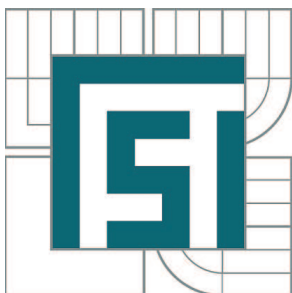


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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 VÝROBNÍCH STROJŮ

PRODUCTION MACHINES PARALLEL KINEMATICS STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ CVEJN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK KNOFLÍČEK, Dr.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Cvejn

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 výrobních strojů

v anglickém jazyce:

Production machines parallell kinematics structures

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle bakalářské práce:

Cíle je získat přehled ve schématech PKS výrobních strojů, které jsou novým typem ve výrobní technice (obráběcích a tvářecích strojích). 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 2010/2011.

V Brně, dne 30.11.2010

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 1
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zmapování současné situace výrobních strojů s paralelní kinematikou. Dále popisuje a srovnává hlavní představitele tohoto technického odvětví. Důraz byl kladen na jejich historický vývoj, konstrukci, současné praktické využití a plány do budoucnosti.

Abstract

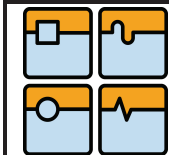
This thesis sets out to map nowadays situation of parallel kinematics structures of production machines. It describes and compares also the main leaders of this technical branch. Emphasis is put on their historical evolution, design, current practical use and future plans.

Klíčová slova

Paralelní kinematika, výrobní stroj, mechanismus, tripod, hexapod, delta

Keywords

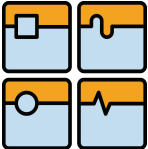
Parallel kinematics, production machine, mechanism, tripod, hexapod, delta



Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

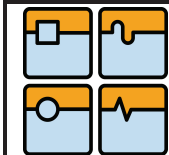
Str. 2

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 3
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Bibliografická citace:

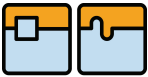
CVEJN, J. *Paralelní kinematické struktury výrobních strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..



Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Str. 4

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Paralelní kinematické struktury výrobních strojů** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.“

V Brně dne 26.05.2011

Podpis:

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

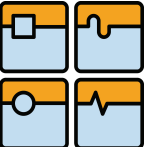
Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr. a celému kolektivu Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky za cenné rady při vypracování bakalářské práce.

1. Paralelní kinematické struktury výrobních strojů.....	10
1.1. Definice základních pojmů.....	10
1.2. Vznik a vývoj paralelních mechanismů.....	12
1.2.1. Úvod.....	12
1.2.2. První paralelní kinematiky.....	12
1.2.3. Užití paralelních kinematik.....	14
1.2.3.1. Simulátory s paralelní kinematikou.....	14
1.2.3.2. První obráběcí stroje a průmyslové roboty s paralelní kinematikou.....	16
1.2.3.3. Vývoj po roce 1990.....	18
1.2.3.4. Renesance paralelních kinematik v posledních letech.....	19
1.3. Porovnání sériových a paralelních kinematik.....	21
1.3.1. Sériové kinematiky.....	21
1.3.1.1. Stavba.....	21
1.3.1.2. Principiální výhody a nevýhody.....	22
1.3.2. Paralelní kinematiky.....	22
1.3.2.1. Definice.....	22
1.3.2.2. Stavba.....	23
1.3.2.3. Principiální výhody a nevýhody.....	23
1.3.3. Porovnání vlastností strojů se sériovou a paralelní konstrukcí.....	24
2. Uplatnění paralelních kinematik v praxi.....	25
2.1. Přehled technologických operací využívaných paralelními kinematikami v oblasti VS a PRaM.....	25
2.2. Oblasti uplatnění.....	25
3. Analýza konstrukcí paralelních kinematik.....	27
3.1. Hodnotící kritéria.....	27
3.1.1. Počet stupňů volnosti.....	27
3.1.2. Počet a uspořádání kloubových bodů na plošině a bázi.....	27
3.1.3. Druh, počet a pořadí kloubů ve vodícím řetězci.....	28
3.1.4. Počet a uspořádání ramen.....	29
3.1.5. Druh a umístění pohonu.....	30
3.1.6. Klasifikátory.....	30
3.2. Základní stavební prvky paralelních mechanismů.....	31
3.2.1. Klouby.....	31
3.2.2. Ramena.....	31
4. Analýza stavu současného poznání v oblasti paralelních kinematik.....	33
4.1. Transformace souřadnic.....	33
4.2. Kinematika.....	34
4.2.1. Kinematická analýza.....	34
4.2.2. Kinematická syntéza.....	34
4.3. Diferenciální kinematika.....	35
4.4. Statika a tuhost.....	35
4.4.1. Určení rovnovážných sil.....	35
4.4.2. Analýza tuhosti.....	35
4.5. Dynamika.....	35
4.5.1. Dynamická analýza.....	35
4.5.2. Dynamická syntéza.....	36
4.6. Přesnost polohování.....	36
4.6.1. Analýza citlivosti.....	36

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

4.7. Shrnutí poznatků.....	36
5. Předpokládaný vývoj a trendy ve výzkumu.....	37
6. Závěr.....	37
7. Použité zdroje.....	38
8. Seznam příloh.....	39

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

1. Paralelní kinematické struktury výrobních strojů

1.1. Definice základních pojmů [1]

Báze: je členem mechanismu, který nevykonává žádný pohyb. Tvoří tedy tzv. rám, základnu, nebo pevnou základnu.

Geometrická odchylka: je odchylka mezi požadovanými a skutečnými geometrickými parametry prvku.

Hexapod: typ paralelní kinematiky s šesti stupni volnosti, platforma je spojena s bází přes šest vodících řetězců. Ve smyslu polohové techniky je hexapod prostorové hnací ústrojí schopné konat veškeré prostorové pohyby.

Hybridní kinematika: je tvořena z uzavřených i otevřených kinematických řetězců nebo jen hnací člen unáší nějaký jiný hnací člen.

Kinematika: kinematika je obecně nauka o pohybu. V této práci se však myslí jako mechanismus, hnací ústrojí, sloužící ke změnám nebo k přenosu pohybu a sil, případně kroutících momentů. Kinematika je tvořena nejméně třemi členy, první je základna.

Kinematická dvojice: je tvořena dvěma členy, které jsou navzájem pohyblivě vázány, resp. spojeny, a to tak, že pohyblivost jednoho vůči druhému je omezena.

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

Kinematická syntéza mechanismů: je inverzní úloha ke kinematické analýze. Na základě předepsaného pohybu hledáme souřadnice hnací souřadnice. Je podstatně obtížnější než analýza mechanismů.

Kinematický řetězec: 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 takový řetězec, jehož některé členy jsou připojeny pouze jednou kinematickou dvojicí.

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

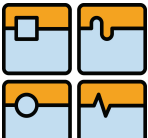
Kloub: je technické provedení kinematické dvojice.

Kloubový bod: nebo tzv. otočný bod představuje střed otáčení rotačního kloubu. Respektive průsečík os otáčení rotačního kloubu s více jak jednou osou rotace. Tj. například kardanův nebo sférický kloub.

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

Mechanismus: je mechanické zařízení, sloužící k transformaci pohybu, nebo přenosu sil. Zařízení je tvořeno soustavou vzájemně pohyblivých těles, z nichž jedno je k ostatním nepohyblivé, nepohyblivé těleso je označováno jako rám.

Paralelní kinematika: výstižnějším označením je mechanismus s paralelní kinematickou strukturou, ale běžně je používáno paralelní mechanismus, nebo paralelní kinematika. Jde o

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

mechanismus s uzavřeným kinematickým řetězcem, který je složen z báze, platformy a nejméně dvou vzájemně nezávislých vodících řetězců. Vodící řetězce jsou vůči bázi a platformě řazeny paralelně.

Platforma: tzv. plošina, pohyblivá plošina, je koncový člen mechanismu, je polohován vzhledem k bázi prostřednictvím vodících řetězců.

Počet stupňů volnosti mechanismu: je mírou pohyblivosti mechanismu. Určuje počet složek pohybu (translace a rotace), jež je platforma mechanismu schopna realizovat.

Pohyblivost: vyjadřuje omezení pohybu soustavy stykovými vazbami.

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

Spojnice: pasivní vzpěra s neměnnou délkou, na jejichž koncích jsou umístěny klouby.

Tripod: je paralelní kinematika s třemi stupni volnosti, u které je platforma zpravidla spojena s bází pomocí tří poháněných vodících řetězců.

Vodící řetězec: představuje spojení báze s platformou. Toto spojení je realizováno pomocí nejméně jednoho hnacího členu a dvou kloubů. Vodící řetězec tvoří vzpěra, nebo vzpěra a spojnice. Tripod má základnu s platformou spojenou pomocí tří vodících řetězců, u hexapodu je vodících řetězců šest.

Vzpěra: Pro předkládanou práci představuje vzpěra aktivní část vodícího řetězce paralelní kinematiky. Z hlediska polohové techniky je vzpěra hnací člen. Stejný význam mají i pojmy rameno nebo servovzpěra.

Redundantní paralelní kinematiky: je paralelní kinematika, kde počet pohonů je vyšší než počet stupňů volnosti, tj. obsahuje redundantní (nadbytečné) pohony.

1.2. Vznik a vývoj paralelních mechanismů

1.2.1. Úvod [1],[2],[3]

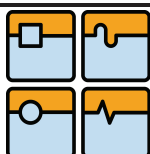
Dnes již nezjistíme, kdo a kdy poprvé přemýšlel o konstrukci paralelní kinematiky, nebo jí popsal. Dříve se myslelo, že první paralelní struktury vznikly ve Velké Británii, přesněji **oktahedrál ní hexapod**, vymyšlený doktorem Ericem Goughem v roce 1947, stroj fungoval v roce 1954. Postupně se ale ukázalo, že teoretickými úvahami se zabýval již anglický geometr Christopher Wren v roce 1645, poté v roce 1813 zkoumal Cauchy tuhost tzv. kloubového octahedronu. V devatenáctém století se zabývali sférickým pohybem paralelního mechanismu i francouzští geometři Lebesgue a Bricard. Zarážející je Homérův popis krácejícího tripodu v Iliadě datované zhruba 800 let před naším letopočtem. Takže samotná myšlenka na tento typ mechanismu může být ještě podstatně starší.



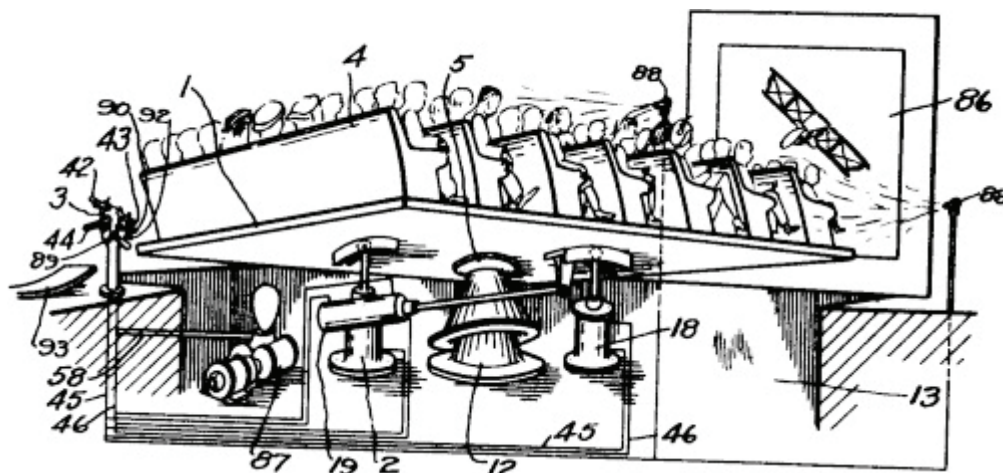
Obr. 1.1: Krácející tripod podle novely Válka světů r. 1898 [4].

