

Průběžná zpráva

Název projektu:

CANUT (Centre for Advanced Nuclear Technologies)

(Pracovní balíček: PB7)

Název balíčku:

Zařízení pro kontroly součástí primárního okruhu tlakovodních jaderných reaktorů (PB7)

Název zprávy:

**Případová studie navrhovaných architektur
manipulátorů pro NDT svarů potrubí**



Zapsáno (místo, datum):

KKY, 6. ledna 2014

Autor:

Tomáš Čechura
Martin Švejda

Tento dokument je součástí projektu TAČR (Centra kompetence) „CANUT (Centre for Advanced Nuclear Technologies)“ realizovaného za finanční spoluúčasti Technologické agentury České republiky.



Technologická agentura
České republiky



**Centra
kompetence**

Kapitola 1

Případová studie: Manipulátoru s obvodovým pojezdem po potrubí

Autor: Martin Švejda (KKY, FAV, ZČU, msvejda@kky.zcu.cz)

1.1 Použité značení

F_i	Souřadný systém (s.s.) zadaný počátkem a vektorem souřadnicových os ve tvaru $\mathbf{O}_i - \mathbf{x}_i\mathbf{y}_i\mathbf{z}_i$.
\mathbf{X}_i^j	Souřadnice bodu/vektoru, transformační matice/matice rotace i -tého s.s. vyjádřeného vzhledem k j -tému s.s.
\mathbf{T}_i^{i-1}	Homogenní transformační matice mezi s.s. F_i a F_{i-1} daná vektorem posunutí počátků s.s. \mathbf{O}_i^{i-1} a maticí rotace \mathbf{R}_i^{i-1} .

$$\mathbf{T}_i^{i-1} = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & \\ & \mathbf{R}_i^{i-1} & & \mathbf{O}_i^{i-1} \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$\mathbf{T}_i^{i-1} \cdot \mathbf{T}_{i+1}^i \cdot \dots$	Skládání transformací, transformace mezi s.s. F_{i-1} a F_{i+1} .
$\mathbf{X}[a : b, c : d]$	Submatice/subvektor obsahující a -tý až b -tý řádek a c -tý až d -tý sloupec matice/vektoru \mathbf{X} .
$\mathbf{S}(\boldsymbol{\omega})$	Antisymetrická matice poskládaná z prvků vektoru úhlové rychlosti $\boldsymbol{\omega}$.

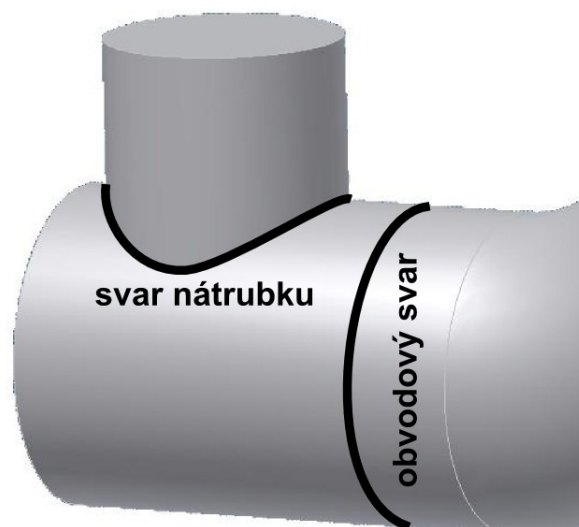
$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}) = \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{\omega}[3] & \boldsymbol{\omega}[2] \\ \boldsymbol{\omega}[3] & 0 & -\boldsymbol{\omega}[1] \\ -\boldsymbol{\omega}[2] & \boldsymbol{\omega}[1] & 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{K} = [k_{i,j}]$	Prvky matice \mathbf{K} .
--------------------------	-----------------------------

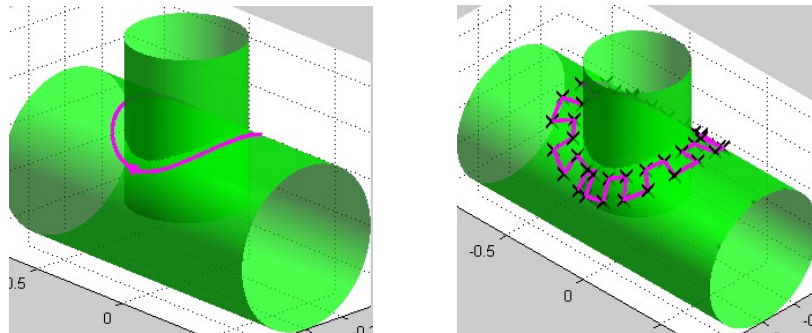
1.2 Úvod

Technická zpráva popisuje novou architekturu manipulátoru s obvodovým pojezdem po potrubí pro účely nedestruktivního zkoušení (NDT) svarů potrubí v JE. Manipulátor je určen prioritně pro dva typy svarů potrubí: svar nátrubku a obvodový svar, viz Obrázek 1.1. Pohyb podél svaru je, s ohledem na používané technologie NDT, předpokládán jako obyčejný (prostý pohyb podél svaru) či meandrovitý (rozmítání kolmo na rovinu svaru), viz Obrázek 1.2. Konstrukce manipulátoru musí být schopna polohovat UZ sondu libovolně podél testovaného svaru a orientovat ji kolmo k rovině svaru. S ohledem na možnost řízení přítlaku sondy je minimální počet stupňů volnosti manipulátoru roven 4 (3 translační, 1 rotační). Vzhledem k požadavku, aby manipulátor zabíral co nejmenší prostor, je jeho kinematická konstrukce navržena s výkyvným ramenem, viz Obrázek 1.4. Optimalizace návrhových parametrů manipulátoru (délek a uspořádání výkyvného ramene) hraje klíčovou roli pro efektivitu celého zařízení (tato problematika však není v uvedené zprávě řešena).

V následujících kapitolách je odvozen kompletní kinematický model, který je nezbytný pro veškerou další analýzu manipulátoru. Jedná se o řešení inverzní kinematické úlohy, kdy požadujeme znát polohy, rychlosti a zrychlení aktuátorů manipulátoru, které zajistí požadovaný pohyb jeho koncového efektoru (UZ sondy). Součástí zprávy byly vytvořeny kompletní simulační modely v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics, viz [7].



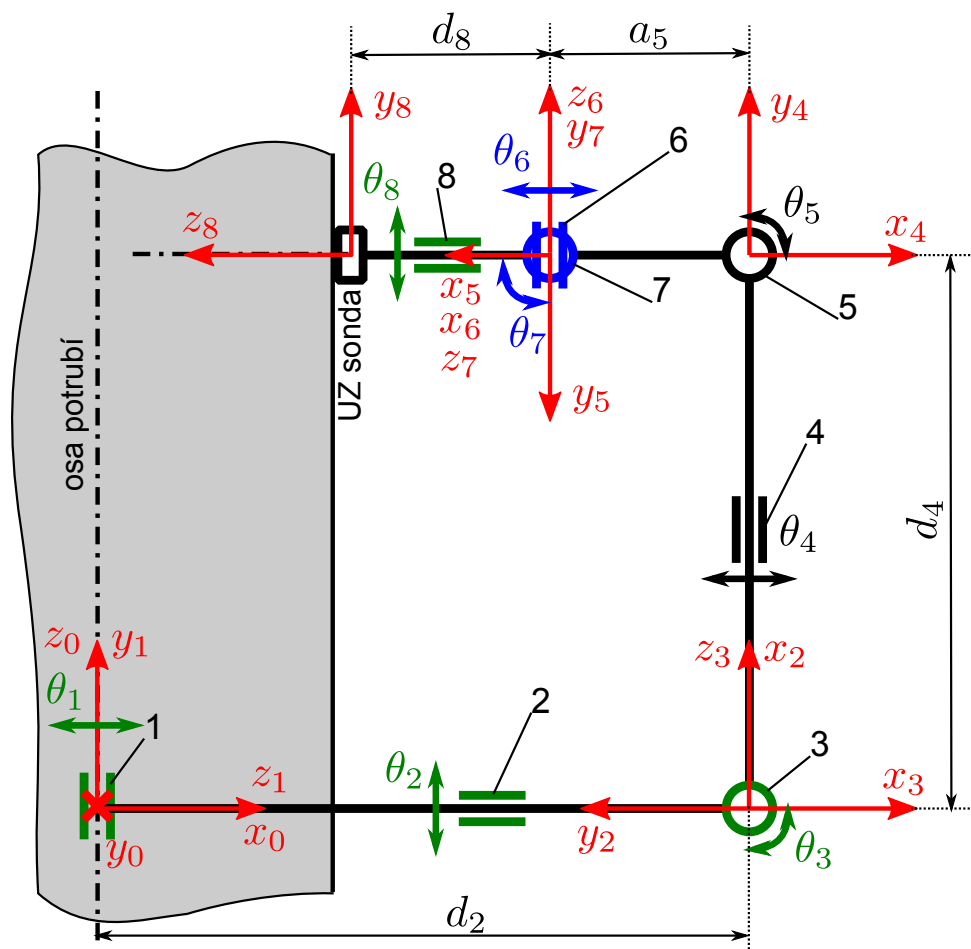
Obrázek 1.1: Uvažované svary



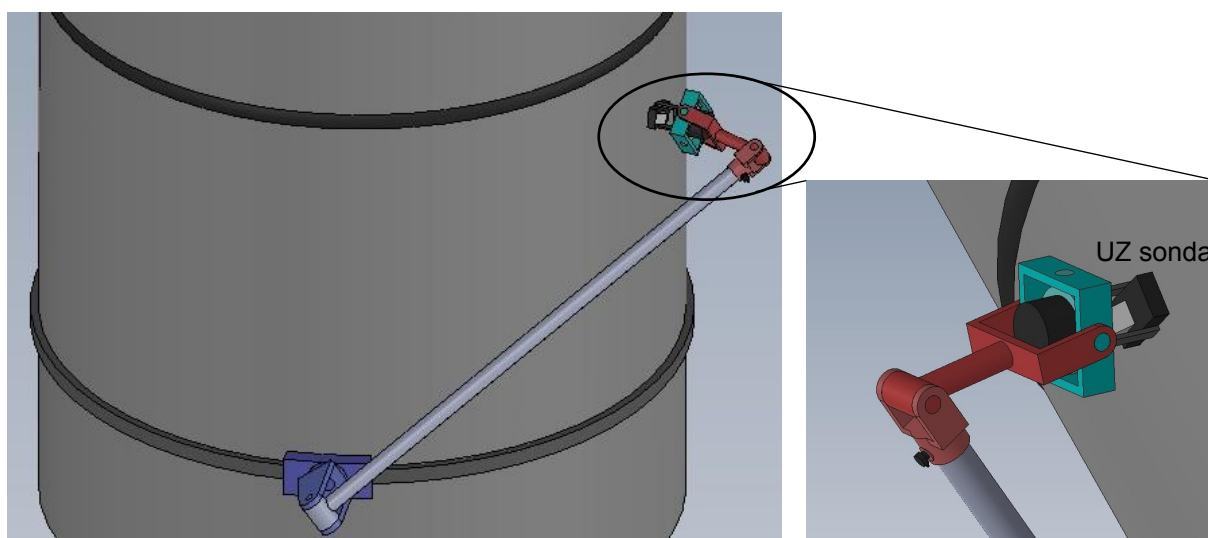
Obrázek 1.2: Uvažované typy pohybů podél testovaného svaru (vlevo: prostý pohyb, vpravo: meandrovitý pohyb)

1.3 Kinematika manipulátoru

Nová kinematická konstrukce manipulátoru je realizována sériovým kinematickým řetězcem (sériový manipulátor). Manipulátor obsahuje 8 rotačních kloubů (typ **R**). První kloub reprezentuje obvodový pojezd po potrubí (aktivní - řízený kloub - aktuátor). Další trojice aktuátorů je dána kloubem č. 2, 3 a 8. Aktuátory (klouby č. 1, 2, 3, 8) zajišťují polohování ultrazvukové (UZ) sondy. UZ sonda je uchycena prostřednictvím pasivního křížového kloubu (kardanův kloub) realizovaného kloubem č. 6 a 7. Tyto klouby jsou během pohybu manipulátoru volné, ale neobsahují aktivní prvek pro řízení polohy (tzv. pasivní klouby). Poznamenejme, že běžně používané přípravky pro upevnění UZ sondy fungují na podobném principu, tedy kyvném uchycení sondy umožňující její 2 DoF orientaci. Vzhledem k tomu, že orientace podélné osy UZ sondy (z_8 v Obrázku 1.3) vzhledem k rovině testovaného svaru je požadována, aktuátor č. 8 je nezbytný pro zajištění správné funkce manipulátoru. Zbývající rotační klouby, tzn. kloub č. 4 a 5 jsou pasivní, avšak na rozdíl od kloubů č. 6 a 7, je jejich poloha při pohybu manipulátoru *fixována* (klouby slouží pouze ke změně kinematické konfigurace manipulátoru a zastupují roli návrhových parametrů). Schématické uspořádání manipulátoru je znázorněno na Obrázku 1.3. Zjednodušený 3D CAD model je znázorněn na Obrázku 1.4. Nejprve předpokládejme, že manipulátor bude použit k testování **obvodového svaru** potrubí.



