



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**HYBRIDNÍ KINEMATICKÉ STRUKTURY VÝROBNÍCH
STROJŮ A PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ**

PRODUCTION MACHINES AND INDUSTRIAL ROBOTS WITH HYBRID KINEMATICS STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Martinec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Matej Martinec
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.
Akademický rok:	2017/18

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:

Hybridní kinematické struktury výrobních strojů a průmyslových robotů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem práce je získat přehled ve schématech hybridních kinematických struktur (HKS) výrobních strojů a průmyslových robotů, které jsou novým typem ve výrobní technice. Na základě historického vývoje je možné uvést jejich základní principy konstrukce, výhody, nevýhody a použití (úspěšné aplikace).

Cíle bakalářské práce:

Definice a názvosloví používaná v oblasti výrobních strojů a průmyslových robotů a v kinematice sériových a paralelních struktur, jako východisko k hybridním.

Konstrukční znaky a rozdělení výrobních strojů a průmyslových robotů s hybridní kinematickou strukturou (HKS).

Základní stavební prvky a uzly.

Struktury výrobních strojů a průmyslových robotů s HKS (od historie až do současnosti).

Příklady konstrukce a aplikace výrobních strojů a průmyslových robotů s HKS.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalárska práca je zameraná na získanie prehľadu v problematike hybridných kinematických štruktúr výrobných strojov a priemyselných robotov. Pre jednoduchšie pochopenie sú na začiatku práce definované základné pojmy a stručný prehľad histórie priemyselných robotov. Ďalšia kapitola opisuje komponenty. Ďalej nasleduje analýza priemyselných robotov a manipulátorov. Nasledujúca kapitola obsahuje popis kinematických štruktúr a jednotlivých robotov s hybridnou kinematickou štruktúrou. Záver práce je venovaný využitiu priemyselných robotov s hybridnou kinematickou štruktúrou v praxi a návrhom robotov pre medicínske účely.

ABSTRACT

The bachelor thesis is aimed at gaining insight into the issue of hybrid kinematic structures of production machines and industrial robots. For simple understanding, the basic concepts and a brief overview of the history of industrial robots are defined at the beginning of the work. The next chapter describes the components. Next is the analysis of industrial robots and manipulators. The following chapter contains a description of kinematic structures and individual robots with a hybrid kinematic structure. The conclusion of the thesis is devoted to the use of industrial robots with hybrid kinematic structure in practice and design of robots for medical purposes.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Hybridná kinematická štruktúra, Tricept, Trivariant, Exechon, priemyselný robot

KEYWORDS

Hybrid kinematic structure, Tricept, Trivariant, Exechon, industrial robot

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MARTINEC, M. *Hybridní kinematické struktury výrobních strojů a průmyslových robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..

POĎAKOVANIE

Ďakujem doc. Ing. Radkovi Knoflíčkovi, Dr. za pomoc a cenné rady pri vypracovávaní bakalárskej práce. Tiež by som chcel poďakovať svojej rodine za podporu v štúdiu.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 24.5.2018

.....

Matej Martinec

Obsah

1 ÚVOD.....	13
1.1 Slovník základných pojmov	13
1.2 História	14
2 KOMPONENTY	17
2.1 Kĺby	17
2.1.1 Guľové kĺby s tromi stupňami voľnosti	17
2.1.2 Univerzálne kĺby s dvomi alebo tromi stupňami voľnosti	18
2.1.3 Kardanové kĺby	18
3 ANALÝZA PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV A MANIPULÁTOROV	19
3.1 Kinematické dvojice	19
3.1.1 Translačné kinematické dvojice	19
3.1.2 Rotačné kinematické dvojice.....	19
3.2 Kinematický reťazec.....	20
4 KINEMATICKÉ ŠTRUKTÚRY	21
4.1 Pohyblivosť kinematických štruktúr	21
4.1.1 Pohyblivosť rovinného mechanizmu.....	22
4.1.2 Staticky preurčené mechanizmy.....	23
4.2 Sériové kinematické štruktúry	24
4.3 Paralelné kinematické štruktúry	25
4.4 Hybridné kinematické štruktúry	26
4.4.1 Exechon.....	27
4.4.2 Trivariant.....	28
4.4.3 Tricept	29
4.4.4 Stroj Verne	31
5 APLIKÁCIA TRICEPTU V PRIEMYSLE	32
5.1 Automobilový priemysel	32
5.2 Železničný priemysel	34
5.3 Letecký priemysel	35
5.4 Laserová aplikácia	35
6 NÁVRHY HYBRIDNÝCH MANIPULÁTOROV PRE MEDICÍNSKE ÚČELY	36
6.1 Hybridný manipulátor pre operáciu chrbtice.....	37
7 ZÁVER.....	38
8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	39
9 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK.....	43
9.1 Zoznam tabuliek	43
9.2 Zoznam obrázkov	43
9.3 Zoznam použitých skratiek a symbolov	44
10 ZOZNAM PRÍLOH.....	45

1 ÚVOD

1.1 Slovník základných pojmov [1]

Aktuálna pozícia je poloha ovládacieho bodu nástroja.

Domovská pozícia je pevná pozícia ktorá sa nachádza na základnej súradnicovej ose manipulátora. Robot ju využíva na odpočinutie alebo identifikáciu nulovej pozície pre každú osu.

Flexibilita je schopnosť robota vykonávať rôzne druhy úloh.

Kinematika vyjadruje vzťah medzi pohybom kĺbov a pohybom koncového bodu.

Kĺb je časť manipulátora, ktorá dáva rotačný alebo translačný stupeň voľnosti koncového efektora.

Koncový efektor sa pripája na zápästie robota alebo montážnu dosku pre nástroj. Koncový efektor môže byť napríklad: uchopovač, striekacia pištoľ, zvaracia pištoľ.

Osa je vyjadruje smer, ktorý sa využíva na určenie pohybu robota v lineárnom alebo rotačnom režime.

Pohon sa využíva na vykonanie pohybu alebo zachovanie polohy robota.

Pracovný priestor je priestor v ktorom môže robot vykonávať svoju úlohu.

Presnosť vyjadruje odchýlku medzi povolenou a dosiahnutou charakteristikou alebo presnosť s akou môže byť vypočítaná pozícia robota.

Priama kinematika je typ výpočtu, ktorý určuje polohu koncového efektora v priestore. Využíva matematické algoritmy a senzory kĺbov na určenie ich polohy.

Priemyselný robot je programovateľný multifunkčný manipulátor navrhnutý na presúvanie materiálu, nástrojov pomocou naprogramovaných pohybov.

Rameno tvoria vzájomne prepojené väzby a kĺby ktoré pohybujú koncovým efektorom v priestore.

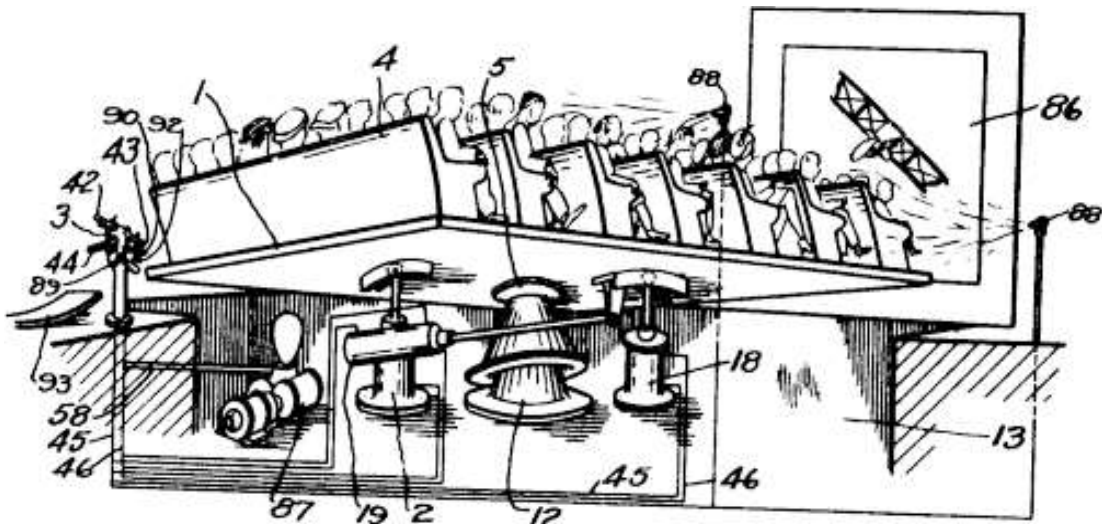
Senzor je vstupné zariadenie robota, ktoré umožňuje určiť vlastnosti prostredia, a vlastné umiestnenie robota v priestore. Senzory reagujú na fyzické podnety a prenášajú výsledné dáta alebo signál pre vykonanie merania alebo pre ovládanie.

Stupne voľnosti vyjadrujú počet nezávislých smerov alebo kĺbov robota. Pre ľubovoľný pohyb v priestore je potrebných 6 stupňov voľnosti.

Základňa alebo báza je stabilná plošina na ktorú je pripojené rameno.

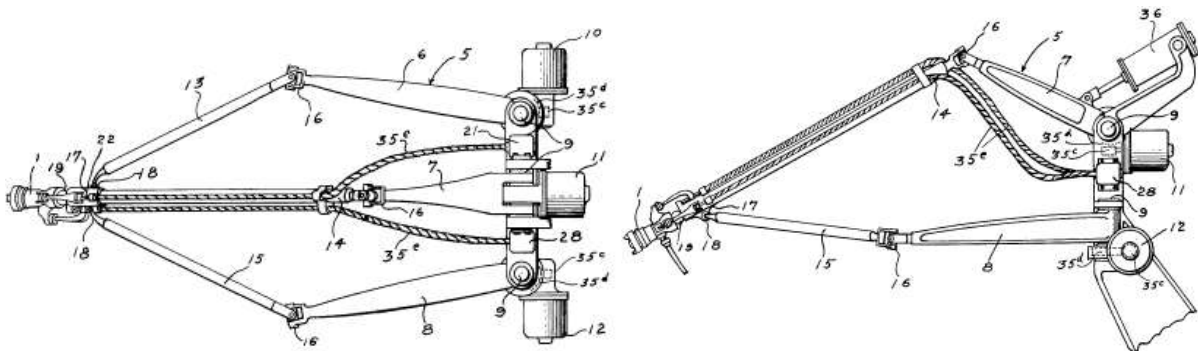
1.2 História [2], [19]

Už v roku 1645 sa Christopher Wren zaoberal základnými problémami paralelných kinematických štruktúr a v roku 1813 nadviazal svojím výskumom tuhosti kĺbového ektahedronu Augustin-Louis Cauchy. Neskôr sa problémy spojené s paralelnou kinematikou študovali aj Henri León Lebesque a Raoul Bricard. V roku 1928 si James E. Gwinnett podal patent na svoje zariadenie (Obr. 1), ktoré bolo založené na sférickom paralelnom robote. Nie je isté či to bolo prvé zariadenie s paralelnou kinematickou štruktúrou ani či bolo skonštruované, ale je isté že James E. Gwinnett svojimi myšlienkami prebehol svoju dobu.



