



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

Analýza pracovního prostoru Delta robotu

Analysis of the Delta robot workspace

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL KOČAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Kočan

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

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza pracovního prostoru Delta robotu

v anglickém jazyce:

Analysis of the Delta robot workspace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na analýzu a optimalizaci pracovního prostoru robotických manipulátorů typu Delta. Cílem práce je řešení problematiky volby délky ramen Delta robotu s ohledem na pracovní prostor, rychlosti pohybu a silové podmínky. Dalším cílem práce je analýza použití více ramen v pracovním prostoru a přesnost manipulátoru.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s problematikou robotických manipulátorů typu Delta.
2. Analyzujte pracovní prostor robotu.
3. Realizujte CAD model a pohybovou studii Delta robotu.
4. Připojte CAD model do prostředí LabVIEW a realizujte jeho ovládání delta robotu v simulaci.
5. Pomocí simulace řešte závislost pracovního prostoru na délce a počtu ramen.

Seznam odborné literatury:


- [1] Siciliano B.: Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer-Verlag, London 2009, e-ISBN 978-1-84628-642-1
- [2] Ďaďo S., Kreidl M.: Senzory a měřicí obvody, Skriptum ČVUT, 1999
- [3] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4
- [4] Noskiewič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [5] National Instruments: LabVIEW Control Design User Manual[online], June 2009, 371057G-01, dostupné z URL:<<http://www.ni.com>>


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 25. 11. 2013




Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je analyzovat pracovní prostor Delta robotu v závislosti na počtu a délce jeho ramen.

Úvod práce je zaměřen na obecný popis problematiky v podobě rešerše. V další části je řešení kinematických problémů. Další část je věnována propojení NI LabVIEW se SolidWorks. Pomocí propojení NI LabVIEW s aktivním modulem SoftMotion a rozhraní SolidWorks byla provedena simulace pohybů Delta robotu v prostoru.

ABSTRAKT

The aim of this work is to analyze the workspace Delta robot, depending on the number and length of his arms.

Introduction is focused on a general description of the problems in the form of theoretical part. In another part are solving problems about kinematic problems. Another section is devoted to linking NI LabVIEW SolidWorks. Using connection NI LabVIEW with the active module SoftMotion and SolidWorks interface was simulated movements Delta robot in space.

KLÍČOVÁ SLOVA

Koncový efektor, základní platforma, pohyblivá platforma, ramena

KEYWORDS

End efektor, base platform, moving platform, arms

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma: „Analýza pracovního prostoru Delta robotu“, vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Houšky, Ph.D., na základě dostupné literatury a dostupných informačních zdrojů, které jsem všechny odcitoval v seznamu použité literatury.

V Brně.....

Podpis.....

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Kočan, M. *Analýza pracovního prostoru Delta robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své práce Ing. Pavlovi Houškovi Ph.D. za odborné rady a trpělivost.

OBSAH

1	ÚVOD.....	13
2	Delta robot	15
2.1	Vlastnosti delta robotu	15
2.2	Přímá kinematika	16
2.3	Inverzní kinematika	18
3	Dynamika	21
3.1	Dynamika pohonu robotu	21
3.2	Inverzní dynamický model	21
3.3	Dynamické parametry	22
3.4	Průběžný Jacobian a singularity	22
4	Pracovní prostor Delta robotu	27
5	Realizace CAD modelu v SolidWorks	31
5.1	Kompletace sestavy	31
5.2	Motion Study	35
6	Realizace co-simulace v NI LabVIEW	37
6.1	Vložení a propojení SolidWorks simulace do LabVIEW projektu	37
6.2	Nastavení a aktivace propojení	42
6.3	Realizace ovládání simulace v LabVIEW	44
7	Závěr.....	47
8	Použitá literatura.....	49

1 ÚVOD

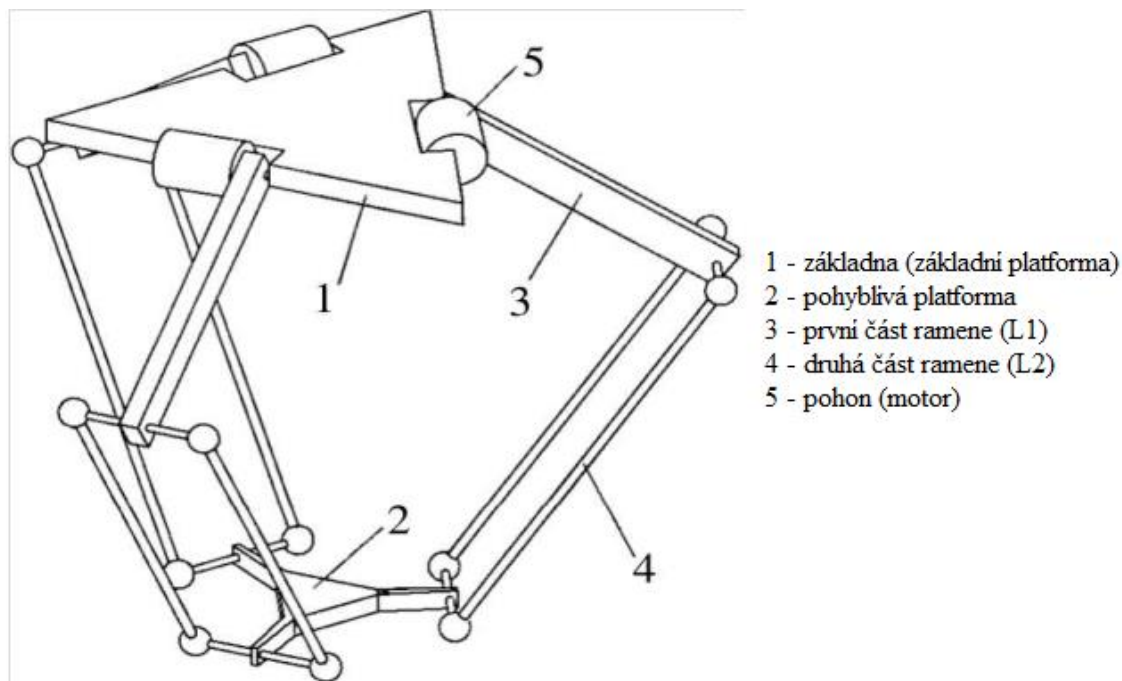
V dnešní době je kladen stále větší důraz na rychlost, přesnost, nízkou energetickou náročnost. Proto se vyvíjejí stále nové manipulátory s novými kinematickými řetězci. Stále více se objevují manipulátory využívající paralelní kinematiky. Tyto manipulátory jsou namáhány především na tah a tlak. Díky paralelnímu systému a druhu namáhání, které na tyto manipulátory působí je umožněno používat při výrobě lehčích materiálů a méně výkonných pohonů, proto je umožněno dosáhnout vyšších rychlostí, přesnosti a delší životnosti. Tyto manipulátory jsou hojně využívány v širokém okruhu průmyslu jako je průmysl strojírenský, kde se používají jako třeba obráběcí stroje, třídíče výrobků nebo jsou zakomponovány do automatizačních systémů. Často jsou to paralelní manipulátory typu Delta.

Delta roboti se vyznačují svým typickým tvarem trojúhelníkové základny a pohybující se platformy. Roboti typu Delta mají pohony umístěné na svých základnách proto je možné ramena vyrábět z lehkých kompozitních materiálů. Využívají se při manipulaci především s menšími a lehčími předměty. Uplatnění nalézají v chemickém, potravinářském a dokonce ve farmaceutickém průmyslu. Pro svou tuhost a přesnost je uplatní i jako robot, který pomáhá lékařům vykonávat náročné operace. V minulosti jejich využití bylo omezeno, technickými potížemi. S novým vývojem software a hardware se však tyto nedostatky odstraňují a využití těchto typů manipulátoru se stále rozšiřuje do dalších odvětví průmyslu a automatizačních procesů.

Tato bakalářská práce využívá již popsanych a ověřených postupů, které byly navrženy jak pro účel ovládání manipulátorů, tak pro znázornění jejich pracovních prostorů. Dále se zabývá paralelním manipulátorem typu Delta, problematikou a řešením kinematiky pro realizaci ovládání. Seznámením s dynamikou, analýzou pracovního prostoru Delta robotu s ohledem na jeho parametry. Popisem realizace propojení simulačního rozhraní SolidWorks s NI LabVIEW rozhraní, jeho nastavení a tvorbou ovládání a následné využití pro uskutečnění simulace. Tato bakalářská práce může sloužit pro účel prezentace, výuky a experimentů.

2 Delta robot

Delta robot byl vyvinut na počátku 80. let, prof. Reymondem Clavelem z École Polytechnique Federale de Lausanne ve Švýcarsku. Prof. Clavel navrhl paralelního robot s použitím rovnoběžníků, se třemi translačními a jedním rotačním stupněm volnosti. Pro manipulaci s malými a lehkými předměty při velmi vysoké rychlosti.



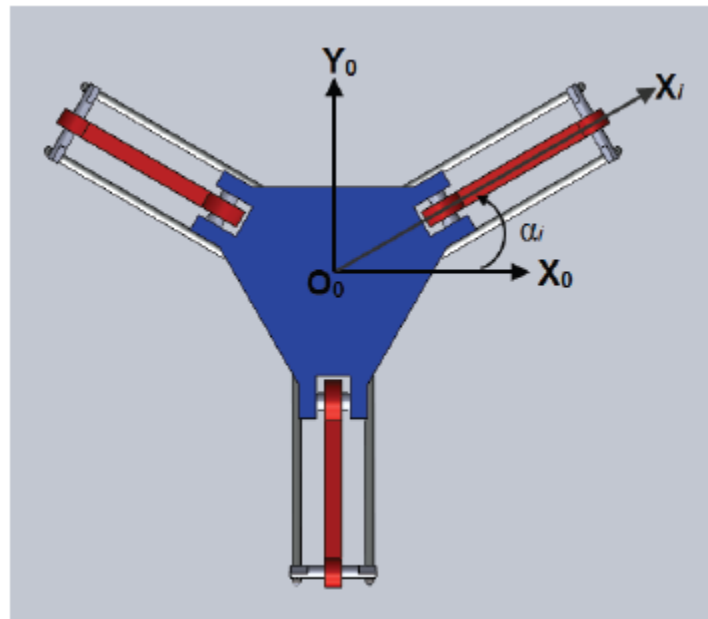
Obr. 1 Robot Delta.

2.1 Vlastnosti delta robotu

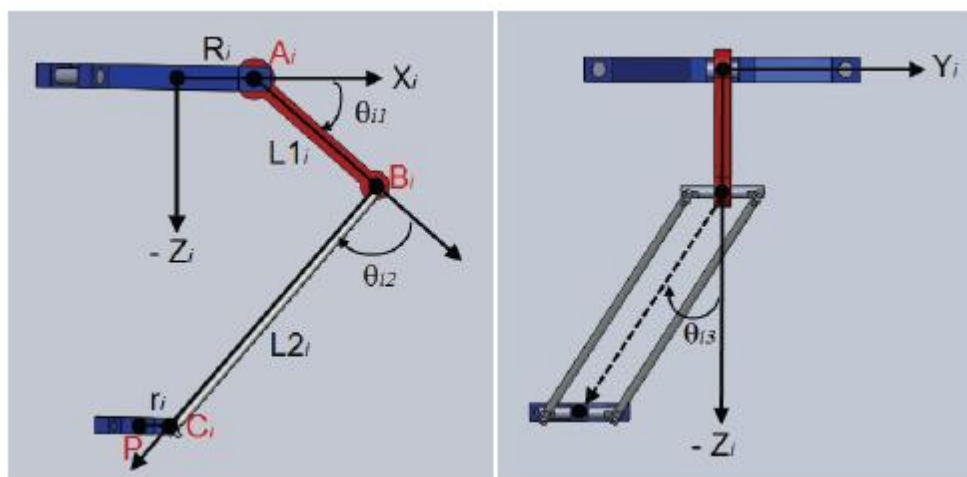
- Pracovní prostor je prostor, v němž se manipulátor pohybuje. Pracovní prostor lze rozdělit na pracovní plochu a pracovní objem.
- Singularity:
 - Okrajová singularita: Vyskytuje se v krajních polohách, když je manipulátor zatažený nebo vytažený. Těto singularitě je možno se vyhnout řízením tak, že se neřídí na hranici dosažitelného pracovního prostoru.
 - Vnitřní singularity: Vyskytují se uvnitř pracovního prostoru a jsou způsobeny obvykle vyrovnáním 2 nebo více os pohybu. Tyto singularity představují vážné omezení, neboť se mohou vyskytnout kdekoliv v pracovním prostoru a je nutné je řešit.
- Dynamika: Jedním ze základních cílů dynamiky je určit pohyb hmotného bodu (případně tělesa nebo těles), známe-li síly na hmotný bod (těleso nebo tělesa) působící. Jde tedy o určení polohy a rychlosti hmotného bodu (tělesa nebo těles) v daném čase.
- Tuhost je část mechaniky, která studuje vztahy mezi deformacemi těles a vnějšími silami, které na toto těleso působí. V úlohách pružnosti se potom řeší, zda deformace tělesa či konstrukce nepřesáhla dovolenou hodnotu.
- Rychlost: Charakterizuje pohyb, který nám sděluje, jakým způsobem se mění poloha tělesa (hmotného bodu) v čase.
- Přesnost: Je mírou pravdivosti, s jakou se pohybuje manipulátor ve skutečnosti od požadované polohy.

2.2 Přímá kinematika

Přímá kinematika robotu Delta je definována rovnicí (2.1), kde jsou neznámé polohy bodu $P = [X_p \ Y_p \ Z_p]$ pro daný soubor úhlů θ_i , pro $i = 1, 2, 3$. Řešení této soustavy rovnic může být představen jako bod, který je průsečíkem tří kulových ploch. Obecně platí, že existují dvě možná řešení, což znamená, že pro skupinu ovládacích úhlů má mobilní platforma dvě konfigurace s ohledem na polohu základní podstavu. To znamená, že pohybující platforma může být v ose $+Z$ nebo $-Z$. Kde X_p, Y_p a Z_p jsou souřadnice pohybující platformy. Kompletní řešení je v elektronické příloze „Prima.m“.



Obr. 2 Schematický pohled na typ Delta robotu [1].