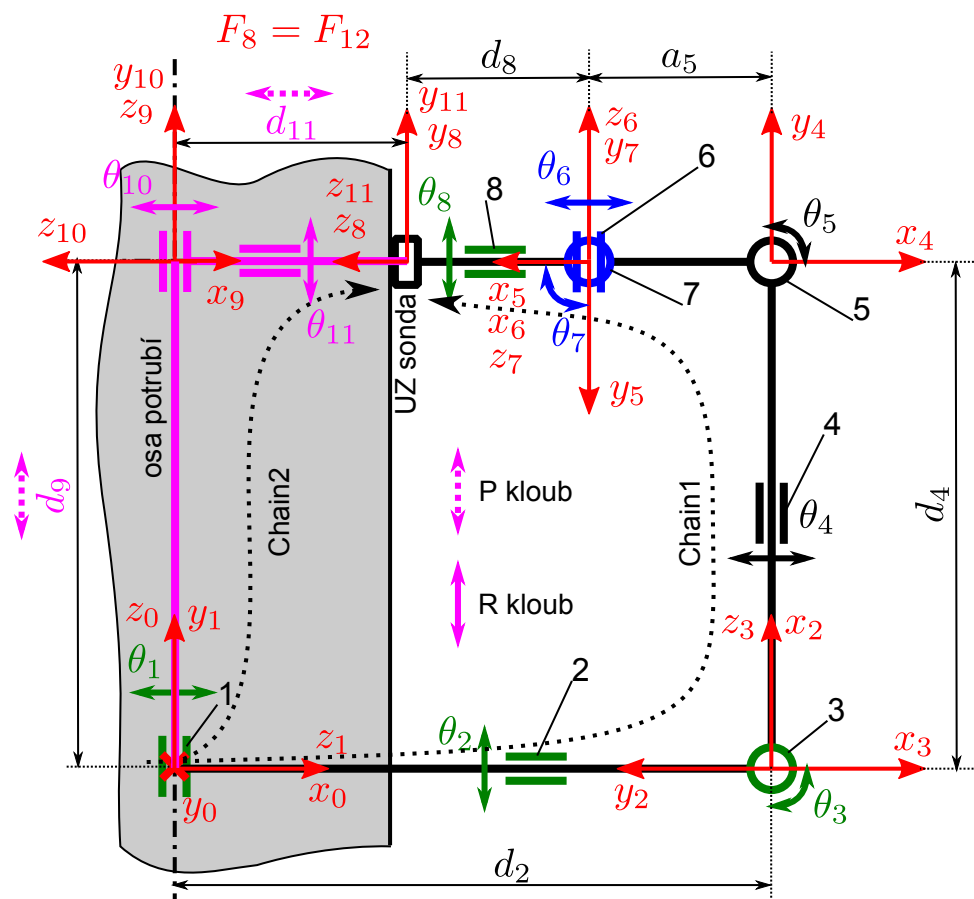
Obrázek 1.3: Schématické uspořádání manipulátoru (kinematický řetězec **RRRRRRRR**), zavedení s.s. ramen manipulátoru dle D-H úmluvy. Zeleně znázorněny aktuátory, modře pasivní klouby (kardanův kloub), černě pasivní klouby s fixní polohou během pohybu manipulátoru. Manipulátor je připevněn na potrubí s **obvodovým svarem**.



Obrázek 1.4: 3D CAD zjednodušený model manipulátoru pro testování **obvodového svaru**.

Z uvedeného popisu manipulátoru je patrné, že manipulátor tedy celkem obsahuje 4 ak-

tivní klouby (č. 1, 2, 3, 8) a 2 klouby pasivní (č. 6, 7). Zřejmě se tak jedná o nedourčenou mechanickou soustavu, neboť pro plné polohování koncového efektoru manipulátoru v prostoru je zapotřebí 6 nezávislých aktuátorů (6 DoF v prostoru - 3 DoF translace + 3 DoF rotace). Pro uvažovaný manipulátor se však předpokládá, že UZ sonda bude přitlačována k potrubí dostatečnou silou, a bude tak zajištěn tečný kontakt plochy UZ sondy s plochou potrubí. Jinými slovy, orientace sondy, ve smyslu směru osy z_8 s.s. koncového efektoru je určena jejím přiložením k povrchu potrubí. Tento tečný kontakt odnímá z mechanické konstrukce manipulátoru právě 2 DoF. Výsledný manipulátor lze tak považovat za plně určený neredundantní 4 DoF manipulátor (4 aktuátory, 4 DoF koncového efektoru - sondy: libovolná translace v prostoru, natočení/orientace sondy okolo své podélné osy z_8). Z kinematického hlediska se jedná o omezení pohybu koncového efektoru, respektive jeho orientace, která je určena rozměry a umístěním válcového potrubí. Za účelem tvorby kinematického modelu manipulátoru si manipulátor lze představit nikoliv jako sériový manipulátor, ale jako manipulátor paralelní, kde jeden kinematický řetězec je reprezentován uvažovaným manipulátorem (**RRRRRRRR**) a druhý, sériový kinematický řetězec (**RRRR**), představuje „podporu“ koncového efektoru, která omezuje jeho orientaci požadovaným způsobem, viz Obrázek 1.5.



Obrázek 1.5: Sériový kin. řetězec **RRRR** (fialově) jako „podpora konc. efektoru“ \Rightarrow výsledný paralelní manipulátor pro testování **obvodového svaru**.

Kinematickou strukturu manipulátoru lze popsat pomocí Denavit Hartenbergovy (D-H) úmluvy, viz [2], [12]. Denavit-Hartenbergovy parametry pro oba sériové kinematické řetězce: **Chain1** - sériový kin. řetězec typu **RRRRRRRR** vlastního manipulátoru, **Chain2** - sériový kin. řetězec typu **RRRR** omezující pohyb konc. efektoru jsou zná-

zorněny v Tabulce 1.1, 1.2. Více informací o popisech vlastních svarů včetně algoritmu generátorů trajektorií lze nalézt v [14]).

i	d_i	θ_i	a_i	α_i	q_i^{home}
1	0	θ_1	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
2	d_2	θ_2	0	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
3	0	θ_3	0	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$
4	d_4	θ_4	0	$\frac{\pi}{2}$	0
5	0	θ_5	a_5	0	π
6	0	θ_6	0	$\frac{\pi}{2}$	0
7	0	θ_7	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
8	d_8	θ_8	0	0	0

Tabulka 1.1: D-H parametry pro **Chain1** (vlastní manipulátor pro **obvodový svar**), $q_i^{\text{home}} = \theta_i$ označuje polohu kloubů manipulátoru, která odpovídá poloze znázorněné na Obrázku 1.5. Tučně jsou vyznačeny volné kloubové souřadnice. První transformace je vztažena vzhledem k s.s. F_0 .

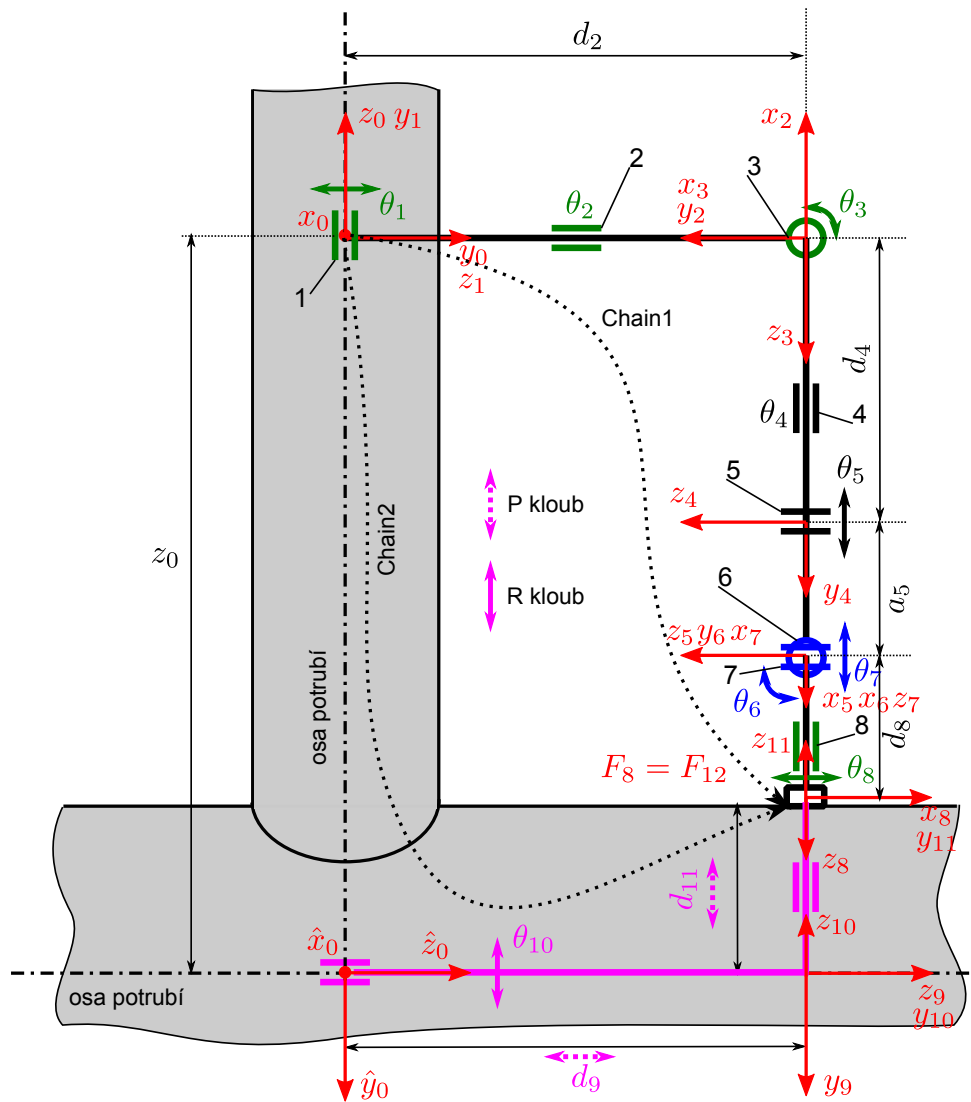
i	d_i	θ_i	a_i	α_i	q_i^{home}
9	d_9	0	0	0	d_4
10	0	θ_{10}	0	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$
11	d_{11}	0	0	0	$-(d_2 - (d_8 + a_5))$
12	0	θ_{12}	0	0	0

Tabulka 1.2: D-H parametry pro **Chain2** (omezení pohybu konc. efektoru pro **obvodový svar**), $q_i^{\text{home}} = \{\theta_i, d_i\}$ označuje polohu kloubů manipulátoru, která odpovídá poloze znázorněné na Obrázku 1.5. Tučně jsou vyznačeny volné kloubové souřadnice. První transformace je vztažena vzhledem k s.s. F_0 .

V případě testování svaru nátrubku je situace odlišná, neboť koncový efektor manipulátoru (UZ sonda) je orientována prostřednictvím tečného kontaktu k povrchu průběžného potrubí, které je kolmé k potrubí na němž je umístěn obvodový pojezd manipulátoru. Tuto situaci znázorňuje Obrázek 1.6. D-H parametry řetězce **Chain1** se nemění. Obrázek 1.6 je však znázorněn pro jiné hodnoty kloubových souřadnic q_i^{home} , viz Tabulka 1.3. D-H parametry řetězce **Chain2** jsou uvedeny v Tabulce 1.4. Poznamenejme, že v tabulce jsou uvedeny D-H parametry reprezentující transformaci vzhledem k s.s. \hat{F}_0 , který je zaveden, aby byly dodržena konvence D-H úmluvy (osy kloubů jsou určeny \mathbf{z} -tovými osami s.s.). Mezi s.s. F_0 a \hat{F}_0 existuje fixní transformace daná vztahem:

$$\mathbf{T}_0^0 = \text{Trans}(\mathbf{z}, z_0) \cdot \text{Rot}(\mathbf{x}, -\frac{\pi}{2}) \tag{1.1}$$

kde z_0 je vzdálenost osy průběžného potrubí ve směru osy \mathbf{z}_0 s.s. F_0 .



Obrázek 1.6: Sériový kin. řetězec **RRRR** (fialově) jako „podpora konc. efektoru“ \Rightarrow výsledný paralelní manipulátor pro testování svaru nátrubku.

i	d_i	θ_i	a_i	α_i	q_i^{home}
1	0	θ_1	0	$\frac{\pi}{2}$	$-\pi$
2	d_2	θ_2	0	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
3	0	θ_3	0	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
4	d_4	θ_4	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
5	0	θ_5	a_5	0	$\frac{\pi}{2}$
6	0	θ_6	0	$\frac{\pi}{2}$	0
7	0	θ_7	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
8	d_8	θ_8	0	0	π

Tabulka 1.3: D-H parametry pro Chain1 (vlastní manipulátor pro svar nátrubku), $q_i^{\text{home}} = \theta_i$ označuje polohu kloubů manipulátoru, která odpovídá poloze znázorněné na Obrázku 1.6. Tučně jsou vyznačeny volné kloubové souřadnice. První transformace je vztažena vzhledem k s.s. F_0 .

i	d_i	θ_i	a_i	α_i	q_i^{home}
9	d_9	0	0	0	d_2
10	0	θ_{10}	0	$\frac{\pi}{2}$	0
11	d_{11}	0	0	0	$-(z_0 + d_4 + a_5 + d_8)$
12	0	θ_{12}	0	π	$\frac{\pi}{2}$

Tabulka 1.4: D-H parametry pro Chain2 (omezení pohybu konc. efektoru pro svar nátrubku), $q_i^{\text{home}} = \{\theta_i, d_i\}$ označuje polohu kloubů manipulátoru, která odpovídá poloze znázorněné na Obrázku 1.6. Tučně jsou vyznačeny volné kloubové souřadnice. První transformace je vztažena vzhledem k s.s. \hat{F}_0 .

