

Robotické architektury pro účely NDT svarových spojů komplexních potrubních systémů jaderných elektráren

Projekt TA ČR č. TA01020457:

Výzkum, vývoj a validace univerzální technologie pro potřeby
moderních ultrazvukových kontrol svarových spojů komplexních
potrubních systémů jaderných elektráren

M. Švejda

ZČU v Plzni, Katedra kybernetiky

23. 8. 2012

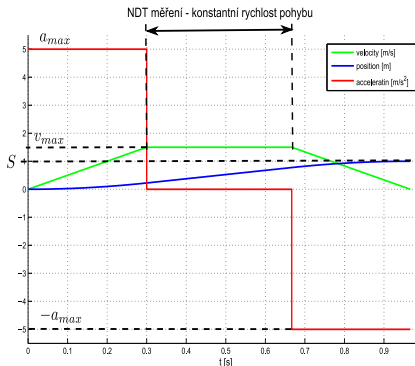


Účel projektu - potřeba nových technologií?

- Současně využití jednoduchých manipulátorů s omezenou možností pohybu
- Obtížná rekonfigurovatelnost zařízení pro komplexní svarové spoje
- Často nutno používat speciální jednoúčelové doplňky pro usazení manipulátorů na potrubí (vodící lišty, atd.)
- **Cíl projektu:**
 - Vyvinout univerzálnější zařízení použitelné na danou třídu testovaných svarů
 - Zařízení schopné požadovaných pohybů s ohledem na svou prostorovou náročnost (fyzický pracovní prostor)
- **Není cílem:** Vyvinout komplexní univerzální manipulátor pro všechno

1 Přehled uvažovaných testovaných svarů

- Parametrizace trajektorií svarů (*výstup*: vektor požadované polohy, rychlosti a zrychlení pozice a orientace koncového efektoru)
- Parametrizace pohybu s ohledem na omezení maximální rychlosti v_{max} a tečného zrychlení a_{max} , S ... celkově ujetá dráha po trajektorii
- Primárně uvažován požadavek na pohyb koncového efektoru po trajektorii s konstantní rychlostí (v případě využití sondy Phased Array bez rozmítání)

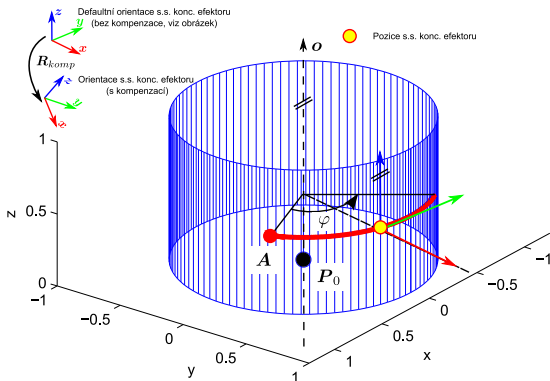


- 2 Virtuální simulační modely trojice předkládaných architektur manipulátorů
 - Všechny manipulátory prioritně navrženy s uvažováním obvodového pojezdu po potrubí (další možnosti neuvažované v přihlášce projektu: vedle potrubí stojící robot, multiredundantní robot, mobilní robot s podtlakovým, magnetickým či jiným přichycením,...)
 - **Simulační modely manipulátorů ve verzi 1 a 2** (4DoF konc. efektoru \Rightarrow omezená pohyblivost X jednodušší mechanická konstrukce)
 - **Simulační model manipulátoru ve verzi 3** (6 DoF koncového efektoru \Rightarrow univerzální pohyblivost X nutno využít 6 aktuátorů - složitější mechanická konstrukce)
 - Využití metodologie **Model Based Design**
 - Kompletní kinematický a dynamický model v prostředí *Simulink / SimMechanics*
 - Generátory trajektorií svarů
 - Analýza požadavků na pohony manipulátoru (*Inverse kinematic and dynamic mode*)

- 3 Diskuze k výběru robotických architektur
 - Další možnosti úpravy robotických architektur
 - Další požadavky na plánování trajektorií
 - Hardwarová realizace
 - Plán dalších činností

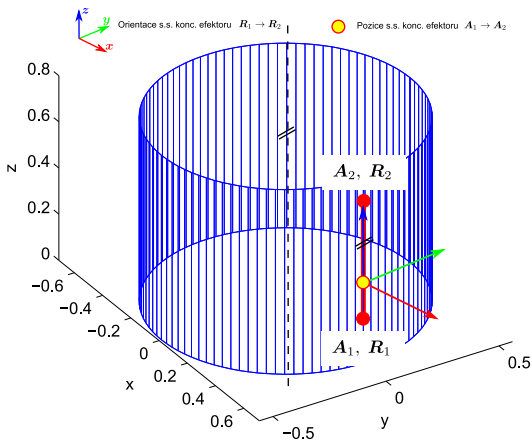
1. Obvodový svar

- Pohyb koncového efektoru po kružnici s osou určenou směrovým vektorem \mathbf{o} a bodem P_0
- Počátek pohybu dán bodem A a úhel posunu hodnotou φ
- Defaultní orientace koncového efektoru (bez kompenzace) dána dle obrázku, skutečná orientace pootočená konstantní maticí rotace R_{komp} (kompenzace orientace)
- Omezení na maximální rychlost v_{max} a tečné zrychlení a_{max} posunu po trajektorii (orientace je příslušně dopočítávána)