Obr. 3 Přední a postranní pohled na nohy Delta-robotu [1].

$$(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i)^2 = L_2^2 \quad (2.1)$$

kde X_p, Y_p a Z_p jsou souřadnice vektoru OP a:

$$x_i = (R + L_1 \cos \theta_{i1} - r) * \cos \alpha_i$$

$$y_i = (R + L_1 \cos \theta_{i1} - r) * \sin \alpha_i$$

$$z_i = -L_1 * \sin \theta_{i1}$$

Rovnice (2.1), odpovídá rovnici pro kouli o poloměru L_2 pro každou paži. Pomocí rovnice (2.2) vypočteme bod $B1'$, $B2'$, $B3'$:

$$B_i' = \cos(\alpha_i) * (L_{1i} * \cos(\theta_i) + R_1) - (R_1 + L_{1i} * \cos(\theta_i)) * \sin(\alpha_i) - L_{1i} * \sin(\theta_i) \quad (2.2)$$

Kde $R_1 = R - r_i$ a α označuje natočení osy X_i od skutečné osy X_0 . Zároveň $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = [0^\circ, 120^\circ, 240^\circ]$. Nyní lze spočítat průsečík tří kružnic se středem v bodech $B1'$, $B2'$, $B3'$.

$$\begin{aligned} (x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2 + (z_p - z_1)^2 &= L_2^2 \\ (x_p - x_2)^2 + (y_p - y_2)^2 + (z_p - z_2)^2 &= L_2^2 \\ (x_p - x_3)^2 + (y_p - y_3)^2 + (z_p - z_3)^2 &= L_2^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Nyní můžeme rovnice rozepsat

$$\begin{aligned} x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - 2x_p x_1 - 2y_p y_1 - 2z_p z_1 &= -x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - L_2^2 \\ x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - 2x_p x_2 - 2y_p y_2 - 2z_p z_2 &= -x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 - L_2^2 \\ x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - 0 - 2y_p y_3 - 2z_p z_3 &= -x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 - L_2^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Pro zjednodušení si pravou stranu rovnic přepíšeme do tvaru

$$\begin{aligned} w_1 &= -x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 - L_2^2 \\ w_2 &= -x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 - L_2^2 \\ w_3 &= -y_3^2 - z_3^2 - L_2^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dostaneme tvar rovnic

$$\begin{aligned} x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - 2x_p x_1 - 2y_p y_1 - 2z_p z_1 &= w_1 \\ x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - 2x_p x_2 - 2y_p y_2 - 2z_p z_2 &= w_2 \\ x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - 0 - 2y_p y_3 - 2z_p z_1 &= w_3 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Rovnice od sebe odečteme

$$x_p(x_1 - x_2) - y_p(y_1 - y_2) - z_p(z_1 - z_2) = \frac{w_1 - w_2}{2} \quad (2.7)$$

$$x_p x_1 - y_p(y_1 - y_3) - z_p(z_1 - z_3) = \frac{w_1 - w_3}{2} \quad (2.8)$$

$$x_p x_2 - y_p(y_2 - y_3) - z_p(z_2 - z_3) = \frac{w_2 - w_3}{2} \quad (2.9)$$

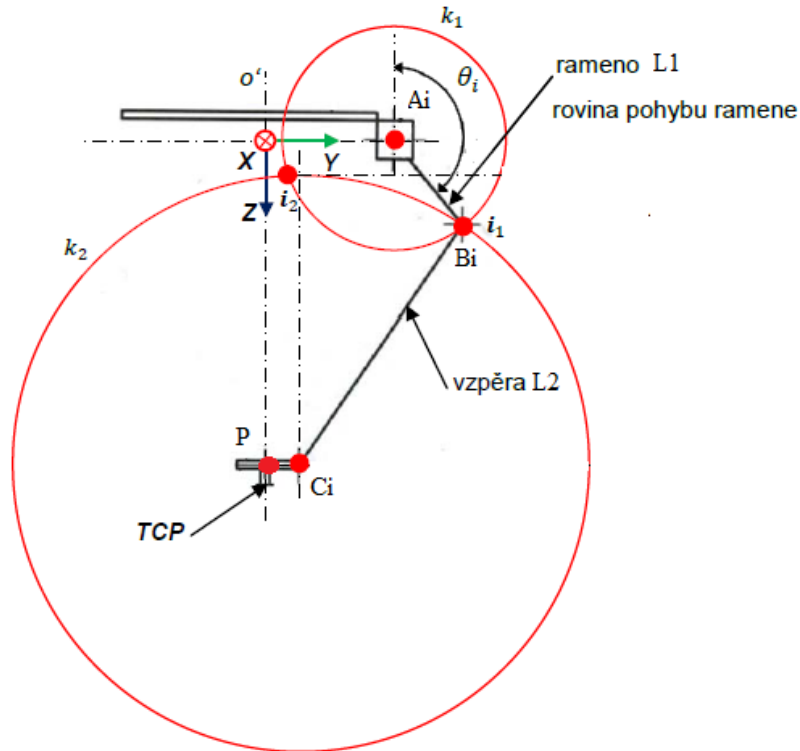
Nyní od sebe odečteme rovnice (2.8) a (2.9), vyjádříme si x_p a y_p

A dosadíme do rovnice:

$$x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 - 0 - 2y_p y_3 - 2z_p z_3 = -x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 - L_2^2$$

2.3 Inverzní kinematika

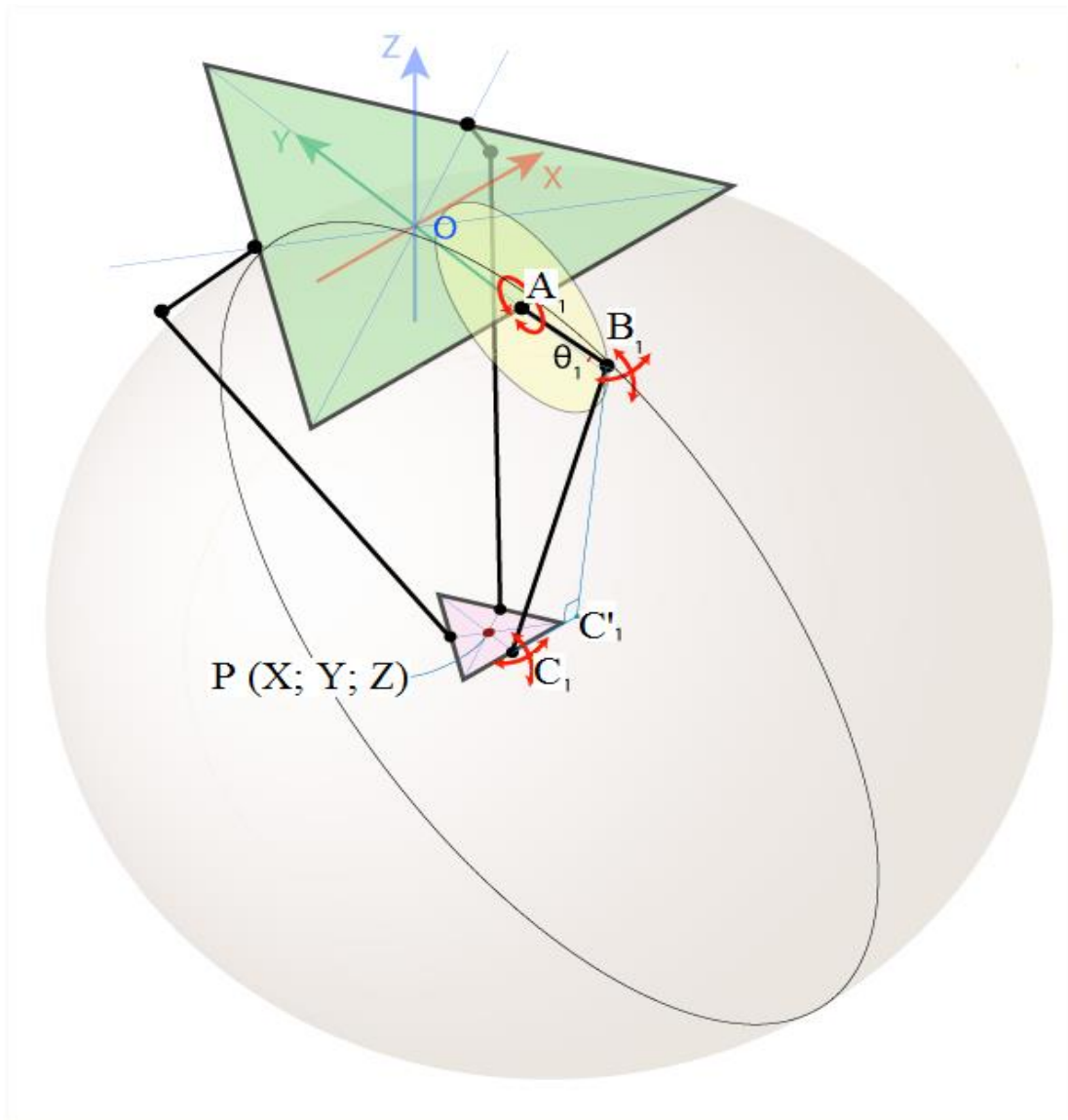
Inverzní kinematika je definována řešením rovnice (2.1) pro neznámé θ_i vzhledem k poloze pohybující platformy $P = [X_p \ Y_p \ Z_p]$. Řešení nalezneme také pomocí průsečíků jednotlivých kružnic k_1 a k_2 . Kompletní řešení je v elektronické příloze „natoceni_theta.m“.



Obr. 4 Znárodnění průsečíku pro rameno 1 [2].

Spočítáme průsečík kružnic k_1 a k_2 , tedy souřadnice pro bod B_i .

$$\begin{aligned} (B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2 + (B_z - A_z)^2 &= L_1^2 \\ (B_x - C_x)^2 + (B_y - C_y)^2 + (B_z - C_z)^2 &= L_2^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$



Obr. 5 Promítnutí do roviny YZ [3].

Výpočet si usnadníme promítnutím do roviny YZ:

$$\begin{aligned} (B_y - A_y)^2 + (B_z - A_z)^2 &= L_2^2 \\ (B_y - C'_y)^2 + (B_z - C'_z)^2 &= L_2^2 - X_p^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Pročež se rameno L_1 pohybuje pouze v rovině YZ proto rovnice má tvar:

$$(B_y - A_y)^2 + (B_z - A_z)^2 = L_2^2 \quad (2.12)$$

Pohyblivá platforma se však pohybuje osách XYZ proto najdeme bod C' , který je posunut o vzdálenost X_p a tím ji promítneme do roviny YZ. Potom má rovnice tvar:

$$(B_y - Y_p + r)^2 + (B_z - C'_z)^2 = L_2^2 - X_p^2 \quad (2.13)$$

Pro správné vyjádření bodu B má tvar soustava rovnic tedy následující:

$$\begin{aligned}(B_y - R)^2 + B_z^2 &= L_2^2 \\ (B_y - Y_p + r)^2 + (B_z - C_z')^2 &= L_2^2 - X_p^2\end{aligned}\tag{2.14}$$

Úhel θ_i spočítáme pomocí nalezeného průsečíku v bodě B, proto můžeme počítat:

$$\arctan \theta = \frac{B_z}{\sqrt{A_y - B_y}}\tag{2.15}$$

Průsečíky jsou počítány pro každé rameno, proto musíme taky počítat s pootočením bodu P o $+120^\circ$ a -120° .

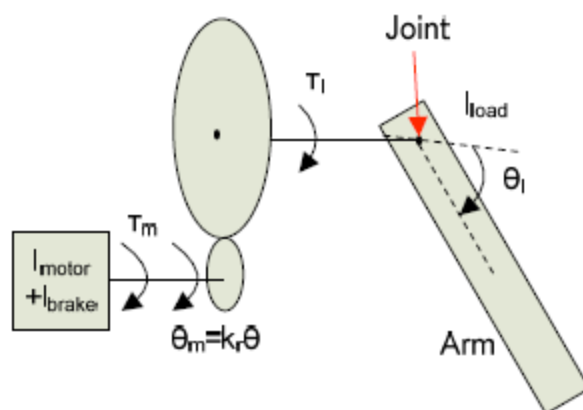
$$\begin{aligned}X_p &= X_p * \cos 120 + Y_p * \sin 120 \\ Y_p &= -X_p * \sin 120 + Y_p * \cos 120\end{aligned}\tag{2.16}$$

3 Dynamika

Pro řešení dynamických problémů bylo čerpáno z následujících zdrojů [4], [5].

3.1 Dynamika pohonu robotu

Ve většině stávajících průmyslových robotů, je přenos představen mezi jednotlivými pohony a odpovídajícími klouby těla manipulátoru. Ovládaná spojka pro jedno rameno robotu je znázorněna na Obr. 6



Obr. 6 Ovládaný kloub s přenosem mezi spojením a motorem [4].

Za předpokladu, tuhého přenosu nemá žádnou vůli, vztah vstupní síly (rychlosti) a výstupní síly (rychlosti) jsou čistě proporcionální. To dává,

$$\theta_m = K_r * \theta_l \quad (3.1)$$

kde θ_m je hřídel motoru. k_r je parametr, který popisuje převodový poměr. I_{load} je moment setrvačnosti osy otáčení z ovládaného spojení. τ_l je moment zátěže na ramenu robotu a τ_m je točivý moment vyrobeného pohonu na ose hřídele. S ohledem na rovnici. (3.1) lze psát

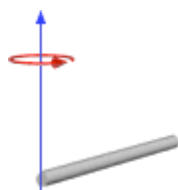
$$\tau_m = \frac{\tau_l}{k_r} \quad (3.2)$$

3.2 Inverzní dynamický model

Způsob, jak vypočítat inverzní dynamický model, je vystříhnout uzavřený řetězec mechanismu u pasivních kloubů a zvážit především dynamiku této vytvořené stromové struktury robotu. Podmínka uzavřený pak může být zmírněna aplikací d'Alembertova principu. Pro Delta roboty, složitosti dynamického modelu vznikají především v důsledku pohybu předloktí. Tento problém může být jednodušší, pokud jejich rotační setrvačnosti jsou zanedbány. Tedy síla mezi pohybující se platformou a ramenem ve směru dané orientace předloktí. Model Delta robotu se počítá s Newton-Eulerovy metody pro zjednodušení hypotézy:

- Rotační hmotnost setrvačností předloktí jsou zanedbány.
- Pro analytické účely jsou ramena předloktí případně rozdělena do dvou částí a umístěna na svých dvou končetinách. Skutečnost, že setrvačnost tuhého prutu délky L a hmotnosti m jedné z končetin je dána $I = \frac{mL^2}{3}$ ukazuje, že si mohou vybrat 1/3 hmotnosti předloktí na

jeho dolní končetině (pohyblivá platforma) a 2/3 na své horní končetině (koleno), kdy bereme v úvahu setrvačnost v lokti osy.



