

## Roman STRYCZEK<sup>1</sup>, Wojciech SZCZEPKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KATEDRA TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI, ATH BIELSKO-BIAŁA, ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała

<sup>2</sup>SIEMENS SP. Z O. O. SEKTOR INDUSTRY, ul. Gawronów 22, 40-527 Katowice

# Szacowanie błędu trajektorii narzędzia w 5-osiowej obróbce współbieżnej

Dr hab. inż. Roman STRYCZEK

Profesor ATH w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Specjalista w zakresie komputerowego wspomaganego projektowania procesów i operacji wytwórczych, obrabiarek sterowanych numerycznie, elastycznego programowania obrabiarek, sieci Petri oraz metod sztucznej inteligencji w wytwarzaniu maszyn. Bogate doświadczenie w zakresie współpracy z przemysłem.



e-mail: rstryczek@ath.bielsko.pl

Mgr inż. Wojciech SZCZEPKA

Absolwent Politechniki Śląskiej, wydziału Automatyki Elektroniki i Informatyki na specjalności Komputerowe Systemy Sterowania. Obecnie pracuje w firmie Siemens Industry w Katowicach. W ramach pracy zawodowej zajmuje się systemami sterowania numerycznego CNC. Działa w Komitecie Technicznym KT50 przy PKN, zajmuje się bezpieczeństwem funkcjonalnym.



e-mail: wojciech.szczepka@siemens.com

### Streszczenie

Artykuł prezentuje możliwości zwiększenia produktywności frezarek z dwoma jednostkami obróbczymi, wyposażonymi w wielokanałowy układ sterowania. Metoda opiera się na możliwości współbieżnej pracy dwóch jednostek obróbczych, realizujących złożone trajektorie, każda w 3 osiach, przy czym oś X jest wspólną osią dla obu jednostek. Zaprezentowano możliwości przechwytywania osi pomiędzy kanałami, funkcje synchronizacji pracy wielokanałowej, narzędzia do tablicowania złożonych trajektorii ruchu, funkcje sprzężenia osi, holowania, śledzenia ruchu i diagnostyki w tym zakresie. Przedstawiono przykład modelu szacowania błędów trajektorii narzędzia.

**Słowa kluczowe:** interpolacje 5-cio osiowe, obróbka współbieżna, błąd trajektorii narzędzia.

## Estimation of the tool trajectory error in 5-axis simultaneous machining

### Abstract

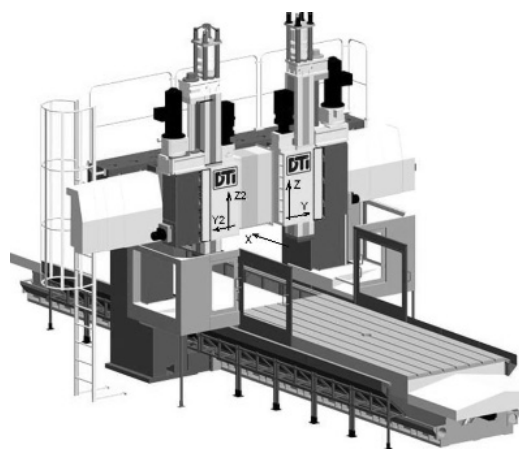
Error analysis in realization of complex trajectories of the tool movement of a multi-axis lathe is currently an issue widely discussed in the literature [1, 2, 3, 4]. However, this literature does not include particular cases, such as machining by means of a bridge type mill with two machining units equipped with a multi-channel CNC system – Sinumerik 840D. There is a possibility of simultaneous work of two machining units which realize complex trajectories; three axes per each unit; moreover, they both share axis X (Fig. 1). There are presented the standard programming tools necessary for such movements (axis replacement between the channels, data transfer between the channels, program coordination in multi-channel operations), the tools for defining curve tables in order to realize complex trajectories, the functions of coupled motions between the leading and following axis as declaration well as the possibilities of movement control and system diagnostics [5]. The method of declaration and initiation of external procedures in the leading channel (Fig. 2) is discussed. The worked out procedure for tabling the motion on the regular curve (Fig. 3, 4) necessary for simultaneous, double circular interpolation controlled by one channel is presented. The analysis of the tool trajectory errors and the chart for error estimation (Fig. 5) are also contained in the paper. The method was verified on a practical example of rail machining. The productivity of the machine tool in that particular case increased by 20-30%.