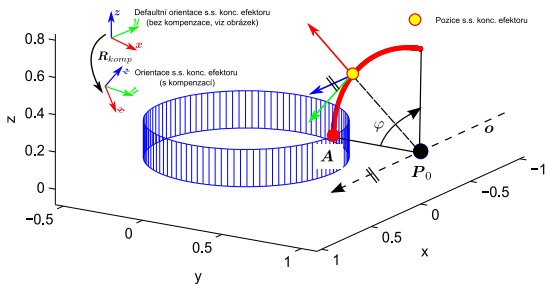
2. Podélný svar

- Obecně pohyb z bodu: pozice A_1 , orientace R_1 do bodu: pozice A_2 , orientace R_2 (po přímce $A_1 A_2$)
- Omezení na maximální rychlost v_{max} a tečné zrychlení a_{max} posunu po trajektorii (translace z bodu A_1 do bodu A_2)
- Orientace $R_1 \rightarrow R_2$ je příslušně dopočítávána (rotace osy z z orientace z_1 do z_2 po jednotkové kružnici, rotace kolem aktuální osy $z \Rightarrow$ zarovnání os xy), tzn. *přirozená změna orientace*
- v případě podélného svaru orientace konstantní $R_1 = R_2$



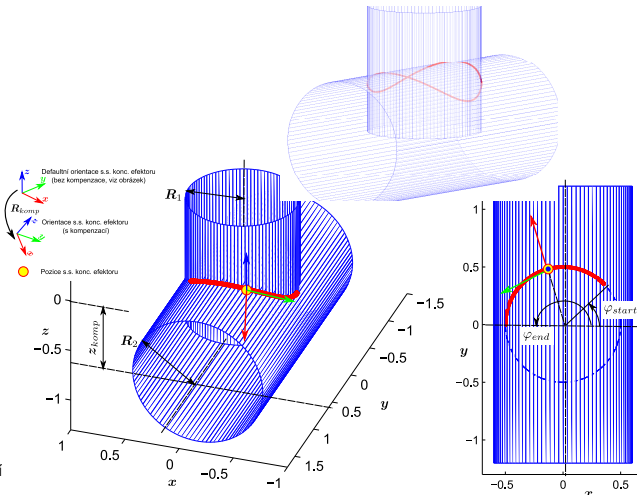
3. Podélný svar v kolenu (analogicky k obvodovému svaru)

- Pohyb koncového efektoru po kružnici s osou určenou směrovým vektorem \mathbf{o} a bodem P_0
- Počátek pohybu dán bodem A a úhel posunu hodnotou φ
- Defaultní orientace koncového efektoru (bez kompenzace) dána dle obrázku, skutečná orientace pootočená konstantní maticí rotace \mathbf{R}_{komp} (kompenzace orientace)
- Omezení na maximální rychlost v_{max} a tečné zrychlení a_{max} posunu po trajektorii (orientace je příslušně dopočítávána)



4. Svar nátrubku (průnik dvou kolmých válcových potrubí)

- Průnik dvou válcových potrubí s poloměrem $R_1 \leq R_2$
- Počátek a konec pohybu je dán úhly φ_{start} a φ_{end} (v průmětu do roviny xy)
- Posunutí trajektorie ve směru osy z je dáno parametrem z_{komp}
- Defaultní orientace koncového efektoru (bez kompenzace) dána dle obrázku, skutečná orientace pootočená konstantní maticí rotace R_{komp} (kompenzace orientace)
- Omezení na maximální rychlost v_{max} a tečné zrychlení a_{max} posunu po trajektorii (translace z bodu A_1 do bodu A_2)
- Na rozdíl od předchozích trajektorií výrazně složitější algoritmy parametrizace křivky pro zachování omezení na rychlost a tečné zrychlení



