



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

EXPERIMENTÁLNÍ ROBOTIZOVANÉ PRACOVIŠTĚ S DELTA-ROBOTEM

EXPERIMENTAL ROBOTIZED WORKPLACE WITH DELTA-ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ KOZUBÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK KNOFLÍČEK, Dr.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Kozubík

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

obor: **Výrobní systémy (2301T030)**

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:

Experimentální robotizované pracoviště s delta-robotem

v anglickém jazyce:

Experimental robotized workplace with delta-robot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod do projekčně – konstrukčního řešení robotizovaných technologických pracovišť (RTP)
2. Komplexní analýza současného stavu v oblasti strojů s paralelní kinematickou strukturou (PKS), jejich možnosti uplatnění v praxi (např. obrábění, manipulace atd.)
3. Kinematická analýza mechanismu s PKS, tj. delta-robotu (přímá / nepřímá úloha kinematiky)
4. Studie experimentálního RTP s delta-robotem – vytvoření konkrétní úlohy prováděné na RTP, výběr vhodného manipulátoru, periferních zařízení, řídicího systému atd. Textovou zprávu ke studii vypracujte včetně potřebné obrazové dokumentace (3D pohledy, nárys a půdorys RTP)
5. Vyhodnocení přínosu nového experimentálního RTP
6. Závěr a kritické zhodnocení vlastního díla

Cíle diplomové práce:

1. Analýza strojů s PKS
2. Kinematická analýza existujícího delta-robotu
3. Studie experimentálního pracoviště s integrovaným delta-robotem

Seznam odborné literatury:

1. Bělohoubek P., Kolíbal Z.: Průmyslové roboty IV, projektování výrobních systémů s PRaM, skriptum VUT v Brně, 1993
2. Burkovič J.: Navrhování RTP, skriptum VŠB-TU Ostrava, 2002
3. Buzek V.: Periferní zařízení RTP, skriptum VŠB-TU Ostrava, 1993
4. Skařupa J.: Metodika konstruování, skriptum VŠB-TU Ostrava, 1993
5. Internetové zdroje: typy PRaM, stroje s PKS

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 4.11.2010

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

JIŘÍ KOZUBÍK: Experimentální robotizované pracoviště s delta-robotem

Tato diplomová práce byla vypracována v rámci česko-německého studijního programu Výrobní systémy (VUT v Brně & TU Chemnitz). Je rozdělena do čtyř základních částí. V první části je uveden úvod do konstrukčního řešení robotizovaných pracovišť. Následující část se zabývá analýzou současného stavu v oblasti strojů s paralelní kinematikou. Předposlední část, na niž byl kladen největší důraz, je věnována kinematické analýze delta-robotu. Závěr této práce tvoří studie experimentálního pracoviště s integrovaným delta-robotem.

Klíčová slova:

robotizované pracoviště, paralelní kinematika, kinematická analýza, delta-robot

KURZFASSUNG

JIŘÍ KOZUBÍK: Experimentelle Roboterzelle mit einem Delta-Roboter

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des deutsch-tschechischen Studienganges Produktionssysteme (VUT v Brně & TU Chemnitz) verfasst. Sie ist in vier Hauptkapitel gegliedert. Im ersten Kapitel ist die Einführung in die konstruktive Lösung von Roboterzellen angeführt. Folgender Teil befasst sich mit der Analyse des heutigen Zustands im Bereich von Maschinen mit Parallelkinematik. Der zweitletzte Teil, auf den der größte Akzent gelegt wurde, ist der kinematischen Analyse des Delta-Roboters gewidmet. Den Abschluss dieser Arbeit stellt die Studie einer experimentellen Roboterzelle mit integriertem Delta-Roboter dar.

Schlüsselwörter:

Roboterzelle, Parallelkinematik, kinematische Analyse, Delta-Roboter

ABSTRACT

JIŘÍ KOZUBÍK: Experimental robotized workplace with delta-robot

This diploma thesis was written within Czech-German study programme Production systems (VUT v Brně & TU Chemnitz). This thesis is divided into four main parts. In the first part is brought out the introduction to design of robotic cells. Following part is concentrated on analysis of present state in area of machines with parallel kinematics. The penultimate part, on which is focused the main attention, is dedicated to kinematic analysis of delta-robot. Closing part of this Thesis presents the study of experimental robotized workplace with integrated delta-robot.

Keywords:

robotic cell, parallel kinematics, kinematic analysis, delta-robot

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

KOZUBÍK, J. Experimentální robotizované pracoviště s delta-robotem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 103 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 25. 5. 2011

.....

Jiří Kozubík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr. za cenné rady, připomínky a přínosné konzultace v průběhu přípravy celé diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Michalu Holubovi za poskytnutí vynikajících materiálů týkajících se analyzovaného delta-robotu a pomocnou ruku s programem SolidWorks.

Mé velké poděkování patří rovněž mým rodičům a Barboře Kejíkové, neboť dokončení této práce, jež představuje vyvrcholení mého studia oboru Výrobní systémy (VUT v Brně & TU Chemnitz), by bez jejich neustálé podpory a obrovského pochopení nebylo možné.

Obsah

Seznam zkratk	12
Seznam značek	13
Seznam obrázků	15
Seznam tabulek	17
1. Úvod	19
2. Konstrukce RTP	21
2.1. Postup při navrhování RTP	22
2.1.1. Empirické metody	22
2.1.2. Systematické metody	22
2.1.3. Graficko-početní metody	23
2.1.4. Matematické metody	23
2.2. Technická dokumentace RTP	23
2.3. Periferní zařízení RTP	24
2.3.1. Periferní zařízení pro manipulaci	24
2.3.2. Periferní zařízení daného technologického procesu	25
2.3.3. Periferní zařízení pro zajištění bezpečnosti práce	25
2.4. Příklady RTP	26
2.4.1. RTP pro svařování	26
2.4.2. RTP pro obrábění	27
2.4.3. RTP pro tváření	28
2.4.4. RTP pro manipulaci	29
3. Výrobní stroje a roboty na bázi PKS	31
3.1. Základní stavba	31
3.1.1. Definice	31
3.1.2. Vzpěry a jejich pohon	31
3.1.3. Klouby	33
3.1.3.1. Rotační klouby – stupeň volnosti 1	33
3.1.3.2. Rotační klouby – stupeň volnosti 2 a 3	33
3.1.4. Hybridní kinematika	35
3.1.4.1. Mechanismy s plnou redundancí	35
3.1.4.2. Mechanismy s částečnou redundancí	35
3.2. Nasazení v průmyslu	36
3.2.1. Obrábění	36
3.2.1.1. Výroba nástrojů a forem	36
3.2.1.2. Letecký průmysl	37
3.2.1.3. Automobilový průmysl	38

3.2.2.	Tváření.....	38
3.2.3.	Manipulace.....	39
3.2.4.	Porovnání paralelní a sérové kinematické struktury.....	40
3.3.	Historický vývoj strojů s PKS.....	40
4.	Kinematická analýza delta-robotu.....	43
4.1.	Popis analyzovaného delta-robotu.....	43
4.1.1.	Kinematická struktura.....	43
4.1.2.	Rozměry.....	44
4.1.3.	Komponenty.....	45
4.1.3.1.	Pohony.....	45
4.1.3.2.	Základna, platforma, ramena a vzpěry.....	46
4.1.3.3.	Kulové klouby.....	47
4.1.3.4.	Řídicí systém.....	47
4.2.	Transformace souřadnic.....	48
4.2.1.	Souřadný systém delta-robotu.....	48
4.2.1.1.	Absolutní souřadný systém.....	48
4.2.1.2.	Relativní souřadný systém.....	49
4.2.1.3.	Souřadný systém stroje.....	49
4.2.2.	Přímá a nepřímá úloha kinematiky.....	50
4.3.	Nepřímá úloha kinematiky.....	51
4.3.1.	Rozbor problému.....	51
4.3.2.	Vlastní řešení IKP – funkce nuk.m.....	52
4.4.	Přímá úloha kinematiky.....	55
4.4.1.	Rozbor problému.....	57
4.4.2.	Přímá úloha kinematiky – funkce puk.m.....	58
4.5.	Pracovní prostor a singulární polohy.....	59
4.5.1.	Pracovní prostor.....	59
4.5.1.1.	Vykreslení grafické.....	59
4.5.1.2.	Vykreslení matematické.....	60
4.5.2.	Singulární polohy.....	62
4.5.2.1.	Definice.....	62
4.5.2.2.	Analýza singularit delta-robotu – Grafika & Geometrie.....	63
4.5.2.3.	Analýza singularit delta-robotu – Jacobiho matice.....	67
4.6.	Přínos práce.....	70
4.6.1.	Simulace pohybů – NI LabVIEW + SolidWorks.....	70
4.6.2.	Plánování dráhy a optimalizace struktury.....	71
4.6.3.	Kalibrace.....	71
5.	Experimentální robotizované pracoviště.....	75
5.1.	Analýza.....	75

5.1.1.	Požadavky na pracoviště	75
5.1.2.	Volba úlohy	76
5.2.	Model experimentálního RTP.....	77
5.2.1.	Pohledy	77
5.2.2.	Pracovní cyklus	79
5.2.3.	Komponenty.....	80
5.2.3.1.	Komponenty, jež jsou k dispozici.....	80
5.2.3.2.	Komponenty, jež je nutné vyrobit / nakoupit	82
5.2.4.	Požizovací náklady	83
5.2.5.	Bezpečnost	83
5.2.6.	Umístění	85
5.3.	Vyhodnocení přínosu experimentálního RTP	85
6.	Závěr.....	87
	Seznam literatury	91
	Příloha A	95
	Příloha B	97
	Příloha C	99



Seznam zkratek

zkratka	popis
DKP	Direct Kinematics Problem – přímá úloha kinematiky
IKP	Inverse Kinematics Problem – nepřímá úloha kinematiky
PKS	paralelní kinematická struktura
PRaM	průmyslové roboty a manipulátory
RTP	robotizované technologické pracoviště
SKS	sériová kinematická struktura
TCP	Tool Centre Point – střed nástroje
ÚVSSR	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky (FSI VUT v Brně)
<i>nuk.m</i>	funkce v programu MATLAB - výpočet nepřímé úlohy kinematiky
<i>pp.m</i>	funkce v programu MATLAB – kontrola pracovního prostoru
<i>pp2.m</i>	funkce v programu MATLAB – kontrola pracovního prostoru
<i>puk.m</i>	funkce v programu MATLAB - výpočet přímé úlohy kinematiky



Seznam značek

značka	jednotka	popis
A		jacobiho matice
B		jacobiho matice
J		jacobiho matice
A		směrový vektor – ve směru ramene
B		směrový vektor – ve směru osy z
L		vektor souřadnic pohonů
O		polohový vektor počátku světového souřadného systému
P		vektor parametrů stroje
P_i		polohový vektor kloubů platformy i
Q_i		polohový vektor kloubů základny i
S_i		střed kulové plochy ramene i
S_i'		polohový vektor koncového kloubu ramene i
W_{meas}		vektor naměřených hodnot
W_{mod}		vektor modelových hodnot
W_{ref}		vektor referenčních hodnot
X		vektor světových souřadnic TCP
θ		vektor souřadnic pohonů
$i_{1,2}$		polohový vektor průsečíku kružnic k_1 a k_2
A	[°]	natočení TCP (kolem osy z)
B	[°]	natočení TCP (kolem osy x')
C	[°]	natočení TCP (kolem osy z'')
F	[-]	počet stupňů volnosti
L_i	[mm]	délka vzpěry i
P_{xi}	[mm]	x – pozice kloubu platformy i
P_{yi}	[mm]	y – pozice kloubu platformy i
P_{zi}	[mm]	z – pozice kloubu platformy i
Q_{xi}	[mm]	x – pozice kloubu základny i
Q_{yi}	[mm]	y – pozice kloubu základny i
Q_{zi}	[mm]	z – pozice kloubu základny i
Rh	[mm]	poloměr základny
X	[mm]	x – pozice TCP
Y	[mm]	y – pozice TCP
Z	[mm]	z – pozice TCP
a	[mm]	polovina tloušťky platformy
a'	[mm]	x - souřadnice středu kružnice k_2
b	[mm]	vzdálenost středu otáčení kulového kloubu platformy od její osy
b'	[mm]	y - souřadnice středu kružnice k_2



DIPLOMOVÁ PRÁCE

b_g	[-]	možnosti pohybu
c	[mm]	délka vzpěry
d	[mm]	délka ramene
d_{min}	[-]	minimální vzdálenost
e	[mm]	vzdálenost středu otáčení rotačního kloubu od roviny základny
f	[mm]	vzdálenost roviny desky stolu od roviny základny
f_i	[-]	stupeň volnosti i -tého členu
f_{id}	[-]	počet identických stupňů volnosti
g	[mm]	vzdálenost vzpěr jednoho vodícího řetězce
h	[mm]	poloměr platformy
h_{min}	[-]	minimální hodnota determinantu
k	[°]	úhel svírající ramena 1 a 3 (průmět do roviny základny)
k_1		kružnice opsaná koncovým bodem ramene
k_2		kružnice - průnik kulové plochy s rovinou pohybu ramene
m	[°]	úhel svírající ramena 1 a 2 (průmět do roviny základny)
n	[°]	úhel svírající ramena 2 a 3 (průmět do roviny základny)
n'	[-]	počet členů
o	[-]	složka směrového vektoru
o'		osa platformy
p	[-]	složka směrového vektoru
p_x	[mm]	x – pozice průsečíku kulových ploch
p_y	[mm]	y – pozice průsečíku kulových ploch
p_z	[mm]	z – pozice průsečíku kulových ploch
q	[-]	složka směrového vektoru
r	[mm]	poloměr kružnice k_2
s	[-]	proměnná
s'	[-]	počet pasivních spojení
t	[-]	parametr
v	[mm]	vzdálenost bodu P_i od roviny pohybu ramene
θ_i	[°]	úhlové natočení pohonu i
θ_{1i}	[°]	úhel pro výpočet jacobiho matic A a B
θ_{2i}	[°]	úhel pro výpočet jacobiho matic A a B
θ_{3i}	[°]	úhel pro výpočet jacobiho matic A a B
κ_i		kulová plocha i
ρ		rovina pohybu ramene
ϕ_i	[°]	úhel pro výpočet jacobiho matic A a B

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Odhadované podíly realizovaných RTP – 2002[1]	21
Obr. 2-2: Fáze systematického plánování	22
Obr. 2-3: Příklady perif. zařízení pro manipulaci (dopravník, otočný stůl, efektor)[4],[5],[6] ..	24
Obr. 2-4: Bezpečnostní systémy SICK[7]	25
Obr. 2-5: Složení RTP pro svařování[5]	26
Obr. 2-6: RTP pro obrábění[8]	27
Obr. 2-7: Robot pro vrtání u 3-osého obráběcího centra[9]	27
Obr. 2-8: RTP pro tvářeni – průmyslový robot obsluhující hydraulický lis[10]	28
Obr. 2-9: RTP pro ohýbání hydraulických trubek[11]	28
Obr. 2-10: RTP vybavené robotem typu SCARA[12]	29
Obr. 2-11: Robot ABB třídy FlexPicker[13]	29
Obr. 2-12: RTP pro sbírání v potravinářském průmyslu[14]	30
Obr. 3-1: Základní stavba stroje s paralelní kinematikou[16]	31
Obr. 3-2: Rozdělení podle typu pohonu vzpěr[18]	32
Obr. 3-3: Obráběcí centrum GENIUS 500 - Cross Hüller GmbH[17]	33
Obr. 3-4: Kardanův kloub INA GLK 2/3[20]	34
Obr. 3-5: Kulový kloub INA GLK[20]	34
Obr. 3-6: Dynapod s výměnnými moduly (tripod / hexapod)[17]	35
Obr. 3-7: Koncept obráběcího stroje s nůžkovou kinematikou – NILES, Chemnitz[21],[22] ..	36
Obr. 3-8: Obráběcí centrum Metrom P1000[23]	37
Obr. 3-9: Obráběcí jednotka SPIRIT Z3 na bázi tripodu[17]	37
Obr. 3-10: Obráběcí modul TRICEPT T605[24]	38
Obr. 3-11: Hexabend – centrum pro trojrozměrné ohýbání; CAD-Model[25]	39
Obr. 3-12: Robot ADEPT Quattro s650[27]	39
Obr. 3-13: Schéma historického vývoje strojů s PKS[17],[21],[28],[29]	42
Obr. 4-1: Kinematická struktura delta-robotu[21]	43
Obr. 4-2: Rozměry analyzovaného delta-robotu	44
Obr. 4-3: Fotografie a CAD model analyzovaného delta-robotu[30]	45
Obr. 4-4: Motor Beckhoff AM3041C[31]	45
Obr. 4-5: Detail platformy	46
Obr. 4-6: Kulový kloub TEA C10; aplikace na delta-robotu[33]	47
Obr. 4-7: Řídicí systém[30]	47
Obr. 4-8: Souřadné systémy delta-robotu[21]	48
Obr. 4-9: Polohy souřadných systémů delta-robotu ($i=1$)	49
Obr. 4-10: Transformace souřadnic – delta-robot	50
Obr. 4-11: Geometrické řešení IKP ($i=1$)	51
Obr. 4-12: Řešení soustavy parametrických rovnic – zjednodušený 2D případ	53
Obr. 4-13: Natočení pohonů v závislosti na čase	54
Obr. 4-14: Rychlost pohonů v závislosti na čase	54
Obr. 4-15: Zrychlení pohonů v závislosti na čase	54
Obr. 4-16: Hexapod s proměnlivou délkou vzpěr	56
Obr. 4-17: Geometrické řešení DKP	57
Obr. 4-18: Dílčí pracovní prostor delta-robotu[21]	59
Obr. 4-19: Pracovní prostor delta-robotu – řezy v ose z[21]	59
Obr. 4-20: Pracovní prostor delta-robotu - $\theta_i \in 20,260$	60
Obr. 4-21: Pracovní prostor delta-robotu (body) - $\theta_i \in 20,260$	60
Obr. 4-22: Plná kontrakce delta-robotu	61
Obr. 4-23: Pracovní prostor delta-robotu - $\theta_i \in 42,260$	61
Obr. 4-24: Pracovní prostor delta-robotu (body) - $\theta_i \in 42,260$, TCP $z_{max} = 664,5 \text{ mm}$	61
Obr. 4-25: Řešení soustavy parametrických rovnic dvou kružnic	64
Obr. 4-26: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in 20,260$	66

Obr. 4-27: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in 20,260$	66
Obr. 4-28: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in 42,260$	66
Obr. 4-29: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in 42,260$	67
Obr. 4-30: Definice úhlů použitých v jacobihho maticích[36]	68
Obr. 4-31: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in 20,260$	68
Obr. 4-32: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in 20,260$	69
Obr. 4-33: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in 42,260$	69
Obr. 4-34: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in 42,260$	69
Obr. 4-35: Vzájemná spolupráce programů NI LabVIEW a SolidWorks[39]	70
Obr. 4-36: Kalibrační proces[22]	72
Obr. 5-1: Experimentální RTP – izometrický pohled.....	77
Obr. 5-2: Experimentální RTP – pohled zepředu.....	78
Obr. 5-3: Experimentální RTP – pohled shora.....	78
Obr. 5-4: Experimentální RTP – pohled zleva a zprava.....	78
Obr. 5-5: Možné umístění experimentálního RTP	85

Seznam tabulek

Tab. 3-1: Porovnání paralelní a sériové kinematické struktury[21]	40
Tab. 4-1: Porovnání vlastností různých materiálů[32].....	46
Tab. 4-2: Parametry delta robotu	50
Tab. 4-3: Druhy singularit[21],[28].....	63
Tab. 5-1: Komponenty experimentálního RTP (k dispozici).....	81
Tab. 5-2: Komponenty experimentálního RTP (výroba / nákup).....	82
Tab. 5-3: Odhad pořizovacích nákladů.....	83



1. Úvod

V důsledku postupné globalizace trhu jsou výrobci výrobních strojů a robotů i jejich zákazníci vystaveni čím dál větším konkurenčním tlakům. To vede výrobce k vývoji nových technologií, jež by jim poskytly důležitý náskok před konkurencí. Stále častěji se proto vedle tradičních strojů a robotů se sériovou kinematikou začínají objevovat zařízení na bázi nových kinematických struktur. Jedná se zejména o zařízení využívající paralelní kinematiku. Konstrukční součásti takových zařízení jsou namáhány především na tah a tlak a nikoliv na ohyb či krut, jak je tomu u sérové kinematických struktur. V důsledku toho lze výrazně zredukovat hmotnost pohyblivých částí za současného zachování vynikajících hodnot tuhosti statické i dynamické a dosáhnout tak podstatného zlepšení dynamických vlastností daného mechanismu. Vedle toho, že zvýšení zrychlení a ryvu vede ke zvýšení produktivity, má v případě výrobních strojů za následek i zlepšení kvality obroběných ploch a prodloužení životnosti nástroje. První prototypy výrobních strojů a robotů s paralelní kinematickou strukturou (PKS) se objevily již koncem sedmdesátých let. Do začátku let devadesátých však tyto koncepty narážely na technické obtíže zejména v oblasti hardwaru a softwaru. Ty byly překonány vývojem výkonných řídicích systémů a nyní můžeme být svědky toho, jak se zařízení na bázi PKS čím dál tím více prosazují v průmyslu. Zejména v oblasti manipulace mají roboty s PKS svou nezastupitelnou roli. Jsou využívány například při výrobě solárních článků pro fotovoltaické systémy a už tradičně zaujímají významné místo při závěrečné manipulaci a kompletování výrobků v potravinářském průmyslu. V oblasti výrobních strojů je situace komplikovanější. Požadavky na výslednou přesnost stroje a tuhost jednotlivých komponent jsou nesrovnatelně vyšší než v oblasti manipulace. Dalším problémem je nevýhodný poměr mezi pracovním a stavebním prostorem stroje, tepelné dilatace vzpěr či nedostatek jednoduchých a efektivních systémů i metod pro kalibraci těchto strojů. Výrobní stroje s paralelní kinematikou se proto začaly objevovat ve výrobních programech některých výrobců teprve nedávno.

Jednou z již jmenovaných výhod těchto strojů a robotů je vyšší produktivita, což je přímo předurčuje k tomu, aby se staly součástí automatizovaných výrobních systémů, kde může být naplno využit jejich potenciál. Takové systémy jsou vedle automatizované manipulace s nástroji, polotovary či vzniklým odpadem vybaveny i automatizovaným měřením, kontrolou kvality a v neposlední řadě také sofistikovaným systémem řízení. Jednou ze součástí automatizovaných výrobních systémů jsou i tzv. robotizovaná technologická pracoviště.

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením studie experimentálního modelového pracoviště, jehož základem je delta-robot s paralelní kinematikou zkonstruovaný na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Takové robotizované pracoviště by pak mohlo sloužit pro účely výukové, experimentální či například v rámci prezentace ústavu na různých veletrzích, akcích atd. Dále tato práce předkládá rešerši týkající se projekčně – konstrukčního řešení robotizovaných pracovišť, studii současného stavu v oblasti výrobních strojů a robotů s paralelní kinematickou strukturou a v neposlední řadě se tato práce zabývá kinematickou analýzou výše jmenovaného robotu. Určení kinematiky je nezbytné například pro simulaci pohybů robotu, vyšetření pracovního prostoru či pro kalibraci. Výsledky této práce tedy mohou být využity i pro další experimenty s delta-robotem.



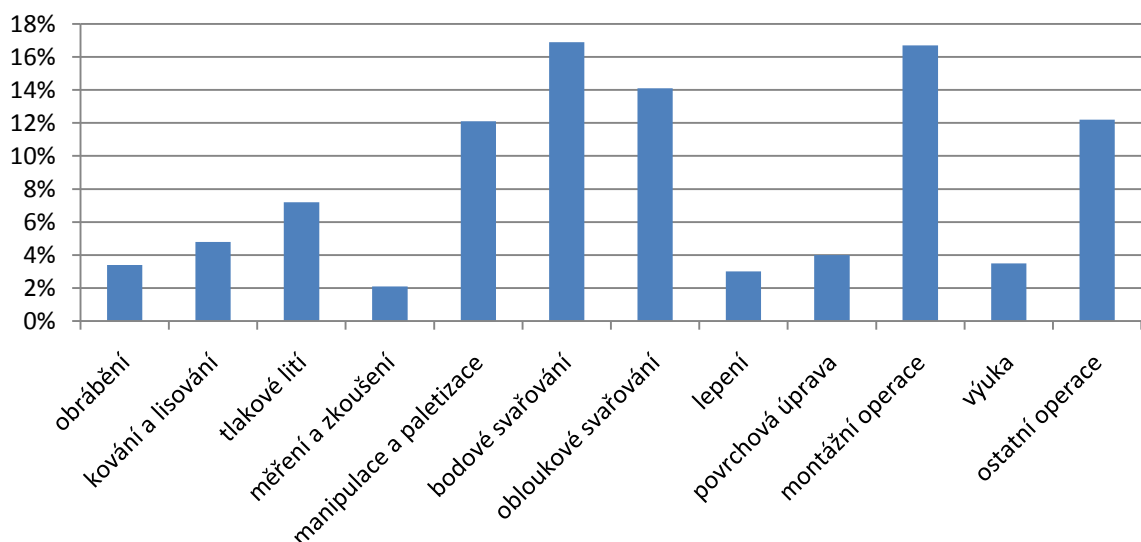
2. Konstrukce RTP

Robotizované technologické pracoviště (RTP) představuje uskupení technologických zařízení, průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM), které autonomně v automatickém cyklu vykonává manipulační nebo technologické operace daného výrobního procesu, nebo jeho části. Pracoviště je řízeno řídicími systémy jednotlivých strojů a robotů, jejichž vzájemná koordinace je zabezpečena nadřazeným řídicím systémem.[1],[2]

Tyto pracoviště se mohou s výhodou stát součástí velkých automatizovaných výrobních systémů na úrovni závodu, přičemž si takové systémy zachovávají relativně velkou míru flexibility, což v dnešní době, kdy se výrobci snaží maximálně vyjít vstříc požadavkům svých zákazníků, hraje naprosto zásadní úlohu. Sjednocení těchto pracovišť do automatizovaných výrobních systémů je zajištěno centrálním systémem mezioperační dopravy.[3]

Robotizovaná technologická pracoviště lze podle jejich určení dělit na RTP pro:

- obrábění
- kování a lisování
- tlakové lití
- měření a zkoušení
- manipulaci a paletizaci
- bodové svařování
- obloukové svařování
- lepení
- povrchovou úpravu
- montážní operace
- výuku
- ostatní operace



Obr. 2-1: Odhadované podíly realizovaných RTP – 2002[1]



2.1. Postup při navrhování RTP

Jednoznačný a zaručený postup, který by vedl k návrhu optimálního řešení robotizovaného technologického pracoviště či jeho umístění v rámci výrobního systému, neexistuje. Existují však metody, které mohou k nalezení optimálního řešení popř. k nalezení řešení, jež se optimálnímu blíží, značně napomoci.

Jedná se o metody:[1]

- empirické
- systematické
- graficko-početní
- matematické

2.1.1. Empirické metody

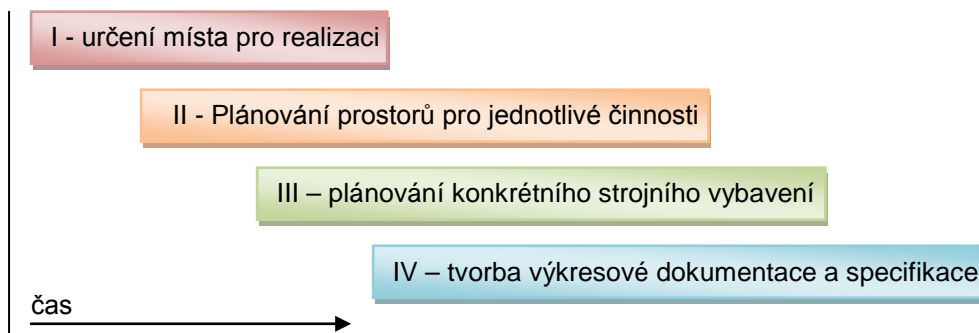
Tyto metody staví především na vlastních zkušenostech projektanta. Výchozími podklady jsou popisy technologických zařízení a analýza materiálového toku. Jedná se o metody jednoduché a časově nenáročné, avšak lze využít většinou jen na projekty poměrně malého rozsahu.

2.1.2. Systematické metody

Do těchto metod zahrnujeme především dvě spolu související metody. Systematické projektování metodou SLP (Systematic Layout Planning) a systematické navrhování manipulace metodou SHA (Systematic Handling Analysis).

Metody systematického plánování vždy závisí na třech základních aspektech, kterými jsou:

- **vztahy** mezi činnostmi a procesy
- **prostory** pro jednotlivé činnosti – jejich druhy, velikost a tvar
- **uspořádání** těchto vztahů a prostorů do efektivního plánu



Obr. 2-2: Fáze systematického plánování

2.1.3. Graficko-početní metody

Graficko-početní metody spočívají v nalezení nejvýhodnějšího rozmístění jednotlivých stanovišť na základně grafického vyjádření materiálového toku. K tomu je používáno několik metod:[1]

- trojúhelníková metoda
- kruhová metoda
- metoda souřadnic

2.1.4. Matematické metody

V případě matematických metod se vychází z matematického modelu výrobního procesu. K tomu, aby byly nalezeny optimální parametry procesu, slouží celá řada matematických optimalizačních metod - většinou se jedná o metody heuristické.

2.2. Technická dokumentace RTP

Technická dokumentace RTP je v praxi nezbytná pro samotnou realizaci RTP. Dokumentace řeší především prostorové uspořádání použitých strojů a zařízení v RTP a jeho případné napojení na další pracoviště.

Během návrhu je nutné volit rozmístění strojů a zařízení i s ohledem na polohu páteřních rozvodů energií, médií či sběrnic systémů centrálního řízení.

