

REVERSE ENGINEERING DATA PROCESSING OF GEAR-WHEEL FOR FEM ANALYSIS

Tadeusz Markowski, Olimpia Markowska, Sławomir Miechowicz

Rzeszow University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautic
Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Poland
tel.: +48 17 8651642, fax.: +48 17 8651150
e-mail: tmarkow@prz.edu.pl
e-mail: olimpia.markowska@wp.pl
e-mail: smiechow@prz.edu.pl

Abstract

The article presents the method of Reverse Engineering (RE) data processing of the gear-wheel geometry for FEM analysis. Reverse Engineering techniques allow obtaining the geometry of the real parts on every stage of their exploitation during the operating period of the product. RE digitizing may become an important tool in the field of simulation and FEM analysis. On the contrary to CAD models, used for the verification of prototype models and the development of the product, the RE model based FEM analysis is very efficient method for real parts, where the geometry and part properties can change with time and service conditions. Computations give more reliable results if they are based on data gathered from true physical objects instead of theoretical CAD models. The analysis data could be very useful to decrease the working expenses of critical parts or the whole product. The specific fields of interest could be a flaw detection, failure analysis, inspection of assemblies, investigations of material properties changes as density distribution, etc.

Keywords: transport, Reverse Engineering, modelling, FEM

WYKORZYSTANIE TECHNIK INŻYNIERII ODWROTNEJ DO ANALIZY MES KÓŁ ZĘBATYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę wykorzystania technik inżynierii odwrotnej do przygotowania danych do analizy MES kół zębatych. Techniki inżynierii odwrotnej umożliwiają określenie geometrii obiektu rzeczywistego, części maszyn, od modelu prototypu do gotowego produktu na każdym etapie eksploatacji. Inżynieria odwrotna może stać się bardzo przydatnym narzędziem na polu symulacji i analizy MES. Modele CAD do analizy MES są wykorzystywane do weryfikacji projektu w pracach nad rozwojem gotowego produktu na etapie prototypowania. Modele elementów do analizy MES, uzyskane metodami inżynierii odwrotnej na podstawie rzeczywistych części maszyn czy urządzeń, uwzględniają rzeczywiste warunki związane z eksploatacją. Jest to bardzo efektywna metoda diagnozowania i analizy problemów występujących podczas pracy maszyny. Rzeczywiste własności oraz geometria części maszyn mogą ulegać zmianom z upływem czasu. W ciągu całego okresu eksploatacji może to znacząco wpływać na pracę maszyny. Uwzględnienie tych czynników w analizie MES, dzięki modelom tworzonym na bazie eksploatowanych elementów maszyn, pozwala na uzyskanie bardziej dokładnych danych elementu oraz poprawę warunków obsługi i eksploatacji maszyny. Można dzięki temu ograniczyć koszty eksploatacji i napraw krytycznych, bardzo kosztownych elementów maszyny. Metody inżynierii odwrotnej mogą być szczególnie przydatne w diagnozowaniu uszkodzeń, pęknięć, zużycia części maszyn z elementami wewnętrznymi, jak kanały, komory, itp., złożonych mechanizmów, oraz badań zmian własności materiałów itp.

Słowa kluczowe: transport, inżynieria odwrotna, modelowanie, MES

1. Wstęp

Inżynieria odwrotna (*ang. Reverse Engineering - RE*) znajduje coraz szersze zastosowanie w dziedzinach związanych z produkcją i eksploatacją silników spalinowych oraz układów napędowych. Dobór odpowiedniej metody akwizycji danych jest szczególnie istotny dla elementów maszyn o złożonych kształtach. Można wyróżnić kilka metod uzyskiwania danych [1, 2], jednak do przygotowania danych do analizy MES najbardziej efektywna jest tomografia komputerowa [3]. Główną zaletą tej techniki jest możliwość otrzymania zewnętrznej i wewnętrznej geometrii badanego obiektu z dużą dokładnością [4, 5]. Przykładem takiego zastosowania może być część zespołu regulatora prędkości obrotowej silnika lotniczego pokazana na Rys. 1.



Rys. 1. Zdjęcie koła zębatego przekładni regulatora prędkości obrotowej silnika AI-14RA użytego do badań
Fig. 1. The photo of gear wheel of speed governor drive of the AI-14RA engine as a tested object

Obróbka danych otrzymanych z tomografu poprzez specjalistyczne oprogramowanie umożliwi otrzymanie plików o standardach typowych dla systemów CAD/CAM/CAE [6].