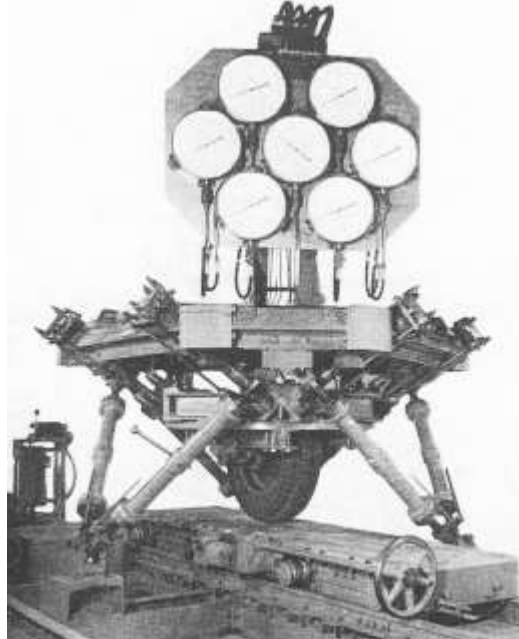
Obr. 1) Prvá patentovaná paralelná štruktúra [2]

O pár rokov neskôr vynálezca Willard L. V. Pallard vynášiel robot s paralelnou štruktúrou pre automatizované striekanie farby (Obr. 2). Tento robot je tiež známy ako prvý priemyslový paralelný robot. Robot pozostával s troch vetiev s 5 stupňami voľnosti. Každá vetva sa skladá s bazového ramena, ktoré je poháňané motorom, ktorý je pripevnený k základni a okrajového ramena, ktoré je s bazovým ramenom spojené univerzálnym kĺbom. Prostredníctvom guľových kĺbov sú spojené dve okrajové ramená k tretiemu okrajovému ramenu. Koncový efektor je pripojený k tretiemu ramenu prostredníctvom univerzálného kĺbu. Polohu koncového efektora určujú tri motory a jeho orientáciu určujú ďalšie dva motory pripojené k základni, pohyb bol prenášaný pomocou ohybných rotačných káblov. Pohon robota mal byť vykonávaný pomocou radiaceho systému, ktorý vynášiel Willard L. G. Pollar. Aj napriek získaniu patentov na mechanickú aj radiaciu časť robota nikdy nebol skonštruovaný.



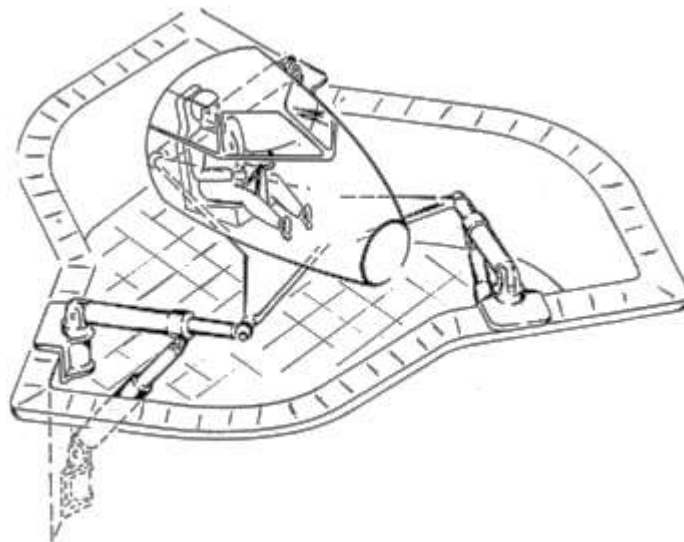
Obr. 2) Prvý priemyselný paralelný robot patentovaný v roku 1945 [2]

Na opačnej strane Atlantického oceánu v roku 1947 bol vynájdenný prvý oktahedrálly hexapod s premenlivou dĺžkou ramien (Obr. 3). Skonstruoval ho automobilový inžinier Dr. Eric Gough pracujúci v tom čase pre Dunlop Rubber Co. Tento univerzálny stroj bol využívaný na stanovenie vlastností pneumatík pri kombinovanom zaťažení.



Obr. 3) Prvý oktahedrálly hexapod [2]

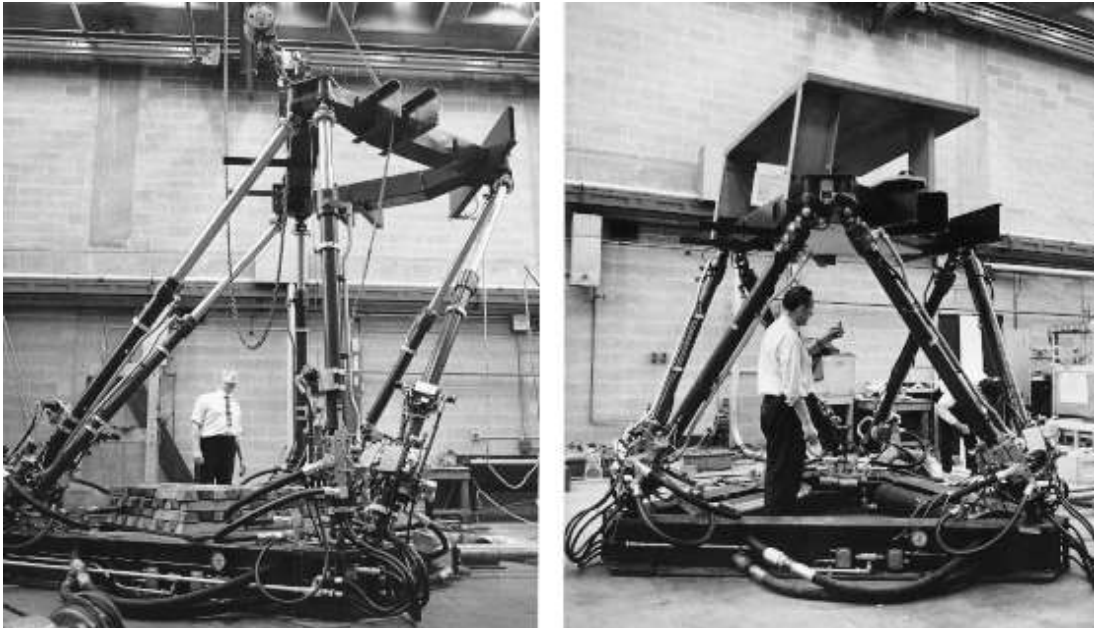
V roku 1965 narazili na Stewartov dokument, v ktorom opisuje letecký simulátor (Obr. 4). Základom tohto simulátoru bola pohybová platforma so šiestimi stupňami voľnosti.



Obr. 4) Stewartov letecký simulátor [2]

V Amerike v roku 1962 dostal inžinier Klaus Cappel za úlohu od svojho zamestnávateľa Franklin Institute Research Laboratories zlepšiť konvenčný vibračný systém. V snahe znížiť horizontálne reakčné hmotnosti použil namiesto 3 akčných členov štyri usporiadané do kruhu. Toto riešenie bolo príliš zložité na kontrolu a výsledku nepridalo, že nakoniec protichodné sily zlomili stôl. V roku 1971 Patentový a obchodný úrad udelil patent Klausovi Cappelovi na jeho

vynález, ktorý mal mať využitie ako simulátor pohybu. Patentová prihláška bola podaná už 7. decembra 1964. Myšlienka pohybového simulátora vyplynula s požiadavky leteckej divízie Sikorsky United Technology na návrh letového simulátora vrtuľníku. A tak vznikol prvý letový simulátor na základe oktahedrálneho hexapodu (Obr. 5).



Obr. 5) Prvý letecký simulátor na základe oktahedrálneho hexapodu [2]

Dr. Gough ako prvý prišiel s oktahedrálnym hexapodom. No Klaus Cappel nezávisle navrhol rovnaký hexapod, dal si ho patentovať a vďaka nemu sa stal hexapod stal populárny.

Prvý robot so sériovou kinematikou, Unimate (Obr. 6), bol v roku 1961 pripojený k montážnej linke vo firme General Motors. Robot vznikol v roku 1956 na stretnutí dvoch vynálezcov Josepha Engelbergera a Georga Devola. Unimate bol využívaný na odnášanie odliatkov zo strojov a tiež bol využívaný aj pri zvaraní na automobiloch. Robot disponuje šiestimi plne programovateľnými osami určenými na vysokorýchlostnú manipuláciu s dielmi o hmotnosti skoro 230 kilogramov.



Obr. 6) Robot Unimate [19]

2 KOMPONENTY [15]

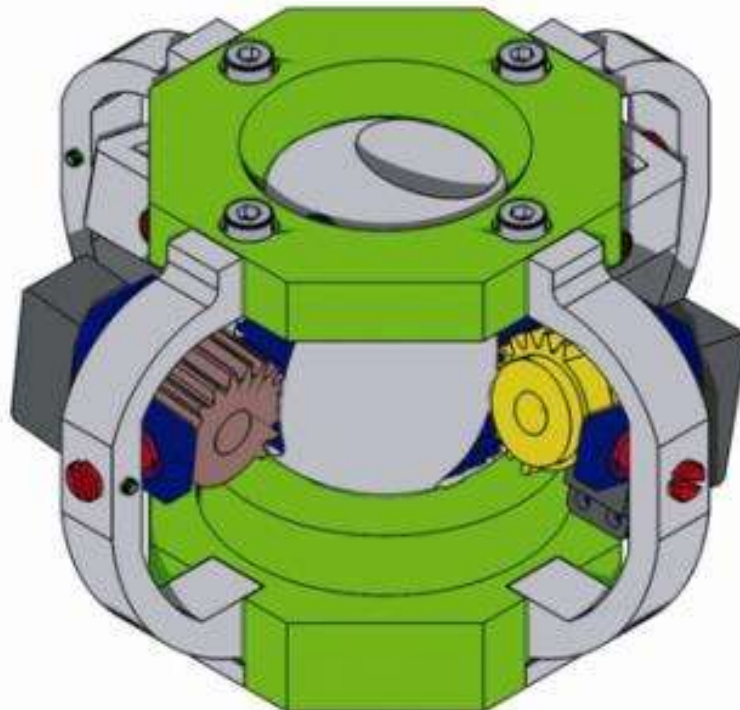
Prvý problém, ktorý sa objavil pri konštrukcii mechanizmov s paralelnou kinematikou bol nedostatok komponentov, ktoré by vyhovovali vysokým nárokom paralelnej štruktúry. Následný vývoj komponentov mal za následok rýchly rozmach paralelných robotov a ich obsadenie do rôznych odvetví priemyslu. Medzi najdôležitejšie komponenty využívané u paralelných štruktúr sú kĺby a tyče.

2.1 Kĺby

Na trhu už existovali kĺby ktoré sa využívali v automobilovom a poľnohospodárskom priemysle ale tie neboli konštruované na potreby aplikácie v týchto strojoch. Nároky na kĺby obsahovali: vysokú tuhosť, vysokú statickú únosnosť, nízku hmotnosť, vysokú presnosť, malé opotrebenie, dlhú životnosť a veľké uhlové rozsahy. Konštrukcia paralelných štruktúr si vyžaduje kĺby s dvoma aj troma stupňami voľnosti. Vznikli tri typy kĺbov.

2.1.1 Gul'ové kĺby s tromi stupňami voľnosti (Obr. 7)

Fungujú na princípe valivého vedenia na gul'ovej ploche. Pri vysokej geometrickej presnosti kontaktných plôch je možné dosiahnuť nízke hodnoty Hertzovho tlaku medzi guľičkami a vonkajším puzdrom kĺbu a guľičkami a spodnou gul'ovou plochou. Tieto kĺby sú hlavne využívané vo frézovacích robotoch z dôvodu vysokej tuhosti a únosnosti. Kĺb musí byť dobre tesnený aby dosiahol vysokú životnosť.



Obr. 7) Model gul'ového kĺbu s tromi stupňami voľnosti [16]

2.1.2 Univerzálne kĺby s dvomi alebo tromi stupňami voľnosti (Obr. 8)

Používa sa v manipulačných zariadeniach. Má nízku hmotnosť a veľké geometrické rozsahy čo umožňuje použitie u robotov s vysokými rýchlosťami a zrýchleniami vo veľkých pracovných priestoroch. Pre zachovanie tuhosti v určitom rozsahu kĺbu je obmedzená koncová poloha kĺbu v druhej ose otáčania. Tieto kĺby disponujú nižšou tuhosťou v porovnaní s guľovými kĺbmi z dôvodu použitia ihlových ložísk a malej opernej plochy valivých teliesok.



