



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 PARALELL KINEMATICS STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ PAVLICA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK KNOFLÍČEK, Dr.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Pavlica

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 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

Cíle bakalářské práce:

Cíle je získat přehled ve schématech PKS robotů, které jsou novým typem v robotice. Na základě historického vývoje je možné uvést jejich základní principy konstrukce a 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 2011/12.

V Brně, dne 29.11.2010




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


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou a současným stavem průmyslových robotů s paralelní kinematikou.

První kapitola je věnována úvodu do problematiky paralelních kinematických struktur, přičemž jednotlivé podkapitoly se zabývají definicí základních pojmů a zachycují vývoj paralelních mechanismů. Druhá kapitola se zaměřuje na porovnání sériových a paralelních kinematických struktur. Třetí kapitola se zabývá analýzou konstrukcí paralelních kinematik. V poslední kapitole jsou uvedeny příklady konstrukcí a aplikací robotů s paralelní kinematickou strukturou.

Závěr práce je věnován předpokládanému budoucímu vývoji paralelních kinematických struktur.

Abstrakt

The bachelor thesis deals with the issue and the current state of industrial robots with the parallel cinematics.

The first chapter is devoted to an introduction to the issue of parallel kinematic structures and the subchapters deal with definitions of the terms and describe the development of parallel mechanisms. The second chapter is focused on the comparison of serial and parallel kinematics structures. The third chapter deals with the analysis of the construction of parallel kinematics. In the last chapter are described examples of constructions and application of robots with parallel kinematic structure.

At the end of the thesis is set down an expected future development of parallel kinematic structures.

KLÍČOVÁ SLOVA:

paralelní kinematická struktura, průmyslový robot, tripod, hexapod, delta robot

KEYWORDS:

a parallel kinematic structure, an industrial robot, a tripod, a hexapod, a delta robot

Bibliografická citace mé práce:

PAVLICA, J. *Paralelní kinematické struktury průmyslových robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Paralelní kinematické struktury průmyslových robotů“ vypracoval samostatně s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury na konci této práce.

V Brně dne 20.05.2012

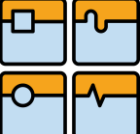
Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr. za vedení mé práce, jeho vstřícnost a poskytnutí cenných rad a připomínek. Mé poděkování patří i manželce za její vytrvalou podporu a rodičům za podporu během celého studia.

**OBSAH**

| | |
|---|-----------|
| 1. Úvod do problematiky paralelních kinematických struktur | 10 |
| 1.1 Definice základních pojmů | 10 |
| 1.2. Vznik a vývoj paralelních mechanismů..... | 13 |
| 1.2.1. Úvod..... | 13 |
| 1.2.2. Historie paralelních mechanismů | 14 |
| 1.2.3 Simulátory s paralelní kinematikou | 16 |
| 2. Porovnání sériových a paralelních kinematik | 18 |
| 2.1. Rozdělení robotů podle kinematiky | 18 |
| 2.2. Sériová kinematika | 18 |
| 2.2.1. Stavba (morfologie) | 18 |
| 2.2.2. Principiální nevýhody | 20 |
| 2.3. Paralelní kinematika | 20 |
| 2.3.1. Principiální nevýhody | 22 |
| 2.4. Porovnání vlastnosti sériových a paralelních struktur | 24 |
| 3. Analýza konstrukcí paralelních kinematik | 25 |
| 3.1. Hodnotící kritéria | 25 |
| 3.1.1. Počet stupňů volnosti | 25 |
| 3.1.2. Počet a uspořádání kloubových bodů na plošině a bázi..... | 26 |
| 3.1.3. Druh, počet a upořádání kloubů ve vodícím řetězci | 27 |
| 3.1.4. Počet uspořádání ramen | 28 |
| 3.1.5. Druh a umístění pohonu..... | 29 |
| 3.2. Komponenty pro paralelní kinematické struktury | 30 |
| 3.2.1. Klouby | 30 |
| 3.2.2. Ramena | 32 |
| 4. Příklady konstrukcí a aplikací robotů s PKS..... | 34 |
| 4.1. Delta struktury | 34 |
| 4.1.1. FANUC M-1iA/0,5A a M-1iA/0,5S | 34 |
| 4.1.2. ABB IRB 360 | 35 |
| 4.1.2. Adept S650H | 36 |
| 4.2. Jiné struktury..... | 37 |
| 4.2.1. Codian D2-800 | 37 |
| 4.2.2. Fanuc F-200IB | 38 |
| 5. Předpokládaný vývoj robotů s PKS | 39 |
| 6. Závěr | 39 |
| 7. Použité zdroje..... | 41 |

| | | |
|---|--|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 10 |
| | BAKALÁŘSKÁ PRÁCE | |

1. Úvod do problematiky paralelních kinematických struktur

1.1 Definice základních pojmů [1]

Báze je člen mechanismu nevyvolávající žádný pohyb. Podle definice mechanismu tvoří tedy rám mechanismu nebo-li pevnou základnu nebo jen základnu.

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

Hexapod je paralelní kinematika s šesti stupni volnosti, jejíž platforma je spojena s bází pomocí šesti vodících řetězců. Ve smyslu pohonové techniky, hexapod představuje prostorové hnací ústrojí schopné realizovat prostorové pohyby.

Hybridní kinematika je tvořena uzavřenými i otevřenými kinematickými řetězci nebo jeden hnací člen je unášen jiným hnacím členem.

Kinematika je nauka o pohybu. V předkládané práci se tímto pojmem rozumí zejména hnací ústrojí sloužící ke změnám nebo k přenosu pohybu a sil. Kinematika je tvořena minimálně třemi členy, z toho jeden člen musí být základna.

Kinematická dvojice: je tvořena dvěma vzájemně pohyblivě vázanými členy, resp. spojeny tak že pohyblivost mezi členy je omezena.

Kinematická analýza mechanismů: spočívá v určení polohy, rychlosti a zrychlení resp. úhlové rychlosti a úhlové zrychlení vybraných bodů v závislosti na hnacích souřadnicích.

Kinematická syntéza mechanismů je inverzní úloha ke kinematické analýze. Na základě předepsaného pohybu hnané souřadnice se hledá souřadnice hnací. Je obtížnější než analýza mechanismů.



Kinematický řetězec je spojení několika členů pomocí kinematických dvojic. Kinematický řetězec je reprezentován strukturou kinematiky, tj. počtem, druhem a uspořádáním členů kinematiky. Kinematický řetězec může být otevřený, uzavřený nebo smíšený, jednoduchý či složený a dále se dělí ještě na rovinný, sférický nebo prostorový.

Kinematický řetězec otevřený je řetězec, jehož některé členy jsou připojeny pouze jednou kinematickou dvojicí.

Kinematický řetězec uzavřený vznikne tak, že každý člen řetězce je připojen nejméně dvěma kinematickými dvojicemi.

Kloub je technické provedení kinematické dvojice.


Kloubový bod představuje průsečík os otáčení rotačního kloubu s více jak jednou osou rotace, tj. například u sférického nebo kardanova kloubu. Synonymem pro kloubový bod je otočný bod.

Koncový efektor tvoří koncový člen mechanismu, který slouží k manipulaci s nástrojem nebo obrobkem.

Mechanismus je mechanické zařízení sloužící k transformaci pohybu nebo přenosu sil. Zařízení tvoří soustava vzájemně pohyblivých těles, z nichž jedno je vzhledem k ostatním nepohyblivé a nazývá se rám. Tělesa zařízení nazýváme členy mechanismu.

Paralelní kinematika: Paralelní mechanismy se skládají ze dvou a více sériových kinematických řetězců, které jsou složeny z báze, platformy a nejméně dvou vzájemně nezávislých vodících řetězců. Výstižnější je označení mechanismus s paralelní kinematickou strukturou.