Głównym celem inżynierii odwrotnej jest stworzenie dokładnego modelu, kopii funkcjonalnej, istniejącego elementu, części maszyny czy urządzenia [1, 2]. Jest to szczególnie przydatne w przypadku obiektów, których dokumentacja techniczna już nie istnieje, lub z pewnych względów nie jest osiągalna. Ma to miejsce w przypadku konieczności wykonania nietypowej części maszyny, modyfikacji z powodów eksploatacyjnych czy stworzenia modelu CAD do dalszego rozwoju produktu. Istotne ze względów eksploatacyjnych są również badania diagnostyczne pracujących, rzeczywistych części maszyn. Metody inżynierii odwrotnej mogą być szczególnie pomocne w diagnozowaniu uszkodzeń, pęknięć, zużycia części maszyn z elementami wewnętrznymi, jak kanały, komory, itp., złożonych mechanizmów, oraz badań zmian własności materiałów itp., gdzie inne metody pomiarowe, ze względu na złożoność konstrukcji, są nieprzydatne. Przykładem mogą być urządzenia w obudowach nierozbieralnych lub trudnorozbieralnych.

Wśród technik digitalizacji obiektów trójwymiarowych w zastosowaniach przemysłowych można wyróżnić metody dotykowe i optyczne – do odwzorowywania powierzchni zewnętrznych oraz tomografię komputerową – do odwzorowywania elementów zawierających cechy wewnętrzne. W zastosowaniach związanych z produkcją i eksploatacją silników spalinowych tomografia komputerowa wydaje się być najbardziej odpowiednia. Dane obiektu w postaci rastrowej można przetworzyć do trójwymiarowej postaci chmury punktów, a następnie modelu powierzchniowego w formacie STL. Stanowi on format wejściowy do wytworzenia fizycznego modelu wybraną metodą szybkiego prototypowania (*ang. Rapid Prototyping - RP*), a także gotowego elementu maszyny jako części zamiennej np. metodą odlewania próżniowego.

Dane uzyskane przy użyciu inżynierii odwrotnej zawierają informacje o obiekcie rzeczywistym w przeciwieństwie do wirtualnego projektu CAD. Mogą przez to zawierać informacje o warunkach współpracy poszczególnych części maszyny. Na ich podstawie można wykryć ewentualne błędy konstrukcyjne, technologiczne, czy wady materiałowe. Uwzględnione wtórnie w analizach MES mogą wpłynąć na poprawę jakości, optymalizację konstrukcji, warunków eksploatacyjnych maszyny, czy rozwiązanie trudnych do wykrycia problemów z urządzeniem, które wystąpiły już w trakcie eksploatacji, a nie zostały wykryte na etapie przedprodukcyjnym. Można dzięki temu ograniczyć koszty eksploatacji i napraw krytycznych, bardzo kosztownych elementów maszyny.

Nie wszystkie elementy maszyn można jednak badać tą metodą. Istotnym ograniczeniem jest wielkość badanego obiektu oraz rodzaj materiału, z jakiego dany element jest zbudowany. Zagadnienie to zostało szczegółowo opisane w [5, 9].

