

## KINEMATYKI RÓWNOLEGŁE W BUDOWIE MASZYN WYTWÓRCZYCH

*W referacie opisano zalety i wady maszyn o kinematyce równoległej w porównaniu z maszynami konwencjonalnymi. Scharakteryzowano przy tym istniejące rozwiązania maszyn o kinematyce równoległej. Wskazano na wymagania stawiane kinematykom równoległym i na ich przydatność do różnych zastosowań. Ostatni rozdział poświęcono prototypowi 3-osiowej maszyny zbudowanej w Politechnice Wrocławskiej, w tym koncepcji układu sterowania numerycznego zbudowanego na zasadzie Soft-control.*

### PARALLEL KINEMATICS FOR MANUFACTURING MACHINES

*In the paper advantages and deficiencies of the parallel kinematics based machines in comparison to conventional machines were described. Existing parallel kinematics solutions used for manufacturing machines were characterised. Requirements to be fulfilled by parallel kinematics and usefulness for different applications were indicated. The last chapter focuses on the prototype of the tripod machine designed and developed at Wrocław University of Technology including CNC system based on Soft-control concept.*

#### 1. GENEZA ZAINTERESOWANIA MASZYNAMI O KINEMATYCE RÓWNOLEGŁEJ

Możliwość zastosowania maszyny wytwórczej w przemyśle zależy między innymi od prędkości i przyspieszenia, z jakimi narzędzie może się przemieszczać zarówno podczas ruchów obróbkowych jak i dostawczych. Maksymalne osiągalne prędkości i przyspieszenia określają czas cyklu wytwórczego, a w związku z tym także koszty wytworzenia danego produktu. Skrócenie czasu obróbki można osiągnąć poprzez zastosowanie maszyn umożliwiających obróbkę wysokoszybkościową (High Speed Cutting). Możliwość zrealizowania wysokich prędkości roboczych stawia wymagania zarówno maszynom wytwórczym, jak i narzędziom tnącym. Realizacja obróbki wysokoszybkościowej wymaga, oprócz zastosowania napędów o dużej mocy i dynamice, rozwoju nowych, niekonwencjonalnych układów kinematycznych dla maszyn wytwórczych, które umożliwiają realizację wytycznych budowy lekkiej [8]. Warunki te spełniają kinematyki równoległe, których próby zastosowania w obrabiarkach można obserwować od początków lat 90-siątych. W 1994 r. zaprezentowano pierwsze prototypy maszyn wytwórczych wykorzystujących równoległy łańcuch kinematyczny. Były to maszyny firm Gidding & Lewis, Ingersoll i Geodetic, hexapody zrealizowane na zasadzie platformy Stewarta. Ze względu na wysoką sztywność i duże przyspieszenia maszyny te stanowią alternatywę dla konwencjonalnych 5-osiowych centrów obróbkowych. Ich własności: blisko trzykrotnie wyższa sztywność niż w dotychczasowych rozwiązaniach i przyspieszenia rzędu 1g byłyby bardzo trudne do osiągnięcia w maszynach konwencjonalnych.

## 2. ZALETY I WADY MASZYN O KINEMATYCE RÓWNOLEGŁEJ W PORÓWNIANIU Z MASZYNAMI KONWENCJONALNYMI

Większość stosowanych obecnie obrabiarek charakteryzuje się otwartą strukturą kinematyczną. W takim układzie siły potrzebne do wywołania ruchów roboczych są przenoszone kolejno przez poszczególne człony łańcucha kinematycznego (dana oś jest obciążona kolejnymi osiami, które są na niej ustawione), czego efektem jest kumulacja odkształceń poszczególnych elementów na końcu tego łańcucha, czyli w miejscu mocowania narzędzia. Dlatego też poszczególne osie muszą być łożyskowane z użyciem bardzo sztywnych łożysk i prowadnic, a całe maszyny są dość masywne. Zaletą układów konwencjonalnych jest natomiast niezależność osi oraz łatwe sterowanie ruchami w przestrzeni.

Alternatywą w stosunku do maszyn o kinematyce otwartej jest nowa klasa maszyn o kinematyce równoległej. Ramiona czynne opierają się na sztywnej ramie lub fundamencie i działają bezpośrednio na platformę roboczą, w którą wbudowane jest wrzeciono, narzędzie, przedmiot obrabiany lub chwytak robota. Kinematyki równoległe nie wykazują wyżej wymienionych wad, typowych dla kinematyk konwencjonalnych, umożliwiając jednocześnie realizowanie dużych prędkości i przyspieszeń przy zachowaniu wymaganej dokładności.

Maszyny wytwórcze o kinematyce równoległej są obiektem intensywnych badań [1]. Mimo tego nie stanowią one jeszcze konkurencji dla obrabiarek konwencjonalnych. Dotychczasowe osiągnięcia wielu ośrodków badawczych wskazują na możliwość szerokich zastosowań tych maszyn, choć wiele zagadnień pozostaje wciąż otwartych. Prezentacje istniejących rozwiązań na targach (EMO, METAV, IMTS) wzbudzają szerokie zainteresowanie klientów, głównie ze względu na spodziewaną ich przewagę nad maszynami konwencjonalnymi [2]. Wymienia się przy tym takie zalety, jak:

- niski koszt konstrukcji, opartej na powtarzalnych elementach,
- łatwość kalibracji,
- dużą dynamikę dzięki małym masom części ruchomych,
- wysoką sztywność dzięki kinematyce równoległej.