Platforma je také označována jako pohyblivá plošina nebo jen plošina, která je polohována nebo orientována vzhledem k bázi prostřednictvím vodících řetězců.

| | | |
|---|--|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 12 |
| | BAKALÁŘSKÁ PRÁCE | |

Počet stupňů volnosti mechanismu je mírou pohyblivosti mechanismu. Slouží k určení počtu složek pohybu (translací a rotací), které je koncový efektor mechanismus schopen realizovat.

Pohyblivost vyjadřuje omezení pohybu soustavy stykovými vazbami.

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

Spojnice je pasivní vzpěra s upevněnými klouby na koncích a neměnitelnou délkou. Z hlediska pohonové techniky je to hnaný člen.

Tripod je mechanismus s paralelní kinematickou strukturou a třemi stupni volnosti, u které je platforma zpravidla spojena s bází pomocí tří poháněných vodících řetězců.

Vodící řetězec je spojení báze s platformou u paralelních kinematik. Toto spojení je realizováno pomocí nejméně jednoho hnacího členu a dvou kloubů. Vodící řetězec je tvořen vzpěrou nebo vzpěrou a spojnici. Hexapod má například bázi spojenou s platformou pomocí šesti vodících řetězců.

Vzpěra je aktivní část vodícího řetězce paralelní kinematiky. Z hlediska pohonové techniky je vzpěra hnacím členem.

Redundantní paralelní kinematika je paralelní kinematika, u níž je počet pohonů vyšší než počet stupňů volnosti.

1.2. Vznik a vývoj paralelních mechanismů

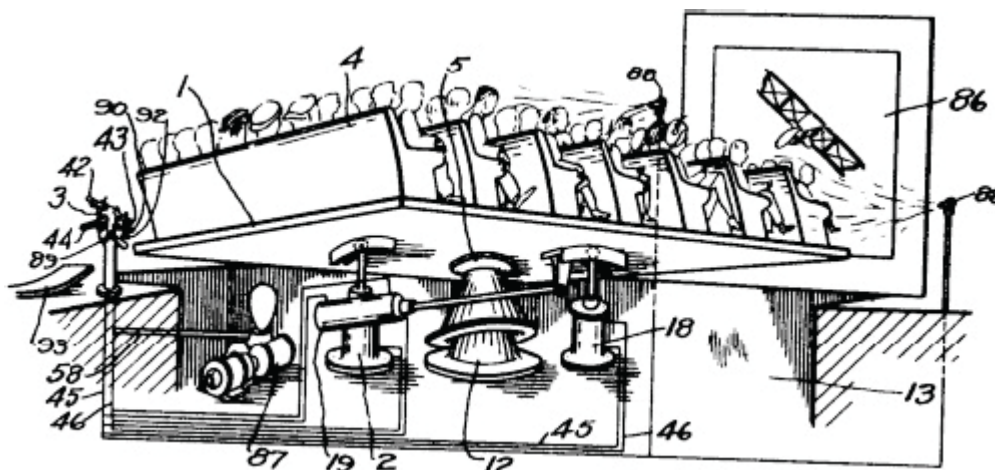
1.2.1. Úvod

Mohlo by se zdát, že konstrukce paralelních mechanismů je současnou novinkou v oblasti průmyslových robotů, výrobních strojů a manipulátorů. Avšak opak je pravdou. Teoretické práce zabývající se problematikou paralelní kinematiky sahají stovky let do minulosti, přičemž prudký rozvoj je až v posledních desetiletích. V dřívějších letech se myslelo, že se jako první touto problematikou zabýval britský doktor Eric Gough někdy kolem roku 1947. Později se však ukázalo, že první teoretické úvahy týkající se paralelních mechanismů vznesl v roce 1645 Christopher Wren. Později pak v roce 1813 zkoumal matematik Augustin Louis Cauchy tuhost takzvaného kloubového ostahedronu. Dále se v devatenáctém století zaobírali touto problematikou také matematikové Henri Léon Lebesgue a Raoul Bricard. V té době však s sebou přinášela tato problematika také mnoho problémů. Ty se týkaly jak technické, tak i hardwarové a softwarové úrovně. Paralelní kinematiky se začíná více využívat teprve v posledních letech. Její využití můžeme sledovat například u obráběcích strojů a manipulátorů. [1],[2],[3]



1.2.2. Historie paralelních mechanismů [1],[2],[3]

Prvním, kdo využil ve svém návrhu paralelní kinematickou strukturu, byl J. E. Gwinnet. Svůj návrh si přihlásil na patentovém úřadě v roce 1928. Jednalo se o pohyblivou naklápací plošinu (obr 1.1), která měla být využita v zábavním průmyslu. Mechanické ústrojí této plošiny tvořila sférická paralelní kinematika. Plošina byla uprostřed uložena na sférickém kloubu a náklápění zajišťovaly tři lineární pneumotory. Patent na tento mechanismus byl přijat v roce 1931, avšak není známo, zda vůbec došlo k sestrojení mechanismu a k realizaci díla. Přesto můžeme tento fakt považovat za první důkaz o úmyslu použít paralelní kinematiku v praxi.



Obr. 1.1: První patentovaný sférický paralelní mechanismus [2].

O několik let později, v roce 1938, navrhl Willard L. V. Pollard stříkací robot s paralelní kinematickou strukturou (obr. 1.2). Šlo o první průmyslový robot, který měl pět stupňů volnosti. Hlavice byla spojena s bází pomocí tří vodících řetězců, z nichž každý byl tvořen ramenem a spojnici spojených uprostřed rotačním kloubem. Ramena byla řízena pomocí tří motorů uložených na bázi. Dvě ze tří ramen byly ke koncovému efektoru (stříkací hlavici) připevněny pomocí kulového kloubu a třetí pomocí univerzálního kloubu. Tento robot byl i díky úsilí Pollardova syna Willarda L. G. Pollarda Jr. přihlášen na patentovém úřadě roku 1934.

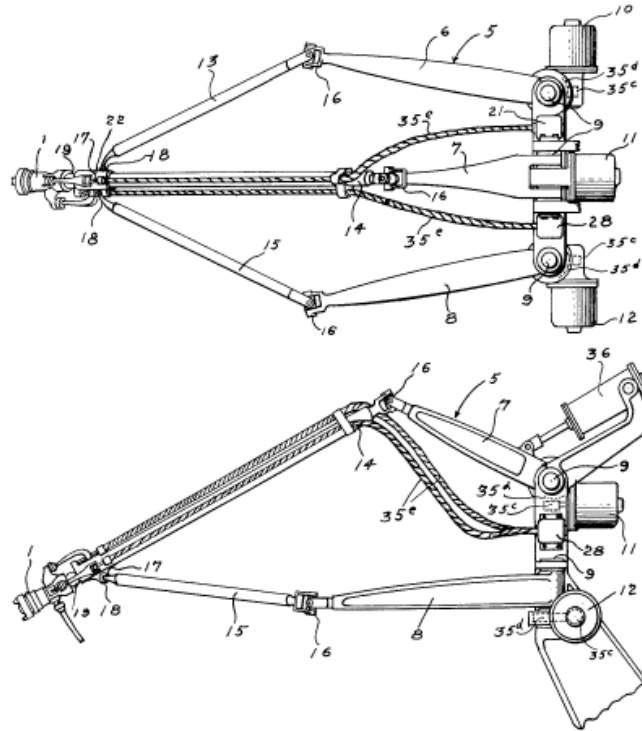
Patent byl rozdělen na dvě části:

- 1) elektrický řídicí systém,
- 2) mechanický manipulátor.

Nakonec byl patent vydán až 16. června 1942, ale i přesto nebyl robot nikdy postaven.

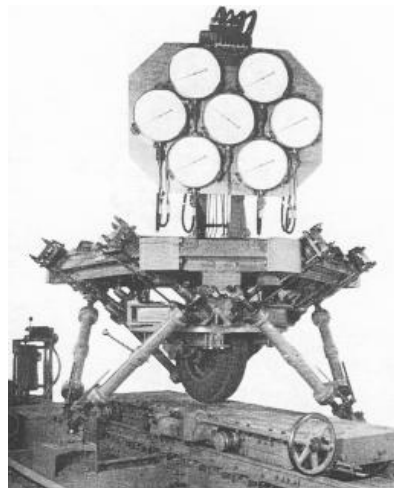


BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Obr. 1.2: První průmyslový robot s paralelním uspořádáním ramen [2].