Obr. 8) Univerzálny kĺb [22]

2.1.3 Kardanové kĺby

Uplatnili sa pri prenose krútiaceho momentu a spojení hriadeľov s osovou odchýlkou. Ťahové a tlakové sily sú u paralelných štruktúr zachytávané v kĺboch, v ktorých je nutné zachovať vysokú tuhosť. Z tohto dôvodu bol pomocou metódy konečných prvkov zlepšený náboj kĺbu pre ťahové a tlakové zaťaženie. Radiálne – axiálne ihlové ložiská dávajú najvyššiu tuhosť, majú dokonalé tesnenie a sú štandardným produktom na trhu. Ich využitie nachádzame vo veľkých pracovných priestoroch kde sa vyžaduje vyššia tuhosť. Tepelný rozsah v ktorom kĺby pracujú je od -30 do +120 °C a disponujú špeciálnym mazivom plneným pri výrobe. Tieto kĺby je doporučené približne každé dva roky premazávať.

3 ANALÝZA PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV A MANIPULÁTOROV

3.1 Kinematické dvojice [17]

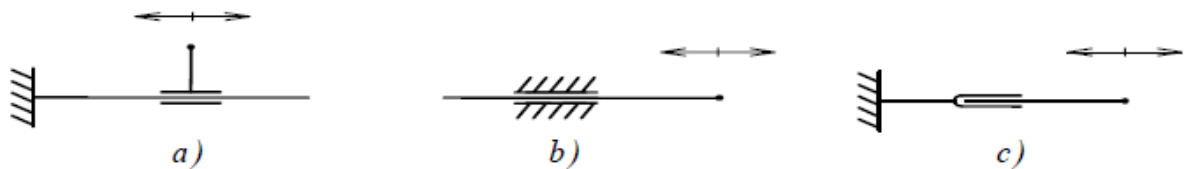
Priemyselné roboty a manipulátory sú v zjednodušenom chápaní pohybovými mechanizmami skladajúcimi sa z binárnych členov, spojených medzi sebou pomocou kinematických dvojíc. Typickými kinematickými dvojicami pre stavbu robotov sú kinematické dvojice s jedným stupňom voľnosti. Kinematické dvojice s väčším počtom stupňov voľnosti nie sú príznačné pre priemyselné roboty a manipulátory. Taktiež sa nevyužíva ani spojenie dvoch otočných kinematických dvojíc pre vytvorenie jedného kĺbu z dôvodu zložitého pohonu servomotormi.

Najviac používanými kinematickými dvojicami sú posuvné (translačné) a otočné (rotačné). Kinematické dvojice majú svoje špecifické schematické označenia, ktoré vyplývajú z ich konštrukčných základov.

3.1.1 Translačné kinematické dvojice [17]

Táto kinematická dvojica (Obr. 9) je nenáročná na zobrazenie, pretože je postačujúce zobrazit' priamočiary pohyb dvoch telies po sebe. Je však potrebné dodržať určité zásady:

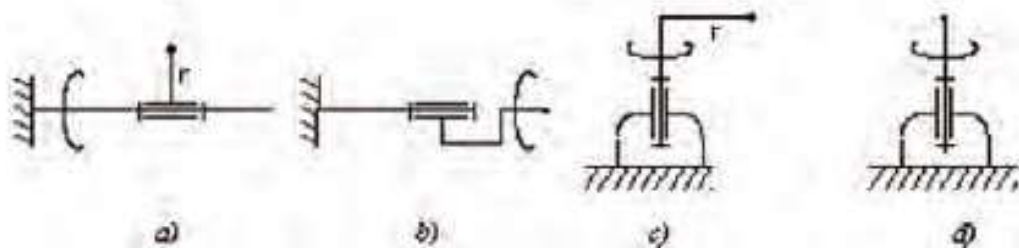
- Kratšie teleso sa pohybuje po dlhšom vedení – suportové vedenie
- Dlhšie teleso sa pohybuje v kratšom vedení – šmýkadlové vedenie
- Výsuvné alebo teleskopické vedenie



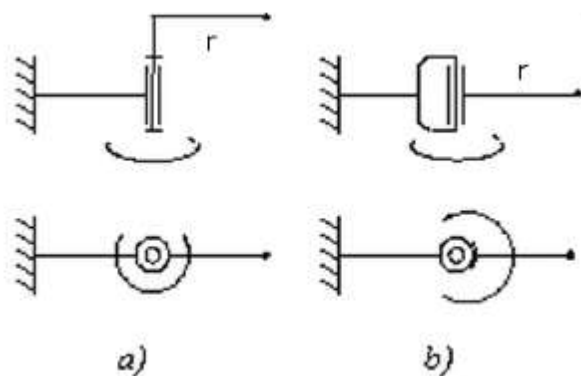
Obr. 9) Schematické zobrazenie translačných kinematických dvojíc: a) suportové, b) šmýkadlové, c) výsuvné [17]

3.1.2 Rotačné kinematické dvojice [17]

Pri zobrazovaní rotačných kinematických dvojíc (Obr. 10 a 11) musíme dodržiavať ich špecifikácie – rotácia okolo vlastnej osi alebo rotáciu ramena s dĺžkou "r" okolo mimostrednej osi (kĺb) a tiež smer pohľadu na rotačný kĺb. Schematické zobrazenie musí vyjadrovať konštrukčnú predstavu o veľkosti možného rozsahu otáčania okolo osi.



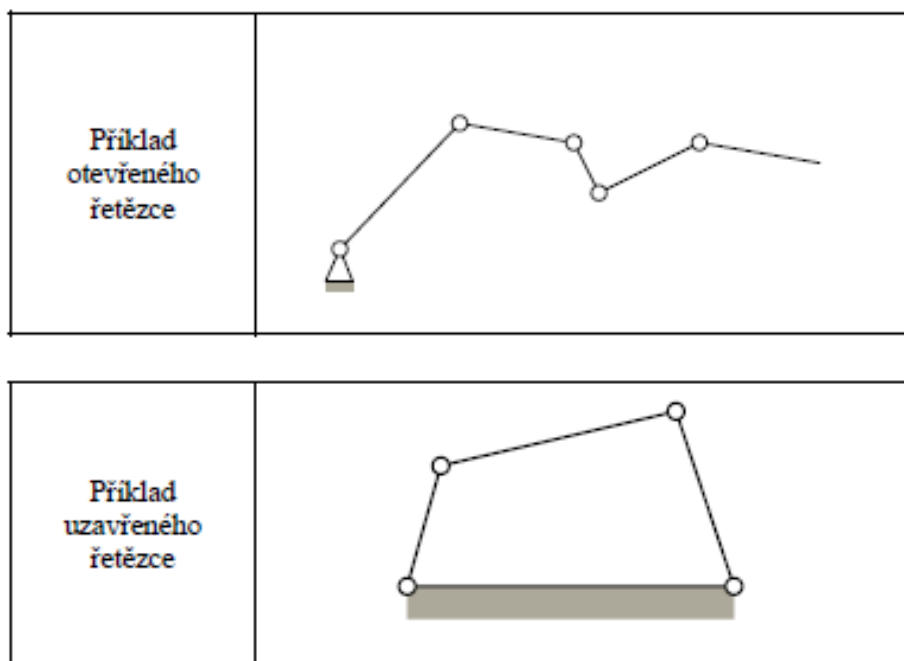
Obr. 10) Rotačné kinematické dvojice bez obmedzenia uhlu otáčania: a),c) s ramenom "r" a b), d) okolo vlastnej osi [17]



Obr. 11) Kĺby zobrazené v náryse a pôdoryse: a) bez obmedzeného uhlu otáčania, b) s obmedzeným uhlom otáčania [17]

3.2 Kinematický reťazec [18]

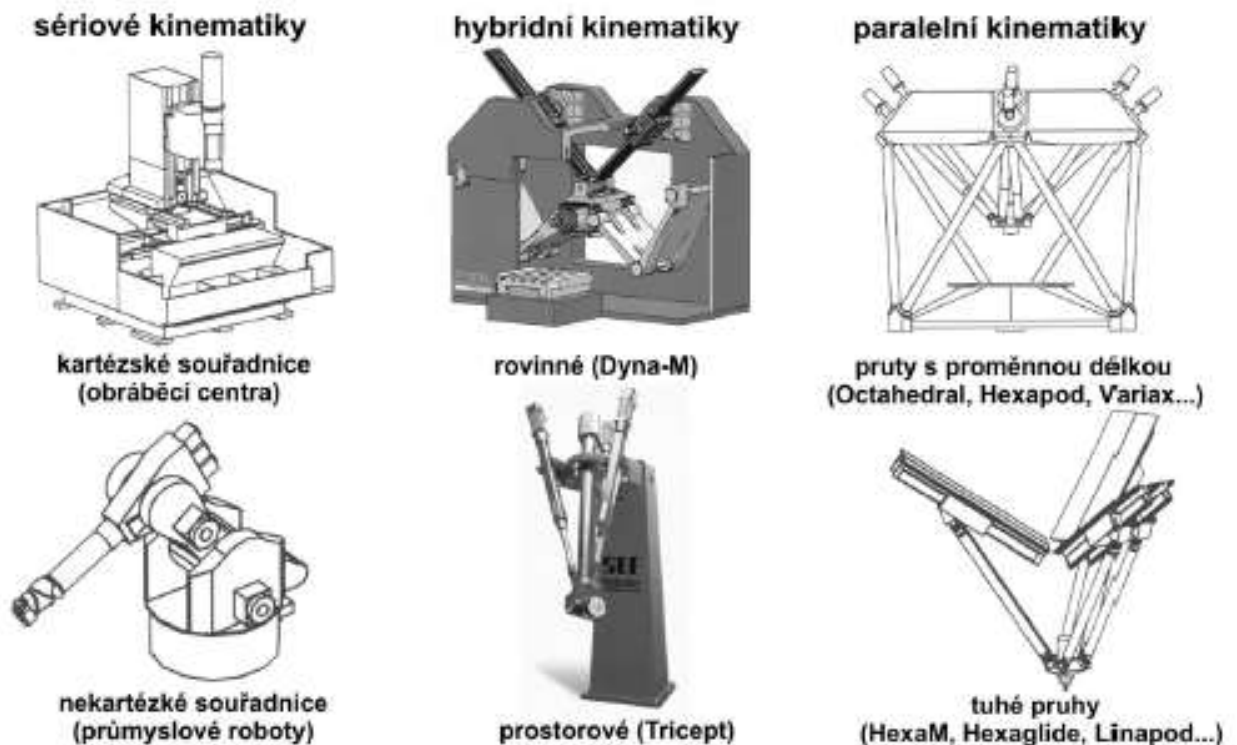
Kinematické reťazce (Obr. 12) vznikajú z členov navzájom spojených kinematickými dvojicami. Manipulačná schopnosť priemyselného robota je závislá na množstve použitých kinematických dvojíc a ich rozložení. Počet stupňov voľnosti je rovnaký ako počet použitých kinematických dvojíc, keďže kinematické dvojice majú iba jeden stupeň voľnosti. Kinematické reťazce môžu byť otvorené, uzatvorené alebo zmiešané. Tiež je potrebné klásť dôraz na zobrazenie jednotlivých os kĺbov v nadväznosti na osi kartézskoho súradnicového systému.



