

Ocena dokładności realizacji procesu inżynierii odwrotnej obiektu przestrzennego

Andrzej Werner

Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

Streszczenie: W artykule zostały zaprezentowane zagadnienia dotyczące realizacji procesu inżynierii odwrotnej na przykładzie obiektu przestrzennego. Proces ten przebiegał w następujących etapach: digitalizacja obiektu przestrzennego z wykorzystaniem skanera optycznego, przetwarzanie chmur punktów pomiarowych uzyskanych w wyniku digitalizacji, budowa modelu geometrycznego obiektu na podstawie przetworzonych chmur punktów pomiarowych, sporządzenie kopii odtwarzanego obiektu technikami szybkiego prototypowania. W artykule została przedstawiona metodyka pomiarów obiektów przestrzennych przy użyciu skanera optycznego (strukturalne światło białe). Omówiona została problematyka dotycząca łączenia chmur punktów pomiarowych oraz ich obróbki (filtrowanie, wygładzanie). Zaprezentowane zostały również zagadnienia związane z budową modelu geometrycznego odtwarzanego obiektu oraz tworzenie kopii obiektu jedną z metod szybkiego prototypowania FDM (ang. *Fused Deposition Modelling*). Końcowa część artykułu zawiera ocenę dokładności realizacji procesu inżynierii odwrotnej. Na podstawie pomiarów współrzędnościowych obiektu oryginalnego określono odchyłki utworzonych modeli geometrycznych.

Słowa kluczowe: digitalizacja, chmura punktów, modelowanie geometryczne, szybkie prototypowanie

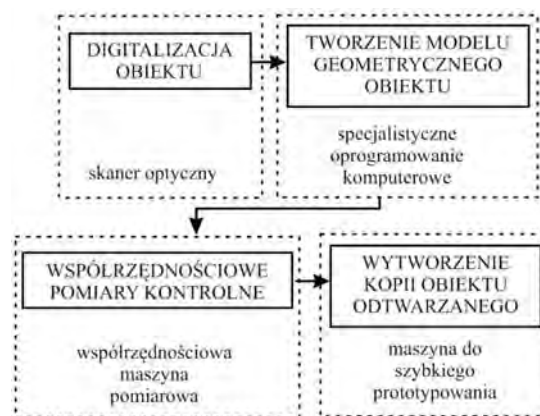
1. Wprowadzenie

Inżynieria odwrotna znajduje obecnie szerokie zastosowanie w pracach inżynierskich związanych z projektowaniem nowych wyrobów [1] lub wytwarzaniem części zapasowych zużytych elementów [2]. Jest ona szczególnie użyteczna w realizacji procesu projektowego, w którym wykorzystuje się modele fizyczne obiektów. W dziedzinach technicznych, takich jak przemysł lotniczy, przemysł motoryzacyjny, przemysł stoczniowy i medyczny, często zachodzi konieczność utworzenia modeli geometrycznych projektowanych elementów z wykorzystaniem wcześniej wyprodukowanych modeli koncepcyjnych [3]. Inżynieria odwrotna odnosi się do procesów, w których projektant opracowuje koncepcję przyszłego produktu na podstawie digitalizacji modelu fizycznego i tworzy jego model CAD. Model ten może być następnie przetwarzany, np. modyfikowany, optymalizowany. Kluczowymi elementami procesu inżynierii odwrotnej jest digitalizacja obiektu i tworzenie jego modelu geometrycznego. Proces digitalizacji realizowany jest obecnie najczęściej z wykorzystaniem współrzędnościowych maszyn pomiarowych [4], skanerów optycznych [5] lub laserowych [6]. Budowa modelu geometrycznego obiektu koncentruje się w głównej mierze na obróbce chmur punktów

pomiarowych i przetwarzaniu ich w powierzchniowe modele geometryczne odtwarzanych obiektów [7]. W przypadku wykorzystania w procesie inżynierii odwrotnej technik szybkiego prototypowania można na podstawie utworzonego modelu geometrycznego wykonać materialną kopię odtwarzanego obiektu [8].