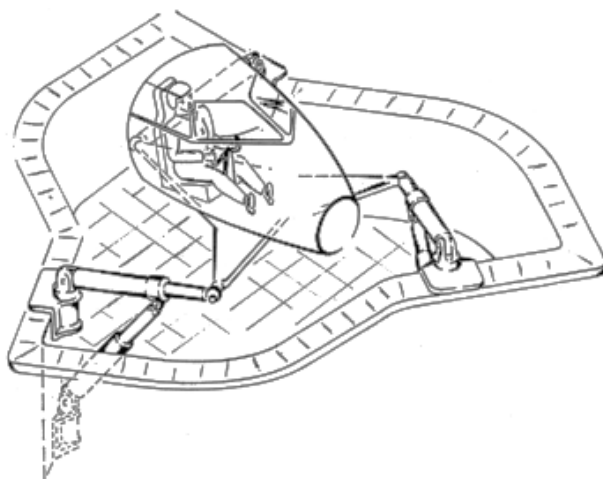
V roce 1947 vyrobil dr. Eric Gough první oktahedrání hexapod s proměnlivou délkou ramen. Tento testovací stroj sestavil pro anglickou firmu Dunlop Rubber Co. Měl sloužit ke zkoumání vlastností pneumatik zatížených silami vznikajícími při přistávání letadla (obr. 1.3). Stroj byl prakticky odzkoušen v letech 1954 a 1955. Později byl zrekonstruován a řízen digitálně. Roku 2001 byl převezen do Vědeckého muzea ve Wroughtonnu v Anglii.



Obr. 1.3: Goughův hexapod na testování pneumatik [2].

1.2.3 Simulátory s paralelní kinematikou

Významným rokem pro paralelní kinematiku se stal rok 1965, kdy Stewart ve svém spisu uvažuje o využití paralelních mechanismů při vývoji leteckého simulátoru. Mechanismus známý jako Stewartova plošina (obr. 1.4) nebyl bohužel nikdy postaven, avšak měl velký dopad na budoucí vývoj v oblasti paralelních mechanismů. Dále se ve spisu objevuje i myšlenka využít paralelní kinematiku pro frézovací a vrtací operace, čímž se mu podařilo odhadnout budoucí vývoj a využití hexapodů. [1],[2],[4]



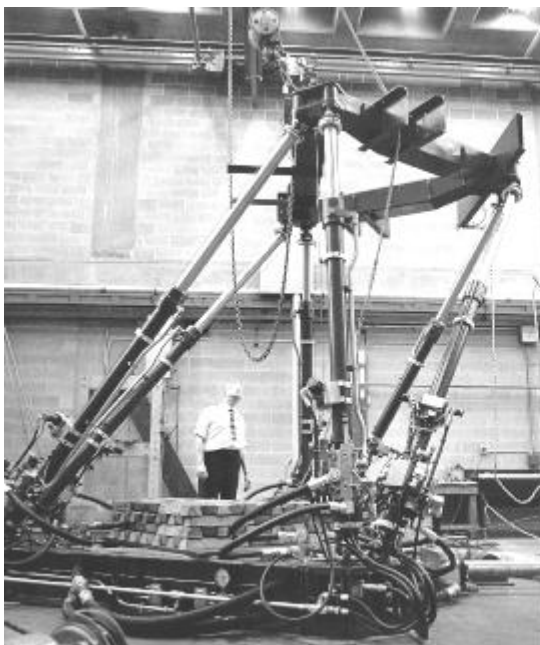
Obr. 1.4: Schéma Stewartovy plošiny [2]

Roku 1962 dostal v Severní Americe inženýr Klaus Cappel zakázku od Franklinského institutu ve Philadelphii na zlepšení vlastností vibrační plošiny MAST. Plošina MAST (obr. 1.5) byla vyráběna se třemi vodorovnými a třemi svislými zdviháky. Pro její vylepšení se Cappel rozhodl přidat čtvrté vodorovné rameno, což však příliš zkomplikovalo řízení plošiny. A docházelo také k problémům s protichůdnými silami, které způsobily selhání platformy. Zvolil tedy podobnou oktahedrální konstrukci, kterou použil také Dr. Gough u svého mechanismu. Tuto konstrukci použil nezávisle na patentu Dr. Gougha a Stewartova spisu (ten v té době ještě nebyl ani vydán). Klaus Cappel přihlásil svojí “Pohybovou plošinu” k patentování v roce 1964 a patent mu byl udělen v roce 1971. [1],[2],[4]



Obr. 1.5: MAST-multi axis simulation table [2]

Ve skutečnosti patentová přihláška a myšlenka pohybového simulátoru vznikla na žádost Franklinova institutu spolu s firmou Sikorsky Aircraft Division of United Technologies, která na základě Cappelova výzkumu navrhla stavbu cvičné pilotní kabiny vrtulníku (obr. 1.6). Franklinův institut vyrobil později ještě pohybovou plošinu pro Rock Island Arsenal a také pro společnost Daimler-Benz (zkoušeli jízdní vlastnosti svých automobilů). [1],[2],[4]



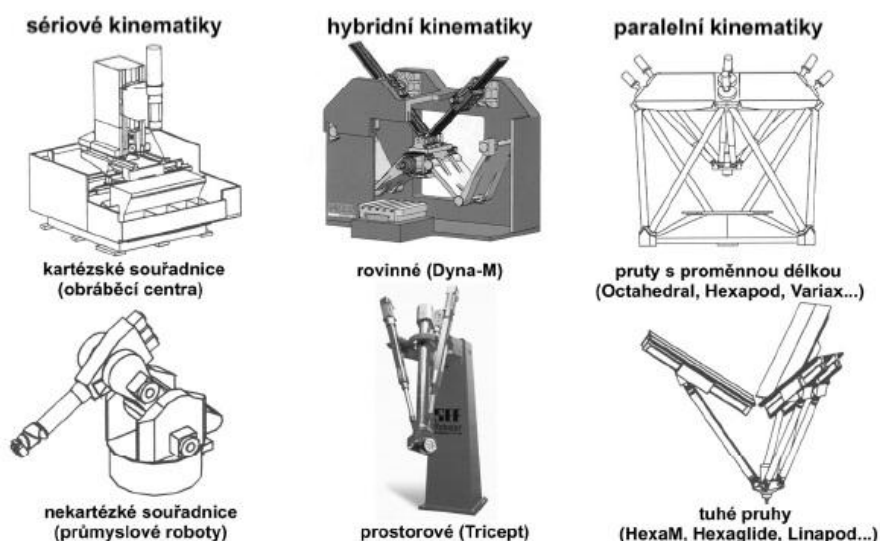
Obr. 1.6: První letecký simulátor založený na využití oktahedrálního hexapodu [2]

Od té doby nacházely paralelní kinematické mechanismy uplatnění zejména v oblasti leteckých simulátorů pro pilotní výcvik a zkoušení nového vybavení. Simulátory se později využívaly také u lodí, vozidel, zábavních atrakcí nebo raketoplánu NASA.

