

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



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Inżynieria odwrotna i metody dyskretyzacji obiektów fizycznych

Reverse engineering and discretization methods of physical objects

MACIEJ SZELEWSKI
 MICHAŁ WIECZOROWSKI*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.584

Inżynieria odwrotna, jest odwrotnym podejściem do inżynierii w ujęciu tradycyjnym. Jeżeli tradycyjna inżynieria jest procesem przebiegającym od pomysłu, to inżynieria odwrotna jest procesem przebiegającym od fizycznego produktu, którego wszystkie składowe są szczegółowo analizowane i rozwijane, do nowego fizycznego produktu w takiej samej bądź ulepszonej postaci.

SŁOWA KLUCZOWE: inżynieria odwrotna, dyskretyzacja, skaner 3D

Reverse engineering is the reverse approach in the traditional engineering. If the traditional engineering is a process from the idea to a physical product, the reverse engineering is a process from physical product, which all components are carefully analyzed and developed into a new physical product in the same or improved form.

KEYWORDS: reverse engineering, discretization, 3D scanner.

Inżynieria odwrotna obecnie znajduje bardzo szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach naszego życia. Współcześnie funkcjonuje ona równolegle z inżynierią tradycyjną.

Pierwszym etapem w procesie inżynierii odwrotnej jest pozyskanie i analiza informacji, czyli dyskretyzacja geometrii elementu. Dyskretyzacja, nazywana też digitalizacją lub kwantowaniem, to zamiana danych analogowych na postać cyfrową, możliwą do zapamiętania w pamięci komputera.

W przypadku dyskretyzacji geometrii elementu, jako dane analogowe należy rozumieć geometrię elementu, którą trzeba przetworzyć na postać cyfrową, czyli zamienić na punkty o współrzędnych (x, y, z) zapisane w formie cyfrowej dla komputera.

Geometrię elementu można doprowadzić do postaci cyfrowej różnymi technikami. Współczesny rozwój wielu dziedzin nauki oraz postęp techniczny sprawiają, że mamy do dyspozycji wiele różnych metod i urządzeń dyskretyzujących geometrię elementu. Ogólnie metody dyskretyzacji geometrii elementów fizycznych można podzielić na metody stykowe – narzędzie, medium dyskretyzujące podczas dyskretyzacji znajduje się w styku z powierzchnią elementu, metody bezstykowe – narzędzie, medium dyskretyzujące podczas dyskretyzacji nie jest w styku z powierzchnią elementu oraz metody hybrydowe, które łączą w sobie powyższe metody.

Definicja inżynierii odwrotnej

Inżynieria odwrotna (ang. Reverse Engineering – RE), jest odwrotnym podejściem do inżynierii w ujęciu tradycyjnym. Jeżeli tradycyjna inżynieria jest procesem przebiegającym od pomysłu, który generuje potrzebę do fizycznego produktu, to inżynieria odwrotna jest procesem przebiegającym od fizycznego produktu, którego wszystkie składowe są szczegółowo analizowane i rozwijane, do nowego fizycznego produktu w takiej samej bądź ulepszonej postaci. Analizując literaturę z zakresu inżynierii odwrotnej, można spotkać się z wieloma jej opisami, czy też definicjami, które są słuszne (prawdziwe) dla tego obszaru nauki i techniki, jaki poruszany jest w danej pozycji literaturowej [1, 5, 8].

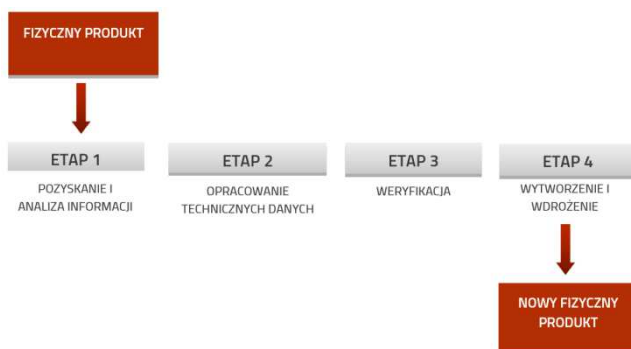
Pomimo różnych definicji, opisów czy też określeń terminu inżynieria odwrotna, można sformułować ogólną jej definicję w brzmieniu: **inżynieria odwrotna to proces pozyskiwania informacji o fizycznym produkcie oraz ich analizowania i przetwarzania w celu opracowania technicznych danych i wytworzenia nowego produktu w takiej samej bądź ulepszonej postaci.**