Obr. 7 Rotace [4].

- Třecí a pružné účinky jsou zanedbány.

3.3 Dynamické parametry

Následující parametry se používají pro výpočet dynamického modelu Delta robotu. U pohyblivé platformy je použita pouze celková hmotnost, která na ni působí. Jedná se o součet hmotnosti pohyblivé platformy m_n , hmotnost užitečného zatížení $m_{payload}$, a 3 částí ramen předloktí $3(1-r)m_{fb}$.

$$m_{nt} = m_n + m_{payload} + 3(1-r)m_{fb} \quad (3.3)$$

r je poměr hmotnosti na předloktí, který je umístěn v jejich horních končetinách. Pro zjednodušení předpokladů je vybráno r rovné 2/3. Poloha těžiště pro každou z horních částí paže se vypočítá střed hmotnostní. Který je definován jako průměr částic pozice systémového r_i a jejich hmotnosti m_i .

$$r_{Gb} = L_1 \frac{\frac{1}{2}m_b + m_c + rm_{fb}}{m_{br}} \quad (3.4)$$

Kde m_{br}

$$m_{br} = m_b + m_c + rm_{fb} \quad (3.5)$$

kde m_b je hmotnost horní části paže, m_c hmotnost loktu, m_{fb} hmotnost předloktí, a $r = 2/3$, část m_{fb} , která je umístěna v lokti. Setrvačnost každého horního ramene je součtem setrvačnosti motoru I_m , motorová setrvačnost brzdy I_{brake} a setrvačnost paže I_{bc} . Setrvačnosti motoru a setrvačnosti brzdy motoru může být vyjádřena na společné úrovni, lze ji násobit s kvadratickou konstantou převodovky. Setrvačnost na společné úrovni je pak dána vztahem:

$$I_{bi} = I_m kr^2 + I_{brake} kr^2 + I_{bc} \quad (3.6)$$

kde I_{bc} je součet setrvačnosti tvořený z hmotnosti a setrvačnosti horní části paže a hmotnosti koncového bodu horní paže, který je dán

$$I_{bc} = \frac{m_b}{3} L_1^2 + L_1^2 (m_c + rm_{fb}) = L_1^2 \left(\frac{m_b}{3} + m_c + rm_{fb} \right) \quad (3.7)$$

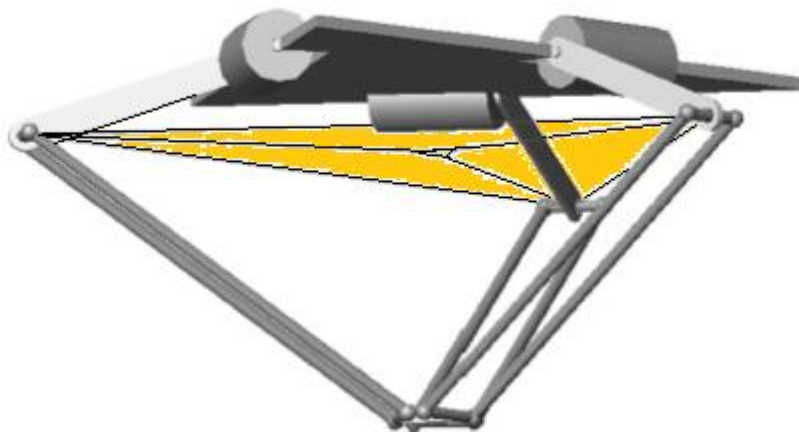
3.4 Průběžný Jacobian a singularity

Tato část, představí myšlenku pokročilých Jacobianů, které se vztahují na rychlost koncových-effektorů, změny rychlosti s ohledem na čas a délky kinematického řetězce. Uzavřené smyčky $OA_i C_i P \subseteq OA_i B_i C_i P$, která je získána tím, že ignorujeme končetiny L_1 a L_2 v uzavřeném kinematickém řetězci $OA_i B_i C_i P$. Jakobiánova analýza této menší smyčky

se provádí venkem. To je důvod, proč volat odpovídající Jacobiany jako jsou průběžné Jacobiany. Rovnice smyčky je

$$\vec{A}_1 \vec{C}_1 = -\vec{OA}_1 + \vec{OP}_1 \quad (3.8)$$

Délka $A_i C_i$ pochází z vektorového kinematického řetězce $\vec{A}_i \vec{C}_i$ psaný jako vektorové komponenty referenčního rámce $x_i y_i z_i$ zjednodušením



Obr. 8 Virtuální vodorovná rovina odpovídá podmínce (3.17) [5].

rovnice vede k

$$c_i^2 = c_{xi}^2 + c_{yi}^2 + c_{zi}^2 = (p_x + (r - R)\cos\alpha_i)^2 + (p_y - (r - R)\sin\alpha_i)^2 + p_z^2$$

kde $c_i = A_i C_i$. Přijetím pohodlnějšího zápisu, ve kterém $p_x \equiv p_1, p_y \equiv p_2, p_z \equiv p_3$ funkce

$$f_i(p_i, c_i) = (p_1 + (r - R)\cos\alpha_i)^2 + (p_2 - (r - R)\sin\alpha_i)^2 + p_3^2 - c_i^2$$

mohou být definovány tak, aby doba diference

$$\frac{\partial f_i}{\partial p_j} \frac{\partial p_j}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial c_j} \frac{\partial c_j}{\partial t} = 0$$

tato rovnice může být snadno znovu uspořádána ve formě

$$J_{ij}^p \dot{p}_j = J_{ij}^c \dot{c}_j \quad (3.9)$$

kde jsou nové průběžné Jacobiany definovány jako

$$J_{ij}^p = \begin{bmatrix} J_{1x} & J_{1y} & J_{1z} \\ J_{2x} & J_{2y} & J_{2z} \\ J_{3x} & J_{3y} & J_{3z} \end{bmatrix}, \quad J_{ij}^c = - \begin{bmatrix} J_{1x} & J_{1y} & J_{1z} \\ J_{2x} & J_{2y} & J_{2z} \\ J_{3x} & J_{3y} & J_{3z} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Je vhodnější volat J_{ij}^p a J_{ij}^c přímých a inverzních průběžných Jacobianů, protože na úseku $OA_i C_i P$ uzavřené smyčky $OA_i B_i C_i P$, vede ke konvenční definici Jakobianovi matice. Explicitní hodnocení parciální derivace vede, k výsledku multiplikativního faktoru.

$$J_{ij}^p = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$J_{ij}^c = \begin{bmatrix} p_1 + \cos\alpha_1(r-R) & p_1 - \sin\alpha_1(r-R) & p_1 \\ p_2 + \cos\alpha_2(r-R) & p_2 - \sin\alpha_2(r-R) & p_2 \\ p_3 + \cos\alpha_3(r-R) & p_3 - \sin\alpha_3(r-R) & p_3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Stejně jako již bylo zmíněno, tato matice singularit odpovídá singulárním pozicím robotu. Inverzní singularity odpovídají skutečnosti, že

$$c_i = 0 \text{ na jakémkoli } i \quad (3.13)$$

Tato situace nastává, když jeden z kinematických řetězců je kompletně zamíchán (pozice odpovídající podmínce (3.14)).

$$\theta_{2i} = 0 \text{ nebo } \pi \text{ pro } i \quad (3.14)$$

Přímé singularity odpovídají stavu

$$p_z = 0 \quad (3.15)$$

$$\theta_{3i} = 0 \text{ nebo } \pi \forall i \quad (3.16)$$

$$\theta_{2i} + \theta_{1i} = 0 \text{ nebo } \pi \forall i \quad (3.17)$$

nebo

$$r = R \quad (3.18)$$

Pokud L_1 se rovná L_2 , je snadné vidět, že stav (3.15) zahrnuje jak podmínky (3.16) a (3.17). Stav (3.18) se týká určité pozici nebo orientaci manipulátoru. To se týká její struktury, protože ta odpovídá, když rozměry základny a pohyblivé platformy se rovnají. Všimněte si, že konvenční Jacobiany se neodkazují na tyto singularity. Nicméně, těžkopádná přímá analýza může být použita k potvrzení této singularity. Aniž bychom se pouštěli do početních detailů, závěrečný výsledek přímé kinematické analýzy je

$$p_x = \frac{f_1 - e_1 - e_3 \left[e_2 f_2 - e_2 e_4 - e_5 f_1 + \frac{e_1 e_5}{e_2 e_6} - e_3 e_5 \right]}{e_2} \quad (3.19)$$

$$p_y = \frac{e_2 f_2 - e_2 e_4 - e_5 f_1 + e_1 e_5}{e_2 e_6 - e_3 e_5}$$

$$p_z = \left[e_8 - p_x^2 + p_y^2 + 2k_3 p_x - 2s_3 p_y \right]^{1/2}$$

kde

$$k_i = (R - r) \cos \alpha_i, s_i = (R - r) \sin \alpha_i, i = 1, 2, 3 \quad (3.20)$$

$$e_1 = k_3^2 - k_1^2 + s_3^2 - s_1^2, e_2 = 2k_1 - 2k_3$$

$$e_3 = 2s_3 - 2s_1, e_4 = k_3^2 - k_2^2 + s_3^2 - s_2^2$$

$$e_5 = 2k_2 - 2k_3, e_6 = 2s_3 - 2s_2$$

$$e_7 = k_3^2 + s_3^2, e_8 = c_3^2 - e_7$$

$$f_1 = c_3^2 - c_1^2, f_2 = c_3^2 - c_2^2 \quad (3.21)$$



Obr. 9 Pythagoras [6].

Navíc, c_i může být psáno úplně v podmínkách L_1 , L_2 a θ_{ij} takto

$$c_i^2 = a^2 + b^2 + 2ab \sin \theta_{3i} \cos \theta_{2i} \quad (3.22)$$

Rovnice (3.19) dává polohu koncového efektoru, pokud jde o ovládání společných proměnných. Proto je soubor rovnic, které odpovídají přímé kinematické analýze. Singulární pozice odpovídající rovnici (3.19) jsou

$$e_2 = 0, e_2 e_6 - e_3 e_5 = 0 \quad (3.23)$$

Jedním ze způsobů, jak tyto podmínky splnit, je nastavit $r = R$, což není nic jiného než stav (3.18). Nicméně, analýza průběžných Jacobianů je nejjednodušší způsob, jak dospět k této singulární pozici.

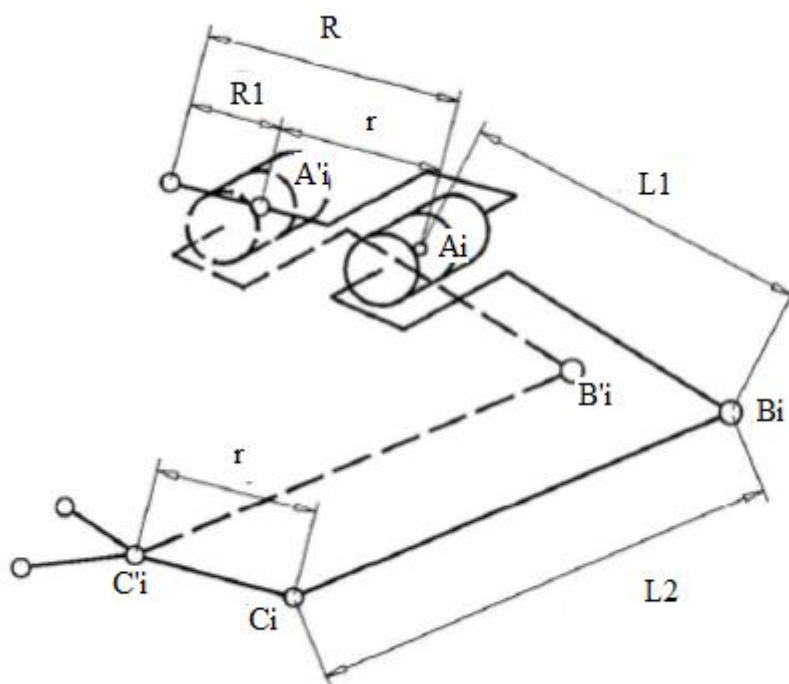
4 Pracovní prostor Delta robotu

Pracovní prostor můžeme spočítat dvěma způsoby. Pomocí přímé nebo inverzní kinematiky. Objem a tvar pracovního prostoru je závislý na délkách ramen a parametrech platformy L_1, L_2, R a r . Pracovní prostor lze rozdělit na dílčí pracovní prostory, které můžeme popsat jako kulové plochy se středem v bodech A_i o poloměru L_1 . Další kulové plochy mají střed v bodech B_i o poloměru L_2 . Tyto koule nám vytyčují pracovní prostor robotu. Pokud použijeme k výpočtu přímou kinematiku, potřebujeme znát minimum a maximum úhlu θ_i (např.: $\theta_i = 0^\circ - 90^\circ$).

U výpočtu pracovního prostoru pomocí inverzní kinematiky potřebujeme znát krajní polohy pohybující se platformy ($x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}, z_{min}, z_{max}$). Pracovní prostor lze rozdělit do 3 základních tvarů to můžeme vidět na Obr. 12.

Obr. 10 ukazuje jedno rameno robotu Delta, kde B_i, A_i a C_i jsou skutečné polohy kloubů. Pohybující platforma je připojena k základní platformě třemi rameny a udržuje vždy stejnou orientaci jako základní platforma, která je zmenšena o rozměr r . $R_1 = R - r$ (R_1 může být záporná), rozměry jsou znázorněny na Obr. 10, a pohybující se platforma je zmenšena o rozměr r .

$$R_1 = R - r$$



Obr. 10 Geometrické parametry robotu Delta [4].

