

Barbara JURAS

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
INSTYTUT TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI PRODUKCJI

Ocena błędów pomiarów współrzędnościowych związanych z algorytmem obliczeniowym

Dr inż. Barbara JURAS

– jest pracownikiem Zakładu Procesów Wytwarzania i Systemów Jakości w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Krakowskiej. Jej zainteresowania związane są z pomiarami wielkości geometrycznych przy wykorzystaniu współrzędnościowej techniki pomiarowej. Problematyka badawcza dotyczy pomiarów nietypowych, krzywoliniowych elementów o złożonych kształtach oraz szeroko rozumianej dokładności pomiarów.



Streszczenie

W referacie poruszono zagadnienie błędów procedur obliczeniowych wykorzystywanych w pomiarach współrzędnościowych. Błędy algorytmów wynikają między innymi z przyjętego sposobu obliczania elementu wyrównanego, przybliżonych metod rozwiązywania równań nieliniowych i innych. Metody testowania oprogramowania wykorzystujące software wzorcowy bądź też wzorcowe parametry zarysu pozwalają na określenie dokładności wykorzystywanych procedur obliczeniowych.

Abstract

The paper presents the problem calculation algorithms errors. Algorithms errors result from mathematical description, methods non-linear equation solutions etc. Methods of test calculation algorithms using model software and model signals are presented.

Wprowadzenie

Procedury obliczeniowe wykorzystywane do identyfikacji parametrów mierzonych obiektów są także jednym ze źródeł błędów pomiaru. Nie tylko przenoszą one błąd przejścia współrzędnych punktów pomiarowych na końcowy wynik pomiaru, ale także same wprowadzają dodatkowe błędy.

Błędy algorytmów wynikają między innymi z:

- przyjętego opisu elementu kształtu,
- zastosowanych uproszczeń opisu matematycznego: linearyzacja równań, rozwinięcia w szeregi, aproksymacja i interpolacja wielkości,
- przyjętego sposobu obliczania elementu wyrównanego,
- przybliżonych metod rozwiązania równań nieliniowych, itp.

Zgodnie z normą [3] jako element, w stosunku do którego powinny zostać określone odchyłki kształtu wykorzystany powinien być element wyrównany, dla którego suma kwadratów odległości punktów pomiarowych od elementu średniego jest najmniejsza. Ze względu na złożoną postać tak zbudowanej funkcji zostaje ona przez producentów oprogramowania niejednokrotnie zmieniona w celu uproszczenia i przyspieszenia obliczeń numerycznych. Przykładem może być oprogramowanie [1] do obliczania charakterystycznych parametrów okręgu: współrzędnych środka i promienia. W celu linearyzacji układu równań służących do wyznaczenia szukaných parametrów zrezygnowano z minimalizacji sumy kwadratów odchyłek w postaci:

$$f(r_i) = \sum_i a_i^2 = \sum_i (R - r_i)^2 \quad (1)$$

na rzecz funkcji:

$$f(r_i) = \sum_i (R^2 - r_i^2) \quad (2)$$

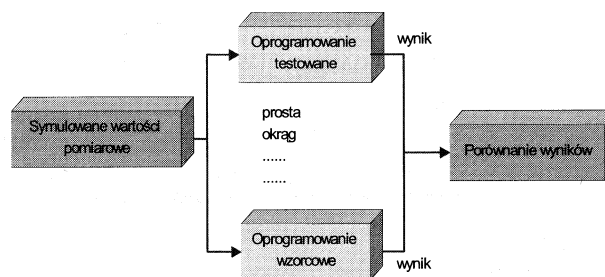
gdzie:

R - promień okręgu

r_i - odległość od zmierzonego punktu „i” od środka okręgu.