2. Porovnání sériových a paralelních kinematik

2.1. Rozdělení robotů podle kinematiky

Mezi hlavní kritéria při výběru robotu je mimo jiné velikost a tvar jeho pracovního prostoru. Ten je dán zejména jeho kinematickým řešením (obr. 1.7). V současnosti převažují v průmyslu roboty se sériovou kinematikou, roboty se smíšenou nebo paralelní kinematikou se zatím využívají v podstatně menší míře. [7]



Obr. 2.1: Rozdělení robotů dle kinematiky [7]

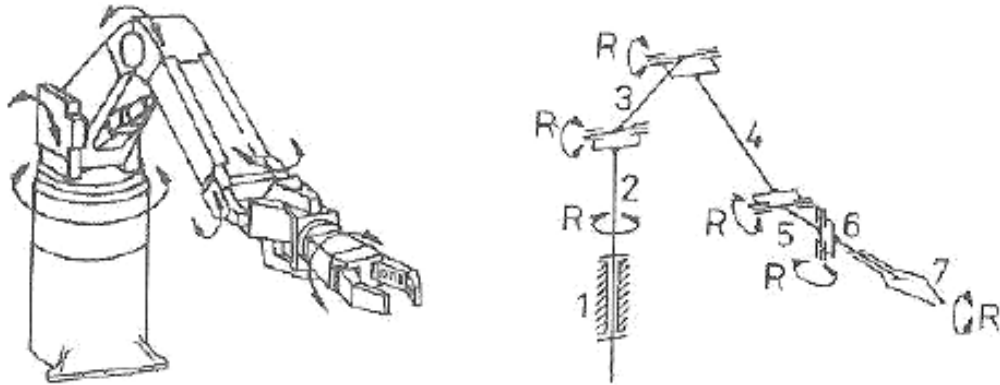
2.2. Sériová kinematika

2.2.1. Stavba (morfologie)

Kinematické řetězce jsou u většiny mechanismů založeny na strukturách se sériovou kinematikou. Tuto strukturu si můžeme ukázat na příkladu průmyslového robotu (obr. 2.2). Robot používá kinematické dvojice vždy o jednom stupni volnosti (tedy KD translační nebo rotační), které se mohou otáčet nebo posouvat nezávisle na sobě. Prvky tohoto mechanismu

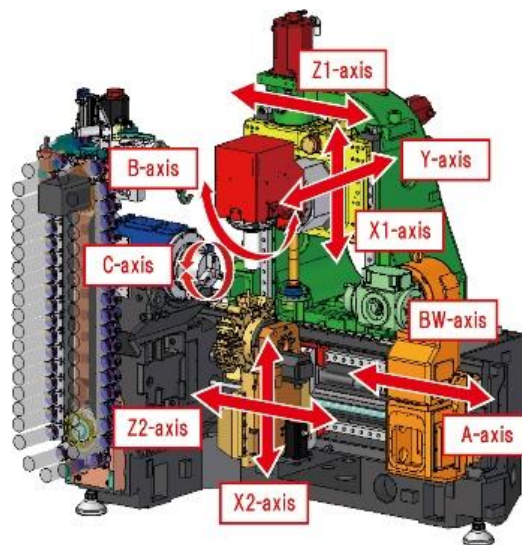


jsou tedy postupně spojeny za sebou. Výsledný pohyb je tedy dán pohybem všech předešlých a do série řazených dvojic. [1], [5]



Obr. 2.2: Průmyslový robot se sériovým uspořádáním ramen [1]

Nosné soustavy současných obráběcích strojů se sériovou kinematikou jsou taktéž vytvářeny stavbou řazením jednoho konstrukčního nebo montážního uzlu na druhý. Tři posuvové osy (obvykle označení jako Z,Y,W) jsou na sebe navázány, dále osa Z unáší osu Y a W. Konstrukce těchto strojů tedy vyžaduje, aby bylo spojení jednotlivých os značně tuhé, jelikož všechny pohyby při obrábění koná nástroj a tím tedy tyto pohyby ovlivňují pracovní a geometrickou přesnost. Dimenzování jednotlivých os musí počítat s faktem, že nosné díly jsou namáhány zejména na ohyb a krut. Z tohoto důvodu celá konstrukce nabývá na hmotnosti a tuhost koncového členu (vřeteno nebo stůl) je snížena (obr. 2.3). [1]



Obr. 2.3: Nosná konstrukce se sériovou kinematikou NT1000 (Mori Seiki) [6]

2.2.2. Principiální nevýhody

Výkonné parametry dnešních výrobních strojů se sériovou kinematikou jsou výsledkem vývoje a výzkumu trvajících několik desítek let. Se stále zvyšujícími se požadavky jako jsou produktivita, rychlost pohybů jednotlivých os a flexibilita, se tyto parametry přibližují hranici možnosti těchto strojů. Hranice lze spatřovat především v těchto aspektech, které se do určité míry nedají zcela odstranit:

- ohybové zatížení částí stroje,
- značné pohybující se hmoty,
- omezená dynamika os, tedy rychlostí a zrychlení,
- sčítání chyb polohy a přesnosti v poloze v jednotlivých osách,
- vysoké požadavky na přesnost jednotlivých dílů,
- nízký počet opakujících se stavebních dílů.

2.3. Paralelní kinematika

V posledních letech se u výrobních strojů a průmyslových robotů začaly uplatňovat konstrukce využívající původní myšlenku, tedy uložit obráběcí nástroj na platformu, která je zavěšena na délkově proměnlivých a kloubově uchycených ramenech, pomocí nichž je možné natáčet a různě orientovat platformu vzhledem k obrobku. Jedná se například o hexapod nebo-li Stewartovu plošinu již uvedenou v kapitole 1.2. Avšak některé firmy používají vzpěr



s pevnou délkou, které jsou uloženy v přidavných hlavách s posuvnými čepy (HexaM, Hexaglide, Triaglide, Linapod (obr. 2.4). Tato konstrukce umožňuje lepší využití lineárních pohonů. [5]



Obr. 2.4: Manipulátor s PKS typ IRB 340 FlexPicker (ABB) [8].

Pod pojmem paralelní kinematika se tedy v oblasti VS a PRaM rozumí mechanismus s následujícími charakteristikami:

- Paralelní kinematický mechanismus je tvořen bází, platformou, rameny, klouby a pohony.
- Platformu podpírají minimálně dva vodící řetězce obsahující alespoň jeden jednoduchý akční člen – člen umožňující pohyb s jedním stupněm volnosti (1 DOF).
- Počet akčních členů musí být stejný jako počet stupňů volnosti koncového efektoru.
- Pohyblivost mechanismu je nulová, jsou-li akční členy zablokovány proti pohybu.

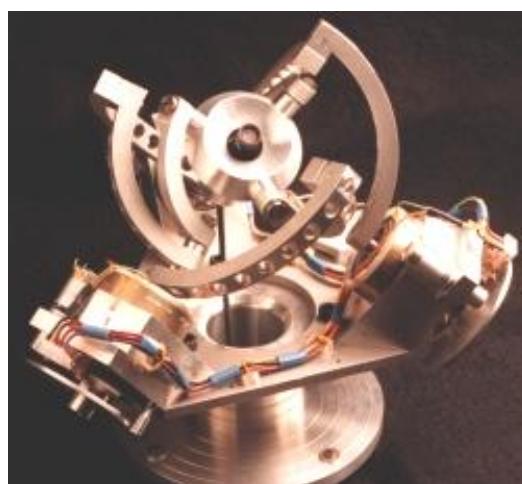
Z hlediska počtu nezávislých vodících řetězců lze paralelní mechanismus definovat takto:

- **Plně paralelní mechanismus:** paralelní mechanismus s n DOF koncového efektoru připojeného k základně n nezávislými vodícími řetězci, z nichž každý má jeden jednoduchý akční člen (obr. 2.5).



Obr. 2.5: Plně paralelní mechanismus HEXALIGHT 6D M-840 [9].

- **Hybridní paralelní mechanismus:** paralelní mechanismus s n DOF koncového efektoru připojeného k základně m ($m < n$) samostatnými vodícími řetězci, z nichž každý má jeden nebo více akčních členů.
- **Orientační paralelní mechanismus:** paralelní mechanismus, jehož body na pohyblivé plošině jsou popsány dráhami a všechny tyto dráhy leží na soustředných kulových plochách (obr. 2.6)



Obr. 2.6: Orientační mechanismus – Agile eye [3].

