

Roboty przemysłowe o równoległej strukturze geometryczno-ruchowej - nowy kierunek w budowie obrabiarek

Koncepcja i historia rozwoju robotów o równoległej strukturze geometryczno-ruchowej (SG-R). Klasyfikacja różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych. Prosta i odwrotna transformacja współrzędnych. Zalety i wady robotów obróbkowych o strukturze równoległej. Sterowanie numeryczne (NC) maszyn o równoległej SG-R z transformacjami współrzędnych w czasie pracy. Zastosowanie profesjonalnych układów NC, na przykładzie Sinumerik 840 D.

Industrial robots with parallel kinematics - a new trend in machine tool design

The idea and development of industrial robots with parallel kinematics. Classification of different design solutions. Transformations of coordinate systems in both directions. Advantages and disadvantages of parallel kinematics for machine tools. Numerical control with real-time transformation of coordinates. The use of professional NC systems on the example of Sinumerik 840 D.

1. STRUKTURY SZEREGOWE I RÓWNOLEGLE

Budowa i działanie stosowanych obecnie, coraz szerzej rozpowszechnionych robotów przemysłowych opiera się na strukturze geometryczno-ruchowej (SG-R) szeregowej, otwartej. Oznacza to, że układ manipulacyjno-nośny (manipulator) robota jest łańcuchem kinematycznym otwartym, którego człony są połączone kolejno za pomocą par kinematycznych, zwykle V i IV klasy - obrotowych, przesuwnych i obrotowo-przesuwnych. Łańcuch kinematyczny robota jako całość nie jest mechanizmem, chociaż zawiera przypisane do każdego członu mechanizmy (jednostki napędowe członów). Tylko ostatni, wolny człon łańcucha kinematycznego ma bezpośredni kontakt z obiektem manipulacji. Roboty przemysłowe o równoległej SG-R nie mają żadnych połączeń ruchowych członów rozmieszczonych szeregowo, zawierają jedynie proste łańcuchy kinematyczne (jednostka napędowa + człon prętowy), przyłączone bezpośrednio do obiektu manipulacji, realizujące wymagane przemieszczenia i ruchy obiektu manipulacji, w wyniku równoczesnej (równoległej) zmiany długości lub położenia prętowych członów napędowych. Liczba tych prostych łańcuchów kinematycznych odpowiada liczbie stopni swobody, które należy zapewnić obiektowi manipulacji; są to łańcuchy kinematyczne zamknięte, a więc mechanizmy.

2. HISTORYCZNY ROZWÓJ ROBOTÓW O RÓWNOLEGŁEJ SG-R

Koncepcja manipulatorów o równoległej SG-R zaprzętała myśli wynalazców już przed 40 laty (1955 - Gough, maszyna testująca do badania opon kół do samolotów). Poczynając od r. 1960 zajmowano się głównie manipulatorami 6-nożnymi (typu hexapod), a później także 3-nożnymi (typ tripod, tricept), ślizgowymi (hexaglide) i różnymi rozwiązaniami tzw. „mechaniki prętowej” (niem. Stabmechanik-Maschinen). W historycznym rozwoju na odnotowanie w okresie do r. 1990 zasługują konstrukcje: 1965 - platforma Stewarta do symulowania lotu samolotem, 1980 - symulator jazdy samochodem firmy Daimler-Benz, liczne patenty i rozwiązania konstrukcyjne w b. Związku Radzieckim, intensyfikacja prac rozwojowych w USA i w ośrodkach zachodnioeuropejskich. W latach 90-tych pojawiły się pierwsze rozwiązania robotów obróbkowych firm amerykańskich Giddings & Lewis oraz Geodetic (prototypy pokazane na wystawie IMTS w Chicago w 1994 r.). Owocem intensywnych prac badawczo-rozwojowych prowadzonych w ośrodkach naukowych przemysłowych i uczelniowych, przy znaczącym wsparciu poważnych firm obrabiarkowych, była prezentacja na EMO'97 w Hannoverze 18 robotów „równoległych” o różnym przeznaczeniu - obróbkowych, kontrolnych, montażowych i przenośnikowych. Przy okazji wystawy odbyła się również pierwsza europejska konferencja naukowo-techniczna AKIMA'97 (Advanced Kinematics for Manufacturing Applications) pod hasłem „Systemy kinematyki równoległej obiecującą technologią w procesach wytwarzania 21-go wieku”.