1.2.2. První patentované paralelní kinematiky [1],[2],[3]

První dochovaná zmínka o použití paralelního kinematického mechanismu se datuje v říjnu 1928 v USA (obr. 1.2). James E. Gwinnett si přihlásil na patentovém úřadě první pohyblivou plošinu tzv. oxymoron. Patent byl přijat v roce 1931. Měla se uplatnit v zábavním průmyslu. Šlo o sférickou paralelní kinematiku. Uprostřed byla uložena na sférickém kloubu, natáčela se pomocí 3 vzduchových válců. Pravděpodobně nebyl nikdy postaven.

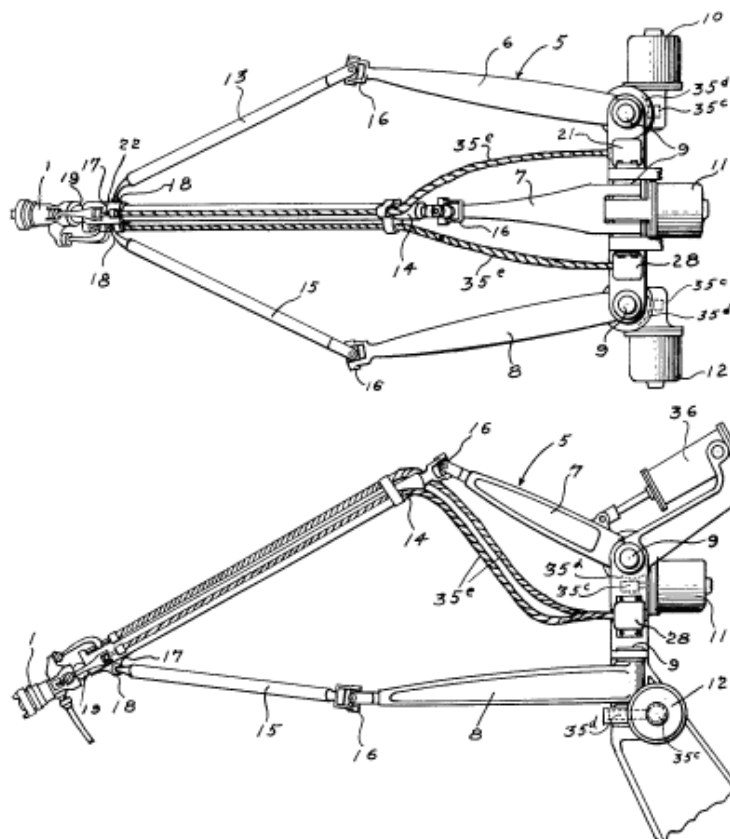


BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



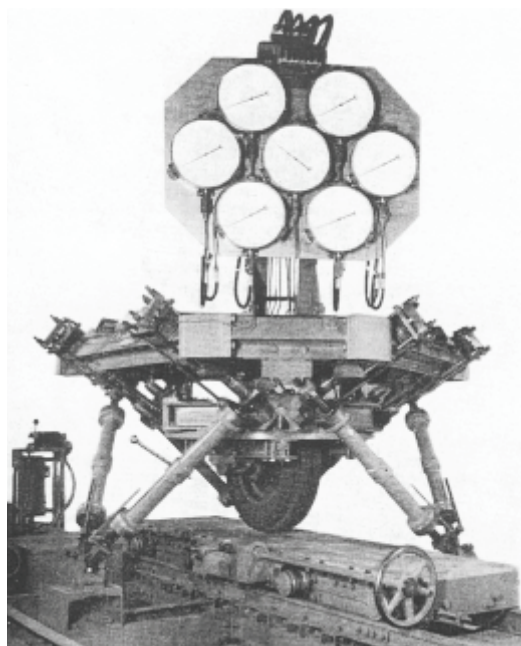
Obr. 1.2: První patentovaný prostorový mechanismus [2].

Willard Pollard a Harold Roselund v roce 1938 navrhli paralelní stříkací robot pro DeVilbiss Co. (obr 1.3). Šlo pravděpodobně o vůbec prvního průmyslového robota. Robot měl pět stupňů volnosti. Základna s platformou (stříkací hlavici) byla spojena pomocí tří vodících řetězců. Ramena byla řízena pomocí tří motorů umístěných na bázi. Koncový efektor (stříkací hlavice) byl natáčen pomocí motoru umístěného na bázi a spojeného s hlavicí otočnými flexibilními kabely. Patent byl vydán v červnu 1942, paralelní robot nebyl nikdy postaven.



Obr. 1.3: Pollardův robot s paralelním uspořádáním ramen [2].

V roce 1947 Dr. Eric Gough začal stavět svůj oktahedrální hexapod s proměnlivou délkou ramen. Stavěl pro firmu Dunlop Rubber Co. v Anglii. Hexapod sloužil od roku 1954 ke zkoumání vlastností pneumatik zatížených silami, které vznikají při přistávání letadla (obr. 1.4). Stroj byl později rekonstruován a řízen digitálně, v roce 2001 byl přemístěn do muzea ve Wroughtonnu (Anglie).



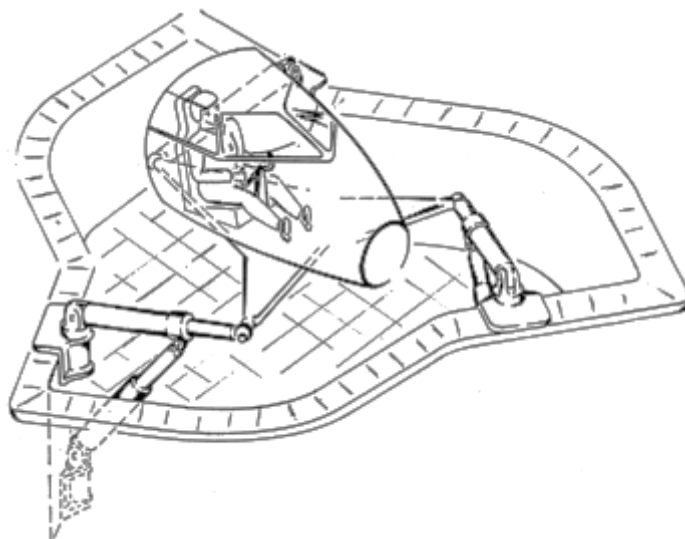
Obr. 1.4: Goughův hexapod pro měření sil [2].

1.2.3. Užití paralelních kinematik

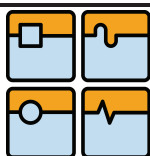
1.2.3.1. Simulátory s paralelní kinematikou

Mezi jednu z prvních aplikací patří simulátory, jak vojenské, letecké, závodní, nebo pro zábavní průmysl.

Významným rokem se stal 1965, objevil se tzv. Stewartův spis. Autor popisuje užití hexapodu u leteckého simulátoru (obr 1.5). Plošina nebyla nikdy postavena, ale měla velký vliv na pozdější konstrukce. Autor se dále ve spisu zabýval užitím paralelních kinematik pro vrtací a frézovací operace. Velmi dobře se mu tak povedlo odhadnout budoucí vývoj.

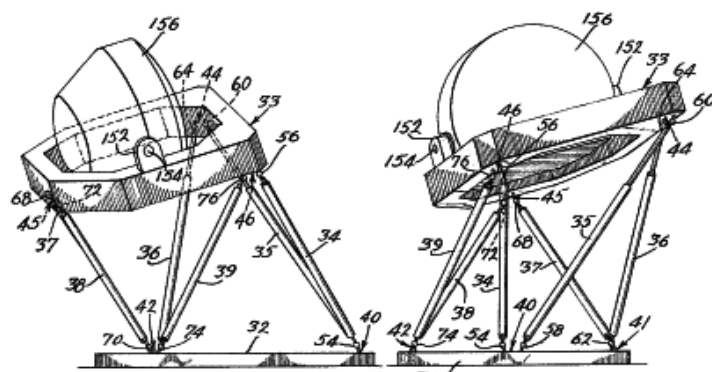


Obr. 1.5: Schéma Stewartova simulátoru [2].



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Simulátory byly stavěny na principu oktahedrálního hexapodu (obr. 1.6, obr. 1.7). V roce 1962 dostal Klaus Cappel, zaměstnanec Franklinova institutu výzkumných laboratoří ve Philadelphii, za úkol zlepšit vlastnosti vibrační plošiny MAST. Přidal další čtvrté rameno, což působilo selhání platformy. Zvolil tedy oktahedrální konstrukci (nezávisle na patentu Dr. Gougha a ještě nevydaném Stewartově spisu). Jeho patent byl uznán v roce 1971 jako "Pohyblivá plošina".



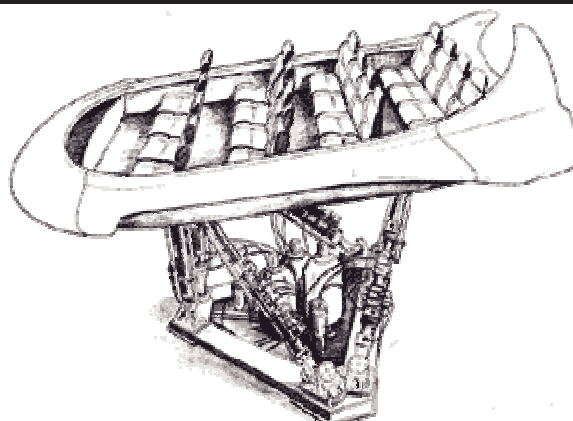
Obr. 1.6: Schéma z patentu pohyblivé plošiny, podáno v roce 1967 [2].

Již několik let před Goughovým hexapodem se začali objevovat plošiny MAST - "multi axis simulation table" neboli "shake table". Jde o jednodušší hexapod s podstatně menším pracovním prostorem než oktahedrální hexapod doktora Gougha. Franklinův institut mezitím navrhl a postavil 3 oktahedrální simulátory. První byl simulátor vrtulníku pro Sikosky Aircraft Division of United Technologies, další simulátor vrtulníku postavil Rock Island Arsenal. Poslední zakoupil Daimler-Benz, zkoušeli výdrž automobilu při intenzivních dlouhotrvajících vibracích.



Obr. 1.7: Moderní letový simulátor postavený na plošině oktahedrálního hexapodu [5].

Od té doby nacházely paralelní kinematické mechanismy uplatnění především v oblasti leteckých simulátorů a základního výcviku pilotů. Dále simulátory lodí, vozidel, raketoplánu NASA. V roce 1979 byl do provozu uveden simulátor vojenského vozidla, v roce 1980 Daimler-Benz začal vyvíjet simulátor jízdních vlastností automobilu. V posledních 15-ti letech se začali objevovat zábavní atrakce s prostorovou projekcí a šesti stupni volnosti (obr 1.8).



Obr. 1.8: Schéma zábavní plošiny firmy Pragolet, plošina bývá přímo spojena s projekčním sálem, pro umocnění zážitku [6].

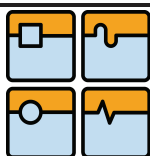
1.2.3.2. První obráběcí stroje a průmyslové roboty s PK

V sedmdesátých letech minulého století se začalo uvažovat o využití paralelních mechanismů i v oblasti výrobních strojů, robotů a manipulátorů. Mezi průkopníky patřili vědci z Novosibirského elektrotechnického institutu. Pokoušeli se použít hexapod jako výrobní stroj. Do konce osmdesátých let vyvinuli několik prototypů, ale díky drastickým změnám v sovětském průmyslu byl výzkum a vývoj redukován. Obdobný vývoj byl zaznamenán všude ve světě. Během devadesátých let bylo vyrobeno několik různých prototypů, naráželi na překážky hardwarového a softwarového vybavení řídicích systémů. Vyřešit tyto problémy se podařilo až s rozvojem polovodičové techniky a výkonných mikroprocesorů. Díky tomu začal stoupat zájem výrobců o paralelní uspořádání výrobních strojů [1],[2].