2.3.1. Principiální nevýhody

Tak jako u většiny konstrukcí se i u paralelních mechanismů vyskytují určité problémy, které je třeba co nejvíce eliminovat. Jedná se zejména o:



- **Tepelnou dilataci:** vlivem zvyšování rychlosti včetně stoupá i dynamický tepelný přírůstek. Jelikož jsou dlouhá ramena citlivá na změnu teploty musí se ramena monitorovat v reálném čase a musí proběhnout automatická kompenzace chyb pomocí programových rutin v řídicím softwaru, čímž se daný problém odstraní.
- **Délky ramen:** dlouhé díly jsou náchylné k rozměrové nestálosti v důsledku tahu či tlaku. S rostoucí délkou ramen hrozí porušení vzpěrné stability a vyšší nepřesnost stroje.
- **Tření:** k největšímu tření u těchto mechanismu dochází v kulových kloubech (koeficient tření se pohybuje okolo hodnoty 0,8), což má za následek vznik axiální síly působící na ramena. Tím dochází k nepřesnostem u polohování. Ke snížení tření se používají např. keramické nátěry nebo speciální lubrikanty.
- **Kalibrace:** přesnost u mechanismu není závislá jen na délkách ramen, ale také na geometrických charakteristikách. Je tedy velmi obtížné sjednotit a specifikovat všechny parametry.

2.4. Porovnání vlastností sériových a paralelních struktur

Výzkum a vývoj strojů s paralelní kinematikou s sebou přináší mnohé zajímavosti, ale také jsou zde stále určité problémy, na kterých lze pracovat. V tabulce 2.1 jsou uvedeny souhrnné vlastnosti sériových a paralelních struktur. Protože je každá struktura zhotovena zvlášť pro daný účel, není možné porovnávat jednotlivé mechanismy

| Vlastnosti | Paralelní kinematický mechanismus | Sériový kinematický mechanismus |
|---------------------------------------|---|---|
| Tuhost | Vysoká (zejména jen tah a tlak) | Nízká (zatěžování především na ohyb) |
| Rychlost a zrychlení stroje | Vysoké | Průměrné |
| Šíření chyb | Chyby jsou průměrem nashromážděných chyb v jednotlivých osách | Hromadění v jednotlivých osách |
| Hmotnost pohybujících se částí | Nízká (pohybují se jen rameny a vřeteno) | Vysoká (první osa je vždy namáhána osami následujícími) |
| Řízení (regulace) | Komplikované (celý mechanismus musí být regulován jako celek) | Jednoduchá (každá osa se reguluje jednotlivě) |
| Kalibrace | Komplikovaná (celková kalibrace je složitá, jelikož jednotlivé části se navzájem ovlivňují) | Jednoduchá |
| Kinematika | Inverzní kinematika, transformace souřadnic je zcela nutná | Přímá kinematika (je jednoduchá) |
| Vazba mezi osami | Osy spojené a vazba je nelineární | Jen malé vazby |
| Výroba a montáž | Jednoduchá (prvky jsou lehce nahraditelné) | Složitá (nákladná a časově náročná) |
| Flexibilita | Vysoká (zaměnitelné díly) | Malá |

Tab. 2.1 Porovnání sériových a paralelních kinematických struktur [1],[7]



3. Analýza konstrukcí paralelních kinematik

Analýza konstrukčního uspořádání paralelních kinematik je velmi obsáhlé téma. V práci je tato kapitola omezena jen na nejdůležitější uspořádání a kritéria, dle kterých se paralelní kinematiky dělí.

3.1. Hodnotící kritéria

Při stavbě paralelních mechanismů je možné využití řady různých komponentů se spoustou možností vzájemného uspořádání. Abychom mohli analyzovat paralelní mechanismy, je nutné určit hlavní charakteristické znaky těchto konstrukcí. Mezi tyto znaky patří:

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

3.1.1. Počet stupňů volnosti


Základním úkonem při vyšetřování mechanismu je analýza celkového počtu stupňů volnosti. Stupně volnosti nám poskytují informaci o pohyblivosti mechanismu a jsou označovány zkratkou DOF (degree of freedom). Pro určení polohy v prostoru je zapotřebí znát 6 stupňů volnosti. Tři stupně translace podél os X, Y, Z (pro polohování v prostoru) a tři stupně rotace kolem os X, Y, Z (pro prostorovou orientaci).

Pro výpočet stupňů volnosti se využívá tzv. Grüblerův vzorec:

$$F = \lambda * (n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i$$

nebo modifikovaný Grüblerův vzorec:

$$F = \lambda * (n - 1) - \sum_{i=1}^g (\lambda - f_i)$$

| | | |
|---|--|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 26 |
| | BAKALÁŘSKÁ PRÁCE | |

Tyto rovnice však neberou v úvahu geometrické vztahy mezi klouby, a proto je nejvhodnější využít pro přesný výpočet DOF vzorec ve tvaru:

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

Výše použité veličiny představují:

F počet stupňů volnosti.

λ počet stupňů volnosti pro jednoznačné určení polohy pohyblivé plošiny
(pro prostorový mechanismus platí $\lambda = 6$ a pro rovinný mechanismus $\lambda = 3$).

n počet členů mechanismu (včetně rámu).

g počet kinematických dvojic.

f_i stupně volnosti kloubu i .

f_{id} počet identických stupňů volnosti.

s počet pasivních vazeb.

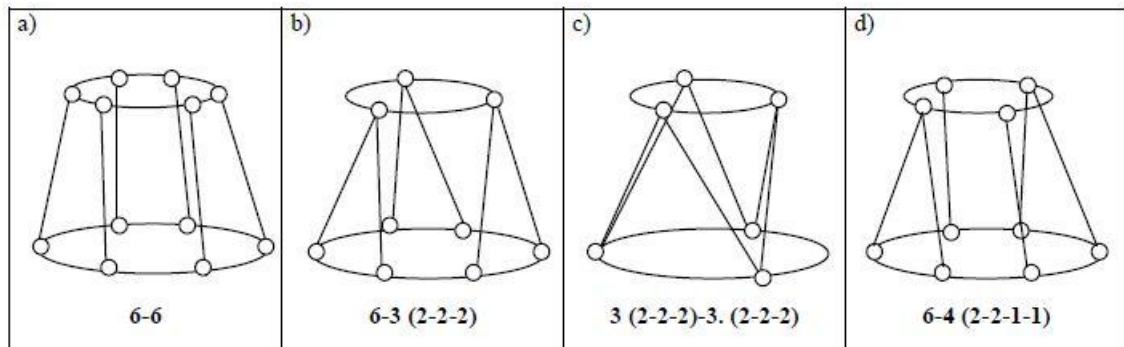
3.1.2. Počet a uspořádání kloubových bodů na plošině a bázi

Dalšími charakteristickými rozlišovacími znaky jsou počet kloubů na bázi m , počet kloubových bodů na platformě n a počet vodících řetězců l .

Rozlišujeme tři možnosti (viz obr. 3.1):

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

V současnosti je u hexapodů počet kloubových spojů a počet ramen převážně shodný. V případech, kdy se počet kloubu liší od počtu ramen, se jedná většinou o různé experimentální nebo speciální konstrukce, které se běžně nepoužívají. Je-li počet kloubu jiný než počet ramen, znamená to, že ke kloubům na bázi nebo platformě jsou připojeny dvě ramena nebo více ramen. Po technické stránce je to velmi složitá situace. Vlastnosti kloubů jsou v těchto případech horší než u „běžných“ kloubů.



Obr. 3.1: Uspořádání kloubových bodů na bázi a platformě [1].