**Keywords:** 5-axis interpolation, simultaneous machining, tool trajectory error.

## 1. Wprowadzenie

Jedną z zauważalnych tendencji w obróbce skrawaniem jest obecnie coraz częstsze stosowanie obróbki 5-cio osiowej. Wiąże się z tym problem szacowania i kompensacji błędów obrabiarek umożliwiających tego typu obróbkę, szeroko publikowany w artykułach naukowych [1, 2, 3, 4]. Mało uwagi poświęca się błędom wynikającym z realizacji przybliżonych trajektorii ruchu, wymuszonych możliwościami kinematycznymi obrabiarki. Jeden z takich przykładów jest przedmiotem analizy w tej pracy.

Operacje frezarskiej obróbki przedmiotów wielkogabarytowych cechuje: długi czas przygotowawczo-zakończeniowy, długi czas pracy pojedynczych narzędzi, duże i nierównomierne naddatki obróbkowe. Stąd potrzeba przeprowadzenia optymalizacji tego typu operacji, zarówno parametrycznej jak i strukturalnej. Bardzo efektywnym sposobem skrócenia czasu jednostkowego operacji jest wprowadzenie współbieżnej obróbki przedmiotu, najczęściej przez dwie równoległe pracujące jednostki obróbcze. W przypadku frezarek pionowych bramowych z przesuwным stołem (rys. 1) obrabiany przedmiot lub przedmioty mocowane są na stole, przemieszczającym się w osi X', wspólnej dla dwóch jednostek obróbczych. Dwa suporty pionowe umieszczone są na wspólnej belce (bramie). Każda z jednostek obróbczych posiada więc sobie przyporządkowaną oś Z oraz oś Y, lecz oś X' jest wspólna. Stosuje się układ dwukanałowy, wspólny dla obu jednostek. Dwukanałowa koncepcja sterowania pozwala na równoległe wykonywanie różnych programów technologicznych w obu kanałach jednocześnie. Omawiany typ maszyny posiada dodatkowo kilka osi „ustawczych”, które wykorzystywane są do realizacji całego cyklu pracy maszyny (wymiana narzędzia, sterowanie obrotem głowicy narzędziowej kątowej). Podstawowe trzy osie tworzące kartezjański układ współrzędnych, realizujące ruchy narzędzia, nazywane są osiami „geometrycznymi”. W konwencjonalnej maszynie dwukanałowej zakłada się, że dostępne są w obu kanałach zestawy osi maszynowych (X,Y,Z). W omawianym przykładzie jeden z kanałów nie posiada osi X. Tak zaprojektowana obrabiarka posiada poważne ograniczenia: obrabiane przedmioty muszą być takie same lub obrabiane przedmioty muszą być swoim lustrzanym odbiciem. W szczególności, może to być jeden przedmiot obrabiany lecz trajektorie ruchu obu jednostek muszą być zgodne.



Rys. 1. 5-osiowe, pionowe, bramowe centrum obróbkowe (za zgodą DTI Racibórz)  
Fig. 1. The 5-axis, bridge-type vertical milling center

## 2. Programowe narzędzia dedykowane obróbce współbieżnej

Firma Siemens zaproponowała w nowych generacjach swoich układów Sinumerik 840D szereg narzędzi programowych, umożliwiających eliminację dotychczasowych ograniczeń [5]. Ich odpowiednie użycie pozwala na znaczne skrócenie czasu obróbki przedmiotów o asymetrycznych kształtach lub współbieżną obróbkę różnych przedmiotów. Jedyнным warunkiem realizacji tego typu obróbki jest, aby ruch w osi X był nieprzerwanym ruchem wiodącym dla pozostałych czterech sprzężonych osi geometrycznych.