2. Metodyka odtwarzania obiektów przestrzennych

Prezentowana w artykule metodyka odtwarzania obiektów przestrzennych (rys. 1) składa się z czterech etapów.



Rys. 1. Metodyka odtwarzania obiektów przestrzennych
Fig. 1. Methodology of the reconstruction of spatial objects

Etap pierwszy polega na digitalizacji obiektu. Jego celem jest uzyskanie chmury punktów, która możliwie dokładnie odwzorowuje kształt i wymiary przedmiotu odtwarzanego. Prezentowana metodyka zakłada wykorzystanie w tym celu skanera optycznego. Zasada pomiaru przy użyciu tej klasy sprzętu wymaga odpowiedniego przygotowania digitalizowanego obiektu (analiza wyglądu odtwarzanej części i naniesienie powłoki antyodblaskowej). Analizie muszą być poddane również kształt i wymiary przedmiotu. Pozwoli to na odpowiednie zaplanowanie pomiaru, które uwzględni takie czynniki, jak:

- właściwe usytuowanie obiektu w przestrzeni pomiarowej skanera,
- liczba ekspozycji oraz należyte ustawienie skanera w trakcie realizacji,
- przygotowanie warunków umożliwiających właściwe złożenie wielu chmur punktów pomiarowych, będących wynikiem licznych ekspozycji wykonanych w trakcie digitalizacji – naniesienie na przedmiot odtwarzany odpowiednich markerów lub wykorzystanie obrotowego stolika pomiarowego.

Etap drugi jest związany z tworzeniem modelu geometrycznego odtwarzanego obiektu. Wymaga on w pierwszej kolejności obróbki chmur punktów uzyskanych w trakcie pomiaru skanerem optycznym. Najpierw należy usunąć wszystkie punkty pomiarowe niezwiązane z odtwarzanym obiektem, a następnie dopasować chmury pomiarowe pochodzące z wielu różnych pomiarów przedmiotu. Procedurę upraszcza wykorzystanie obrotowego stolika pomiarowego, dzięki któremu dopasowanie jest wykonywane automatycznie. Kolejnym krokiem jest dalsze przetwarzanie chmur punktów (filtrowanie szumów, wygładzanie, wypełnianie ubytków). Tak przetworzoną chmurę punktów pomiarowych przekształca się w obiekt przestrzenny, składający się z wieloboków. Można go poddać dalszej obróbce, która polega głównie na: naprawie siatki wieloboków, wygładzaniu, wypełnianiu ubytków, łączeniu różnych grup wieloboków, obróbce krawędzi, wyostrzaniu naroży. Przetwarzanie to ma na celu przygotowanie właściwych danych umożliwiających realizację ostatniej fazy tworzenia modelu geometrycznego obiektu odtwarzanego. W fazie tej z wieloboków przestrzennych tworzone są płyty powierzchni.

Etap trzeci procesu odtwarzania obiektu przestrzennego obejmuje pomiary kontrolne wykonywane na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Pomiary te mogą być szczegółowe lub ograniczać się do mniejszej ilości danych dotyczących tylko najważniejszych wymiarów odtwarzanego przedmiotu. Wyniki pomiarów po odpowiednim dopasowaniu porównywane są z utworzonym wcześniej modelem geometrycznym obiektu. W ten sposób uzyskuje się informacje o różnicach wymiarowych występujących pomiędzy materialnym obiektem odtwarzanym a jego wirtualnym modelem geometrycznym. Dane te są podstawą do określenia dokładności realizacji procesu inżynierii odwrotnej. Kiedy odpowiednia dokładność została osiągnięta, można przejść do ostatniego, czwartego etapu odtwarzania obiektu. Polega on na wytworzeniu materialnej kopii części z wykorzystaniem technik szybkiego prototypowania.

