, Proper Orthogonal Decomposition (POD).

1. Wprowadzenie

Obecnie, wiele inżynierskich narzędzi CAx znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauki – między innymi w medycynie – tworząc nowe dyscypliny takie jak np. biomechanika, biocybernetyka, bioinżynieria, itd. Te interdyscyplinarne kierunki wykorzystują możliwości inżynierii odwrotnej, trójwymiarowego modelowania i symulacji, analizy wytrzymałościowej MES, jak również urządzeń do szybkiego prototypowania i obrabiarek NC.

Istotnym zagadnieniem w wielu aplikacjach jest akwizycja danych i obróbka trójwymiarowych modeli. Trójwymiarowe wirtualne modele posiadają wiele zastosowań. W medycynie są to: wizualizacja tkanek (modele oddają kształt i rozmiary poszczególnych organów), diagnostyka medyczna (np. wirtualna endoskopia), planowanie „przedchirurgiczne” (symulacje operacji chirurgicznych), analizie MES (np. wyznaczenie wytrzymałości kości przy osteoporozie). W większości zastosowań „czysto” medycznych, wystarczająca jest tylko wizualizacja. Technologie CAx wymagają znacznie dokładniejszych danych, umożliwiających wykonanie siatki MES, czy też wygenerowanie ścieżki narzędzia dla maszyny CNC.

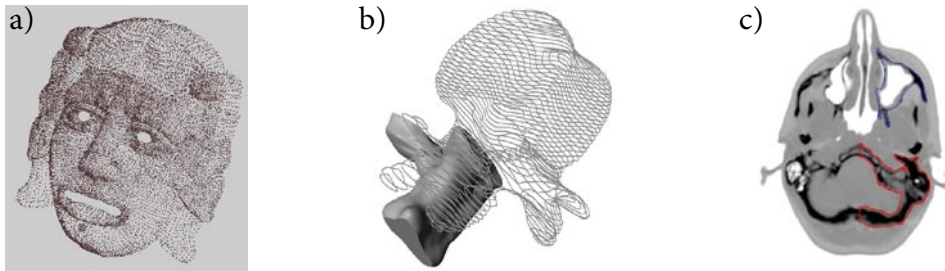
2. Metody rekonstrukcji modeli 3D

W zależności od dziedziny jak i aplikacji rekonstruowanego modelu 3D, stosuje się różne metody akwizycji danych pomiarowych. Dwie podstawowe grupy to urządzenia działające jako: stykowe lub bezstykowe.

W przemyśle maszynowym najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami są współrzędnościowe maszyny pomiarowe, ramiona pomiarowe (metody stykowe) oraz skanery laserowe i radarowe (metody bezstykowe). W innych gałęziach wykorzystuje się urządzenia wyspecjalizowane, np. w medycynie tomografy komputerowe CT, lub urządzenia obrazowania rezonansu magnetycznego NMR.

Rezultatem procesu pomiarowego są dane w różnej postaci [1] (rys. 1.): a) rozproszonej (tzw. chmura punktów), b) konturowej (tzw. krzywe spline), c) objętościowej (obrazy z rezonansu i tomografii komputerowej).

W celu otrzymania modelu wirtualnego należy dane pomiarowe przetworzyć korzystając z algorytmów odwzorowujących powierzchniowo lub bryłowo (objętościowo). Wybór odpowiedniego algorytmu jest istotny zarówno ze względu na przebieg samego procesu, jak i rezultat końcowy, którym może być siatka powierzchniowa, bryła czy też objętościowa siatka



Rys. 1. Przykłady danych pomiarowych: a) zapis rozproszony, b) zapis konturowy, c) zapis objętościowy
 Fig. 1. Examples of measuring data: a) disperse data, b) contour data (splines), c) volume data

MES. Poszczególne metody posiadają liczne ograniczenia a uzyskane efekty nie zawsze umożliwiają ich zastosowanie w programach CAx [3].