Obr. 12) Příklady kinematických reťazcov [18]

4 KINEMATICKÉ ŠTRUKTÚRY [4]

Keď sa v posledných dvoch desaťročiach začali v praxi uplatňovať sériové a paralelné kinematické štruktúry (Obr. 13) predpokladalo sa že nahradia konvenčné CNC obrábacie stroje a vytvoria základ pre novú generáciu obrábacích centier. Táto myšlienka sa nepodarila uskutočniť z dôvodu problémov spojených s týmto typom štruktúr ktoré nemôžu byť úplne uspokojivo vyriešené. Problémy môžeme postrehnúť najmä v obrábacích procesoch kde sú vysoké požiadavky na presnosť, tuhosť, zručnosť a veľký pracovný priestor. Hoci majú výrobné stroje s PKM vynikajúce mechanické vlastnosti ako vysoká tuhosť, presnosť a odozva majú aj svoje nevýhody ku ktorým patrí ich jedinečnosť, nekonzistentná obratnosť, nepravidelný pracovný priestor a limitovaný rozsah pohybu obzvlášť rotačného pohybu. Pre vyriešenie problémov spojených s PKM bolo vynaložené značné úsilie. Prvé výsledky sa začali dostavovať až pri použití hybridných štruktúr, ktoré sa skladajú z paralelnej a sériovej časti. Táto myšlienka otvorila nové možnosti a potrebu ďalšieho vývoja a výskumu v tejto oblasti.



Obr. 13) Rozdelenie obrábacích strojov a robotov podľa kinematiky [32]

4.1 Pohyblivosť kinematických štruktúr [4]

Mobilita je významnou štruktúrnou vlastnosťou mechanizmov zostavených z veľkého počtu kĺbov a spojov. Taktiež patrí medzi najdôležitejšie koncepty v kinematickom a dynamickom modelovaní mechanizmov a robotických manipulátorov. Medzinárodná federácia na podporu mechanizmov a strojárstva (IFTOMM) definuje pohyblivosť alebo stupeň voľnosti ako počet nezávislých súradníc potrebných na definovanie konfigurácie kinematického reťazca alebo mechanizmu. Pohyblivosť sa využíva na zistenie počtu vstupov potrebných na pohon mechanizmu a určenie počtu nezávislých parametrov v kinematických a dynamických modeloch.

Metódy na výpočet pohyblivosti mechanizmov s uzatvorenou slučkou môžeme rozdeliť na dva druhy:

- Metódy využívajúce kinematické obmedzovacie rovnice a výpočet ich hodnôt pre určitú pozíciu mechanizmu so špecifickým umiestnením kĺbov
- Metódy využívajúce rýchly výpočet mobility bez potreby vytvorenia kinematických obmedzovacích rovníc

Prvý druh je platný bez výnimky. No bez kinematického modelu mechanizmu nie je možné rýchlo určiť pohyblivosť. Tento druh býva zvyčajne vyjadrený ako uzatvorené rovnice s potrebou analyzovania z hľadiska závislosti. Nie je známy žiadny spôsob ako informácie o mobilite mechanizmu bez použitia kinematickej analýzy využitím analytických nástrojov.

Pomocou Cebychev-Grubler-Kutzbachovho vzorca pohyblivosti môže byť pohyblivosť M mechanizmu zloženého z L väzieb spojených kĺbmi určená z rovnice:

$$M = 6(L - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i$$

(1) Cebychev-Grubler-Kutzbachov vzorec

Kde f_i je počet stupňov voľnosti priradený ku kĺbu i . Táto rovnica sa využíva na výpočet pohyblivosti priestorových robotických mechanizmov.

4.1.1 Pohyblivosť rovinného mechanizmu [4]

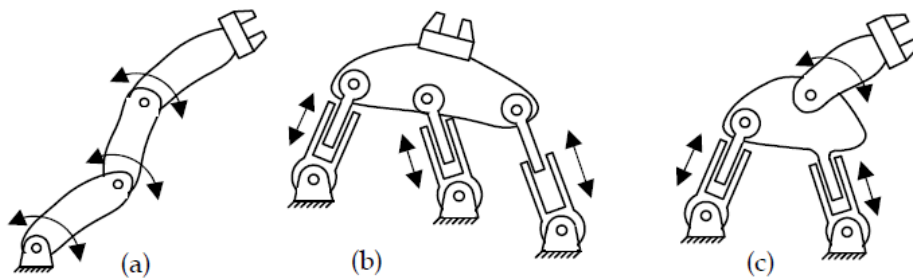
Pomocou Kutzbach-Grueblerovej rovnice môžeme študovať pohyblivosť rovinných mechanizmov aby sme získali informácie o vplyve pohyblivosti na kinematickú analýzu a návrh sériových, paralelných a hybridných kinematických štruktúr.

$$M = 3(L - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i$$

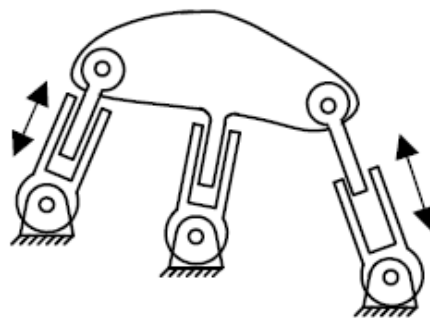
(2) Cebychev-Grubler-Kutzbachov vzorec pre rovinný mechanizmus

V tejto rovnici M je pohyblivosť mechanizmu zloženého z L väzieb spojených kĺbmi, f_i je počet stupňov voľnosti priradený ku kĺbu i . Robotické štruktúry so tvorené sériovými a paralelnými reťazcami a tie majú rôzny počet ramien a kĺbov. Použitím rovnice x všetky tri štruktúry znázornené na obr. 8 majú tri stupne voľnosti, $M=3$. Toto dáva koncovému efektoru 2 stupne voľnosti pre ľubovoľný pohyb v rovine x - y , a jeden rotačný stupeň voľnosti na orientáciu okolo osi z . Sériová kinematická štruktúra má všetky tri kĺby aktívne. U paralelnej a hybridnej štruktúry sú tri prizmatické kĺby aktívne a otočné kĺby sú pasívne. Paralelná časť hybridnej štruktúry (Obr. 14) má dva stupne voľnosti pretože sme odstránili jeden pasívny rotačný kĺb a jedno rameno. Existuje aj alternatívny spôsob redukcie počtu stupňov voľnosti paralelného mechanizmu a tým aj zníženie počtu aktívnych prizmatických kĺbov (Obr. 15). Robí sa to odstránením jedného otočného kĺbu, ktorý spája rameno s plošinou. Toto rameno má pasívny prizmatický kĺb na odstránenie jedného stupňa voľnosti. Po odstránení otočného kĺbu sa stane z ramena trojsilový člen a vzniknú v ňom ohybové momenty. Tieto momenty potrebujú značnú

pozornosť z dôvodu zachovania pôvodnej presnosti a tuhosti. Tento spôsob zníženia stupňov voľnosti sa využíva u Triceptu na zníženie stupňov voľnosti zo 6 na 3.



Obr. 14) Schéma rovinného mechanizmu s 3 stupňami voľnosti s a) sériovou b) paralelnou c) hybridnou štruktúrou [4]



Obr. 15) Schéma rovinného mechanizmu s paralelnou štruktúrou a dvomi stupňami voľnosti [4]

U rovinných mechanizmov sa vyžaduje aby otočné kĺby boli kolmé na rovinu a prizmatické kĺby zostali v rovine. Tieto mechanizmi sa môžu považovať za špeciálne prípady priestorových mechanizmov operujúcich iba v rovine.

4.1.2 Staticky preurčené mechanizmy [4]

Explicitný vzťah medzi parametrami štrukturálnymi mechanizmu ako počet reťazcov a kĺbov, pohybové a obmedzujúce parametre kĺbov a mechanizmu vyjadruje vzorec pre rýchly výpočet pohyblivosti. Zvyčajne je veľmi jednoduché zistiť tieto parametre bez potreby vytvorenia kinematických obmedzujúcich rovníc. No nie všetky vzorce pre rýchly výpočet pohyblivosti sa dajú použiť u všetkých klasických mechanizmoch obzvlášť u paralelných mechanizmoch. Významnú rolu pri určovaní pohyblivosti mechanizmov nazývaných paradoxné alebo staticky preurčené ale mobilné mechanizmy zohrávajú zvláštne geometrické podmienky. Pohyblivosť je spôsobená geometrickými podmienkami medzi kĺbovými osami. Tieto podmienky sa nazývajú staticky preurčené podmienky. Väčšina z nich sú priestorové mechanizmy čo z nich tvorí vhodný základ pre moderné väzbové návrhy tam kde je potrebný priestorový pohyb. Staticky preurčené mechanizmy sú mobilné s menším počtom väzieb a kĺbov.

Pri paralelných a hybridných rovinných mechanizmoch môže rovnica mobility vykazovať záporné hodnoty, ktoré by naznačovali, že tieto mechanizmy sú nepohyblivé aj keď to nie je pravda. Statické preurčenie v rovinných paralelných a hybridných mechanizmoch spôsobujú geometrické požiadavky na kĺbové osi vo vzťahu medzi sebou. Z tohto dôvodu využívame pre rovinné a staticky preurčené mechanizmy Somo-Malushevovu rovnicu pohyblivosti, ktorá je odvodená od priestorovej Kutzbach-Grueblerovej rovnice.

$$M = 6(L - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i + s$$

(3) Somo-Malushevova rovnica

Pre mechanizmy ktoré nemajú žiadne pasívne stupne voľnosti je parameter s počet staticky preurčených podmienok.

4.2 Sériové kinematické štruktúry [19], [20]

Sériové kinematické štruktúry (Obr. 16) sú tvorené otvoreným kinematickým reťazcom v ktorom sú kinematické dvojice radené za sebou. Pohyb jednotlivých členov je na sebe nezávislý. Výsledný pohyb koncového efektoru sa skladá z niekoľkých na seba nadväzujúcich pohybov. Ramená sú navzájom pospájané kĺbmi. Všetky ramená okrem základne a koncového efektoru sú pripojené pomocou kĺbov k dvom ďalším ramenám. Základňa a koncový efektor je pripojený vždy iba k jednému ramenu. Roboty so sériovou kinematikou sú dnes najrozšírenejším druhom robotov. Sériové manipulátory sa v priemysle využívajú pri zvaraní, obrábaní, lakovaní, skladaní a kompletovaní.

Podľa kombinácie kinematických dvojíc sa delia na:

- Angulárne roboty
- SCARA roboty
- Kartézske roboty
- Cylindrické roboty
- Sférické roboty



Obr. 16) Sériová štruktúra [20]

4.3 Paralelné kinematické štruktúry [19], [20]

Sú tvorené uzatvoreným kinematickým reťazcom. Robot sa skladá zo základne a pohyblivej platformy ktorá je podopretá minimálne dvomi ramenami. Pre pohyb plošiny je potrebná spolupráca všetkých ramien.