Kde R je skutečná vzdálenost od středu základny k bodu A_i , r je skutečná vzdálenost od středu pohybující platformy k bodu C_i . L_1 a L_2 jsou délky ramen. Vypočteme posun bodů B_i, A_i , a C_i . Nyní se nám shodují svou polohou body C_i a P , $C_i = P$. Protože každý ze tří parametrů L_1, L_2 a $|R_1|$ se můžeme měnit mezi 0 a ∞ je důležité, aby prostorový nástroj zahrnoval všechny parametry robotu Delta (pro různé délky ramen). Hledání optimálních robotických parametrů je založeno na těchto výpočtech:

$$D = \frac{L_1 + L_2 + |R_1|}{3} \quad (4.1)$$

Délky části ramen L_1 , L_2 a $|R_1|$ děleno D jsou definovány jako tři ne-rozměrové parametry, které jsou

$$r_1 = \frac{L_1}{D}, r_2 = \frac{L_2}{D}, r_3 = \frac{|R_1|}{D} \quad (4.2)$$

proto

$$r_1 + r_2 + |r_3| = 3 \quad (4.3)$$

Tento postup snižuje trojrozměrný vzor, parametry prostoru na dvourozměrné. Z Obr. 10 je zřejmé, že ne-prostoroví Delta roboti nemůžou být smontovány pokud $|r_3| > 1.5$. Z tohoto důvodu, platí následující podmínky:

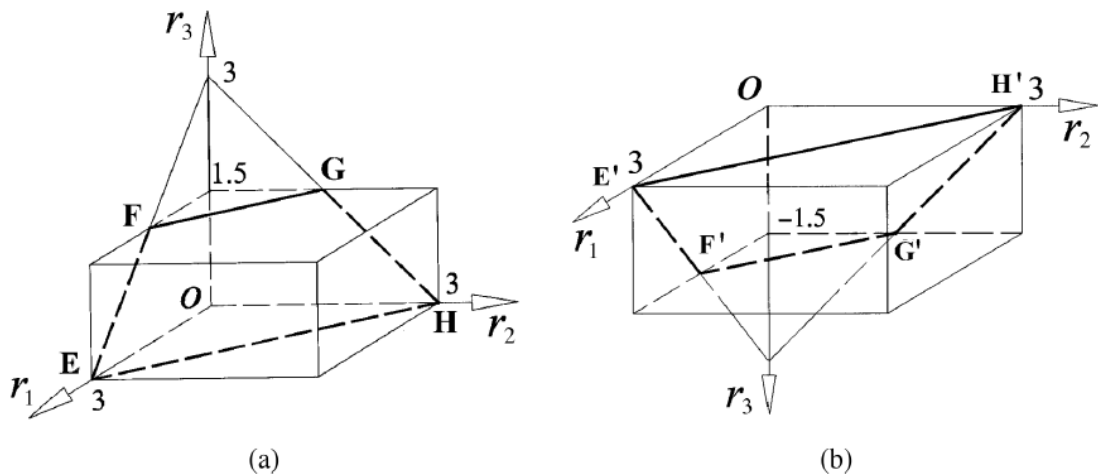
$$0 < |r_3| < 1.5, \quad 0 < r_1, \quad r_2 < 3 \quad (4.4)$$

Z rovnic (4.3) a (4.4), na fyzikálním modelu prostoru pro roboty Delta lze získat řešení, jak je znázorněno na Obr. 11. Model je vyroben ze dvou lichoběžníků $EFGH$ a $E'F'G'H'$, ve kterém případné kombinace délek ramen jsou prezentovány hodnotami r_1, r_2 a $|r_3|$. Rovinná uzavřená konfigurace modelu je znázorněna na Obr. 12. Řešení prostoru poskytuje prostředky pro snížení trojrozměrného problému na dvojrozměrný. Máme dvě ortogonální polohy s a t použity v rovinné soustavě souřadnic $O-st$ vyjádřené pomocí r_1, r_2 a $|r_3|$.

$$s = \frac{2}{\sqrt{3}} * r_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} * |r_3|$$

$$t = |r_3| \quad (4.5)$$

Poloha r_1, r_2 a $|r_3|$ a může být přeměněna na



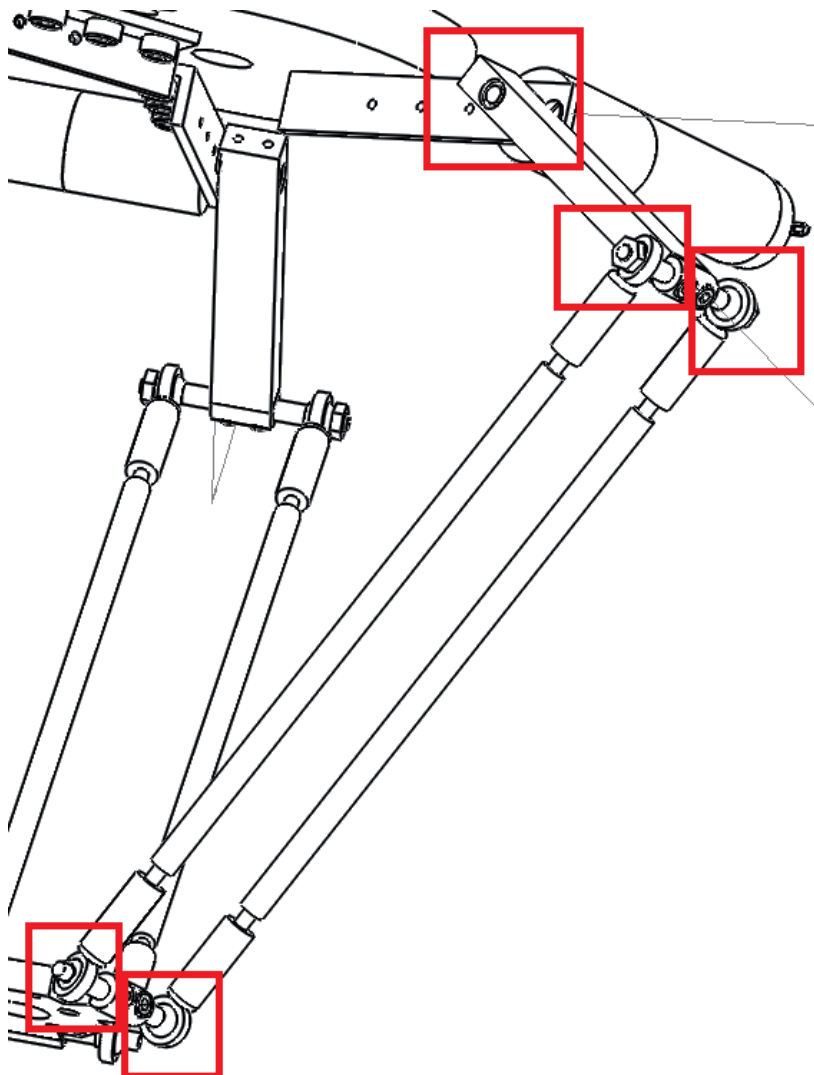
Obr. 11 Fyzikální model řešení prostoru pro roboty Delta: (a) když $r_3 > 0$, (b), když $r_3 < 0$ [7].

5 Realizace CAD modelu v SolidWorks

SolidWorks je strojírenský 3D CAD systém, který můžeme využít pro navrhování strojírenských součástí, kompletaci sestav, simulací pohybů, kolizí a energetického namáhání. Pro náš projekt je nejdůležitější možnost propojení s LabVIEW, pomocí kterého sestavíme ovládání Delta robotu. Simulace pohybů v prostoru a sestavení pohybující se sestavy. Použitelné jsou verze SolidWorks 2009 Service Pack 2.1 Premium nebo Profesional a novější. Použijeme verzi 2010 (32bitů).

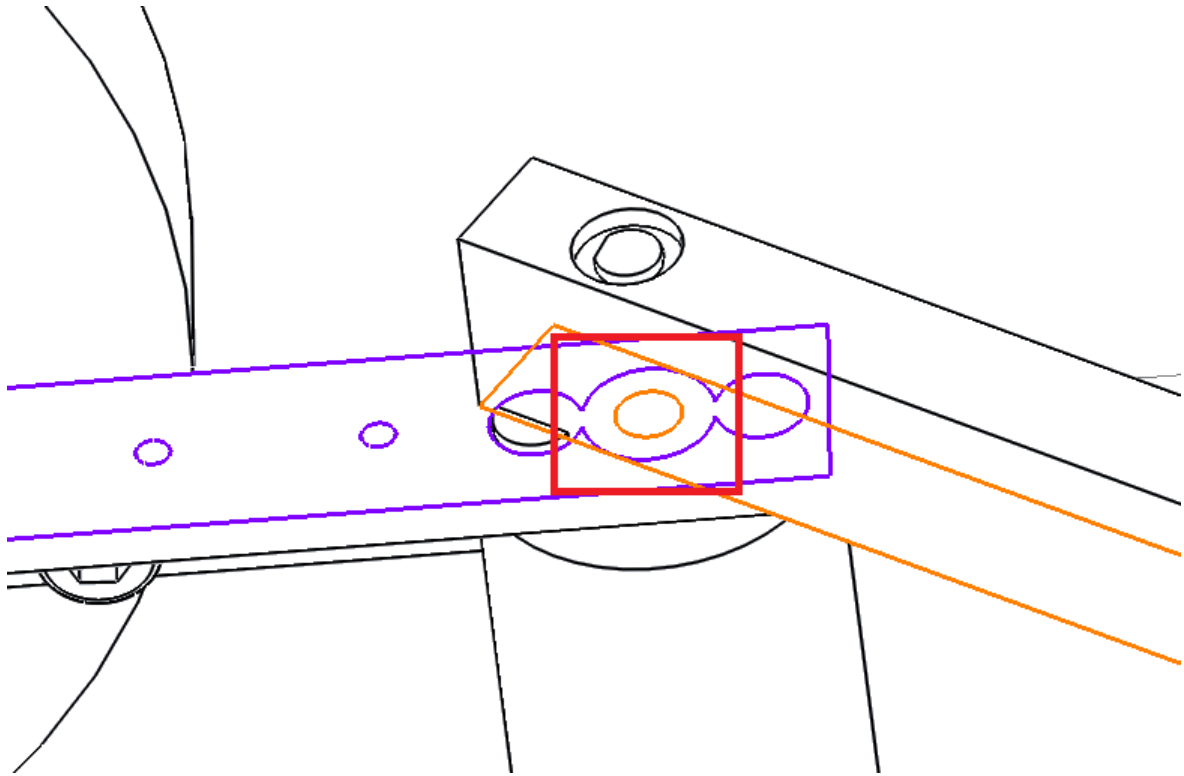
5.1 Kompletace sestavy

Po zhotovení jednotlivých dílů pro Delta robotu je započata kompletace sestavy. Nejdříve je potřeba vyskládat potřebné díly do pracovní plochy, kde je možno je spojovat pomocí „Mate“ s ikonkou kancelářské sponky, nachází se na horním rámečku pod záložkou „Assembly“. Nyní je nutné jednotlivé díly na sebe navázat tak, aby bylo zajištěno, že se budou pohybovat a zároveň se vazby nerozpady. Tím je zajištěno, že se bude moci simulovat pohyb. Důležité jsou zejména pohyblivé části znázorněné na Obr. 14 v červených rámcích.



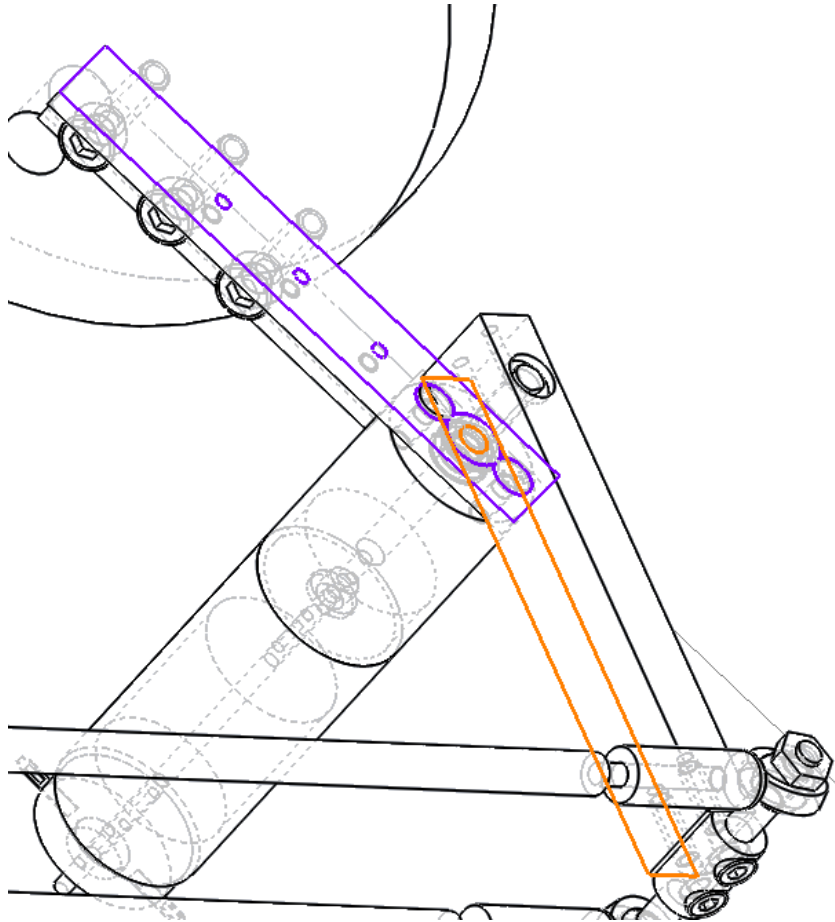
Obr. 14 Klouby Delta robotu.

Je potřeba navázat na sebe díl „driveholder“ a díl „rameno 1“ použité je opět „Mate“ z nabídky dále soustředné kružnice „Concentric“ vybráním díry na dílech „driveholder“ a „rameno 1“ obě jsou znázorněny v červeném rámečku oranžovou a fialovou barvou jak je vidět na Obr. 15.



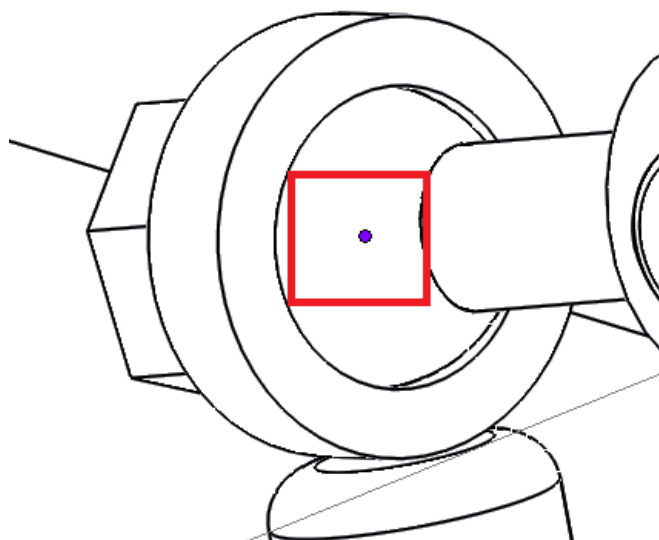
Obr. 15 Spojení soustřednými kružnicemi.