Technická dokumentace zpravidla obsahuje několik základních součástí, kterými jsou:[1]

- dokumentace vlastního RTP
- dokumentace systému řízení
- provozní rozvod silnoproudu
- provozní potrubí
- provozní vzduchotechnika

Součástí každé z těchto položek je:

- technická zpráva
- výkresová dokumentace
- seznam strojů a zařízení

Mimo výše uvedených položek je nutné vyčíslit náklady na realizaci daného pracoviště a provést analýzu a hodnocení rizik pro zajištění maximální bezpečnosti práce. Zařízení pak musí být zkonstruováno s ohledem na výsledky analýzy. Výrobce technického zařízení provozovaného na území Evropské unie musí vypracovat ES prohlášení o shodě. Veškerá dokumentace nutná k vydání prohlášení musí být k dispozici na vyžádání.



2.3. Periferní zařízení RTP

Pojem periferní zařízení RTP je velmi široký. Patří sem veškerá zařízení pro zajištění plně automatizované činnosti robotizovaného pracoviště, dále zařízení pro přísun a odsun materiálu v RTP, zařízení, jež zvyšují dosah a manipulační schopnosti PRaM, a v neposlední řadě sem spadají zařízení zajišťující bezpečnou interakci člověka s RTP.[2]

Periferní zařízení RTP se velmi liší v závislosti na druhu technologie daného robotizovaného pracoviště. Dále je jejich výběr ovlivněn druhem použitého výrobního stroje, PRaM, tvarovou či rozměrovou odlišností polotovarů, atd. I přes uvedené odlišnosti je snaha tyto zařízení pro jednotlivé technologie maximálně typizovat, což vede k dalšímu snižování nákladů na pořízení RTP. Podrobně se problematikou periferních zařízení RTP zabývá publikace [2].

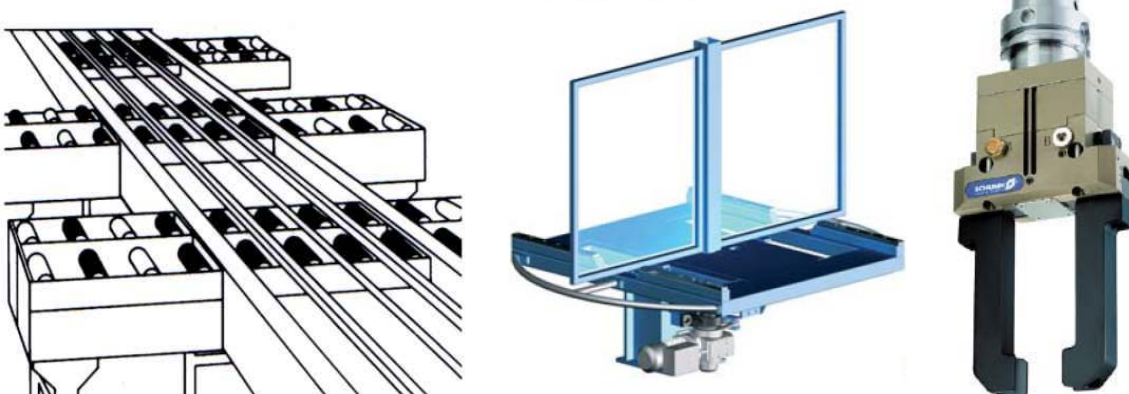
Podle účelu můžeme periferní zařízení dělit na základní skupiny:

2.3.1. Periferní zařízení pro manipulaci

Do této skupiny řadíme zařízení, která slouží pro automatickou manipulaci s materiálem, nástroji či vzniklým odpadem. Manipulaci s materiálem se myslí operační manipulace a polohování polotovarů a dále jejich mezioperační doprava a skladování.

Mezi tyto zařízení spadají:

- dopravníky
- otočné stoly
- zakladače
- skluzy
- polohovadla
- pojezdy
- manipulační hlavice PRaM
- senzory
- ostatní zařízení



Obr. 2-3: Příklady perif. zařízení pro manipulaci (dopravník, otočný stůl, efektor)[4],[5],[6]



2.3.2. Periferní zařízení daného technologického procesu

Jedná se o periferní zařízení, jež mají přímou souvislost s druhem technologie daného robotizovaného pracoviště. Například pro technologii svařování jsou to svařovací hubice, držáky cívek svařovacího drátu, svařovací zdroje, či jednotky pro čištění svařovacích hořáků. U obrábění to mohou být speciální obráběcí hlavice, měřicí systémy či upínací přípravky atd.

2.3.3. Periferní zařízení pro zajištění bezpečnosti práce

V dnešní době hraje bezpečnost práce zcela klíčovou roli. Základní podmínky, které musí splňovat každé robotizované pracoviště, jsou následující:

- Robot případně polohovadlo nesmí přijít při práci do styku s obsluhou. Veškeré dopravníky, skluzy, atd. musí být zajištěny, aby nedošlo k zachycení obsluhy, skřípnutí končetin apod.
- Prostor RTP musí být zajištěn takovým způsobem, aby nebylo možné pracoviště spustit, nachází-li se uvnitř, např. za optickou závorou, nepovolaná osoba.
- RTP nesmí v žádném případě ohrožovat své okolí nebezpečným zářením, zplodinami, atd. Např. RTP pro svařování musí být vybaveno speciálními zástěnami a digestořemi.
- Bezpečnostní systém musí být kompletně řízen nadřazeným nezávislým řídicím systémem robotizovaného pracoviště. Panely obsluhy musí být vybaveny STOP tlačítky pro případy nebezpečí.
- V případě, že jsou použity bezpečnostní závory, musí jejich výběr odpovídat platným normám. Navíc musí konstruktér vypočítat minimální bezpečnou vzdálenost, do které může být daná závora umístěna.



Obr. 2-4: Bezpečnostní systémy SICK[7]

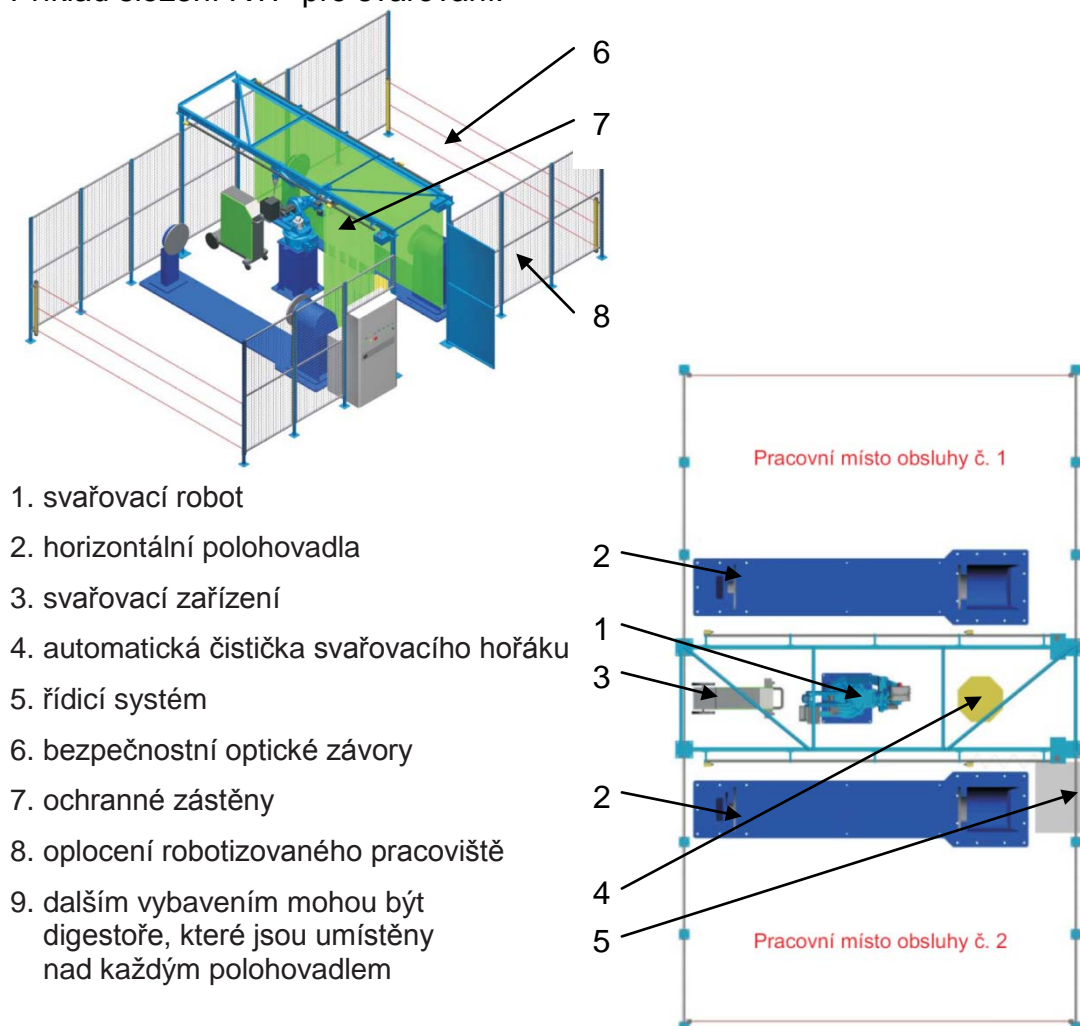
2.4. Příklady RTP

2.4.1. RTP pro svařování

Technologie svařování je z hlediska automatizace velmi výhodná. Robotizované svařování přináší oproti ručnímu svařování řadu výhod. Mezi ně patří zvýšení produktivity práce, zlepšení pracovního prostředí, možnost svařovat i obtížně svařitelné materiály, či vysoká kvalita svarů. K masivnímu rozšíření průmyslových robotů v oblasti svařování došlo na počátku 80. let zejména díky automobilovému průmyslu.

Zasazení průmyslového robotu do robotizovaného pracoviště, které je vedle polohovadel a bezpečnostních systémů vybaveno například i systémy pro automatické čištění svařovacích hořáků, může zásadně zvýšit produktivitu takového robotu při zachování vysoké míry flexibility celého pracoviště. Díky modulárním řešení RTP, které představují např. flexibilní kompaktní buňky německé firmy Carl Cloos Schweißtechnik GmbH, se značně zredukovaly pořizovací náklady a zakoupení robotizovaného pracoviště pro svařování je dnes reálné i pro malé a střední firmy.

Příklad složení RTP pro svařování:



Obr. 2-5: Složení RTP pro svařování[5]



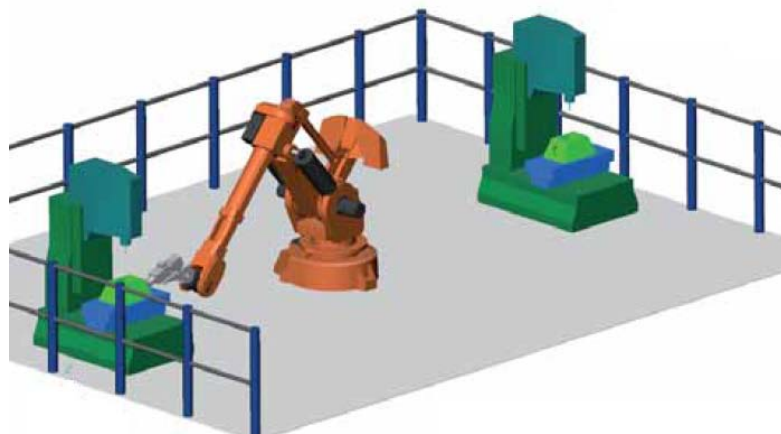
2.4.2. RTP pro obrábění

Obrábění patří mezi nejrozšířenější strojírenské způsoby výroby součástí. Robotizované pracoviště pro obrábění se obvykle sestává z jednoho či více CNC obráběcích center, které jsou vybaveny automatickou výměnou nástrojů, a manipulátoru či průmyslového robotu pro manipulaci s polotovary a obrobky. Díky této kombinaci lze naplno využít potenciál obráběcího centra a zvýšit tím podstatně produktivitu výroby.



Obr. 2-6: RTP pro obrábění[8]

Vedle výše uvedené klasické koncepce RTP pro obrábění můžeme nalézt i takové aplikace, kdy se průmyslový robot přímo podílí na samotném výrobním procesu. Koncový efektor robotu pak může být vybaven vřetenem pro frézování či vrtání. Díky tomu řešení je možné vrtat do obrobku díry v pěti osách i v situaci, kdy má firma k dispozici například pouze jednoduché 3-osé obráběcí centrum. Lze tak ušetřit nemalé finanční prostředky, neboť pořizovací cena průmyslového robotu, který má navíc velmi univerzální použití, je několikanásobně nižší než u víceosého obráběcího centra. Nedostatkem průmyslového robotu je poměrně malá přesnost polohování, tu však lze zvýšit pomocí speciálních externích měřicích systémů.



Obr. 2-7: Robot pro vrtání u 3-osého obráběcího centra[9]

2.4.3. RTP pro tváření

Tváření je velmi progresivní technologií s velkou produktivitou práce za současné úspory materiálu. Tváření můžeme dělit na:[1]

- *Tváření plošné* – při kterém nedochází ke změně průřezu
 - stříhání
 - ohýbání
 - děrování
 - atd.
- *Tváření objemové* – za tepla či za studena
 - protlačování
 - kování (volné, zápusťkové)
 - kalibrování, ražení
 - atd.

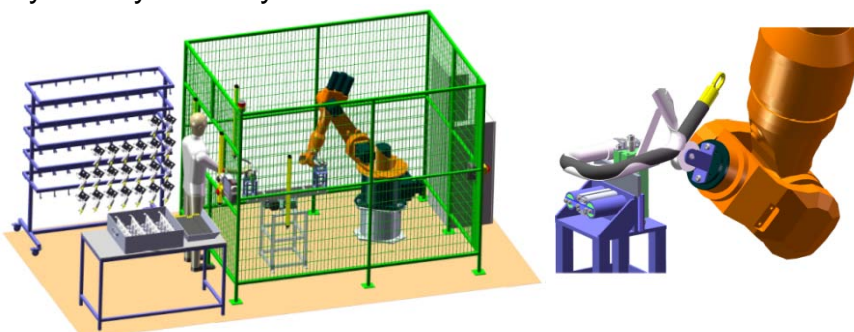
Neboť produktivita dnešních tvářecích strojů daleko přesahuje možnosti lidské obsluhy, směřuje vývoj k plné automatizaci tvářecích procesů. A nejedná se pouze o produktivitu. Automatizace v tomto případě zásadním způsobem přispívá ke zvýšení bezpečnosti práce.

Na Obr. 2-8 je ukázka klasické koncepce RTP pro tváření, kdy průmyslový robot obsluhuje hydraulický lis.



Obr. 2-8: RTP pro tváření – průmyslový robot obsluhující hydraulický lis[10]

Robot však nemusí být pouze v pozici manipulačního zařízení. Velmi zajímavý návrh jednoho RTP vznikl na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Průmyslový robot zde slouží přímo k ohýbání hydraulických trubek.



Obr. 2-9: RTP pro ohýbání hydraulických trubek[11]



2.4.4. RTP pro manipulaci

Jednou z nejvýznamnějších oblastí, kde se uplatňují PRaM, je manipulace, paletizace či balení. Pro tyto aplikace obvykle není nutné využívat klasické průmyslové roboty se šesti stupni volnosti a tzv. angulárním pracovním prostorem. Většinou postačí roboty se čtyřmi stupni volnosti, kdy tři stupně volnosti slouží k dosažení pozice v prostoru a čtvrtý stupeň (rotační osa) umožňuje změnu orientace tělesa v pracovní rovině.

Často se používají např. roboty typu SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Tyto roboty vznikly roku 1978 na univerzitě v Yamanashi v Japonsku. Jsou zejména vhodné na rychlou manipulaci s materiálem v rovině – úlohy pick and place. Díky své rychlosti, přesnosti a vysoké spolehlivosti se používají i pro montážní aplikace v elektrotechnickém průmyslu.



Obr. 2-10: RTP vybavené robotem typu SCARA[12]

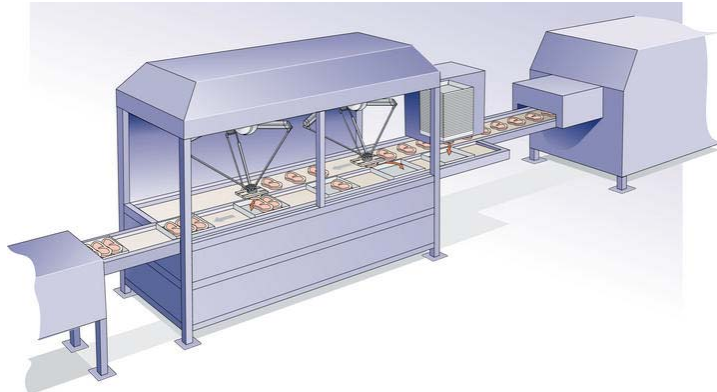
Dalším hojně využívaným typem robotu pro výše uvedené aplikace jsou roboty s paralelní kinematickou strukturou typu delta. Tento typ vynalezl na konci osmdesátých let Raymond Clavel ze Švýcarského národního technologického institutu v Lausanne EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne).



Obr. 2-11: Robot ABB třídy FlexPicker[13]



Kinematická stavba delta-robotu je podrobně popsána v kapitole 4. Na Obr. 2-11 je zobrazen delta-robot společnosti ABB. Tento robot třídy FlexPicker s PKS je k dispozici i v nerezovém omyvatelném provedení a splňuje ty nejpřísnější hygienické požadavky pro nasazení v potravinářském průmyslu.



Obr. 2-12: RTP pro sbírání v potravinářském průmyslu[14]



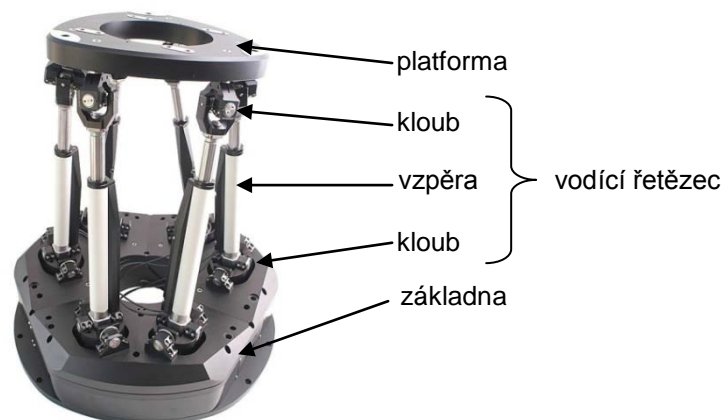
3. Výrobní stroje a roboty na bázi PKS

V této kapitole je uvedena analýza současného stavu v oblasti výrobních strojů a robotů s paralelní kinematickou strukturou včetně možností jejich uplatnění v praxi. Mimo to se tato kapitola zabývá historickým vývojem těchto zařízení a jejich základními stavebními komponenty.

3.1. Základní stavba

3.1.1. Definice

Paralelně kinematický mechanismus je uzavřený kinematický řetězec, jehož koncový člen (platforma) je se základnou spojen pomocí nejméně dvou vodících řetězců. Vodící řetězec tvoří nejméně jeden hnací člen a dva klouby.[15]



Obr. 3-1: Základní stavba stroje s paralelní kinematikou[16]

3.1.2. Vzpěry a jejich pohon

Vzpěra představuje aktivní část vodícího řetězce, která spojuje pevnou část mechanismu s pohyblivou platformou. Vzpěry jsou teoreticky namáhány pouze na tah a tlak. To však platí jen v ideálním případě, kdy jsou vzpěry považovány za dokonale tuhé a klouby za ideální – tzn., že jsou rovněž dokonale tuhé a všechny osy rotace se protínají v jediném bodě. V reálných případech, a to zejména v oblasti výrobních strojů, však nelze zanedbat ani vliv zatížení v ohybu nebo krutu. Další komplikací představuje silně nelineární závislost mezi tuhostí mechanismu a polohou platformy (resp. koncového efektoru) v pracovním prostoru. Je proto nutné již v počáteční fázi vývoje takového výrobního stroje či robotu s PKS pečlivě vybrat optimalizovat jeho strukturu.[17]

V zásadě rozlišujeme dva základní typy vzpěr – vzpěry s proměnnou délkou (mění se vzdálenost mezi klouby) a vzpěry s neproměnnou délkou (mění se poloha kloubů).



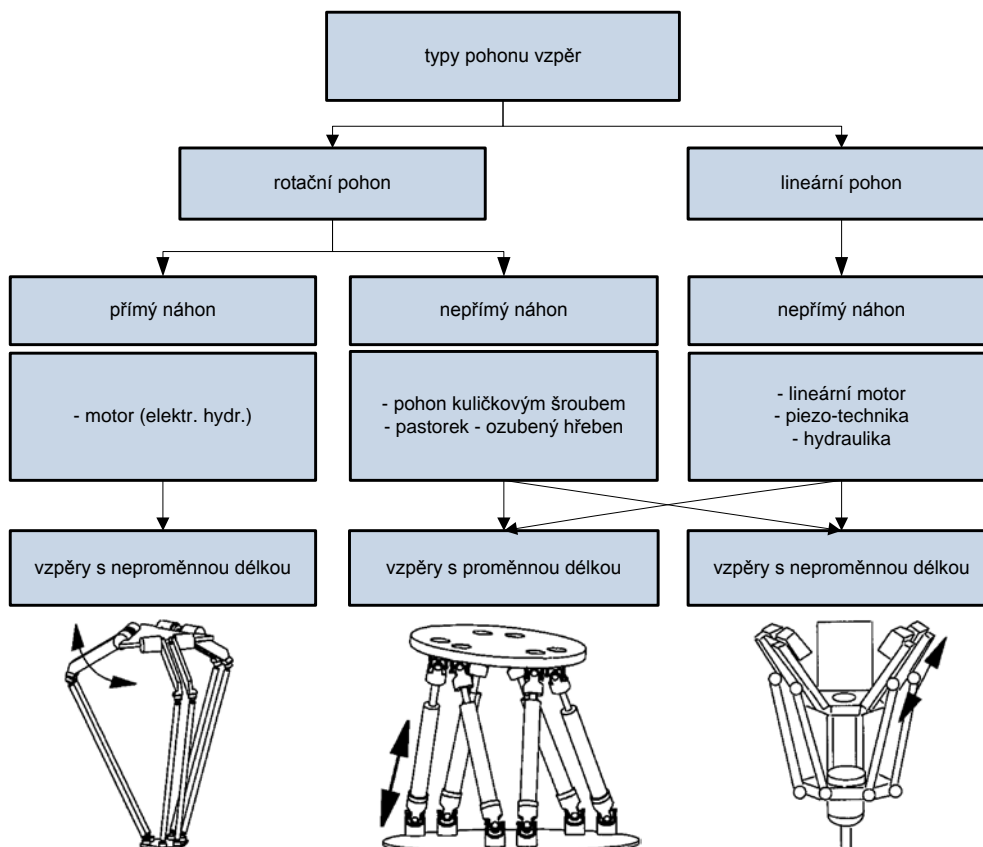
Podle [17] a [18] mají struktury s proměnnou délkou vzpěr tyto výhody:

- větší možný pracovní prostor
- menší zatížení vzpěr a vedení
- jednodušší kalibrace (nižší počet parametrů)
- vyšší přesnost – vzdálenost místa měření od místa působení je menší
- menší změny vlastností mechanismu v rámci pracovního prostoru

Naproti tomu výhody struktury s neproměnnou délkou vzpěr jsou následující:

- vyšší tuhost
- menší požadovaný úhlový rozsah kloubů
- kompaktnější konstrukce kloubů
- pohony lze umístit mimo vzpěry – menší teplotní dilatace

U výrobních strojů a robotů s PKS se používají jak pohony rotační, tak pohony lineární. Velkou výhodou pohonů rotačních je jejich vysoká účinnost. Často je potřeba transformovat pohyb rotační na pohyb lineární. K tomu se využívá kuličkový šroub s maticí nebo kombinace pastorku a ozubeného hřebene. Pohony lineární vynikají výbornými dynamickými vlastnostmi, avšak mají nižší účinnost spojenou s velkým vývinem tepla. Používají se tedy zejména u struktur s neproměnnou délkou vzpěr, kde můžeme snadněji zajistit jejich chlazení.



Obr. 3-2: Rozdělení podle typu pohonu vzpěr[18]



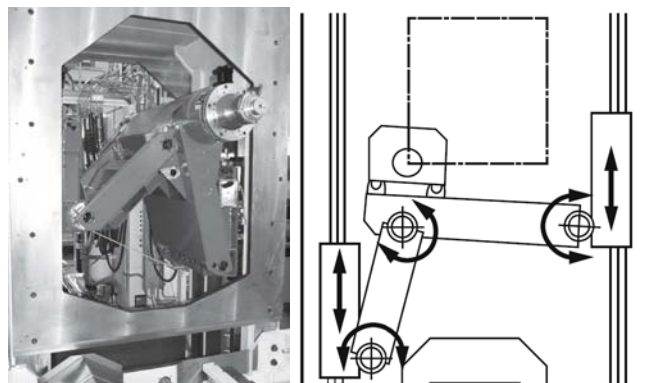
3.1.3. Klouby

U paralelních kinematik se klouby nacházejí přímo v silovém toku a zásadním způsobem tak ovlivňují chování celé struktury. To v případě robotů s PKS, které slouží většinou k vysokorychlostní manipulaci s předměty o nižších hmotnostech, nepředstavuje větší problém. Pro tyto aplikace lze využít celou řadu komerčně dostupných kloubů s různým počtem stupňů volnosti. U výrobních strojů s PKS je situace zcela odlišná. V současné době většina sériově vyráběných kloubů nedosahuje požadovaných vlastností - jsou to především vysoká tuhost, vysoká statická únosnost, nízká hmotnost, vysoká přesnost, malé opotřebení, dlouhá životnost a v neposlední řadě dostatečné úhlové rozsahy. Rovněž vlastní vývoj prostorových kloubů představuje problém, neboť prozatím chybí dostatek vhodných ložisek ve standardním sortimentu. První společností, která si všimla této mezery na trhu, byla společnost INA, jež ve spolupráci s předními světovými univerzitami a vývojovými pracovišti začala s vývojem sériových komponentů pro výrobní stroje s PKS. Typické příklady těchto kloubů jsou uvedeny v následujících odstavcích.[17],[18]

3.1.3.1. Rotační klouby – stupeň volnosti 1

Rotační klouby s jedním stupněm volnosti umožňují rotaci v jedné ose a obecně se používají u rovinných mechanismů. Díky jejich jednoduché konstrukci můžeme dosáhnout tuhostí až 2000 N/ μm .

Na Obr. 3-3 je zobrazeno obráběcí centrum společnosti Cross Hüller GmbH GENIUS 500. Jedná se principiálně o obráběcí centrum na bázi sériové kinematiky, jehož vřetenno je umístěno v rovinném mechanismu s PKS.



Obr. 3-3: Obráběcí centrum GENIUS 500 - Cross Hüller GmbH[17]

3.1.3.2. Rotační klouby – stupeň volnosti 2 a 3

Pro dosažení pohybu v prostoru jsou zapotřebí rotační klouby se dvěma a třemi stupni volnosti. Existují dva základní typy těchto kloubů – kardanovy klouby a kulové klouby. Specifické požadavky na různé aplikace vedly k vývoji různých konstrukčních typů těchto kloubů. Např. u frézování



je zapotřebí dosáhnout maximální tuhosti a přesnosti kloubů. U manipulačních zařízení jsou prioritou velké úhlové rozsahy k obsáhnutí co možná největšího pracovního prostoru a důležitá je i nízká hmotnost kloubů kvůli zachování co nejvyšších hodnot ryvu a zrychlení.[19]

Kardanovy klouby

Vyrábí se v konstrukčních provedeních se dvěma nebo se třemi stupni volnosti. Skládají se ze dvou za sebou řazených rotačních kloubů, jejichž osy jsou na sebe vzájemně kolmé. Volitelná třetí osa je tvořena radiálně-axiálním ložiskem.



Obr. 3-4: Kardanův kloub INA GLK 2/3[20]

Kulové klouby

Tyto klouby se třemi stupni volnosti při dodržení vysoké geometrické přesnosti jednotlivých komponent vykazují výborné hodnoty tuhosti i únosnosti a jsou proto vhodné zejména pro frézovací stroje. Na Obr. 3-5 je zobrazen kulový kloub ze sortimentu společnosti INA, jenž se skládá z kulového čepu opatřeného vnějším závitem a dvojdílného vnějšího pouzdra. Mezi pouzdrem a čepem je velké množství kuliček – jedná se v podstatě o valivé vedení na kulové ploše.



Obr. 3-5: Kulový kloub INA GLK[20]



3.1.4. Hybridní kinematika

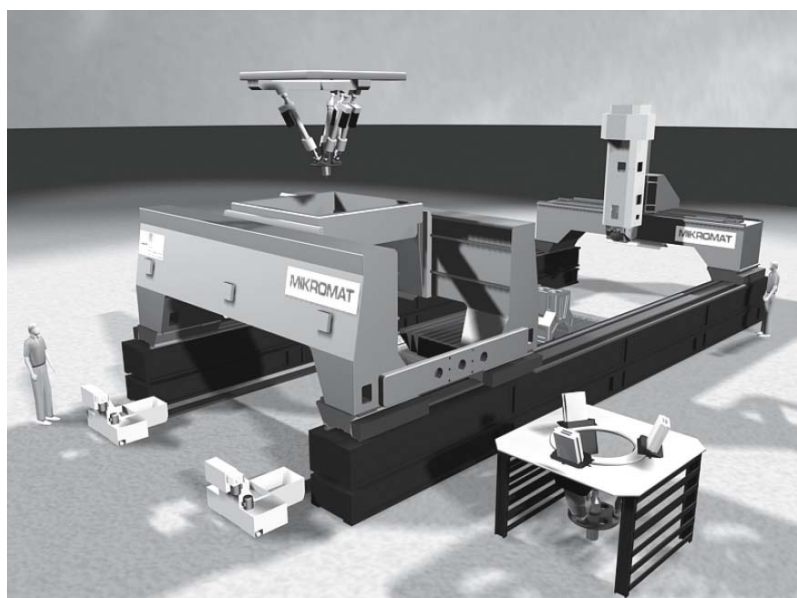
Vedle mechanismů s čistě paralelně kinematickou strukturou existují i mechanismy s tzv. hybridní kinematikou. Jedná se o mechanismy, u nichž je kinematika paralelní kombinována s kinematikou sériovou. Účelem této kombinace je využití výhod, které obě koncepce přináší – velký pracovní prostor sériové kinematiky a výborné dynamické vlastnosti a tuhost kinematiky paralelní.