3.1.3. Druh, počet a upořádání kloubů ve vodícím řetězci

Tato podkapitola nám popisuje přímo konstrukci vodících řetězců u paralelních mechanismů. Pro tuto konstrukci se využívá několika kinematických dvojic (KD), jejichž označení je následující:

P – prizmatická KD (jedná se o translační KD bez rotace kolem vlastní osy), 1 DOF

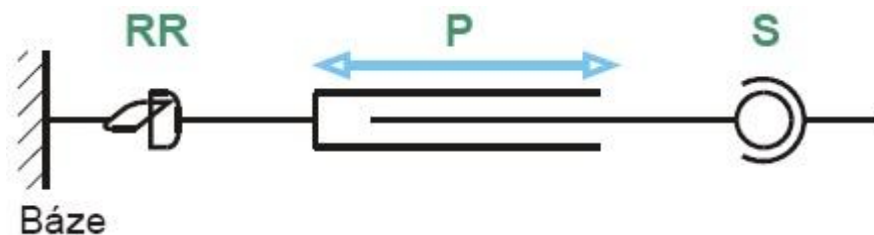
R – rotační KD, 1 DOF

S – sférická KD, 3 DOF

C – cylindrická KD, 2 DOF

RR – univerzální KD (také označovaná jako Hookův nebo-li Kardanův kloub), 3 DOF

Při sestavování kinematického řetězce je možné různě kombinovat KD a také použít v jednotlivých řetězcích rozdílné uspořádání KD (to se ale běžně nevyužívá). Uspořádání a druh kinematických dvojic významně rozhoduje o finálních vlastnostech mechanismu, jako jsou např. velikost nebo tvar pracovního prostoru, pohyblivost (počet DOF) a tuhost mechanismu. Zobrazení jednoho z nejčastěji používaného uspořádání KD je na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Příklad často používaného uspořádání KD ve vodícím řetězci [1].

Vodící řetězce se označují podle toho, v jakém pořadí jsou KD řazeny. Pro vodící řetězec na obr. 3.2 by označení vypadalo takto – RRPS.

Kde: R = rotace, T = translace, S = sférický pohyb.

3.1.4. Počet uspořádání ramen

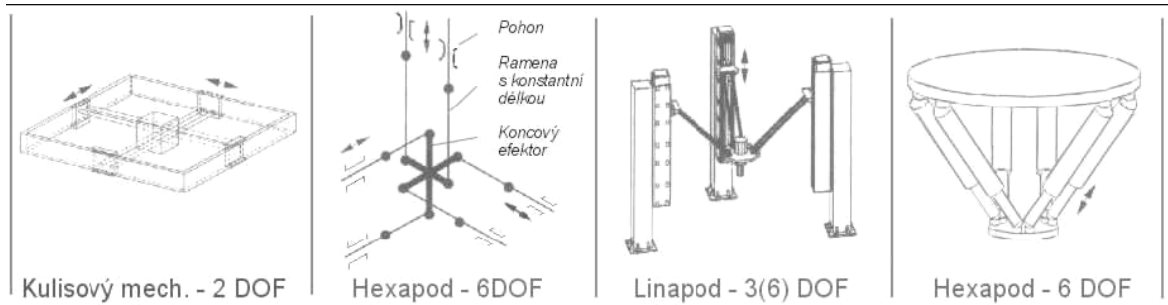
U paralelního mechanismu se předpokládá, že je složen minimálně ze dvou ramen (kinematických řetězců). Naopak maximální počet ramen není nijak omezen, avšak většina dnešních mechanismů je konstruována s využitím šesti ramen.

Paralelní mechanismy je možné z hlediska geometrického uspořádání ramen (viz obr. 3.3), tj. posuvových os, rozdělit na:

- **Posuvové osy jsou navzájem ortogonálně uspořádány a nejsou spojeny:** každá osa se může pohybovat zvlášť, aniž by vyvolávala nebo ovlivňovala pohyb jiné osy. Vyskytují se u paralelních kinematik, kde souřadný systém (SS) je shodný se SS obrobku.
- **Posuvové osy jsou navzájem ortogonálně uspořádány a jsou spojeny:** paralelní kinematiky se můžou pohybovat v prostoru ve všech směrech.
- **Posuvové osy jsou navzájem geometricky paralelně uspořádány a jsou spřaženy:** posuvové osy tvoří přímo část rámu nebo jsou k němu pevně uloženy.
- **Posuvové osy jsou navzájem neortogonálně uspořádány:** jedná se například o hexapod. I zde jsou osy spřaženy.



Obr. 3.3: Uspořádání posuvových os – první část [1].

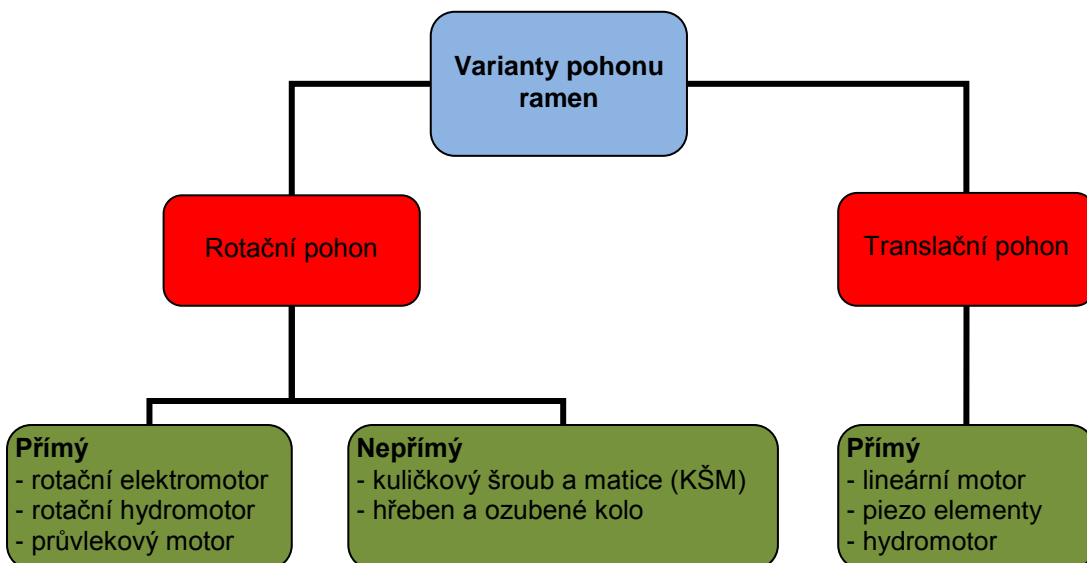


Obr. 3.3: Uspořádání posuvových os – druhá část [1].

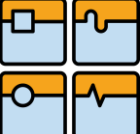
3.1.5. Druh a umístění pohonu

Vysunutí nebo rotace ramen je u vodícího řetězce zajištěna pomocí kinematické dvojice (tj. akční člen). Kinematická dvojice je díky zpětné vazbě schopna řídit vysunutí, rotaci, rychlost a zrychlení ramena.

Při volbě pohonu je potřeba zvážit umístění pohonu v mechanismu. Jednou z možností je umístit pohon na bázi, popř. na platformu. Nevýhodou u umístění pohonu na platformu je to, že pohon musí nést svou vlastní váhu. V praxi se využívají možnosti pohonu (viz obr. 3.4.).



Obr. 3.4: Varianty pro pohánění ramen [1].

| | | |
|---|--|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 30 |
| | BAKALÁŘSKÁ PRÁCE | |

3.2. Komponenty pro paralelní kinematické struktury

Základní stavební prvky kinematických řetězců pro paralelní kinematické struktury (PKS), mezi něž patří klouby, ramena, platforma, a báze, se od sériových struktur velmi liší. Klouby a ramena jsou při konstrukci PKS jedny z nejdůležitějších komponentů, které se mimo jiné nejvíce podílejí na přesnosti stroje. [10]

