

Wpływ rodzaju filtra na wyniki bezstykowych pomiarów wybranej powierzchni swobodnej

The influence of the type of a filter on the results of non-contact measurements of the selected free-form surface

PAWEŁ TUREK
MAREK MAGDZIAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.178>

W artykule omówiono początkowe etapy inżynierii odwrotnej wybranej powierzchni swobodnej. Do pozyskania danych pomiarowych wykorzystano współrzędnościowe ramię pomiarowe MCA II, wyposażone w bezstykową głowicę pomiarową. Przeanalizowano wpływ wybranych poleceń i ustawień programów Focus Inspection oraz CATIA V5-6 w zakresie filtracji wyników pomiarów na jakość uzyskanych danych pomiarowych.

SŁOWA KLUCZOWE: współrzędnościowa technika pomiarowa, powierzchnia swobodna, digitalizacja, filtracja

The article concerns the early stages of the reverse engineering of the selected free-form surface. The process of acquisition of measurement data was carried out by using the MCA II coordinate measuring arm equipped with a non-contact measuring probe. The influence of the selected commands and settings of Focus Inspection and CATIA V5-6 software packages in the field of filtration of measurement results on the quality of obtained measurement data was analysed.

KEYWORDS: coordinate measuring technique, free-form surface, digitalization, filtration

Inżynieria odwrotna, określana skrótem RE (*reverse engineering*), zwana także inżynierią rekonstrukcyjną, umożliwia odtworzenie geometrii istniejącego wyrobu, nieposiadającego dokumentacji technicznej [1]. Inżynieria rekonstrukcyjna obejmuje m.in. akwizycję danych pomiarowych w postaci chmur punktów [2] oraz ich przekształcanie do postaci akceptowanej przez systemy komputerowego wspomaganie projektowania CAD (*computer aided design*) [3]. W przypadku obiektu charakteryzującego się skomplikowanym kształtem geometrycznym inżynieria odwrotna, wspomagana zaawansowanymi urządzeniami pomiarowymi, często jest jedynym sposobem na uzyskanie cyfrowego odpowiednika danego produktu [4]. Obecnie proces *reverse engineering* jest stosowany w wielu dziedzinach, m.in. w przemyśle lotniczym [4] oraz architekturze [5]. Bardzo często znajduje również zastosowanie w medycynie, np. do odtwarzania geometrii wewnętrznych struktur anatomicznych [6]. Proces rekonstrukcji obiektów zbudowanych z powierzchni krzywoliniowych jest możliwy z użyciem nowoczesnych, współrzędnościowych systemów pomiarowych, które są stosowane podczas digitalizacji, czyli na pierwszym etapie inżynierii odwrotnej [7].

Dzięki automatyzacji pomiarów i integracji nowoczesnych, współrzędnościowych systemów pomiarowych z programami CAD możliwe jest odtworzenie geometrii praktycznie dowolnego wyrobu. Na dokładność pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych wyrobów ma wpływ wiele czynników, takich jak: dobór właściwej strategii pomiarowej [7], wybór algorytmów obliczeniowych [8] oraz określenie rozdzielczości pozyskiwanych danych pomiarowych [9]. Ponadto należy wziąć pod uwagę czynnik ludzki, zwłaszcza gdy pomiary współrzędnościowe są wykonywane manualnie. Przykładem ręcznego systemu pomiarowego, który może być stosowany w inżynierii rekonstrukcyjnej, jest współrzędnościowe ramię pomiarowe, wyposażone zarówno w głowicę stykową, jak i bezstykową.

Ważnym etapem analizy wyników bezstykowych pomiarów współrzędnościowych jest proces ich filtracji, który można realizować różnymi metodami. Filtracja pozwala na redukcję nadmiernej ilości danych pomiarowych i usunięcie z chmury błędnych punktów, które są nieuniknione w przypadku pomiarów bezstykowych wykonywanych w trybie ręcznym. Obecnie trudno jednak dobrać takie wartości parametrów filtracji punktów pomiarowych, które spowodują usunięcie błędów pomiarowych bez wpływu na jakość ostatecznej chmury punktów odtwarzanego obiektu. W przypadku przetwarzania danych pomiarowych wybór filtrów i ich ustawień odbywa się z reguły na podstawie doświadczeń użytkowników współrzędnościowych systemów pomiarowych i programów komputerowego wspomaganie projektowania.

