

TAČR Centrum kompetence CIDAM
Dynamická analýza manipulátoru „Vodník“

Výzkumná zpráva DV075

Martin Švejda, Arnold Jáger

8. prosince 2017

T A
Č R



CIDAM

*Center for Intelligent Drives
and Advanced Machine Control*

Abstrakt

Předložená technická zpráva se zabývá dynamickou analýzou manipulátoru „Vodník“ vyvíjeného v rámci projektu CIDAM ve spolupráci s firmou Eurotec JKR. Cílem analýzy je stanovit předpokládané momentové zatížení rotačních aktuátorů manipulátoru v závislosti na požadované délce pracovního cyklu, kde vstupními daty je úplný 3D CAD model vyvíjeného manipulátoru (včetně rozměrových a hmotnostních parametrů ramen, kloubů a aktuátorů). Tvar trajektorie pohybu koncového efektoru manipulátoru je nakreslen přímo v 3D CAD nástroji (Inventor, SolidWorks), ve kterém je konstruován celý manipulátor, včetně zakreslení technologických komponent, které mají být manipulátorem obsluhovány (konkrétně se jedná o ofuk tlakovým vzduchem za účelem osušení komponent po procesu průmyslového mytí). Trajektorie z 3D CAD nástroje je dále exportována ve formě koincidenčních bodů a dále zpracována (editace, interpolace, parametrizace). Součástí zprávy je nástin a řešení výzkumného problému pohybu koncového efektoru manipulátoru po dané trajektorii (aproximační B-spline určený získanými koincidenčními body) s ohledem na maximální možné rychlosti a zrychlení aktuátorů manipulátoru. Zohlednění problému je nezbytné v případech, kdy se manipulátor při svém pohybu blíží do blízkosti singulární polohy a generované rychlosti/zrychlení aktuátorů extrémně rostou. Zvolený postup řešení (vhodným tvarováním feedrate parametrizace trajektorie) vede na striktní limitaci rychlostí aktuátorů, nikoliv však na jejich zrychlení).

Obsah

1	Virtuální simulační model	4
2	Generátor trajektorie pohybu robotu	6
3	Generování časové závislosti $u(t)$ s ohledem na omezení pohybu aktuátorů (korekce feedrate)	11
4	Simulační výsledky	12
5	Závěr	18
A	Přílohy	20
A.1	Exporty z prostředí SolidWorks	20

1 Virtuální simulační model

Předložená zpráva se zabývá dynamickou analýzou robotu „Vodník“, jehož virtuální simulační model včetně prvotní optimalizace rozměrů byl představen detailně v technické zprávě [4]. Finální architektura robotu byla ustálena na neredundantní verzi (bez lineárního výtahu), tzn. 5 DoF robotu s možností řízení pozice (X, Y, Z) konce trysky a její orientace definované směrovým vektorem (n_x, n_y, n_z) . Zobecněné souřadnice robotu (MCS: Machine Coordinate System) jsou dány neminimální reprezentací jako:

$$\mathbf{X} = [X \ Y \ Z \ n_x \ n_y \ n_z]^T, \quad n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1 \quad (1)$$

Kloubové souřadnice robotu (ACS: Axes Coordinate System) definující pohyb aktuátorů jsou dány jako:

$$\mathbf{Q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5]^T \quad (2)$$

CAD výkres finální verze manipulátoru je znázorněna na Obrázku 1 včetně dvojice technologických dílů, které mají být ofukovány vzduchem. Simulační model v prostředí Simulink/SimMechanics je znázorněn na Obrázku 2.

Volené kinematické parametry robotu jsou dány délkou jednotlivých ramen robotu L_i , ostatní kinematické parametry (Denavit-Hartenbergovy parametry) jsou dány odpovídajícími konstantami charakterizující kinematické uspořádání ramen a kloubů. Detailní kinematický popis manipulátoru včetně řešení přímé inverzní kinematické úlohy je uveden v [4].

Volené kinematické parametry manipulátoru (vycházející z optimalizace (minimalizace) momentů aktuátorů na základě zjednodušeného - „tyčkového“ dynamického modelu ramen, viz [4]):

Kinematické parametry manipulátoru:

$$\boldsymbol{\xi} = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6]^T = [0.55 \ 0.232 \ 0.389 \ 0 \ 0.283 \ 0.1]^T [m] \quad (3)$$

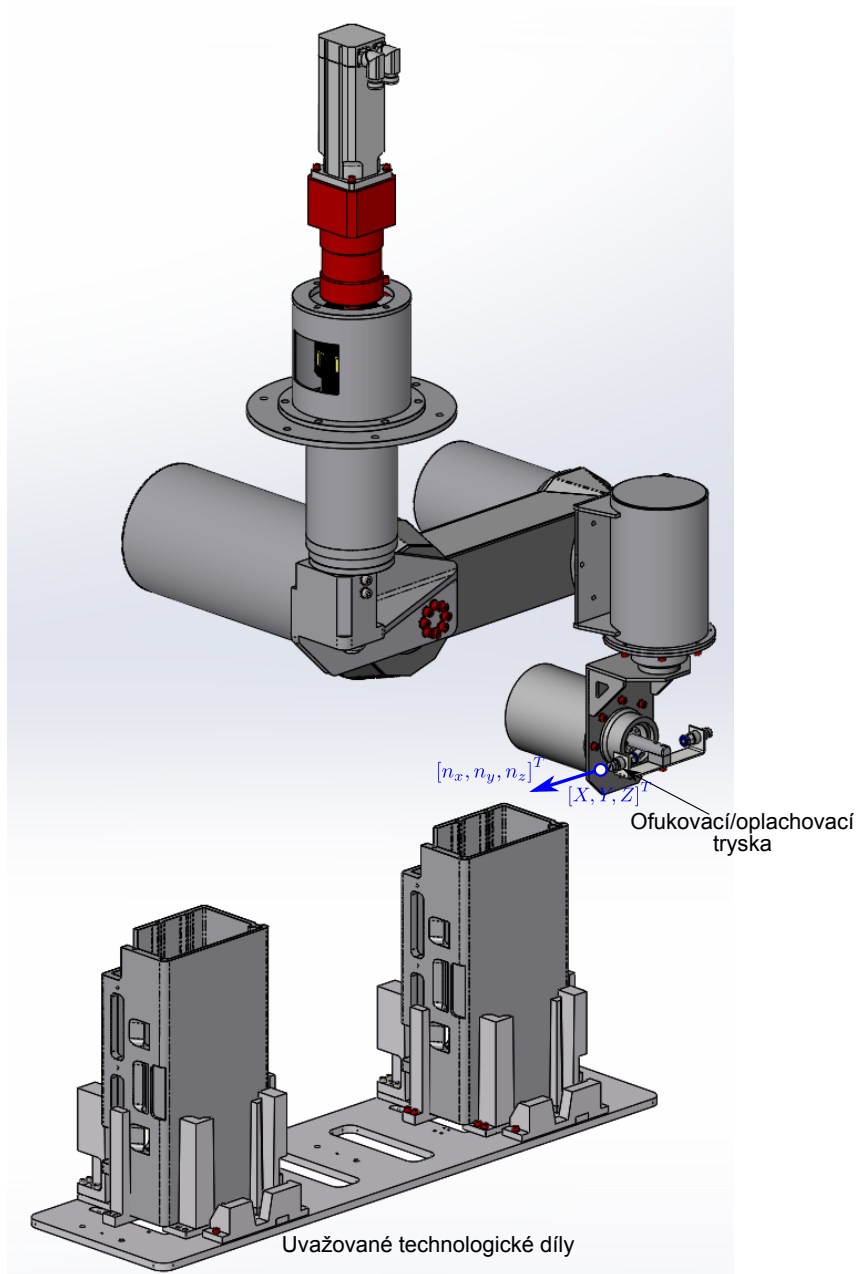
Na základě odhadu kinematických parametrů manipulátoru byl vytvořen reálný 3D CAD model (vytvořeno v Inventoru) s uvažováním všech materiálových vlastností ramen manipulátoru a skutečných hmotnostních parametrů jednotlivých aktuátorů (ze známé konfigurace aktuátoru - motor, převodovka, konstrukční spojovací díly, krycí elementy, atd.). 3D CAD model vytvořený v Inventoru byl následně exportován do prostředí SolidWorks, kde byl model robotu rozebrán na jednotlivé pohybuující se celky - díly (typicky kinematické dvojice = rameno + kloub), byly doplněny/opraveny všechny hmotnostní parametry ramen (dílní problémy s exportem z Inventoru) a následně všem ramenům přiřazen odpovídající pevný souřadný systém (CS - Coordinate System) dle Denavit-Hartenbergovy úmluvy, viz [4], odpovídající přiřazeným CS na Obrázku 2. Výpočetní jádro SolidWorksu následně umožňuje vypočítat odpovídající hmotnostní (dynamické) parametry každého dílního ramena Link i manipulátoru, konkrétně hmotnost $M_i \in \mathbb{R}$, polohu těžiště $\mathbf{T}_i^i \in \mathbb{R}^3$ a tensor setrvačnosti $\mathbf{I}_i^i \in \mathbb{R}^{3,3}$ jejich souřadnice jsou vyjádřeny vzhledem (v osách) CS příslušného ramena F_i , viz Obrázek 2.

Dynamické parametry manipulátoru:

Exporty ze SolidWorks jsou přiloženy v Kapitole A.1.

$$\mathbf{M} = [M_1, M_2, \dots] = [24.2594, 39.4674, 13.2503, 5.5005, 0.4771] [kg] \quad (4)$$