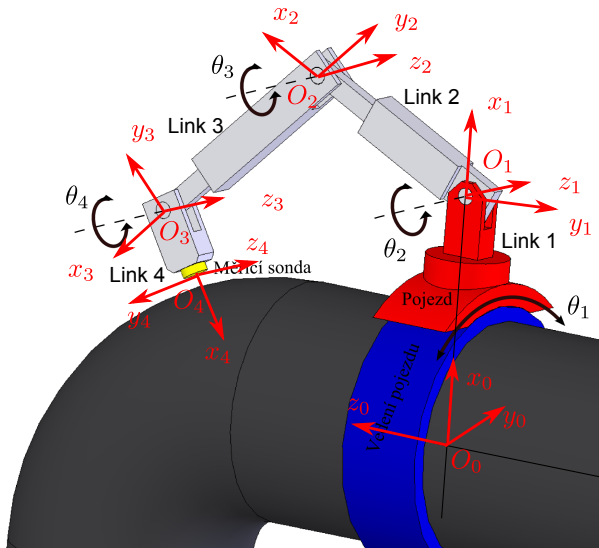
Manipulátor verze 1

- 4 DoF konc. efektoru (3 DoF translační, 1 DoF rotační)
- aktuátory:
 - virtuální kloub **R** - pojezd po potrubí
 - 3 identické **R** klouby
- Zobecněné souřadnice:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_4^0 & \phi \end{bmatrix}^T$$

$$\phi \dots \text{natočení s.s. } F_4 \text{ vzhledem k s.s. } F_1 \text{ okolo osy } z$$
- Kloubové souřadnice:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \end{bmatrix}^T$$

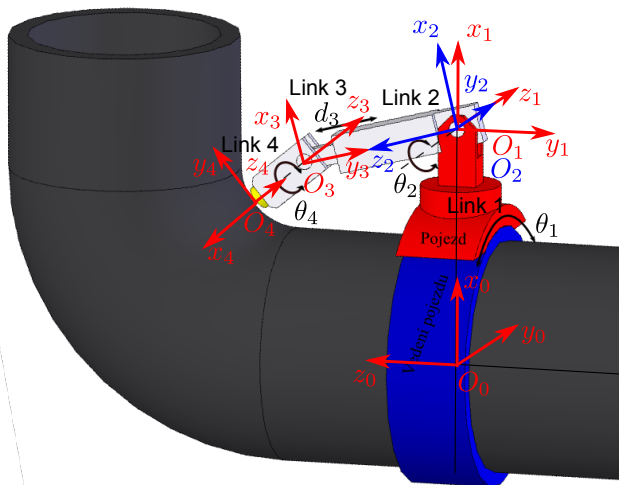


Manipulátor verze 2

- 4 DoF konc. efektoru (3 DoF translační, 1 DoF rotační)
- Aktuátory:
 - virtuální kloub **R** - pojezd po potrubí
 - 2 identické **R** klouby
 - 1 **P** kloub
- Zobecněné souřadnice:

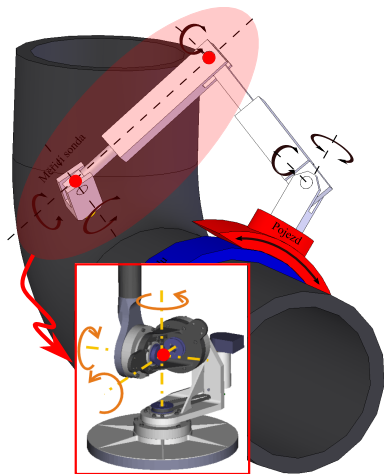
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_4^0 & \phi \end{bmatrix}^T$$
 ϕ ...natočení s.s. F_4 vzhledem k s.s. F_1 okolo osy z
- Kloubové souřadnice:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & d_3 & \theta_4 \end{bmatrix}^T$$



Manipulátor verze 3 (původní varianta)

- Univerzální manipulátor se všemi 6 DoF koncového efektoru (3 DoF translační, 3 DoF rotační)
- geometrické uspořádání posledních 3 R neplní funkci tzv. **sférického zápěstí** (osy kloubů se protínají ve společném bodě) \Rightarrow komplikace
- **Důsledky:** nelze provést standardní dekompozici na translační a rotační část manipulátoru \Rightarrow komplikované rovnice IKÚ \Rightarrow neexistuje analytické řešení, více možných řešení
- **Řešení se komplikuje:**
 - Využití Roth-Raghavanovy metody (převod na řešení polynomu 24.(16.) st.)
 - Numerické metody výpočtu (lokální)
- **Vhodná modifikace architektury manipulátoru**



Manipulátor verze 3 (modifikovaná varianta)