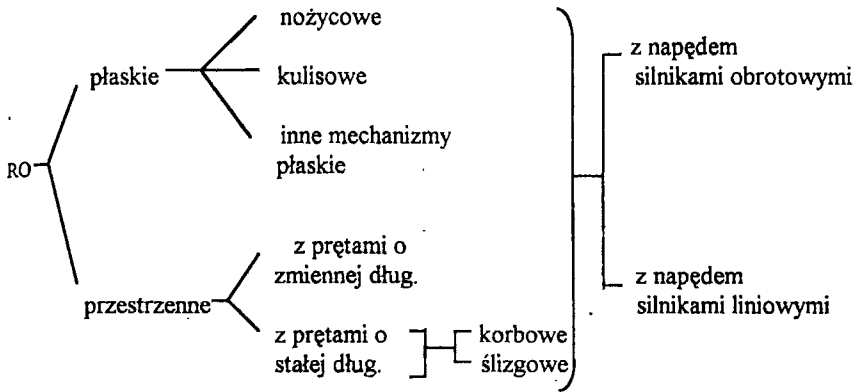
3. BUDOWA I DZIAŁANIE ROBOTÓW OBRÓBKOWYCH

W skład robota obróbkowego, niezależnie od jego postaci konstrukcyjnej, wchodzi następujące zespoły i człony:

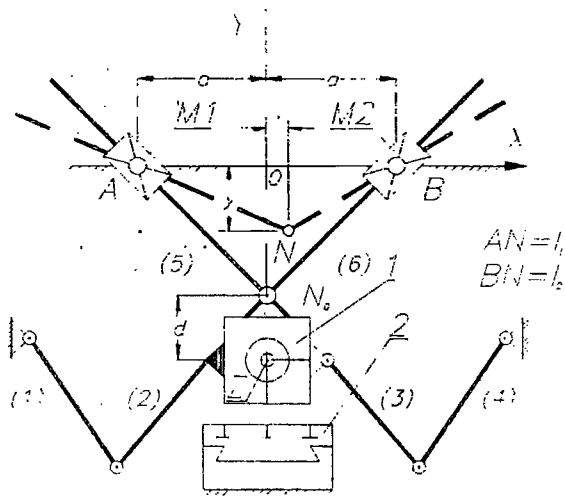
- zespół roboczy, którym zwykle jest zespół obróbkowy wrzecionowy frezarsko-wiertarski z własnym napędem, stanowiący obiekt manipulacji, o dodatkowych szeregowych stopniach swobody, w terminologii ogólnorobotowej określane jako „platforma” ruchoma;
- w sensie ogólnomaszynowym (mechanizmowym) podstawa, w postaci stojaka, ramy lub klatki, tworząca konstrukcję nośną dla zespołów i członów ruchomych;
- jednostki kinematyczne serwonapędowe z członami prętowymi, wiążącymi ruchowo, za pomocą par kinematycznych, zespół roboczy z podstawą;
- zespół przedmiotowy do ustawienia i zamocowania przedmiotu obrabianego, którym jest stół, uzbrojony w uchwyt mocujący lub paletę przedmiotową;
- zespoły uzupełniające i pomocnicze, dostosowane do zadań obróbkowych robota, np. magazyn narzędzi lub palet, przenośniki, osprzęt obróbkowy itp.

Działanie robota obróbkowego polega na przekazywaniu ruchu przez prętowe człony napędowe do określonych punktów zespołu roboczego - tyle, ile stopni swobody ma mieć narzędzie osadzone we wrzecionie zespołu, a więc przy sześciu stopniach swobody potrzebne jest sześć jednostek kinematycznych. Oprócz zapewnienia wymaganej pozycji i orientacji narzędzia względem przedmiotu obrabianego oraz zadanych prędkości ruchu posuwowego, prętowo-przegubowy układ członów napędowych powinien przenosić siły występujące podczas obróbki, przy zachowaniu wystarczająco dużej sztywności układu. Jest oczywiste, że spełnienie założonego działania i technicznych wymagań współczesnych maszyn technologicznych jest możliwe jedynie przy wykorzystaniu precyzyjnych elementów konstrukcyjnych, nowoczesnych zespołów serwonapędowych, układów pomiarowych oraz wysoce zorganizowanych softwarowych układów sterowania numerycznego.