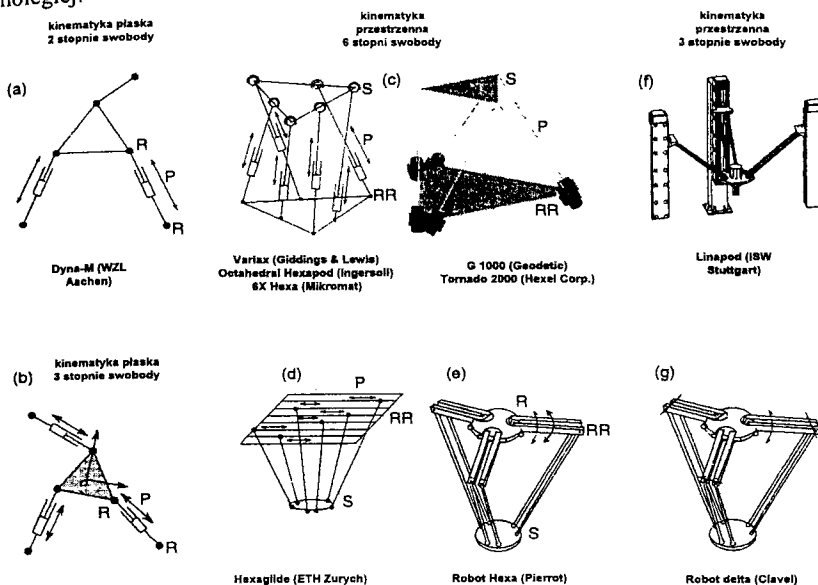
Powodem dla którego maszyny te w dalszym ciągu cieszą się mniejszym zainteresowaniem przemysłu, aniżeli obrabiarki z konwencjonalnym sekwencyjnym układem osi posuwowych, jest szereg problemów technicznych, związanych z ich funkcjonowaniem. Jako najważniejsze podaje się [3]:

- zmienną sztywność w obszarze roboczym,
- niekorzystny stosunek obszaru zajmowanego przez maszynę do jej przestrzeni roboczej,
- ograniczony kąt wychylenia platformy roboczej ( $\leq 30^\circ$  dla maszyn o liczbie osi większej niż 3),
- niedokładność pozycjonowania, zależną od: warunków termicznych, warunków statycznych i dynamicznych oraz histerezy przegubów.

## 3. CHARAKTERYSTYKA ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ MASZYN O KINEMATYCE RÓWNOLEGŁEJ I NAJISTOTNIEJSZE ZAGADNIENIA

Maszyny o równoległym łańcuchu kinematycznym można podzielić na płaskie i przestrzenne. Innym rodzajem systematyki jest podział ze względu na liczbę i rodzaj przegubów zastosowanych w łańcuchu kinematycznym. Oznaczając jako R przegub obrotowy, P parę przesuwną, S przegub kulisty i RR przegub Cardana, można wyróżnić struktury ramion typu

RRPS, RPRS, PRRS. Na rys. 1 pokazano podstawowe rodzaje konstrukcji o kinematyce równoległej.



Rys. 1: Zestawienie różnych typów maszyn o kinematyce równoległej [9].

Wśród funkcjonujących maszyn o kinematyce równoległej można wyróżnić dwie zasadnicze grupy. Pierwszą stanowią struktury w pełni równoległe, drugą zaś maszyny hybrydowe, składające się z zamkniętych i otwartych łańcuchów kinematycznych [4]. Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że kinematyki hybrydowe oferują znacznie większą różnorodność rozwiązań w porównaniu z kinematykami równoległymi. Wynika to m.in. z możliwości zwiększenia kąta wychylenia platformy roboczej (nawet do  $95^\circ$ ). Napędzane masy są w przypadku rozwiązań hybrydowych większe niż w przypadku czysto równoległych, ale poprzez precyzyjne zaprojektowanie możliwe jest osiągnięcie mimo to porównywalnych własności dynamicznych. Kolejnym argumentem przemawiającym za kinematykami hybrydowymi jest możliwość znacznego zwiększenia przestrzeni roboczej maszyny, choć wiąże się to z dodatkowymi trudnościami przy sterowaniu. Kinematyki hybrydowe mają duże znaczenie przy obróbce wymagającej dużych przestrzeni roboczych. Decyzja odnośnie wyboru hybrydowego albo w pełni równoległego układu kinematycznego może zapaść jednak wyłącznie na drodze analizy konkretnego zadania, dla którego ma być przeznaczona projektowana maszyna.

Wśród obu wspomnianych grup rozróżnia się maszyny o ramionach (członach łączących) posiadających stałą lub zmienną długość. W pierwszym przypadku odstęp pomiędzy przegubami jest stały, w drugim zmienny. Porównanie obydwu rodzajów pozwala na określenie zalet zarówno pierwszego, jak i drugiego rozwiązania. Do zalet rozwiązań o stałej długości ramion należą:

- większa sztywność, ponieważ siły działające na ramię dzielą się pomiędzy napęd i konstrukcję nośną,
- mniejsze wymagania odnośnie luzów w przegubach,
- możliwość zastosowania mniejszych przegubów,

- większa dokładność, ponieważ źródło ciepła (silnik) znajduje się poza obszarem roboczym.