3. Realizacja procesu inżynierii odwrotnej szablonu odlewniczego

Metodyka realizacji procesu inżynierii odwrotnej została zweryfikowana na przykładzie odtwarzania szablonu od-



Rys. 2. Odtwarzany szablon odlewniczy

Fig. 2. Reconstructed template casting

lewniczego. Szablon ten wykorzystywany w procesie formowania piaskowego zaczął wykazywać objawy zużycia, konieczne stało się więc wytworzenie jego kopii. Oryginal-

na część została odpowiednio przygotowana. Wyrównano nierówności na powierzchniach zewnętrznych obiektu, powstałe wskutek zużycia. Przed wykonaniem pomiarów skanerem optycznym cały szablon został również zmatowany odpowiednią substancją antyodblaskową (rys. 2).

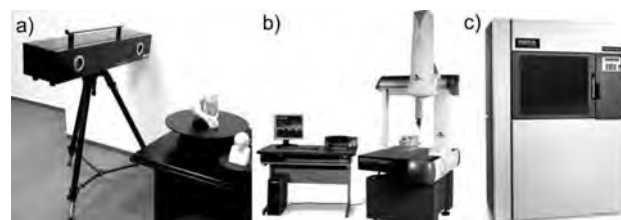
3.1. Stanowisko badawcze

Badania zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym, w skład którego wchodziły:

- skaner optyczny ScanBright Professional firmy SmartTech (rys. 3a) – działanie oparte na zasadzie strukturalnego światła białego, dokładność pomiaru 0,05 mm,
- współrzędnościowa maszyna pomiarowa Global Performance 07 07 05 (rys. 3b),
- maszyna do szybkiego prototypowania Fortus 360m firmy Stratasys (rys. 3c) – praca w technologii FDM (ang. *Fused Deposition Modelling*).

Poszczególne etapy odtwarzania obiektu wspomagane były również przez oprogramowanie obejmujące:

- system Mesh 3D – wykorzystywany do sterowania pracą skanera optycznego oraz wstępnej obróbki chmur punktów,
- system Geomagic Studio 12 – wykorzystywany do przetwarzania chmur punktów i tworzenia powierzchniowych modeli geometrycznych odtwarzanego obiektu,
- oprogramowanie Insight 7 – przetwarzające dane geometryczne na format obsługiwany przez maszynę do szybkiego prototypowania.



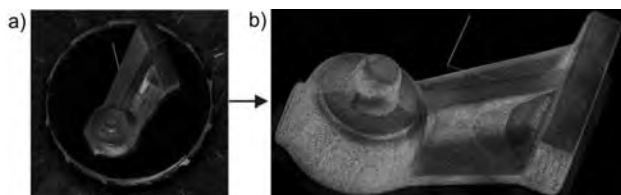
Rys. 3. Stanowisko badawcze: a) skaner optyczny, b) współrzędnościowa maszyna pomiarowa, c) maszyna do szybkiego prototypowania

Fig. 3. The test stand: a) the optical scanner, b) coordinate measuring machine, c) rapid prototyping machine

3.2. Odtwarzanie szablonu odlewniczego

Realizacja procesu odtwarzania szablonu odlewniczego rozpoczęła się od wykonania pomiarów obiektu z wykorzystaniem skanera optycznego. W celu uproszczenia procedury pomiarowej i dalszego przetwarzania wyników pomiarów wykorzystano obrotowy stolik pomiarowy. Przy pomiarze obiektu zostały uwzględnione jego kształt i wymiary. Przeprowadzono również serię próbnych pomiarów kontrolnych obiektu przy różnych ustawieniach kątowych stolika pomiarowego. Ostatecznie przyjęto, że pomiar zostanie wykonany w 12 położeniach kątowych z równym przyrostem kąta obrotu stolika, tzn. co 30°. Wynik przeprowadzonych pomiarów został przedstawiony na rys. 4a. Zauważyć można, że oprócz informacji na temat mierzonego obiektu uzyskano dużo niepotrzebnych danych dotyczących jego bezpośredniego otoczenia. Zbędne informacje

zostały usunięte przy pomocy oprogramowania Mesh 3D, sterującego pracą skanera. Ostateczny wynik pomiaru przedstawiono na rys. 4b. Obiekt odtwarzany został opisany przez 12 609 punktów pomiarowych o łącznej liczbie 609 223 punktów.



