

TAČR: Pokročilé robotické architektury pro průmyslové inspekce (ADRA-2I)

Číslo projektu: TF02000041

Analýza trhu a dostupných robotických technologií pro průmyslovou inspekci (O)

(Odborná zpráva)

Martin Švejda (ZCU)

21. ledna, 2017

T A
Č R

Identifikátor společnosti:

ZČU - Západočeská univerzita v Plzni, SM - SmartMotion s.r.o., UJV - ÚJV Řež, a. s

1 Úvod

Předložená technická zpráva se zabývá analýzou trhu a dostupných robotických technologií pro průmyslovou inspekci. Na základě získaných znalostí je zpracována dále prvotní analýza možností konstrukce, HW instrumentace a algoritmů řízení pro účely NDT inspekce především potrubních svarů v případech, kdy standardní koncepce inspekčních robotů selhávají z důvodu silně omezeného prostoru v okolí pohybu robotu. Předložené zpráva tak shrnuje pokročilé rešeršní práce a návrh vlastního řešení tak, aby byla maximálním možným způsobem konkretizována představa o budoucí podobě *prototypu multi-redundantního robotu pro nedestruktivní průmyslovou inspekci*.

Předložená zpráva je chápána jako stručný přehled dosažených výsledků v prvním roce řešení projektu. Detailní popisy dílčích částí jsou obsaženy v technických zprávách (viz "Seznam odkazovaných výzkumných zpráv" na konci dokumentu).

2 Rešerše stávajících technologií pro kontrolu potrubních svarů

V rámci doplňující rešerše a aktualizace současného stavu robotických zařízení pro inspekční postupy v technologických provezech včetně některých vývojových variant byla vypracována obsáhlá výzkumná zpráva [8].

3 Analýza konstrukce a řízení robotu, plánování trajektorie

V rámci navazujících rešeršních průzkumů byly nalezeny některé dostupné řešení konstrukce snake-like robotů, viz následující odkazy:

Konstrukční řešení:

<https://www.youtube.com/watch?v=v6W-sEpJEqY>

<https://www.youtube.com/watch?v=cJuNe50uuzk>

<https://www.youtube.com/watch?v=Ocyhbij9JYQ>

https://www.youtube.com/watch?v=_5PplUmtEvA

<https://www.youtube.com/watch?v=PC2hsu0jTbo>

<https://www.youtube.com/watch?v=oat582SaTko>

<https://www.youtube.com/watch?v=7Z5fzD9yvQs>

https://www.youtube.com/watch?v=_gU6TWGynkU

<https://www.youtube.com/watch?v=EUEp-AfvvzE>

<https://www.youtube.com/watch?v=IJxdf13JHKU>

<https://www.youtube.com/watch?v=tSR5NpPMnls>

Studie pohybu:

<https://www.youtube.com/watch?v=veQHVnKQRLI>
<https://www.youtube.com/watch?v=FInq8fZKAy0>
<https://www.youtube.com/watch?v=4GG9F25NiZM>
<https://www.youtube.com/watch?v=4suuvryJFgU>
<https://www.youtube.com/watch?v=ZYYeUQImkaA>
<https://www.youtube.com/watch?v=Q7fajmeNFMs>
<https://www.youtube.com/watch?v=SjHd3ezHac0>
<https://www.youtube.com/watch?v=orWmDO13k9Y>
<https://www.youtube.com/watch?v=LDYDMqJSD90>
<https://www.youtube.com/watch?v=TMAmqBBwb9I>
<https://www.youtube.com/watch?v=MaG0p2PWuRI>
https://www.youtube.com/watch?v=4r3vUI3yc_k
<https://www.youtube.com/watch?v=GeirgHVc9WE>
https://www.youtube.com/watch?v=jpbOE1wH_6w
<https://www.youtube.com/watch?v=EeSUPTAz2MM>
<https://www.youtube.com/watch?v=PC2hsu0jTbo>

Ze získaných informací a zkušeností řešitelů/konstruktérů byly s ohledem na plánovanou aplikaci NDT v silně omezených prostorových podmínkách identifikovány klíčové problémy, které znemožňují použití prohledaných variant, jedná se zejména o:

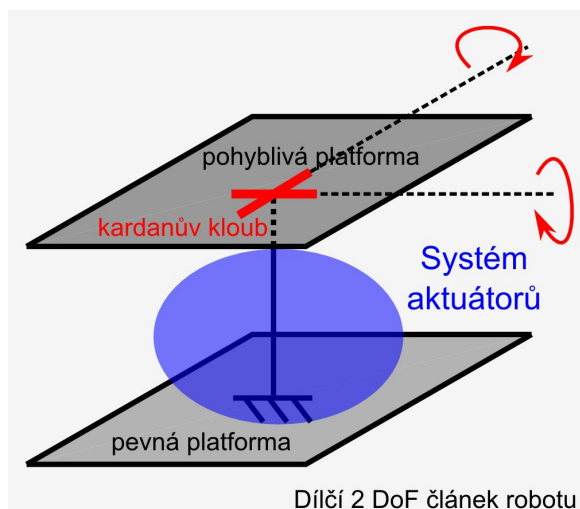
- Drtivá většina nalezených řešení je konstruována pro pohyb snake-like robotu ve smyslu “plazení” (odvalování, sunutí, atd.) po povrchu - není tedy nutné držet celé tělo robotu ve volném prostoru.
- Celá řada konstrukčních řešení je příliš velká, než aby ji bylo možné použít pro NDT aplikace v omezených zástavbách.
- Algoritmy řízení pohybu nalezených řešení jsou formulovány na základě podoby pohybu se skutečnými hady v přírodě.
- Často je alespoň dílčí část instrumentace řídicího systému realizována mimo vlastní “tělo” robotu (externí rozvaděčové skříně, atd.)

Z výše uvedených důvodů bylo hledáno vhodné kompaktní řešení pro vlastní konstrukci snake-like robotu, které bude splňovat především následující předpoklady:

- Subtilní konstrukce (možná kombinace více konstrukčních technologií)
- Integrovaná elektronika v dílčích člancích robotu (propojení dílčích článků pouze napájením a komunikací)
- Inteligentní systém řízení zahrnující především možnosti tvarování (optimalizace) těla robotu za účelem minimalizace zaujímaného prostoru a/nebo překonávání dílčích překážek (typicky např. tlumiče švihu potrubních systémů, odbočky - odběry, fixační konstrukce, atd.)
- Intuitivní systém plánování pohybu robotu (vzhledem ke známým inspekčním postupům v oblasti NDT svarových spojů)

3.1 Alternativní koncepce konstrukce snake-like robotu

V první fázi byly analyzovány možnosti *alternativní* konstrukce dílčích článků snake-like robotu, které oproti *konvenčnímu* řešení, viz Kapitola 3.2, potenciálně umožňují menší konstrukci akčních členů zpravidla založené na jiném než motorovém principu (rotační/lineární aktuátory s elektrickými rotačními pohony). V rámci projektu byly uvažovány dvě alternativní varianty pohonu dílčího článku snake-like robotu realizovaného jako 3 DoF tripod - tři rotační stupně volnosti, viz Obrázek 1.



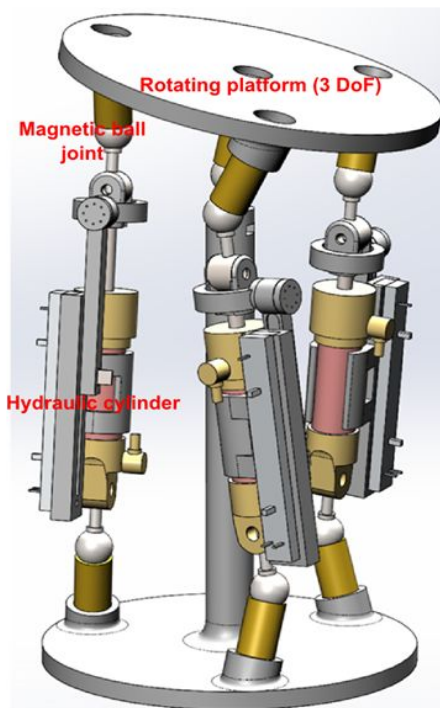
Obrázek 1: 2 DoF článek robotu - tripod (bez konkrétního systému aktuátorů)