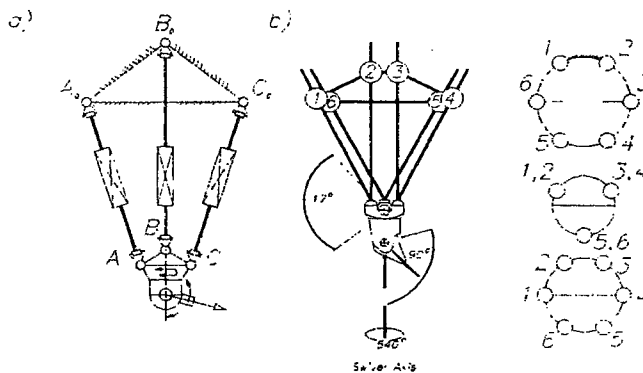
Z punktu widzenia geometrii i kinematyki połączeń ruchowych członów rysuje się następujący podział robotów obróbkowych o równoległej strukturze geometryczno ruchowej:



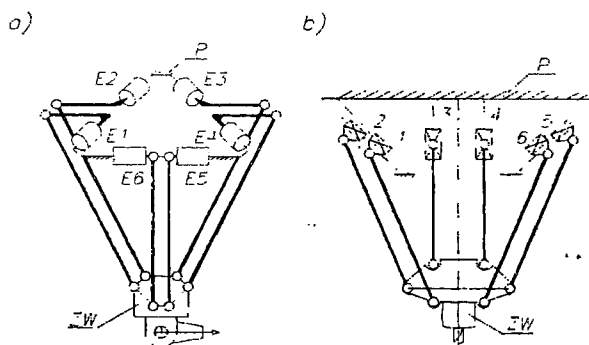
Wybrane przykłady układów kinematycznych robotów obróbkowych wg tej klasyfikacji przedstawiono na rys. 1,2,3,4.



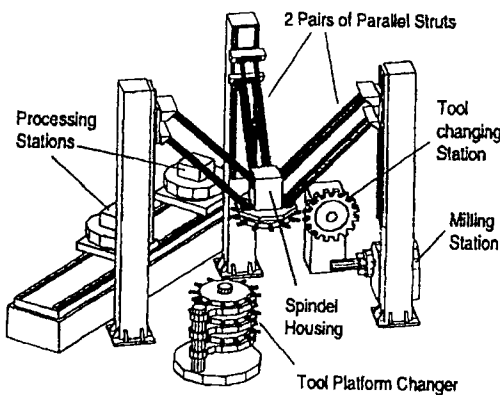
Rys. 1. Schemat kinematyczny robota obróbkowego płaskiego o strukturze G-R nożycowej: 1- wrzeciennik, 2 - stół przedmiotowy, M_1 i M_2 - pary kinematyczne obrotowo-przesuwne zawierające elektryczne silniki liniowe



Rys. 2. Schematy strukturalne robotów obróbkowych o zmiennej długości członów napędowych (prętów): a) typ „tricept”, b) typ „hexapod” (Geodetic)



Rys. 3. Schematy strukturalne robotów obróbkowych o stałej długości członów napędowych: a) korbowodowy (typ DELTA), b) ślizgowy (typ Toyoda).



Rys. 4. Przykład stanowiska obróbkowego z robotem obróbkowym prętowo-ślizgowym, stołem przedmiotowym paletowym, zmieniaczem głowic narzędziowych i pojedynczych narzędzi

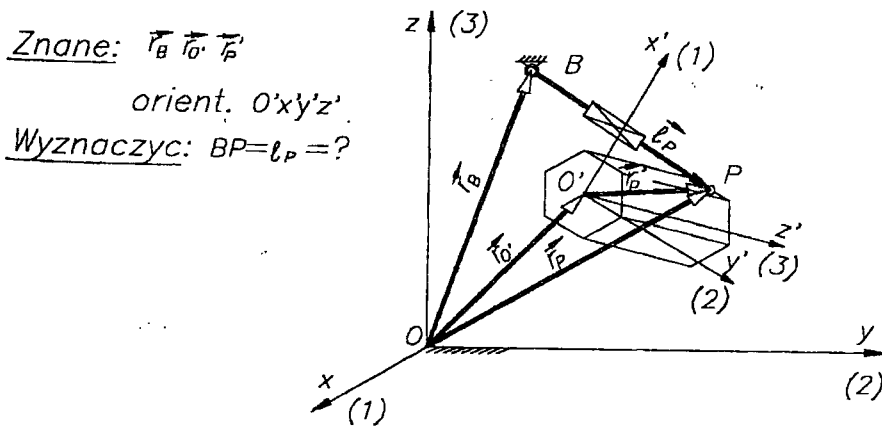
4. PROBLEMY GEOMETRII I KINEMATYKI RÓWNOLEGŁEJ

Są dwa podstawowe zagadnienia geometrii i kinematyki, które muszą być rozwiązywane przez komputerowy układ sterowania na bieżąco (w czasie rzeczywistym), dla zrealizowania programu położeń i ruchów zespołu roboczego robota równoległego:

1^o Wyznaczenie współrzędnych konfiguracyjnych manipulatora dla zadanych współrzędnych kartezjańskich x, y, z bazowego punktu zespołu roboczego (tzw. punktu TCP - Tool Center Point), określającego pozycję, oraz współrzędnych kątowych (kątów lub kosinusów kierunkowych) określających orientację zespołu; jest to tzw. odwrotne zadanie kinematyki, a procedury obliczeniowe prowadzące do rozwiązania zadania noszą nazwę odwrotnej transformacji współrzędnych.

2^o Określenie współrzędnych kartezjańskich x, y, z i kątowych zespołu roboczego, gdy znane są współrzędne konfiguracyjne (proste zadanie kinematyki, transformacja prosta - do przodu); rozwiązanie tego zadania, również w czasie rzeczywistym, jest potrzebne dla kontroli położenia zespołu roboczego.

W robotach obróbkowych z członami napędowymi o zmiennej długości współrzędnymi konfiguracyjnymi są czynne długości l_i prętów. Całościowo sformułowane zadanie kinematyki dla robota 6-członowego można rozdzielić na 6 sobie podobnych zadań częściowych; z tych sześciu rozwiązanych zadań częściowych składa się rozwiązanie całościowe (globalne). Metodykę rozwiązania ilustruje rys. 5.



Rys. 5. Rozwiązanie częściowego zadania kinematyki manipulatora równoległego o zmiennej długości członów napędowych, w ujęciu wektorowym

Zagadnienie sformułowano w ujęciu wektorowym. W nieruchomym układzie współrzędnych $Oxyz$ znany jest wektor $\vec{OB} = \vec{r}_B$ położenia pary kinematycznej w podstawie manipulatora oraz dane są:

- $O\bar{O}' = \bar{r}_0$ - wektor położenia w układzie Oxyz wybranego punktu O' zespołu roboczego (punktu TCP), w którym przyjęto lokalny układ współrzędnych $O'x'y'z'$;
- $[\alpha]$ - macierz kosinusów kierunkowych układu $O'x'y'z'$ względem układu bazowego Oxyz, określająca orientację zespołu roboczego (narzędzia w tym układzie);
- $O'\bar{P} - \bar{r}'_P$ - wektor położenia pary kinematycznej P w zespole roboczym.

Należy wyznaczyć długość l_p członu napędowego, reprezentowanego przez wektor $\bar{B}\bar{P}$. Z pokazanej konstrukcji rysunkowej widoczne są związki:

$$\bar{l}_p = \bar{r}_B - \bar{r}'_P = \bar{r}_B - (\bar{r}_O + \bar{r}'_P) \quad (1)$$

Wektory zapisujemy w postaci macierzowej

$$\bar{l}_p = (x_1, y_1, z_1)^T; \quad \bar{r}_O = (x, y, z)^T$$

$$\bar{r}_B = (x_B, y_B, z_B); \quad \bar{r}'_P = [\alpha](x', y', z')^T$$

gdzie

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \quad \text{jest macierzą kosinusów kierunkowych ukl. } O'x'y'z' \text{ wzgl. Oxyz}$$

Po wstawieniu do (1) otrzymamy

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (2)$$

a po wykonaniu operacji mnożenia i sumowania

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B - x - (\alpha_{11}x' + \alpha_{12}y' + \alpha_{13}z') \\ y_B - y - (\alpha_{21}x' + \alpha_{22}y' + \alpha_{23}z') \\ z_B - z - (\alpha_{31}x' + \alpha_{32}y' + \alpha_{33}z') \end{bmatrix} \quad (3)$$

z zapisu tego wyniku związek

$$l_p = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \quad (4)$$

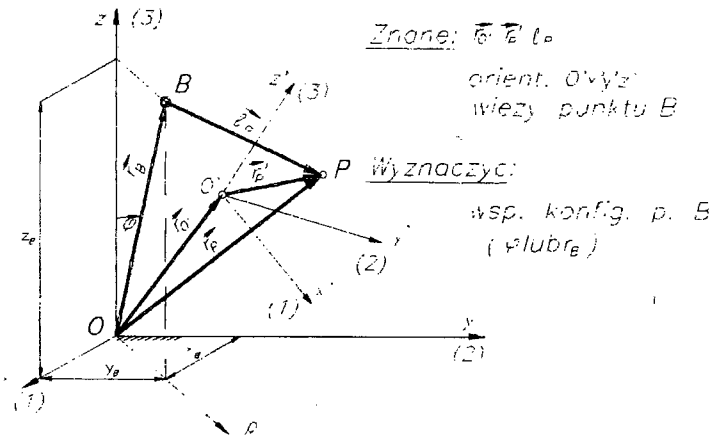
który opisuje jedną współzrzedną konfiguracyjną w zależności od zadanej pozycji (x, y, z) i orientacji zespołu roboczego.