Rys. 4. Wyniki pomiarów obiektu: a) wyniki „surowe”, b) wyniki pomiarów po wstępnym przetworzeniu

Fig. 4. The results of measurements of the object: a) the results of the "raw", b) the results of measurements after the initial processing

Wyniki pomiarów zostały przesłane w odpowiednim formacie do oprogramowania Geomagic Studio 12. Ten specjalistyczny system stosowany w inżynierii odwrótej służy głównie do przetwarzania dużych chmur punktów w powierzchniowe modele geometryczne obiektów i przesyłania uzyskanych wyników do systemów CAD. W systemie tym wyniki pomiarów zostały poddane przetworzeniu w trzech kolejnych fazach: chmury punktów, wieloboki, obiekty powierzchniowe (rys. 5). W fazie pierwszej obróbce była poddawana chmura punktów. Przetwarzanie to obejmowało takie aspekty, jak:

- próbkowanie – uzyskane chmury punktów pomiarowych były poddawane obróbce mającej na celu uzyskanie równomiernego rozkładu punktów, ograniczenia ich ilości,
- naprawa – chmury punktów poddawane były takim operacjom, jak: usunięcie grup punktów nie mających właściwego połączenia z główną chmurą pomiarową, redukcja szumów pochodzących z zakłóceń, które wystąpiły podczas pomiarów, wypełnianie ubytków,
- łączenie wielu chmur punktów pomiarowych w jeden obiekt.

Efektom przetwarzania w tej fazie było uzyskanie pozbawionej zakłóceń i nieciągłości chmury punktów. Redukcji uległa też liczba punktów do 582 911. Umożliwiło to przejście do kolejnej fazy przetwarzania – chmura punktów została przekształcona w obiekt przestrzenny opisany przez wieloboki.

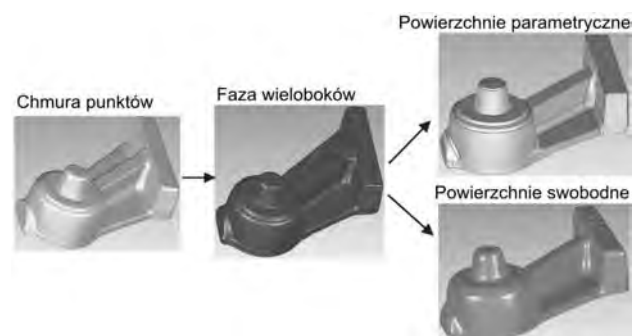
Faza wieloboków obejmuje dalszą obróbkę danych, związaną przede wszystkim z:

- naprawą – eliminacja źle skonstruowanych wieloboków, ograniczenie ich ilości, zmiana kształtu wieloboków,
- wygładzaniem – wygładzenie siatki wieloboków, usunięcie ostrych zniekształceń,
- wypełnianiem ubytków – wypełnienie ubytków siatki, które pojawiły się na różnych etapach jej przetwarzania,
- obróbką brzegów – wyznaczenie jednoznacznych granic obiektów o odpowiednim przebiegu,
- wyznaczaniem ostrych naroży.

Podstawowym zadaniem fazy wieloboków jest przygotowanie danych, niezbędnych do uzyskania właściwego

obiektu powierzchniowego. W przypadku odtwarzanego szablonu odlewniczego faza ta zakończyła się uzyskaniem obiektu złożonego z 1 163 704 trójkątów.