Tak pojmowane znaczenie inżynierii odwrotnej daje się uschematyzować. Ogólny, poglądowy schemat procesu inżynierii odwrotnej przedstawiony został na rysunku 1.

W procesie inżynierii odwrotnej na początku mamy fizyczny produkt, który należy odtworzyć, skopiować czy też

*dr inż. Maciej Szelewski (msz@ita-polska.com.pl), prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski (michal.wieczorowski@put.poznan.pl)

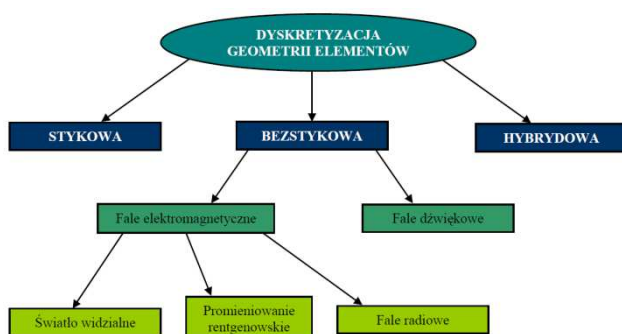
ulepszyć. Dokonuje się tego w czterech etapach, z których pierwszy to etap pozyskania o produkcie wszelkich informacji niezbędnych i ułatwiających realizację zadania projektowego. Zebrane informacje posłużą do opracowania technicznych danych (np. schematy, algorytmy, rysunki czy modele cyfrowe), co realizowane jest w drugim etapie procesu inżynierii odwrotnej. W kolejnym etapie opracowane dane techniczne należy poddać weryfikacji, czy są one poprawne i wystarczające, aby wytworzyć i wdrożyć nowy produkt. I właśnie wytworzenie i wdrożenie są w ostatnim, czwartym etapie procesu inżynierii odwrotnej. W wyniku przeprowadzenia całego procesu na końcu otrzymujemy, w zależności od celu i wymagań postawionych na początku całego procesu projektowego, taki sam nowy czy też ulepszony produkt. W procesie inżynierii odwrotnej poszczególne etapy są realizowane w ściśle określonym porządku i są wzajemnie powiązane. Każdy etap jest bardzo istotny i powodzenie całego procesu zależy od dokładności i jakości opracowywanych informacji czy danych w kolejnych etapach [8].



Rys. 1. Ogólny poglądowy schemat procesu inżynierii odwrotnej [8]

Metody dyskretyzacji geometrii obiektów

Pierwszym etapem w procesie inżynierii odwrotnej jest pozyskanie i analiza informacji, czyli w zastosowaniu do inżynierii produkcji – dyskretyzacja geometrii elementu. Dyskretyzacja, nazywana też digitalizacją lub kwantowaniem, to zamiana danych analogowych na postać cyfrową, możliwą do zapamiętania w pamięci komputera. W przypadku dyskretyzacji geometrii elementu, jako dane analogowe należy rozumieć geometrię elementu, którą trzeba przetworzyć na postać cyfrową, czyli na przykład zamienić na punkty o współrzędnych (x, y, z) zapisane w formacie czytelnym dla komputera.



