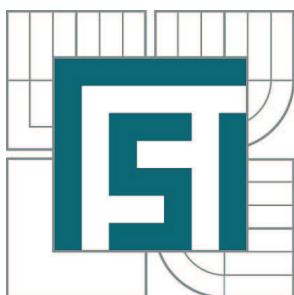


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

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

# KONSTRUKCE MANIPULÁTORU S PKS PRO VELMI MALÉ SOUČÁSTI

DESING OF PKS TYPE TRIPOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ COUFAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL HOLUB

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2010/11

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jiří Coufal

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

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

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 diplomové práce:

### **Konstrukce manipulátoru s PKS pro velmi malé součásti**

v anglickém jazyce:

#### **Desing of PKS type TRIPOD**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnout konstrukční řešení manipulátoru na bázi paralelní kinematiky pro manipulaci velmi malých součástí.

Cíle diplomové práce:

- řešerše manipulátorů v oblasti paralelních kinematik
- volba typu a uspořádání PKS dle zadání
- Konstrukční návrh, 3D model, výkres sestavy, výrobní výkresy vytipovaných uzlů

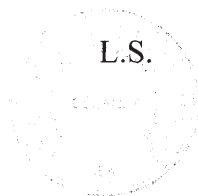
Seznam odborné literatury:

- [www.infozdroje.cz](http://www.infozdroje.cz)
- Petru, F.; Valasek, M.: Concept, Design and Evaluated Properties of TRIJOINT 900H. V: CIRP The 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2004, Verlag wissenschaftliche Scripten, 2004, s. 569 – 584.
- Bleicher, F.; Günther, G.: Automatically Operating Calibration Method for a Three-Axis Parallel Kinematic Machine. V: CIRP The 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2004, Verlag wissenschaftliche Scripten, 2004, s. 165– 183.
- Wieland, F.: Entwicklungsplattform für Parallelkinematiken und Prototyp einer Werkzeugmaschine. Dissertation, TU Chemnitz, 1999.

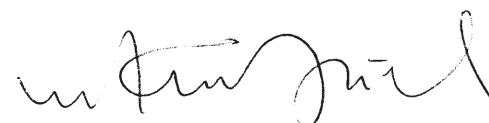
Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Holub

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 26.11.2010



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

  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce má seznámit čtenáře s problematikou manipulátorů zakládajících se na bázi paralelních kinematických struktur, včetně postupu konstrukce zvoleného mechanismu. Úvodní rešeršní část upřesňuje vybrané pojmy týkající se stavebních prvků a klade důraz na jejich požadavky. Možnosti sestavení a používané typy manipulátorů jsou zobrazeny na názorných obrázcích s příslušnými popisky. Návrhy zvoleného paralelního mechanismu a metodiky konstrukcí na sebe volně navazují v příslušných kapitolách. V těchto kapitolách je popsán návrh všech navržených konstrukčních uzlů. Sestavení a testování vyrobeného prototypu je příslušně zdokumentováno s uvedením výsledných poznatků.

## **ABSTRACT**

The thesis acquaints the reader with issues of manipulators based on parallel kinematic structures. It includes also the description of the construction procedure of chosen mechanism. Introductory search part specifies selected terms relating to building elements and describes their requirements. Alternatives of construction and used types of manipulators are shown in the illustrative images with labels. Next chapters deal with projects of selected parallel mechanism and methodologies of constructions. These chapters describe the design of all devised construction nodes. The construction and testing of the produced prototype is properly documented, indicating the resulting knowledge.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

paralelní manipulátor, návrh a konstrukce, Delta robot

## **KEYWORDS**

parallel manipulator, design and construction, Delta robot

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

COUFAL, J. *Konstrukce manipulátoru s PKS pro velmi malé součásti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 111 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Holub.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Konstrukce manipulátoru s PKS pro velmi malé součásti vypracoval samostatně s použitím zdrojů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. května. 2011

. . . . .

Bc. Jiří Coufal

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Holubovi za cenné připomínky a ochotu při vypracování diplomové práce, panu Zdeňku Němcovi za odborný a trpělivý přístup při výrobě navržrných dílů a společnosti Hennlich za poskytnutí použitých kluzných dílů. Poděkování patří také všem rodinným příslušníkům za jejich vytrvalou podporu.

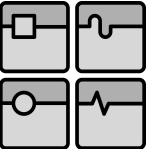


## OBSAH

|        |                                                                                                                |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | Úvod .....                                                                                                     | 18 |
| 1.1.   | Definice používaných pojmů .....                                                                               | 19 |
| 2.     | Kinematické uspořádání stavby robotů .....                                                                     | 22 |
| 2.1.   | Rozdělení dle kinematických struktur .....                                                                     | 22 |
| 2.1.1. | Sériová kinematická struktura .....                                                                            | 23 |
| 2.1.2. | Hybridní kinematická struktura .....                                                                           | 24 |
| 2.1.3. | Paralelní kinematická struktura .....                                                                          | 25 |
| 2.2.   | Porovnání vlastností sériových a paralelních struktur .....                                                    | 26 |
| 3.     | Historie a vznik paralelních mechanismů .....                                                                  | 27 |
| 4.     | Popis paralelních struktur .....                                                                               | 32 |
| 4.1.   | Popis částí a základních stavebních prvků PKS .....                                                            | 32 |
| 4.1.1. | Báze .....                                                                                                     | 33 |
| 4.1.2. | Ramena .....                                                                                                   | 34 |
| 4.1.3. | Klouby .....                                                                                                   | 37 |
| 4.1.4. | Platforma .....                                                                                                | 39 |
| 4.1.5. | Pohony .....                                                                                                   | 41 |
| 4.1.6. | Efektor .....                                                                                                  | 41 |
| 4.1.7. | Shrnutí požadavků kladených na základní stavební prvky PKS .....                                               | 42 |
| 4.2.   | Popis značení kinematických dvojic ve stavbě robotů s PKS .....                                                | 43 |
| 4.2.1. | Uspořádání kloubových bodů .....                                                                               | 43 |
| 4.2.2. | Označení kinematických dvojic a jejich sestavení .....                                                         | 44 |
| 4.3.   | Možnosti uspořádání kinematických dvojic s výsledným počtem třech stupňů volnosti paralelního mechanismu ..... | 45 |
| 4.4.   | Příklady paralelní stavby robotů se třemi stupni volnosti .....                                                | 46 |
| 4.4.1. | Delta koncepce .....                                                                                           | 46 |
| 4.4.2. | Star koncepce .....                                                                                            | 47 |
| 4.4.3. | Ortogonální koncepce .....                                                                                     | 47 |
| 4.4.4. | UPU koncepce ("Tsai" koncepce) .....                                                                           | 48 |
| 4.4.5. | Tricept koncepce (Neumann patent) .....                                                                        | 49 |
| 4.4.6. | RPS koncepce (Hunt a Lee patent) .....                                                                         | 50 |
| 4.4.7. | RS2S koncepce (Lambertův návrh) .....                                                                          | 50 |
| 4.4.8. | Dvojitý delta robot .....                                                                                      | 51 |

|        |                                                                          |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.     | Kinematika PKS .....                                                     | 52 |
| 5.1.   | Způsoby řešení kinematické analýzy .....                                 | 52 |
| 5.1.1. | Úloha přímé kinematiky .....                                             | 52 |
| 5.1.2. | Úloha nepřímé kinematiky .....                                           | 53 |
| 5.2.   | Určení a ověření stupňů volnosti Delta robotu.....                       | 53 |
| 5.2.1. | Určení stupňů volnosti Delta robotu s použitím kulových kloubů.....      | 54 |
| 5.2.2. | Určení stupňů volnosti Delta robotu s použitím univerzálních kloubů..... | 54 |
| 6.     | Současné produkty vybraných robotů s PKS na trhu .....                   | 55 |
| 6.1.   | Delta struktury .....                                                    | 55 |
| 6.1.1. | ABB IRB 340 / IRB 360 .....                                              | 55 |
| 6.1.2. | Fanuc M-1iA/0,5A / M-1iA/0.5S .....                                      | 56 |
| 6.1.3. | Fanuc M-3iA/6A / M-3iA/6S .....                                          | 57 |
| 6.1.4. | Adept s650H / s800H .....                                                | 58 |
| 6.1.5. | Aico DR 1200/3 / DR 1200/4 .....                                         | 59 |
| 6.1.6. | Kawasaki YF03N .....                                                     | 60 |
| 6.1.7. | Elau P4s / P4sR .....                                                    | 61 |
| 6.2.   | Jiné struktury .....                                                     | 62 |
| 6.2.1. | Fanuc F-200iB .....                                                      | 62 |
| 6.2.2. | Mitsubishi RP-5AH .....                                                  | 63 |
| 6.2.3. | Tricept T606 .....                                                       | 64 |
| 6.2.4. | Elau D2.....                                                             | 65 |
| 7.     | Konstrukce manipulátoru s PKS .....                                      | 66 |
| 7.1.   | Návrh s univerzálním kloubem .....                                       | 67 |
| 7.1.1. | Báze .....                                                               | 67 |
| 7.1.2. | Pohony .....                                                             | 70 |
| 7.1.3. | Ramena.....                                                              | 73 |
| 7.1.4. | Táhla (vzpěry) .....                                                     | 80 |
| 7.1.5. | Klouby .....                                                             | 81 |
| 7.1.6. | Platforma.....                                                           | 83 |
| 7.1.7. | Teleskopický hřídel a čtvrtá osa .....                                   | 85 |
| 7.1.8. | Znázornění pracovního prostoru .....                                     | 87 |
| 7.2.   | Návrh s kulovým kloubem .....                                            | 91 |
| 7.2.1. | Ramena.....                                                              | 91 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.2. Táhlá (vzpěry).....                                               | 93  |
| 7.2.3. Klouby.....                                                       | 94  |
| 7.2.4. Platforma .....                                                   | 95  |
| 7.2.5. Teleskopický hřídel a čtvrtá osa .....                            | 96  |
| 8. Měření a porovnání deformace při statickém zatížení .....             | 97  |
| 8.1. Měření deformace konstrukce s kulovými klouby .....                 | 98  |
| 8.2. Měření deformace konstrukce s univerzálními klouby .....            | 99  |
| 9. Poznatky získané při testování konstrukce s univerzálními klouby..... | 100 |
| 9.1. Báze .....                                                          | 100 |
| 9.2. Pohony .....                                                        | 100 |
| 9.3. Ramena.....                                                         | 100 |
| 9.4. Klouby.....                                                         | 101 |
| 9.5. Platforma .....                                                     | 101 |
| 10. Ekonomický rozbor .....                                              | 102 |
| 11. Závěr.....                                                           | 103 |
| 12. Seznam použitých zdrojů.....                                         | 105 |
| 13. Seznam použitých symbolů a zkratk.....                               | 107 |
| 14. Seznam příloh. ....                                                  | 109 |
| 15. Seznam výkresové dokumentace .....                                   | 110 |

|                                                                                   |                                            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 18 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

## 1. ÚVOD

Současný stav a technická vyspělost lidské populace se vyznačuje vysokou náročností. Kladené požadavky a cíle jsou velmi rozmanité a jejich řešení je mnohdy nutné pružně přizpůsobit. Faktory ovlivňující požadavky průmyslových odvětví jsou především konkurenceschopnost, stálý vzestup kvality, adaptabilita a v neposlední řadě čas. Tyto faktory vyžadují neustálou potřebu zdokonalovat a zlepšovat ekonomické, technologické a technické procesy.

Neustále se rozvíjející technickou oblastí, je oblast robotiky. V této oblasti lze nalézt v posledních letech několik rozvíjejících se trendů. Jedná se nejen o vytvoření samostatného rozhodování robotů. Snaha zdokonalení umělé inteligence v tomto odvětví, je mnohdy podmíněna ostatními faktory. Jedná se především o vylepšení konstrukcí stávajících a o vývoj konstrukcí nových. Mohlo by se zdát, že v oblasti průmyslové robotiky jsou známé konstrukce dostačující a není nutno tuto oblast dále rozšiřovat. Právě opakovaná realizace robotických struktur s nutnou inovací vede k technickému pokroku a nabízí prostor pro zdokonalení těchto mechanismů.

Z historického hlediska byly známé vlastnosti plynoucí z používaných struktur impulsem pro vývoj struktur nových. Nedostatky v té době známých struktur byly často podnětem pro vznik nových mechanismů. Ukazuje se, že význam paralelních kinematických struktur a možnosti jejich uplatnění jsou v dnešní době velmi otevřené. Při bližším prozkoumání jejich problematiky bylo zjištěno, že oproti jiným strukturám v určitých oblastech vynikají. Posuzování bez hlubšího prozkoumání těchto mechanismů často vede ke mylným a nepřesným závěrům.

Použití paralelních struktur v oblasti robotiky se v posledních letech ukázalo jako zajímavé a z části nové řešení. Jejich nasazení je mnohdy vhodné tam, kde jiné struktury nejsou dostačující či jejich vlastnosti nesplňují dané požadavky. V určitých oblastech, do kterých paralelní struktury byly aplikovány, byla potvrzena jejich vhodnost. Lepší výsledky byly často doprovázeny menší provozní náročností a ekonomickou návratností. Znamé typy konstrukcí mají ale svá specifika a nelze je tak snadno adaptovat do jiných oblastí.

Do budoucna lze očekávat stále větší význam těchto struktur. Tento fakt dosvědčuje stále větší pozornost výzkumných a vývojových pracovišť. Při správném posuzování a přístupu se dá říci, že jejich nasazení bude možno i v oblastech, ve kterých dnes není jejich nasazení tak zřejmé.

Cílem této práce je navrhnout vhodný typ paralelního manipulátoru, který bude plnit funkci manipulace. Hmotnost součástí určených pro manipulaci nebude přesahovat 200g. Před samostatným návrhem konstrukce mechanismu je v diplomové práci zařazena podrobná rešerše s definicí základních pojmů. Pro co nejlepší přehled se rešerše skládá z výčtu současných manipulátorů s paralelní kinematickou strukturou. Popis uspořádání základních stavebních prvků je názorně popsán s uvedeným výčtem požadovaných vlastností. Samotný návrh konstrukce poukazuje na problematiku spjatou s vytvořením mechanismu a zobrazuje celkový postup. Získané poznatky jsou patřičně zdokumentovány a sepsány v závěrečné části.

## 1.1. DEFINICE POUŽÍVANÝCH POJMŮ

### Báze

Slovo má původ v anglickém slově “base – základna“. Tvoří statickou část robotu. Slouží k uchycení komponentů sloužících k manipulaci s rameny a lze ji též využít k montáži robotu na příslušné místo.

### Efektor (grip)

Zvláště vyvíjený koncový prvek, sloužící k přímému styku s manipulovaným předmětem. Zpravidla bývá součástí platformy nebo je k ní pevně uchycen.

### Geometrická odchylka

Odchylka, která je daná rozdílem mezi požadovanými a skutečnými geometrickými parametry.

### Goughův stroj (oktahedrální hexapod)

Paralelní kinematická struktura obsahující šest ramen, které tvoří hrany osmistěnu pevné a pohyblivé plošiny. V průběhu let se ukázal jako ideální “základní kámen“ pro stavbu leteckých simulátorů.

### Hybridní kinematická struktura (kinematika)

Tuto strukturu nelze přímo zařadit mezi sériovou či paralelní, jelikož často bývá výsledná kinematická struktura právě kombinací těchto dvou. Konstrukční uspořádání bývá často takové, že dovoluje vzájemné unášení pohonných jednotek.

### Kinematická dvojice

Souhrnný pojem pro spojení převážně dvou členů prvkem, který určuje výslednou možnost pohybu těchto dvou prvků a to buď posuvným (translačním) nebo rotačním (otáčivým, příp. kyvným) pohybem.

### Kinematický řetězec

Vzniklý soubor vytvořený spojením členů (vzpěry, ramena) s pomocí spojovacích členů, tzv. kinematických dvojic (kloub, posuvné vedení).

### Kloubový bod

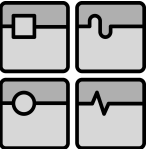
Představuje střed otáčení rotačního kloubu, respektive průsečík os otáčení rotačního kloubu s více jak jednou osou rotace, např. Kardanův nebo sférický kloub. Pro kloubový bod je někdy používáno synonymum otočný bod.[1]

### Mechanismus

Soustava vzájemně pohyblivých těles zařízení, která slouží k transformaci pohybu nebo přenosu sil.

### Otevřená kinematická struktura

Kinematický řetězec, jehož sousední členy jsou spojeny výhradně jednou kinematickou dvojicí (kloub, posuvné vedení).

|                                                                                   |                                            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 20 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

### **Paralelní kinematická struktura (kinematika) PKS**

Taková struktura, jejíž části (spojnice – vzpěry) jsou vůči sobě řazeny paralelně. Obecně lze říci, že každá spojnice vychází ze stejné (společné) hladiny a v jiné společné hladině končí. Při použití je charakteristická svojí výslednou vysokou tuhostí a poměrně malou náchylností k nepřesnostem a chybám.

### **Platforma**

Prvek ovládaný a polohovaný vůči základně pomocí ramen. Bývá přizpůsoben pro uchycení koncového efektoru (gripu), pokud není přímo jeho součástí.

### **Počet stupňů volnosti mechanismu**

Míra pohyblivosti mechanismu, která určuje počet složek pohybu (translací a rotací), které je koncový efektor mechanismu schopen uskutečnit.

### **Pozice (poloha)**

Aktuální poloha platformy v obsluhovaném prostoru, určená charakteristickým souřadným systémem daného robotu.

### **Pracovní režim**

Režim, při kterém jsou pevně dána pravidla (v současné době zavádění vlastního rozhodování) plnění daných úkolů. Lidský faktor již přímo nezasahuje do pracovních cyklů.

### **Rameno**

Rozumíme tím nadřazený, souhrnný pojem pro spojnice, vzpěry, servovzpěry, servoramena spolu s pohonem.

### **Redundantní paralelní kinematika**

Paralelní kinematika s nadbytečnými pohony. Počet pohonů přesahuje počet stupňů volnosti.

### **Řídící (seřizovací) režim**

Režim, při kterém veškeré pohyby, a s nimi spjatá činnost vychází z přímých povelů obsluhy. Zpravidla předchází režimu pracovnímu, který se nachází ve fázi zkušební a prověřování.

### **Sériová kinematická struktura (kinematika)**

Taková struktura, jejíž části (spojnice – vzpěry) jsou vůči sobě řazeny postupně za sebou – sériově.

### **Spojnice**

Hnaná část paralelního kinematického řetězce ukončená jednoduchými kinematickými vazbami (klouby) spojující bázi s platformou.

### **Stacionární pohon**

Pohon, který je pevně ukotven k základní části, tzv. bázi. Volba tohoto uložení je často využívaná, a to především kvůli nezatěžování pohybujících se součástí svou vlastní hmotností.

|                                                                                                                                                                     |                                            |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|     | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 21 |
|   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

### **Stupeň volnosti (DOF “degrees of freedom”)**

Označení (“jednotka”) pro množství (počet) hlavních pohybů, jenž umožňují dané kinematické dvojice vykonávat celkovému mechanismu. Základní složky výsledného složeného pohybu.

### **Teleskopické rameno**

Převážně hnaná část kinematického řetězce (jako spojnice), doplněná o možnost změny své funkční délky.

### **Tripod**

Paralelní kinematika se třemi stupni volnosti, u které je platforma poháněna třemi vodícími řetězci.

### **Uzavřená kinematická struktura**

Kinematický řetězec, jehož sousední členy nejsou spojeny pouze jednou kinematickou dvojicí (kloub, posuvné vedení). Z převážné většiny jsou to paralelní řetězce.

### **Vodící řetězec**

Zejména u paralelních kinematik představuje spojení báze s platformou. Skládá se nejméně z jednoho hnacího členu a dvou kloubů.

### **Vzpěra**

Prakticky stejný význam jako spojnice s tím rozdílem, že plní funkci nepřímo hnané části (akční člen). Není připojena přímo na pohon.

## 2. KINEMATICKÉ USPOŘÁDÁNÍ STAVBY ROBOTŮ

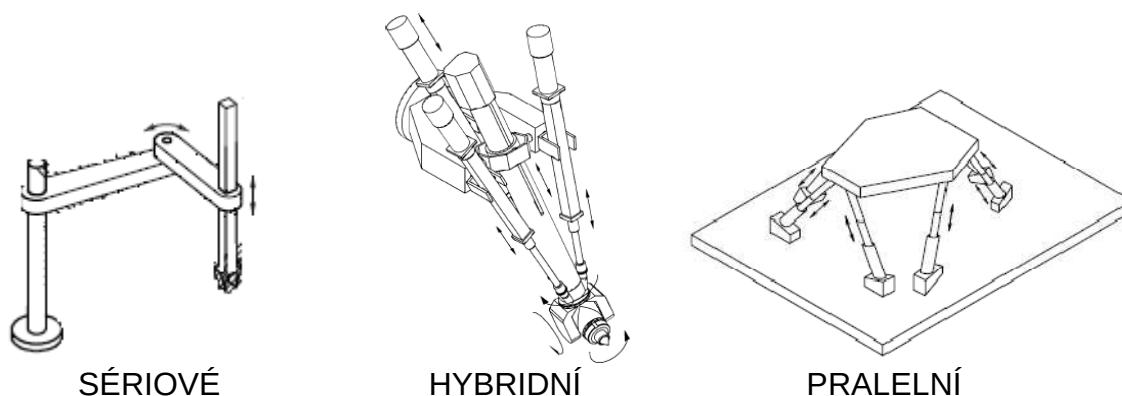
### 2.1. ROZDĚLENÍ DLE KINEMATICKÝCH STRUKTUR

Každá konstrukce průmyslového robotu se skládá z několika pevných těles, které jsou propojeny klouby. Takové spojení má za následek vznik kinematických vazeb, které následně vytváří kinematické řetězce. Z hlediska uspořádání ramen a členů robotu (kinematických struktur), se dají roboty rozdělit do třech skupin:

- roboty se sériovou kinematickou strukturou
- roboty s paralelní kinematickou strukturou
- roboty s hybridní kinematickou strukturou

Názorné srovnání robotů s různým uspořádáním kinematických dvojic – viz. obr. 2.1a[3]

Nedá se s jistotou říci, která skupina výrazněji vyniká před ostatními. Konstrukce těchto skupin jsou natolik odlišné, že bychom se mohli snadno dopustit chyb. Proto dříve než se přistoupí k posuzování a srovnávání vlastností těchto struktur, je třeba názorně definovat každou strukturu zvlášť.



Obr. 2.1a[3]  
Znázornění uspořádání skupin průmyslových robotů

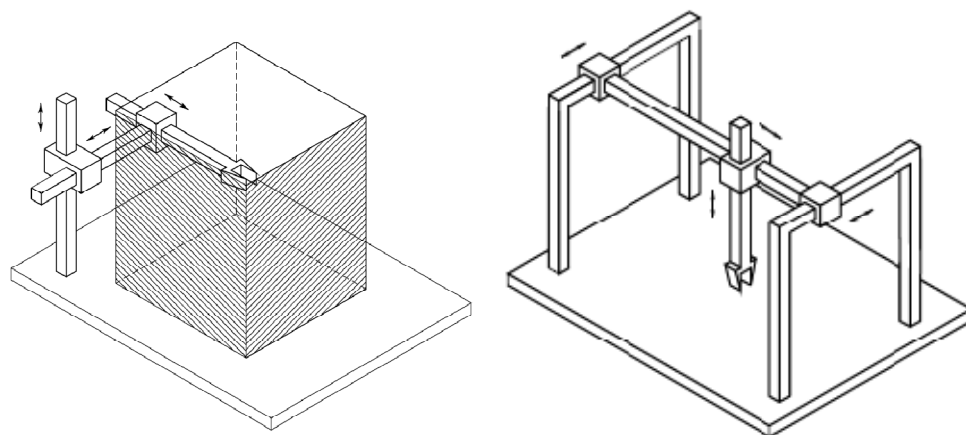


### 2.1.1. SÉRIOVÁ KINEMATICKÁ STRUKTURA

V současné době nepoužívanější a nejvíce nasazovaná struktura průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM) na trhu. Jedná se o typy robotů, jejichž kinematický řetězec má sériovou strukturu. Části takového mechanismu jsou postupně spojeny za sebou. Tento typ je jednodušší na koordinaci pohybů a celkové řízení. Vzájemné spojení a výběr kloubů má za následek vznik odlišných pracovních prostorů a různých stupňů volnosti robotu.

#### Spojení pomocí třech posuvných spojení

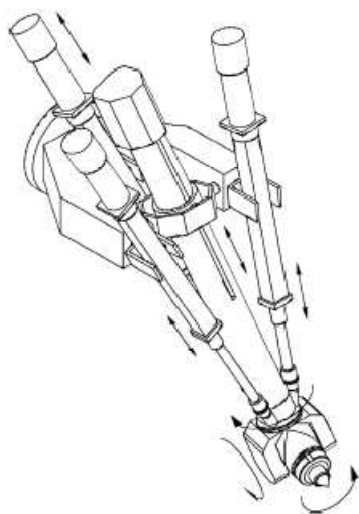
Toto uspořádání lze velmi často nalézt pod označením TTT – viz. obr. 2.1.1[3] (T – translační-posuvný pohyb spojení). Spojení navzájem tří kolmých posuvných kloubů má za následek vznik kartézského pracovního prostoru. Výhodou této jednoduché geometrie je velmi dobrá tuhost, pevnost a vznik konstantní přesnosti polohování v celém prostoru. Protože jsou ale všechny klouby posuvné, mají omezenou obratnost. Tato struktura je v současné době používána často a uplatnění nachází především tam, kde je třeba pracovním prostorem pokrýt velkou část plochy. Tak jako u ostatních uspořádání kinematických dvojic, které tvoří jiné pracovní prostory, lze si na obr. 2.2.1a[3] velmi dobře všimnout stavby celého robotu. Ačkoli je zde v obou případech použito tří translačních vazeb, výsledkem jsou dvě naprosto odlišné uspořádání robotu. V prvním případě (obr. 2.1.1[3] vlevo) jsou zvoleny posuvy postupně jdoucí ve směru svislý-příčný-podélný, na obrázku druhém (obr. 2.2.1[3] vpravo) je toto uspořádání příčný-podélný-svislý. Právě tato uspořádání ve směrech výrazně ovlivňují následné uplatnění robota, a to z hlediska přístupu k manipulovatelnému předmětu.



Obr. 2.1.1a[3]  
Sériová kinematická struktura TTT

### 2.1.2. HYBRIDNÍ KINEMATICKÁ STRUKTURA

Hybridní kinematické struktury připomínají již na první pohled struktury paralelní. Jejich stavba a uspořádání jsou často velmi sporné a velká část těchto mechanismů je tudíž řazena do skupin paralelních. V mnohých případech nebývají ani samostatně rozlišovány. Kinematické a dynamické výpočty se také často neliší, a proto nelze brát za chybu zařazení do skupiny paralelních. Zdůrazněním a poukázáním na stavbu těchto struktur lépe vynikne jejich rozdíl a zařazení.



Obr. 2.1.2a[2]  
Mechanismus s hybridní kinematickou strukturou

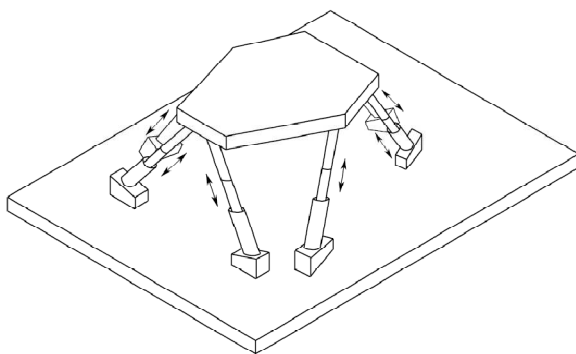
Tento typ uspořádání kinematických členů, především ramen, je značně složitější než v případě sériových struktur.

Jak lze vidět na obr. 2.1.2a[2], daná kinematická struktura je tvořena řetězcí, které se nacházejí jak v sériovém, tak paralelním uspořádání. V takovém uspořádání bývají rozděleny požadavky na vlastnosti daných kinematických řetězců. Obvodové kinematické řetězce v tomto případě slouží zejména pro navýšení a vznik vysoké tuhosti mechanismu. Ostatní řetězce, například umístěné ve středu (středové řetězce), často zajišťují funkci pohonu. Pracovní prostor je závislý na natočení celého uspořádání, jenž bývá zpravidla ustaveno na samostatné ose. Toto uspořádání se s výhodou uplatňuje všude tam, kde je za potřebí veliké tuhosti a kompenzace velikých sil, a to především ve vertikálním směru. Výše uvedené vlastnosti jsou důvodem častého využití pro obráběcí stroje.

Jak bude v práci dále poukázáno, typů hybridních kinematik není málo a proto obr. 2.1.2a[2] slouží pouze jako reprezentant v celé skupině těchto mechanismů, jelikož dobře vystihuje názornost dané problematiky.

### 2.1.3. PARALELNÍ KINEMATICKÁ STRUKTURA

Tyto struktury tvoří svým uspořádáním kinematických členů a dvojic zcela odlišné uspořádání, než struktury sériové. Souběžné uspořádání ramen má za následek natočení pohyblivé platformy, které je způsobeno změnou jejich délky. Aby se struktura dala zařadit do skupiny "čistě" paralelních kinematik, musí tyto ramena být pevná nebo teleskopická – viz. obr. 2.1.3a[3]. Jakékoli spojení dvou a více členů pomocí kloubů znamená, že se jedná spíše o hybridní kinematickou strukturu. I přes tento fakt pohlížíme na mechanismus, jako na kinematiku paralelní.



Obr. 2.1.3a[3]  
Uspořádání paralelní kinematiky  
s teleskopickými rameny



Obr. 2.1.3b[3]  
Uspořádání paralelní kinematiky  
s pojezdem ramen

Z obr. 2.1.3a[3] je patrné použití teleskopických ramen. Tak je dosaženo zajištění pohybu platformy.

Při použití pevných ramen je značně komplikovanější zajištění pohybu platformy. V tomto případě musíme zajistit možnou délkovou změnu uchycení kloubů ramen vůči sobě na bázi. S výhodou lze řešit tento mechanismus např. pojezdem – viz. obr. 2.1.3b[3]. Jako pojezd pro uchycení báze kloubu bývá často použit kuličkový šroub, příp. lineární elektromotor.

Spojením kinematických řetězců do paralelního uspořádání se vytvoří mechanismus, který má značně vysokou tuhost a odolnost proti vnější deformaci. Po pohybové stránce lze dosáhnout velmi rychlé změny polohy a vysoké rychlosti platformy při menším pracovním prostoru.

