

Korekcja odchyłek obróbkowych profili 2D opisanych krzywymi NURBS

Correction of machining deviations of 2D profiles described with NURBS curves

ANDRZEJ WERNER *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.113>

Przedstawiono metodę korekcji odchyłek obróbkowych profili krzywoliniowych. Bazuje ona na wykorzystaniu pomiarów współrzędnościowych wstępnie wytwarzanego obiektu. Wyniki pomiarów zawierają informacje o zaobserwowanych odchyłkach obróbkowych. Dane te są wykorzystywane w przebudowie modelu geometrycznego wytwarzanego profilu.

SŁOWA KLUCZOWE: profil krzywoliniowy, frezarka CNC, pomiary współrzędnościowe, korekta odchyłek

The method of correction of machining of curvilinear profiles is presented. This method is based on the use of coordinate measurements of the pre-manufactured object. The results of the measurements contain information about the observed machining deviations. These data are used in the reconstruction of the geometric model of the produced profile.

KEYWORDS: curvilinear profile, CNC milling machine, coordinate measurements, correction of deviations

Precyzyjne wytwarzanie przedmiotów zawierających krzywoliniowe elementy geometryczne jest często nieodzowne w produkcji oprzyrządowania i narzędzi (wykrojników do blach, elektrod do obróbki elektroerozyjnej, matryc do form wtryskowych). Zachowanie odpowiedniej dokładności wytwarzania wymaga zastosowania procedur kompensujących błędy obróbkowe.

Jest wiele sposobów takiej kompensacji. Jednym z nich jest wyznaczenie błędów geometrycznych obrabiarki CNC [1] i wykorzystanie ich do korekcji programów obróbkowych [2]. Kolejnym podejściem jest analiza błędów, których źródłem jest proces obróbki i towarzyszące mu zjawiska [3]. Rozwijane są adaptacyjne systemy kontrolne, korygujące położenie narzędzia w czasie rzeczywistym [4].

Inna, uniwersalna metoda podnoszenia dokładności wytwarzania elementów wykorzystuje pomiary współrzędnościowe. Korekcja procesu obróbkowego odbywa się na podstawie wyników pomiarów wykonanych na obrabiarce CNC [5, 6] lub na współrzędnościowej maszynie pomiarowej [7]. Dane pomiarowe uzyskane dwoma sposobami są porównywane najczęściej z nominalnymi modelami CAD obrabianych elementów. Na tej podstawie wyznaczane są odchyłki obróbkowe, wykorzystywane do korekcji błędów wytwarzania.

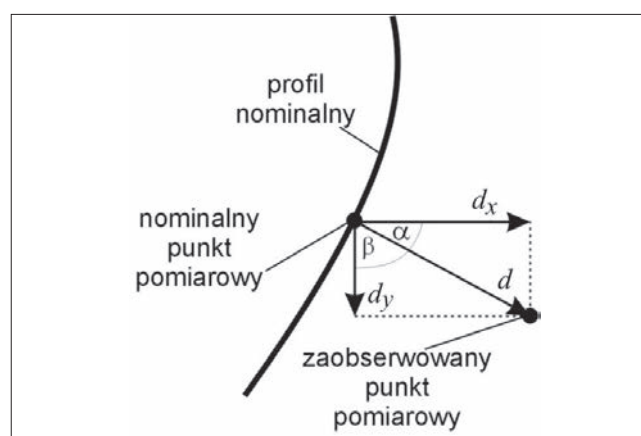
Zaproponowana w artykule metoda zwiększania dokładności bazuje na pomiarach wykonywanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Korekta programów obróbkowych odbywa się pośrednio poprzez przebudowę nominalnego modelu CAD obiektu na skorygowany model geometryczny z uwzględnieniem odchyłek zaobserwowanych po wstępnej obróbce przedmiotu.

Metoda podnoszenia dokładności wytwarzania profilu krzywoliniowego

Proponowana w artykule metoda jest realizowana w następujących etapach:

- budowa nominalnego modelu geometrycznego profilu,
- tworzenie programów obróbkowych wytwarzanego obiektu i obróbka wstępna na frezarce CNC,
- pomiary współrzędnościowe obiektu, wyznaczenie odchyłek i ich składowych,
- wyznaczenie współrzędnych skorygowanych profilu w punktach pomiarowych,
- przebudowa modelu geometrycznego wytwarzanego profilu, tworzenie skorygowanych programów obróbkowych i obróbka przedmiotu,
- pomiary współrzędnościowe i ocena poprawy dokładności wytwarzania profilu krzywoliniowego.