Rys. 2. Podział metod dyskretyzacji elementów [8]

Geometrię elementu można doprowadzić do postaci cyfrowej różnymi technikami. Współczesny rozwój wielu dziedzin nauki oraz postęp techniczny sprawiają, że mamy do dyspozycji wiele różnych metod i urządzeń dyskretyzujących kształt elementu. Podział metod dyskretyzacji geometrii

elementów przedstawia rysunek 2. Ogólnie metody dyskretyzacji geometrii elementów fizycznych można podzielić na dyskretyzację stykową – narzędzie, medium dyskretyzujące podczas dyskretyzacji znajduje się w styku z powierzchnią elementu, dyskretyzację bezstykową – narzędzie, medium dyskretyzujące podczas dyskretyzacji nie jest w styku z powierzchnią elementu oraz dyskretyzację hybrydową, która łączy w sobie dyskretyzację bezstykową i stykową. Wybór metody dyskretyzacji danego elementu nie jest dowolny, lecz zdeterminowany przez różne czynniki. Zależy on przede wszystkim od elementu, z jakim mamy do czynienia, jego właściwości czy gabarytów. Oczywiście jest, że do dyskretyzacji elementu, który pod wpływem nawet niewielkiego nacisku zmienia swoją geometrię, nie użyjemy metody stykowej. Inne również ważne czynniki brane pod uwagę podczas wyboru metody dyskretyzacji to czas i dokładność. Jeśli zależy nam bardziej na czasie niż dokładności, to wybierzemy metodę bezstykową, która w stosunkowo krótkim czasie pozwala uzyskać pełną informację o geometrii obiektu, czyni to jednak kosztem dokładności. Większe dokładności uzyskamy, stosując metody stykowe, jednak czas dyskretyzacji wydłuża się [3, 4].

Metody stykowe

Istotą dyskretyzacji geometrii obiektów metodami stykowymi jest bezpośredni kontakt urządzenia dyskretyzującego z powierzchnią elementu. W urządzeniach stykowych wykorzystuje się głowice wyposażone w końcówki pomiarowe, które w sposób ręczny lub automatyczny stykają się z powierzchnią dyskretyzowanego elementu, zbierając informację o jego geometrii. Informacja ta rejestrowana jest w postaci punktów pomiarowych zbieranych sekwencyjnie. To sprawia, że metody te w odniesieniu do metod bezstykowych są rozciągnięte w czasie. Jest to niewątpliwie ich wadą, natomiast zaletą metod stykowych jest ich dokładność. Najdokładniejsze urządzenia stykowe (współrzędnościowe maszyny pomiarowe) są dokładniejsze o rząd wielkości od najdokładniejszych urządzeń działających w oparciu o metody bezstykowe. W metodach stykowych kontakt urządzenia z dyskretyzowaną powierzchnią powoduje pewien nacisk, pojawienie się siły. Zatem metody te mają ograniczone zastosowanie w przypadku elementów wykonanych z materiałów miękkich, których geometria pod wpływem nacisku ulega zniekształceniu.



Rys. 3. Przenośna współrzędnościowa maszyna pomiarowa HandyPROBE firmy Creaform [10]

Wśród urządzeń do dyskretyzacji geometrii obiektów działających w oparciu o metody stykowe można wymienić: proste i mniej dokładne ręczne digitizery czy ramiona pomiarowe oraz bardziej dokładne współrzędnościowe maszyny pomiarowe. Rysunek 3 prezentuje przykład stykowego urządzenia firmy Creaform o nazwie HandyPROBE. Urządzenie to jest określane jako przenośna współrzędnościowa maszyna pomiarowa i działa w oparciu o zasadę triangulacji. System składa się z:

- ręcznego wskaźnika zakończonego końcówką pomiarową,

- urządzenia śledzącego C-Tack emitującego światło podczerwone,
- magnetycznych znaczników jako układ odniesienia,
- jednostki sterującej wraz z oprogramowaniem.

Metody bezstykowe

Obecnie na rynku dostępnych jest bardzo wiele różnorodnych urządzeń pozwalających dyskretyzować element bezstykowo. Zaletą urządzeń wykorzystujących metody bezstykowe jak brak fizycznego kontaktu urządzenia dyskretyzującego z powierzchnią elementu. Metody te zaliczane są do metod stosunkowo szybkich, ponieważ w jednym cyklu dyskretyzacji otrzymujemy dużą ilość informacji, co przekłada się na całkowity czas dyskretyzacji elementu. Niestety pomimo dużego postępu w obszarze sensorów optycznych i mikroprocesorów sygnałowych, w dalszym ciągu dokładności najdokładniejszych urządzeń wykorzystujących metody bezstykowe są niższe o rząd wielkości od najdokładniejszych urządzeń wykorzystujących metody stykowe (współrzędnościowe maszyny pomiarowe). Inne wady metod bezstykowych (głównie wykorzystujących światło białe) to konieczność odpowiedniego przygotowania powierzchni transparentnych i błyszczących (pokrycie powierzchni substancją matującą) – wrażliwość na refleksy świetlne.