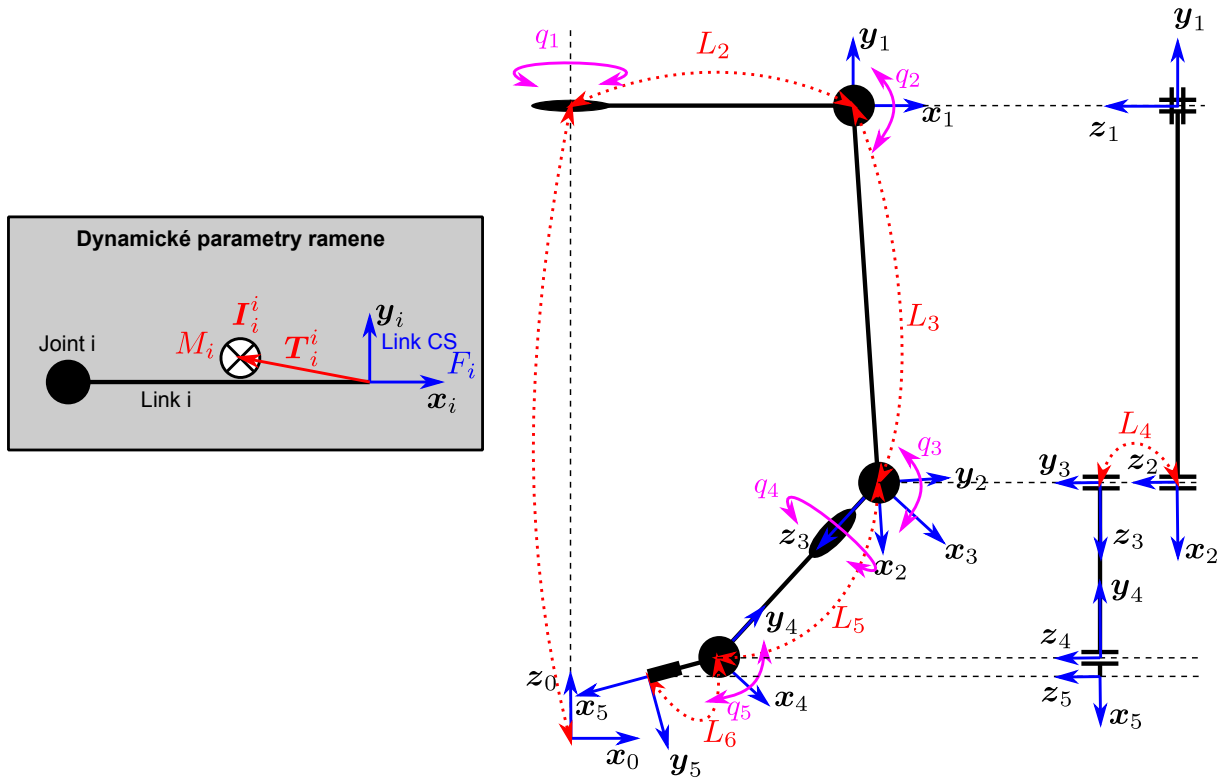
$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1^1 | \mathbf{T}_2^2 | \dots] = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} -0.1854 & -0.2739 & -0.0005 & 0 & -0.1001 \\ 0.2069 & 0.0000 & -0.0364 & 0.0340 & -0.0052 \\ -0.0325 & -0.2389 & 0.0246 & -0.0973 & -0.0146 \end{array} \right] [m] \quad (5)$$



Obrázek 1: CAD model robotu

$$\mathbf{I} = [\mathbf{I}_1^1 | \mathbf{I}_2^2 | \dots] = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc}
 0.9077 & -0.2028 & -0.0611 & 0.4302 & -0.0001 & 0.0680 & 0.0896 & -0.0003 & 0.0001 \\
 -0.2028 & 0.2167 & 0.1266 & -0.0001 & 1.5656 & -0.0000 & -0.0003 & 0.0705 & 0.0119 \\
 -0.0611 & 0.1266 & 1.0375 & 0.0680 & -0.0000 & 1.2817 & 0.0001 & 0.0119 & 0.0584 \\
 \dots & & & 0.0478 & 0 & 0 & 0.0003 & 0 & 0 \\
 & & & 0 & 0.0324 & 0.0138 & 0 & 0.0013 & -0.0000 \\
 & & & 0 & 0.0138 & 0.0281 & 0 & -0.0000 & 0.0011
 \end{array} \right] [kg \cdot m^2] \quad (6)$$

Virtuální simulační model manipulátoru (kinematika + dynamika) byl vytvořen v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics na základě knihovny robotLib, viz [3], která umožňuje systematickou cestou vytvářet modely sériových manipulátorů pomocí blokových schémat a obsahuje podpůrné funkce jako elementární prerekvizity určené k řešení kinematických a dynamických úloh.



Obrázek 2: Schéma uspořádání architektury robotu (kinematické/dynamické parametry)

2 Generátor trajektorie pohybu robotu

Za účelem provedení dynamické analýzy (výpočet silových momentů v aktuátorech manipulátoru) je nezbytně nutné definovat nominální trajektorii pohybu robotu. Vzhledem k podstatě prováděné úlohy robotem a po konzultaci s vývojáři firmy Eurotec JKR, lze požadavky na trajektorie manipulátoru shrnout následovně, viz Obrázek 3, 4.

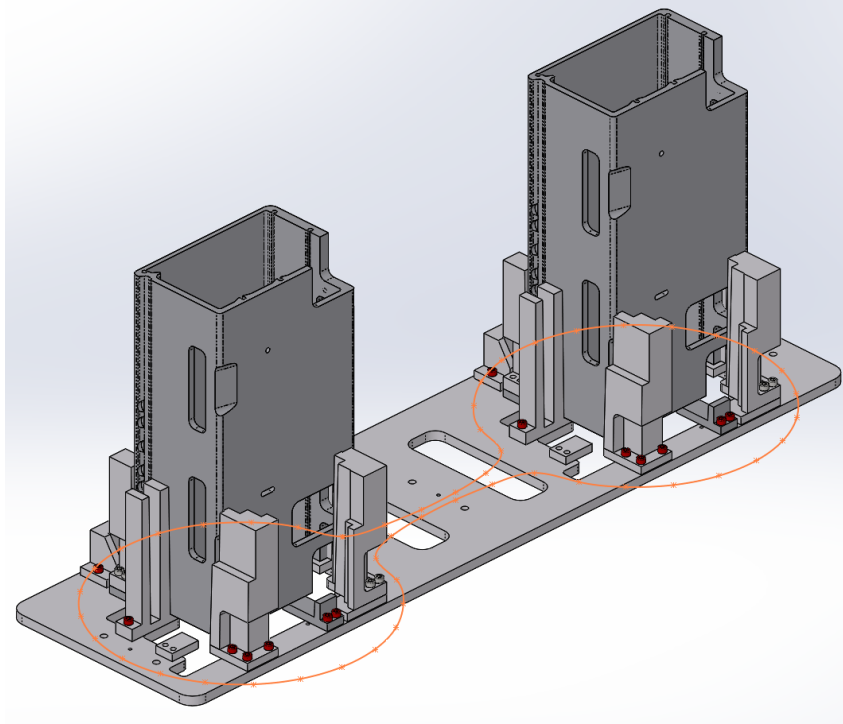
1. Generování koincidenčních bodů z CAD nástroje (SolidWorks)

Jedná se o poloautomatickou proceduru, kdy je možné exportovat seznam datových bodů (poloh), které tvoří vybranou entitu v prostředí SolidWorks. V našem případě se jednalo o diskretizaci rovinné křivky (v rovině x_0y_0), která obepínala oba uvažované technologické díly, viz Obrázek 3. Klíčovou vlastností je možnost zadávání tvaru požadované trajektorie přímo z CAD nástroje, ve kterém je již obsažen model technologické součásti a využít tedy dostupné možnosti 3D kreslení. Zároveň může být základní tvar trajektorie zadáván přímo konstruktérem/technologem, který je s budoucí vykonávanou úlohou robotem dobře seznámen.

2. Editace/parametrizace CAD koincidenčních bodů

V případě nutnosti mohou být vygenerované koincidenční body z CAD nástroje dále upravovány/parametrizovány. V našem případě se jedná o parametrizaci trajektorie následujícími parametry (přechod z rovinné trajektorie do prostorové trajektorie - spirálovitý pohyb v ose z_0), viz Obrázek 4.

N_{rev}	Počet závitů spirály
z_{range}	$= [z_{\text{min}}, z_{\text{max}}]$ Rozsah rozmítání v ose z_0 (\Rightarrow výška spirály) [m]
α_{slope}	Odklon od roviny x_0y_0 [rad]



Obrázek 3: Koincidenční body (★) na rovinné křivce vytvořené v SolidWorksu jako základní tvar trajektorie pohybu koncového efektoru

3. Aproximace výsledných koincidenčních bodů (v pozici XYZ)

Výsledné (parametrizované) koincidenční body (modré body na Obrázku 4) jsou dále aproximovány kvintickým B-spline

$$\mathbf{O}(u) = [X(u), Y(u), Z(u)], \quad u \in \langle 0, 1 \rangle \quad (7)$$

viz [2], kde míra aproximace je dána počtem řídicích segmentů N ve smyslu rozdělení parametru

$$u = [0 = u_1 < u_2 < u_3 < \dots < u_N = 1]$$

Na každém segmentu $[u_i, u_{i+1}]$ je poloha $\mathbf{O}(u)$ aproximována kvintickým polynomem zajišťující dostatečnou hladkost trajektorie (ve smyslu spojitosti jejich vyšších derivací dle parametru u). První a poslední koincidenční bod trajektorie splňuje okrajovou podmínku:

$$\mathbf{O}(0) = \text{První koincidenční bod traj.}, \quad \mathbf{O}(1) = \text{Poslední koincidenční bod traj.}$$

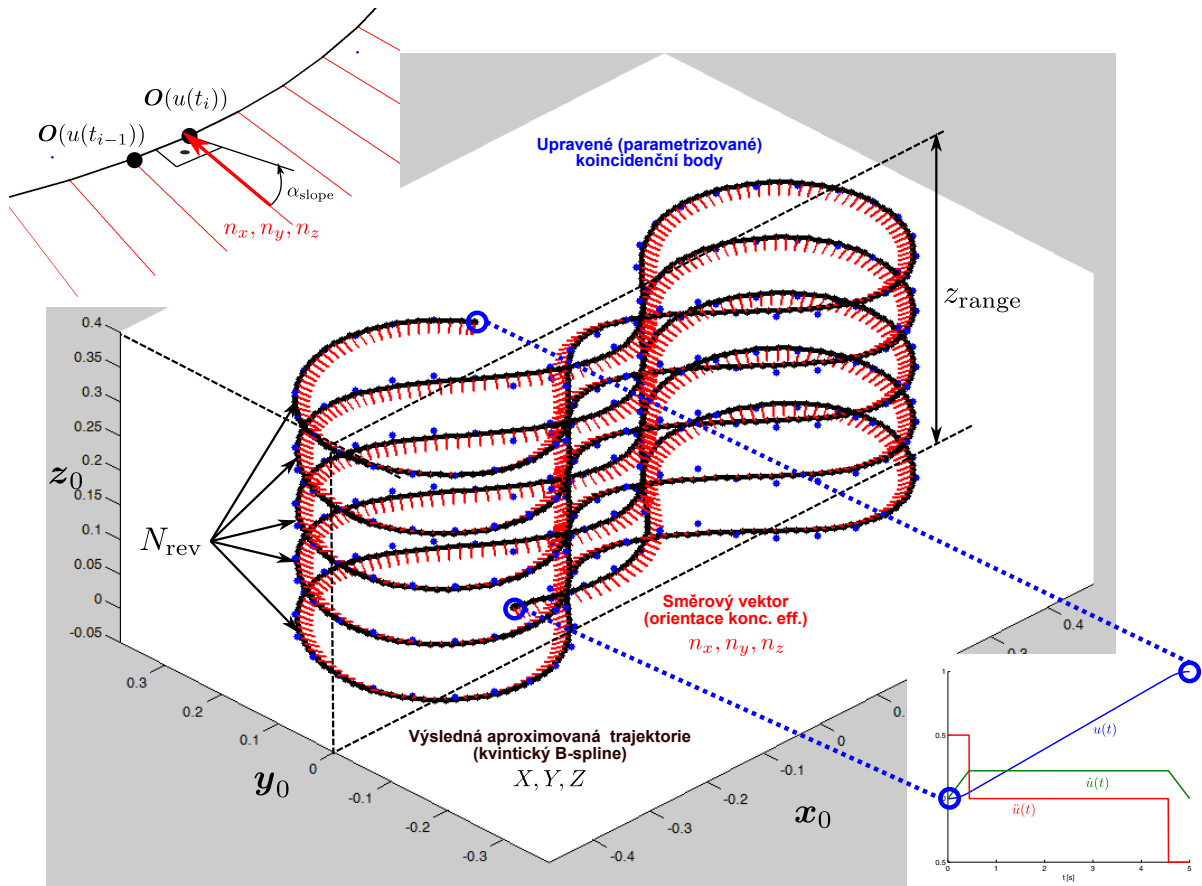
4. Generátor časové závislosti parametru $u = u(t)$