## 2.2. POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ SÉRIOVÝCH A PARALELNÍCH STRUKTUR

Vývoj paralelních kinematických struktur byl impulsem pro zlepšení a odstranění nedostatků vlastností struktur sériových. Každá z těchto struktur má svá specifika. Již při vývoji každé struktury formují dané požadavky její konstrukci. Srovnávání těchto struktur je velmi obtížné, protože každá z nich je sestavena přesně pro danou funkci a řešení daného problému. Není proto možné porovnávat každý mechanismus zvlášť. Výsledkem tohoto porovnání by byly zkeslené a nepřesné údaje poukazující na výhody či nevýhody některé konstrukce. Tabulka 2.2a poukazuje na souhrnné vlastnosti paralelních a sériových kinematických struktur.

| Vlastnost                             | SÉRIOVÉ USPOŘÁDÁNÍ                                                   | PARALELNÍ USPOŘÁDÁNÍ                                                                                                          |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tuhost</b>                         | Nízká; osy jsou namáhány zejména na ohyb                             | Vysoká; namáhání je rozděleno do příslušných os                                                                               |
| <b>Šíření chyb</b>                    | hromadění v jednotlivých osách                                       | chyby jsou vytvořeny průměrem chyb v jednotlivých osách                                                                       |
| <b>Hmotnost pohybujících se částí</b> | Vysoká; první člen robotu je vždy namáhán členy následnými           | Nízká; všechna ramena se podílí na celkové manipulaci platformy                                                               |
| <b>Rychlost a zrychlení</b>           | Průměrné                                                             | Vysoké                                                                                                                        |
| <b>Řízení (regulace)</b>              | Jednoduchá; je možná regulace jednotlivých os                        | Komplikované; celý mechanismus musí být řízen jako celek                                                                      |
| <b>Kalibrace</b>                      | Poměrně jednoduchá; v současné době již známá problematika           | Komplikovaná; celková kalibrace vyžaduje souběžné a složité kalibrování jednotlivých částí, které se často vzájemně ovlivňují |
| <b>Kinematika</b>                     | Přímá kinematika je jednoduchá; inverzní kinematika spíše složitější | Přímá kinematika je značně složitá; inverzní kinematika je jednodušší; vždy nutná transformace souřadnic                      |
| <b>Výroba a montáž</b>                | Složitá                                                              | Jednoduchá                                                                                                                    |
| <b>Flexibilita</b>                    | Poměrně malá                                                         | Vysoká; vysoké možnosti sestavení a modularity                                                                                |

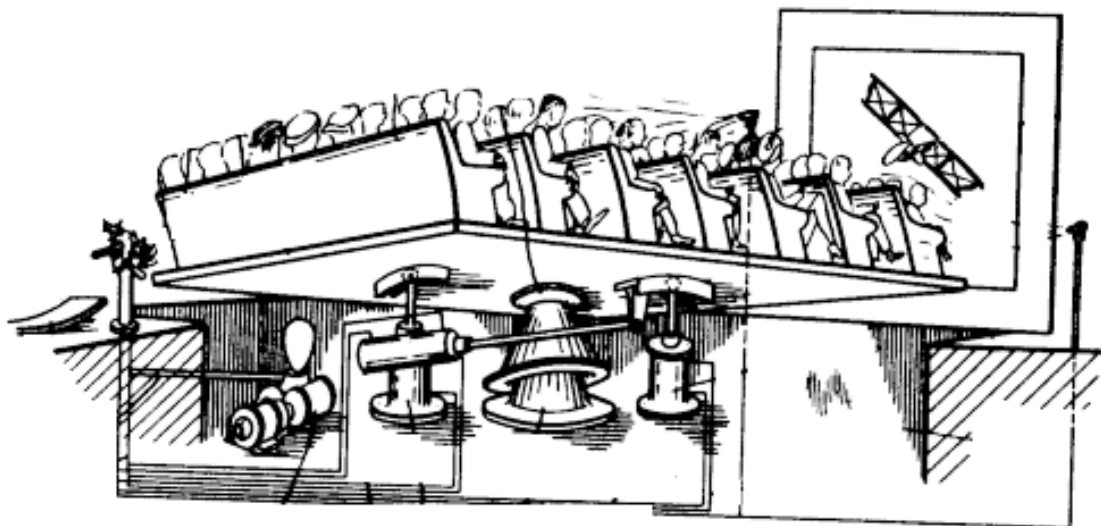
Tab. 2.2a  
Okrajové srovnání vlastností kinematických struktur

### 3. HISTORIE A VZNIK PARALELNÍCH MECHANISMŮ

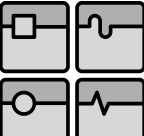
Historie a celkový vznik paralelních kinematických struktur je především spojen s pojmem Stewartova plošina (často mylné označení pro oktahedrální hexapod). S myšlenkou sestavit mechanismus současně ovládaný hned několika rameny, se přišlo dokonce dříve, než bylo známo slovo robot. Proto by bylo chybné spojovat si tyto dva pojmy a přisuzovat jim společný vznik. Slovo robot uvedl poprvé roku 1920 ve své hře RUR Karel Čapek. Samotným autorem je ale jeho bratr Josef Čapek.

Zmínky o prvních úvahách, které využívají PKS, jsou datovány k roku 1645 a jsou spojeny se jménem Christopher Wren. V roce 1813 zkoumal Dr. Cauchy tuhost kloubového oktahedronu. V roce 1867 byly pokusy o sestavení prováděny Lebesguem a v roce 1897 Bricardem.

První praktické zmínky o použití prvního reálného stroje využívajícího PKS, jsou spojovány s říjnem roku 1928. Tehdy si James E. Gwinnett přihlásil k patentování plošinu, která měla sloužit pro účely zábavního průmyslu – viz. obr.3a [1]. Mechanické ústrojí této plošiny bylo tvořeno jedním, uprostřed uloženým sférickým kloubem. Pohyb plošiny kolem příčné a podélné osy zajišťovaly dva vzduchové válce, třetí válec natáčel plošinu kolem kolmé osy. Neví se, zda byl také v té době postaven. Je to především první důkaz využití mechanismu s touto strukturou v praxi.

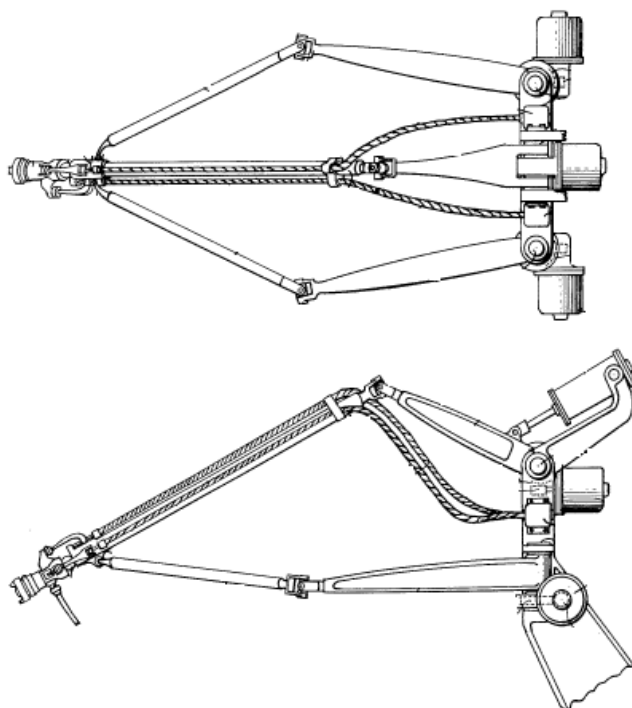


Obr. 3a[1]  
Mechanismus patentovaný v roce 1928

|                                                                                   |                                            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 28 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

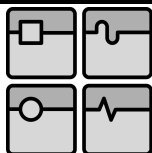
Vznik prvního paralelního robotu je zaznamenán až o několik let později – viz. obr. 3b [1]. Autorem byl Willard L. W. Pollard. Robot se skládal ze tří dvoudílných ramen a disponoval 5 DOF. Ramena byla tvořena bázovým a okrajovým ramenem spojenými otočným kloubem. Pohony, které se nacházely na bázi, přímo otáčely rameny.

Dvě okrajová ramena byla spojena se třetím ramenem pomocí kulových kloubů. Třetí rameno bylo spojeno přes univerzální kloub s koncovou hlavicí (efektorem). Robot byl ovládán celkem čtyřmi motory. Tři motory ovládali polohy hlavice a čtvrtý určoval polohu natočení koncové hlavice přes flexibilní otočné kabely. Zatímco Pollard byl autorem konstrukce celého robotu, jeho syn Willard L. W. Pollard Jr. vytvořil návrh pro elektrické řízení. Celkový patent byl podán ke schválení 29. 9. 1934 a byl úspěšně schválen až 16. 6. 1942. I přes to, že se takto ojedinělý, v té době nadčasový mechanismus dočkal patentu, nebyl nikdy postaven.



Obr. 3b[1]  
První paralelní robot pro stříkání nátěrových hmot

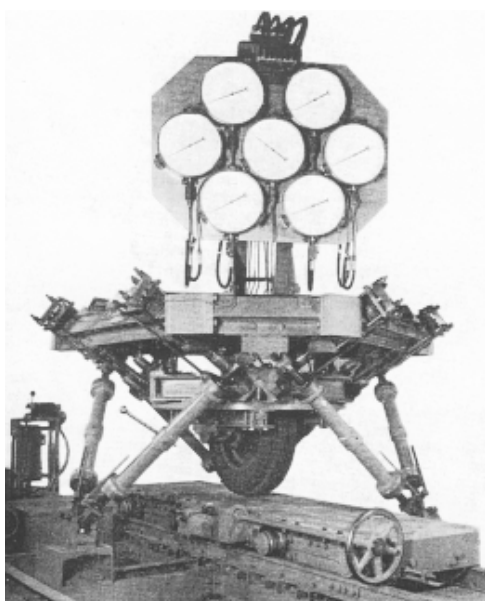
Velmi dobré výsledky poskytovala již běžně stavěná soustava, se třemi horizontálními a třemi vodorovnými lineárními pohony, nazývaná jako Multi – Axis Simulation Table (MAST) – viz obr. 3c[1]. Tento mechanismus nacházel využití při simulacích a testování vibrací na různé komponenty, nejčastěji však pro automobilový průmysl.



Obr. 3c[1]

Multi – Axis Simulation Table

V roce 1947 byl sestaven dr. Ericem Goughem nový paralelní mechanismus s proměnlivou délkou ramen. Oktahedrání hexapod – viz.obr 3d[1] se uplatnil v anglické firmě Dunlop Rubber ke zkoumání vlastností pneumatik a simuloval tak zatížení, které si vyskytovalo při přistávání letadel. Zcela nové uspořádání ramen, do tvaru oktahedronu (osmistěnu), mělo za následek výrazné zvýšení rozsahu pohybu. Mechanismus se již tradičně sestával z pevné a pohyblivé plošiny a šesti ramen. Délka těchto ramen byla přenastavována ručně, pomocí stavitelných šroubů. Až o několik let později bylo přestavování zautomatizováno.



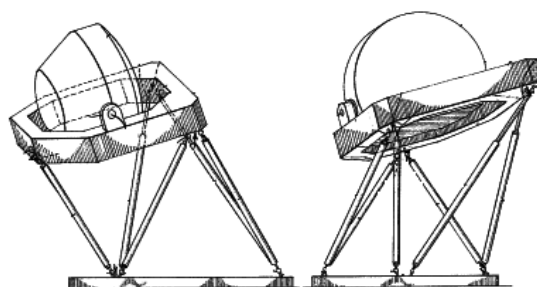
Obr.3d[1]

Oktahedrání hexapod

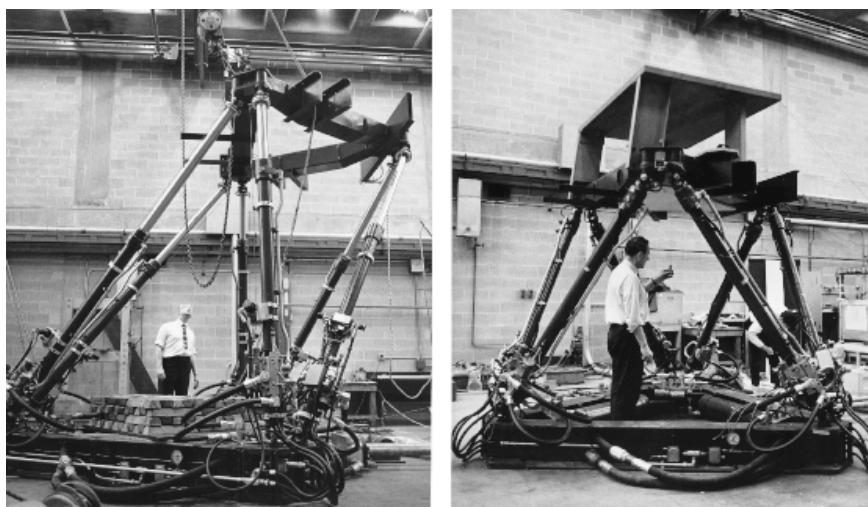
Spojení mezi plošinami a rameny zajišťovaly univerzální klouby. Na pohyblivou plošinu byla ustavena obdobná hexapodická struktura, která sloužila k zavěšení pneumatiky a ustrojí. Toto ústrojí pneumatiku roztáčelo a na pomocné plošině se měřily síly působící na pneumatiku.

Roku 1962 Klaus Cappel z Franklinových výzkumných laboratoří v USA dostal úkol vylepšit existující MAST-viz. obr. 3c[1]. Původní Cappelova myšlenka, nahradit tři vodorovné členy čtyřmi, které by uspořádal do kruhu, se příliš neosvědčila. Velmi se tím zkomplikovalo celé řízení, ale především vlivem protichůdně působících sil trvale docházelo k namáhání pohyblivé platformy. Toto namáhání mělo často za následek vznik trhlin a následné prasknutí. Řešení se objevilo ve stejném oktahedrálním uspořádání, které již použil dr. Gough. Vývoj trval několik let a byl úspěšně zakončen podáním patentu v roce 1964. Následně se na požadavky společnosti Sikorsky Aircraft navrhla stavba simulátoru cvičné kabiny vrtulníku s 6DOF – viz. obr. 3.2e. Byla to první cvičná pilotní kabina s kinematickým řetězcem s uspořádáním oktahedrálního hexapodu.

Dochované fotografie ze stavby oktahedrálního hexapodu přímo s autorem K. Cappellem – viz. obr. 3f[1].



Obr.3e[1]  
Nákres simulátoru pilotní kabiny vrtulníku

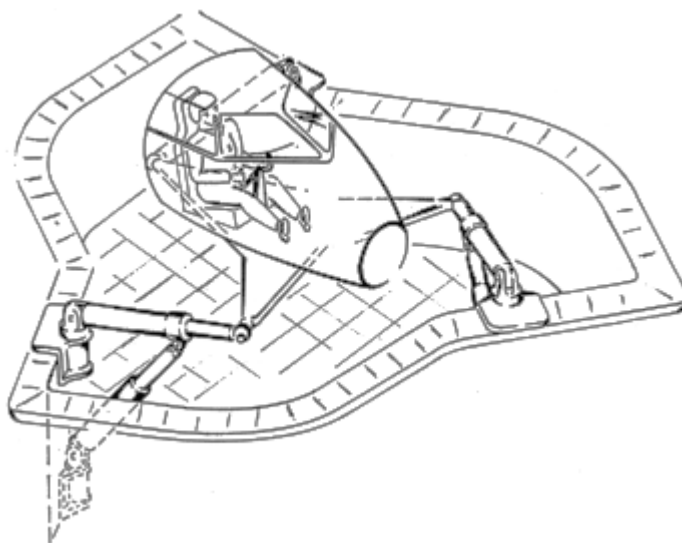


Obr.3f[1]  
Stavba prvního leteckého simulátoru



Téměř souběžně, tzn. v roce 1965 se v tzv. Stewartově spise objevilo popsání pohyblivé plošiny zkonstruované pro simulaci letu s 6DOF – viz.obr 3g[1]. Dnes je velmi často mylně spojován pojem oktahedrální hexapod s pojmem Stewartova plošina. Stewartova plošina nemá oktahedrální uspořádání ramen.

Stewartův spis měl později značný vliv na následující vývoj v oblasti paralelních mechanismů. Již v této době Stewart uvažoval o sestrojení stroje s paralelním mechanismem pro frézovací a vrtací operce.



Obr.3g[1]  
Schematický náčrt Stewartovy platformy

V následné době se myšlenka sestrojit obráběcí stroj s paralelní kinematikou, stále udržovala ve vědomí. Nicméně po několik let nacházelo toto uspořádání plně dostačující funkci ve výrobě simulátorů. Od prvních leteckých simulátorů, kde se velmi osvědčily a přinesly značný pokrok ve výcviku pilotů, simulátory začaly nacházet uplatnění i v jiných odvětvích, např. simulátory lodí a vozidel. Tímto příkladem může být v roce 1979 uvedení do provozu první simulátor vojenského vozidla a o rok později osobního automobilu.

## 4. POPIS PARALELNÍCH STRUKTUR

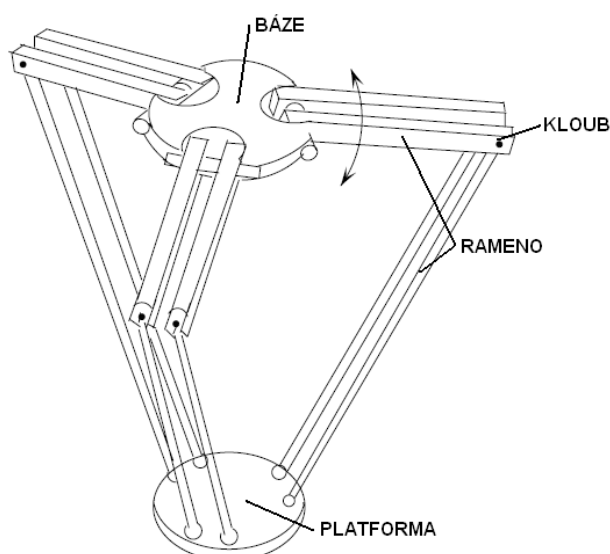
Kinematické struktury v sériovém pořadí lze použít pro různé účely. Jedná se zejména o simulace pohybů, manipulaci s materiálem a účely drobného obrábění. V případě konstrukce sériových robotů se nabízí otázka vhodné volby a zvolení uzpůsobení sestavení kinematických řetězců. V případě paralelních robotů a manipulátorů existuje několik variant k sestavení kinematických řetězců. Tím se liší od sériových robotů, pro které je typický omezený počet možností pro jejich sestavení. Právě sestavení různých kinematických řetězců nám určí výsledný počet stupňů volnosti. Stupně volnosti mají následný vliv na celkový charakter mechanismu.

### 4.1. POPIS ČÁSTÍ A ZÁKLADNÍCH STAVEBNÍCH PRVKŮ PKS

Stavební prvky kinematických řetězců a jejich vhodná volba jsou zásadní pro finální vlastnosti a možnosti manipulátoru. Současný trh nabízí nespočet materiálů a prvků pro jejich sestavení. Stejně jako při návrhu jakéhokoli mechanismu, je nutné zahrnout při návrhu účel a možnosti dané konstrukce, stejně jako vlastnosti, které se od konstrukce očekávají.

Základními stavebními prvky (viz. obr. 4.1a[2]) každé konstrukce jsou:

- báze
- ramena
- klouby
- platforma
- efektor
- pohony

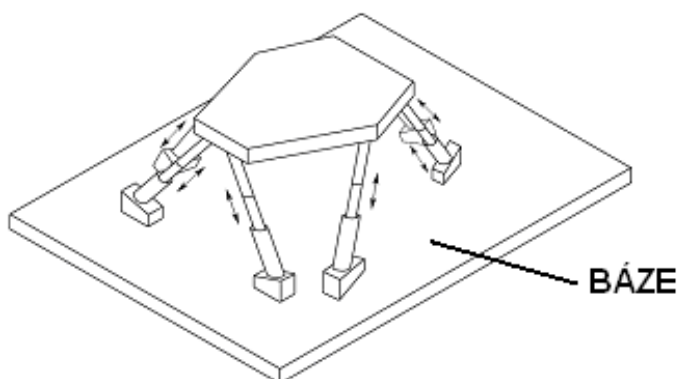


Obr. 4.1a[2]  
Schematický náčrt konstrukce

#### 4.1.1. BÁZE

Báze (základna, základ) tvoří statickou část robotu. Není přesně uvedeno, jak musí báze vypadat. Jedná se o základní část, podle které se odvíjí následující konstrukce robotu. Již v okamžiku rozměrového návrhu báze, je nepřímo ovlivněna velikost výsledného pracovního prostoru. Ve většině případů bývají na bázi připevněny pohonné a řídicí prvky. Z toho je patrné, že je často ovlivňována hmotností ostatních řídicích součástí. Právě z tohoto hlediska, hraje také významnou roli její tuhost. I když báze není pohyblivou částí, je přesto ovlivňována výslednými dynamickými vlivy. Podcenění dostatečné tuhosti by mělo u některých typů konstrukcí za následek rozkmitání základu celého mechanismu. Výsledkem tohoto rozkmitání by byl pokles přesnosti mechanismu.

Báze jako základní stavební prvek nemusí být vždy umístěna ve spodní poloze celkového pracovního prostoru. Tento fakt plyne především z požadavků na pracovní prostor. Pokud je od paralelní struktury požadována spíše simulace pohybů (např. simulátory), je téměř vždy použita báze ve spodní poloze – viz. obr. 4.1.1a[3]. Vyplývá to z namáhání a daných požadavků. Ustavení těchto simulátorů s bází nahoře, znamená značně komplikovanější konstrukci a materiálové požadavky. Umístění báze ve spodní části mechanismu je vhodné pro větší a těžší manipulaci. U některých konstrukcí by bylo toto umístění značně nevýhodné a ne vždy by umožňovalo správnou funkci.



Obr. 4.1.1a[3]  
PKS s bází ve spodní poloze

Uložení báze v horní poloze (patrně v obr. 4.1a[3]). Následný směr kinematického řetězce směrem dolů, je velmi častý pro konstrukci robotu s účelem manipulace s materiálem. U této stavby je typické umístění všech pohonů právě na bázi. Seběmenší navýšení hmotnosti pohybujících se členů by mělo za následek zvýšení setrvačných sil. Tím by mohlo dojít k narušení celkové tuhosti soustavy.

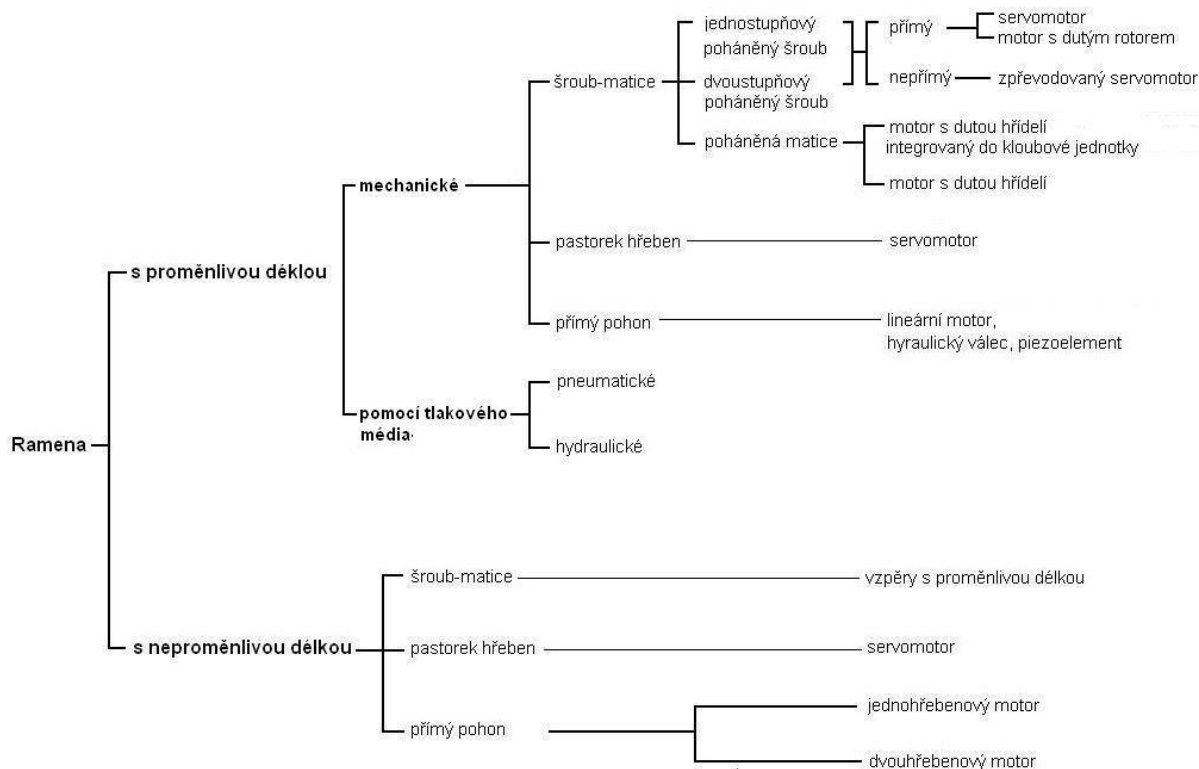
#### 4.1.2. RAMENA

Ramena tvoří spolu s klouby základní část vodicích řetězců. Úlohou těchto řetězců je přenos pohybu z báze směrem k platformě. Při vhodném uspořádání ramen spojených pomocí kloubů, lze dosáhnout vysoké tuhosti. Výsledná tuhost má za následek odpovídající přesnost a možnost dosažení vysokých manipulačních rychlostí.

Ramena lze rozdělit na dvě hlavních skupiny. První skupinu tvoří ramena s proměnlivou délkou. Druhou skupinu představují ramena s neproměnlivou délkou (bývají také označovány jako aktivní a pasivní).

Důležitou vlastností ramen je statické a dynamické chování. Ramena bývají nejčastěji namáhána kombinací tahu, tlaku a především ohybu. Pokud se používá k pohonu vysokofrekvenční buzení, je důležité zajistit vyrušení přenosu vlastního kmitání. Vlastní kmitání by mělo za následek přídatné namáhání ramen. Důležité měřítko je délka ramen. Dlouhé části s malým průměrem jsou příčinou rozměrové nestálosti kvůli kombinovaným zatížením.

Znázornění možností pohonu ramen – viz. obr. 4.1.2



Obr. 4.1.2  
Rozdělení ramen a druhy jejich pohonů

### Ramena s pevnou délkou (vzpěry, spojnice)

Použití ramen s pevnou délkou samo o sobě nezajistí požadovanou změnu vzdálenosti mezi bází a platformou. Pro splnění tohoto požadavku je třeba zvolit sériové řazení několika vzpěr s pevnou délkou. Takové spojení je možno provést použitím vhodného kloubu – viz. obr. 4.1.2a[5]. Pouze tak zajistíme možnou změnu vzdálenosti.

Ramena zpravidla nejsou přímým nositelem pohonu (ale mohou být), odpadá zde nutnost řešení tepelných vlivů přenášených z pohonu na vzpěru. Při konstrukci ramen nesmí být opomenuta vhodná volba materiálu. Použití tohoto typu ramen je zejména tam, kde je třeba rychlé manipulace s častou změnou směru pohybu.



Obr. 4.1.2a[5]  
Řazení ramen s pevnou délkou

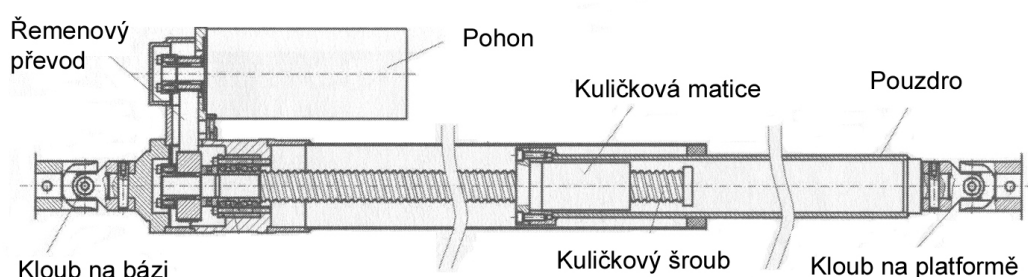
### Ramena s proměnlivou délkou - tlaková

Výhoda tohoto uskupení je, že rameno je schopné samostatně zajistit délkovou změnu vzdálenosti. Velmi snadno se tohoto požadavku docílí při použití prvku, který využívá tlakového média, např. přímočarý hydraulický (pneumatický) válec.

Nasazení těchto prvků bylo určeno tam, kde se jedná o agresivní a náročné prostředí. Velmi vhodné je použití pneumatických válců v případech, kdy na platformu působí kmity z okolního prostředí (vibrace, nárazy, rázy apod.). Výhradně se nasazují také v konstrukcích, které pracují v těkavém a výbušném prostředí. V tomto prostředí se jedná prakticky o jedinou možnost pohonu. Výhodou použití hydraulických válců je zvýšení nosnosti mechanismu. Jako nevýhoda, se dá označit nutnost použití rozměrného agregátu, který často bývá velmi hlučný. U tlakových prvků nelze dosáhnout takové přesnosti jako u prvků mechanických. V případě hydraulických válců se nedoporučuje nasazení tam, kde by v případném úniku média hrozila kontaminace a znečištění okolí (v případě úniku hydraulického oleje). Jedná se zejména o potravinářský a farmaceutický průmysl.

## Ramena s proměnlivou délkou – mechanická

Mechanické provedení stavby ramene je možné provést několika způsoby. Nejčastěji se používá převod kuličkového šroubu a matice – viz. obr. 4.1.2c[4]. Možností je také integrace pevných posuvných ramen přímo s pohonem blízko kloubu umístěného na bázi. Pohon kuličkovým šroubem a maticí lze provést třemi různými způsoby. Poháněný šroub – statická matice, statický šroub – poháněná matice, poháněný šroub – poháněná matice. Nejčastěji se lze setkat s případem prvním. Třetí případ se používá zejména tam, kde je zapotřebí dosažení vysokých rychlostí.



Obr. 4.1.2c[4]

Pohon teleskopického ramena kuličkovým šroubem

Další možností pohonu ramen s proměnlivou délkou jsou průvlekové motory s integrovaným pohonem viz. obr. 4.1.2d[4]. V případě integrace motorů do ramene je nezbytné zvážit účinky oteplení, které vyvolají tepelnou dilataci ramene. Ztižované oteplení se dá odstranit volbou vhodné senzorky s kombinací řídicích algoritmů.



Obr. 4.1.2c[4]

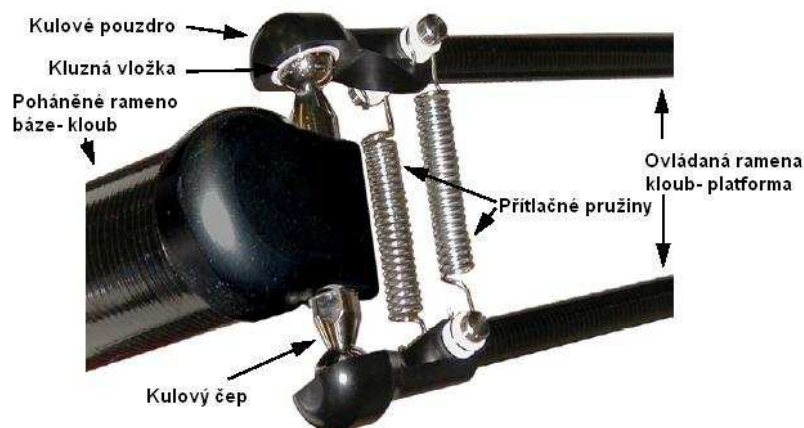
Teleskopické rameno poháněné průvlekovým motorem

### 4.1.3. KLOUBY

Obecné požadavky na klouby u PKS nejsou nijak výrazně odlišné od nároků kladených na kloubová spojení používaná u ostatních strojů. Paralelní mechanismy nejčastěji používají spoje s rostoucím počtem DOF. Úlohou kloubů je přenášet síly a pohyb mezi bází a platformou. Lze se ale setkat s klouby speciálně navrženými. Hlavním úkolem kloubů je udržet geometricky definovanou pozici středů otáčení. Udržení této pozice má za následek odpovídající přesnost mechanismu. Klouby téměř vždy podléhají časovému opotřebením a odpovídajícímu hystereznímu efektu. Tento efekt je příčinou vzniku vůlí ve spojení. Tyto vůle následně zapříčiní vznik odchylek v koncové poloze řetězce při srovnání s matematickým modelem. Velmi důležitý fakt ovlivňující přesnost je, aby se všechny osy natáčení setkávaly v jednom bodě a to v celém rozsahu úhlů.

U PKS je často od kloubu požadováno umožnění pohybu spojovaných částí nejčastěji ve 3 DOF. Pro tento požadavek je vhodné použít kulový kloub s velmi přesnou koulí, která je uložena v kulové jamce. Problémem takového kloubu je nemožnost vytvořit tzv. uzavřený kloub o velkém rozsahu úhlů natočení. I když se v současné době na trhu objevují kulové klouby volně nerozebíratelné, je právě jejich úhel natočení značně omezen. Začínají se také objevovat klouby speciálně navrhované pro požadavky PKS. Takový kloub uvedla na trh společnost INA – viz. obr. 4.1.3b[2] a Hephaist Seiko - viz. obr. 4.1.3c[2]. Rozměry kloubů na obr. 4.1.3b[2] a 4.1.3c[2] nedovolují pro svojí velikost použití kloubů v manipulačních konstrukcích (např. u Delta robotu). Jsou proto vhodné pro mechanismy simulující pohyb, jako je např. hexapod.

U otevřených kulových kloubů je časté řešení vytvoření vazby se zrcadlově totožnou kulovou částí – viz. obr 4.1.3a[5]. Toto spojení poskytuje značnou nevýhodu - možnost "vyklouznutí" kulové části z kloubní jamky. Je proto snahou se těmito kloubům vyhnout a nahradit tak kulový kloub kombinací kloubů otáčivých. Použité otáčivé klouby v tomto případě je velmi složité a konstrukčně náročné. U kulových kloubů bývá značným problémem tření. Snížení koeficientu tření lze provést keramickým nátěrem a užitím speciálního lubrikantu.



Obr. 4.1.3a[5]  
Kulové klouby jištěné tažnými pružinami

Další důležitý požadavek na klouby je jejich dostatečná tuhost. Ideální kloub může podléhat jen velmi malým deformacím, aby zůstala zachována vzájemná poloha os otáčení. Často se klouby předepínají pro vymezení jejich vůle. Zvýší se tím ale tření a celkové opotřebení kloubu. Kromě statické tuhosti musí kloub disponovat také velmi dobrou dynamickou tuhostí. Životnost kloubů se ve velké míře určuje srovnáváním s podobnými hodnotami životností podobných vodicích jednotek.