Z kolei zaletami rozwiązań o zmiennej długości ramion są:

- możliwość osiągnięcia większej przestrzeni roboczej,
- mniejsze wahania własności w przestrzeni roboczej,
- mniejsze obciążenie ramion, przy mniejszej jego zależności od kąta ich nachylenia,
- mniejszy nakład pracy potrzebny do kalibracji,
- miejsce pomiaru może znajdować się bliżej narzędzia.

Już powyższe zestawienie pokazuje, że wybór optymalnego rozwiązania silnie zależy od konkretnego zastosowania projektowanej maszyny.

Innym kryterium, według którego można podzielić funkcjonujące obecnie maszyny o kinematyce równoległej, jest liczba stopni swobody elementu czynnego [4]. Powszechnie przyjmuje się, że struktury typu hexapod (o sześciu ramionach) stanowią alternatywę dla tradycyjnych obrabiarek pięcioosiowych, natomiast struktury typu tripod (o trzech ramionach), w tym również linapody (posiadające sześć ramion, w których każde 2 stanowią jedną jednostkę ruchomą) mogą zastępować dotychczasowe maszyny do obróbki trójosiowej. Istotnym kryterium przy podejmowaniu decyzji o konstruowaniu obrabiarki jest też nakład pracy i koszty związane z realizacją inwestycji. Pod tym względem maszyny typu tripod powinny przewyższać hexapody. Praktyka wykazała jednak, że wykonanie i montaż tripodów charakteryzują się większym nakładem pracy, ponieważ wymagają one o wiele większych dokładności wykonania poszczególnych części [2].

Podsumowując można stwierdzić, że zaletami struktur typu hexapod są: sztywność struktury, różnorodność zastosowań oraz większe możliwości kompensowania błędów. Natomiast do zalet tripodów należy zaliczyć: niższe koszty części i mniejsze rozmiary.

Wśród ośrodków zajmujących się konstruowaniem maszyn o kinematyce zamkniętej można zauważyć większe zainteresowanie strukturami trójosiowymi, typu tripod. Często są one wyposażane w dodatkowe ramie bierne, mające na celu odebranie zbędnych stopni swobody, podniesienie dokładności lub montaż urządzeń pomiarowych. Maszyna Tricept firmy Neos Robotics stanowi przykład tego rodzaju struktury. Znajduje ona zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym. Do roku 2000 skonstruowano ponad 20 różnych maszyn o kinematyce równoległej, jednak w dalszym ciągu większość z nich nie pracuje w warunkach przemysłowych [3].

#### **4. WYMAGANIA STAWIANE KINEMATYKOM RÓWNOLEGŁYM I ICH PRZYDATNOŚĆ DO RÓŻNYCH ZASTOSOWAŃ**

Kinematyki równoległe można, ze względu na przeznaczenie, zaklasyfikować do dwu grup [8]:

- struktury o niezdefiniowanym konkretnie obszarze zastosowania, mogące realizować wiele nie określonych ściśle zadań,
- kinematyki wyspecjalizowane w kierunku zadania znanego już w fazie projektowania maszyny.

Zalety kinematyki równoległej, takie jak małe masy napędzanych elementów oraz wysoka sztywność mają szczególne znaczenie dla tych zastosowań, które wymagają wysokiej dynamiki. W obszarze zastosowań maszyn roboczych są to przede wszystkim zastosowania związane z obróbką HSC, natomiast w dziedzinie automatyzacji zastosowania związane z manipulowaniem obiektami.

W związku z przydatnością kinematyk równoległych do różnych zastosowań można wprowadzić następujący podział:

- maszyny do automatycznych linii obrabiarkowych,
- elastyczne centra obróbkowe,
- maszyny dla małych sił procesowych, np. do obróbki laserem lub strumieniem wody,
- urządzenia montażowe.

Potencjał racjonalizatorski nowoczesnych technologii, pomysły odnośnie zastosowania i wymagania odnośnie poszczególnych maszyn są ściśle związane z określonym zastosowaniem, który określa m.in. geometrię i wielkość maszyny, wymagane dokładności itd.

Podczas gdy centra obróbkowe, jak również maszyny do obróbki laserem lub strumieniem wody wymagają możliwie dużej przestrzeni roboczej z, w miarę możliwości, stałymi właściwościami w jej obrębie, maszyny dla linii obrabiarkowych oraz montażowe powinny charakteryzować się określonymi własnościami w ściśle zdefiniowanej co do wielkości przestrzeni roboczej [8]. Dynamika maszyny również powinna być projektowana z uwzględnieniem obszaru zastosowań maszyny. I tak, ponieważ czas manipulowania ma istotny wpływ na czas całego procesu, może okazać się właściwym postawienie ekstremalnych wymagań odnośnie dynamiki urządzeń do manipulowania (Tab. 1).