Idea realizacji zadania programowania współbieżnych trajektorii zakłada wykorzystanie następujących funkcji dostępnych w układzie sterowania Sinumerik:

- tablicowania trajektorii ruchów narzędzia,
- przechwytywania osi pomiędzy kanałami układu sterowania,
- sprzężenia osi,
- synchronizacji przetwarzania dwukanałowego.

Dla celów realizacji dwukanałowej interpolacji 5-cio osiowej w układzie sterowania SINUMERIK wymagane jest użycie następujących funkcji programowych:

1. Funkcja sprzężenia osi obrabiarki umożliwiająca realizację złożonych ruchów, realizowanych równocześnie w dwóch lub większej liczbie osi sterowanych.

LEADON(*F*Axis, *L*Axis, *n*) - aktywacja sprzężenia osi,

LEADOF(*F*Axis, *L*Axis) - odwołanie sprzężenia osi,

gdzie: *F*Axis – oznaczenie osi holowanej, *L*Axis – oznaczenie osi prowadzącej, *n* - numer tablicy.

2. Opis złożonej trajektorii poprzez definicję tablicy punktów leżących na projektowanym torze narzędzia realizowanym w osiach holowanych, programowanych w drugim kanale układu sterowania (Y2, Z2). Do definicji tablic oraz aktywacji i odwołania funkcji sprzężenia osi służą następujące komendy:

CTABDEF(*F*Axis, *L*Axis, *n*, *applim*) - inicjacja definicji tablicy krzywej,

CTABEND() - koniec definicji tablicy krzywej,

CTABDEL(*n*) - kasowanie tablicy krzywej,

gdzie: *applim* - parametr określający periodyczność tablicy, 0 - tablica jest nieperiodyczna, 1 - tablica jest periodyczna odnośnie osi prowadzącej, 2 - tablica jest periodyczna odnośnie osi prowadzącej i osi holowanej.

Kasowanie wcześniej zdefiniowanych tablic jest niezbędne, gdyż brak procedury kasowania może doprowadzić do wyczerpania ograniczonego limitu tablic, zadeklarowanego w układzie sterowania. Istnieją także funkcje dla odczytu aproksymowanych wartości zarówno w osi holowanej (CTAB) jak i prowadzącej (CTABINV).

3. W systemie sterowania można odczytać informacje diagnostyczne o działaniu funkcji sprzężenia osi. Służą do tego zmienne systemowe:

\$AA\_LEAD\_P - Wartość pozycji dla osi holowanej,

\$AA\_LEAD\_V - Wartość prędkości dla osi prowadzącej,

\$AA\_COUP\_ACT[*F*Axis] - status sprzężenia dla osi holowanej, 0 - brak sprzężenia, wartość 16 - sprzężenie aktywne.

4. Przechwycenie osi kanału osi holowanych przez kanał osi prowadzącej: GETD(Z2, Y2). Pojęcie „kanał osi holowanych” odnosi się do kanału dla którego nie jest przyporządkowana żadna oś prowadząca.

5. Przekazanie do zmiennej globalnej, zadeklarowanej w przestrzeni zmiennych użytkownika GUD (Global User Data) wartości korekcji długościowej narzędzia w kanale osi holowanych:  $\_R0=\$TC\_DP3[T,D]$ , gdzie:  $\_R0$  – przykładowa nazwa globalnej zmiennej użytkownika, T – nr narzędzia, D – nr ostrza.

6. Odczyt GUD w kanale osi prowadzącej.

7. W trakcie budowy tablicy funkcji w osi Z2 należy zwiększyć współrzędne Z2 o wartość korekcji długościowej narzędzia. Uwaga: punkty 5, 6 i 7 są niezbędne w przypadku, gdy oś Z2 jest osi holowaną.

8. Wymagane jest ustawienie osi dokładnie na początkowej wartości zakresu osi prowadzących i osi holowanych (Y2, Z2) przed wywołaniem funkcji sprzężenia. W przypadku gdy ruch na tę pozycję w osi Z2 jest realizowany w kanale osi holowanej, należy dla osi Z2 zwiększyć wartość o wymiar długościowy narzędzia.