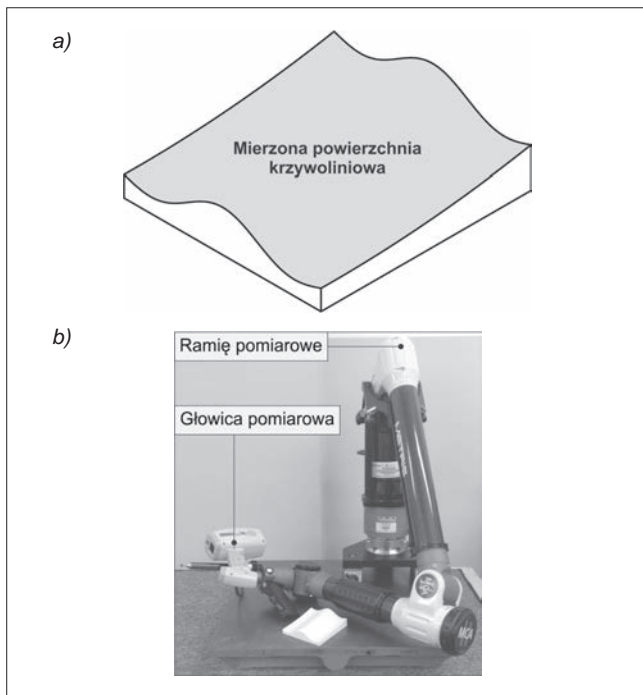
W niniejszym artykule zbadano wpływ wybranych rodzajów filtrów i ich ustawień na wyniki pomiarów powierzchni krzywoliniowej. Analizowane filtry są częścią dwóch programów komputerowych, powszechnie stosowanych na różnych etapach procesu RE.

Mierzony wyrób i stanowisko pomiarowe

Analizę wybranych funkcji programów, umożliwiających filtrację chmury punktów, przeprowadzono na podstawie wyników bezstykowych pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnej wyrobu (rys. 1a).

Mierzony przedmiot wytworzono metodą kształtowania przyrostowego z użyciem techniki 3DP (*three dimensional printing*). Pomiary górnej powierzchni tego wyrobu wykonano z zastosowaniem systemu pomiarowego, którego bazą było siedmioosiowe ramię pomiarowe MCA II, wyposażone w bezstykową głowicę laserową typu MMDx100 (rys. 1b).

* Dr inż. Paweł Turek (pturek@prz.edu.pl), dr inż. Marek Magdziak (marekm@prz.edu.pl) – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej



Rys. 1. Mierzona powierzchnia swobodna (a) oraz system pomiarowy, za pomocą którego pozyskano dane pomiarowe powierzchni krzywoliniowej w postaci chmury punktów (b)

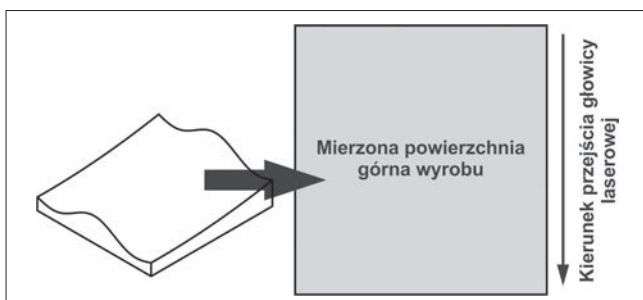
Metodyka badań eksperymentalnych

Podstawowym celem badań doświadczalnych było sprawdzenie wpływu przyjętych sposobów filtracji chmury punktów i ich ustawień na wyniki pomiarów współrzędnościowych. W tym celu bezstykowe pomiary współrzędnościowe wybranej powierzchni krzywoliniowej podzielono na dwa główne etapy.