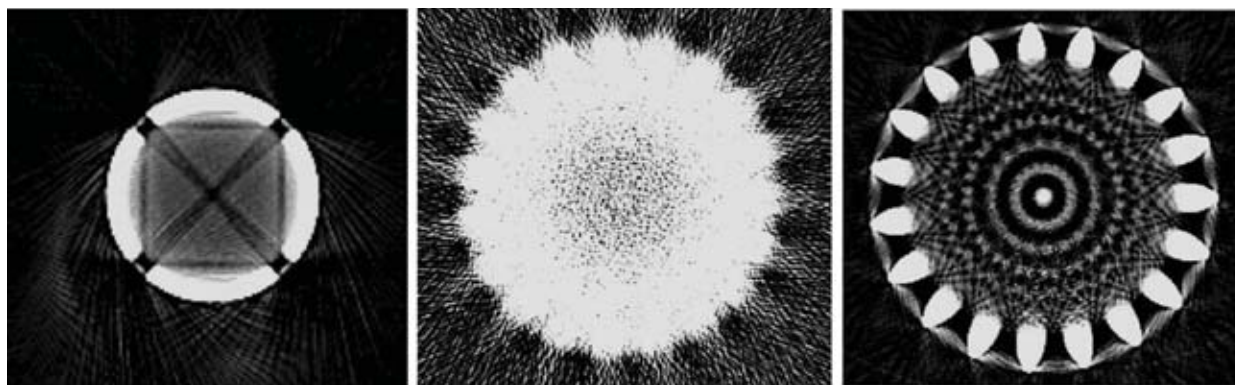
2. Etapy przygotowania modelu

Modele uzyskane przy użyciu inżynierii odwrotnej są bardziej skomplikowane, zawierają więcej elementów i inną strukturę niż modele CAD. W przeciwieństwie bowiem do nich są uzyskiwane metodami dyskretnymi. W wyniku pomiarów technikami optycznymi i dotykowymi można uzyskać w sposób bezpośredni trójwymiarową chmurę punktów [7]. W przypadku tomografii komputerowej dane są uzyskiwane metodą pośrednią. Wynik pomiaru ma postać zbioru obrazów rastrowych. Każdy obraz zawiera informację z pojedynczej warstwy skanowanego obiektu. Składa się ona z macierzy pojedynczych wokseli. Element macierzy stanowi matematyczną interpretację gęstości HU – Housfiolda w odniesieniu do skali odcieni szarości obrazu. Jego wartość jest proporcjonalna do współczynnika osłabienia promieniowania rentgenowskiego po przejściu przez badany obiekt [8]. Wygenerowany w trakcie rekonstrukcji warstw zbiór obrazów może być źródłem danych do wizualizacji 3D objętościowej VR (*ang. Volume Rendering - VR*) lub powierzchniowej. Pozwalają one na tym etapie na kontrolę poprawności przeprowadzonego badania. Wizualizacja powierzchniowa obiektu zawiera obszary o tej samej gęstości, tj. z zakresu wartości HU. Do uzyskania siatki MES niezbędna jest transformacja danych do modelu wektorowego. Obróbka cyfrowa obrazu rastrowego pozwala wyodrębnić zbiór punktów stanowiących zarys krawędzi w danym przekroju badanego obiektu.

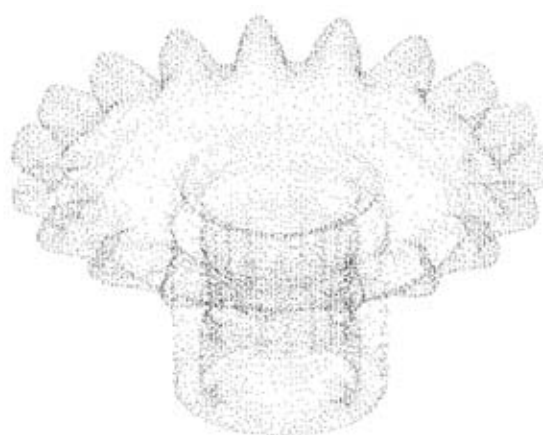
Rekonstrukcja obrazu 2D wiąże się z oddzieleniem fragmentów obiektu od występujących zniekształceń obrazu, szumu oraz tła. W metodzie warstwowej etap określenia krawędzi obiektu może być połączony z wyznaczeniem konturu wektorowego obiektu. Zabieg ten jest przeprowadzany dla całego zbioru obrazów badanego obiektu. Po opisaniu w procesie segmentacji maski obiektu następuje określenie wokseli brzegowych obiektu w całym zbiorze. Wyliczone współrzędne punktów krawędzi stanowią reprezentację obiektu w postaci chmury punktów. Największy problem wpływający na dokładność pomiarów stanowią artefakty, tj. zakłócenia obrazu wynikające z dużej gęstości materiału badanego obiektu. Zagadnienie korekcji artefaktów w obrazowaniu części maszyn o dużej gęstości dla potrzeb inżynierii odwrotnej zostało opisane w [9]. Technika pomiaru została opisana w [3, 6, 8]. Na Rys. 2. zostały przedstawione obrazy rastrowe badanego obiektu wygenerowane przy użyciu tomografu spiralnego Siemens Sensation 10.

Na Rys. 3. przedstawiono chmurę punktów badanego obiektu wygenerowaną na podstawie danych uzyskanych metodą spiralnej tomografii komputerowej.

Chmura punktów jest najczęściej stosowanym formatem zapisu danych w technikach RE. Stanowi interfejs do zapisu wektorowego systemów CAD [10]. Format pliku danych zależy od przewidywanego zastosowania modelu. Otrzymany model 3D może służyć do wytworzenia fizycznego elementu jako kopii badanej części wybraną techniką RP. Istnieje również możliwość późniejszego wytworzenia części funkcjonalnej z oryginalnego materiału metodą odlewania próżniowego. Może ona posłużyć do weryfikacji jakościowej wyników analiz MES badanego obiektu przy zastosowaniu metody elastoptycznej.



