

Andrzej KAWALEC, Marek MAGDZIAK

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA, KATEDRA TECHNIK WYTWARZANIA I AUTOMATYZACJI, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Lokalne metody obliczania krzywych offset**Dr hab. inż. Andrzej KAWALEC**

Pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Techniki Wytwarzania i Automatykacji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Wcześniej zatrudniony przez 8 lat w przemyśle lotniczym. Zainteresowania naukowe dotyczą metod numerycznych mechaniki ciał stałych, metod kształtowania metali lekkich, w szczególności stosowanych w technologiach lotniczych, konstruowania i wytwarzania napędów lotniczych, a także współrzędnościowej techniki pomiarowej.



e-mail: ak@prz.edu.pl

Mgr inż. Marek MAGDZIAK

Asystent w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. W swojej pracy naukowo-dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami związanymi z wykorzystaniem metod CAD/CAM/CAI w projektowaniu i wytwarzaniu produktów. Specjalizuje się we współrzędnościowej technice pomiarowej.



e-mail: marekm@prz.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono i porównano wybrane metody obliczania krzywych offset. Metody te mogą mieć zastosowanie do korekcy promienia końcówki trzpienia głowicy pomiarowej w trakcie pomiaru powierzchni swobodnych na obrabiarce sterowanej numerycznie. W ramach pracy przeprowadzono badania numeryczne oraz doświadczalne. Badania symulacyjne wykonano poprzez zastosowanie krzywych analitycznych reprezentujących zaobserwowane punkty pomiarowe. Z kolei badania eksperymentalne zrealizowano z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA II wyposażonej w głowicę pomiarową VAST XT i oprogramowanie Calypso.

Słowa kluczowe: współrzędnościowa technika pomiarowa, pomiar na obrabiarce, krzywa offset.

Local methods for computing offset curves**Abstract**

In this paper there are presented and compared various selected methods of computing offset curves. They may be used for correction of the radius of a measurement tip during measurements of free-form surfaces on a CNC machine tool directly during the manufacturing process. In order to measure free-form surfaces during in-process measurements, CAD/CAI software can be used. In the first part of the first section the disadvantages of using such programs are reviewed. One of them concerns the process of calculation of corrected points according to nominal normal vectors at measurement points. The second part of the first section shows the possible solution of this problem by using the global method of the offset curve calculation. Unfortunately, this method can be used for such measurement surfaces which are characterized by small curvature. In the second section of this paper two new algorithms for generation of corrected measurement points are presented. Both of them are based on Bézier curves. In contrast to the global method, they are local ones and can be used especially for some parts of measurement surfaces which are characterized by big curvature. The following two sections concern both numerical and experimental investigations. In the first case some methods of computing offset curves, including those presented in the second section, are compared. Comparisons are made on the basis of some analytic curves representing the sequence of the observed measurement points for which the corrected points are calculated. In the second case the results of application of the proposed local methods for computing offset curves are compared with the results of experimental investigations concerning measurements of free-form surfaces made on the CMM ACCURA II equipped with the measurement head VAST XT and the associated software Calypso.

Keywords: coordinate measuring technique, on machine measurement, offset curve.

1. Wstęp

Pomiary przedmiotów w trakcie procesu obróbki lub bezpośrednio po jego zakończeniu na obrabiarce sterowanych numerycznie (CNC) są obecnie powszechnie stosowane w praktyce przemysłowej. Pomiary te są możliwe poprzez wykorzystanie głowic pomiarowych zamontowanych we wrzecionach danych obrabiarek CNC. Niestety w większości przypadków głowice te są

używane tylko na etapie wyznaczania układów współrzędnych oraz w trakcie pomiarów przedmiotów charakteryzujących się regularnymi kształtami geometrycznymi. Natomiast części, których geometria opisana jest za pomocą skomplikowanych geometrycznie powierzchni swobodnych są bardzo często spotykane w projektowaniu przemysłowym m.in. w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, czy stoczniowym. W przeciwieństwie do prostych zadań pomiarowych programowanie procesu ich pomiaru bezpośrednio w warunkach produkcyjnych na obrabiarkach CNC może być realizowane poprzez oprogramowanie komputerowego wspomagania projektowania i pomiaru (CAD/CAI). Przykłady programów CAD/CAI, ich zalety oraz wady przedstawiono w pracach [1, 2, 3].