Wśród metod bezstykowych możemy wyróżnić metody wykorzystujące różne zakresy widma fal elektromagnetycznych (światło widzialne, promieniowanie rentgenowskie, fale radiowe) oraz metody oparte na falach dźwiękowych.

■ Metody wykorzystujące fale elektromagnetyczne

Metody dyskretyzacji geometrii elementów wykorzystujące fale elektromagnetyczne stanowią najliczniejszą i najbardziej zróżnicowaną grupę wśród wszystkich znanych metod. W inżynierii produkcji do dyskretyzacji geometrii elementów, najczęściej wykorzystuje się metody oparte na świetle widzialnym. W metodzie tej dyskretyzacja odbywa się poprzez pomiar światła odbitego od powierzchni dyskretyzowanego elementu. Dostępne obecnie metody dyskretyzacji działające w oparciu o światło widzialne można podzielić na metody aktywne oraz metody pasywne. Różnica między tymi metodami polega na tym, że w metodach pasywnych, w przeciwieństwie do metod aktywnych, nie wykorzystuje się dodatkowego źródła oświetlenia, a jedynie naturalne źródło światła.



Rys. 4. Skaner laserowy HandySCAN 3D firmy Creaform [10]

■ Skanowanie laserowe

Jednym z najbardziej popularnych urządzeń wykorzystywanych do bezstykowej dyskretyzacji geometrii elementów

są skanery laserowe. Rysunek 4 prezentuje przykład urządzenia w którym zastosowano technologię laserową. Jest to skaner 3D HandySCAN firmy Creaform. W urządzeniu tym układ krzyży laserowych rzutowany jest na powierzchnię dyskretyzowanego elementu. Zespół dwóch kamer obserwuje wzór laserowy i przesyła obraz do oprogramowania. Następnie w oparciu o zasadę triangulacji obliczane są współrzędne punktów leżących na powierzchni dyskretyzowanego elementu. Skaner HandySCAN cechuje się dużą szybkością działania 480.000 punktów/s oraz, ze względu na dużą swobodę działania (skanowanie „z ręki”) stosunkowo dużą dokładnością – do 0,03mm.

■ Skanowanie światłem białym – światło strukturalne, projekcja wzoru

Przestrzenne skanery światła białego w swoim działaniu również wykorzystują triangulację w celu zebrania informacji o powierzchni dyskretyzowanej. Skanery światła białego są urządzeniami mobilnymi, które można zamontować na statywach trójnożnych czy różnego rodzaju robotach przemysłowych. Skaner zazwyczaj składa się z projektora prążków, jednej lub dwóch kamer cyfrowych z obiektywami, źródła światła, jednostki sterującej oraz komputera ze specjalizowanym oprogramowaniem. Przykładowy przestrzenny skaner światła białego Go!SCAN firmy Creaform prezentuje rysunek 5.



Rys. 5. Skaner światła białego Go!SCAN 3D firmy Creaform [10]