Na pierwszym etapie uzyskano tzw. siatkę odniesienia, która pełniła rolę siatki wzorcowej w kolejnych analizach. Względem siatki wzorcowej testowano wpływ różnych typów filtrów i wartości ich parametrów na wyniki pomiarów współrzędnościowych. Badania doświadczalne polegały na porównaniu chmur punktów, przefiltrowanych z użyciem czterech różnych filtrów, z siatką wzorcową.

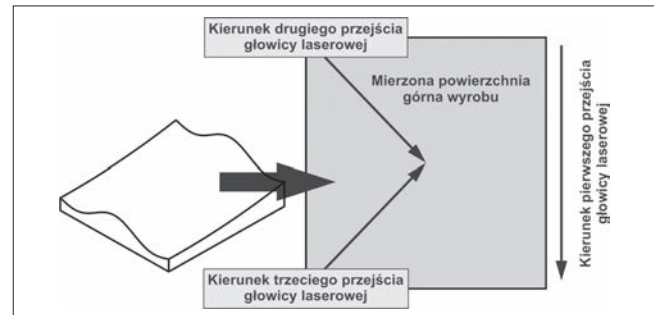
Siatkę odniesienia uzyskano w wyniku jednokrotnego przemieszczenia głowicy laserowej wzdłuż mierzonej powierzchni krzywoliniowej przedmiotu (rys. 2). Rezultaty pomiaru zapisano w formacie STL (skrót od *stereolithography*). Konwersję chmury punktów siatki odniesienia do pliku STL przeprowadzono w programie pomiarowym Focus Handheld, współpracującym z zastosowanym współrzędnościowym systemem pomiarowym.

Drugi etap pomiarów współrzędnościowych polegał na pozyskaniu chmury punktów rozpatrywanej powierzchni swobodnej, celowo zawierającej błędy skanowania w postaci tzw. nadskanów.



Rys. 2. Strategia pomiarowa zastosowana w pomiarach powierzchni odniesienia

Tego rodzaju błędy pomiarowe pojawiły się w efekcie trzykrotnego przejścia głowicy laserowej w trzech różnych kierunkach wzdłuż mierzonej powierzchni swobodnej przedmiotu (rys. 3). Dodatkowe pomiary współrzędnościowe miały na celu symulację błędów, które mogą zostać popełnione przez mniej doświadczonych operatorów współrzędnościowych ramion pomiarowych. Ostatecznie uzyskano chmurę punktów obarczoną nadskanami, którą w dalszej części badań poddano procesom filtracji z użyciem różnych programów komputerowych. Następnie wyniki filtracji porównywano z siatką odniesienia (otrzymaną na pierwszym etapie pomiarów), aby ocenić dokładność przyjętych sposobów filtracji.



Rys. 3. Strategia pomiarowa zastosowana w celu uzyskania chmury punktów z tzw. nadskanami

Nadskania, typowe dla pomiarów bezstykowych realizowanych w trybie ręcznym, utrudniają wykonanie modelu 3D wyrobu na podstawie chmury punktów. W przypadku analizowanego przedmiotu siatka utworzona na podstawie chmury punktów zawierającej nadskania miała ubytki struktury i charakteryzowała się zdecydowanie gorszą jakością topografii w porównaniu z siatką odniesienia. Wady siatki wygenerowanej z chmury punktów obarczonej nadskanami wynikały z nakładających się grup punktów pomiarowych, znajdujących się na różnych poziomach względem rekonstruowanej powierzchni wyrobu. Podczas pomiarów bezstykowych (zarówno na pierwszym, jak i drugim etapie badań eksperymentalnych) stosowano tę samą rozdzielczość pomiarową – 0,05 mm.

Porównywane filtry chmury punktów

Na kolejnym etapie przeprowadzono edycję chmury punktów zawierającej nadskania. Proces ten polegał na cyfrowej filtracji punktów pomiarowych, tworzących chmurę punktów, za pomocą programów Focus Inspection i CATIA V5-6.