W związku z istnieniem szeregu czynników decydujących o dokładności procesu wytwarzania na obrabiarce sterowanych numerycznie [2] zasadniczą wadą wykorzystywania programów CAD/CAI na etapie procesu pomiaru jest możliwość korekcy promienia końcówki trzpienia głowicy pomiarowej tylko na podstawie nominalnych wektorów normalnych w danych punktach pomiarowych mierzonej powierzchni krzywoliniowej. W rezultacie tego opracowano szereg metod umożliwiających obliczanie przybliżonych wektorów normalnych, odzwierciedlających rzeczywiste kształty mierzonej powierzchni swobodnych przedmiotów. Przegląd wybranych metod przedstawiono w pracy [3].

Dodatkowo istotną wadą, ograniczającą zastosowanie oprogramowań CAD/CAI, jest ich stosunkowo wysoka cena. W związku z tym w pracy [3] zaproponowano sposób rozwiązania tego problemu poprzez wykorzystanie pakietu cykli pomiarowych Inspection Plus, jednocześnie wykazując wadę tego rozwiązania. Jako uzupełnienie przeprowadzonej w artykule [3] analizy można wyróżnić dodatkową możliwość pomiaru powierzchni krzywoliniowych z użyciem np. cyklu L9811 programu Inspection Plus, umożliwiającego pomiar pojedynczego punktu na mierzonej powierzchni.

W artykule [3] zaproponowana została także metoda obliczania tzw. krzywych offset, umożliwiająca generowanie współrzędnych punktów pomiarowych skorygowanych na podstawie współrzędnych punktów pomiarowych zaobserwowanych. Metoda ta uwzględnia informację o rzeczywistej postaci mierzonego przedmiotu a w procesie korekcy promieniowej nie korzysta z nominalnych wektorów normalnych. Opracowany algorytm wykorzystuje krzywe opisane w reprezentacji Bézier'a trzeciego stopnia z użyciem klasy ciągłości G^2 w punktach połączenia poszczególnych segmentów danej krzywej swobodnej, które odpowiadają zaobserwowanym oraz skorygowanym punktom pomiarowym. W celu weryfikacji efektywności ww. metody przeprowadzono szereg badań numerycznych mających na celu porównanie liczby punktów kontrolnych krzywych offset oraz czasu ich obliczeń dla wybranych krzywych swobodnych charakteryzujących się różnym stopniem skomplikowania. Analizę porównawczą wykonano dla sześciu przykładów krzywych oraz dwóch wartości promienia końcówki trzpienia głowicy pomiarowej. Ponadto w pracy [3] przeprowadzono badania doświadczalne, których celem było porównanie wyników opracowanej metody z wynikami pomiarów

realizowanych na wybranej współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Do tego celu wykorzystano maszynę pomiarową LH87 wyposażoną w głowicę pomiarową SP25M oraz współpracującą z oprogramowaniem pomiarowym Metrosoft.

Przeprowadzone badania, zarówno numeryczne jak i doświadczalne, dotyczące obliczania punktów pomiarowych skorygowanych na podstawie rzeczywistych wektorów normalnych doprowadziły do wniosku wskazującego na możliwość wykorzystywania powyższej metody w procesie korekcji promienia końcówki trzpienia głowicy pomiarowej tylko w przypadku pomiarów przedmiotów charakteryzujących się małą krzywizną mierzonych powierzchni.

2. Krzywe offset

W ramach niniejszej pracy przedstawiono metody obliczania krzywych offset, które w przeciwieństwie do algorytmu opisanego w artykule [3], mogą być wykorzystywane w pomiarach powierzchni swobodnych cechujących się małą wartością promienia krzywizny. W celu obliczania współrzędnych punktów pomiarowych skorygowanych opracowane algorytmy wykorzystują krzywe Bézier'a drugiego oraz czwartego stopnia interpolujące odpowiednio trzy P_0, P_1, P_2 oraz pięć zaobserwowanych punktów pomiarowych P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 .