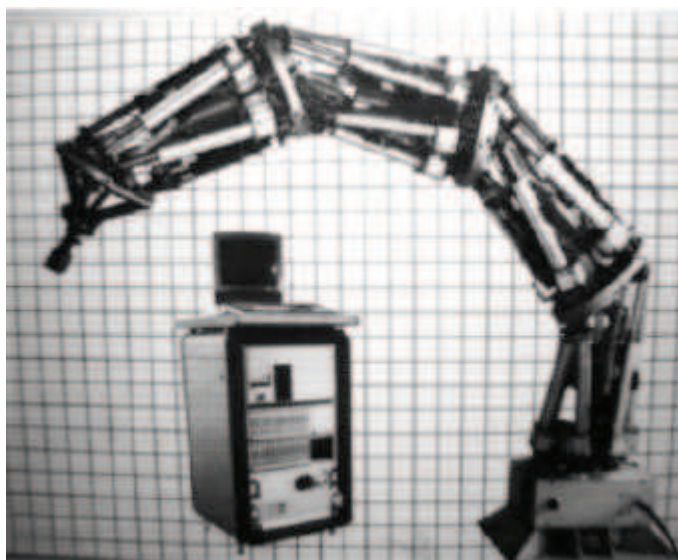
V roce 1986 Karl-Erik Neumann podal patent robotu Tricept. I když tento robot má hybridní kinematiku, jednalo se o první komerčně vyráběný a prodávaný robot s polohovacím ústrojím založeným na paralelní kinematice. Tricept již nevyrábí firma SEF roboter, ale například PKM tricept sídlící ve Španělsku. Vyrábí několik řad obráběcích strojů a manipulátorů založených na kinematice patentu Tricept (obr 1.9). Tricept má díky zvolené konstrukci poměrně nižší opakovatelnou přesnost $\pm 0,02\text{mm}$, ale je schopen vyvinout velké přitlačné síly [1],[2],[7].



Obr. 1.9: Představitel robotu se 6-DOF Tricept T606 (PKM Tricept) [8].

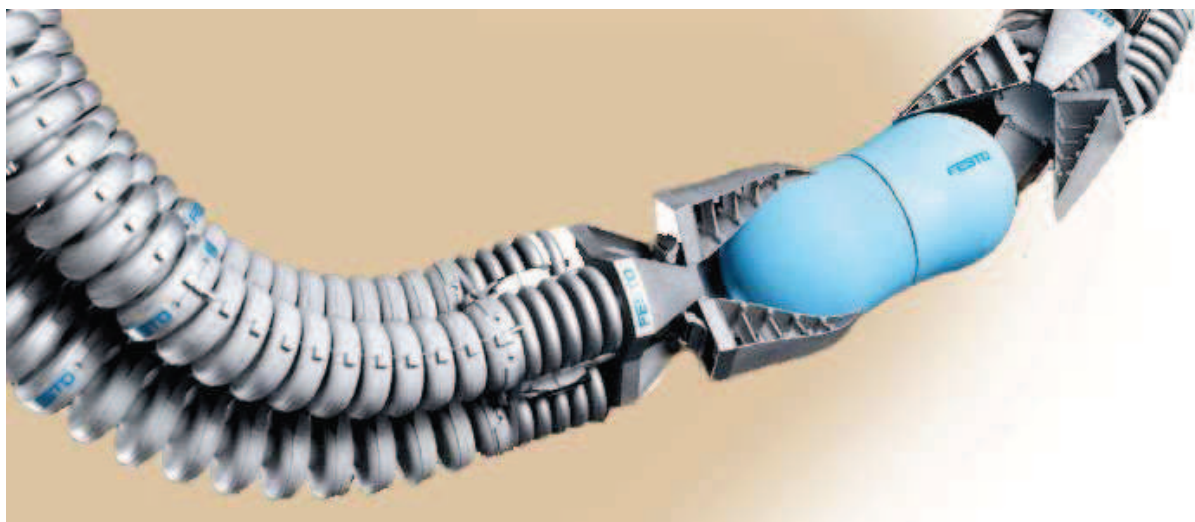


Další směr rozvoje paralelních kinematik se zaměřil na vysokou pohyblivost a velký pracovní prostor, bylo napojeno několik paralelních kinematik na sebe. Tak vzniklo uspořádání podobné slonímu chobotu. Jedná se o velmi výhodné upořádání. Parametry nosnost/hmotnost a zastavěná plocha/pracovní prostor jsou u tohoto uspořádání excelentní. Nevýhodou je velmi složité řízení. Jedním z prvních byl LX4 (Logabex) hmotnost/nosnost 120/75kg.



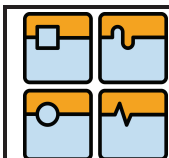
Obr. 1.10: Robot LX4 (Logabex) [1].

Jedním z posledních zkonstruovaných je Bionic Handling Assistant (německé FESTO). Jde o velmi pokročilý model manipulátoru. Pro své polohování využívá nafukovatelné plastové vaky spojené do čtyř vodících řetězců. Nemá žádné ocelové součásti. Celé rameno je realizováno pomocí 3D tisku z polyamid polymeru (obr 1.11) [1],[2],[7],[9].



Obr. 1.11: Bionic Handling Assistant (FESTO) [9].

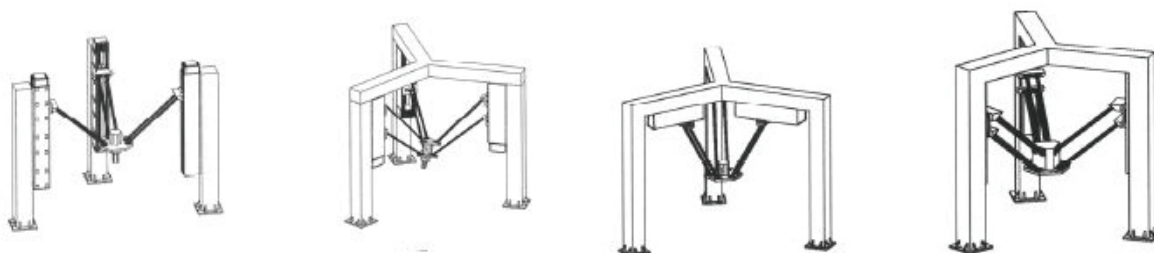
Rozvoj zaznamenaly i průmyslové manipulátory. V roce 1989 Reymond Clavel představil manipulátor se třemi stupni volnosti Delta. Dnes masově vyráběný ABB FlexPicker (obr. 1.12). V roce 1990 rozšířil Pierott konstrukci delta o další tři řetězce na typ Hexa se šesti stupni volnosti [1],[7].



Obr. 1.12: Delta robot, IRB 340 FlexPicker (ABB) [10].

1.2.3.3. Vývoj po roce 1990

V devadesátých letech a na začátku nového tisíciletí dosáhla popularita výrobních strojů s paralelní kinematikou vrcholu. Zájem výrobců o odvětví začal dynamicky stoupat. Proto uvedu jen několik nejúspěšnějších konstrukcí, výrobců a milníků v produkci a konstrukci paralelních strojů.

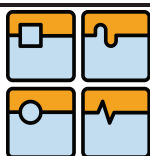


Obr. 1.13: Možná uspořádání koncepce Linapod [7].

V roce 1990 vznikl v Německu výzkumný projekt Dynamil (Dynamisch Maschinen in Leichtbauweise) při vysokých školách ISW Stuttgart a WZL Aachen. V letech 1997 až 2000 běžel projekt Dynamil II. Druhého projektu se účastnily tři univerzity a 19 výrobců z Německa. Cílem bylo vyvinout vysoce dynamické obráběcí stroje a v co možná nejkratší době je uvést do výroby. Výsledkem byly stroje Dyna-M, Linapod (obr. 1.13), Hexact (obr. 1.14) a Mikromat 6X HEXA (obr. 1.14).



Obr. 1.14: stroje Hexact a Mikromat 6X HEXA [7].



V roce 1994 na mezinárodní výstavě IMTS v Chicagu bylo představeno několik obráběcích strojů s paralelní kinematikou. Variax (Giddings & Lewis), Vertical Octahedral Hexapod1000 (Ingersoll) a G1000 (Geodetic).

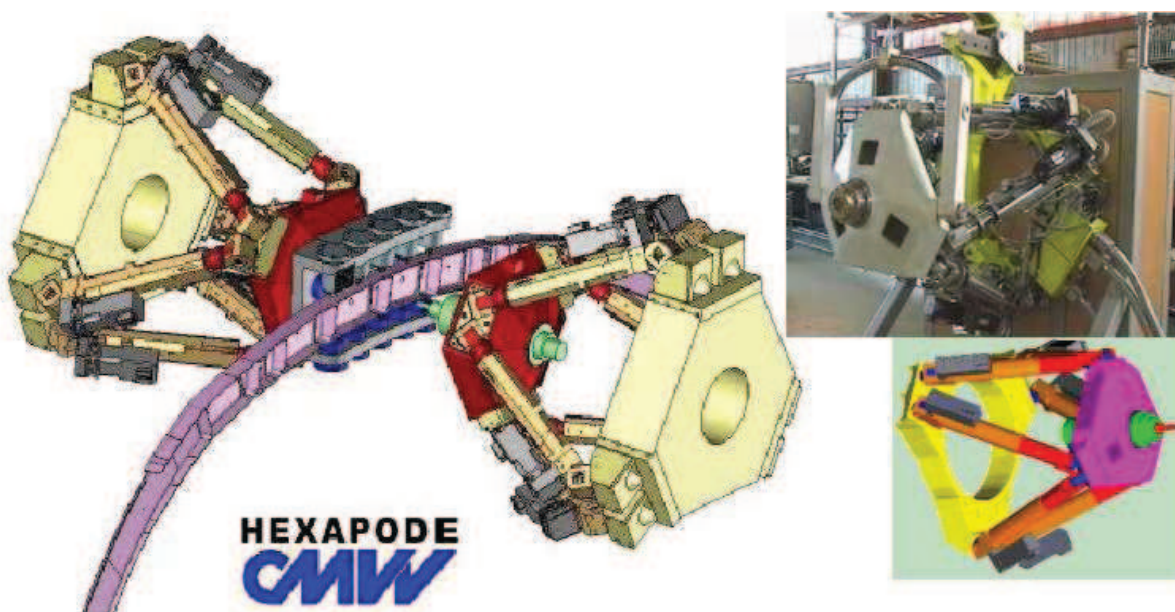
Dále se objevily stroje HOH600 (Ingersoll), Urane SX (Renault Automation) obrábění dílů z lehkých slitin, OSP-U 100 CNC (Okuma) pro obrábění obecných tvarů, HexaM (Toyoda), Tornado 2000 (Hexel), Kinematic SKM 400 (Heckert).

Hexapody HOH600 a Mikromat 6X mají parametry (obr. 1.14):

- až 40000 ot/min pracovního vřetene, výkony 7,5-52kW
- posuvové rychlosti při obrábění 40m/min (odpovídá cca 3-5g to je jako vrtat 16 děr za 5,8s)
- přesnost je 0,01mm
- obrobky mají hmotnost i 1500kg
- výměna nástroje je provedena za 3,5s.

Další oblastí, kde se výrobní stroje pokusili uspět, byla modifikace velkých obráběcích strojů se sériovou kinematikou použitím přídavných hexapodů. Tyto stroje měli, sloužit pro obrábění tvarových ploch. Například Hexapode - CMW 300 (CMW) (obr. 1.15).

Úplnou novinkou byly redundantní paralelní kinematické struktury.



Obr. 1.15: Hexapod - CMW 300 (CMW) obráběl například toroid tokamaku ITER [11].

1.2.3.4. Renesance paralelních kinematik v posledních letech

S dnešními moderními počítači, senzorikou a moderní heuristikou řízení, jsme schopni velice přesně paralelní kinematické systémy řídit, jsme schopni dosáhnout velmi dobrých výsledků v opakovaném polohování, odchylka bývá uváděna v rozmezí $\pm 0,002\text{mm}$. Přesto se nezdá, že by docházelo k výraznému oživení zájmu o obráběcí stroje s čistě paralelní nebo hybridní kinematikou. Jednoduše se v minulém desetiletí neosvědčili. U průmyslových manipulátorů je situace jiná zejména pro relativně vysoká dosažitelná zrychlení. Uplatnění nachází především na třídících linkách. Mnoho firem dnes staví manipulátory s konstrukcí delta.