Testowanie oprogramowania w oparciu o software wzorcowy

O skali problemu mogą świadczyć badania oprogramowania dla podstawowych elementów kształtu tj.: prostej, okręgu, płaszczyzny, walca i stożka przeprowadzone w Physikalish Technische Bundesanstalt PTB [2]. W badaniach testowano oprogramowania 12 producentów oprogramowania dla potrzeb współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Jako metodę oceny dokładności oprogramowania przyjęto porównanie z oprogramowaniem wzorcowym przygotowanym w PTB, przy wykorzystaniu symulacji danych wejściowych (rys. 1).



Rys. 1. Testowanie software z wykorzystaniem danych symulowanych

Wyniki przeprowadzonych badań zawiera tabela 1.

Tab. 1. Wyniki testu oprogramowania [2]

Element kształtu	Stopień zgodności				
	1	2	3	4	bez wyników
Linia prosta	60%	13%	5%	5%	17%
Płaszczyzna	73%	12%	6%	9%	0%
Okrąg	76%	7%	9%	0%	8%
Okrąg w przestrzeni	56%	19%	0%	0%	25%
Walec	52%	1%	5%	9%	33%
Stożek	27%	5%	10%	25%	33%

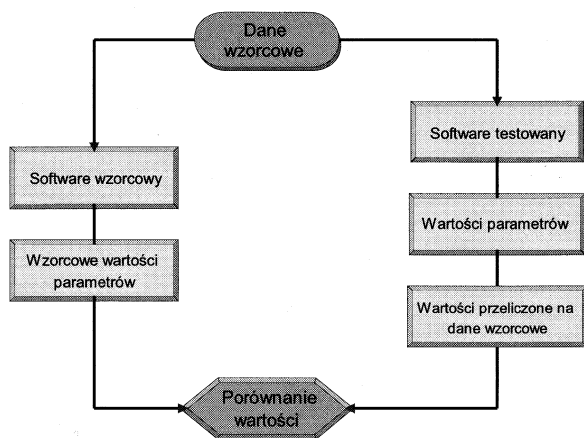
gdzie:

stopnie zgodności od 1 do 4 odpowiadają następującym różnicom pomiędzy wartościami parametrów charakteryzujących element otrzymanymi jako wynik obliczeń przez oprogramowanie wzorcowe i testowane:

- stopień 1 – różnice do 0.1 μm dla wymiarów liniowych lub 0.1" dla kątowych,
- stopień 2 – różnice do 0.5 μm lub 0.5",
- stopień 3 – różnice do 2 μm lub 2",
- stopień 4 – różnice powyżej 2 μm lub 2".

W odpowiedzi na konieczność kontroli dokładności oferowanego na rynku oprogramowania metrologicznego w opracowaniu jest norma ISO/CD 10360-6 mająca na celu określenie sposobu oceny dokładności algorytmów obliczeniowych stosowanych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych pt.: Sposób testowania oprogramowania do obliczania zastępczych elementów kształtu Gaussa dla metrologii współrzędnościowej.

Podstawy testowania oprogramowania do określania parametrów zastępczych zarysów Gaussa przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Metoda testowania oprogramowania wg ISO

Przeliczenie wartości parametrów na wzorcowe związane jest z możliwością przyjęcia różnych sposobów jednoznacznego opisu poszczególnych elementów geometrycznych np.: linia prosta w przestrzeni może być zdefiniowana przez podanie współrzędnych dwóch punktów na niej leżących lub przez punkt i współrzędne wektora do niej równoległego itd. Norma określa sposób opisu i precyzuje jakie wielkości opisujące dany element kształtu podlegają porównaniu.

Określone przez normę dopuszczalne wartości błędów obliczonych parametrów przedstawia tabela 2.