Vzhledem ke kinematice manipulátoru, kterou lze popsat paralelní strukturou zajišťující omezení pohybu koncového efektoru, je pro uvažované typy svarů mírně odlišné řešení tzv. *inverzního geometrického modelu* (IGM). Je patrné, že výsledný paralelní manipulátor se svým uspořádáním liší pro obvodový svar a svar nátrubku (odlišná konfigurace kin. řetězce Chain2). Poznamenejme, že IGM umožňuje výpočet poloh kloubových souřadnic manipulátoru z požadované polohy koncového efektoru. IGM tedy hraje klíčovou roli při řízení manipulátoru. IGM se budeme zabývat v Kapitolách 1.3.1, 1.3.2.

Pokud se neomezíme pouze na výpočet požadované polohy kloubových souřadnic, ale požadujeme i výpočet rychlosti/zrychlení kloubových souřadnic ze známých rychlostí/zrychlení koncového efektoru, budeme řešit tzv. *inverzní okamžitou kinematickou úlohu* (IOKÚ). IOKÚ se budeme zabývat v Kapitole 1.3.3.

1.3.1 Inverzní geometrický model manipulátoru - svar nátrubku

Pro polohu koncového efektoru (UZ sondy) definujme zobecněné souřadnice \mathbf{X} . Koncový efektor manipulátoru má 4 nezávislé DoF (translace ve směrech os \mathbf{x}_0 , \mathbf{y}_0 , \mathbf{z}_0 a orientaci ϕ okolo své podélné osy \mathbf{z}_8). Zatímco translace koncového efektoru je definována vzhledem k s.s. F_0 a její interpretace je zřejmá, orientace konc. efektoru bude vyjádřena následovně. Zaveďme nulovou (domovskou) orientaci konc. efektoru (ve smyslu řízeného DoF, tedy úhlu ϕ) jako polohu osy \mathbf{x}_8 koncového efektoru ve směru osy \mathbf{y}_0 (osa průběžného potrubí). Orientace zbývajících os s.s. F_8 je dána tečným kontaktem roviny sondy k rovině potrubí, neboli směr osy \mathbf{z}_8 je určen směrem kolmým do osy průběžného potrubí. Předpokládejme, že se koncový efektor nachází v libovolném bodu \mathbf{O}_8^0 (translace). Jeho nulová orientace lze potom vyjádřit maticí rotace \mathbf{R}_{8H}^0 jako:

$$\mathbf{R}_{8H}^0 = \left[\begin{array}{c|c} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{z}_8^0 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \hline & \mathbf{z}_8^0 \end{array} \right] \quad (1.2)$$

osa \mathbf{z}_8^0 je pochopitelně závislá na na bodu \mathbf{O}_8^0 :

Osa \mathbf{z}_8^0 bude ležet vždy v rovině $\mathbf{x}_0\mathbf{z}_0$ a její směr bude určen bodem \mathbf{O}_8^0 :

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_8^0[1, 3] &= \begin{bmatrix} 0 \\ z_0 \end{bmatrix} - \mathbf{O}_8^0[1, 3] \\ \mathbf{z}_8^0 &= \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{z}_8^0[1])^2 + \mathbf{z}_8^0[3]}} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_8^0[1] \\ 0 \\ \mathbf{z}_8^0[3] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Vzhledem k faktu, že požadovanou zobecněnou souřadnicí manipulátoru je orientace ϕ konc. ef. kolem osy \mathbf{z}_8^0 , definujeme její nulovou polohu $\phi = 0$ jako polohu odpovídající nulovému (domovskému) natočení konc. ef. vyjádřeného maticí rotace \mathbf{R}_{8H}^0 . Zřejmě tedy lze výsledná orientace koncového efektoru vyjádřit s pomocí elementární rotace jako:

$$\mathbf{R}_8^0 = \mathbf{R}_{8H}^0 \cdot \mathbf{R}_8^{8H}, \quad \text{kde } \mathbf{R}_8^{8H} = \text{Rot}(\mathbf{z}, \phi) \quad (1.4)$$

■ Poznámka 1 (Počet DoF koncového efektoru)

V případě uvažovaného manipulátoru předpokládáme, že směr podélné osy sondy \mathbf{z}_8^0 bude určen tečným kontaktem povrchu sondy k povrchu potrubí (\mathbf{z}_8^0 míří kolmo do osy průběžného potrubí). Toto však nutně neznamená, že by se mohl manipulátor pohybovat pouze po povrchu průběžného potrubí, sonda však stále bude držet uvedený směr osy \mathbf{z}_8 . Manipulátor se tak může pohybovat, co se týče translace, libovolně v prostoru. V průběhu NDT procesu je translační pohyb konc. efektoru manipulátoru skutečně vázán k povrchu průběžného potrubí, a mohlo by se tedy zdát, že konc. efektor má pouze 2 translační DoF (konstantní poloměr průběžného potrubí). Pro praktické použití bude však pravděpodobně nutné navíc řídit přitlačnou sílu sondy k povrchu průběžného potrubí, tzn. sonda bude vybavena pružným elementem, který bude moci být deformován v normálovém směru k povrchu průběžného potrubí. Tzn. konc. ef. manipulátoru bude muset umožňovat vyvíjet pohyb i v tomto směru \Rightarrow konc. efektor musí mít všechny 3 translační DoF. ■

Zobecněné souřadnice manipulátoru jsou zavedeny následovně:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_8^0 \\ \phi \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Aktivní volné kloubové souřadnice manipulátoru (aktuátory) jsou zavedeny jako:

$$\mathbf{Q} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_8]^T \quad (1.6)$$

Kloubové souřadnice jednotlivých kinematických řetězců **Chain1** a **Chain2** označme pro pozdější použití jako:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\text{Chain1}} &= [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_6 \quad \theta_7 \quad \theta_8]^T \\ \mathbf{Q}_{\text{Chain2}} &= [d_9 \quad \theta_{10} \quad d_{11} \quad \theta_{12}]^T \end{aligned} \quad (1.7)$$

θ_4, θ_5 jsou fixované konstanty při pohybu manipulátoru.

Návrhové parametry manipulátoru jsou dány jako:

$$\boldsymbol{\xi} = [d_2 \quad d_4 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad a_5 \quad d_8]^T \quad (1.8)$$

Samotný inverzní geometrický model, tedy transformaci $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Q}$ lze vyřešit následujícím algoritmem:

◆ Algoritmus 1 (IGM - svar nátrubku, viz Obrázek 1.6)

1. Řešení pro kloubovou souřadnici θ_3 :

Počátek \mathbf{O}_5^0 s.s. F_5 lze určit jako:

$$\mathbf{O}_5^0 = \begin{bmatrix} x_5^0 \\ y_5^0 \\ z_5^0 \end{bmatrix} = \mathbf{O}_8^0 - \mathbf{z}_8^0 \cdot d_8 \quad (1.9)$$

kde \mathbf{z}_8^0 je dána rovnicí (1.3).

Bod \mathbf{O}_5^0 lze vypočítat symbolicky prostřednictvím skládání homogenních transformačních matic \mathbf{T}_i^{i-1} získaných z popisu kin. řetězce Chain1 dle D-H úmluvy jako:

$$\mathbf{O}_5^0 = \mathbf{T}_5^0[1 : 3, 4], \quad \text{kde} \quad \mathbf{T}_5^0 = \prod_{i=1}^5 \mathbf{T}_i^{i-1} \quad (1.10)$$

Umocněním a sečtením souřadnicových složek bodu \mathbf{O}_5^0 z rovnice (1.10) získáme vztah:

$$\|\mathbf{O}_5^0\|^2 = 2 s_5 a_5 d_4 - 2 c_5 a_5 c_4 s_3 d_2 + a_5^2 - 2 s_5 a_5 c_3 d_2 + d_2^2 + d_4^2 - 2 d_4 c_3 d_2 \quad (1.11)$$

Rovnici (1.11) lze, po dosazení z rovnice (1.9), přepsat do tvaru:

$$A_3 \cdot s_3 + B_3 \cdot c_3 = K_3 \quad (1.12)$$

kde známé konstanty jsou:

$$\begin{aligned} A_3 &= -2c_5 a_5 c_4 d_2 \\ B_3 &= -2s_5 a_5 d_2 - 2d_4 d_2 \\ K_3 &= (x_5^0)^2 + (y_5^0)^2 + (z_5^0)^2 - (a_5^2 + d_2^2 + d_4^2 + 2s_5 a_5 d_4) \end{aligned}$$

Rovnici (1.12) lze řešit pro souřadnici θ_3 analyticky v zavřeném tvaru a existují dvě různá izolovaná řešení:

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \text{atan2}\left(\frac{-B_3 \sqrt{A_3^2 (B_3^2 + A_3^2 - K_3^2)} + K_3 A_3^2}{(B_3^2 + A_3^2) A_3}, \frac{K_3 B_3 + \sqrt{A_3^2 (B_3^2 + A_3^2 - K_3^2)}}{B_3^2 + A_3^2}\right) \\ \theta_3 &= \text{atan2}\left(\frac{B_3 \sqrt{A_3^2 (B_3^2 + A_3^2 - K_3^2)} + K_3 A_3^2}{(B_3^2 + A_3^2) A_3}, \frac{K_3 B_3 - \sqrt{A_3^2 (B_3^2 + A_3^2 - K_3^2)}}{B_3^2 + A_3^2}\right) \end{aligned} \quad (1.13)$$

2. Řešení pro kloubovou souřadnici θ_2 :

Porovnáním souřadnice \mathbf{z} bodu \mathbf{O}_5^0 , viz rovnice (1.9) se symbolickým výpočtem též souřadnice, viz rovnice (1.10) získáváme rovnici:

$$\mathbf{O}_5^0[3] = (c_5 a_5 c_3 c_4 - s_3 (s_5 a_5 + d_4)) s_2 - c_5 a_5 c_2 s_4 \quad (1.14)$$

Rovnici (1.14) lze přepsat opět do tvaru:

$$A_2 \cdot s_2 + B_2 \cdot c_2 = K_2 \quad (1.15)$$

kde známé konstanty jsou:

$$\begin{aligned} A_2 &= c_5 a_5 c_3 c_4 - s_3 (s_5 a_5 + d_4) \\ B_2 &= -s_4 c_5 a_5 \\ K_2 &= z_5^0 \end{aligned}$$

Rovnici (1.15) lze řešit analogicky jako v předchozím případě, tedy platí:

$$\theta_2 = \operatorname{atan2}\left(\frac{-B_2\sqrt{A_2^2(B_2^2 + A_2^2 - K_2^2)} + K_2A_2^2}{(B_2^2 + A_2^2)A_2}, \frac{K_2B_2 + \sqrt{A_2^2(B_2^2 + A_2^2 - K_2^2)}}{B_2^2 + A_2^2}\right)$$

$$\theta_2 = \operatorname{atan2}\left(\frac{B_2\sqrt{A_2^2(B_2^2 + A_2^2 - K_2^2)} + K_2A_2^2}{(B_2^2 + A_2^2)A_2}, \frac{K_2B_2 - \sqrt{A_2^2(B_2^2 + A_2^2 - K_2^2)}}{B_2^2 + A_2^2}\right)$$
(1.16)

Řešení pro kloubovou souřadnici θ_1 :

Nyní známe již hodnoty kloubových souřadnic θ_2 a θ_3 . V tomto případě lze snadno ukázat, že porovnáním prvních dvou vypočtených souřadnic (\mathbf{x}, \mathbf{y}) bodu \mathbf{O}_5^0 , viz rovnice (1.9) s odpovídajícím symbolickým výpočtem, viz rovnice (1.10), dostáváme soustavu dvou lineárních rovnic pro dvě neznámé s_1, c_1 :

$$\mathbf{A}_{\theta_1} \begin{bmatrix} s_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \mathbf{b}_{\theta_1} \quad (1.17)$$

kde

$$\mathbf{A}_{\theta_1} = \begin{bmatrix} -(s_5a_5 + d_4)c_3 - c_5a_5c_4s_3 + d_2 & (c_5a_5c_3c_4 - s_3(s_5a_5 + d_4))c_2 + c_5a_5s_2s_4 \\ (c_5a_5c_3c_4 - s_3(s_5a_5 + d_4))c_2 + c_5a_5s_2s_4 & (s_5a_5 + d_4)c_3 + c_5a_5c_4s_3 - d_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_{\theta_1} = \begin{bmatrix} x_5^0 \\ y_5^0 \end{bmatrix}$$

Kloubová souřadnice je dána řešením rovnice (1.17) jako:

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{\theta_1}^{-1} \cdot \mathbf{b}_{\theta_1} \quad \Rightarrow \quad \theta_1 = \operatorname{atan2}(s_1, c_1) \quad (1.18)$$

3. Řešení pro pasivních kloubové souřadnice θ_6, θ_7

Přestože kloubové souřadnice θ_6, θ_7 reprezentují pasivní klouby pro kardanův kloub v uchycení UZ sondy a jsou tedy závislé a jednoznačně určené aktivními kloubovými souřadnicemi \mathbf{Q} , jejich hodnoty je nutné vypočítat pro určení polohy posledního aktivního kloubu θ_8 . Klouby θ_6, θ_7 totiž zřejmě ovlivňují orientaci koncového efektoru kolem osy \mathbf{z}_8 .