Na veletrhu EMO 2009 vystavovali, jen německá firma METROM a thaiwanská Leadwell. Metrom vystavil pětiosý obráběcí stroj P2000 (obr. 1.16), Leadwell X-700R (obr. 1.16) [12],[13],[14]..

P2000

- všechny osy jsou vybaveny kuličkovými šrouby
- posuvová rychlost při obrábění je 45ms^{-1} , zrychlení 10ms^{-1}
- maximální hmotnost obrobku je 7000kg
- přesnost polohování je $\pm 0,01\text{mm}$ a opakovatelnost $\pm 0,003\text{mm}$

X-700R

- jde o stroj s hybridní kinematikou, jedná se v podstatě o velmi dynamický tripod s vřetenem umístěným na konci, vřeteno přidává další 2 DOF
- pracovní vřeteno pracuje při 30000ot/min
- stroj dosahuje zrychlení až 30ms^{-1}

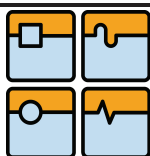


Obr. 1.16: Schéma X-700R (LeadWell), P2000 (METROM) [12],[13].

V České republice byl v roce 2003 vyvinut Trijoint 900H (KOVOSVIT MAS a.s.), stroj byl založen na hybridní kinematice. I přes velmi dobré technické parametry a několik ocenění za inovaci v oblasti obráběcích strojů. Nebyl nikdy prodán a nasazen, jako plnohodnotné obráběcí centrum (obr. 1.17).



Obr. 1.17: Trijoint 900H [18].

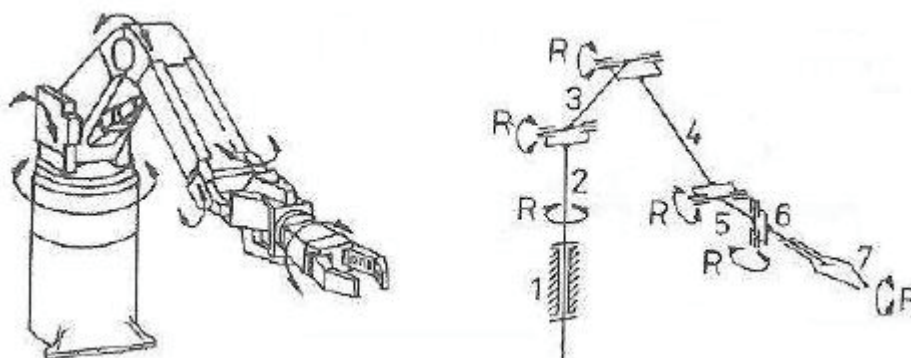


1.3. Porovnání sériových a paralelních kinematik

1.3.1. Sériové kinematiky

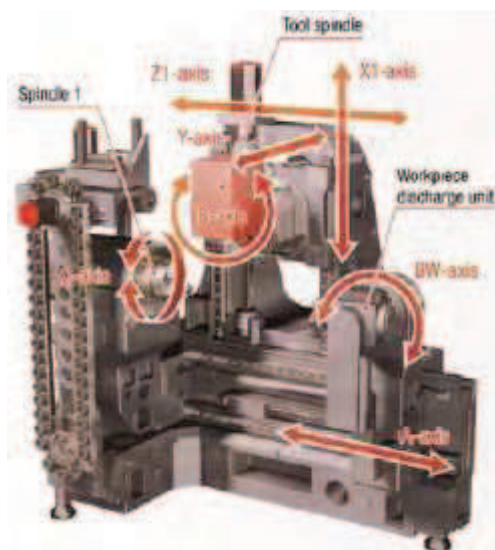
1.3.1.1. Stavba

Sériové kinematiky se uplatňují nejen v oblasti výrobních strojů, ale také jako výrobní roboty a manipulátory. Charakteristickým znakem je jejich postupné uspořádání kinematických dvojic, do otevřeného kinematického řetězce, jako u lidské ruky. Strukturu je možné názorně vysvětlit na příkladu průmyslového robota (obr. 1.18), kde se výsledný pohyb skládá z rotace nebo translace, na sebe navazujících členů. Jednotlivá ramena se pohybují nezávisle.



Obr. 1.18: Sériové uspořádání kinematického řetězce [1].

Nosné soustavy současných obráběcích strojů se sériovou kinematikou jsou rovněž vytvářeny stavbou jednoho uzlu na druhý. Osy Z, Y, W jsou nastavěny na sebe, pak osa Z unáší osu Y a W. Konstrukce těchto strojů tedy vyžaduje, aby spojení jednotlivých os byla značně tuhá. Všechny pohyby při obrábění totiž koná nástroj. Dimenzování jednotlivých os tedy podléhá tuhosti a faktu, že díly jsou namáhány převážně na ohyb a krut. Tím celá konstrukce nabývá na hmotnosti a tuhost koncového členu, který nese platformu (stůl, či vřeteno) je díky tomu snížena (obr. 1.19).



Obr. 1.19: Sériová nosná struktura NT1000 (Mori Seiki) [14].

1.3.1.2. Principiální výhody a nevýhody

Výkonové parametry dnešních výrobních strojů se sériovou kinematikou se již přibližují teoreticky dosažitelné hranici. To díky vývoji trvajícím několik desetiletí a tlaku na produktivitu strojů (vysokorychlostní obrábění, flexibilita, vedlejší výrobní časy...) Tyto hranice lze spatřovat především v následujících aspektech, které nemohou být nikdy odstraněny:

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

1.3.2. Paralelní kinematiky

1.3.2.1. Definice

Vymezení obecného pojmu paralelní kinematika bylo již uvedeno v kapitole 1.1. Poněkud zjednodušeně jako: "Jde o mechanismus s uzavřeným kinematickým řetězcem, který je složen z báze, platformy a nejméně dvou vzájemně nezávislých vodících řetězců." V tomto odstavci se tedy zaměřím na podrobnější popis s ohledem na využití PM v oblasti výrobních strojů, ale i průmyslových robotů a manipulátorů.

Obecná definice zní mechanismus s uzavřenou smyčkou kinematického řetězce, tato definice ale zahrnuje například i redundantní mechanismy (tj. mechanismus s větším počtem akčních členů než je počet řízených stupňů volnosti). Proto byla stanovena kritéria přesně vymezující co je a není za paralelní kinematický mechanismus v oblasti výrobních strojů a průmyslových robotů považováno. PM má následující charakteristiky:

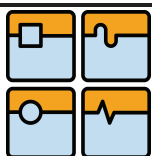
- Paralelní kinematický mechanismus je tvořen bází, platformou a vodícími řetězci.
- Platformu podpírají alespoň dva vodící řetězce, přičemž každý z těchto řetězců obsahuje alespoň jeden jednoduchý akční člen (člen umožňující pohyb s 1 DOF)
- Počet akčních členů je stejný jako počet stupňů volnosti platformy.
- Pohyblivost mechanismu je nulová v případě, že akční členy jsou zablokovány proti pohybu.

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

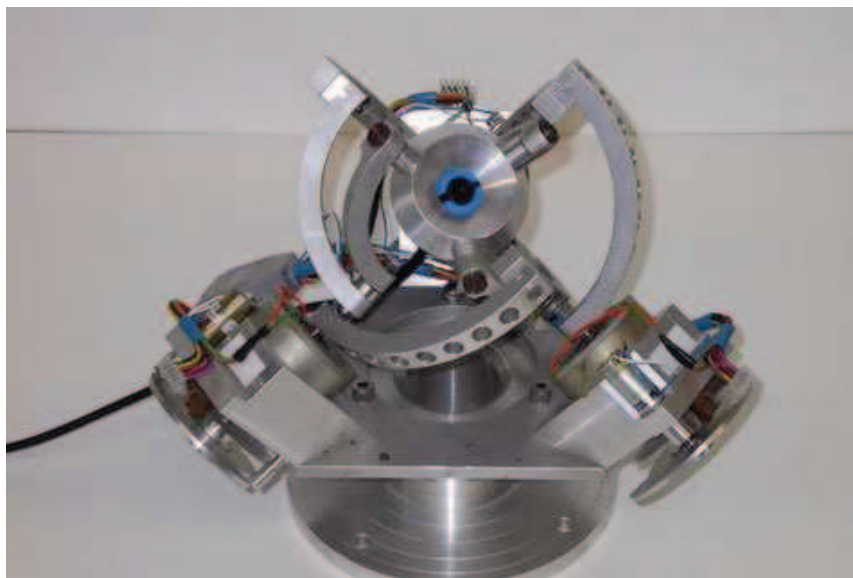
- **Plně paralelní mechanismus:** paralelní mechanismus s n DOF platformy (koncového efektoru) připojeného k základně n nezávislými vodícími řetězci, kde každý má jeden jednoduchý akční člen (obr. 1.20).



Obr. 1.20: PKS typ F-200i (FANUC) [15].



- **Hybridní paralelní mechanismus:** paralelní mechanismus s n DOF platformy (koncového efektoru) připojeného k základně $m < n$ samostatnými vodícími řetězci, kde každý má jeden nebo více akčních členů (obr. 1.9, 1.16).
- **Orientační mechanismus:** paralelní mechanismus, pro který jsou všechny body na pohyblivé plošině popsány dráhami a všechny tyto dráhy leží na soustředných kulových plochách (obr. 1.21).



Obr. 1.21: Orientační mechanismus typ Agile eye [16].

1.3.2.2. Stavba

Množství variant různých konstrukcí je opravdu nepřehledné. Jako typická konstrukce se proto uvádí hexapod (obr. 1.21). Hexapod je mechanismus, u kterého šest paralelních vodících řetězců (ramen) s proměnnou délkou spojuje bázi s platformou. Spojení mezi bází a rameny jsou realizována pomocí kardanových kloubů a spojení mezi platformou a rameny pomocí sférických kloubů (obr. 3.7). Díky tomuto uspořádání má platforma šest stupňů volnosti (posouvá se i rotuje kolem všech os). Výsledný pohyb platformy vzniká tedy součinností všech ramen (tj. jejich spojitou změnou délky). Z toho vyplývá, že pohyb jednoho ramene ovlivňuje polohu všech ostatních, jedná se tedy o nelineární prostorový systém nerespektující princip superpozice dílčích pohybů. To je typickou vlastností všech paralelních kinematických struktur.

1.3.2.3. Principiální výhody a nevýhody

Paralelní kinematický mechanismus je namáhán především na tah a tlak. Teoreticky by měl mít násobně vyšší tuhost k hmotnosti oproti sériovému mechanismu. Mezi největší problémy patří: tření, délková nestálost ramen, tepelné dilatace, kalibrace mechanismu.

- **tření:** tření je pro kulové klouby PKM zásadní problém. Koeficient se může pohybovat i kolem hodnoty 0,8, což má za následek značné axiální vychýlení ramen, to velmi ovlivňuje opakovatelnou přesnost. Použitím keramických materiálů a speciálních lubrikantů snižujeme hodnotu tření pod hodnotu 0,2.
- **délky ramen:** dlouhé tenké díly jsou nestálé k rozměrové nestálosti v důsledku působení tlaku či tahu. S rostoucí délkou hrozí také ztráta vzpěrné stability.
- **tepelné dilatace:** s přírůstkem rychlosti vřeten stoupá i dynamický tepelný přírůstek. Dlouhá ramena jsou velice citlivá na změny teploty, jednak se zvyšuje nepřesnost

stroje, ale zvyšuje se i riziko ztráty vzpěrné stability. Proto je nutno ramena v reálném čase monitorovat a kompenzovat chyby řídicím systémem.

- **kalibrace:** nejde jen o délku ramen ale i o další specifické geometrické vlastnosti. U hexapodu musí být popsáno 132 parametrů, aby byly popsány geometrické charakteristiky celé konstrukce. Dodnes nebyl tento problém zcela dořešen.