Rys. 2. Wybrane obrazy 2D badanego elementu w postaci rastrowej
Fig. 2. The chosen 2D raster imaging of tested object

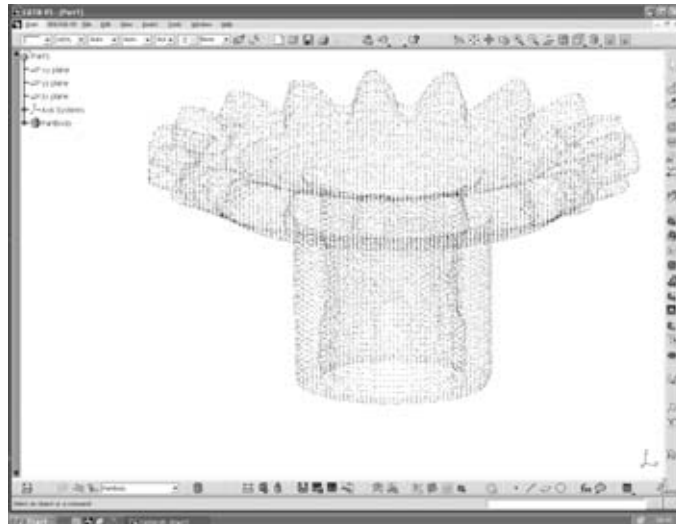


Rys. 3. Badany obiekt w postaci chmury punktów
Fig. 3. The point cloud of tested object

3. Model do analizy MES

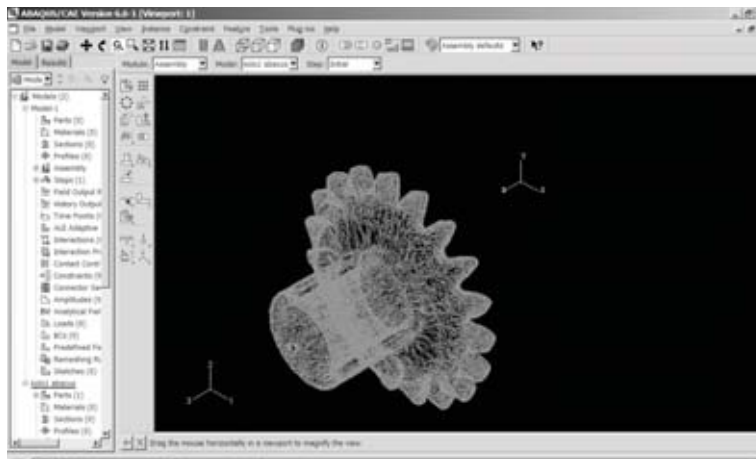
Przetwarzanie zbiorów obrazów rastrowych może być wykonane przy użyciu ogólnie dostępnego oprogramowania z zastosowaniem skryptów lub aplikacji specjalizowanych. Do przetwarzania modeli w postaci chmur punktów wybór jest bardziej ograniczony. Do analiz i obróbki danych został wybrany, dostępny program Catia v5. Charakteryzuje się dużą paletą narzędzi i funkcji do obróbki chmur punktów oraz intuicyjnym interfejsem danych do programu Abacus. Na Rys. 4. przedstawiono obraz badanego obiektu w trakcie przygotowania modelu siatkowego przy użyciu programu Catia.

Do wyznaczenia modelu siatkowego konieczne jest określenie powierzchni badanego obiektu. Postać chmury punktów jako zbioru ich współrzędnych XYZ nie definiuje jednoznacznie kształtu elementu. Nie występuje informacja o wzajemnych zależnościach, czy połączeniach punktów. Błędna interpretacja cech powierzchni może wpływać na przydatność modelu do dalszych analiz. Większość dostępnych aplikacji do obróbki chmur punktów nie jest w stanie automatycznie rozpoznać i przyporządkować punktów wewnętrznych i zewnętrznych do odpowiednich powierzchni obiektu [7]. Konieczna jest interwencja operatora, jego znajomość budowy modelu oraz cech powierzchni obiektu. Często występuje więc konieczność wykonania dodatkowych, pomocniczych operacji obliczeniowych. Otrzymany tym sposobem model cechuje duża dokładność wymiarowa. Nie występują błędy dyskretyzacji modelu jak w przypadku obiektów generowanych w systemach CAD [10]. Nie występuje również konieczność lokalnego zagęszczania siatki MES.



Rys. 4. Przygotowanie modelu przy użyciu programu Catia v5
Fig. 4. The tested object model data preparation with Catia v5

Na Rys. 5. przedstawiono model badanego obiektu do analizy MES przy użyciu programu Abacus.