3.2.1. Klouby [10]

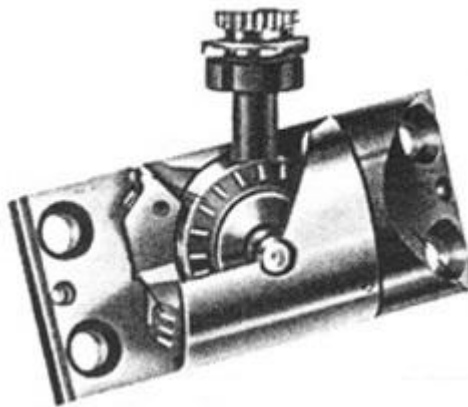
Klouby obecně nejsou v dnešní době pro paralelní mechanismy žádnou novinkou. Už v minulosti se využívaly např. v automobilovém a zemědělském průmyslu. Požadavky kladené na klouby, které se používaly dříve, jsou velmi odlišné od těch, které jsou preferovány při stavbě PKS. Důraz je kladen zejména na vysokou tuhost, vysokou statickou únosnost, nízkou hmotnost, vysokou přesnost, malé opotřebení, dlouhou životnost a velké úhlové rozsahy. Specifické požadavky vedly k vývoji různých typů kloubů pro konstrukci PKS. U manipulačních zařízení je zapotřebí velkých úhlových rozsahů (velký pracovní prostor) a z důvodu velmi rychlého polohování je důležitá i nízká hmotnost kloubů. U aplikací pro frézování je potřeba dosáhnout maximální tuhosti a přesnosti kloubů. Tyto požadavky vedly k vývoji tří druhů kloubů:

Kulové klouby se třemi stupni volnosti využívají kontaktu kuliček v kulovém kloubu (viz obr. 3.5), které slouží jako valivé vedení na kulové ploše. Kuličky jsou použity jako valivá tělíska, způsobující nízké hodnoty Hertzova tlaku mezi vnějším pouzdem kloubu a kuličkami a také mezi kuličkami a spodní kulovou plochou. Tyto podmínky jsou dosaženy, jsou-li kulové plochy vyrobeny s velmi vysokou geometrickou přesností. Kulové klouby se vyznačují vysokou únosností a tuhostí, díky čemuž je vhodné jejich využití u frézovacích strojů, kde je na tyto vlastnosti kladen velký důraz.



Obr. 3.5a: Kulový kloub společnosti INA [3]. Obr. 3.5b: Kulový kloub společnosti Hephaist Seiko [3].

Univerzální klouby se dvěma nebo třemi stupni volnosti se vyznačují nízkou hmotností a odolností vůči vysokým zrychlením a rychlostem ve velkých pracovních prostorech. Jejich konstrukce se využívá u manipulačních zařízení. Nevýhodou univerzálních kloubů (viz obr. 3.6) je nižší tuhost, která vzniká na základě malé opěrné plochy valivých tělísek a použití jehlových ložisek.



Obr. 3.6: Univerzální kloub společnosti INA [1].

Kardanové klouby jsou využívány k přenosu krouticích momentů. Kvůli požadavku na vysokou tuhost byl náboj kloubu optimalizován metodou konečných prvků pro tahové a tlakové zatížení. Použitá jsou radiálně-axiální jehlová ložiska, která poskytují nejvyšší dosahovanou tuhost. Kardanové klouby (viz obr. 3.7) je vhodné použít u velkých pracovních prostorů a při požadavcích na vyšší tuhost. Klouby pracují v prostředí od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a již při montáži jsou mazány speciálními tuky.



Obr. 3.7: Kardanův kloub společnosti INA [1].

3.2.2. Ramena [1,10]

Principiálně se dělí na ramena s proměnlivou a pevnou délkou. Podobně jako u kloubů je jedním z hlavních úkolů přenášení sil z platformy na bázi. Paralelní uspořádání ramen zaručuje mechanismu vysokou celkovou tuhost a tím lepší pracovní přesnost strojů s paralelní kinematikou.

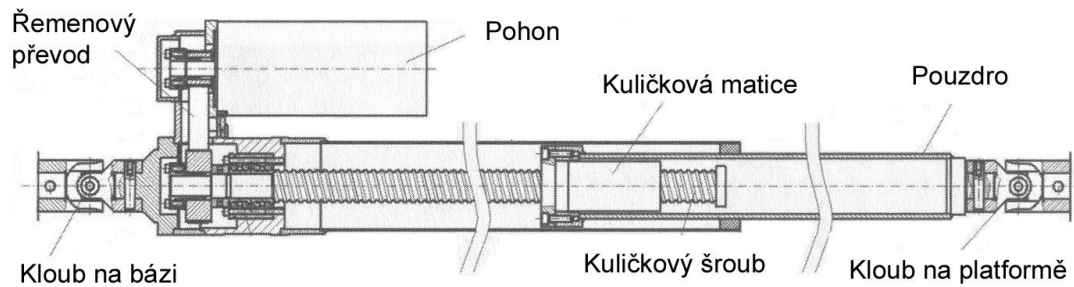
Ramena s proměnlivou délkou: Při pohybu vzpěry s proměnnou délkou dochází ke změně vzdálenosti mezi kloubem na platformě a středem otáčení kloubu na bázi. Používá se nový komponent, tzv. průvlekový motor (viz obr. 3.8), kde je rotující matice spojena přímo s dutou kotvou motoru, díky čemuž se dá dosáhnout vyššího zrychlení, vyšší posuvové rychlosti a vyšší přesnosti polohování.



Obr. 3.7: Průvlekový motor [1].



U klasického spojení pomocí kuličkového šroubu přes převod se servopohonem jsou provozní otáčky šroubu často v blízkosti oblasti kritických otáček, což způsobuje zahřívání a rozpínání prvků mechanismu.



Obr. 3.8: Rameno poháněné kuličkovým šroubem [1].

Ramena s pevnou délkou: U těchto ramen se očekává délková stálost a tuhost na vzpěr. Vlastnosti ramen s pevnou délkou se přizpůsobují přímo nárokům kladeným na ramena paralelních mechanismů.

Pro oba typy ramen je také důležité i dynamické chování. U obou variant je potřeba počítat s určitými teplotními rozdíly např. při chlazení. Vyskytují se i případy, kdy dochází k vysokofrekvenčnímu buzení. V takové situaci může být ve vzpěrách vybudeno vlastní kmitání, které má za následek ohybové namáhání ramen.

Shrneme-li poznatky z kapitoly 3.2 vidíme, že důležitými parametry při návrhu konstrukce servoramén jsou: **přesnost, rychlost, zrychlení, měřicí systém, kolizní stavy, pracovní prostor a zatížení (statické, dynamické, tepelné).**

4. Příklady konstrukcí a aplikací robotů s PKS

4.1. Delta struktury

4.1.1. FANUC M-1iA/0,5A a M-1iA/0,5S [11]

Společnost Fanuc nabízí typ M-1iA – viz. obr. 4.1, ve variantách se čtyřmi nebo šesti stupni volnosti. Pro spojení ramen se využívají kulové klouby, které jsou pevně spojeny a díky tomu jsou pevně fixovány ve své poloze. Tento robot je navržen tak, aby nahradil nebo doplnil lidskou práci ve výrobních linkách. Typ M-1iA/0,5A je navíc rozšířen až na 6 DOF. Dané rozšíření spočívá v přímém zabudování efektoru s 2 DOF na platformu. Bez tohoto rozšíření by měl tento typ stejný počet DOF jako typ M-1iA/0,5S, tj. 4 DOF.



Obr. 4.1: Robot M-1iA/0,5A od společnosti Fanuc [11].



4.1.2. ABB IRB 360 [12]

Společnost ABB nabízí delta robot s PKS – IRB 360 (viz. obr. 4.2) se čtyřmi stupni volnosti. Jedná se o robot, který se vyrábí v několika variantách s různou velikostí pracovního prostoru. Díky tomuto má široké uplatnění. První provedení tohoto robotu s označením IRB 360-1/800 má průměr 800 mm a lze ho využít jako balící stroj. Další variantou je typ IRB 360-1/1130 (jedná se o standardní verzi), který je určen pro velmi rychlé pohyby a manipulaci s předměty s větší hmotností (do 3kg). Posledním typem je robot IRB 360-1/1600, který má nerezovou konstrukci s ochranou IP69, což umožňuje využití robota ve vlhkém a nečistém prostředí. Tento typ je také vhodný pro použití v prostředí s vysokými hygienickými požadavky (např. v mlékárenském průmyslu). Robot je konstruován pomocí kulových kloubů, jejichž vzájemnou polohu zajišťují tažné pružiny (viz. obr. 4.2).