Ostatnią fazą tworzenia modelu geometrycznego odtwarzanego obiektu była budowa jego modelu powierzchniowego. Model powierzchniowy może być tworzony z wykorzystaniem płatów powierzchni swobodnych lub powierzchni parametrycznych. O wyborze właściwej ścieżki decyduje osoba przygotowująca model. Jeżeli odtwarzane kształty składają się w głównej mierze z typowych elementów typu stożki, walce, płaszczyzny itp., właściwa jest budowa obiektu złożonego z powierzchni parametrycznych. W przypadku kształtów, które nie pasują do typowych obiektów geometrycznych, stosuje się płyty powierzchni swobodnych. Na potrzeby przeprowadzonych badań zostały utworzone dwa powierzchniowe modele geometryczne odtwarzanego obiektu (rys. 5).

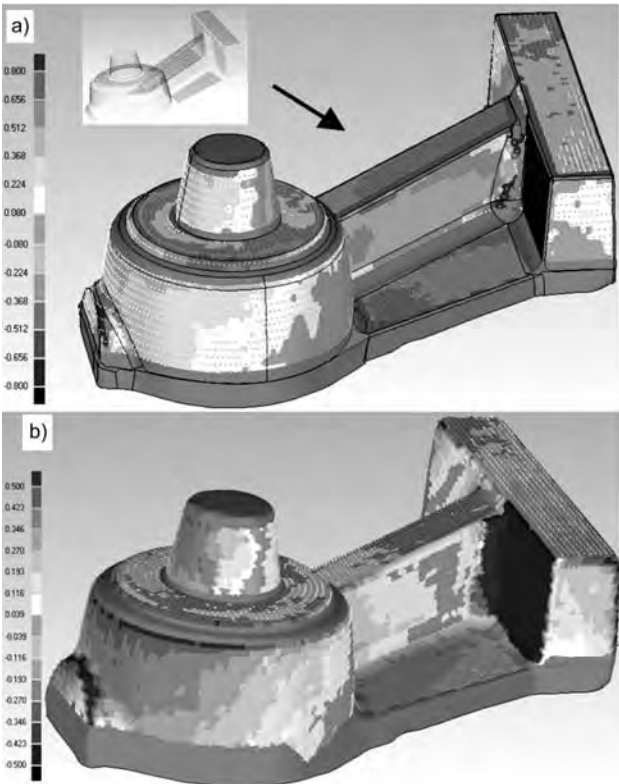


Rys. 5. Kolejne etapy przetwarzania wyników pomiarów w systemie Geomagic Studio 12

Fig. 5. Next steps in processing the measurement results in the system Geomagic Studio 12

3.3. Ocena dokładności odtwarzania szablonu odlewniczego

Oceny dokładności odtworzenia szablonu odlewniczego dokonano poprzez porównanie uzyskanych modeli powierzchniowych odtwarzanego obiektu z punktami pomiarowymi uzyskanymi po pomiarze szablonu odlewniczego na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. W celu uzyskania właściwych danych wejściowych przeprowadzono kontrolne pomiary współrzędnościowe odtwarzanego przedmiotu. Zostały one zaplanowane w taki sposób, by ich wyniki zawierały wszystkie najważniejsze informacje dotyczące kształtu i wymiarów szablonu. Uzyskano w ten sposób chmurę 7445 punktów pomiarowych, która w odpowiednim formacie została przesłana do systemu Geomagic Studio. Następnie zgodnie z procedurą *best fit* punkty te zostały dopasowane do utworzonych uprzednio modeli geometrycznych odtwarzanego obiektu (rys. 6a). System Geomagic Studio dysponuje procedurą *deviation*, która wyznacza odchyłki między obiektem powierzchniowym a dopasowaną do niego chmurą punktów. Graficzna prezentacja tych wyników została przedstawiona na rys. 6: rozkład odchyłek dla modelu utworzonego na bazie powierzchni parametrycznych – rys. 6a, dla modelu utworzonego na powierzchniach swobodnych – rys. 6b. W tab. 1 zestawiono uzyskane wyniki.