Podstawowym elementem proponowanej metody jest proces przebudowy modelu geometrycznego wytwarzanego obiektu. Rozpoczyna się on od współrzędnościowych pomiarów kontrolnych wstępnie obrobionego profilu. Wyniki pomiarów zawierają informacje o zaobserwowanych odchyłkach obróbkowych. Miarą wyznaczanych odchyłek są odległości pomiędzy punktami znajdującymi się na profilu (modelu nominalnym CAD) a odpowiadającymi im punktami zaobserwowanymi w wyniku pomiarów. Odchyłki są wyznaczane w kierunku normalnym do obrabianego profilu (rys. 1).



Rys. 1. Graficzna reprezentacja odchyłki obróbkowej

Po przeprowadzeniu pomiarów współrzędnościowych dysponuje się informacjami o współrzędnych punktów nominalnych i zaobserwowanych odchyłkach obróbkowych oraz cosinusach kierunkowych w punktach pomiarowych. Na bazie tych informacji można rozpocząć korekcję profilu krzywoliniowego, opisującego wytwarzany obiekt.

* Dr inż. Andrzej Werner (a.werner@pb.edu.pl) – Katedra Inżynierii Materiałowej i Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej

W pierwszej kolejności wyznacza się składowe odchyłki obróbkowych. Do obliczeń wykorzystuje się zależności:

$$d_{xi} = d_i \cdot \cos \alpha_i \quad d_{yi} = d_i \cdot \cos \beta_i \quad (1)$$

gdzie: d_{xi} , d_{yi} – składowe zaobserwowanych odchyłki obróbkowych; d_i – odchyłka zaobserwowana w punkcie pomiarowym, $\cos \alpha_i$, $\cos \beta_i$ – cosinusy kierunkowe w punktach pomiarowych, i – numer punktu pomiarowego.

Wyznaczone składowe odchyłki obróbkowych umożliwiają obliczenie skorygowanych współrzędnych punktów. Jeśli korekcja będzie przeprowadzana na „surowych” danych pomiarowych, współrzędne skorygowane w punktach pomiarowych zostaną wyznaczone z zależności:

$$x_i^{cor} = x_i^{nom} - d_{xi} \quad y_i^{cor} = y_i^{nom} - d_{yi} \quad (2)$$

gdzie: x_i^{cor} , y_i^{cor} – współrzędne skorygowane profilu krzywoliniowego, x_i^{nom} , y_i^{nom} – współrzędne punktów na profilu nominalnym (modelu CAD).

To podejście jest najprostsze, lecz nie gwarantuje osiągnięcia najlepszego efektu. Z uwagi na złożoność procesu obróbkowego oraz pomiarowego zaobserwowane odchyłki mogą zawierać istotne efekty zjawisk losowych. Odchyłki te mają dwie składowe: zdeterminowaną i losową. Wprowadzenie filtracji danych pomiarowych umożliwia minimalizację wpływu odchyłki losowych na efekt korekcji odchyłki obróbkowych. Wzór (1) zmienia postać i składowe odchyłki skorygowanych są wyznaczone z zależności:

$$d_{xi} = d_i^f \cdot \cos \alpha_i \quad d_{yi} = d_i^f \cdot \cos \beta_i \quad (3)$$

gdzie: d_i^f – przefiltrowane składowe zaobserwowanych odchyłki obróbkowych.

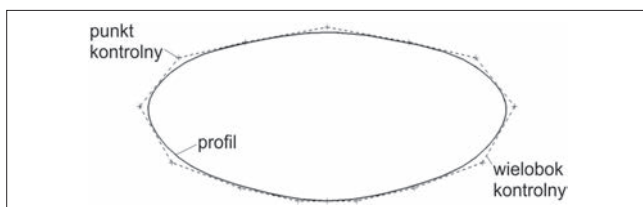
Metod filtracji danych jest wiele. Kluczem do wyboru odpowiedniej metody powinna być jej prostota. W dalszej części artykułu zostanie przedstawione podejście zaczerpnięte z technik analizy szeregów czasowych.