Najczęściej stosowane metody rekonstrukcji to:

- rekonstrukcja powierzchniowa – w procesie triangulacji na wejściowej chmurze punktów generuje się powierzchniową siatkę trójkątną. Przy obiektach o złożonym kształcie powstają liczne błędy, które uniemożliwiają wykonanie modelu bryłowego w programach CAD.
- rekonstrukcja bryłowa (operacja „Loft”) – współczesne systemy CAD umożliwiają zamianę danych konturowych w model bryłowy poprzez zastosowanie operacji „Loft”. Rezultatem takiej operacji jest powierzchnia typu NURBS. Wadą tego rozwiązania jest konieczność stosowania wielu krzywych prowadzących, względem których rozpinana jest powierzchnia, oraz złożoność procedury wynikająca z niedoskonałości algorytmów przy przetwarzaniu skomplikowanych kształtów geometrycznych.
- bezpośrednia generacja siatki MES – metoda możliwa do zastosowania, gdy dane pomiarowe są zapisane w postaci konturowej (szereg przekrojów). Metoda ta jest oparta na rekonstrukcji Delanuaya [7, 8, 9, 10], ogranicza się jednak tylko do MES i nie pozwala na obróbkę w programach CAD lub CAM.

3. Rekonstrukcja w oparciu o mody empiryczne

Przykłady przedstawione w poprzednim rozdziale głównie omawiają sposoby rekonstrukcji powierzchni obiektów, przy pełnej liczbie danych pomiarowych. Metod tych praktycznie nie można użyć w sytuacji gdy liczba danych jest ograniczona i niewystarczająca. Jest to szczególnie częsty przypadek w zastosowaniach medycznych, gdy jako dane wejściowe otrzymujemy szereg przekrojów (obrazów CT, NMR) lub zdjęć RTG.

Opisana poniżej metoda pozwala zrekonstruować trójwymiarowy model złożonego geometrycznie obiektu w oparciu o ograniczoną liczbę danych po-

miarowych (np. zdjęcia RTG wykonane w różnych płaszczyznach) oraz wiedzę uzupełniającą, w postaci trójwymiarowych modeli wzorcowych (przechowywanych w bazie danych).

Algorytm postępowania jest następujący: dwa zdjęcia RTG (w dwóch płaszczyznach) porównane są ze sztucznie wygenerowanymi obrazami DRR (modeli wzorcowych – z bazy danych). Na tej podstawie wybrany zostaje najbardziej zbliżony geometrycznie model 3D. Różnice wynikające z odrębnej budowy poszczególnych osobników korygowane są w procesie kalibracji i deformacji (przeptyły pikseli w znanych przekrojach przekłada się na cały model).

Do odbudowy geometrii 3D użyto rekonstrukcji „nisko-wymiarowej” („low-dimensional”), bazującej na metodzie POD (Proper Orthogonal Decomposition) [12], znanej również pod nazwą Karhunen-Loeve Decomposition (PCA).

Analizie POD poddano zestaw przekrojów (za przykład posłużyły obrazy ludzkiej głowy) w postaci czarno-białych bitmap o rozdzielczości i 100x100 pikseli, ułożonych promieniście wokół osi symetrii (rys. 2.).

Dla zestawu przekrojów (np. P=180) tworzona jest macierz wejściowa X o rozmiarze NxP (gdzie N liczba punktów bitmapy), i wyznaczana średnia:

$$x_i \rightarrow x_i - m \quad (1)$$

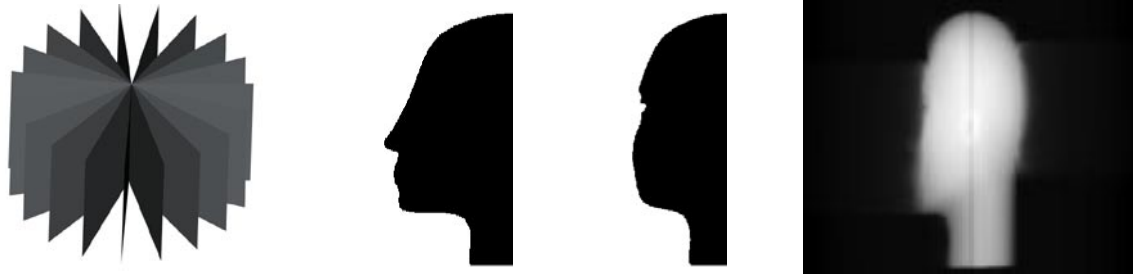
gdzie

$$m = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P x_i \quad (2)$$

Następnie tworzona jest macierz korelacji:

$$C = XX^T \quad (3)$$

i wyznaczane są wektory własne i wartości własne. Wektory własne w połączeniu z największymi wartościami własnymi określają największe różnice między poszczególnymi przekrojami. W celu rekonstrukcji modelu w oparciu o zestaw modów wykonuje się rzutowanie na przestrzeń własną:



Rys. 2. Układ poszczególnych przekrojów, przykładowe bitmapy i DRR

Fig. 2. Arrangement of input data slices, several bitmaps and DRR

$$x'_i = v^T x_i \quad (4)$$

gdzie x'_i - mody, v - wektor własny.