Podľa počtu ramien sa delia na:

- Bipody
- Tripody
- Delta roboty – manipulácia s bremenom
- Pentapody
- Hexapody

Sériové manipulátory	Paralelní manipulátory
+ jednoduchá mechanická architektura Zpravidla jednodušší řešení přímé a inverzní kinematiky, přímá kinematika lze vždy řešit analyticky, inverzní kinematika obecně nelze řešit analyticky.	- složitější mechanická architektura Řešení přímé a inverzní kinematiky může být obtížnější, inverzní kinematika lze většinou řešit analyticky (s výjimkou složitých kinematických architektur), přímá kinematika obecně nelze řešit analyticky.
- užité zátížení manipulátoru Všechna ramena manipulátoru jsou zatěžována výhradně na ohyb a každé z ramen musí být dimenzováno tak, aby udrželo celou váhu břemene => manipulátor musí být dostatečně robustní (vyšší hmotnost, horší dynamické vlastnosti, poddajnost manipulátoru)	+ užité zátížení manipulátoru Síla potřebná k udržení břemene je rozdělena mezi jednotlivé kinematické řetězce (koncový efektor manipulátoru je podepírán ve více bodech) => manipulátor nemusí být tak robustní (nižší hmotnost, lepší dynamické vlastnosti, vyšší tuhost manipulátoru)
- přesnost a opakovatelnost manipulátoru Nasčítávání chyb vzniklých při polohování jednotlivých ramen nejčastěji v důsledku jejich průhybů, případně chyb snímačů v jednotlivých aktuátorech => ztráta přesnosti a opakovatelnosti.	+ přesnost a opakovatelnost manipulátoru Vzhledem k odlišné mechanické konstrukci jsou chyby vzniklé při polohování jednotlivých ramen průměrovány => dosažení větší přesnosti a opakovatelnosti.
- umístění aktuátorů Aktuátory musí být umístěny v každém kloubu manipulátoru (aktuátory se pohybují společně s manipulátorem) => horší dynamické vlastnosti, větší robustnost manipulátoru, nutnost vézt kabeláž v celé mechanické konstrukci.	+ umístění aktuátorů Aktuátory mohou být umístěny na základně manipulátoru (a to v mnoha případech i napevno) => lepší dynamické vlastnosti, lehčí konstrukce manipulátoru, možnost prostorově oddělit aktuátor (v případě že manipulátor musí pracovat v agresivním, vybušném či jinak nestandardním prostředí)
+ pracovní prostor Relativně velký pracovní prostor.	- pracovní prostor Pracovní prostor je z důvodu složitější mechanické konstrukce více komplikovaný (neregulární tvar s řadou výdutí a prohlubní).

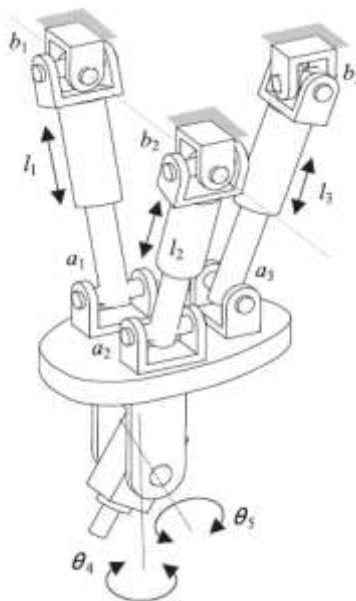
Tab 1) Porovnanie základných vlastností paralelných a sériových manipulátorov [20]

4.4 Hybridné kinematické štruktúry [4],[5],[11]

Keď štandardné mechanizmy so sériovou ale aj paralelnou štruktúrou dosiahnu svoje limity môžeme použiť mechanizmy s hybridnou kinematickou štruktúrou. Manipulátory s hybridnou kinematickou štruktúrou (Obr. 17) pozostávajú z uzatvorených a otvorených reťazcov alebo môžu byť tvorené ako postupnosť paralelných mechanizmov. Tieto manipulátory odstraňujú problém obmedzeného pracovného priestoru paralelných mechanizmov a poskytujú výhody sériových aj paralelných manipulátorov ako pevnosť a pracovný priestor. Hybridné kinematické štruktúry môžu obsahovať ako prvé tri väzby a kĺby tvoriace paralelnú kinematickú štruktúru, ktorá má za úlohu hrubé polohovanie koncového efektoru. Ostatné kĺby a väzby sú usporiadané tak aby tvorili sériovú kinematickú štruktúru. Sériová kinematická štruktúra je používaná na orientáciu koncového efektoru. Týmto sa oddelili dve hlavné funkčné požiadavky mechanizmu a ich dizajnové parametre. Sériová kinematická štruktúra môže štandardne pozostávať zo súbežných otáčavých kĺbov a z toho dôvodu sa konštruktéri môžu zamerať na návrh paralelnej kinematickej štruktúry, ktorá vyžaduje vysokú pozornosť. Rozdelením konštrukčných požiadaviek sa redukovali problémy s návrhom paralelnej kinematickej štruktúry s tromi stupňami voľnosti, ktorá polohuje sériovú kinematickú štruktúru pozdĺž os x, y a z. Aj keď požiadavky na orientáciu nie sú obsiahnuté v konštrukčných požiadavkách paralelného mechanizmu, schopnosť dodávať systému krútiaci moment je stále časťou konštrukčných požiadaviek. Toto je dopĺňujúca požiadavka k schopnosti vykonávať akýkoľvek pohyb okolo troch osí a podporovať súvisiaci systém síl v týchto smeroch

Mechanizmy s hybridnou kinematickou štruktúrou:

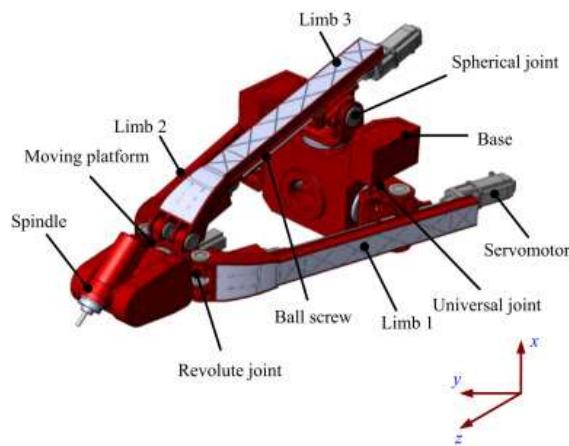
- Tricept – uplatnenie pri operáciách ako vysokorýchlostné frézovanie, zváranie a skladanie komponentov dokopy v leteckom a automobilovom priemysle
- Exechon – najnovší a upravený prototyp Triceptu
- Trivariant – konštrukcia vychádza z Triceptu odobratím jedného stupňa voľnosti



Obr. 17) Hybridná kinematická štruktúra [4]

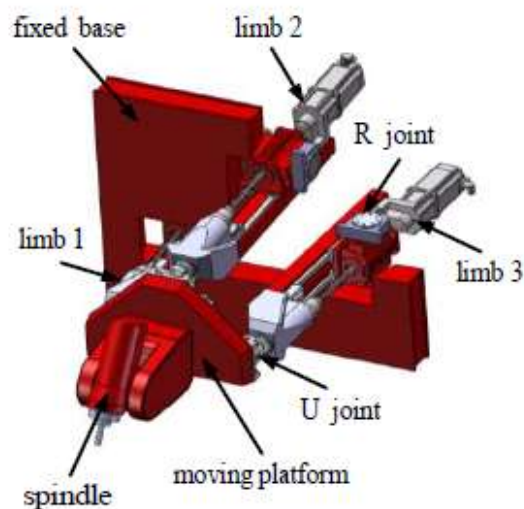
4.4.1 Exechon [6], [7], [28]

Karl-Erik Neumann len nedávno navrhol a nechal si patentovať Exechon, ktorý vznikol ako snaha znížiť počet pasívnych kĺbov a neaktívnych stupňov voľnosti. Exechon (Obr. 18) sa skladá z pevnej základne a pohyblivej plošiny ktorá je podporovaná tromi ramenami. Rameno 1 (limb 1) a rameno (limb 2) sú symetrické vzhľadom k ramenu 3 (limb 3). Pohyblivá plošina je spojená so základňou cez ramená 1 a 2 pomocou univerzálneho (U) kĺbu na ktorý naväzuje prizmatický (P) kĺb a otočný (R) kĺb. Lineárnym pohonom skrutky je poháňaný prizmatický kĺb. Spojenie ramena 3 je iné ako u ramena 1 a 2 . Rameno 3 je spojené s pohyblivou plošinou pomocou guľového (S) kĺbu. Na plošine môže byť pripevnené elektrické vreteno potrebné na vysokorýchlostné frézovanie. Pri nezávislom pohone pomocou troch servomotorov sa dá vykonávať jeden posuvný pohyb po ose z a dva rotačné pohyby okolo osi x a y.



Obr. 18) Štruktúra Exechonu [28]

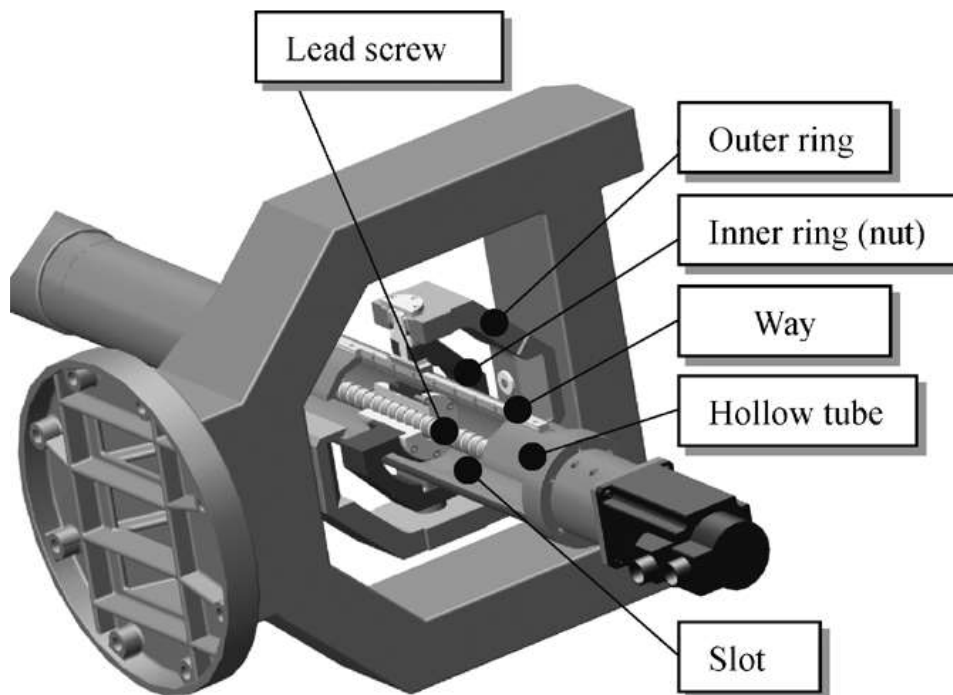
Zmenou poradia kĺbov v jednotlivých ramenách Exechonu vznikne nový koncepčný dizajn nazývaný Exe-variant (Obr. 19). Rameno 1 a rameno 2 Exe-variantu spája pevnú základňu s pohyblivou platformou pomocou otočného kĺbu (R), prizmatického kĺbu (P) a univerzálneho kĺbu (U). U ramena 3 sú to otočný kĺb (R), prizmatický kĺb (P) a sférický kĺb (S).



Obr. 19) Exe-variant [28]

4.4.2 Trivariant [9], [10]

Trivariant (Obr. 21) je hybridná kinematická štruktúra s piatimi stupňami voľnosti odvodená od Triceptu zmenou funkcie jedného aktívneho reťazca na pasívny reťazec. Je potrebné aby paralelné kinematické štruktúry mali valcový pracovný priestor pre axiálne symetrický kinematický výkon. Toto je veľmi obtiažné dosiahnuť pre Trivariant pretože jeho štruktúra je rovinná symetrická. UP kĺb (Obr.20) Trivariantu je tvorený tak, že na dutom ramene je vytvorený dlhá a úzka drážka dovoľujúca aby vnútorný prstenec U kĺbu slúžil ako prvok prizmatického páru na jednej strane a ako matica sústavy servomotoru s vodiacou skrutkou na druhej strane. Pomocou pohonu servomotoru môže byť dosiahnutý aktívny posuvný pohyb pozdĺž dutého ramena vzhľadom na vnútorný prstenec U kĺbu.