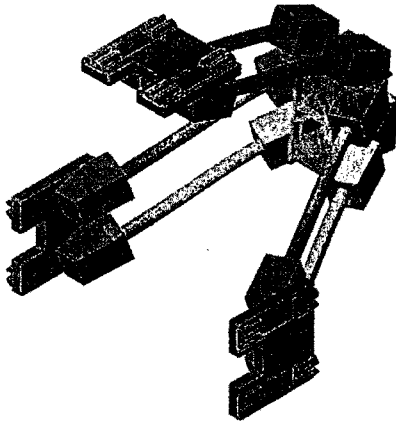
Tab. 1. Kryteria oceny maszyn w zależności od zastosowania [8]

Kryterium		Obrabiarka			Manipulator
		linie obrabiarkowe	centra obróbkowe	dla małych sił procesowych	
Geometria	przestrzeń robocza	zdefiniowana	możliwie duża	możliwie duża	zdefiniowana
	przestrzeń zajmowana	możliwie mała			zdefiniowany obszar zajmowany
	kolizje	brak kolizji w przestrzeni roboczej			brak kolizji
	liczba stopni swobody	3 do 5			6
	zakres położeń kątowych członu roboczego	zdefiniowany	możliwie duży	możliwie duży	zdefiniowany
Dokładność	dynamika	duża i równomierna			miejscami ekstremalnie duża
	napędzane masy	minimalne			
	szttywność	równomierna i wysoka			wysoka w obszarze odkładczym
	punkty osobliwe	brak			
Elastyczność		przeciętna	duża		przeciętna

W zależności od branży, kinematyki równoległe muszą spełniać różnorodne wymagania. W tabeli 2 [8] zebrano najważniejsze grupy zastosowań i wymagania, które zostaną tu kolejno omówione.

### Obróbka korpusów

Produkcja seryjna w branży samochodowej wymaga z reguły specjalnych i szczegółowo dopracowanych rozwiązań technicznych. Dodatkowo, mimo wprowadzania koncepcji platformy produktu, ilość wariantów, jak również częstotliwość wprowadzania nowych modeli stale rośnie, wywierając wpływ na rozwój technologii. Stąd wyżywa konieczność poszukiwania elastycznych rozwiązań technicznych, które mogą sprostać wymaganiom stawianym przez taką zmienność produkcji. W tej branży coraz większe znaczenie mają lekkie materiały, przede wszystkim stopy aluminium i magnezu. Maszyna, która może spełnić wymagania tej branży, jest np. Quickstep firmy Krause&Mauser [6]. Jest to maszyna trójosiowa typu tripod. Może ona również pracować jako pięcioosiowe centrum obróbkowe. Jest wówczas wyposażona w stół obrotowy i uchylny. Od roku 2000 maszyna jest z sukcesem stosowana w przemyśle motoryzacyjnym.



Rys. 2 Struktura kinematyczna maszyny Quickstep firmy Krause&Mauser

### Przemysł lotniczy

W budowie nowoczesnych samolotów zaczyna przeważać budowa integralna, co objawia się łączeniem wielu części w większe elementy przy wykluczeniu elementów połączeniowych. Prowadzi to do tego, że konieczna staje się wieloosiowa obróbka dużych i skomplikowanych części. Wykonanie takich części wymaga poza tym obróbki wysokowydajnej i HSC.



Rys. 3. Obrabiarka o strukturze równoległej typu Tricept 805 firmy Neos

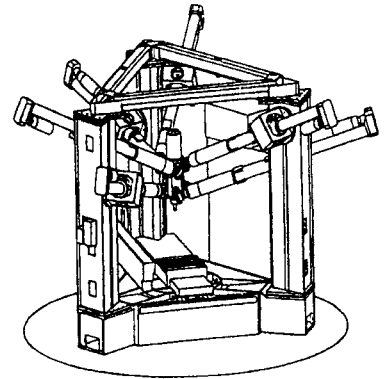
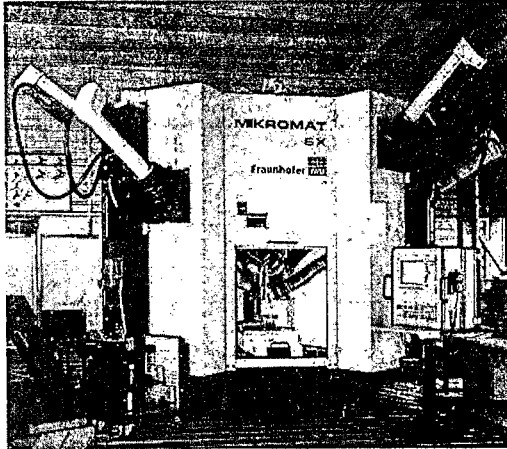
W materiałach przeważają stopy aluminium, wzrasta udział stopów tytanu. Struktury „czysto” równoległe mają za małą przestrzeń roboczą, aby spełnić wymagania przemysłu lotniczego. Dlatego też do realizacji tych zadań znajdują zastosowanie przede wszystkim struktury hybrydowe, w których głowice robocze są realizowane jako równoległe. Przykładem może być głowica o kinematyce równoległej (koncepcja Ecospeed) firmy DS-Technologie [5]. Konstrukcja ta została opracowana pod kątem zastosowania do obróbki dużych części w przemyśle lotniczym. Głowice te mają trzy sterowane stopnie swobody. Również maszyny Tricept serii 800 firmy Neos Robotics (Rys. 3) znajdują zastosowanie w przemyśle lotniczym [3]. Maszyny te stanowią rozwiązanie hybrydowe. Szczególnie preferowana jest 5-stronna obróbka przedmiotów z metali lekkich przy dużych objętościach usuwanego materiału

Tab. 2. Wymagania stawiane obrabiarkom o kinematyce równoległej w zależności od branży [8]