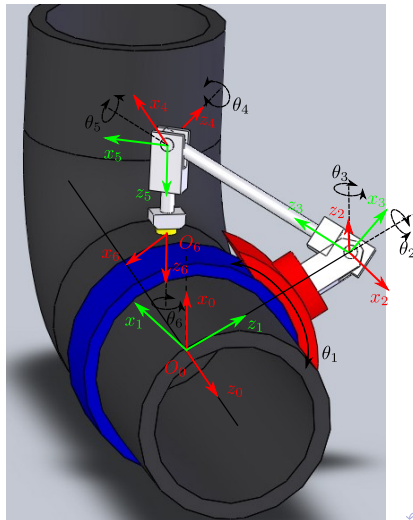
- Univerzální manipulátor se všemi 6 DoF koncového efektoru (3 DoF translační, 3 DoF rotační) s možností dekompozice na translační a rotační část!
- Znamé analytické řešení IKÚ (8 možných řešení)
- Aktuátory:
 - virtuální kloub **R** - pojezd potrubí
 - 5 identických **R** kloubů
 - Zobecněné souřadnice:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_6^0 & \mathbf{R}_6^0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{R}_6^0 \dots \text{matice rotace s.s. } F_6 \text{ vzhledem k s.s. } F_0$$
 - Kloubové souřadnice:

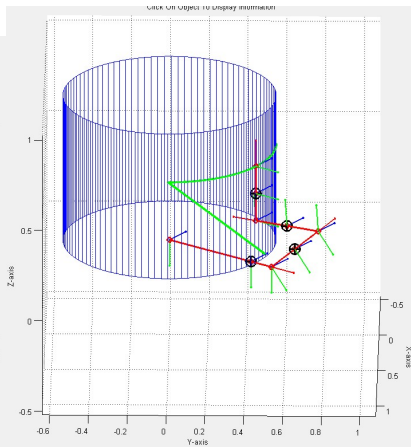
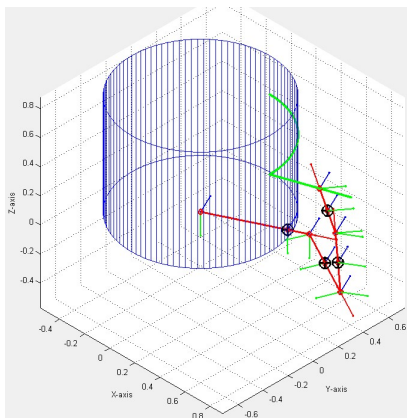
$$\mathbf{Q} =$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 & \theta_6 \end{bmatrix}^T$$



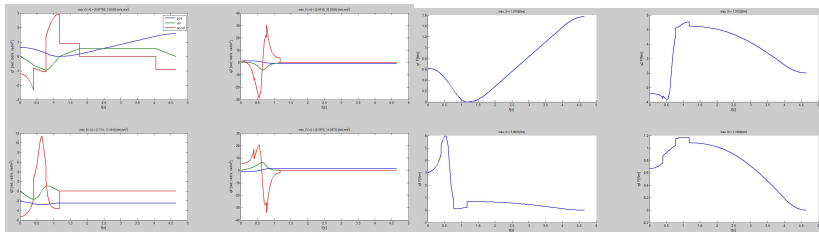
Manipulátor verze 1 (obvodový svar)

Přibližovací fáze a fáze NDT (gravitace ve směru osy $-x$, zeleně znázorněna plánovaná trajektorie)

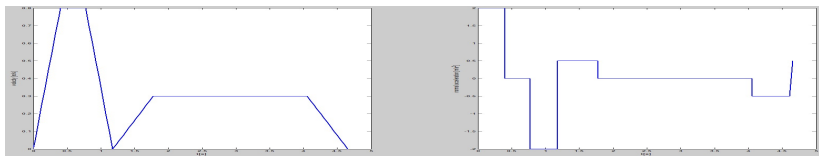


Manipulátor verze 1 (obvodový svar)

Požadované polohy, rychlosti, zrychlení a síly/momenty aktuátorů

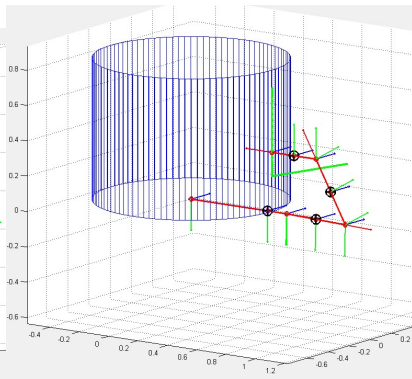
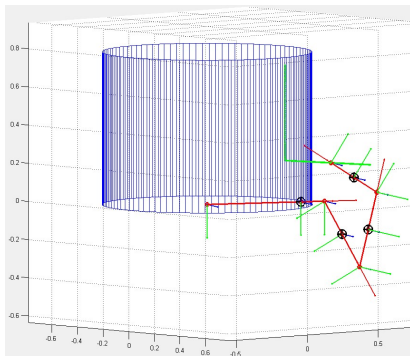


Omezení translačního pohybu konc. efektoru (rychlost, zrychlení)