Tab. 2. Wartości dopuszczalne błędów obliczonych parametrów wg ISO/CD10360-6

	Położenie	Orientacja	Wymiar	Kąt
Wartości parametrów	0,01 μm	10 ⁻⁸	0,01 μm	10 ⁻⁸
Wartości sum reszkowych	0,01 μm	-	-	-

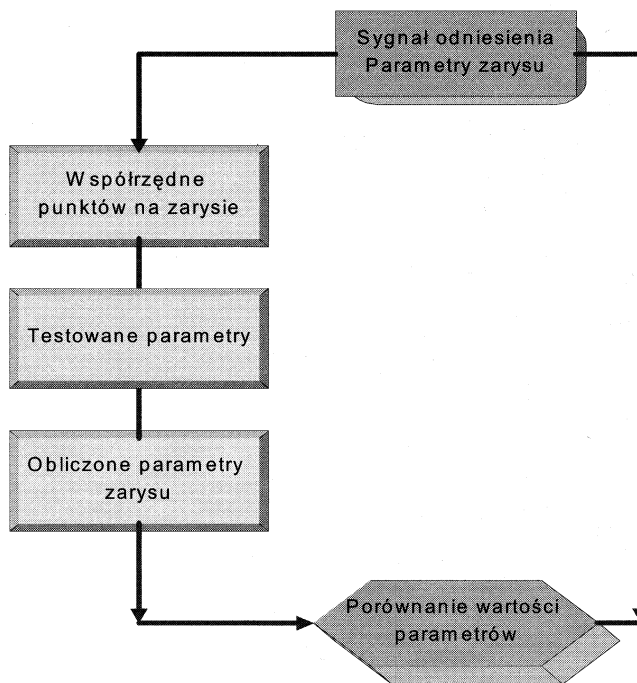
Przedstawioną powyżej metodę można określić jako ustalanie rozbieżności między procedurami z wykorzystaniem operacji odniesienia: ten sam sygnał pomiarowy przetwarzany jest równocześnie przez software pomiarowy i software odniesienia.

Testowanie oprogramowania w oparciu o sygnał wzorcowy

Innym sposobem oceny dokładności oprogramowania jest symulacja pomiaru z określonymi błędami, wykorzystanie uzyskanych w ten sposób danych do obliczenia parametrów zarysu przez testo-

wane oprogramowanie i porównanie założonych na wejściu parametrów z uzyskanymi z obliczeń.

Metoda ta ma zastosowanie w przypadku nietypowych elementów kształtu, dla których brak jest oprogramowania wzorcowego czy jakichkolwiek innych danych porównawczych, w szczególności może zostać wykorzystana do określenia dokładności procedur obliczeniowych parametrów zarysów o zmiennej krzywiźnie



Rys. 3. Testowanie oprogramowania z sygnałem odniesienia

Można tę metodę określić jako identyfikację z sygnałem odniesienia. Wartości parametrów opisujących zarys, na którym są rozmieszczone punkty symulujące wartości pomiarowe są wartościami odniesienia dla wartości parametrów uzyskanych w wyniku obliczeń z wykorzystaniem ocenianego oprogramowania.

Błąd pomiaru liczony jest w stosunku do wartości wejścia i mówi na ile parametry uległy zmianie.

Realizacja pierwszego sposobu oceny oprogramowania uzależniona jest od posiadania wzorcowego oprogramowania. Realizacja drugiego wymaga odpowiedniego doboru punktów pomiarowych.

Wprowadzenie na wejściu układu danych nominalnego mierzonego zarysu o zmiennej krzywiźnie, obliczenie teoretycznych punktów pomiarowych leżących na ekwidystancie przy zadanym promieniu sondy pomiarowej, a następnie zaburzenie wartości współrzędnych punktów o symulowane błędy stanowi podstawę do oceny dokładności uzyskanego wyniku pomiaru wyznaczenia parametrów mierzonego zarysu.

Wyniki badań uproszczonej procedury wyznaczania okręgu wyrównanego

W dalszej części referatu przedstawiono przykładowe wyniki testowania oprogramowania do wyznaczania parametrów okręgu, opartego na uproszczonym równaniu przedstawionym we wzorze (2).