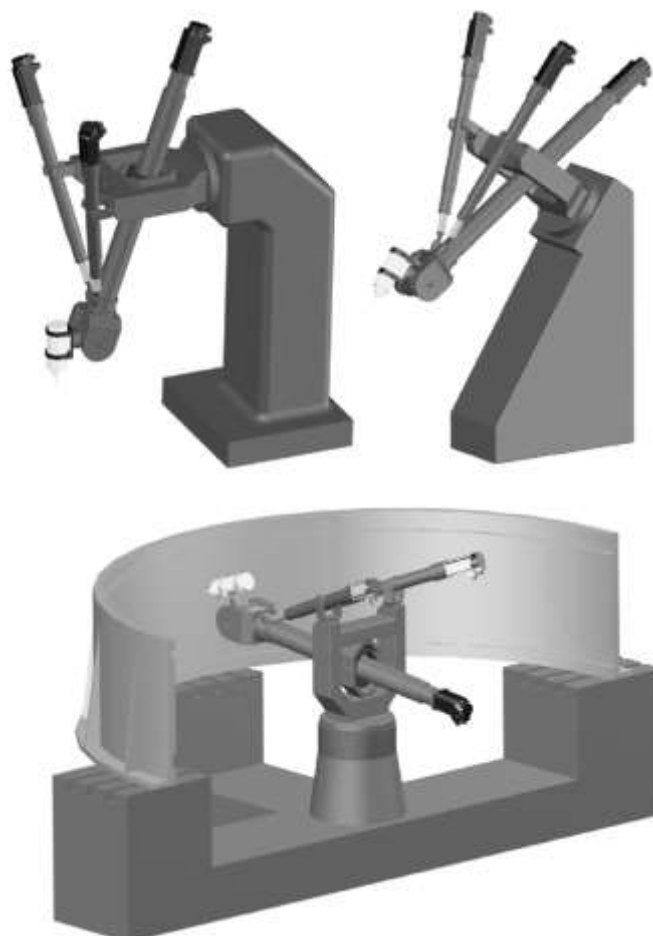


Obr. 20) Konštrukcia UP ramena [10]

Výhody:

- UP rameno môže byť dostatočne silné aby udržalo krútiaci moment okolo svojej axiálnej osi
- Aktuálna pozícia referenčného bodu platformy môže byť priamo odmeriavaná pomocou snímania buď pomocou orientácie dutého ramena použitím dvoch snímačov orientovaných na ortogonálnej ose U kĺbu patriaceho UP končatine alebo posuvným pohybom dutého ramena vzhľadom na vnútorný prstenec U kĺbu pomocou lineárnej mriežky. Toto umožňuje vytvoriť ovládanie v uzatvorenej slučke a tým zlepšiť presnosť polohovania zariadenia.
- Trivariant môže byť postavený ako plug and play modul s piatimi stupňami voľnosti pre rôzne druhy strojov. Trivariant môže byť umiestnený zvislo, šikmo a horizontálne. (Obr.d)

- Trivariant je cenovo efektívnejší ako Tricept pretože neobsahuje jeden UPS reťazec. Aj napriek tomu si zachováva vysokú tuhosť a vysokú dynamiku akú môžeme pozorovať u triceptu.



Obr. 21) Konfigurácie Trivariantu [10]

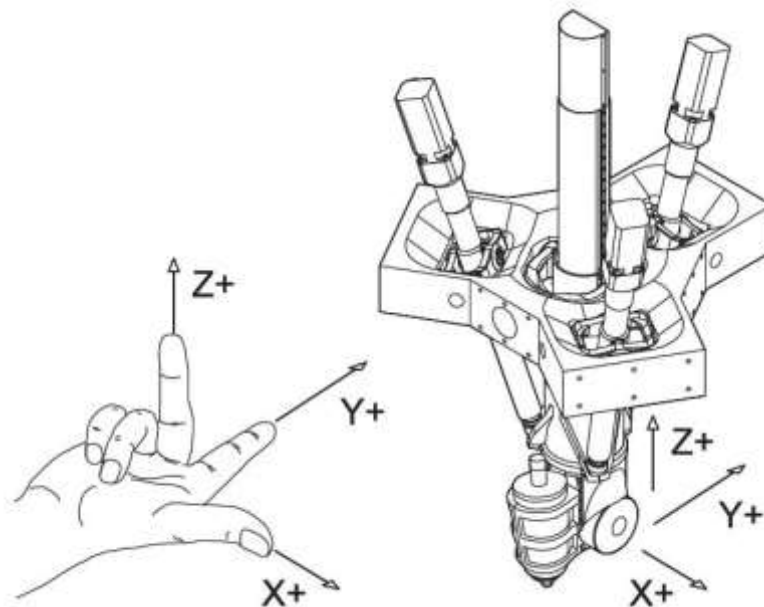
4.4.3 Tricept [8],[12], [29], [30]

Tricept (Obr. 22) bol predstavený Karl-Erik Neumannom ako manipulátor s dvomi rotačnými a jedným translačným stupňom voľnosti. Pohyblivú plošinu podopierajú tri pohyblivé ramená pripojené k základni. Každé rameno je navrhnuté ako sféricko-prizmaticko-sférický kinematický reťazec, v ktorom je aktívny iba prizmatický kĺb. Poprípade jeden so sférických kĺbov môže byť vymenený za univerzálny kĺb bez zmeny kinematickej rovnice. Pre obidva prípady platí, že každé ovládané rameno ma prinajmenšom 6 stupňov voľnosti. V strede mechanizmu sa nachádza pasívne prizmaticko-univerzálne rameno na obmedzenie pohyblivosti pohyblivej platformy na 3 stupne voľnosti. Pri rovnobežnosti základne a pohyblivej platformy sú osi x a y základného rámu rovnobežné s dvomi osami univerzálneho kĺbu pasívneho ramena.



Obr. 22) Tricept [31]

Moduly Tricept môžu využívať karteziánsky súradnicový systém x, y, z (Obr. 23). Každý dostupný ovládací systém pre Tricepty zahŕňa kinematickú transformáciu, ktorá uľahčuje programovanie. Napríklad ovládací systém Siemens 840D je vyvinutý ako štandardný riadiaci systém pre veľké množstvo obrábacích strojov. To znamená že programovanie Triceptu je rovnako jednoduché ako programovanie ostatných obrábacích strojov používajúcich rovnaký ovládací systém.



Obr. 23) Súradnicový systém pre stroj Tricept [29]

Úspech Triceptu je založený na nasledujúcich faktoch:

- Tricept je modulárny robot, disponuje tromi rovnakými servopohonmi namáhanými na ťah a tlak. Centrálny reťazec zachytáva torzné momenty.
- Priamy odmeriavací systém a redundantné snímače (meranie rotácie centrálneho reťazca a pohyb pozdĺž neho) poskytujú dostatočnú presnosť a tuhosť globálnemu systému.
- Vysoká dynamika skracuje čas medzi operáciami
- Vysoká spoľahlivosť z pohľadu malej časovej náročnosti
- Dostatočne veľký pracovný priestor umožňuje lepšiu dostupnosť bez potreby presunu súčastí
- Flexibilita Triceptu umožňuje rýchle prestavenie a preprogramovanie sa pre uľahčenie zmien vo výrobe a uľahčuje vývoj výrobných liniek predtým ako je produkt plne definovaný.
- Je možné programovanie s virtuálnymi zariadeniami čo spôsobuje skrátenie času potrebného na programovanie nových súčastí

4.4.4 Stroj Verne [21]

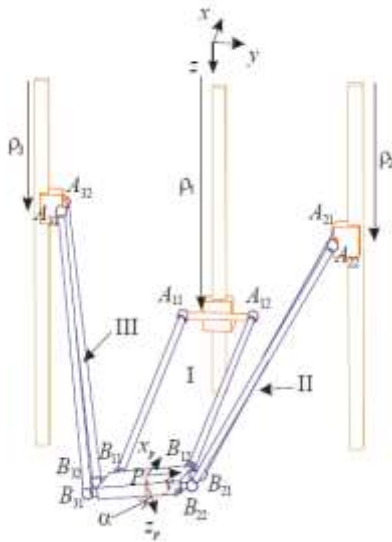
Stroj Verne (Obr. 24) je 5 osí obrábací stroj vyvinutý firmou Fatronik. Verne pozostáva z paralelného modulu a sklopného stola. Paralelný modul pohybuje vretenom v priamočiaram pohybe zatiaľ čo sklopný stôl otáča obrobok okolo dvoj pravouhlých osí.



Obr. 24) Obrábací stroj Verne [21]

Pohyblivá platforma paralelného modulu je pripojená k základni prostredníctvom troch ramien. Rameno sa skladá z dvoch tyčí, ktoré spájajú prizmatický kĺb s pohyblivou plošinou cez dva sférické kĺby. Ramená 2 a 3 sú identické a tvoria paralelogram. Rameno 1 je odlišné, tvorí lichobežník. Tri posuvné ovládače vytvárajú pohyb plošiny pozdĺž troch vertikálnych

vodiacich dráh. Sklápací stôl otáča obrobok okolo dvoch pravouhlých os. Prvá osa – osa naklopenia je horizontálna a druhá rotačná osa je kolmá na naklápací stôl. Pre nastavenie nástroja voči obrobku sa využívajú výhody týchto dvoch osí. Na Obr. 25 môžeme vidieť kinematickú schému obrábacieho stroja Verne.



Obr. 25) Zjednodušená kinematická schéma obrábacieho stroja VERNE [21]

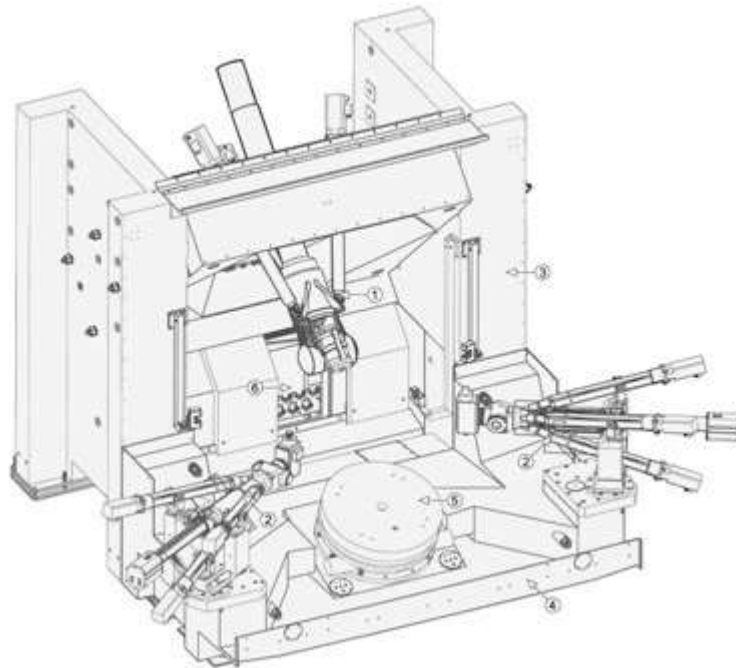
5 APLIKÁCIA TRICEPTU V PRIEMYSLE

5.1 Automobilový priemysel [23], [26], [27]

Medzi jednu z najúspešnejších aplikácií Triceptu patrí konštrukčné obrábanie v automobilovom priemysle, kde bol Tricept nasadený úspešne s vysokou spoľahlivosťou a výkonom. Medzi najväčších zákazníkov patrí ALCOA, HYDRO, GM, BMW a DANA, u ktorých Tricept patrí k najhlavnejším produktom a poskytuje flexibilitu požadovanú zákazníkmi. Tricept (Obr. 26) obrába konštrukcie od nosičov náprav cez nárazníky až po hlavné rámy karosérie, rámy na ochranu proti vetru a bočné rámy.

Rada Tricept T60x sa využíva všade kde je potrebná flexibilita s ľahkým obrábaním, no je udržaná potrebná tuhosť, ktorú nedokážu poskytnúť kĺbové roboty.

Naopak Tricept T805 sa používa tam, kde je potrebná väčšia sila a presnosť spolu s jeho väčším pracovným priestorom. Tricept T805 je dostupný pre tieto použitia s podpornou konštrukciou, automatickým vymieňaním nástrojov, otočným stolom a rôznymi inými doplnkami. V určitých špecifických prípadoch spojením oboch rád vzniká cenovo najvýhodnejšie a časovo najefektívnejšie riešenie pre zákazníka.