Obr. 4.1.3b[2]  
Kulový kloub společnosti INA



Obr. 4.1.3c[2]  
Kulový kloub společnosti Hephaist Seiko

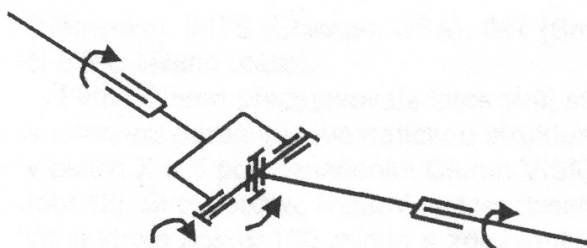
Již zmiňovaný kulový kloub umožňuje užití 3 otáčivých stupňů volnosti. Při podrobnější studii kulového kloubu a jeho aplikacích v PKS zjistíme, že v častých případech třetí stupeň není potřeba. Myslí se tím stupeň rotace okolo podélné osy napojení ramena, tj. zpravidla osy z. Jako vhodnou náhradu lze v tomto případě použít kloub nazývaný Hookův či Kardanův. Tyto dva klouby mají často označení jako univerzální klouby – viz. obr. 4.2.3d[4]. Univerzální kloub je tvořen dvěma klouby rotačními, které jsou navzájem pootočený o 90°:



Obr. 4.2.3d[4]  
Univerzální kloub



Pro zajímavost bude stručně zmíněna funkce mechatronického, kulového kloubu – viz. obr. 4.2.3e[4]. Jedná se o poněkud atypický příklad univerzálního kloubu. Snahou při tomto vytvoření bylo, co nejvíce zamezit vlivu singularit plynoucích z kloubového uspořádání. Tohoto cíle je dosaženo tak, že kloub má čtyři osy rotace. Uspořádání os je tvořeno tak, aby vždy jedna osa byla blokována proti pohybu. V okamžiku, kdy se jedna z os začne blížit ke svému singulárnímu stavu (stav, kdy osa není schopna plnit svoji funkci), uvolní se blokována osa a jedna ze zbývajících aktivních os je zablokována. Po překonání okamžiku blížícího se k singularitě nebo v případě, že se blíží singulární poloha jiného kloubu, se tento princip opakuje s jinou osou. Tento princip je nejvýhodnější aplikovat pro větší bezpečnost použití v mechanismech s jistěním elektronicky řízených brzd.

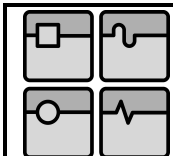


Obr. 3.3e[4]  
Schéma mechatronického kulového kloubu.

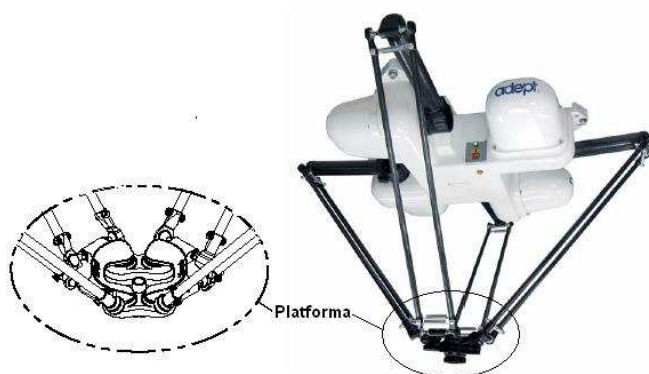
Při výběru požadavků na klouby musíme brát v úvahu již probíranou polohu báze. U robotů, jejichž kinematický řetězec se nachází nad bází, nesehrává např. hmotnost a velikost kloubu tak významnou roli jako v případě, kdy se báze nachází nad kinematickou stavbou robotu.

#### 4.1.4. PLATFORMA

Platformou nazýváme pohyblivou část, která tvoří poslední část kinematického řetězce. Přesněji na platformě kinematický řetězec končí. Její úlohou je upevnění koncového efektoru. Ačkoli by se na první pohled mohlo zdát, že platforma je spíše pasivní člen celé stavby robotu, a proto není zapotřebí věnovat jí náležitou pozornost, není tomu tak. Velikost platformy je zásadně ovlivněna funkcí, uplatněním a stavbou celého robotu. To, jak bude platforma velká, jaký bude mít tvar a jaké bude její celkové chování, je zcela zásadní rozhodnutí pro vytvoření jejích pevnostních parametrů. Veliké zeslabení platformy může mít za následek nižší tuhost. Poznatky z celkového vývoje platformy ukázaly, že při zanedbání dostatečné pozornosti, byl téměř vždy jistý vznik trhlin a poškození od koncentrovaného napětí. Zvuk napětí je následkem protiběžných sil vyvolaných aktivně poháněnými řetězci (rameny).



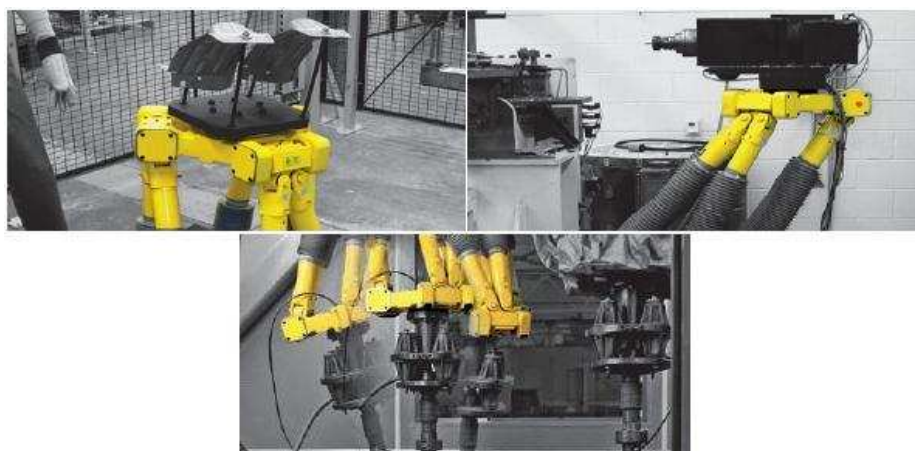
Důležité je zmínit vliv celé funkce mechanismu. V případě, že od mechanismu požadujeme plnění funkce rychlé manipulace s materiálem, je na místě snaha o redukci hmotnosti platformy – viz. obr. 4.1.4a[6]. Dosáhne se tak vyšší redukce setrvačných sil a momentů. Pokud by se tento fakt nebral v potaz, výrazně by se zvýšilo namáhání ostatních členů – zejména namáhání ramen a kloubů. Proto se u těchto konstrukcí vyskytují velmi pevné, lehké a moderní materiály. Nedoporučuje se však užívat materiály založené na vrstvení vláken z důvodů odlišných vlastností ve směru vláken. Při použití takové koncepce je nutné mít zaručené vrstvení vláken v několika směrech. Materiály založené na vrstvení vláken mají schopnost přenášet zatížení podél své délky, nikoli však napříč. Doplnkovým jevem těchto materiálů, je pružení.



Obr. 4.1.4a[6]

Platforma robotu pro manipulační účely

Pokud má být platforma užitá např. ve stavbě manipulátoru zakládajícím se na principu oktahedru nebo Stewartovy platformy (tj. báze tvoří spodní část konstrukce – viz. obr. 4.1.4b[7]), musí se pozornost upírat na jiné požadavky. Příkladem takového požadavku je zejména zvýšení tuhosti. Tento požadavek je založen na faktu, že u těchto manipulátorů není požadována vysoká manipulační rychlost, ale důraz je kladen především na přesnost.



Obr.4.1.4b[7]

Platforma robotu Fanuc

#### 4.1.5. POHONY

Nejčastější použití pohonů je patrné z obr. 4.1.2. V současné době se u robotů s PKS vyskytuje převaha elektrických pohonů. Zbývající část je tvořena především pohony hydraulickými. Tento fakt je výsledkem pokroku a stále dokonalejších elektrických zařízení, jenž spolu se stále dokonalejšími senzorickými prvky vytvoří velmi dobré výsledky.

Z široké nabídky elektrických motorů jsou především používány servomotory, dnes už výhradně se zpětnou vazbou. Jejich vlastnosti a regulace zde nebudou popisovány. Výhodou těchto pohonů je možnost nastavení přesného úhlu natočení rotoru hřídele. Signál snímače polohy je přiveden pomocí zpětné vazby na regulátor, který porovnává skutečnou polohu motoru s žádanou polohou. Rozdíl žádané a skutečné polohy je snímán regulátorem, ten řídí měnič a nastavuje motor na žádanou polohu. To je velmi důležité pro použití a následnou aplikaci. Spojením s vhodným druhem převodovky lze dosáhnout požadovaného poměru výstupních veličin.

Hydraulické pohony jsou nasazovány tam, kde je třeba manipulace s velmi vysokou zátěží. Jejich výhodou je také možnost nasazení ve výbušném prostředí. Nevýhodou je především pomalejší možnost ovládání a nutnost poměrně rozměrného zdroje tlakového média.

#### 4.1.6. EFEKTOR

Efektor nebývá součástí robotu. Robot se dodává od výrobce bez efektoru. Konstrukcí a poradenstvím v oblasti samotných chapadel se zabývají specializované firmy.

Úlohou efektoru je transport daného předmětu. Samotná přeprava se skládá z uchopení, přepravy a umístění předmětu na požadované místo. Za transport může být považován čistý přesun kusu, přísun a odebírání materiálu (u obráběcích strojů, měřicích přístrojů a jiných zařízení) nebo uchopení předmětu po dobu jeho obrábění (odhrocení, nahřívání apod.). V oblasti nasazení v paralelních kinematických strukturách se téměř vždy jedná o dočasné uchopení za účelem přepravy.

Chapadla lze stejně jako roboty rozdělit do jednotlivých skupin podle jejich typických znaků. Dělí se převážně podle:

- počtu čelistí (2, 3, 4, víceprstá)
- způsobu pohonu
- počtu držných objektů (jednonásobná, vícenásobná)
- principu činnosti (vakuová, magnetická, mechanická, klešťová, přídržná)
- principu držení

#### 4.1.7. SHRUTÍ POŽADAVKŮ KLADENÝCH NA ZÁKLADNÍ STAVEBNÍ PRVKY PKS

| STAVEBNÍ PRVEK                 | HLAVNÍ POŽADAVKY                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BÁZE                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- statická a dynamická tuhost</li> <li>- v případě uložení báze v horní poloze snaha o redukci hmotnosti (odlehčení)</li> <li>- teplotní stabilita</li> <li>- v případě upevnění pohonů vysoká geometrická přesnost prvků v přímém styku s připojením pohonu</li> </ul>                                                                                                                                                                     |
| REMENA (aktivní, tj. poháněná) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká stabilita a odolnost proti deformaci od setrvačných sil</li> <li>- vysoké požadavky na odolnost proti kombinovanému namáhání (tah, tlak, ohyb, krut)</li> <li>- vyrušení přenosu vlastního kmitání (v případě pohonu s vysokofrekvenčním buzením)</li> <li>- snaha o redukci délky v závislosti na délce vzpěry a velikosti požadovaného pracovního prostoru</li> <li>- redukce hmotnosti</li> <li>- teplotní stabilita</li> </ul> |
| VZPĚRY (pasivní)               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoké požadavky na odolnost proti kombinovanému namáhání (tah, tlak, ohyb, krut)</li> <li>- snaha o redukci délky v závislosti na délce vzpěry a velikosti požadovaného pracovního prostoru</li> <li>- snaha o co největší odolnost proti kmitání</li> <li>- vyšší stupeň redukce hmotnosti než u vzpěr</li> <li>- teplotní stabilita</li> <li>- vysoký požadavek délkové přesnosti paralelně řazených vzpěr</li> </ul>                  |
| KLOUBY                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká statická a dynamická tuhost</li> <li>- vysoká odolnost proti opotřebení → životnost</li> <li>- vysoká geometrická přesnost vykonávaného pohybu</li> <li>- redukce hmotnosti</li> <li>- nízké požadavky na údržbu</li> <li>- bezvůlový chod</li> </ul>                                                                                                                                                                              |
| PLATFORMA                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká redukce hmotnosti → vznik nepříznivých setrvačných sil a momentů</li> <li>- vysoká statická a dynamická tuhost</li> <li>- vysoká geometrická přesnost připojovacích ploch</li> <li>- velmi dobrá tuhost</li> <li>- návrh vhodné geometrie pro zamezení vzniku míst koncentrace napětí</li> <li>- častý požadavek miniaturizace</li> </ul>                                                                                          |

## 4.2. POPIS ZNAČENÍ KINEMATICKÝCH DVOJIC VE STAVBĚ ROBOTŮ S PKS

Paralelní kinematické struktury lze sestavit ve velkém množství koncepcí. Analýzou těchto uspořádání se zabývalo velké množství autorů (J.-P. Merlet, B. Siciliano, F. Weidemann, F. Wieland, R. E. Stamper). U většiny analýz byly užity zjednodušující předpoklady. Těmito předpoklady se myslí např. požadavek užití teleskopických ramen, užití pohonu umístěného na bázi apod. Základní možnosti a hodnocení mohou být počet DOF, počet a uspořádání ramen, druh a počet kloubů v řetězci, počet a uspořádání kloubů na platformě a bázi, druh a umístění pohonu atd.

### 4.2.1. USPOŘÁDÁNÍ KLOUBOVÝCH BODŮ

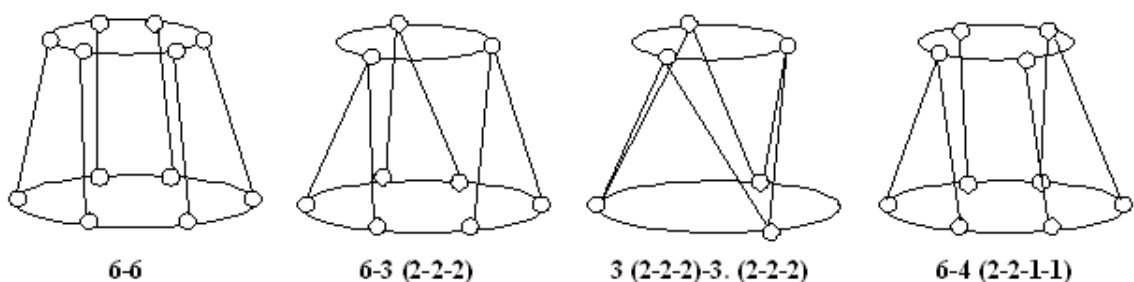
Při konstrukci mechanismu s PKS není podmínkou použití shodného počtu kloubových bodů a ramen. Takové užití se vyskytuje zejména u hexapodů. Ačkoli hexapody nejsou vhodné pro rychlou manipulaci s materiálem a jejich přednost je především v tuhosti, je vhodné na toto uspořádání poukázat. Pro následný přehled budou zavedena následující označení:

$m$  – počet kloubů na bázi  
 $k$  – počet kloubů na platformě  
 $l$  – počet vodicích řetězců

Je zřejmé, že mohou nastat tři případy uspořádání:

$m = k = l$  – nejčastější způsob uspořádání v sestavení tripodů  
 $m = k, \quad l > k$   
 $m = l, \quad m > k$   
 $m = l, \quad n = l$   
 $m = l, \quad m < l$

V případě, že se liší počet kloubů od počtu ramen, musí být použit kloub umožňující upevnění dvou a více ramen. Realizace takového kloubu je velmi obtížná a má horší vlastnosti. Pro popis se užívá zavedené číselné označení v pořadí  $m ( \dots ) - k ( \dots )$ . V závorkách je uveden počet ramen připojených do jednotlivých kloubových bodů – viz obr. 4.2.1[4].



Obr. 4.2.1[4]

Uspořádání a označení kloubových bodů na bázi a platformě

#### 4.2.2. OZNAČENÍ KINEMATICKÝCH DVOJIC A JEJICH SESTAVENÍ

Při konstrukci každého paralelního mechanismu je nutné užít několik kinematických dvojic. Pro způsob jejich označení budou zavedena následující označení:

P – prismatická (posuv bez rotace, kolem osy posuvu) – 1DOF

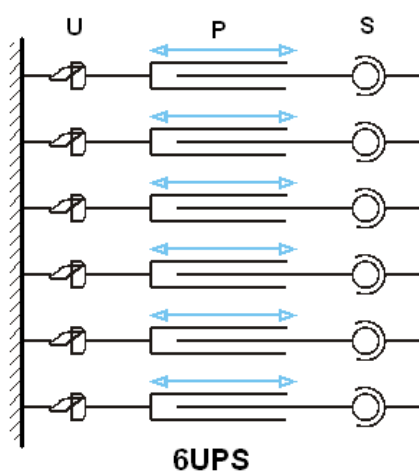
C – válcová (posuv v dané ose a rotace kolem dané osy) – 2DOF

R – rotační (rotace kolem osy) – 1DOF

S – sférická (rotace kolem tří vzájemně kolmých os) – 3DOF

U – univerzální kloub (složení dvou rotačních dvojic se vzájemně kolmou polohou os otáčení) – 2DOF

Při sestavení kinematického řetězce se libovolně kombinují uvedené kinematické dvojice. U hexapodů a zejména tripodů je obvykle užito tří kinematických dvojic. Lze také užít různé uspořádání kinematických dvojic v paralelně řazených řetězcích. Uspořádání a druh kinematických dvojic má za následek velikost a tvar pracovního prostoru mechanismu. Označení vodícího řetězce se určuje výhradně směrem od báze k platformě. Velmi často se před takové označení uvádí číslo, které určuje počet takto použitých kinematických řetězců s paralelním mechanismem – viz. obr. 4.2.2a.

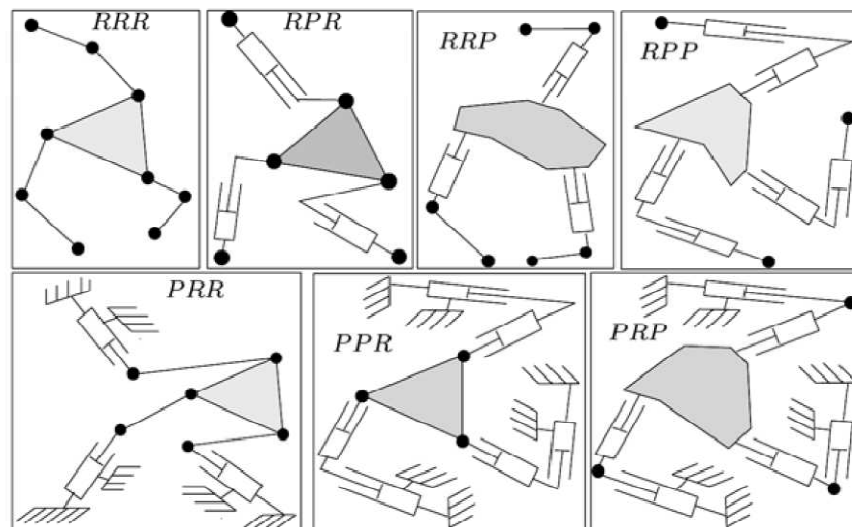


4.2.2a

Označení uspořádání kinematických dvojic hexapodu

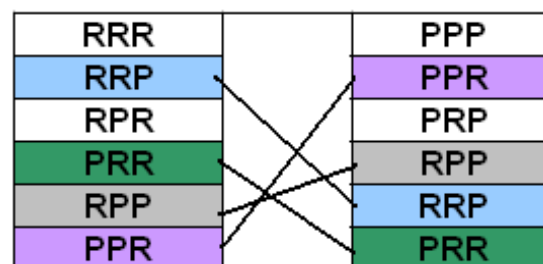
#### 4.3. MOŽNOSTI USPOŘÁDÁNÍ KINEMATICKÝCH DVOJIC S VÝSLEDNÝM POČTEM TŘECH STUPŇŮ VOLNOSTI PARALELNÍHO MECHANISMU

Jak poukazuje definice paralelních kinematických struktur, je nutné pro vznik paralelního mechanismu použít alespoň dva nezávislé, paralelně řazené kinematické řetězce. S takovou konstrukcí se lze setkat velmi výjimečně, protože je vhodná zejména pro rovinný prostor. V případě tripodů se používá třech paralelně řazených kinematických řetězců, ovládaných třemi pohony. Každý z těchto řetězců musí být spojen s bází a pohybující se platformou současně. Nachází se tudíž tři připojovací body na bázi a tři připojovací body na platformě. Je proto obvyklé setkávat se s trojúhelníkovým tvarem těchto stavebních prvků. Možná spojení lze nejčastěji dosáhnout kombinací spojení uvedených kinematických dvojic – viz. obr. 4.3a[2]. Výsledné kombinace popisuje obr. 4.3b, na kterém jsou stejné dvojice kombinací znázorněny příslušnými barvami. Výčtem kinematických možností dostaneme celkem 7 různých uspořádání. Je důležité poukázat na vynechání stavby o třech posuvných kinematických dvojicích (PPP). Toto spojení by neumožňovalo nezávislost pohybu řetězců.



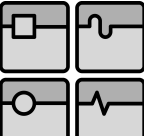
Obr. 4.3a[2]

Možnosti sestavení paralelních kinematických řetězců s 3DOF



Obr. 4.3b

Zobrazení stejných kombinací sestavení kinematických řetězců s 3DOF

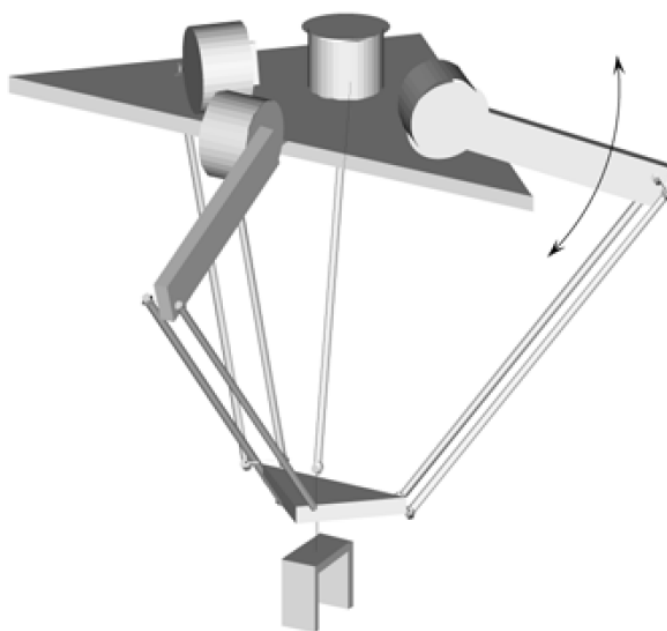
|                                                                                   |                                            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 46 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

#### 4.4. PŘÍKLADY PARALELNÍ STAVBY ROBOTŮ SE TŘEMI STUPNI VOLNOSTI

Manipulátory se 3DOF se prokázaly zejména vhodné pro účel manipulace. Z tohoto důvodu bude obsah této kapitoly věnován názornému popsání některých robotů s 3DOF.

##### 4.4.1. DELTA KONCEPCE

Konstrukce tohoto mechanismu bude popsána v kapitole 7. Robot byl původně vyvinut na 'Ecole Polytechnique v Lausanne' a stal se nejpoužívanější robotem této třídy. Disponuje 3DOF, ale často je doplněn o 4. DOF. Složení kinematického řetězce je v pořadí R2K2K (rotace – 2 x paralelně kulový kloub – 2 x paralelně kulový kloub) – viz.obr.4.4.1a[2]. Tři motory, které jsou vůči sobě vzájemně pootočený o 120° a jsou připevněné na bázi, pohybují ramenem s otáčivým pohybem s horizontální osou otáčení. Na konci tohoto ramene jsou pomocí dvou kulových kloubů souběžně připojena táhla, která uchycují pohybující se platformu. Uspořádání táhel vytvoří pohybující se paralelogram. Vlivem těchto paralelogramů, pohybující se platforma získává možnost pohybu ve třech směrech s vyloučením současných rotací. Často bývá struktura doplněna o středovou rotaci koncového efektoru (4. DOF) – viz.obr.4.4.1a[2]. Čtvrtá osa je nejčastěji provedena pomocí samostatného pohonu umístěného na bázi. Přenos pohybu od tohoto pohonu bývá proveden přes Kardanovy klouby s teleskopickou hřídelí.

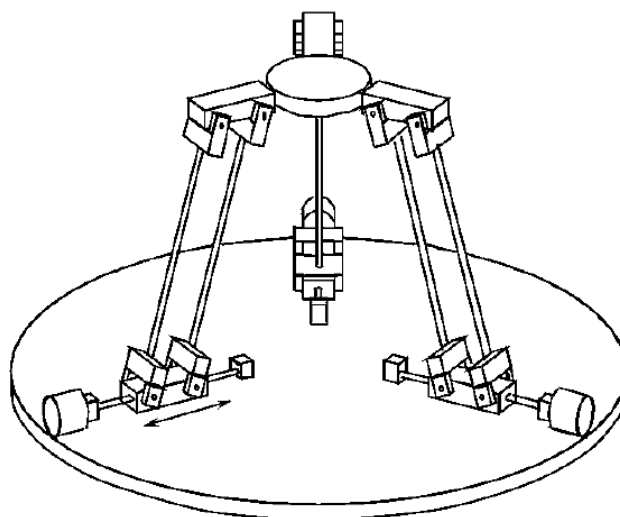


Obr.4.4.1a[2]  
Delta robot



#### 4.4.2. STAR KONCEPCE

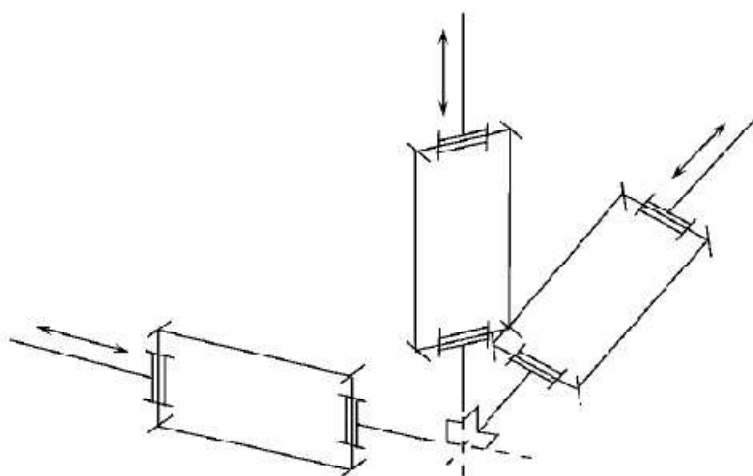
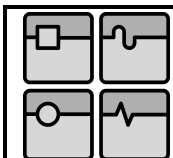
Tato koncepce je typická ovládáním platformy pomocí třech motorů. Pohony jsou pootočené o  $120^\circ$  s osami otáčení směřujícími do středu se společným průsečíkem ve středovém bodě – viz. obr. 4.4.2a[2]. Konstrukci lze doplnit 4. DOF, ale pro tuto konstrukci je to spíše výjimečné. Ramena tvoří již přímo paralelogram spojený dvojicemi obecných kloubů. Tím odpadá problematika jištění polohy kloubů, která je u kloubů kulových nezbytná. Pohyb ramen může být uskutečňován kuličkovým šroubem. Natočení rotoru je převedeno na kuličkový šroub. Tím je změněna poloha jednotlivých kloubů na bázi. Změnou této polohy dojde k následnému pohybu platformy. Platforma se může pohybovat s 3 DOF. Pro zajištění stability mechanismu je nutná fixace v polohách kloubů. Nutno poukázat, že použití kuličkových šroubů má za následek výborné vlastnosti z hlediska přesnosti a polohování koncového efektoru.



Obr. 4.4.2a[2]  
Star koncepce robotu

#### 4.4.3. ORTOGONÁLNÍ KONCEPCE

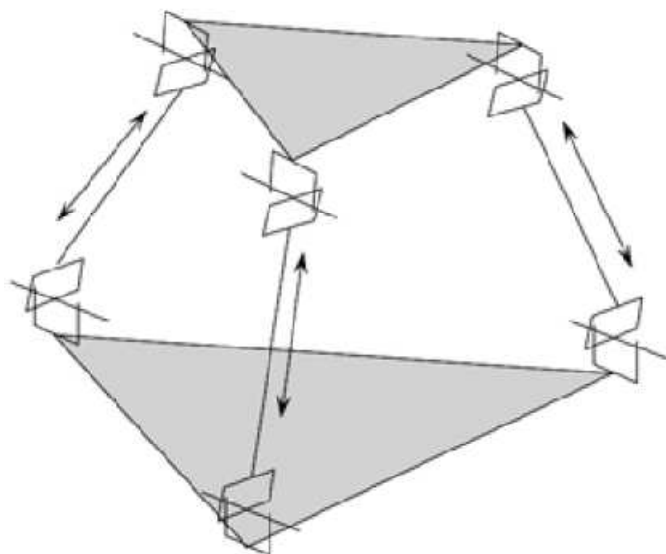
U této koncepce se nabízí využití také pro obráběcí účely. Koncepce se vyznačuje použitím atypické, nerovinné báze – viz. obr. 4.4.3a[2]. Bázi tvoří tři navzájem kolmé roviny, na nichž jsou uspořádány tři navzájem kolmé lineární posuvné jednotky. Osy jsou tak uspořádány v Kartézském souřadném systému. Návaznost na každou posuvovou jednotku tvoří uspořádání ramen ve tvaru paralelogramu. Výhodou tohoto uspořádání je poměrně malý zastavěný prostor a možnost přímého sestavení koncepce, bez nutnosti použít základní platformu (v určitých případech).



Obr.4.4.3a[2]  
Ortogonální koncepce robotu

#### 4.4.4. UPU KONCEPCE (“TSAI” KONCEPCE)

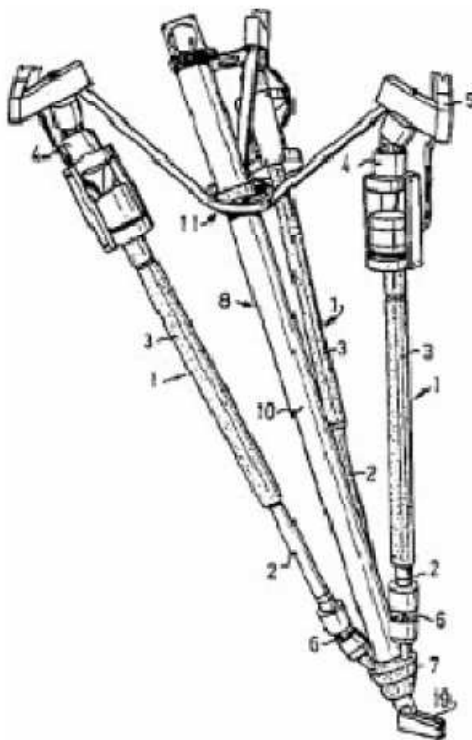
Koncepce užívá spojení třech kinematických řetězců 3UPU – viz. obr. 4.4.4a[2]. Studii pro tento typ robotu provedl Tsai (vědec). Byly zde pozorovány velké možnosti rotačních pohybů, a proto je tento robot velmi citlivý na výrobní tolerance. Pohon robotu je zajištěn pomocí teleskopických ramen, která jsou připojena k bázi a platformě univerzálními klouby. Pro zajištění stability mechanismu je nutná fixace univerzálních kloubů v jednotlivých polohách.



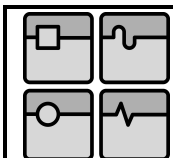
Obr. 4.4.4a[2]  
“Tsai” koncepce

#### 4.4.5. TRICEPT KONCEPCE (NEUMANN PATENT)

Koncepce je založená na hybridní kinematice. Dá se zařadit do studií s netradiční (dělenou) stavbou báze – viz. obr. 4.4.5a[2]. Jako bázi lze označit nejen středový prvek uchycení středního pasivního ramene (11), ale i následná uchycení ramen vedlejších souběžných ramen (5). Těmito lineárními rameny (1), které se nachází v pootočení vůči sobě o  $120^\circ$  je polohován koncový efektor (19). Tato ramena musí být zavěšena na univerzálních kloubech a zároveň pohybují středovým pasivním ramenem (8), které může často nést pohon pro koncový efektor. To umožňuje této koncepci především schopnost pro manipulaci s velmi těžkými břemeny a především vhodnost pro aplikaci v obrábění.