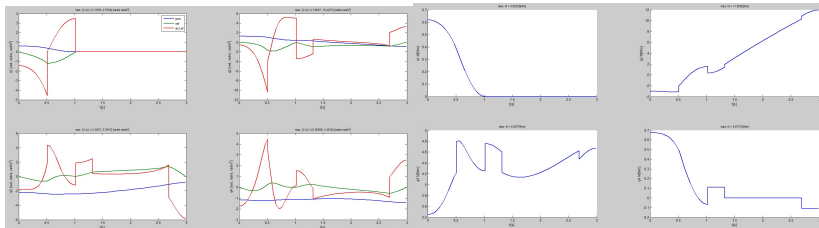
Manipulátor verze 1 (podélný svar)

Přibližovací fáze a fáze NDT

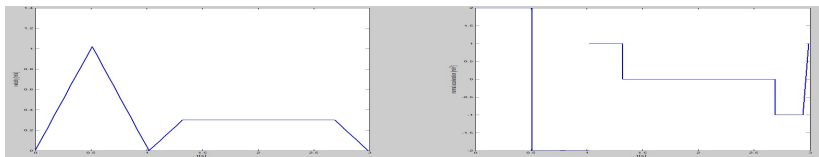


Manipulátor verze 1 (podélný svar)

Požadované polohy, rychlosti, zrychlení a síly/momenty aktuátorů

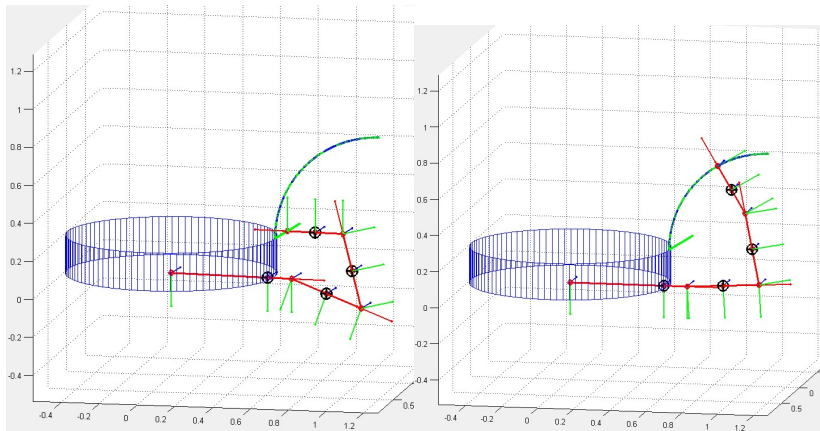


Omezení translačního pohybu konc. efektoru (rychlost, zrychlení)



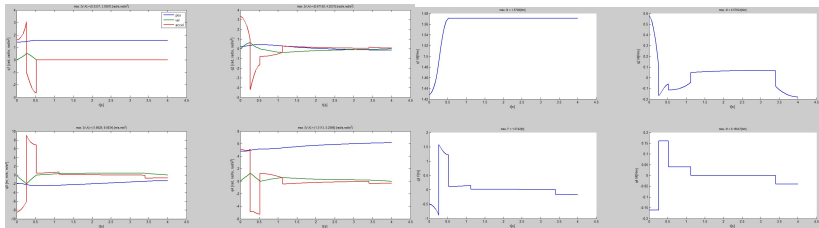
Manipulátor verze 1 (podélný svar v kolenu)

Přibližovací fáze a fáze NDT

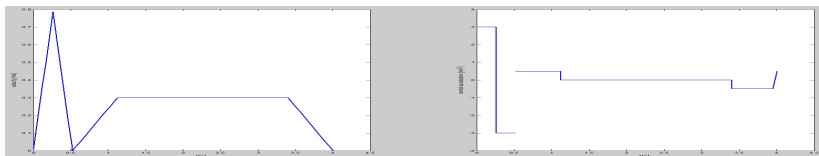


Manipulátor verze 1 (podélný svar v kolenu)

Požadované polohy, rychlosti, zrychlení a síly/momenty aktuátorů

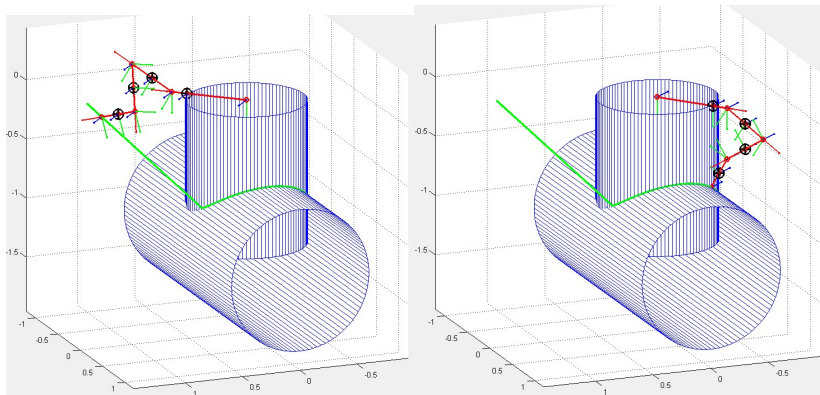


Omezení translačního pohybu konc. efektoru (rychlost, zrychlení)