Vzhledem k tvaru poslední transformace s.s. v kin řetězci **Chain1**, tzn. $F_7 \rightarrow F_8 \Rightarrow \mathbf{T}_8^0$, je zřejmé, že osy \mathbf{z}_8 a \mathbf{z}_7 jsou identické, neboť s.s. F_8 vznikne ze s.s. F_7 pouze rotací a posunem ve směru osy \mathbf{z}_7 :

$$\mathbf{T}_8^7 = \operatorname{Trans}(\mathbf{z}, d_8) \cdot \operatorname{Rot}(\mathbf{z}, \theta_8) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{z}_8^0 = \mathbf{z}_7^0 \quad (1.19)$$

Této vlastnosti lze s výhodou využít, neboť pro kin. řetězec **Chain1** platí následující transformace:

$$\underbrace{\mathbf{T}_5^0}_{\text{známe, závisí na: } \theta_1 \dots \theta_5} \cdot \underbrace{\mathbf{T}_7^5}_{\text{funkcí hledaných: } \theta_6, \theta_7} = \mathbf{T}_7^0 \quad (1.20)$$

Výběrem pouze \mathbf{z} -tové osy dostáváme z (1.20):

$$\mathbf{R}_7^5[1 : 3, 3] = \underbrace{(\mathbf{R}_5^0)^T}_{[a,b,c]^T} \cdot \mathbf{z}_7^0 \quad (1.21)$$

Pravá strana rovnice (1.21) je známá a vyjádřením levé strany symbolicky dostáváme následující soustavu rovnic a její řešení:

$$\begin{bmatrix} c_6 s_7 \\ s_6 s_7 \\ -c_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{array}{l} c_7 = -c \\ s_7 = \pm \sqrt{a^2 + b^2} \\ s_6 = \frac{b}{s_7} \\ c_6 = \frac{a}{s_7} \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} \theta_6 = \text{atan2}(s_6, c_6) \\ \theta_7 = \text{atan2}(s_7, c_7) \end{array} \quad (1.22)$$

4. **Řešení pro kloubovou souřadnici θ_8 :**

Pro kinematický řetězec **Chain1** lze odvodit následující rovnici (\mathbf{R}_8^0 známe a umíme vyčíslit ze zadání, viz (1.4)):

$$\underbrace{\mathbf{T}_7^0}_{\text{známé, závisí na: } \theta_1 \dots \theta_7} \cdot \underbrace{\mathbf{T}_8^7}_{\text{funkcí hledané: } \theta_8} = \mathbf{T}_8^0$$

$$\mathbf{R}_8^7 = \underbrace{(\mathbf{R}_7^0)^T \cdot \mathbf{R}_8^0}_{[r_{ij}]} \quad (1.23)$$

Porovnáním symbolicky vyjádřené levé strany rovnice (1.23) a známé pravé strany dostáváme přímo řešení:

$$s_8 = r_{21}, \quad c_8 = r_{11} \Rightarrow \theta_8 = \text{atan2}(s_8, c_8) \quad (1.24)$$

Nyní je vyřešena IGM pro všechny kloubové souřadnice $\theta_1 \dots \theta_3, \theta_6 \dots \theta_8$ kin. řetězce **Chain1**.

Kloubové souřadnice kin. řetězce **Chain2** lze stanovit následujícím způsobem:

5. **Řešení pro kloubovou souřadnici $d_9, \theta_{10}, d_{11}, \theta_{12}$:**

Homogenní transformační matici kinematického řetězce **Chain2** lze vypočítat prostřednictvím D-H úmluvy následovně, viz Obrázek 1.6, Tabulka 1.4:

$$\mathbf{T}_{12}^0 = \mathbf{T}_0^0 \cdot \mathbf{T}_9^0 \cdot \mathbf{T}_{10}^9 \cdot \mathbf{T}_{11}^{10} \cdot \mathbf{T}_{12}^{11} \quad (1.25)$$

kde \mathbf{T}_0^0 je dána rovnicí (1.1) a zbývající homogenní transformační matice vychází z D-H úmluvu a zavedení D-H parametrů v Tabulce 1.3.

Vzhledem k podmínce uzavření kinematického řetězce musí pro **Chain1** a **Chain2** platit:

$$\underbrace{\mathbf{T}_8^0}_{\text{známe, závisí na: } \theta_1 \dots \theta_8} = \underbrace{\mathbf{T}_{12}^0}_{\text{funkcí hledaných: } d_9, \theta_{10}, d_{11}, \theta_{12}} \quad (1.26)$$

Porovnáním známé levé strany a symbolicky vyjádřené pravé strany rovnice (1.26) dostáváme:

$$d_9 = \mathbf{T}_8^0[2, 4] \quad (1.27)$$

$$d_{11} = \pm \sqrt{\mathbf{T}_8^0[1, 4]^2 + (\mathbf{T}_8^0[3, 4] - z_0)^2} \quad (1.28)$$

$$\theta_{10} = \text{atan2}(-\mathbf{T}_8^0[1, 3], -\mathbf{T}_8^0[3, 3]) \quad (1.29)$$

$$\theta_{12} = \text{atan2}(\mathbf{T}_8^0[2, 1], -\mathbf{T}_8^0[2, 2]) \quad (1.30)$$



1.3.2 Inverzní geometrický model manipulátoru - obvodový svar

Řešení IGM pro manipulátor v případě umístění na potrubí s obvodovým svarem je velmi podobné. Změny, které se zde objevují oproti Algoritmu 1 jsou dány právě jiným umístěním manipulátoru, tudíž odlišným vzájemným uspořádáním kinematických řetězců **Chain1** a **Chain2**.

Nulová (domovská) orientace konc. efektoru (ve smyslu řízeného DoF, tedy úhlu ϕ) bude nyní definována jako poloha osy \mathbf{x}_8 koncového efektoru ve směru osy \mathbf{z}_0 (osa průběžného potrubí). Předpokládejme opět, že se koncový efektor nachází v libovolném bodu \mathbf{O}_8^0 (translace). Jeho nulová orientace lze potom vyjádřit maticí rotace \mathbf{R}_{8H}^0 jako:

$$\mathbf{R}_{8H}^0 = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \vdots & \mathbf{z}_8^0 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \vdots & \mathbf{z}_8^0 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

osa \mathbf{z}_8^0 je pochopitelně závislá na bodu \mathbf{O}_8^0 :

Osa \mathbf{z}_8^0 bude ležet vždy v rovině $\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0$ a její směr bude určen bodem \mathbf{O}_8^0 :

$$\mathbf{z}_8^0 = \begin{bmatrix} -\frac{\mathbf{O}_8^0[1:2]}{\|\mathbf{O}_8^0[1:2]\|} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Zřejmě tedy lze výsledná orientace koncového efektoru vyjádřit s pomocí elementární rotace jako (analogicky s případem v Kapitole 1.3.1):

$$\mathbf{R}_8^0 = \mathbf{R}_{8H}^0 \cdot \mathbf{R}_8^{8H}, \quad \text{kde } \mathbf{R}_8^{8H} = \text{Rot}(\mathbf{z}, \phi) \quad (1.33)$$

◆ **Algoritmus 2 (IGM - obvodový svar, viz Obrázek 1.5)**

1. **Řešení pro kloubovou souřadnici θ_3 :**

Analogické s Algoritmem 1.

2. **Řešení pro kloubovou souřadnici θ_2 :**

Analogické s Algoritmem 1.

3. **Řešení pro kloubovou souřadnici θ_1 :**

Analogické s Algoritmem 1.

4. **Řešení pro pasivních kloubové souřadnice θ_6, θ_7**

Analogické s Algoritmem 1.

5. **Řešení pro kloubovou souřadnici θ_8 :**

Analogické s Algoritmem 1.

Nyní je vyřešena IGM pro všechny kloubové souřadnice $\theta_1 \dots \theta_3, \theta_6 \dots \theta_8$ kin. řetězce **Chain1**.

Kloubové souřadnice kin. řetězce **Chain2** lze stanovit následujícím způsobem:

6. **Řešení pro kloubovou souřadnici $d_9, \theta_{10}, d_{11}, \theta_{12}$:**

Homogenní transformační matici kinematického řetězce **Chain2** lze vypočítat prostřednictvím D-H úmluvy následovně, viz Obrázek 1.5, Tabulka 1.2:

$$\mathbf{T}_{12}^0 = \mathbf{T}_9^0 \cdot \mathbf{T}_{10}^9 \cdot \mathbf{T}_{11}^{10} \cdot \mathbf{T}_{12}^{11} \quad (1.34)$$

Vzhledem k podmínce uzavření kinematického řetězce musí pro **Chain1** a **Chain2** platit:

$$\underbrace{\mathbf{T}_8^0}_{\text{známe, závisí na: } \theta_1 \dots \theta_8} = \underbrace{\mathbf{T}_{12}^0}_{\text{funkcí hledaných: } d_9, \theta_{10}, d_{11}, \theta_{12}} \quad (1.35)$$

Porovnáním známé levé strany a symbolicky vyjádřené pravé strany rovnice (1.35) dostáváme:

$$d_9 = \mathbf{T}_8^0[3, 4] \quad (1.36)$$

$$\theta_{10} = \text{atan2}(\mathbf{T}_8^0[1, 3], -\mathbf{T}_8^0[2, 3]) \quad (1.37)$$

$$d_{11} = \begin{cases} \frac{\mathbf{T}_8^0[1,4]}{\mathbf{T}_8^0[1,3]} & \text{pro: } \mathbf{T}_8^0[1, 3] \geq \mathbf{T}_8^0[2, 3] \\ \frac{-\mathbf{T}_8^0[2,4]}{\mathbf{T}_8^0[2,3]} & \text{pro: } \mathbf{T}_8^0[1, 3] < \mathbf{T}_8^0[2, 3] \end{cases} \quad (1.38)$$

Z důvodu omezení numerických chyb (dělení číslem blíží se nule).

$$\theta_{12} = \text{atan2}(\mathbf{T}_8^0[3, 1], -\mathbf{T}_8^0[3, 2]) \quad (1.39)$$

◆

1.3.3 Inverzní okamžitá kinematická úloha

Zabývejme se nyní výpočtem rychlostí/zrychlení kloubových souřadnic manipulátoru ze zadaných rychlostí/zrychlení koncového efektoru, tedy relací IOKÚ:

$$\text{Pro rychlosti: } \dot{\mathbf{X}} \rightarrow \dot{\mathbf{Q}}$$

$$\text{Pro zrychlení: } \ddot{\mathbf{X}} \rightarrow \ddot{\mathbf{Q}}$$

Přirozeně by bylo možné využít prosté derivování vztahů IGM (Algoritmu 1, 2). Nicméně tento postup vede na symbolickou expanzi členů ve výsledných vzorcích, neboť jsou uvedené algoritmy poměrně komplikované. Alternativním a obecným řešením IOKU (použitelným k řešení obecných architektur paralelních manipulátorů, viz [13]) je dekomponovat kinematickou architekturu manipulátoru na izolované sériové kinematické řetězce, v našem případě využijeme již uvažované kinematické řetězce **Chain1**, **Chain2**. Z podmínky uzavření kinematického řetězce vyplývá podmínka koincidence rychlostí a zrychlení posledních s.s. sériových kinematických řetězců **Chain1**, **Chain2**. Dostáváme tak polohově závislou podmínku dávající do vzájemného vztahu rychlosti/zrychlení všech kloubových souřadnic manipulátoru. Tato podmínka bude z principu a pro každou danou polohu manipulátoru reprezentována soustavou obecně závislých (pro manipulátory s méně jak 6-ti DoF) lineárních rovnic pro počet neznámých odpovídají počtu 1DoF kloubů manipulátoru (aktivních i pasivních). Ze soustavy lineárních rovnic lze potom určit jednoznačně závislost rychlostí/zrychlení mezi aktivními a pasivními kloubovými souřadnicemi manipulátoru. S touto znalostí lze pak vypočítat rychlosti/zrychlení kloubových souřadnic ze znalosti rychlosti/zrychlení koncového efektoru. Celý postup je znázorněn v následujících algoritmech.

◆ **Algoritmus 3 (IOKÚ - pro rychlosti)**

Z použití popisu s.s. manipulátoru pomocí D-H úmluvy vyplývá možnost vypočítat kinematické jakobiány kin. řetězců **Chain1**, **Chain2** přímo z prvků jejich homogenních transformačních matic \mathbf{T}_i^{i-1} , viz [13]. Rychlost koncového efektoru manipulátoru, tedy s.s. $F_8 = F_{12}$, lze potom vyjádřit následovně:

Pro Chain1:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}} = \mathbf{J}_8^0 \cdot \dot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain1}} \quad (1.40)$$

kde $\dot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain1}} = \frac{d}{dt} [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_6 \ \theta_7 \ \theta_8]^T$ je rychlost kloubových souřadnic, $\mathbf{J}_8^0 \in \mathbb{R}_{6 \times 6}$ je kin. jakobián závislý na konkrétní poloze manipulátoru a $\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}} = [(\dot{\mathbf{O}}_8^0)^T \ (\boldsymbol{\omega}_8^0)^T]^T$ je plná (6 Dof) rychlost koncového efektoru.

Pro Chain2:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain2}} = \mathbf{J}_{12}^0 \cdot \dot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain2}} \quad (1.41)$$

kde $\dot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain2}} = \frac{d}{dt} [d_9 \ \theta_{10} \ d_{11} \ \theta_{12}]^T$ je rychlost kloubových souřadnic, $\mathbf{J}_{12}^0 \in \mathbb{R}_{6 \times 4}$ je kin. jakobián závislý na konkrétní poloze manipulátoru a $\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain2}} = [(\dot{\mathbf{O}}_{12}^0)^T \ (\boldsymbol{\omega}_{12}^0)^T]^T$ je plná (6 Dof) rychlost koncového efektoru.