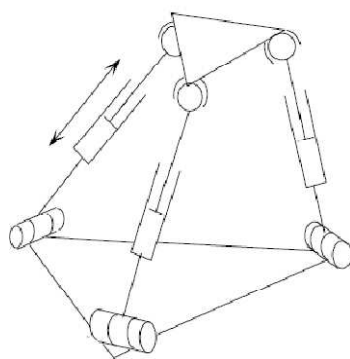


Obr.4.4.5a [2]  
Tricept koncepce



#### 4.4.6. RPS KONCEPCE (HUNT A LEE PATENT)

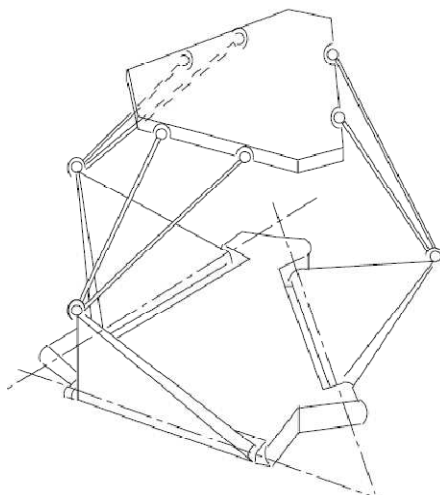
Na první pohled jednoduchá koncepce, skýtající možnost manipulace s bází pomocí tří řetězců RPS. Toto sestavení umožňuje vhodnou manipulaci s koncovým efektem v malém prostoru. Důsledkem vestavění lineárních pohonů do jednotlivých ramen je fakt, že není vhodný pro rychlou manipulaci s břemenem – viz. obr. 4.4.6a[2]. Výsledný pohyb se skládá z posuvu podél vertikální osy a dvou otočných pohybů podél os horizontálních.



Obr.4.4.6a[2]  
RPS koncepce

#### 4.4.7. RS2S KONCEPCE (LAMBERTŮV NÁVRH)

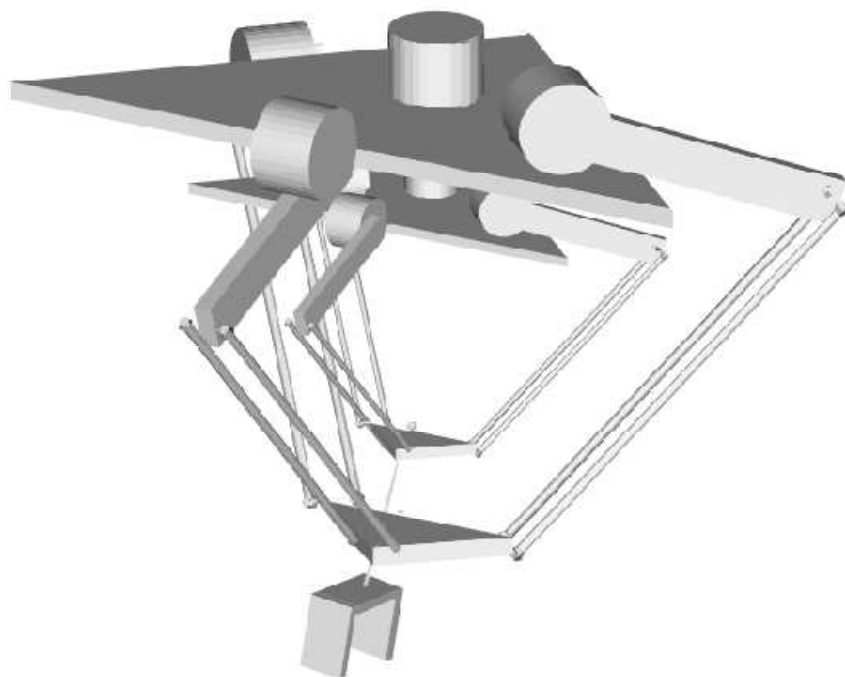
Tato struktura je částečně zaměnitelná se strukturou 4.4.6[2]. Rozdíl tvoří nahrazení posuvné jednotky (koncepce 4.4.6) dvěma rameny spojenými kulovým kloubem – viz, obr. 4.4.7a[2]. Ukotvení poháněného ramene je na bázi rotační dvojice. Na druhém konci je k ramenu připevněna kulovým kloubem dvojice vzpěr, které jsou ukotveny na platformě s následnou roztečí. Právě propojení těchto ramen je konstrukčně velmi obtížné, a proto se s takovou konstrukcí setkáme zcela výjimečně.



Obr. 4.4.7a[2]  
RS2S koncepce

#### 4.4.8. DVOJITÝ DELTA ROBOT

Jelikož je náplní této kapitoly přehled kinematických struktur s 3DOF, je tato koncepce s 6DOF zařazena pouze jako zajímavost. Tvoří ji totiž zdvojená struktura koncepce delta – viz. obr. 4.4.8a[2]. Právě zdvojení a následné zavěšení vnitřního delta uspořádání má za následek vznik 6DOF. Vnitřní delta uspořádání je zavěšeno na středový otočný kloub s vertikální osou otáčení umístěnou ve středu vnitřní báze. Koncový efektor, který prochází vnější platformou je manipulován pomocí středového závěsu ukotveného na vnitřní platformě. Tento závěs musí být upevněn na vnitřní platformu pomocí obecného kloubu. Vlivem schopnosti otáčet celým vnitřním delta uspořádáním je umožněno otáčení koncového efektoru. Vzájemná poloha platformám umožňuje vychylovat středový závěs. Nutno poukázat na možnost zpřesnění celkového pohybu efektoru oddálením vnější platformy od platformy vnitřní. Poloha platformám má vliv na rozšíření pracovního prostoru, který není jako u delta robotu dán dosahem jednotlivých ramen, ale tvoří ho zde absolutní poloha středového závěsu. Proto tedy lze mechanismus použít i pro velmi přesné operace s úkolem polohování. Tato velmi zajímavá koncepce s ojedinělým návrhem zatím nikdy nebyla postavena. Jako složité se jeví i následné ovládání, vytvoření simulace a matematického modelu.



Obr. 4.4.8[2]  
Dvojitá delta koncepce

## 5. KINEMATIKA PKS

Celý proces popsání kinematiky mechanismů s paralelní kinematickou strukturou je poměrně obtížný, a proto není cílem této diplomové práce detailně odvozovat dané přístupy řešení. V této kapitole bude pouze poukázáno na způsoby řešení a problematiku s nimi spjatou. Základní představa umožní lepší orientaci v dané oblasti a návrhu samotné konstrukce.

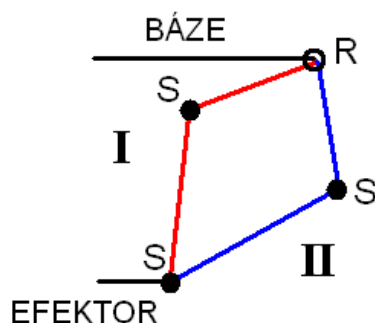
Úlohou kinematiky je popis chování těles a soustav těles bez ohledu na síly a momenty, které jakýkoli pohyb způsobují. Kinematika se zabývá popsáním polohy daných řetězců a následnými derivacemi. Těmito derivacemi se získá např. přehled o rychlosti a zrychlení. Kinematika tudíž studuje pouze geometrii a časové vlastnosti pohybu. Popsání pohybu a chování manipulátoru s PKS je složitější, než u manipulátorů zakládajících se na sériové kinematické struktuře. Tento problém je způsoben užitím několika souběžných kinematických řetězců, které se podílí na koncové poloze efektoru vůči bázi.

### 5.1. ZPŮSOBY ŘEŠENÍ KINEMATICKÉ ANALÝZY

Kinematická analýza odvozuje relativní pohyb mezi stavebními prvky mechanismu. Celá problematika spočívá ve vyvození vlastností určitého mechanismu. Řešení analýzy patří k složitějším procesům a obvykle se používají analytické metody založené na vektorové analýze, maticové algebře apod. Užívají se dva typy řešení úloh – úloha přímé kinematiky a úloha nepřímé (inverzní) kinematiky. Tyto úlohy se používají především pro stanovení polohy.

#### 5.1.1. ÚLOHA PŘÍMÉ KINEMATIKY

Úlohou přímé kinematiky je nalézt hodnoty hnacích členů a jejich časových derivací pro zajištění požadované polohy koncového efektoru. V případě paralelních mechanismů, je tato úloha velmi složitá a často vede k nejednoznačným řešením. Existuje totiž více možných natočení členů pro koncovou polohu efektoru - viz. obr. 5.1.1a. Přímoúhlohu lze řešit např. analyticky anebo např. interačními metodami, jako jsou Newton-Raphasonova metoda, Gauss-Newtonova metoda atd. [4].



Obr. 5.1.1a

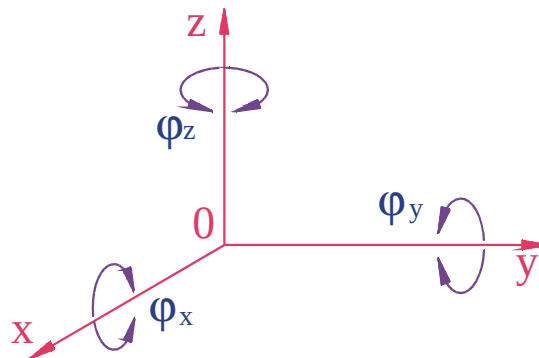
Možnosti natočení ramene Delta robotu  
při totožné výsledné poloze efektoru

### 5.1.2. ÚLOHA NEPŘÍMÉ KINEMATIKY

Úlohou nepřímé kinematiky je, ze známých aktuálních hodnot koncového efektoru, určit hodnoty akčních členů. V případě paralelních mechanismů je řešení této úlohy jednodušší, než v případě řešení pomocí přímé kinematiky. Pro řešení využíváme především maticového počtu. S výhodou lze užít algoritmy i pro řešení analýzy pracovního prostoru.

### 5.2. URČENÍ A OVĚŘENÍ STUPŇŮ VOLNOSTI DELTA ROBOTU

Počet stupňů volnosti je stěžejní parametr pro každý mechanismus. V podstatě nám říká, kolik druhů pohybů může daný řetězec vykonávat. Pro určení polohy platformy v prostoru je obecně potřeba 6DOF, tj. tři translace ve směru x, y, z, a tři rotace kolem os  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ,  $\varphi_z$  - viz. obr. 5.2a [4].



Obr. 5.2a[4]  
DOF v prostoru

Z důvodů složitosti paralelních konstrukcí se používá pro určení DOF mechanismu modifikovaný Grüblerův vzorec – viz. rovnice. 5.2. Tento vzorec bere v úvahu geometrické vztahy mezi klouby.

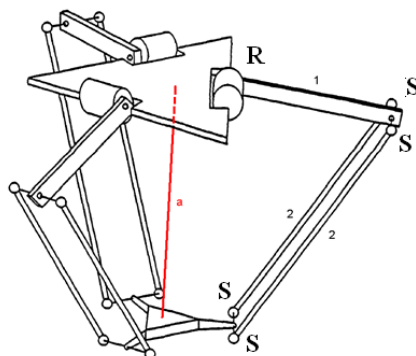
$$F = \lambda \cdot (n - j - 1) + \sum_{i=1}^g f_i - f_{id} + s$$

[4]

kde:

- |           |                                                                                                                                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F         | počet DOF                                                                                                                                                       |
| n         | počet všech členů mechanismu                                                                                                                                    |
| j         | počet kinematických dvojic                                                                                                                                      |
| $f_i$     | počet DOF od jednotlivých kinematických dvojic (viz kapitola 4.2.2)                                                                                             |
| $\lambda$ | konstanta - pro pohyb v rovině $\lambda = 3$ (2 translace + 1 rotace)<br>pro pohyb v prostoru $\lambda = 6$ (3 translace + 3 rotace)                            |
| $f_{id}$  | DOF vlastních pohybů ( DOF členu, který nemá vliv na polohu koncového efektoru)                                                                                 |
| s         | počet pasivních vazeb (také často pod názvem “geometrické předpoklady“, představují polohy os kloubů, nadbytečné podmínky tuhosti nebo zvláštní rozměry kloubů) |

Výpočet se bude uvažovat pro větší názornost podle obr. 5.2b, tzn. bez doplňkové rotační osy, která je zde pouze naznačena. Jak již bylo uvedeno, jedná se o otáčející se teleskopické rameno - poz. a, vedené mezi středem báze a platformou. Toto samostatné rameno nemá vliv na samostatnou polohu platformy, a tudíž se cíleně nebude ve výpočtu uvažovat. Úloha tohoto prvku je pouze natáčení kolem svislé osy koncovým efektozem.



Obr. 5.2b[3]  
Nákres Delta robotu

### 5.2.1. URČENÍ STUPŇŮ VOLNOSTI DELTA ROBOTU S POUŽITÍM KULOVÝCH KLOUBŮ

Parametry Delta robotu:

$$\begin{aligned}
 n &= 1+3.(1+2)+1 &= 11 \\
 j &= 3.(R+4.S) = 3.(1+4.1) &= 15 \\
 f_i &= 3.(R+4.S) = 3.(1+4.3) &= 39 \\
 \lambda & &= 6 \\
 f_{id} &= 3.(1+1+1+1) &= 12 \\
 S & &= 0
 \end{aligned}$$

(rotace vzpěry – obr. 5.2b, poz. 2 kolem své vlastní osy)

Dosazení příslušných parametrů do rce. 5.2[4]

$$F = 6(11-15-1)+39-12-0 = -3 \text{ DOF}$$

Tímto bylo ověřeno, že základní struktura Delta robotu má 3DOF, které budou následně doplněny o rotaci koncového efektoru (1DOF) s výslednými 4DOF. Znaménko – určuje počet nutných DOF k tomu, aby byl mechanismus staticky určitý, tzn. měl 0DOF.

### 5.2.2. URČENÍ STUPŇŮ VOLNOSTI DELTA ROBOTU S POUŽITÍM UNIVERZÁLNÍCH KLOUBŮ

Parametry Delta robotu:

$$\begin{aligned}
 n &= 1+3.(1+2)+1 &= 11 \\
 j &= 3.(R+4.U) = 3.(1+4.1) &= 15 \\
 f_i &= 3.(R+4.U) = 3.(1+4.2) &= 27 \\
 \lambda & &= 6 \\
 f_{id} & &= 0 \\
 S & &= 0
 \end{aligned}$$



Dosazení příslušných parametrů do rce. 5.2[4]

$$F = 6(11-15-1)+27-0-0 = -3 \text{ DOF}$$

Počet DOF s použitím univerzálních kloubů je shodný jako při použití kloubů kulových. Tím je dokázáno, že při použití univerzálních kloubů nedojde k narušení základních požadovaných vlastností. Budou tak zachovány základní požadavky z hlediska kinematiky na funkci konstrukce.

## 6. SOUČASNÉ PRODUKTY VYBRANÝCH ROBOTŮ S PKS

### 6.1. DELTA STRUKTURY

#### 6.1.1. ABB IRB 340 / IRB 360

Společnost ABB nabízí dva typy delta robotů s PKS. Oba dva typy jsou založeny na konstrukci s kulovými klouby, jejichž vzájemnou polohu zajišťuje pružina – viz. obr. 6.1.1a[5]. Čtvrtá (středová) osa umožňující rotaci kolem svislé osy, je uskutečněna volbou teleskopického hřídele uloženého v Kardanových kloubech. Oba roboty jsou vhodné do prostředí s vysokými hygienickými požadavky.

|                                               | IRB 340         | IRB 360         |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Počet DOF                                     | 4               | 4               |
| Pracovní hmotnost [kg]                        | 1               | 1               |
| Přesnost polohování [mm]                      | 0,1(bez zátěže) | 0,1(bez zátěže) |
| Přesnost polohování natočení 4.osy [°]        | 0,4             | 0,4             |
| Pracovní prostor - max. ø / zdvih max. ø [mm] | ø1130/250       | ø960/250        |



Obr.6.1.1a[5]  
ABB IRB 360

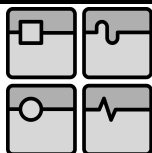
### 6.1.2. FANUC M-1iA/0,5A / M-1iA/0.5S

Společnost Fanuc nabízí čtyři typy delta robotů a jeden na principu hexapodu – viz. kap. 6.2.1. U typů M-1iA – viz. obr. 6.1.2a[7]. Pro spojení ramen používá kulové klouby, které jsou pevně spojeny a jsou tudíž pevně fixovány ve své poloze. Čtvrtá osa je založena na principu dvou paralelně řazených táhel, které svým natočením změni polohu platformy. Typ M-1iA/0,5A je navíc rozšířen na 6DOF. Dané rozšíření spočívá spíše v přímém zabudování efektoru s 2DOF na platformu. Bez tohoto rozšíření má tento typ stejný počet DOF, jako typ M-1iA/0.5S, tj. 4DOF.

|                                                                       | M-1iA/0,5A           | M-1iA/0.5S           |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Počet DOF                                                             | 6 (4+2)              | 4                    |
| Pracovní hmotnost [kg]                                                | 0,5                  | 0,5                  |
| Přesnost polohování [mm]                                              | 0,02(bez zátěže)     | 0,02(bez zátěže)     |
| Přesnost polohování natočení 4.osy [°]                                | neuvedeno            | neuvedeno            |
| Pracovní prostor - max. $\varnothing$ / zdvih max. $\varnothing$ [mm] | $\varnothing$ 280/60 | $\varnothing$ 280/60 |



Obr. 6.1.2a[7].  
Fanuc M-1iA/0,5A



### 6.1.3. FANUC M-3iA/6A / M-3iA/6S

Typy M-3iA jsou podobné jako typy M-1iA k dostání ve dvou variantách. Tím se myslí s rozšířenou možností integrace 2DOF do koncového efektoru. V základní verzi disponují oba tyto roboty 4DOF. Spojení ramen je zajišťováno kulovými klouby s kombinací pružné i pevné vzpěry – viz. obr. 6.1.3a[7]. Pro větší tuhost je pevná vzpěra zařazena do prostoru každé dvojice vzpěr tvořících paralelogram (není použita v obr. 6.1.3a). U těchto typů se lze setkat s velmi zajímavým a dosud nikde nezveřejněným způsobem řešení 4.DOF. Rotace koncového efektoru zde není řešena jako ve většině případů středovým hřídelem. Rotaci zajišťují vestavené pohony v prostoru vzpěr tvořících paralelogram. Tyto pohony poté otáčejí zřejmě ozubeným věncem, který je vestavěn do poněkud rozměrnější platformy, než je tomu u ostatních případů.

|                                               | M-3iA/6A        | M-3iA/6S        |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Počet DOF</b>                              | 6               | 4               |
| <b>Pracovní hmotnost [kg]</b>                 | 6               | 6               |
| <b>Přesnost polohování [mm]</b>               | 0,1(bez zátěže) | 0,1(bez zátěže) |
| <b>Přesnost polohování natočení 4.osy [°]</b> | neuvedeno       | neuvedeno       |
| <b>Pracovní prostor ø / zdvih [mm] [mm]</b>   | ø1350/300       | ø1350/300       |



Obr. 6.1.3a[7].  
Fanuc M-3iA/6A

#### 6.1.4. ADEPT S650H / S800H

Společnost Adept nabízí dvě modifikace delta robotů – viz obr. 6.1.4a[6]. Roboty disponují 4DOF. Lze se zde setkat s ovládáním 4.DOF pomocí nepravidelně rozmístěných ramen na platformě. Jako klouby mezi rameny jsou použity klouby kulové s jistěním polohy pružinou. Již zmiňovaná nepravidelnost uchycení kloubů na platformě, umožňuje při pohybu jednotlivých ramen natočení platformy. Konstrukce nepotřebuje tudíž dodatečné středové rameno pro otáčení koncového efektoru. Nutno ale podotknout, že natáčení platformy (4.DOF) je omezené. Toto uspořádání je velmi zajímavé a především náročné z hlediska ovládání a schopnosti zamezit natáčení platformy během pohybu ramen. Varianta s800H nabízí prodloužená táhla ramen, která zvýší pracovní rádius robotu.

|                                             | s650H                  | s800H                  |
|---------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Počet DOF                                   | 4                      | 4                      |
| Pracovní hmotnost [kg]                      | 2 (max6)               | 2 (max6)               |
| Přesnost polohování [mm]                    | 0,1(bez zátěže)        | 0,1(bez zátěže)        |
| Přesnost polohování natočení 4.osy [°]      | 0,1                    | 0,1                    |
| Pracovní prostor $\varnothing$ / zdvih [mm] | $\varnothing$ 1300/215 | $\varnothing$ 1600/215 |



Obr.6.1.4a[6]  
Adept s650H / Adept s800H

### 6.1.5. AICO DR 1200/3 / DR 1200/4

Společnost Aico Robot nabízí v základní verzi delta robot se 3DOF – viz. obr. 6.1.5a[8]. V sortimentu společnosti lze nalézt rozšíření tohoto typu o rotační DOF, tzn. na 4DOF. Klouby jsou opět použity v jednoduchém kulovém spojení a pružnou.

|                                                               | DR 1200/3              | DR 1200/4              |
|---------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Počet DOF</b>                                              | 3                      | 4                      |
| <b>Pracovní hmotnost [kg]</b>                                 | 2                      | 2                      |
| <b>Přesnost polohování [mm]</b>                               | 0,15(bez zátěže)       | 0,15(bez zátěže)       |
| <b>Přesnost polohování natočení 4.osy [°]</b>                 | -                      | 0,5°                   |
| <b>Pracovní prostor <math>\varnothing</math> / zdvih [mm]</b> | $\varnothing$ 1200/230 | $\varnothing$ 1200/230 |



Obr.6.1.5a[8]  
Aico DR 1200/4

### 6.1.6. KAWASAKI YF03N

Společnost Kawasaki Robotics nabízí delta robot se 4 DOF – viz. obr. 6.1.6a[9]. V nabídce se lze setkat i s delta robotem s 5DOF. Jedná se ale o chybné označení, kde jako 5. DOF je brán stupeň volnosti koncového efektoru– viz. obr. 6.1.6b[9]. Takovéto stupně volnosti se do celkového počtu DOF robotu nezapočítávají, jelikož jde o výměnné zařízení. Kloubové spoje jsou uspořádány ve formě kulových kloubů jištěných pružinou. Čtvrtý stupeň volnosti je vytvořen zabudováním mikromotoru přímo do platformy.

|                                                               | YF03N                  |
|---------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Počet DOF</b>                                              | 4                      |
| <b>Pracovní hmotnost [kg]</b>                                 | 3                      |
| <b>Přesnost polohování [mm]</b>                               | 0,1                    |
| <b>Přesnost polohování natočení 4.osy [°]</b>                 | 0,1                    |
| <b>Pracovní prostor <math>\varnothing</math> / zdvih [mm]</b> | $\varnothing$ 1300/300 |



Obr.6.1.6a[9]  
Kawasaki YF03N



Obr.6.1.6b[9]  
DOF koncového efektoru  
uváděný jako 5.DOF robotu

### 6.1.7. ELAU P4S / P4SR

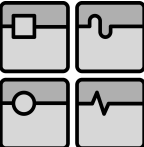
Společnost Schneider Electric nabízí delta robot se 3DOF. Model lze vybavit také 5 DOF – viz. obr. 6.1.7a[10]. Klouby robotu jsou kulové s jističením pomocí pružiny. Robustní, nerezové krytování robotu předurčuje jeho použití zejména v potravinářském průmyslu.

|                                                               | P4s                    | P4sR                   |
|---------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Počet DOF</b>                                              | 3                      | 4                      |
| <b>Pracovní hmotnost [kg]</b>                                 | 1,5                    | 1,5                    |
| <b>Přesnost polohování [mm]</b>                               | 0,1(bez zátěže)        | 0,1(bez zátěže)        |
| <b>Přesnost polohování natočení 4.osy [°]</b>                 | neuvedeno              | neuvedeno              |
| <b>Pracovní prostor <math>\varnothing</math> / zdvih [mm]</b> | $\varnothing 1200/225$ | $\varnothing 1200/225$ |



Obr.6.1.7a[10]  
Elau P4sR



|                                                                                   |                                            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 62 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

## 6.2. JINÉ STRUKTURY

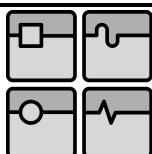
### 6.2.1. FANUC F-200IB

Výrobce Fanuc nabízí mimo tří předchozích delta uspořádání robotů i manipulátor založený na bázi hexapodu – viz. obr. 6.2.1a[7]. Manipulátor nabízí k využití 6 DOF. Šest teleskopických ramen je poháněno pomocí vlastních kuličkových šroubů. Každé rameno je ovládáno vlastním servomotorem a je uloženo v obecných kloubech. Ovládání každého ramene tak klade zvýšené nároky na celkovou kontrolu řízení. Každé rameno je vybaveno automatickou bezpečnostní brzdou pro zajištění polohy při nebezpečí výpadku elektrického proudu. Robot je určen převážně pro pracovní pozici s bází ve spodní poloze. Ramena jsou vybavena vlastním tlumicím systémem, který zabraňuje přenášení možných vibrací z platformy na bázi a naopak. Manipulační hmotnost robotu činí 100kg. Využití robotu je především tam, kde je třeba manipulace s těžkými břemeny a kde nejsou tak náročné požadavky na manipulační rychlost, jako v případě delta robotů.



Obr.6.2.1a[7]  
Fanuc F-200iB





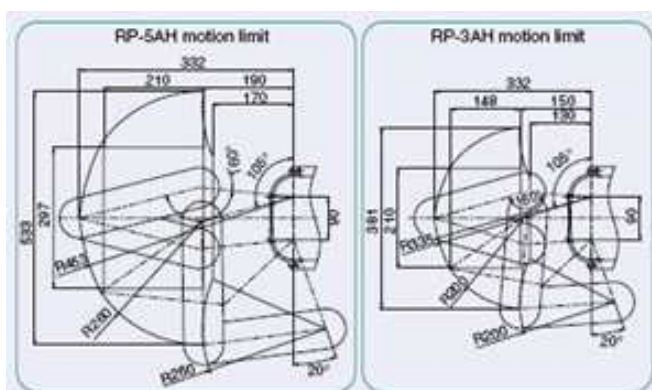
### 6.2.2. MITSUBISHI RP-5AH

Společnost Mitsubishi Robots nabízí ve své řadě produktů poněkud atypický a ojedinělý druh robotu z pohledu kinematického uspořádání – viz. obr. 6.2.2a[10]. Robot je vyráběn ve dvou rozměrových provedeních. Mohlo by se říci, že se jedná o určitý druh “zdvojeného” robota typu scara. Uspořádáním dvojice ramen, ovládaných v horizontální rovině, se může zařadit do skupiny skupin paralelních. Klouby robotu tvoří rotační klouby s osou otáčení uloženou ve vertikálním směru. Ramena tedy pracují pouze v rovině horizontální a o vertikální pohyb se stará koncový člen s patřičným efektozem. Koncový výsuvný člen má možnost rotace kolem své osy v rozmezí  $\pm 200^\circ$ . Robot má tudíž celkově 4DOF. Jeho maximální manipulační hmotnost je 5kg. Nasazení tohoto mechanismu se nalézá tam, kde je potřeba montáže dílů v poměrně malém pracovním prostoru.

Nákres pracovního prostoru – viz. obr 6.2.2b[10]



Obr.6.2.2a[10]  
Mitsubishi RP-5AH



Obr.6.2.2b[10]  
Podrobné schéma robotu Mitsubishi RP-5AH

### 6.2.3. TRICEPT T606

Společnost Tricept PKM nabízí čtyři rozměrové řady robotu tricept. Pro tento typ robotu je typická hybridní kinematická struktura. Robot se vyznačuje poměrně velikou dynamikou vzhledem k jeho velmi vysoké tuhosti, robustní konstrukci a rozměrům. Tři teleskopická ramena jsou vzájemně rozmístěna okolo středového ramene a vzájemně pootočena o  $120^\circ$  - viz. obr. 6.2.3a[11]. Středové rameno může nést pohonnou jednotku pro případ nasazení s účelem obrábění. Robot disponuje 5DOF. Maximální manipulační hmotnost robotu činí 580kg. Vzhledem k této vysoké hmotnosti má velmi dobrou přesnost polohování, tj.  $\pm 20\mu\text{m}$ . Jsou známy velmi dobré výsledky nejen v manipulaci s velmi těžkými břemeny, ale hlavně v nasazení při dokončovacím obrábění (ořezávání a broušení hran apod.)



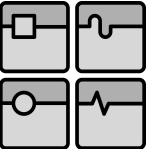
Obr.6.2.3a[11]  
Tricept T606

#### 6.2.4. ELAU D2

Společnost Schneider Electric nabízí zcela ojedinělý manipulátor na bázi paralelní kinematiky s 2DOF – viz. obr. 6.2.4a[12]. Manipulátor pracuje pouze ve svislé rovině. Dva servomotory jsou přímo napojeny na ovládaná ramena. Nasazení je velmi omezené, protože pracovní prostor tvoří rovina. Maximální manipulační hmotnost je 25kg.



Obr.6.2.4a[12]  
Elau D2

|                                                                                   |                                            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 66 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

## 7. KONSTRUKCE MANIPULÁTORU S PKS

V této části diplomové práce bude popsán postup návrhu a složení základních stavebních prvků vlastní konstrukce dle přiděleného zadání. Jako vhodné kinematické uspořádání pro plnění daného úkolu byla vybrána koncepce uspořádání Delta – viz. 4.1.1. Dané uspořádání skýtá možnost manipulace s materiálem s využitím velmi dobrých dynamických vlastností, dostatečné tuhosti a možnosti polohování materiálu. Z navržených konstrukcí bude zvolen návrh určený pro výrobu a sestavení. Na vybrané konstrukci se také bude provádět zkušební měření a porovnání výsledných parametrů.

Základní část konstrukce má za úkol navázat na vytvořenou bázi s pohony, která byla zkonstruována na UVSSR FSI VUT v Brně. Ve finální fázi návrhu bude tudíž ponechána vytvořená báze s pohony. Tyto dva stavební prvky budou tedy pro oba dva návrhy konstrukcí stejné. Na dalších částech mechanismu bude dále aplikována nová konstrukce základních stavebních prvků. Hlavním požadavkem je tedy aplikovat vlastní návrhy konstrukce spolu s návrhem čtvrté osy a porovnáním finálních vlastností. Popisy obou konstrukčních návrhů budou popsány v samostatných kapitolách.

Ačkoli jsou oba modely založeny na stejném principu kinematické stavby, jsou velmi odlišné. V obou návrzích se objevují nové prvky a možnosti, které nebývají často používány. Vytvoření dalších prototypů by se dalo označit za modifikace těchto dvou základních konstrukčních variant. Aby byla v budoucnu možnost testovat oba zvolené návrhy, byl zde brán ohled na snadnou přestavbu odlišných dílů.

Dalším úkolem diplomové práce je výběr vhodných stavebních materiálů. V této části bylo nutné vypořádat se s několika požadavky, spolu se snahou nalezení vhodného kompromisu. Použité stavební materiály byly vybrány dle dostupnosti nabídek na trhu. Faktory ovlivňující výběr materiálů zahrnovaly: vlastnosti daného materiálu, nabídka vhodných polotovarů, cena a dostupnost (termín dodání).

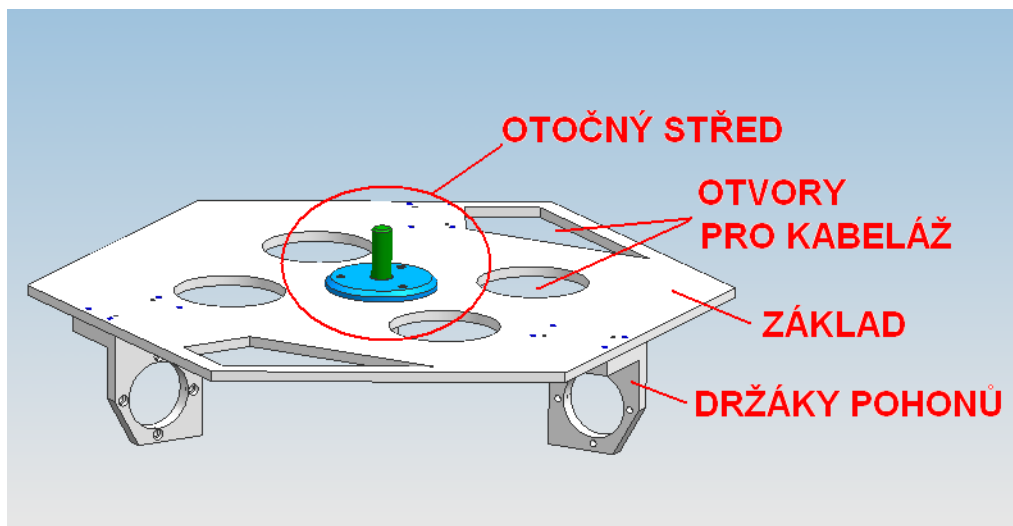
## 7.1. NÁVRH S UNIVERZÁLNÍM KLOUBEM

Konstrukce s univerzálním kloubem poukazuje na problematiku a náročnost spojenou s použitím univerzálních kloubů. Definice univerzálního kloubu – viz. kap. 4.1.3. Jelikož univerzální klouby nebývají ve stavbě Delta robotu tak často používány, je tento návrh poněkud ojedinělý. Obzvláště složité je řešení uložení kloubu do spojovaných prvků. Použití univerzálních kloubů totiž nabízí možnost kladení vyšších požadavků na dynamické vlastnosti. Z návrhu je patrna snaha integrace kloubů do samotných stavebních prvků. Dále je zde použit zcela odlišný materiál (slitina hliníku) na výrobu táhel ve snaze o co největší redukci hmotnosti. Návrh použitých stavebních prvků tedy nabízí odlišný pohled na vytvoření konstrukce, za možnosti splnění předpokladů lepších finálních výsledků.