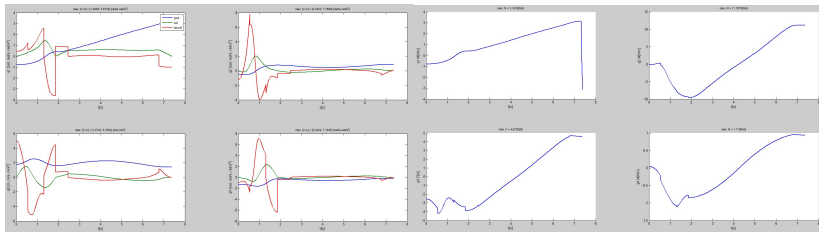
Manipulátor verze 1 (svar nátrubku)

Přibližovací fáze a fáze NDT

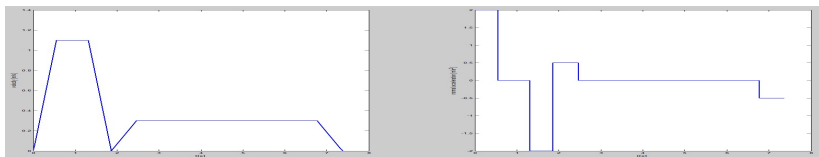


Manipulátor verze 1 (svar nátrubku)

Požadované polohy, rychlosti, zrychlení a síly/momenty aktuátorů

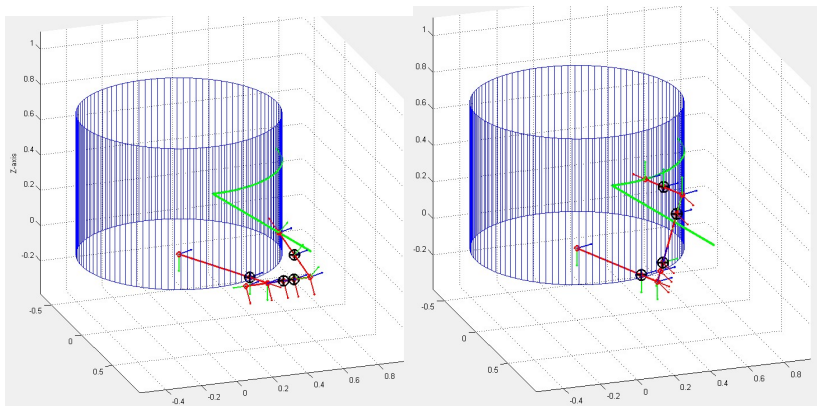


Omezení translačního pohybu konc. efektoru (rychlost, zrychlení)



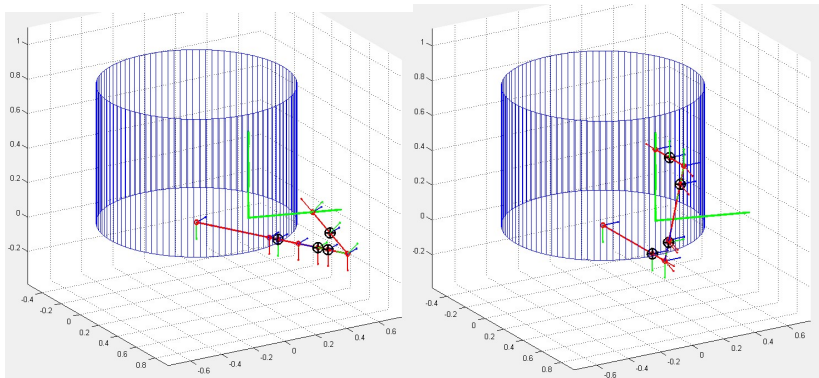
Manipulátor verze 2 (obvodový svar)

Přibližovací fáze a fáze NDT



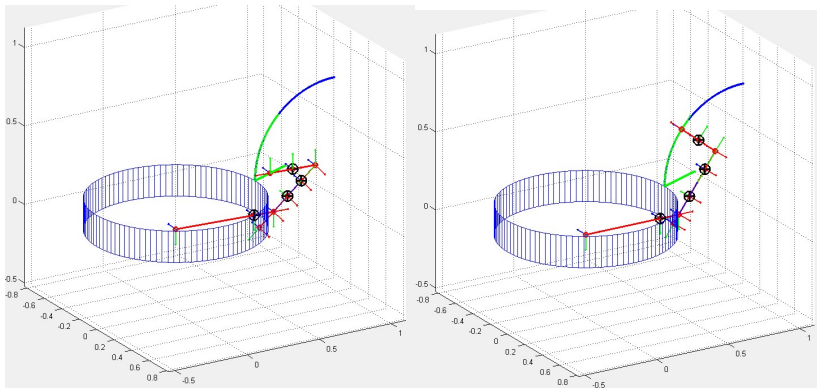
Manipulátor verze 2 (podélný svar)