Poznamenejme, že všechny prvky kinematických jakobiánů jsou v této chvíli známé, neboť závisí pouze na hodnotách poloh kloubových souřadnic kin. řetězců získaných z řešení IGM v Kapitolách 1.3.1, 1.3.2. Z podmínky uzavření kinematického řetězce, tedy ztotožnění pohybu (rychlosti) koncového efektoru **Chain1** (s.s. F_8) a **Chain2** (s.s. F_{12}) získáváme následující rovnici:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}} = \dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain2}} = \dot{\mathbf{X}} \quad (1.42)$$

kde $\dot{\mathbf{X}}$ označuje rychlost koncového efektoru manipulátoru vyjádřenou ve tvaru jeho translační a úhlové rychlosti.

■ **Poznámka 2 (Výpočet kin. jakobiánu \mathbf{J}_8^0)**

V kinematickém řetězci **Chain1** vystupují konstantní homogenní transformace \mathbf{T}_4^3 , \mathbf{T}_5^4 s konstantními kl. souřadnicemi $\theta_4, \theta_5 \Rightarrow \dot{\theta}_4 = \dot{\theta}_5 = 0$, tzn. příslušný sloupec (j_8^4 a j_8^5) kin. jakobiánu při výpočtu dle algoritmu v [13] bude nulován (a může být tedy vypuštěn - klouby θ_4, θ_5 nepřispívají do výsledné rychlosti konc. efektoru), viz (1.44) \Rightarrow jakobián \mathbf{J}_8^0 nemá 8, ale pouze 6 sloupců (pro 6 kloubových souřadnic $\mathbf{Q}_{\text{Chain1}}$). ■

■ **Poznámka 3 (Výpočet kin. jakobiánu \mathbf{J}_{12}^0)**

Poznamenejme, že v případě výpočtu kin. jakobiánu \mathbf{J}_{12}^0 kin. řetězce **Chain2** je první homogenní transformační matice \mathbf{T}_0^0 , viz (1.1) konstantní (posun a otočení „základen“ kin. řetězců) a není zahrnuta ve výše zmíněném generování kin. jakobiánu z prvků homog. transform. matic, tzn. algoritmem uvedeným v [13] získáváme pouze kin. jakobián $\mathbf{J}_{12}^{\hat{0}}$ (vzhledem k s.s. $F_{\hat{0}}$). Lze snadno ukázat, že hledaný kinematický jakobián vztahovaný k s.s. F_0 je dán prostou transformací (vyplývá z vyjádření vektorů translační a úhlové rychlosti vzhledem k jinému s.s.):

$$\mathbf{J}_{12}^0 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0^0 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_0^0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{J}_{12}^{\hat{0}} \quad (1.43)$$

kde $\mathbf{R}_0^0 = \mathbf{T}_0^0[1 : 3, 1 : 3]$, viz (1.1). ■

Rovnice (1.42) je pro danou polohu manipulátoru lineární soustavou 6 rovnic pro 10 neznámých ($\dot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain1}}, \dot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain2}}$).

Zavedme označení jednotlivých sloupců kin. jakobiánů jako:

$$\mathbf{J}_8^0 = [j_8^1 \quad j_8^2 \quad j_8^3 \quad j_8^6 \quad j_8^7 \quad j_8^8], \quad \mathbf{J}_{12}^0 = [j_{12}^1 \quad j_{12}^2 \quad j_{12}^3 \quad j_{12}^4] \quad (1.44)$$

Potom lze rovnici (1.42) přepsat prostřednictvím přeskládání sloupců kinematických jakobiánů \mathbf{J}_8^0 a \mathbf{J}_{12}^0 jako:

$$\mathbf{J}_P \cdot \dot{\mathbf{Q}}_P = \mathbf{J}_A \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A \quad (1.45)$$

kde $\mathbf{J}_P \in \mathbb{R}_{6 \times 6}$ resp. $\mathbf{J}_A \in \mathbb{R}_{6 \times 4}$ je kinematický jakobián příslušející pasivním \mathbf{Q}_P resp. aktivním \mathbf{Q}_A kloubům manipulátoru:

$$\dot{\mathbf{Q}}_P = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} d_9 \\ \theta_{10} \\ d_{11} \\ \theta_{12} \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{Q}}_A = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_8 \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{Q}}$$

$$\mathbf{J}_P = [j_{12}^1 \quad j_{12}^2 \quad j_{12}^3 \quad j_{12}^4 \quad -j_8^6 \quad -j_8^7], \quad \mathbf{J}_A = [j_8^1 \quad j_8^2 \quad j_8^3 \quad j_8^8]$$

Vzhledem k faktu, že genericky lze předpokládat, že kin. jakobián \mathbf{J}_P je regulární, lze rovnici (1.45) přepsat do tvaru určující rychlosti aktivních kloubů $\dot{\mathbf{Q}}_P$ z rychlostí kloubů aktivních $\dot{\mathbf{Q}}_A$:

$$\dot{\mathbf{Q}}_P = \mathbf{J}_{A2P} \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A, \quad \text{kde} \quad \mathbf{J}_{A2P} = \mathbf{J}_P^{-1} \cdot \mathbf{J}_A \in \mathbb{R}_{6 \times 4} \quad (1.46)$$

Vztah mezi rychlostmi aktivních a pasivních kloubů hraje významnou roli, neboť naším záměrem je stanovit výslednou rychlost koncového efektoru manipulátoru jako veličinu závislou na rychlostech aktivních kloubových souřadnic. Vraťme se nyní k výpočtu rychlosti koncového efektoru manipulátoru, tedy veličině $\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}}$, viz (1.40) (bylo by možné uvažovat i $\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain2}}$, protože z podmínky uzavření kin. řetězce se tyto rychlosti rovnají, viz rovnice (1.42)). Z rovnice (1.46) lze vypočítat rychlosti pasivních kloubových souřadnic θ_6, θ_7 jako funkce souřadnic aktivních:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{A2P}[5 : 6, :] \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A \quad (1.47)$$

Dosazením rychlostí pasivních kloubových souřadnic $\dot{\theta}_6, \dot{\theta}_7$ z rovnice (1.47) (jediné pasivní souřadnice kin. řetězce **Chain1**) do rovnice (1.40) a jejím přeuspořádáním získáváme vztah pro rychlost koncového efektoru manipulátoru:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}} = \dot{\mathbf{X}} = \bar{\mathbf{J}} \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A \quad (1.48)$$

kde

$$\bar{\mathbf{J}} = [j_8^1 \quad j_8^2 \quad j_8^3 \quad j_8^8] + [j_8^6 \quad j_8^7] \cdot \mathbf{J}_{A2P} \in \mathbb{R}_{6 \times 4}$$

a $\dot{\mathbf{X}} = [(\dot{\mathbf{O}}_8^0)^T \quad (\boldsymbol{\omega}_8^0)^T]^T$ je výsledná rychlost koncového efektoru.

Je zřejmé, že prvky $\dot{\mathbf{X}}$ jsou závislé, neboť uvažovaný manipulátor zajišťuje sice 3 translační DoF ($\dot{\mathbf{O}}_8^0$), ale pouze 1 rotační DoF ($\dot{\phi}$). Řešme tedy dále, jakým způsobem lze transformovat vektor rychlostí zobecněných souřadnic manipulátoru $\dot{\mathbf{X}}$, viz rovnice (1.5), a vektor

získaných rychlostí koncového efektoru $\dot{\mathbf{X}}$ vyjádřený rovnicí (1.48). Předpokládejme přede-
dem, že uvažovanou relaci lze zapsat následovně:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{O}_8^0 \\ \omega_8^0 \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{X}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ & \mathbf{K}_\omega \end{bmatrix}}_{\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{6 \times 4}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{O}_8^0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{X}} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}} \quad \text{neboli} \quad \omega_8^0 = \mathbf{K}_\omega \cdot \begin{bmatrix} \dot{O}_8^0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

kde $\mathbf{K}_\omega \in \mathbb{R}_{3 \times 4}$ je hledaná matice a \mathbf{K} je výsledná transformační matice.

Uvažujme rovnici pro orientaci koncového efektoru manipulátoru danou maticí rotace \mathbf{R}_8^0 , viz rovnice (1.4, 1.33):

$$\mathbf{R}_8^0 = \mathbf{R}_{8H}^0 \cdot \mathbf{R}_8^{8H}, \quad \text{kde} \quad \mathbf{R}_8^{8H} = \text{Rot}(\mathbf{z}, \phi) \quad (1.50)$$

Poznamenejme, že člen \mathbf{R}_{8H}^0 se liší v závislosti na typu svaru (svar nátrubku, obvodový svar), viz rovnice (1.2, 1.31).

Formální časovou derivací (1.50) dostáváme:

$$\dot{\mathbf{R}}_8^0 = \dot{\mathbf{R}}_{8H}^0 \cdot \mathbf{R}_8^{8H} + \mathbf{R}_{8H}^0 \cdot \dot{\mathbf{R}}_8^{8H} \quad (1.51)$$

Z [13] je zřejmé, že časovou derivaci matic rotace lze vyjádřit prostřednictvím vektoru úhlové rychlosti a antisymetrické matice $\mathbf{S}(\star)$:

$$\dot{\mathbf{R}}_8^0 = \mathbf{S}(\omega_8^0) \cdot \mathbf{R}_8^0 \quad (1.52)$$

Dosazením (1.52) do (1.51) dostáváme prvky vektoru úhlové rychlosti ω_8^0 jako lineární kombinace rychlostí zobecněných souřadnic manipulátoru $\dot{O}_8^0[1]$, $\dot{O}_8^0[2]$, $\dot{O}_8^0[3]$, $\dot{\phi}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(\omega_8^0) &= \left(\dot{\mathbf{R}}_{8H}^0 \cdot \mathbf{R}_8^{8H} + \mathbf{R}_{8H}^0 \cdot \dot{\mathbf{R}}_8^{8H} \right) \cdot (\mathbf{R}_8^0)^T \quad \Rightarrow \text{jednoduch. úpravami} \\ \omega_8^0 &= \mathbf{K}_\omega \cdot \begin{bmatrix} \dot{O}_8^0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.53)$$

kde pro svar nátrubku platí:

$$\mathbf{K}_\omega = [k_{i,j}], \quad k_{i,j} = 0 \text{ vyjma:}$$

$$\begin{aligned} k_{1,4} &= -\frac{\mathbf{O}_8^0[1]}{\sqrt{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + z_0^2 - 2z_0\mathbf{O}_8^0[3] + \mathbf{O}_8^0[3]^2}} \\ k_{2,1} &= -\frac{z_0 - \mathbf{O}_8^0[3]}{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + z_0^2 - 2z_0\mathbf{O}_8^0[3] + \mathbf{O}_8^0[3]^2} \\ k_{2,3} &= -\frac{\mathbf{O}_8^0[1]}{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + z_0^2 - 2z_0\mathbf{O}_8^0[3] + \mathbf{O}_8^0[3]^2} \\ k_{3,4} &= -\frac{-z_0 + \mathbf{O}_8^0[3]}{\sqrt{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + z_0^2 - 2z_0\mathbf{O}_8^0[3] + \mathbf{O}_8^0[3]^2}} \end{aligned}$$

A pro **obvodový svar** platí:

$$\mathbf{K}_\omega = [k_{i,j}], \quad k_{i,j} = 0 \text{ vyjma:}$$

$$k_{1,4} = -\frac{\mathbf{O}_8^0[1]}{\sqrt{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + \mathbf{O}_8^0[2]^2}}$$

$$k_{2,4} = -\frac{\mathbf{O}_8^0[2]}{\sqrt{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + \mathbf{O}_8^0[2]^2}}$$

$$k_{3,1} = -\frac{\mathbf{O}_8^0[2]}{\sqrt{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + \mathbf{O}_8^0[2]^2}}$$

$$k_{3,2} = \frac{\mathbf{O}_8^0[1]}{\sqrt{\mathbf{O}_8^0[1]^2 + \mathbf{O}_8^0[2]^2}}$$

Nyní lze dosadit již známou transformaci mezi $\dot{\bar{\mathbf{X}}}$ a $\dot{\mathbf{X}}$ do rovnice (1.48) a dostáváme:

$$\bar{\mathbf{J}} \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A = \dot{\bar{\mathbf{X}}} = \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{X}} \quad (1.54)$$

tedy soustavu 6 rovnic pro 4 neznámé rychlosti aktivních kloubových souřadnic $\dot{\mathbf{Q}}_A$. Vzhledem k tomu, že zřejmě jsou tyto rovnice vzájemně závislé díky závislosti prvků ve vektoru rychlostí $\dot{\bar{\mathbf{X}}}$ který má pouze 4 nezávislé prvky (4DoF manipulátoru), bude mít soustava rovnic právě 4 nezávislé rovnice. Rychlosti $\dot{\mathbf{Q}}_A$ tak lze získat řešení prostřednictvím metody nejmenších čtverců (ovšem přirozeně s nulovou chybou - řešení beze zbytku odpovídá rovnici):

$$\dot{\mathbf{Q}}_A = \dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{X}} \quad (1.55)$$

kde matice $\mathbf{J}^{-1} = ((\bar{\mathbf{J}})^T \cdot \bar{\mathbf{J}})^{-1} \cdot \bar{\mathbf{J}}^T \cdot \mathbf{K} \in \mathbb{R}_{4 \times 4}$ reprezentuje **inverzní kinematický jakobián manipulátoru**. ♦

Poznamenejme, že ze znalosti rychlostí aktivních kloubových souřadnic $\dot{\mathbf{Q}}_A$ lze využít k výpočtu všech rychlostí pasivních kloubových souřadnic $\dot{\mathbf{Q}}_P$ z rovnice (1.46). Známe tedy rychlosti všech kloubů manipulátoru (pasivních i aktivních) a jejich hodnoty jsou vypočítány z požadované polohy a rychlosti zobecněných souřadnic \mathbf{X} a $\dot{\mathbf{X}}$.