### 7.1.1. BÁZE

Výkresy č.: 3-01.0304, 3-2.0403, 3-2.0401, 4-2.0402

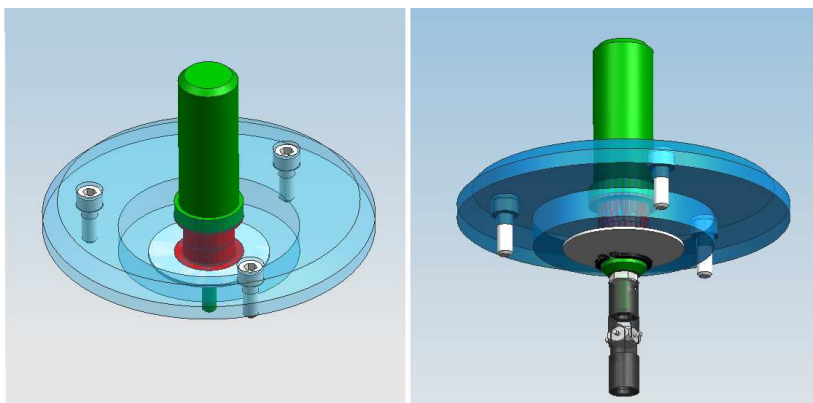
Báze je celkově připevněna na sestaveném rámu, který není součástí diplomové práce (dle zadaných pokynů). Z velikosti tohoto rámu také vycházel požadavek na požadovaný pracovní prostor.



Obr. 7.1.1a  
Sestavení báze

Báze je složena ze tří základních částí – viz. obr. 7.1.1a. Otočný střed slouží k upevnění pohonu čtvrté osy a připojení Kardanova kloubu. Pohled na detail otočného středu – viz. obr. 7.1.1b.

Jako vhodný materiál pro základ a držáky pohonu je zvolena pro dostačující vlastnosti ocel tř. 11500. Otočný střed je vyroben ze slitiny hliníku EN AW-6060 (AlMgSi0,5).



Obr. 7.1.1b  
Uložení otočného středu

Popis sestavení otočného středu přibližuje jeho konstrukci. Zajištění polohy spodního víčka je vyřešeno použitím pojistného kroužku. Pro vymezení vůle vzniklé mezi spodním víčkem a spodním ložiskem je možno použít tenkou pryžovou podložku. Tato podložka dodatečně vymezí vůli vzniklou tolerancí polohy drážky pro pojistný kroužek. Pro správnou funkci otočného středu je nutné dodržet dané tolerance – viz. obr. 7.1.1c .

Uložení otočného středu na  $\varnothing 60H7/g6$ , je uložení s velmi malou vůlí. Umožňuje tak smontování základu a otočného středu bez znatelné vůle. Pozici otočného středu zajišťují trojice šroubů M5.

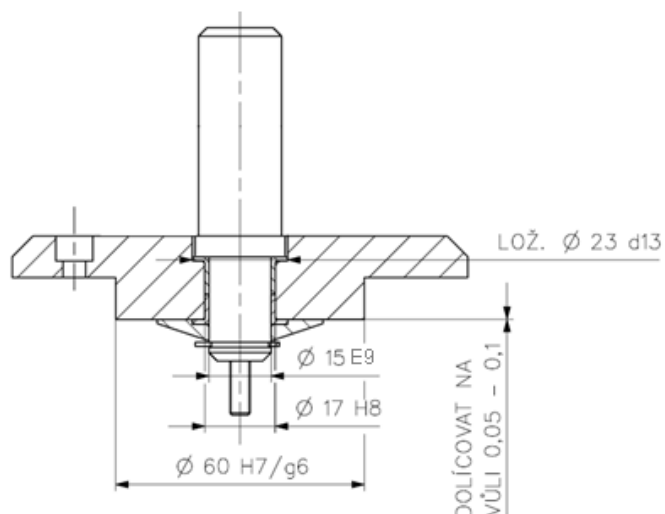
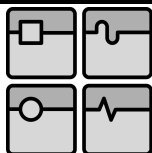
Uložení středového hřídele v otočném středu je provedeno přes dvojici protiběžných kluzných ložisek Iglidur.

Vnitřní průměr ložiska je vyroben dle katalogu v toleranci  $\varnothing 15,032$  až  $\varnothing 15,102$ .

Kontaktní průměr středového hřídele je vyroben s tolerancí  $\varnothing 15h7$ , aby byla zajištěna minimální radiální vůle v otáčení.

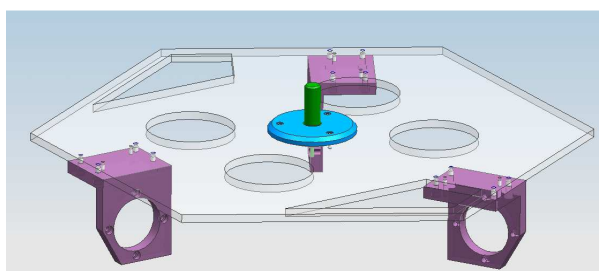
Vnější průměr ložiska je uložen v otvoru s tolerancí  $\varnothing 17E9$  pro nutné vytvoření vůle. Tato tolerance je zvolena s ohledem na přesah vnější části ložiska o rozměru  $\varnothing 15,2\text{mm}$

Pro správnou funkci je nutné dolícovat délku (čela) ložisek tak, aby vznikla minimální axiální vůle v uložení o velikosti 0,05 až 0,1mm. Správným dolícováním délky ložisek bude zaručena správná funkce s požadovanou přesností otáčení.



Obr. 7.1.1c  
Uložení otočného středu

Ve spodní části báze jsou připevněny držáky pohonů – viz. obr. 7.1.1d. Tyto prvky byly navrženy tak, aby zaručovali maximální tuhost a odolnost proti momentovým vlivům vycházejících z pohonů.



Obr. 7.1.1d  
Držáky pohonů

Pro velmi složité vyrobení Kardanových kloubů o vhodné velikosti, jsou tyto klouby řešeny jako nákup subdodávky. Vyrobení těchto kloubů by znamenalo lepší a známé vlastnosti materiálu, ale i vyšší pořizovací náklady. Tělo nakoupených Kardanových kloubů je tvořeno tvrzeným plastem, ve kterém je zalita kovová vložka se závitem pro připojení. Kříž spojující obě části Kardanova kloubu je vyroben z kovu. Připojení Kardanova kloubu je řešeno přes koncový závit s dotaženou kontramaticí k otočnému středu – viz. obr. 7.1.1b. Jako pojistka proti pootočení slouží dotažení bočního pojistného šroubu, který je součástí Kardanova kloubu – viz. obr. 7.1.1e[16].

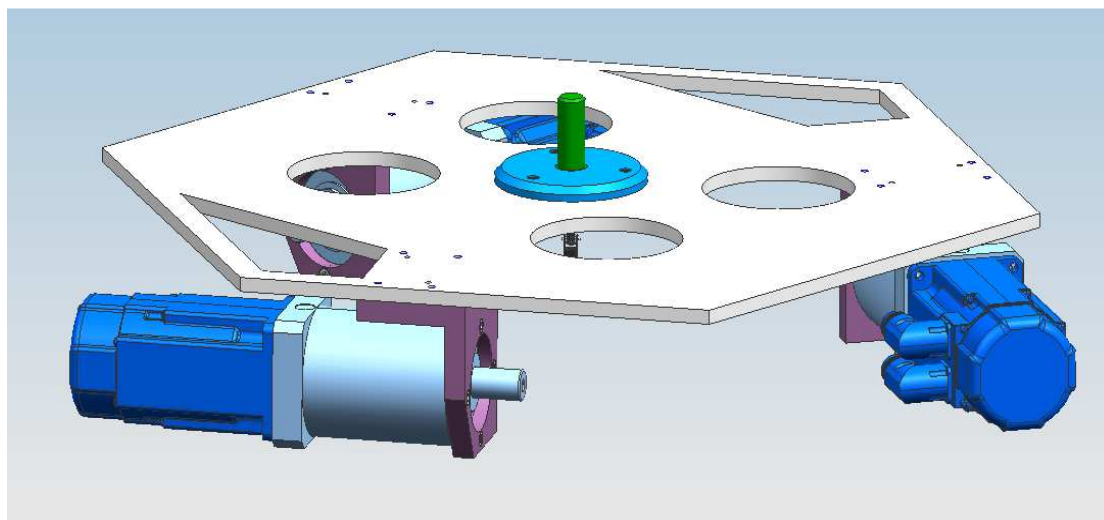


Obr. 7.1.1e[16]  
Kardanův kloub



### 7.1.2. POHONY

Základními požadavky na pohon jsou zejména dynamické vlastnosti a provozní stabilita. Jako pohony jsou použity motory Beckhoff AM3041C s převodovkami Wittenstein LP090/02-25 – viz. obr. 7.1.2a. Motor s převodovkou je spojen v celek dle pokynů výrobce.



Obr. 7.1.2c  
Pohony

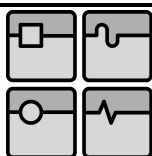
#### Beckhoff AM3041C

Jedná se o synchronní třífázový servomotor pro náročné servoaplikace. Použití nalézá zejména v aplikacích, jako jsou polohovací úlohy průmyslových robotů, obráběcí stroje a výrobní linky. Servomotor je vybaven permanentními magnety. Moderní magnetické materiály výrazně přispívají k velmi dobrým dynamickým vlastnostem motoru. Teplota vinutí je sledována teplotními čidly zabudovanými ve statoru. Zpětná vazba je tvořena integrovaným revolverem s EnDAT/BISS enkoderem. Motor může být dodáván s vestavěnou brzdou.



AM3041C[14]  
Servomotor





# DIPLOMOVÁ PRÁCE

## Technické a mechanické parametry servomotoru

|                                           |                                       |      |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|------|
| Klidový moment $M_0$ [Nm]                 |                                       | 1,95 |
| Klidový proud $I_{0rms}$ [A]              |                                       | 1,46 |
| Maximální otáčky $N_{max}$ [ $min^{-1}$ ] |                                       | 6000 |
| $U_n=230V$                                | Jmenovité otáčky $N_n$ [ $min^{-1}$ ] | 1200 |
|                                           | Jmenovitý moment $M_n$ [Nm]           | 1,88 |
|                                           | Jmenovitý výkon $P_n$ [kW]            | 0,24 |
| Maximální proud $I_{0max}$ [A]            |                                       | 7,3  |
| Maximální moment $M_{0max}$ [Nm]          |                                       | 7,02 |
| Momentová konstanta $K_{Trms}$ [Nm/A]     |                                       | 1,34 |
| Napěťová konstanta $K_{erms}$ [mVmin]     |                                       | 86,3 |
| Resistance vinutí Ph-PH $R_{25}$ [OHM]    |                                       | 21,3 |
| Indukčnost vinutí Ph-PH $L$ [mH]          |                                       | 66,1 |

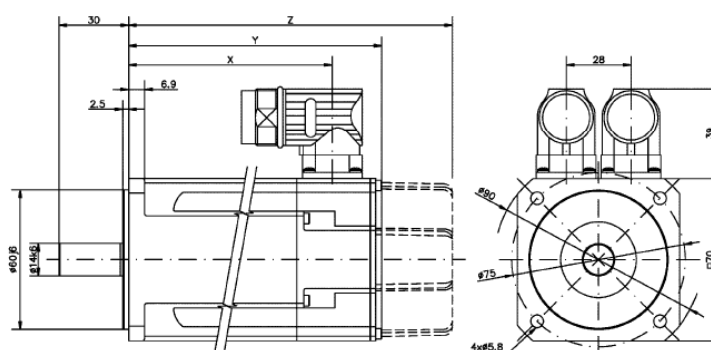
AM3041C [14]

## Technické parametry servomotoru

|                                                      |       |
|------------------------------------------------------|-------|
| Moment setrvačnosti rotoru $J$ [ $kgcm^2$ ]          | 0,81  |
| Počet pólů                                           | 10    |
| Statický moment tření $M_R$ [Nm]                     | 0,014 |
| Teplotní časová konstanta $t_{TH}$ [min]             | 13    |
| Hmotnost $m_M$ [kg]                                  | 2,44  |
| Přípustná radiální síla na výstupní hřídel $F_R$ [N] | 450   |
| Přípustná axiální síla $F_A$ [N]                     | 180   |

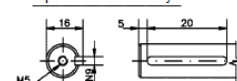
AM3041C [14]

## Mechanické parametry servomotoru



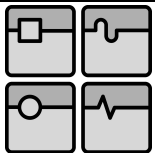
| Motor type | X    | Y     | Z (brake) |
|------------|------|-------|-----------|
| AM3031     | 87,9 | 109,8 | 141,3     |

Optional: Feather key



AM3041C [14]

## Rozměry motoru a výstupního hřídele

**Wittenstein LP090/02-25**

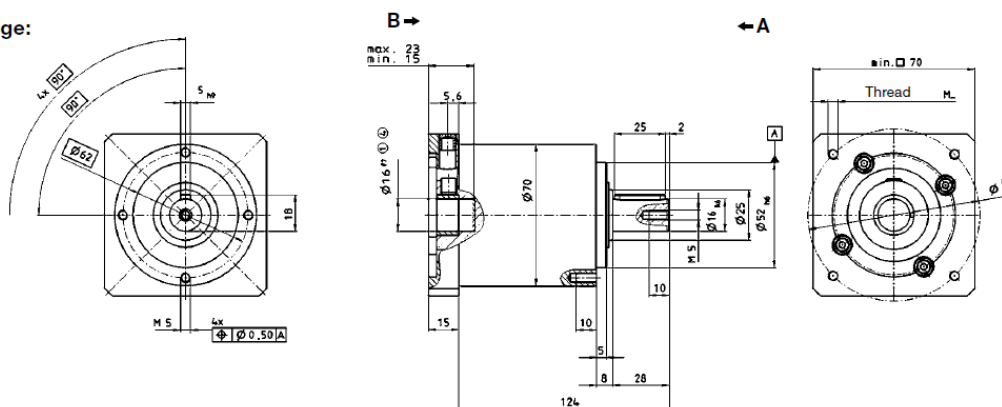
Jedná se o dvoustupňovou planetovou převodovku. Napojením na servomotor se získá optimální redukce parametrů. Nevýhodou této převodovky jsou možné vůle na výstupním hřídeli. Uvedené parametry plně vyhovují daným požadavkům. Převodovka je omezena vysokým množstvím cyklů (1000 cyklů/hodinu) a omezeným počtem použití nouzového brzděného režimu (1000x během servisní kontroly).

|                                                          |                      |
|----------------------------------------------------------|----------------------|
| Převod $i$                                               | 25                   |
| Max. moment zrychlení $T_{2B}$ [Nm]                      | 90                   |
| Nominální výstupní moment $T_{2N}$ [Nm]                  | 45                   |
| Nouzový brzděný moment $T_{2NOT}$ [Nm]                   | 190                  |
| Nominální vstupní rychlost $n_{1N}$ [min <sup>-1</sup> ] | 3400                 |
| Výstupní otáčky $n_{1MAX}$ [min <sup>-1</sup> ]          | 6000                 |
| Průměrné zatížení momentem $T_{012}$ [Nm]                | 0,3                  |
| Moment setrvačnosti $J$ [kgm <sup>2</sup> ]              | $1,41 \cdot 10^{-4}$ |
| Doba technické kontroly $L_h$ [h]                        | >20000               |

LP090/02-25 [15]

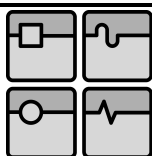
Technické parametry převodovky

LP- 2-stage:



LP090/02-25 [15]

Rozměry a parametry připojení převodovky

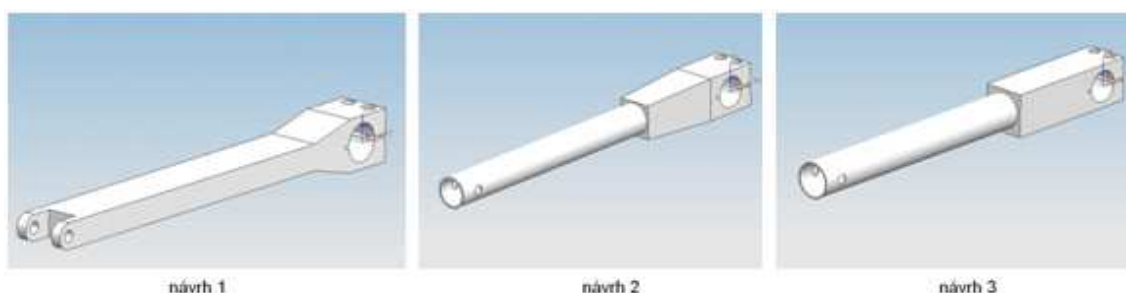


### 7.1.3. RAMENA

Výkres sestavy č. 3-01.2006

Požadavky kladené na konstrukci ramen jsou popsány v kap. 4.1.7. Hlavním úkolem při návrhu konstrukce byla vhodná volba materiálu s přihlédnutím na pořizovací cenu. Byl brán ohled zejména vlastnosti materiálu, a to především na vysoký modul pružnosti, nízkou hmotnost konstrukce a dostatečnou tuhost. Právě nízká hmotnost konstruovaného uzlu má za následek přímé ovlivnění momentů setrvačnosti.

Jako návrhy ramen byly vytvořeny ramena na obr. 7.1.3a.



Obr. 7.1.3a  
Návrhy ramen

Mechanické vlastnosti vypočtené z modelů návrhů:

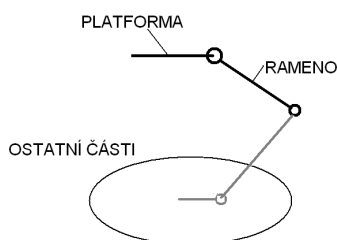
|         | Hmotnost [kg] | Moment setrvačnosti [kg.mm <sup>2</sup> ] |
|---------|---------------|-------------------------------------------|
| návrh 1 | 0,98          | 19352                                     |
| návrh 2 | 0,51          | 5122                                      |
| návrh 3 | 0,72          | 6039                                      |

Pro výsledky mechanických vlastností byl vybrán návrh č. 2. Pro tento návrh bude dále vytvořen dynamický výpočet namáhání ramene.

Zjednodušené odvození výpočtu dynamického zatížení ramene:

Podmínky - viz. obr. 7.1.3b:

- hmotnost ostatních stavebních prvků nacházejících se za poháněným ramenem nesmí překročit  $m_o = 3\text{kg}$ .
- požadovaná manipulační nosnost:  $m_m = 0,2\text{kg}$

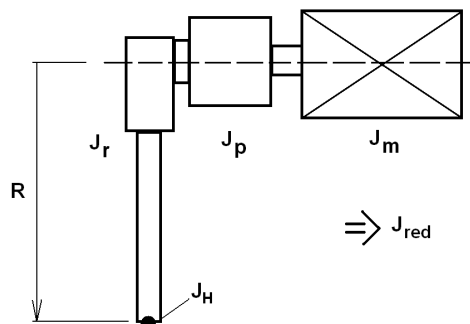


Obr. 7.1.3b  
Schéma pro výpočet statického zatížení

Dle obr. 7.1.3b vypočteme statické zatížení jednoho ramene hmotností  $m_H$ :

$$m_H = \frac{m_m + m_o}{3} = \frac{0,2 + 3}{3} = 1,7 \text{ kg}$$

Schéma pro výpočet redukovaného momentu setrvačnosti na hřídel motoru – viz, obr. 7.1.3c:



Obr. 7.1.3c

Schéma pro výpočet redukovaného momentu setrvačnosti

Momenty setrvačnosti:

$J_m = 0,81 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$  - moment setrvačnosti motoru (z katalogového listu)  
 $J_p = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$  - moment setrvačnosti převodovky (z katalogového listu)  
 $J_r = 51,21 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$  - moment setrvačnosti ramene (odměřen z modelu)  
 $J_h = m \cdot R^2 = 1,7 \cdot 0,252 = 0,106 \text{ kg.m}^2$  - moment setrvačnosti ostatních částí  
 $i = 25$  - převodový poměr

Redukovaný moment setrvačnosti na hřídel motoru:

$$J_{red} = J_m + J_p + \frac{J_r + J_h}{i^2} = 0,81 \cdot 10^{-4} + 1,42 \cdot 10^{-4} + \frac{51,21 \cdot 10^{-4} + 0,106}{25^2} = 4 \text{ kg.m}^2$$

Přepočet otáček na výstupní hřídel převodovky  $n_{jimp}$ :

$n_{jm} = 50 \text{ s}^{-1}$  (z katalogového listu)

$\eta_c = 0,95$  (voleno)

$$n_{jimp} = \frac{n_{jm}}{i} = \frac{50}{25} = 2 \text{ s}^{-1}$$

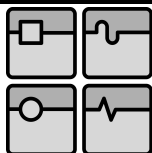
Doba rozběhu  $t$  na jmenovité otáčky motoru:

$$t = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{J_{red}}{n_{jimp} \cdot \eta_c} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{4}{2 \cdot 0,95} = 0,44 \text{ s}$$

Úvaha:

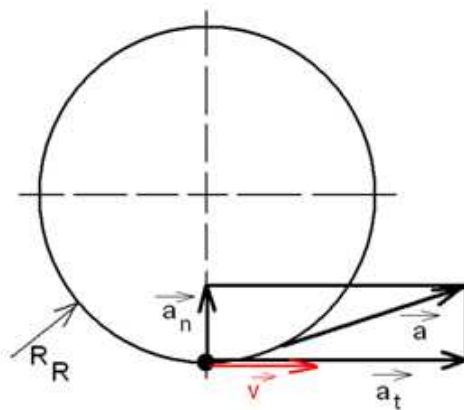
$10t = 2\pi \text{ rad} = 360^\circ$

rozběh na  $n_{jimp}$  ( $20t/\text{s}$ ) = 0,43s



Úhlové zrychlení:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{2.2\pi}{0.44} = 29.3 \text{ rad.s}^{-2} \approx 5274^\circ.\text{s}^{-2}$$



Obr. 7.1.3d

Znázornění působení zrychlení na poháněném rameni

Obvod kružnice obíhající ramenem:

$R_R = 0.25\text{m}$  (poloměr ramene)

$$o = 2 \cdot \pi \cdot R_R = 2 \cdot \pi \cdot 0.25 = 1.57\text{m}$$

Úvaha:

$$1ot [s^{-1}] = 360^\circ = o (1.57\text{m}) \quad = 1.57 \text{ m.s}^{-1}$$

$$2ot [s^{-1}] = 720^\circ = 2 \cdot o (3.14\text{m}) \rightarrow v = 3.14 \text{ m.s}^{-1}$$

Výpočet tečného zrychlení  $a_t$ :

$$a_t = \frac{\alpha}{o} = \frac{5274}{1.57} = 14.65 \text{ m.s}^{-2}$$

Výpočet normálového zrychlení  $a_n$ :

$$a_n = \frac{v^2}{R_R} = \frac{3.14^2}{0.25} = 39.5 \text{ m.s}^{-2}$$

Výpočet celkového zrychlení:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{14.65^2 + 39.5^2} = 42.12 \text{ m.s}^{-2}$$

Výpočet síly působící na rameno od zrychlení:

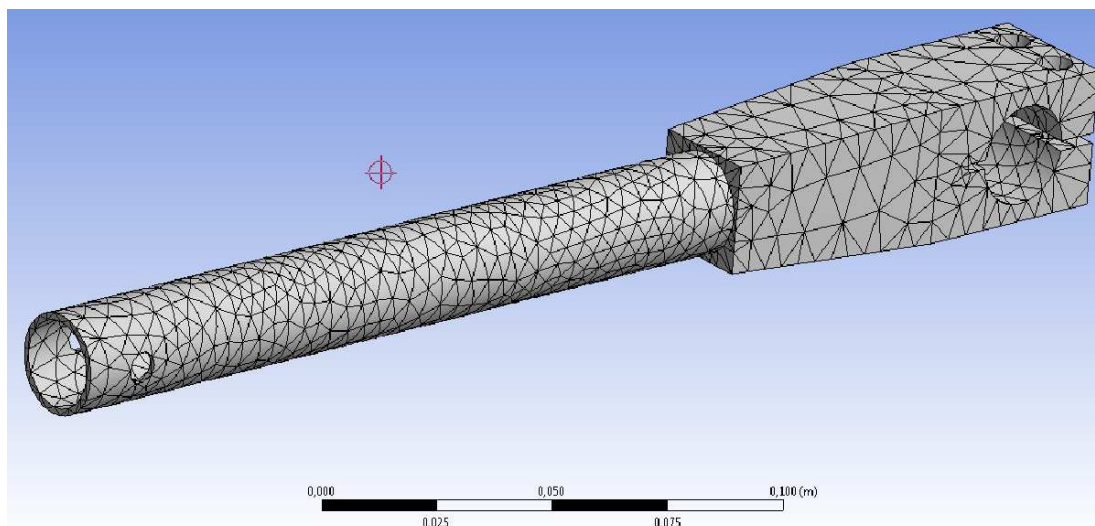
$$F_S = m \cdot a = 1.7 \cdot 42.12 = 71.6 \text{ N}$$

Jako materiál pro hlavní část ramen byla zvolena slitina hliníku EN AW-6060 (AlMgSi0,5) s následujícími mechanickými vlastnostmi:

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| Minimální pevnost v tahu $R_m$ | 170 až 195 MPa |
| Minimální mez kluzu $R_{p02}$  | 140 až 150 MPa |
| Obrobitelnost                  | velmi dobrá    |

Pro simulaci zatížení ramene byla provedena napěťová a deformační analýza ve výukové verzi výpočtového programu ANSYS. Výsledky analýzy jsou uvažovány pro materiál ramene EN AW 6060, vypočtenou statickou zatěžující sílu  $F = 71,6N$  a statické zatížení. Simulace napětí a deformace byla provedena dle standardního postupu:

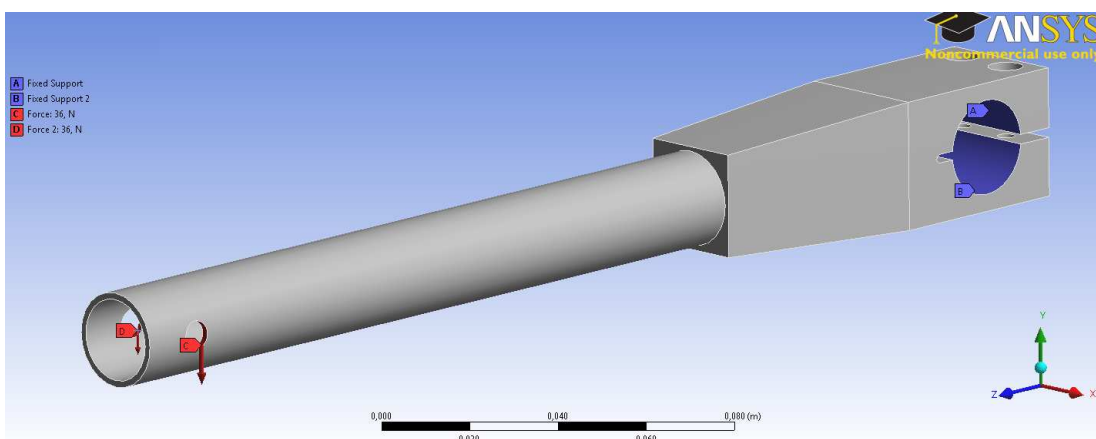
- načtení modelu
- volba materiálu modelu
- provedení síťování modelu -viz. obr. 7.1.3e



Obr. 7.1.3e

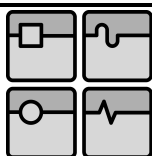
Model ramene se síťovými prvky

- definování pevných vazeb a zatížení - viz. obr. 7.1.3f

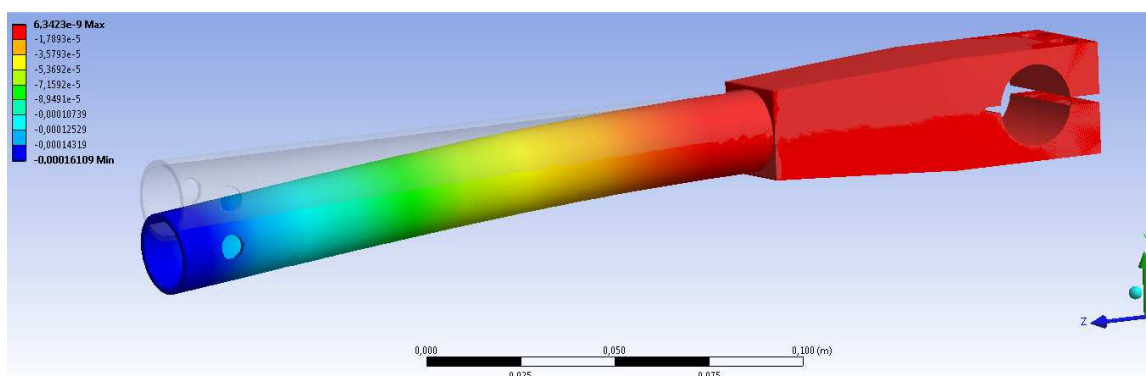


Obr. 7.1.3f

Zatížení modelu ramene



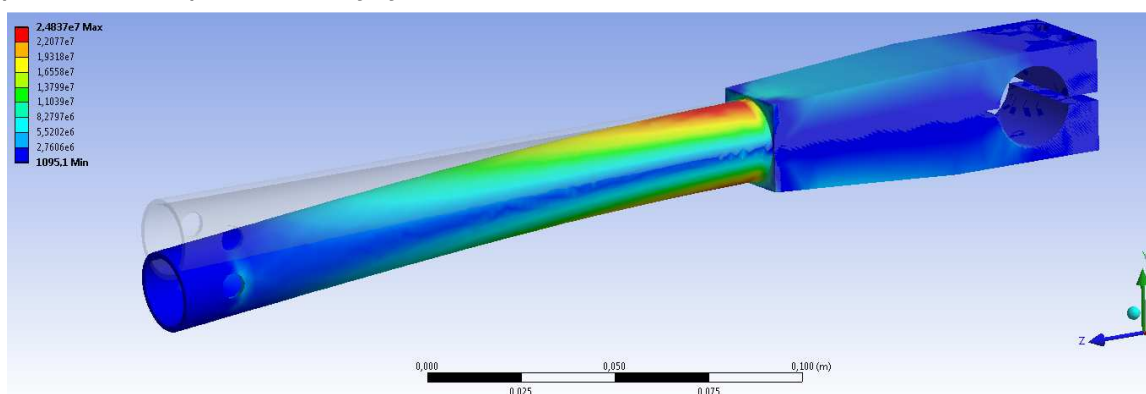
- provedení deformační analýzy - viz. obr. 7.1.3g



Obr. 7.1.3g

Deformace ramene od zatěžující síly ve směru osy y

- provedení napěťové analýzy - viz. obr. 7.1.3h

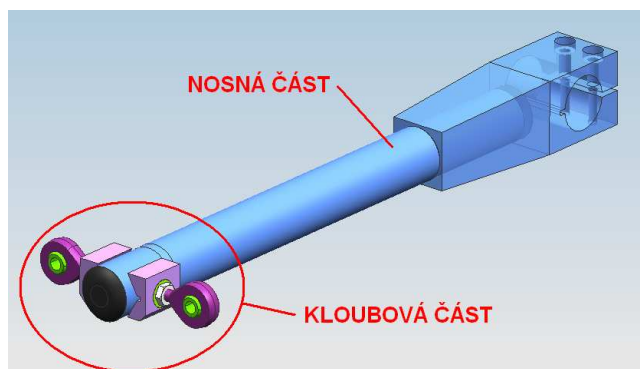


Obr. 7.1.3h

Zobrazení ohybového statického napětí vyvolaného zatěžující silou

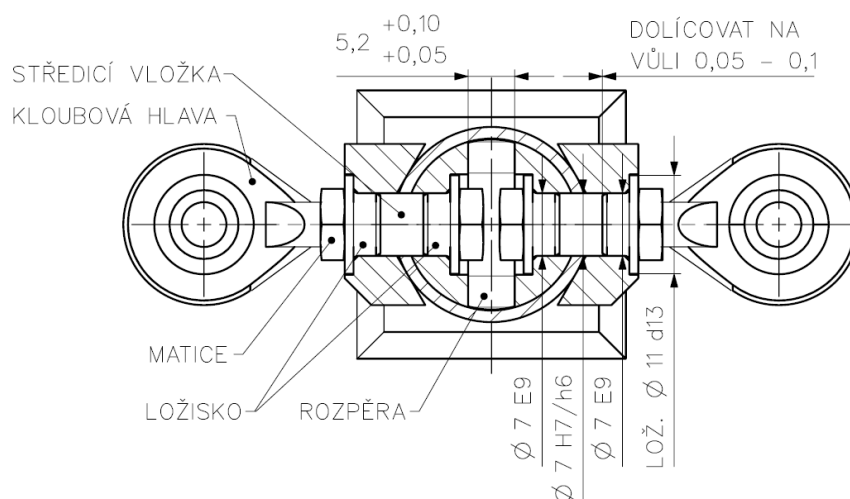
Uvažována pevnost v tahu  $R_m = 170$  až  $190$  MPa. Z napěťové analýzy – viz. obr. 7.1.3h je výsledek ohybového napětí  $\sigma_o = 24,837$  MPa. Rameno je při plnění své funkce zatěžováno střídavým ohybovým napětím. Maximální dovolené napětí při střídavém zatížení je  $\sigma_{o\max M} = 1/5 \cdot R_m$ , tj.  $\sigma_{o\max M} = 34$  až  $39$  MPa. Protože  $\sigma_o \ll \sigma_{o\max M}$ , rameno vyhovuje danému zatížení a napětí nepřesahuje ohybovou mez napětí.