Przykłady zastosowań	Obróbka korpusów	Przemysł lotniczy	Obróbka form i matryc		Manipulowanie matrycami obiektami
			Mate formy	Średnie i duże formy	
	Korpus przekładni	Części wykonywane w całości (np. podłuznica)	Elektrody	Formy wtryskowe	Pozycjonowanie, montaż
<b>CHARAKTERYSTYKA WYMAGAŃ</b>					
<b>Wymiary</b>	ok. 600x400x400 [mm3]	do 25000x1000x300 [mm3]	ok. 600x600x400 [mm3]	do 4500x2500x1500 [mm3]	do 600x400x400 [mm3]
<b>Kształt części</b>	Płaskie powierzchnie czółowe, otwory (skośne)	płaskie powierzchnie, otwory, wąskie elementy uźbrowane (B/H 1:15 do 1:35), podwójnie zakrzywione powierzchnie	płaskie powierzchnie, otwory, głęboko kute wykroje, mate podwójnie zakrzywione powierzchnie swobodne	płaskie powierzchnie, duże podwójnie zakrzywione powierzchnie swobodne, głębokie rowki (L/D>10)	duża różnorodność
<b>Wymagane dokładności</b>	0,005-0,05 mm	0,02-0,05 mm	0,02-0,05 mm	0,02-0,05 mm	0,1 do 0,002 mm (w zależności od zastosowania)
<b>Materiały obrabiane</b>	żeliwo, stopy magnezu i aluminium	aluminium, stal, tytan	miedź, tworzywa sztuczne, grafit, stале narzędziowe, węgliki spiekane	aluminium, żeliwo, stале stopowe i narzędziowe	-
<b>Masa części</b>	20 –50 kg	do kilku ton	do kilkuset kilogramów	do kilku ton	do 50 kg
<b>Zadania obróbkowe</b>	frezowanie (przeważnie 3-osiowe), wiercenie	frezowanie 3- i 5-osiowe, wiercenie	frezowanie 3- i 5-osiowe, wiercenie	frezowanie 3- i 5-osiowe, wiercenie	pobieranie, transport
<b>Przyspieszenie</b>	10 m/s <sup>2</sup>	10 m/s <sup>2</sup>	10 m/s <sup>2</sup>	3-5 m/s <sup>2</sup>	do 40 m/s <sup>2</sup>
<b>Prędkość osiowa</b>	40 m/min	50 m/min	40 m/min	40 m/min	do 300 m/min (w zależności od masy)

## Obróbka form i narzędzi

Zadania obróbkowe w tej branży odznaczają się dużym udziałem obróbki powierzchni swobodnych. Wymagane są dokładności rzędu 0,02 do 0,05 mm. Często wymagana jest obróbka 5-osiowa. Maszyna musi przede wszystkim mieć możliwość obróbki zagłębień, silnie zakrzywionych powierzchni swobodnych i głębokich szczelin. Dla spełnienia tych wymagań niezbędne jest zastosowanie maszyn 5-osiowych, o strukturze typu hexapod. Przykładem może być obrabiarka MIKROMAT 6 X (rys. 4), skonstruowany przez IWU Chemnitz we współpracy z firmą MIKROMAT [7].



Rys. 4 MIKROMAT 6X Hexa

## Manipulowanie lekkimi obiektami

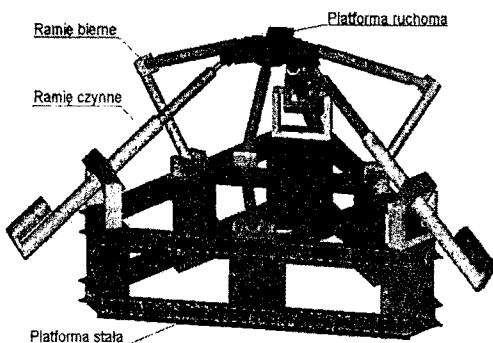
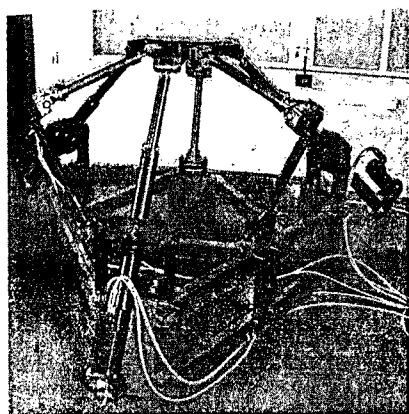
W dziedzinie urządzeń manipulacyjnych istotny jest specyficzny i różnorodny zakres wymagań stawiany konstrukcji urządzenia manipulującego. O ile np. w mikrochirurgii kładzie się nacisk na relatywnie małą przestrzeń roboczą w połączeniu z największą precyzją, to np. przy chwytaniu i transporcie części wykonanych na wtryskarkach najważniejsze są maksymalne przyspieszenia i prędkości.

## 5. CHARAKTERYSTYKA MASZyny ZBUDOWANEJ W ITMiA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

W wyniku realizacji prac naukowo-badawczych, podjętych trzy lata temu w ITMiA Politechniki Wrocławskiej, powstał prototyp maszyny typu tripod (rys. 2). Maszyna ta jest rozwijana w kierunku frezarki 3-osiowej. Dobór jej kinematyki, a także określenia jej podstawowych parametrów dokonano w oparciu o wymagania sformułowane przez potencjalnych użytkowników tej klasy maszyn. Stanowiły je odpowiedzi na postawione w ankiecie pytania. Do przetransformowania określonych oczekiwań klientów na wymogi projektowe, wykorzystano metodę QFD (ang. Quality Function Deployment) [10].