Poznamenejme, že parametrizace kvintickým B-splinem nespĺňuje podmínky přirozené parametrizace trajektorie, tedy neplatí lineární závislost délky ujeté dráhy $s(u(t)) = k \cdot u(t)$, $k = \text{konst.}$, tzn. zvolený profil rychlosti parametru $\dot{u}(t)$ negeneruje identický profil tečné rychlosti

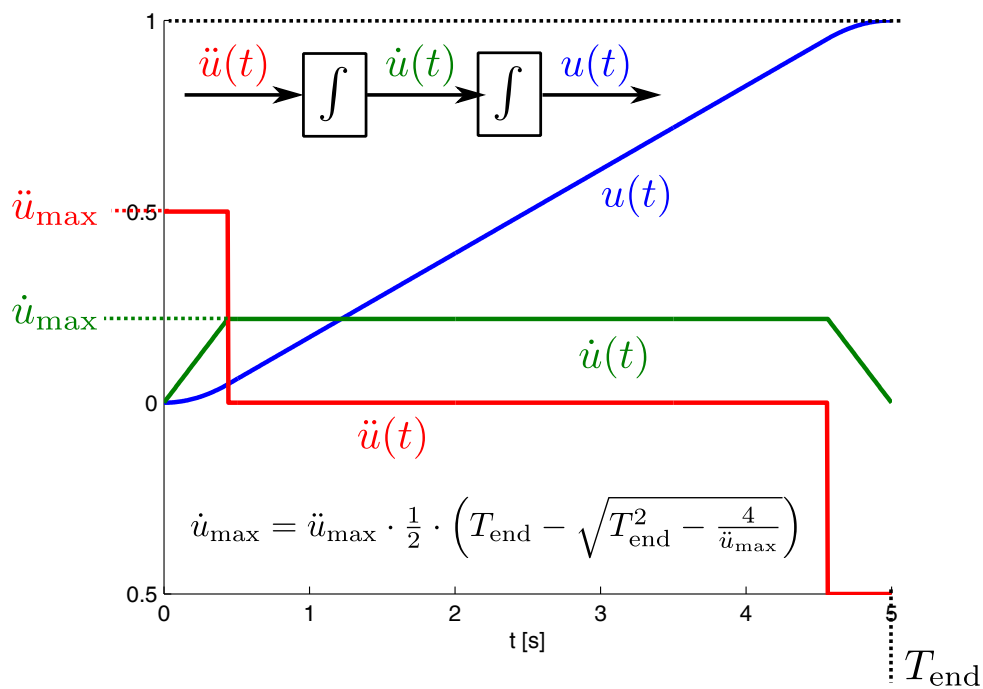
$$\dot{s}(t) = \sqrt{\frac{\partial \mathbf{O}^T(u(t))}{\partial t} \cdot \frac{\partial \mathbf{O}(u(t))}{\partial t}} = \underbrace{\sqrt{\frac{\partial \mathbf{O}^T(u)}{\partial u} \cdot \frac{\partial \mathbf{O}(u)}{\partial u}}}_{=k \neq \text{konst.}} \cdot \dot{u}(t) \quad (8)$$

Vzhledem k podstatě plánované trajektorie byl zvolen profil parametru $u(t)$, viz Obrázek 5 s následujícími parametry:

\ddot{u}_{\max}	maximální zrychlení parametru $[1/s^2]$
T_{end}	délka cyklu (čas potřebný k projetí celé naplánované trajektorie) $[s]$



Obrázek 4: Parametrizace trajektorie - koincidenčních bodů (★) na Obrázku 3, aproximace koincidenčních bodů kvintickým B-spline a vypočtená orientace koncového efektoru



Obrázek 5: Použitý profil parametru $u(t)$ - maximální rychlost dána požadovanou délkou cyklu.

5. Výpočet orientace n_x, n_y, n_z (v aproximovaných bodech polohy XYZ)

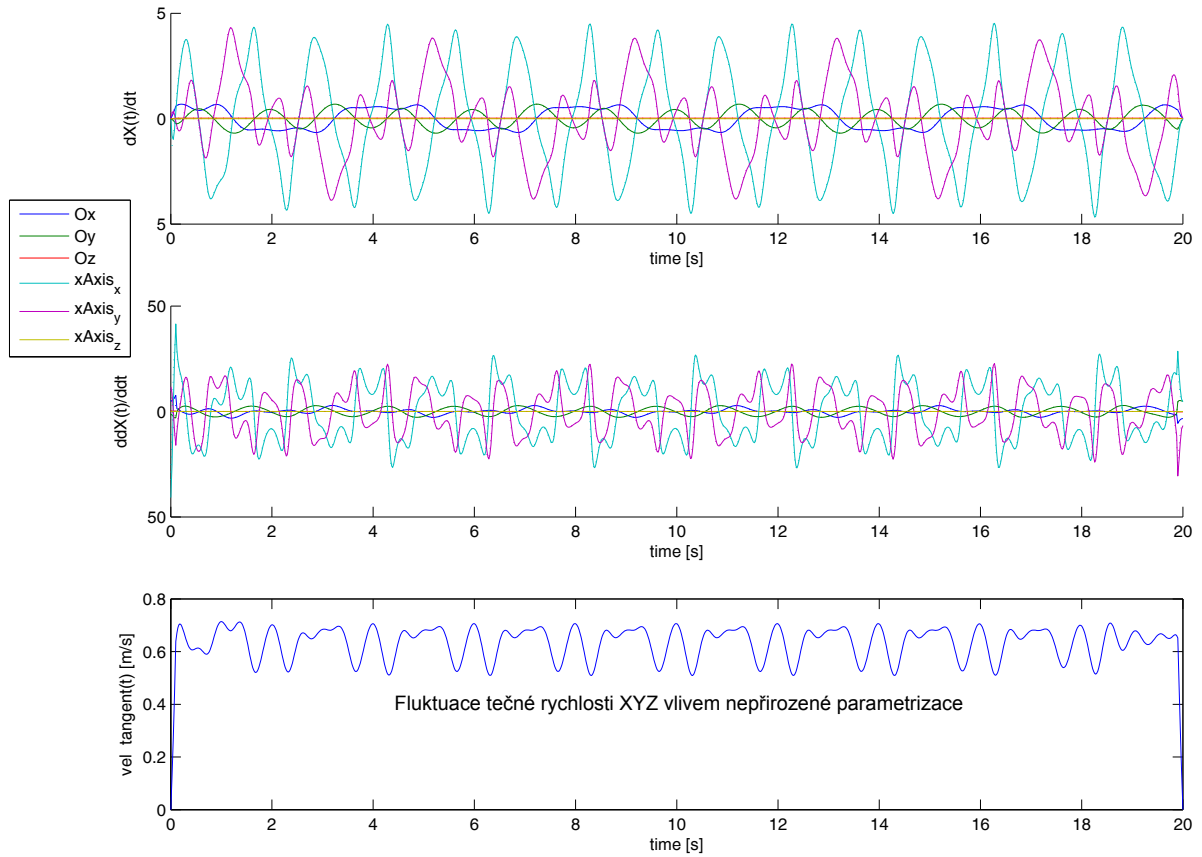
K parametrizovaným bodům translace XYZ koncového efektoru $\mathbf{O}(u(t))$ byla dopočítána požadovaná orientace směrového vektoru n_x, n_y, n_z (včetně jeho rychlosti a zrychlení). Směrový vektor byl generován jako normálový vektor ke směru XYZ pohybu v diskretních časových okamžicích $\mathbf{O}(u(t_{i-1}))\mathbf{O}(u(t_i))$, který je odkloněn od roviny $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$ o úhel α_{slope} , viz Obrázek 4. Parametrizaci orientace lze tak psát analogicky jako v (7) jako:

$$\mathbf{n}(u) = [n_x(u), n_y(u), n_z(u)], \quad u \in \langle 0, 1 \rangle \quad (9)$$

Typický průběh generovaných zobecněných souřadnic robotu \mathbf{X} je znázorněn na Obrázku 6 pro požadované parametry:

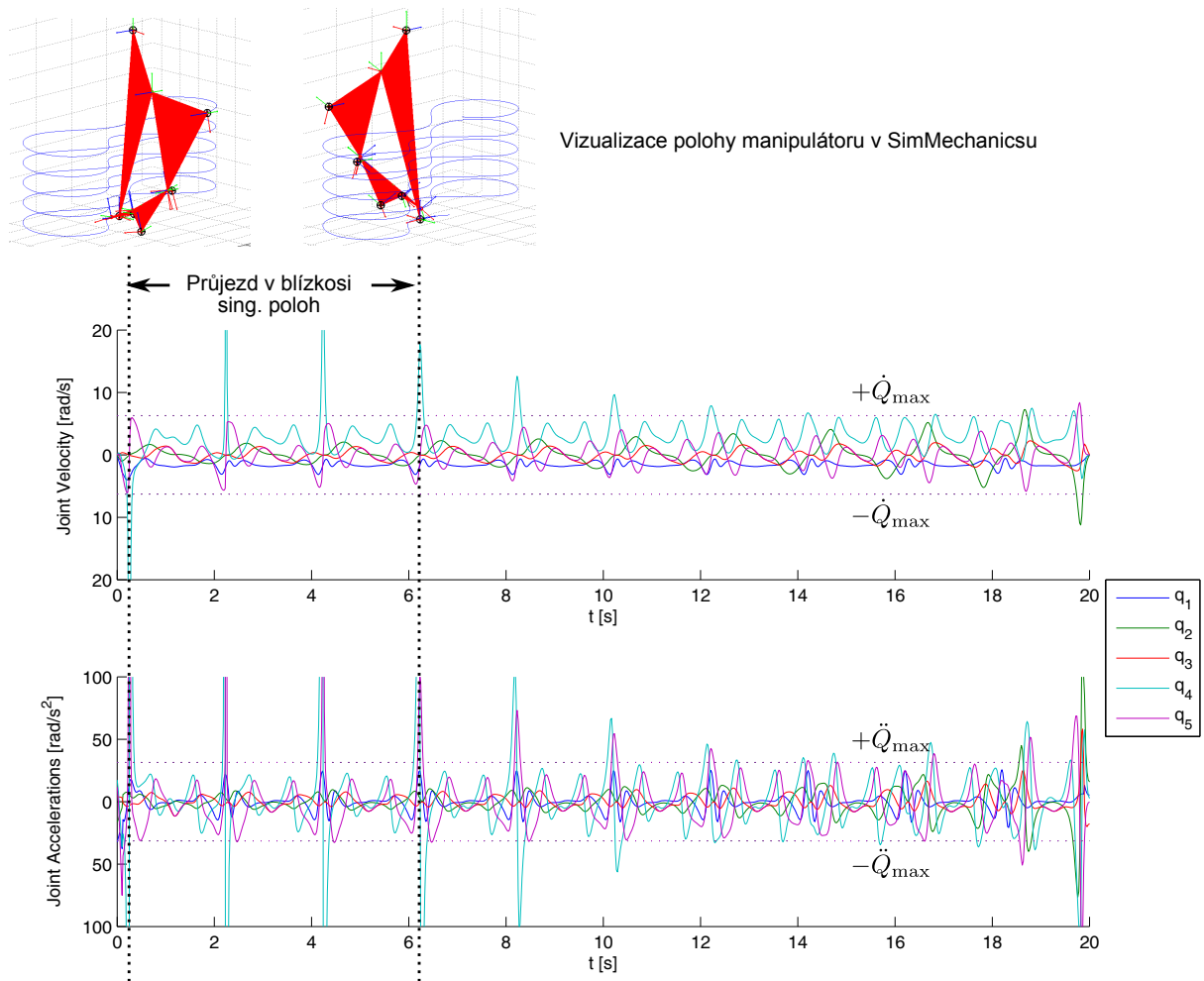
$$N_{\text{rev}} = 5, \quad \mathbf{z}_{\text{range}} = [0, 0.4], \quad \alpha_{\text{slope}} = \frac{\pi}{8} \quad (\text{Parametrizace CAD koincidenčních bodů})$$

$$\ddot{u}_{\text{max}} = 0.5, \quad T_{\text{end}} = 20 \quad (\text{Profil parametru } u(t), \text{ viz Obrázek 5})$$



Obrázek 6: Plánovaný průběh zobecněných souřadnic manipulátoru (poloha a orientace koncového efektoru)

Prostřednictvím nelineární transformace mezi zobecněnými \mathbf{X} a kloubovými \mathbf{Q} souřadnicemi manipulátoru (viz inverzní kinematická úloha manipulátoru [4]) lze vypočítat odpovídající rychlosti a zrychlení aktuátorů manipulátoru, viz Obrázek 7. Z průběhů lze snadno pozorovat, že pro plánovanou trajektorii v prostoru zobecněných souřadnic se manipulátor dostává do blízkosti singulární polohy, která vedena na velké navýšení kloubových rychlostí/zrychlení. Takový pohyb nelze aktuátory manipulátoru realizovat a časový průběh parametru $u(t)$ tak musí být korigován - obvykle pak dle požadavků na maximální dovolenou rychlost \dot{Q}_{max} a zrychlení \ddot{Q}_{max} aktuátorů.



Obrázek 7: Plánovaný průběh kloubových souřadnic manipulátoru (rychlosti/zrychlení aktuátorů)

Ze známých vztahů pro závislosti mezi polohou/rychlostí/zrychlením kloubových a zobecněných souřadnic manipulátoru (a jejich odpovídající inverze)

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{Q}), \quad \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{Q}) \cdot \dot{\mathbf{Q}}, \quad \ddot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{Q}) \cdot \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{J}(\mathbf{Q}) \cdot \ddot{\mathbf{Q}} \quad (10)$$

kde $\mathbf{J}(\mathbf{Q})$ je jakobián příslušného zobrazení,

a s uvažováním použité parametrizace (7, 9) trajektorie parametrem $u(t)$

$$\mathbf{X}(u) = [X(u) \ Y(u) \ Z(u) \ n_x(u) \ n_y(u) \ n_z(u)]^T \quad (11)$$

lze odvodit následující závislosti mezi rychlostí/zrychlením kloubových souřadnic a parametru $u(t)$:

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{G}(u) \cdot \dot{u} \quad (12)$$

$$\ddot{\mathbf{Q}} = \mathbf{G}(u) \cdot \ddot{u} + \mathbf{K}(u) \cdot (\dot{u})^2 \quad (13)$$

kde

$$\mathbf{G}(u) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{Q}) \cdot \frac{\partial \mathbf{X}(u)}{\partial u} \quad (14)$$

$$\mathbf{K}(u) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{Q}) \cdot \left(\frac{\partial^2 \mathbf{X}(u)}{\partial u^2} - \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{Q})}{\partial \mathbf{Q}} \otimes \left(\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{Q}) \cdot \frac{\partial \mathbf{X}(u)}{\partial u} \right) \cdot \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{Q}) \cdot \frac{\partial \mathbf{X}(u)}{\partial u} \right)$$

kde $\mathbf{X}(u)$ a parciální derivace $\frac{\partial \mathbf{X}(u)}{\partial u}$, $\frac{\partial^2 \mathbf{X}(u)}{\partial u^2}$ jsou známy z aproximace trajektorie B-splinem, viz [2], a následného výpočtu orientace, \otimes je tensorový součin.

Ze vztahů (12, 13) lze určit omezující křivku rychlosti a zrychlení parametru $u(t)$ jako¹:

- Omezení rychlosti \dot{u} plynoucí z omezení maximální rychlosti aktuátorů plynoucí z (12):

$$-\dot{Q}_{\max} \leq \dot{Q}[i] \leq +\dot{Q}_{\max} \quad \Rightarrow \quad 0 \leq \dot{u} \leq \dot{u}_{\max}^{vel}(u) \quad (15)$$

- Omezení rychlosti \dot{u} plynoucí z omezení maximálního zrychlení aktuátorů plynoucí z (12) za předpokladu $\ddot{u} = 0$ (pohyb s konstantní rychlostí parametru $u(t)$, tzn. konstantní rychlost parametru $u(t)$ může generovat zrychlení aktuátorů nad maximální povolený rozsah):

$$-\ddot{Q}_{\max} \leq \ddot{Q}[i] \leq +\ddot{Q}_{\max} \quad \Rightarrow \quad \text{pro: } \ddot{u} = 0 \quad \Rightarrow \quad 0 \leq \dot{u} \leq \dot{u}_{\max}^{accel}(u) \quad (16)$$

Poznamenejme, že obě předchozí omezení $\dot{u}_{\max}^{vel}(u)$, $\dot{u}_{\max}^{accel}(u)$ rychlosti parametru \dot{u} závisí pouze na aktuální poloze u (tedy konkrétní poloze \mathbf{X} podél uvažované trajektorie koncového efektoru robotu).

- Omezení zrychlení \ddot{u} plynoucí z omezení maximálního zrychlení aktuátorů plynoucí z (12) za předpokladu $\ddot{u} \neq 0$ (pohyb se zrychlením parametru u):

$$-\ddot{Q}_{\max} \leq \ddot{Q}[i] \leq +\ddot{Q}_{\max} \quad \Rightarrow \quad \text{pro: } \ddot{u} \neq 0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{u}_{\min}^{accel}(u, \dot{u}) \leq \ddot{u} \leq \ddot{u}_{\max}^{accel}(u, \dot{u}) \quad (17)$$

Poznamenejme, že horní a spodní mez maximálního omezení zrychlení \ddot{u} je závislá na aktuální poloze u i rychlosti \dot{u} .

Omezení na průběh rychlosti \dot{u} a zrychlení \ddot{u} v závislosti na u je znázorněna na Obrázku 8.

3 Generování časové závislosti $u(t)$ s ohledem na omezení pohybu aktuátorů (korekce feedrate)

Z výše uvedené analýzy vyplývá, že v případě nutnosti zahrnutí omezení na maximální rychlosti a zrychlení aktuátorů při pohybu po naplánované trajektorii $\mathbf{X}(u(t))$ koncového efektoru manipulátoru je nutné zohlednit tato omezení při generování parametru posunu $u(t)$ v čase. Obrázek 9 znázorňuje dvě možné realizace rychlosti \dot{u} splňující omezení (15, 16). Poznamenejme, že tyto realizace jsou generovány s omezením maximálního zrychlení \ddot{u} - algoritmus byl převzat z práce [1].

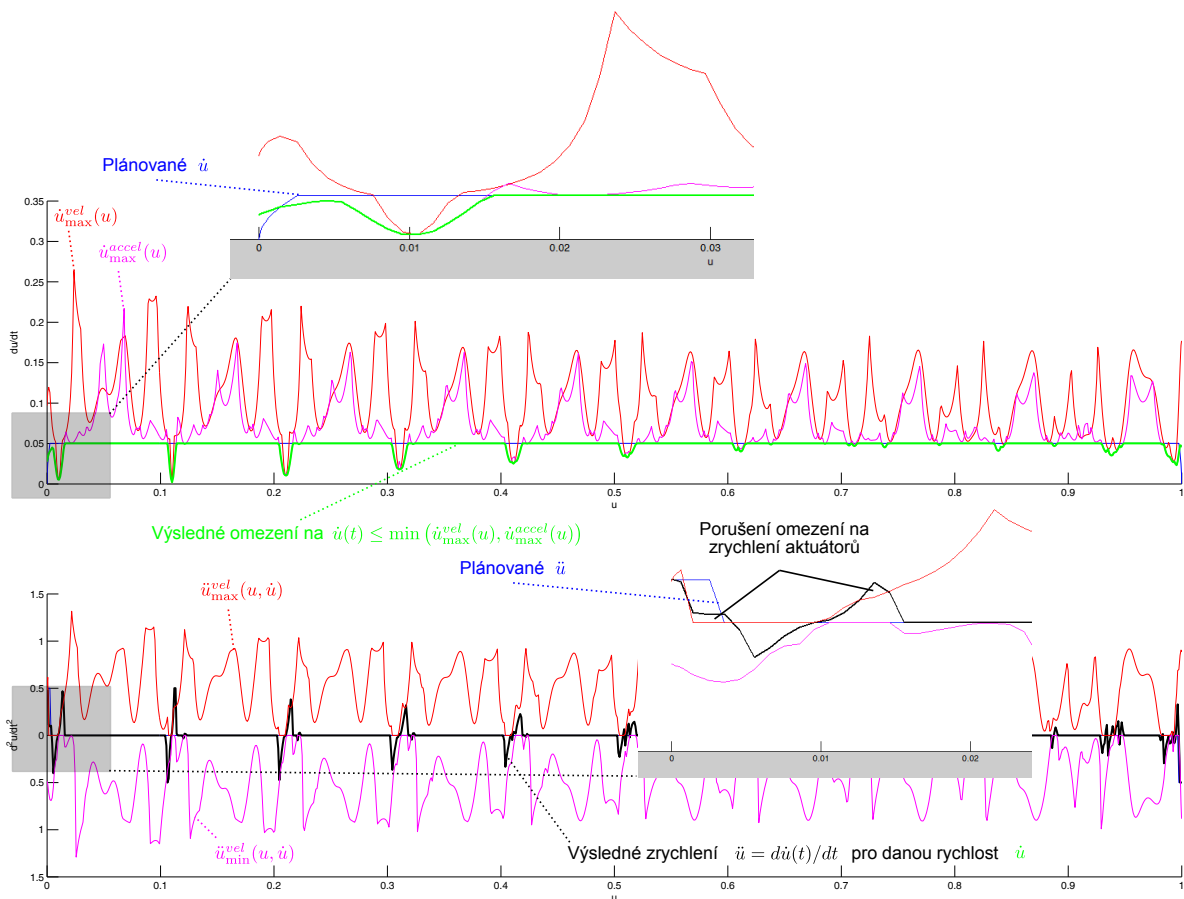
Bohužel, viz (17), díky závislosti omezení $\ddot{u}_{\min}^{accel}(u, \dot{u})$, $\ddot{u}_{\max}^{accel}(u, \dot{u})$ na konkrétní realizaci rychlosti \dot{u} , je již velmi obtížné zajistit podmínku $\ddot{u}_{\min}^{accel}(u, \dot{u}) \leq \ddot{u} \leq \ddot{u}_{\max}^{accel}(u, \dot{u})$, neboť zároveň platí $\ddot{u}(t) = \frac{d\dot{u}(t)}{dt}$. Některé pokročilé algoritmy lze nalézt v [1].