Podczas pomiaru na powierzchnię dyskretyzowanego przedmiotu rzutowany jest wzór i tak powstały obraz rejestrowany jest przez kamery. W czasie mierzonym w milisekundach, na podstawie informacji o kącie światła rzutowanego, kącie przechwyconego odbicia oraz pozycji umiejscowienia źródła światła i kamery, oprogramowanie, dla każdego piksela kamery, oblicza współrzędne punktów leżących na dyskretyzowanej powierzchni. Liczba punktów, jaką można otrzymać w wyniku pojedynczego pomiaru, jest zależna od rozdzielczości kamery i może wynosić nawet kilka milionów. W przypadku urządzenia prezentowanego na rysunku 5 możemy uzyskać 550.000 punktów w ciągu sekundy z dokładnością do 0,1mm. W celu przeprowadzenia kompletnego pomiaru skomplikowanych i dużych przedmiotów wykonuje się wiele projekcji z różnych kątów. Otrzymane obrazy w czasie rzeczywistym transformowane są do wspólnego układu współrzędnych, który określa pierwszy pomiar. Transformacja odbywa się na podstawie informacji o kolorze skanowanego obiektu oraz charakterystycznych cech geometrycznych. Ciekawą funkcją tych skanerów jest również to, że wyposażone w kolorowe kamery, umożliwiają zebranie informacji nie tylko o geometrii skanowanego elementu, ale również o jego teksturze.

■ Fotogrametria

Jest to dziedzina nauki i techniki obejmująca metody odzwierciedlenia kształtów, rozmiarów i wzajemnego położenia obiektów na podstawie zdjęć fotogrametrycznych (fotogramów). Metody fotogrametrii są stosowane m.in. w geodezji, geologii, astronomii. Fotogrametria znalazła również zastosowanie w przemyśle [6]. Przykładem przemysłowego, fotogrametrycznego systemu optycznego może być system MaxSHOT 3D (rys. 6), wcześniej wspomnianej, kanadyjskiej firmy Creaform. Jest to optyczny system pomiarowy, który bezstykowo, w czasie rzeczywistym rejestruje współrzędne punktów, co pozwala na przeprowadzenie in. dyskretyzacji geometrii obiektu. Podstawą działania systemu jest fotogrametria, czyli obserwacja punktów referencyjnych z różnych kierunków i wykonanie zdjęć, na podstawie których obliczane są przestrzenne współrzędne punktów naklejonych na obiekt znaczników (markerów). W skład systemu MaxSHOT 3D wchodzi następujące elementy:

- aparat fotogrametryczny,
- magnetyczne referencyjne ramki,
- magnetyczne certyfikowane wzorce długości,
- magnetyczne kodowane znaczniki,
- jednostka sterująca wraz z oprogramowaniem.

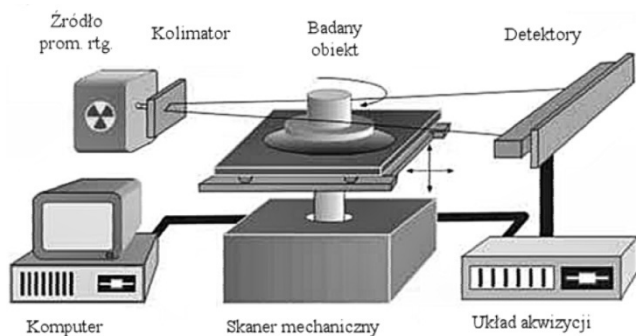


Rys. 6. System fotogrametryczny MaxSHOT 3D firmy Creaform [10]

■ Promieniowanie rentgenowskie - CT

Tomografia komputerowa jest metodą badania za pomocą promieniowania rentgenowskiego obiektów materialnych, pozwalającą na otrzymanie przestrzennego lub płaskiego rozkładu wybranej wielkości fizycznej na podstawie serii jednowymiarowych pomiarów i ich odpowiedniej obróbki komputerowej. Jest ona szeroko wykorzystywana zarówno w medycynie, jak i w przemyśle.

W zastosowaniach przemysłowych tomografia komputerowa wykorzystywana jest do dyskretyzacji zarówno zewnętrznej, jak i wewnętrznej geometrii elementów. Zasada działania tomografu przemysłowego jest podobna do tomografu wykorzystywanego w medycynie, istotną różnicą polega głównie na samej konstrukcji urządzenia. Schemat oraz zasadę działania tomografu komputerowego stosowanego w przemyśle prezentuje rysunek 7 [2, 7].