Struktura geometryczno-ruchowa zaprojektowanej maszyny posiada trzy stopnie swobody (XYZ) i jest zbudowana z dwóch platform (stałej i ruchomej). Platformy te połączone ze sobą sześcioma ramionami (rys. 5).



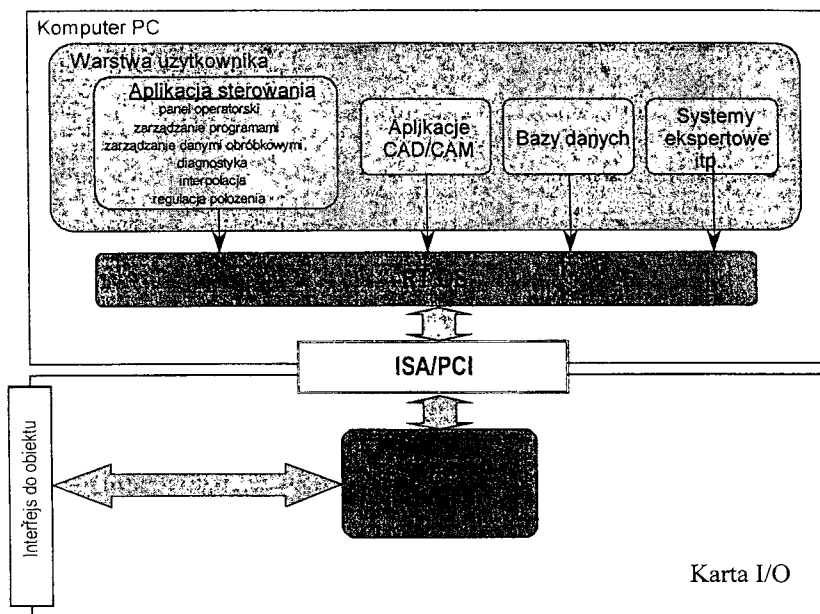
Rys. 5. Prototyp układu kinematycznego dla frezarki 3-osiowej („Pająk”), zrealizowany w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej i jego model komputerowy

Trzy z tych ramion są elementami napędowymi (ramiona czynne), a trzy pozostałe zapewniają platformie ruchomej stałość orientacji. Osiągnięto to dzięki wyposażeniu omawianej struktury w odpowiednie przeguby. Ruch platformy roboczej następuje wskutek zmiany długości elementów czynnych (napęd śrubowy tocny). Założono, że do platformy tej zostanie przymocowane elektrowrzeciono. Natomiast platforma stała będzie stanowić bazę dla układu przedmiotowego. Opracowaną konstrukcję obrabiarki o strukturze równoległej cechuje powtarzalność podzespołów składających się na jej budowę. Wdrożenie zasad budowy modułowej stwarza możliwość wykonania typoszeregu tych maszyn ze standardowych elementów. Umożliwi to w efekcie szybką budowę obrabiarki do realizacji określonych zadań obróbkowych

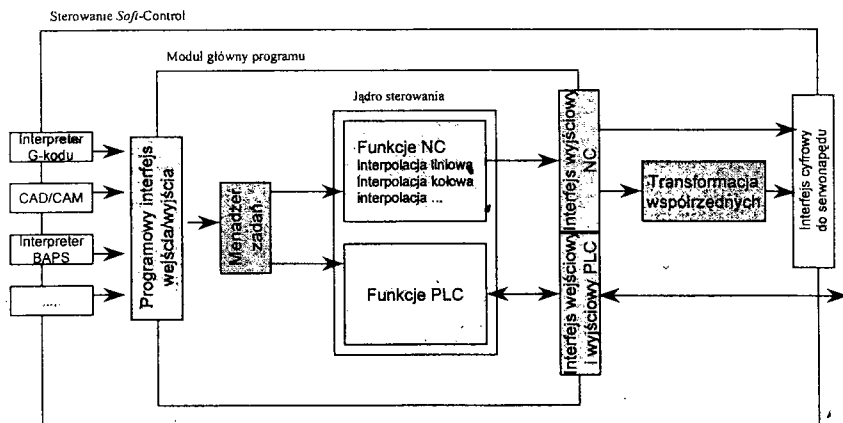
Obecnie rozwój technik komputerowych pozwala na wykorzystanie do budowy w pełni funkcjonalnego układu sterowania numerycznego komputerów PC [12]. Sterowanie to jest oparte w całości na odpowiednim oprogramowaniu pracującym pod kontrolą systemu operacyjnego i na tym samym procesorze, w który jest wyposażony komputer PC (rys. 6). Architektura ta, znana pod nazwą Soft-Control wymaga wyposażenia standardowego komputera w specjalną kartę rozszerzeń. Na rysunku 7 przedstawiona jest przykładowa struktura aplikacji sterowania obrabiarką o zamkniętym łańcuchu kinematycznym