Jelikož pro $\ddot{u} \rightarrow 0$ nutně platí (16), lze konstatovat, že snižováním zrychlení \ddot{u} (ekvivalentně vyhlazováním průběhu \dot{u}) se blížíme dodržení omezení na maximální zrychlení aktuátorů. Tedy lze předpokládat, že „rozumným“ tvarováním průběhu

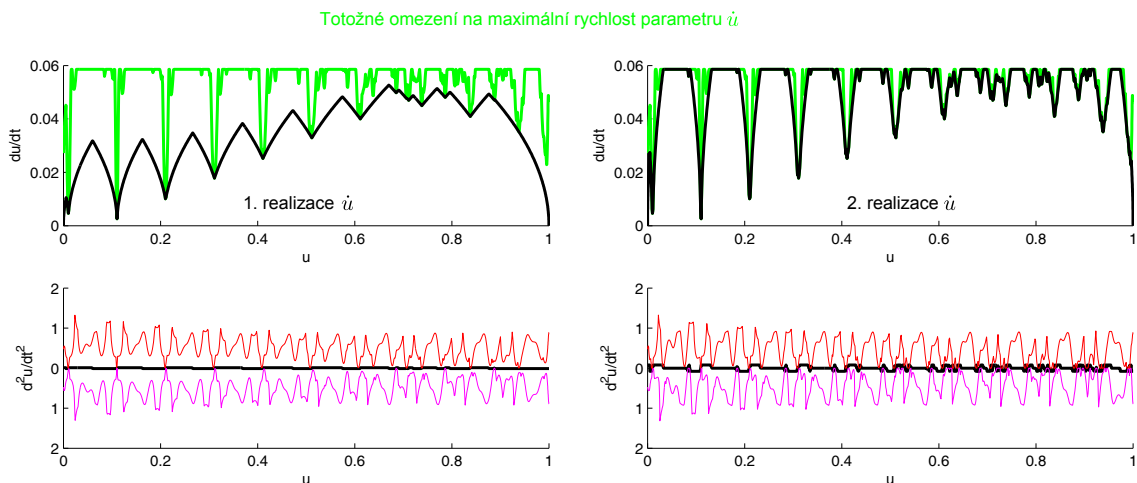
$$\dot{u}(t) \leq \min \left(\dot{u}_{\max}^{vel}(u), \dot{u}_{\max}^{accel}(u) \right) \quad (18)$$

lze manuálně kontrolovat míru překročení omezení na zrychlení aktuátorů (bude předmětem dalšího výzkumu jako alternativa k metodám v [1]).

¹Označení $\mathbf{X}[i]$ odpovídá i -té složce vektoru \mathbf{X} .



Obrázek 8: Omezení průběhu rychlosti a zrychlení parametru $u(t)$ dle známých omezení na max. rychlosti a zrychlení aktuátorů. Poznamenejme, že plánovaný průběh (modře) odpovídá průběhu polohy a rychlosti $u(t)$ definovanému (v závislosti na čase) v Obrázku 5.



Obrázek 9: Dvě možné realizace průběhu \dot{u} splňující omezení na maximální rychlosti aktuátorů (však nikoliv nutně omezení na zrychlení aktuátorů).

4 Simulační výsledky

Cílem dynamické analýzy uvažovaného robotu „Vodník“ bylo analyzovat momentové namáhání aktuátorů pro konkrétní tvar trajektorie pohybu manipulátoru za předpokladu různých časů

cyklů (čas potřebný k projetí celé trajektorie).

Vstupní parametry analýzy

- Kinematické a dynamické parametry uvažovaného manipulátoru \Rightarrow virtuální simulační model, viz Kapitola 1, založený na skutečné technologické realizaci manipulátoru.

Kinematické parametry (délky ramen manipulátoru):

$$\boldsymbol{\xi} = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6]^T = [0.55 \ 0.232 \ 0.389 \ 0 \ 0.283 \ 0.1]^T [m] \quad (19)$$

Dynamické parametry, viz Příloha A.1.

- Tvar trajektorie pohybu koncového efektoru s parametry, viz Obrázek 4 (vyplývající z nutnosti ofuku reálných technologických komponent):

$$N_{\text{rev}} = 5, \ z_{\text{range}} = [0, 0.4], \ \alpha_{\text{slope}} = \frac{\pi}{8} \quad (20)$$

- Profil parametru $u(t)$ daný požadovaným časem cyklu T_{end} a omezením na zrychlení parametru \ddot{u}_{max} , viz Obrázek 5 - tedy plánovaný průběh parametrizace trajektorie pohybu $\mathbf{X}(u)$, $u(t) \in \langle u(0) = 0, u(T_{\text{end}}) = 1 \rangle$:

$$T_{\text{end}} = [10, 12, 14, \dots, 62] [s], \quad \ddot{u}_{\text{max}} = 0.5 [1/s^2] \quad (21)$$

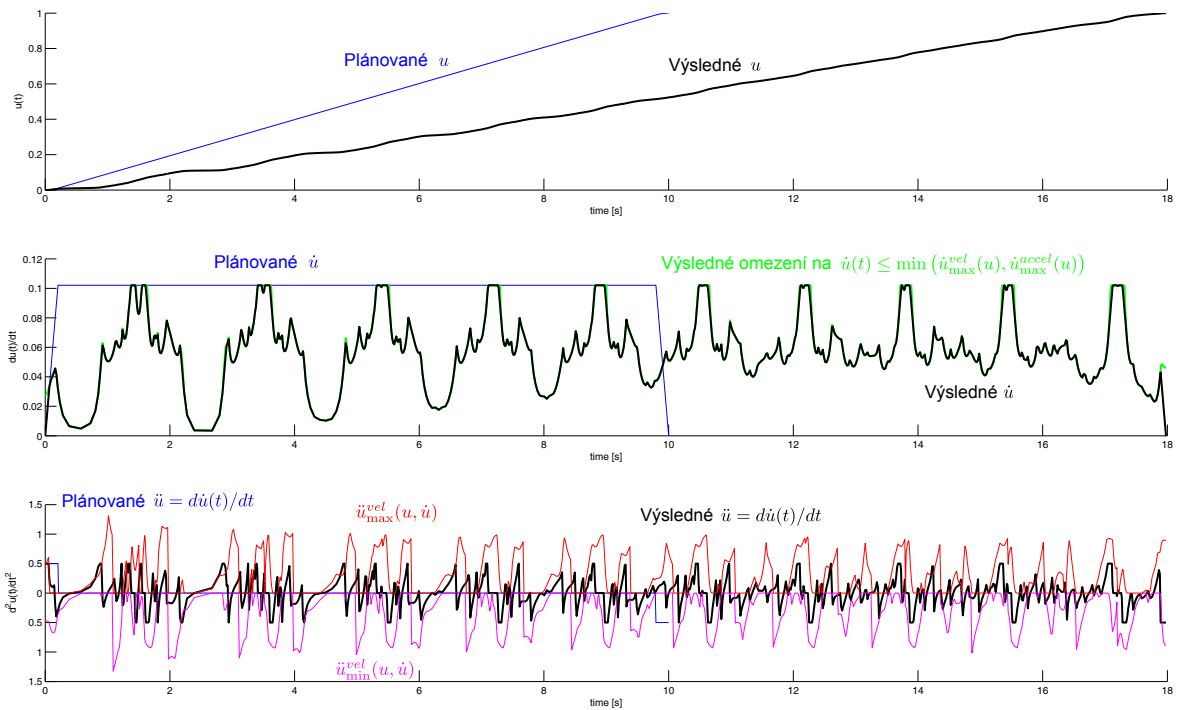
- Omezení na maximální rychlosti (a zrychlení aktuátorů za podmínky $\ddot{u} = 0$), viz Kapitola 3.

$$\dot{Q}_{\text{max}} = 2\pi [rad/s], \quad \ddot{Q}_{\text{max}} = 10\pi [rad/s^2] \quad (22)$$

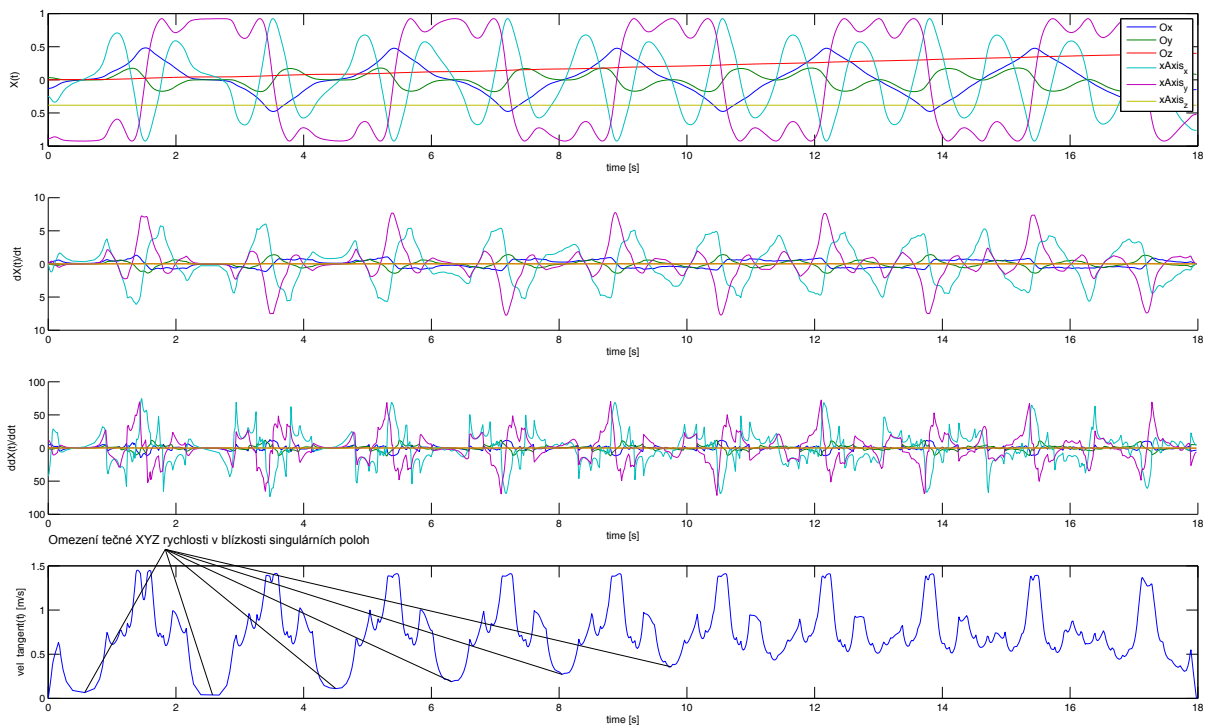
- Průběh rychlosti $\dot{u}(t)$ splňující podmínku omezení rychlosti (18) je generován algoritmem zajišťujícím maximální zrychlení $\ddot{u} \leq \ddot{u}_{\text{max}}$, viz algoritmus v [1].