9. W razie potrzeby użycia w kanale osi holowanych interpolacji kołowej, należy:

9.1. Zadeklarować procedurę zewnętrzną IK na początku programu w kanale osi prowadzącej: EXTERN IK(INT,REAL,REAL,REAL,REAL,REAL,REAL);

9.2. W trakcie deklaracji tablicy punktów użyć procedury IK tyle razy ile jest odcinków kołowych.

## 3. Zalecana struktura programów w kanałach obróbczych

Rys. 2 przedstawia zoptymalizowaną strukturę programów sterujących, zawierających komendy synchronizacji pracy kanału osi prowadzącej z kanałem osi holowanych, deklaracji tablic trajektorii ruchu oraz funkcji sprzężenia osi holowanych z ruchem osi prowadzącej.

```

;KANAL OSI PROWADZĄCEJ
EXTERN
IK(INT,REAL,REAL,REAL,REAL,REAL,REAL)
WAITM(#1,1,2) ; pierwszy punkt synchronizacji
_GET_Z2Y2
R0=_R0
STOPRE
G0 ... Z2=...+R0 ;pozycja startowa w osi X Y2 i/lub Z2
CTABDEL ; kasowanie dotychczasowych tablic
CTABDEF(Y2,X,1,0)
X... Y2=... ; deklaracja punktu tablicy X x Y2
IK(...) ; deklaracja odcinka kołowego
...
CTABEND
CTABDEF(Z2,X,2,0)
X ... Z2=...+R0 ; deklaracja tablicy X x Z2
...
CTABEND
LEADON(Y2,X,1)
LEADON(Z2,X,2)
... ; deklaracja trajektorii w osiach X, Y i/lub Z
LEADOF(Y2,X)
LEADOF(Z2,X)
WAITM(#2,1,2) ; drugi punkt synchronizacji
; kontynuacja programu w kanale osi prowadzącej

```

```

;KANAL OSI HOLOWANYCH
_R0=$TC_DP3[T,D] ;T - narzędzie D - ostrze
WAITM(#1,1,2) ; pierwszy punkt synchronizacji
WAITM(#2,1,2) ; drugi punkt synchronizacji
STOPRE
_GET_Z2Y2 ; powrót osi do kanału osi holowanych
; kontynuacja programu w kanale osi holowanych

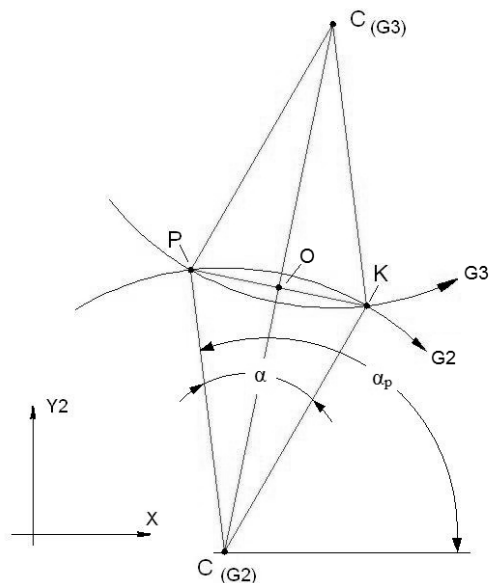
```

Rys. 2. Zalecana struktura programów 2-kanałowej synchronizacji  
Fig. 2. The recommended structure of synchronous 2-channel CNC programs