Dla manipulatora o 6-ciu stopniach swobody, tzn dla $i = 1, 2, \dots, 6$, otrzymuje się 6 zależności

$$l_i = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2} \quad (5)$$

Jeżeli w równaniach (5) przyjąć jako niewiadome - współrzędne x, y, z i kosinusy kierunkowe x_{ij} (3 wartości), to dla zadanych l_i zostaje sformułowane proste zadanie kinematyki manipulatora o równoległej SG-R, które - jak widać z postaci równań (3) i (5) - jest znacznie trudniejsze do rozwiązania od zadania odwrotnego.

Zadanie kinematyki manipulatora równoległego o stałej długości członów napędowych różni się od poprzedniego zadania tym, że zmienne jest położenie punktu B pary kinematycznej w podstawie (rys.6).



Rys. 6. Rozwiązanie częściowego zadania kinematyki manipulatora równoległego o stałej długości członów napędowych, w ujęciu wektorowym

W ruchomej parze kinematycznej B (IV klasy) znajduje się początek członu napędowego o stałej długości $BP = l_p$. Należy wyznaczyć współrzędną konfiguracyjną - kąt φ lub długość r_B wektora $O\vec{B}$, przy ograniczeniu ruchu punktu B do jednej płaszczyzny. Z konstrukcji wektorów pokazanej na rys. widać

$$\mathbf{r}_P = \mathbf{r}_O + \mathbf{r}'_P = (x, y, z)^T + \mathbf{a}(x', y', z')$$

$$\mathbf{r}_B = (x_B, y_B, r_B \cos\varphi)^T$$

Odległość punktów B i P powinna wynosić l_p , zatem powinna być spełniona zależność

$$l_p^2 = (x_p - x_B)^2 + (y_p - y_B)^2 + (z_p - r_B \cos\varphi)^2 \quad (6)$$

Współrzędne konfiguracyjne r_B i φ są od siebie zależne. Zależność taka wynika ze sposobu napędzania członu BP.

Na przykład w mechanizmie przedstawionym na rys.7 z wzoru sinusów dla ΔOBC wynika

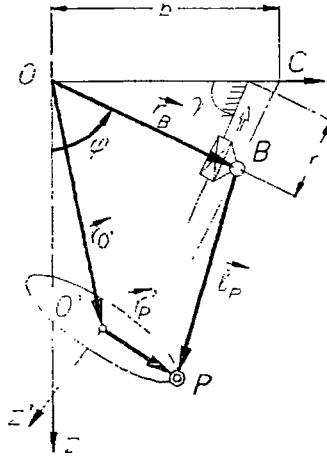
$$\frac{b}{r_B} = \frac{\sin[90^\circ + (\varphi - \gamma)]}{\sin\gamma} \Rightarrow r_B(\varphi) = \frac{b}{\cos\varphi(\text{ctg}\gamma + \text{tg}\varphi)}$$

co po wstawieniu do (6) daje wynik

$$I_p^2 = (x_p - x_B)^2 + (y_p - y_B)^2 + \left(z_p - \frac{b}{\text{ctg}\gamma + \text{tg}\varphi} \right)^2$$

Dla całego układu manipulatora układu się sześć równań z niewiadomymi φ_i , gdzie $i = 1, 2, \dots, 6$. Do przeliczenia współrzędnej φ_i na współrzędną napędową s wykorzystuje się wzór Carnota

$$s^2 = r_B^2 + b^2 - 2r_B b \sin \varphi_i$$



Rys. 7. Wektorowy obraz manipulatora równoległego ślizgowego o stałej długości członów napędowych

5. ZALETY I WADY ROBOTÓW OBRÓBKOWYCH O RÓWNOLEGŁEJ SG-R W PORÓWNIANIU ZE WSPÓŁCZESNYMI OBRABIARKAMI NC TRADYCYJNEJ BUDOWY