Ukázky průběhů pro jeden konkrétní požadovaný čas cyklu $T_{\text{end}} = 10$ s

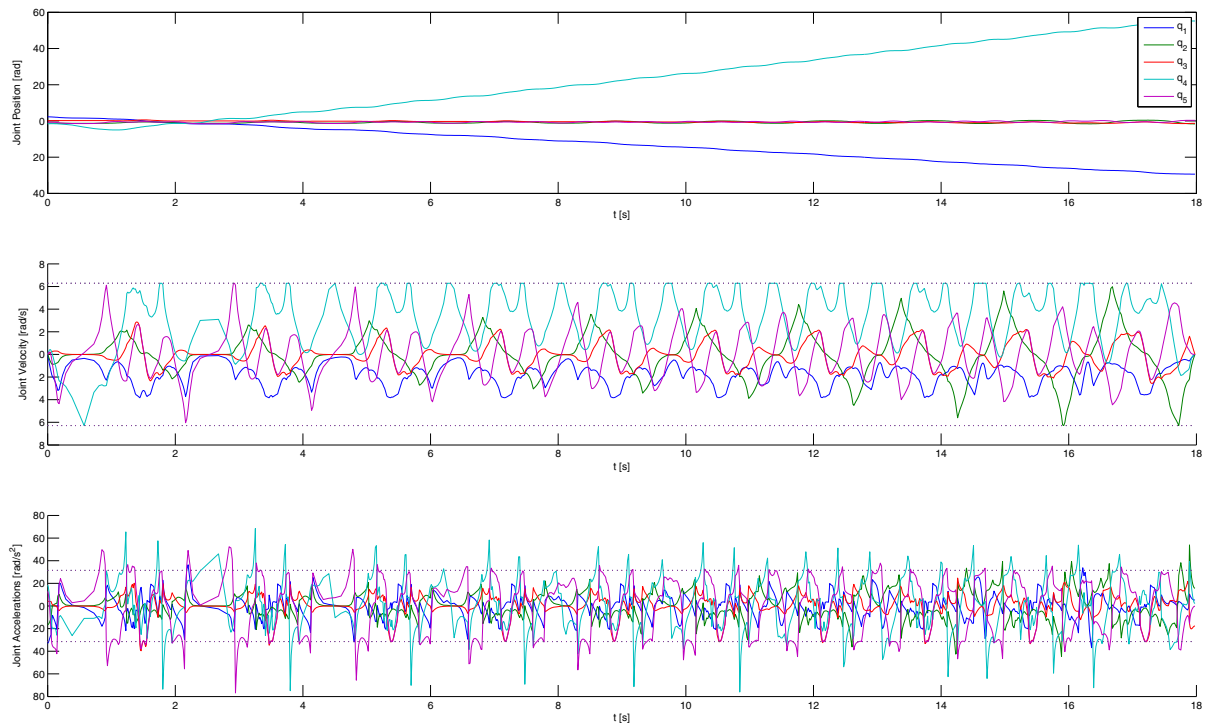
Z průběhů je patrné, že skutečná doba cyklu je díky nutnosti dodržení omezení na rychlosti aktuátorů $T_{\text{end}} = 17.98$ s.



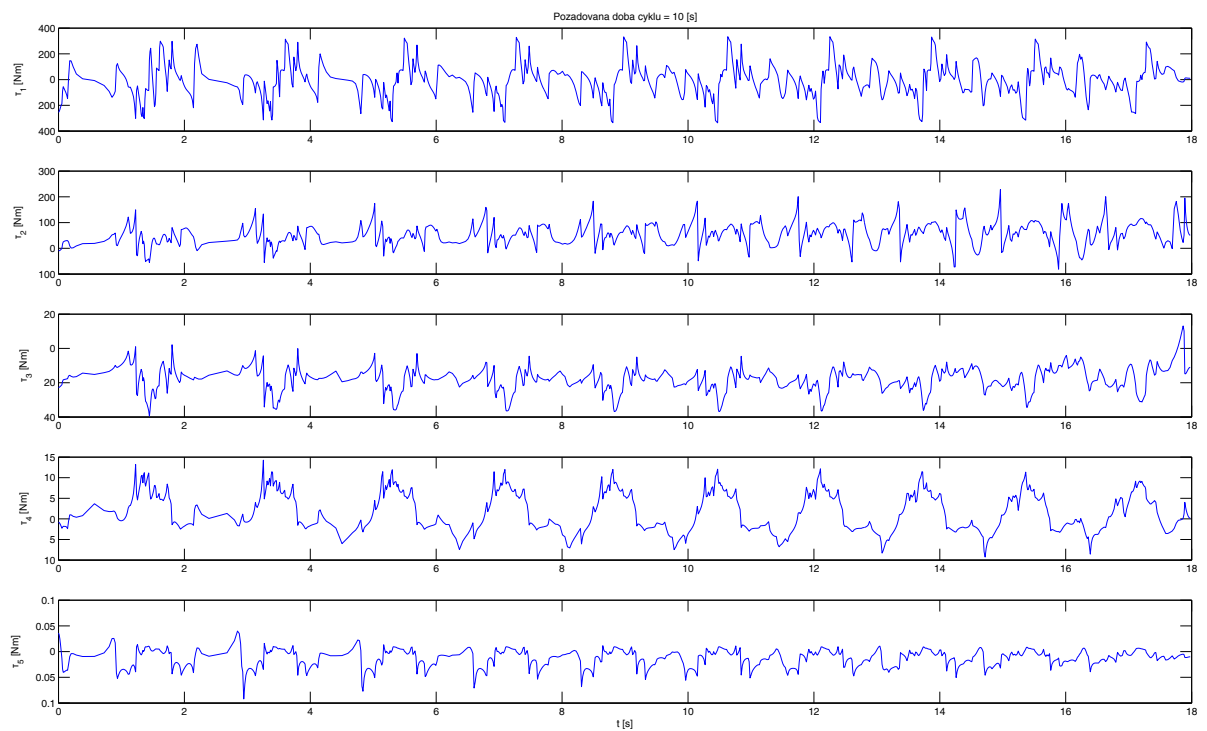
Obrázek 10: Plánované a výsledné průběhy parametru $u(t)$ v závislosti na čase



Obrázek 11: Výsledné průběhy zobecněných souřadnic (poloha a orientace konc. efektoru manipulátoru) s vyznačenými místy limitace rychlosti (zrychlení) z důvodu přiblížení se k singulárním polohám



Obrázek 12: Výsledné průběhy kloubových souřadnic (patrné je striktní dodržení omezení pouze na rychlosti aktuátorů)



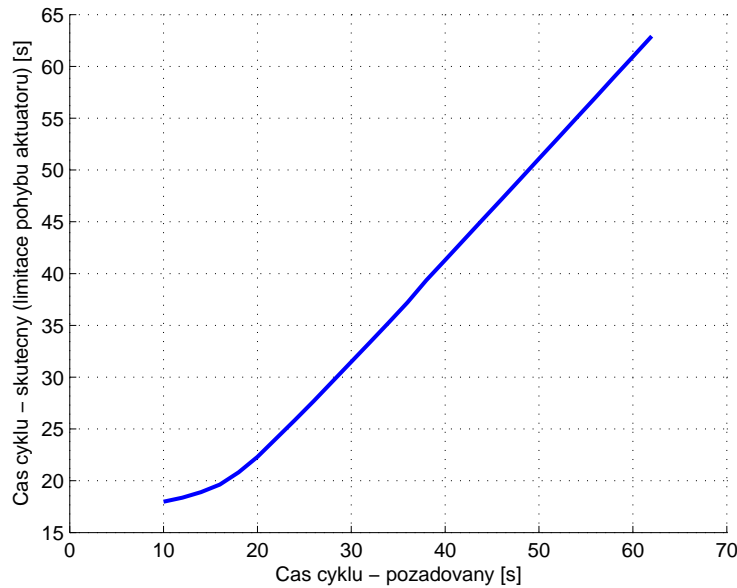
Obrázek 13: Výsledné průběhy silových momentů působících na aktuátory robotu

Výsledky dynamické analýzy - v závislosti na délce cyklu

Zde jsou postupně uvedeny výsledky dynamické analýzy pro různé požadované časy cyklu v rozsahu:

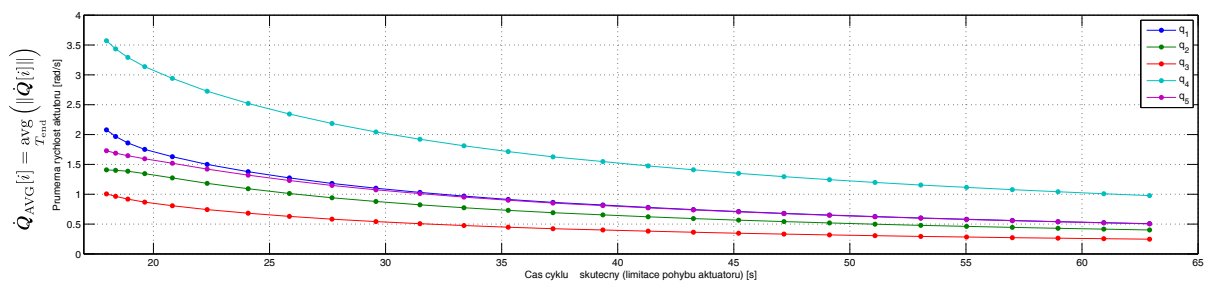
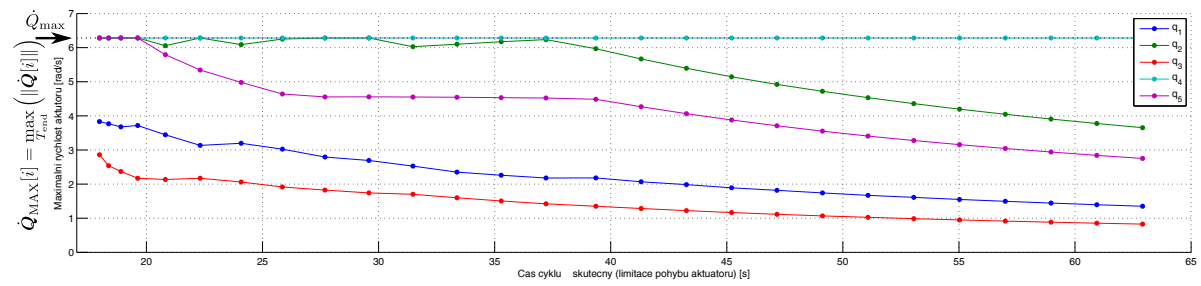
$$T_{\text{end}} = [10, 12, 14, \dots, 62] \text{ [s]}, \quad \ddot{u}_{\text{max}} = 0.5 \text{ [1/s}^2\text{]} \quad (23)$$

Požadovaný T_{end} a skutečný čas cyklu, viz Obrázek 14, se v důsledku uvažovaných omezení na rychlost a zrychlení aktuátorů odlišují (zejména pro krátké požadované časy). V dalších průbězích budeme již uvažovat skutečný čas cyklu (nikoliv požadovaný).

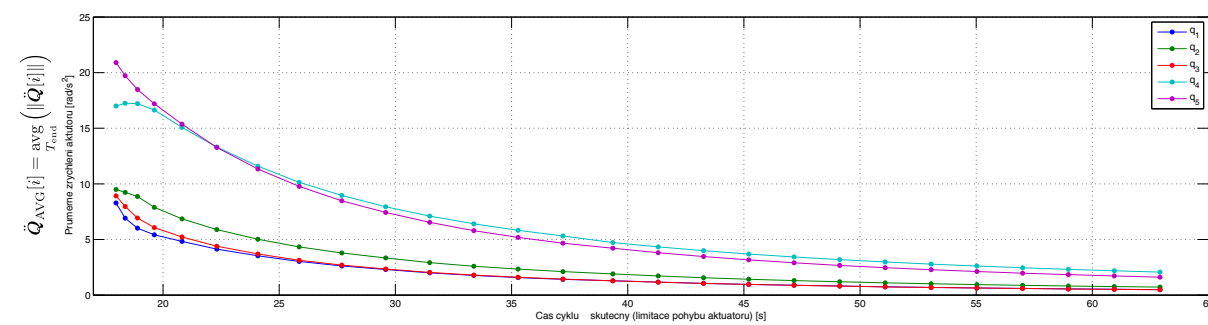
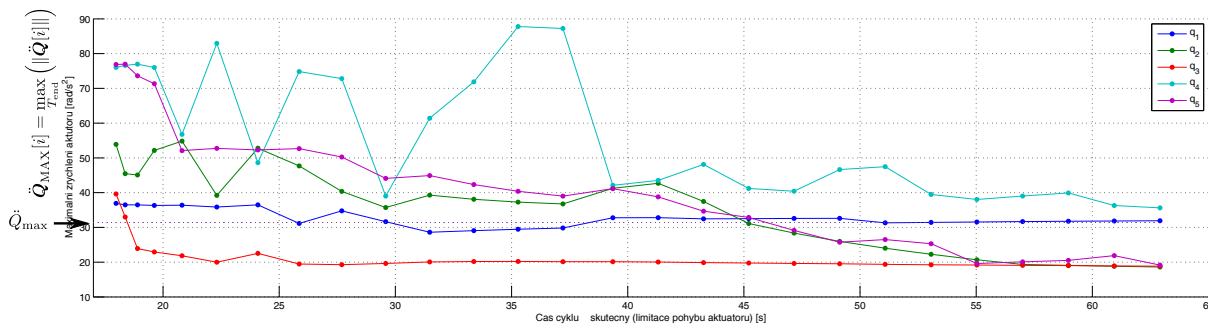


Obrázek 14: Požadovaný a skutečný čas cyklu

Průběhy na Obrázcích 15,16 zahrnují maximální a průměrné hodnoty rychlostí a zrychlení aktuátorů manipulátoru v závislosti na skutečné době cyklu. Z průběhu rychlostí je patrné, že k limitaci dochází v kloubové souřadnici q_4 pro všechny časy cyklu a v souřadnicích q_2, q_5 pro krátké požadované časy cyklu. V průbězích zrychlení je zřejmé, že nedochází k striktnímu omezení (není algoritmicky ošetřováno při generování feedrate, viz Kapitola 3). Požadované zrychlení aktuátorů však často není v technické praxi u skutečných pohonů často limitující.

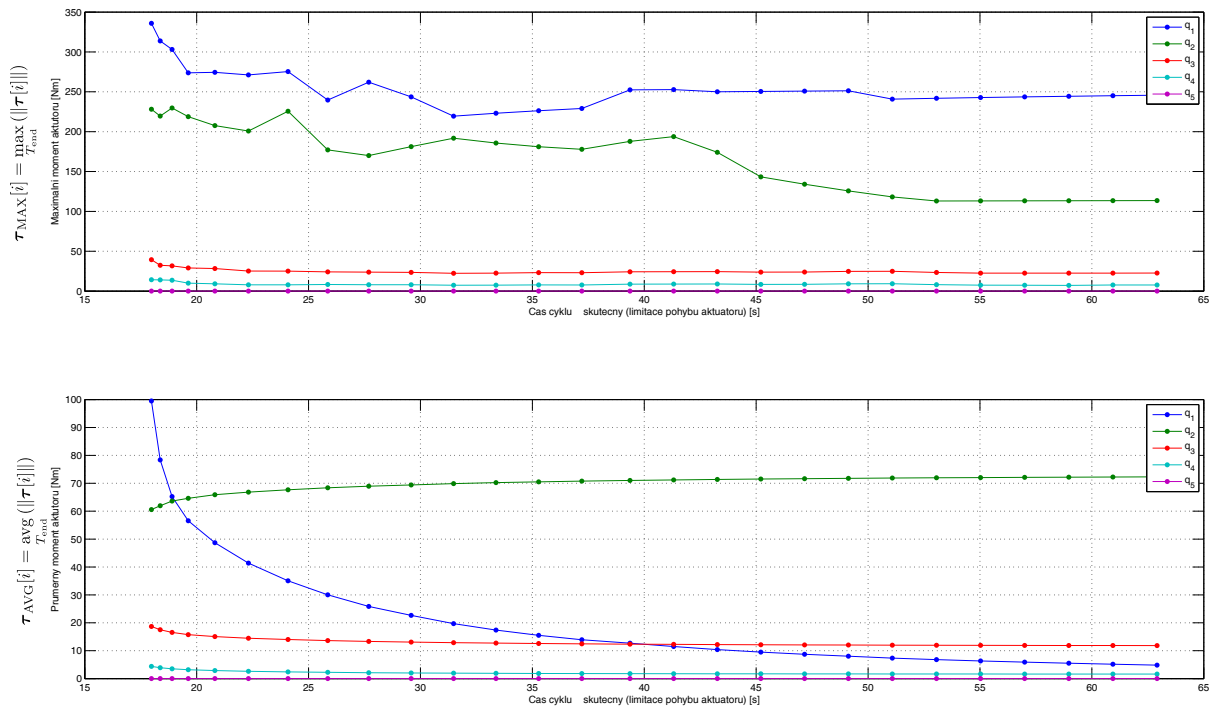


Obrázek 15: Maximální a průměrná rychlost dílčích aktuátorů manipulátoru v závislosti na skutečné době cyklu



Obrázek 16: Maximální a průměrné zrychlení dílčích aktuátorů manipulátoru v závislosti na skutečné době cyklu

Obrázek 17 zahrnuje maximální a průměrné hodnoty silových momentů aktuátorů (získaných z virtuálního simulačního modelu prostřednictvím inverzní dynamické úlohy) v závislosti na skutečné době cyklu, které jsou potřebné k realizaci požadovaného pohybu koncového efektoru manipulátoru.



Obrázek 17: Maximální a průměrné silové momenty na aktuátorech manipulátoru v závislosti na skutečné době cyklu

5 Závěr

Hlavní simulační výsledky dynamické analýzy jsou shrnuty v Kapitole 4. Na základě dostupných dat o maximálních a průměrných rychlostech, zrychlení a silových momentů v závislosti na skutečné délce cyklu (tedy času potřebnému k objetí celé požadované spirálovité trajektorie manipulátorem)² lze usuzovat na dimenzování pohonů manipulátoru ve smyslu minimální délky cyklu, která lze ještě s osazenými pohony dosáhnout. Poznamenejme, že dynamická analýza vychází z aktuální podoby manipulátoru „Vodník“ tak, jak byl manipulátor navržen v Inventoru konstruktéry z firmy Eurotec JKR (verze výkresu z 27. 10. 2017).

Poděkování

Tento výzkum byl podpořen Technologickou agenturou České republiky z prostředků projektu Centra Kompetence CIDAM TE02000103.

²Poznamenejme, že trajektorie byla za účelem simulací realizována ze spodní úvratě do horní, přesto, že v reálném procesu tomu bude opačně, nemá tato změna vliv na dynamickou analýzu.

Reference

- [1] Bláha, L.: *Plánování pohybu podél specifikované cesty s uvažováním všech pohybových omezení*. Dizertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Katedra kybernetiky, 2014.
- [2] Gouběj, M.; Švejda, M.; Schlegel, M.: *Úvod do mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu (skripta)*. Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
URL <http://home.zcu.cz/~msvejda/URM/materialy/Uvod%20do%20mechatroniky.pdf>
- [3] Švejda, M.: *Optimalizace robotických architektur*. Dizertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
URL http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2016/4_SvejdaMartin_thesis_2016_06_14.pdf
- [4] Švejda, M.: *Návrh, řízení a optimalizace manipulátoru do průmyslových myček („vodník“)*. Technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
URL http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2017/1_vodnik_optimalizace_rizeni.pdf

A Přílohy

A.1 Exporty z prostředí SolidWorks

Link 1

Fyzikální vlastnosti Link_1

Konfigurace: Default

Souřadný systém: SS1

Hmotnost = 24.25936 kilogramů

Objem = 0.00305 metry krychlové

Plošný obsah = 0.40768 metry čtvereční

Těžiště: (metry)

X = -0.18538

Y = 0.20687

Z = -0.03246

Hlavní osy setrvačnosti a hlavní momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Vybrané z těžiště.