Aktuátory na principu hydraulických válců

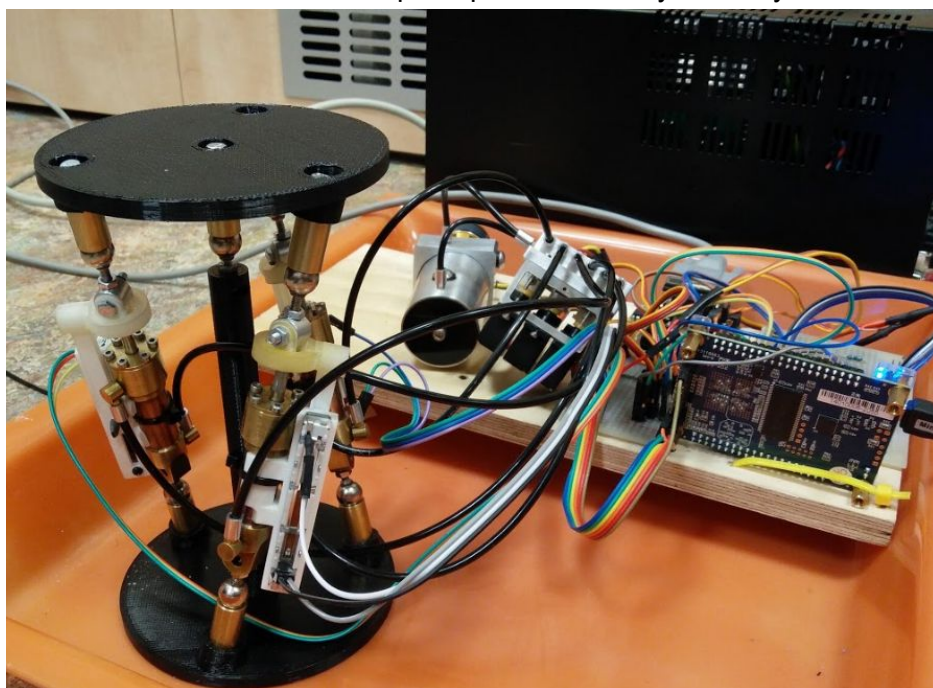
Vzhledem k požadovaným vlastnostem polohování dílčích článků snake-like robotu (zejména malý rozměr, síla, přesnost, tuhost) byly podrobně prozkoumány možnosti realizace systémů aktuátorů prostřednictvím *mikro-hydraulického systému*. K ověření navrženého principu byl realizován prototyp hydraulického tripodu, viz Obrázek 2 (CAD model) a Obrázek 3 (vlastní prototyp). Prototyp byl založen na mikrohydraulických aktuátorech (válců, rozvaděče, čerpadlo) určených pro hobby účely a dodávané firmou MAGOM HRC, speciálních magnetických kulových kloubech a vlastní prototypové konstrukci (3D tisk). Detaily konstrukčních prací, řídicího systému a zhodnocení výsledků lze nalézt v [1].

Bohužel, po zhodnocení dosažených přínosů navrženého řešení bylo dále rozhodnuto v této alternativní variantě aktuátorů tripodu dále nepokračovat, a to z následujících důvodů:

- Nedostatečná kvalita hydraulických komponent (zejména elektrohydraulický proporcionální rozvaděč) => zásadní problémy při polohovém řízení
- Kvalitní mikrohydraulické komponenty jsou velmi drahé a často příliš velkých rozměrů znemožňující efektivní použití
- Navýšení principiálně odlišné instrumentace řídicího systému (olejové hospodářství, atd.)



Obrázek 2: CAD model tripodu poháněného hydraulickými válci



Obrázek 3: Vlastní realizace prototypu

Aktuátory na principu nitinolových (flexinolových) drátů

Další prozkoumanou možností systémů aktuátorů tripodu byla relativně moderní technologie na základě tzv. Smart Wires (Muscle Wires, Shape-memory alloy), neboli drátů s tvarovou pamětí. Jedná se o nitinolové (Nickel Titanium) dráty s častým obchodním názvem Flexinol.

Uvažované nasazení nitinolových drátů spočívá v jejich využití jako lineární (jednosměrné) aktuátory pro polohování pohyblivé platformy článku snake-like robotu.

Za účelem odzkoušení možností silového/polohového řízení samotných nitinolových drátů a následně prototypového řešení dílčího článku robotu, byl vyvinut spoluřešitelem SM testovací stand [2], viz Obrázek 4.