Celé rameno je tvořeno sestavou kloubové a nosné části. Díly nosné části ramene – viz obr. 7.1.3a, jsou spojeny přechodným uložením H6/k6 (lze pojistit dvousložkovým lepidlem). Takto je vytvořena hlavní nosná část. Pro spojení ramene s výstupní hřídelí převodovky je použito svěrného spoje. Svěrná síla je vyvozena stažením koncové části dvojicí šroubů M4.



Obr. 7.1.3a  
Rameno

V důsledku použití univerzálních kloubů – viz kap.7.1.5 jsou konce ramen přímo uzpůsobeny pro uchycení otočné části kloubu. Toto složení konstrukce je velmi náročné a složité na výrobu. Musí splňovat základní požadavky vycházející z funkce univerzálního kloubu – více kap. 7.1.5. Snaha integrace kloubu do nosné části ramene vychází z redukce rozměrů, momentů setrvačnosti a snahy využít vnitřní prostor nosné části. Pro správnou funkci je nutné dodržet požadované geometrické přesnosti uvedené na výkresech, ale také tolerance přesnosti uložení dílů sestavy – viz. obr. 7.1.3b.



Obr. 7.1.3b  
Uložení dílů kloubové části ramene

Uložení středící vložky na  $\phi 7H7/h6$  je točné uložení s velmi malou vůlí pro přesné vedení. Umožňuje tak dostatečně přesné vedení středící vložky za plnění funkce otáčení v sevření ložisky.

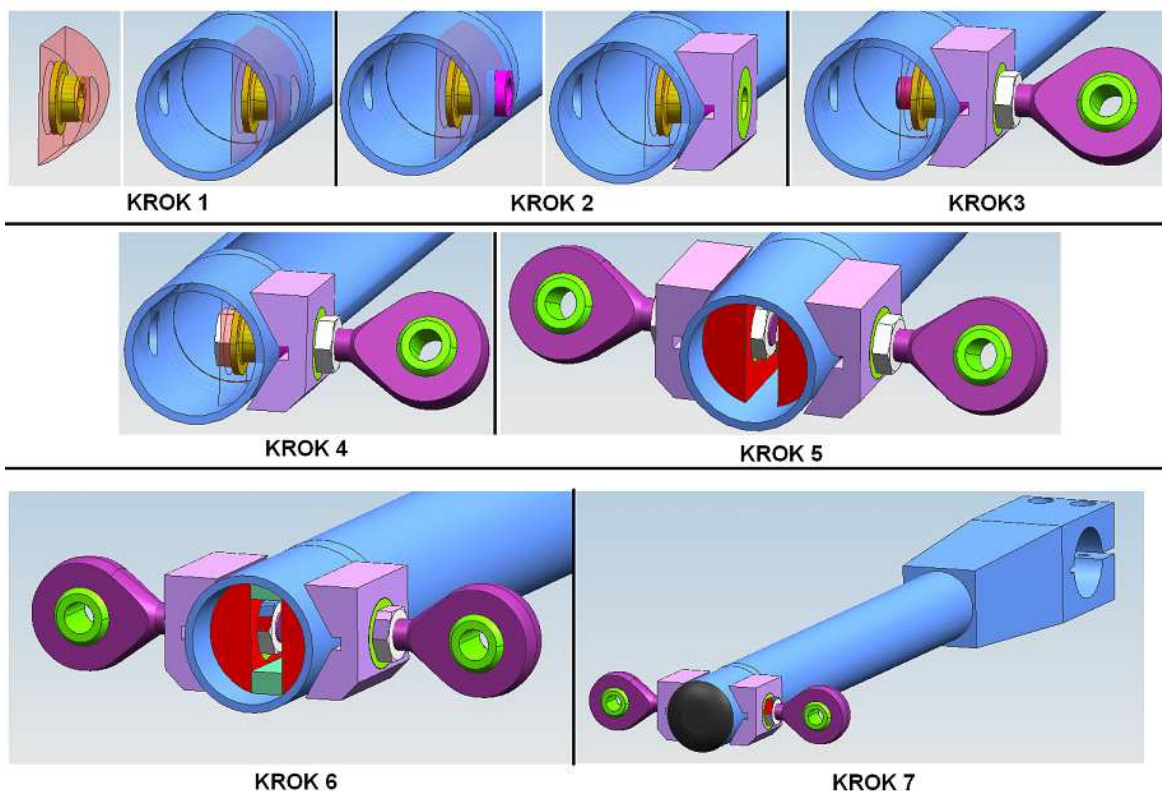
Uložení kluzných ložisek je provedeno na vnějším průměru ložiska, s tolerancí pro nutný vznik minimální vůle  $\phi 7E9$ . Tato tolerance je zvolena s ohledem na přesah vnější části ložiska o rozměru  $\phi 7,2\text{mm}$



Správná funkce kluzného vedení je zajištěna dolícováním čela ložiska na požadovanou vůli o velikosti 0,05 až 0,1mm.

Po sestavení polovin otočného kloubu je nutné vložit rozpěry s daným přesahem. Tyto rozpěry zajistí vzájemnou rovnoběžnost vnitřní části vedení ložiska a dosáhne se tím rovnoběžnosti os otáčení kloubových hlav..

Pro správné sestavení kloubové části ramene je nutné dodržet postup sestavení – viz. obr. 7.1.3c



Obr. 7.1.3c  
Postup montáže kloubové části ramene

- Krok 1 – ustavit ložisko do vnitřní kloubové části a vložit do nosné části ramene
- Krok 2 – vložit středící vložku a ustavit vnější kloubovou část s ložiskem
- Krok 3 – vsunout kloubovou hlavici s maticí
- Krok 4 – vložit matici a pohybem kloubové části sešroubovat
- Krok 5 – totožným způsobem sestavit protější kloubovou část ramene
- Krok 6 – vložit rozpěry, seřídít rozteč ok kloubové hlavy a utáhnout matice
- Krok 7 – zajistit sestavenou kloubovou část proti vnikání nečistot vnitřní záslepkou

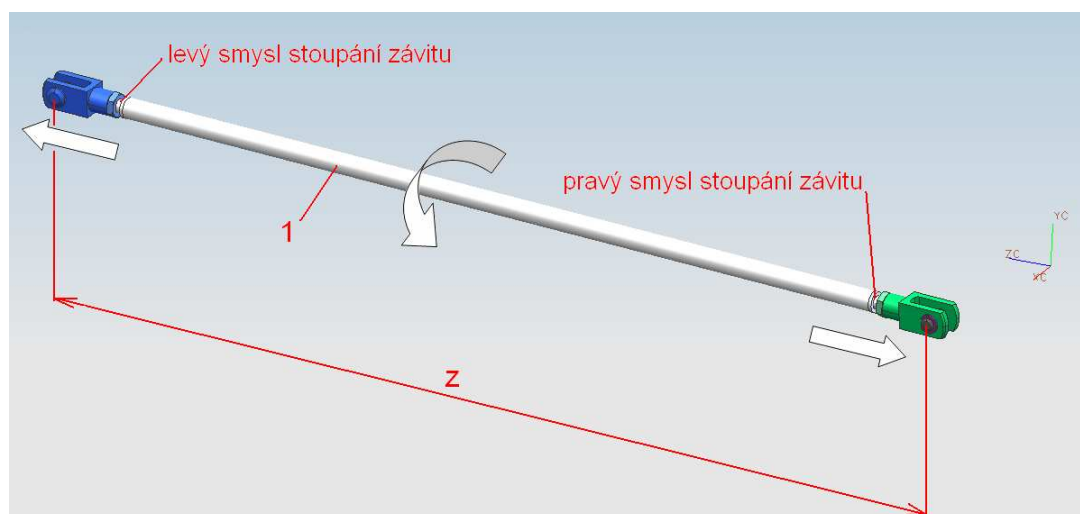
(Po ustavení vnější kloubové části se provede jemný bodový svar pro zpevnění vnější kloubové části a ramene.)

#### 7.1.4. TÁHLA (VZPĚRY)

Výkres sestavy č. 4-02.2104

Splnění základních požadavků pro vhodnou volbu vzpěr z kap.4.1.7 je nutné řešit vhodným a efektivním návrhem. Důležitým požadavkem je odolnost proti ohybovému namáhání. Z tohoto důvodu byl zvolen materiál AW6005 (AlSiMg0,7) - T6. Jde o vytvrzenou slitinu hliníku o rozměrech průřezu  $\varnothing 12 \times 1$ . Tato slitina je běžně k dostání na trhu. K volbě materiálu ze slitiny hliníku bylo přihlédnuto zejména k výrazně lepšímu splnění redukce hmotnosti. Právě tento požadavek byl splněn lépe, oproti možnosti použití ostatních materiálů. Dostatečnou tuhost zaručuje poměrně velký průměr průřezu součástí.

Dalším důležitým požadavkem je zajištění možnosti délkové kompenzace odchylek délkových rozměrů vzpěr. Pro tento případ byly použity koncové přípoje se závitem M8 pro připevnění kloubové vidlice s pravým a levým smyslem stoupání závitu. Koncové přípoje jsou přes osazení vlepeny do střední části táhla. Připojovací část vzpěry tvoří kloubová vidlice – viz. kap. 7.1.5. Po zajištění přesného délkového rozměru jsou vidlice zajištěny kontramaticí, proti následnému pootočení – viz. obr. 7.1.4a. Povolením kontramatic a následným pootočením střední části ramene – viz. obr. 7.1.4, poz. 1 ve směru osy z dojde k požadované změně délky rozteče kluzných vidlic z- viz. obr. 7.1.4. Tím je zajištěn problém vyrovnání délky vzpěry a možnost následného seřízení v provozu.

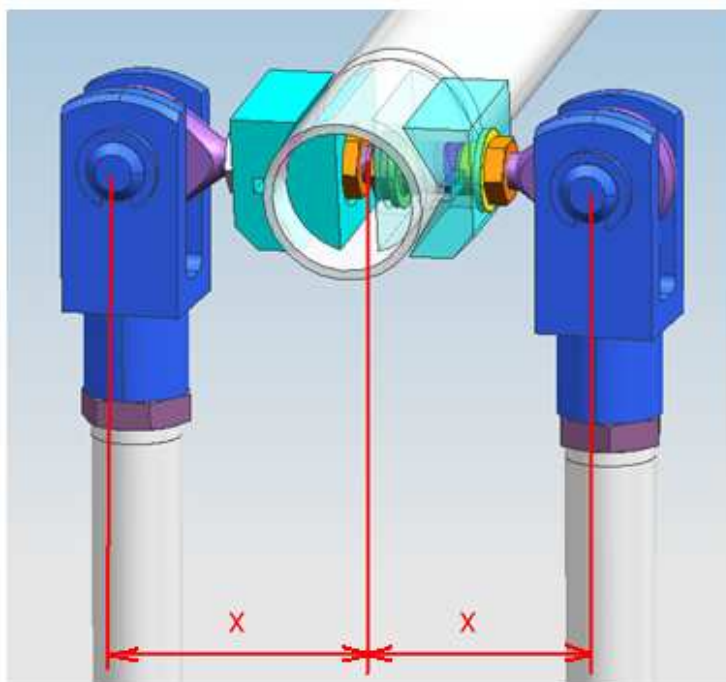


Obr. 7.1.4  
Vzpěra

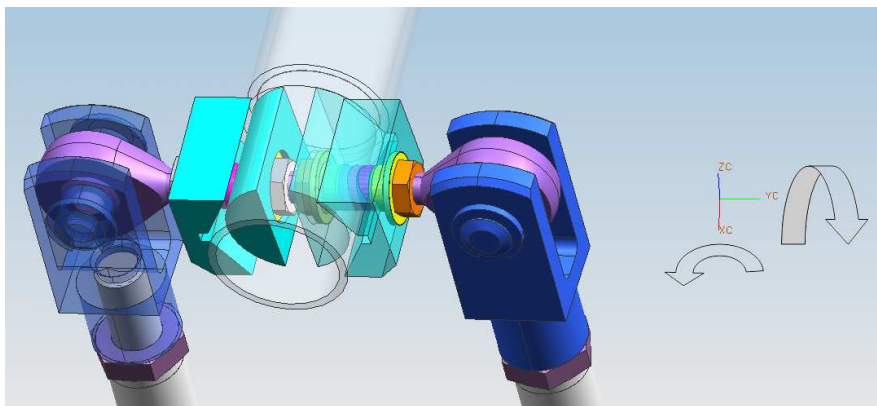
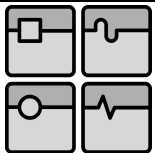
### 7.1.5. KLOUBY

Použití univerzálních kloubů se vyznačuje nutnými opatřeními a bývá často spojeno s konstrukčními problémy (např. vymezení vůle). Užití tohoto typu kloubu vyžaduje přímou integraci částí nejen od vzájemně spojovaných ramen, ale především zabudování otočné části kloubu do ramen a platformy. Proto se část kloubu tvořená uložením kloubové hlavy vztahuje ke konstrukci ramene a konstrukci platformy. Část kluzné vidlice je pak vztažena k části táhla. Problematika a popis univerzálního kloubu je uveden v kap. 4.2.3 – viz. obr. 4.2.3d. Hlavní výhodou celé konstrukce s univerzálními klouby je, že kloub je pevně spojen ve všech svých polohách. Odpadá tak možnost vyskočení kloubu z kloubové jamky a jištění vzájemné polohy, jako je tomu u kloubu kulového. Tento problém nastával hlavně při vyšších dynamických rázech vyvolaných změnou směru pohybu platformy.

Konstrukce uložení univerzálních kloubů je založena na stejném principu jak v uložení v rameni – viz. obr. 7.1.3b, tak v uložení v platformě – viz. obr. 7.1.6a. Univerzální kloub se skládá z kloubové hlavy uložené v kluzném pouzdru a kloubové vidlice připojené ke vzpěře. Kluzná hlava je uložena v kloubové části ramene a kloubové části platformy ve dvojici protilehlých, sevřených kluzných ložisek. Toto uložení umožňuje kloubům vykonávat požadované stupně volnosti, tj. rotace v ose  $x$ . Samotné spojení kloubové hlavy a kloubové vidlice zaručí otáčení kolem osy  $y$  – viz. obr. 7.1.5b. Použité matice slouží k sevření a vhodné regulaci polohy rozteče ok kluzné hlavy – viz. obr. 7.1.5a. Tato rozteč ( $x$ ) musí být u všech kloubových dvojic stejná. Vytváří základní stěnu paralelogramu, který je tvořen táhly a je typický pro tuto konstrukci. Nedodržením přesnosti paralelogramu by vedlo k závažným chybám vzhledem k polohování a výsledné geometrické přesnosti polohy platformy. Konstrukce je navržena tak, aby se dala rozteč kteréhokoli kloubu při seřizování změnit a bylo tak umožněno trvalé seřízení přesnosti.

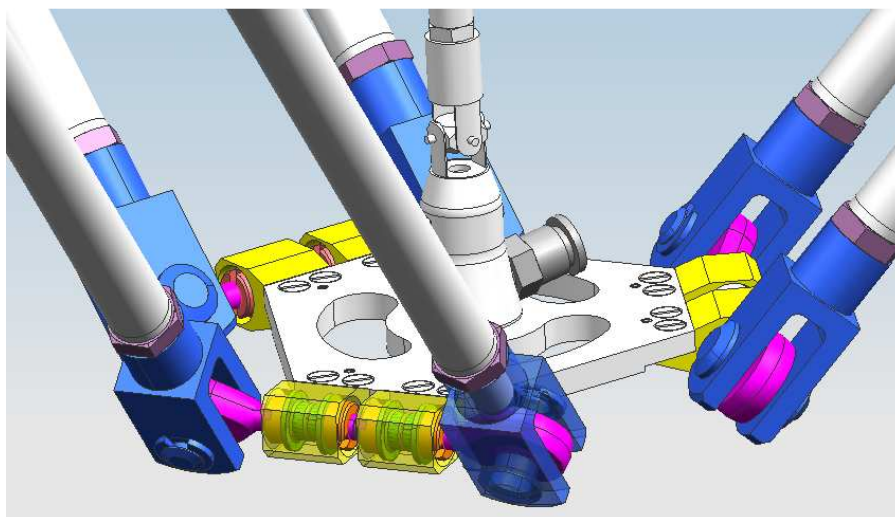


Obr. 7.1.5a  
Seřiditelná rozteč polohy ok kluzné hlavy



Obr7.1.5b

Znázornění vytvořených stupňů volnosti kloubového uspořádání



Obr7.1.5c

Uložení obecného kloubu v platformě

K vytvoření kloubu byly použity pro své vlastnosti kluzné vidlice a kluzné hlavy Igus - Igubal. Nevýhodou těchto prvků dodávaných výrobcem je jejich plastová konstrukce a vnitřní část oka kloubové hlavy. Plast zajišťuje dle popisu výrobce některé výhody. Nutno ale upozornit, že tento materiál pro konstrukci nosných částí vidlice a hlavy může podléhat zvýšené pružné deformaci, která může ve výsledku ovlivnit tuhost celé konstrukce.

Vlastnosti kloubové hlavy a kloubové vidlice:

- bezúdržbový provoz
- vysoká pevnost při rázovém zatížení
- velmi vysoká pevnost v tahu při míjivém zatížení
- vyrovnaní hranového zatížení
- vysoká schopnost tlumení vibrací
- nízká hmotnost
- k dispozici s vnitřním i vnějším závitem
- k dispozici s levým i pravým závitem

Zatěžovací hodnoty uvedené v katalogu pro kloubovou hlavu použitého rozměru – viz. tab. 7.1.5d.

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Max. statická pevnost v tahu | 800N   |
| Max. radiální zatížení       | 400N   |
| Max. utahovací moment        | 0,4N.m |
| Min. hloubka závitu          | 13mm   |

Tab.7.1.5d  
Přípustné zatěžovací hodnoty kloubové hlavy

Při výpočtu síly namáhajícího konec ramene se dá předpokládat stejná síla zatěžující dvojici uložených kloubových hlav. Síla působící na jednu kloubovou hlavu je  $F_S/2 = 35,8N$ . Z tohoto hlediska vyplývá, že pevnost kloubových hlav je dostačující.

### 7.1.6. PLATFORMA

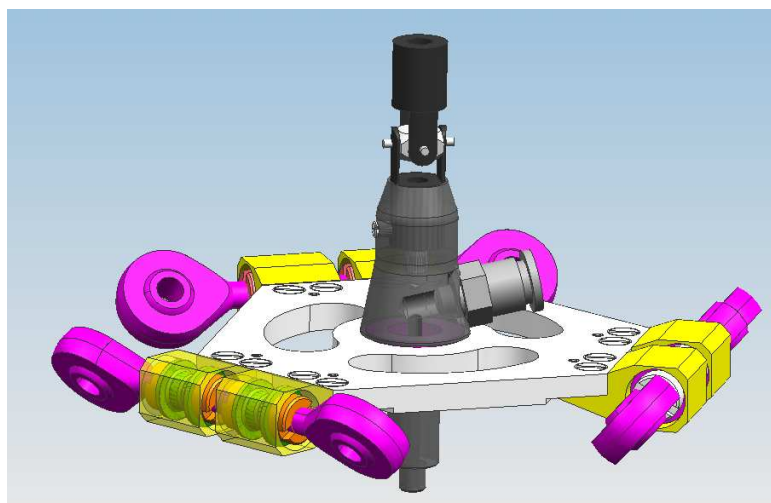
Výkres sestavy č. 3-01.2204

Pro co nejlepší plnění úkolů platformy je nutná její geometrická přesnost připojovacích rozměrů, tuhost atd. Jako materiál samotné platformy byla zvolena slitina hliníku EN AW-6060. Materiálové vlastnosti této slitiny se jeví jako dostačující a plně splňují požadavky. Hmotnost platformy je redukována třemi frézovanými otvory. Spojení s pouzdry, ve kterých je uložena kulová hlava univerzálního kloubu, je řešeno dvojicí zápusťných šroubů M3 s kuželovou hlavou a pružného kolíku.

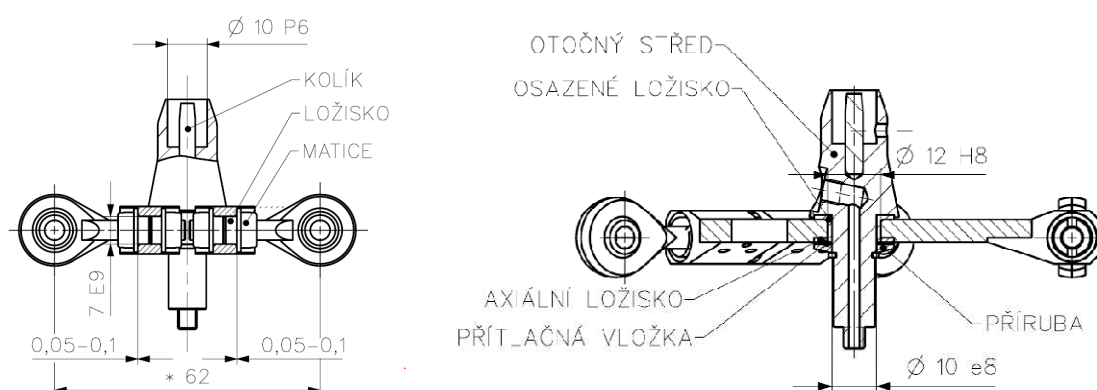
Součástí platformy je také integrovaný otočný střed. Úlohou této součásti je připojení Kardanova kloubu, který je ovládám 4. Osou, a připojení koncového efektoru (přísavky). Přes tento otočný střed je veden tlakový (vakuový) vzduch pro ovládání přísavky. Připojení pneumatické je řešeno nástrčnou přípojkou  $\varnothing 6mm$ . Uložení otočného středu je řešeno pomocí bezúdržbových kluzných ložisek. Kardanův kloub je uložen v otočném středu v přechodném uložení, zajištěn bočním šroubem a centrován na středový kolík. Tento kolík má významnou funkci především ve snížení tlaku na obvodovou připojovací část Kardanového kloubu – viz. obr. 7.1.6b.

Uchycení univerzálních kloubů, které jsou v konstrukci použity, je řešeno pomocí samostatných kloubových pouzder – viz. obr. 7.1.6a. Princip uložení a popis funkce je popsán v kap. 7.1.5. V těchto jednotkách se celý kloub nejdříve složí, pojistí maticemi a poté se celá jednotka ustaví na platformu. Pro správnou a požadovanou funkci uložení v kloubových jednotkách je nutné dodržet výrobní tolerance – viz. obr. 7.1.6b





Obr.7.1.6a  
Sestava platformy s připojením pro čtvrtou osu



Obr.7.1.6b  
Uložení dílů platformy

Uložení kluzných ložisek je provedeno na vnějším průměru ložiska s tolerancí pro nutný vznik minimální vůle  $\varnothing 7E9$ . Tato tolerance je zvolena s ohledem na přesah vnějšího průměru ložiska o rozměru  $\varnothing 7,2\text{mm}$ .

Po uložení ložisek do kloubových pouzder se musí dosedající čela ložisek dolícovat tak, aby vznikla mezi osazením a pouzdem nutná vůle o rozměru 0,05 až 0,1mm.

Rozměr  $\varnothing 10P6$  slouží pro vytvoření přechodného uložení mezi Kardanovým kloubem a točnou platformou. Přechodné uložení je voleno z důvodu zajištění vymezení případných vůlí. Jelikož je plášť Kardanova kloubu z plastu, je pro snížení nepříznivých momentů vlepen do otočného středu středový kolík na který se Kardanův kloub nasune. Tím dojde ke zvýšení rozložení namáhání a přenosových sil, a zabrání se tak postupnému otlacení vnější plastové části Kardanova kloubu.

Otvor  $\varnothing 12H8$  slouží k nalisování osazeného ložiska (změřen  $\varnothing 12,2$ ).

Část otočného středu, která je v kontaktu s ložisky je vyrobena na  $\varnothing 10e8$  z důvodu minimální vůle a snadného otáčení.

Čelo osazeného ložiska musí být po montáži zarovnáno tak, aby nepřechýlovalo přes axiální ložisko.

Vůle vzniklá v uložení mezi přírubou a axiálním ložiskem může být dle potřeby vymezena pružnou přitlačnou vložkou.

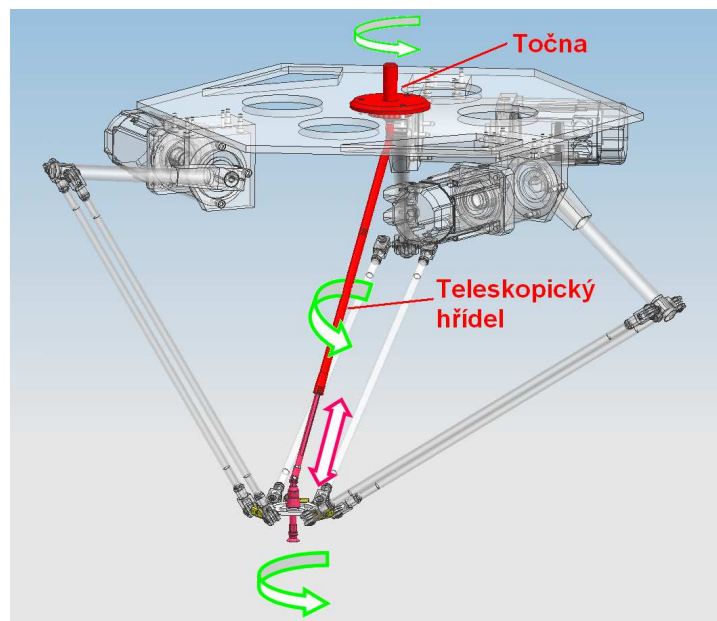
Příruba je upevněna pojistným kroužkem.

Pro připojení koncových efektorů slouží na koncovém středu vnější část s připojovacím závitem M5-6g. Středem této části je vedeno vakuové médium. Pro standardní manipulační činnost se doporučuje použití vakuových přísavek s připojením přes vnitřní závit M5.

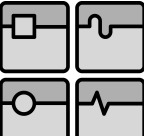
### 7.1.7. TELESKOPICKÝ HŘÍDEL A ČTVRTÁ OSA

Výkres sestavy č. 3-02.0008

Složení čtvrté osy je vytvořeno z několika částí, které dohromady tvoří poměrně složitý konstrukční uzel – viz. obr. 7.1.7a. Úlohou čtvrté osy je změna orientace natočení obrobku. Teleskopický hřídel je připevněn přes Kardanovy klouby k točně umístěné na bázi a k otočnému středu platformy. Uložení a připojení přes Kardanovy klouby umožní převedení krouticího momentu od pohonu ke koncovému efektoru, a to i v případě vyosení středu platformy od středu báze.

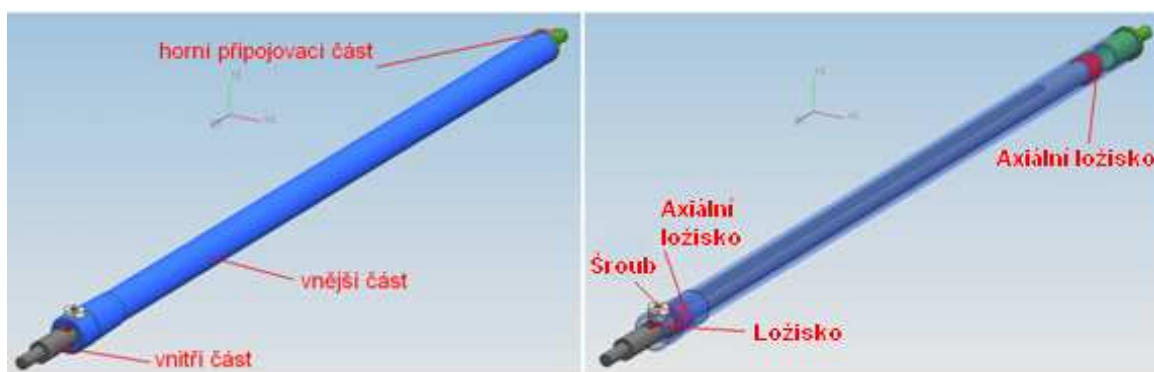


Obr. 7.1.7a  
Uložení čtvrté osy

|                                                                                   |                                            |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 86 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |         |

Čtvrtá osa výrazně omezí rozsah pracovního prostoru. Kardanův kloub plní svoji funkci pouze v úhlu vychýlení středových os o  $\pm 30^\circ$ . To je důvod rozměrových parametrů ostatních částí mechanismu. Ty jsou navrženy tak, aby byl zachován požadovaný pracovní rozsah.

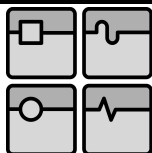
Detailní konstrukce teleskopického hřídele - viz. obr. 7.1.7b. Materiálové složení částí hřídele vychází převážně z použití slitin hliníku, přesněji mat. EN AW-6060. Při návrhu bylo nutné splnit základní požadavky pro plnění funkce čtvrté osy. Požadavky týkající se teleskopického hřídele jsou zejména přenos momentu rotace kolem středové osy a zároveň možnost měnit svoji délku. Teleskopický hřídel je uchycen na koncích přes připojovací závit M5-6g. Na konci závitu je přišroubovaná připojovací část Kardanova kloubu s vestavěným závitem. Pojištění proti pootočení a zajištění polohy je provedeno pomocí matice.



Obr. 7.1.7b  
Teleskopický hřídel

Kluznou část tvoří uložení v axiálních kluzných ložiscích – viz. obr. 7.1.7. Použití axiálních kluzných ložisek výrazně snižuje tření v kontaktních součástech a zvyšuje životnost konstruovaného uzlu. Vnější kluzná část je tvořena koncovým zakončením pro uložení axiálního ložiska a zajištění šroubu. Axiální ložisko je nalisováno ve vnější kluzné části. Na vnitřní pohyblivé části teleskopického hřídele je axiální ložisko nalepeno. Ložisko ustavené na šroubu zajišťuje zamezení přímého kontaktu mezi šroubem a vodící drážkou. Poloha šroubu je dána zašroubováním ve vnější kluzné části a šroub zajištěn kontramaticí. Montáž musí být prováděna vložením vnitřní části s nalepeným axiálním ložiskem přes horní připojovací část. Následně se vnitřní část ustaví šroubem s vloženým ložiskem a zajistí maticí. Nakonec se vlepe do vnější části horní připojovací část. Pro lepení je nutné použít výhradně dvousložkové lepidlo.