Mechanismy s hybridní kinematikou můžeme dále dělit na mechanismy s plnou nebo částečnou redundancí.

3.1.4.1. Mechanismy s plnou redundancí

U těchto mechanismů je obvykle na sériově kinematickou část umístěna část paralelně kinematická, přičemž možnosti pohybu v jednotlivých osách (x , y , z) se u obou částí plně kryjí. Příkladem takovéto koncepce je Dynapod z institutu Fraunhofer IWU. Sériová kinematika nese čtvercový nosič, v němž se nalézá obráběcí hlava na bázi paralelní kinematiky (tripod či hexapod).

Výhodou těchto koncepcí je výborná dynamika a vysoká přesnost, nevýhodou představuje nízká tuhost.



Obr. 3-6: Dynapod s výměnnými moduly (tripod / hexapod)[17]

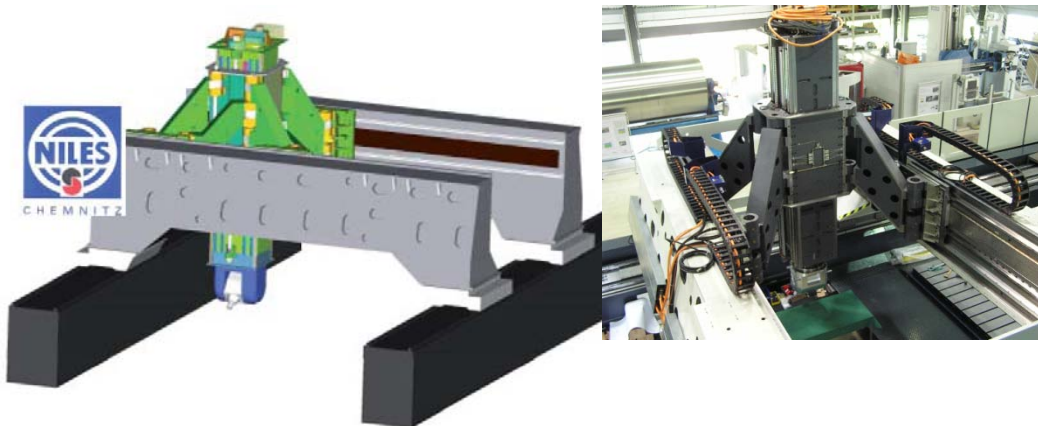
3.1.4.2. Mechanismy s částečnou redundancí

U mechanismů s částečnou redundancí není nemožné docílit pohyb ve všech osách (x , y , z) jen paralelně kinematickou či sériově kinematickou částí, ale je nutná jejich neustálá vzájemná spolupráce.



Výhodou těchto koncepcí je zvýšení dynamiky sérově kinematických os za současného zachování vysoké přesnosti a tuhosti.

Příkladem mechanismu s hybridní kinematikou s částečnou redundancí je koncept výrobního stroje firmy NILES. Jedná se o obráběcí centrum s tzv. nůžkovou kinematikou.



Obr. 3-7: Koncept obráběcího stroje s nůžkovou kinematikou – NILES, Chemnitz[21],[22]

3.2. Nasazení v průmyslu

3.2.1. Obrábění

3.2.1.1. Výroba nástrojů a forem

U výroby nástrojů a forem je požadováno co nejrychlejší opracování obrobku za současného zachování vysoké přesnosti. Při výrobě forem představuje čas, kdy je nástroj v záběru, až 95% celkového času obrábění. Tuto část můžeme výrazně ovlivnit zlepšením dynamických vlastností stroje. Zvýšení zrychlení a ryvu vede k výraznému zvýšení posuvových rychlostí a zkrácení času obrábění. To vedle zvýšení produktivity přináší několik dalších výhod, jako zvýšení životnosti nástroje, zlepšení kvality obrobených ploch, či snížení energetické náročnosti.[17]

Již byla představena řada prototypů výrobních strojů s paralelní kinematikou a v poslední době se začínají objevovat i první sériově vyráběné výrobní stroje s PKS. Zajímavým příkladem takového stroje je obráběcí centrum Metrom P1000 firmy Metrom Mechatronische Maschinen GmbH. Jedná se o poměrně netradiční koncepci paralelně kinematického stroje s pěti stupni volnosti. Díky velkému rozsahu naklápění vřetene je u něj poprvé mezi stroji s PKS možné kompletní obrábění obrobků z pěti stran.

Tento stroj patří do oblasti menších obráběcích strojů. U středních a větších strojů není použití čistě paralelně kinematické struktury, vzhledem k nevýhodnému poměru mezi pracovním a stavebním prostorem, příliš



pravděpodobné. V oblasti středních a větších strojů se očekává nasazení tzv. hybridních kinematik (viz. odst. 3.1.4).



Obr. 3-8: Obráběcí centrum Metrom P1000[23]

3.2.1.2. Letecký průmysl


V leteckém průmyslu jsou přednostně využívány velmi rozměrné součásti z monolitických polotovarů. Výhodou takovýchto součástí je například nižší hmotnost, neboť není nutné používat žádné spojovací prvky. Jako polotovary se zpravidla používají velké ploché díly či dlouhé tenké profily z vysokopevnostních slitin hliníku, titanu a oceli. Kvůli velikosti těchto polotovarů jsou nasazovány takové obráběcí stroje, kde všechny pohyby leží na straně nástroje. Zpravidla se jedná o 5-osá obráběcí centra, aby bylo možné obrábět ty nejkomplicovanější geometrie a docílit tak co největší redukce hmotnosti.[17]

Pro hrubování hliníkových slitin musí být obráběcí stroje vybaveny vřetenem o vysokém výkonu, naproti tomu u obrábění titanu a oceli je požadován dostatečný krouticí moment. Zajímavé řešení představuje frézovací hlava firmy Dörries Scharmann Technologie GmbH na bázi tripodu, jež přináší následující výhody:[17]

- robustnost a spolehlivost
- snížení hmotnosti
- rychlé naklápění
- vysokou statickou tuhost
- zkrácení procesních časů (cca. 42%)
- vyšší kvalitu obrobků

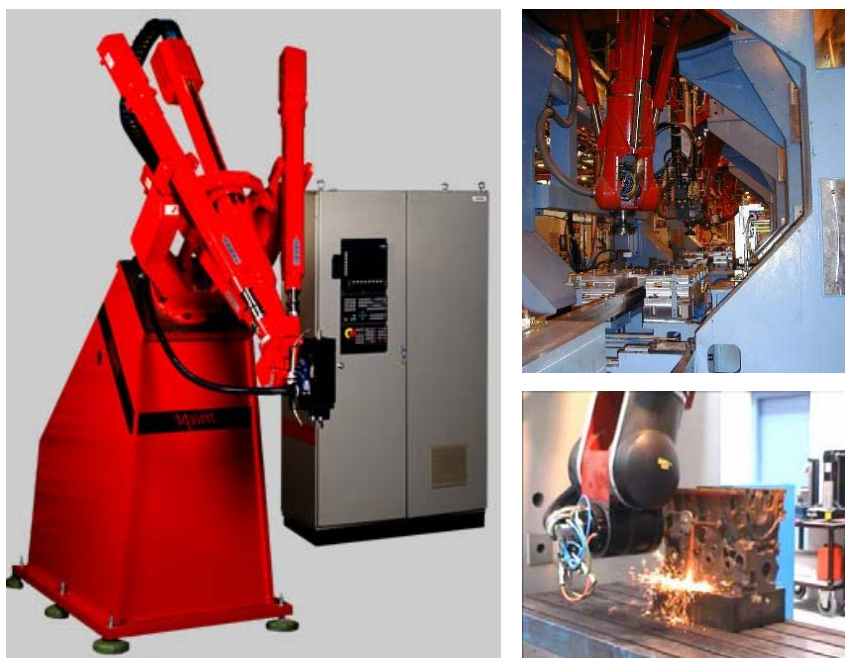


Obr. 3-9: Obráběcí jednotka SPIRIT Z3 na bázi tripodu[17]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 38
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

3.2.1.3. Automobilový průmysl

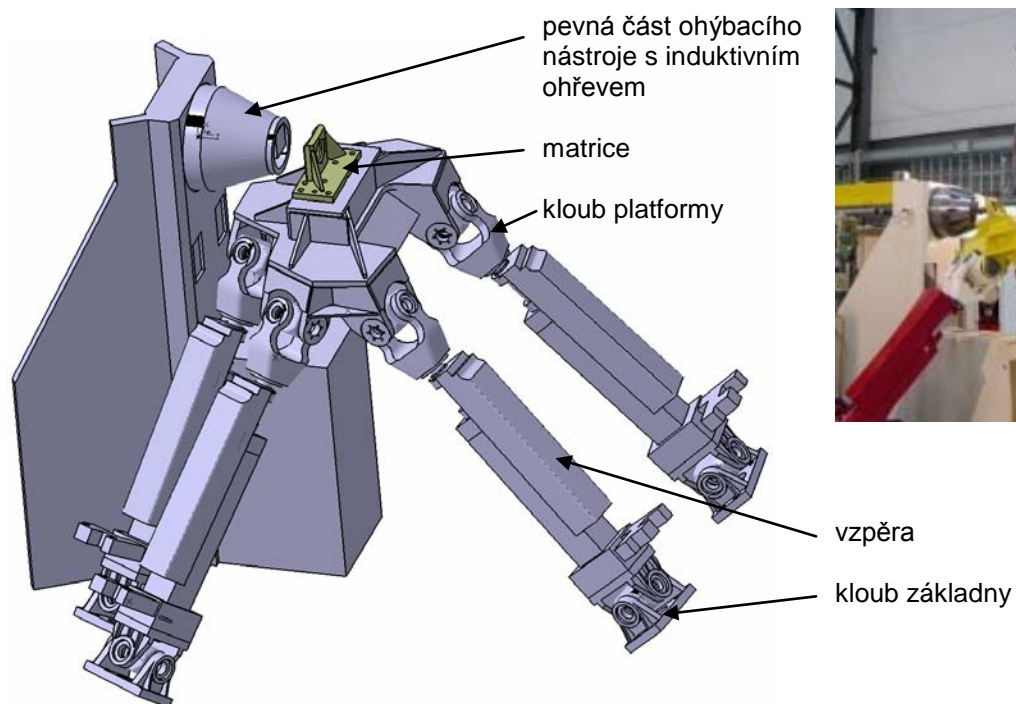
V automobilovém průmyslu jsou na obráběcí stroje kladeny tři základní požadavky. Stroje musí být vysoce flexibilní, neboť musí být schopny obrábět různé polotovary, které se liší jak tvarem, tak i použitým materiálem, dále musí být vysoce produktivní a ekonomické. Zvýšení produktivity lze dosáhnout použitím speciálních vysokodynamických pohonů. To však hovoří proti požadavku na nízké pořizovací náklady i náklady, jež souvisí s údržbou. Tyto protichůdné požadavky hovoří opět pro nasazení strojů s paralelní kinematikou. Příkladem takového stroje je TRICEPT od švédské firmy SMT TRICEPT AB. V současné době se jedná o nejspěšnější stroj s PKS s více jak dvěma sty prodanými kusy. [17]



Obr. 3-10: Obráběcí modul TRICEPT T605[24]

3.2.2. Tváření

Stroje s PKS se uplatňují i v oblasti tváření. Dokladem toho je stroj pro trojrozměrné ohýbání trubkových profilů HEXABEND, vyvinutý na institutu Fraunhofer IWU. Jedná se o hexapod s hydraulicky poháněnými vzpěrami, na jehož platformě je umístěna pohyblivá část ohýbacího nástroje (tzv. matrice), zatímco pevná část nástroje je pevně spojena se základnou. Profil je umístěn do vedení a je tlačěn přes induktivně ohřívanou pevnou část ohýbacího nástroje. Dále se profil posouvá do pohyblivé matrice. Geometrie ohybu je tedy definována pohybem matrice (6 stupňů volnosti) za současného posuvu profilu a nikoliv tvarem nástroje, jak je tomu u běžných zařízení. Velkou výhodou tohoto stroje je pak vysoká flexibilita, neboť pro jakýkoliv poloměr ohybu stačí pouze jeden nástroj (pro daný průměr profilu). Tyto profily se využívají jako polotovary pro tváření vnitřním tlakem nebo jako konstrukční součásti. [17],[25]



Obr. 3-11: Hexabend – centrum pro trojrozměrné ohýbání; CAD-Model[25]

3.2.3. Manipulace

V oblasti manipulace mají stroje resp. roboty s PKS již své pevné postavení. Používají se pro manipulační i montážní operace s méně hmotnými předměty, kde lze plně využít výborných dynamických vlastností těchto robotů. Například robot ABB IRB 340 třídy FlexPicker je schopen při manipulaci s předměty do 1kg pracovat se zrychlením 100 m/s^2 a do maximální rychlosti 10 m/s. Díky tomu je schopen vykonat až 150 pracovních manipulačních cyklů typu Pick & Place (vezmi a umísti) za minutu s přesností polohování 0,1 mm. V současné době nejrychlejším sériově vyráběným robotem s PKS je 4 ramenný robot ADEPT Quattro se 3 stupni volnosti.[26]

Tyto roboty jsou využívány při výrobě solárních článků u fotovoltaických systémů a už tradičně zaujímají významné místo při závěrečné manipulaci a kompletování výrobků v potravinářském průmyslu.[27]



Obr. 3-12: Robot ADEPT Quattro s650[27]

3.2.4. Porovnání paralelní a sériové kinematické struktury

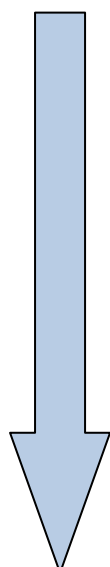
V Tab. 3-1 je uvedeno porovnání výhod a nevýhod strojů a robotů na bázi sériové a paralelní kinematické struktury.

	paralelní kinematika	sériová kinematika
výhody	<ul style="list-style-type: none"> vysoká tuhost struktury vzpěry jsou zatíženy převážně na tah/tlak nízká hmotnost pohyblivých částí určeny pro HSC obrábění bezproblémový přívod energií a médií mnoho identických a opakovatelných součástí realizace rotačního pohybu pouze pomocí translačních pohonů 	<ul style="list-style-type: none"> dobry poměr pracovní/stavební prostor kvadratický pracovní prostor
nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> pro jakýkoliv pohyb je nutné současné řízení všech os zvýšené nároky na řízení při transformaci souřadnic nevýhodný poměr pracovní/stavební prostor omezené naklápění platformy možná kolize mezi vzpěrami 	<ul style="list-style-type: none"> vůle v kloubech a v převodech se sčítají pouze uspokojivá tuhost vysoké hmotnosti pohyblivých částí

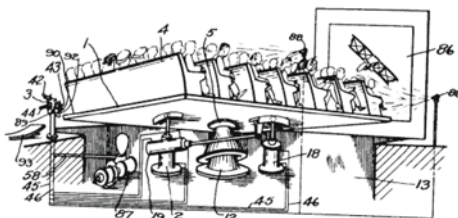
Tab. 3-1: Porovnání paralelní a sériové kinematické struktury[21]

3.3. Historický vývoj strojů s PKS

V následujícím odstavci je uvedeno stručné schéma historického vývoje strojů s PKS, jež je založeno na příkladech konkrétních zařízení. Podrobně se historickým vývojem těchto strojů zabývá např. publikace [17].



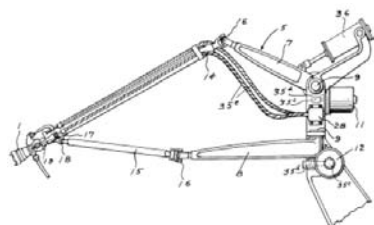
1920



1928 Oxymoron

- plošina simulující pohyb
- autor James E. Gwinnett
- aplikace v zábavním průmyslu
- 1. dokumentovaný záměr využít paralelní kinematiku (patent)
- nerealizováno

1940

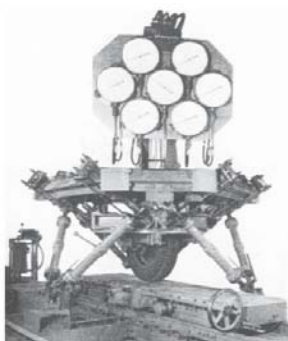


1934 Spray Painting Machine

- stříkací pistole
- autor Willard L. V. Pollard
- 5 stupňů volnosti
- nerealizováno



1940



1947-49 *Goughova platforma*

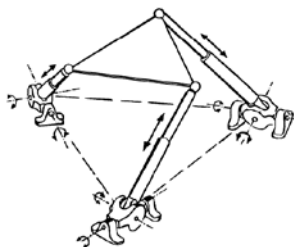
- testovací zařízení pro pneumatiky letadel
- autor Eric Gough (fa. Dunlop)
- koncept hexapodu

1960



1964 *Simulátor vrtulníku Sikorsky*

- založeno na Goughově platformě
- autor Klaus Cappel (Franklin Institute Research Laboratories, Filadelfia)



1965 *Stewartova platforma*

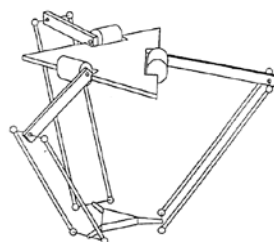
- koncept leteckého simulátoru
- autor D. Stewart
- publikováno v časopise Institution of mechanical engineers IMechE
- nerealizováno
- dnešní mechanismy označované za Stewartovy platformy jsou zcela odlišné

1980



1980-90 *Obráběcí stroje Nowosibirsk*

- první prototypy obráběcích strojů
- problémy s řízením (nebyly k dispozici dostatečně výkonné řídicí systémy)

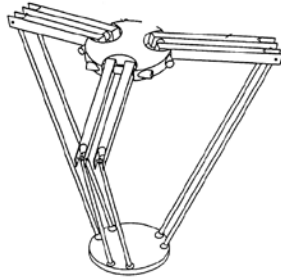


1988 *Kinematika typu DELTA*

- zařízení určené primárně pro manipulaci
- 3 stupně volnosti
- autor Reymond Clavel (EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne)



1990



1990 Kinematika typu HEXA

- obdoba kinematiky delta
- 6 stupňů volnosti



1994 Variax

- obráběcí centrum se 6 stupni volnosti (hexapod)
- výrobce Giddings & Lewis



1997 Mikromat 6X Hexa

- 1. německý obráběcí stroj na bázi hexapodu
- vyvinut na Institutu Fraunhofer IWU

2010



2011 Koncept mobilních obráběcích center

- tzv. obráběcí satelity, které jsou schopny převozu (letadlem, nákladním automobilem, atd.)
- možné upevnění nad obrobkem, přímo v místě instalace (zejména vhodné pro opravy velkých součástí)
- paralelní kinematika s 5 stupni volnosti
- výrobce Metrom - Mechatronische Maschinen GmbH
- vítěz intec-Preis 2011

Obr. 3-13: Schéma historického vývoje strojů s PKS[17],[21],[28],[29]



4. Kinematická analýza delta-robotu

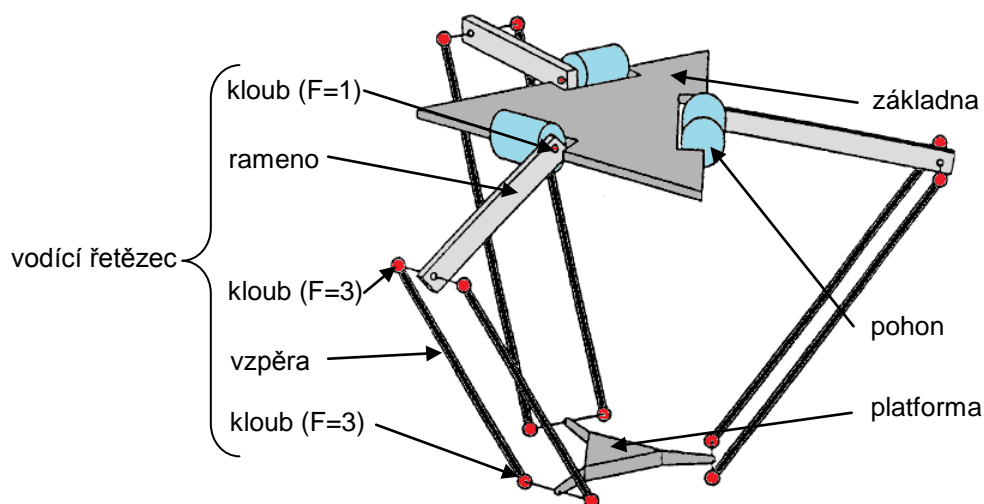
Tato kapitola se zabývá kinematickou analýzou delta-robotu, jenž byl zkonstruován a vyroben na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně. Konkrétně se jedná o určení přímé a nepřímé úlohy kinematiky (tj. transformace souřadnic mezi absolutním souřadným systémem a souřadným systémem stroje) na základě analytické geometrie. Znalost kinematiky je zapotřebí pro řízení robotu, simulaci pohybů robotu, vyšetření pracovního prostoru, určení singulárních poloh či pro kinematickou kalibraci daného mechanismu.

4.1. Popis analyzovaného delta-robotu

4.1.1. Kinematická struktura

První prototyp delta-robotu představil roku 1988 Reymond Clavel ze Švýcarského národního technologického institutu v Lausanne EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne). Jednalo se o mechanismus s tzv. trojúhelníkovou kinematickou strukturou. Postupně se objevilo i několik dalších modifikací této struktury, avšak původní koncepce nebyla překonána a delta-roboty dnes patří k nejúspěšnějším strojům s PKS.

Pohyblivá platforma i pevná základna delta-robotů mají podobu rovnostranného trojúhelníku a jsou vzájemně propojeny třemi vodícími řetězci. Každý z těchto řetězců je tvořen ramenem a dvěma vzpěrami umístěnými do paralelogramu. Díky těmto paralelogramům mají delta-roboty pouze tři stupně volnosti (translační osy x , y , z), přičemž orientace platformy zůstává konstantní. Rameno je se základnou spojeno hnanou rotační vazbou s jedním stupněm volnosti ($F = 1$). Vzpěry jsou spojeny s ramenem na jedné straně a s pohyblivou platformou na straně druhé pomocí kulových kloubů se třemi stupni volnosti ($F = 3$).



Obr. 4-1: Kinematická struktura delta-robotu[21]



Počet stupňů volnosti paralelně kinematického lze vypočítat pomocí Grüblerovy rovnice (4.1).

$$F = b_g(n' - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i - f_{id} + s' \quad (4.1)$$

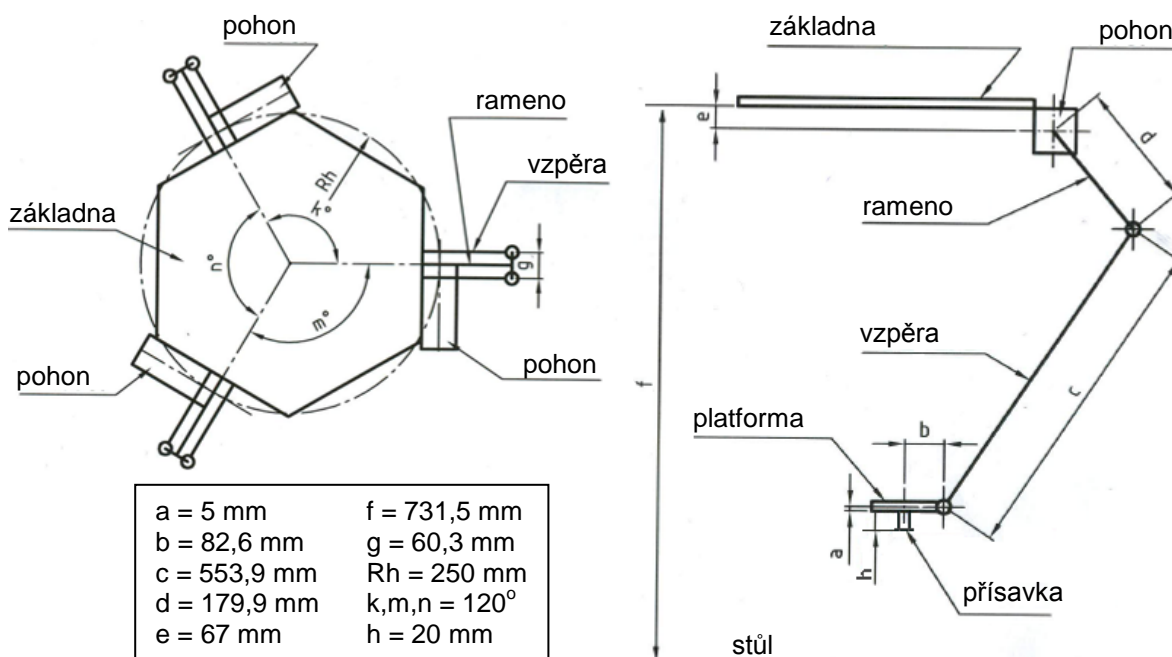
b_g	možnosti pohybu (3...pohyb v rovině / 6...pohyb v prostoru)
n	počet členů
g	počet kloubů
f_i	stupeň volnosti i-tého členu
f_{id}	počet identických stupňů volnosti (pohyb členu se neprojeví na pohybu platformy resp. koncového efektoru – např. rotace vzpěry kolem vlastní osy)
s'	počet pasivních spojení (pasivní spojení vznikají při zvláštních polohách os kloubů nebo při zvláštních rozměrech některých členů – spojení, která existují, pohyb však neomezují)

Výpočet stupňů volnosti delta robotu je pak:

$$3 = 6(11 - 15 - 1) + 39 - 6 + 0 \quad (4.2)$$

4.1.2. Rozměry

Na následujícím schématu jsou uvedeny rozměry analyzovaného delta-robotu. V programovaném kinematickém modelu, který slouží k řešení přímé a nepřímé úlohy kinematiky (jedná se o knihovnu funkcí v programu MATLAB) lze jednotlivé parametry libovolně měnit a získaný model tak využít pro různé konfigurace.

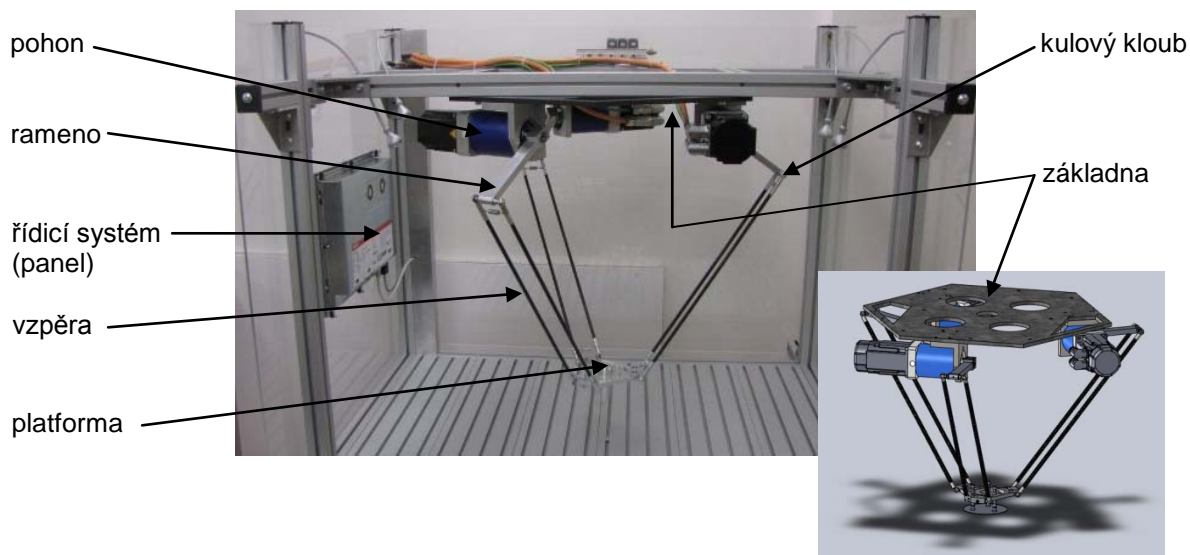


Obr. 4-2: Rozměry analyzovaného delta-robotu



4.1.3. Komponenty

Na Obr. 4-3 jsou označeny základní komponenty analyzovaného delta-robotu, které jsou dále podrobněji popsány.



Obr. 4-3: Fotografie a CAD model analyzovaného delta-robotu[30]

4.1.3.1. Pohony

Jako pohony byly využity motory Beckhoff AM3041C s dvoustupňovými planetovými převodovkami Wittenstein LP090/02-25. Jedná se o bezkartáčové synchronní servomotory, které jsou určeny pro komplikované servo-aplikace. Hodí se zejména pro polohovací úlohy u průmyslových robotů, výrobních strojů či výrobních linek. Tyto motory jsou charakteristické extrémně nízkým momentem setrvačnosti, robustní konstrukcí a velkou přetížitelností. Teplota statorového vinutí je sledována zabudovanými čidly. Kompletní technická specifikace tohoto motoru je uvedena v katalogu [31].

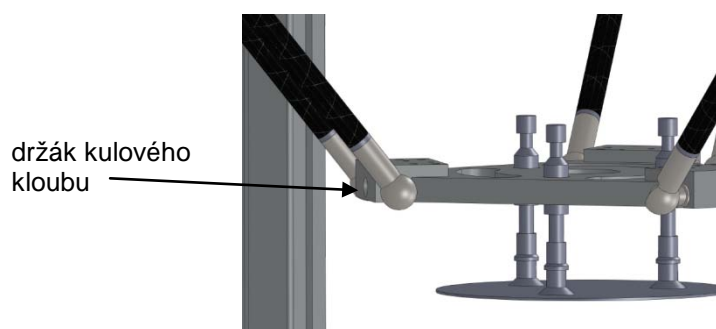


Obr. 4-4: Motor Beckhoff AM3041C[31]

4.1.3.2. Základna, platforma, ramena a vzpěry

Zatímco u platformy, ramen a vzpěr je požadována co nejnižší hmotnost při zachování dostatečné tuhosti kvůli zachování co možná nejlepších dynamických vlastností, není u základny hmotnost rozhodující. Materiál základny i na ni umístěných držáků motorů je ocel třídy 11 500.