Přibližovací fáze a fáze NDT



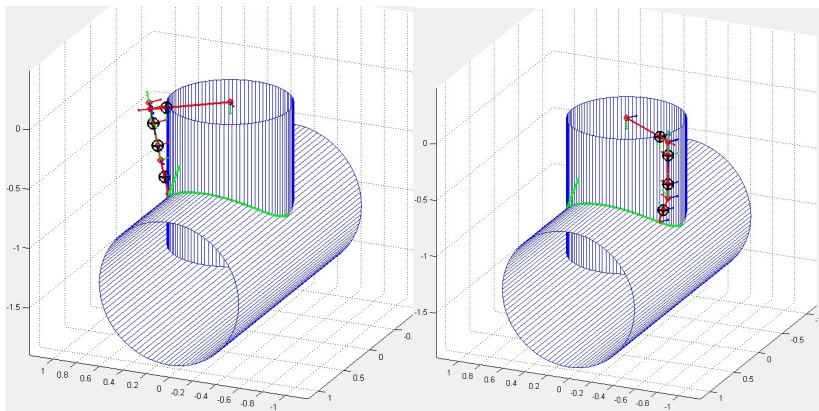
Manipulátor verze 2 (podélný svar v kolenu)

Přibližovací fáze a fáze NDT



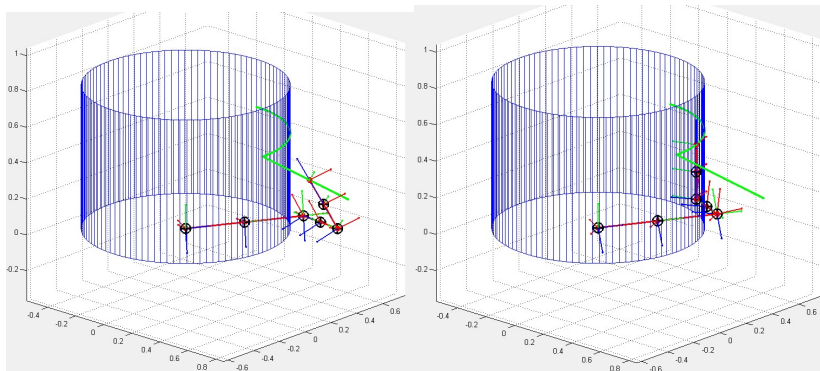
Manipulátor verze 2 (svar nátrubku)

Přibližovací fáze a fáze NDT



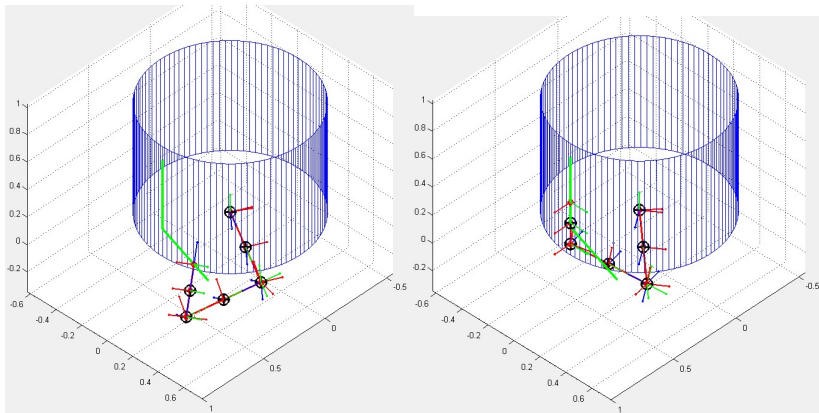
Manipulátor verze 3 (obvodový svar)

Přibližovací fáze a fáze NDT



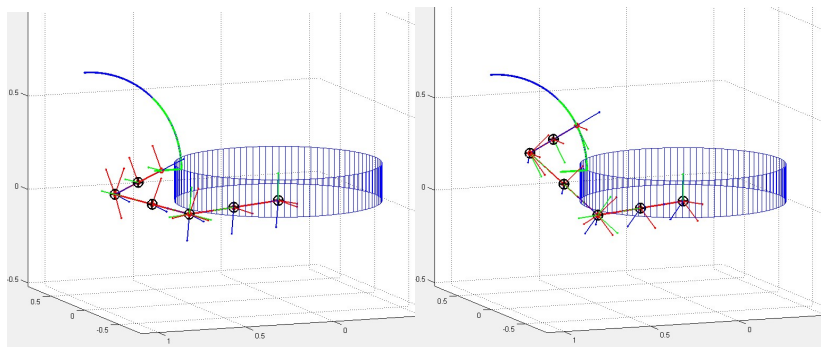
Manipulátor verze 3 (podélný svar)