Rys. 7. Schemat rentgenowskiego tomografu komputerowego stosowanego w przemyśle [7]

Tomografia komputerowa pozwala sprawdzać objekty o dowolnym kształcie, wykonane z dowolnego materiału, bez ich modyfikowania oraz dotykania. Umożliwia dyskretyzację nie tylko zewnętrznego kształtu przedmiotu, ale również jego cech wewnętrznych. Oprócz tego daje także możliwość otrzymania informacji o gęstości i składzie materiału, z którego wykonany jest przedmiot, dlatego wykorzystywana jest powszechnie w materiałoznawstwie do wykrywania wtrąceń materiałowych [7].

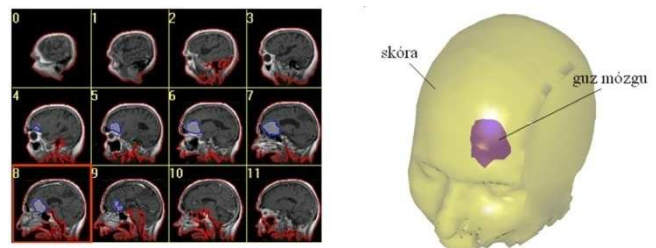
Przykładem urządzenia do bezinwazyjnej dyskretyzacji geometrii zewnętrznej i wewnętrznej obiektów jest urządzenie firmy General Electric o nazwie Phoenix (rys. 8).



Rys. 8. Tomograf komputerowy Phoenix nanotom - General Electric.

■ Fale radiowe - MRI

Metoda dyskretyzacji obiektów, w której wykorzystuje się fale radiowe obejmuje metodę obrazowania rezonansu magnetycznego (ang. Magnetic Resonance Imaging – MRI). Jest to jedna z technik tomografii, i znalazła zastosowanie w medycynie. Badanie przy użyciu tej metody przeprowadzane jest za pomocą stałego pola magnetycznego o dużym natężeniu. W odróżnieniu od metody tomograficznej obraz przekrojowy tworzony jest z wykorzystaniem fal radiowych a nie promieniowania rentgenowskiego. Obrazowanie rezonansu magnetycznego wymaga umieszczenia osoby badanej w silnym polu magnetycznym i podania impulsu elektromagnetycznego o częstotliwości fal radiowych. Wywołuje to w tkance procesy fizyczne na poziomie atomów, dzięki którym tkanka pobiera tę energię, a następnie ją zwraca jak echo, rezonans. Źródłem tego sygnału są zazwyczaj protony jądra wodoru, wszechobecnego w organizmie w postaci molekuł wody. Zwracany sygnał jest rejestrowany przez skaner, a ponieważ każda tkanka zwraca sygnał o nieco odmiennej charakterystyce, możliwe jest odróżnienie różnych tkanek i struktur np. mózgu. Po przetworzeniu sygnału możliwa jest wizualizacja danego przekroju mózgu w postaci dwu- lub trójwymiarowego obrazu. MRI umożliwia obrazowanie narządów wewnętrznych ze zdolnością rozdzielczą 0,1 – 0,01 mm warstwy.



Rys. 9. Model przestrzenny stworzony z obrazów MRI [12]

Urządzenie do obrazowania rezonansu magnetycznego zbudowane jest z ruchomego stołu, który jest wsuwany do wnętrza aparatu – tzw. gantry. Do wykonania badania niezbędne są również specjalne cewki regulacyjne, w których badane obszary ciała są dodatkowo unieruchamiane przed badaniem. Zebrane dane są wysyłane do komputera przy konsoli technika i przetwarzane w sposób gwarantujący otrzymanie obrazu (rys. 9).