Nyní již známe řešení IOKÚ pro rychlosti, IOKÚ pro zrychlení lze řešit dle následujícího algoritmu:

♦ **Algoritmus 4 (IOKÚ - pro zrychlení)**

Časovou derivací rovnice (1.45) vztahující rychlosti aktivních a pasivních kloubových souřadnic manipulátoru získáváme:

$$\dot{\mathbf{J}}_P \cdot \dot{\mathbf{Q}}_P + \mathbf{J}_P \cdot \ddot{\mathbf{Q}}_P = \dot{\mathbf{J}}_A \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A + \mathbf{J}_A \cdot \ddot{\mathbf{Q}}_A \quad (1.56)$$

kde \mathbf{J}_P , \mathbf{J}_A již známe z (1.45) a jejich časové derivace $\dot{\mathbf{J}}_P$, $\dot{\mathbf{J}}_A$ odpovídají časovým derivacím jejich prvků, tedy jednotlivých sloupců kinematických jakobiánů \mathbf{J}_8^0 , \mathbf{J}_{12}^0 kin. řetězců **Chain1**, **Chain2**. Časové derivace jakobiánů \mathbf{J}_8^0 , \mathbf{J}_{12}^0 je možné sestavit opět pouze ze znalostí homogenních transformačních matic kin. řetězců **Chain1**, **Chain2** a rychlostí kloubových souřadnic manipulátoru $\dot{\mathbf{Q}}_A$, $\dot{\mathbf{Q}}_P$ (již známe z řešení IOKÚ pro rychlosti,

viz Algoritmus 3), princip výpočtu časových derivací jakobiánů sériových kin. řetězců lze nalézt v [13].

Zrychlení pasivních souřadnic lze tedy vyjádřit z (1.56) jako:

$$\ddot{\mathbf{Q}}_P = \mathbf{J}_P^{-1} \cdot \left(\dot{\mathbf{J}}_A \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A + \mathbf{J}_A \cdot \ddot{\mathbf{Q}}_A - \dot{\mathbf{J}}_P \cdot \dot{\mathbf{Q}}_P \right) \quad (1.57)$$

Časovou derivací rovnice (1.40) získáváme zrychlení koncového efektoru (opět ve smyslu translačního zrychlení a vektoru úhlového zrychlení, pro uzavřený kin. řetězec přirozeně platí: $\ddot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}} = \ddot{\mathbf{X}}_{\text{Chain2}} = \ddot{\mathbf{X}}$):

$$\ddot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}} = \mathbf{J}_8^0 \cdot \dot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain1}} + \mathbf{J}_8^0 \cdot \ddot{\mathbf{Q}}_{\text{Chain1}} \quad (1.58)$$

Zrychlení jediných pasivních kloubových souřadnic $\ddot{\theta}_6, \ddot{\theta}_7$ kin. řetězce Chain1 lze vyjádřit ze vztahu (1.57) v závislosti na zrychleních (i rychlostech) aktivních kloubových souřadnic jako:

$$\frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} = \ddot{\mathbf{Q}}_P[5 : 6, :] = \mathbf{K}_1 \cdot \ddot{\mathbf{Q}}_A + \mathbf{K}_2 \quad (1.59)$$

kde

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 &= \mathbf{J}_P^{-1} \cdot \mathbf{J}_A[5 : 6, :] \\ \mathbf{K}_2 &= \mathbf{J}_P^{-1} \cdot \left(\dot{\mathbf{J}}_A \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A - \dot{\mathbf{J}}_P \cdot \dot{\mathbf{Q}}_P \right) [5 : 6, :] \end{aligned}$$

Dosazením zrychleních pasivních kloubových souřadnic θ_6, θ_7 z rovnice (1.59) (jediné pasivní souřadnice kin. řetězce Chain1) do rovnice (1.58) a jejím přeuspořádáním získáváme vztah pro zrychlení koncového efektoru manipulátoru:

$$\ddot{\mathbf{X}}_{\text{Chain1}} = \ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{K}_3 + (\mathbf{K}_4 + \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_1) \cdot \ddot{\mathbf{Q}}_A + \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_6 \quad (1.60)$$

kde

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_3 &= \mathbf{J}_A \cdot \dot{\mathbf{Q}}_A \\ \mathbf{K}_4 &= \mathbf{J}_A \\ \mathbf{K}_5 &= -\mathbf{J}_P[5 : 6, :] \\ \mathbf{K}_6 &= -\dot{\mathbf{J}}_P[5 : 6, :] \cdot \dot{\mathbf{Q}}_P[5 : 6] \end{aligned}$$

a $\ddot{\mathbf{X}} = \left[(\ddot{\mathbf{O}}_8^0)^T \quad (\dot{\omega}_8^0)^T \right]^T$ je výsledné zrychlení koncového efektoru.

V poslední řadě opět zbývá provést transformaci 6DoF zrychlení konc. efektoru $\ddot{\mathbf{X}}$, jehož prvky jsou, stejně jako v případě rychlostí, vzájemně závislé, na vektor zrychlení zobecněných souřadnic $\ddot{\mathbf{X}}$. Transformační vztah lze nalézt formální časovou derivací vztahu (1.49):

$$\ddot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{K}} \cdot \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K} \cdot \ddot{\mathbf{X}} \quad (1.61)$$

kde $\dot{\mathbf{K}}$ je časová derivace matice \mathbf{K} , potažmo matice \mathbf{K}_ω , viz rovnice (1.53). Její tvar pro svar nátrubku a obvodový svar lze snadno odvodit a není na tomto místě uveden.

Z rovnice (1.60) tak dosazením (1.61) dostáváme:

$$\mathbf{K}_3 + (\mathbf{K}_4 + \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_1) \cdot \ddot{\mathbf{Q}}_A + \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_6 = \ddot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{K}} \cdot \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K} \cdot \ddot{\mathbf{X}} \quad (1.62)$$

Tedy opět soustavu 6 rovnic pro 4 neznámé zrychlení aktivních kloubových souřadnic $\ddot{\mathbf{Q}}_A$. Ze stejného důvodu, jako v Algoritmu 3 lze řešení IOKÚ pro zrychlení nalézt řešením soustavy metodou nejmenších čtverců jako:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{Q}}_A = \ddot{\mathbf{Q}} = & \\ & = \left((\mathbf{K}_4 + \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_1)^T \cdot (\mathbf{K}_4 + \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_1) \right)^{-1} (\mathbf{K}_4 + \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_1)^T \cdot \\ & \cdot \left(\dot{\mathbf{K}} \cdot \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K} \cdot \ddot{\mathbf{X}} - \mathbf{K}_3 - \mathbf{K}_5 \cdot \mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_6 \right) \quad (1.63) \end{aligned}$$

◆

1.4 Závěr

Předložená zpráva zahrnuje kompletní kinematický model nové architektury manipulátoru pro NDT aplikace svarů potrubí v JE, typicky pro obvodový svar a svar nátrubku. Kinematický model manipulátoru obsahuje výpočet inverzního geometrického modelu (IGM) a inverzní okamžité kinematické úlohy (IOKÚ) pro rychlosti a zrychlení, tzn. výpočet poloh, rychlostí a zrychlení aktivních kloubů manipulátoru (aktuátorů) ze zadanou trajektorii (poloha, rychlost, zrychlení) koncového efektoru manipulátoru (UZ sonda sledující daný typ svaru). Zatímco odvození IGM je specifické pro daný typ manipulátoru, odvození IOKÚ lze snadno rozšířit na libovolný typ neredundantního paralelního manipulátoru, který zkoumaný manipulátor, díky omezení pohybu koncového efektoru tečným kontaktem k ploše potrubí, představuje. V rámci kinematické analýzy byl vytvořen kompletní model manipulátoru v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics a předložené výpočty byly ověřeny na simulačních modelech. Znalost IGM a IOKÚ hraje klíčovou roli nejen pro řízení manipulátoru, ale také pro další analýzu jeho kinematických vlastností (singulární polohy, atd.) a tvorby kompletních dynamických modelů. Ve fázi návrhu manipulátoru se předpokládá, že vytvořené matematické a simulační modely budou využity zejména pro návrh geometrických parametrů manipulátoru a jejich optimalizaci. V současnosti je matematické modely využít přímo k analýze sil a momentů, které budou vyvíjeny na klouby a ramena manipulátoru, k analýze momentů potřebných na aktuátorech (výkony motorů). V okamžiku, kdy máme k dispozici informace o rozměrech a dynamických vlastnostech manipulátoru (hmotnosti, těžiště, momenty setrvačnosti) a požadovaný pohyb koncového efektoru (z generátorů trajektorií pro jednotlivé typy svarů), je možné v režimu inverzní dynamiky (SimMechanics) pozorovat např. požadované momenty na aktuátorech robotu či ostatní silové a momentové působení v kloubech a ramenech manipulátoru (např. síly/momenty, které působí na klouby ve směrech omezující pohyb).

Kapitola 2

Případová studie: Přísavkový manipulátor

Autor: Tomáš Čechura (NTIS, ZČU, tomek89@ntis.zcu.cz)

2.1 Úvod

Vedle návrhové architektury manipulátoru s pevnou vazbou k potrubí je současně vyvíjena architektura mobilního manipulátoru. Hlavní motivací pro vývoj takového manipulátoru je se co největší přiblížení k původní myšlence plně mobilního manipulátoru umožňujícího libovolný pohyb po povrchu kovového neferomagnetického potrubí v omezených prostorových podmínkách po libovolně složité trajektorii.

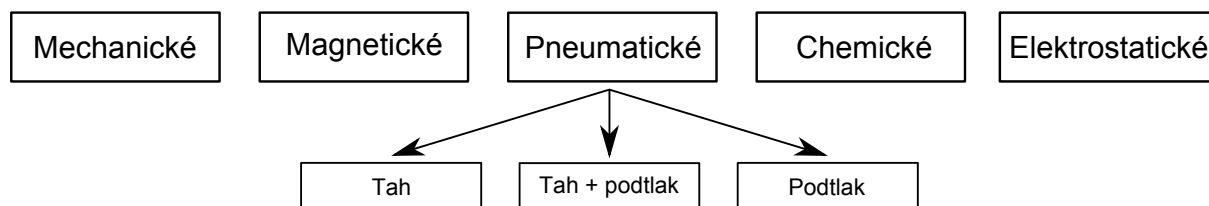
Daný problém lze zobecnit na návrh mobilního manipulátoru schopného pohybu po libovolně orientované ploše. Návrhové limity kladené na manipulátor z důvodu omezených prostorových podmínek v okolí svarů jsou zprvu zjednodušeny jako minimalizace rozměrů manipulátoru.

Zpočátku byly důkladně prozkoumány dostupné technologie současných manipulátorů pro NDT a technologie šplhajících robotů. Shrnutí používaných technologií v současné době je uvedeno v následující kapitole. V současnosti je za automatický průmyslový skener pro NDT považován mobilní robot s přípevněnou diagnostickou jednotkou, který je operátorem posazen na požadované místo potrubí v blízkosti testovaného svaru. Manipulátor pak dle pokynů operátora nebo automaticky provede diagnostiku svaru danou technologií a poskytne naměřená data k dalšímu vyhodnocení.

2.2 Rešerše technologií šplhajících robotů

2.2.1 Technologie adheze

Hlavní technologií, která určí konstrukci a většinu hlavních vlastností manipulátoru, je způsob přilnavosti robotu k podložce. Přilnavost musí spolehlivě vyvolávat takové silové účinky, aby vyrušila působení gravitační síly na hmotu manipulátoru a umožnila tak manipulátoru jeho požadovaný pohyb. Tyto technologie mohou být rozděleny podle účinků přítláčných sil (viz Obrázek 2.1).



Obrázek 2.1: Přehled technologií pro přilnavost robotů

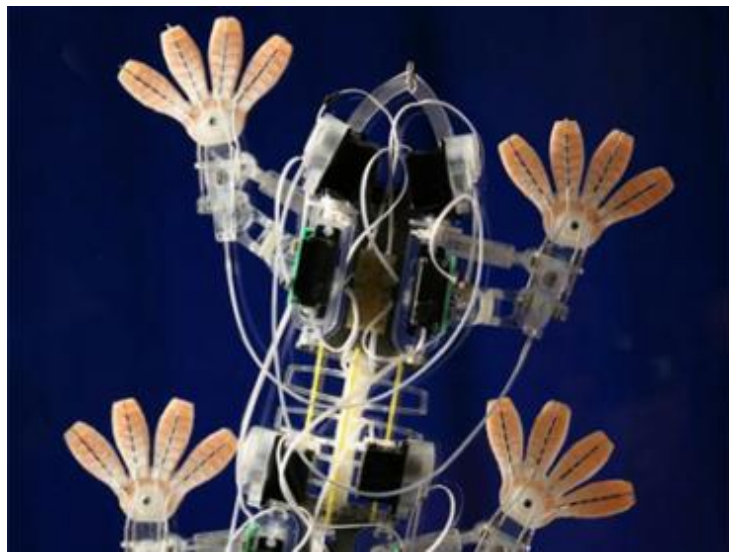
Mechanická adheze využívá obecně struktury a tvaru povrchu, případně dovede vhodným způsobem povrch měnit. Předpokládá se tedy jistá členitost a poddajnost daného povrchu. Příkladem může být SpinybotII [3], který je opatřen množstvím mikroskopických háčků s odpovídajícím odpružením. Vývoj tohoto robotu byl inspirován přírodou - konkrétně lezoucím hmyzem a pavouky. SpinybotII spolehlivě leze po betonu, cihlové zdi a dalších hrubozrnných materiálech. Vzhledem k použití vyvíjeného manipulátoru na hladkém povrchu potrubí je uvažování této technologie nevhodné.