Ramena i pohyblivá platforma delta-robotu jsou zhotoveny ze slitiny hliníku EN AW-6060 (AlMgSi0,5). Materiál držáků kulových kloubů na platformě je slitina hliníku EN AW-2007 (AlCuPbMg).



Obr. 4-5: Detail platformy

Jako vzpěry byly použity kompozitní profily od společnosti 5M. Jedná se o duté karbonové (uhlíkové) trubky s vnějším průměrem 12 mm, vnitřním průměrem 5 mm a délkou 500 mm.

Mezi výhody kompozitních profilů patří:[32]

- rozměrová přesnost
- vysoká pevnost v tahu
- vysoká rázová houževnatost
- nízká teplotní vodivost
- malá teplotní roztažnost
- nízká hustota
- dlouhá životnost

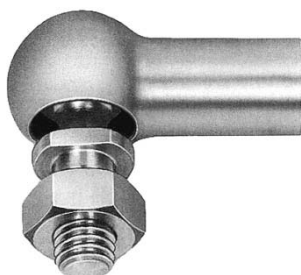
Měřená veličina	Pultruze (uhlík)	Ocel	Hliník	PVC	Dřevo
Hustota (kg/m ³)	1650	7900	2700	1380	520
Modul pružnosti v ohybu (GPa)	120-300	196	70	2,4	10
Modul pružnosti v tahu (GPa)	140	196	70	2,4	9
Tepelná kapacita (J/kg.K)	950	461	921	1100	1700
Tepelná vodivost (W/m.K)	1,4	47	209	0,24	0,47
Lineární teplotní roztažnost (1/K)	-0,2.10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁵	4.10 ⁻⁵

Tab. 4-1: Porovnání vlastností různých materiálů[32]



4.1.3.3. Kulové klouby

Pro spojení vzpěr s rameny a platformou byly u delta-robotu použity kulové klouby společnosti T.E.A. Technik typu C10. Tyto klouby se skládají z pánve a kulového čepu. Jsou vyrobeny z oceli, přičemž koule kulového čepu je tvrzená. Aby se zvýšil úhlový rozsah kloubu, byla část pánve odfrézována. Pánev je na kulovém čepu držena silou pomocí pružin, které jsou umístěny mezi dvěma vzpěrami odpovídajícího vodícího řetězce.



Obr. 4-6: Kulový kloub TEA C10; aplikace na delta-robotu[33]

4.1.3.4. Řídicí systém

Delta-robot je řízen prostřednictvím distribuovaného CNC řízení firmy Beckhoff. Ovládací dotykový panel CP 6202 s integrovaným průmyslovým PC s procesorem Intel je propojen se servo-zesilovačem AX 5911, na nějž jsou dále připojeny servomotory AM3041C. Pro propojení je použita sběrnice EtherCAT. Na průmyslovém PC je nainstalován operační systém Windows C s NC Runtimem.



Obr. 4-7: Řídicí systém[30]

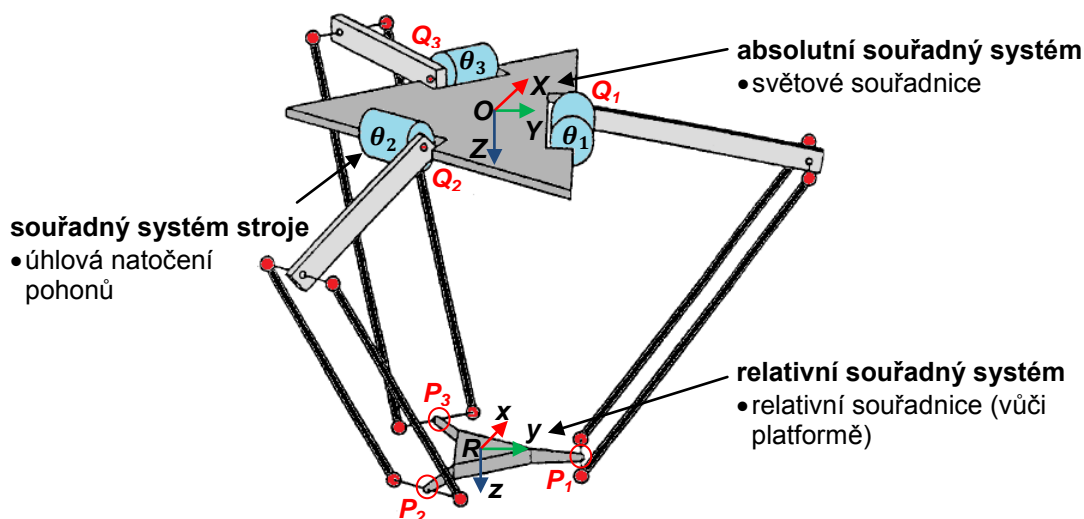


4.2. Transformace souřadnic

V případě strojů se sériovou kinematikou obvykle nepředstavuje transformace souřadnic mezi absolutním souřadným systémem a souřadným systémem stroje větší problém, neboť tyto souřadné systémy si většinou odpovídají. Například pro posuv v jedné ose stačí, aby daný pohyb vykonal pohon, který dané ose náleží. To u strojů s paralelní kinematikou neplatí. Zde jsou tyto souřadné systémy naprosto odlišné a jejich vzájemná závislost je vysoce nelineární. U strojů s PKS je pro jakýkoliv pohyb nutná spolupráce všech pohonů zároveň.

4.2.1. Souřadný systém delta-robotu

Před provedením kinematické analýzy je nutné stanovit souřadné systémy vyšetřovaného delta robotu. Byly stanoveny tři souřadné systémy-viz.Obr. 4-8:



Obr. 4-8: Souřadné systémy delta-robotu[21]

4.2.1.1. Absolutní souřadný systém

V tomto souřadném systému by měl být uživatel schopen pohyb stroje jednoduše stanovit. Samotné programování pak obvykle probíhá v uživatelském souřadném systému, u kterého je stanoveno posunutí a event. natočení vůči absolutnímu souřadnému systému. Počátek absolutního souřadného systému je pevně spojen s platformou. V tomto souřadném systému jsou udány:

- Pozice TCP ve světových souřadnicích:

$$\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T \quad (4.3)$$

- Pozice kloubů základny ve světových souřadnicích:

$${}^0Q_i = ({}^0Q_{xi}, {}^0Q_{yi}, {}^0Q_{zi})^T \quad i = 1,2,3 \quad (4.4)$$



4.2.1.2. Relativní souřadný systém

Relativní souřadný systém je pevně spojen s platformou a udává pozice kloubů platformy. Pro účely kinematické analýzy však není nutné udávat pozice všech šesti kloubů. Lze pracovat pouze s pozicemi tří virtuálních kloubů, které se nachází vždy mezi dvěma klouby platformy, jež odpovídají jednomu vodícímu řetězci. V případě tohoto zjednodušení je nutné pracovat s podmínkou konstantní orientace platformy.

- Relativní souřadnice kloubů platformy

$${}^R P_i = ({}^R P_{xi}, {}^R P_{yi}, {}^R P_{zi})^T \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

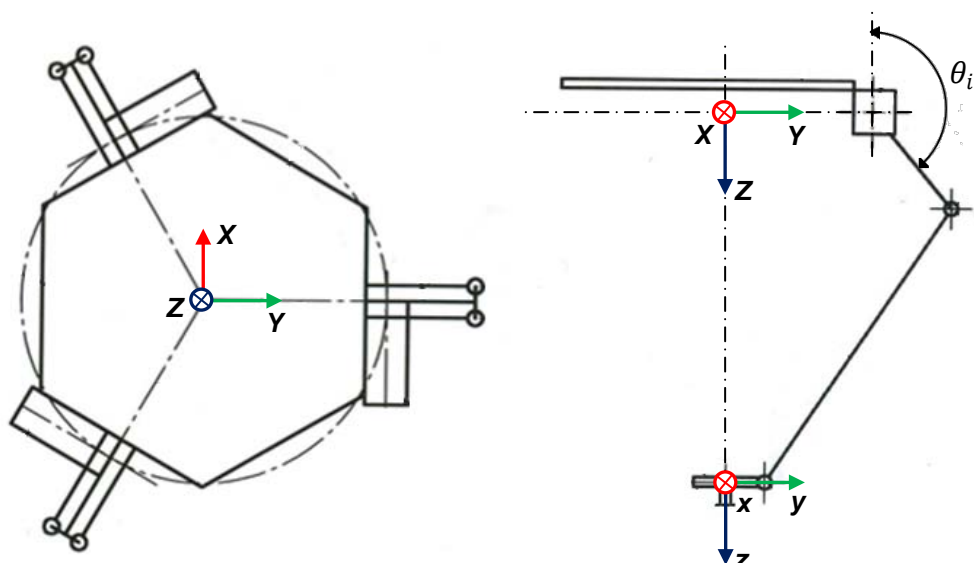
4.2.1.3. Souřadný systém stroje

Každé poloze TCP v prostoru odpovídá daná poloha pohonů (tj. úhlová natočení jednotlivých motorů), proto se pro souřadný systém stroje používá i pojem „souřadný systém pohonů“. Každý z pohonů pak může od řídicího systému dostat informaci o své nové poloze.

- Souřadnice pohonů (úhlová natočení)

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T \quad (4.6)$$

Obr. 4-9 udává přesnou polohu počátku absolutního a relativního souřadného systému a úhel natočení pohonů. Počátek absolutního souřadného systému leží na ose základny a v rovině středů kloubů základny. Analogicky je definována i poloha relativního souřadného systému vůči platformě (při výpočtu transformace souřadnic je nutné dále zohlednit typ použitého efektoru).



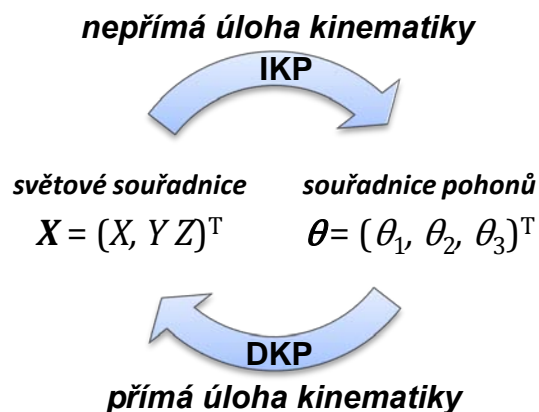
Obr. 4-9: Polohy souřadných systémů delta-robotu ($i=1$)

4.2.2. Přímá a nepřímá úloha kinematiky

Pro řízení pohybu delta-robotu (či jiného stroje) musí mít řídicí systém k dispozici funkce pro transformaci světových souřadnic do souřadnic pohonů a opačně.

Transformace světových souřadnic do souřadnic pohonů představuje nepřímou úlohu kinematiky (IKP). Ve srovnání s PRaM se sériově kinematickou je řešení nepřímé úlohy kinematiky u strojů s PKS relativně jednoduché a je analytické. Řešení nepřímé úlohy kinematiky pro delta-robot je uvedeno v odstavci 4.3.

Naproti tomu transformace souřadnic pohonů do světových souřadnic představuje přímou úlohu kinematiky (DKP). Řešení přímé úlohy kinematiky je ve srovnání s PRaM se sériově kinematickou strukturou komplikované a v naprosté většině případů pouze numerické. To však není případ delta-robotu - řešení přímé úlohy kinematiky tohoto robotu je popsáno v odstavci 4.4.



Obr. 4-10: Transformace souřadnic – delta-robot

Před provedením vlastní transformace je nutné z rozměrů delta-robotu (viz. Obr. 4-2) dopočítat zbývající parametry - světové souřadnice kloubů základny Q a relativní souřadnice kloubů platformy P .

Použité parametry delta-robotu při řešení IKP a DKP – jednotky v mm					
Základna		Platforma		Ostatní	
${}^0Q_{x1}$	0	${}^R P_{x1}$	0	délka ramene d	179,9
${}^0Q_{y1}$	250	${}^R P_{y1}$	82,6	délka vzpěry c	553,9
${}^0Q_{z1}$	0	${}^R P_{z1}$	0 resp. $-(a+h)$	délka přísavky h	20
${}^0Q_{x2}$	-216,5064	${}^R P_{x2}$	-71,5337	polovina tloušťky platformy a	5
${}^0Q_{y2}$	-125	${}^R P_{y2}$	-41,3		
${}^0Q_{z2}$	0	${}^R P_{z2}$	0 resp. $-(a+h)$		
${}^0Q_{x3}$	216,5064	${}^R P_{x3}$	71,5337		
${}^0Q_{y3}$	-125	${}^R P_{y3}$	-41,3		
${}^0Q_{z3}$	0	${}^R P_{z3}$	0 resp. $-(a+h)$		

Tab. 4-2: Parametry delta robotu



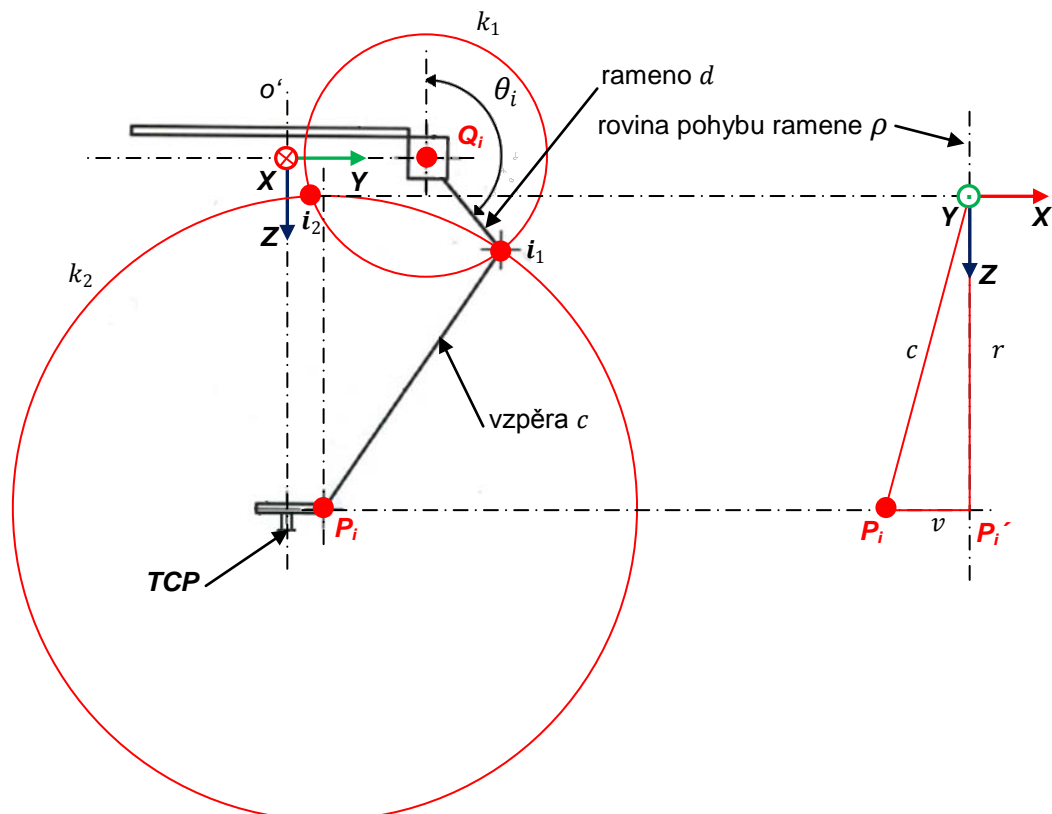
4.3. Nepřímá úloha kinematiky

Nepřímá úloha kinematiky je v řídicím systému stroje řešena při pohybu neustále. Z uživatelského programu je získána informace o poloze TCP a ta je převedena do souřadného systému pohonů.

Řešení nepřímé úlohy kinematiky předkládané v této práci je založeno čistě na analytické geometrii. Pro řešení této úlohy slouží funkce *nuk.m*, která je umístěna v elektronické příloze této práce.

4.3.1. Rozbor problému

Úkolem je určit natočení jednotlivých pohonů θ_i při známé poloze TCP v prostoru (viz. Obr. 4-11). Rameno se může pohybovat pouze v rovině ρ , přičemž koncový bod opisuje kružnici k_1 . Konkrétní poloha TCP v prostoru odpovídá konkrétní poloze kulového kloubu P_i , ke kterému je vázána vzpěra. Druhý koncový bod vzpěry se pak může teoreticky pohybovat po kulové ploše s poloměrem c (délka vzpěry) a středem P_i . Průnikem této kulové plochy s rovinou pohybu ramene je pak kružnice k_2 . Poloměr této kružnice r je dán vzdáleností v středu kulové plochy P_i od roviny pohybu ramene. Rameno je se vzpěrou propojeno rovněž kulovým kloubem. Pro danou polohu TCP jsou pak možná pouze dvě řešení – průsečíky i_1 a i_2 . Poloha průsečíku i_2 však vzhledem ke stavbě delta-robotu představuje redundantní informaci. Je vždy volen průsečík, který je více vzdálen od osy platformy o' .



Obr. 4-11: Geometrické řešení IKP ($i=1$)



4.3.2. Vlastní řešení IKP – funkce nuk.m

Algoritmus funkce *nuk.m* pro řešení nepřímé úlohy kinematiky je následující:

1. Určení polohy kloubu platformy 0P_i v absolutním souřadném systému při známé poloze TCP X :

$${}^0P_i = {}^R P_i + X = \begin{pmatrix} {}^R P_{xi} \\ {}^R P_{yi} \\ {}^R P_{zi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

2. Definice roviny ρ horního ramene – normálová rovnice:

$$\begin{aligned} (OQ) &= {}^0Q_i - [0; 0; 0] \\ (OP) &= [0; 0; 100] - [0; 0; 0] \\ (OQ) \times (OP) &= (o; p; q) \\ s &= -1 \cdot (o \cdot {}^0Q_{xi} + p \cdot {}^0Q_{yi} + q \cdot {}^0Q_{zi}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\rho: ox + py + qz + s = 0 \quad (4.9)$$

3. Určení vzdálenosti v kloubu platformy 0P_i od roviny ρ :

$$\begin{aligned} x &= {}^0Q_{xi} + t \cdot o \\ y &= {}^0Q_{yi} + t \cdot p \\ z &= {}^0Q_{zi} + t \cdot q \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$(4.10) \rightarrow (4.9)$$

$$t = \frac{-s - (o \cdot {}^0Q_{xi} + p \cdot {}^0Q_{yi} - q \cdot {}^0Q_{zi})}{(o^2 + p^2 + q^2)} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} {}^0P'_{xi} &= {}^0P_{xi} + t \cdot o \\ {}^0P'_{yi} &= {}^0P_{yi} + t \cdot p \\ {}^0P'_{zi} &= {}^0P_{zi} + t \cdot q \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$v = \| {}^0P_i - {}^0P'_i \| \quad (4.12)$$

4. Výpočet poloměru r kružnice k_2 :

$$r = \sqrt{c^2 - v^2} \quad (4.13)$$

5. Určení průsečíků i_1 a i_2 - tzn. řešení soustavy parametrických rovnic kružnic k_1 a k_2 - viz. Obr. 4-12 (soustava je řešena symbolicky):

$$k_1: x^2 + y^2 = d^2 \quad (4.14)$$

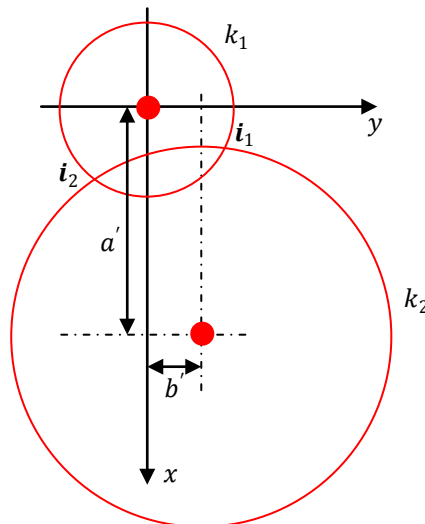
$$k_2: (x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (4.15)$$



$$a' = {}^0P_{Zi}' - {}^0Q_{Zi} \quad (4.16)$$

$$b' = \pm \left\| \left[{}^0Q_{Xi}; {}^0Q_{Yi} \right] - \left[{}^0P_{Xi}'; {}^0P_{Yi}' \right] \right\| \quad (4.17)$$

pozn.: záporné znaménko platí v případě, kdy $|{}^0Q_{Yi}| > |{}^0P_{Yi}'|$
z průsečíků i_1 a i_2 je zvolen ten, jehož souřadnice y (viz. Obr. 4-12) je vyšší: i_1



Obr. 4-12: Řešení soustavy parametrických rovnic – zjednodušený 2D případ

6. Výpočet úhlového natočení θ_i :

$$\mathbf{A} = \mathbf{i}_1 - [0; 0] \quad (4.18)$$

$$\mathbf{B} = [-100; 0] - [0; 0] \quad (4.19)$$

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| \cdot |\mathbf{B}|}\right) \quad (4.20)$$

pozn.: když je souřadnice y průsečíku i_1 záporná

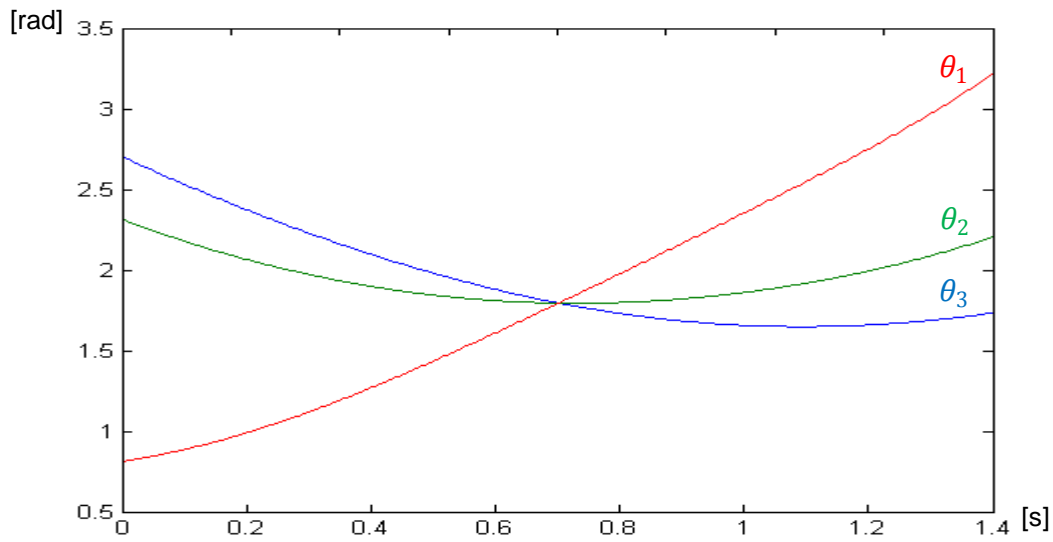
$$\theta_i = 360^\circ - \arccos\left(\frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| \cdot |\mathbf{B}|}\right)$$

Cyklus se opakuje pro všechny vzpěry 1,2 a 3.

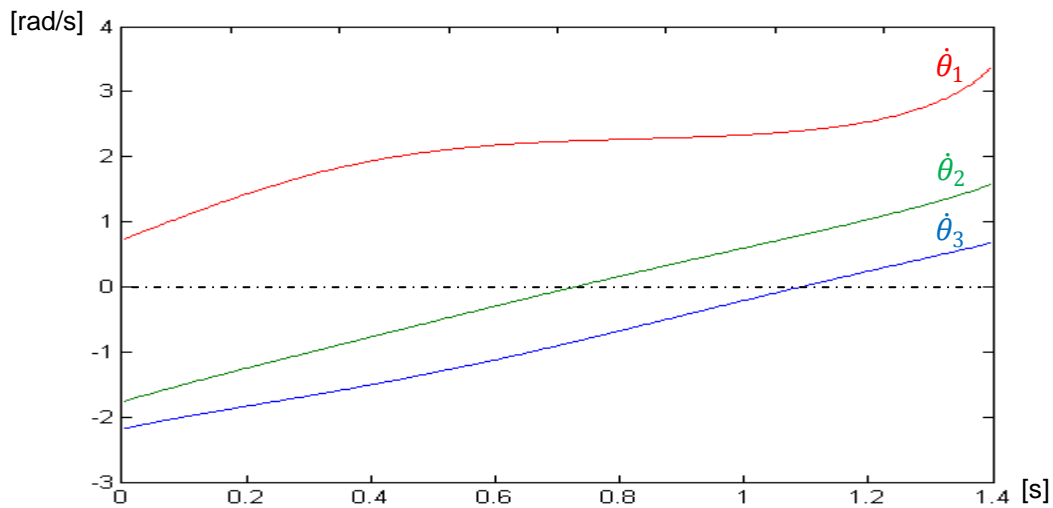
Známe-li řešení nepřímé úlohy kinematiky, je možné sledovat např. polohu, rychlost, či zrychlení jednotlivých pohonů, je-li dán pohyb TCP.

Na následujících grafech jsou vykresleny výše uvedené veličiny – pro tuto ukázkou byl zvolen následující pohyb koncového efektoru:

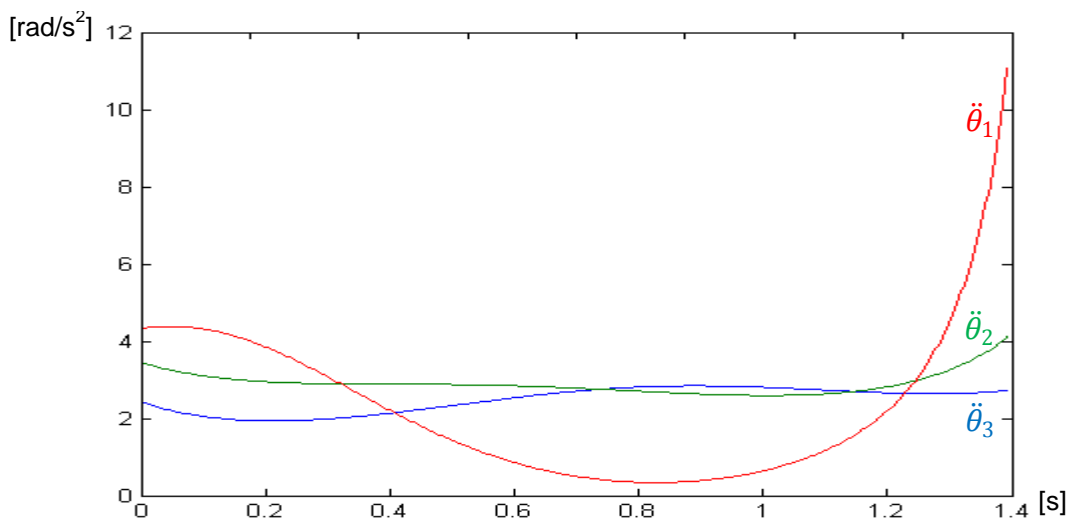
- tvar dráhy: přímka
- souřadnice počátečního bodu: [200;-200;450]
- souřadnice koncového bodu: [-200;200;550]
- rychlost TCP: 0,5 m/s (konstantní)
- celkový čas: 1,4 s



Obr. 4-13: Natočení pohonů v závislosti na čase



Obr. 4-14: Rychlost pohonů v závislosti na čase



Obr. 4-15: Zrychlení pohonů v závislosti na čase

4.4. Přímá úloha kinematiky

Přímá úloha kinematiky (DKP) představuje transformaci ze souřadnic pohonů do světových souřadnic TCP. Tato úloha není k vlastnímu řízení pohybu stroje nutná. Její odvození je však nezbytné z následujících důvodů:

- 1) Po novém spuštění stroje má řídicí systém pouze informace ze snímačů polohy jednotlivých pohonů a je nezbytné vypočítat odpovídající polohu TCP.
- 2) Dále se přímá úloha kinematiky používá pro kontrolu rozdílu skutečné a nastavené polohy TCP v řídicím systému.
- 3) Přímá úloha je nezbytná pro kalibraci (viz. Odst. 4.6.3).

Ve většině případů strojů s PKS je přímá úloha kinematiky řešitelná pouze numericky pomocí Newtonovy metody. Např. u hexapodu s proměnlivou délkou vzpěr (6 stupňů volnosti; polohu pohonů představují délky jednotlivých vzpěr, přičemž změna délky vzpěry může být realizována pomocí kuličkového šroubu a matice) má rovnice přímé úlohy kinematiky tvar:

$$F(L) = X \quad (4.21)$$

tzn.: pro dané délky vzpěr $L = (L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6)^T$ je hledána odpovídající poloha platformy X . Samotné řešení probíhá v několika krocích:

- 1) Definice počátečního bodu, od kterého začíná iterace:

$$X_i = (X, Y, Z, A, B, C)^T \quad (4.22)$$

- 2) Výpočet odpovídající délky vzpěr z nepřímé úlohy kinematiky:

$$F(X_i) = L_i \quad (4.23)$$

- 3) Výpočet rozdílu délek vzpěr

$$\Delta L = L - L_i \quad (4.24)$$

- 4) Určení nové polohy koncového efektoru X_{i+1} - tzn. zlepšení předchozího odhadu X_i :

$$X_{i+1} = X_i + J^{-1} \times \Delta L \quad (\det(J) \neq 0) \quad (4.25)$$

$$X_i = X_{i+1} \quad (4.26)$$

Cyklus bodů 2), 3) a 4) se opakuje dokud ΔL není menší než určitá hodnota. Dále dokud není rozdíl mezi dvěma iteracemi ($L_i - L_{i-1}$) menší než určitá hodnota, popřípadě pokud není dosažen maximální počet iterací.

V případě, že se uplatní dvě poslední zmiňované podmínky, lze mluvit o selhání iteračního procesu (tyto podmínky jsou důležité, aby nedošlo k „zacyklení“ v programu).