Tím je zajištěna pohyblivost dílu „ramena 1“ a „driveholder“, teď ještě je potřeba je spojit k sobě a zajistit aby se během pohybu od sebe nevzdalovaly nebo se nerozpadaly. To je uděláno následovně, „Mate“ dále „Coincident“. Plochy jsou zvýrazněny fialovou a oranžovou barvou, jak je vidět na Obr. 16.



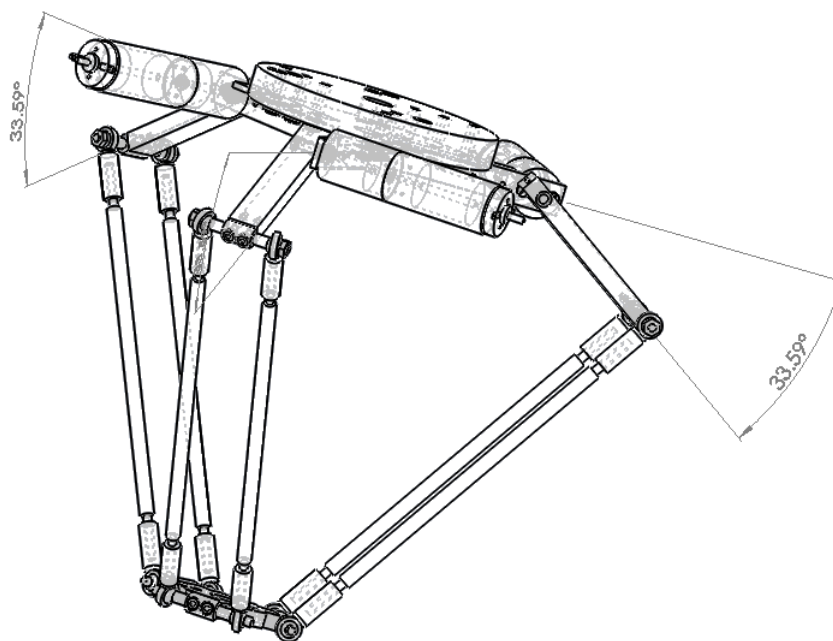
Obr. 16 Spojení ploch "driveholder" a "rameno 1".

U podsestavy „pivot s kouly“ je důležité si všimnout, vytvořených bodů uprostřed koulí. Body jsou vytvořeny i v očku v podsestavě „forarmcela“ Obr. 17. Tyto body jsou důležité pro spojení podsestav „forarmcela“ a „pivot a rameno“, aby zajistily pohyb celého ramena Delta robotu. Body jsou znázorněny na obrázku fialovou tečkou a spojeny již přes funkci „Coincident“ a proto se zdá, že je bod jen jeden. Pokud by tyto díly byly spojeny jiným typem vazby, nezajistila by se, tak jejich pohyblivost, která je pro simulaci pohybu velmi důležitá.



Obr. 17 Spojení "forarmcela" a "pivot a rameno" pomocí bodu.

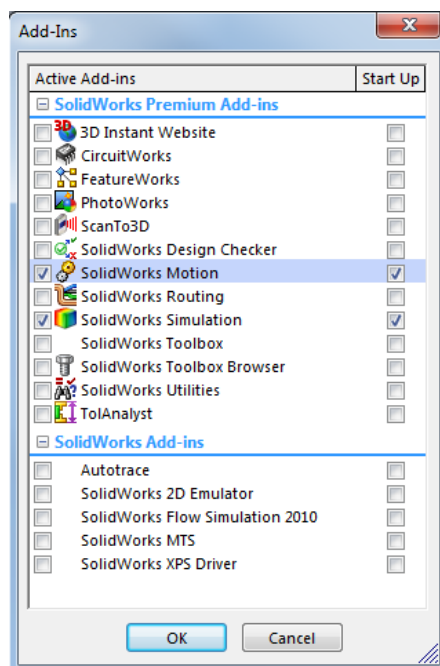
Na podsestavu „pivot a rameno“ jsou připojeny tímto způsobem dvě podsestavy „forarmcela“. Druhé volné konce podsestav „forarmcela“ jsou připojeny opět přes body, aby byl zajištěn pohyb s nachystanou podsestavou „platforma s pivotem“. Tyto kroky jsou zopakovány pro všechny tři paže Delta robotu a je, tak zajištěn jeho pohyb v prostoru pro pozdější ovládání. Na Obr. 18 už je vidět sestavený Delta robot.



Obr. 18 Zkompletovaný Delta robot.

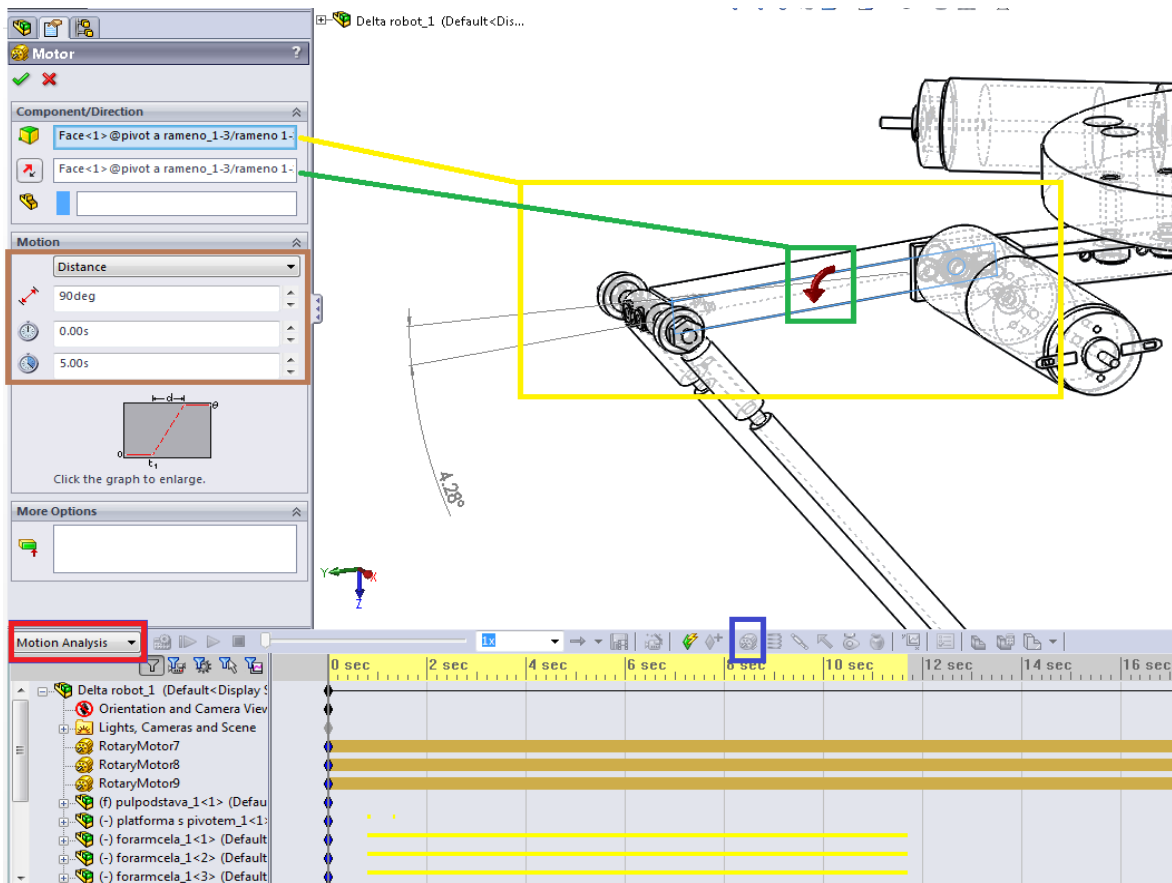
5.2 Motion Study

V přední řadě je nutné aktivovat „SolidWorks Motion“ v nabídce „Tools“ přidat doplňky „Add-Ins“ a šedě označenou položku viditelnou na Obr. 19 aktivovat pro zdárnou simulaci a ovládání motorů.



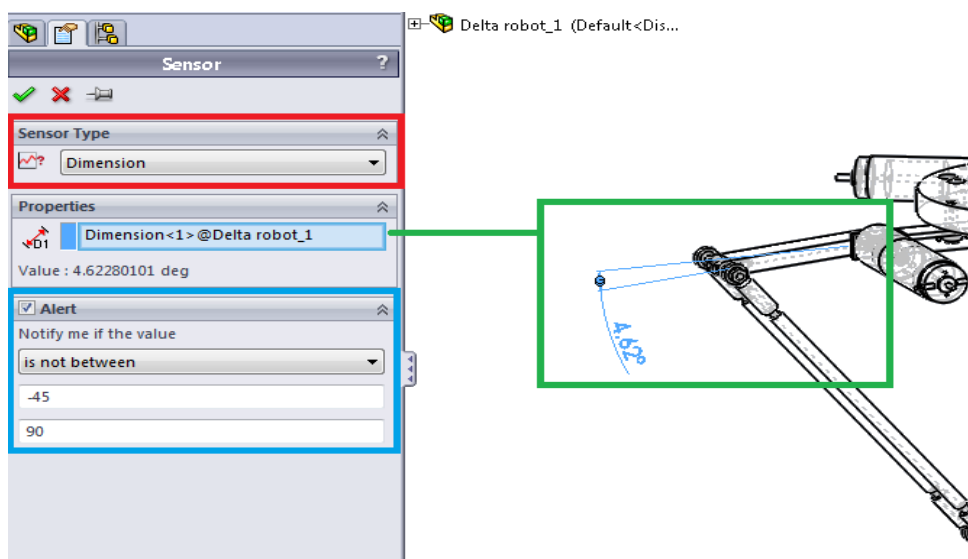
Obr. 19 Aktivace nutných doplňků.

Dole na levé straně je důležité vybrat „Motion Analys“ a zároveň umístěním motorů na sestavu Delta robotu vytvořit „Motion Study 1“, které je nezbytné pro simulaci ovládání. Motory přidáme kliknutím na ikonku motor a zvolíme díl, na který jej umístíme a vybereme taktéž směr otáčení. Vybrali jsme díl „rameno 1“ a umístili motor. Motor je potřeba také nastavit, zvolíme druh „Distance“ a rozsah pohybu motoru a časovou konstantu za jak dlouho se má pohyb provést. Motory nasadíme na všechny tři ramena Delta robotu.



Obr. 20 Přidání a nastavení motoru v "Motion Analysis".

Přidáme senzory vázané na kóty úhlu zobrazující aktuální natočení motorů. Senzory nesmí být součástí podsestavy, ale musí být umístěny do hlavní sestavy. Pro správnou funkci musí být nastaveno „Alarm“. Správné nastavení „Alarm“ způsobí vypnutí, pozastavení simulace nebo upozorní na porušení stanovené podmínky. Pro získávání dat ze senzoru zvolíme senzor „Dimension“.



Obr. 21 Přidání a nastavení rozměrového senzoru.

6 Realizace co-simulace v NI LabVIEW

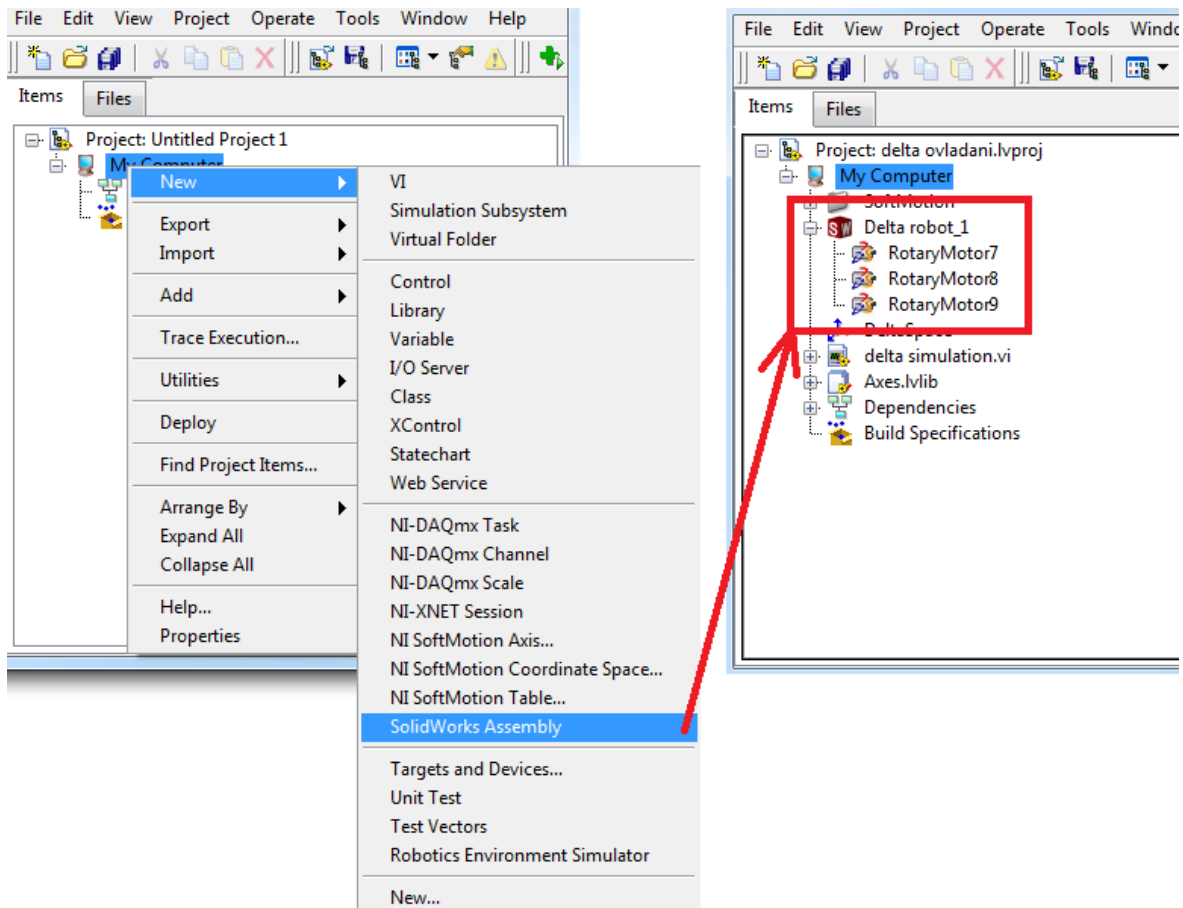
NI LabVIEW je grafický programovací prostředí, používající se pro vývoj, simulaci a testování řídicích a měřicích aplikací. Pro tuto bakalářskou práci je důležitá možnost realizovat propojení se SolidWorks a následné realizace aplikaci v LabVIEW, která ovládá simulaci v Solidworks. Tato možnost je podporována od LabVIEW 2009 a je nutné mít nainstalovaný a aktivovaný modul SoftMotion Standart nebo Premium, který toto propojení umožňuje.