Rozšířenějším přístupem je bezpochyby využití **magnetismu**. V dnešní době existuje mnoho sériově vyráběných servisních manipulátorů s magnetickými kolečky. Technologii magnetických kol používá i servisní robot právě pro nedestruktivní testování svarů od firmy Olympus s označením WeldROVER [8] viz Obrázek 2.2a. Místo určení vyvíjeného

manipulátoru je ve sporu s hlavním předpokladem této technologie - je totiž uvažována diagnostika neferomagnetického potrubí.



(a) Olympus Weld ROVER [8]



(b) StickyBot [4]

Obrázek 2.2: Ukázka šplhajících manipulátorů a robotů I

Chemická adheze využívá vlastností speciálně vyvinutých suchých polymerů. Jako příklad je uveden robot StickyBot [4] (viz Obr. 2.2b) inspirovaný přilnavými polštářky, které mají na svých prstech gekoni. Hlavním úskalím této skupiny technologií je velmi rychlé znehodnocení přilnavých chapadel nečistotami a prachem. Nicméně v poslední době se objevují technologie, které se zabývají samočištěním suchých polymerů. Průmyslové použití je ale zatím nemožné.

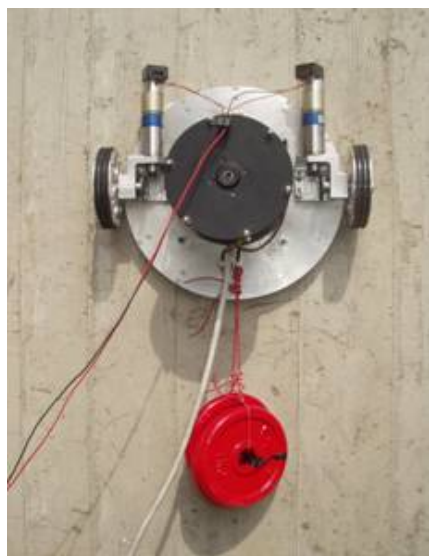
Princip **elektrické adheze** je využíván na vodivých elektrodách, které jsou na povrchu polymeru. Elektrody vytvářejí velmi silný elektrický potenciál a díky rozdílu potenciálů mezi podložkou a elektrodou dochází ke vzniku přitlačné Columbovy síly. Na konferencích se publikují první dosažené výsledky [15], ale k jejich běžnému použití je ještě daleko.

Snad nejpočetnější a nejrozšířenější je skupina využívající všechny možné varianty **pneumatické adheze**. Pneumatické účinky přitlačné síly vznikají rozdílem tlaků. Tuto skupinu můžeme dále rozdělit na roboty a manipulátory využívající podtlak, tah, či jejich kombinaci.

Posuvné přísavky jsou na povrchu přidržovány rozdílem tlaku uvnitř a vně podtlakové komory. Do té je přiváděn podtlak, případně je vytvářen přímo na robotu pomocí k tomu uzpůsobené vývěvy. Zároveň ale nesmí dojít k úplnému přísátí komory, čímž by byl znemožněn vlastní pohyb manipulátoru. Tuto funkci plní vhodně navržené těsnění mezi komorou a povrchem, které nedovolí úplně přísátí, ale udrží uvnitř komory dostatečnou hladinu podtlaku. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících vlastnosti výsledného mobilního manipulátoru je právě použité těsnění. Principu posuvné přísavky využívá například robot Alicia3 [6].

Metoda kombinující podtlak v podobě **posuvné přísavky a tah** vrtule je popsána uvedena v [5]. Vrtule poskytuje tah a zároveň vyvíjí i podtlak. Článek se zabývá zavedením této technologie a vhodným vyvážením obou aspektů vzniku přitlačné síly.

Zařízení s posuvnými přísavkami dávají obecně dostačující výsledky na rovných vertikálních plochách různých povrchů (např. beton, cihlová zeď, omítka, sklo, atp.). Využití této



(a) Alicia3 [6]



(b) Prototyp využívající podtlak a tah [5]

Obrázek 2.3: Ukázka šplhajících manipulátorů a robotů II

technologie na potrubí daných poloměrů je nevhodné, ať už z hlediska zakřivení povrchu potrubí nebo požadavku na přesné polohování diagnostického zařízení.

Další skupinou využívající podtlak jsou **přísavkové roboty a manipulátory**. Jedná se především o kráčející a pásové roboty. Přísavky jsou dnes velmi hojně průmyslově využívány především v robotických manipulátorech a aplikacích „pick and place“. Přísavky se vyrábějí v mnoha provedeních různých materiálů, tvarů a dalších vlastností. Tato technologie je velmi flexibilní a byla zvolena jako nejvhodnější pro návrh plně mobilního manipulátoru již dříve specifikovaných požadavků.

2.2.2 Přísavkové mobilní roboty

Pokud pomineme posuvné přísavky jsou manipulátory s přísavkami především tzv. kráčející. V každém časovém okamžiku musí být pevně spojeno s povrchem tolik přísavek, kolik jich bezpečně udrží tělo robotu na daném místě a zároveň dovolí robotu určitý dynamický pohyb. Při praktickém návrhu velikosti a počtu přísavek je doporučováno vynásobit hmotnost manipulátoru bezpečnostním koeficientem minimálně 2,5.

Přítlačné síly průmyslově používaných přísavek jsou udávány v závislosti na poloměru / průřezu přísavky, úrovni vakua a také směru působící síly (kolmá nebo paralelní s podložkou).

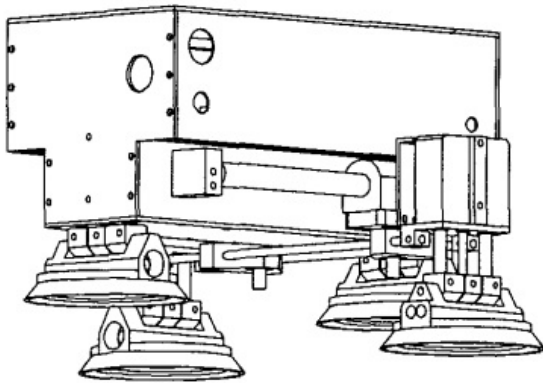
Mobilních robotů využívajících přísavky je mnoho typů. Zde bude uvedeno několik zástupců s různými konfiguracemi podvozků a rozestavení přísavek.

Robot **Robicen III** [11] (Obrázek 2.4a) byl vyvinut pro inspekci cylindrických tanků v jaderných elektrárnách. Podvozek složený ze dvou dvojic přísavek mu umožňuje kráčivý pohyb, kdy vždy minimálně jedna dvojice protilehlých přísavek zabezpečuje pevný styk s povrchem. Pohon robotu je zajištěn pneumatickými písty. Dva písty obstarávají vzájemný pohyb dvojic přísavek a další dva písty zvedají a pokládají tělo robotu.

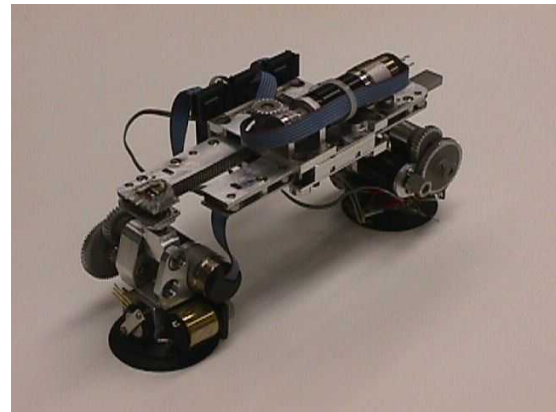
Robot **Crawler** [16] (Obrázek 2.4b) je dvounohý chodící robot opatřený přísavkou na každém konci nohy. Každou nohu tvoří dva krokové motory umožňující rotaci nohy ve dvou

kolmých osách. Hřebenový pohon formuje tělo robotu a díky němu může být vzdálenost mezi oběma nohama prodlužována a zkracována. Tím je umožněn pohyb robotu.

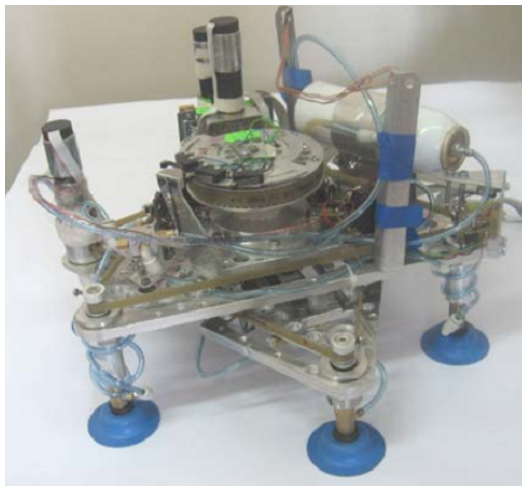
Na Obrázku 2.4c je popsána konstrukce **mobilního přísavkového servisního robotu** [1]. Řešení využívá dvou navzájem se překrývajících trojúhelníkových platform, díky čemuž nedochází při pohybu k výraznému posunu těžiště. Pohyb robotu je způsoben vhodným pohybem a natočením jedné platformy vůči druhé. Krokovými motory je ovládán pohyb přísavek jedné platformy nahoru a dolů i relativní pohyb mezi platformami.



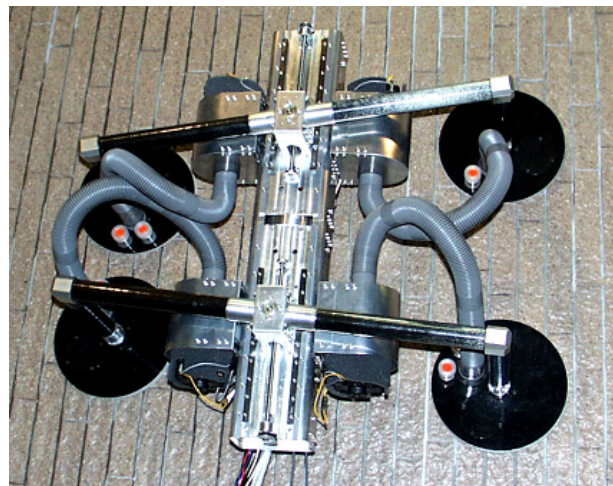
(a) Robicen III [11]



(b) Crawler [16]



(c) Mobilní přísavkový servisní robot [1]



(d) Robot s redukováným počtem stupňů volnosti [9]

Obrázek 2.4: Přísavkové mobilní roboty

Při návrhu **čtyřnohého robotu** (Obrázek 2.4d) popsaného v článku [9] byl kladen důraz na redukcí poháněných stupňů volnosti. Každá noha je složena z ramene, podtlakové přísavky a miniaturní vakuové vývěvy. O pohyb celého robotu se starají pouze tři servomotory. Pohyb po nakloněném povrchu „hlavou dolů“ je zatím problematický, protože robot není vybaven žádným mechanismem, který by udržoval tělo robotu u povrchu a nedocházelo by tak k jeho odklonu.

Uvedená rešerše mapuje jen zlomek prozkoumaných článků a technologií a poskytuje pouze základní náhled do problematiky konstrukce a vývoje mobilních manipulátorů. Slouží však jako jistá inspirace a je nedílnou součástí návrhu manipulátorů nových architektur.

2.3 Konstrukce prototypového manipulátoru

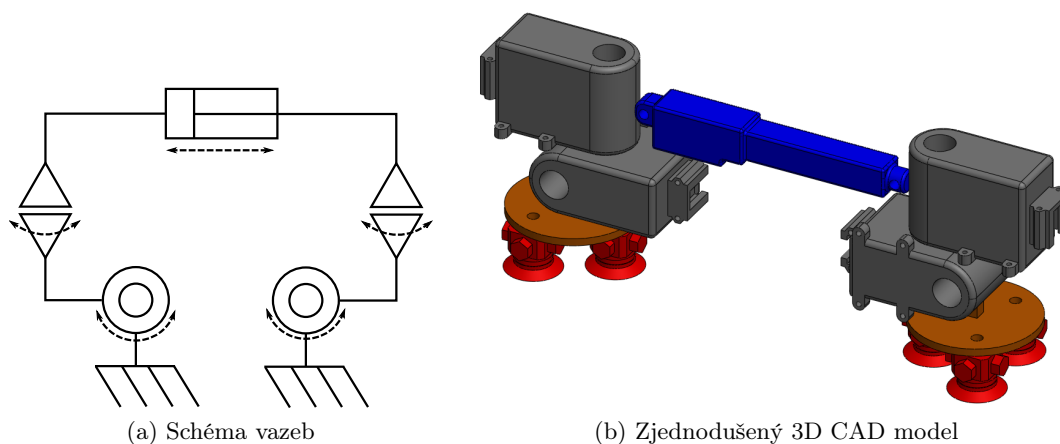
Teoretický základ byl využit pro sestavení prototypového přísavkového manipulátoru. Motivací sestavení prototypu bylo ověření základních poznatků při použití přísavek v kráčejícím mobilním manipulátoru.