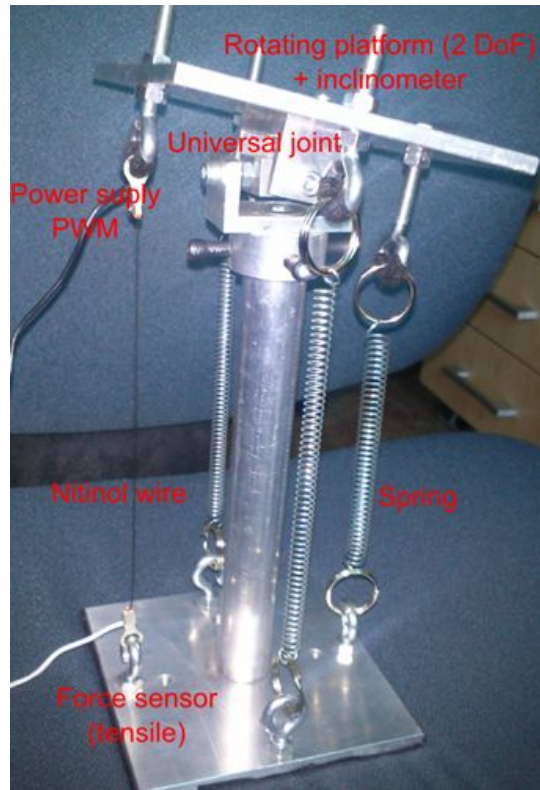
Přesto, že nitinolové dráty jako aktuátory tripodu přinášejí řadu komplikací (konstrukčních i s ohledem na samotné řízení), které musejí být řešeny, existuje zde několik zásadních faktorů, které byly vyhodnoceny jako klíčové pro konstrukci snake-like robotu, jedná se především o následující:

- (Pohybový) akční člen s bezkonkurenčně jednoduchým principem (protékaný elektrický proud nitinolovým drátem jej zahřívá, a v důsledku toho je drát zkracován, po vychladnutí je opět drát navrácen do své původní délky)
- Lehký a levný aktuátor - možnost řetězení za sebou v člancích robotu
- Relativně velké vyvinuté síly (byť s malým rozsahem pohybu - zkrácení v hodnotách cca 3 - 5% délky)
- Vysoká mechanická pevnost

V rámci další pokročilé analýzy možností reálného nasazení nitinolových aktuátorů byly provedena rozvaha nad možnostmi (polohového) řízení nitinolových drátů, a to ve dvou úrovních:

1. HW instrumentace pro měření klíčových veličin a generování akčních zásahů:

Vzhledem k potřebě přesného měření napětí, proudu (potažmo odporu nitinolového drátu) a dále síly nitinolovým drátem vyvíjené, orientace pohyblivé platformy a generování výkonových akčních zásahů (PWM), byl zahájen prvotní vývoj speciální analogové měřicí karty, která poskytuje odpovídající možnosti. Na základě dosažených zkušeností lze předpokládat, že analogová měřicí karta bude moci být v konečném řešení integrována přímo do článku (tripodu) robotu a přes konkrétní komunikační protokol propojena s řídicím systémem robotu. Prvotní návrh analogové měřicí karty, včetně základního funkčního popisu, realizace a testování je shrnut ve výzkumné zprávě [3].



Obrázek 4: Testovací stand (2 DoF článek) robotu s aktuátory na principu nitinolových drátů