Co-simulace umožňuje simulaci blížící se skutečnému procesu, který představuje komunikaci a výměnu dat mezi dvěma a více propojenými simulačními prostředími. Pro simulaci pohybu v prostoru Delta robotu je potřeba využít co-simulace, pro získání dat, které se co nejvíce přibližují skutečnosti. Co simulace realizuje simulaci pohybu, ověření pohybové studie, dosahu, rychlosti zrychlení a jiné.

Než začne být realizován pohybový profil pro simulaci SolidWorks, je zapotřebí importovat informace z SolidWorks sestavy do projektu LabVIEW a vytvořit NI SoftMotion osy pro simulované motory v SolidWorks sestavě.

6.1 Vložení a propojení SolidWorks simulace do LabVIEW projektu

Prvním krokem realizace simulace je vložení modelu sestavy (sldasm) s nastavenými motory a senzory do LabVIEW projektu. (Create Project -> Blank Project v Project Explorer klikem pravého tlačítka myši na My Computer -> New -> SolidWorks Assembly zobrazí se Dialog Box). Je zapotřebí vybrat správnou cestu k sestavě modelu. Pokud je model sestavy otevřený doporučuje se uložit a model se sestavou zavřít. V tomto případě je otevřena sestava modelu s názvem „Delta robot_1.sldasm“. Vybraná sestava se objeví v okně „Project Explorer“ včetně všech motorů nakonfigurovaných v pohybové studii SolidWorksu (Obr. 22). Pokud SolidWorks sestava obsahuje více pohybových studií, vybere se ta, která má být použita. Tímhle postupem je možné i sestavu změnit. Další možností je aktivace záznamu průběhu simulace (kliknutím pravého tlačítka myši na SolidWorks Assembly -> Properties). Zvolte cestu k datům „Log Data“ jako je poloha, rychlost, zrychlení a točiví moment a zatrhne se políčko „Log Data“. Soubory mají formát „.lvm“. Každá další simulace přepíše data v souboru. Je-li zapotřebí vytvořit nový soubor pro další simulaci, je nutné změnit název souboru na jiný.



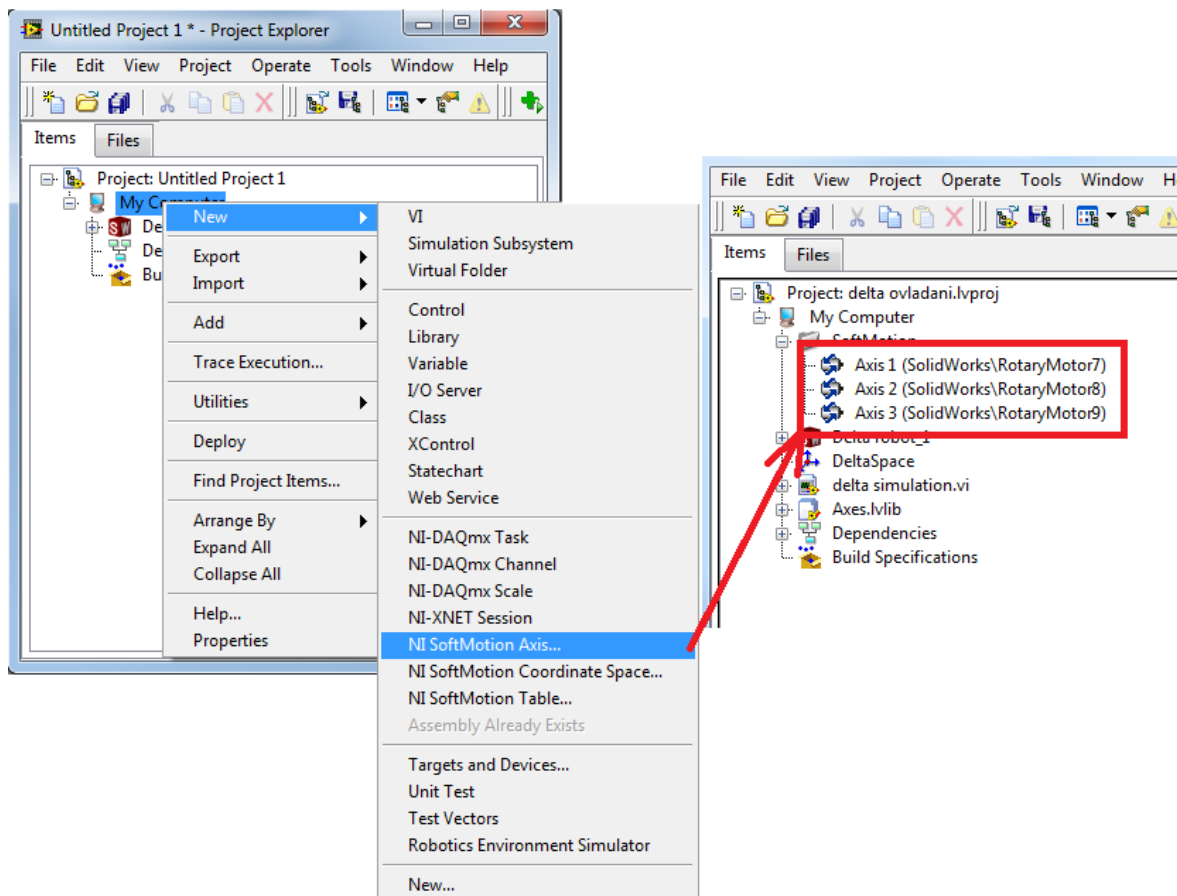
Obr. 22 Vložení SolidWorks sestavy.

Ovládání simulace je prováděno prostřednictvím os LabVIEW modulu SoftMotion. SoftMotion osám lze v LabVIEW nastavovat polohu motoru v SolidWorks a zpětně přes ně lze získávat polohu. SoftMotion osy jsou vázány na simulované motory v SolidWorks tím je zajištěno získávání a posílání dat oběma směry jak posílání dat z rozhraní LabVIEW do SolidWorks rozhraní, tak získávání dat z SolidWorks do LabVIEW. SoftMotion osy nejsou omezeny pouze na snímání nebo nastavování polohy, ale mohou snímat a nastavovat také rychlost, zrychlení a další simulované fyzikální veličiny. Pomocí SoftMotion os lze sledovat rozdíl mezi dvěma kroky, generované trajektorie a skutečné polohy snímače

Vytvořené osy se mohou propojit se simulovaným nebo se skutečným hardwarem. Aktuálně SoftMotion podporuje tyto typy os:

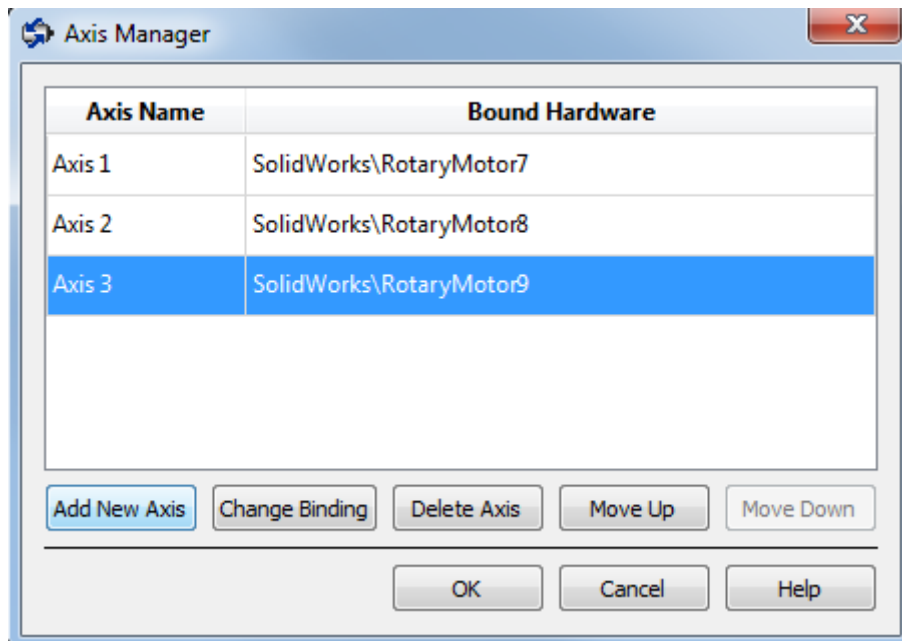
- „NI 95xx axis“ – osa, která pracuje s NI moduly řady C pro řízení motorů;
- „EtherCAT drive“ – osa, která pracuje s řídicími jednotkami AKD EtherCAT;
- „Simulated Axis“ – simulovaná osa, umožňuje realizovat simulace pohonů bez hardware;
- „Unbound Axis“ – univerzální osa, pro ovládání motoru přes specializované I/O;
- „SolidWorks Axis“ – osa napojená na motor v pohybové studii v SolidWorks modelu.

Pro tuto simulaci je nezbytné vytvořit „SolidWorks Axis“, které umožní synchronizaci se SolidWorks sestavou a tak simulaci pohybu Delta robotu. Na každou SoftMotion osu je vázán pohon ze SolidWorks. V následujícím kroku se musí provést definice a namapování SolidWorks motorů na SoftMotion osy. (Project Explorer -> My Computer -> New -> NI SoftMotion Axis).



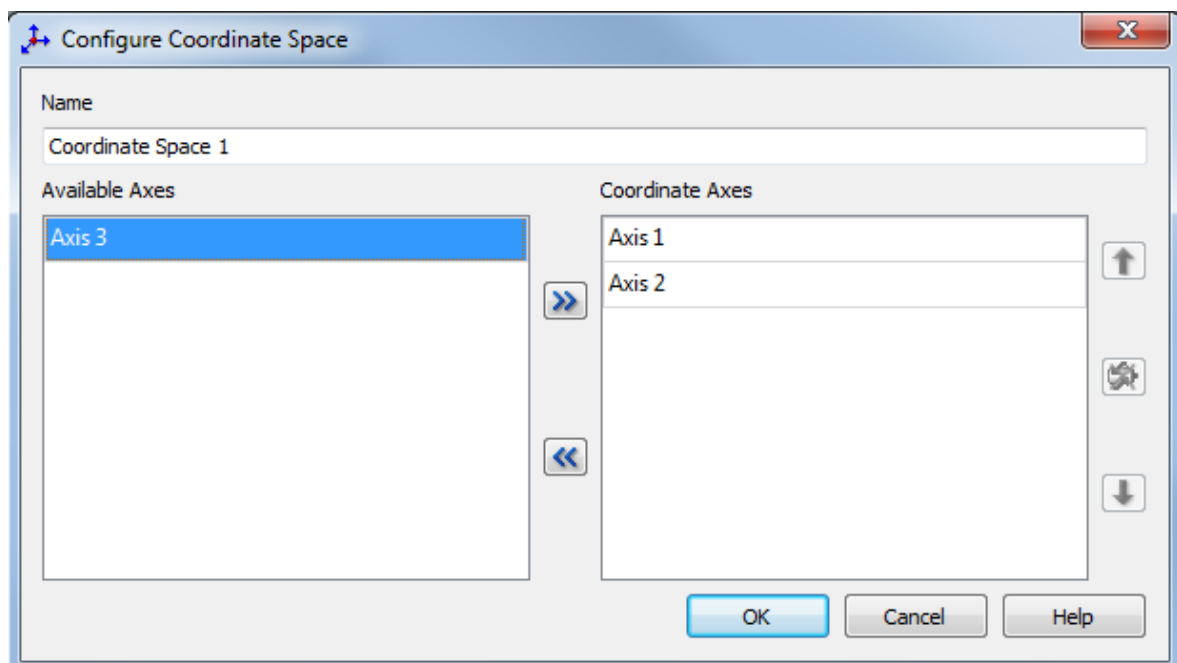
Obr. 23 Vkládání os do projektu, přidání koordinačního prostoru.

Přidání nových os pro motory se provádí pomocí tlačítka „Add New Axis“, které se zobrazují v „Axis Manager“.



Obr. 24 Axis Manager.

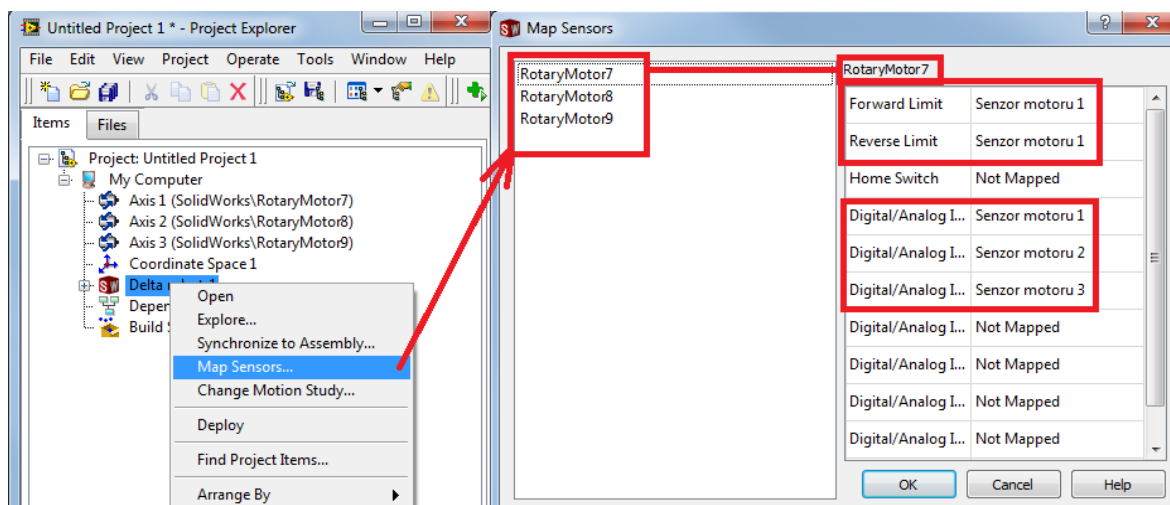
Při potřebě provádění pohybů v prostoru, tedy na více osách najednou je vhodné vytvořit souřadný systém „Coordinate Space“, prostřednictvím kterého SoftMotion realizuje synchronizaci všech os v souřadném systému. Osy, které jsou v něm nadefinovány, jsou potřebné pro pohyb všech tří motorů nasazených na ramenech Delta robotu. (V Project Explorer kliknutím pravého tlačítka myši na My Computer -> New -> NI SoftMotion Coordinate Space (Obr. 23), vložení dostupných os Available Axes do Coordinate Axes (Obr. 25)).