W efekcie przeprowadzonej procedury uzyskuje się zbiór punktów skorygowanych. W systemie CAD interpoluje się przez nie krzywą. Uzyskuje się w ten sposób model geometryczny wytwarzanego profilu kompensujący zaobserwowane odchyłki obróbkowe.

Weryfikacja eksperymentalna metody podnoszenia dokładności

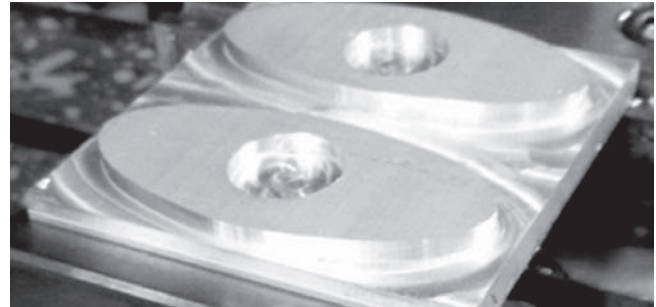
Proponowana w artykule metoda została zweryfikowana na przykładzie profilu krzywoliniowego opisanego krzywą NURBS (rys. 2). Krzywa została zbudowana na wieloboku kontrolnym składającym się z 15 wierzchołków. Stopień funkcji bazowych B -sklejanych $n = 3$.

Budowa modelu CAD obiektu oraz przygotowanie programów sterujących obróbką wykonano w systemie MasterCAM. Obróbka wykończeniowa została przeprowa-



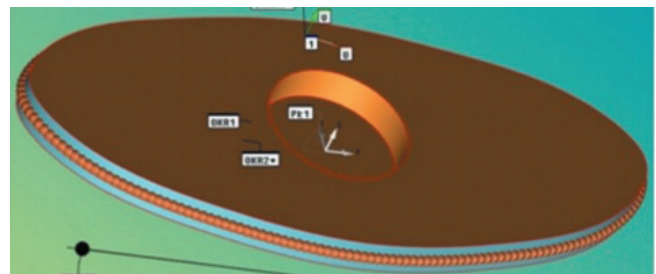
Rys. 2. Wytwarzany profil krzywoliniowy

dzona frezem walcowo-czołowym o średnicy $\varnothing 10$ mm. Przyjęte parametry obróbki to: posuw – 300 mm/min, obroty wrzeciona – 6000 obr/min, naddatek 0,3 mm. Obiekt został wykonany ze stopu aluminium PA6 (rys. 3).



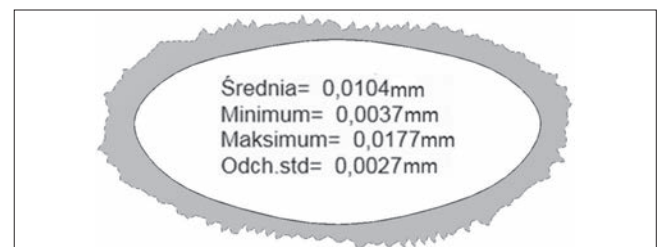
Rys. 3. Wytworzony profil krzywoliniowy

Po zakończeniu etapu wytwarzania badany obiekt został poddany pomiarom kontrolnym na maszynie pomiarowej Global Performance firmy Hexagon Metrology (oprogramowanie PC-DMIS, MPEE = 1,5 + L/333 μ m, głowica pomiarowa Renishaw SP25M, trzpień pomiarowy o długości 20 mm z kulistą końcówką o średnicy $\varnothing 2$ mm). W pomiarach wykorzystano jedną z procedur automatycznego skanowania dostępnych w systemie PC-DMIS. Uzyskano 200 punktów pomiarowych, których rozkład przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Rozkład punktów pomiarowych

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano informacje dotyczące 200 odchyłki zaobserwowanych. Rozkład odchyłki (w skali 500:1) oraz wyniki przedstawiono na rys. 5. Wszystkie odchyłki zawierały się w przedziale 0,003÷0,017 mm.