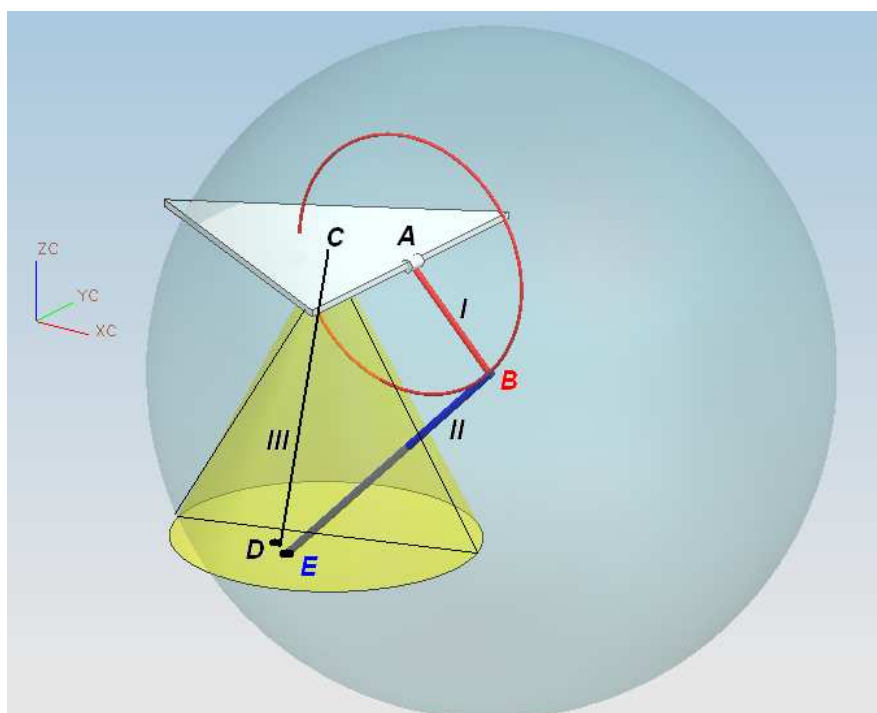


### 7.1.8. ZNÁZORNĚNÍ PRACOVNÍHO PROSTORU

Pro znázornění a vytvoření pracovního prostoru použijme je použit vlastní odvozený postup s danými výsledky. Dle obr. 7.1.8a [2] a z konstrukce Delta robotu vyplývají následující podmínky určující možnost pohybu jednotlivých částí robotu. Pro větší přehlednost je princip teoretického odvození pracovního dosahu ramen popsán na zástupci trojice kloubových ramen a středovém teleskopickém rameni.

Pro názornost bude pro popis odvození teoretického pracovního prostoru použito následující značení:

- Kloub A – otočný kloub - rotační vazba (1DOF)
- Kloub B – obecný kloub – rotační vazba x rotační vazba (2DOF)
- Kloub C – Kardanův kloub – rotační vazba x rotační vazba x rotační vazba (3DOF)
- Rameno I – rameno o konstantní délce
- Rameno II – rameno o konstantní délce
- Rameno III – teleskopické rameno (1DOF)



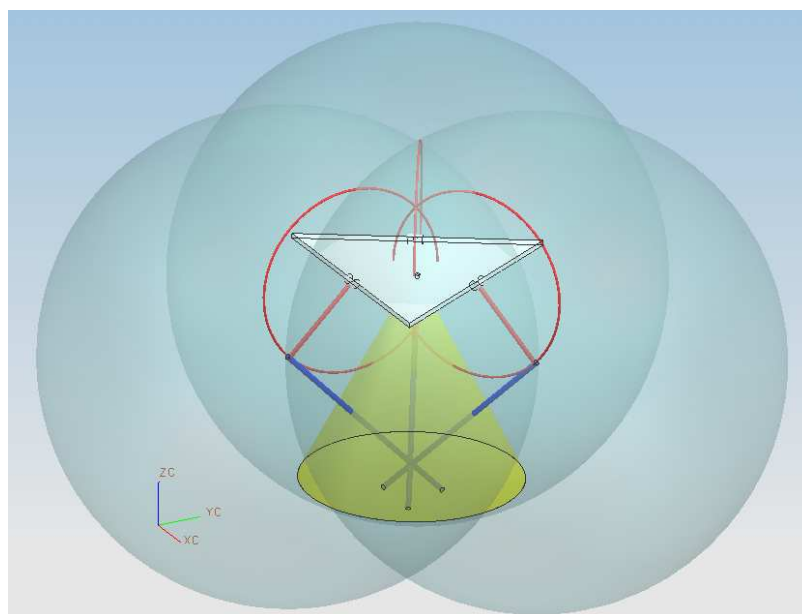
Obr.7.1.8a

Znázornění pracovního rozsahu  
kloubového a teleskopického ramene

Rotací bodu B okolo bodu A získáme kruhovou trajektorii v rovině XZ, s poloměrem ramena I. Bod B je zároveň středem otáčení vzpěry II. Užití obecného kloubu (nebo také kulového kloubu) v bodě B vede k možnosti rotace ramene II okolo os x, y, z. Tím vznikne kulová plocha o poloměru ramene II se středem v bodě B. Konečný bod E ramene II, je bod určující konečnou polohu kloubu uchycení platformy. Konečný bod E se proto nachází na kulové ploše se středem v bodě B, který se nachází na kruhové trajektorii.

Rameno III se nepodílí na poloze platformy, ale svými vlastnostmi přímo ovlivňuje pracovní rozsah mechanismu. Pracovní rozsah ramene III je ovlivněn Kardanovým kloubem C a nutnou teleskopickou schopností ramene III. Kardanův kloub plní funkci v rozsahu úhlu natočení  $\pm 30^\circ$  ramene III od směru svislé osy z. Rozsah úhlu natočení ramene je měřen v některé z rovin XZ nebo YZ. Rotací mezních úhlů rozsahu ramene III kolem osy otáčení z kloubu C, vznikne komolý kužel. Tento komolý kužel charakterizuje pracovní rozsah středového teleskopického ramene C.

Teoretický pracovní prostor mechanismu bude tedy určen společným průnikem takto vzniklých prostorů. Jedná se přesněji o tři kulové prostory umístěné na kruhové trajektorii ramene, vzájemně pootočené o  $120^\circ$  a omezením prostoru pracovního ramene III – viz. obr. 7.1.8.b.



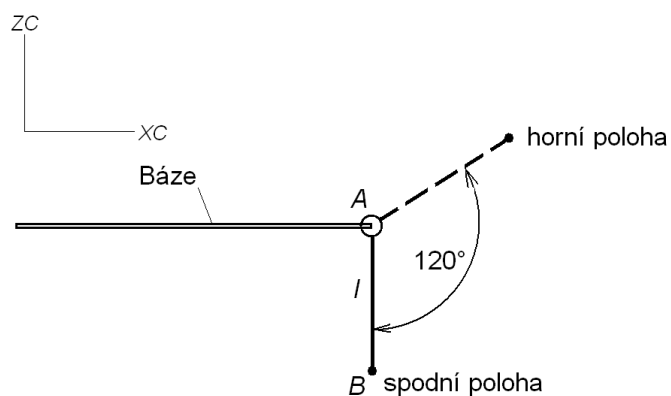
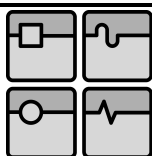
Obr.7.1.8b

Teoretický pracovní prostor tvořený průnikem pracovních rozsahů jednotlivých ramen mechanismu

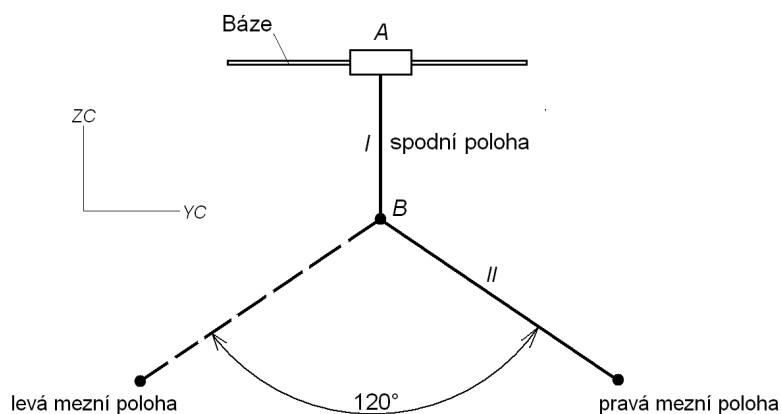
Pro odvození a znázornění pracovního prostoru návrhu mechanismu s obecným kloubem budou trajektorie omezeny danými podmínkami. Podmínky jsou důležité z hlediska omezení tzv. nereálných poloh ramen. Tyto polohy vyplývají z viditelného dosahu ramen. Jedná se o polohy, kde je předem patrna nemožnost dosahu všech tří ramen, např. část kruhové trajektorie nacházející se nad bází apod. Dané polohy jsou často označovány jako chybné výsledky v úloze řešení inverzní kinematiky.

Daná omezení pro vytvoření pracovního prostoru:

- úhel natočení poháněného ramene – viz. obr. 7.1.8c
- úhel natočení vzpěry – viz. obr. 7.1.8d

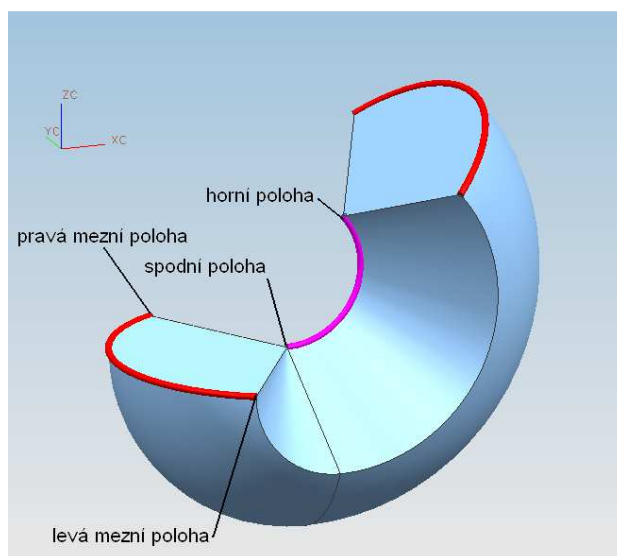


Obr. 7.1.8c  
Omezení natočení poháněného ramene



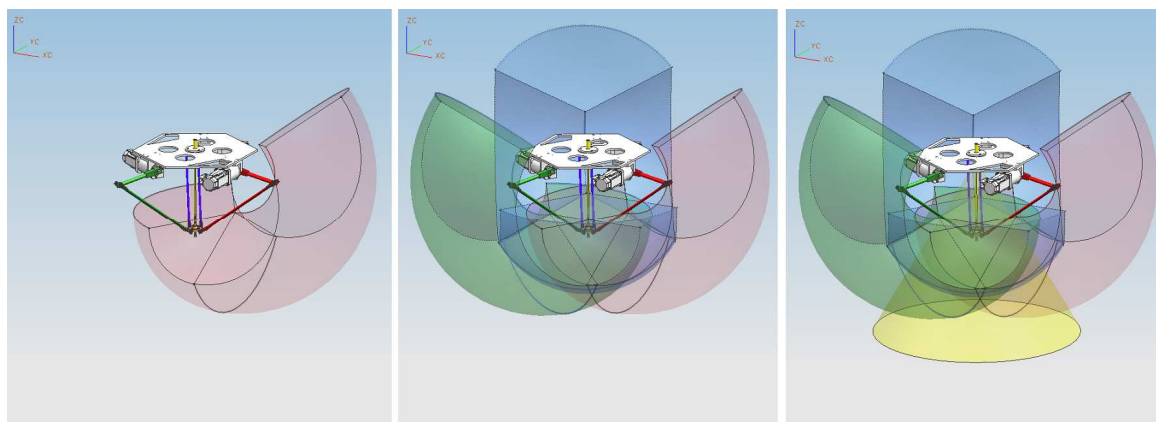
Obr. 7.1.8d  
Omezení natočení vzpěry

Vzniklý pracovní prostor ramene – viz. obr. 7.1.8e

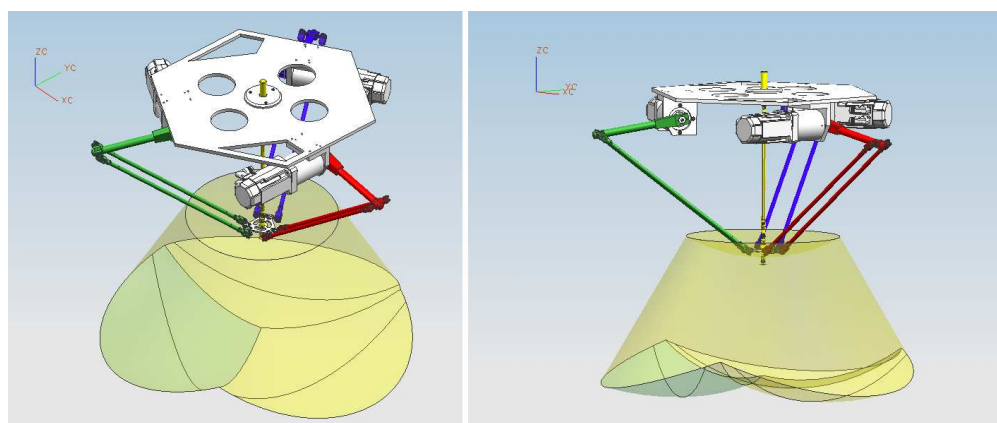


Obr. 7.1.8e  
Omezený pracovní prostor ramene

Aplikací celého postupu na rozměry konstruovaného mechanismu získáme průnik pracovních prostorů jednotlivých ramen – viz. obr. 7.1.8d.



Obr. 7.1.8e  
Pracovní prostory jednotlivých ramen



Obr. 7.1.8e  
Pracovní prostory jednotlivých ramen

Vzniklý průnik pracovních prostorů – viz. obr. 7.1.8f. Tento průnik je proměřen a zobrazen v několika rovinách řezu na výkresu č. 3-1.2900. Jedná se o pracovní prostor, který byl odvozen na základě skutečného dosahu polohy ramen. Skutečný pracovní prostor se získá vytvořením matematického modelu celé konstrukce. Ověření by bylo vhodné následným porovnáním těchto vzniklých prostorů. Toto ověření v diplomové práci nebude použito, jelikož matematický model není součástí diplomové práce.

## 7.2. NÁVRH S KULOVÝM KLOUBEM

Konstrukce částečně vychází z návrhu s univerzálním kloubem. Společné prvky, které jsou zachovány pro tuto variantu jsou báze – kap. 7.1.1, pohony – kap. 7.1.2, nosná část ramen – kap. 7.1.3. a otočný střed platformy – kap. 7.1.6. Tyto prvky nebudou proto znovu popisovány.

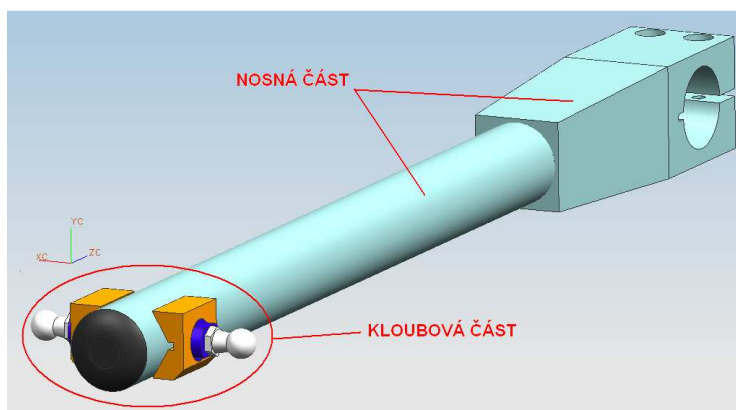
V tomto návrhu je poukázáno na řešení s použitím známých kulových kloubů. Konstrukce je značně jednodušší. V návrhu je použito řešení táhel s kombinací různých materiálů. Tím je dosaženo odlišných vlastností. Pro vytvoření čtvrté osy bude v konstrukci aplikován jiný způsob vytvoření teleskopického hřídele. Tento návrh nebyl zvolen k výrobě. Důvody jsou časová náročnost výroby dílů, finanční náročnost a známé použití kulových kloubů.

Cílené ponechání určitých částí mechanismu je uzpůsobeno pro možné zaměnění kloubové části ramene a okamžitou záměnu kloubů. Hlavní výhody snadné přestavby ramene spočívají především v okamžitém měření tuhosti navržených mechanismů.

Protože tento návrh z výše uvedených důvodů není zvolen pro výrobu prototypu, neobsahuje popis návrhu řešení volby materiálu a výrobních tolerancí.

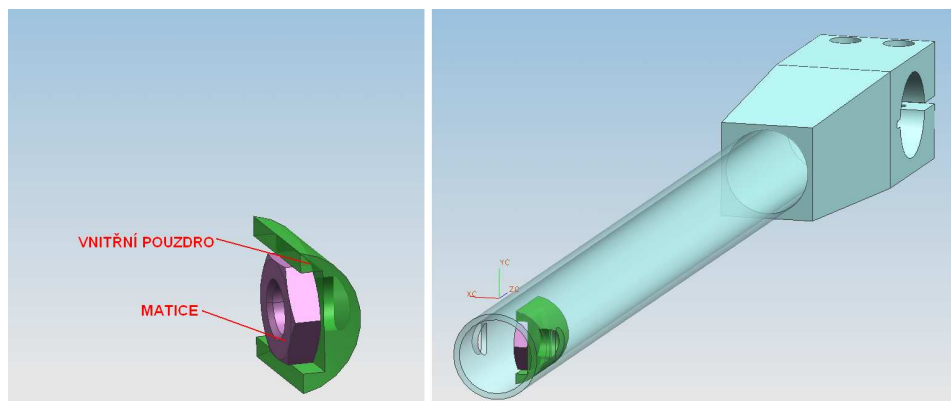
### 7.2.1. RAMENA

Na první pohled vypadá konstrukce ramene totožná jako konstrukce ramene v kap. 7.1.3. Z navrhovaného mechanismu ramene v kap. 7.1.3 se ponechá nosná část ramene – viz. obr. 7.2.1a. Hlavní rozdíl tvoří uchycení kulové části kloubu. Jelikož je ve variantě použit kulový kloub, odpadá tak značně problematický úkol vestavění otočné části kloubu do ramene. Celková konstrukce je tak jednodušší a výrazně se zjednoduší proces montáže. Náznorný postup montáže – viz. obr. 7.2.1b, 7.2.1c, 7.2.1d.



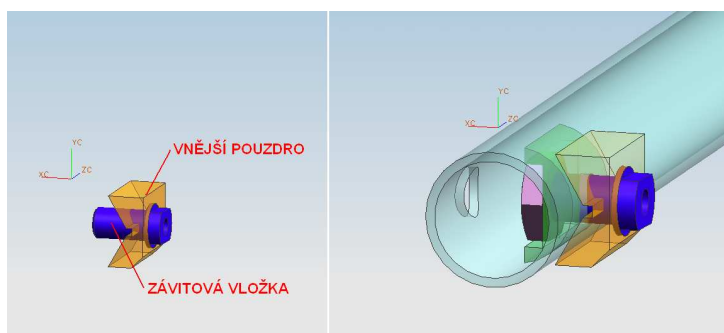
Obr. 7.2.1a  
Rameno

Do nosné části ramene se vloží vnitřní pouzdro s usazenou maticí. Vnitřní pouzdro je uzpůsobeno tak, aby nedocházelo k možnosti protáčení matice. Odpadá tak nutnost jištění matice montážním klíčem při dotahování závitové vložky – viz. obr 7.2.1b.



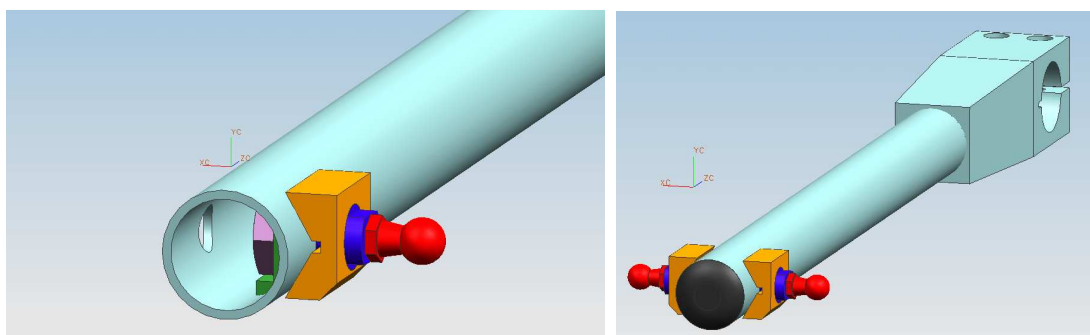
Obr. 7.2.1b  
Montáž – krok 1

Do usazeného vnitřního pouzdra všroubujeme závitovou vložku (vnější závit) vloženou do vnějšího pouzdra – viz. obr- 7.2.1b. Závitová vložka je opatřena vnějším a vnitřním závitem. Vnější závit slouží pro spojení s maticí v vnitřním pouzdře. Vnitřní závit slouží k našroubování kulové hlavy. Pro utažení normalizovaným klíčem jsou na vložce vytvořeny patřičné plochy pro klíč.



Obr. 7.2.1c  
Montáž – krok 2

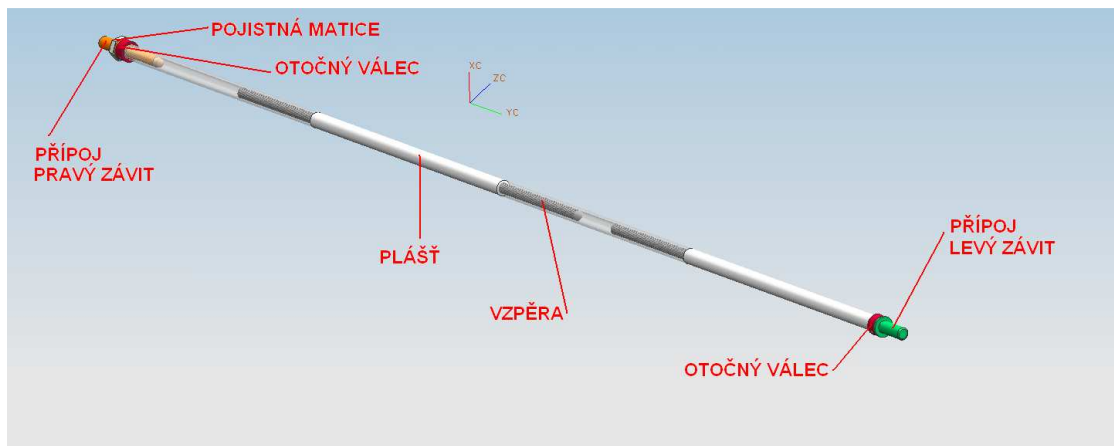
Sestavením předchozích dílů vznikne pevná část uzpůsobená pro našroubování kulové hlavy kloubu – viz obr 7.2.1c, obr 7.2.1d. Pro sestavení celé kloubové části ramene musíme popsané kroky opakovat i pro vytvoření druhého kloubu. Po tomto sestavení zajistíme vnitřní prostor nosné části záplepkou proti vnikání nečistot – viz. obr. 7.2.1d.



Obr. 7.2.1d  
Montáž – krok 3 a 4

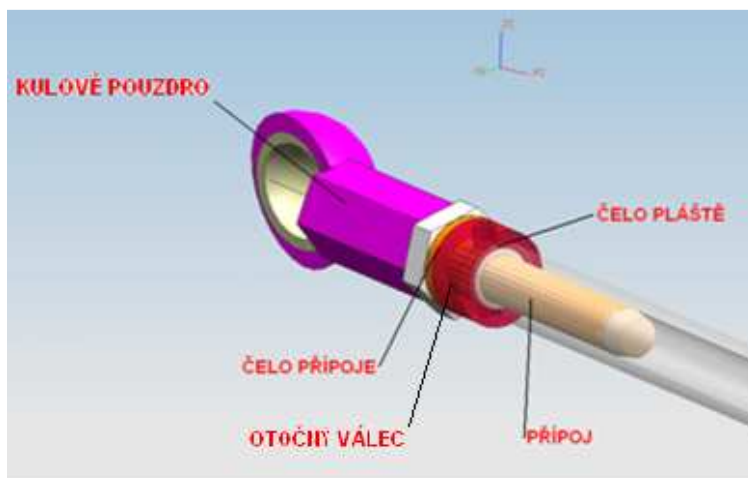
### 7.2.2. TÁHLA (VZPĚRY)

Pro vytvoření požadavků, které byly vyjmenovány v předchozích částech diplomové práce, je v návrhu použita kombinace materiálů. Skladba vzpěry je patrna z obr. 7.2.2a. Použité materiály jsou slitina hliníku (plášť) a uhlíkový kompozit (výztuž). Spojení těchto dílů je vytvořeno pomocí kvalitního dvousložkového lepidla. Tím je zajištěno navýšení tuhosti.



Obr. 7.2.2a  
Skladba vzpěry

Přípoje s opačným smyslem stoupání závitu slouží k přišroubování kulových pouzder – viz. obr. 7.2.2b. Přípoje jsou lepeny do pláště. Účel použití opačných smyslů stoupání závitů je totožný s návrhem 7.1.4. Přípoje jsou opatřeny osazením, na kterém jsou usazeny otočné válce. Tyto válce mají možnost volného otáčení kolem osy x. Účelem těchto válců je pozdější pevné zajištění rozteče vzpěr a kloubů. Polohu válců určuje osazení na přípojích. Otočný válec je tedy zajištěn čelem na přípojích a čelem na plášti – viz. obr. 7.2.2b.



Obr. 7.2.2b



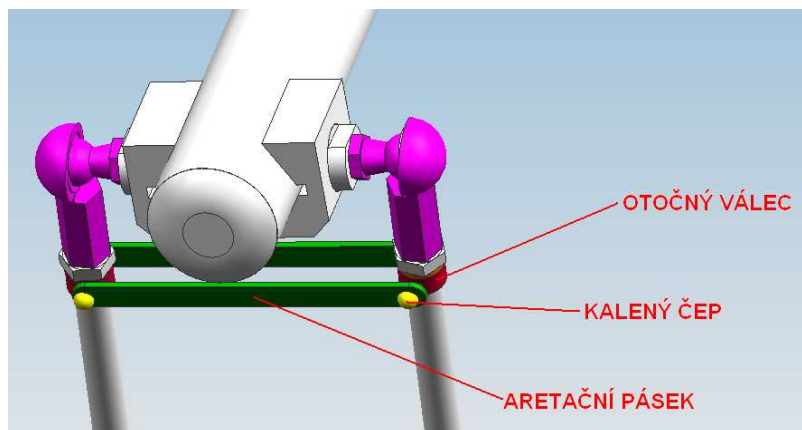
### 7.2.3. KLOUBY

Pro návrh jsou použity kulové klouby Iglidur s teflonovou vložkou. Použití kulových kloubů u Delta robotů je velmi časté. Jejich výhodou je při pružném zajištění polohy okamžité vymezení možné vůle. Problém použití kulových kloubů spočívá v nutnosti zajištění polohy kloubové hlavy v kloubové jamce. Toto zajištění polohy bývá nejčastěji prováděno způsobem pružného uchycení nebo pevným zajištěním polohy.

Pružné zajištění polohy kloubů je nejčastěji prováděno pomocí tažené pružiny – viz. obr. 4.1.3a. Jedná se o jednoduchý způsob zajištění. Nevýhodou jsou omezené dynamické možnosti - možnost rozpojení kloubu při výrazné změně směru pohybu. Tato možnost rozpojení však může být využita jako pojistka proti deformaci. Mají se namysli případy vyvolané např. nárazem platformy do pevné překážky v pracovním prostoru.

Pevné zajištění polohy zaručuje zvýšení dynamických požadavků a vylučuje možnost rozpojení kloubů. Nevýhodou je ovšem vznik deformace částí kinematického řetězce při nárazu do překážky v pracovním prostoru.

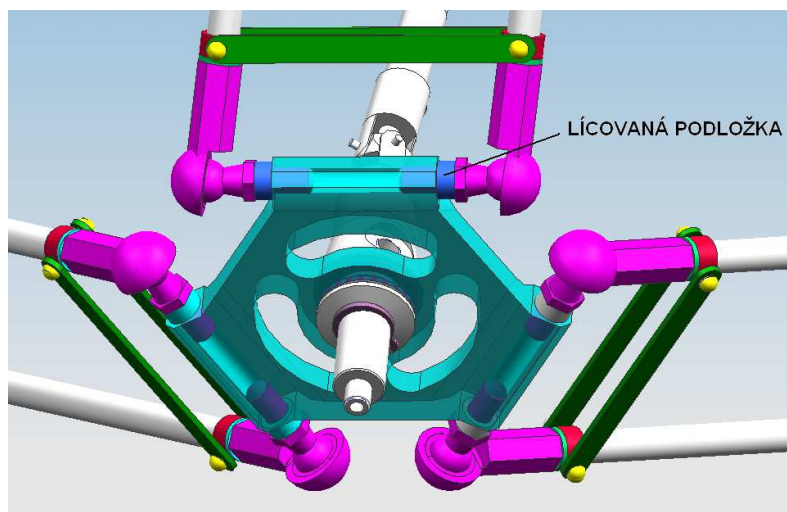
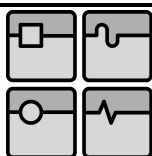
Navrhované použití využívá klouby s pevnou roztečí – viz. obr. 7.2.3a. Poloha kloubů je jištěna dvojicí protiběžných pásků, které jsou upevněny v otočném válci. Upevnění je vytvořeno pomocí kalených čepů.



Obr. 7.2.3a  
Spojení kloubů v části ramene

Stejného principu zajištění polohy kloubů je použito i v případě kloubů umístěných na platformě – viz. obr. 7.2.3b. Stejná rozteč kloubů v rameni a platformě je řešena použitím lícovaných podložek. Tyto podložky mohou být použity pro změnu rozteče kloubů na rameni i platformě. Přes tyto lícované podložky je kulová hlava zašroubována do platformy - viz. obr 7.2.3b.

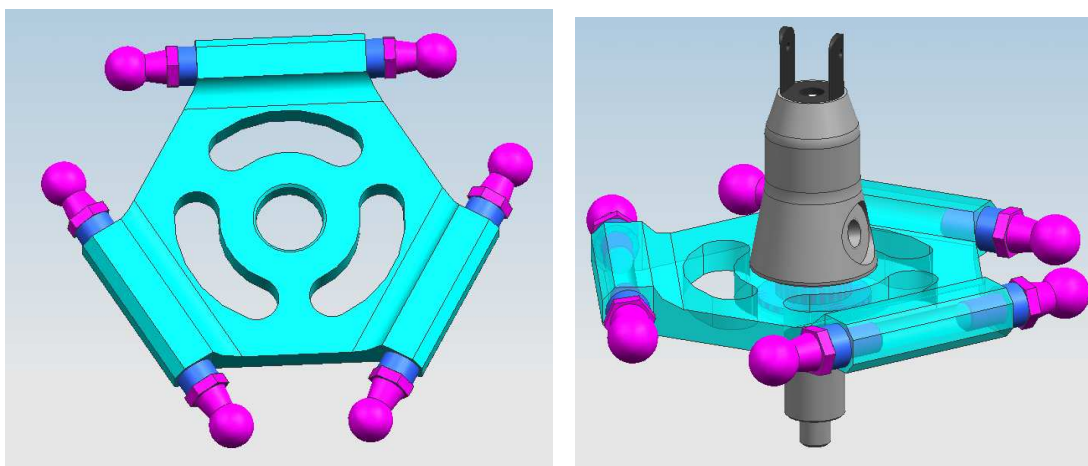




Obr. 7.2.3b  
Spojení kloubů v části platformy

#### 7.2.4. PLATFORMA

Návrh platformy je uzpůsoben tak, aby bylo možné použití otočného středu z návrhu 7.1.6. Tím je zajištěno vytvoření čtvrté osy. Platforma je vytvořena z jedné části. Hlavní rozdíl v požadovaných parametrech návrhu je uzpůsobení připojení kulových kloubů. Klouby jsou pevně dotaženy přes svoji závitovou část. Aby bylo dosaženo co nejmenší hmotnosti, jsou vytvořeny v platformě otvory pro odlehčení – viz. obr. 7.2.4a.