1.3.3. Porovnání vlastností strojů se sériovou a paralelní konstrukcí

Vedle výhod mají paralelní kinematické konstrukce mechanismů i své nevýhody. V posledních letech se výrobní stroje s paralelní kinematikou dostaly do slepé uličky, výrobci upouštějí od dalšího vývoje. Naopak u průmyslových robotů a manipulátorů zažívají tyto konstrukce boom především pro relativně vysoká zrychlení koncového efektoru. Porovnání konstrukce se sériovou a paralelní kinematikou (tab. 1.1).

Vlastnosti	Paralelní kinematický mechanismus	Sériový kinematický mechanismus
Hmotnost pohybujících se částí	Nízká (pohybují se ramena a koncový efektor)	Vysoká (první osa nese všechny ostatní)
Dynamika x velikost stroje	Velmi vysoká i u velkých strojů	S velikostí se zhoršuje
Rychlost a zrychlení stroje	Relativně vysoké (10G)	Nízké
Tuhost	Vysoká (teoreticky jen tah a tlak)	Nízká (namáhání především na ohyb)
Vazba mezi osami	Jen malé vazby	Osy jsou spojené, vazby nelineární
Kinematika	Inverzní kinematika, transformace souřadnic je zcela nutná	Přímá kinematika
Řízení	Komplikované (ramena musí být řízena současně jako jeden celek)	Jednoduchá (regulují každou osu zvlášť)
Kalibrace	Prováděná až po montáži, komplikovaná	Jednoduchá
Šíření chyb	Chyba je průměrnou hodnotou chyb v jednotlivých osách	Chyby v osách se sčítají
Výroba a montáž	Mnoho zaměnitelných dílů, montáž jednoduchá	Neopakující se díly, montáž časově náročná
Flexibilita	vysoká (zaměnitelné díly)	Malá
Pracovní prostor / zastavěný prostor	vysoký	poměrně menší než u PKM
Pracovní prostor / hmotnost stroje	nízký	vyšší

Tab. 1.1: Porovnání paralelní a sériové kinematiky [1],[7].

2. Uplatnění paralelních kinematik v praxi

V devadesátých letech se rapidně zvýšil zájem o paralelní kinematiky. Především díky možnosti mechanismus řídit a teoretickým výpočtům, které slibovaly vysokou tuhost v porovnání se sériovou kinematikou. Postupem času s přibývajícimi poznatky z praktického nasazení se zjistilo, že tuhost není tak vysoká jak se očekávalo. Z praxe vyvstalo mnoho reálných problémů. Problémy byly především v oblasti teplotní dilatace, tudíž s přesností a zvýšeným zatížením prutů. Faktem je, že byla vyrobena celá řada prototypů, experimentálních strojů i stroje které se dočkaly masového nasazení v různých oblastech průmyslu. Bylo stále více patrné, že stroje s paralelní mechanikou nevytlačí sériové kinematiky z trhu. Proto většina výrobců omezila své aktivity v oblasti paralelní kinematiky.

2.1. Přehled technologických operací využívaných paralelními kinematikami v oblasti VS a PRaM

Díky velkému množství variant konstrukcí může být spektrum praktického uplatnění paralelních kinematik velice široké. S paralelními kinematikami se lze setkat především v oblasti obrábění (vysokorychlostní frézování), tváření, měřících strojů, průmyslových robotů a manipulátorů. Uvedu i prototypy, které prozatím nebyly nasazeny do výroby.

- **obráběcí stroje a obráběcí centra**
 - frézování a vrtání: HOH600, Tricent, Urane SX
 - obrábění laserovým paprskem: Georg V (IFW Hannover), Hexadiode (ZFS Uni Stuttgart)
 - vysokorychlostní obrábění: Ulyses (Flatronic), Quickstep HS 500 (Krause & Muser)
 - soustružení: V100 (Index-Werke)
- **tvářecí stroje:**
IWU Chemnitz vyvinuli několik prototypů použitelných především při volném tváření a ohýbání
- **měřící stroje:**
jednak nosiče detektorů pro prostorové snímání TM 1000 (Lapik), Equator 300 (Renishaw) a pak měřící plošiny MAST a Goughův octahedrální hexapod
- **průmyslové roboty a manipulátory:**
uplatnily se při technologických operacích, bodovém a laserovém svařování, obrábění vodním paprskem, odjehlování, tvarovém broušení
- **manipulačních operacích:**
polohování vzorků pro mikroskopy, polohování a upínání obrobků, ukládání SMD na plošné spoje (ABB FlexPicker), polohování kamer (Agila eye), polohování plošin simulátorů
- **další operace a výrobní prostředky:**
 - koncové efekторы: Robothand (CERT), Parallel Topology End Effector (InFACT Project)
 - přídatné hexapody s vysokootáčkovým vřetenem pro rozšíření možností velkých obráběcích strojů: Hexapode CMW 300 - Francois Wildenberg)

2.2. Oblasti uplatnění

Uvedu oblasti, kde již paralelní či hybridní kinematiky uplatněny jsou a oblasti kde se jejich nasazení předpokládá.

- **astronomie:**
Existují simulační a polohovací zařízení, testuje se přistávací zařízení vesmírných stanic (Low impact docking system), do kategorie polohování patří polohování celých teleskopů pomocí hexapodů.
- **automobilový průmysl:**
Paralelní obráběcí stroje se uplatňují především při výrobě motorových skříní a skříní převodovek. Zde se 70% operací vykonává z pěti stran v kartézských souřadnicích. Proto je výhodné používat tripody a hexapody, které mohou obrábět čtyři kolmé stěny a mají možnost šikmého vrtání.
- **letecký průmysl:**
Stroje založené na paralelní kinematice se používají při obrábění velmi složitých součástí (více integrovaných dílů do jednoho), tuto operaci provádějí jen víceosé stroje schopné vysokorychlostního vrtání a frézování. Tricent (obr. 1.9) se používá při nýtování menších letadel.
- **manipulační zařízení:**
Hlavním kritériem při manipulačních operacích je rychlost. Díky vysokým rychlostem a zrychlením jsou paralelní a hybridní kinematiky jako stvořené pro tuto oblast. Například manipulátor FlexPicker (ABB), se již dlouhé roky uplatňuje na třídících linkách.
- **měřicí systémy:**
Typickým znakem je velmi rychlé a přesné polohování měřicího senzoru. Měřicí přístroj s paralelní kinematikou může dosahovat přesnosti až 2 μm KIM 750, TM-1000(JSC Lapik), Equator 300 (Renishaw)
- **simulátory pohybu:**
Šlo o první oblast reálného uplatnění. Důvodem byla velká nosnost, díky které bylo možné pohybovat například celým vrtulníkem nebo kabinou letounu najednou. Vznikly nejrůznější simulátory, od aut, tankových věží až po celou kabinu letadla jež má připravit cestující na pocit prožívaný při vzletu letounu.
- **výroba nástrojů a forem:**
Nástroje, 3D formy a zápustky jsou většinou ocelové. Proto je třeba při obrábění počítat s velkými silami, z čehož plynou vysoké požadavky na tuhost stroje a jeho přesnost 0,02-0,05mm. Vzhledem k zastavěnému prostoru se nejeví použití plně paralelního mechanismu výhodné. Používají se hybridní mechanismy jako Hexapode - CMW 300 (obr. 1.15), nebo X-700R (Leadwell).
- **výroba turbín:**
Obráběna je chromová ocel. Lopatky turbín jsou obecnou 3D plochou a mají malé rozměry. Proto se zdá použití výrobního stroje s paralelní kinematikou jako výhodné.
- **zábavní průmysl:**
Jedná se o nejrůznější pohyblivé plošiny ve stylu Stewartovy plošiny, nebo patentu z roku 1931 Gwinettovy plošiny. I v této oblasti se uplatňuje především vysoká nosnost hexapodů. Existují simulátory jízdy v závodním automobilu, na motocyklu, koni. Jedná se o sedačky společnosti Virtogo se šesti stupni volnosti. Existují celé kinosály typu Cinaxe umístěné na 6DOF plošinách. V České republice je vyrábí společnost Pragolet.
- **další aplikace:**
Byl zkonstruován robotický jeřáb RoboCrane (NIST), existuje důlní robot, mikro a nano hexapody firmy Xerox

3. Analýza konstrukcí paralelních kinematik [1]

Analýza všech možných konstrukčních uspořádání výrobních strojů s paralelní kinematikou by byla velmi zdoluhavá a překročila by rámec této práce. Proto jsem nucen omezit se jen na nejběžnější uspořádání a kritéria, dle kterých se paralelní kinematiky dělí.

3.1. Hodnotící kritéria

Při stavbě paralelního mechanismu je možno použít celou řadu variant vzájemného uspořádání stavebních prvků. Proto se lze zabývat jen hlavními charakteristikami uspořádání:

- 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

3.1.1. Počet stupňů volnosti

DOF stupně volnosti, z anglického *degree of freedom*, nám poskytují základní informaci o pohyblivosti mechanismu. Vyšetření DOF se provádí u sériových i paralelních kinematik, je základním krokem při kinematickém a dynamickém vyšetřování mechanismu. Pro jednoznačné určení polohy v prostoru je nutné znát všech šest stupňů volnosti. Tři translace podél os X, Y, Z a tři rotace φ_x , φ_y , φ_z kolem os.

Pro výpočet se používá "Grüberův vzorec":

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

nebo "modifikovaný Grüberův vzorec":

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

Avšak tyto vzorce neberou v potaz geometrické vztahy mezi klouby. Proto je pro výpočet parametrů paralelního mechanismu nutno použít "rozšířený Grüberův vzorec":

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

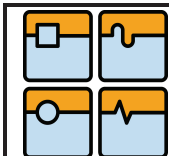
jednotlivé veličiny použité ve vzorcích představují:

- | | |
|-----------|---|
| F | počet stupňů volnosti |
| λ | počet stupňů volnosti nutné pro jednoznačné určení polohy platformy (pro prostorový mech. $\lambda=6$, pro rovinný mech. $\lambda=3$) |
| n | počet členů mechanismu (včetně rámu) |
| g | počet kinematických dvojic (kloubů) |
| f_i | stupně volnosti kloubu i |
| f_{id} | počet identických stupňů volnosti (umožňují pohyb poháněného členu bez toho aniž by měl vliv na polohu platformy, jde o tzv. vlastní pohyb) |
| s | počet pasivních vazeb (tzv. geometrické předpoklady, kloub se pohybuje na základě pohybu jiného poháněného členu, který je přenášen pasivním členem, neexistence by nezměnila DOF jen vlastnosti pracovního prostoru) |

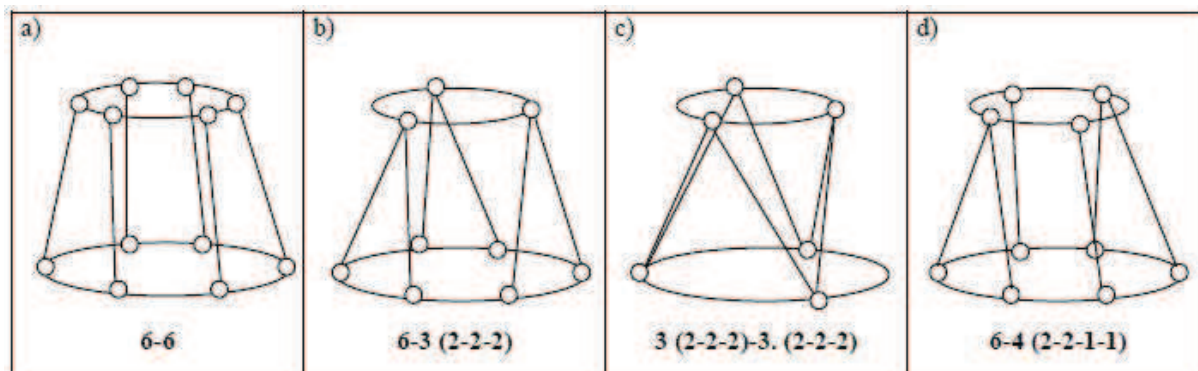
3.1.2. Počet a uspořádání kloubových bodů na plošině a bázi

Dalším charakteristickým znakem je počet kloubů na bázi m , počet na platformě n a počet vodících řetězců l . Jsme tedy schopni rozlišit následující možnosti (obr. 3.1):

- $m=n=l$
- $m=l$ a $m>n$, nebo $n=l$ a $m<n$
- $m=n$ a $l>n$



V praxi se doposud uplatňují především koncepce hexapodů a tripodů, kde počet kloubových bodů je shodný s počtem ramen. Varianty, kdy jsou počty kloubů různé od počtu řetězců, jsou spíše experimentální a akademické konstrukce nebo konstrukce se speciálními vlastnostmi a výhodami. Je-li počet kloubů různý od počtu ramen, pak je většinou kloub společný pro více ramen. Technická realizace je však obtížná, vlastnosti kloubu nejsou ideální, proto jde především o experimentální konstrukci sloužící pro simulaci specifických vlastností.