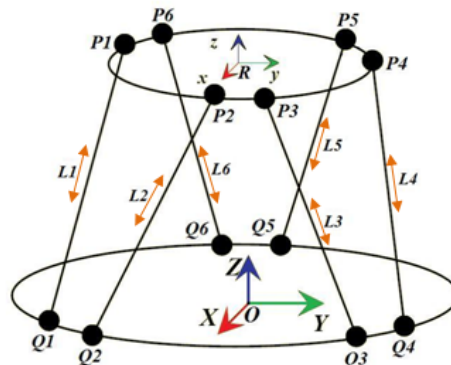


DIPLOMOVÁ PRÁCE

\mathbf{J} v rovnici (4.25) představuje jacobihu matici, která má v případě hexapodu (viz. Obr. 4-16) tvar:

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial X} & \frac{\partial L_1}{\partial Y} & \frac{\partial L_1}{\partial Z} & \frac{\partial L_1}{\partial A} & \frac{\partial L_1}{\partial B} & \frac{\partial L_1}{\partial C} \\ \frac{\partial L_2}{\partial X} & \frac{\partial L_2}{\partial Y} & \frac{\partial L_2}{\partial Z} & \frac{\partial L_2}{\partial A} & \frac{\partial L_2}{\partial B} & \frac{\partial L_2}{\partial C} \\ \frac{\partial L_3}{\partial X} & \frac{\partial L_3}{\partial Y} & \frac{\partial L_3}{\partial Z} & \frac{\partial L_3}{\partial A} & \frac{\partial L_3}{\partial B} & \frac{\partial L_3}{\partial C} \\ \frac{\partial L_4}{\partial X} & \frac{\partial L_4}{\partial Y} & \frac{\partial L_4}{\partial Z} & \frac{\partial L_4}{\partial A} & \frac{\partial L_4}{\partial B} & \frac{\partial L_4}{\partial C} \\ \frac{\partial L_5}{\partial X} & \frac{\partial L_5}{\partial Y} & \frac{\partial L_5}{\partial Z} & \frac{\partial L_5}{\partial A} & \frac{\partial L_5}{\partial B} & \frac{\partial L_5}{\partial C} \\ \frac{\partial L_6}{\partial X} & \frac{\partial L_6}{\partial Y} & \frac{\partial L_6}{\partial Z} & \frac{\partial L_6}{\partial A} & \frac{\partial L_6}{\partial B} & \frac{\partial L_6}{\partial C} \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Podrobné vysvětlení Newtonovy metody je uvedeno v příloze A této práce.



Obr. 4-16: Hexapod s proměnlivou délkou vzpěr

Analogicky lze odvodit i výše uvedené rovnice pro delta-robot:

$$\text{IKP: } \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \boldsymbol{\theta} \quad (4.28)$$

$$\text{DKP: } \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{X} \quad (4.29)$$

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial \mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial X} & \frac{\partial \theta_1}{\partial Y} & \frac{\partial \theta_1}{\partial Z} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial X} & \frac{\partial \theta_2}{\partial Y} & \frac{\partial \theta_2}{\partial Z} \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial X} & \frac{\partial \theta_3}{\partial Y} & \frac{\partial \theta_3}{\partial Z} \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Avšak v případě delta-robotu, kde je díky použitým paralelogramům orientace platformy (A, B, C) konstantní, je přímá úloha kinematiky řešitelná i analyticky a výše uvedené numerické řešení není nutné použít. Pro řešení této úlohy slouží funkce *puk.m*, která je umístěna v elektronické příloze této práce.



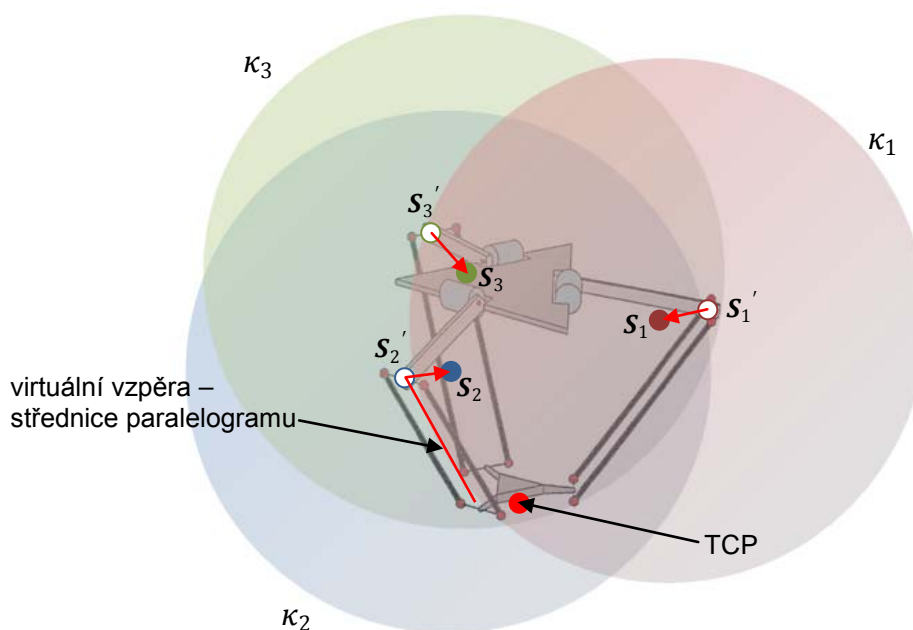
4.4.1. Rozbor problému

Úkolem je určit polohu TCP ve světových souřadnicích $X = (X, Y, Z)^T$ při známých polohách pohonů $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$. Známe-li natočení jednotlivých pohonů, lze vypočítat polohu koncových bodů ramen S_i' v prostoru. Na tyto ramena jsou připojeny vzpěry pomocí kulových kloubů. Tím je pohyb druhého koncového bodu vzpěry omezen pouze na kulovou plochu se středem S_i' a poloměrem rovným délce vzpěry c .

Určit polohu TCP je pak možné pomocí výpočtu průsečíku všech tří kulových ploch (jedná se o tzv. trilateraci). Vyjma speciálních případů dává trilaterace dva výsledky. Jeden průsečík se nachází pod platformou (v rámci pracovního prostoru) druhý nad platformou - tento výsledek představuje redundantní informaci.

Při vlastním výpočtu je nutné ještě před provedením trilaterace odečíst od souřadnic bodů S_i relativní souřadnice kloubů základny (relativní vůči TCP) – tím dojde k teoretickému posunutí vzpěr, které se pak protnou přesně v hledané poloze TCP. S_i jsou pak skutečné středy kulových ploch κ_i , s nimiž počítá trilaterace.

Pro zjednodušení výpočtu je počet vzpěr zredukován na 3 virtuální vzpěry, které tvoří střednice paralelogramu, za podmínky neměnné orientace platformy. Analogicky byly definovány i relativní souřadnice kloubů platformy – viz. (4.5).



Obr. 4-17: Geometrické řešení DKP



4.4.2. Přímá úloha kinematiky – funkce *puk.m*

Algoritmus funkce *puk.m* pro řešení přímé úlohy kinematiky je následující:

1. Určení poloh koncových bodů ramen S'_i (viz. Obr. 4-17) při známých polohách pohonů θ .

$$\begin{aligned} S'_{1X} &= {}^0Q_{X1} \\ S'_{1Y} &= {}^0Q_{Y1} + \sin(\theta_1) \cdot d \\ S'_{1Z} &= {}^0Q_{Z1} - \cos(\theta_1) \cdot d \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} S'_{2X} &= {}^0Q_{X2} - (\sin(\theta_2) \cdot d) \cdot \cos\left(m - \left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \\ S'_{2Y} &= {}^0Q_{Y2} - (\sin(\theta_2) \cdot d) \cdot \sin\left(m - \left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \\ S'_{2Z} &= {}^0Q_{Z2} - \cos(\theta_2) \cdot d \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} S'_{3X} &= {}^0Q_{X3} + (\sin(\theta_3) \cdot d) \cdot \cos\left(k - \left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \\ S'_{3Y} &= {}^0Q_{Y3} - (\sin(\theta_3) \cdot d) \cdot \sin\left(k - \left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \\ S'_{3Z} &= {}^0Q_{Z3} - \cos(\theta_3) \cdot d \end{aligned} \quad (4.33)$$

2. Určení středů kulových ploch pro výpočet trilaterace – tzn. odečtení relativních souřadnic kloubů platformy (relativních vůči TCP) od bodů S'_i .

$$S_1 = S'_1 - {}^R P_1 \quad (4.34)$$

$$S_2 = S'_2 - {}^R P_2 \quad (4.35)$$

$$S_3 = S'_3 - {}^R P_3 \quad (4.36)$$

3. Výpočet průsečíků tří kulových ploch – kompletní výpočet trilaterace je uveden v příloze B této diplomové práce.

Velmi známé použití trilaterace představuje systém GPS, kdy je z údajů o vzdálenosti z minimálně tří satelitů, určena poloha přijímače na Zemi.

4. Ze získaných průsečíků je zvolen ten, jehož souřadnice z je větší. Světové souřadnice tohoto průsečíku, pak odpovídají hledané poloze TCP.

$$X = (p_X, p_Y, p_Z)^T \quad (4.37)$$

Správnost výsledků nepřímé a přímé úlohy kinematiky byla ověřena na 3D modelu v programu SolidWorks.



4.5. Pracovní prostor a singulární polohy

Odvození nepřímé a přímé úlohy kinematiky dále slouží k znázornění pracovního prostoru a singulárních poloh.

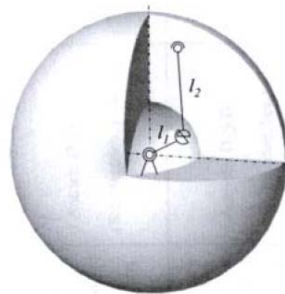
4.5.1. Pracovní prostor

4.5.1.1. Vykreslení grafické

Grafické vykreslení pracovního prostoru sestává ze dvou základních kroků.

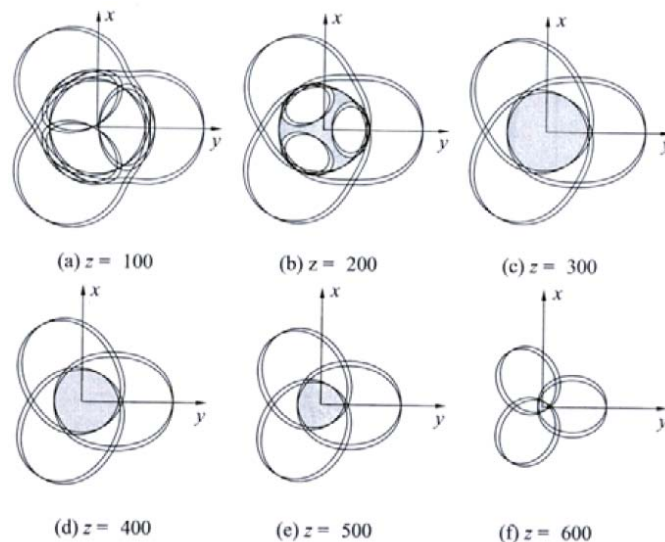
- 1) Určení „dílčích pracovních prostorů“ jednotlivých kloubních spojení (vodících řetězců).

V případě delta-robotu se jeden vodící řetězec skládá z rotačního kloubu, ramene, kulového kloubu, vzpěry a kulového kloubu. Teoretický dosah koncového členu tohoto řetězce, ke kterému je připojena platforma má pak následující podobu:



Obr. 4-18: Dílčí pracovní prostor delta-robotu[21]

- 2) Určení pracovního prostoru – z průniku dílčích pracovních prostorů.



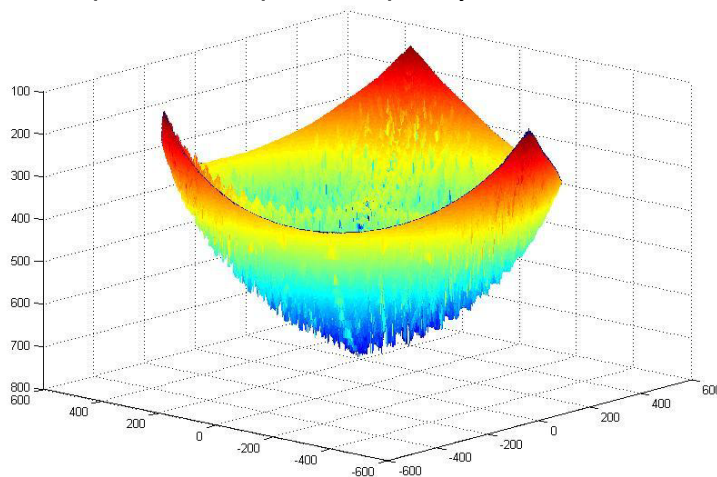
Obr. 4-19: Pracovní prostor delta-robotu – řezy v ose z[21]

4.5.1.2. Vykreslení matematické

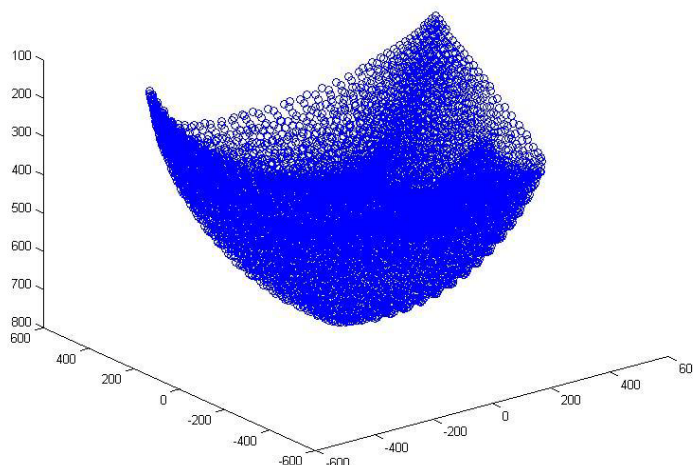
Vykreslit pracovní prostor lze i z kinematického modelu (resp. matematického modelu). Výhodou matematického modelu je možnost velmi rychle měnit jednotlivé parametry a např. efektivně porovnávat pracovní prostory pro různé délky vzpěr. Dále je možné snadno zavádět různá omezení, jako jsou úhlová natočení různých kloubů či sledování kolizí (vzpěr s rámem apod.).

Vykreslení pracovního prostoru bylo provedeno na základě kombinací natočení jednotlivých pohonů θ_i . Pozice koncového efektoru byla vypočtena pomocí přímé úlohy kinematiky a uložena – ze získaných bodů v prostoru je pak možné vykreslit pracovní prostor. Před uložení dané pozice je provedena zpětná kontrola pomocí nepřímé úlohy kinematiky (aby byly uloženy pouze pozice s reálnou vzájemnou polohou ramen a vzpěr). Dále je možné kontrolovat blízkost singulárních poloh, úhlová natočení jednotlivých kloubů, či maximální a minimální souřadnice koncového efektoru. Pro kontrolu pracovního prostoru slouží funkce $pp.m$ a $pp2.m$, které jsou uloženy v elektronické příloze této práce.

Vykreslení pracovního prostoru pro $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$:



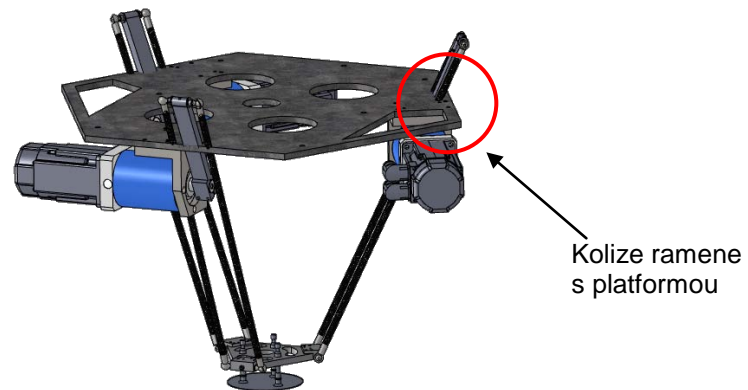
Obr. 4-20: Pracovní prostor delta-robotu - $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$



Obr. 4-21: Pracovní prostor delta-robotu (body) - $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$

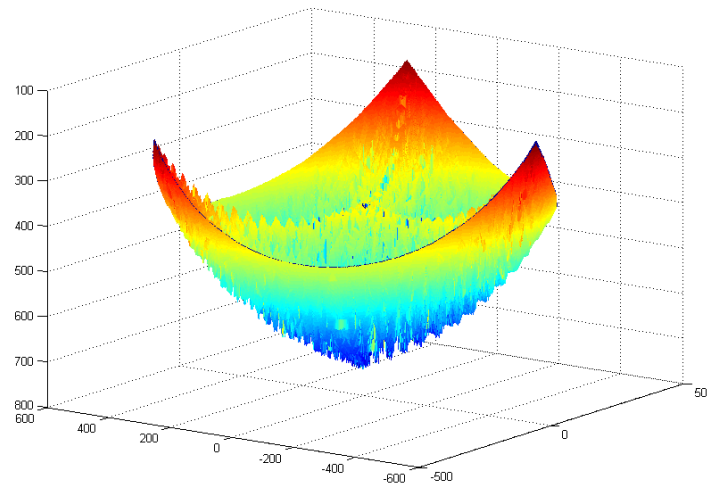


V případě analyzovaného delta-robotu však není možné dosáhnout výše uvedeného úhlového rozsahu. Minimální úhel θ_i je mechanicky omezen na 42° (kolize ramene s platformou). Úhlový rozsah $\theta_i \in \langle 20, 260 \rangle$ byl zvolen z toho důvodu, aby bylo dosaženo plné „kontrakce“ robotu – což je vhodné pro vyšetřování singulárních poloh.

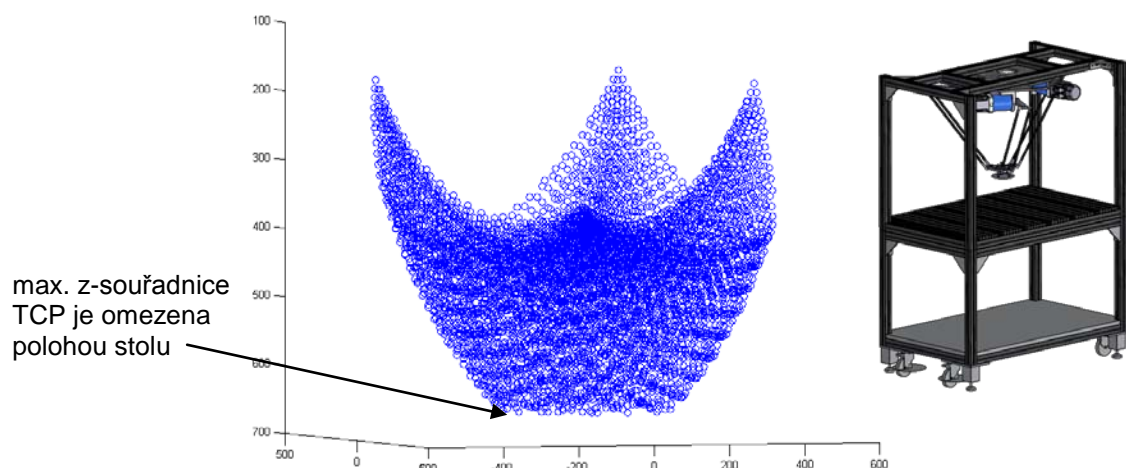


Obr. 4-22: Plná kontrakce delta-robotu

Vykreslení pracovního prostoru pro $\theta_i \in \langle 42, 260 \rangle$



Obr. 4-23: Pracovní prostor delta-robotu - $\theta_i \in \langle 42, 260 \rangle$



Obr. 4-24: Pracovní prostor delta-robotu (body) - $\theta_i \in \langle 42, 260 \rangle$, TCP $z_{max} = 664,5 \text{ mm}$



4.5.2. Singulární polohy

4.5.2.1. Definice

Pojem „singularita“ pochází z latinského slova „singularis“, což znamená jedinečný, osamocený, zvláštní či mimořádný.

V závislosti na oboru se definice tohoto pojmu liší:

Matematika:

Singularita představuje v matematice bod, v němž daný matematický objekt není definován, popřípadě vykazuje výjimečné vlastnosti – např. v něm nelze provést derivaci.[34]

Astronomie:

V astronomii, či fyzice jsou za singulární označeny stavy či oblasti, v nichž nejsou fyzikální zákony definovány – např. v okolí středu černých děr dochází k tak silnému zakřivení časoprostoru, že v něm zákony obecné teorie relativity či kvantové mechaniky přestávají platit.[34],[35]

Robotika:

Singularita v robotice označuje určitý bod v prostoru, který může být dosažen nekonečně velkým počtem poloh pohonů.[34]

V oblasti strojů s PKS představují singularity v pracovním prostoru takové polohy, kdy:[21]

- koncový efektor získává dodatečné stupně volnosti, jež nelze kontrolovat pohony
- struktura ztrácí v jednom či více směrech svou tuhost
- na koncový efektor se nepřenáší žádná síla

Kinematické podmínky dané rameny lze pro delta-robot obecně zapsat ve tvaru:

$$F(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}) = 0 \quad (4.38)$$

Derivací této rovnice podle času získáme vztah mezi rychlostmi pohonů a koncového efektoru:

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}} = 0 \quad (4.39)$$

Kde:

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \quad (4.40)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \quad (4.41)$$



Singularita v pracovním prostoru pak lze z matematického hlediska definovat jako polohy, kde determinant matice **A** nebo **B** je nulový. V případě, že je determinant matice **B** nulový, jedná se o singularitu prvního druhu. V případě, že je nulový determinant matice **A**, jde o singularitu druhého druhu. Singularita druhu třetího nastává, když je v dané poloze nulový determinant jak matice **A**, tak matice **B**.

A a **B** jsou Jacobiho matice typu 3x3. Odvozením těchto matic pro delta-robot se zabývá publikace [36].

Singularita	Kritérium	Příklad	Důsledek
1. druhu	$\det(\mathbf{B}) = 0$		<ul style="list-style-type: none"> nedochází k přenosu pohybu z hnacího členu na hnaný člen jedná se např. o polohy v úvrati mechanismus v těchto polohách ztrácí jeden nebo více stupňů volnosti
2. druhu	$\det(\mathbf{A}) = 0$		<ul style="list-style-type: none"> nedochází k přenosu síly z hnacího na hnaný člen jedná se např. o polohy, kdy dochází k vzpříčení mechanismus v těchto polohách získává jeden nebo více stupňů volnosti
3. druhu	$\det(\mathbf{B}) = 0$ $\det(\mathbf{A}) = 0$		<ul style="list-style-type: none"> nedochází k přenosu pohybu ani síly z hnacího na hnaný člen

Tab. 4-3: Druhy singularit[21],[28]

4.5.2.2. Analýza singularit delta-robotu – Grafika & Geometrie

Ve většině případů mechanismů s PKS se provádí analýza singularit na základě nulových determinantů Jacobiho matic **A** a **B**. V literatuře se však objevují i odlišné metody, které slouží k určení těchto singularitních poloh. Příkladem toho může být článek [37], který se zabývá grafickou analýzou singularit u rovinného manipulátoru s PKS o třech stupních volnosti. Velmi kvalitní přehled různých metod pro analýzu singularit včetně mnoha



odkazů na literaturu dále uvádí publikace [15]. Takové metody mohou být výhodné pro případy, kdy není nutné pro transformaci souřadnic odvozovat jacobih matici - viz. (4.27), což je případ i analyzovaného delta-robotu.

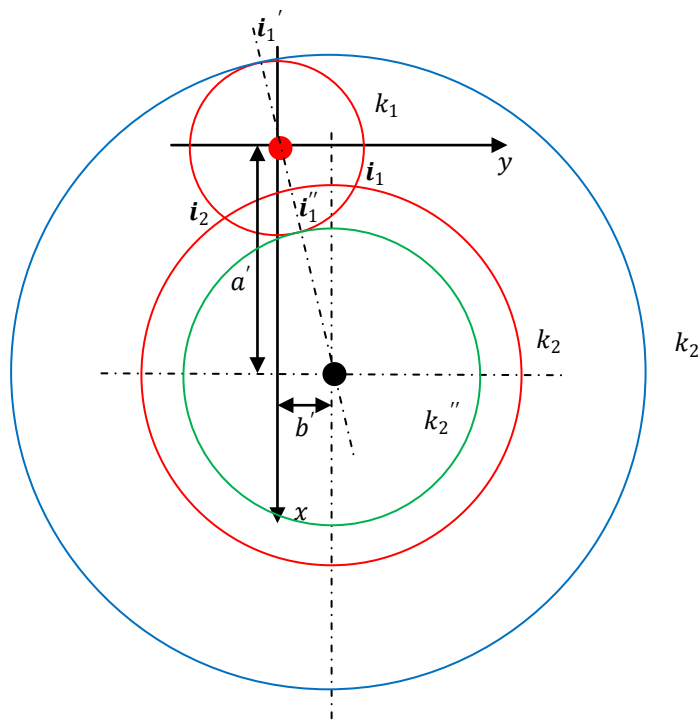
Neboť při řešení nepřímé a přímé úlohy kinematiky delta-robotu se v této diplomové práci vychází pouze z analytické geometrie, vyvstala otázka, zda by bylo možné identifikovat singulární polohy tohoto robotu pouze na základě geometrického vyjádření těchto poloh.

Jak již bylo uvedeno v odst. 4.3.2, řešení nepřímé úlohy kinematiky se převede na řešení 2D problému – hledání průsečíků dvou kružnic. Jedná se o řešení soustavy parametrických rovnic kružnic k_1 a k_2 . Při řešení této soustavy mohou nastat 3 situace:

- 1) Soustava má 2 řešení – obvyklý případ (i_1 a i_2)
- 2) Soustava nemá řešení – v tomto případě je poloha TCP označena jako poloha mimo pracovní prostor
- 3) Soustava má jedno řešení – speciální případ (i_1' a i_1'')

Vyslovme předpoklad, že singulární poloha nastává v případě 3). Vzájemná poloha ramene a vzpěry (průmět do roviny pohybu ramene), pak zároveň přesně odpovídá grafickému vyjádření singularity 1. druhu uvedenému v Tab. 4-3.

Z praktického hlediska je však nutné rozpoznat i polohy, které se singulárním blíží. K tomuto účelu je možné sledovat vzdálenost průsečíků i_1 a i_2 a pokud poklesne pod jistou minimální hodnotu d_{min} je odpovídající poloha označena za polohu blízkou singularitě.



Obr. 4-25: Řešení soustavy parametrických rovnic dvou kružnic



Analogicky lze odvodit předpoklad singulární polohy plynoucí z přímé úlohy kinematiky – singulární poloha nastává v případě, kdy je výsledkem trilaterace pouze jeden průsečík. Polohy blízké singulárním lze opět analogicky rozpoznat podle vzdálenosti průsečíků p_1 a p_2 . (viz. rce. (15) - příloha B), která klesne pod minimální hodnotu d_{min} .

Z grafického vyjádření singularit uvedeného v tabulce Tab. 4-3. dále vyplývá, že singularita 2. druhu nastává v případě, kdy kloub spojující ramena R1 a R2 má stejnou souřadnici x jako kloub spojující rameno R2 se smykadlem. Obdobnou situaci lze definovat i u delta-robotu v rovině pohybu ramene – viz. Obr. 4-25. Jedná se o situaci, kdy má identifikovaný průsečík i stejnou souřadnici x jako je střed kružnice k_2 . Poloha blízká singularitám je opět určena podle toho, že rozdíl hodnot souřadnic x klesne pod jistou minimální hodnotu d_{min} . V případě, že by hodnota souřadnice x průsečíku i byla vyšší než hodnota souřadnice kružnice k_2 , je odpovídající poloha TCP označena za polohu mimo pracovní prostor.

Pozn.: Průsečík i je ten z průsečíků (i_1 a i_2), jehož hodnota souřadnice y je vyšší.

Na základě výše uvedených kritérií byla pro kontrolu singularit a poloh singularitám blízkých u delta-robotu naprogramována funkce $pp.m$ (viz. elektronická příloha této práce). Vstupními hodnotami této funkce jsou parametry delta robotu (viz. Tab. 4-2) a pozice TCP X . Výsledky této funkce jsou následující:

- 1) 0...pozice TCP mimo pracovní prostor
- 2) 1...pozice TCP v pracovním prostoru
- 3) 2...pozice TCP blízká singularitě

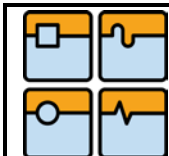
V této funkci je možné nastavit a kontrolovat:

- 1) minimální a maximální hodnotu souřadnic x, y, z TCP - např. omezení souřadnice z vzhledem k poloze stolu
- 2) úhlové rozsahy ramen
- 3) úhlové rozsahy kulových kloubů
- 4) vzdálenost d_{min}

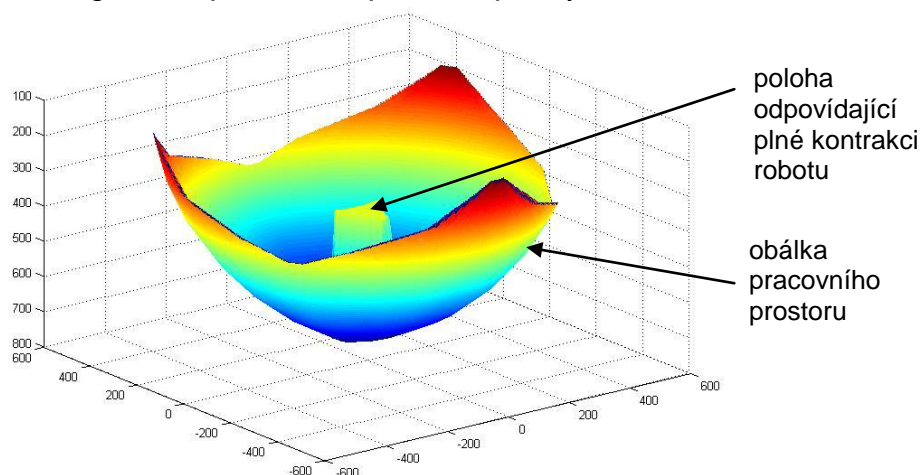
V případě, že nejsou splněny podmínky 1)-3), je odpovídající pozice TCP označena jako „0“... pozice mimo pracovní prostor.