W programie Focus Inspection wybrano następujące filtry:

- **scatter** – ten filtr analizuje obszar na podstawie określonej długości promienia sfery, którą definiuje użytkownik oprogramowania pomiarowego. W przypadku użycia tego filtru należy uwzględnić graniczną liczbę sąsiadujących punktów pomiarowych. Parametr ten określa liczbę punktów wewnątrz sfery o zadanej długości promienia, dla której nie następuje ich usunięcie. W przypadku mniejszej ilości danych pomiarowych przeprowadzany jest proces filtracji. W ramach wykonanych badań doświadczalnych zdefiniowano graniczną liczbę punktów równą 2;

- **grid** – ten filtr dzieli chmurę punktów na sześciany o zadanej przez użytkownika długości krawędzi i pozostawia wewnątrz każdego sześcianu tylko jeden wybrany punkt, a odrzuca pozostałe dane pomiarowe, zlokalizowane wewnątrz danego sześcianu. Punktów w danej chmurze jest tym więcej, im mniejsza jest długość krawędzi danego sześcianu.

W przypadku programu CATIA V5-6 zastosowano dwa filtry modułu Digitized Shape Editor:

- **homogeneous** – filtr oparty na kuli przemieszczającej się pomiędzy punktami pomiarowymi wchodzącymi w skład chmury punktów. Wymaganiem parametrem jest promień kuli, a usuwanymi punktami pomiarowymi są punkty znajdujące się w jej środku. Zasada działania tego filtru jest podobna do filtru grid – liczba punktów maleje wraz ze zwiększającym się promieniem kuli;
- **adaptive** – użytkownik tego filtru musi określić odchyłkę między punktami będącymi częścią chmury punktów a aproksymującymi je cięciwami. W przypadku tego filtru więcej punktów jest usuwanych w obszarach powierzchni charakteryzujących się małą wartością krzywizny. W związku z tym filtr ten jest przeznaczony przede wszystkim dla powierzchni wyrobów charakteryzujących się złożonym kształtem geometrycznym.

Wyniki pomiarów współrzędnościowych

Za pomocą polecenia Deviation Analysis, które jest dostępne w module Digitized Shape Editor oprogramowania CATIA V5-6, przefiltrowane chmury punktów porównano z siatką wzorcową rozważanego wyrobu. Wyniki tych analiz przedstawiono w tabl. I–IV.

TABLICA I. Wyniki pomiarów uzyskane z użyciem filtru scatter

Promień sfery, mm	Δ_{sr} , mm	Δ_{max} , mm	σ , mm
0,1	0,0356	0,159	0,0309
0,2	0,0373	0,162	0,0283
0,3	0,0466	0,214	0,0342
0,4	0,0509	0,222	0,0369
0,5	0,0520	0,223	0,0375
0,6	0,0523	0,223	0,0376
0,7	0,0523	0,223	0,0376
0,8	0,0524	0,223	0,0376
0,9	0,0524	0,223	0,0376
1,0	0,0524	0,223	0,0376
Rozstęp	0,0168	0,064	0,0093

TABLICA II. Wyniki pomiarów uzyskane z użyciem filtru grid

Długość krawędzi sześciangu, mm	Δ_{sr} , mm	Δ_{max} , mm	σ , mm
0,1	0,0525	0,223	0,0376
0,2	0,0529	0,223	0,0378
0,3	0,0533	0,223	0,0380
0,4	0,0537	0,223	0,0381
0,5	0,0540	0,223	0,0382
0,6	0,0551	0,223	0,0387
0,7	0,0558	0,223	0,0387
0,8	0,0565	0,214	0,0388
0,9	0,0571	0,209	0,0390
1,0	0,0576	0,205	0,0392
Rozstęp	0,0051	0,018	0,0016