Obr. 3.1: Uspořádání kloubových bodů [1].

3.1.3. Druh, počet a pořadí kloubů ve vodícím řetězci

Druh a počet kloubů vodícího řetězce nám dává přesnou představu konstrukce mechanismu. Při konstrukci paralelních kinematik se používá několik kinematických dvojic (KD), pro ty se používá následující označení:

P - prismatická KD (translační bez rotace kolem vlastní osy), 1 DOF

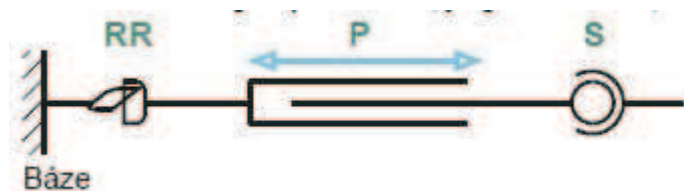
R - rotační KD, 1 DOF

S - sférická KD, 3 DOF

C - cylindrická KD, 2 DOF

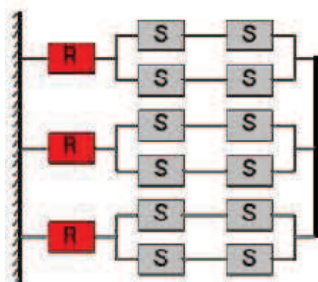
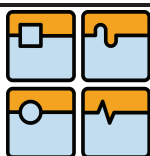
RR - univerzální 3DOF nebo se používá pro Hookův, Kardanův kloub 2 DOF

Při sestavování kinematického řetězce je možno jednotlivé dvojice libovolně a dle potřeby kombinovat. Přirozeně druh a uspořádání kinematických dvojic rozhoduje o výsledných vlastnostech mechanismu (tvar pracovního prostoru, tuhost, pohyblivost). Vodící řetězec hexapodu a tripodu je typicky tvořen třemi KD dle (obr. 3.2),



Obr. 3.2: RRPS vodící řetězec [1].

Označení pro tento řetězec by bylo RRPS nebo přesněji pro obecný hexapod 6RRPS. Někteří výrobci popisují uspořádání robotu pomocí schémat viz (obr. 3.3) Schéma robotu FlexPicker (ABB).



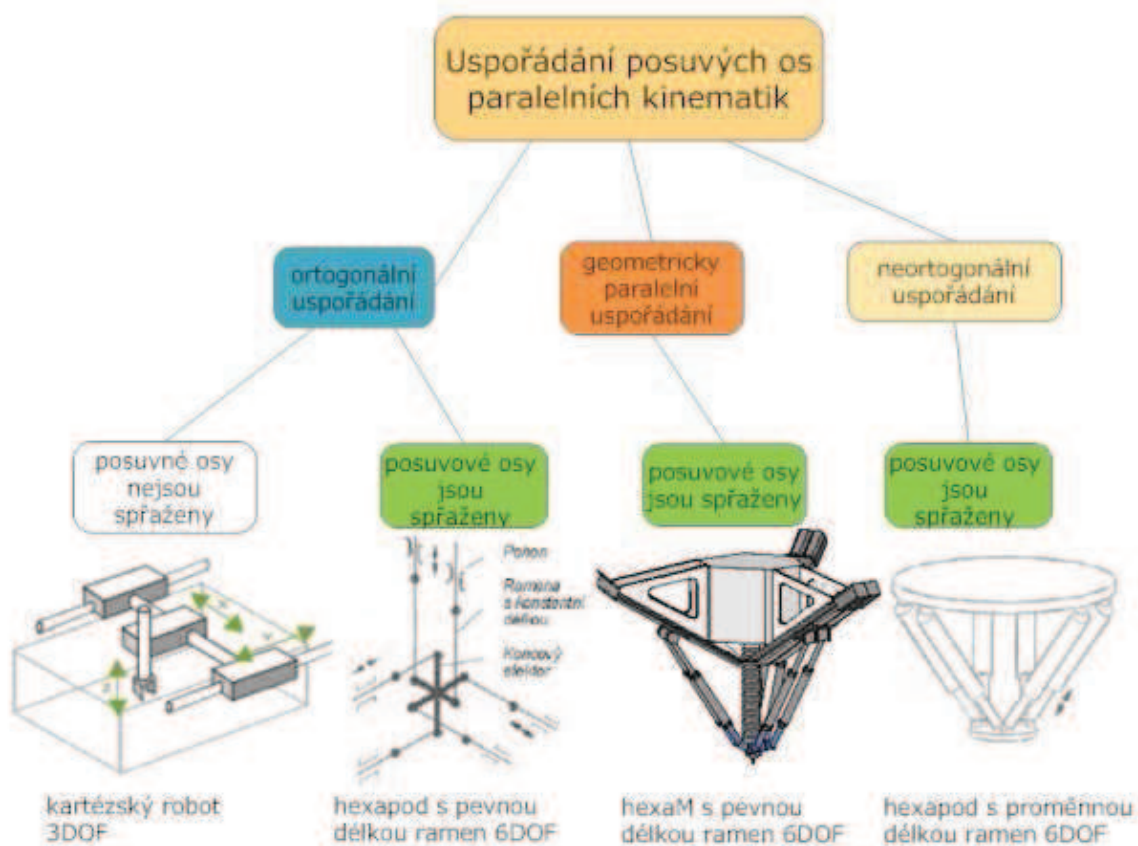
Obr. 3.3: Schéma uspořádání ramen robotu FlexPicker (ABB) [1].

3.1.4. Počet a uspořádání ramen

Z teorie paralelní kinematiky vyplývá minimální počet vodících řetězců a to jsou dva. Maximální počet nebyl omezen, ale nejčastější konstrukce mají maximálně šest ramen. Pak tedy vznikají "bipody", "tripody", "tetrapody", "pentapody" a "hexapody".

Dle umístění posuvných os pak rozlišujeme následující druhy mechanismů (obr. 3.4):

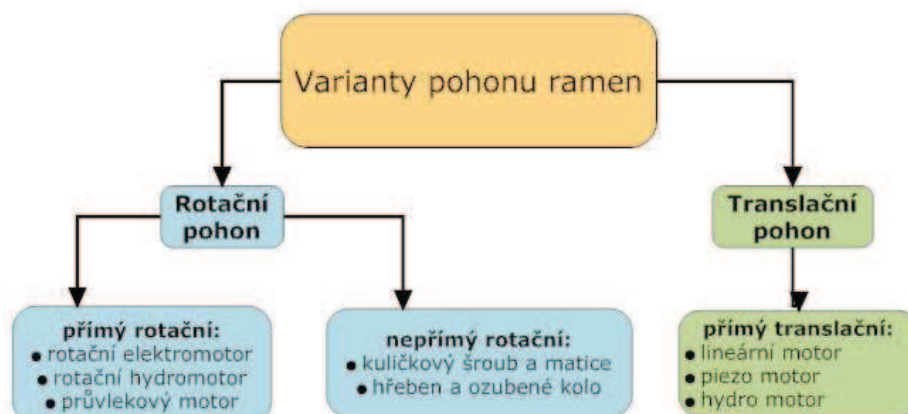
- **neortogonální uspořádání:** jedná se o již mnohokrát zmíněný hexapod, jde o nejčastější konstrukci, u tohoto typu jsou posuvové osy sprzęženy
- **geometricky paralelní posuvné osy:** Linapod (universita v Chemnitz), posuvné osy jsou nepohyblivé a většinou jsou přímo součástí rámu (obr. 1.13)
- **osy s ortogonálním uspořádáním:** osy nejsou spolu sprzęženy, pak se osa může pohybovat nezávisle aniž by ovlivnila polohu nebo pohyb osy další, tento typ mechanismu se může pohybovat pouze v rovině, kinematika se sprzęženými posuvovými osami se liší od předchozího pohybem v prostoru



Obr. 3.4: Uspořádání posuvových os [1].

3.1.5. Druh a umístění pohonu

Druhy pohonu se omezují na translační a rotační. Jsou zajištěny umístěním akčního členu (poháněcího) v každé kinematické dvojici. Pak jsme schopni plynule řídit polohu, rychlost a zrychlení ramena. Umístění pohonu je možno na bázi, integrovat do vodícího řetězce, nebo na platformu. Poslední je značně nevhodné, jelikož by motor musel pohánět svou vlastní hmotnost. Osvědčili se následující varianty viz. (obr. 3.5).

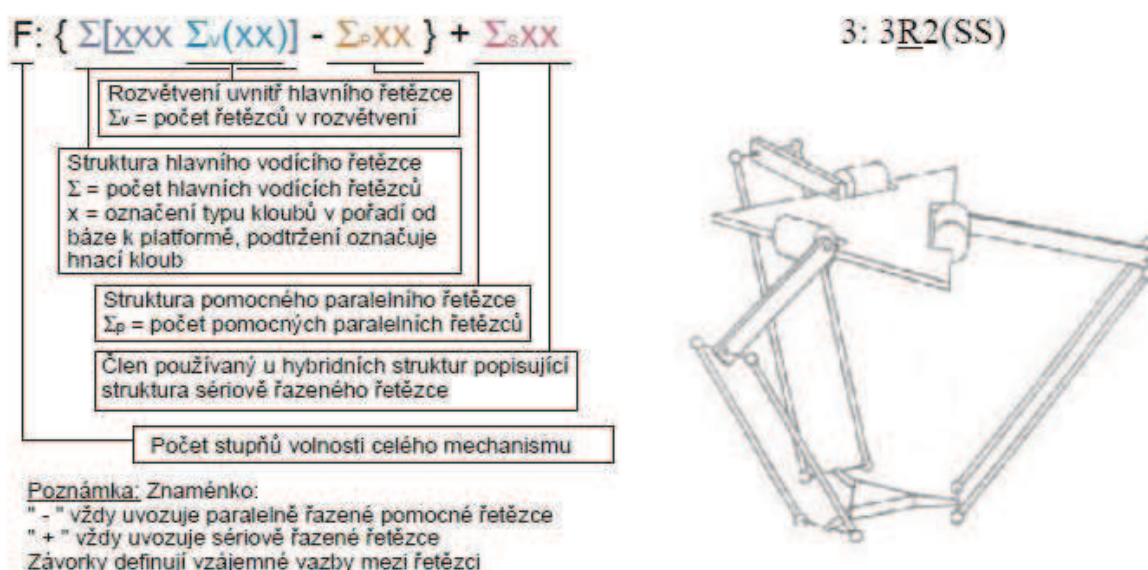


Obr. 3.5: Varianty pohonu ramen.

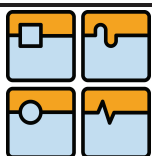
Osvědčili se zejména tyto koncepce: obecný hexapod (pohyblivý lineární typ RRPS), hexa a delta (rotační typ RRRS), tricept (pevný lineární typ PRRS)

3.1.6. Klasifikátory

Klasifikátor slouží k stručnému, výstižnému a pokud možno jednoznačnému popsání dané konstrukce. Vzhledem k rozličnému množství komponent a variantám jejich uspořádání doposud žádný takový zcela universální a funkční nebyl vymyšlen. Tato otázka je stále předmětem výzkumu. Jako jeden z nejpracovanějších uvedu tento (obr. 3.6):



Obr. 3.6: Klasifikátor paralelních mechanismů [1].