Rys. 6. Rozkład odchyłek zaobserwowanych między modelem powierzchniowym a chmurą punktów z pomiarów współrzędnościowych: a) powierzchnie parametryczne, b) powierzchnie swobodne

Fig. 6. The distribution of the observed deviations between the model surface and the cloud of points with coordinate measurements: a) parametric surfaces, b) free-form surface

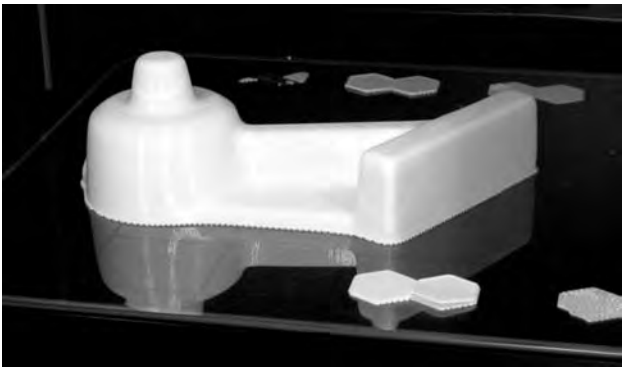
Tab. 1. Zestawienie odchyłek zaobserwowanych
Tab. 1. Summary of the observed deviations

Typ modelu obiektu	Powierzchnie parametryczne	Powierzchnie swobodne
Maksymalna dodatnia [mm]	1,4	1,5
Maksymalna ujemna [mm]	-0,8	0
Średnia [mm]	0,012	0,219
Średnia dodatnia [mm]	0,229	0,219
Średnia ujemna [mm]	-0,253	0
Odchylenie standardowe [mm]	0,394	0,294

W przypadku odtwarzanego obiektu nie dysponowano dokumentacją rysunkową oraz niez użytym przedmiotem. Przyjęto więc, że zestawienie wyników pomiarów współrzędnościowych odtwarzanego obiektu z utworzonym modelem geometrycznym jest najwłaściwszym źródłem danych, umożliwiającym oszacowanie dokładności odtworzenia. Zaobserwowane wartości odchyłek maksymalnych wynikają ze znacznego stopnia zużycia odtwarzanego szablonu. Rekonstrukcja obiektu skupiała się nie tylko na jak najwierniejszym skopiowaniu obiektu, lecz także na wyeliminowaniu wpływu defektów zużytych powierzchni na jakość końcowego modelu geometrycznego. Przedstawione w tab. 1 odchylenie standardowe dotyczy wszystkich odchyłek zaobserwowanych w trakcie pomiarów współrzędnościowych.

3.4. Wytworzenie kopii odtwarzanego obiektu technikami szybkiego prototypowania

W końcowym etapie realizacji procesu inżynierii odwrotnej, przy użyciu technik szybkiego prototypowania została wytworzona kopia szablonu odlewniczego (rys. 7). Sporządzono ją z materiału ABS-M30 metodą FDM. Do wytworzenia repliki obiektu posłużył model utworzony z powierzchni parametrycznych jako bardziej adekwatny do klasy kształtu odtwarzanego obiektu.



Rys. 7. Kopia odtwarzanego obiektu wykonana techniką szybkiego prototypowania
Fig. 7. A copy of the reproduced object made using rapid prototyping technique

4. Wnioski końcowe

Kluczowymi elementami mającymi wpływ na dokładność przeprowadzonego procesu inżynierii odwrotnej są pomiary oraz tworzenie modelu geometrycznego odtwarzanego przedmiotu. Pomiar z wykorzystaniem skanera optycznego wymaga w pierwszej kolejności właściwego przygotowania mierzonego elementu. Położenie przedmiotu i skanera należy dobrać tak, aby zapewnić odpowiedni dostęp wiązki światła do wszystkich mierzonych powierzchni. Budowa modelu geometrycznego wymaga przede wszystkim odpowiedniej obróbki chmur punktów pomiarowych. Ważnym etapem jest również sporządzanie finalnych modeli powierzchniowych. Wybór typu powierzchni (parametryczne lub swobodne) w istotny sposób wpływa na dokładność rekonstrukcji odtwarzanych kształtów. Dobrym punktem odniesienia, który umożliwia oszacowanie dokładności realizacji procesu inżynierii odwrotnej, są wyniki pomiarów obiektu przeprowadzonych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Zakres tych pomiarów może być ograniczony i dotyczyć jedynie informacji kluczowych dla funkcjonowania obiektu. Zestawienie wyników pomiarów współrzędnościowych z utworzonym modelem geometrycznym części dostarcza informacji o wartościach i rozkładzie odchyłek zaobserwowanych.