W części wstępnej badań sprawdzono poprawność działania procedury, wprowadzając różną ilość i różne rozmieszczenie punktów leżących na zarysie idealnym. W każdym przypadku wyznaczone wartości parametrów zarysu były równe wartościom zadanim.

Wprowadzenie błędu przypadkowego do zadanych wartości współrzędnych punktów na wejściu spowodowało charakterystycz-

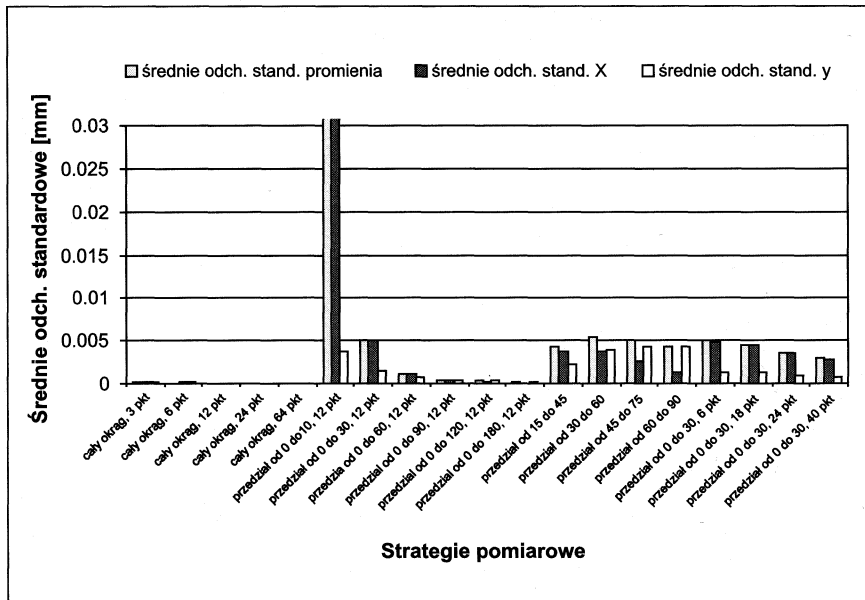
ne zmiany wartości wyznaczonych parametrów okręgu. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań. Symulowano pomiar okręgu o średnicy $D=25\text{mm}$ i środka w punkcie $O(0,0)$, wartość błędów przypadkowych $\delta=0.001\ \mu\text{m}$; liczba powtórzeń obliczeń dla każdej z rozważanych strategii pomiaru $n=40$.

Jako miarę dokładności wyznaczenia parametrów zarysu przyjęto wartości średnich odchylenia standardowych. Położenie fragmentu zarysu, na którym rozmieszczone były punkty wzorcowe definiowane było przez podanie kąta pierwszego i ostatniego punktu na zarysie: kąt odmierzany był od dodatniego kierunku osi OX.

Na wykresie przedstawiono wyniki badań w przypadku:

- równomiernego rozmieszczenia różnej liczby punktów na zarysie,
- objęcia pomiarem zmiennej długości fragmentu zarysu, stała liczba punktów pomiarowych,
- różnego umieszczenia objętego pomiarem fragmentu na zarysie, stała liczba punktów,
- objęcie pomiarem fragmentu okręgu, zmieniła liczba punktów na zarysie.

Jak widać z przedstawionego wykresu w przypadku równomiernego rozmieszczenia punktów na zarysie, dla liczby punktów pomiarowych $n>6$ średnie odchylenia standardowe dla wszystkich parametrów okręgu przyjmują wartości $\sigma_x<0.0001$, $\sigma_y<0.0001$ i $\sigma_r<0.0001$.



Rys. 4. Zależność średniego odchylenia standardowego parametrów okręgu w funkcji różnych danych wzorcowych

Rozmieszczenie punktów pomiarowych na fragmencie zarysu silnie zmniejsza dokładność obliczeń.

Wzrost liczby punktów pomiarowych, w przypadku objęcia pomiarem tylko fragmentu zarysu w stopniu niewielkim poprawia działanie procedury obliczeniowej.