3.2. Základní stavební prvky paralelních mechanismů

Mechanismus se skládá z báze, ramen, kloubů a platformy. Pro paralelní mechanismy se vyrábí sériově několik variant kloubů a ramen. Na rozdíl od bází a platform, ty se liší od konkrétní operace.

3.2.1. Klouby

Pro stavbu paralelních mechanismů se používají klouby běžně dostupné pro stavbu jiných strojů a mechanismů, nebo řada kloubů speciálně vyvinutých přímo pro paralelní kinematiky. Tak aby co nejlépe vyhovovaly řadě specifických parametrů.

Klouby mají velmi výrazný vliv na přesnost mechanismu. Některé mohou mít až tři stupně volnosti s velkým dosažitelným úhlem natočení, a proto je důležité, aby se všechny osy otáčení protínaly ve společném bodě. Je zavedena řada opatření, aby bylo dosaženo co největší přesnosti. Rozměrově vysoce přesné kulové plochy kloubů, předepnutí pro zamezení vůle, speciální povrchy, kloub je velmi tuhý jak staticky tak dynamicky. Bohužel s předepnutím a tuhostí se může zvyšovat tření v kloubu a při vysoké dynamice kladené na paralelní mechanismus, se v kloubu vyvíjí teplo. To vede jednak k rozměrové nepřesnosti, ale především ke zvýšenému opotřebení.

Důležitými parametry tedy jsou: **dosažitelný úhel natočení, tuhost, životnost, výrobní náklady, bezvůlnost, tření, prostor pro zástavbu kloubu, opotřebení.**

V Německu se výrobou kloubů speciálně pro paralelní kinematiky zabývá společnost INA, Geodetic. V posledních letech se začaly objevovat i klouby s integrovaným pohonem a klouby s vnitřní mechatronickou konstrukcí.



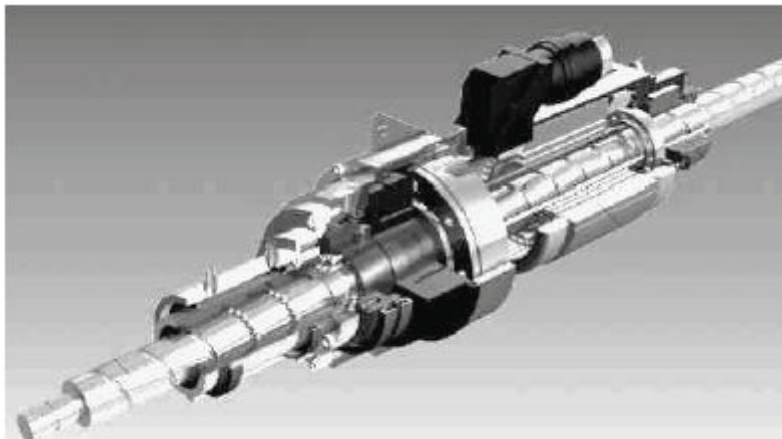
Obr. 3.7: Kulový, Kardanův a univerzální kloub (INA) [1].

3.2.2. Ramena

Principiálně se ramena dělí na vzpěry s proměnlivou a pevnou délkou. Podobně jako u kloubů je jedním z hlavních úkolů přenášet sílu ze základny na platformu. Paralelní uspořádání pak propůjčuje mechanismu vysokou tuhost. Dále velmi výrazně rozhoduje o pracovní přesnosti (tuhost, rozměrová stálost).

- **ramena s proměnlivou délkou:**

Při pohybu vzpěry s proměnnou délkou dochází ke změně vzdálenosti mezi středem otáčení kloubu na bázi a kloubu na platformě. Je možno použít kuličkový šroub (proměnná posuvná ramena), nebo "průvlekový motor" (pevná posuvná ramena) (obr. 3.8).



Obr 3.8: Průvlekový motor [1].

Zde se rameno posouvá skrz pohon na obě strany, tak není jeho koncová délka v podstatě omezena. U této koncepce se používají konvenčně vyráběné a používané pohony jako hřebenové tyče a pastorky. Což je nespornou výhodou.

U kuličkového šroubu se otáčí přímo rameno, tím se posouvá nebo se otáčí matice, která se pak relativně pohybuje po rameni. Velkou nevýhodou je, že tyto kuličkové šrouby pracují v oblastech svých kritických rychlostí, proto dochází k oteplování a rozpínání prvků mechanismu. To je nutno kompenzovat odpovídajícími řídicími algoritmy.



Obr. 3.9: Kuličkové šrouby firmy (BOSCH REXROTH) [17].

- **ramena s pevnou délkou:**

Ramena s pevnou délkou (spojnice). Jejich vlastnosti, dnes přímo přizpůsobujeme nárokům kladeným na ramena paralelních mechanismů. Očekáváme délkovou stálost a tuhost na vzpěr. Tyto ramena také nejsou tolik ovlivněny teplem od motorů a tření.

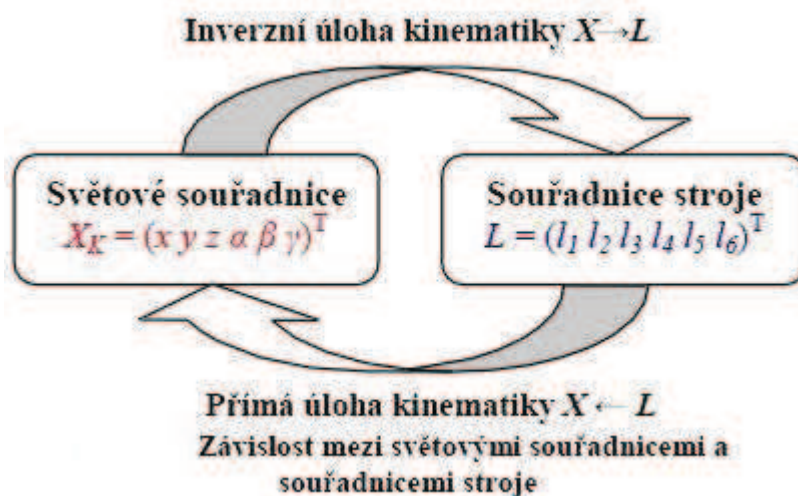
Pro oba typy ramen jsou důležité i dynamické vlastnosti chování. Důležitými parametry jsou: **přesnost, rychlost, zrychlení, měřicí systém, kolizní stavy, pracovní prostor, zatížení statické, dynamické i tepelné.** Při vysokofrekvenčním buzení může dojít ve vzpěrách k vybuzení vlastního kmitání, které má za následek ohybové namáhání. Dále je nutné uvažovat chování v prostředí chladicí kapaliny a třísek vnikajících při obrábění.

4. Analýza stavu současného poznání v oblasti paralelních kinematik

Zde v této kapitole se zabývám energií, silami a jejich vlivem na pohyb paralelního mechanického systému. Obsahuje tři vzájemně propojené oblasti, kinematiku, statiku a dynamiku. Základem je maticový zápis současných pohybů prostorových těles. Pohyb koncového efektoru (platformy, plošiny) určuje nastavení akčních členů. Je tedy nevyhnutelné znát transformační vztahy mezi nastavením akčních členů a polohou plošiny.

4.1. Transformace souřadnic [1]

U paralelních kinematik je pohyb platformy popsán změnou polohy a orientace vůči bázi. Umístíme-li bázi na globální souřadný systém B (světové souřadnice), pak na koncovém efektoru (platformě) bude souřadný systém lokální P. Poloha a orientace lokálního souřadného systému se bude měnit se změnou polohy všech ramen (souřadnice stroje). Aby bylo možno hexapod řídit, je nutné stanovit transformační vztah mezi oběma systémy. Transformace světových souřadnic na polohu stroje představuje inverzní úlohu kinematiky a naopak (obr 4.1). Poloha a orientace platformy je popsána polohovým vektorem X . Podle způsobu popisu orientace je ve tvaru popisu Kardanovými úhly $X_k = [xyz\alpha\beta\gamma]^T$, nebo Eulerovými úhly $X_L = [xyz\psi\theta\varphi]^T$, souřadnice stroje lze popsat pomocí vektoru pohonů $L = [l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6]^T$. Závislosti popisujeme pomocí ortogonální transformace, homogenní transformace, vztah mezi rychlostmi pohonů řešíme pomocí Jakobiho matice.



Obr. 4.1: Transformace souřadnic [1].

Homogenní transformace:

Základem je maticová transformační rovnice. Je dán základní souřadnicový systém, v něm libovolně zvolíme jiný souřadný systém. Pokud jsou oba systémy pravoúhlé a pravotočivé, pak vztah mezi souřadnicemi bodu M v obou souřadných systémech je dán transformační maticí (obr. 4.2).

$$\begin{bmatrix} x_{aM} \\ y_{aM} \\ z_{aM} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_{ab} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_{ab} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_{ab} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{bM} \\ y_{bM} \\ z_{bM} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Tuto rovnici lze zapsat pomocí rozdělených matic jako

$$\begin{bmatrix} u_{aM} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ab} & u_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{bM} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

a konečně symbolickou maticovou rovnici

$$r_{aM} = T_{ab} \cdot r_{bM}, \quad (9)$$

kde použité symboly mají význam:

T_{ab} – transformační matice pohybu $a:b$;

S_{ab} – matice směrových kosínů; její jednotlivé sloupce vyjadřují jednotkové vektory os x_b, y_b, z_b (jejich směrové kosíny) v prostoru;

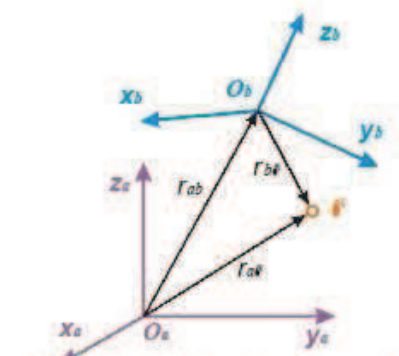
u_{ab} – průvodič počátku O_b v prostoru a ;

u_{aM} – průvodič bodu M v prostoru a ;

u_{bM} – průvodič bodu M v prostoru b ;

r_{aM} – rozšířený průvodič bodu M v prostoru a ;

r_{bM} – rozšířený průvodič bodu M v prostoru b .



obr. 31: Souřadnicový systém a a b

Obr. 4.2: Transformační matice [1].

4.2. Kinematika

Zkoumá pohyb těles bez ohledu na síly a kroutící momenty, které pohyb způsobily. Studuje pouze geometrii a časové vlastnosti pohybu. Přímo i nepřímou úlohu kinematiky je možno řešit různými analytickými metodami.

4.2.1. Kinematická analýza

Předmětem kinematické analýzy je odvození relativního pohybu mezi různými členy mechanismu. Existuje přímá a nepřímá (inverzní) úloha kinematiky.

- **přímá úloha kinematiky:**

Ptáme se na polohu a relativní pohyby koncového efektoru, známe geometrickou polohu a pohyby ramen v kloubových souřadnicích

- **inverzní úloha kinematiky:**

Známe polohu a pohyb koncového efektoru (platformy), zjišťujeme možná geometrická nastavení a změnu polohy jednotlivých ramen, je podstatně složitější než přímá úloha kinematiky, může mít větší počet řešení

4.2.2. Kinematická syntéza

Je opačnou úlohou ke kinematické analýze. Ze zadaných kinematických vlastností stroje určujeme proměnné hnacích členů, které zajistí požadované kinematické vlastnosti. Tímto postupem určíme typ mechanismu a geometrie.

4.3. Diferenciální kinematika

Jedná se o směr rozvíjený na akademické úrovni, zabývá se popisem vztahů rychlostí pohonů a koncového efektoru. Především pomocí Jakobiho matice, dále jsou zkoumány singulární polohy mechanismu.

4.4. Statika a tuhost

Zkoumá síly působící na mechanismus v rovnovážné poloze, tj. v klidu. Uvažujeme tíhu ramen a posléze mechanismu, sil a momentů na soustavu působících. Při této analýze se zaměřujeme především na zjištění tuhosti mechanismu.