Rys. 5. Rozkład odchyłki oraz zestawienie wyników pomiarów współrzędnościowych

■ **Filtracja danych pomiarowych.** Zaproponowano adaptację filtra bazującego na średniej ruchomej ważonej. Jest on popularny w przetwarzaniu szeregów czasowych.

Zastosowanie tego filtra w przetwarzaniu danych pomiarowych oznacza, że do obliczenia nowej wartości punktu brane są pod uwagę wartości punktów z jego otoczenia. Każdy punkt pomiarowy z otoczenia wnosi swój wkład – wagę – w obliczenia. Wagi te są zapisywane w postaci maski. Typowe rozmiary masek to 3, 5 bądź 7.

Zasada filtracji danych na podstawie filtra o masce 5:

$$\begin{bmatrix} f_{i-2} & f_{i-1} & f_i & f_{i+1} & f_{i+2} \end{bmatrix}$$

Odchyłki zaobserwowane w punktach pomiarowych mają formę szeregu składającego się z n elementów. Nową wartość składową punktu d_i oblicza się w dwóch krokach. Najpierw oblicza się sumę ważoną składowej punktu i wszystkich sąsiadów zgodnie z wagami wskazanymi przez maskę filtra.

(4)

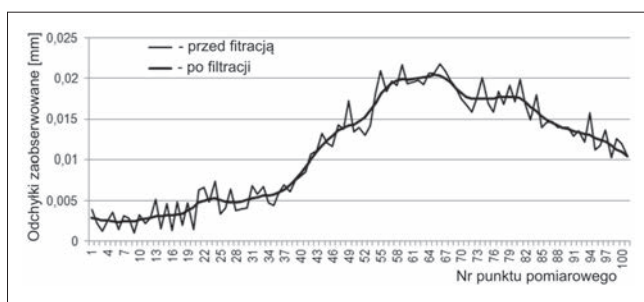
$$d_i' = f_{i-2} \cdot d_{i-2} + f_{i-1} \cdot d_{i-1} + f_i \cdot d_i + f_{i+1} \cdot d_{i+1} + f_{i+2} \cdot d_{i+2}$$

Tak otrzymaną sumę dzieli się przez sumę wszystkich wag maski, jeżeli jest ona różna od 0. W ten sposób uzyskuje się składową przefiltrowaną zaobserwowanej odchyłki obróbkowej.

$$d_i^f = \frac{d_i'}{f_{i-2} + f_{i-1} + f_i + f_{i+1} + f_{i+2}} \quad (5)$$

Normalizacja wartości składowej zaobserwowanej odchyłki obróbkowej powoduje uzyskanie gładszego rozkładu odchyłek oraz minimalizuje wpływ składowych losowych na wynik korekcji błędów obróbkowych.

Do przetestowania proponowanej procedury wykorzystano maskę 5. Z uwagi na równomierny rozkład punktów pomiarowych przyjęto, że wpływ wszystkich punktów otaczających przetwarzaną odchyłkę jest jednakowy (wszystkie wagi równe 1). Efekt filtracji danych dla 100 pierwszych punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 6.

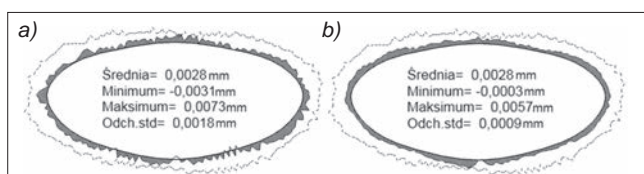


Rys. 6. Wynik filtracji danych pomiarowych

Porównując rozkład odchyłek przed filtracją i po niej, można zauważyć znaczące wygładzenie profilu reprezentującego poszczególne poziomy odchyłek. Wynika to ze zmniejszenia wpływu składowych losowych generowanych w trakcie procesu obróbkowego i pomiarowego.

■ **Poprawa dokładności wytwarzania profilu krzywoliniowego.** Zgodnie z opisaną procedurą przystąpiono do budowy dwóch skorygowanych modeli geometrycznych wytwarzanego profilu. Pierwszy model przebudowano na bazie „surowych” wyników pomiarów współrzędnych. W drugim przypadku do przebudowy modelu wykorzystano przefiltrowane odchyłki obróbkowe.