V rámci této práce byla zvolena hodnota $d_{min} = 10mm$.

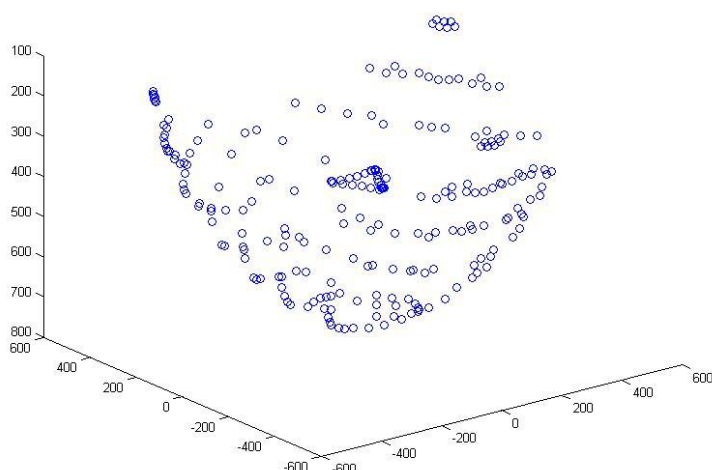
Díky této funkci je možné analyzovat singularity a pozice singularitám blízké, které se nachází v pracovním prostoru delta-robotu. To může být vhodné např. při plánování trajektorie TCP, či určování co největší kvadratické části pracovního prostoru, v níž se nenachází polohy singulární či singulárním blízké (dále jen singularity).[15]



Vykreslení singularit v pracovním prostoru pro $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$:

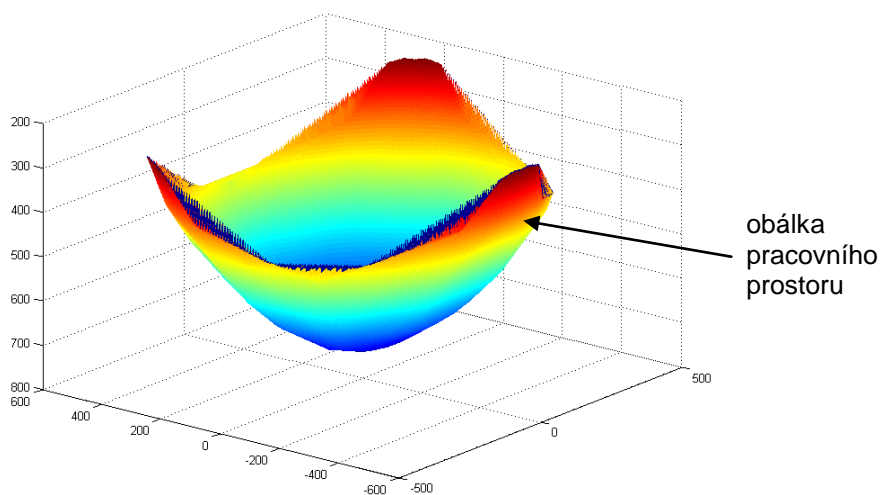


Obr. 4-26: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$

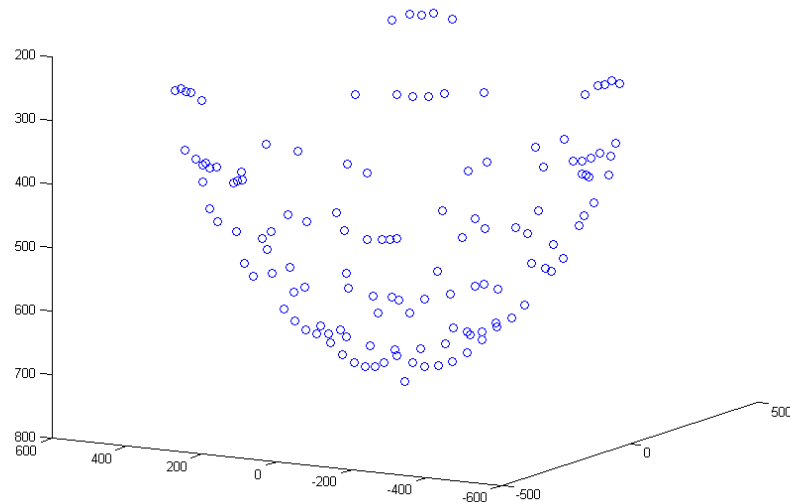


Obr. 4-27: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$

Vykreslení singularit v pracovním prostoru pro $\theta_i \in \langle 42,260 \rangle$:



Obr. 4-28: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in \langle 42,260 \rangle$



Obr. 4-29: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in \langle 42, 260 \rangle$

Z vykreslení singularit je zřejmé, že u delta-robotu se nachází singularity na okrajích pracovního prostoru a tvoří jakousi obálku tohoto prostoru. Další singularita se nachází v oblasti, kde dochází k plné „kontrakci“ delta-robotu (viz. Obr. 4-22). Díky konstrukci analyzovaného robotu však k plné „kontrakci“ nedochází a singularity se vyskytují pouze na obálce pracovního prostoru (viz. Obr. 4-28).

4.5.2.3. Analýza singularit delta-robotu – Jacobiho matice

Metoda, která je prezentována v předcházejícím odstavci a jež vychází z geometrického řešení transformace souřadnic a grafického vyjádření singularit, nemá v literatuře obdoby. Aby byla možná verifikace získaných výsledků, byla k funkci *pp.m* naprogramována ekvivalentní funkce *pp2.m*, která vychází z definice, že singularity se v rámci pracovního prostoru nacházejí v místech, kde determinant jacobiho matice **A** nebo **B** je nulový.

Odvozením těchto jacobiho matic pro delta-robot se zabývá publikace [36].

Matice **A** a **B** mají podobu:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} J_{1x} & J_{1y} & J_{1z} \\ J_{2x} & J_{2y} & J_{2z} \\ J_{3x} & J_{3y} & J_{3z} \end{pmatrix} \quad (4.42)$$

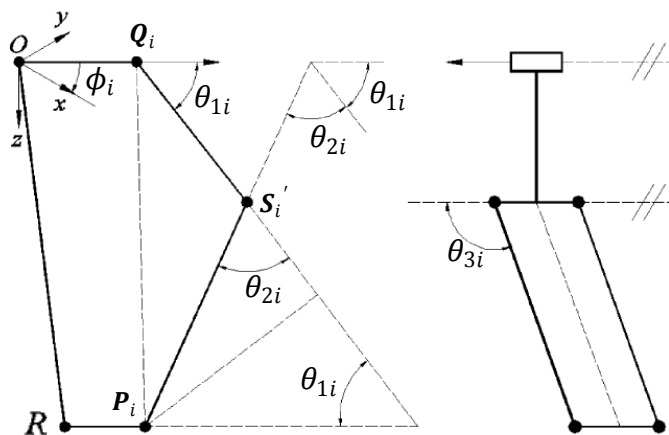
$$\begin{aligned} J_{ix} &= \sin \theta_{3i} \cos(\theta_{2i} + \theta_{1i}) \cos \phi_i + \cos \theta_{3i} \sin \phi_i \\ J_{iy} &= -\sin \theta_{3i} \cos(\theta_{2i} + \theta_{1i}) \sin \phi_i + \cos \theta_{3i} \cos \phi_i \\ J_{iz} &= \sin \theta_{3i} \sin(\theta_{2i} + \theta_{1i}) \end{aligned} \quad (4.43)$$



DIPLOMOVÁ PRÁCE

$$\mathbf{B} = d \times \begin{pmatrix} \sin \theta_{21} \sin \theta_{31} & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta_{22} \sin \theta_{32} & 0 \\ 0 & 0 & \sin \theta_{23} \sin \theta_{33} \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

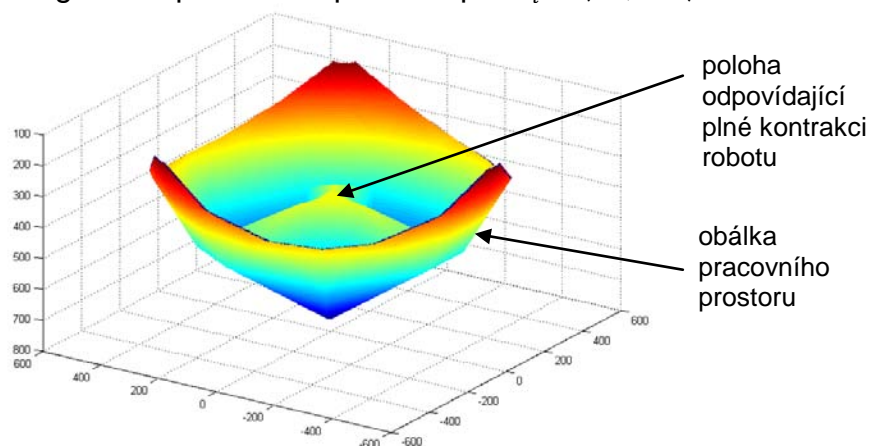
d představuje délku ramene. Definici úhlů θ_{1i} , θ_{2i} , θ_{3i} a ϕ_i pro vodící řetězec i uvádí Obr. 4-30. Vlevo je průmět vzpěry a ramene do roviny pohybu ramene. Vpravo je v pravoúhlém rovnoběžném promítání zobrazen pohled zprava.



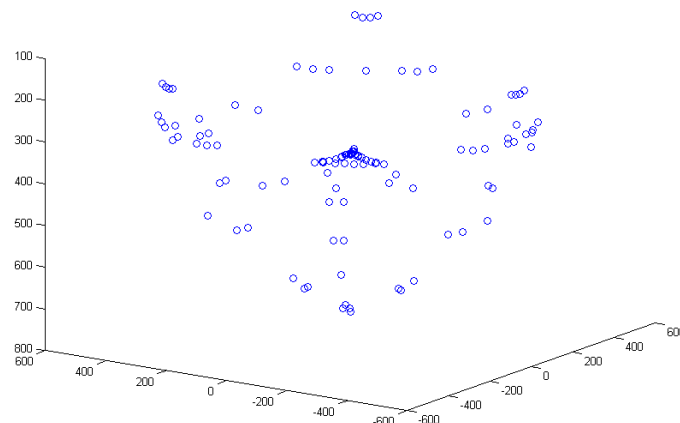
Obr. 4-30: Definice úhlů použitých v jacobiho maticích[36]

V rámci této práce byla zvolena minimální hodnota determinantu matice \mathbf{A} nebo \mathbf{B} na $h_{min} = 1,0^{-5}$. V případě, že hodnota determinantu poklesne pod tuto hodnotu je odpovídající poloha TCP označena za singularní. Tato hodnota byla zvolena na základě konzultací s panem Ing. Tomášem Březinou, Ph.D. z Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně. Je nutné zdůraznit, že volba této hodnoty i hodnoty d_{min} v předchozí metodě je intuitivní; v budoucnu by jistě bylo vhodné provést experimenty s analyzovaným delta-robotem a upravit tyto hodnoty na základě výsledků těchto provedených měření.

Vykreslení singularit v pracovním prostoru pro $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$

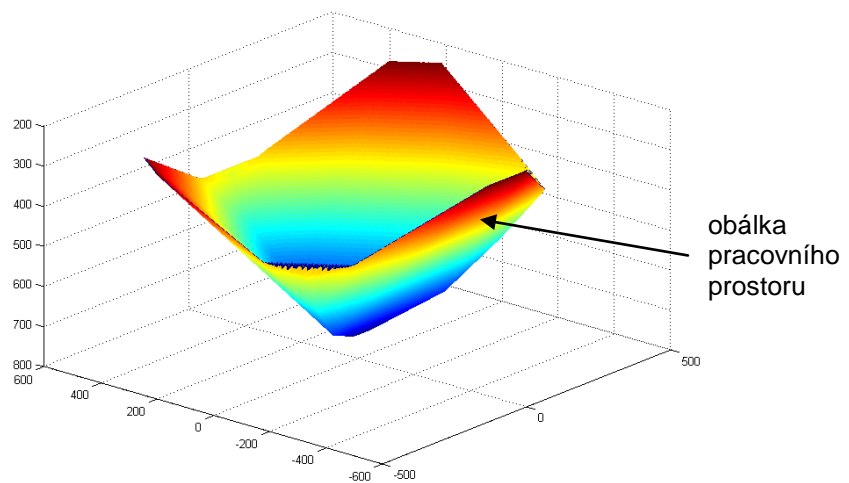


Obr. 4-31: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in \langle 20,260 \rangle$

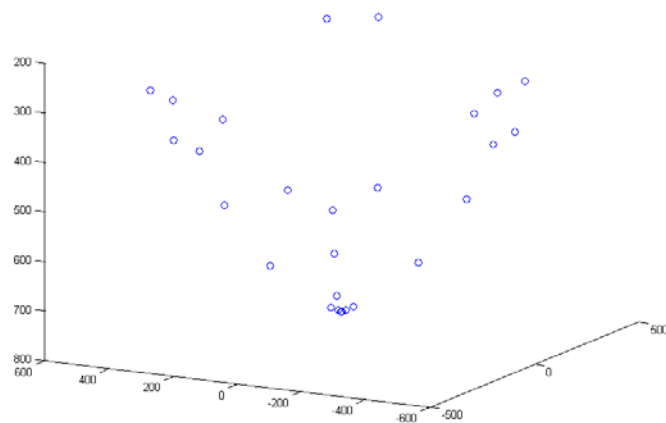


Obr. 4-32: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in \langle 20, 260 \rangle$

Vykreslení singularit v pracovním prostoru pro $\theta_i \in \langle 42, 260 \rangle$:



Obr. 4-33: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu - $\theta_i \in \langle 42, 260 \rangle$



Obr. 4-34: Singularity v pracovním prostoru delta-robotu (body) - $\theta_i \in \langle 42, 260 \rangle$

Z provedené analýzy singularit v pracovním prostoru delta-robotu na základě nulových determinantů jacobihho matic je zřejmé, že výsledky obou metod se velmi dobře kryjí. Byl tedy potvrzen předchozí výsledek, že singulární polohy se u delta-robotu nacházejí pouze na okrajích pracovního prostoru (na tzv. obálce), popř. v oblasti plné kontrakce robotu (dosažení této polohy je však u analyzovaného robotu nemožné).

Dále bylo potvrzeno, že není vždy nutné pro analýzu singulárních poloh odvozovat jacobihho matice, ale lze použít i odlišné metody. Je však pravděpodobné, že tyto metody mohou být s výhodou aplikovány většinou jen na kinematicky jednodušší mechanismy s nižším počtem stupňů volnosti.

Je nutné zdůraznit, že ačkoliv se v této práci pro postup k určení singularit prezentovaný v odst. 4.5.2.2 používá označení metoda – stále nelze o skutečné metodě hovořit. Bylo by však jistě velmi zajímavé uvedený postup podrobněji analyzovat.

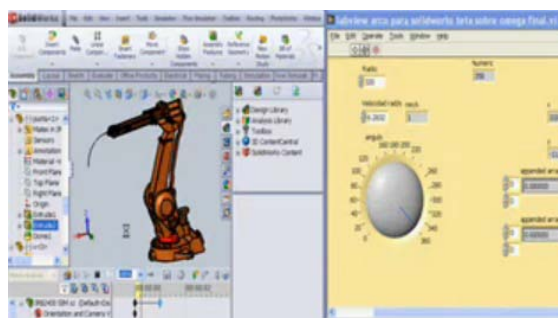
4.6. Přínos práce

Vyšetření kinematiky delta-robotu hraje zcela zásadní roli pro další vývoj tohoto zařízení, kterým se Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně intenzivně zabývá. Kinematický model (funkce v programu MATLAB), který vznikl v rámci této diplomové práce, může být použit k následujícím účelům:

4.6.1. Simulace pohybů – NI LabVIEW + SolidWorks

Při návrhu mechatronických systémů, k nimž delta-robot bezesporu patří, je potřeba implementovat řízení do technologického výrobku. Avšak před vznikem skutečného zařízení je žádoucí provést počítačovou simulaci z důvodu komplexní verifikace návrhu – tj. návrhu řízení i konstrukce. K tomu je zapotřebí nástroj, který by dokázal propojit program pro návrh řízení s 3D CAD programem. Na tuto potřebu reagovala firma National Instruments vydáním toolkitu umožňujícího propojení programu NI LabVIEW s 3D CAD nástrojem SolidWorks.[38]

Do programu NI LabVIEW je dále možné implementovat funkce programu MATLAB (např. kinematický model delta-robotu) a řídit tak aktuátory umístěné v 3D modelu. Lze tedy velmi jednoduše simulovat pohyb zařízení i s případnou kontrolou kolizí.



Obr. 4-35: Vzájemná spolupráce programů NI LabVIEW a SolidWorks[39]



4.6.2. Plánování dráhy a optimalizace struktury

Díky vytvořeným funkcím, je možné již při návrhu konkrétní úlohy prováděné na delta-robotu jednoduše zkontrolovat, zda požadovaná trajektorie pohybu leží v pracovním prostoru robotu a mimo singulární polohy. V opačném případě lze upravit trajektorii, popřípadě pro danou aplikaci upravit strukturu robotu – například použitím delších vyměnitelných vzpěr.

Úpravu délky vzpěr, aby bylo dosaženo požadovaných souřadnic, však nelze označit za optimalizaci struktury v pravém slova smyslu. Optimalizace návrhu je v oblasti strojů a robotů s PKS v současné době předmětem intenzivního výzkumu. K tomuto účelu slouží řada matematických optimalizačních metod - v oblasti optimalizace se vedle metod deterministických používají často metody heuristické, neboť není vždy nutné najít optimální řešení, ale stačí nalézt řešení, které se optimálním blíží. Úlohou optimalizace je nalézt takové parametry stroje, které nejlépe splní stanovené požadavky (velikost pracovního prostoru, polohy singularit, hmotnost, zrychlení, atd.).

4.6.3. Kalibrace

Stejně jako optimalizace představuje kalibrace mechanismů s PKS velmi složitý matematický problém. Na rozdíl od strojů se sériovou kinematikou totiž nelze u strojů s PKS kalibrovat jednotlivé parametry postupně, ale je nutné kalibrovat všechny parametry najednou. Přehledný úvod do této problematiky předkládá publikace [22].

Návrh kalibrace delta-robotu (kinematická kalibrace pomocí externího zařízení)

Vytvoření kinematického modelu je zcela nezbytným předpokladem pro kalibraci delta-robotu. Konkrétně se jedná o přímou úlohu kinematiky.

Kalibrace je založena na porovnání tzv. naměřených hodnot W_{meas} z měřicího přístroje a modelových hodnot W_{mod} získaných z kinematického modelu. W_{mod} jsou vypočítány na základě známých parametrů stroje P a referenčních hodnot W_{ref} . Referenční hodnoty jsou hodnoty získané z měřicího systému vlastního stroje – v případě delta-robotu se jedná o úhlová natočení jednotlivých pohonů θ .

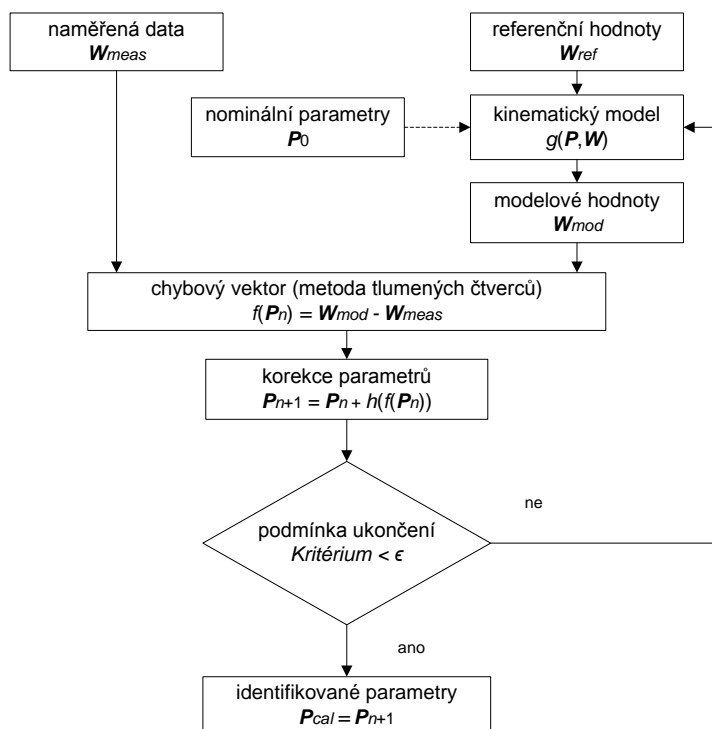
U delta-robotu by tedy probíhala kalibrace následujícím způsobem:

- 1) robot by najel do určité „kalibrační“ pozice
- 2) z přímé úlohy kinematiky by byla určena pozice TCP X , která odpovídá modelové hodnotě W_{mod}
- 3) pozice TCP by byla zároveň zaznamenána externím zařízením – např. laser-tracker, laserový interferometr, double ball-bar, mřížkový snímač apod. – hodnota zaznamenaná tímto zařízením odpovídá naměřené hodnotě W_{meas} .




- 4) Sekvence bodů 1) -3) by se opakovala, dokud by nebylo naměřeno dostatečné množství hodnot. Počet těchto hodnot musí být minimálně tak velký, jako je počet kalibrovaných parametrů. Chceme-li kalibrovat například 21 parametrů a v jedné „kalibrační“ pozici jsme schopni určit měřicím zařízením polohu TCP v souřadnicích x , y , z – pak potřebujeme minimálně 7 „kalibračních“ pozic. Toto měření by však bylo možné pomocí pouze 3D měřicího zařízení, jakým je například laser-tracker. Takové zařízení je však extrémně drahé (cca. 100 000 EUR). Proto se ke kalibraci používá i „jednodušších zařízení“, jakým je například double ball-bar. Double ball-bar sice umožňuje pouze 1D měření (ke kalibraci 21 parametrů by bylo zapotřebí minimálně 21 „kalibračních“ pozic), avšak jeho cena se pohybuje okolo 7000 EUR a ke kalibraci delta-robotu, který slouží primárně k manipulaci, by jistě dostačovalo. Dále je nutné zdůraznit, že pro kvalitní kalibraci je nutné naměřit podstatně větší počet hodnot (řádově desetinásobek minimálního počtu).
- 5) Rozdíl hodnot W_{mod} a W_{meas} pak představuje východisko pro kalibraci. Kalibrace je v podstatě matematická úloha optimalizace, kdy jsou hledány takové parametry stroje, při nichž je rozdíl těchto hodnot minimální. K těmto účelům slouží opět řada matematických metod, avšak na rozdíl od optimalizace struktury jsou preferovány metody deterministické, neboť jejich výsledky lze dokázat. Často se používá Levenberg-Marquardtova metoda (metoda tlumených čtverců), jež kombinuje výhody metody největšího spádu a Gauss-Newtonovy metody.

Na Obr. 4-36 je zobrazeno schéma výše uvedeného kalibračního procesu:



Obr. 4-36: Kalibrační proces[22]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 73
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Kalibrace delta-robotu i optimalizace jeho struktury by mohly být velmi zajímavými tématy dalších diplomových, či dizertačních prací. Neboť se jedná z velké části o matematické problémy, bylo by jistě vhodné spolupracovat na jejich řešení s kolegy z Ústavu matematiky FSI VUT v Brně – taková spolupráce by pak mohla vyústit v řešení, jež by měla potenciál zásadním způsobem ovlivnit světový vývoj strojů a robotů s PKS.

5. Experimentální robotizované pracoviště

Jedním z cílů této diplomové práce je vytvoření studie experimentálního robotizovaného pracoviště, jehož základem je analyzovaný delta-robot. Záměrem tedy není zpracovat kompletní konstrukční řešení RTP včetně technické dokumentace, ale jedná o zjednodušený návrh RTP, jež by mělo potencionál dospět v budoucnu ke skutečné realizaci v rámci Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Realizace vlastního RTP by se pak mohla stát předmětem dalších diplomových prací.

Je důležité zdůraznit, že ačkoliv je tato diplomová práce pojmenována „Experimentální robotizované pracoviště s delta-robotem“, po dohodě s vedoucím práce panem doc. Ing. Radkem Knoflíčkem, Dr. spočívá těžiště této práce v kinematické analýze, jež je uvedena v kapitole předcházející.

5.1. Analýza

Před vytvořením modelu experimentálního RTP je nutné analyzovat předpoklady, jaké by mělo dané pracoviště splňovat.

5.1.1. Požadavky na pracoviště


Požadavky na experimentální RTP lze rozdělit do tří hlavních skupin – na požadavky věcné, technické a ekonomické

Požadavky věcné – pracoviště by mělo sloužit k následujícím účelům:

- *Účely výukové* – pracoviště má sloužit studentům bakalářských, magisterských i doktorských studijních programů při studiu automatizace a manipulační techniky.
- *Účely experimentální* – pracoviště by mělo umožňovat jednoduchou výměnu či doplnění různých zařízení.
- *Účely prezentační* – pracoviště musí sloužit i k prezentaci Ústavu výrobních strojů systémů a robotiky na různých veletrzích a jiných akcích.

Požadavky technické:

- *Modulární stavba* - celé pracoviště by se mělo skládat z několika málo modulů, které by bylo možné snadno demontovat a celé pracoviště přesunout na jiné místo určení – např. na veletrh. Velikost jednotlivých modulů by měla být taková, aby bylo možné instalovat pracoviště i v místnosti, kde je průchodná šířka vstupních otvorů minimálně 80 cm.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 76
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- *Dostatek prostoru* – není nutné, aby byla stavba maximálně kompaktní, jak by tomu bylo u pracovišť určených do průmyslu. V experimentálním pracovišti musí být dostatek prostoru na další zařízení a periferie, které mohou sloužit k různým experimentům.
- *Využití různých zařízení průmyslové automatizace* – příkladem takových zařízení mohou být různé senzory či kamerové systémy apod.
- *Práce v automatickém cyklu bez nutnosti doplňování materiálu* – Práce v automatickém cyklu je základní podmínkou RTP, vždy je však takové RTP zapojeno do materiálového toku. Neboť jednou z podmínek je, aby experimentální pracoviště sloužilo k prezentačním účelům, je vhodné, aby RTP mohlo pracovat bez doplňování materiálu – např. opakující se úlohy paletizace a depaletizace.
- *Bezpečnost* – RTP musí být vůči svému okolí bezpečné – především při prezentaci pracoviště na veřejnosti. Je nutné učinit taková opatření, aby bylo zabráněno nechtěnému dotyku s robotem, zachycení, přiskřípnutí apod.

Požadavky ekonomické:

- *Nízké pořizovací náklady* – je žádoucí, aby pořizovací náklady takového experimentálního pracoviště byly minimální. Toho lze docílit maximálním využitím zařízení, jež má ústav k dispozici.
- *Nízké náklady na provoz a údržbu*

5.1.2. Volba úlohy

Jak již bylo uvedeno, delta-roboty slouží především k vysokorychlostní manipulaci s méně hmotnými předměty. Z tohoto důvodu se tyto roboty často využívají pro manipulaci v potravinářském průmyslu. Analyzovaný delta-robot doposud nebyl vybaven čtvrtou osou, která by byla umístěna na pohyblivé platformě a umožňovala měnit orientaci uchopeného předmětu (v rovině desky stolu). K uchopení předmětů je možné použít například vakuovou přísavku.

Vzhledem k výše uvedeným faktům byla zvolena následující úloha prováděná na experimentálním pracovišti:

„Sbírání sušenek kruhového tvaru“

To může být typická aplikace v situaci, kdy upečené sušenky vyjíždějí z trouby na dopravníku a je nutné je v určitých počtech seskupit a připravit pro fázi balení. Sušenky kruhového tvaru byly zvoleny záměrně, aby odpadla nutnost měnit jejich orientaci. Dalším plusem této úlohy je, že sušenky

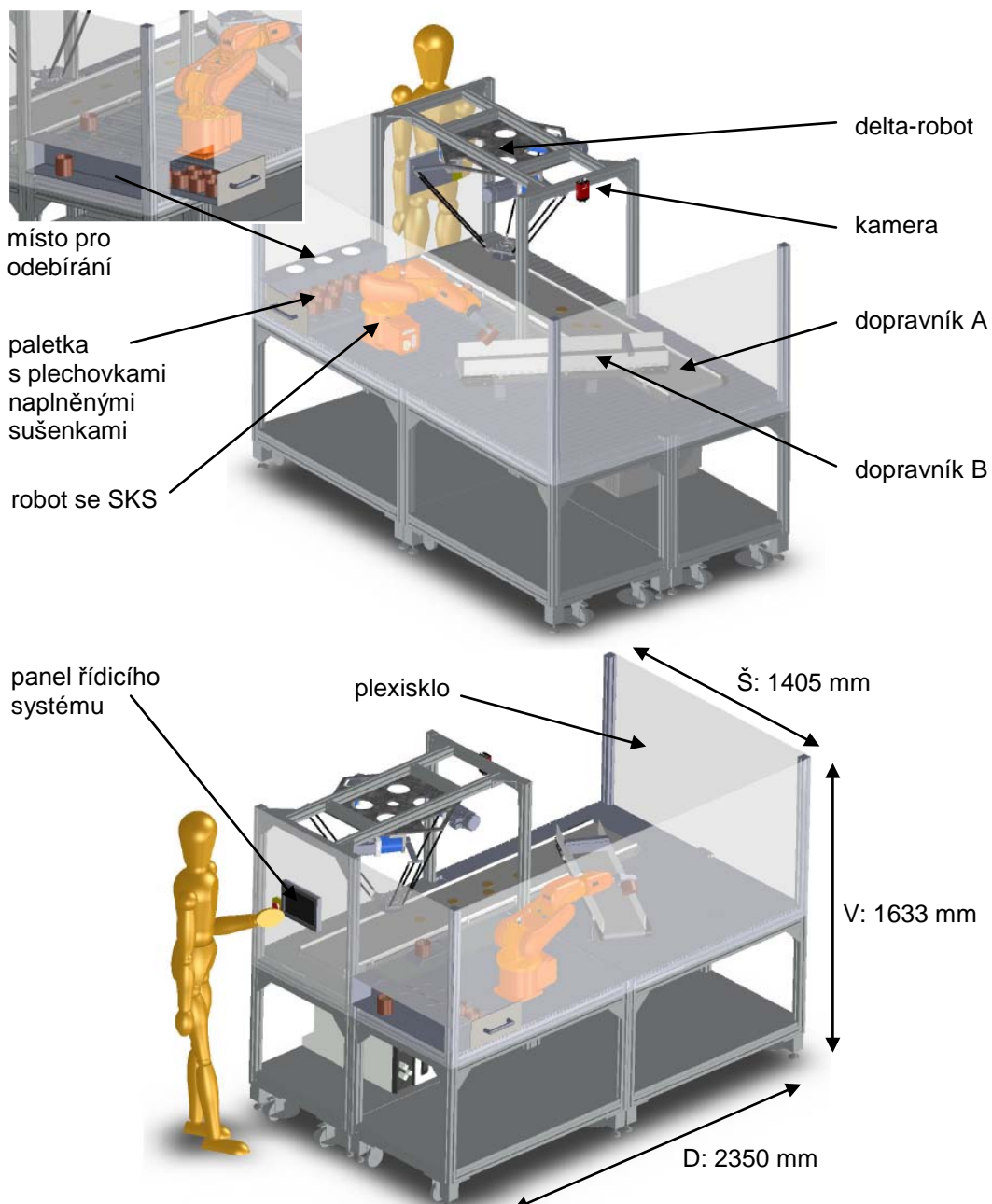


„nachystané“ tímto experimentálním RTP se mohou stát zajímavým zpestřením a chutným suvenýrem při prezentacích tohoto pracoviště. Pracovní cyklus experimentálního pracoviště je podrobně popsán v Odst. 5.2.2.