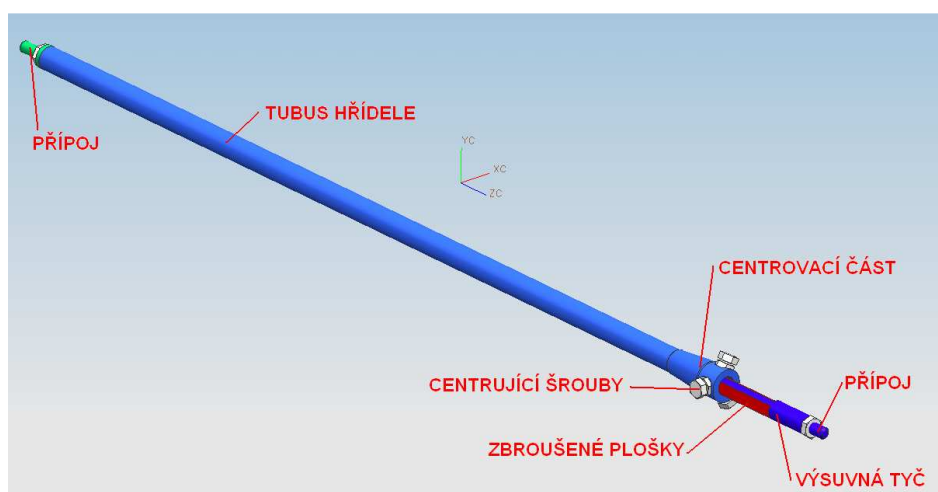


Obr. 7.2.4a  
Platforma

## 7.2.5. TELESKOPICKÝ HŘÍDEL A ČTVRTÁ OSA

Princip a úloha čtvrté osy robotu již byla zmíněna a je patrna z obr. 7.1.7a. Složení a požadavky čtvrté osy totožné z návrhu 7.1.7 s výjimkou konstrukce teleskopického hřídele.

Konstrukce teleskopického hřídele je velmi náročná a pro rozšíření konstrukce je zde použito jiné varianty – viz. obr. 7.2.1a. Vnitřní část hřídele tvoří výsuvná tyč se zbroušenými ploškami vzájemně pootočenými o  $120^\circ$ . Tyto plošky slouží k dotyku čel šroubů, které jsou uchyceny v centrovací části tubusu hřídele. Centrovací část a tubus hřídele jsou nalisovány. Centrující šrouby jsou zajištěny proti povolení kontramaticemi. Tyto šrouby zajišťují polohu vycentrování středu výsuvné tyče a zároveň zabráňují pootočení. Přenáší tak točivý moment. Připojení ke Kardanovým kloubům, je provedeno přes koncové závity s dotažením matic proti pootočení. Kardanovy klouby spojují přes teleskopický hřídel točnu která je součástí báze a otočný střed platformy.



Obr. 7.2.4a  
Teleskopický hřídel

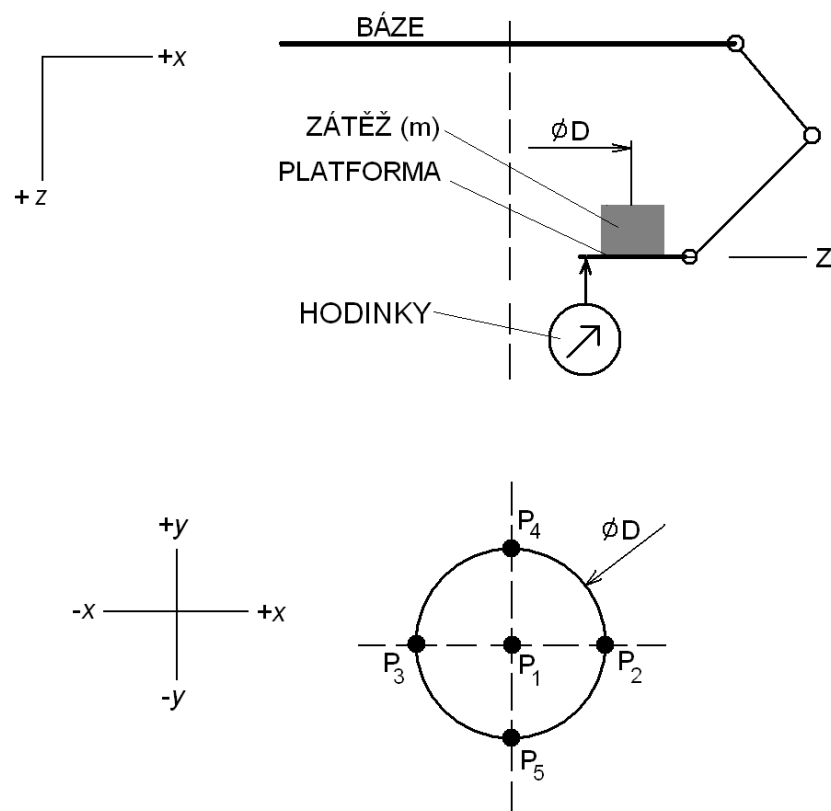
Nevýhodou této konstrukce je nutnost použití většího průměru výsuvné tyče, aby byly vytvořeny dostatečně velké zbroušené plošky. Náročná část je řešení dotyku čel centrovacích šroubů se zbroušenými ploškami z důvodů vysokého tření. Aby se tření v dotyku těchto prvků snížilo, je na čela šroubů vsazena tenká kluzná podložka.

## 8. MĚŘENÍ A POROVNÁNÍ DEFORMACE PŘI STATICKÉM ZATÍŽENÍ

Významem měření deformace je simulovat deformující účinky při provozu zařízení. Deformující dynamické síly by bylo možné měřit např. použitím tenzometrických snímačů napětí umístěných na ramena a vzpěry. Jelikož by bylo měření velmi složité a nákladné, využilo se jednodušší varianty simulace zatížení. Jedná se o simulování deformace při použití statického zatížení. Měření bylo aplikováno na původní konstrukci sestavenou na ÚVSSR a na navrženou konstrukci s univerzálním kloubem.

Měření probíhalo za okolní teploty 22°C a při běžném atmosférickém tlaku. Obě konstrukce se nejprve sestavily a seřídily. Měření bylo prováděno za připojení robotů k řídicímu systému Beckhoff, který byl dodán. Názorný postup měření - viz. obr. 8.a.

Pomocí zadaných poloh platformy bylo postupně prováděno zatěžování. Deformace byly vyvolány třemi stupni zátěže ( $m_1=575\text{g}$ ,  $m_2=855\text{g}$ ,  $m_3=2240\text{g}$ ) s místem působení ve středu platformy v různých polohách pracovního prostoru ( $P_1$  až  $P_5$ ). Vyvolané deformace mechanismu (posunutí platformy v ose z od původní nezatížené polohy), byly následně změřeny úchylkoměrem a zaznamenány. Postup měření byl prováděn dle obr. 8a.



Obr. 8a  
Schéma statického zatížení

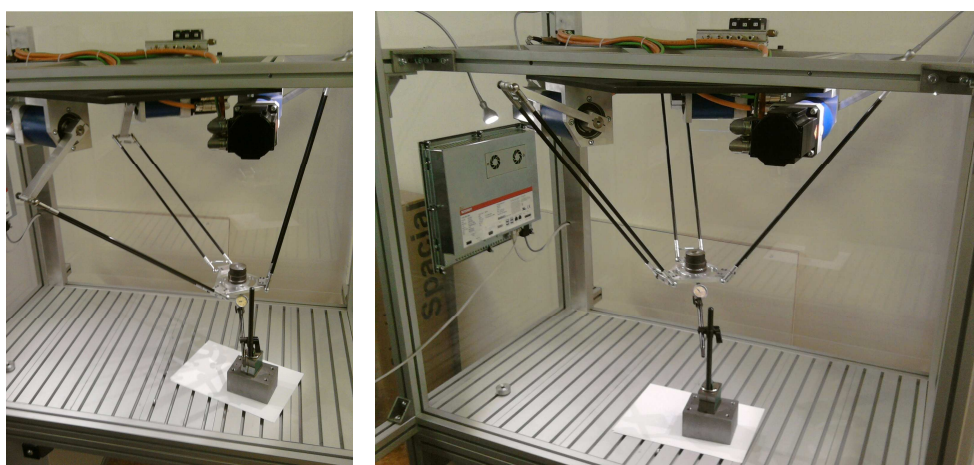
## 8.1. MĚŘENÍ DEFORMACE KONSTRUKCE S KULOVÝMI KLOUBY

Dle schématu – viz. obr. 8a, byly naměřeny a zaznamenány hodnoty (v ose z) při statickém zatížení platformy – viz. tab. 8.1

| ROVINA    | HMOTNOST               | DEFORMACE V BODĚ |                     |                     |                     |                     |
|-----------|------------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|           |                        | P <sub>1</sub>   | P <sub>2</sub> (+X) | P <sub>3</sub> (-X) | P <sub>4</sub> (+Y) | P <sub>5</sub> (-Y) |
| Z = 500mm | m <sub>1</sub> = 575g  | 0,02             | 0,03                | 0,04                | 0,02                | 0,05                |
| Z = 500mm | m <sub>2</sub> = 855g  | 0,03             | 0,04                | 0,06                | 0,05                | 0,08                |
| Z = 500mm | m <sub>3</sub> = 2240g | 0,07             | 0,06                | 0,09                | 0,10                | 0,13                |
| øD[mm]    |                        | 0                | 110                 | 110                 | 110                 | 110                 |
|           |                        |                  |                     |                     |                     |                     |
| Z = 600mm | m <sub>1</sub> = 575g  | 0,02             | 0,05                | 0,04                | 0,06                | 0,07                |
| Z = 600mm | m <sub>2</sub> = 855g  | 0,04             | 0,08                | 0,05                | 0,12                | 0,12                |
| Z = 600mm | m <sub>3</sub> = 2240g | 0,09             | 0,20                | 0,12                | 0,25                | 0,16                |
| øD[mm]    |                        | 0                | 250                 | 200                 | 240                 | 250                 |
|           |                        |                  |                     |                     |                     |                     |
| Z = 650mm | m <sub>1</sub> = 575g  | 0,03             | 0,06                | 0,04                | 0,04                | 0,05                |
| Z = 650mm | m <sub>2</sub> = 855g  | 0,04             | 0,09                | 0,07                | 0,08                | 0,08                |
| Z = 650mm | m <sub>3</sub> = 2240g | 0,11             | 0,18                | 0,12                | 0,16                | 0,14                |
| øD[mm]    |                        | 0                | 190                 | 150                 | 150                 | 150                 |
|           |                        |                  |                     |                     |                     |                     |
| Z = 710mm | m <sub>1</sub> = 575g  | 0,08             | -                   | -                   | -                   | -                   |
| Z = 710mm | m <sub>2</sub> = 855g  | 0,15             | -                   | -                   | -                   | -                   |
| Z = 710mm | m <sub>3</sub> = 2240g | 0,19             | -                   | -                   | -                   | -                   |
|           |                        |                  |                     |                     |                     |                     |

Tab. 8.1

Naměřené a zaznamenané hodnoty statické deformace  
Záznam probíhajícího měření – viz. obr. 8.1a.



Obr. 8.1a

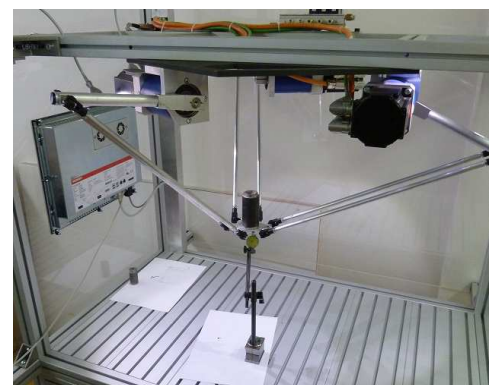
Schéma statického zatížení

## 8.2. MĚŘENÍ DEFORMACE KONSTRUKCE S UNIVERZÁLNÍMI KLOUBY

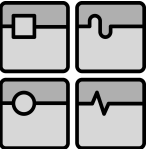
Dle schématu – viz. obr. 8a, byly naměřeny a zaznamenány hodnoty (v ose z) při statickém zatížení platformy – viz. tab. 8.2a.

| ROVINA    | HMOTNOST   | DEFORMACE V BODĚ |        |        |        |        |
|-----------|------------|------------------|--------|--------|--------|--------|
|           |            | P1               | P2(+X) | P3(-X) | P4(+Y) | P5(-Y) |
| Z = 500mm | m1 = 575g  | 0,08             | 0,05   | 0,10   | 0,08   | 0,10   |
| Z = 500mm | m2 = 855g  | 0,10             | 0,12   | 0,15   | 0,01   | 0,13   |
| Z = 500mm | m3 = 2240g | 0,20             | 0,16   | 0,18   | 0,16   | 0,18   |
|           |            |                  |        |        |        |        |
| D[mm]     | D[mm]      | 0,00             | 70,00  | 70,00  | 140,00 | 110,00 |
|           |            |                  |        |        |        |        |
| Z = 600mm | m1 = 575g  | 0,04             | 0,05   | 0,05   | 0,09   | 0,70   |
| Z = 600mm | m2 = 855g  | 0,06             | 0,10   | 0,07   | 0,14   | 0,12   |
| Z = 600mm | m3 = 2240g | 0,08             | 0,14   | 0,17   | 0,20   | 0,19   |
|           |            |                  |        |        |        |        |
| D[mm]     | D[mm]      | 0,00             | 250,00 | 150,00 | 200,00 | 200,00 |
|           |            |                  |        |        |        |        |
| Z = 650mm | m1 = 575g  | 0,06             | 0,07   | 0,11   | 0,05   | 0,07   |
| Z = 650mm | m2 = 855g  | 0,10             | 0,09   | 0,13   | 0,08   | 0,12   |
| Z = 650mm | m3 = 2240g | 0,22             | 0,17   | 0,23   | 0,16   | 0,21   |
|           |            |                  |        |        |        |        |
| D[mm]     | D[mm]      | 0,00             | 200,00 | 140,00 | 170,00 | 160,00 |
|           |            |                  |        |        |        |        |
| Z = 710mm | m1 = 575g  | 0,08             | -      | -      | -      | -      |
| Z = 710mm | m2 = 855g  | 0,12             | -      | -      | -      | -      |
| Z = 710mm | m3 = 2240g | 0,18             | -      | -      | -      | -      |
|           |            |                  |        |        |        |        |
| D[mm]     | D[mm]      | 0,00             | -      | -      | -      | -      |

Tab. 8.2b  
Naměřené a zaznamenané hodnoty statické deformace



Obr. 8a  
Schéma průběhu statického zatížení

|                                                                                   |                                            |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 100 |
|                                                                                   | DIPLOMOVÁ PRÁCE                            |          |

## 9. POZNATKY ZÍSKANÉ PŘI TESTOVÁNÍ KONSTRUKCE S UNIVERZÁLNÍMI KLOUBY

Po vyrobení a sestavení navržené konstrukce byly zjištěny nedostatky některých dodávaných součástí. Tyto nedostatky ovlivnily celkové vlastnosti mechanismu. Výsledné vlastnosti jsou také ovlivněny výrobní nepřesností navržených dílů. Při testování konstrukce nebyly zjištěny vlastnosti všech konstrukčních uzlů, z důvodu nedodržení výrobního plánu. V době testování nebyly vyrobeny následující konstrukční uzly: otočný střed (kap.7.1.1 Báze), teleskopický hřídel a čtvrtá osa (kap.7.1.7) a otočný střed (kap. 7.1.6 Platforma).

### 9.1. BÁZE

(Více poznatků bude zjištěno po kompletním vyrobení navrhovaných dílů.)

#### VÝHODY

- velmi dobrá tuhost

#### NÁVRH NA ZLEPŠENÍ

- možné snížení hmotnosti, která klade zvýšené požadavky na uchycení k rámu

### 9.2. POHONY

#### VÝHODY

- dobré a jednoduše navržené řízení
- tichý chod
- dostačující dynamické vlastnosti

#### NÁVRH NA ZLEPŠENÍ

- vůle v polohování natočení výstupního hřídele převodovky
- motory nejsou opatřeny brzdou

### 9.3. RAMENA

#### VÝHODY

- velmi dobrá tuhost
- nízká hmotnost
- snadná montáž

#### NÁVRH NA ZLEPŠENÍ

- kloubová část ramene je velmi složitá na výrobu
- návrh lepšího technologického postupu výroby kloubové části, a to zejména s ohledem na možnost svaření dílů. Standardní postup zahrnuje svaření vnější kloubové části, poté následuje obrobení uložení pro ložisko. Tento postup nebyl dodržen z důvodů umožnění možnosti záběhu a samotného vymezení následných vůlí. Po záběhu dílů se nepřistoupilo k plánovanému svaření dílů z důvodu možné tepelné deformace dílů. Svaření bylo nahrazeno pojištěním pomocí dvousložkového lepidla při dodržení stejných výsledných účinků.

## 9.4. KLOUBY

### VÝHODY

- možnost snadného chodu
- možnost nastavení rozteče vzpěr a následného okamžitého seřízení
- odpadá nutnost jištění vzájemné polohy
- možnost vyššího dynamického zatížení
- nerozebíratelné spojení

### NÁVRH NA ZLEPŠENÍ

- snížení náročnosti na přesnost uložení v kluzných pouzdrech a vymezení vůlí
- plastové provedení daných typů podléhá pružné deformaci, a tím výrazně přispívá k celkové deformaci mechanismu
- u použitých typů kloubových hlav je spojení provedeno přes kulový člen, který je příčinou nepříznivých vůlí v natočení. Tyto vůle byly následně vymezeny použitím vymezovacích podložek.
- plastová závitová část kloubu výrazně omezuje požadovaný utahovací moment, který je požadován při kontraspojení matic. Z toho plyne omezení požadovaného předepětí a vymezení vůlí plynoucí z možnosti strhání závitu.

## 9.5. PLATFORMA

### VÝHODY

- velmi nízká hmotnost
- kompaktní rozměry
- snadná výměna opotřebovaných kluzných částí

### NÁVRH NA ZLEPŠENÍ

Na platformě nebyly patrné nedostatky. V době testování navrženého prototypu byla vyrobena pouze část platformy bez středové točny 4.DOF.

## 10. EKONOMICKÝ ROZBOR

Ekonomický rozbor především plyne z celkových finančních nákladů plynoucích z nákupu materiálu, výroby dílů, montáže a finálních úprav prototypu. Ekonomická stránka týkající se výroby součástí není zahrnuta. Navrhované díly byly samostatně vyrobeny v dílnách VUT. Přesný výpočet nákladů na obrobení dílů dle výkresové dokumentace by byl spočítán dle patřičných hodinových sazeb jednotlivých obráběcích strojů a výrobních časů jednotlivých prvků konstrukce. Společnost Hennlich poskytla po kontaktování a následné dohodě obou stran kluzné díly jako bezplatné vzorky pro diplomovou práci.

Pro ekonomickou názornost je zobrazen finanční odhad nakupovaných materiálů pro výrobu navržených dílů:

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| Báze (otočný střed)  | 500,-        |
| Pohony               | nezahrnuty   |
| Ramena               | 400,-        |
| Táhla                | 650,-        |
| Klouby a klizné díly | zdarma       |
| Platforma            | 600,-        |
| Otočný střed         | 450,-        |
| Spojovací díly       | 550,-        |
| <u>Příslušenství</u> | <u>300,-</u> |
| Cena celkem          | 3450,-       |

Pozn.: Pohony (3x Beckhoff AM3041C, 3x Wittenstein LP090/02-25, kabeláž) a báze byly použity z původní konstrukce s kulovými klouby. Nebyly proto do ekonomického rozboru zahrnuty.



## 11. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zpracována za účelem vytvoření "Konstrukce manipulátoru s paralelní kinematickou strukturou pro velmi malé součásti". Aby bylo dosaženo co nejlepšího přiblížení dané problematiky, bylo nutné vytvořit podrobnou řešeršní část. Právě vytvoření obsáhlé řešeršní části má za úkol vytvořit čtenáři jasnou představu o těchto mechanismech.

Diplomová práce zahrnuje popis paralelních struktur od jejich vzniku až po současnost. Vytvořením přehledu současných produktů poukazuje na využití v oblasti průmyslové robotiky. Z historického zjištění plyne, že vytvoření paralelních mechanismů nebylo vždy spojeno s jednoznačným cílem. Postupem času vytvářely tyto mechanismy konkrétní představu o svém chování a možnostech využití. Získané poznatky poukazují na odlišné vlastnosti, které jsou pro tyto mechanismy charakteristické.

Rozmanitost způsobů vytvoření paralelních konstrukcí je značná. Způsoby těchto sestavení jsou názorně popsány. Tento popis zahrnuje i metodiku s možnostmi kinematického návrhu a poukazuje na vhodnost jejich použití. Společné stavební prvky, které jsou charakteristické pro tyto mechanismy, jsou podrobně rozebrány a zhodnoceny.

Po názorném vytyčení požadovaných cílů zaměřuje diplomová práce svoji pozornost na návrhy vlastní konstrukce. Vytvoření dvou odlišných návrhů poukazuje na použití odlišných prvků k vytvoření zvolené stavby robotu. Konstrukce byly navrženy s ohledem na vzájemnou přestavbu obou mechanismů. Z odlišností navržených konstrukcí vyplývají charakteristické vlastnosti navrhovaných uzlů. Tyto uzly byly podrobně popsány a zdokumentovány. K výrobě prototypu byla zvolena složitější konstrukce, která není tak běžná.

V závěrečné části diplomové práce je vytvořeno zhodnocení navržených konstrukčních uzlů s ohledem na plnění jejich očekávané funkce. Na vyrobeném prototypu bylo potvrzeno splnění daných cílů, požadovaných funkcí a ověření správnosti vlastního přístupu. Při testování se potvrdily očekávané vlastnosti použitých komponentů. Sestavený prototyp výborně plní svoji požadovanou pohybovou úlohu. Pracovní prostor splňuje požadované velikosti při zachování potřebných funkcí. Vyráběné díly mají velmi dobrý předpoklad pro plnění požadovaných cílů při vysokém dynamickém namáhání. Vyrobený prototyp byl podroben simulaci deformujícího zatížení se zaznamenanými výsledky.

Část této diplomové práce byla použita v publikaci vytvořené na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, VUT v Brně s názvem: "DELTA - a robot with parallel kinematics". Publikace byl uveřejněna v "Mechatronics 2011".

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Parallemic* [online]. 19.9.2009 [cit. 2011-02-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.parallemic.org/>>.
- [2] MERLET, Jean-Pierre. *Parallel Robots*. Francie : Springer, 2006. 383 s. ISBN 0-7923-6308-6
- [3] SICILIANO, Bruno, et al. *Robotics*. London : Springer, 2009. 623 s.
- [4] KNOFLÍČEK, Radek, PLŠEK, Ladislav. *Paralelní kinematické struktury výrobních strojů a průmyslových robotů*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 43 s.
- [5] *ABB* [online]. 2010 [cit. 2010-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.abb.com/>>.
- [6] *ADEPT TECHNOLOGY, INC.* [online]. c1996-2009 [cit. 2009-07-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.adept.com>>.
- [7] *FANUC Robotics* [online]. [2002] [cit. 2009-07-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.fanucrobotics.cz>>.
- [8] *ACS Robotar AB* [online]. 2011 [cit. 2011-03-10]. ACS Robotar AB. Dostupné z WWW: <<http://www.acsrobotar.se>>.
- [9] *Kawasaki* [online]. 2011 [cit. 2011-03-10]. Kawasaki Robotics. Dostupné z WWW: <<http://www.kawasakirobotics.com>>.
- [10] *RobotWorx* [online]. 2010 [cit. 2011-03-10]. RobotWorx. Dostupné z WWW: <<http://www.robots.com>>.
- [11] *PKM Tricept : PKM Tricept* [online]. 2011 [cit. 2011-03-10]. PKM Tricept. Dostupné z WWW: <<http://www.pkmtricept.com>>.
- [12] *ELAU Packaging solutions* [online]. 2011 [cit. 2011-03-10]. Schneider Electric. Dostupné z WWW: <<http://www.elau.com>>.
- [13] *COSMOS : Aluminium Industry* [online]. 2011 [cit. 2011-03-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.cosmosaluminium.gr>>.
- [14] *New Automation Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-04-06]. Beckhoff. Dostupné z WWW: <<http://www.beckhoff.com>>.
- [15] *Wittenstein* [online]. 2011 [cit. 2011-04-06]. Wittenstein. Dostupné z WWW: <<http://www.wittenstein-alpha.de>>.
- [16] *Innovation im Modellbau* [online]. 2011 [cit. 2011-02-18]. Graupner. Dostupné z WWW: <<http://www.graupner.de>>.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| OZNAČENÍ   | JEDNOTKA     | NÁZEV                                                                     |
|------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $a_t$      | $[m.s^{-2}]$ | Tečné zrychlení                                                           |
| $a_n$      | $[m.s^{-2}]$ | Normálové zrychlení                                                       |
| $a$        | $[m.s^{-2}]$ | Celkové zrychlení                                                         |
| $C$        | $[-]$        | Válcová – cylindrická kinematická dvojice                                 |
| DOF        | $[-]$        | Degrees of freedom (stupně volnosti)                                      |
| $F$        | $[-]$        | Počet DOF                                                                 |
| $F_A$      | $[N]$        | Axiální síla                                                              |
| $F_R$      | $[N]$        | Radiální síla na výstupní hřídel                                          |
| $F_S$      | $[N]$        | Síla působící na rameno                                                   |
| $f_i$      | $[-]$        | Počet DOF jednotlivých kinematických dvojic                               |
| $f_{id}$   | $[-]$        | Počet DOF vlastních pohybů, které nemají vliv na koncovou polohu efektoru |
| $i$        | $[-]$        | Stupeň převodu                                                            |
| $I_{0max}$ | $[A]$        | Maximální proud                                                           |
| $j$        | $[-]$        | Počet kinematických dvojic                                                |
| $J_m$      | $[kg.m^2]$   | Moment setrvačnosti motoru                                                |
| $J_p$      | $[kg.m^2]$   | Moment setrvačnosti převodovky                                            |
| $J_r$      | $[kg.m^2]$   | Moment setrvačnosti ramene                                                |
| $J_{red}$  | $[kg.m^2]$   | Redukovaný moment setrvačnosti na hřídel motoru                           |
| $J_h$      | $[kg.m^2]$   | Moment setrvačnosti ostatních částí                                       |
| $k$        | $[-]$        | Počet kloubů na platformě                                                 |
| $K_{erms}$ | $[mVmin]$    | Napěťová konstanta                                                        |
| $K_{Trms}$ | $[Nm/A]$     | Momentová konstanta                                                       |
| $l$        | $[-]$        | Počet vodicích řetězců                                                    |
| $I_{0rms}$ | $[A]$        | Klidový proud                                                             |
| $L$        | $[mH]$       | Indukčnost vinutí                                                         |
| $L_h$      | $[h]$        | Doba technická kontrola                                                   |
| $m$        | $[-]$        | Počet kloubů na bázi                                                      |
| $m_H$      | $[kg]$       | Hmotnost zatížení ramene                                                  |
| $m_m$      | $[kg]$       | Manipulační hmotnost                                                      |
| $m_o$      | $[kg]$       | Hmotnost ostatních prvků konstrukce                                       |
| $m_M$      | $[kg]$       | Hmotnost motoru                                                           |
| $M_n$      | $[Nm]$       | Jmenovitý moment                                                          |
| $M_o$      | $[Nm]$       | Klidový moment                                                            |
| $M_{Omax}$ | $[Nm]$       | Maximální moment                                                          |
| $M_R$      | $[Nm]$       | Statický moment                                                           |
| $n$        | $[-]$        | Počet všech členů mechanismu                                              |
| $n_{jm}$   | $[s^{-1}]$   | Jmenovité otáčky motoru                                                   |
| $n_{jimp}$ | $[s^{-1}]$   | Otáčky výstupní hřídele převodovky                                        |
| $n_{1N}$   | $[min^{-1}]$ | Výstupní otáčky                                                           |
| $N_{max}$  | $[min^{-1}]$ | Maximální otáčky                                                          |
| $N_n$      | $[min^{-1}]$ | Jmenovité otáčky                                                          |

|                  |                        |                                                      |
|------------------|------------------------|------------------------------------------------------|
| $o$              | [m]                    | Obvod                                                |
| $P$              | [ - ]                  | Prismatická kinematická dvojice                      |
| $P_n$            | [kW]                   | Jmenovitý moment                                     |
| $PKS$            | [ - ]                  | Paralelní kinematická struktura                      |
| $R$              | [ - ]                  | Rotační kinematická dvojice                          |
| $R_{25}$         | [OHM]                  | Resistance napětí Ph-PH                              |
| $R_R$            | [m]                    | Poloměr ramene                                       |
| $R_m$            | [MPa]                  | Minimální pevnost v tahu                             |
| $R_{p02}$        | [MPa]                  | Minimální mez kluzu                                  |
| $s$              | [ - ]                  | Počet pasivních vazeb                                |
| $S$              | [ - ]                  | Sférická kinematická dvojice                         |
| $t$              | [s]                    | Doba rozběhu                                         |
| $t_{TH}$         | [min]                  | Teplotní časová konstanta                            |
| $T_{012}$        | [Nm]                   | Průměrné zatížení momentem                           |
| $T_{2B}$         | [Nm]                   | Max. mament zrychlení                                |
| $T_{2N}$         | [Nm]                   | Max. výstupní moment                                 |
| $T_{2NOT}$       | [Nm]                   | Nouzový brzdny moment                                |
| $U$              | [ - ]                  | Univerzální kinematická dvojice                      |
| $v$              | [m.s <sup>-1</sup> ]   | Tečná rychlost                                       |
| $x$              | [ - ]                  | Směr osy x                                           |
| $y$              | [ - ]                  | Směr osy y                                           |
| $z$              | [ - ]                  | Směr osy z                                           |
| $\alpha$         | [rad.s <sup>-2</sup> ] | Úhlové zrychlení                                     |
| $\eta_c$         | [%]                    | Účinnost převodu                                     |
| $\lambda$        | [ - ]                  | Kinematická konstanta                                |
| $\varphi_x$      | [ ° ]                  | Rotace kolem osy x                                   |
| $\varphi_y$      | [ ° ]                  | Rotace kolem osy y                                   |
| $\varphi_z$      | [ ° ]                  | Rotace kolem osy z                                   |
| $\sigma_o$       | [MPa]                  | Ohybové napětí                                       |
| $\sigma_{omaxM}$ | [MPa]                  | Maximální ohybové napětí při střídavém smyslu napětí |

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1

Fotografie sestaveného prototypu

## SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

| Číslo výkresu | Název                     |
|---------------|---------------------------|
| 2-02.0001     | DELTA                     |
| K- 2-02.0001  | KUSOVNÍK DELTA            |
| 3-1.2900      | PRACOVNÍ PROSTOR – STUDIE |
| 3-01-0304     | TOČNA                     |
| K-3-01.0304   | KUSOVNÍK TOČNA            |
| 3-01.2204     | PLATFORMA                 |
| K-3-01.2204   | KUSOVNÍK PLATFORMA        |
| 3-01.2006     | RAMENO                    |
| K-3-01.2006   | KUSOVNÍK RAMENO           |
| 3-01-2003     | RAMENO – OPRACOVANEC      |
| K-3-01.2003   | KUSOVNÍK RAMENO OPRAC.    |
| 4-02-2104     | TÁHLO                     |
| K-4-02-2104   | KUSOVNÍK TÁHLO            |
| 3-02.0008     | HŘÍDEL                    |
| K-3-02.0008   | KUSOVNÍK HŘÍDEL           |
| 3-1.2101      | STŘED                     |
| 3-1.2201      | PLATFORMA                 |
| 3-2.0401      | ZÁKLAD                    |
| 3-2.0403      | DRŽÁK                     |
| 4-1.2001      | TUBKA                     |
| 4-1.2002      | ÚCHYT                     |
| 4-1.2004      | VLOŽKA VNĚJŠÍ             |
| 4-1.2005      | VLOŽKA VNITŘNÍ            |
| 4-1.2007      | STŘEDÍCÍ VLOŽKA           |
| 4.1.2009      | ROZPĚRA                   |
| 4-1.2010      | KLOUBOVÁ HLAVA            |
| 4-1.2102      | PODLOŽKA                  |
| 4-1.2103      | ČEP                       |
| 4-1.2104      | DISTANČNÍ PLECH           |
| 4-1.2202      | PŘÍCHYT                   |
| 4-2.0001      | KONCOVKA                  |
| 4-2.0002      | TRUBKA                    |
| 4-2.0003      | PŘÍPOJ                    |
| 4-2.0004      | TYČ                       |
| 4-2.0005      | POUZDRO                   |
| 4-2.0006      | POUZDRO                   |
| 4-2.0301      | PŘÍRUBA                   |
| 4-2.0302      | PODLOŽKA                  |
| 4-2.0303      | TOČNA                     |
| 4-2.0402      | ZÁKLAD                    |
| 4-2.2101      | KONCOVKA M8               |
| 4-2.2102      | KONCOVKA M8 LH            |
| 4-2.2103      | TRUBKA                    |

**Příloha č. 1**  
**FOTOGRAFIE SESTAVENÉHO PROTOTYPU**