TABLICA III. Wyniki pomiarów uzyskane z użyciem filtru homogeneous

Promień kuli, mm	Δ_{sr} , mm	Δ_{max} , mm	σ , mm
0,2	0,0564	0,223	0,0385
0,6	0,0622	0,222	0,0387
1,0	0,0627	0,222	0,0381
1,4	0,0638	0,198	0,0380
1,8	0,0640	0,198	0,0385
2,2	0,0641	0,189	0,0392
2,6	0,0655	0,189	0,0390
3,0	0,0644	0,178	0,0382
3,4	0,0643	0,160	0,0388
3,8	0,0641	0,174	0,0398
Rozstęp	0,0091	0,063	0,0012

TABLICA IV. Wyniki pomiarów uzyskane z użyciem filtru adaptive

Odchyłka względem cięciwy, mm	Δ_{sr} , mm	Δ_{max} , mm	σ , mm
0,12	0,0679	0,223	0,0437
0,14	0,0651	0,223	0,0437
0,16	0,0547	0,206	0,0406
0,18	0,0474	0,172	0,0352
0,20	0,0453	0,160	0,0333
0,22	0,0444	0,145	0,0326
0,24	0,0449	0,145	0,0328
0,26	0,0443	0,144	0,0326
0,28	0,0459	0,153	0,0332
0,30	0,0462	0,153	0,0336
Rozstęp	0,0236	0,079	0,0111

Tablice zawierają:

- wartości średnich arytmetycznych (Δ_{sr}) i maksymalnych (Δ_{max}) odchyłek chmur punktów, obliczonych względem siatki odniesienia;
- wartości odchyłek standardowych odchyłek (σ);
- wartości poszczególnych parametrów charakterystycznych dla porównywanych filtrów.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości ich rozstępów.

Podsumowanie

Rezultaty przeprowadzonych badań wskazują na istotny wpływ przyjętego rodzaju filtru chmury punktów na wyniki pomiarów współrzędnościowych powierzchni krzywoliniowej. Ponadto niezależnie od zastosowanego filtru zaobserwowano znaczące wahania wyników pomiarów dla przyjętych różnych wartości parametrów filtracji. Największe wartości rozstępów wyników zanotowano w przypadku zastosowania filtrów typu scatter i adaptive.

Aby więc uzyskać chmury punktów prawidłowo reprezentujące rekonstruowane przedmioty, wskazane jest przetestowanie różnych sposobów filtracji i ich parametrów przed ostatecznym wyborem ustawień w zakresie edycji danych pomiarowych.

LITERATURA

1. Raja V., Fernandes K.J. "Reverse engineering – an industrial perspective". Springer, 2010.
2. Bubicz M. „Szybkie prototypowanie. Cz. II. Skanery 3D. Wstęp do inżynierii odwrótej”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie*. 6, 9 (2008): s. 12–21.
3. Wyleżoń M. „Inżynieria odwróta w doskonaleniu konstrukcji”. *Modelowanie Inżynierskie*. 1, 32 (2006): s. 485–490.
4. Burek J., Żurek P., Gdula M., Misiura J., Żurawski K. „Wykonanie pióra łopatkki na podstawie modelu uzyskanego w wyniku pomiarów współrzędnościowych”. *Mechanik*. 2 (2015): CD.
5. Gibson I., Kvan T., Ming L.W. "Rapid prototyping for architectural models". *Rapid Prototyping Journal*. 8, 2 (2002): s. 91–95.
6. Ciocca L., Mazzoni S., Fantini M., Persiani F., Baldissara P., Marchetti C., Scotti R. "A CAD/CAM-prototyped anatomical condylar prosthesis connected to a custom-made bone plate to support a fibula free flap". *Medical & Biological Engineering & Computing*. 50, 7 (2012): s. 743–749.
7. Barbero B.R., Ureta E.S. "Comparative study of different digitization techniques and their accuracy". *Computer-Aided Design*. 43, 2 (2011): s. 188–206.
8. Magdziak M., Wdowik R. "Comparison of selected methods of probe radius correction based on measurements of ceramic workpieces". *Procedia CIRP*. 62 (2017): s. 391–395.
9. Magdziak M. "The influence of a number of points on results of measurements of a turbine blade". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 89, 6 (2017): s. 953–959. ■