W przypadku obiektu odtwarzanego w trakcie wykonywanych badań należy stwierdzić (na podstawie danych zawartych w tab. 1), że dla obu uzyskanych modeli geometrycznych dokładność odtworzenia jest na porównywalnym poziomie. Z uwagi na fakt, że odtwarzanym obiektem był szablon odlewniczy do formowania piaskowego (wykorzystywany w wytwarzaniu mniej precyzyjnych elementów), uznano osiągniętą w obu przypadkach dokładność

odtworzenia za akceptowalną. Kluczowym kryterium w doborze ostatecznej wersji modelu geometrycznego była ocena klas powierzchni ograniczających odtwarzany szablón odlewniczy. Ponieważ w większości przypadków były to powierzchnie typu stożek, płaszczyzna, zaokrąglenie naroża itp., właściwszy okazał się model sporządzony z wykorzystaniem powierzchni parametrycznych. W większym stopniu odzwierciedlał wszystkie szczegóły odtwarzanego obiektu.

Bibliografia

1. S.-W. Hsiao, J.-C. Chuang: *A reverse engineering based approach for product form design*, Design Studies, vol. 24, no. 2, 2003, 155–171.
2. E. Bagci: *Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies*, Advances in Engineering Software, 40 (2009), 407–418.
3. Y. Zhang: *Research into the engineering application of reverse engineering technology*, Journal of Materials Processing Technology, 139 (2003), 472–475.
4. S.-R. Liang, A.C. Lin: *Probe radius compensation for 3D data points in reverse engineering*, Computers in Industry, 48 (2002), 241–251.
5. S.C. Park, M. Chang: *Reverse engineering with a structured light system*, Computers & Industrial Engineering, 57 (2009), 1377–1384.
6. M. Korošec, J. Duhovnik, N. Vukobratović: *Identification and optimization of key process parameters in noncontact laser scanning for reverse engineering*, Computer-Aided Design, 42 (2010), 744–748.
7. P. Azariadis, N. Sapidis: *Product design using point-cloud surfaces: A recursive subdivision technique for point parameterization*, Computers in Industry, 58 (2007), 832–843.
8. K.H. Lee, H. Woo: *Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping*, Computers & Industrial Engineering, 38 (2000), 21–38. ■

Accuracy assessment of the reverse engineering process of spatial object

Abstract: The paper presents the theme of the reverse engineering process on the example of spatial object. The reverse engineering process was made in the following stages: digitization of the spatial object using the optical scanner, processing of point clouds obtained by digitization, construction of the geometric model of the object based on the processed cloud points, manufacturing the copy of the reconstructed object using rapid prototyping techniques. The paper describes the methods of measurement of the spatial objects using an optical scanner (structural white light) and methods of the measuring point clouds processing (filtering, smoothing). The article presents the issues related to the construction of the geometric model of the reconstructed object and creating the copy of the object by one of the methods of rapid prototyping (FDM – Fused Deposition Modelling). In the final part of this article the assess the accuracy of the process of reverse engineering was presented.

Keywords: digitization, cloud points, geometric modelling, rapid prototyping

dr inż. Andrzej Werner

Zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Zakładzie Inżynierii Produkcji na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Zajmuje się problematyką związaną z obrabiarkami sterowanymi numerycznie, inżynierią odwrotną, szybkim prototypowaniem oraz korekcją błędów wytwarzania obiektów opisanych powierzchniami swobodnymi.

e-mail: anwer@pb.edu.pl