■ Metody wykorzystujące fale dźwiękowe

Fale dźwiękowe również są wykorzystywane do dyskretyzacji obiektów w celu ich obrazowania. Wykorzystywane tutaj fale dźwiękowe mają częstotliwość od 16 kHz do 10 GHz (są to ultradźwięki, które nie wywołują wrażenia słuchowego u człowieka i większości zwierząt, za wyjątkiem psów czy delfinów). Ultradźwięki mają bardzo szerokie zastosowanie w wielu obszarach nauki i techniki. Jedną z metod, która wykorzystuje ultradźwięki, którą stosuje się w medycynie jest ultrasonografia (USG). Ultrasonografia jest jedynym sposobem wizualizacji, który nie jest oparty na elektromagnetycznym oddziaływaniu na ciało człowieka. Podstawą obrazowania ultradźwiękowego są informacje o gęstości, sprężystości tkanek narządów (lub przepływu krwi), uzyskane na podstawie analizy odbicia lub zmiany częstotliwości wiązki fal ultradźwiękowych penetrujących ciało. Informacje te są przetwarzane na użyteczny diagnostycznie obraz prezentowany na ekranie monitora. Obrazowanie ultradźwiękowe ma charakter tomograficzny. Uzyskiwane obrazy przedstawiają przekrój ciała lub narządu w płaszczyźnie przemieszczania wąskiej (do granicy możliwości) wiązki fal penetrujących obiekt. Na podstawie danych zawartych w obrazach dwuwymiarowych, podobnie jak w innych sposobach obrazowania, można zrekonstruować obraz trójwymiarowy. Obrazy są uzyskiwane w czasie rzeczywistym, czyli natychmiast w trakcie badania. W technice ultradźwięki wykorzystuje się między innymi w badaniach materiałów, których zadaniem jest wykrycie wad materiałowych w postaci różnego rodzaju pęknięć czy rys. Fala, napotykając na taką wadę, ulega odbiciu na skutek zmiany współczynnika pochłaniania i akustycznych oporności falowych, które są powodem ugięcia, odbicia i załamania fali [9].

Metody hybrydowe

Trzecią grupą metod dyskretyzacji geometrii elementów są metody hybrydowe, łączące w sobie zarówno metody bezstykowe, jak i metody stykowe.



Rys. 10. System hybrydowy firmy Creaform: HandySCAN – dyskretyzacja stykowa, MetraSCAN 3D – dyskretyzacja laserowa [10]

Jedną z metod hybrydowych jest koncepcja łącząca z jednej strony dokładność pomiarów stykowych oraz kompleksowość i szybkość pomiarów bezstykowych. Metoda opiera się na współrzędnościowej technice pomiarowej, a wykorzystuje się w niej współrzędnościową maszynę pomiarową oraz przestrzenny skaner optyczny. Przykładem takiego systemu hybrydowego może być system łączący ręczne urządzenie stykowe HandySCAN oraz skaner laserowy MetraSCAN 3D firmy Creaform (rys. 10). Obiekt dyskrety-

zowany, i takie jego cechy geometryczne jak np. otwory, są dyskretyzowane stykowo, natomiast cała geometria kompleksowo dyskretyzowana jest skanerem laserowym.

Do metod hybrydowych zaliczyć można również metodę dyskretyzacji geometrii elementów przekrojami poprzecznymi. Metodę tę opracował i opatentował Craig Crump, twórca przedsiębiorstwa Capture Geometry Inside (CGI). Urządzenia produkowane przez to przedsiębiorstwo nazywane są zwyczajowo skanerami CGI (rys. 11). Główną zaletą skanerów przekrojów poprzecznych jest możliwość dyskretyzacji elementów o skomplikowanej geometrii wewnętrznej. Skaner CGI może dyskretyzować każdy element, który może być obrabiany. Część, która ma być dyskretyzowana przez skaner CGI jest umieszczana w formie i zanurzona w płynie epoksydowym. Płyn epoksydowy musi być dobrany w takim kolorze, aby po stwardnieniu kontrastował z kolorem części. Tak przygotowaną formę umieszcza się w próżni w celu usunięcia pęcherzyków powietrza, zwiększone ciśnienie powoduje, że wszystkie wewnętrzne kanaliki i zagłębienia są wypełniane przez płyn. Cały blok schnie i jeżeli jest już twardy, to następuje etap frezowania i dyskretyzacji. Frez usuwa z bloku kolejne warstwy o grubości setnych lub dziesiątych części milimetra, a aparat cyfrowy rejestruje obraz każdej warstwy i zapisuje go w postaci czytelnej dla komputera. Na podstawie tego zdjęcia odtwarzane są kolejne krawędzie elementu, a w rezultacie cały element. Największą wadą tej techniki jest bezpowrotna utrata elementu poddanego takiej dyskretyzacji. Dlatego też, jeżeli nie możemy sobie pozwolić na zniszczenie elementu, bo np. istnieje tylko jeden egzemplarz, to metoda ta staje się całkowicie bezużyteczna. Inną wadą tej metody jest stosunkowo długi czas dyskretyzacji – element dyskretyzuje się warstwa po warstwie [4].