Přibližovací fáze a fáze NDT



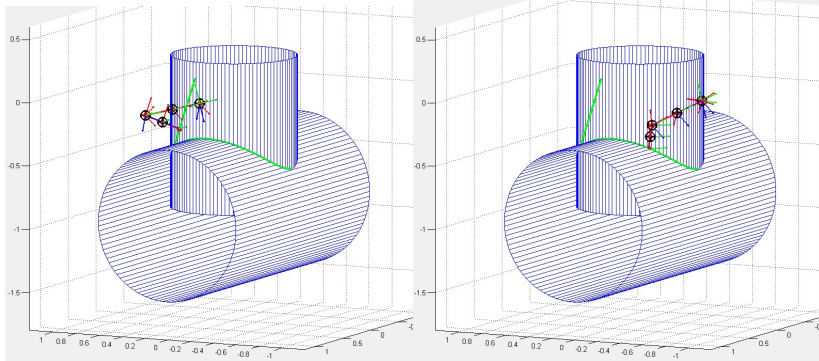
Manipulátor verze 3 (podélný svar v kolenu)

Přibližovací fáze a fáze NDT



Manipulátor verze 3 (svar nátrubku)

Přibližovací fáze a fáze NDT

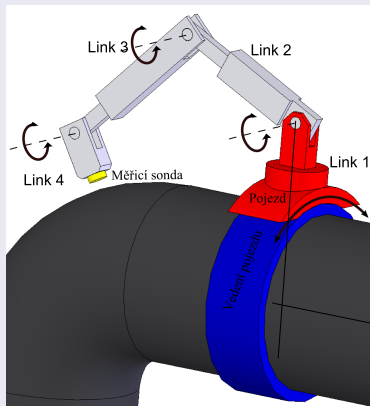


Diskuse k výběru robotických architektur (1/4)

Zhodnocení předkládaných architektur

Varianta 1

- + identické typy kloubů ⇒ jednodušší mechanika
- + „přirozené“ orientování NDT sondy vzhledem k potrubí
- omezený počet DoF (libovolná pozice v prostoru, ale omezené možnosti orientace NDT sondy)
- relativně velké prostorové nároky díky dvojici ramen (*Link 2, 3*)

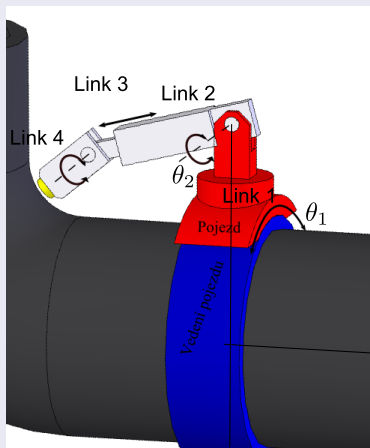


Diskuse k výběru robotických architektur (2/4)

Zhodnocení předkládaných architektur

Varianta 2

- + „přirozené“ orientování NDT sondy vzhledem k potrubí
- + díky **P** kloubu výrazně snížené prostorové nároky
- kombinace **R** a **P** kloubů
- omezený počet DoF (libovolná pozice v prostoru, ale omezené možnosti orientace NDT sondy)

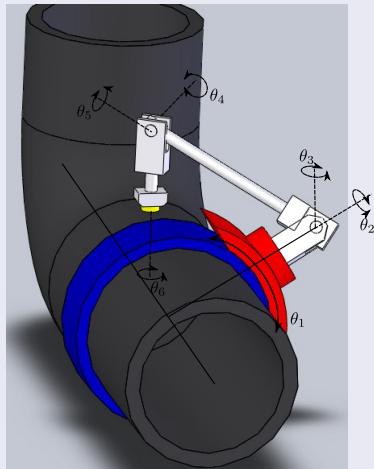


Diskuse k výběru robotických architektur (3/4)

Zhodnocení předkládaných architektur

Varianta 3

- + možnost dosáhnout libovolné orientace NDT sondy (univerzálnost pro komplexnější geometrie svarů)
- + všechny klouby jsou typu **R**
- mechanická složitost, nutnost využít 6 aktuátorů



- Vymezování vůlí a řízení přítlaku sondy (pružina-tlumič)?
- Další návrhy na vylepšení uvedených architektur?
- Plánování trajektorie - meandr? \Rightarrow postačí standardní hotové bloky Motion Control v REXu? (*možné řešení*: aproximace trajektorií po částech přímkami a rozmítání sondy kolmo k přímce)
- Specifikace konkrétních pohonů a řízení (nutno mít alespoň přibližný CAD model)
- Tvorba CAD modelu vybrané architektury (ATEGA)