Podstawową zaletą ww. metod generowania krzywych offset są wyprowadzone dla nich formuły matematyczne, które w związku z brakiem konieczności wykonywania złożonych operacji matematycznych mogą być zaimplementowane bezpośrednio w układach sterowania obrabiarek CNC. Przedstawione w pracy wzory matematyczne określają współrzędne wektorów stycznych do krzywych Bézier'a trzeciego i piątego rzędu. Natomiast współrzędne skorygowanych punktów pomiarowych są obliczane na podstawie dodatkowej informacji o wartościach offset jako wynikach procesu kwalifikacji końcówki trzpienia głowicy pomiarowej oraz orientacji wektorów normalnych w rozpatrywanych zaobserwowanych punktach pomiarowych.

Dla krzywych Bézier'a drugiego stopnia współrzędne skorygowanych punktów pomiarowych są obliczane z użyciem równania (1) definiującego współrzędne wektora stycznego Q_1 .

$$Q_1 = \frac{(u_1 - 1.0)^2 P_0 + (2u_1 - 1.0)P_1 - u_1^2 P_2}{u_1(u_1 - 1.0)} \quad (1)$$

gdzie współczynnik u_1 wynika z odległości pomiędzy zaobserwowanymi punktami pomiarowymi.

W przypadku zastosowania krzywych Bézier'a czwartego stopnia współrzędne wektora stycznego Q_2 są określone równaniem (2).

$$Q_2 = [a_0, a_1, a_2, a_3, a_4] [P_0, P_1, P_2, P_3, P_4]^T \quad (2)$$

gdzie $[a_i]$ oznacza wektor wiersz, zaś $[P_i]^T$ transpozycję wektora $[P_i]$.

Współczynniki a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 są zdefiniowane za pomocą wzorów (3–7).

$$a_0 = f_1(u_2, R_{13}, W_{13}, M_{13}) \quad (3)$$

$$a_1 = f_2(u_1, u_2, u_3, R_{23}, W_{23}, M_{23}) \quad (4)$$

$$a_2 = f_3(u_2, R_{13}, W_{13}, M_{13}) \quad (5)$$

$$a_3 = f_4(u_1, u_2, u_3, R_{12}, W_{12}, M_{12}) \quad (6)$$

$$a_4 = f_5(u_1, u_2, u_3, M_{13}, S_{13}) \quad (7)$$

Parametry $S_{13}, S_{23}, S_{12}, M_{13}, M_{23}, M_{12}, R_{13}, R_{23}, R_{12}, W_{13}, W_{23}, W_{12}$ określają grupy równań (8–11),

$$S_{13} = u_1 + u_3 \quad S_{23} = u_2 + u_3 \quad S_{12} = u_1 + u_2 \quad (8)$$

$$M_{13} = u_1 u_3 \quad M_{23} = u_2 u_3 \quad M_{12} = u_1 u_2 \quad (9)$$

$$R_{13} = S_{13} + 1.0 \quad R_{23} = S_{23} + 1.0 \quad R_{12} = S_{12} + 1.0 \quad (10)$$

$$W_{13} = S_{13} + M_{13} \quad W_{23} = S_{23} + M_{23} \quad W_{12} = S_{12} + M_{12} \quad (11)$$

natomiast poszczególne współczynniki $u_1 - u_3$ są obliczane, podobnie jak we wzorze (1), na podstawie wzajemnych odległości między interpolowanymi, zaobserwowanymi punktami pomiarowymi.

Wyprowadzone formuły matematyczne w połączeniu z cyklami pomiarowymi dostępnymi np. w ramach programu Inspection Plus umożliwiają, przy jednoczesnym wykorzystaniu możliwości programistycznych układów sterowania obrabiarek CNC, pomiary powierzchni swobodnych przedmiotów. Proces generowania współrzędnych punktów pomiarowych skorygowanych realizowany jest w sposób automatyczny.

Opracowane metody obliczania krzywych offset działają w sposób iteracyjny. Na każdym etapie działania ww. algorytmów krzywa interpolująca przebiega przez trzy lub pięć kolejnych sąsiednich zaobserwowanych punktów pomiarowych. Każdy krok iteracji odpowiada za obliczanie współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych zlokalizowanych wewnątrz danej grupy trzech lub pięciu punktów reprezentujących środek końcówki trzpienia głowicy pomiarowej.