Obr. 4.2: Robot IRB 360 od společnosti ABB [12].

4.1.2. Adept S650H [13]

Společnost Adept nabízí delta robot se 4 DOF (viz. obr. 4.3). U tohoto konstrukčního provedení se můžeme setkat s ovládním 4 DOF pomocí nepravidelně rozmístěných ramen na platformě. U této konstrukce je také využito kulových kloubů, jejichž vzájemnou polohu zajišťují tažné pružiny. Nepravidelné rozmístění ramen a uchycení kloubů na platformě umožňuje při pohybu jednotlivých ramen natočení platformy. Díky tomuto ovládní se zde nevyskytuje středové rameno pro otáčení koncového efektoru, a proto je možnost natáčení koncového efektoru nepatrně omezena. Konstrukční řešení robota mu umožňuje manipulovat s předměty do hmotnosti 6 kg.



Obr. 4.3: Robot Adept Quattro s650 od společnosti Adept [13].




4.2. Jiné struktury

4.2.1. Codian D2-800 [14]

Společnost Codian robotics nabízí manipulátor Codian D2-800, který je na bázi paralelní kinematiky s 2 DOF – viz. obr. 4.4 [14]. Manipulátor pracuje pouze ve svislé rovině. Pohon zajišťují dva servomotory, které jsou připojeny na ovládaná ramena. Nosnost manipulátoru je 1 kg.



Obr. 4.4: Robot Codian D2-800 od společnosti Codian robotics [14].

| | | |
|---|--|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 38 |
| | BAKALÁŘSKÁ PRÁCE | |

4.2.2. Fanuc F-200IB [11]

Společnost Fanuc vyrábí manipulátor s PKS, který je založen na bázi hexapodu s 6 DOF– viz. obr. 4.5 [11]. Manipulátor je ovládán šesti teleskopickými rameny, poháněnými pomocí vlastních kuličkových šroubů. Jednotlivá ramena jsou uložena v obecných kloubech. Každé z ramen má vlastní servomotor. Manipulátor je dále vybaven tlumícím systémem, který zabraňuje přenosu vibrací z báze na platformu nebo naopak. Využívá se zejména v automobilovém průmyslu a u aplikací, kde je vyžadována vysoká tuhost. Jeho maximální zatížení je 100 kg.



Obr. 4.5: Robot Fanuc F-200IB od společnosti Fanuc [11].



5. Předpokládaný vývoj robotů s PKS


Vývoj paralelních mechanismů je poměrně krátký v porovnání s dobou, která je věnována vývoji a výrobě strojů se sériovou kinematikou. Za tuto dobu se ukázalo, že paralelním kinematickým strukturám se nepodařilo úplně vytlačit sériové kinematiky, které mají stále pevné postavení na trhu. Tuto skutečnost lze přisuzovat finanční a konstrukční složitosti paralelních mechanismu. V dnešní době můžeme říct, že se paralelní mechanismy dostaly do slepé uličky, což nám mimo jiné dokazují výstavy na veletrzích. V roce 2003 se zúčastnilo výstavy EMO 16 výrobců paralelních mechanismů, načež v roce 2010 se této výstavy zúčastnil pouze jeden výrobce (METROM). Dalším faktem je, že v posledních pěti letech nebyla prezentována žádná nová koncepce průmyslového robotu s paralelním kinematickým uspořádáním.

Pro využívání paralelních mechanismů je důležité efektivní využití jejich předností. V minulosti se však uživatelům využití těchto předností nedařilo, což vedlo k jejich nedůvěře ke strojům s paralelní kinematikou. Následkem pak byl pokles zájmu o tyto stroje. Vhodnou cestou by mohlo být spojení a využití jak sériové, tak paralelní kinematiky. Další možností je vytvoření a zejména využití tzv. hybridní kinematiky podobné té, která se již v dnešní době vyskytuje u robotu RVL od firmy Reis robotics.

Shrňme-li všechna uvedená fakta, dojdeme k závěru, že vývoj v oblasti paralelních mechanismů stagnuje. Můžeme však doufat, že se v budoucnosti objeví nová konstrukční řešení, která by zabránila tomu, aby veškeré prostředky, které byly v tomto odvětví doposud využity, nebyly zbytečné.

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo poskytnout základní informace o vývoji paralelních kinematických struktur. Práce se zabývá jejich vývojem od počátku až do současnosti. Úvodní kapitola je věnována seznámení se s historií paralelních kinematických struktur a definicím základních pojmů. Další kapitola se věnuje porovnání vlastností paralelních a sériových struktur. Zachycuje především přednosti a nevýhody paralelních kinematických struktur. Třetí kapitola se zaměřuje na celkovou analýzu konstrukcí paralelních kinematik. V popředí zájmu této kapitoly jsou především hodnotící kritéria a komponenty pro paralelní kinematické

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

struktury. V závěru práce jsou uvedeny příklady konstrukcí a aplikací robotů s paralelní kinematickou strukturou. Po domluvě s vedoucím bakalářské práce je závěr práce doplněn o shrnutí současného stavu konstrukcí a aplikací robotů s PKS a jejich předpokládaný vývoj.

Průmyslové roboty s paralelní kinematickou strukturou se v současné době netěší přílišné oblibě. Zájem o tyto roboty klesá, a to zejména díky jejich vysokým pořizovacím nákladům v poměru k efektivnosti práce. Východiskem z této situace je zamření se na vývoj robotů s PKS s cílem eliminovat uvedené negativní stránky těchto strojů.



7. Použité zdroje

- [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] BONEV, Ilian. *Parallelic.org* [online]. 2003 [cit. 2012-02-02]. The True Origins of Parallel Robots.
Dostupné z WWW: <<http://www.parallelic.org/Reviews/Review007.html>>.
- [3] MERLET, Jean-Pierre. *Parallel Robots*. Francie: Springer, 2006. 383 s.
ISBN 0-7923-6308-6.
- [4] KNOFLÍČEK, Radek. *Historie hexapodů*. MM spektrum [online]. 2003, 11. [cit. 2012-18-02].
Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/historie-hexapodu.html>>.
- [5] *Sériová a paralelní kinematika*. Automatizace [online]. 2006, 49, 10. [cit. 2012-10-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1476>>.
- [6] *Compleetbewaterken met Mori Seiki NT1000*. metaalmagazine.nl [online]. 2010, [cit. 2012-25-03].
Dostupné z WWW: <<http://www.metaalmagazine.nl/nieuws/id12873-compleetbewaterken-met-mori-seiki-nt1000-.html>>.
- [7] 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 WWW: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Aplikace_Robotu.pdf>.

- [8] BONEV, Ilian. Parallelic.org [online]. 2006 [cit. 2012-10-04]. Delta Parallel Robot - the Story of Success.
Dostupné z WWW: <<http://www.parallelic.org/Reviews/Review002.html>>.
- [9] *Parallel Kinematic Robots*. Robotics.org [online]. 2002 [cit. 2012-15-04].
Dostupné z WWW: <http://www.robotics.org/content-detail.cfm/I%20Industrial-Robotics-News/Parallel-Kinematic-Robots/content_id/989>.
- [10] HANÁČEK, Luděk. *Komponenty pro paralelní kinematické struktury*. MM spektrum [online]. 2002, 4. [cit. 2012-18-04].
Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/komponenty-pro-paralelni-kinematicke-struktury.html>>.
- [11] Fanucrobotics [online]. 2002, [cit. 2012-02-05].
Dostupné z WWW: <<http://www.fanucrobotics.cz>>.
- [12] ABB [online]. 2010 [cit. 2012-02-05].
Dostupné z WWW: <<http://www.abb.com>>.
- [13] Adept technology. *User's Guide of Quattro s650 Robot* [online]. 2010, [cit. 2012-02-05]. Dostupné z WWW:
<http://www1.adept.com/main/ke/data/Archived/Quattro/sQuattro_UG.pdf>
- [14] Codian-robotics [online]. 2010 [cit. 2012-07-05].
Dostupné z WWW: <<http://codian-robotics.com>>.