Rys. 5. Model badanego obiektu do analizy MES – program Abacus
Fig. 5. The tested object model for FEM analysis – Abacus program

4. Wnioski

Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej umożliwia dokładne obrazowanie elementów maszyn zarówno ich powierzchni zewnętrznych, jak i przestrzeni wewnętrznych. Przestrzeń pomiarowa oraz parametry stosowanego skanera pozwalają na pomiar części maszyn o średniej gęstości [9] oraz całych zespołów nawet do 2m długości.

Tomografia komputerowa może być szczególnie użyteczna w przypadku skomplikowanych kształtów części czy złożonych podzespołów maszyn [6].

Dla części ze stopów tytanu napięcie lampy rentgenowskiej powinno wynosić powyżej 450kV [5]. Stopy aluminium dosyć powszechnie stosowane w budowie silników charakteryzują się relatywnie niską gęstością. Pomiar elementów o grubości do 300 mm przy napięciu lampy rtg 450kV nie stanowi problemu [5, 9].

Możliwe jest przygotowanie modelu do analizy MES na podstawie danych uzyskanych w wyniku inżynierii odwrotnej. Nie jest to jednak proces automatyczny, składa się z kilku etapów. Do wykonania poprawnego modelu konieczna jest znajomość budowy badanego obiektu. Jest to

szczególnie istotne na etapie rekonstrukcji obrazów rastrowych. Umożliwia to poprawną identyfikację poszczególnych powierzchni obiektu, cech struktury oraz artefaktów. Dobrą regułą przetwarzania danych jest korekcja błędów występujących na danym etapie obróbki cyfrowej na tym samym etapie. Przeniesienie modelu z błędami bardzo utrudnia, a w niektórych przypadkach uniemożliwia wykorzystanie modelu do analizy MES. Otrzymane wyniki mogą być wtedy obciążone dużymi błędami i poprzez brak odniesienia do modelu rzeczywistego nie odzwierciedlać stanu badanego obiektu.

Modele do badań MES uzyskane metodami dyskretnymi mogą wymagać znacznych mocy obliczeniowych zarówno w trakcie akwizycji, przetwarzania danych oraz analizy MES. Jednak ze względu na szybki rozwój technik komputerowych oraz optymalizację algorytmów przetwarzania danych problem ten traci na znaczeniu.

Tomografia komputerowa dzięki swojej dostępności może stać się ważnym narzędziem do symulacji i analiz MES. Stanowi również źródło danych w nieniszczących badaniach materiałów, kontroli jakości oraz inżynierii odwrotnej [3].

Literatura

- [1] Gawlik, J., Karbowski, K., *Inżynieria odwrotna (Reverse Engineering) w wytwarzaniu wyrobów o złożonym kształcie*, Konferencja Nowoczesne techniki inżynierskie w szybkim rozwoju wyrobów, Poznań 2004.
- [2] Motavalli, S., *Review of Reverse Engineering Approaches*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40/2000, Vol. 35, No 1-2, 2000.
- [3] Miechowicz, S., Budzik, G., Cygar, M., Truszkiewicz, A., *Zastosowanie tomografii komputerowej w Reverse Engineering*, Prace Naukowe IT PWSZ w Nowym Sączu, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu, 2005.
- [4] Urbanik, A., Miechowicz, S., *Przestrzenna analiza dokładności obrazowania tomografu medycznego, Spatial Analysis of CT Accuracy*, Polish Journal of Radiology, Vol. 69, suppl. 1, 372(319), Mikołajki 2004.
- [5] Markowski, T., Miechowicz, S., *Czynniki wpływające na rozdzielczość przestrzenną CT dla potrzeb Reverse Engineering*, Wyd. Akademii Morskiej w Gdyni, 2005.
- [6] Miechowicz, S., Sobolak, M., *The Efficiency of Utilization of Siemens Sensation 10 CT Scanner for Reverse Engineering*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn I Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej nr 85/2004, Wrocław 2004.
- [7] Xinming, L., Zhongin, L., Tian, H., Ziping, Z., *A Study of a Reverse Engineering System Based on Vision Sensor for Free-Form Surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40/2001, 2001.
- [8] Faridani, A., *Introduction to the Mathematics of Computed Tomography*, MSRI Publications, 47, 2003.
- [9] Markowski, T., Miechowicz, S., Markowska, O., *Some aspects of CT data acquisition for Reverse Engineering*, Prace Zachodniego Centrum Akademii Transportu Ukrainy, Lwów, Wydawnictwo "Logos" Lwów, 2006.
- [10] Tai, C., Huang, M., *The processing of data points basing on design intent in reverse engineering*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 2000.