3. Badania numeryczne

Badania symulacyjne miały na celu weryfikację efektywności opracowanych algorytmów obliczania krzywych offset bazujących na krzywych Bézier'a drugiego (**M1**) i czwartego (**M2**) stopnia na tle istniejących metod korekcji promieniowej. Badania wykonano dla nierównomiernie rozmieszczonych punktów pomiarowych. Porównania dokonano pod kątem dokładności poszczególnych metod, jak i czasu realizacji danych obliczeń numerycznych. Badania zostały przeprowadzone w środowisku programistycznym Python. W celu oceny dokładności poszczególnych metod wykorzystano krzywą wzorcową przedstawioną w formie analitycznej za pomocą ogólnego równania (12).

$$f(x) = \left\{ 4.0 \left(\frac{x}{A} \right)^2 \left[\left(\frac{x}{A} \right)^2 - C \right] + 1.0 \right\} B \quad (12)$$

Ponadto badania numeryczne uzupełniono o trzy metody obliczania punktów pomiarowych skorygowanych. Pierwsza z nich to metoda okręgu interpolującego trzy sąsiednio zlokalizowane zaobserwowane punkty pomiarowe (**M3**) [4]. Kierunek wektora normalnego rzeczywistego określany jest przez połączenie punktu środka okręgu ze środkowym w danej grupie punktem pomiarowym zaobserwowanym, dla którego jego skorygowany odpowiednik jest poszukiwany. Druga z metod bazuje na ilorazie różnicowym (**M4**), a współrzędne wektora stycznego określone są równaniem (13).

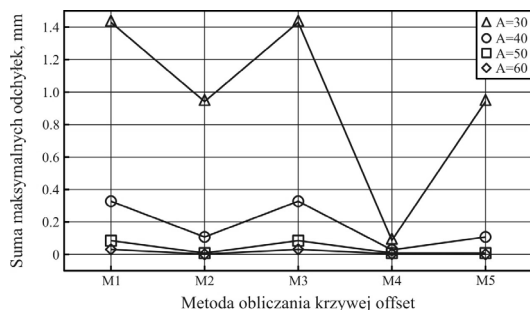
$$Q_1 = \alpha (P_2 - P_0) \quad (13)$$

gdzie: α – współczynnik proporcjonalności.

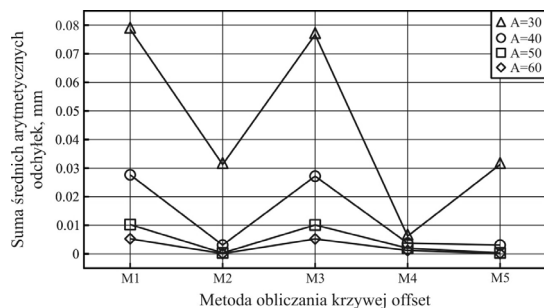
Ostatnia z dodatkowo rozpatrywanych metod obliczania krzywych offset dotyczy przypadku wykorzystania krzywych interpolujących Bézier'a piątego rzędu z uwzględnieniem numerycznej operacji odwracania macierzy (**M5**) o wymiarze 5x5 wykonanej

z użyciem języka programowania Python. Zabieg ten miał na celu porównanie szybkości realizowanych obliczeń z użyciem opracowanych algorytmów generowania krzywych offset za pomocą wyprowadzonych formuł matematycznych z obliczeniami wymagającymi odwracania macierzy wartości parametrów.

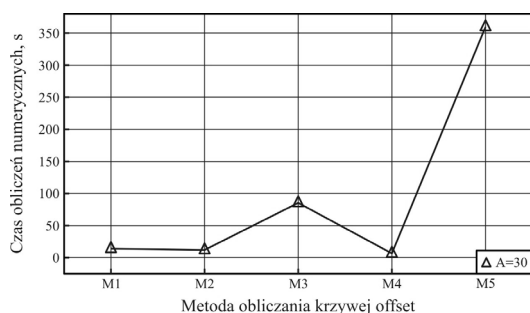
Rysunki 1–3 prezentują wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych dla wszystkich rozpatrywanych metod korekcji promieniowej (M1–M5). Metody te analizowano pod kątem sumy maksymalnych oraz średnich arytmetycznych odchyłek obliczonych skorygowanych punktów pomiarowych w stosunku do krzywej wzorcowej oraz czasu wykonywania obliczeń symulacyjnych. Badania numeryczne zostały wykonane dla wartości offset równej 1.5 mm.