5.2. Model experimentálního RTP

5.2.1. Pohledy

Na uvedených vizualizacích je zobrazen model experimentálního pracoviště s popisem. K vytvoření tohoto modelu byl použit program SolidWorks.

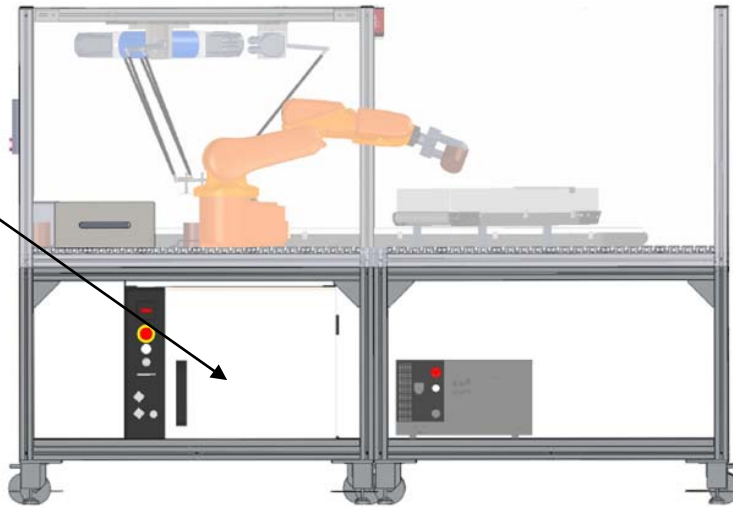


Obr. 5-1: Experimentální RTP – izometrický pohled

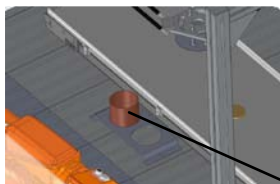


DIPLOMOVÁ PRÁCE

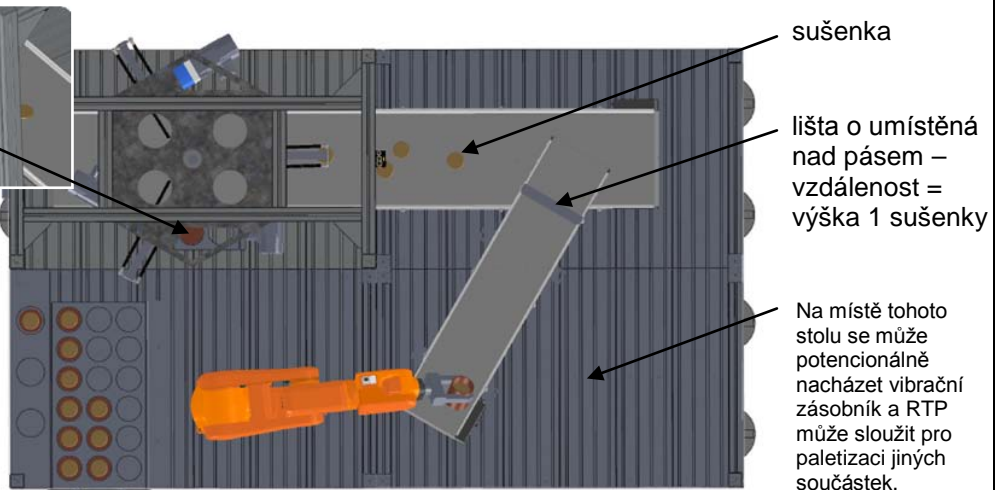
skříň řídicího systému



Obr. 5-2: Experimentální RTP – pohled zepředu



držák na 2 plechovky



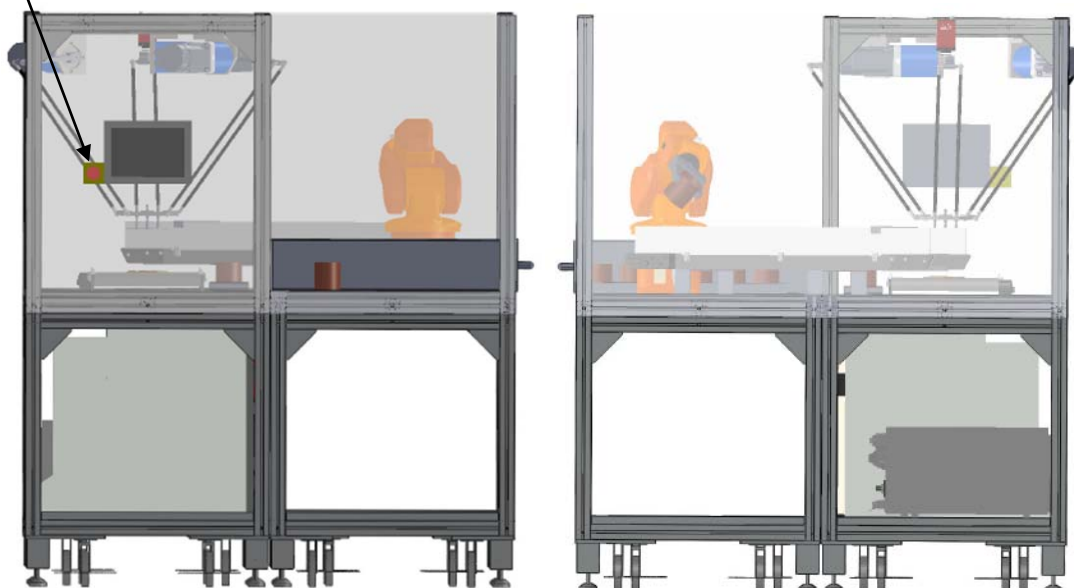
sušenka

lišta o umístěná nad pásem – vzdálenost = výška 1 sušenky

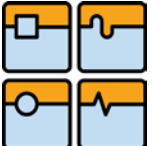
Na místě tohoto stolu se může potenciálně nacházet vibrační zásobník a RTP může sloužit pro paletizaci jiných součástek.

STOP tlačítko

Obr. 5-3: Experimentální RTP – pohled shora



Obr. 5-4: Experimentální RTP – pohled zleva a zprava

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 79
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

5.2.2. Pracovní cyklus

Pracovní cyklus pracoviště je popsán v následujících bodech:

1. Plná paletka s plechovkami naplněnými sušenkami je pracovníkem obsluhy zasunuta do RTP.
2. Stiskem povelu START je spuštěn vlastní pracovní cyklus.
3. Jsou spuštěny dopravníky A i B a jsou inicializovány oba roboty.
4. Robot se SKS odebere z paletky postupně dvě plechovky, nasype je na dopravník B a uloží do držáku na plechovky.
5. Kamera snímá pozice sušenek na pásu A – ty jsou odsílány do řídicího systému delta-robotu. Delta-robot pomocí přísavky sbírá sušenky a ukládá je do jedné z plechovek v držáku.
6. Jakmile je jedna plechovka naplněna, robot se SKS ji odebere, vysype na dopravník B a znovu vrátí do držáku. V mezidobí plní delta-robot druhou plechovku.
7. Cyklus bodů 5. a 6. se opakuje, dokud není stisknut povel SERVÍRUJ nebo povel KONEC.
8. V případě, že je stisknut povel SERVÍRUJ, není plechovka po naplnění vysypána, ale je robotem se SKS prostrčena do místa pro odebrání. Poté je odebrána nová plechovka z paletky, ta je vysypána na dopravník B a umístěna do držáku. RTP se pak vrátí k cyklu bodů 5. a 6.
9. V případě, že je stisknut povel KONEC, jsou postupně vráceny naplněné plechovky zpět do paletky.
10. Robot se SKS i delta-robot se přesunou do výchozí polohy a zastaví se dopravníky A i B.
11. RTP čeká na opětovné stisknutí povelu START.
12. Po stisknutí povelu START pracuje RTP opět v rámci bodů 3. až 10.
13. V případě, že by byly „naservírovány“ všechny plechovky, přesunou se opět oba roboty do výchozí pozice, zastaví se oba dopravníky a pracovník obsluhy je vyzván k opětovnému naplnění paletky.
14. Pracovní cyklus se poté znovu vrací do bodu 1.

Zjednodušené schéma tohoto pracovního cyklu je uvedeno v příloze C. Součástí této přílohy je rovněž i ideový návrh řízení RTP. Vytvoření vlastního programu pro řízení experimentálního RTP však není předmětem této práce.




Navržené RTP umožňuje použití celé řady dalších zařízení, které nejsou vyobrazeny na vizualizacích. Takovými zařízeními mohou být například:

- senzor kontrolující zasunutí paletky
- zámek, který znemožňuje vytažení paletky při práci RTP
- optický senzor, který zamezuje „sjetí“ sušenky z pásu A
- světelná závora, která chrání pracovní prostor RTP (zadní strana)











5.2.3. Komponenty

5.2.3.1. Komponenty, jež jsou k dispozici

název	fotografie	popis + vybraná data
delta-robot		popis delta-robotu – viz. kap. 4
řídící systém delta-robotu	 	CNC řídicí systém firmy Beckhoff servo-zesilovač - Beckhoff AX 5911 dotykový panel s integrovaným průmyslovým PC s procesorem Intel - Beckhoff CP 6202
robot se SKS		průmyslový robot KUKA KR3 počet os: 6 nosnost: 3 kg hmotnost: 53 kg
řídící systém robotu se SKS		řídící systém robotu KUKA KR3
efektor		efektor Schunk MEG 64 EC s příslušenstvím
kamera		kamera SICK IVC-2DM1122 snímání: 2D rozlišení: 1024 x 768 px komunikační rozhraní: vysokorychlostní ethernet

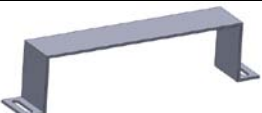


DIPLOMOVÁ PRÁCE

dopravník A		větší dopravník vybavený asynchronním motorem výkon: 200 W rozměry: 150 x 450 x 2100 mm
dopravník B		menší dopravník vybavený synchronním motorem výkon: 75 W rozměry: 120 x 180 x 700 mm
pracovní stůl		univerzální pracovní stůl vybavený deskou s T-drážkami rozměry: 75 x 80 x 110 mm materiál: dural
přísavka		přísavka od firmy SMC umístěná na platformě delta-robotu
kompresor		kompresor Silent-master 50-8-9W výkon: 400 W
optický senzor		optický senzor firmy IFM zamezující sjetí sušenky z dopravníku
světelná závara		světelná závara SICK C4000, jež může být namontována na zadní stranu RTP
laserový scanner		laserový scanner SICK S20B-1011BA, jež může sloužit ke hlídání pracovního prostoru RTP shora
STOP-tlačítko		STOP-tlačítko sloužící k okamžitému odstavení RTP – mělo by být umístěno vedle ovládacího panelu RTP
bezpečnostní PLC		nadřazené bezpečnosti PLC od firmy SICK pro zapojení bezpečnostních prvků

Tab. 5-1: Komponenty experimentálního RTP (k dispozici)

5.2.3.2. Komponenty, jež je nutné vyrobit / nakoupit

název	vizualizace	popis + vybraná data
profil A		profil s příslušenstvím určený k namontování plexiskel rozměry: 45 x 45 x 850 mm materiál: dural
plexisklo		upravené plexisklo ve formě desek tl. 5 mm určené ke krytí pracovního prostoru částečné krytí: 5 m ² (viz. 3D model) plné krytí: 10 m ² (ze všech stran + shora)
lišta A		lišta vymežující místo pro odebrání rozměry: 130 x 150 x 700 mm
lišta B		lišta vymežující polohu paletky rozměry: 30 x 55 x 600 mm
lišta C		lišta vymežující prostor nad pásem dopravníku B rozměry: 30 x 40 x 180 mm
lišta D		lišta pod dopravník B rozměry: 80 x 200 x 400 mm
paletka		paletka pro uložení plechovek se sušenkami rozměry: 150 x 330 x 600 mm
držák		držák 2 plechovek u delta-robotu rozměry: 30 x 110 x 250 mm
spojovací materiál		šrouby, matice, podložky apod.
plechovka		nemusí se jednat bezpodmínečně o plechovou dózu – lze využít i dózu plastovou apod. příklad – obal od arašídů či bramborových lupínků
sušenky		např. sušenky Albert, holandské vafle apod.

Tab. 5-2: Komponenty experimentálního RTP (výroba / nákup)



5.2.4. Pořizovací náklady

Z důvodu minimalizace pořizovacích nákladů, bylo navrženo takové experimentální RTP, v němž jsou maximálně využita zařízení, jež má Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky k dispozici – viz. Tab. 5-1. Komponenty, které je nutno vyrobit / zakoupit uvádí Tab. 5-2. Odhad pořizovacích nákladů těchto komponent je uveden v následující tabulce:

název	počet	odhad ceny (bez DPH)	poznámka
profil A	3 ks	400,- Kč x 3 = 1.200,- Kč	odhad ceny vychází z ceníku uvedeného na stránkách: http://www.askmt.com/
plexisklo	5 m ²	1.200,- Kč x 5 = 6.000,- Kč	odhad ceny vychází z ceníku uvedeného na stránkách: http://www.plexisklo.eu/
lišta A-D, paletka, držák	6 ks	1.000,- Kč	tyto komponenty by mely být vyrobeny v rámci výrobních kapacit na ÚVSSR – cena je uvedena pouze za materiál, jenž je již k dispozici – 1 m ² duralového plech tl. 3 mm (zdroj: Ing. Pochylý)
spojovací materiál	---	250,- Kč	---
plechovka	18 ks	20,- Kč x 18 = 360 Kč	---
náplň plechovek (sušenky)	18 ks	10,- Kč x 18 = 180 Kč	---

celkem 8.990,- Kč + rezerva = 10.000,- Kč (bez DPH)


Tab. 5-3: Odhad pořizovacích nákladů

Z uvedeného odhadu vyplývá, že pořizovací cena takového pracoviště by se měla činit přibližně 10.000,- Kč (bez DPH). To však pouze za předpokladu, že do ceny není zahrnuta práce zaměstnanců ÚVSSR. Předpokládá se, že vlastní montáž a oživení pracoviště by měly trvat cca. 100 pracovních hodin.

5.2.5. Bezpečnost

Bezpečnost strojních zařízení je v současné době klíčová. Ačkoliv experimentální RTP není určeno pro nasazení v průmyslu je nutné i u takového zařízení rozpoznat možná rizika a ta co možná nejvíce minimalizovat.

U navrhovaného RTP lze identifikovat dva významné typy nebezpečí, jež mohou vést k újmě na zdraví:

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 84
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

1) Elektrická nebezpečí zapříčiněná dotykem osob živých částí nebo částí, které se staly živými v důsledku poruchy:

- elektrické rozvody je nutné důkladně izolovat
- veškerá elektrická zařízení musí být označena štítky informujícími o nebezpečí vysokého napětí (motory dopravníků, servomotory, robot se SKS, popř. skříňě řídicího systému – rozvaděče)
- skříňě řídicího systému – rozvaděče, kde se nachází živé části, musí být uzamčeny a údržbu na nich musí provádět pouze osoba k tomuto účelu oprávněná

2) Nebezpečí stlačení, stříhu a říznutí:

- nebezpečí stlačení u robotu se SKS - je nutné dbát zvýšené opatrnosti při programování robotu; pokud to situace dovolí, je vhodné zvolit takový pohyb robotu, aby se koncový efektor pohyboval v dostatečné vzdálenosti od rámu RTP a nebezpečí stlačení bylo minimalizováno
- nebezpečí stlačení u delta-robotu – akutní nebezpečí stlačení hrozí při neopatrnosti mezi ramenem a platformou; na toto nebezpečí je nutné upozornit varovnými štítky a minimalizovat jej volbou vhodného pohybu; nebezpečí stlačení dále hrozí mezi koncovým efektozem a deskou stolu resp. přísavkou a dopravníkem – toto nebezpečí lze minimalizovat volbou vhodného efektoru vybaveného např. pružinou, který se po dosažení určitého tlaku zasune
- nebezpečí stříhu hrozí mezi plechovkou a rámem stroje, kdyby osoba v „místě pro odebrání“ prostrčila prsty kruhovým otvorem dovnitř RTP; toto nebezpečí je nutné ošetřit volbou takové síly koncového efektoru (robot se SKS), aby se plechovka při nárazu na pevnou část snadno zasunula
- nebezpečí říznutí - veškeré části RTP s nimiž se manipuluje, musí být zbaveny otřepů a ostrých hran

Při prezentacích experimentálního RTP musí být zajištěna téměř absolutní bezpečnost, neboť se v jeho blízkosti mohou pohybovat osoby z řad laické veřejnosti, děti apod. Pro tyto příležitosti je zvoleno krytí pracovního prostoru plexisklem. Minimální krytí je ze tří stran (přední, pravá a levá) v případě, že přístup k zadní části je zamezen. V případě, že je pracoviště přístupné ze všech stran, je možné zadní stranu vybavit optickými závorami (popř. rovněž plexisklem). Horní strana může být hlídána např. pomocí laserového scanneru.



5.2.6. Umístění

Navrhované experimentální RTP by mohlo být v budoucnu umístěno např. v počítačové učebně ÚVSSR č. A1/1213:



Obr. 5-5: Možné umístění experimentálního RTP

5.3. Vyhodnocení přínosu experimentálního RTP

Experimentální RTP bylo záměrně navrženo tak, aby kombinovalo řadu různých zařízení. Je použit robot s paralelní i sériovou kinematickou strukturou, dopravník se synchronním i asynchronním motorem. Je nutné využití kamery, optických senzorů a kombinace různých typů řídicích systémů. Do RTP je dále možné integrovat různá bezpečnostní zařízení jako je optická závora či laserový scanner. Přitom byly zvoleny pouze takové komponenty, které jsou již k dispozici, což vede k razantnímu snížení pořizovacích nákladů.

Výhodou takového komplexního RTP je, že může velmi dobře sloužit při výuce automatizace výrobních systémů. Samotné sestavení a zprovoznění RTP může být velmi zajímavým tématem diplomových prací. Funkční pracoviště pak může dále sloužit k experimentálním účelům, jakými může být např. automatická kalibrace delta-robotu, optimalizace dráhy koncového efektoru apod. Experimentální RTP bude dále jistě využito k prezentaci ÚVSSR.



6. Závěr

Zadáním byly stanoveny tři základní cíle této práce:

- Analýza strojů s paralelní kinematickou strukturou
- Kinematická analýza existujícího delta-robotu
- Studie experimentálního pracoviště s delta-robotem


Těmto bodům předchází rešeršní část, jež je věnována úvodu do konstrukčního řešení robotizovaných pracovišť. Tato část se zabývá metodami návrhu robotizovaných pracovišť, jejich základními stavebními komponenty a uvádí příklady robotizovaných pracovišť v průmyslu.

Z analýzy strojů s paralelní kinematickou strukturou vyplývá, že se tyto stroje začínají uplatňovat v průmyslu stále více a to nejen v oblasti manipulace, ale i v oblasti výrobních strojů. Mezi hlavní výhody těchto strojů patří lepší dynamické vlastnosti a namáhání konstrukčních součástí převážně na tah a tlak. S tím souvisí i nižší energetická náročnost těchto strojů, neboť pro dosažení stejné tuhosti je možné použít podstatně subtilnější a lehčí komponenty. Energetická náročnost výrobních strojů je vzhledem ke stoupajícím cenám energií mezi výrobcí i odbornou veřejností hojně diskutované téma a v krátké době lze předpokládat významný rozvoj výrobních strojů s netradičními kinematickými strukturami. Mezi tyto struktury patří například stroje s takzvanou hybridní kinematikou, jež kombinují výhody kinematiky sériové a paralelní. Součástí této analýzy je popis základní stavby strojů s paralelní kinematickou strukturou, rozbor jejich nasazení v průmyslu a schéma jejich historického vývoje.

Jádro této diplomové práce představuje kinematická analýza delta-robotu, jenž byl zkonstruován a postaven na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Kinematická analýza představuje další krok ve vývoji tohoto zařízení. Knihovnu funkcí v programu MATLAB, která vznikla v rámci této diplomové práce lze využít nejen pro řízení robotu, ale i pro vyšetřování závislostí mezi pohybem koncového efektoru a pohonů, vykreslení a kontrolu pracovního prostoru a singulárních poloh, simulaci pohybů robotu, plánování dráhy či kalibraci. Kinematická analýza delta-robotu prezentovaná v této práci je založena čistě na analytické geometrii. Vedle řešení přímé a nepřímé úlohy kinematiky, které bylo ověřeno na 3D modelu, bylo provedeno i vyšetření pracovního prostoru a singulárních poloh. Z tohoto vyšetření vyplývá, že u analyzovaného delta-robotu se singularity nacházejí pouze na jeho okrajích. Toto vyšetření bylo založeno na dvou přístupech. Na metodě, jež je založena na nulových determinantech Jacobiho matic, a zcela netradiční metodě, která vychází z geometrického řešení transformace souřadnic a grafického vyjádření singularit. Kinematická analýza delta-robotu, jež tvoří kapitolu 4. této diplomové práce, byla zařazena do vědeckého článku, který bude vydán ve sborníku konference MECHATRONICS 2011 (21. - 24. září, Varšava):

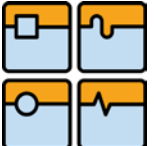
„OPL, Miroslav , et al. DELTA - a robot with parallel kinematics. Mechatronics 2011, to be published.“

Třetím cílem této práce bylo vytvoření studie experimentálního robotizovaného pracoviště, jehož základní součástí by byl analyzovaný delta-robot. Bylo navrženo pracoviště, které simuluje aplikaci v potravinářském průmyslu – sbírání sušenek. Při

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 88
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

návrhu byl respektován požadavek na co nejnižší pořizovací náklady a maximální využití různých typů zařízení. Byly proto maximálně využity komponenty, které jsou na Ústavu výrobních strojů systémů a robotiky k dispozici. Navrhované pracoviště by v budoucnu mohlo sloužit k účelům výukovým, experimentální, v rámci prezentací Ústavu na různých akcích, veletrzích apod.

Jsem přesvědčen, že se podařilo dosáhnout cílů, jež mi určilo zadání, a věřím, že výsledky této diplomové práce budou využity při dalším vývoji delta-robotu.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 89
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Zusammenfassung

In der Aufgabenstellung wurden drei Hauptziele festgelegt:

- Analyse der Maschinen mit Parallelkinematik
- Kinematische Analyse des existierenden Delta-Roboters
- Studie einer experimentellen Roboterzelle mit dem integrierten Delta-Roboter

Diesen Schwerpunkten geht der Recherche-Teil voraus, der der Einführung in die konstruktive Lösung von Roboterzellen gewidmet ist. Dieser Teil befasst sich mit den Methoden des Entwurfs von Roboterzellen, mit ihren Grundbaukomponenten und führt Beispiele von Roboterzellen in der Industrie an.

Aus der Analyse von Maschinen mit Parallelkinematik geht hervor, dass diese Maschinen beginnen sich in der Industrie immer mehr durchzusetzen. Und nicht nur im Bereich der Manipulation, sondern auch im Bereich der Werkzeugmaschinen. Zu den Hauptvorteilen von diesen Maschinen gehören bessere dynamische Eigenschaften und Beanspruchung der Bauteile vorwiegend im Zug und Druck. Damit ist auch ein niedrigerer Energieaufwand verbunden, denn für Erreichung derselben Steifigkeit ist es möglich, wesentlich leichtere Komponenten zu benutzen. Der Energieaufwand bei Werkzeugmaschinen ist im Zusammenhang mit steigenden Preisen der Energien ein oft diskutiertes Thema bei den Herstellern und in der Fachwelt, und in kurzer Zeit kann man einen bedeutenden Aufschwung von Werkzeugmaschinen mit unkonventionellen kinematischen Strukturen erwarten. Zu diesen Strukturen zählt man zum Beispiel Maschinen mit sog. Hybridkinematik, die die Vorteile von seriellen Kinematik und Parallelkinematik kombinieren. Ein Bestandteil dieser Analyse ist auch die Beschreibung des Grundaufbaus der Maschinen mit parallelkinematischer Struktur, die Bewertung ihres Einsatzes in der Industrie und das Schema ihrer historischen Entwicklung.

Den Kern dieser Diplomarbeit stellt kinematische Analyse des Delta-Roboters dar, der am Institut für Werkzeugmaschinen, Produktionssysteme und Robotik der Fakultät für Maschinenbau VUT Brno konstruiert und aufgebaut wurde. Die kinematische Analyse stellt einen weiteren Schritt in der Entwicklung von diesem Gerät dar. Die Bibliothek von Funktionen im Programm MATLAB, die im Rahmen dieser Diplomarbeit entstanden ist, kann nicht nur zur Steuerung des Roboters genutzt werden, sondern auch zur Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen der Bewegung des Endeffektors und der Antriebe, zur Darstellung und Kontrolle des Arbeitsraums und der Singularitäten, zur Simulierung der Roboterbewegungen, zur Bahnplanung oder zur Kalibrierung.

Die kinematische Analyse des Delta-Roboters, die in dieser Arbeit präsentiert wird, ist rein auf der analytischen Geometrie gegründet. Neben der Lösung des Direkten und Inversen Kinematischen Problems, die am 3D-Modell verifiziert wurde, wurden auch Untersuchungen des Arbeitsraums und der Singularitäten durchgeführt. Aus der Untersuchung geht hervor, dass beim analysierten Delta-Roboter die Singularitäten nur am Rand des Arbeitsraums liegen. Diese Untersuchung beruht auf zwei verschiedenen Prinzipien: Auf der Methode, die auf Null-Determinanten basiert, und auf einer ganz neuen unkonventionellen Methode, die von der geometrischen Lösung der Koordinatentransformation und von der graphischen Formulierung der Singularitäten ausgeht. Die kinematische Analyse, die das Kapitel 4 dieser Diplomarbeit bildet, wurde in einen wissenschaftlichen Aufsatz

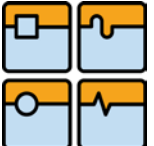
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 90
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

eingegliedert, der im Sammelbuch der Konferenz MECHATRONICS 2011 (21. - 24. September, Warschau) herausgegeben wird:

„OPL, Miroslav , et al. DELTA - a robot with parallel kinematics. Mechatronics 2011, to be published.“

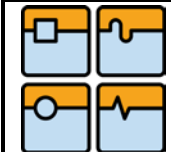
Drittes Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer Studie für experimentelle Roboterzelle, deren Bestandteil der analysierte Delta-Roboter ist. Es wurde eine Roboterzelle entworfen, die die Anwendung in der Lebensmittelindustrie simuliert – das Aufsammeln von Keksen. Beim Entwurf wurde die Anforderung an möglichst geringe Anschaffungskosten und an maximale Ausnutzung von verschiedenen Arten der Geräte respektiert. Deshalb wurden im höchst möglichen Maße solche Komponenten ausgenutzt, die am Institut für Werkzeugmaschinen, Produktionssysteme und Robotik zur Verfügung stehen. Die entworfene Roboterzelle könnte in der Zukunft den Unterrichtszwecken sowie den experimentellen Zwecken, zur Präsentation des Institutes im Rahmen verschiedener Veranstaltungen, Messen usw. dienen.

Ich bin überzeugt, dass alle in der Aufgabenstellung festgelegten Ziele erreicht wurden; und ich hoffe, dass die Ergebnisse dieser Diplomarbeit für weitere Entwicklung des Delta-Roboters genutzt werden können.