Obr. 25 Vložení os do souřadného systému

Senzory získávají potřebná data o poloze, rychlosti, zrychlení a jiných veličin. Při mapování senzorů do LabVIEW je důležité si poukázat na možnost vedle mapování simulovaných senzorů nebo reálných senzorů na osy, že je lze kdykoliv přemapovat na jiné

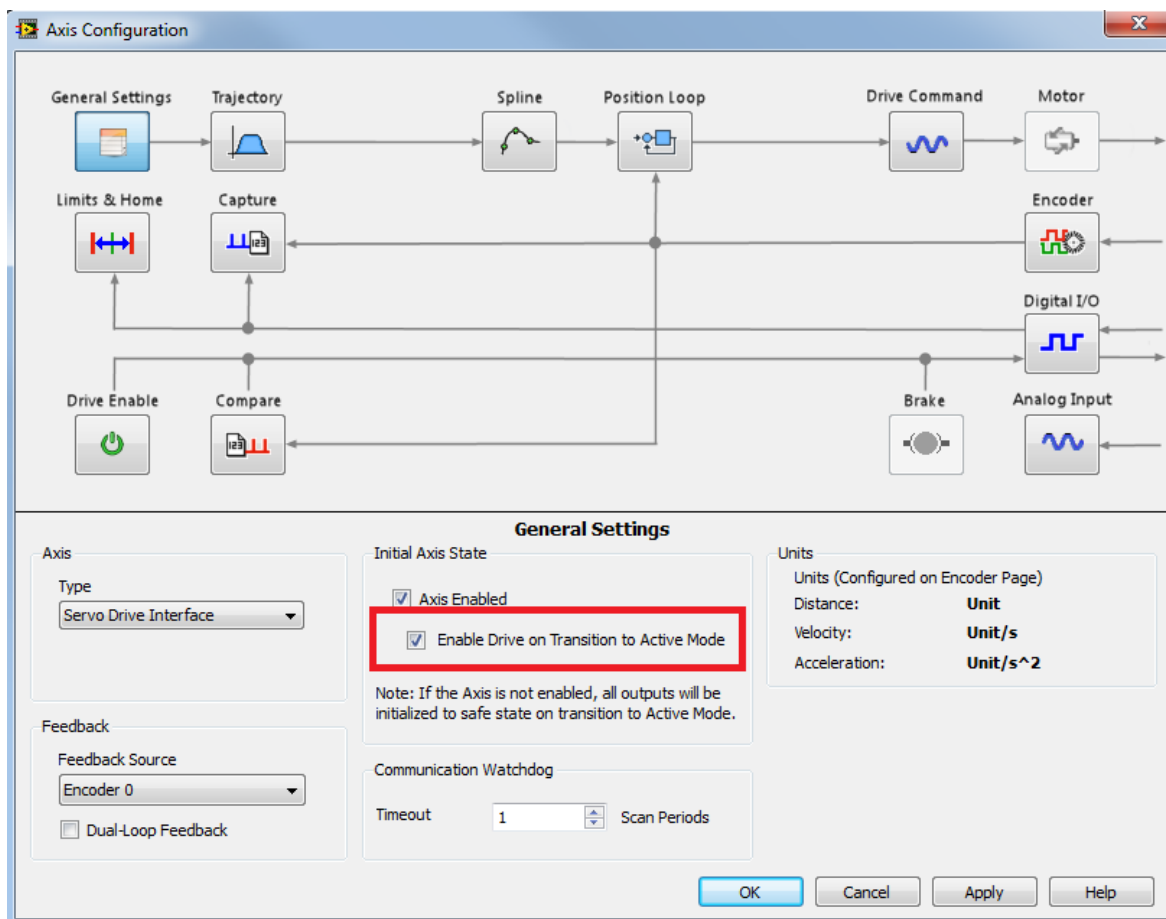
osy než byly původně namapovány (např.: reálné osy). (Klikem pravého tlačítka myši na „SolidWorks Assembly“ v tomto případě to je Delta robot 1 s ikonkou SolidWorksu na levé straně, přidají se všechny osy „Axis 1-3“).



Obr. 26 Map Sensors.

Při mapování senzorů pro motory 7-9 se nastaví limity, které při porušení určité podmínky simulaci zastaví. „Forward Limit“ a „Reverse Limit“ a také vstupy 0-2 „Digital/Analog input“.

Osy propojené s motory ze SolidWorks jsou považovány za servomotory a protože nejsou spojeny aktuálně s žádným hardwarem, je nutné provést konfiguraci. Po nastavení simulace připojením virtuálního hardwaru. Povolením „Enable Drive on Transition to Active Mode“ se automaticky aktivují všechny osy, když je aktivován NI Scan Engine. (V Project Explorer -> Axis 1 pravým tlačítkem myši Properties -> Axis Configuration zatrhneme Enable Drive on Transition to Active Mode. Tento krok se zopakuje pro všechny tři osy).



Obr. 27 Axis Configuration.

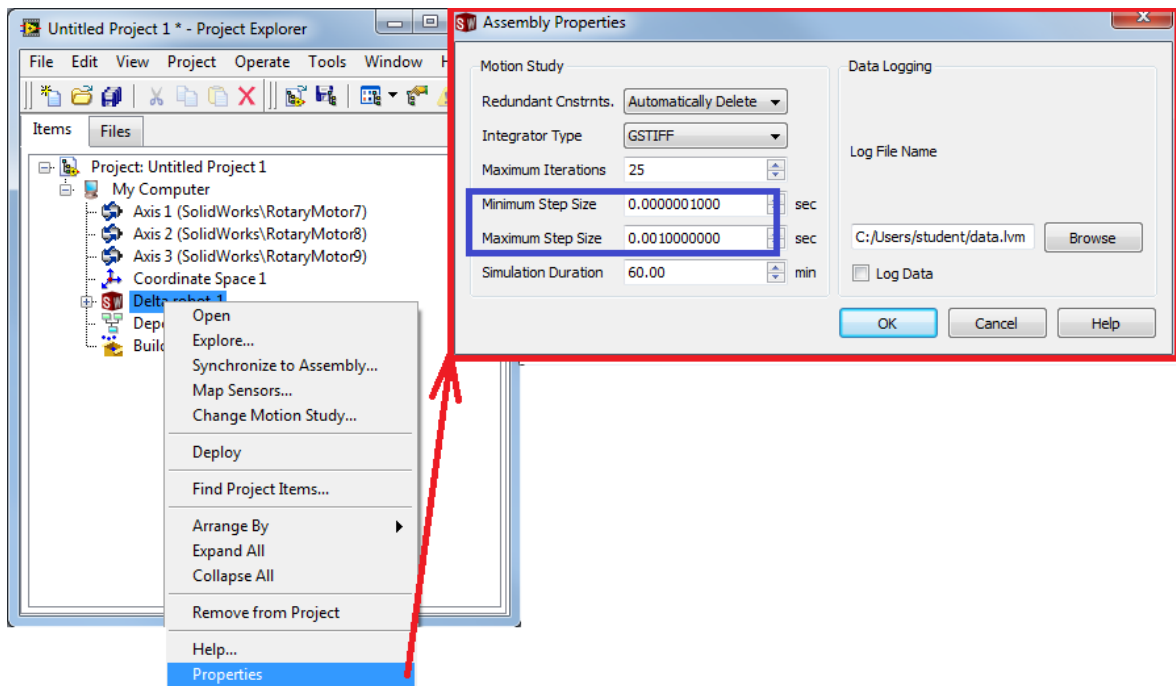
6.2 Nastavení a aktivace propojení

SolidWorks Motion (ADAMS/Solver) je schopen řešit statické, kinematické nebo dynamické výpočty, k tomu využívá tři numerické řešiče „GSTIFF“, „SI2_GSTIFF“ a „WSTIFF“.

- „GSTIFF“ – rychlý, přesný a jednoduchý řešič pro výpočet pohybu a rozsáhlé pohybové simulace;
- „SI2_GSTIFF“ – složitější řešič se zaměřením na přesnost výpočtu rychlostí a zrychlení, může být výrazně pomalejší než „GSTIFF“;
- „WSTIFF“ – řešič nespécifických problémů, jako jsou nespojitě síly působící na sestavu;

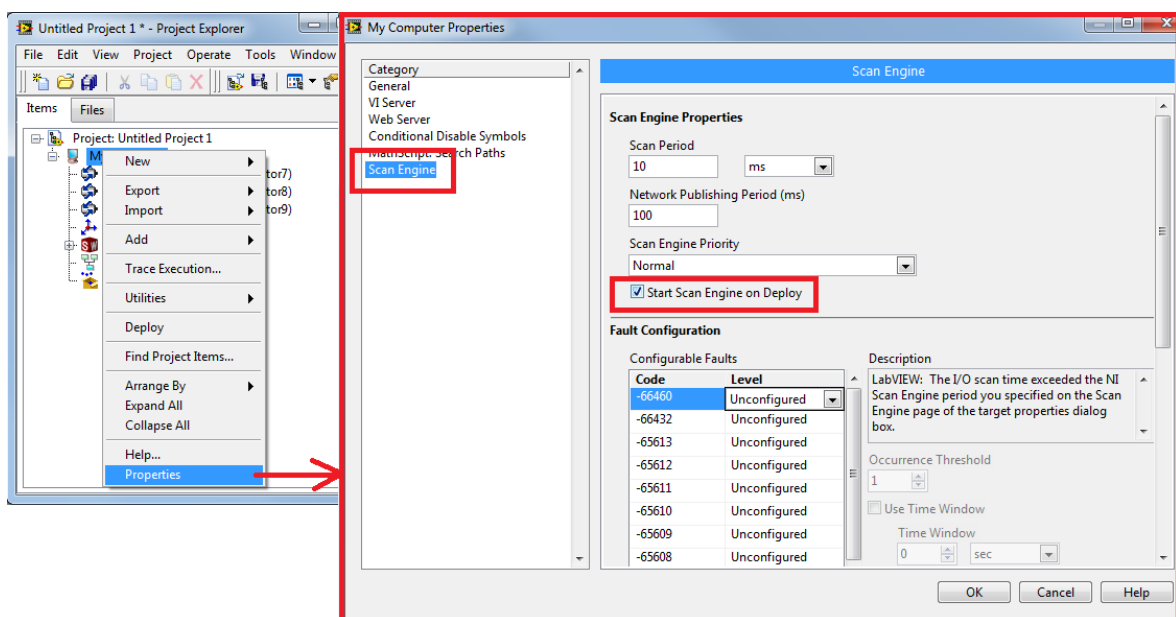
„Scan Engine“ ukládá všechny snímané data o simulaci z os a souřadného systému do globální paměti map a aktualizuje tyto data při každém cyklu. Ve stejném cyklu začne synchronizovat osy a souřadnicový prostor. To znamená, že můžeme začít využívat osy a souřadnicový prostor v tom samém snímacím cyklu.

Nastavení maximální a minimální velikosti kroků, je důležité pro integrační časový krok. Nastavením dolní meze integračního časového kroku na vyšší hodnotu se sníží doba trvání kroku v simulaci. Horní mez integračního časového kroku, omezuje dobu provedení kroku v simulaci. Nastavením této hodnoty menší než je „short lived events“ zajistí, že tyto události nejsou v simulaci ignorovány. „Maximum Step Size“ musí být menší než „NI Scan Engine Scan Period“. (SolidWorks Assembly-> Properties).



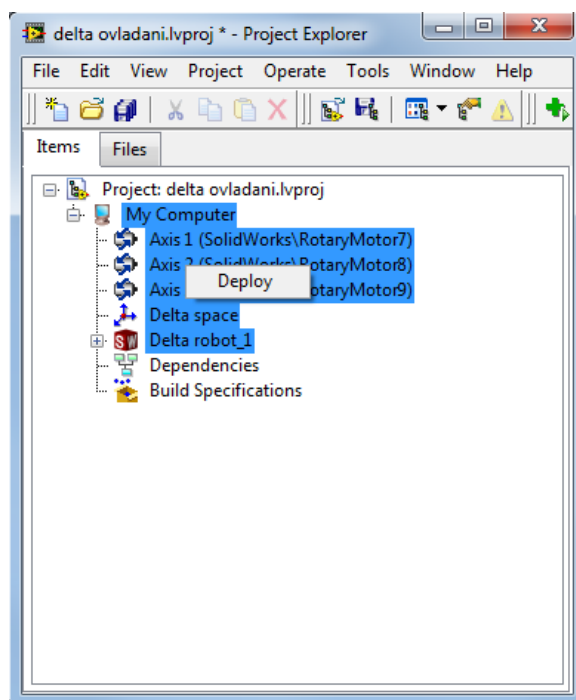
Obr. 28 Vlastnosti SolidWorks sestavy.

Nastavení maximální a minimální velikosti kroků v „Maximum Step Size“, „Minimum Step Size“ v okně „Assembly Properties“ (Obr. 28) je vhodné provést v rozsahu 0.0000001 – 0.001. Následně je vhodné zkontrolovat nastavení Scan Engine LabVIEW (My Computer->Properties). „Scan Period“ nastavuje dobu snímání NI Scan Engine, v našem případě jsem použil hodnotu 10. Pro snazší ovládání je vhodné zapnout „Start Scan Engine on Deploy“, které nastavuje, zda se spustí NI Scan Engine po provedení „Deploy“ na „My Computer“ nebo na položku v rámci „My Computer“, která je závislá na NI Scan Engine. Pokud je NI Scan Engine spuštěn, provedení „Deploy“ nerestartuje NI Scan Engine. (My Computer Properties -> Scan Engine -> Start Scan Engine on Deploy).