W wyniku dokonanej analizy otrzymano bitmapę przedstawiającą średnią wartość ze wszystkich przekrojów, zestaw modów opisujących poszczególne przekroje (tabela 1.), oraz poszczególne współczynniki (rys 3.). Do rekonstrukcji wykorzystano 15 modów, które dostarczają 99,04% informacji o geometrii.

Dla lepszego zilustrowania poszczególnych modów dokonano ich wizualizacji w środowisku trójwymiarowym. Poniżej przedstawiono trójwymiarową rekonstrukcję pierwszych pięciu modów dla modelu głowy (rys. 4.).

Każdy kolejny mod jest odpowiedzialny za inne części obiektu i dodając do wartości średniej poszczególne mody można otrzymać model o zadanej dokładności odwzorowania. Mod pierwszy przenosi informację dotyczącą wyoblenia głowy w płaszczyźnie pionowej. Mod drugi natomiast przechowuje dane dotyczące cech twarzy oraz części szyi i tyłu głowy. Każdy kolejny mod dostarcza coraz drobniejszych detali. Dzięki temu możliwe jest zrekonstruowanie modelu z wybranych części lub na określonym poziomie szczegółowości. Przy wyznaczeniu optymalnej liczby modów (różna dla różnych obiektów) można wykonać rekonstrukcję modelu „odcinając” niepożądane szумы informacyjne

(często spotykane przy danych rozproszonych), przy jednoczesnym zachowaniu dużej dokładności odwzorowania. W przypadku prezentowanej głowy liczba modów użytych do pełnej rekonstrukcji i eksportu do systemu CAD wyniosła 15 modów (rys. 5).

Końcowym rezultatem jest trójwymiarowy model bryłowy (rys. 6.), który można dowolnie obrabiać narzędziami znajdującymi się w programach CAx (np. budowa siatki MES, generowanie ścieżki narzędzia dla obrabiarek NC, itp.)

4. Wnioski

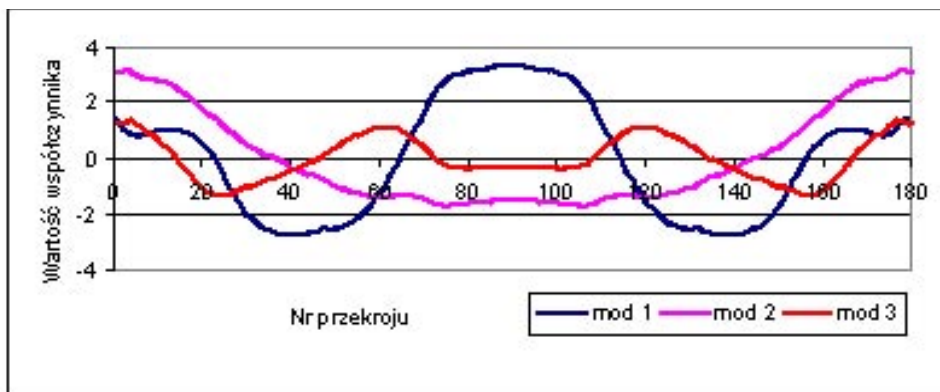
Na podstawie przeprowadzonych prób generowania modeli bryłowych można stwierdzić, że proste geometrycznie modele 3D pozwalają przejść od siatki powierzchniowej do modeli bryłowych lub wprost do trójwymiarowej siatki MES. Ze względu jednak na złożoności kształtu niektórych obiektów oraz niewystarczającej liczby danych pomiarowych często nie jest możliwe wykonanie trójwymiarowych modeli bryłowych a tym samym niemożność zastosowania w programach CAx.

Analiza modalna obiektów 3D umożliwia redukcję liczby parametrów koniecznych do jednoznacznego opisu geometrii poszczególnych modeli. Pozwala także na wyeliminowanie błędów pomiarowych („szумы” pomiarowe), oraz odbudowę modelu na zadanym poziomie szczegółowości.