Różna dokładność wyznaczenia współrzędnych x i y środka okręgu, w przypadku przemieszczania fragmentu objętego pomiarem po kontrolowanym zarysie, wskazuje na brak symetrii procedury obliczeniowej w przypadku wyznaczania tych parametrów.

Przetestowana procedura obliczeniowa może być wykorzystywana w przypadku równomiernego rozmieszczenia punktów pomiarowych na całym zarysie. Objęcie pomiarem mniejszego obszaru wymaga wzrostu liczby punktów pomiarowych, przy czym pomiarem powinno zostać objęte minimum 30% długości zarysu.

Podsumowanie

Przedstawione metody testowania oprogramowania pozwalają na ocenę dokładności wykonywanych przez oprogramowanie metrologiczne obliczeń, a zatem na określenie wartości błędów jakie te obliczenia wprowadzają do końcowego wyniku pomiaru.

W oparciu o znane wartości błędów przejścia współrzędnych punktów pomiarowych w przestrzeni pomiarowej maszyny, wykorzystując symulację pomiaru, można prognozować dokładność pomiaru wybranych zarysów realizowanych współrzędnościową techniką pomiarową.

Literatura

- [1] E. RATAJCZYK: Współrzędnościowa technika pomiarowa. *Oficyna wydawnicza PW 1994.*
- [2] F. WALDELE, R. HEGELMAN, E. TRAPET: *Coordinate Metrology PTB-F-11, Braunschweig, II 1992.*
- [3] ISO/CD 10360-6.
- [4] B. JURAS: Metoda pomiaru zarysu o zmiennej krzywiznie realizowanego z wykorzystaniem wielowspółrzędnościowej maszyny pomiarowej. *Praca doktorska. Politechnika Krakowska 1997.*

Artykuł recenzowany

S&O MET s.c.

METROLOGIA EKOLOGIA

44-100 GLIWICE, ul. Kołłączyki 32/3

tel./fax (032) 231 57 19, tel./kom 0 601 49 53 87

OFERUJEMY APARATURĘ POMIAROWĄ

URZĄDZENIA DO POMIARÓW EKOLOGICZNYCH:

Casella-Cel – analizatory natężenia dźwięku, mierniki kierunku i siły wiatru, stacje meteorologiczne, mierniki zapylenia, aerozoli, klimatu pomieszczeń.

Monitran – mierniki wibracji, przetworniki położenia, akcelerometry, wykonania Ex.

Crowcon – osobiste i stacjonarne analizatory gazów.

URZĄDZENIA KONTROLNO-POMIAROWE:

Raytek – pirometry przenośne i stacjonarne, również dwubarwne.

Labfacility – termopary, przewody kompensacyjne, wtyczki, złącza, czujniki temperatury.

Mescon – przetworniki pomiarowe wielkości elektrycznych i nieelektrycznych.

Ellison Sensors – przetworniki ciśnienia i głębokości.

Onix Instrument (Peek) – przepływomierze ultradźwiękowe, przenośne i stacjonarne w tym wielokanałowe i do pomiarów zawiesin, przetworniki gęstości.

Vaisala – mierniki wilgotności i stężenia gazów.

Biwater – urządzenia do wykrywania przecieków z sieci wodociągowych i ciepłowniczych.

Ericksen – mierniki grubości pokryw, **Sheen** – miernik grubości pokryw i polysku.

URZĄDZENIA LABORATORYJNE:

Mierniki przenośne – temperatury, wilgotności, ciśnienia, prędkości przepływu, prędkości obrotowej, dalmierze laserowe.

Grant – termostaty, myjki ultradźwiękowe, inkubatory transportowe, bloki grzejące.

Labfacility – piece kalibracyjne, **Eurotron Italiana** – kalibratory.

Zapraszamy do współpracy i życzymy zadowolenia z nabytego u nas sprzętu.