Na początkowym etapie procesu korekcji z programu pomiarowego wydzielono współrzędne nominalne oraz współrzędne zaobserwowane 200 punktów pomiarowych.



Rys. 7. Wyniki korekcji odchyłek obróbkowych: a) na „surowych” danych pomiarowych, b) na przefiltrowanych danych obróbkowych

Posługując się równaniami (1), (2) i (3), wyznaczono dwa zestawy współrzędnych skorygowanych (przed filtracją i po filtracji danych pomiarowych). Na ich podstawie w systemie Mastercam utworzono dwie skorygowane krzywe opisujące wytwarzany profil.

Na bazie przebudowanych modeli geometrycznych części powtórnie utworzono programy obróbkowe. Wykorzystano przy tym te same narzędzia i parametry, jakie przyjęto przy wstępnej obróbce obiektu. Powtórnie wytworzone dwa profile krzywoliniowe poddano pomiarom współrzędnościowym.

Rozkłady uzyskanych odchyłek obróbkowych przedstawiono na rys. 7. Zewnętrzny kontur prezentuje rozkład odchyłek po obróbce wstępnej (przed korekcją).

TABLICA. Zestawienie wyników korekcji odchyłek obróbkowych

	Przed korekcją	Po korekcji – dane „surowe”	Po korekcji – dane po filtracji
Średnia, mm	+0,0104	+0,0028	+0,0028
Min./maks., mm	+0,003/+0,017	-0,003/+0,007	0,000/+0,0057
Wys. profilu, mm	0,0140	0,0104	0,0060
Odch. stand., mm	0,0027	0,0018	0,0009

W tabelicy zamieszczono wartości liczbowe ilustrujące efekt przeprowadzonej korekcji odchyłek obróbkowych. W obu przypadkach osiągnięto istotną poprawę dokładności wytwarzania.

Podsumowanie

Wykorzystanie zaprezentowanej metody umożliwiło znaczące podniesienie dokładności wytwarzania profilu krzywoliniowego. W tabelicy przedstawiono wyniki zaobserwowane przed korekcją i po jej przeprowadzeniu dwiema metodami. W obu przypadkach dowodzą one skuteczności proponowanego sposobu postępowania.

Wyniki pokazują wyraźny spadek zaobserwowanych odchyłek obróbkowych. Wprowadzenie filtracji danych pomiarowych umożliwiło uzyskanie najlepszego wyniku końcowego. Zaobserwowane odchyłki obróbkowe i wysokość profilu są w tym przypadku najmniejsze. Odchylenie standardowe odchyłek i ich średnia wskazują na dodatkowy, pozytywny efekt wygładzenia uzyskanego profilu.

Wytworzony profil krzywoliniowy wykazuje największe podobieństwo do nominalnego modelu CAD. Filtracja danych pomiarowych umożliwiła zmniejszenie wpływu składowych losowych zaobserwowanych odchyłek obróbkowych na proces podnoszenia dokładności wytwarzania.

LITERATURA

- Wenjie T., Weiguo G., Dawei Z., Tian H. "A general approach for error modeling of machine tools". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 79 (2014): s. 17–23.
- Mehrdad V.N., Nojeh M.H., Behrooz A. "Tool path accuracy enhancement through geometrical error compensation". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 51 (2011): s. 471–482.
- Hansel A., Yamazaki K., Konishi K. "Improving CNC machine tool geometric precision using manufacturing process analysis techniques". *Procedia CIRP*. 14 (2014): s. 263–268.
- Mohsen H., Behrooz A., Mehrdad V.N. "Tool deflection and geometrical error compensation by tool path modification". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 51 (2011): s. 439–449.
- Cho M.W., Seo T.I., Kwon H.D. "Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operations". *Journal of Materials Processing Technology*. 136 (2003): s. 88–99.
- Chen Y., Gao J., Deng H., Zheng D., Chena X., Kelly R. "Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces". *Precision Engineering*. 37 (2013): s. 203–212.
- Poniatowska M., Werner A. "Fitting spatial models of geometric deviations of free-form surfaces determined in coordinate measurements". *Metrology and Measurement Systems*. 17, 4 (2010): s. 599–610. ■