Roboty obróbkowe o równoległej SG-R są nowością w budowie obrabiarek. Dość różnorodnie i liczne egzemplarze, raczej rozwiązania prototypowe; nie przeszły jeszcze prób szerszego zastosowania w produkcji przemysłowej. Oceniane są na razie przez ich twórców, konstruktorów i wystawców, głównie z podkreśleniem licznych zalet i perspektyw rozwojowych, porównywalnych z pojawieniem się w latach 50-tych obrabiarek sterowanych numerycznie. Do niewątpliwych zalet tej nowej rodziny obrabiarek można zaliczyć:

- możliwość bezpośredniej realizacji złożonych, przestrzennych ruchów kształtowania powierzchni przedmiotów obrabianych, bez potrzeby superpozycji ruchów elementarnych za pomocą szeregowych łańcuchów kinematycznych;
- uproszczenie struktury konstrukcyjnej obrabiarki (brak prowadnic, mniejsza liczba zespołów przesuwnych, unifikacja napędów);
- wyraźne zmniejszenie masy zespołów ruchomych;

- wystarczająco duża sztywność struktur prętowych.

Ponadto można wymienić :

- możliwości unifikacji (jednakowe moduły prętowe), co ułatwia budowę i serwis;

- napięcie wstępne poszczególnych członów;

- brak zginania i skręcania członów, tylko rozciąganie lub ściskanie.

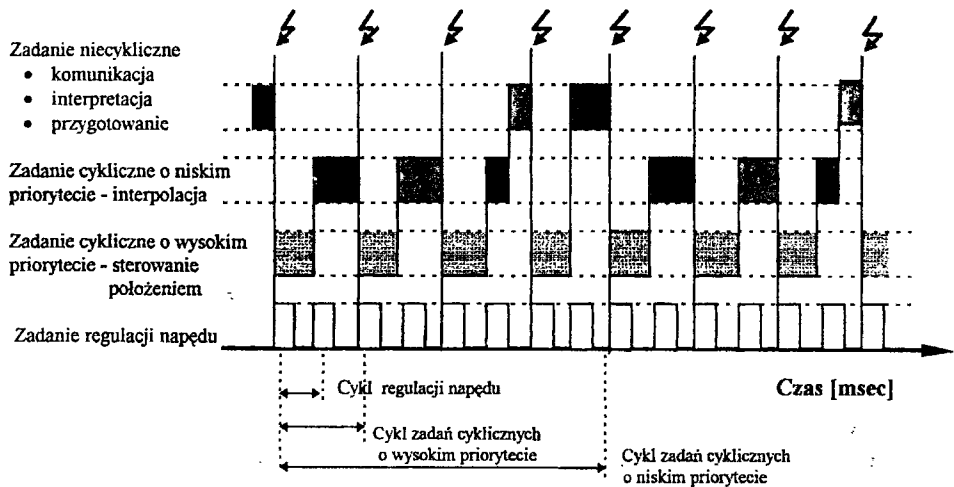
Ograniczenie zastosowań robotów obróbkowych wynika głównie z rozmiarów obrabianych przedmiotów, dyspozycyjności przestrzeni roboczej, wygody obsługi i złożoności układów sterowania.

6. STEROWANIE NUMERYCZNE OBRABIAREK-ROBOTÓW O RÓWNOLEGŁEJ STRUKTURZE GEOMETRYCZNO-RUCHOWEJ

Programy operacji technologicznych dla obrabiarek sterowanych numerycznie, przygotowywane często w oparciu o systemy CAD/CAM, z reguły opisują żądane ruchy narzędzia wzg. przedmiotu obrabianego w prostokątnym, kartezjańskim układzie współrzędnych, typowym dla obrabiarek o tradycyjnej strukturze kinematycznej i przystosowanym do ludzkich przyzwyczajeń. W celu sterowania obróbką przy innej strukturze obrabiarki żądane ruchy muszą być przedstawione w układzie współrzędnych, odpowiadającym jej ruchom elementarnym (we współrzędnych konfiguracyjnych).

Przekształcenia te powinny się odbywać na bieżąco, w czasie obróbki, ze względu na potrzebę monitorowania ruchów narzędzia wzg. przedmiotu obrabianego oraz wprowadzania odpowiednich korekcji. Potrzebne są zarówno przekształcenia opisu żądanych ruchów na poszczególne ruchy elementarne obrabiarki-roboty (odwrotna transformacja układu współrzędnych) jak przekształcanie realizowanych ruchów do prostokątnego układu współrzędnych (prosta transformacja układu współrzędnych). Z matematycznego punktu widzenia obie transformacje układu współrzędnych dla równoległej struktury geometryczno-ruchowej nie są zadaniami trudnymi. Trudności powstają ze względu na to, że przekształcenia te mają być wykonywane przez sterownik NC, który jest układem mikroprocesorowym działającym w systemie operacyjnym czasu rzeczywistego, gdy możliwości obliczeniowe mikroprocesorów są ściśle przydzielane w czasie do poszczególnych zadań. Programowanie w systemach czasu rzeczywistego musi uwzględniać wynikające z tego powodu ograniczenia i transformacja współrzędnych może zajmować jedynie kilka milisekund.

Sterowanie numeryczne obrabiarek wymaga tzw. systemu czasu rzeczywistego z ostrymi ograniczeniami czasowymi (hard real-time) [7] w którym jest niezbędna synchronizacja zadań i komunikacji pomiędzy nimi dająca pełną kontrolę nad kolejnością i przewidywalność czasu ich wykonywania. Uzyskuje się to zwykle przez podział czasu na powtarzające się synchronicznie „ramki” w których są wykonywane przypisane do nich zadania, przy czym, może być kilka „płaszczyzn czasu” z ramkami o różnych długościach, rys.8



Rys.8 Podział czasu procesora w systemach czasu rzeczywistego

W oferowanych na rynku profesjonalnych układach sterowania numerycznego obrabiarek jądro realizujące sterowanie ruchami NC (w prostokątnym układzie współrzędnych) oraz zastosowany przez producenta system operacyjny są dla użytkownika niedostępne. Reklamuje się obecnie, co prawda, „otwartą strukturę” układów NC, lecz ich otwartość dotyczy zadań peryferyjnych układu sterowania. Większość nowoczesnych układów NC, obok oprogramowania sterującego ruchami, ma zainstalowany ogólnie dostępny i powszechnie znany system programowania, zwykle Windows 95 lub Windows NT, który można wykorzystać do wprowadzania żądanych funkcji peryferyjnych. Najczęściej system ten wykorzystuje się do formułowania kontaktów między człowiekiem-operatorem a układem sterującym, tzw. MMI lub HMI (Human Machine Interface). Dzięki tym możliwościom producenci obrabiarek mogą nadawać swoim wyrobom cechy indywidualne wprowadzając do układów NC, kupowanych od wyspecjalizowanych firm, własne obrazy ekranu i własne funkcje klawiszy programowalnych przy poszczególnych trybach i etapach pracy obrabiarki.

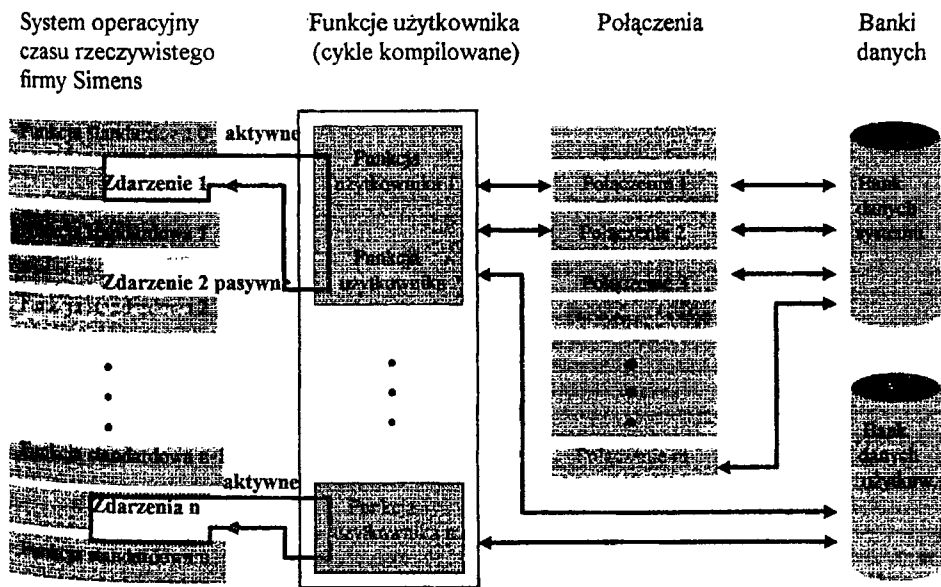
W okresie powstawania pierwszych obrabiarek-modeli o budowie prętowej ich twórcy opracowywali sami doświadczalne układy sterowania, na bazie typowych mikrokomputerów. Obecnie, gdy tego rodzaju obrabiarki są wprowadzane do praktyki przemysłowej, potrzebne są sterowniki wykonane profesjonalnie. Jednak ze względu na bardzo dużą różnorodność struktur producenci sterowników NC nie mogą zaoferować, tak jak w przypadku obrabiarek o tradycyjnej strukturze, układu sterowania dostosowanego do konkretnego rozwiązania. Warunkiem stosowania do obrabiarek o równoległej strukturze geometryczno-ruchowej profesjonalnych układów sterowania NC jest otwartość ich jądra, działającego w systemie czasu rzeczywistego, umożliwiająca konstruktorom obrabiarki dostosowanie go do zaprojektowanej struktury.