4.4.1. Určení rovnovážných sil

Provedeme užitím principu virtuálních prací a Jakobiho matice. Zavedeme rovnováhu silové a momentové výslednice působící z vně na soustavu, rovnou potřebným silám vyvíjenými pohony mechanismu.

4.4.2. Analýza tuhosti

Vysoká tuhost patří mezi přednosti paralelních mechanismů. Podle dosavadních poznatků jsou nejslabším článkem z hlediska tuhosti klouby. Čím mají vyšší rozsah pohybu, tím je nižší jejich tuhost (především Kardanův a sférický kloub). Při analýzách mechanismů se dále předpokládá dokonalá tuhost jednotlivých částí.

4.5. Dynamika

Pojednává o silách a kroutících momentech, které způsobují pohyb mechanismu. Jednou z hlavních sil, kterými se dynamika zabývá, je síla setrvačná. Platforma (koncový efektor) musí být řízena po zvolené dráze s předepsanou pohybovou charakteristikou. Proto musí být na řídicí členy aplikována řada momentových a silových funkcí. Tyto funkce závisí nejen na parametrech dráhy, ale na hmotnosti členů, zatížení a vnějších silách. Dynamika řeší dynamickou analýzu a syntézu.

4.5.1. Dynamická analýza

Dynamická analýza je taková úloha při kterou určujeme dynamické vlastnosti stroje. Známe dynamické charakteristiky stroje, máme je popsány matematicky. Pro tuto analýzu využíváme například Newton-Eulerovu metodu, Lagrangeovy pohybové rovnice, či princip virtuálních prací. Problém je podobný přímé a nepřímé úloze kinematiky. Dnes je velmi důležitý inverzní dynamický model pro real-time řízení stroje. Dynamickou analýzu užíváme i ke zjištění vlastních frekvencí stroje, ty jsou nebezpečné jelikož u paralelních mechanismů mohou vyvodit ohybový moment do ramen.

- **přímá úloha dynamiky:**

Je taková úloha, kdy známe kinematické veličiny (polohu, rychlost, zrychlení) jednotlivých pohybových jednotek a hledáme zobecněnou sílu v těchto pohybových jednotkách v čase. Zde se dá aplikovat již zmíněná Lagrangeova metoda.

- **inverzní úloha dynamiky:**

Známe průběh zobecněné síly působící na jednotlivé pohybové jednotky v čase a hledáme nazpátek kinematické veličiny pohybu (poloha, rychlost, zrychlení) v čase. Lze řešit například metodou lineární interpolace mezi jednotlivými diskrétními body trajektorie (popsána v osmdesátých letech).

4.5.2. Dynamická syntéza

Jde o inverzní úlohu k dynamické analýze. Konkrétně, stroj je navrhován s určitou požadovanou dynamickou charakteristikou a úkolem dynamické syntézy je pro požadované dynamické parametry nalézt odpovídající konstrukční řešení. Jde o podstatně komplikovanější úlohu než je analýza.

4.6. Přesnost polohování

Při vyšetřování mechanismu se předpokládají jmenovité rozměry členů, jejich tuhost a spojení bez vůlí. Takový mechanismus se nazývá ideální. Ale skutečný mechanismus nereprodukuje přesně pohyb vypočtený pro ideální mechanismus. Zejména v důsledku nepřesné výroby, montáže, poddajnosti členů, vůle v kloubech, teplotních dilatací a opotřebení. Zkoumáním těchto odchylek se zabývá přesnost mechanismů. Základními pojmy jsou:

- **Skutečný a ideální mechanismus:** mechanismus u kterého se buď uvažuje nebo neuvažuje působení chyb
- **Skutečná a ideální veličina:** veličina, která určuje nějakou vlastnost mechanismu, opět se uvažuje nebo neuvažuje působení chyb
- **Přesnost polohování:** udává odchylku mezi požadovanou polohou a skutečnou polohou při najetí z různých směrů
- **Opakovatelná přesnost polohování:** udává jakou přesnost stroj dosáhne při opakovaném najíždění do požadované polohy, vyhodnocuje se jako průměrná hodnota dosažených odchylek.
- **Prvotní chyby:** chyby jsou v rozměrech členů, v hodnotách kinematických veličin, vstupních dvojicích, chyby jsou navzájem nezávislé
- **Druhotné chyby:** chyby v hodnotách kinematických veličin hnaných členů a jejich bodů jsou funkcí prvotních chyb

Přesnost polohování je podmínkou praktického využití strojů s paralelní kinematickou konstrukcí. Snahou je tedy kompenzovat chyby co možná nejlépe. **Přímá kompenzace:** provede se konstrukční úprava elementu. **Nepřímá kompenzace:** za pomoci kompenzačního algoritmu řídicího systému. Podmínkou správné kompenzace je definování velikostí odchylek. Na rozdíl od sériových kinematik chyba nevzniká prostým součtem odchylek, ale celková odchylka vychází z diferenciálního počtu.

4.6.1. Analýza citlivosti

Pro stanovení citlivosti se využívá tzv.: diferenciální model, přímo odvozený z inverzní kinematiky nominálního modelu. Odchytky jsou popisovány pomocí Eulerových úhlů.

4.7. Shrnutí poznatků

Intenzivní výzkum a vývoj strojů s paralelní konstrukcí začal přibližně před 35 lety, na ruských univerzitách jako možný progresivní směr konstrukce obráběcích strojů. Postupně se touto otázkou začal zabývat celý svět. Ale již v minulém desetiletí se od výrobních strojů s paralelní kinematikou začalo upouštět. Na EMO2010 vystavovala jediná firma a to METROM (německý výrobce pětiosých obráběcích center).

Jedná se tedy o poměrně nový směr, kde doposud zůstávají nezodpovězené některé úlohy především v oblasti dynamiky a kalibrace. Běžné problémy bránící použití již byly odstraněny.

5. Předpokládaný vývoj a trendy ve výzkumu

V minulosti byl přeceněn přínos paralelních struktur v konstrukci výrobních strojů. Po nemalých investicích do vývoje se ukázalo, že nebudou schopny vytlačit sériové kinematiky z dominantního postavení na trhu. Dostaly se do slepé uličky. Na EMO 2003 se účastnilo 16 vystavovatelů, 2005 devět vystavovatelů, počet dvou v roce 2009 a pouze jednoho (METROM) pro rok 2010. A fakt, že za posledních 5 let nebyla představena žádná nová koncepce obráběcího stroje s paralelním uspořádáním kinematiky, vede k závěru totálního úpadku odvětví probíraného typu výrobních strojů. Cestou je efektivní využití předností těchto uspořádání. Důkladné zvážení všech ekonomických a technických hledisek, jejich porovnání s ekvivalentním sériovým uspořádáním, a to ve fázi koncepčního návrhu stroje. Dá se předpokládat, že tento postup povede k prosazení hybridních kinematik jako X-700R od firmy Leadwell. Je ale otázkou, kam bude trend směřovat. Před několika lety docent Radek Knoflíček, předpokládal standardizaci prvků a konstrukčních typových řad, zlepšování stávajících komponent a výzkum redundantních kinematik a hledání optimalizačních postupů využití. Jen některé byly naplněny. Zlepšování sériově vyráběných komponentů realizováno nebylo, stavebnicové řady se neobjevily. Teoretický výzkum nadále probíhá, a to jak v oblasti kompenzace řízení a opakovatelné přesnosti, teorie porovnání se sériovými kinematikami, efektivnosti paralelního a hybridního uspořádání, výzkumu netradičních uspořádání a jejich stále zdokonalování jako v případě Bionic hand assistant (FESTO).

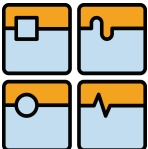
Vývoj je přesto poměrně krátký v porovnání s mnoha desetiletími koncentrace kapacit na výrobu strojů se sériovou kinematikou. Proto se dá očekávat, že se i nadále budou objevovat projekty podporující výzkum paralelních kinematik. Je však otázkou, kdy se podaří napravit renomé poničené nedomyšlenými, neověřenými stroji a nemalými prostředky, které byly nenávratně do vývoje vloženy.

6. Závěr

Stroje vznikly a vyvíjeli se díky přirozené tvořivosti člověka. Proto i paralelní kinematické mechanismy budou i nadále podléhat stálému vývoji v oblasti řešení. Nikam se neztratí. Práci jsem zaměřil především na stavbu paralelních kinematických struktur, historii jejich vzniku a současné existující konstrukce. Práce postrádá širší výklad kinematické a dynamické analýzy a syntézy, téměř vůbec nepostihuje diferenciální kinematiku nutnou k popisu chování paralelního mechanismu.

7. Použité zdroje

- [1] KOFLÍČEK, Radek. *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. *Parallemic.org* [online]. 2003 [cit. 2011-04-20]. The True Origins of Parallel Robots. Dostupné z WWW: <<http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>>.
- [3] Bloomberg. *Businessweek.com* [online]. 2001-03-19 [cit. 2011-04-20]. BW Online | March 19, 2001 | Table: Robot Milestones (extended). Dostupné z WWW: <http://www.businessweek.com/magazine/content/01_12/b3724010.htm>.
- [4] The War of the Worlds. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 20 December 2006 , last modified on 17 April 2011 [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/The_War_of_the_Worlds>.
- [5] Full flight simulator. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Full_flight_simulator>.
- [6] PRAGOLET, s.r.o. [online]. 2006 [cit. 2011-04-20]. Simulační technika - technologie. Dostupné z WWW: <<http://www.pragolet.cz/simulacni-technika/>>.
- [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] *Pkmtricept.com* [online]. 2007 [cit. 2011-04-20]. PKM Tricept. Dostupné z WWW: <<http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240238156>>.
- [9] *Robotpig.net* [online]. 2010-11-23 [cit. 2011-04-20]. Bionic Handling Assistant by Festo | robotics news | robotpig.net. Dostupné z WWW: <http://robotpig.net/robotics-news/bionic-handling-assistant-by-festo-_1934>.
- [10] *robotmatrix.org* [online]. 2005 [cit. 2011-04-20]. Parallel Robot, ABB FlexPicker Robot, FANUC F-200i Robot, The ISIS SurgiScope Robot. Dostupné z WWW: <<http://www.robotmatrix.org/Parallelrobot.htm>>.
- [11] *Hexapode.com* [online]. 2000 [cit. 2011-04-21]. Hexapode CMW 300-The Needs. Dostupné z WWW: <<http://www.hexapode.com/english/pourquoi/vues.htm>>.
- [12] *Leadwell.com.tw* [online]. 2009 [cit. 2011-04-21]. CNC MACHINING CENTER MANUFACTURERS | LEADWELL. Dostupné z WWW: <<http://www.leadwell.com.tw/cnc-machining-center-video.html>>.
- [13] *Metrom.com* [online]. 2011 [cit. 2011-04-21]. Metrom - mechatronische Maschinen: Startseite. Dostupné z WWW: <<http://www.metrom.com/>>.
- [14] *Czspos.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-04-21]. Společnost pro obráběcí stroje. Dostupné z WWW: <http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/11_nove_kinematicke_struktury_stroju.pdf>.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 39
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [15] *Robotics.org* [online]. 2002-05-02 [cit. 2011-04-25]. Robotics Featured Articles. Dostupné z WWW: <http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/Parallel-Kinematic-Robots/content_id/989>.
- [16] *Dientutieudung.vn* [online]. 2010-03-09 [cit. 2011-04-25]. Những ứng dụng của bàn tay máy. Dostupné z WWW: <<http://dientutieudung.vn/ca-fe/chuyen-phiem/i2691-nhung-ung-dung-cua-ban-tay-may.dtttd>>.
- [17] *Controlsformotion.com* [online]. 2008 [cit. 2011-04-25]. Ballscrew. Dostupné z WWW: <http://www13.boschrexroth-us.com/Catalogs/BALL_SCREW.pdf>.

8. Seznam příloh

CD:

Elektronická verze bakalářské práce