Rys. 11. Skaner przekrojów poprzecznych CGI [11]

Podsumowanie

Dyskretyzacja w procesie inżynierii odwrotnej jest jednym z czterech etapów, ale na tyle ważna, że warto jej poświęcić odpowiednio dużo czasu. Etap dyskretyzacji jest bardzo istotny, ponieważ to od niego w dużej mierze zależy powodzenie całego procesu inżynierii odwrotnej.

W praktyce do dyskretyzacji geometrii obiektów fizycznych wybiera się urządzenia (metody) spośród urządzeń dostępnych i funkcjonujących w parku maszynowym danej firmy. Z punktu widzenia ekonomii, jest to oczywiście jak najbardziej właściwy wybór. Jednak z punktu widzenia inżyniera, własności materiałowych dyskretyzowanego obiektu oraz oczekiwanych rezultatów dyskretyzacji, wybór urzą-

dzienia dostępnego w danej firmie może okazać się niewłaściwy. Należy mieć świadomość różnorodności metod dyskretyzacji i dokonywać właściwych wyborów co do urządzeń i metod. Każdorazowo, przed przystąpieniem do dyskretyzacji obiektu i wyborem urządzenia, należy przeprowadzić analizę samego obiektu (np. rodzaj materiału), ilości i jakości danych otrzymanych w wyniku dyskretyzacji i ich przydatność w kolejnym etapie, mając cały czas na uwadze cel podjętego procesu inżynierii odwrotnej.

Choć współczesny postęp technologiczny sprawia że dyskretyzacja obiektów rzeczywistych jest prostsza niż kiedykolwiek wcześniej, to jednak niewłaściwy wybór metody dyskretyzacji może przyczynić się, że podjęty proces inżynierii odwrotnej zakończy się niepowodzeniem.

LITERATURA

1. Chajda Jan, Szelewski Maciej, Grzelka Mirosław "Analysis of the measuring point coordinates identification error on free-form surface, for CMM and CAD systems". *Zeszyty Naukowe nr 22 Budowa i Eksploatacja Maszyn*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2006, s. 37-43.
2. Cierniak Robert „*Tomografia komputerowa: budowa urządzeń CT: algorytmy rekonstrukcyjne*”. Akademska Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
3. Galeoto M., Vezzetti E. "Reverse engineering of free-form surfaces: A methodology for threshold definition In selective sampling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, 2006, p. 1079-1086.
4. Motavalli S. "Review of Reverse Engineering Approaches". *Computers Industrial Engineering*, vol. 35, 1998, p. 25-28.
5. Raja V., Fernandes K.J. "Reverse Engineering. An Industrial Perspective". Springer, London 2008.
6. Reich, C., Ritter, R., Thesing, J. "3D-shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection". *Optical Engineering*, 39(1), 2000, p. 224-231.
7. Senczyk D., Moryksiewicz S. „Przemysłowa rentgenowska tomografia komputerowa”. 35 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk, 24-26.10.2006, Zeszyty Problemowe - Badania Nieniszczące, 2006, nr 11, s. 49-57.
8. Szelewski Maciej „*Metrologiczna analiza dyskretyzacji na współrzędnościowych maszynach pomiarowych i modelowania w systemie CAD wybranych elementów w procesie inżynierii odwrotnej*”. Praca doktorska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, Poznań 2008.
9. Śliwiński A. „*Ultradźwięki i ich zastosowania*”. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
10. Go!Scan 50, HandySCAN, MetraScan Creaform, 2015.
11. <http://www.scanning-solutions.com/>
12. <http://www.ablesw.com/>