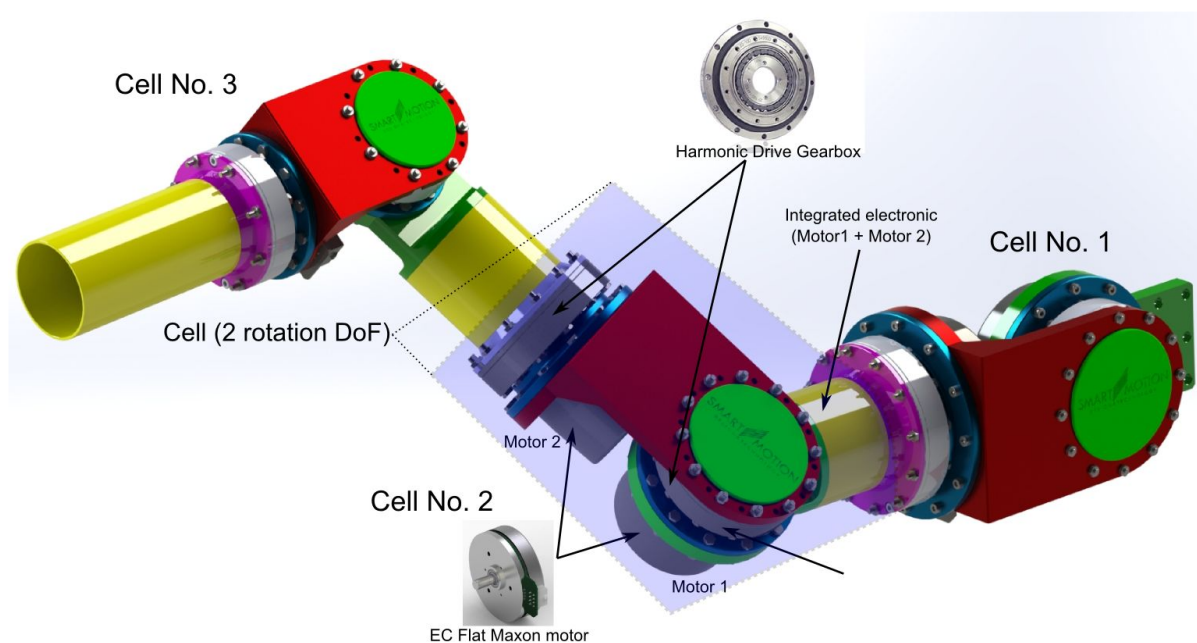
- 2. Možnosti řízení polohy nitinolových drátů:** Řízení polohy nitinolových drátů a potažmo řízení celého testovacího standu na Obrázku 4 (dočasné pružiny nahrazeny nitinolovými dráty) je relativně komplikovaná úloha, která kombinuje řízení síly a polohy samotných drátů včetně některých podpůrných režimů (boost, ochrana proti přehřátí, anti-slack mechanismus, atd.) a kinematické/dynamické modelování paralelního robotu (tripodu) s lineárními aktuátory s jednostranným působením (nitinolové dráty). Za účelem analýzy možností řízení tripodu ve funkci dílčího článku snake-like robotu byla vyhotovena základní studie zahrnující virtuální model tripodu včetně návrhu řízení a zhodnocení dosažených simulačních výsledků [4].

3.2 Finální návrh konstrukce snake-like robotu

Přesto, že realizace článků snake-like robotu prostřednictvím tripodu s lineárními aktuátory (nitinolovými dráty) bude nadále rozvíjena, a z dosavadních výsledků lze předpokládat, že bude možné takový princip skutečně nasadit na vyvíjeném prototypu, existuje zde několik problémů vyplývajících z komplexnosti samotného řízení, jedná se zejména o:

- Řízení polohy nitinolových drátů v okolních (průmyslových) podmínkách způsobující nedefinovatelné ochlazování
- Mechanická pružnost systému - tuhost systému
- Omezený rozsah pohybu
- Nestandardní řešení => riziko dalšího odhalení kritických problémů v rámci dalších experimentů

Právě z výše uvedených důvodů bylo přistoupeno k možnosti realizovat prvních několik článků snake-like robotu nějakým standardním (konvenčním) přístupem. Na základě intenzivní spolupráce ZČU se spoluřešitelem SM byl vytvořen základní koncept 2 DoF konvenčního článku snake-like robotu [2], viz Obrázek 5, realizovaný jako rotační aktuátor se dvěma kolmými osami rotace osazený motorem, převodovkou, enkodérem a integrovanou elektronikou vlastního vývoje.



Obrázek 5: Koncept (trojice) konvenčních článků snake-like robotu

Současně byla navržena instrumentace pohony firmy *Maxon motor ag* (www.maxonmotor.com/) a převodovkami firmy *Harmonic drive LLC* (<http://www.harmonicdrive.net/>) včetně jejich typových řad pro použití v navrženém konvenčním řešení (provedena základní statická rozvaha momentového zatížení, viz [2]). Typové označení motorů a převodovek je shrnuto v Tabulce 1.

Článek č.:	Motor	Převodovka
1	MAXON: EC 90 flat	Harmonic Drive AG: SHD-20-160-2SH
2	MAXON: EC 60 flat	Harmonic Drive AG: SHD-17-100-2SH
3	MAXON: EC 45 flat	Harmonic Drive AG: SHD-17-100-2SH