Głównym modułem programowym jest jądro sterowania, które zawiera podstawowe funkcje NC odpowiedzialne za odwzorowanie kształtu geometrycznego przedmiotu obrabianego (interpolacje) oraz zestaw funkcji odpowiedzialnych za realizację funkcji pomocniczych (funkcje logiczne). Jądro to jest niezależne od typu obrabiarki, a ponadto może być łatwo rozbudowane np. przez dodanie nowych modułów funkcjonalnych. W jądrze sterowania generowana jest wartość zadana położenia dla poszczególnych osi oraz wartości logiczne do sterowania funkcjami pomocniczymi. Wartość zadana położenia przekazywana jest, poprzez standaryzowany interfejs, do modułu transformacji współrzędnych i następnie, cyfrowym interfejsem położeniowym, do sterownika napędu posuwu. Dzięki temu sterowanie nie jest

uzależnione od konkretnego typu napędu, przez to że nie musi wykonywać regulacji położenia w osiach sterowanych, tzn. regulator położenia leży po stronie napędu posuwu a nie sterowania. Moduł transformacji może być dowolnie opracowywany, w zależności od potrzeb konkretnego układu kinematycznego i, dzięki ściśle określonej formatowi danych wychodzących z jądra, łatwo integrowany ze sterowaniem.

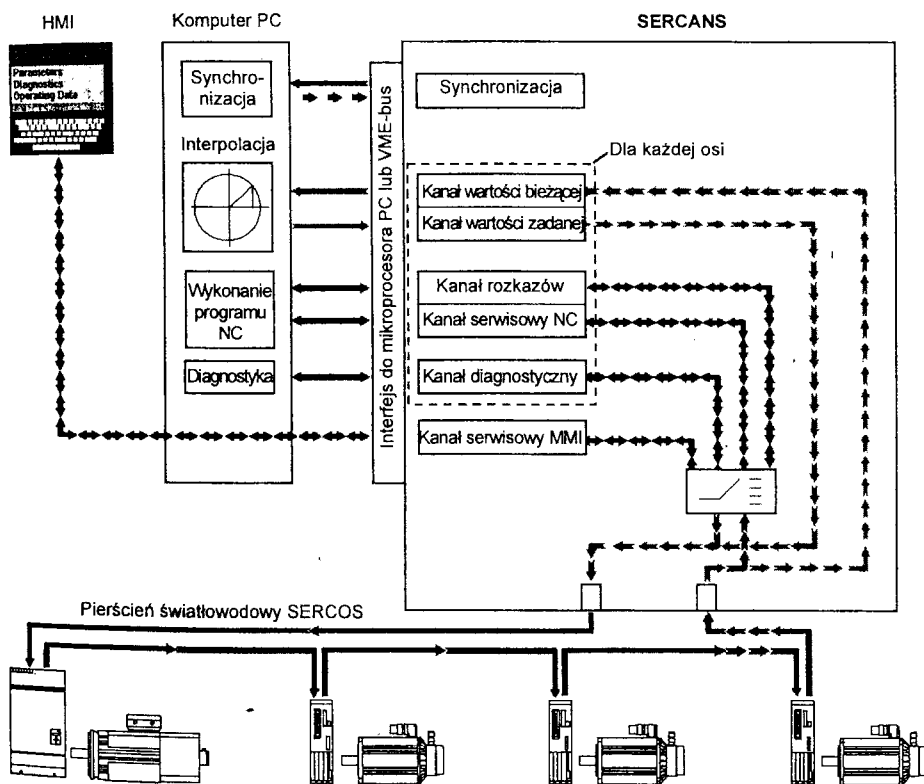


Rys. 6 Sterowanie Soft-Control [11]



Rys. 7 Struktura aplikacji sterownika NC [11]

Zaproponowana architektura sterowania wymaga zastosowania cyfrowego interfejsu położeniowego, który umożliwiłby przesyłanie danych pomiędzy aplikacją a sterownikami silników napędu posuwu. Obecnie jednym z dostępnych rozwiązań takiego interfejsu jest SERCOS, interfejs komunikacyjny dedykowany do zastosowań w obrabiarkach, ze względu na możliwość wymiany danych między sterownikiem a napędami posuwu w czasie rzeczywistym. W celu wykorzystania interfejsu SERCOS standardowy komputer PC wyposaża się w kartę SERCANS, dzięki której możliwe staje się sprzęgnięcie sterowania *Soft-Control*, zaimplementowanego na komputerze PC, z inteligentnym napędem posuwu (rys. 8). Ponieważ wszystkie pętle regulacyjne serwonapędu znajdują się po stronie napędu i jedyną wielkością przekazywaną do niego ze sterowania jest wartość zadana położenia, więc zgodność na poziomie interfejsu komunikacyjnego, poprzez zapewnienie poprawnej transmisji tych danych pomiędzy sterownikiem NC a sterownikiem napędu zapewnia właściwe funkcjonowanie całego układu.



Rys. 8 Struktura układu sterowania i napędu posuwu dla obrabiarki o równoległym łańcuchu kinematycznym [11]

## 6. PERSPEKTYWY ROZWOJU MASZYN O STRUKTURACH RÓWNOLEGLYCH

Każdego roku pojawia się kilka nowych konstrukcji maszyn o kinematyce równoległej. Oprócz wymienionych gałęzi przemysłu, maszyny tego typu znajdują zastosowanie w obróbce laserowej i montażu, a w szczególności w montażu precyzyjnym [7].