Rys. 1. Porównanie sumy maksymalnych odchyłek dla różnych wartości A
Fig. 1. Comparison of sums of the maximum deviations obtained for various values of factor A



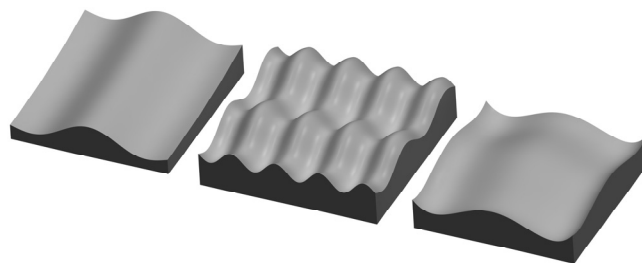
Rys. 2. Porównanie sumy średnich arytmetycznych odchyłek dla różnych wartości A
Fig. 2. Comparison of sums of the arithmetic average of deviations obtained for various values of factor A



Rys. 3. Porównanie czasów obliczeń numerycznych dla $A=30$. Wykresy w przypadku pozostałych wartości współczynnika A mają bardzo podobny przebieg
Fig. 3. Comparison of the time of numerical calculations for $A=30$. The graphs for other values of factor A are very similar

4. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne obejmowały pomiary wybranych przekrojów powierzchni swobodnych przedmiotów przedstawionych na rysunku 4.



Rys. 4. Przedmioty mierzone w trakcie badań doświadczalnych
Fig. 4. The parts measured during experimental investigations

Badania eksperymentalne wykonano z wykorzystaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA II wyposażonej w głowicę pomiarową VAST XT i oprogramowanie Calypso. Wynikami pomiarów na maszynie pomiarowej były zaobserwowane punkty pomiarowe, które w kolejnym etapie zostały poddane procesowi korekcji przy pomocy algorytmu obliczeniowego właściwego dla programu Calypso.

Uzyskane z przeprowadzonych pomiarów wyniki w postaci współrzędnych punktów pomiarowych skorygowanych porównano z punktami otrzymanymi na podstawie algorytmów generowania krzywych offset wykorzystujących krzywe Béziera (M1, M2). Na tej podstawie obliczono wartości maksymalnych odchyłek między dwiema grupami punktów pomiarowych skorygowanych.

Najlepsza metoda obliczania krzywej offset wybrana na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych, tj. metoda bazująca na krzywej Béziera czwartego stopnia, została wdrożona w układzie sterowania SINUMERIK 840D obrabiarki CNC DMU 80P duoBLOCK.

5. Wnioski

Zaproponowane w niniejszym artykule metody obliczania krzywych offset mogą być stosowane, w trakcie pomiaru powierzchni swobodnych na obrabiarkę CNC, naprzemiennie z algorytmem obliczania skorygowanych punktów pomiarowych przedstawionym w pracy [3]. Wybór odpowiedniego sposobu korekcji promieniowej jest uzależniony m.in. od wartości krzywizny mierzonej powierzchni. Kolejne etapy badań powinny być prowadzone w kierunku opracowania algorytmów umożliwiających wybór właściwej metody korekcji promienia końcówki trzpienia głowicy pomiarowej w sposób zautomatyzowany na podstawie stopnia skomplikowania mierzonych profili powierzchni swobodnych.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy (nr N N503 173737).

6. Literatura

- [1] Kawalec A., Magdziak M.: An influence of the number of measurement points on the accuracy of measurements of free-form surfaces on CNC machine tool. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 35(2), s. 17–27, 2011.
- [2] Kawalec A., Magdziak M., Cena I.: Measurement of free-form surfaces on CNC milling machine considering tool wear and small changes of its working length and offset radius. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 35(1), s. 25–40, 2011.
- [3] Kawalec A., Magdziak M.: Method for computing of an offset curve. *Advances in Coordinate Metrology*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, s. 197–206, 2010.
- [4] Juras B.: Metoda pomiaru zarysu o zmiennej krzywiznie na wielo-współrzędnościowej maszynie pomiarowej. Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków 1997.