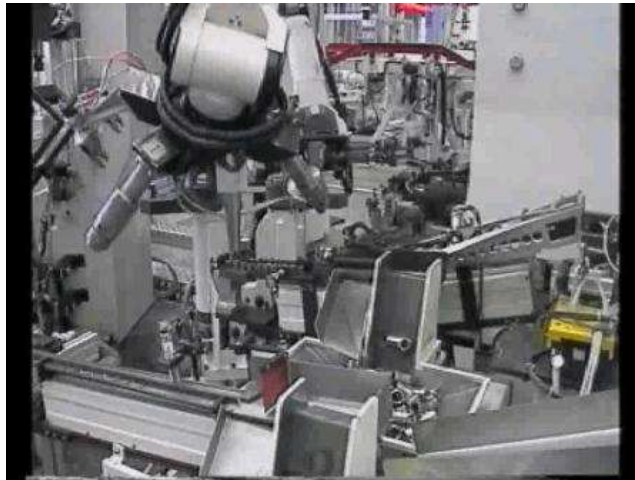
Obr. 26) Obrábacie centrum založené na Tricepte [23]

Tricept sa ďalej uplatňuje v automobilovom priemysle aj v automatizovaných centrách na obrábanie blokov a hláv motorov (Obr. 27).



Obr. 27) Skupina triceptov pracujúcich na rovnakej linke [26]

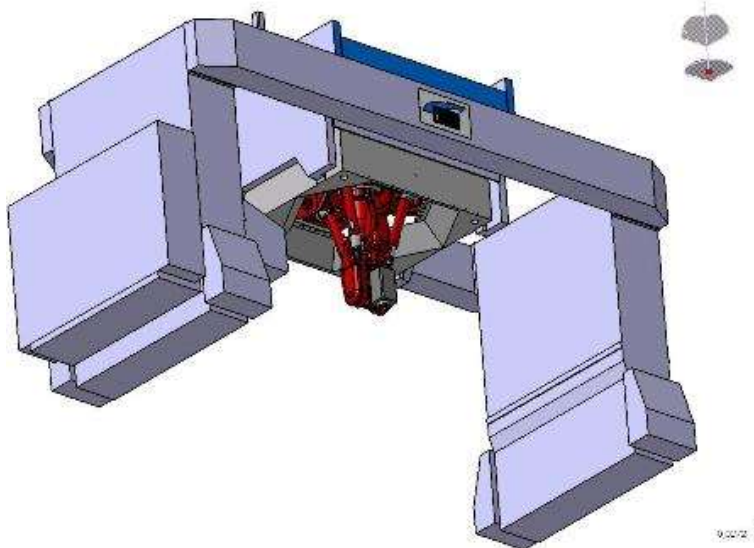
Taktiež sa využíva pri kompletovaní jednotlivých častí motora ako sú ložiská a kolíky, pri ktorých je potrebná väčšia sila na úspešné dokončenie úlohy. Taktiež je možné využiť ako efektor revolverovú hlavu (Obr. 28).



Obr. 28) Tricept s revolverovou hlavou v továrni GM v Šanghaji [27]

5.2 Železničný priemysel [24]

Ďalšou z mnohých úspešných využití Triceptu je konštrukčné obrábanie v železničnom priemysle. Najobdivuhodnejším je použitie Triceptu v najväčšom portálovom stroji. Integrátor Loxin 2002 (Obr. 29) má veľké skúsenosti s využitím Triceptu v ich portálovom stroji. Toto spojenie je najvýhodnejším riešením pre obrábanie konštrukcii vagónov z ocele aj hliníku. Ďalším využitím tejto konfigurácie je trecie zváranie premiesením, kde vysoká tuhosť zariadenia umožňuje zváranie dlhých hliníkových panelov. Rovnaká konfigurácia portálového stroja môže byť použitá na obrábanie a aj zváranie hliníkových panelov iba pomocou zmeny nástroja.



Obr. 29) Portálová konfigurácia Loxin obsahujúca Tricept [24]

5.3 Letecký priemysel [25]

Štruktúrálné obrábanie v leteckom priemysle sa stalo najdôležitejšou aplikáciou Triceptu v integrátore Loxin 2002 (Obr. 30). Projekty na ktorých sa Loxin podieľa v leteckom priemysle sú: krídlové konštrukcie (predné a zadné rebrá, nosníky a pozdĺžne výstuže), pohyblivé časti (výškové a smerové kormidlo) a trup lietadla (panely a výstuže).



Obr. 30) Tricept využívaný v leteckom priemysle [25]

5.4 Laserová aplikácia [33]

Presná pohyblivosť Triceptu na 3D povrchu dovoľuje aby bol používaný aj pri rezaní pomocou lasera. Na fotografii (Obr. 31) je zobrazený Tricept T9000 na veľtrhu v Bilbao BIEMH '08. Firma chcela ukázať možnosť konfigurácie dvojitého stroja. Tricept má prichytenú laserovú hlavu na elektrickom vretene. V tejto konfigurácii sa môže využívať na laserové rezanie aj frézovanie.



Obr. 31) Tricept T900 [33]

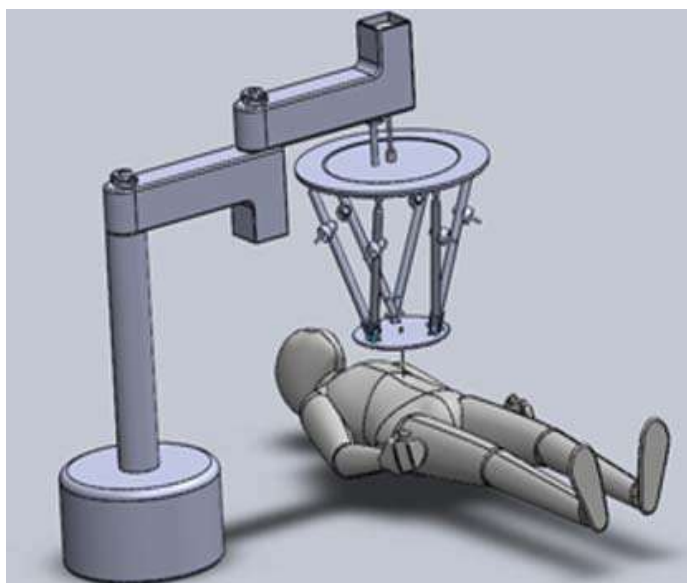
6 NÁVRHY HYBRIDNÝCH MANIPULÁTOROV PRE MEDICÍNSKE ÚČELY [13]

Medzi dôležité výhody robotov používaných na medicínske účely patria:

- Menšie rezy
- Presnosť
- Väčšia stabilizácia v porovnaní s ľudskou rukou
- Kratší operačný čas
- Rýchlejšie zotavenie s operácie

Vývoj robotov pre medicínske účely sa delí do troch generácií. Prvá generácia bola odvodená z priemyselných robotov z osemdesiatych rokov. V ortopédii boli využívané na rezanie a vrtanie do kosti a v neurochirurgii na presné polohovanie nástroja vo vnútri hlavy pacienta. Druhá generácia bola vyvinutá špeciálne pre medicínske účely v deväťdesiatych rokoch. Boli používané hlavne v ortopédii, neurochirurgii, rádiológii a miniinvazívnej chirurgii. Medicínsky robot v miniinvazívnej chirurgii drží rameno kamery alebo mechanické ramená s potrebnými chirurgickými nástrojmi. Chirurg využíva mechanické ramená na operovanie pacienta. Tretia generácia medicínskych robotov bola vyvinutá na vykonávanie extrémne ťažkých operácií. Boli využívané v ortopédii, intervenčnej rádiológii a pri problémoch s kardiovaskulárnym systémom.

Nový hybridný robot vytvorený pre medicínske účely (Obr. 32) využíva ako vnútorné kĺby sériovú štruktúru SCARA s tromi stupňami voľnosti pre umiestnenie koncového efektoru. Prvé dva kĺby sú otočné a tretí kĺb je prizmatický. Ako vonkajšie kĺby využíva paralelnú štruktúru, Stewartovu plošinu na orientáciu koncového efektoru. Stewartova plošina má šesť aktívnych ramien spájajúcich plošinu so základňou. Každé aktívne rameno je pripojené k základni a plošine pomocou pasívneho univerzálneho kĺbu.



Obr. 32) Nový hybridný manipulátor navrhnutý pre lekárske účely [13]

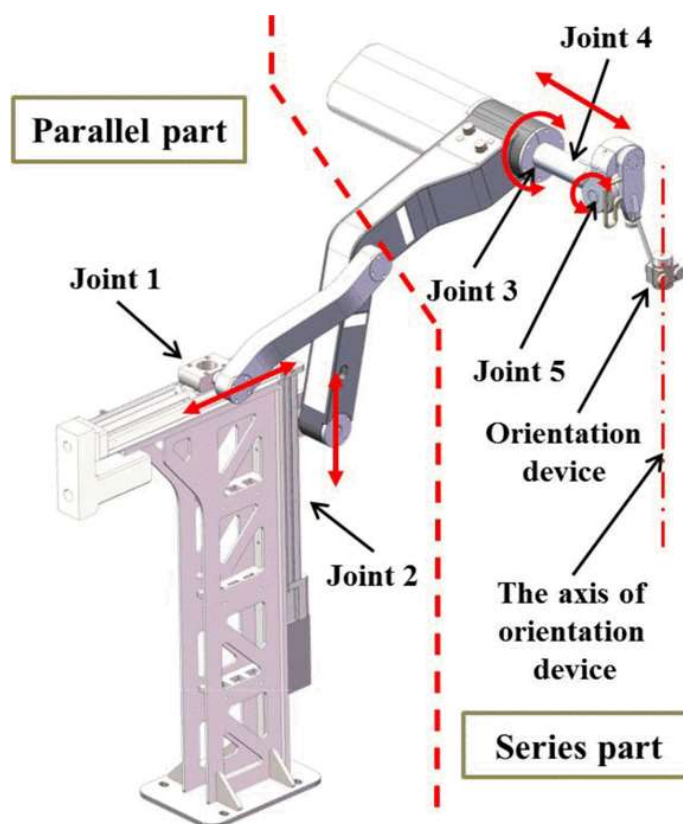
6.1 Hybridný manipulátor pre operáciu chrbtice [14]

V dnešnej dobe väčšina robotov využívaných na operáciu chrbtice má sériovú kinematickú štruktúru pre jej veľký pracovný priestor a jednoduchú konštrukciu. Z dôvodu potreby rôznych koncových efektorov je robot zaťažovaný pomerne veľkou spätnou silou. Operácia vyžaduje aj veľký pracovný priestor, z toho dôvodu je výhodné použiť hybridný manipulátor. Robot je tvorený hybridným manipulátorom a mobilným vozidlom. Hybridný manipulátor (Obr. 33) má 5 stupňov voľnosti. 3 stupne voľnosti pre lokalizáciu trojrozmernej pozície a 2 stupne voľnosti pre dvojrozmernú orientáciu uhla.

Prvé dva kĺby tvoria paralelný mechanizmus a zabezpečujú tuhosť a stabilitu. Posledné tri kĺby tvoria sériový mechanizmus a ich osi sa pretínajú.

Chirurg môže pohybovať s robotom z jeho východiskovej pozície do operačnej pozície. Keď sa koncový efektor dostane do pracovnej pozície ovládanie robota sa zmení na automatické riadené navigačným systémom, ktorý zabezpečí orientáciu koncového efektora a presné polohovanie. Na úspešné dokončenie operácie sa môžu využívať rôzne pracovné moduly. Tretí a piaty kĺb je zodpovedný za nastavenie sklonu uhlu koncového efektora, zatiaľ čo prvý, druhý a štvrtý kĺb je zodpovedný za polohu koncového efektora a kompenzáciu odchýlok polohy spôsobených nastavením uhlu ponoru.