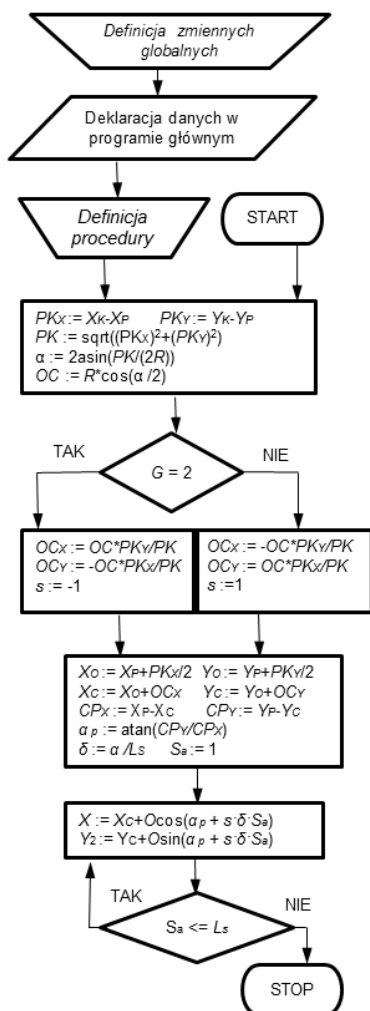
## 4. Przykład procedury realizującej podział łuku na n segmentów

Ze względu na brak możliwości interpolacji kołowej w osiach przejętych z innego kanału, realizacja ruchu po torze kołowym w tych osiach jest możliwa tylko za pomocą przybliżenia łuku

otwartym wielobokiem. Rysunek 3 przedstawia pomocniczy szkic dla tej procedury. Schemat blokowy zaproponowanej procedury przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Oznaczenia punktów charakterystycznych  
Fig. 3. Denotations of the characteristic points



Rys. 4. Schemat blokowy procedury podziału łuku  
Fig. 4. Flowchart of the arc partitioning procedure

Oznaczenia (dla rys. 3 i 4):

- O – punkt odniesienia (leży w środku odcinka PK);
- C – środek łuku;
- G – rodzaj interpolacji kołowej (G2 lub G3);
- $X_p, Y_p$  – współrzędne  $X, Y_2$  początku łuku (punkt P);
- $X_k, Y_k$  – współrzędne  $X, Y_2$  końca łuku (punkt K);
- R – promień łuku;
- $n_s$  – liczba segmentów (odcinków prostych) podziału łuku;
- PK,  $PK_x, PK_y$  – długość odcinka od P do K oraz jego składowe w osiach X i  $Y_2$ ;
- $\alpha$  – kąt rozwarcia łuku;
- OC,  $OC_x, OC_y$  – długość odcinka od O do C oraz jego składowe w osiach X i  $Y_2$ ;
- $X_o, Y_o$  – współrzędne punktu O;
- $X_c, Y_c$  – współrzędne punktu C;
- $CP_x, CP_y$  – składowe odcinka CP;
- $\alpha_p$  – kąt pochylenia odcinka CP;
- $S_a$  – licznik segmentów odcinków;
- s – znak zależny od rodzaju interpolacji kołowej;
- $\delta$  – kąt rozwarcia odpowiadający jednemu segmentowi.

### 5. Teoretyczny błąd odwzorowania łuku odcinkami prostymi

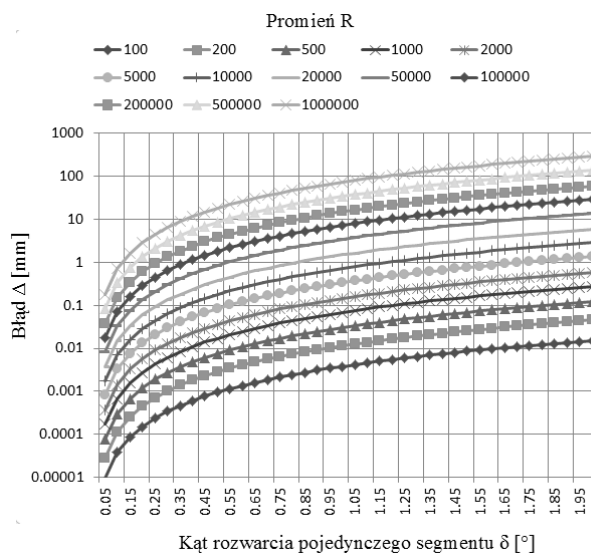
Na rys. 5 przedstawiono wykres maksymalnych odchyłek od konturu nominalnego  $\Delta$  obliczanych z wzoru:

$$\Delta = R - R \cos\left(\frac{\delta}{2}\right), \tag{1}$$

gdzie kąt rozwarcia pojedynczego segmentu  $\delta$  jest wyznaczany z wzoru:

$$\delta = \frac{\alpha}{n_s}. \tag{2}$$

Jak wynika z wzorów 1 i 2 wielkość tych odchyłek zależy od promienia łuku R, kąta rozwarcia łuku  $\alpha$  oraz liczby odcinków składających się na wielobok  $n_s$ . Błąd ten można znacząco zmniejszyć programując promień łuku mniejszy o błąd przed korekcją, bez zmiany punktów początku i końca łuku.



Rys. 5. Maksymalny błąd trajektorii  $\Delta$   
Fig. 5. The maximum trajectory error  $\Delta$

## 6. Podsumowanie

Racjonalne wykorzystanie środków produkcji jest jednym z niezbędnych warunków efektywności operacji wytwórczych. Przemysłowe przedmioty wielkogabarytowe, charakterystyczne dla takich gałęzi przemysłu jak: energetyka, przemysł lotniczy, przemysł maszyn budowlanych czy zbrojeniowy, w dużej mierze decydują o kształtowaniu się kosztu inwestycji w tych branżach. Stąd każda udana próba wdrożenia innowacji do technologii ich wytwarzania stanowi narzędzie budowania przewagi konkurencyjnej. Zaprezentowane podejście zostało wdrożone w zakładzie obróbki rozjazdów szynowych. Osiągnięte tą drogą podwyższenie wydajności stanowiska produkcyjnego, w zależności od aktualnie realizowanego programu produkcji, sięga 20 do 30 procent. Równocześnie błędy obróbki w zaproponowanym podejściu, przy dobraniu odpowiednich parametrów procedur aproksymacji zarysu, są pomijalnie małe. Zaprezentowana procedura jest uniwersalna. Algorytm podziału regularnego łuku jest szczególnym, lecz bardzo często występującym przypadkiem. Algorytm dzielenia łuku został oprogramowany w układzie sterowania, metoda przeszła pełne testy i wdrożenie przemysłowe. Dokładność wykonania była weryfikowana sprawdzianami, co jest przyjętym sposobem kontroli jakości w branży kolejowej, jednak równocześnie nie

pozwała porównać rzeczywistych odchyłek kształtu z teoretycznymi.

## 7. Literatura

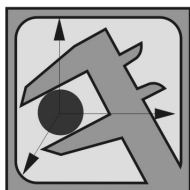
- [1] So B.S., Park D.H., Cho Y., Kim T.J., Song T.S., Ko T.J.: An analytic model for tool trajectory error in 5-axis machining. *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 31 (2008).
- [2] Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N.: Tracking and contour error control in CNC servo systems. *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005).
- [3] Cheng Y.M., Chin J.H.: Machining contour errors as ensembles of cutting, feeding and machine structure effects. *Int. J. of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003).
- [4] El Khalick A.M., Uchiyama N.: Contouring controller design based on iterative contour error estimation for three-dimensional machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27 (2011).
- [5] Stryczek R., Pytlak B.: *Elastyczne programowanie obrabiarek*. PWN, Warszawa 2011.

otrzymano / received: 31.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE



# CONTROL-TECH

Targi Przemysłowej Techniki Pomiarowej  
oraz Badań Nieniszczących

**25-27 IX 2013, Kielce**

**SZEROKI WYBÓR URZĄDZEŃ NDT**

\* **CENY PROMOCYJNE  
DO 15 CZERWCA**

mechanik

MM Magazyn  
Przemysłowy

Przemysł  
Magazyn

POMIARY. AUTOMATYKA. ROBOTYKA  
**PAR**

TIAM  
TECHNOLOGIA  
I INSTRUMENTALNA  
MONTAŻU

Patronat medialny:



*Wkrótce otwarcie!*

NOWE CENTRUM KONGRESOWE

TARGI KIELCE