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 91
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Seznam literatury

- [1] BURKOVIČ, Jan. Navrhování RTP. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 2002. 112 s. ISBN 80-248-0217-1.
- [2] BUZEK, Vladimír. Periferní zařízení RTP. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1993. 160 s. ISBN 80-7078-159-9.
- [3] KOLÍBAL, Zdeněk; BĚLOHOUBEK, Pavel. Projektování výrobních systémů s PRaM. první vydání. Brno : Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1993. 88 s. ISBN 80-214-0532-5.
- [4] ELPA KUPEČEK, spol. s.r.o. [online]. [cit. 2011-04-17]. Dopravníkové systémy. Dostupné z WWW: <http://www.elpakupecek.cz/dopravnik_cz.htm>.
- [5] Průmyslová robotizace : svařování a řezání kovů. Hadyna - International, spol. s.r.o., Ostrava, 2009. 20 s. Dostupný z WWW: <http://www.hadyna.cz/pdf/Robotizace_CZ.pdf>.
- [6] TechPark [online]. 2008 [cit. 2011-04-17]. Obráběcí stroj jako robot. Dostupné z WWW: <<http://www.techpark.sk/technika-92009/obrabeci-stroj-jako-robot.html>>.
- [7] SICK - Home [online]. 2009 [cit. 2009-05-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.sick.cz/cz/cs.html>>.
- [8] Zerspanungstechnik.at [online]. 2010 [cit. 2011-04-11]. Roboterbedienung so einfach wie nie. Dostupné z WWW: <http://www.zerspanungstechnik.at/news/plattform-zerspanungs-technik/roboterloesungen/roboterbedienung-so-einfach-wie-nie_23874>.
- [9] HADYNA, Daniel. Obrábění, frézování, vrtání, broušení průmyslovým robotem : Představení možností investičních úspor při realizaci robotizovaného pracoviště. Svět svaru [online]. 2009, prd, [cit. 2011-04-11]. Dostupný z WWW: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2_Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20robotem.pdf>.
- [10] AT&P [online]. 2009 [cit. 2011-04-14]. Momento presst erhitzte Teile mit Hilfe von AP&. Dostupné z WWW: <http://de.apgroup.com/Neuigkeiten_Veranstaltungen/Presseberichte/PR2048_Momento>.
- [11] BARTOŠEK, Jindřich. DESIGN OF A ROBOTIC CELL FOR HYDRAULIC. Fakulta strojního inženýrství, 2009. 56 s. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [12] CONTEXO automation [online]. [cit. 2011-04-17]. Roboterzelle. Dostupné z WWW: <<http://www.contexo-gmbh.de/content/roboterzelle.html>>.
- [13] ABB [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. ABB IRB 360. Dostupné z WWW: <<http://www.abb.com/product/seitp327/cf1b0a0847a71711c12573f40037d5cf.aspx>>.
- [14] ABB [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. Sbírání a odebírání. Dostupné z WWW: <<http://www.abb.cz/product/seitp327/d138aeb4ad7bf788c12571300056628a.aspx>>.
- [15] MERLET, J.-P. *Parallel Robots*. Sophia-Antipolis: Springer, 2006. 394 s. ISBN 1-4020-4132-2.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 92
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [16] *Direct Industry* [online]. 2011 [cit. 2011-03-21]. 6-axis parallel-kinematic hexapod micropositioning system - MICOS. Dostupné z WWW: <<http://www.directindustry.com/prod/micos/6-axis-parallel-kinematics-hexapod-micro-positioning-systems-7412-29336.html>>.
- [17] NEUGEBAUER, Reimund. *Parallelkinematische Maschinen : Entwurf, Konstruktion, Anwendung*. Berlin : Springer, 2006. 261 s. ISBN 103-540-20991-3.
- [18] WEIDERMANN, Frank. *Strukturoptimierung von parallelkinematischen Werkzeugmaschinen*. [s.l.], 2002. 126 s. Dizertační práce. TU Chemnitz. ISBN 3-928921-81-9.
- [19] Komponenty pro paralelní kinematické struktury. *MM Průmyslové spektrum*. 2002, 4, Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/komponenty-pro-paralelni-kinematicke-struktury>>.
- [20] INA-Schaeffler KG. Komponenten für parallele Kinematiken. *Katalog*. Prd, prd, s. prd. Dostupný také z WWW: <http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/library/downloads/ma_i66_de_de.pdf>.
- [21] Neugebauer, R., Wittstock, V. a Drossel, W. *Werkzeugmaschinen-Mechatronik, Arbeitsblätter*. Chemnitz : TU-Chemnitz, 2010
- [22] ECORCHARD, Gaël. Static Accuracy Enhancement of Redundantly Actuated Parallel Kinematic Machine Tools. Chemnitz, 2008. 164 s. Dizertační práce. TU Chemnitz. Dostupné z WWW: <<http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0206>>.
- [23] METROM, mechatronische Maschinen [online]. [cit. 2011-04-18]. P1000. Dostupné z WWW: <<http://www.metrom.com/index.php?id=16>>.
- [24] PKM Tricept [online]. [cit. 2011-04-22]. Tricept T605. Dostupné z WWW: <<http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240238268>>.
- [25] Neugebauer, R. und Ihlenfeldt, S. *Parallelkinematiken, Katalog*. Chemnitz : Fraunhofer IWU.
- [26] Využití robotů v potravinářství. *AUTOMATIZACE* [online]. 2006, 49, 10, [cit. 2011-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1477>>.
- [27] Šmíd, J. Robot v rozličných aplikacích. *MM Průmyslové spektrum*. 2010, 4.
- [28] PÍŠEK, Ladislav. Vliv geometrických odchylek na výslednou přesnost polohování tripodu. *Fakulta strojního inženýrství*, 2007. 133 s. Dizertační práce. VUT v Brně.
- [29] METROM, mechatronische Maschinen [online]. [cit. 2011-04-23]. Maschine zum Werkstück. Dostupné z WWW: <<http://www.metrom.com/index.php?id=19>>.
- [30] BRADÁČ, František. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky [online]. 2011 [cit. 2011-05-13]. Manipulátor na bázi paralelní kinematiky – delta robot s třemi osami. Dostupné z WWW: <http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=991>.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 93
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [31] Katalog. Dokumentation : Synchron Servomotor AM3000 und AM5000. Verl : Beckhoff Automation, 63 s. Dostupné z WWW: <http://download.beckhoff.com/download/Document/Drives/AM3000_Am3500_BA_de.pdf>.
- [32] 5M [online]. 2008 [cit. 2011-05-13]. Kompozitní profily. Dostupné z WWW: <<http://www.5m.cz/cz/kompozitni-profily/>>.
- [33] T.E.A. TECHNIK, s.r.o. [online]. 2007 [cit. 2011-05-13]. Úhlové klouby bez třmenu typu C. Dostupné z WWW: <<http://www.teatechnik.cz/trmenu-typ-c/>>.
- [34] Wikipedia.de [online]. 2011 [cit. 2011-05-03]. Singularität. Dostupné z WWW: <<http://de.wikipedia.org/wiki/Singularit%C3%A4t>>.
- [35] Wikipedia.cz [online]. 2011 [cit. 2011-05-04]. Gravitační singularita. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD_singularita>.
- [36] LÓPEZ, M., et al. Delta robot : inverse, direct, and intermediate Jacobians. In Proc. IMechE. 220. [s.l.] : Institution of mechanical engineers, 2006. s. 103-109. Dostupné z WWW: <<http://robotics.caltech.edu/~jwb/courses/ME115/handouts/DeltaRobotInverseDirectIntermediateJacobians.pdf>>.
- [37] DEGANI, Amir; WOLF, Alon. Graphical Singularity Analysis of Planar Parallel Manipulators : In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, Florida : 2006. s. 751 - 756. Dostupné z WWW: <http://www.cs.cmu.edu/~biorobotics/papers/ICRA06_Singularities_Degani.pdf>.
- [38] FRIDRICHOVSKÝ, Jan. MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ MECHATRONICKÝCH SOUSTAV V SOLIDWORKS A NI LABVIEW. Brno, 2009. 71 s. Diplomová práce. VUT v Brně. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18138>.
- [39] Youtube.com [online]. 2009 [cit. 2011-05-06]. Arco generado en Labview en SolidWorks simulando Robot ABB. Dostupné z WWW: <http://www.youtube.com/watch?v=0e7XB_93-pg&feature=related>.



Příloha A

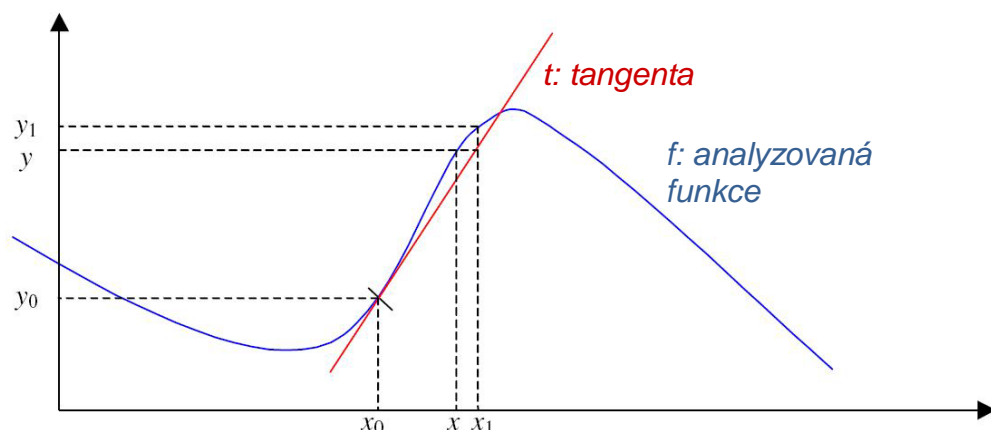
Newtonova metoda

Newtonova metoda je v matematice standartní metoda k numerickému řešení nelineárních rovnic a jejich soustav.

- *Vysvětlení na dvourozměrném případě*

Nechť je $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ spojitá diferencovatelná reálná funkce. Tato funkce není bijektivní (resp. invertovatelná), proto je problematické najít hodnotu x , která odpovídá dané hodnotě y . Iterační proces začíná volbou startovacího bodu (x_0, y_0) . Výběh tohoto bodu je zásadní. V případě, že je tento bod špatně zvolen, metoda nemusí konvergovat, popřípadě konverguje k chybnému výsledku.

Po zvolení startovacího bodu $(x_0, y_0 = f(x_0))$, jenž leží na křivce f , následuje v tomto bodě výpočet derivace prvního řádu funkce f .



Obr. 1: Newtonova metoda: 2D případ

$$f(x) \approx f(x_0) + (x - x_0) \cdot \frac{df}{dx}(x_0) \quad (1)$$

Je zřejmé, že aproximace (1) pro $x = x_1$ je tím přesnější, čím menší je vzdálenost mezi x_1 a x_0 .

V Newtonově metodě má tato aproximace následující podobu:

$$y - f(x_0) \approx (x_1 - x_0) \cdot p_0 \quad (2)$$

- p_0 je zde směrnice tangenty funkce f v bodě (x_0, y_0)

$$p_0 = \frac{df}{dx}(x_0) \quad (3)$$

Rovnici (3) pak můžeme přepsat následujícím způsobem:

$$\Delta y = \Delta x \cdot p_0 \quad (4)$$

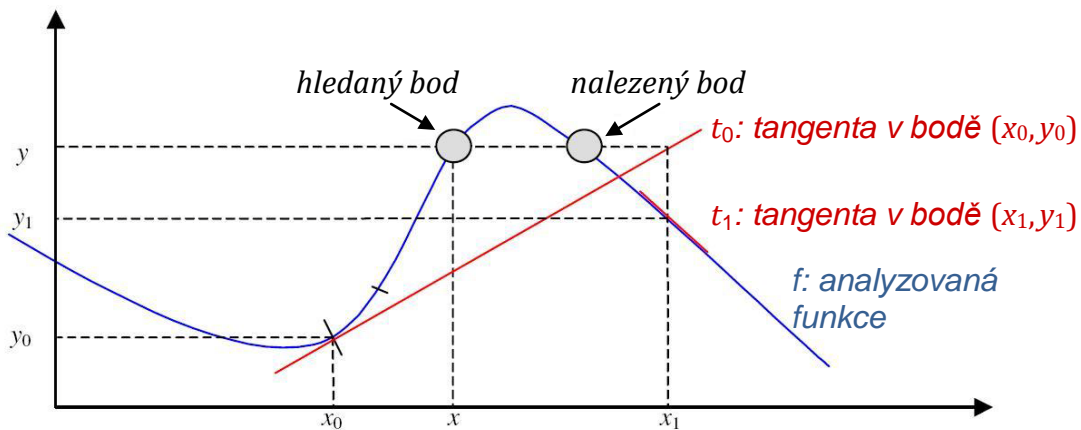


Za předpokladu, že $p_0 \neq 0$:

$$\Delta x = \Delta y \cdot p_0^{-1} \rightarrow x_1 = x_0 + \Delta y \cdot p_0^{-1} \quad (5)$$

Bod (x_1, y) je bodu (x, y) blíže než bod (x_0, y_0) . V následujícím iteračním kroku je startovacím bodem $(x_1, y_1 = f(x_1))$ a je vypočítán nový bod (x_2, y) . Proces iterace pokračuje až do dosažení konečné podmínky $|y_i - y| < \epsilon$; i představuje počet iteračních kroků a ϵ je zvolená hodnota určující přesnost aproximace.

Na Obr. 2 můžeme vidět, jaká situace nastane, když je špatně zvolen startovací bod.



Obr. 2: Výběr startovacího bodu

- **Vícerozměrné soustavy rovnic**

Výše jmenovaný princip musí být rozšířen, aby byly řešitelné i vícerozměrné soustavy rovnic. Funkce f má pak následující podobu

$$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (6)$$

Místo tangenty p musí být použita Jacobiho matice.

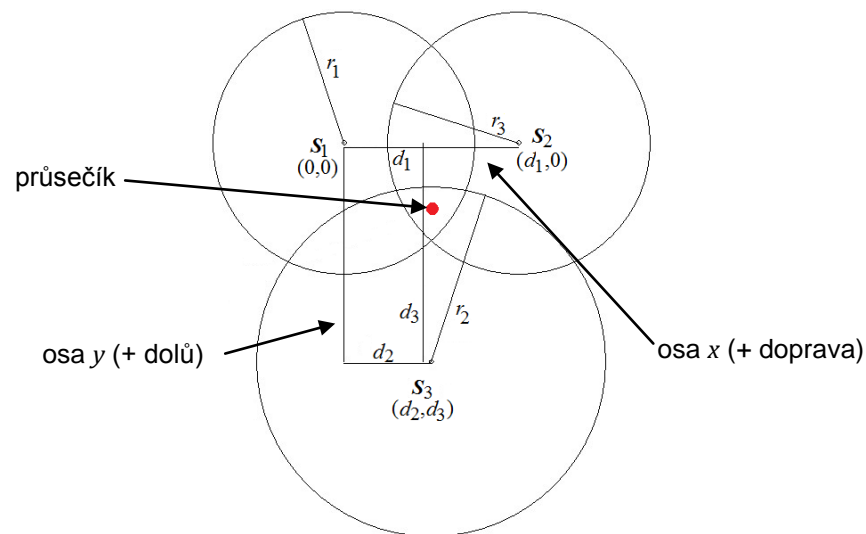
$$\mathbf{J} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (7)$$



Příloha B

Výpočet trilaterace

Pro zjednodušení výpočtu je zaveden pomocný souřadný systém. Rovnice tří kulových ploch formulovány tak, že jejich středy leží v rovině $z = 0$. Jeden střed leží v počátku souřadného systému a druhý leží na ose x . Rovnice lze takto formulovat pro jakékoliv tři body, které nejsou kolineární. Nalezené řešení je pak transformováno do původního souřadného systému.



Obr. 1: Trilaterace-souřadný systém

Formulace rovnic kulových ploch:

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (1)$$

$$r_2^2 = (x - d_1)^2 + y^2 + z^2 \quad (2)$$

$$r_3^2 = (x - d_2)^2 + (y - d_3)^2 + z^2 \quad (3)$$

Hledáme řešení rovnic – tj. body $p_{1,2} = (x, y, \pm z)$:

Souřadnice x

Odečteme rovnici (2) od rovnice (1):

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d_1^2}{2d_1} \quad (4)$$

Souřadnice y

Za předpokladu $(d_1 - r_1) < r_2 < (d_1 + r_1)$ se dosadí rovnice (4) do rovnice (1):

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d_1^2}{2d_1} \quad (5)$$



Zavedeme substituci:

$$y^2 + z^2 = r_1^2 - x^2 \quad (6)$$

Pak platí:

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - x^2 + (x - d_2)^2 + d_3^2}{2d_3} = \frac{r_1^2 - r_3^2 + d_2^2 + d_3^2}{2d_3} - \frac{d_2}{d_3}x \quad (7)$$

Souřadnice z

Upravíme rovnici (1):

$$z = \pm \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (8)$$

Transformace do původního souřadného systému

Středy kulových ploch S_1 , S_2 a S_3 jsou zadány i v absolutním souřadném systému. Můžeme pak vypočítat jednotkový vektor e_x z S_1 do S_2 :

$$e_x = \frac{S_2 - S_1}{\|S_2 - S_1\|} \quad (9)$$

Dále se vypočítá vzdálenost d_2 bodu S_3 od osy y pomocného souřadného systému (Obr. 1):

$$d_2 = e_x \cdot (S_3 - S_1) \quad (10)$$

Výpočet jednotkového vektoru e_y :

$$e_y = \frac{S_3 - S_1 - d_2 e_x}{\|S_3 - S_1 - d_2 e_x\|} \quad (11)$$

Jednotkový vektor e_z je pak:

$$e_z = e_x \times e_y \quad (12)$$

Vzdálenosti d_1 a d_3 (Obr. 1) jsou:

$$d_1 = \|S_2 - S_1\| \quad (13)$$

$$d_3 = e_y \cdot (S_3 - S_1) \quad (14)$$

Hodnoty d_1 , d_2 a d_3 se dosadí do rovnic (4) a (7) a jsou vypočítány hodnoty x , y a z .

Provedeme transformaci bodů $p_{1,2} = (x, y, \pm z)$ z pomocného do původního souřadného systému:

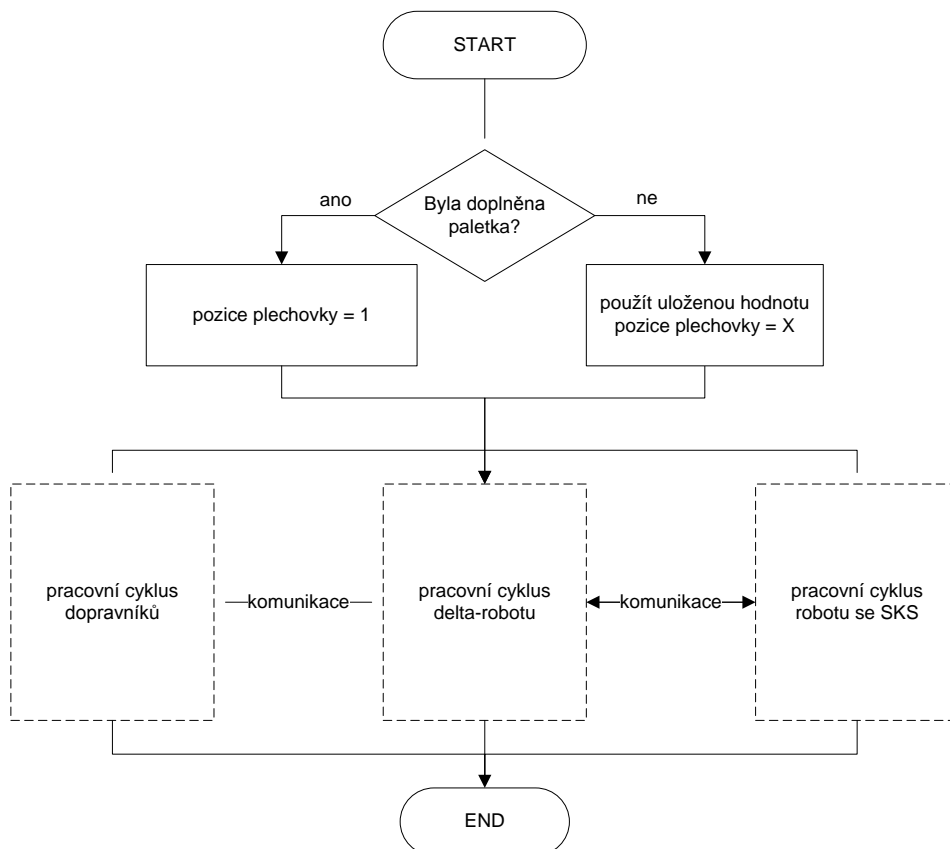
$$p_{1,2} = S_1 + x e_x + y e_y \pm z e_z \quad (15)$$



Příloha C

Zjednodušené schéma pracovního cyklu experimentálního robotizovaného pracoviště:

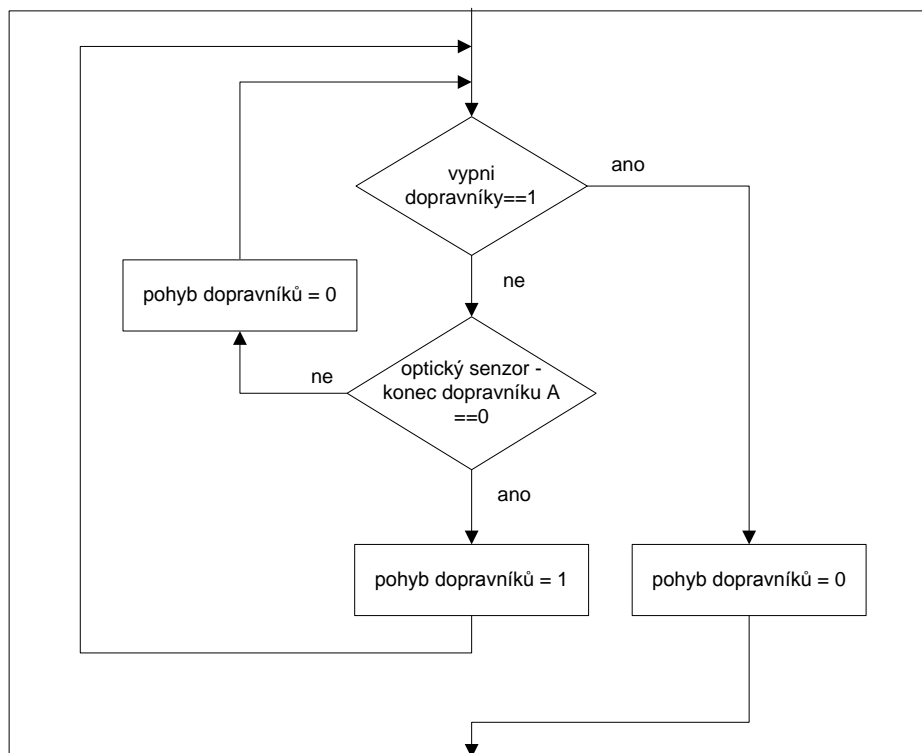
Celek:





DIPLOMOVÁ PRÁCE

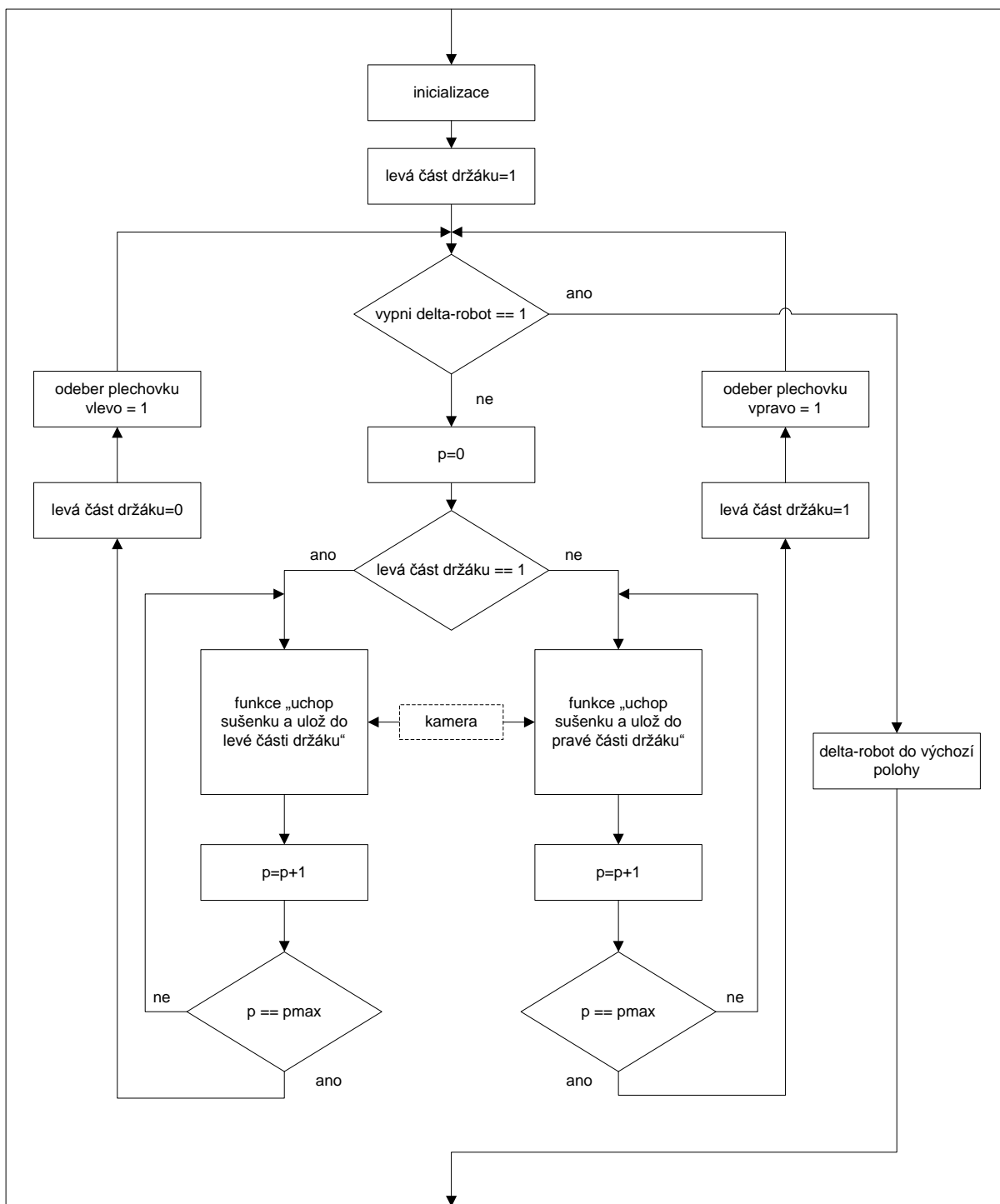
Pracovní cyklus dopravníků:





DIPLOMOVÁ PRÁCE

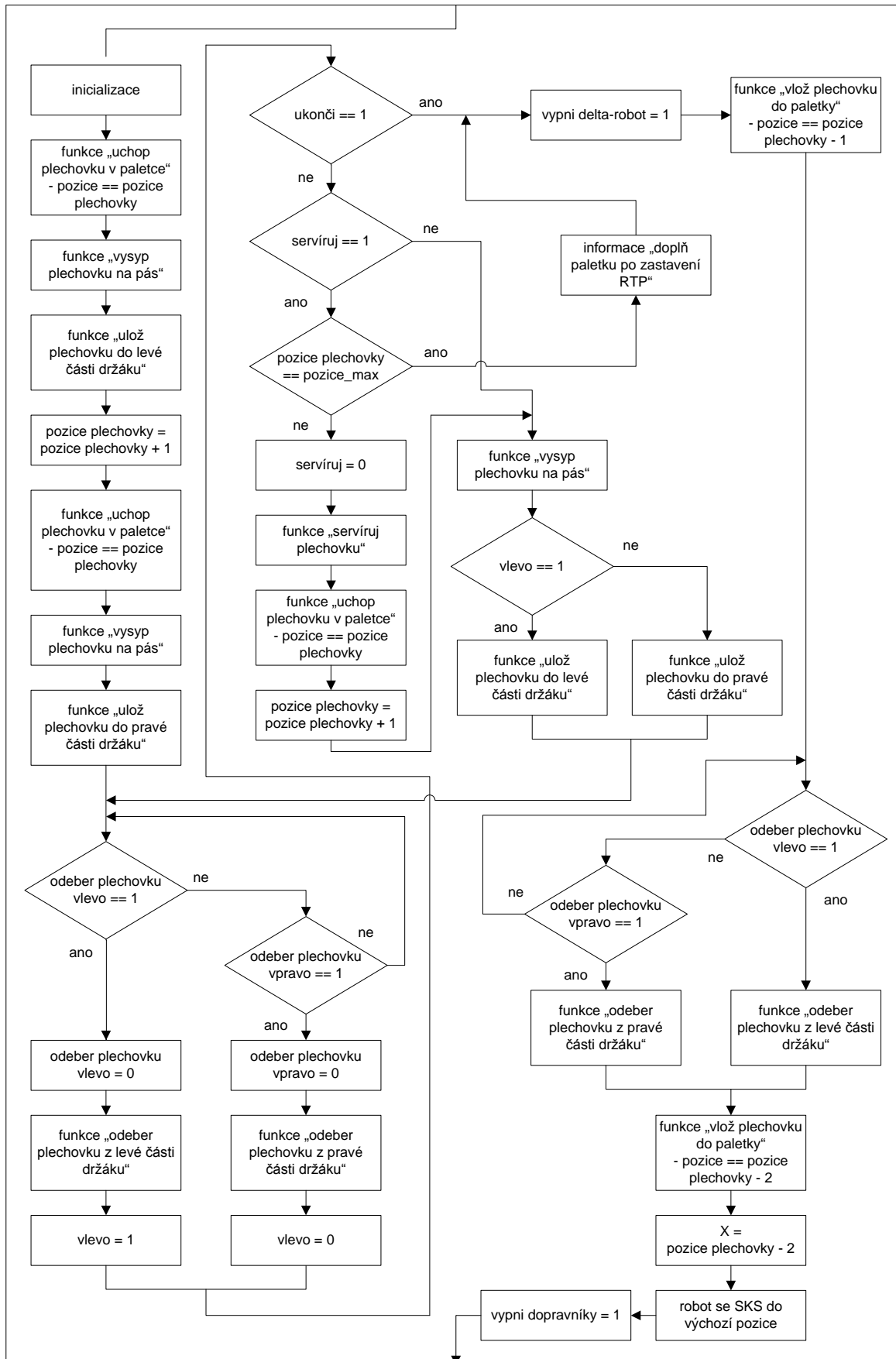
Pracovní cyklus delta-robotu:





DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pracovní cyklus robotu se SKS:





Ideový návrh řízení experimentálního RTP:

