

**ČVUT
FAKULTA STROJNÍ**

Ústav mechaniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Dynamický model prostorového
lanového manipulátoru a jeho řízení**

Obor Inženýrská Mechanika a Mechatronika

Praha 2005

AHOSSY Cossi Alindé Hugues



obr.1 Průmyslový robot

Výhody-Nevýhody

Výhody

- Větší produktivita
- Větší flexibilita
- Větší kvalita

Nevýhody

- Pracují s poměrnými nerozměrnými a netěžkými předměty
- Relativně malý pracovní prostor

Pokud jde o velké předměty-lanové zařízení-lana snesou velké namáhání-relativně malo prostoru



Obr.2 Pohyblivý jeřáb stavby



Obr.3 Nepohyblivý jeřáb stavby

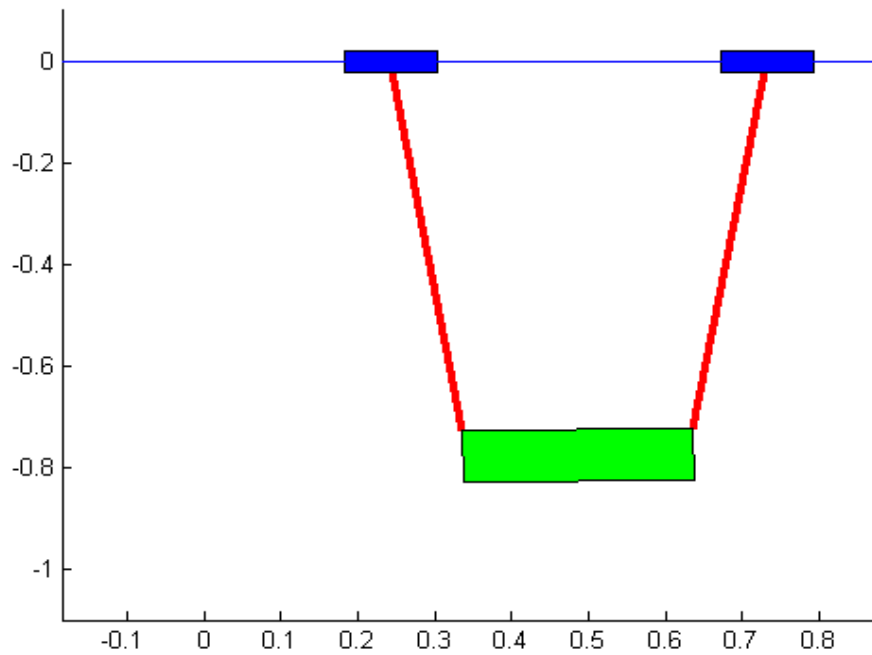
Výhody-Nevýhody

Výhody

- Větší pracovní prostor
- Velké předměty

Nevýhody

- Svislé lano-předmět zachycen v jednom podě
- Houpaní-nebezpečné pro okolí
- Řešení:Pomalý přesun jeřabové kočky....Zvyšuje se doba potřebná k přesouvání



Obr.4 Simulační model rovinného lanového manipulátoru
čvut-fsi 2003

Výhody-Nevýhody

Výhody

- Větší pracovní prostor
- Velké předměty
- Dvě lana
- Předmět zachycen ve dvou bodech.
- Dá se naklonit lana vhodnou volbou poloh vozíků-Vyvodí se vodorovné složky sil v lanech působící proti houpaní v rovině manipulátoru

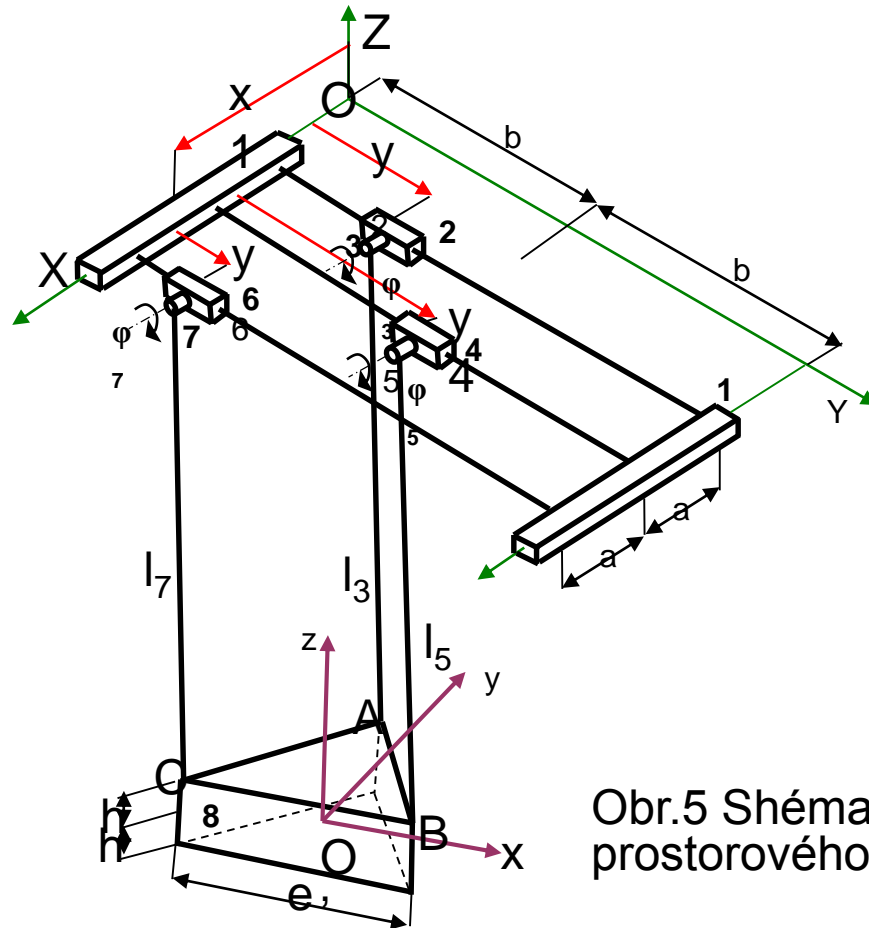
Nevýhody

- Citlivý na síly působící kolmo k rovině manipulátoru-Houpaní

- Nutno zavést manipulátory s více lany:prostorový lanový manipulátor

prostorový lanový manipulátor

- manipulace velmi těžkých hmot ve velkém pracovním prostoru využitím šikovnosti robotů.
 - Řídit posuvy hmot i jejich otáčení kolem několika os.
 - Víc než šest lan: Redundance.
 - Nadbytečné pohony umožňují vyhovět dodatečným namáháním, pro realizace vedlejších úkolů jako jsou na příklad: setrvávat v určité poloze, zvýšit pohyblivost, vyhnout se blokování kloubů nebo vyhnout se překážkám.
 - Neredundantní manipulátory: může dojít ke kývání břemena i když navijáky a trolejová vedení jsou v klidu.
 - V takovém případě, poloha platformy nebude určena jenom délkami lan, a polohami vozíků.
 - Poloha platforma:ne jako koncový efektor průmyslového robota na konci ramena...realizuje ukoly na základě signalů.
 - Musíme tedy u neredundantních manipulátorů uvažovat dynamiku houpaní hmoty.
-
- **Doporučeno manipulátor se třemi lany**



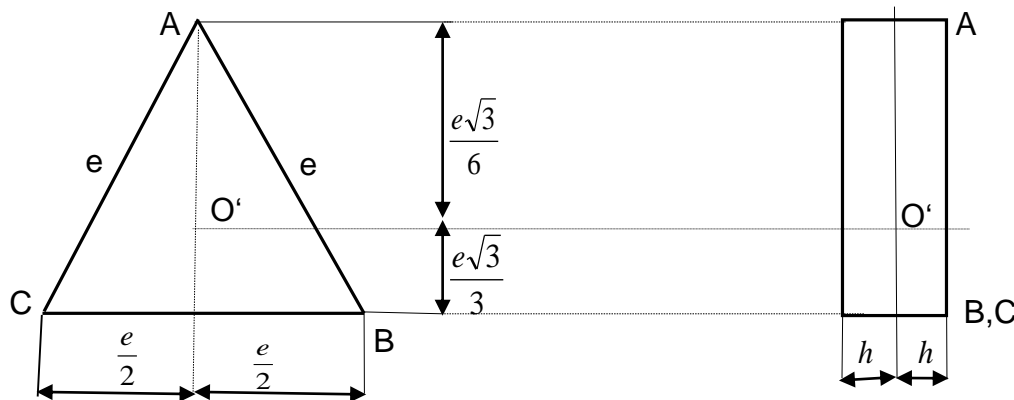
Obr.5 Shéma studovaného modelu prostorového lanového manipulátoru

Studovaný manipulátor (obr.5) se skládá celkem z 12 těles: tří prostorově umístěná lana l_3 , l_5 a l_7 , platforma 8, počítačově řízené navijáky 3, 5 a 7, namontované na vozících 2, 4 a 6. Vozíky se mohou posouvat po vedeních nosiče 1 který má jednosměrní translační pohyb po vedení základního rámu.

DYNAMICKÝ MODEL PROSTOROVÉHO LANOVÉ MANIPULÁTORU Volba rozměrů manipulátoru

Mechanický model manipulátoru

- Nosič má délku **2b**, šířku **2a**.
- Troleje jsou identické a jsou ze stejného materiálu o hustotě ρ_t .
- Navijáky jsou identické a jsou ze stejného materiálu o hustotě ρ_n , mají stejný moment setrvačnosti I_{nx} ke své ose otáčení rovnoběžné s osou X a mají stejné vnitřní a vnější poloměry bubnu r_{n1} a r_{n2} . Platforma (obr.5) má hustotu ρ_8 a matici setrvačnosti I_8 .



obr.5 Platforma

Volba souřadnicového systému a popis manipulátoru

Manipulátor má v systému (O,X,Y,Z) 13 souřadnic s_j , $j=1, \dots, 13$ obsažené ve vektoru:

$$s = \begin{bmatrix} x_1 & y_2 & y_4 & y_6 & \varphi_{3x} & \varphi_{5x} & \varphi_{7x} & x_8 & y_8 & z_8 & \varphi_{8x} & \varphi_{8y} & \varphi_{8z} \end{bmatrix}^T$$

Matematický model manipulátoru

Pohybové rovnice pohybu manipulátoru které představují mechanický model.

Metoda: Lagrangeovy Rovnice Smíšeného Typu

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{s}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial s_j} = Q_j + \sum_{k=1}^r \lambda_k \frac{\partial f_k}{\partial s_j}$$

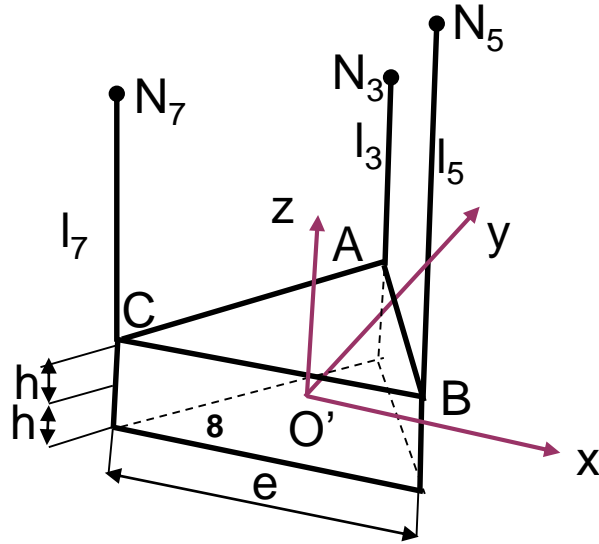
Kinetická energie T soustavy

Koenigova věta. Ta říká: Kinetická energie tělesa je rovna energii čistého posuvného pohybu určeného pohybem těžiště tělesa a kinetické energie relativního rotačního (resp. sférického) pohybu kolem těžiště tělesa

$$T = \frac{1}{2} \sum (v_i^T m_i v_i + \omega_i^T I_i \omega_i)$$

$$T = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & (m_1 + 3m_t + 3m_n)(\dot{x}_1)^2 + (m_t + m_n)(\dot{y}_2)^2 + (m_t + m_n)(\dot{y}_4)^2 + (m_t + m_n)(\dot{y}_6)^2 + \\ & + I_{nx}(\dot{\varphi}_{3x})^2 + I_{nx}(\dot{\varphi}_{5x})^2 + I_{nx}(\dot{\varphi}_{7x})^2 + m_8(\dot{x}_8)^2 + m_8(\dot{y}_8)^2 + m_8(\dot{z}_8)^2 \\ & + I_{8x} * \left[(\dot{\varphi}_{8x})^2 * \cos^2 \varphi_{8y} * \cos^2 \varphi_{8z} + 2 * \dot{\varphi}_{8x} * \cos \varphi_{8y} * \cos \varphi_{8z} * \dot{\varphi}_{8y} * \sin \varphi_{8z} + (\dot{\varphi}_{8y})^2 * \sin^2 \varphi_{8z} \right] + \\ & + I_{8y} * \left[(\dot{\varphi}_{8x})^2 * \cos^2 \varphi_{8y} * \sin^2 \varphi_{8z} - 2 * \dot{\varphi}_{8x} * \cos \varphi_{8y} * \sin \varphi_{8z} * \dot{\varphi}_{8y} * \cos \varphi_{8z} + (\dot{\varphi}_{8y})^2 * \cos^2 \varphi_{8z} \right] + \\ & + I_{8z} * \left[(\dot{\varphi}_{8x})^2 * \sin^2 \varphi_{8y} + 2 * \dot{\varphi}_{8x} * \sin \varphi_{8y} * \dot{\varphi}_{8z} + (\dot{\varphi}_{8z})^2 \right] \end{aligned} \right]$$

Vázbové podmínky



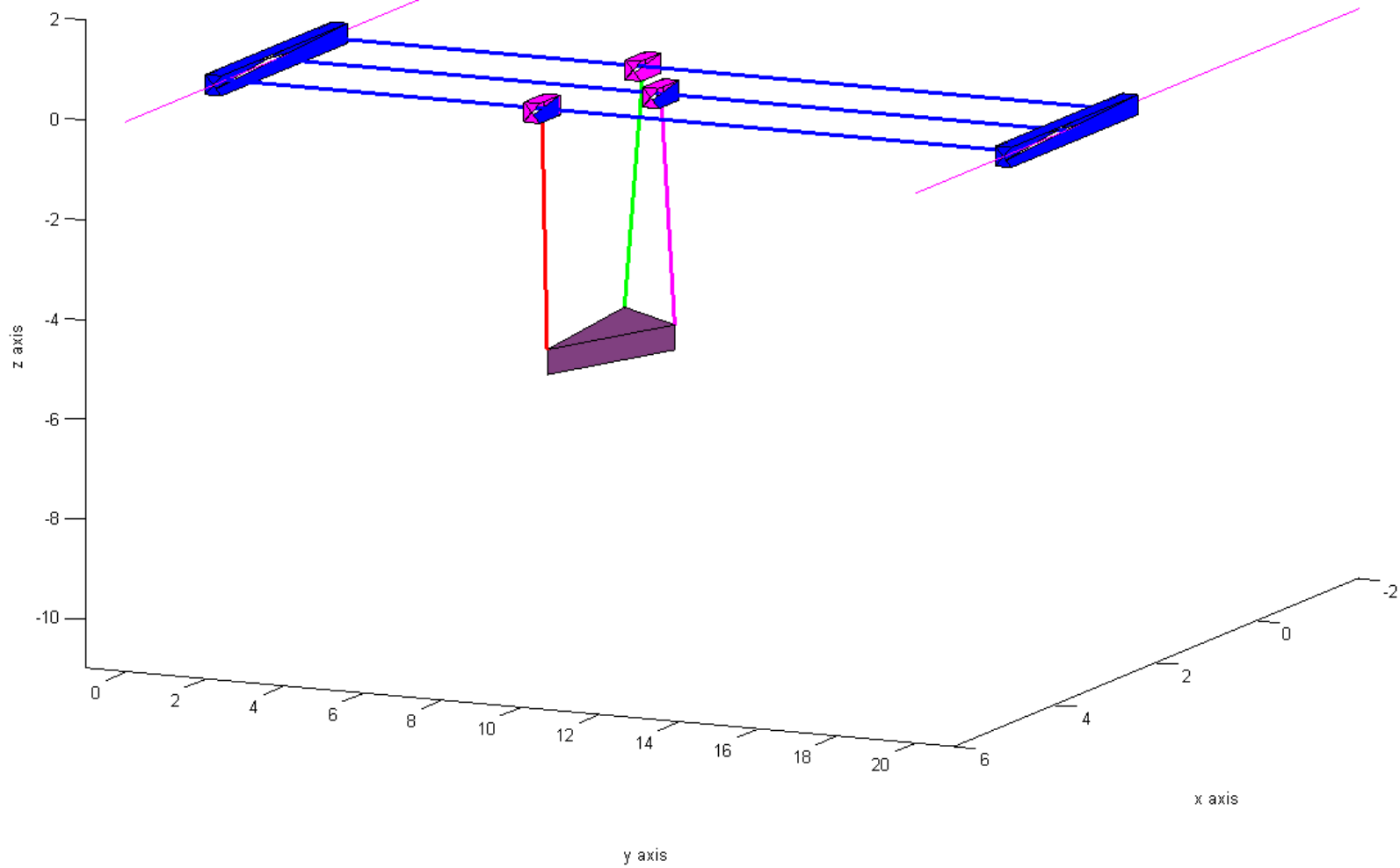
$$\begin{cases} (x_1 - a - X_A)^2 + (y_2 - Y_A)^2 + Z_A^2 - r_{n2}^2 * \varphi_{3x}^2 = 0 \\ (x_1 - X_B)^2 + (y_4 - Y_B)^2 + Z_B^2 - r_{n2}^2 * \varphi_{5x}^2 = 0 \\ (x_1 + a - X_C)^2 + (y_6 - Y_C)^2 + Z_C^2 - r_{n2}^2 * \varphi_{7x}^2 = 0 \end{cases}$$

Výpočet zobecněných sil QJ

$$Q_j = [F1 \ F2 \ F4 \ F6 \ M3 \ M5 \ M7 \ 0 \ 0 \ -m_8 * g \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Jakobiho matice

$$\phi^T = \begin{bmatrix} df_1 x_1 & df_1 y_2 & df_1 y_4 & df_1 y_6 & df_1 \varphi_{3x} & df_1 \varphi_{5x} & df_1 \varphi_{7x} & df_1 x_8 & df_1 y_8 & df_1 z_8 & df_1 \varphi_{8x} & df_1 \varphi_{8y} & df_1 \varphi_{8z} \\ df_2 x_1 & df_2 y_2 & df_2 y_4 & df_2 y_6 & df_2 \varphi_{3x} & df_2 \varphi_{5x} & df_2 \varphi_{7x} & df_2 x_8 & df_2 y_8 & df_2 z_8 & df_2 \varphi_{8x} & df_2 \varphi_{8y} & df_2 \varphi_{8z} \\ df_3 x_3 & df_3 y_2 & df_3 y_4 & df_3 y_6 & df_3 \varphi_{3x} & df_3 \varphi_{5x} & df_3 \varphi_{7x} & df_3 x_8 & df_3 y_8 & df_3 z_8 & df_3 \varphi_{8x} & df_3 \varphi_{8y} & df_3 \varphi_{8z} \end{bmatrix}^T$$



Obr.5 Simulační obrázek studovaného modelu prostorového lanového manipulátoru tři sekundy po spuštění simulace

NÁVRH ŘÍZENÍ PROSTOROVÉHO LANOVÉHO MANIPULÁTORU

Dynamické systémy, popisující soustavu mnoha těles je popsán soustavou rovnic :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}$$

Použitím Lagrangeovy rovnice smíšeného typu můžeme každou soustavu těles popsat diferencialními rovnicemi:

$$M\ddot{s} = Q + \Phi^T \lambda$$

- *Studovaný manipulátor je příkladem nelineárního systému.*
- *Nelineární systém je soustava jejíž popisující rovnice jsou nelineární.*
- *Řízení NQR (Nonlinear Quadratic Regulator).*
- *Tato metoda vyžaduje několik uprav:*
 - 1-*Izolovat nezávislé souřadnice od závislých*

$$\begin{array}{l} q\text{-nezávislé} \\ s\text{-závislé} \end{array} \quad q = \begin{bmatrix} x_1 & y_2 & y_4 & y_6 & x_8 & y_8 & z_8 & \varphi_{8x} & \varphi_{8y} & \varphi_{8z} \end{bmatrix}^T$$
$$s = \begin{bmatrix} x_1 & y_2 & y_4 & y_6 & \varphi_{3x} & \varphi_{5x} & \varphi_{7x} & x_8 & y_8 & z_8 & \varphi_{8x} & \varphi_{8y} & \varphi_{8z} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} (x_1 - a - X_A)^2 + (y_2 - Y_A)^2 + Z_A^2 - r_{n2}^2 * \varphi_{3x}^2 = 0 \\ (x_1 - X_B)^2 + (y_4 - Y_B)^2 + Z_B^2 - r_{n2}^2 * \varphi_{5x}^2 = 0 \\ (x_1 + a - X_C)^2 + (y_6 - Y_C)^2 + Z_C^2 - r_{n2}^2 * \varphi_{7x}^2 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} f_3 &= (x_1 + a - X_C)^2 + (y_6 - Y_C)^2 + Z_C^2 \\ f_1 &= (x_1 - a - X_A)^2 + (y_2 - Y_A)^2 + Z_A^2 \\ f_2 &= (x_1 - X_B)^2 + (y_4 - Y_B)^2 + Z_B^2 \end{aligned}$$

$$r = s = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \varphi_{3x} \\ \varphi_{5x} \\ \varphi_{7x} \\ x_8 \\ y_8 \\ z_8 \\ \varphi_{8x} \\ \varphi_{8y} \\ \varphi_{8z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{1}{r_{n2}} \sqrt{f_1} \\ \frac{1}{r_{n2}} \sqrt{f_2} \\ \frac{1}{r_{n2}} \sqrt{f_3} \\ x_8 \\ y_8 \\ z_8 \\ \varphi_{8x} \\ \varphi_{8y} \\ \varphi_{8z} \end{bmatrix}$$

$$r = s = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \varphi_{3x} \\ \varphi_{5x} \\ \varphi_{7x} \\ x_8 \\ y_8 \\ z_8 \\ \varphi_{8x} \\ \varphi_{8y} \\ \varphi_{8z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{1}{r_{n2}} \sqrt{(x_1 - a - X_A)^2 + (y_2 - Y_A)^2 + Z_A^2} \\ \frac{1}{r_{n2}} \sqrt{(x_1 - X_B)^2 + (y_4 - Y_B)^2 + Z_B^2} \\ \frac{1}{r_{n2}} \sqrt{(x_1 + a - X_C)^2 + (y_6 - Y_C)^2 + Z_C^2} \\ x_8 \\ y_8 \\ z_8 \\ \varphi_{8x} \\ \varphi_{8y} \\ \varphi_{8z} \end{bmatrix}$$

Pak vektor \mathbf{s} bude nějaká funkce \mathbf{r} jenom nezávislých souřadnic: $\mathbf{s}=\mathbf{r}(\mathbf{q})$

Derivováním sloupcové matice $\mathbf{r}(\mathbf{q})$ podle času dostaneme: $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{r}'(\mathbf{q}) * \dot{\mathbf{q}}$

Opět derivováním tohoto podle času dostaneme $\ddot{\mathbf{s}} = \mathbf{r}'(\mathbf{q}) * \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}''(\mathbf{q}) * \dot{\mathbf{q}} * \dot{\mathbf{q}}$

Nechť $\mathbf{R} = \mathbf{r}'(\mathbf{q})$ a $\mathbf{R}' = \mathbf{r}''(\mathbf{q}) * \dot{\mathbf{q}}$

Pak $\ddot{\mathbf{S}} = \mathbf{R}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}'\dot{\mathbf{q}}$ Stavový vektor bude $\mathbf{x} = \left[\mathbf{q}, \frac{d\mathbf{q}}{dt} \right]$

A dosazením do $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{s}} = \mathbf{Q} + \Phi^T \lambda$ dostaneme $\mathbf{M}(\mathbf{R}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}'\dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q} + \Phi^T \lambda$

Po úpravě $\mathbf{R}^T \mathbf{M}\mathbf{R}\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{R}^T \mathbf{Q} - \mathbf{R}^T \mathbf{M}\mathbf{R}'\dot{\mathbf{q}}$ $\mathbf{x} = \left[\mathbf{q}, \frac{d\mathbf{q}}{dt} \right]$

Z toho výrazu vyjádříme a dostaneme stavový popis ve tvaru
$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \dot{\mathbf{q}} = (\mathbf{R}^T \mathbf{M}\mathbf{R})^{-1} (\mathbf{R}^T \mathbf{Q} - \mathbf{R}^T \mathbf{M}\mathbf{R}'\dot{\mathbf{q}}) \\ \frac{d}{dt} \mathbf{q} = \dot{\mathbf{q}} \end{cases}$$

- Vyloučení tíhy z $g(x)$
- Rozklad $f(x)=A(x)x$
- Zavedení substituce $x=z+xz$

Pak jsem sestavil funkce $f(x)$ a $g(x)$

$$f(z) = (R^T MR)^{-1} (-R^T M \dot{R})(z + x_z) + (R^T MR)^{-1} R^T Q_2 + (R^T MR)^{-1} R^T u$$

$$g(z) = (R^T MR)^{-1} R^T$$

Experimenty

7.6. Zvednutí z x0 o 7 metrů ve směru kladné osy z.

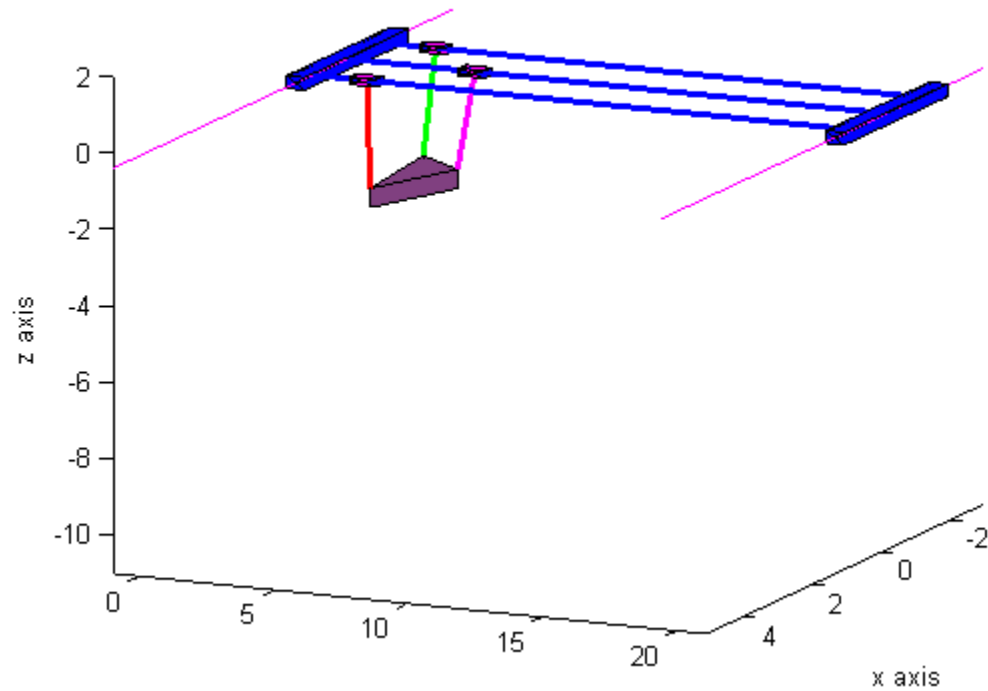
Pro zvednutí platformy o 5 metru ve směru kladné osy y je nastavená počáteční poloha x_0 a žádaná poloha x_z na:

$x_0 = [-1; 2; (e \cdot \sqrt{3})/2 + 3; 2; -1; 2 + e \cdot \sqrt{3}/6; -10; 0; 0; 3 \cdot \pi/4; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0]$

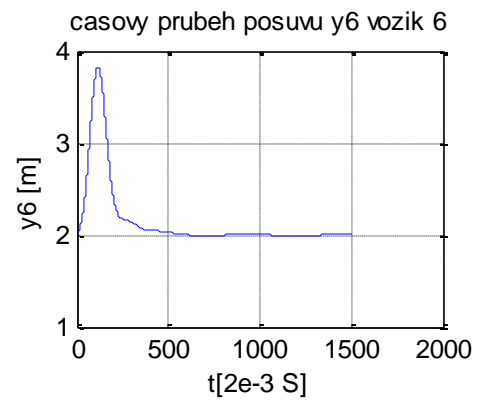
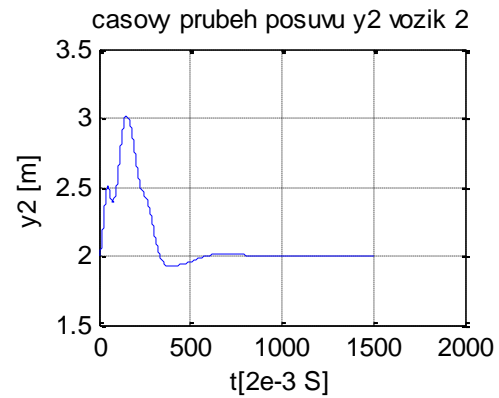
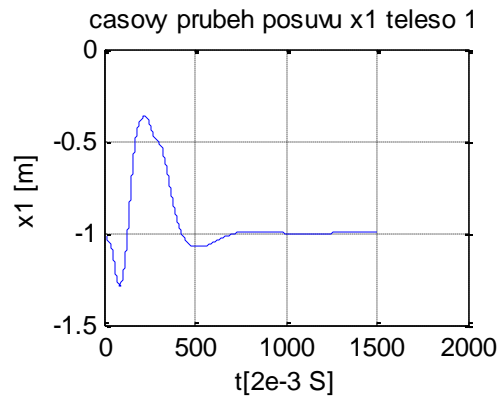
$x_z = [-1; 2; (e \cdot \sqrt{3})/2 + 3; 2; -1; 2 + e \cdot \sqrt{3}/6; -3; 0; 0; 3 \cdot \pi/4; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0]$

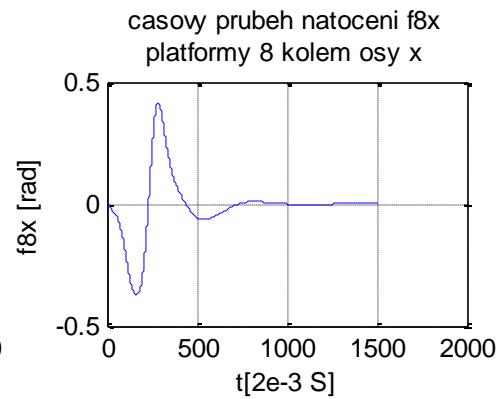
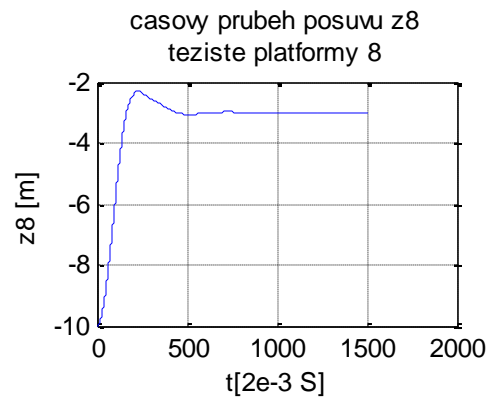
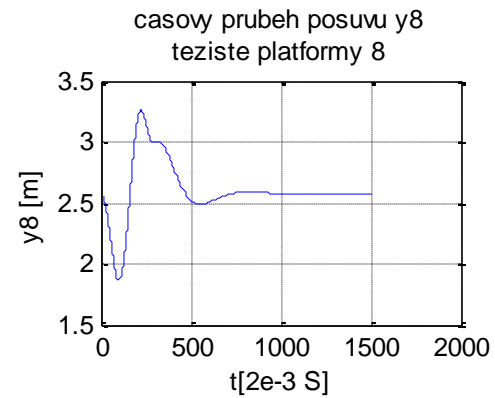
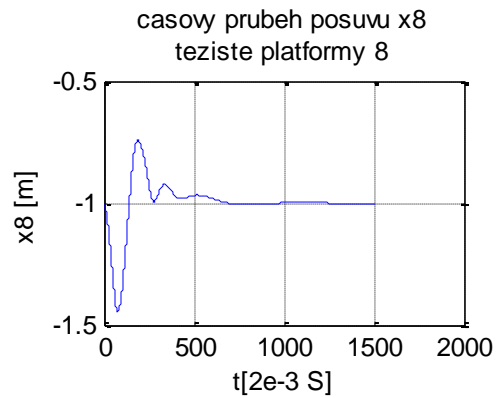
Čas simulace byl nastaven tak aby manipulátor stihl dojet na žádanou polohu, matice kvadratického kritéria optimality byly zvolené o velikosti $QNQR=104$ a $RNQR=1$.

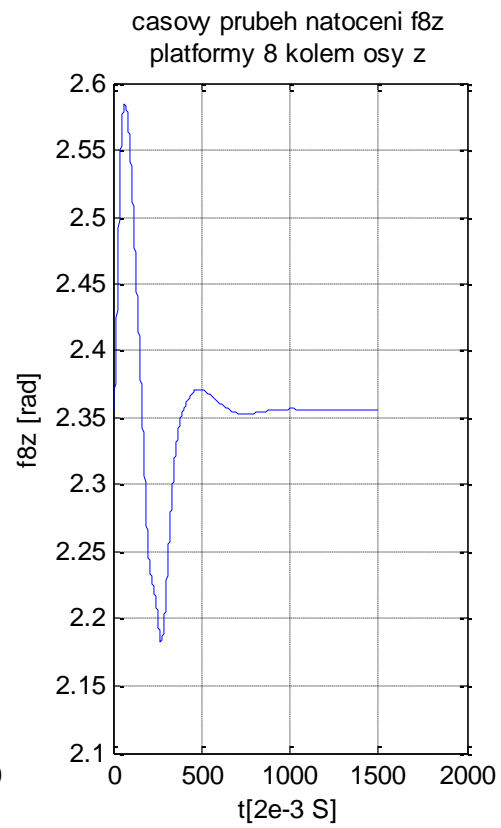
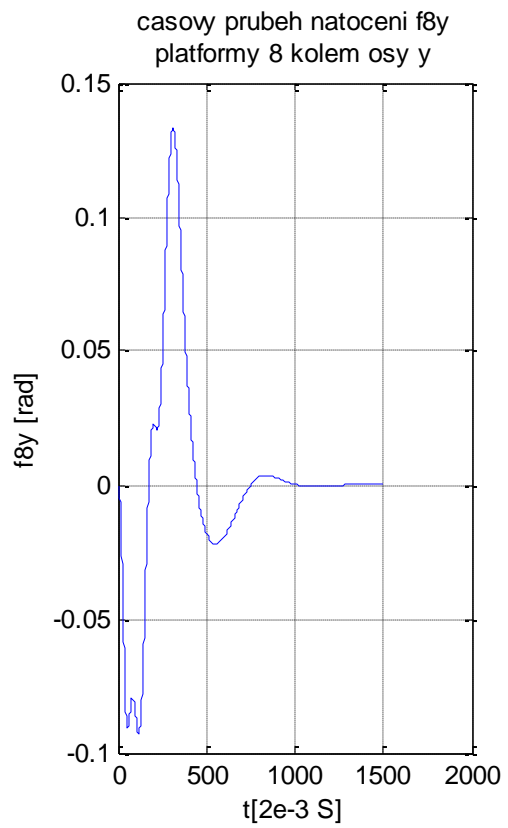
Zjistí se, že po spuštění se manipulátor rozběhne, všechny souřadnice se mění a manipulátor se blíží asymptoticky po dobu tří sekund k žádané poloze (obr.24), tak, že platforma se posune o 7 metrů nahoru (obr.23). Přitom všechny ostatní souřadnice se vrátí na původní hodnoty.



Obr.5 Simulační obrázek studovaného modelu prostorového lanového manipulátoru v žádáné poloze







ZÁVĚR

- Po provedení simulace dynamického modelu, bylo zjištěno, že manipulátor má v počáteční poloze nulové rychlosti a zrychlení.
- A po provedení simulace řízení bylo zjištěno, že záznamy chování manipulátoru ukazují, že se manipulátor pro určitou počáteční polohu a určitou žádanou polohu, vždy blíží asymptoticky k žádané poloze.
- Očekávané výsledky práce byly tedy dosažené.

Děkuju za pozornost

AHOSSY Alinde