Obecnie coraz większą popularność zyskują rozwiązania hybrydowe, a to dlatego, że są one w stanie w pełni łączyć zalety maszyn konwencjonalnych, przy wyeliminowaniu podstawowej wady struktur „czysto” równoległych (mała przestrzeń robocza). Podkreśla się również modułowość tych rozwiązań. Na uwagę zasługuje fakt, że niektórzy producenci wyspecjalizowali się w produkcji takich komponentów do kinematyk równoległych, jak: przeguby, śruby toczne i napędy liniowe (np. f-ma INA). Powstają również modułowe systemy sterowania tych maszyn (np. f-ma Siemens). Szersze zainteresowanie rynku obrabiarkami tego typu wymaga jednakże kilku lat pracy nad rozwiązaniem podstawowych problemów, do których zalicza się: niezadowalającą dokładność i ograniczoną możliwość orientowania narzędzia, a także trudności związane z kalibracją oraz wysoki koszt maszyny i niekorzystny stosunek jej wymiarów gabarytowych do przestrzeni roboczej [2].

Praktyka wskazuje, że jednym ze sposobów na zwiększenie dokładności maszyn o strukturach równoległych może być np. zastosowanie dodatkowego, biernego ramienia. Przykładem może być obrabiarka typu Tricept [3]. Ramię to zabezpiecza przed niekontrolowanym wychyleniem się elementu czynnego i poprawia dokładność maszyny.

Innym sposobem poprawy dokładności jest stosowanie nowych, mniej podatnych na temperaturę materiałów i komponentów wykonanych z dużą dokładnością. Duże znaczenie mają zastosowane systemy pomiarowe i kalibracja [2].

Zwiększenie możliwości orientowania narzędzia w przestrzeni można uzyskać dzięki wprowadzeniu dodatkowych stopni swobody. Powiększenie przestrzeni roboczej uzyskuje się najczęściej poprzez zastosowanie rozwiązań hybrydowych, o czym była mowa wcześniej.

Koszt maszyn o kinematyce równoległej będzie z pewnością malał w miarę wzrostu ich popularności i popytu. Szczególnie ważne są badania maszyn w warunkach nie odbiegających od warunków przemysłowych. W trakcie takich badań wykrywa się większość niedoskonałości samej konstrukcji i systemów sterowania.

Podsumowując można stwierdzić, że pomimo wymienionych wad udział maszyn o kinematyce równoległej będzie coraz większy, zwłaszcza w takich dziedzinach, jak lotnictwo, przemysł samochodowy i wytwarzanie form.

### LITERATURA

- [1] Chlebus E., Honczarenko J., Iżykowski S. (Red.), Koch J., Koch T., Kosmol J., Krzyżanowski J., Kwaśny W., Rafałowicz J., Smalec Z., Szafarczyk M., Weiss E.: *Nowe koncepcje maszyn i urządzeń wytwórczych*; W: „Automatyzacja produkcji '97. Innowacje w technice i zarządzaniu”. T. 1 Referaty plenarne. Prace Nauk. ITMiA PWr. nr 67, serii Konferencje nr 29. Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 1997, s. 269-300.
- [2] Pritschow G.: *Neue Wege für Parallelkinematikkonzepte*; Tagungsband FTK 2000. Springer Verlag. Stuttgart 2000.
- [3] Kreidler V.: *Leistungsfähigkeit von Parallelkinematikmaschinen*; Tagungsband FTK 2000. Springer Verlag. Stuttgart 2000.
- [4] Neugebauer R.: *Gestaltung, Bewertung und Einsatzerfahrungen von Parallelkinematiken*; Tagungsband FTK 2000. Springer Verlag. Stuttgart 2000.

- [5] Hennes N.: *ECOSPEED – Ein hybridkinematisches Maschinenkonzept zur 5-Achsen-Hochleistungserspannung großer Strukturbauteile im Flugzeugbau*; Tagungsband FTK 2000. Springer Verlag. Stuttgart 2000.
- [6] Holy F.: *Entwicklung von der EMO – Maschine zur Serienlösung des QUICKSTEP'S*; Tagungsband FTK 2000. Springer Verlag. Stuttgart 2000.
- [7] Neugebauer R.: *Chemnitzer Parallelstruktur-Seminar*; 28/29. April 1998. Tagungsband. Chemnitz 1998.
- [8] Neugebauer R., Harzbecker C., Stoll A.: *Parallelkinematiken im Werkzeugmaschinenbau*; 2. Chemnitzer Parallelstruktur-Seminar. 2000. Tagungsband. Chemnitz 2000.
- [9] Weck M., Giesler M.: *Auslegung von Werkzeugmaschinen auf Basis paralleler Kinematiken am Beispiel Hexapod und Dyna-M*; Hexapod, Linapod, Dyna-M. Materialy Seminarium, WZL Aachen 1998
- [10] Koch T., Owczarek A., Chrapek K.: *Zastosowanie metody QFD do formułowania wytycznych do założeń konstrukcyjnych frezarki*; Mechanik nr 5-6/2001.
- [11] Szeplik P., Koch T.: *Sterowanie prototypowego modelu frezarki trzyosiowej o kinematyce równoległej*; Materiały konferenc.: W: VII Krajowa Konferencja Robotyki. Łądek Zdrój, 5-8 września 2001. T. 2 Wrocław: Oficyna Wydaw. PWroc. 2001 Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej nr 103, Konferencje.
- [12] Pritschow G., Lutz P., Reichele R.: *Perspektiven der Steuerungstechnik*; 1. Chemnitzer Parallelstruktur-Seminar. Tagungsband. Chemnitz 1998, s.127-142