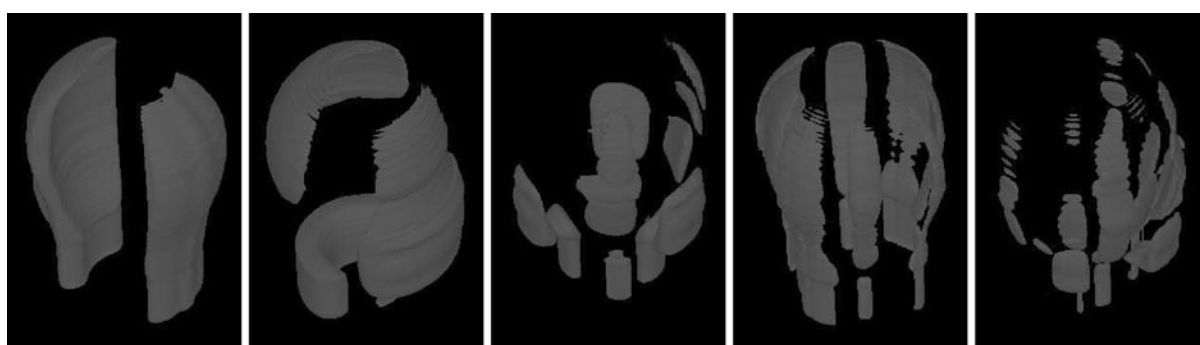
Tab. 1. Poziom odwzorowania poszczególnych modów

Tab. 1. Level of mapping individual modes

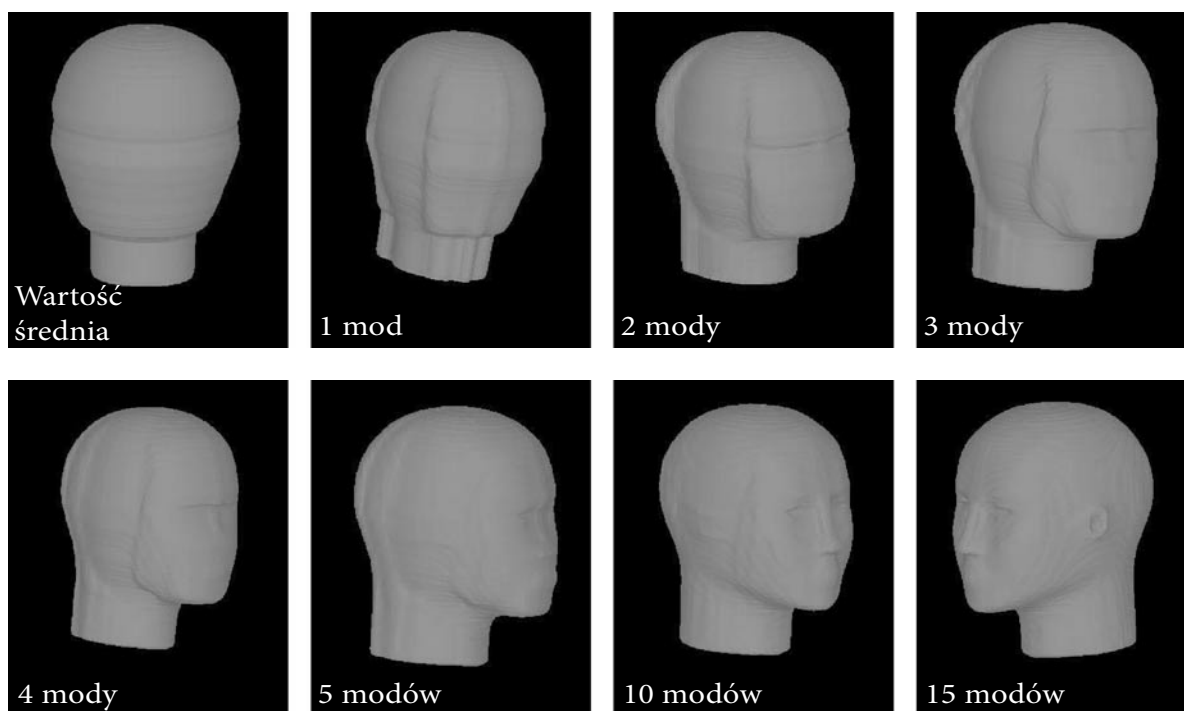
Mod	Udział modu w odwzorowywaniu [%]	Sumaryczny stopień odwzorowania [%]
1	46.88	46.88
2	30.07	76.95
3	6.56	83.52
4	5.74	89.26
5	2.65	91.91
6	1.72	93.63
7	1.40	95.03
8	1.08	96.11
9	0.87	96.98
10	0.53	97.51
11	0.51	98.02
12	0.34	98.36
13	0.28	98.64
14	0.22	98.86
15	0.17	99.04