Obr. 29 Nastavení Scan Engine.

Spuštění simulace se provádí ve dvou krocích. V prvním kroku se přenesou výše popisovaná nastavení do běhového prostředí a ve druhém kroku se spustí simulace. Pro přenesení nastavení do běhového prostředí se provede „Deploy“. (Delta robot 1 až My Computer (Obr. 30)).



Obr. 30 Nasazování.

Nyní zbývá jen se synchronizovat motory se SolidWorks sestavou (Delta robot -> Synchronize to Assembly). Spuštění simulace v SolidWorks se provede přes SolidWorks sestavu importovanou v LabVIEW. (Delta robot -> Start Simulation). Před spuštěním simulace se však nesmí zapomenout provést „Deploy“. Spuštěním tlačítka „Run“ na „Front Panel“. Započne spuštění celé co-simulace. Zadáváním souřadnic a stiskem tlačítka „Move“ se Delta robot rozpojuje (Obr. 32).

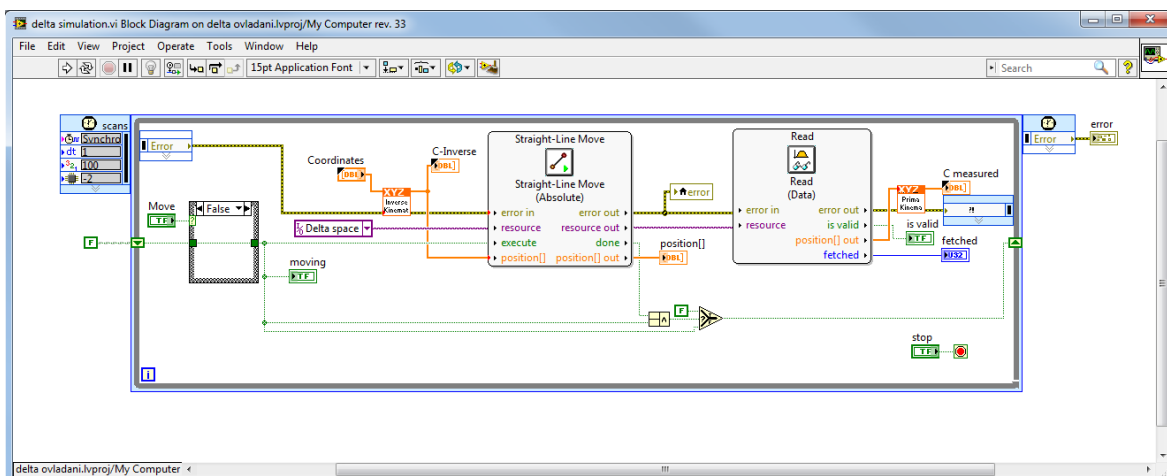
6.3 Realizace ovládání simulace v LabVIEW

Ovládání simulace se realizuje prostřednictvím funkcí SoftMotion modulu, pro svou schopnost propojení se SolidWorks a vytváření pohybových aplikací, konfiguraci os, souřadného systému, propojení a ladění motorů. SoftMotion modul rovněž dokáže transformovat lineární pohyb na rotační.

„Front Panel“ toto uživatelské rozhraní slouží jako ovládací panel, kde se umísťují indikátory, kontroly a jiné ovládací či zobrazovací prvky a jsou zároveň zobrazeny i v „Block Diagram“. „Block Diagram“ a „Front Panel“ jsou provázány a na sobě závislé, pokud je jakýkoliv prvek umístěn na „Front Panel“ okamžitě se objeví v „Block Diagram“ má však jinou grafickou podobu než na „Front Panel“.

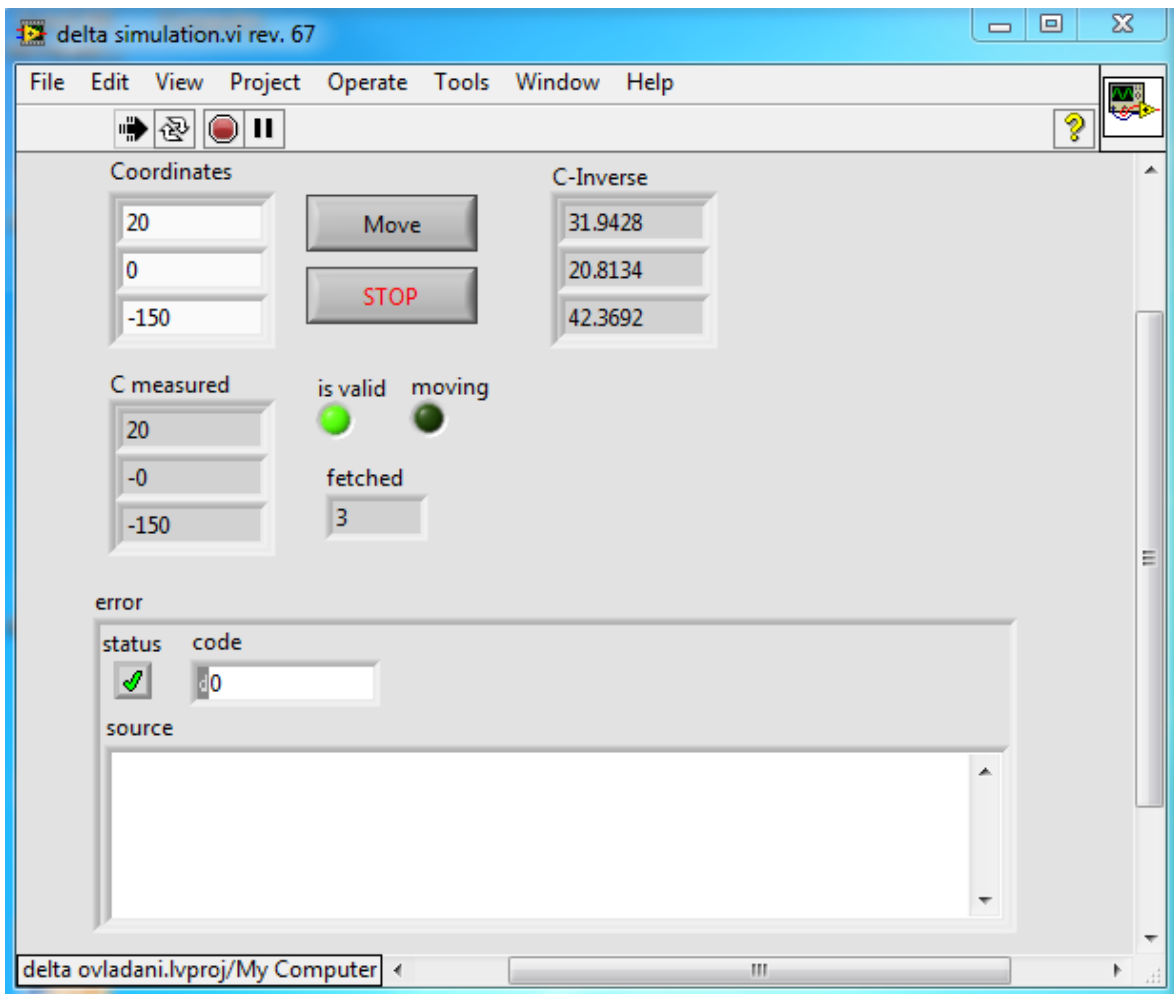
Je potřeba nastavit testování synchronizace motorů v časové smyčce. Tohle nastavení vždy vyzve uživatele k synchronizaci motorů pro SolidWorks sestavu s namapovanými osami v LabVIEW, aby nedocházelo k časovým prodlevám a snížila se náročnost na paměť.(Structures -> Timed Structures -> Timed Loop, Configure Timed Loop -> Synchronize to Scan Engine).

„SoftMotion modul“ obsahuje funkční blok „Straight-Line Move“, který provádí lineární pohyb a spojuje body na více osách. Je tedy nezbytný pro realizaci ovládání simulace. Dalším důležitým blokem v „SoftMotion modul“ je „Read“, který čte informace o stavu dat z osy.



Obr. 31 Naprogramované ovládání pro simulaci pohybu Delta robotu.

Do „Straight-Line Move“ je přiveden „Delta space“ v němž jsou přiřazeny osy Axis 1-3, zároveň se připojí blok s inverzní kinematikou, v tomto bloku se provádí přepočítání zadaných souřadnic na úhly, o které se natočí motory. Jak se tyto motory natáčí o vypočítaný úhel, tak zároveň pohybují celými rameny Delta robotu a tím i pohyblivou platformou. Souřadnice jsou zadávány do „Coordinates“. Přidáním bloku ze SoftMotion „Read“, je získána zpětná vazba a tím i data ze senzorů jako je například aktuální úhel natočení motoru. Připojením jeho vstupů na výstupy „Straight-Line Move“ je zajištěno získání dat ze senzorů. Na výstup „Read“ je připojen blok s přímou kinematikou, zde se přepočítávají data získaná ze senzorů, ověří se tak pomocí přepočítání získaných aktuálních úhlů natočení motoru ze senzoru na souřadnice zadaných do pole „Coordinates“ a tím i správnost posunutí pohybující se platformy na zadané souřadnice.



Obr. 32 Ovládací panel pro simulaci pohybu Delta robotu.

7 Závěr

Předmětem práce je seznámení s problematikou Delta manipulátorů. Musí být zajištěno vyhnutí a přiblížení k okrajovým singularitám. Proto je důležitá jejich kalibrace a nastavení takových omezujících podmínek, aby k tomu nedocházelo. Jednou z takových podmínek může být třeba omezení natočení pohonů, které provádí pohyb celého manipulátoru. Další problematikou je řešení inverzní kinematiky, kdy je ze známých pozic pohyblivé platformy potřeba vypočítat úhly natočení jednotlivých motorů tak, aby odpovídaly skutečnosti. Přímá kinematika naopak řeší výpočet pozice pro pohyblivou platformu ze známých úhlů natočení motorů. Dalším pojmem jsou singularity, které se nacházejí na okrajích pracovního prostoru Delta robotu. Jsou to právě takové pozice, ve kterých může být pohyb platformy problémem.

Analýza pracovního prostoru Delta robotu proběhla především formou rešerše. V této kapitole jsou znázorněny různé podoby pracovních prostorů, které jsou závislé na parametrech platformy a délkách jednotlivých částí ramen. Jsou zde popsány postupy jak odhadnout tvar pracovního prostoru a podle potřeby, tak navrhovat i parametry Delta robotu. Z tvarů pracovních prostorů je zřejmé, že se skládají z několika menších a zároveň je zřejmé jejich omezení při spojení jednotlivých paží na sobě závislých v uzavřeném řetězci.

Výpočet přímé kinematiky byl realizován pomocí trilaterace. Inverzní kinematika byla řešena, tak že se prostorový výpočet převedl do jednoduššího 2D prostoru tak, aby jej bylo možné použít pro ovládání CAD modelu v rozhraní LabVIEW a pro analýzu pracovního prostoru. Pracovní prostor je přímo závislý na podmínkách přímé a inverzní kinematiky tak jako na velikosti svých parametrů, jako jsou délka jednotlivých ramen a rozměry základní a pohyblivé platformy.

Vypracovaný CAD model a jeho pohybová studie je realizována v SolidWorks. Při kompletaci CAD modelu bylo důležité, aby byla zajištěna jeho pohyblivost. Pohyblivosti bylo dosaženo použitím správných vazeb na vybraných místech, jako jsou body u dílu „pivotu“ a oček na dílu „forarm“. Toto spojení je vzhledem k pohyblivosti ramen nejdůležitější.

Programování simulace CAD modelu umožnil NI SoftMotion modul v LabVIEW, který dokáže komunikovat, synchronizovat a modelovat ovládací rozhraní pro úspěšnou simulaci se SolidWorks. Pro úspěšné propojení a simulaci byla realizována řada nastavení, bez kterých by se komunikace a simulace samotná nebyla možná nebo by pracovala nekorektně. Nepodařilo se realizovat ovládání více ramenného Delta robotu. Naprogramovaná simulace pohybu v prostoru CAD modelu se nachází v elektronické příloze.

Tuhle bakalářskou práci je možno použít v budoucnu pro získávání mechanických a kinematických vlastností simulované sestavy Delta robotu, k experimentálním pokusům a jiným účelům. Realizaci fyzického modelu Delta robotu a jeho ovládání a experimentovat s jeho dynamikou.

8 Použitá literatura

- [1] E. C. A. L. E. G.-G. a. A. C. Mauro Maya, „Workspace and Payload-Capacity of,“ *International Journal of Advanced Robotic Systems*, č. [cit. 2013-05-23], p. 11, 2013.
- [2] B. K. Jiří, „EXPERIMENTÁLNÍ ROBOTIZOVANÉ PRACOVIŠTE S DELTA-ROBOTE M [cit. 2013-05-23].,“ Vysoké uení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních stroju, systému a robotiky, Brno, 2011.
- [3] mzavatsky, „forums.trossenrobotics,“ [Online]. Available: <http://forums.trossenrobotics.com/tutorials/introduction-129/delta-robot-kinematics-3276/>. [cit. 23 5 2013].
- [4] A. Olsson, *Modeling and control of a Delta-3 robot*, [cit. 2013-05-23], Lund: Lund University, Sweden, 2009, [cit. 25 11 2013].
- [5] A. Bashir, E. Castillo, G. García a M. Lopez, „Delta robot: inverse, direct, and intermediate Jacobians,“ *Academic Journal*, č. [cit. 2013-05-23]., p. 7, 2006.
- [6] A. Fan, Pythagoras: Drawing Delta Robot [online], [cit. 2014-3-3], Dostupné z: <http://blog.aaronbot3000.com/p/pythagoras-drawing-delta-robot.html>.
- [7] L. X-J, W. J. a Z. H., „Workspace atlases for the computer aided design of the,“ *Mechanical Engineering Publications, London, ROYAUME-UNI (1989) (Revue)*, sv. 217, č. [cit. 2013-05-23], p. 8, 1989.
- [8] S.-D. Stan, „academik.edu,“ 25-27 5 2008. [Online]. Available: http://utcluj.academia.edu/SergiuDanStan/Papers/702503/3_dof_parallel_robots. [cit. 15 3 2012].
- [9] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani a G. Oriolo, *Robotics*, London: Springer-Verlag, 2009, [cit. 17 4 2014].
- [10] J. P. Marlet, *Parallel Robots*, Dordrecht: Springer, 2006, [cit. 14 3 2014].