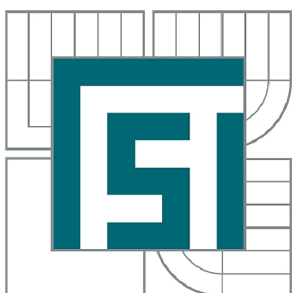


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

PARALELNÍ KINEMATICKÉ STRUKTURY PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

INDUSTRIAL ROBOTS WITH PARALELL KINEMATICS STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ADAM ŠABART

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK KNOFLÍČEK, Dr.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Adam Šabart

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Paralelní kinematické struktury průmyslových robotů

v anglickém jazyce:

Industrial robots with parallel kinematics structures

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Definice a názvosloví používaná v robotice a v kinematice paralelních struktur
2. Konstrukční znaky a rozdělení robotů s paralelní kinematickou strukturou (PKS)
3. Základní stavební prvky a uzly
4. Struktury robotů s PKS (od historie až do současnosti)
5. Příklady konstrukce a aplikace robotů s PKS
6. Perspektivy PKS a závěr

Cíle bakalářské práce:

Cílem je získat přehled ve schématech PKS robotů, které jsou novým typem v robotice. Na základě historického vývoje je možné uvést jejich základní principy konstrukce, výhody, nevýhody a použití(vhodné aplikace).

Seznam odborné literatury:

1. Merlet J. P.: Paralell robots, Kluwer academic publishers, London, 2000, ISBN 0-7923-6308-6
2. Skařupa J., Mostýn V.: Teorie průmyslových robotů, VIENALA Košuce, 2001, ISBN 80-88922-35-6
3. Valášek M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT Praha, 1996, ISBN 80-01-01276-X
4. Knoflíček R., Plšek L.: Paralelní kinematické struktury výrobních strojů a průmyslových robotů, přednáška projektu Erasmus, FSI VUT Brno, 2006

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 25.10.2014

L.S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku a stav současného poznání robotů s paralelní kinematickou strukturou. Pro snazší pochopení jsou nejprve definovány používané pojmy, dále práce pokračuje popisem historického vývoje paralelních kinematik. V další kapitole je provedena analýza konstrukcí a rozdělení paralelních mechanismů. Následuje základní rozdělení kinematických struktur robotů a jejich srovnání. Závěr je věnován paralelním robotům užívaným v praxi a jejich předpokládanému vývoji.

Abstract

The Bachelor's thesis is focusing on the problems and the state of the current knowledge in robots having parallel kinematic structure. For better understanding, first of all, the words used are defined, and this definition is followed by the description of the historical developments of parallel kinematics. The subsequent chapter comprises the analysis of structures and the division of parallel mechanisms. This is followed by the basic division of kinematic structures of robots and their comparison. In conclusion attention is paid to the parallel robots utilized in practice and their expected development.

Klíčová slova

Paralelní kinematická struktura, průmyslový robot, hexapod, delta robot, mechanismus.

Keywords

Parallel kinematic structure, industrial robot, hexapod, delta robot, mechanism.

Bibliografická citace práce

ŠABART, Adam. *Paralelní kinematické struktury průmyslových robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr. s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 24. května 2015


.....
Adam Šabart

Poděkování


Děkuji doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr. za pomoc, cenné rady a ochotu, jež mi poskytl při vypracování této práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Březinovi, Ph.D. za pomoc při práci s programem MATLAB/SimMechanics. Poděkování patří též mé rodině za podporu během celého studia.

Obsah

1. ÚVOD DO KINEMATICKÝCH STRUKTUR ROBOTŮ	15
1.1 Slovník základních pojmů	15
1.2 Historický vývoj paralelních kinematik a jejich užití	17
1.2.1 Úvod	17
1.2.2 První paralelní roboty využitelné v průmyslu	17
2. ANALÝZA PARALELNÍCH KINEMATICKÝCH STRUKTUR	21
2.1 Komponenty	21
2.1.1 Klouby	21
2.1.2 Ramena	22
2.2 Hodnotící kritéria	23
2.2.1 Stupně volnosti	23
2.2.2 Počet a uspořádání kloubových bodů na bázi a platformě	24
2.2.3 Druh, počet a pořadí kloubů ve vodícím řetězci	24
2.2.4 Počet a uspořádání ramen	25
2.2.5 Druh a umístění pohonu	26
2.3 Kinematika	27
2.3.1 Přímá úloha kinematiky	27
2.3.2 Inverzní úloha kinematiky	30
2.3.3 Tvorba kinematického modelu robotu DexTAR	31
3. DRUHY KINEMATICKÝCH STRUKTUR U PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ	34
3.1 Sériové kinematické struktury	34
3.2 Paralelní kinematické struktury	35
3.3 Porovnání SKS, PKS	36
4. ROBOTY S PKS V PRAXI	38
4.1 Roboty s PKS a jejich uplatnění pro vesmírné aktivity	38
4.2 Roboty s PKS ve zdravotnictví	39
4.3 Roboty s PKS v průmyslu	40
4.4 Joysticky	42
4.5 Simulátory	42
4.6 Speciální aplikace	43

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 14
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

5. PŘEDPOKLÁDANÝ VÝVOJ	45
ZÁVĚR	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	49
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....	50
SEZNAM TABULEK.....	51
SEZNAM PŘÍLOH	52

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 15
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

1. Úvod do kinematických struktur robotů

1.1 Slovník základních pojmů [1]

Pro pochopení problematiky týkající se paralelních kinematických struktur je vhodné definovat základní pojmy.

Báze je takový člen mechanismu, který nekoná žádný pohyb. Tvoří tedy rám mechanismu, někdy je označována jako pevná základna nebo jen základna.

Geometrická odchylka je odchylka vzniklá rozdílem mezi požadovanými a skutečnými geometrickými parametry daného prvku.

Hexapod lze popsat jako paralelní kinematiku s šesti stupni volnosti, jejíž platforma je spojena s bází šesti vodícími řetězci. Ve smyslu pohonové techniky je hexapod chápán jako prostorové hnací ústrojí schopné realizovat všechny prostorové pohyby.

Hybridní kinematika je tvořena otevřenými i uzavřenými kinematickými řetězci. Vzniká, také když jeden hnací člen unáší jiný hnací člen.

Kinematika je obecně chápána jako nauka o pohybu. V této práci se pod tímto pojmem rozumí převážně hnací ústrojí, které slouží k přenosu pohybu, sil či kroutících momentů. Zároveň je kinematika tvořena minimálně třemi členy, přičemž jeden musí být základna. V tomto smyslu slova lze kinematiku chápat jako synonymum ke slovu mechanismus.

Kinematická dvojice se skládá ze dvou členů, které jsou k sobě pohyblivě vázány tak, že pohyblivost jednoho vůči druhému je omezena.

Kinematická analýza mechanismů spočívá v určování polohy, rychlosti a zrychlení resp. úhlové výchylky, úhlové rychlosti a úhlového zrychlení bodů nebo těles daného mechanismu v závislosti na hnací souřadnici.


Kinematická syntéza mechanismů představuje inverzní úlohu ke kinematické analýze. Spočívá v nalezení hnací souřadnice na základě předepsaného pohybu, tedy hnané souřadnice.

Kinematický řetězec vznikne při spojení několika členů pomocí kinematických dvojic. Kinematický řetězec je reprezentován strukturou kinematiky, tj. počtem, druhem a uspořádáním jednotlivých členů kinematiky. Kinematické řetězce mohou být otevřené, uzavřené nebo smíšené, také jednoduché či složené a dále je lze ještě rozdělit na rovinné, sférické nebo prostorové.

Kinematický řetězec otevřený je takový řetězec, ve kterém jsou některé členy připojeny pouze jednou kinematickou dvojicí.

Kinematický řetězec uzavřený je takový řetězec, jehož každý člen je připojen nejméně dvěma kinematickými dvojicemi.

Kloub představuje technické provedení kinematické dvojice. Jedná se o označení používané především pro nižší kinematické dvojice.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 16
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Kloubový bod je střed otáčení rotačního kloubu, tzn. průsečík os otáčení rotačního kloubu s více jak jednou osou rotace. Kloubový bod bývá někdy označován synonymem otočný bod.

Koncový efektor tvoří koncový člen mechanismu, který je unášen prostřednictvím platformy nebo platformu tvoří. Je určen k manipulaci s nástrojem nebo obrobkem.

Mechanismus je mechanické zařízení, jenž slouží k transformaci pohybu nebo přenosu sil. Mechanismus je tvořen soustavou vzájemně pohyblivých těles, z nichž je jedno vzhledem k ostatním nepohyblivé. Tělesa nazýváme členy mechanismu, nepohyblivé těleso se nazývá rám.

Paralelní kinematika je pojem, který není formálně zcela jednoznačný (přesněji jde o mechanismus s paralelní kinematickou strukturou). Odborná veřejnost však tento pojem běžně používá, proto bude i v této práci zmiňován ve spojitosti s konstrukcí výrobních strojů, robotů a manipulátorů. Jedná se tedy o mechanismus s uzavřeným kinematickým řetězcem složený z báze, platformy a nejméně dvou nezávislých paralelně řazených vodících řetězců.

Platforma je označení koncového členu mechanismu, který je polohován a/nebo orientován vůči bázi prostřednictvím vodících řetězců. Platforma bývá také označována jako pohyblivá plošina nebo jen plošina.

Počet stupňů volnosti mechanismu určuje míru pohyblivosti mechanismu. Udává počet složek pohybu (translací a rotací), které jsou pro koncový efektor realizovatelné.

Pohyblivost vyjadřuje omezení pohybu dané soustavy stykovými vazbami.

Sériová kinematika je kinematický mechanismus s otevřeným kinematickým řetězcem. Sériová kinematika je složena z báze, platformy a jednoho vodícího řetězce.

Spojnice představuje pasivní vzpěru s neměnnou délkou, na jejíchž koncích se nacházejí klouby. Z hlediska pohonové techniky se jedná o hnaný člen.

Tripod je druh paralelní kinematiky s třemi stupni volnosti. Platforma tripodu bývá zpravidla spojena s bází pomocí tří poháněných vodících řetězců.

Vodící řetězec paralelních kinematik zajišťuje spojení platformy s bází. Toto spojení je realizováno nejméně jedním hnacím členem a dvěma klouby. Vodící řetězec je tvořen vzpěrou nebo vzpěrou a spojnici.

Vzpěra v této práci představuje aktivní člen vodícího řetězce paralelních kinematik. Pojmy rameno a servovzpěra mají stejný význam. Z hlediska pohonové techniky se vzpěra řadí do hnacích členů.

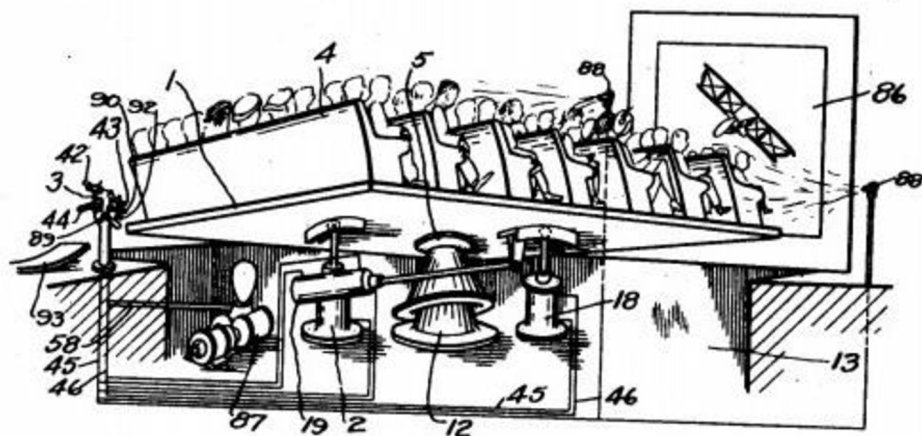
Redundantní paralelní kinematika je paralelní kinematika obsahující nadbytečné pohony. Počet pohonů překračuje počet stupňů volnosti.

1.2 Historický vývoj paralelních kinematik a jejich užití

1.2.1 Úvod [2], [3], [4]

Ačkoliv je aplikace průmyslových robotů s paralelní kinematikou relativně nová záležitost, její kořeny sahají mnohem hlouběji do historie, než by se na první pohled mohlo zdát.

První teoretické problémy mechanismů s paralelní kinematickou strukturou zmiňoval Christopher Wren již v roce 1645, dále pak v roce 1813 Augustin Louis Cauchy zkoumal tuhost kloubového oktahedronu. Později se danou problematikou se zabývali také Henri Léon Lebesgue a Raoul Bricard. O vůbec první patent zahrnující paralelní kinematiku požádal James E. Gwinnett v roce 1928. Jeho plošina (obr. 1.1) pojmenovaná oxymoronem „pohyblivá báze“ disponující třemi stupni volnosti měla najít své využití v kinech. Není známo jestli byla „pohyblivá báze“ někdy sestrojena a používána. Můžeme však usoudit, že Gwinnett byl ve svých myšlenkách velmi napřed, průmysl ale nebyl schopen jeho invence prozatím využít.



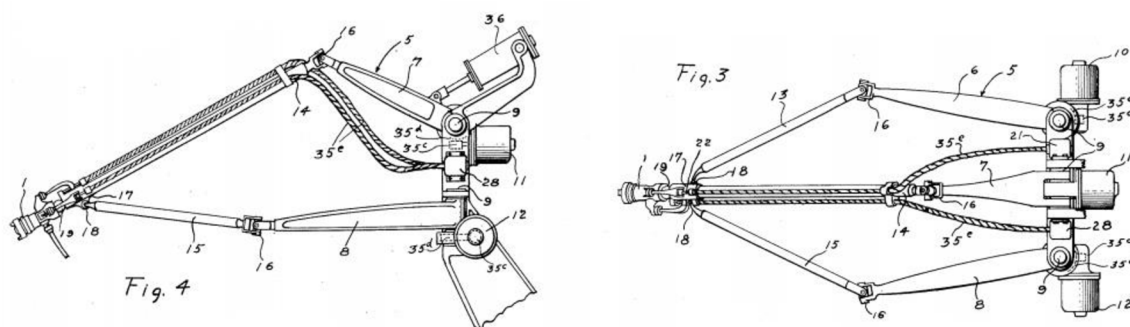
Obr. 1.1: První patentovaná paralelní kinematika [4].

1.2.2 První paralelní roboty využitelné v průmyslu [3], [4], [5]

O pár let později po Gwinnettovi a pouhých 17 let po prvním použití slova robot Karlem Čapkem přišel se svým návrhem robotu (obr. 1.2) Willard L. V. Pollard. Jednalo se o první průmyslový robot s paralelní kinematickou strukturou. Mechanismus měl sloužit k rozstřikování nátěrů. Pollardův vynález se skládal ze tří paralelních řetězců, každý řetězec se skládal z bazového a okrajového ramene, jenž spojoval univerzální kloub. Každé bazové rameno bylo otáčeno vlastním motorem umístěným na bázi. Dvě okrajové ramena byla vázána ke třetímu kulovým kloubem, zatímco koncový efektor byl se třetím ramenem spojen pomocí univerzálního kloubu. Polohu a orientaci koncového efektoru zajišťovalo celkem 5 motorů umístěných na bázi, 3 motory otáčející bazovými rameny určovaly polohu a další 2 pomocí flexibilních otočných kabelů orientaci. Tato konstrukce dávala robotu 5 stupňů volnosti. Patentu se tento robot dočkal až díky synovi Willarda L. V. Pollarda. V roce 1934 si Willard Pollard Jr. přihlásil svůj patent, který se skládal ze dvou částí:

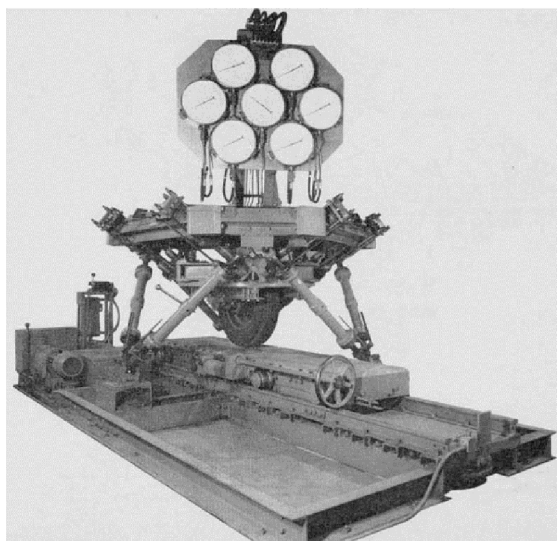
- elektrický řídicí systém,
- mechanický manipulátor.

Patent byl nakonec přijat až v roce 1942, ke stavbě robotu přesto nedošlo.



Obr. 1.2: První průmyslový robot s paralelní kinematickou strukturou [4].

Jen o pár let později, v roce 1947, představil Dr. Eric Cough svůj oktahedrální hexapod s proměnlivou délkou ramen. Dr. Eric Cough pracoval jako automobilový inženýr pro firmu Dunlop Rubber Co. v Anglii. Jeho stroj měl sloužit k testování pneumatik, které byly zatíženy silami vzniklými od přistávání letadel. Zařízení (obr. 1.3) bylo plně funkční v roce 1954. V době zahájení provozu byly výsuvné nohy ručně nastavitelné, později bylo implementováno digitální ovládání.

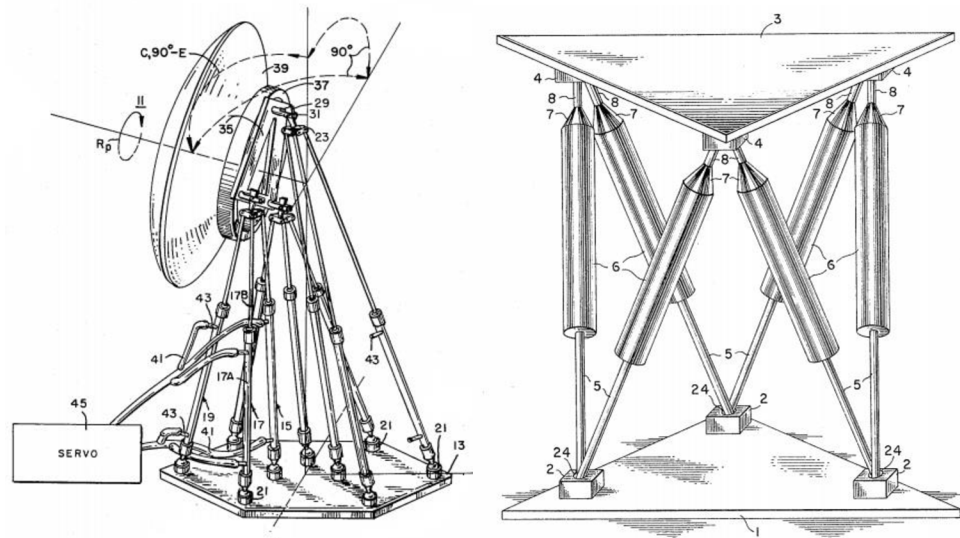


Obr. 1.3: Coughův hexapod určený k testování pneumatik [5].

60. léta byla pro vývoj paralelních kinematických struktur velmi důležitá. V roce 1962 si Menahem Suliteanu a William R. La Valley podali žádost o patentování jejich podstavce antén (obr. 1.4). Ten se skládal ze tří tripodů a měl 6 stupňů volnosti. Patent byl přijat až v roce 1966. Ve stejný rok byl přijat patent, o který si v roce 1965 zažádal Everett R. Peterson. Peterson navrhl oktahedrální hexapod s dvoukuličkovými klouby (obr. 1.5).

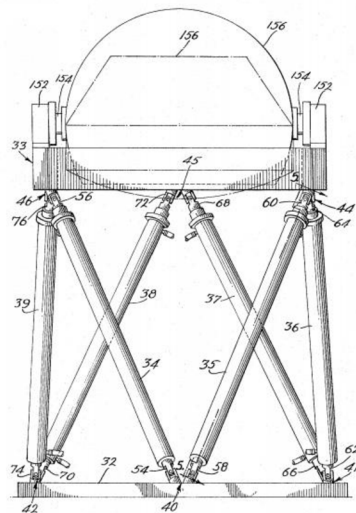


BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

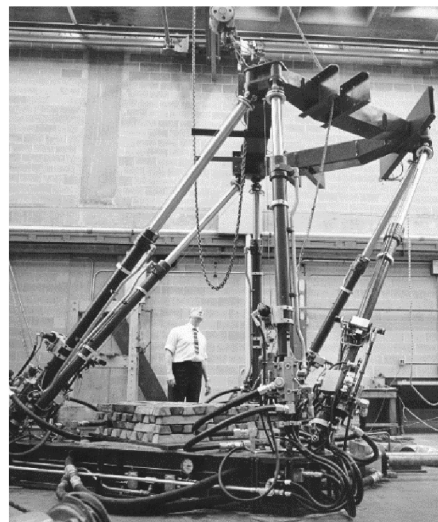


Obr. 1.4: Paralelní podstavec antén [6]. Obr. 1.5: Petersonův oktahedrální hexapod [7].

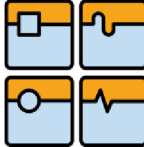
Ačkoliv přišlo schválení patentu Klause L. Cappela pár měsíců po Petersonovi, byl ten jeho pravděpodobně nejprůlomovější v oblasti paralelních kinematik. Vše začalo tak, že zaměstnavatel Klause L. Cappel - Franklinův institut vznesl požadavek na zdokonalení již existujícího vibračního systému MAST (Multi-Axis Simulation Table) se 6 stupni volnosti. MAST byl hexapod se třemi vertikálními a třemi horizontálními zvedáky. Cappel se v prvopočátku snažil nahradit tři vodorovné členy čtyřmi, které byly uspořádány do kruhu, ve snaze snížit horizontální reakce. Nicméně konfigurace se 7 podpěrami byla příliš složitá na řízení a protichůdné síly vedly k lomu plošiny. A tak Cappel použil Coughovo oktahedrální uspořádání. V roce 1964 Cappel zažádal o patentování svého pohybového simulátoru (obr. 1.6) a o 3 roky později byl jeho patent schválen. Myšlenka Cappelova leteckého simulátoru byla ve skutečnosti důsledkem požadavku firemní kanceláře Sikorsky Aircraft Division na vrtulníkový letecký simulátor se 6 stupni volnosti. A tak se plošina Klause L. Cappel stala prvním leteckým simulátorem postaveným na oktahedrálním hexapodu (obr. 1.7).



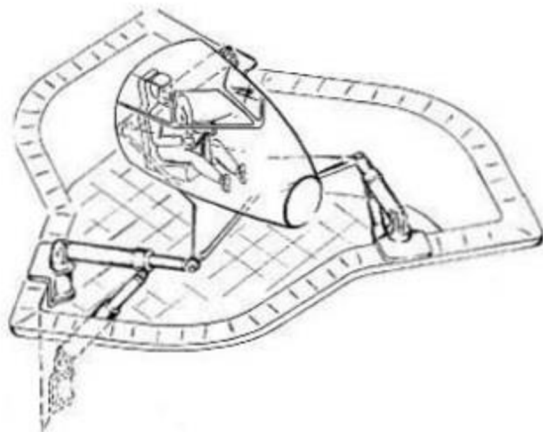
Obr. 1.6: Návrh Cappelova leteckého simulátoru [8].



Obr. 1.7: První letecký simulátor postavený na bázi hexapodu [4].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 20
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Velmi důležitý byl pro vývoj paralelních kinematik objev Stewartova spisu v roce 1965. D. Stewart v něm uvažuje (nezávisle na Cappelovi a Coughovi) nad použitím mechanismu se 6 paralelně řazenými teleskopickými rameny (obr. 1.8). Konstrukce měla 6 stupňů volnosti a měla sloužit jako letecký simulátor. Paradoxem však je, že pojmem Stewartova plošina bývají nazývané oktahedrání hexapody, Stewartova plošina ale nemá oktahedrání konfiguraci.




Obr. 1.8: Schéma Stewartovy plošiny [4].

Po další dvě desetiletí nebyla paralelním robotům věnována příliš velká pozornost, to se ale změnilo na počátku 80. let minulého století. V roce 1985 přišel Donald C. Fyler s nápadem použít dvouramenného robota s paralelním uspořádáním a tvrdil, že jeho robot bude lepší než sériový SCARA robot, který byl vyvinut v roce 1979 profesorem Hiroshim Makinoem. Dále v 80. letech přišlo ještě mnoho inovativních architektur, žádná však neměla takový úspěch jako DELTA robot (obr. 1.9), paralelní manipulátor pro vysokorychlostní přemísťování předmětů se 4 stupni volnosti. Autorem byl profesor Raymond Clavel, který si mechanismus nechal v roce 1990 patentovat a hned několik firem, jako například ABB, začalo DELTA roboty vyrábět. Po dobu patentové ochrany bylo vyrobeno víc jak 10 000 kusů. Nyní již design DELTA robotů není dále chráněn patentem a mnoho firem jako je FANUC, Motoman a Kawasaki roboty vyrábějí. DELTA robot se tak stal nejvíce používaný robot v průmyslu.



Obr. 1.9: První delta robot, vyrobený v roce 1985 [5].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 21
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

2. Analýza paralelních kinematických struktur

2.1 Komponenty [9]

Při konstruování prvních paralelních struktur se vyskytly konstrukční problémy s nedostatkem komponentů, které by splňovaly kladené požadavky. Tento fakt se změnil v 90. letech minulého století s vývojem nových komponentů a umožnil tak prudký rozvoj paralelních kinematik do různých oborů. Mezi hlavní prvky paralelních robotů patří báze, ramena, klouby a platforma. Nejdůležitější komponenty zejména pro přesnost paralelních struktur jsou klouby a ramena, na něž jsou kladeny vysoké požadavky. Jako první se výrobou komponentů pro paralelní struktury začala zabývat firma INA. Podílela se na výrobě strojů ve spolupráci s univerzitami, výzkumnými ústavami i průmyslovými podniky.

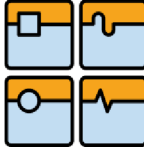
2.1.1 Klouby

Klouby jako takové se již dříve používali v automobilovém a zemědělském průmyslu. Na klouby určené pro stavbu paralelních mechanismů jsou kladeny zvláštní požadavky jako jsou tuhost, statická únosnost, vysoká přesnost, nízká hmotnost, malé opotřebení, dlouhá životnost a velké úhlové rozsahy. Každá konstrukce má jiné požadavky, někdy je potřeba kloubu se 2 stupni volnosti, někdy se třemi. Pro použití mechanismu k frézování je potřeba dosáhnout vysoké tuhosti a přesnosti, naopak pro manipulační použití je požadavek na velké úhlové rozsahy pro získání větších pracovních prostor a nízkou hmotnost pro rychlé polohování. Všechny požadavky vedly k vývoji tří základních druhů kloubů.

Kulové klouby se třemi stupni volnosti (obr. 2.1 vlevo) pracují tak, že kuličky v kloubu tvoří valivé vedení pro kulovou plochu kloubu. Výhodou kulových kloubů je nízká hodnota Hertzova tlaku na stykových plochách vnějšího pouzdra s kuličkami a kuliček s kulovou plochou kloubu. Této nízké hodnoty je dosaženo díky velkému počtu kuliček, které slouží jako valivá tělíska. Avšak jsou kladeny velmi velké nároky na geometrickou přesnost výše zmíněných kontaktních ploch. Tento druh kloubů dostahuje nejvyšších hodnot únosnosti a tuhosti, což kulové klouby předurčuje pro aplikaci do strojů určených k frézování. Pro dosažení dlouhodobé činnosti je nezbytné dokonalé těsnění kloubu.

Univerzální klouby se dvěma nebo třemi stupni volnosti (obr. 2.1 vpravo) jsou zejména používány pro manipulační zařízení. Jejich konstrukce má nízkou hmotnost a velké geometrické rozsahy, což umožňuje použití do struktur vystavených vysokým zrychlením a rychlostem ve velkých pracovních prostorech. Pro udržení tuhosti za daného úhlového rozsahu kloubu je limitována koncová poloha kloubu v druhé ose otáčení. V porovnání s kulovými klouby mají univerzální nižší tuhost, což je způsobeno malou opěrnou plochou valivých tělísek a použitím jehlových ložisek.

Kardanové klouby (obr. 2.1 uprostřed) nachází obvykle své využití k přenosu kroutících momentů a pro spojení hřídelí s osovou výchylkou. U paralelních struktur jsou tahové a tlakové síly zachycovány právě v kloubech, kde je z tohoto důvodu vyžadována zvýšená tuhost. Právě proto je náboj kloubu optimalizován metodou konečných prvků pro tahové a tlakové zatížení. K uložení kloubu se používá radiálně-axiálních jehlových ložisek. Tento druh ložisek zajišťuje nejvyšší tuhost a dokonale těsní. Kardanové klouby na trhu vyplňují mezeru mezi klouby kulovými a

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 22
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

univerzálními. Nejvhodněji se kardanové klouby dají použít pro struktury vyžadující velké pracovní prostory a vyšší tuhost. Na druhou stranu platí omezení úhlových rozsahů jako u univerzálních kloubů. Kardanové klouby pracují v rozsahu teplot od -30 do 120 °C a jsou mazány speciálními tuky. Klouby jsou naplněny tukem již od výrobce, přibližně po 2 letech používání je doporučeno klouby znovu namazat.



Obr. 2.1: Kulový, kardanový a univerzální kloub [1].

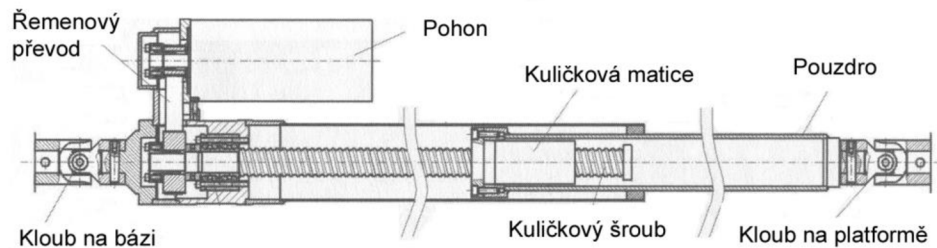
2.1.2 Ramena [1]

U robotů s paralelní kinematickou strukturou jsou ramena a klouby hlavními prvky vodících řetězců, které spojují bázi s pohyblivou platformou. Mezi hlavní úkoly ramen patří přenášení síly z platformy na pevnou základnu. Charakteristiky a uspořádání ramen dokáží ovlivnit celkové vlastnosti mechanismu jako je například tuhost, přesnost a rychlost polohování. Ramena lze obecně rozdělit do dvou základních skupin.

Ramena s proměnlivou délkou se vyznačují tím, že jsou schopny měnit vzdálenost mezi středem otáčení kloubu na bázi a středem otáčení kloubu na platformě. U ramen s proměnlivou délkou lze použít teleskopické druhy pohonu jako převod kuličkový šroub – matice, u kterých dochází k celkové změně délky ramene nebo pevná posuvová ramena, u kterých je pohon umístěn v kloubu na bázi. Při použití dutého pohonu se rameno může posouvat skrz pohon na obě strany. Pevné posuvové členy umožňují využít větší pracovní prostor (délka ramena není omezena jako u teleskopických ramen) a také umožňují aplikaci konvenčních přímočarých pohonů nebo pohonů s hřebenovou tyčí a pastorkem.

Při použití kuličkového šroubu a matice se můžeme setkat se třemi druhy konstrukce. U dvou systémů vzniká pohyb díky rotaci matice, jenž inicializuje translační pohyb po nehybném šroubu. Tento druh pohonu může být jednostupňový či dvoustupňový. Třetí druh pohonu se vyznačuje tím, že poháněná matice je uložena v kloubové jednotce a při její rotaci dochází k axiálnímu posuvu šroubu.

Během transformace elektrického výkonu na mechanický pohyb se prvky ramen zahřívají, což způsobuje i jejich rozpínání. Největší odchylky vznikají v ose z. Pomocí vhodné senzorky a algoritmů v řídicím systému se však odchylky dají minimalizovat.



Obr. 2.2: Teleskopické rameno využívající pohonu kuličkovým šroubem [1].

Ramena s pevnou délkou jsou též někdy označována jako spojnice. V porovnání s rameny s proměnlivou délkou mají jednu podstatnou výhodu. Rozměry a materiál spojnic mohou být snadno přizpůsobeny daným požadavkům. Nejčastějším namáháním ramen s pevnou délkou u paralelních kinematik je tah a tlak. Proto je klíčová tuhost v ose z a odolnost vůči vzpěru.

U obou typů ramen je velmi důležité také dynamické chování. Vysokofrekvenční buzení může způsobit vlastní kmitání, které namáhá ramena ohybem. Z tohoto důvodu je důležité testovat u ramen dynamické přenosové vlastnosti. Pro oba typy vzpěr je též důležité vyšetřit vliv tepelných změn od špon a chladicí kapaliny. Klíčovými parametry při návrhu konstrukce ramen tedy jsou: **přesnost, rychlost, zrychlení, měřicí systém, kolizní stavy, pracovní prostor a zatížení.**

2.2 Hodnotící kritéria [1]

K analýze paralelních kinematik je nutné určit společné znaky jednotlivých konstrukcí, kterými lze paralelní mechanismy popsat. K hlavním charakteristickým znakům se řadí:

- stupně volnosti,
- počet a uspořádání kloubových bodů na bázi a platformě,
- druh, počet a pořadí kloubů ve vodícím řetězci,
- počet a uspořádání ramen,
- druh a umístění pohonu.

2.2.1 Stupně volnosti

Při vyšetřování pohyblivosti paralelních mechanismů patří mezi základní kroky určení celkového počtu stupňů volnosti (anglicky *degree of freedom* – DOF). K jednoznačnému určení polohy a orientace tělesa (u paralelních kinematik nejčastěji platformy) v prostoru je zapotřebí 6 stupňů volnosti. Tři určující polohu jsou translace podél os x, y, z a tři určující orientaci jsou rotace kolem os x, y, z. Pro přesný výpočet stupňů volnosti paralelního mechanismu se používá rozšířený Grüblerův vzorec popsany v rovnici (2.1).

$$F = \lambda \times (n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i - f_{id} + s \quad (2.1)$$

Kde:

- F počet stupňů volnosti mechanismu,
 λ počet stupňů volnosti pro jednoznačné určení polohy a orientace platformy (prostorový mechanismus $\lambda=6$, rovinný mechanismus $\lambda=3$),
 n počet členů mechanismu včetně rámu,

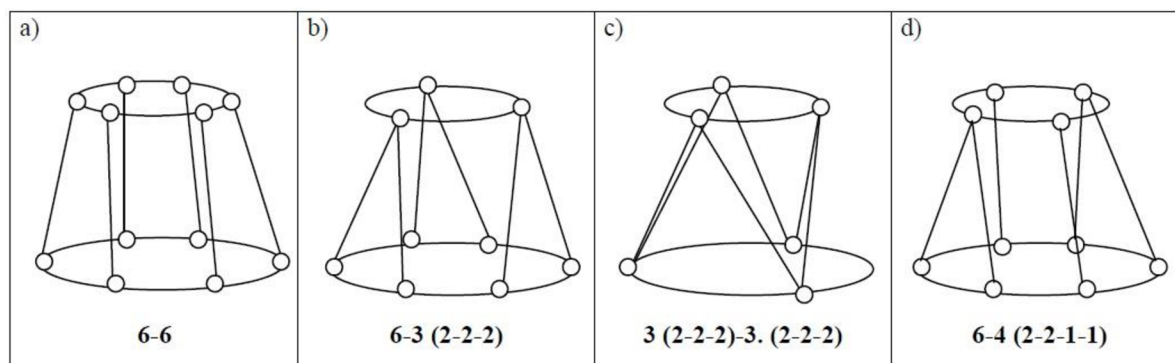
- g počet kloubů,
 f_i počet stupňů volnosti kloubu i ,
 f_{id} počet identických stupňů volnosti (identické stupně volnosti umožňují pohyb hnaného členu takovým způsobem, že tento pohyb nemá vliv na polohu či orientaci koncového efektoru, někdy je tento pohyb označován jako vlastní pohyb),
 s počet pasivních vazeb (pasivní vazby reprezentují zvláštní polohy os kloubů, zvláštní rozměry kloubů nebo nadbytečné podmínky tuhosti, proto se pasivní vazby někdy nazývají jako geometrické předpoklady, v případě, že by pasivní vazby v mechanismu chyběly, počet stupňů volnosti kinematiky by se zachoval, pouze by došlo ke změně tvaru pracovního prostoru nebo charakteristik pohybu).

2.2.2 Počet a uspořádání kloubových bodů na bázi a platformě

Veličiny počtu kloubových bodů na bázi m , počtu kloubových bodů na platformě n a počtu vodících řetězců spojující bázi s platformou l se řadí mezi další charakteristické rozlišovací znaky paralelních kinematik. Dle těchto veličin je možné rozlišovat tyto tři možnosti:

- $m=n=l$,
- $m=l$, ale $m>n$ nebo $n=l$ ale, $m<n$,
- $m=n$, ale $l>n$.

Případy, kdy je počet kloubových bodů různý od počtu ramen, nejsou příliš časté a většinou se jedná o experimentální konstrukce, konstrukce se speciálním využitím či konstrukce akademického charakteru. Když není počet kloubů stejný jako počet ramen, tak je to zpravidla způsobeno tím, že jsou dvě ramena spojena s bází nebo platformou pomocí jednoho kloubu. To má za následek zhoršení vlastností kloubu. K popisu uspořádání kloubových bodů slouží číselné značení znázorněné na obr. 2.3. První číslice udává počet kloubů na bázi (m) a druhá počet kloubů na platformě (n). Závorka za číslicí obsahuje počet ramen připojených do jednotlivých kloubů.



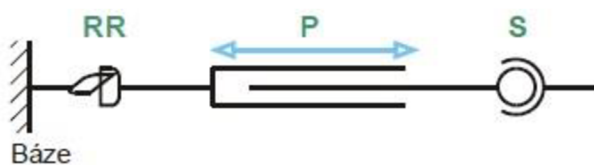
Obr. 2.3: Uspořádání kloubových bodů [1].

2.2.3 Druh, počet a pořadí kloubů ve vodícím řetězci

Oproti kritériu popsanému v podkapitole 2.2.2, které charakterizuje uspořádání vodících řetězců, kritérium hodnotící paralelní kinematiky podle druhu, počtu a pořadí kloubů přímo popisuje jejich konstrukci. Při konstruování paralelních mechanismů se využívá několik kinematických dvojic (zkratka KD), které lze značit následovně:

- P-prizmatická KD (představuje translační KD bez rotace kolem vlastní osy), 1 DOF,
- R-rotační KD, 1 DOF,
- S-sférická KD, 3 DOF,
- C-cylindrická KD, 2 DOF.

Lze se setkat i s označením U pro univerzální kloub. Ten je tvořen dvěma rotačními KD, jenž jsou pootočený o 90°. Z tohoto důvodu je přesnější označení RR. Kinematické řetězce paralelních kinematik se zpravidla skládají ze stejných vodících řetězců, různé uspořádání v jednotlivých vodících řetězcích nebývá obvyklé. Uspořádání a druh jednotlivých KD použitých v řetězci významně ovlivňuje vlastnosti mechanismu jako např. tuhost, velikost a tvar pracovního prostoru, pohyblivost. Značení KD vodícího řetězce probíhá ve směru od báze k platformě. Ty KD, jejichž pohyb je řízen, bývají podtrženy. Často bývá před toto značení přidána číslice, určující počet vodících řetězců s tímto uspořádáním. Na obr. 2.4 je znázorněno obvyklé uspořádání KD ve vodícím řetězci obecného hexapodu. Označení tohoto řetězce je RRPS.

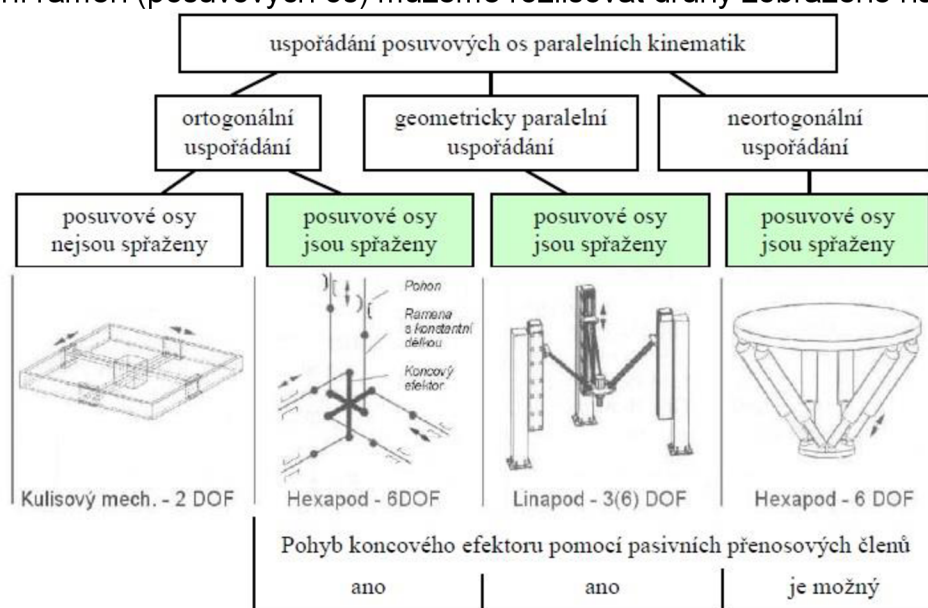


určující počet vodících řetězců s tímto uspořádáním. Na obr. 2.4 je znázorněno obvyklé uspořádání KD ve vodícím řetězci obecného hexapodu. Označení tohoto řetězce je RRPS.

Obr. 2.4: Uspořádání kloubů ve vodícím řetězci [1].

2.2.4 Počet a uspořádání ramen

Mezi hlavní předpoklady paralelních mechanismů patří existence dvou a více kinematických řetězců (ramen). V praxi se využívají paralelní mechanismy se 2 až 6 rameny. Značení paralelních mechanismů je často právě podle počtu ramen: bipod (2 ramena), tripod (3 ramena), tetrapod (4 ramena), pentapod (5 ramen), hexapod (6 ramen). Při hodnocení paralelních mechanismů z hlediska geometrického uspořádání ramen (posuvových os) můžeme rozlišovat druhy zobrazené na obr 2.5.

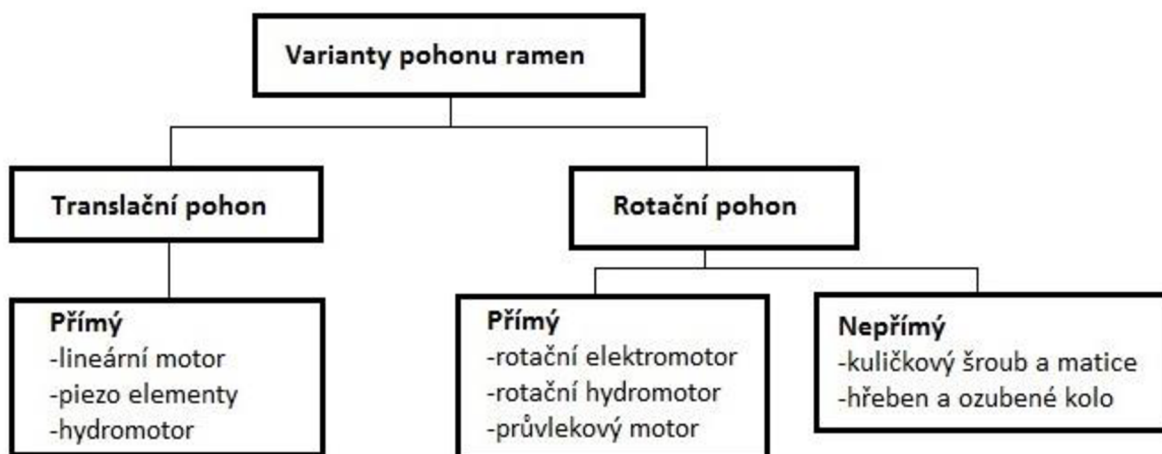


Obr. 2.5: Rozdělení paralelních mechanismů z hlediska uspořádání ramen [1].

Pro sféru průmyslových robotů a manipulátorů je nejpoužívanější geometricky paralelní a neortogonální uspořádání posuvových os.

2.2.5 Druh a umístění pohonu

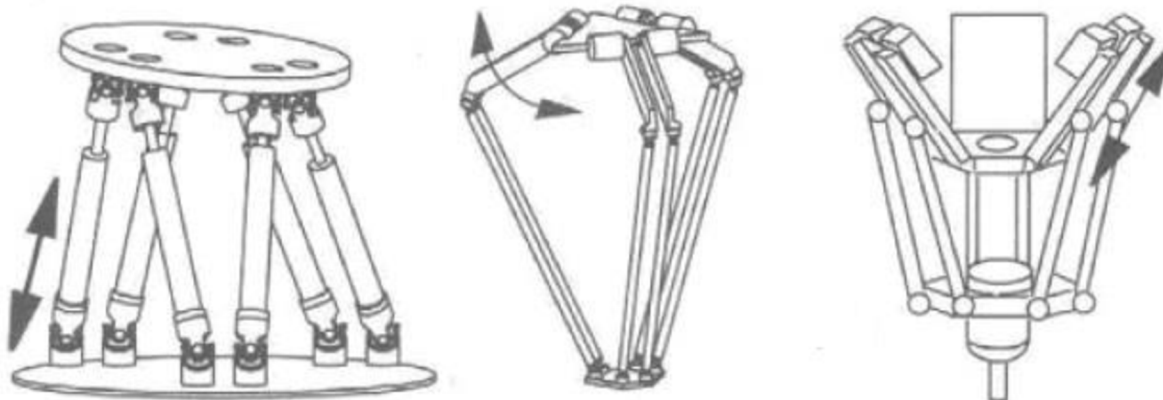
V každém vodícím řetězci se nachází tzv. akční člen. Akční člen představuje KD, která je poháněná a zajišťuje rotaci či vysunutí ramene. Díky zpětné vazbě je akční člen schopen řídit polohu, rychlost a zrychlení ramene. Označení servorameno nebo servovzpěra se používá, když je rameno a akční člen považováno za jeden konstrukční celek. Z hlediska druhu akčního členu lze servorameny rozdělit tak, jak je zobrazeno na obr. 2.6. Každý typ pohonu má svá specifika, proto je vhodný pro jiné aplikace.




Obr. 2.6: Rozdělení pohonů servoramen [1].

Po výběru typu pohonu je též důležité vzít v potaz i jeho umístění ve vodícím řetězci. U paralelních mechanismů má z praktického hlediska význam umístění pohonů na bázi nebo jejich integrace do ramen. Umístění na platformě je nevhodné, protože musí nést svoji vlastní hmotnost. V praktickém použití se nejvíce osvědčily tyto 3 varianty:

- pohyblivý lineární typ (obr. 2.7 vlevo),
- rotační typ (obr. 2.7 uprostřed),
- pevný lineární typ (obr. 2.7 vpravo).



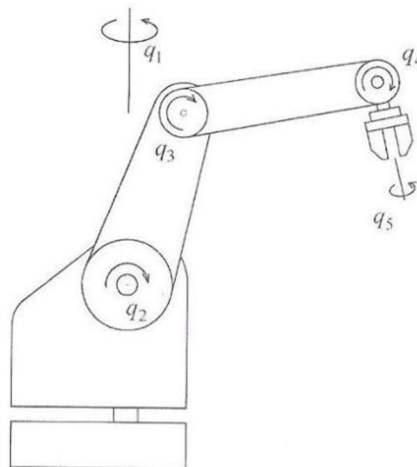
Obr. 2.7: Používané varianty umístění pohonů [1].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 27
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

2.3 Kinematika

K základům všech metod kinematické analýzy a syntézy patří popis pohybu bodu a tělesa bez ohledu na dynamické veličiny (silové či momentové působení). Obvyklý přístup je pomocí vektorů. Tento přístup má však nevýhodu v tom, že neumožňuje popis pohybu tělesa jedinou veličinou (symbolem). To ale umožňuje maticový a kvaternionový přístup. Nejvíce používaný je maticový přístup, díky své účinnosti a relativní jednoduchosti. [10]

Důležitou součástí analýzy robotů je tvorba úplného kinematického modelu daného mechanického systému. Model by měl poskytnout všechny potřebné kinematické veličiny jak pro dynamický model mechanického systému (silové působení, dimenzování, zatěžování článků), tak pro potřeby řízení (syntéza regulátorů polohy a rychlosti). Jedná se převážně o průběh polohy a orientace koncového pracovního bodu v čase a tomu odpovídající průběh polohy jednotlivých článků mechanického systému. Poloha článků je obecně definována tzv. zobecněnými souřadnicemi (v robotice je často využíván pojem kloubové proměnné – *joint variables*), jenž udávají natočení nebo posunutí jednotlivých os. Na obr. 2.8 je průmyslový robot s pěti stupni volnosti, jehož zobecněné souřadnice q_1 až q_5 definují natočení jednotlivých článků. [11]



Obr. 2.8: Kloubové proměnné sériového robotu [11].

V kinematice prostorových mechanismů lze řešit dva základní typy úloh:

- **přímá úloha kinematiky,**
- **inverzní úloha kinematiky.**

2.3.1 Přímá úloha kinematiky [11]

Jedná se o úlohu, ve které jsou známy jednotlivé zobecněné souřadnice, přičemž cílem je získat polohu a orientaci koncového bodu. Tento typ úlohy je snadno řešitelný pomocí goniometrických vztahů mezi danými články mechanismu nebo pomocí lokálních souřadných systémů článků a transformačními maticemi pro přepočítání souřadnic mezi nimi. Uvažujme tedy případ natočení lokálního souřadného systému (platformy) $x_0 \ y_0 \ z_0$ kolem osy x o úhel α a posunutí jeho počátku o vektor $\mathbf{p}^0 = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ vůči globálnímu souřadnému systému (báze). K přepočtu souřadnic obecného bodu $\mathbf{P} = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ z lokálního souřadného systému do globálního slouží **transformační rovnice** (obr. 2.9).

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & P_x \\ & \mathbf{R}_{x,\alpha} & & P_y \\ & & & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Obr. 2.9: Transformační rovnice [12].

V této rovnici a kinematice mechanismů obecně je často používáno homogenních souřadnic, které jsou čtyřrozměrné. První tři souřadnice jsou stejné jako ortogonální (třírozměrné) a čtvrtá souřadnice je zavedena z formálních důvodů. Pro souřadnice bodu je v posledním řádku 1 a pro souřadnice vektoru 0. Matice $\mathbf{R}_{x,\alpha}$ (obr. 2.10) je transformační matice rotace kolem osy x o úhel α . Obdobně můžeme vytvořit transformační matici pro rotaci kolem osy y o úhel φ (obr. 2.11) či rotaci kolem osy z o úhel ϑ (obr. 2.12). Při vícenásobném natočení kolem různých os se dané transformační matice násobí ve stejném pořadí jako se odehrávaly pohyby.

$$\mathbf{R}_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{z,\vartheta} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & -\sin\vartheta & 0 \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Obr. 2.10: Matice $\mathbf{R}_{x,\alpha}$ [12].

Obr. 2.11: Matice $\mathbf{R}_{y,\varphi}$ [12].

Obr. 2.12: Matice $\mathbf{R}_{z,\vartheta}$ [12].

Transformační rovnici lze zapsat také symbolicky:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{P})_b = \mathbf{A}_b^0 \cdot (\mathbf{P})_0 \quad (2.2)$$

Kde:

\mathbf{P} je matice souřadnic daného bodu vyjádřená v souřadnicích posunutého a natočeného lokálního souřadnicového systému,

$(\mathbf{P})_b$ je matice souřadnic bodu v globálním souřadnicovém systému,

\mathbf{A}_b^0 je transformační matice rotace i posuvu,

$(\mathbf{P})_0$ je matice původních souřadnic v lokálním souřadnicovém systému.

Tyto dva zápisy transformační rovnice (obr. 2.13 a rov. (2.2)) definují transformační vztah pro přepočítání posunutých a natočených lokálních souřadnic do globálních. Pomocí těchto vztahů lze sestavit transformační matici pro libovolně natočené a posunuté lokální souřadné systémy. Je-li systémů více, transformační matice vznikne vynásobením jednotlivých transformačních matic. Pořadí násobení matic musí opět odpovídat pořadí pohybů.

Souřadné systémy je možné do mechanismů umísťovat libovolně, třeba do středu kloubů nebo do těžišť ramen. Tvorba transformační matice pak ale nemusí být zcela jednoduchá. Při dodržení rozmístování souřadných systémů podle Denavit-Hartenbergova principu lze transformační matici tvořit automaticky. Při dodržení tohoto principu lze transformační matici dvou souřadných systémů získat pomocí sjednocení čtyř jednoduchých pohybů: rotace, translace, translace a zase rotace. Výsledná transformační matice těchto dvou souřadných systémů ($i, i-1$) vznikne opět vynásobením čtyř dílčích transformačních matic v takovém pořadí, jak byly prováděny pohyby. Výsledkem je transformační matice ve tvaru (rov. (2.3) nebo obr. 2.13).



$$A_{i-1}^i = A_{z_{i-1}, \vartheta_i} \cdot A_{z_{i-1}, d_i} \cdot A_{x_i, a_i} \cdot A_{x_i, \alpha_i} \quad (2.3)$$

Kde:

- A_{z_{i-1}, ϑ_i} je matice rotace kolem osy z_{i-1} o úhel ϑ_i ,
 A_{z_{i-1}, d_i} je matice posunutí ve směru osy z_{i-1} o vzdálenost d_i ,
 A_{x_i, a_i} je matice posunutí ve směru osy x_i o vzdálenost a_i ,
 A_{x_i, α_i} je matice rotace kolem osy x_i o úhel α_i .

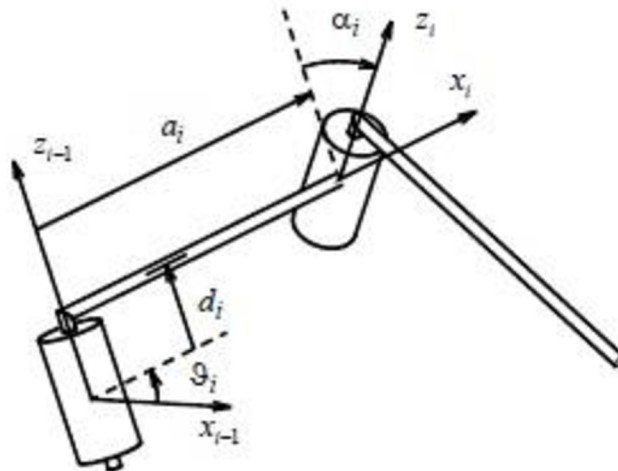
$$A_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_i & -\sin \vartheta_i \cos \alpha_i & \sin \vartheta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \vartheta_i \\ \sin \vartheta_i & \cos \vartheta_i \cos \alpha_i & -\cos \vartheta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \vartheta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Obr. 2.13: Transformační matice využívající Denavit-Hartenbergovi parametry [12].

Kde tzv. Denavit-Hartenbergovi parametry ϑ_i , d_i , a_i , α_i definují vztah mezi dvěma libovolně posunutými a natočenými souřadnými systémy:

- ϑ_i je úhel mezi osami x_{i-1} a x_i při otáčení kolem osy z_{i-1} ,
 d_i je nejkratší vzdálenost (normála) mezi x_{i-1} a x_i , její kladný směr je ve směru z_{i-1} ,
 a_i je nejkratší vzdálenost (normála) mezi z_{i-1} a z_i , její kladný směr je ve směru x_i ,
 α_i je úhel mezi osami z_{i-1} a z_i při otáčení kolem osy x_i .

Grafické znázornění parametrů lze vidět na obr. 2.14.



Obr. 2.14: Denavit-Hartenbergovi parametry mezi 2 souřadnicovými systémy [11].

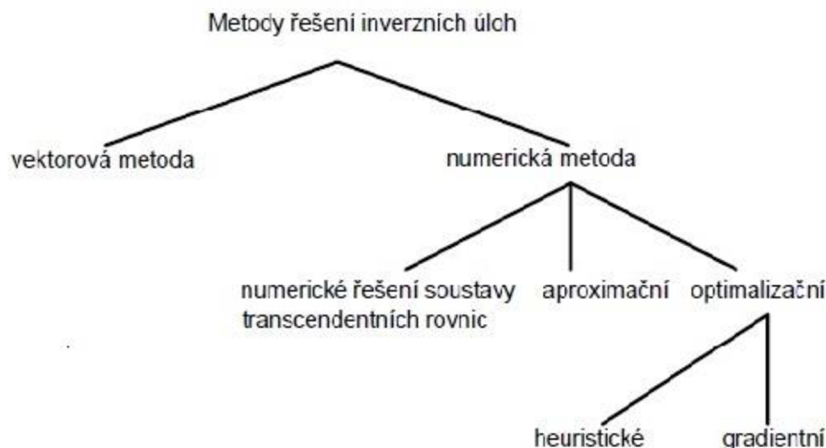
Denavit-Hartenbergův princip rozmístění souřadných systému je definován na obr. 2.15.

- Číslovat články od základu, první nepohyblivý článek má číslo 0, další pohyblivé články čísla 1..n. Vzestupná sekvence indexů je $b, 0, 1..n$
- Číslovat pohybové jednotky od základu, i -tá pohybová jednotka spojuje $i-1$ a i -tý článek
- Osa z_{i-1} je osou pohybu (otáčení) i -té pohybové jednotky, kladný směr os směřuje nejlépe do kladného kvadrantu základního souřadného systému
- Osa x_i je kolmá na osy z_{i-1} a z_i . Případy:
 - a) osy z_{i-1} a z_i jsou totožné - případ z_b a z_0 . V tomto případě je možné vést osu x_0 kolmo na obě totožné osy v libovolném místě a libovolným směrem, nejlépe je ale umístit počátek do určitého bodu na příslušném článku, v našem případě do koncového bodu 0-tého článku, směr nejlépe rovnoběžně s některou předchozí osou, nejlépe s x_b (zjednoduší se transformační matice)
 - b) osy z_{i-1} a z_i jsou mimoběžné – případ z_0 a z_1 , osa x_1 leží ve společné normále os z_{i-1} a z_i a její kladný směr je dán směrem od osy s nižším indexem (z_0) k ose s vyšším indexem (z_1) v pořadí indexů
 - c) osy z_{i-1} a z_i jsou různoběžné – případ z_1 a z_2 , osa x_2 vede kolmo na osy z_1 a z_2 a vychází z jejich průsečíku, kladný směr osy je dán požadavkem, aby při rotaci kolem osy x_2 přešla osa z s nižším indexem (z_1) na osu z s vyšším indexem (z_2) v kladném směru otáčení
- Osu z_n posledního souřadného systému vedeme z koncového bodu posledního článku nejlépe rovnoběžně s osou z předchozího souřadného systému nebo ji umístíme do některého význačného směru (např. rovnoběžně s technologickým přívodem do hlavice apod.).
- Osu x_n posledního souřadného systému vedeme z koncového bodu posledního článku vždy tak, aby protнула osu z předchozího souřadného systému. V řadě případů je nejlépe ji umístit do posledního článku. Její kladný směr je směrem do pracovního prostoru mechanismu

Obr. 2.15: Denavit-Hartenbergův princip rozmišťování souřadných systémů [11].

2.3.2 Inverzní úloha kinematiky [11], [13]

Úloha, kdy naopak známe polohu a orientaci koncového bodu a našim cílem je získat jednotlivé zobecněné souřadnice jednotlivých vazeb. Řešení této úlohy je složitější zejména pro kinematické struktury s více stupni volnosti. Metody používané pro řešení tohoto typu úloh jsou na obr. 2.16.



Obr. 2.16: Rozdělení metod pro řešení inverzních úloh kinematiky [11].

Z hlediska používání metod na různé kinematické struktury, jsou univerzálnější numerické metody. Ty lze bezproblémově použít u mechanismů se sériovou kinematickou strukturou. V úlohách, které obsahují mechanismy s jednoduchou smyčkou se dají tyto metody většinou použít po menších úpravách či přímo.

Při řešení inverzních úloh mohou nastat jisté problémy, které jsou způsobeny:

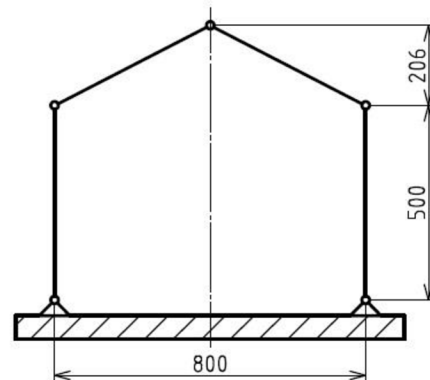
- Omezeným pracovním prostorem,
- Dvoznačností řešení,
- Mechanismus je redundantní (vektor zobecněných souřadnic ve vazbách je delší než počet hledaných souřadnic – v prostoru maximálně 6),
- Singulární polohou mechanismu (v pracovním prostoru mechanismu se nachází oblast, ve které nejde jednoznačně určit některá zobecněná souřadnice).

2.3.3 Tvorba kinematického modelu robotu DexTAR [13]

Pro tvorbu kinematických a dynamických modelů se v dnešní době nejčastěji používá počítačový software. Světově nejpoužívanější a nejznámější je ADAMS, dalším velmi používaným je MATLAB/SimMechanics, se kterým mají možnost studenti FSI pracovat v rámci vyučování kinematiky. Jako objekt modelování byl vybrán paralelní robot DexTAR (obr. 2.17), jedná se v podstatě o pětikloubový mechanismus, který vznikl spojením dvou ramen sériových robotů SCARA, jeho kinematický model je na obr. 2.18.

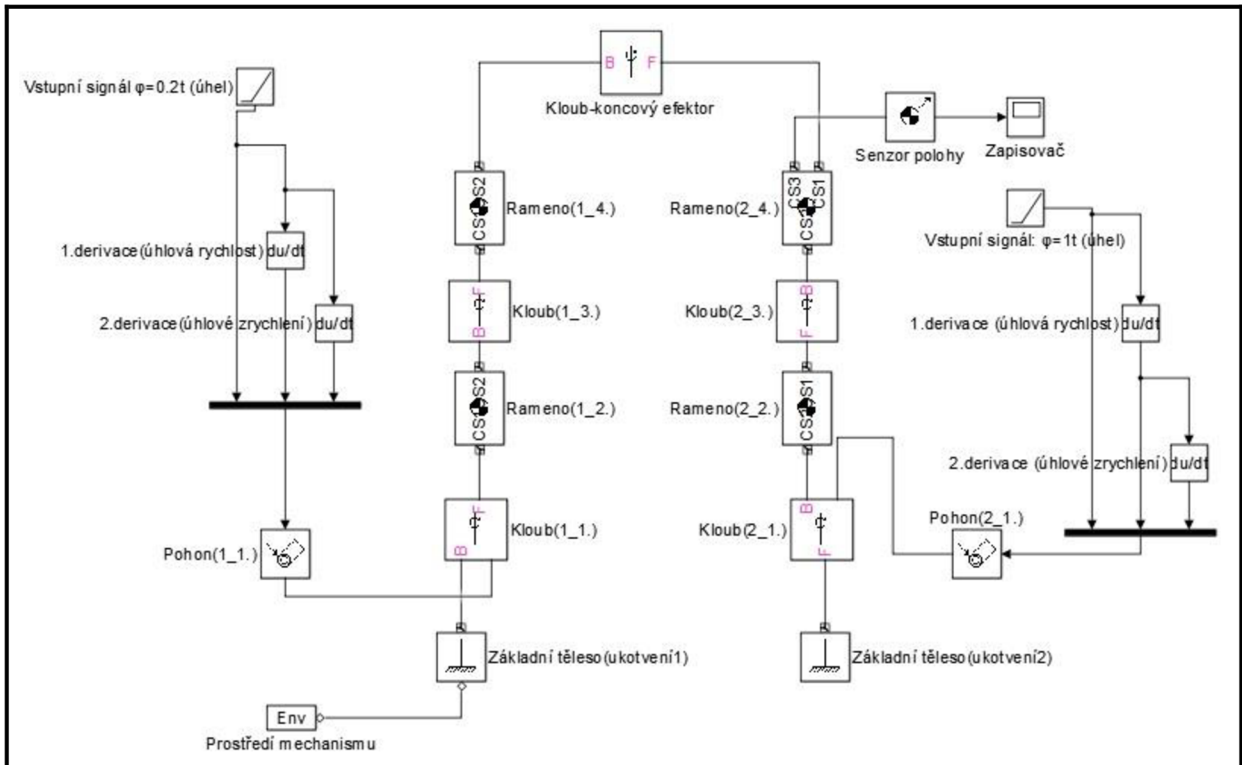


Obr. 2.17: Paralelní SCARA robot [5].

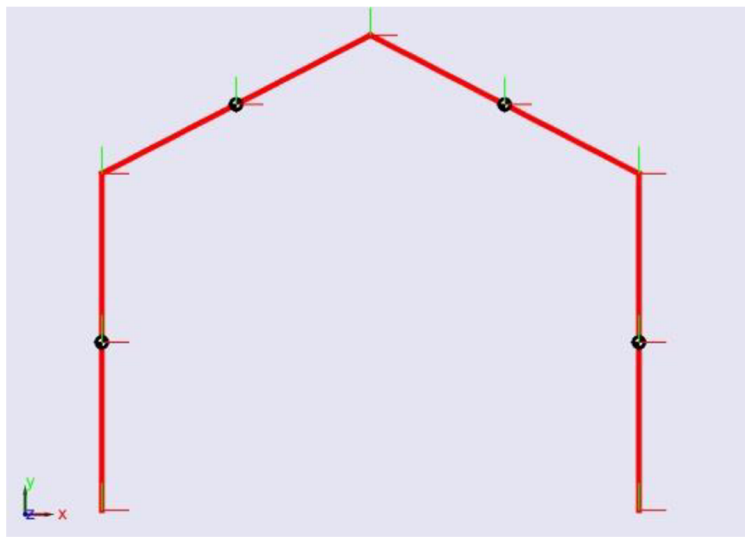


Obr. 2.18: Kinematický model paralelního robotu DexTAR.

Modelování složité prostorové kinematické struktury a následné řešení kinematické problematiky by přesáhlo rámec bakalářské práce. I proto padla volba právě na tuto kinematickou strukturu, jenž lze zjednodušit na rovinný případ. Cílem modelování a simulování bylo získat průběh souřadnic koncového efektoru po dobu 10 sekund při zadání funkce popisující úhlovou výchylku pohonů v závislosti na čase.

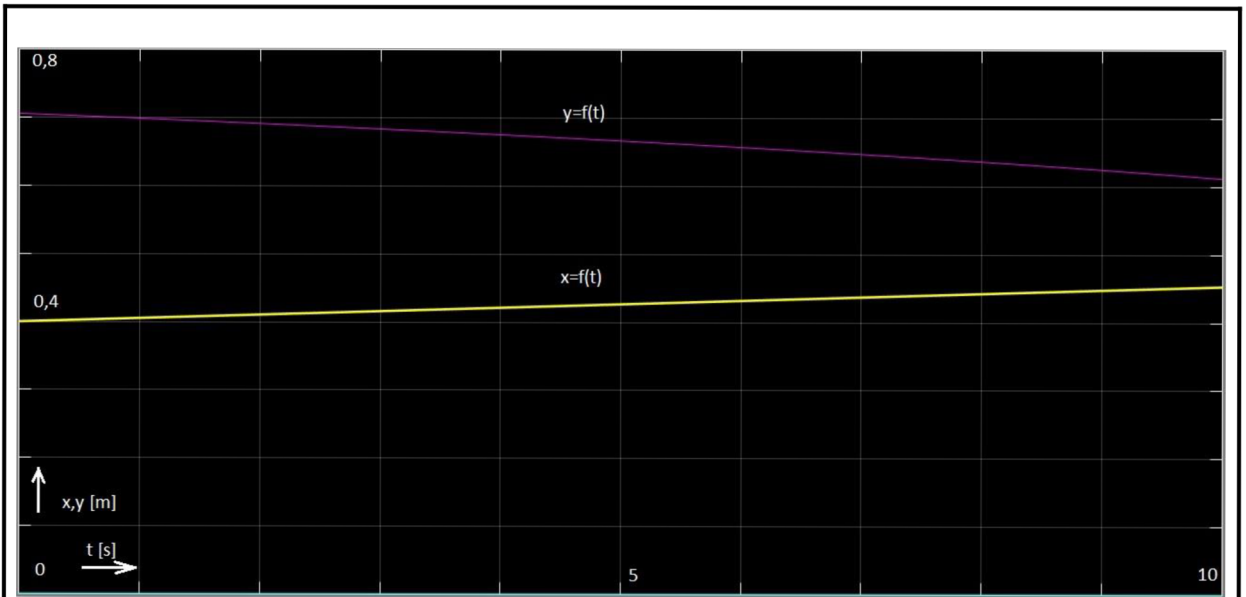


Obr. 2.19: Model robotu DexTAR v programu MATLAB/SimMechanics.



Obr. 2.20: Vizualizace modelu v SimMechanics.

Při tvorbě modelu byl definován počátek globálního souřadného systému k levému rotačnímu pohonu. Další části mechanismu se nacházejí pouze v rovině xy a jejich poloha byla určena pomocí lokálních souřadnicových systémů umístěných v rotačních vazbách mezi jednotlivými rameny. Buzení úhlové výchylky je pro jednoduchost zvoleno v levém pohonu $\varphi=0,2t$ a v pravém $\vartheta=t$. První a druhá derivace funkce podle času nám říká, že rotační pohony mají konstantní úhlovou rychlost a nulové úhlové zrychlení, což lze ověřit vizuálně v animaci pohybu. Průběh polohy koncového efektoru zapíše snímač umístěný na konci ramene 2_4., což je teoretický shodný bod s koncovým efektoem.



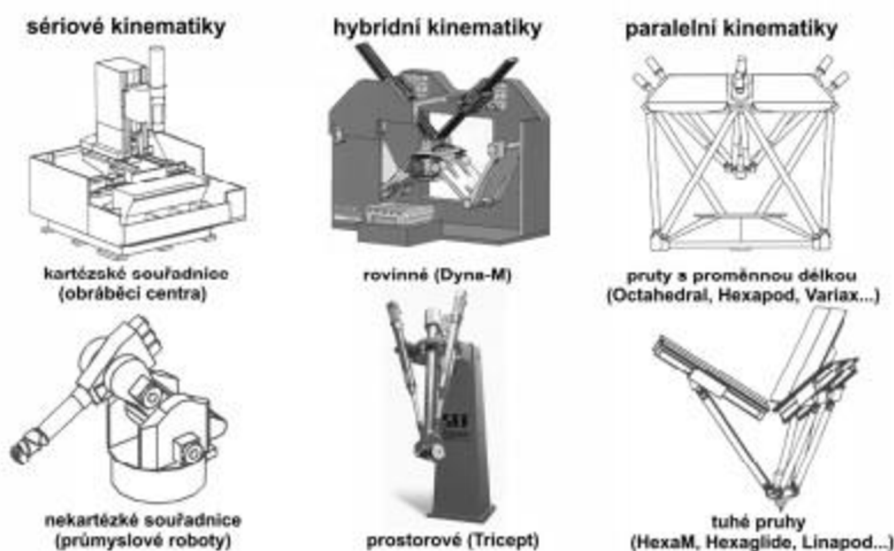
Obr. 2.21: Průběh souřadnic x, y a koncového efektoru v závislosti na čase t .

3. Druhy kinematických struktur u průmyslových robotů [14]

Při výběru robota patří mezi nejdůležitější kritéria tvar a velikost jeho pracovního prostoru. Pracovní prostor je daný kinematickou strukturou daného robota. Dle kinematické struktury můžeme roboty rozdělit do tří velkých skupin:

- sériové,
- paralelní,
- hybridní (smíšené).

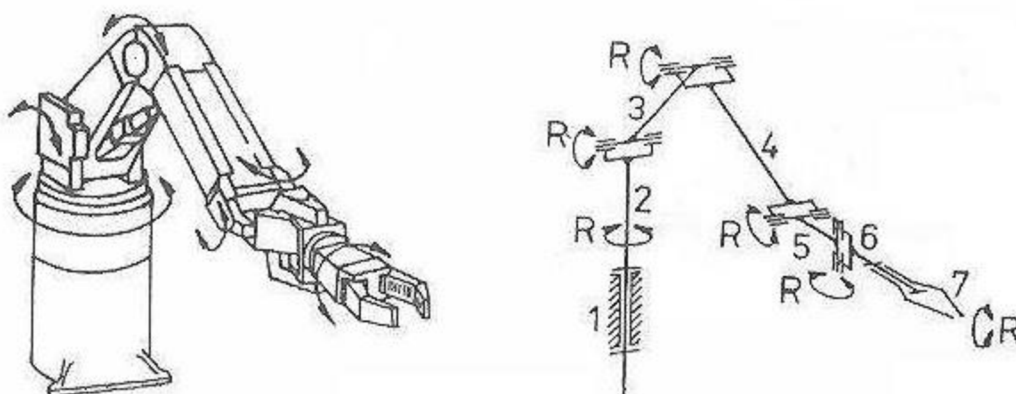
Nejvíce používanou kinematickou strukturou robotů v dnešní době je právě sériová, roboty s paralelní či hybridní kinematickou strukturou se využívají hlavně při tzv. *pick and place* operacích nebo ve speciálních případech.




Obr. 3.1: Dělení robotů dle kinematiky [14].

3.1 Sériové kinematické struktury [1]

Konstrukce sériových kinematik se vyznačuje postupným uspořádáním kinematických dvojic do otevřeného kinematického řetězce. Výsledný pohyb je složen z několika na sebe navazujících pohybů, zpravidla translací a rotací. Nosné soustavy sériových kinematik musí dosahovat značně vysoké tuhosti a to z důvodu, že osa na počátku kinematického řetězce musí unášet všechny ostatní.



Obr. 3.2: Příklad sériového robota (vlevo) a jeho kinematického řetězce (vpravo) [1].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 35
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Při návrhu jednotlivých členů mechanismu musí být brán v potaz fakt, že nosné díly jsou namáhány převážně na ohyb a krut. To způsobuje, že celá konstrukce nabývá na hmotnosti a tím se snižuje tuhost koncového členu (vřeteno nebo stůl).

Vývoj a výzkum sériových kinematik tvající několik desetiletí vyprodukoval roboty, jejichž výkonové parametry se blíží hranici možností těchto zařízení. K těmto hranicím se sériové kinematiky blíží díky následujícím aspektům, jejichž vliv může být snižován, ale nemůže být zcela odstraněn:

- ohybové zatížení,
- velké pohybující se hmoty,
- omezená dynamika os,
- sčítání chyb v jednotlivých osách,
- vysoké požadavky na přesnost,
- nízký počet opakujících se stavebních dílů.

3.2 Paralelní kinematické struktury

Obecný pojem paralelní kinematika byl vymezen v podkapitole 1.1. V následujícím odstavci budou popsány paralelní mechanismy využívané v oblasti výrobních strojů, průmyslových robotů a manipulátorů.


Definice obecné paralelní kinematiky je velmi otevřená, proto do ní lze zahrnout například i redundantní mechanismy (mechanismy, ve kterých je počet akčních členů větší než počet ovládaných stupňů volnosti koncového efektoru). Z tohoto důvodu byly určeny vlastnosti, jaké mechanismus musí mít, aby byl v oblasti výrobních strojů, průmyslových robotů a manipulátorů označen jako paralelní kinematika. Tyto charakteristiky jsou:

- mechanismus je tvořen bází, platformou a vodícími řetězci,
- platforma je podpírána alespoň dvěma vodícími řetězci a každý tento řetězec obsahuje alespoň jednoduchý akční člen (umožňující pohyb s 1 DOF),
- počet akčních členů je shodný jako počet stupňů volnosti koncového efektoru,
- pohyblivost mechanismu je nulová, když jsou akční členy zablokovány proti pohybu.

Z hlediska počtu nezávislých vodících řetězců v paralelním mechanismu lze rozlišovat:

- **plně paralelní mechanismus** - paralelní mechanismus, jehož koncový efektor má n DOF a k základně je připojen n nezávislými vodícími řetězci, z nichž každý má jeden jednoduchý akční člen,
- **hybridní paralelní mechanismus** - paralelní mechanismus, jehož koncový efektor má n DOF a k základně je připojen m ($m < n$) samostatnými vodícími řetězci, z nichž každý má jeden nebo více jednoduchých akčních členů.

Uspořádání kinematických řetězců paralelních kinematik je narozdíl od sériových kinematik rozmanitější. Mezi typické konstrukce s paralelní kinematikou se řadí hexapod a delta struktury. Společným znakem paralelních kinematik je, že prostorová úhlová poloha ramen je ovlivňována pohybem každého z nich. Stroj s paralelní kinematickou strukturou je tedy charakterizován jako nelineární prostorový systém nerespektující princip superpozice dílčích pohybů.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 36
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Stejně jako u vývoje sériových mechanismů i u konstruování paralelních struktur narážíme na problémy, které je třeba řešit a snižovat jejich vliv na minimum. Jde zejména o:

- Tření - Třením v kulových kloubech vzniká axiální vychýlení ramen, což snižuje přesnost polohování a opakovatelnou přesnost. Při použití keramického nátěru a speciálního lubrikantu lze koeficient tření snížit z 0,8 na 0,2.
- Délky ramen – Dlouhá ramena s malým průměrem jsou v důsledku tahového a tlakového zatížení náchylná k rozměrové nestálosti a tím je opět snížena přesnost stroje. S délkou ramene roste i náchylnost k porušení vzpěrné stability.
- Tepelné dilatace – Se zvyšující se rychlostí vřeten výrazně roste dynamický tepelný přírůstek, což ovlivňuje hlavně dlouhá ramena. Prostředkem k řešení tohoto problému je monitorování ramen v reálném čase a automatická kompenzace chyb.
- Kalibrace – Přesnost paralelních kinematik není určena pouze přesným řízením délky ramen, ale i velkým množstvím dalších geometrických charakteristik. Parametry k popsání celé konstrukce je velmi obtížné sjednotit a proto kalibrace zůstává otevřeným problémem.

3.3 Porovnání SKS, PKS

Konstrukce paralelních mechanismů mají své výhody, díky kterým jsou pro některé aplikace vhodnější než struktury sériové. Těchto výhod je využíváno zejména u manipulátorů, kde mají paralelní kinematiky dominantní postavení. Vedle výhod mají paralelní mechanismy i své nevýhody, které jsou stále předmětem výzkumu. V tabulce 1.1 jsou obě kinematické struktury porovnané z několika hledisek.



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

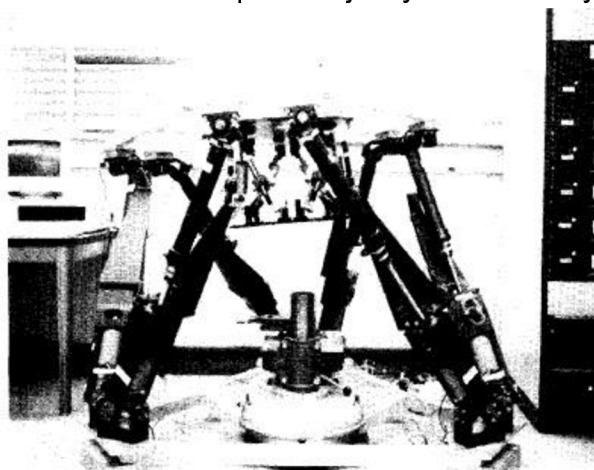
Vlastnost	PARALELNÍ kinematický mechanismus	SÉRIOVÝ kinematický mechanismus
Tuhost	Vysoká (v osách jen tak a tlak)	Nízká (osy namáhány ohybem)
Šíření chyb	Chyby jednotlivých os tvoří průměrnou chybu	Chyby jednotlivých os se sčítají
Hmotnost pohybujících se částí	Nízká (pohybuje se pouze vřeteno a ramena)	Vysoká (první osa unáší všechny další osy)
Dynamika x velikost stroje	Vysoká, dokonce i u velkých strojů	S rostoucí velikostí se zhoršuje
Rychlost a zrychlení	Vysoké	Nižší
Vazba mezi osami	Spojené osy s nelineární vazbou	Malé vazby
Řízení (regulace)	Jednoduché (regulace jednotlivých os)	Komplikované (řízení celku)
Kalibrace	Komplikovaná (málo prozkoumáno)	Vcelku jednoduchá
Kinematika	Inverzní kinematika (transformace souřadnic nutná)	Přímá kinematika (jednoduchá, do 3 os není nutná transformace)
Výroba a montáž	Jednoduchá	Poměrně složitá
Flexibilita	Vysoká	Poměrně malá
Poměr - pracovní prostor/velikost stroje	Poměrně nízký	Relativně vysoký

Tabulka 1.1: Porovnání sériových a paralelních mechanismů [1].

4. Roboty s PKS v praxi

4.1 Roboty s PKS a jejich uplatnění pro vesmírné aktivity [2], [15]

Roboty používané v tomto spektru lze ještě rozdělit do dvou skupin: pozemní zařízení konstruovaná pro simulaci stavu beztláče a přímo oběžná zařízení. Do první skupiny lze zařadit simulátor pro testování dokovací stanice pro vesmírnou stanici Columbus. Manipulátor je vybaven silovými senzory, informace o silách pak slouží



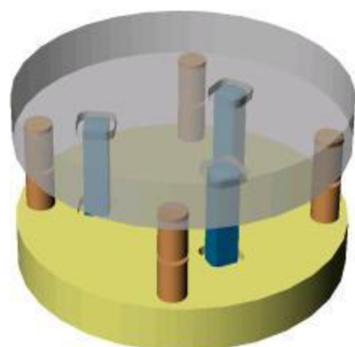
k vytvoření dynamického modelu stanice, který je při testování vystavován daným silovým účinkům. Dalším zajímavým prototypem je robot CKCM (obr. 4.1), studovaný pro NASA *Goddard Space Flight Center* C. C. Nguyenem a jeho spolupracovníky. Jedná se o robotické zápěstí se 6 stupni volnosti, které bylo vytvořeno pro studování robotizované montáže ve vesmíru. Dále pak M. K. Idle popsal závěsný systém pro stav beztláče určený k testování antivibračních soustav.

Obr. 4.1: CKCM robot [2].

Požadavek astronomů vedl k vyvinutí speciálních hexapodů pro polohování zrcadel teleskopů. Mezi důležité vlastnosti, které tyto hexapody měly mít patří: vysoká přesnost, minimální vůle a velmi tuhá konstrukce. Proto byly vybaveny U-klouby (které mimo jiné velmi redukuje tření) a podpěrami s proměnlivou délkou. Tyto hexapody sestavila firma Physik Instrumente (PI) pro teleskopy NASA - IRTF (*Infrared Telescope Facility*) a UKIRT (*the United Kingdom Infra-Red Telescope*) (obr. 4.2) umístěné na havajských ostrovech.



Obr. 4.2: Hexapod pro teleskop UKIRT [15].



Obr. 4.3: Tripod s piezo pohonem [15].

Další zajímavou konstrukcí firmy Physik Instrumente je vysokorychlostní tripod s piezo-poháněnými zrcadly, který slouží k stabilizaci obrazu teleskopů (obr. 4.3). Konstrukce tripodu se skládá z báze, platformy, 3 pohonů a 4 senzorů, což jí dává 3 stupně volnosti.



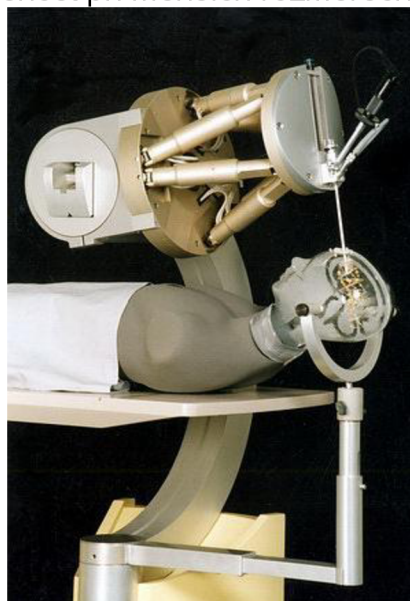
4.2 Roboty s PKS ve zdravotnictví [2], [16]

Roboty s paralelní kinematickou strukturou si hlavně díky přesnosti polohování našly své místo v oboru zdravotnictví. Od roku 1993 firma ISIC (*Intelligent Surgical Instruments & Systems*) vyvíjí a zdokonaluje svůj Delta robot *SurgiScope®* (obr. 4.4), sloužící k přesné manipulaci s těžkým mikroskopem. V případě, že je robot doplněn o kit zajišťující uchopení nástrojů, může zajistit velmi přesné polohování bioptických jehel a endoskopických pomůcek.




Obr. 4.4: Delta robot *SurgiScope®* v akci [17].

Fraunhoferův Institut ve Stuttgartu vyvinul robotického asistenta (obr. 4.5), který pomáhá chirurgům provádět zákroky s mikrometrovou přesností. Základ je tvořen hexapodem, který oproti ostatním víceosým polohovacím robotům nabízí vyšší tuhost, větší únosnost a přesnost při menších rozměrech.



Obr. 4.5: Robotický asistent jehož základ tvoří hexapod [18].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 40
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

4.3 Roboty s PKS v průmyslu [19]

Průmyslová sféra je pravděpodobně tou nejdůležitější z hlediska využívání paralelních kinematických struktur. Samozřejmě, že paralelní struktury nevytlačily sériové z trhu průmyslových robotů, ale díky svým výhodám jako je hlavně tuhost a velmi dobrá dynamika si našly své uplatnění. Velké množství variant konstrukcí paralelních struktur nabízí i široké spektrum užití. Hezi hlavní oblasti používání paralelních kinematik patří obrábění a manipulační operace (tzv. „*pick and place*“).

Pravěpodobně nejpoužívanější paralelní strukturou pro průmyslové aplikace se stal Delta robot. Tento typ robotů je vhodný pro manipulační a montážní operace nebo balení výrobků. Nejrychlejší Delta robot Adept řady Quattro: ePLC650H/HS (obr. 4.6) od firmy Adept dokáže 240 cyklů za minutu. K největším výrobcům Delta robotů v současné době dále patří firma ABB s řadou IRB 360 Flexpicker a firma Fanuc s modelovými sériemi M-1, M-2. Manipulační Delta roboty těchto sérií pro vysokorychlostní operace mají užitečné zatížení až do cca. 3 kg, pro standartní operace se hodnota zvyšuje až na 8 kg. Dosah těchto robotů (při použití standartních chapadel) je až 1600 mm. Nižší užitečné zatížení bývá zpravidla kompenzováno flexibilitou, dosahem nebo cenou.



Obr. 4.6: Adept Quattro ePLC650H/HS [20].

Jako další paralelní kinematickou strukturu používanou v průmyslu lze uvést Deltapod FlexPLP (*Flexible Principle Locator Points*) (Obr. 4.7) firmy ABB vyvinutý pro automobilový průmysl k manipulaci s těžkými rámy aut. Konstrukce Deltapodu představuje kombinaci známého Delta robotu s hexapodem. Skládá se ze tří paralelně řazených párů válcových ramen s proměnlivou délkou, báze a platformy. Tato konstrukce dává mechanismu únosnost 4× překračující jeho hmotnost.




Obr. 4.7: Deltapod FlexPLP firmy ABB [19].

Výrobou jiné paralelní struktury oplývající vysokou tuhostí se zabývá španělská firma PKMtricept. Jak je již z názvu firmy zřejmé, struktura se jmenuje Tricept (Obr. 4.8). První částí Triceptu je tripod skládající se ze tří paralelně uspořádaných ramen s proměnlivou délkou ramen, která dávají mechanismu 3 stupně volnosti. Další částí je zápěstí s rotační hlavou umístěné do středu rámu tripodu, které přidává další 2 (u některých typů 3) stupně volnosti. Tricept jich má tedy celkem 5 (nebo 6). Při zatížení jsou ramena tripodu namáhána pouze na tah-tlak a zápěstí ve středu mechanismu na krut. Výhodou této konstrukce je velmi velká tuhost v ose z (osa středového zápěstí), čehož je využíváno u montážních úkonů s velkými přítláčnými silami. Dále se Tricepty používají při frézování, vrtání, svařování a řezání vodním paprskem nebo laserem.

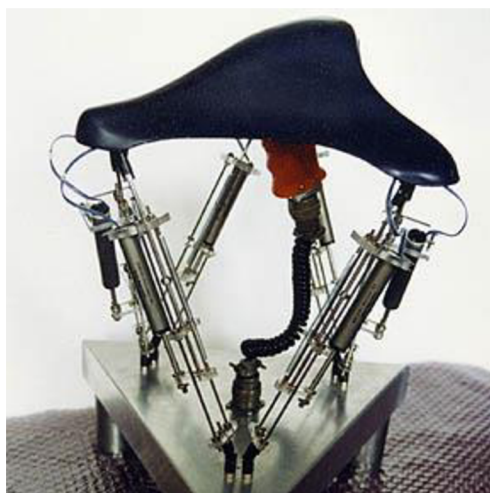


Obr. 4.8: Tricept T606 se 6 stupni volnosti [21].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 42
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

4.4 Joysticky [2]

Další zajímavé uplatnění si paralelní struktury našly při výrobě joysticků a ručních ovladačů. Jako příklad lze uvést ruční ovladač vyvinutý na McGillově Univerzitě (obr. 4.6).



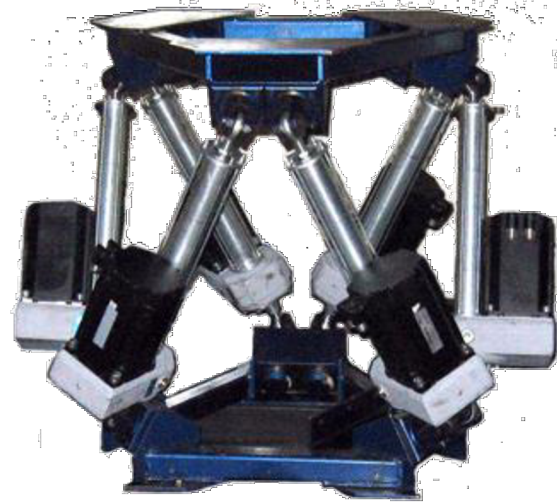
Obr. 4.9: Ruční ovladač sestavený na McGillově univerzitě [22].

4.5 Simulátory [2], [23], [24]

V dnešní době hrají paralelní kinematické struktury významnou roli při výrobě simulátorů. Na trh dodává simulátory velké množství firem, mezi největší patří: CAE, Frasca, Thomson a v České republice firma Pragolet. Simulátory jsou vyráběny pro civilní sféru od zábavní techniky přes automobilový až po letecký průmysl. Pro armádní účely jsou vyvíjeny tankové a letecké simulátory. Poslední sférou výroby simulátorů je kosmonautika. Na obr. 4.7 je automobilový simulátor firmy Mercedes-Benz, jehož základ tvoří hexapod. Řídící systém simulátoru vyhodnocuje jeho chování tisíckrát za sekundu a je tak schopen velmi přesně napodobit reakce na brždění, zrychlování atd. Česká firma Pragolet nejvíce využívá plošin se šesti stupni volnosti, které dokáží velmi dobře reprodukovat pohybové vjemy. Nejmodernější plošina Pragoletu (obr. 4.8) má 6 stupňů volnosti, k jejíž pohybu slouží synchronní servo-pohon s permanentními magnety. Výhodou je možnost rekuperace elektrické energie mezi jednotlivými osami mechanismu. Lineární aktuátor pracuje na bázi převodu z rotačního pohybu na posuvný pomocí kuličkového šroubu, který vyniká vysokou účinností, tuhostí a hlavně přesností.



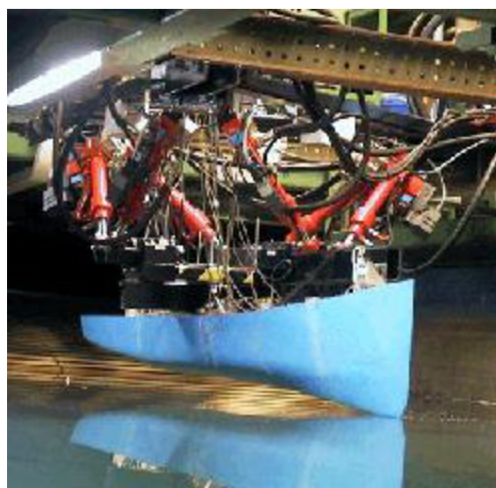
Obr. 4.10: Automobilový simulátor firmy Mercedes-Benz [23].




Obr. 4.11: Simulační plošina firmy Pragolet [24].

4.6 Speciální aplikace [2], [25]

Pro velmi zajímavé aplikace vyrábí své hexapody švýcarská firma Oelhydraulik Hagenguch AG. Jejich zařízení Hexamove (obr. 4.9) slouží mimo jiné také k testování výrobků na vibrační zátěž a testování trupů lodí v proudových kanálech. Výhoda těchto zařízení při vibračních testech spočívá v jejich přesnosti a tuhosti, tudíž je možné napodobovat velmi jemné vibrace ve všech osách. Používání Hexamove při testech lodních trupů má zase výhodu v tom, že místo vytváření vln v testovacím kanálu pohybuje a naklání s trupem hexapod, který dokáže ještě zjišťovat reakční síly, jenž působí na trup lodí.




Obr. 4.12: Hexapod Hexamove testující trup lodí [25].

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 44
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

V této kapitole by určitě mělo být zmíněno polohovací zařízení Evropského centra pro synchrotronové záření (ESRF). ESRF synchrotron je určen k produkci paprsků pásma X, které mají velmi jemně upravovanou frekvenci a jsou přiváděny do experimentálních komor. Orientaci těchto paprsků zajišťuje speciální optické zařízení, které musí být extrémně přesné. K tomu je zapotřebí zařízení se šesti stupni volnosti, nosností mezi 500 až 1000 kg a přesností polohování menší jak 1 μm . Proto zde využívají více jak 40 paralelních robotů.


Jiné zajímavé aplikace robotů s paralelní kinematickou strukturou jsou například: žvýkácký simulátor navrženy H. Takonobem nebo nabíječ munice od M.D. Bryfogleho.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 45
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

5. Předpokládaný vývoj

Během asi třicetiletého vývoje prodělali moderní roboty s paralelní kinematickou strukturou značný počet změn, jež vedly ke všeobecnému zlepšení jejich vlastností. V oblasti průmyslových robotů a manipulátorů se paralelním strukturám podařilo v několika směrech předčit ty sériové, ne však je úplně vytlačit z jejich dominantního postavení na trhu. Cestou k efektivnímu používání paralelních kinematik je důkladné zvážení všech technických a ekonomických hledisek v porovnání s kinematikami sériovými. Dá se předpokládat, že výhod sériových i paralelních kinematik dokáží využít kinematiky hybridní, které mohou být vhodnou volbou pro mnoho aplikací. Dalším směrem vývoje mohou být redundantní paralelní kinematické struktury. Ty dosahují při vhodném užití větších pracovních prostorů, menšího počtu singulárních poloh a vyšších výkonů. Dále lze pak očekávat vývoj vedený ke zlepšování vlastností hlavních komponent paralelních kinematik, jako jsou klouby a ramena.


Vývoj nových paralelních kinematik v oblasti průmyslových robotů a manipulátorů spíše stagnuje, což můžeme usoudit z toho, že v současné době nejsou na trhu představovány žádné novinky. Výzkum v dosud neprobádaných oblastech však mohou podpořit projekty jako MACH 21 Evropské unie podporující vývoj paralelních kinematik pro průmysl. Do projektu se zapojilo 10 evropských institucí z 5 různých zemí.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 46
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Závěr


Tato bakalářská práce byla vypracována za účelem vytvoření rešeršní publikace pojednávající o paralelních kinematických strukturách průmyslových robotů. Hlavním cílem práce je vytvoření uceleného pohledu na tento nový typ robotických struktur.

Úvodní kapitola práce definuje základní pojmy používané v robotice a seznamuje čtenáře s historickým vývojem paralelních mechanismů. Druhá kapitola se zabývá popisem hlavních komponent používaných v konstrukcích robotů s paralelní kinematickou strukturou. Dále uvádí kritéria, podle kterých lze paralelní struktury hodnotit. Součástí této kapitoly je i detailnější pohled na kinematiku těchto struktur a autorem vypracovaný kinematický model paralelního SCARA robotu vytvořený v programu MATLAB/SimMechanics. Tvorba kinematického modelu by mohla tvořit námět další závěrečné práce. Následující kapitola uvádí základní dělení a popis jednotlivých kinematických struktur používaných ve sféře robotů a manipulátorů. Současně zde dochází i k porovnání paralelních a sériových kinematických struktur a též k uvedení jejich výhod a nevýhod. Čtvrtá kapitola zachycuje využití paralelních kinematických struktur v praxi. V poslední kapitole je pozornost věnována budoucímu vývoji paralelních mechanismů a směru, jakým by se mohly ubírat. Rozebráno je zde i hledisko efektivního používání těchto struktur a aktuální zájem firem o jejich vývoj.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 47
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Seznam použitých zdrojů

- [1] KNOFLÍČEK, Radek, PLŠEK, Ladislav. Paralelní kinematické struktury výrobních strojů a průmyslových robotů. VUT (Brno), 2006. 43 s. Přednáška Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [2] MERLET, Jean-Pierre. Parallel robots. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, xiv, 355 p. ISBN 07-923-6308-6.
- [3] PLŠEK, Ladislav a Radek KNOFLÍČEK. Historie hexapodů.... MM Průmyslové spektrum. 2003, roč. 03, č. 5, s. 12, ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/historie-hexapodu.html>
- [4] BONEV, Ilian. The True Origins of Parallel Robots. Parallemic [online]. 2003 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>
- [5] What is a parallel robot?. Mecademic [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.mecademic.com/What-is-a-parallel-robot.html>
- [6] SULITEANU, Menahem a William R. LA VALLEY. Antenna support. Dostupné z: <http://www.mecademic.com/references/US3229941.pdf>
- [7] PETERSON, Everett R. Movable nad rotatable top. Dostupné z: <http://www.mecademic.com/references/US3288421.pdf>
- [8] CAPPEL, Klaus L. Motion simulator. Dostupné z: <http://www.mecademic.com/references/US3295224.pdf>
- [9] HANÁČEK, Luděk. Komponenty pro paralelní kinematické struktury. MM Průmyslové spektrum. 2002, roč. 02, č. 4, s. 24, ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/komponenty-pro-paralelni-kinematicke-struktury.html>
- [10] Valášek M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT Praha, 1996, ISBN 80-01-01276-X
- [11] Skařupa J., Mostýn V.: Teorie průmyslových robotů, VIENALA Košuce, 2001, ISBN 80-88922-35-6
- [12] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R [cit. 2015-05-02]. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [13] GREPL, Robert. 2007. Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 151 s. ISBN 978-80-7300-226-8.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 48
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	


- [14] MRÁZ, Petr. *Průmyslové roboty v praxi*. ČVUT (Praha), 2008. 14 s. Referát. České vysoké učení technické Praha, Fakulta strojní, Ústav konstruování a částí strojů. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Aplikace_Robotu.pdf
- [15] Low-Inertia Parallel-Kinematics Systems for Submicron Alignment and Handling. VORNDRAN, Stefan. ParalleMIC [online]. 2002 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review012.html>
- [16] Surgiscope solution. In: Intelligent Surgical Instruments & Systems [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.isis-robotics.com/en/surgiscope-solution.html>
- [17] BONEV, Ilian. Delta Parallel Robot — the Story of Success. ParalleMIC [online]. 2001 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>
- [18] Hexapod for Spine Surgery. Physik Instrumente [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: http://www.pi-usa.us/news/newsletter/old/25/hexapod_operation_robot.html
- [19] SOETEBIER, Sven, Sönke KOCK a Fabrice LEGELEUX. The Deltapod: A New Parallel Robot for Flexible Fixturing Applications. ParalleMIC [online]. 2007 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review015.html>
- [20] Adept Quattro Parallel Robots. Adept Technology, Inc. [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.adept.com/products/robots/parallel/quattro-s650h/general>
- [21] Tricept T606. PKMtricept [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240238156>
- [22] Decoupled Passive Hand Controller. Centre for Intelligent Machines [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://cim.mcgill.ca/~haptic/pictures/DecoupledHC.html>
- [23] MERCEDES-BENZ DRIVING SIMULATOR. EMercedesBenz [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://www.emercedesbenz.com/autos/mercedes-benz/corporate-news/mercedes-benz-driving-simulator/>
- [24] POHYBOVÉ PLOŠINY. PRAGOLET, S.R.O. [online]. [cit. 2015-04-16, 13:45]. Dostupné z: <http://www.pragolet.cz/cs/pohybove-systemy>
- [25] Hexamove - Movement made easy ... Oelhydraulik Hagenbuch AG [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.hagenbuch.ch/index.php?lan=en&mid=hexamoveEnglisch>

Seznam použitých symbolů a zkratk

A_{x_i, a_i}	matice posunutí ve směru osy x_i o vzdálenost a_i
A_{x_i, α_i}	matice rotace kolem osy x_i o úhel α_i
A_{z_{i-1}, d_i}	matice posunutí ve směru osy z_{i-1} o vzdálenost d_i
A_{z_{i-1}, ϑ_i}	matice rotace kolem osy z_{i-1} o úhel ϑ_i
A_b^0	transformační matice rotace i posuvu
a_i [m]	nejkratší vzdálenost (normála) mezi z_{i-1} a z_i , její kladný směr je ve směru x_i
d_i [m]	nejkratší vzdálenost (normála) mezi x_{i-1} a x_i , její kladný směr je ve směru z_{i-1}
DOF	<i>degree of freedom</i> , počet stupňů volnosti
F [-]	počet stupňů volnosti mechanismu
f_i [-]	počet stupňů volnosti kloubu i
f_{id} [-]	počet identických stupňů volnosti
g [-]	počet kloubů
KD	kinematická dvojice
l [-]	počet vodících řetězců spojující bázi s platformou
m [-]	počet kloubových bodů na bázi
n [-]	počet členů mechanismu včetně rámu (kap. 2.2.1)
n [-]	počet kloubových bodů na platformě (kap. 2.2.2)
P	vektor souřadnic bodu P
p_b^0	vektor posunutí počátku
$(P)_0$	matice původních souřadnic v lokálním souřadnicovém systému
$(P)_b$	matice souřadnic bodu v globálním souřadnicovém systému
$R_{x, \alpha}$	transformační matice pro rotaci kolem osy x o úhel α
$R_{y, \varphi}$	transformační matice pro rotaci kolem osy y o úhel φ
$R_{z, \vartheta}$	transformační matice pro rotaci kolem osy z o úhel ϑ
s [-]	počet pasivních vazeb
t [s]	čas
α_i [rad]	úhel mezi osami z_{i-1} a z_i při otáčení kolem osy x_i
ϑ_i [rad]	úhel mezi osami x_{i-1} a x_i při otáčení kolem osy z_{i-1}
λ [-]	počet stupňů volnosti pro jednoznačné určení polohy a orientace platformy


Seznam obrázků a grafů

Obr. 1.1: První patentovaná paralelní kinematika	17
Obr. 1.2: První průmyslový robot s paralelní kinematičnou strukturou.....	18
Obr. 1.3: Coughův hexapod určený k testování pneumatik.....	18
Obr. 1.4: Paralelní podstavec antén.....	19
Obr. 1.5: Petersonův oktahedrání hexapod.....	19
Obr. 1.6: Nákres Cappelova letečkého simulátoru	19
Obr. 1.7: První letečský simulátor postavený na bázi hexapodu	19
Obr. 1.8: Schéma Stewartovy plošiny	20
Obr. 1.9: První delta robot, vyrobený v roce 1985	20
Obr. 2.1: Kulový, kardanový a univerzální kloub.....	22
Obr. 2.2: Teleskopické rameno využívající pohonu kuličkovým šroubem	23
Obr. 2.3: Uspořádání kloubových bodů	24
Obr. 2.4: Uspořádání kloubů ve vodícím řetězci.....	25
Obr. 2.5: Rozdělení paralelních mechanismů z hlediska uspořádání ramen	25
Obr. 2.6: Rozdělení pohonů servoramen	26
Obr. 2.7: Používané varianty umístění pohonů	26
Obr. 2.8: Kloubové proměnné sériového robotu	27
Obr. 2.9: Transformační rovnice	28
Obr. 2.10: Matice $R_{x,\alpha}$	28
Obr. 2.11: Matice $R_{y,\phi}$	28
Obr. 2.12: Matice $R_{z,\theta}$	28
Obr. 2.13: Transformační matice využívající Denavit-Hartenbergovi parametry	29
Obr. 2.14: Denavit-Hartenbergovi parametry mezi 2 souřadnicovými systémy.....	29
Obr. 2.15: Denavit-Hartenbergův princip rozmišřování souřadných systémů	30
Obr. 2.16: Rozdělení metod pro řešení inverzních úloh kinematiky.....	30
Obr. 2.17: Paralelní SCARA robot.....	31
Obr. 2.18: Kinematičký model paralelního robotu DexTAR	31
Obr. 2.19: Model robotu DexTAR v programu MATLAB/SimMechanics.....	32
Obr. 2.20: Vizualizace modelu v SimMechanics.....	32
Obr. 2.21: Průběh souřadnic x, y koncového efektoru v závislosti na čase t	33
Obr. 3.1: Dělení robotů dle kinematiky.....	34
Obr. 3.2: Příklad sériového robotu (vlevo) a jeho kinematičkého řetězce (vpravo)	34
Obr. 4.1: CKCM robot.....	38
Obr. 4.2: Hexapod pro teleskop UKIRT	38
Obr. 4.3: Tripod s piezo pohonem	38
Obr. 4.4: Delta robot SurgiScope® v akci	39
Obr. 4.5: Robotický asistent jehož základ tvoří hexapod.....	39
Obr. 4.6: Adept Quattro ePLC650H-HS	40
Obr. 4.7: Deltapod FlexPLP firmy ABB	41
Obr. 4.8: Tricept T606 se 6 stupni volnosti	41
Obr. 4.9: Ruční ovladač sestrojený na McGillově univerzitě.....	42
Obr. 4.10: Automobilový simulátor firmy Mercedes-Benz	43
Obr. 4.11: Simulační plošina firmy Pragolet.....	43
Obr. 4.12: Hexapod Hexamove testující trup lodi.....	43

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 51
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Porovnání sériových a paralelních mechanismů.....37

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 52
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Seznam příloh

CD:

- elektronická verze bakalářské práce ve formátu PDF,
- kinematický model paralelního robotu DexTAR vytvořený v programu MATLAB/SimMechanics ve formátu .slx.