Rys. 3. Wykres wartości współczynników dla poszczególnych przekroi (dla pierwszych trzech modów)
 Fig. 3. Coefficients values in individual slices



Rys. 4. Trójwymiarowa rekonstrukcja pięciu pierwszych modów
 Fig. 4. Three dimensional reconstructions the first five modes



Rys. 5. Trójwymiarowa rekonstrukcja modelu głowy dla różnej liczby modów
 Fig. 5. Three dimensional reconstructions human head for different number of modes

Zastosowanie metody opartej na porównaniu tradycyjnych zdjęć RTG z syntetycznymi zdjęciami DRR i bazy obiektów porównawczych, umożliwia wykonywanie precyzyjnych modeli CAD przy zredukowanej liczbie danych pomiarowych. Natomiast kalibracja i deformacja modelu, umożliwia wprowadzenie indywidualnych poprawek, charakterystycznych dla danego pacjenta.

Ponieważ metoda ta wykorzystuje powszechnie spotykane zdjęcia RTG, zatem nie wymaga specjalistycznych środków, co czyni tę metodę ogólnie dostępną i tanią.

Każdy nowo zrekonstruowany model może zostać wprowadzony do bazy danych, co pozwala go wykorzystać w kolejnych rekonstrukcjach. Dzięki temu można utworzyć bardzo bogatą trójwymiarową bazę antropometryczną (np, kręgów kręgosłupa).

5. Literatura

- [1] Projekt KBN 8T07A04621, kier T. Łodygowski: *Odkształcenia trzonów kręgów ludzkiego kręgosłupa w zależności od zmian ich własności konstytutywnych i zwyrodnieniowych*, 2001-2004.
- [2] Ogurkowska M.B., Morzyński M., Nowak M., Roszak R., Rychlik M., Stankiewicz W., Glema A., Łodygowski T., Wierszycki M.: *The Interaction of the L4-L5 spinal segments by FEM analysis. Part 1. Geometrical data acquisition and validation*. 13th Conference of the Society of Biomechanics, pp.98. Wrocław, 2002.
- [3] Rychlik M.: *Sposoby uzyskiwania i przetwarzania geometrii złożonych obiektów 3D*, ZNPP, Nr 53: 53-58. Poznań, 2001.
- [4] Edelbrunner H., Mucke E.P.: *Three Dimensional Alpha Shape*, ACM Transaction on Graphics, Vol. 13, n.1, 1994, s. 43–72.
- [5] Lorensen W., Cline H., *Marching Cube: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm*, Computer – Graphics, 1987, Vol. 21 n. 4, 2000, s. 163–170.
- [6] Kobbelt L., Botsch M.: *An interactive approach to point cloud triangulation*, Eurographics, Vol. 19 n. 3, 2000.
- [7] Boissonnat J.-D., Geiger B.: *Three-dimensional reconstruction of complex shapes based on the Delaunay triangulation*, Report 1697, INRIA Sophia – Antipolis, Valbonne, France, 1992.
- [8] Boissonnat J.-D., Geiger B.: *Three-dimensional reconstruction of complex shapes based on the Delaunay triangulation*, Biomedical Image Processing and Biomedical Visualization, San Jose CA, Vol. 1905, part 2, 1993, s. 964–975.
- [9] Boissonnat J.-D.: *Shape reconstruction from planar cross-sections*, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 44, 1988, pp. 1–29.
- [10] Geiger B.: *Three-dimensional modeling of human organs and its application to diagnosis and surgical planning*, Report 06902, INRIA Sophia – Antipolis, France, 1993.
- [11] Benameur S., Mignotte M., Parent S., Labelle H., Skalli W., De Guise J. A.: *3D Biplanar Reconstruction of Scoliotic Vertebrae Using Statistical Models*, 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. II-577-582, 8-14 december 2001.
- [12] Sirovich L.: *Turbulence and the Dynamics of Coherent Structure: I, II and III*, Quarterly Applied Mathematics, 45, pp. 561, 1987.

Mgr inż. Michał RYCHLIK

Politechnika Poznańska

Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Zakład Metod Projektowania Maszyn

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,

tel.: (061) 665-21-67

e-mail:rychlik@stanton.ice.put.poznan.pl