2.3.1 Mechanická konstrukce

Požadavky na mechanickou konstrukci byly zformulovány následovně:

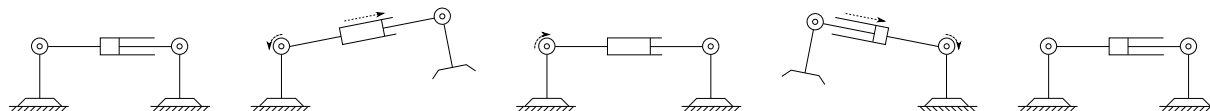
- minimální rozměry z důvodu prostorových dispozic
- minimální hmotnost pohybovaných součástí mobilního manipulátoru
- jednoduchá mechanická konstrukce umožňující libovolný pohyb po povrchu

Postupným návrhem byla odsouhlasena architektura robotu vyobrazena na Obrázku 2.5. Obrázek 2.5a znázorňuje jednotlivé vazby - manipulátor je vybaven čtyřmi rotačními vazbami a jednou posuvnou vazbou.



Obrázek 2.5: Konstrukce prototypu mobilního manipulátoru

Zjednodušená vizualizace uvedená na Obrázku 2.5b přibližuje konstrukci robotu s již konkrétními použitými prvky (viz Tabulka 2.1). Tato symetrická architektura dovoluje robotu kráčivý pohyb připomínající pohyb „píďalky“. Vždy minimálně jedna noha musí být pevně přisáta k podložce. Krok manipulátoru se skládá ze sekvence po sobě jdoucích elementárních pohybů - Obrázek 2.6 .



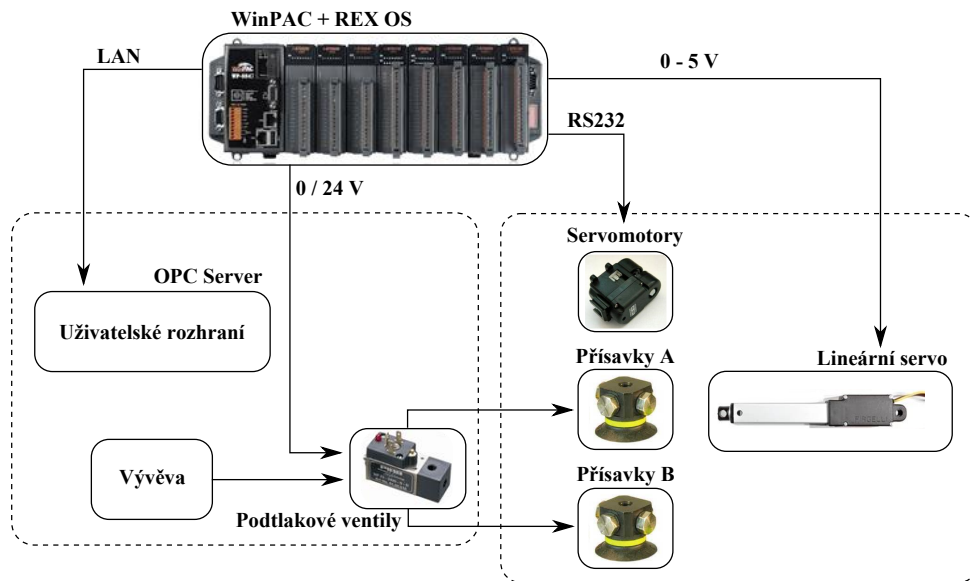
Obrázek 2.6: Zjednodušená sekvence kroku manipulátoru

Položka	Typ
Přísavky	6x PIAB F20
Servomotory	4x MEGAROBOTICS AI 701
Lineární servo	Firgelli L-12, 50 mm

Tabulka 2.1: Použité konstrukční prvky a aktuátory

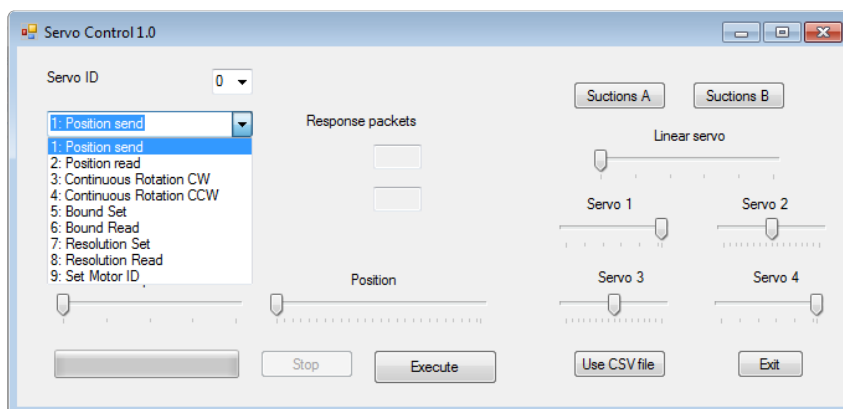
2.3.2 Řídicí systém

Dále byl vyvinut jednoduchý řídicí systém, kterým je mobilní manipulátor ovládán. Průmyslový počítač WinPAC s řídicím systémem REX [10] zajišťuje komunikaci se všemi pohony a poskytuje data pro vizualizaci a uživatelské rozhraní. Blokové schéma navrženého systému je uvedeno na Obrázku 2.7. Servomotory jsou řízeny pomocí seriové linky, lineární servomotor pak napětovým rozsahem 0-5 V. Externí vývěva dodává neustále podtlak, který je distribuován podtlakovým vedením přes spínané ventily k přísavkám. Uživatelské rozhraní využívá OPC server implementovaný v RS REX a přes počítačovou síť LAN přistupuje ke všem klíčovým hodnotám řídicího systému manipulátoru.



Obrázek 2.7: Blokové schéma robotu

Uživatelské rozhraní (viz Obrázek 2.8) umožňuje spravovat a ovládat servomotory a lineární pohon. V levé části uživatelského okna je možné nastavovat parametry jednotlivých servomotorů. Část pravá pak umožňuje manuálně ovládat jednotlivé klouby manipulátoru.

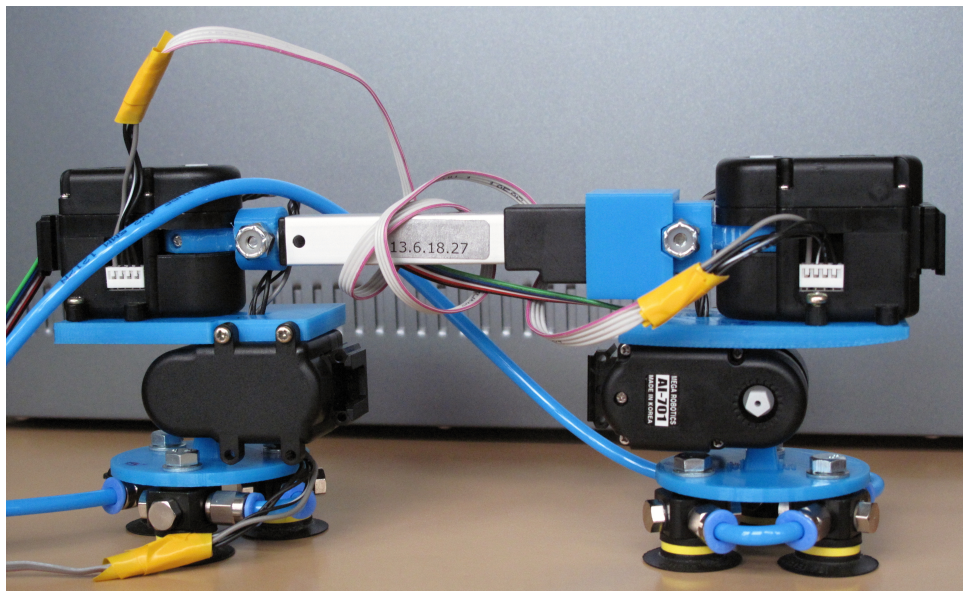


Obrázek 2.8: Screenshot uživatelského rozhraní

Řídicí systém je zatím velmi primitivní. Jedná se pouze o programové řízení bez zpětné vazby od senzorů. Nicméně poskytuje stabilní základ pro odzkoušení potřebných vlastností celé konstrukce prototypového mobilního manipulátoru.

2.4 Dosažené výsledky

Vlastní konstrukce robotu byla provedena za pomoci prototypových součástí vytištěných na 3D tiskárně z modrého PLA plastu. Celý prototyp byl vyvinut a postaven s důrazem na minimální náklady a co největší využitelnost prvků, které jsou k dispozici v laboratořích Katedry Kybernetiky, ZČU. Cílem tohoto prototypu bylo praktické vyzkoušení vlastností přísavek a jejich použitelnost k účelům nedestruktivního testování svaru potrubí v jaderných elektrárnách.



Obrázek 2.9: Prototyp mobilního manipulátoru

Prototyp vyobrazený na Obrázku 2.9 je schopen pohybu po horizontální ploše bez velkých děr a nerovností. Chůze a pohyby po vertikální ploše jsou možné s určitými omezeními. Tato omezení jsou ale způsobena pouze použitými servomotory, jejichž točivý moment není dostačující vzhledem k hmotnosti konstrukce mobilního manipulátoru.

2.5 Plánované cíle

Blízké cíle tohoto projektu jsou především co možná nejvíce využít sestavený prototyp k testování jeho funkčnosti a hledání mezí a hranic použitelnosti. Zjištěná data a informace budou použity pro vývoj nového prototypového zařízení, schopného uspokojit všechny na něj kladené požadavky.

Dále bude zavedena regulační smyčka pomocí zpětné vazby od senzorů. Zejména budou implementovány podtlakové senzory do přísavek k určení stavu přísátí robotické nohy k podložce.

Programové řízení bude nahrazeno řízením pomocí vizuální zpětné vazby. Robot tak bude schopen sledovat požadovanou trajektorii v okolí testovaného svaru. Z tohoto důvodu je nutné provést kompletní kinematickou a dynamickou analýzu mobilního manipulátoru. Vizuální zpětná vazba vyžaduje zpracování obrazové informace z okolí robotu. Tyto informace budou následně využity pro řízení akčních prvků manipulátoru.

Vývoj nového prototypového zařízení bude usnadněn díky informacím získaným praktickým vývojem tohoto jednoduchého mobilního manipulátoru.

Literatura

- [1] Alexandrescu, N.; Apostolescu, T. C.; Udrea, C.; aj.: Autonomous mobile robot with displacements in a vertical plane and applications in cleaning services. In *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2010 - Proceedings*, ročník 1, 2010, s. 265–270.
- [2] Khalil, W.; Dombre, E.: *Modeling, Identification and Control of Robots*. Kogan Page Science paper edition, Elsevier Science, 2004, ISBN 9780080536613.
URL <http://books.google.cz/books?id=nyrY0Pu5k10C>
- [3] Kim, S.; Asbeck, A. T.; Cutkosky, M. R.; aj.: SpinybotII: Climbing Hard Walls With Compliant Microspines. In *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics*, 2005, s. 601–606.
- [4] Kim, S.; Spenko, M.; Trujillo, S.; aj.: Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. *IEEE Transactions on Robotics*, ročník 24, č. 1, 2008: s. 65–74.
- [5] Li, J.; Gao, X.; Fan, N.; aj.: Wall climbing robot based on negative pressure-thrust suction method. 2008, doi:10.1109/ICMA.2008.4798825.
- [6] Longo, D.; Muscato, G.: The Alicia 3 climbing robot: A threemodule robot for automatic wall inspection. *IEEE Robot. Autom. Mag.*, , č. 13, 2006: s. 42–50.
- [7] MathWorks, T.: *SimMechanics User's Guide*, www.mathworks.com.
- [8] Olympus: Pokročilé NDT Technologie. [Online], [cit. 2013-12-20].
URL <http://www.olympus-ims.com/cs/scanners/weldrover/>
- [9] Ota, Y.; Kuga, T.; Yoneda, K.: Deformation compensation for continuous force control of a wall climbing quadruped with reduced-DOF. In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, 2006, ISSN 1050-4729, s. 468–474, doi:10.1109/ROBOT.2006.1641755.
- [10] RexControls: Řídicí systém REX. [Online], [cit. 2013-12-20].
URL <http://www.rexcontrols.cz>
- [11] Savall, J.; Avello, A.; Briones, L.: Two compact robots for remote inspection of hazardous areas in nuclear power plants. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ročník 3, 1999: s. 1993–1998.
- [12] Sciavicco, L.; Siciliano, B.: *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer London, 2000, ISBN 9781852332211.
URL <http://books.google.fr/books?id=v9PLbcYd9aUC>

- [13] Švejda, M.: Kinematika robotických architektur. Katedra Kybernetiky, ZČU v Plzni (online: http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/rigo.pdf), 2011.
- [14] Švejda, M.: Manipulátor pro NDT (varianta 2: RRPR manipulátor). Technická zpráva, Katedra Kybernetiky, ZČU v Plzni (online: http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2013/6_generatorUJVrobot.pdf), 2013.
- [15] Wang, H.; Yamamoto, A.; Higuchi, T.: Electrostatic-motor-driven electroadhesive robot. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, s. 914–919.
URL www.scopus.com
- [16] Xiao, J.; Minor, M.; Dulimarta, H.; aj.: Modeling and control of an under-actuated miniature crawler robot. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, ročník 3, 2001, s. 1546–1551.