Navigačným systémom pri operácii zohľadňuje aj pohyb tela spôsobený dýchaním alebo chirurgickým zákrokom a upravuje polohu koncového efektora podľa pohybu tela.



Obr. 33) Celková mechanická konštrukcia robota [14]

7 ZÁVER

Táto bakalárska práca vznikla s cieľom získať prehľad v schémach hybridných kinematických štruktúr výrobných strojov a priemyselných robotov.

V prvej kapitole sa nachádzajú definície niektorých základných pojmov z robotiky a tiež stručná história priemyselných robotov. Nasledujúca kapitola popisuje kĺby používané pri stavbe priemyselných robotov. Potom nasleduje analýza kinematických štruktúr, definícia kinematických dvojíc a kinematických reťazcov používaných pri stavbe priemyselných robotov. Ďalšia kapitola popisuje jednotlivé kinematické štruktúry a hlbšie rozoberá priemyselné roboty s hybridnou kinematickou štruktúrou. Nasledujúca kapitola popisuje využitie Triceptu v priemysle. Posledná kapitola je venovaná návrhom manipulátorov s hybridnou kinematickou štruktúrou pre medicínske účely.

Hybridné kinematické štruktúry sú novým typom vo výrobnej technike a ešte nie sú úplne preskúmané ale majú veľký potenciál nájsť svoje miesto v priemyselnej výrobe, keďže poskytujú výhody ako sériových tak aj paralelných kinematických štruktúr.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Glossary of Robotics Terms* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/glossary>
- [2] BONEV, Ilian. The True Origins of Parallel Robots [online]. In: . [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.parallelemic.org/Reviews/Review007.html>
- [3] PLŠEK, Ladislav a Radek KNOFLÍČEK. Historie hexapodů.... MM Průmyslové spektrum. 2003, roč. 03, č. 5, s. 12, ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/historie-hexapodu.html>
- [4] Khalifa H. Harib, Kamal A.F. Moustafa, A.M.M. Sharif Ullah and Salah Zenieh (2012). Parallel, Serial and Hybrid Machine Tools and Robotics Structures: Comparative Study on Optimum Kinematic Designs, Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization, Dr. Serdar Kucuk (Ed.), ISBN: 978-953-51-0437-7, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/serial-and-parallel-robotmanipulators-kinematics-dynamics-control-and-optimization/parallel-serial-and-hybrid-machine-tools-androbotics-structures-comparative-study-on-optimum-kinema>
- [5] TANEV, Tanio K. Kinematics of a hybrid (parallel–serial) robot manipulator. *Mechanism and Machine Theory* [online]. Elsevier, 2000, **35**(9), 1183-1196 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1016/S0094-114X(99)00073-7. ISSN 0094-114X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0094114X99000737>
- [6] ZHANG, Jun, Yanqin ZHAO a Yan JIN. Kinetostatic-model-based stiffness analysis of Exechon PKM. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* [online]. Elsevier, 2016, **37**, 208-220 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.04.008. ISSN 0736-5845. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0736584515000630>
- [7] TANG, Teng-fei a Jun ZHANG. Conceptual design and comparative stiffness analysis of an Exechon-like parallel kinematic machine with lockable spherical joints. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. SAGE Publications, 2017, **14**(4) [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1177/1729881417724134. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1729881417724134>
- [8] MIR AMIN HOSSEINI a HAMID-REZA MOHAMMADI DANIALI. Kinematic Analysis Of Tricept Parallel Manipulator. *International Islamic University Malaysia Engineering Journal* [online]. IIUM Press, International Islamic University Malaysia, 2012, **12**(5) [cit. 2018-05-15]. ISSN 1511-788X. Dostupné z: <http://journals.iium.edu.my/ejournal/index.php/iiumej/article/view/200/222>

- [9] LIU, H.T., T. HUANG, X.M. ZHAO, J.P. MEI a D.G. CHETWYND. Optimal design of the TriVariant robot to achieve a nearly axial symmetry of kinematic performance. *Mechanism and Machine Theory* [online]. Elsevier, 2007, **42**(12), 1643-1652 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2006.12.001. ISSN 0094-114X. Dostupné z: [https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0094114X06002230](https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0094114X06002230)
- [10] HUANG, T., M. LI, X.M. ZHAO, J.P. MEI, D.G. CHETWYND a S.J. HU. Conceptual design and dimensional synthesis for a 3-DOF module of the TriVariant-a novel 5-DOF reconfigurable hybrid robot. *Robotics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2005, **21**(3), 449-456 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/TRO.2004.840908. ISSN 1552-3098. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1435489/>
- [11] BULEJ, Vladimír, Juraj URÍČEK, Viera POPPEOVA, Robert ZAHORANSKÝ a Monika RUPIKOVA. Study of the Workspace of Hybrid Mechanism Trivariant. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2016, (436), 366-373 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.436.366. Dostupné z: <https://www.scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMM.436.366.pdf>
- [12] *Tricept: Hybrid Parallel Robot* [online]. 2009 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240411882>
- [13] KUCUK, Serdar a Baris Doruk GUNGOR. Inverse kinematics solution of a new hybrid robot manipulator proposed for medical purposes. In: *Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO), 2016* [online]. Antalya, Turkey: IEEE, 2016, s. 1-4 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/TIPTEKNO.2016.7863076. ISBN 978-1-5090-2386-8. ISSN 16707812. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7863076/>
- [14] PENG, Yi, Hongjian YU a Zhijiang DU. Design and kinematic analysis of a hybrid manipulator for spine surgery. In: *Mechatronics and Automation (ICMA), 2016 IEEE International Conference on* [online]. Harbin, China: IEEE, 2016, s. 884-889 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558679. ISBN 978-1-5090-2396-7. ISSN 2152-744X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7558679/>
- [15] HANÁČEK, Luděk. Komponenty pro paralelní kinematické struktury. MM Průmyslové spektrum. 2002, roč. 02, č. 4, s. 24, ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/komponenty-pro-paralelni-kinematicke-struktury.html>
- [16] ANDRLÍK, Vladimír. Kulový kloub se třemi stupni volnosti. MM Průmyslové spektrum. 2011 roč. 11 č. 1 s.40, ISSN 1212-2572 Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kulovy-kloub-se-tremi-stupni-volnosti.html>
- [17] KOLÍBAL, Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. Košice: Viena, 2000, 178 s.: il. ISBN 80-88922-27-5.

- [18] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [19] *04 Základy Priemyselnej robotiky- Základné delenie robotov* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://dailyautomation.sk/01-zaklady-priemyselnej-robotiky-zakladne-delenie/>
- [20] GOUBEJ, Martin, Martin ŠVEJDA a Miloš SCHLEGEL. *Úvod do mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu*[online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~msvejda/URM/materialy/Uvod%20do%20mechatroniky.pdf>
- [21] KANAAN, Daniel, Philippe WENGER a Damien CHABLAT. Kinematic analysis of a serial–parallel machine tool: The VERNE machine. *Mechanism and Machine Theory* [online]. Elsevier, 2009, **44**(2), 487-498 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.03.002. ISSN 0094-114X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0094114X08000517>
- [22] *Single Universal Joints* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.beldenuniversal.com/products/universal-joints/single-universal-joints>
- [23] *Structural Machining Automotive* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1238065220>
- [24] *Structural Machining Railroad* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1240239582>
- [25] *Structural Machining Aerospace* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1240239668>
- [26] *Powertrain Machining* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1240239709>
- [27] *Engine Parts Assembly* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1240239830>
- [28] TANG, Tengfei, Yanqin ZHAO, Zhang JUN a Yan JIN. *CONCEPTUAL DESIGN AND WORKSPACE ANALYSIS OF AN EXECHON-INSPIRED PARALLEL KINEMATIC MACHINE* [online]. China, 2015 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://pure.qub.ac.uk/portal/files/16395708/Conceptual_Design_and_Workspace_Analysis_of_an_Exechon_inspired_Parallel_Kinematic_Machine.pdf
- [29] *Working in cartesians: Tricept Transformation* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240415079>

[30] *Facts about Tricept success* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240413422>

[31] *Tricept T606* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240238156>

[32] *Průmyslové roboty v praxi* [online]. Ústav výrobních strojů a mechanismů, Horská 3, Praha 2 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6707543-Prumyslove-roboty-v-praxi.html>. Prezentácia.

[33] *Laser Welding & Cutting* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/index.php?id=en&Naplica=1240239964>

9 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

9.1 Zoznam tabuliek

Tab 1) Porovnanie základných vlastností paralelných a sériových manipulátorov	25
---	----

9.2 Zoznam obrázkov

Obr. 1) Prvá patentovaná paralelná štruktúra	14
Obr. 2) Prvý priemyselný paralelný robot patentovaný v roku 1945	14
Obr. 3) Prvý oktahedrálny hexapod	15
Obr. 4) Stewartov letecký simulátor	15
Obr. 5) Prvý letecký simulátor na základe oktahedrálneho hexapodu.....	16
Obr. 6) Robot Unimate	16
Obr. 7) Model guľového kĺbu s tromi stupňami voľnosti.....	17
Obr. 8) Univerzálny kĺb	18
Obr. 9) Schematické zobrazenie translačných kinematických dvojíc:	
a) suportové, b) šmýkadlové, c) výsuvné	19
Obr. 10) Rotačné kinematické dvojice bez obmedzenia uhlu otáčania: a),c) s ramenom "r"	
a) b), d) okolo vlastnej osi.....	19
Obr. 11) Kĺby zobrazené v náryse a pôdoryse: a) bez obmedzeného uhlu otáčania, b)	
s obmedzeným uhlom otáčania	20
Obr. 12) Príkady kinematických reťazcov	20
Obr. 13) Rozdelenie obrábacích strojov a robotov podľa kinematiky.....	21
Obr. 14) Schéma rovinného mechanizmu s 3 stupňami voľnosti s a) sériovou b) paralelnou	
c) hybridnou štruktúrou	23
Obr. 15) Schéma rovinného mechanizmu s paralelnou štruktúrou a dvomi stupňami voľnosti	
.....	23
Obr. 16) Sériová štruktúra	24
Obr. 17) Hybridná kinematická štruktúra	26
Obr. 18) Štruktúra Exechonu	27
Obr. 19) Exe-variant	27
Obr. 20) Konštrukcia UP ramena.....	28
Obr. 21) Konfigurácie Trivariantu	29
Obr. 22) Tricept	30
Obr. 23) Súradnicový systém pre stroj Tricept	30
Obr. 24) Obrábací stroj Verne	31
Obr. 25) Zjednodušená kinematická schéma obrábacieho stroja VERNE	32
Obr. 26) Obrábacie centrum založené na Tricepte	33
Obr. 27) Skupina triceptov pracujúcich na rovnakej linke	33
Obr. 28) Tricept s revolverovou hlavou v továrni GM v Šanghaji	34
Obr. 29) Portálová konfigurácia Loxin obsahujúca Tricept	34
Obr. 30) Tricept využívaný v leteckom priemysle	35
Obr. 31) Tricept T900	35
Obr. 32) Nový hybridný manipulátor navrhnutý pre lekárske účely	36

Obr. 33) Celková mechanická konštrukcia robota [14].....37

9.3 Zoznam použitých skratiek a symbolov

M	Pohyblivosť
L	Počet väzieb
Fi	Počet stupňov voľnosti
R	Rotačný kĺb
P	Prizmatický kĺb
U	Univerzálny kĺb
S	Sférický kĺb
IFTtoMM	International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science

10 ZOZNAM PRÍLOH

CD:

- Elektronická verzia bakalárskej práce vo formáte PDF