$I_x = (-0.26385, 0.95246, 0.15232)$ $P_x = 0.14032$

$I_y = (-0.92562, -0.29444, 0.23775)$ $P_y = 0.95651$

$I_z = (0.27130, -0.07826, 0.95931)$ $P_z = 1.06507$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Pochází z těžiště a je zarovnaný s výstupním souřadným systémem.

$L_{xx} = 0.90768$ $L_{xy} = -0.20281$ $L_{xz} = -0.06106$

$L_{yx} = -0.20281$ $L_{yy} = 0.21674$ $L_{yz} = 0.12656$

$L_{zx} = -0.06106$ $L_{zy} = 0.12656$ $L_{zz} = 1.03748$

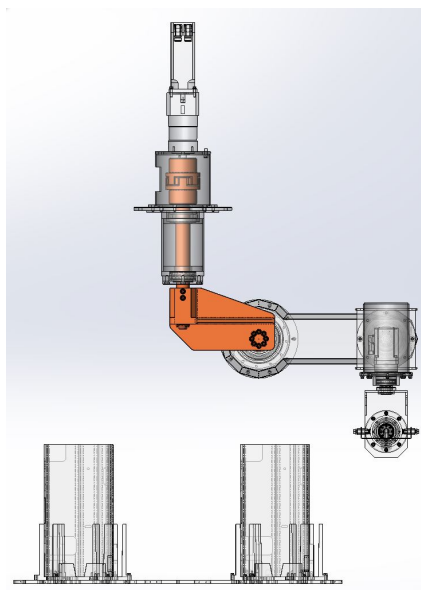
Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Získány z výstupního souřadného systému.

$I_{xx} = 1.97139$ $I_{xy} = -1.13311$ $I_{xz} = 0.08493$

$I_{yx} = -1.13311$ $I_{yy} = 1.07596$ $I_{yz} = -0.03635$

$I_{zx} = 0.08493$ $I_{zy} = -0.03635$ $I_{zz} = 2.90928$



Link 2

Fyzikální vlastnosti Link_2

Konfigurace: Default

Souřadný systém: SS2

Hmotnost = 39.46737 kilogramů

Objem = 0.00897 metry krychlové

Plošný obsah = 2.11787 metry čtvereční

Těžiště: (metry)

X = -0.27394

Y = 0.00001

Z = -0.23888

Hlavní osy setrvačnosti a hlavní momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Vybrané z těžiště.

$I_x = (-0.99686, 0.00006, -0.07913)$ $P_x = 0.42478$

$I_y = (-0.07913, -0.00014, 0.99686)$ $P_y = 1.28714$

$I_z = (0.00005, 1.00000, 0.00014)$ $P_z = 1.56555$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Pochází z těžiště a je zarovnaný s výstupním souřadným systémem.

$L_{xx} = 0.43018$ $L_{xy} = -0.00006$ $L_{xz} = 0.06803$

$L_{yx} = -0.00006$ $L_{yy} = 1.56555$ $L_{yz} = -0.00004$

$L_{zx} = 0.06803$ $L_{zy} = -0.00004$ $L_{zz} = 1.28174$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Získány z výstupního souřadného systému.

$I_{xx} = 2.68234$ $I_{xy} = -0.00016$ $I_{xz} = 2.65072$

$I_{yx} = -0.00016$ $I_{yy} = 6.77943$ $I_{yz} = -0.00013$

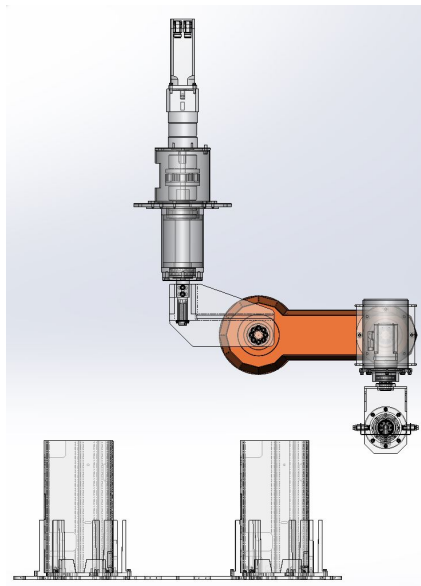
$I_{zx} = 2.65072$ $I_{zy} = -0.00013$ $I_{zz} = 4.24346$

U jedné nebo více součástí jsou přepsány fyzikální vlastnosti:

PHQ422EZ301U_1

PSBF622_R EPH04_14_11@PSBF622EPH04+TGN4-0510-KE1

TGN4-0510-30-560@PSBF622EPH04+TGN4-0510-KE1



Link 3

Fyzikální vlastnosti Link_3

Konfigurace: Default

Souřadný systém: SS3

Hmotnost = 13.25030 kilogramů

Objem = 0.00187 metry krychlové

Plošný obsah = 0.57480 metry čtvereční

Těžiště: (metry)

X = -0.00053

Y = -0.03639

Z = 0.02464

Hlavní osy setrvačnosti a hlavní momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Vybrané z těžiště.

$I_x = (0.00210, -0.52277, -0.85247)$ $P_x = 0.05115$

$I_y = (-0.02128, 0.85225, -0.52270)$ $P_y = 0.07780$

$I_z = (0.99977, 0.01924, -0.00933)$ $P_z = 0.08956$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Pochází z těžiště a je zarovnaný s výstupním souřadným systémem.

$L_{xx} = 0.08956$ $L_{xy} = -0.00026$ $L_{xz} = 0.00006$

$L_{yx} = -0.00026$ $L_{yy} = 0.07052$ $L_{yz} = 0.01188$

$L_{zx} = 0.00006$ $L_{zy} = 0.01188$ $L_{zz} = 0.05844$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Získány z výstupního souřadného systému.

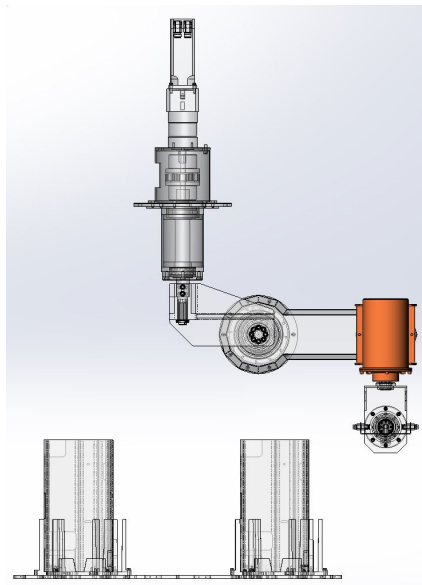
$I_{xx} = 0.11514$ $I_{xy} = 0.00000$ $I_{xz} = -0.00011$

$I_{yx} = 0.00000$ $I_{yy} = 0.07857$ $I_{yz} = 0.00000$

$I_{zx} = -0.00011$ $I_{zy} = 0.00000$ $I_{zz} = 0.07598$

U jedné nebo více součástí jsou přepsány fyzikální vlastnosti:

PH321EZ301U_1



Link 4

Fyzikální vlastnosti Link_4

Konfigurace: Default

Souřadný systém: SS4

Hmotnost = 5.50054 kilogramů

Objem = 0.00080 metry krychlové

Plošný obsah = 0.40492 metry čtvereční

Těžiště: (metry)

X = 0.00000

Y = 0.03403

Z = -0.09733

Hlavní osy setrvačnosti a hlavní momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Vybrané z těžiště.

$I_x = (-0.00002, 0.65023, 0.75973)$ $P_x = 0.01623$

$I_y = (0.00017, -0.75973, 0.65023)$ $P_y = 0.04422$

$I_z = (1.00000, 0.00014, -0.00010)$ $P_z = 0.04778$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Pochází z těžiště a je zarovnaný s výstupním souřadným systémem.

$L_{xx} = 0.04778$ $L_{xy} = 0.00000$ $L_{xz} = 0.00000$

$L_{yx} = 0.00000$ $L_{yy} = 0.03239$ $L_{yz} = 0.01383$

$L_{zx} = 0.00000$ $L_{zy} = 0.01383$ $L_{zz} = 0.02807$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Získány z výstupního souřadného systému.

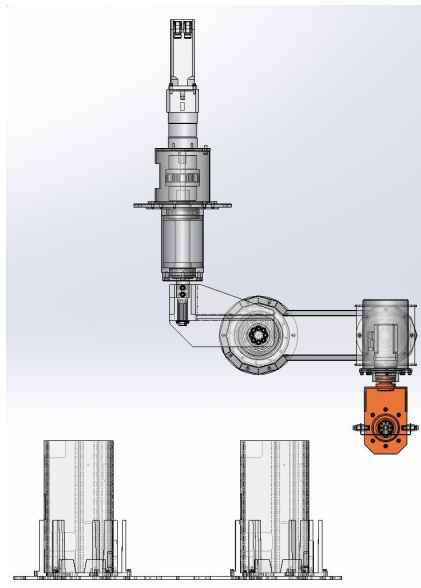
$I_{xx} = 0.10626$ $I_{xy} = 0.00000$ $I_{xz} = 0.00000$

$I_{yx} = 0.00000$ $I_{yy} = 0.08450$ $I_{yz} = -0.00439$

$I_{zx} = 0.00000$ $I_{zy} = -0.00439$ $I_{zz} = 0.03444$

U jedné nebo více součástí jsou přepsány fyzikální vlastnosti:

TGS1-0010-K1 (2)@Pohon tryska



Link 5

Fyzikální vlastnosti Link_5

Konfigurace: Default

Souřadný systém: SS5

Hmotnost = 0.47709 kilogramů

Objem = 0.00006 metry krychlové

Plošný obsah = 0.04020 metry čtvereční

Těžiště: (metry)

X = -0.10012

Y = -0.00523

Z = -0.01456

Hlavní osy setrvačnosti a hlavní momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Vybrané z těžiště.

$I_x = (-0.99999, 0.00042, -0.00344)$ $P_x = 0.00032$

$I_y = (-0.00346, -0.15351, 0.98814)$ $P_y = 0.00108$

$I_z = (-0.00011, 0.98815, 0.15351)$ $P_z = 0.00132$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Pochází z těžiště a je zarovnaný s výstupním souřadným systémem.

$L_{xx} = 0.00032$ $L_{xy} = 0.00000$ $L_{xz} = 0.00000$

$L_{yx} = 0.00000$ $L_{yy} = 0.00132$ $L_{yz} = -0.00004$

$L_{zx} = 0.00000$ $L_{zy} = -0.00004$ $L_{zz} = 0.00109$

Momenty setrvačnosti: (kilogramů * metry čtvereční)

Získány z výstupního souřadného systému.

$I_{xx} = 0.00044$ $I_{xy} = 0.00025$ $I_{xz} = 0.00070$

$I_{yx} = 0.00025$ $I_{yy} = 0.00620$ $I_{yz} = 0.00000$

$I_{zx} = 0.00070$ $I_{zy} = 0.00000$ $I_{zz} = 0.00588$