Ponieważ w typowych układach NC, których architektura oprogramowania opiera się na strukturach konwencjonalnych układów kinematycznych maszyn, nie można zestawiać oprogramowania do sterowania i regulacji heksapodów f-ma Siemens zastosowała do tego celu układ NC o specjalnych możliwościach, SINUMERIK 840 D, który umożliwia skomponowanie wymaganego, specyficznego oprogramowania dla konkretnych obrabiarek o

budowie prętowej. Układ ten został zastosowany w kilku takich obrabiarkach pokazanych na Międzynarodowej Wystawie Obrabiarek, EMO'97, w Hanowerze.

Jądro czasu rzeczywistego układu SINUMERIK 840 D zostało utworzone, i odpowiednio zabezpieczone przez producenta, na czterech płaszczyznach czasowych, wprowadzono jednak możliwości dołączenia funkcji poprzez interfejs programistów OEM (Original Equipment Manufacturer). Daje on do dyspozycji użytkownikowi dwie metody interfejsowania oprogramowania: „zdarzenia” („Events”) i „połączenia” („Bindings”) [1]. W całym systemie czasu rzeczywistego oprogramowania jądra NC zainstalowano dużą liczbę „zdarzeń”, które reprezentują wyjścia czasowe i funkcyjne z systemu bazowego do kompilacji cykliów dołączonych. Dzięki temu użytkownik może dołączyć nowe czynności, wynikające z jego wymagań, do odpowiednich zadań (tasks). Poprzez interfejs „połączeń” użytkownik ma możliwość dostępu do danych systemowych oraz własnego banku danych.

Oprogramowanie użytkownika poprzez „cykle kompilowane” powoduje funkcjonalnie nowe lub zmienione działanie systemu bazowego. Użytkownik posiada dostęp do wszystkich płaszczyzn czasowych. Aktywacja jego aplikacji następuje, bądź cyklicznie przy każdej aktywacji zadania, któremu przyporządkowano rozszerzenie, bądź aktywacja jest sterowana asynchronicznie np. w zależności od sygnału przesyłanego z procesu, rys.9



Rys.9 Współdziałanie jądra czasu rzeczywistego NC i oprogramowania użytkownika

Przy stosunkowo niewielkim wkładzie prac programowych można wprowadzić: transformacje współrzędnych, sprawdzanie sztywności i nadzorowanie ewentualnych kolizji. Poprzez interfejs użytkownika producent obrabiarki może wykorzystać standardowe funkcje profesjonalnego układu Sinumerik 840 D: zaawansowane metody generowania toru (m. in. NURBS - Non Uniform Rational B Splines) w bazowym układzie współrzędnych oraz sterowanie osiami z określonymi predkościami, przyspieszeniami i szarpnięciami (jerk).

LITERATURA

- [1] V.Kreidler: *Offene objektorientierte CNC - Steuerungsarchitektur am Beispiel der Hexapod-Maschine*. Fachaufsatz/Sonderdruck. Siemens AG.
- [2] M.Hebsacker: *More Effective Milling with Six Legs*. Metalworking. Aug.1997, str. 26-28.
- [3] G.Pritschow, K.H.Wurst: *Systematic Design of Hexapods and Parallel Link Systems*. Annals of the CIRP Vol.46/1/1997. str. 291-295.
- [4] R.Neugebauer, F.Wieland: *Neue Werkzeugmaschinenstrukturen*. ZWF 91 (1996) 7-8, str. 363-366.
- [5] E.Neugebauer, F.Wieland: *Hexapod-Werkzeugmaschine für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. ZWF 92 (1997) 9, str. 447-450.
- [6] O.Zirn, G.Baldini, T.Treib: *Parallele Kinematik für Werkzeugmaschinen* Werkstatt u.Betrieb 130 (1997) 9. str. 733-736.
- [7] Halang W.A., Sacha K.M.: *Real-Time Systems. Implementation of Industrial Computerised Process Automation*, World Scientific, 1992