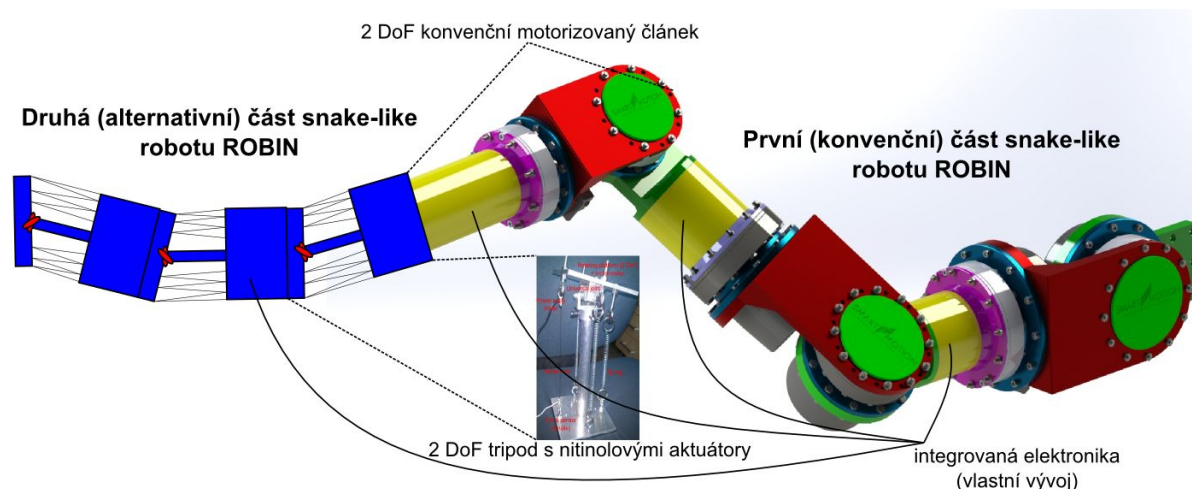
Tabulka 1: Typové označení předpokládaných použitých motorů a převodovek

Klíčové výhody použití konvenční konstrukce článků snake-like robotu jsou následující:

- Standardní konstrukční řešení
- Bohaté zkušenosti řešitelů (ZČU, SM) se řízením motorizovaných zařízení a robotů
- Dostupné řídicí jednotky motorů (např. EPOS2, MAXPOS, atd. od Maxon motor) pro testovací účely - před dokončeným vývojem vlastní integrované elektroniky

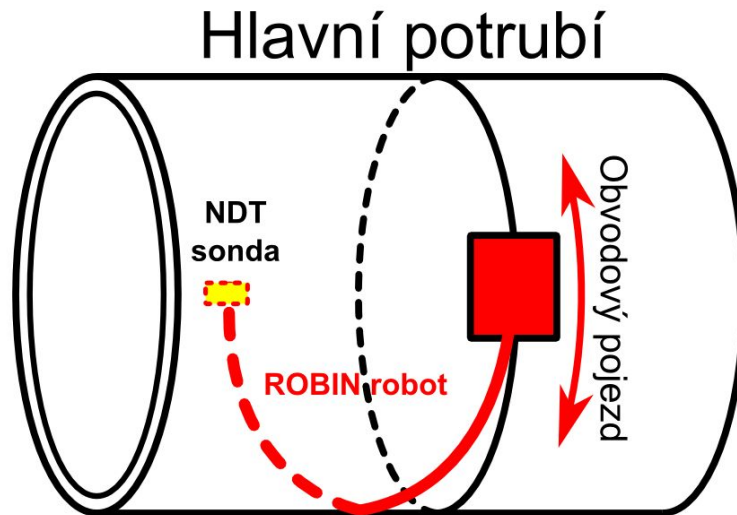
Finální navržené konstrukční řešení snake-like robotu ROBIN

Na základě dosavadních zkušeností bylo rozhodnuto, že finální podoba snake-like robotu bude realizována dvěma částmi, a to: **první konvenční částí robotu** (trojice 2 DoF konvenčních motorizovaných článků, viz Obrázek 5) a **druhou alternativní částí robotu** (zatím blíže nespécifikovaný počet 2DoF tripodů s nitinolovými aktuátory, viz Kapitola 3.1). Základní schématické zobrazení obou částí snake-like robotu, který byl pracovně pojmenován **ROBIN (ROBOTic INSpection)** je znázorněno na Obrázku 6.



Obrázek 6: Koncepční architektura snake-like robotu ROBIN

Dále se předpokládá, že vzhledem k použití robotu pro inspekce potrubí bude první konvenční část robotu vybavena obvodovým pojezdem okolo potrubí, viz Obrázek 7, na kterém bude robot fixován. Systémy uchycení a řízení pohybu obvodového pojezdu robotu okolo potrubí je řešitelům dobře znám a lze předpokládat využití stávajících znalostí z předchozích výzkumných projektů (TAČR č. TA01020457: *Výzkum, vývoj a validace univerzální technologie pro potřeby moderních ultrazvukových kontrol svarových spojů*

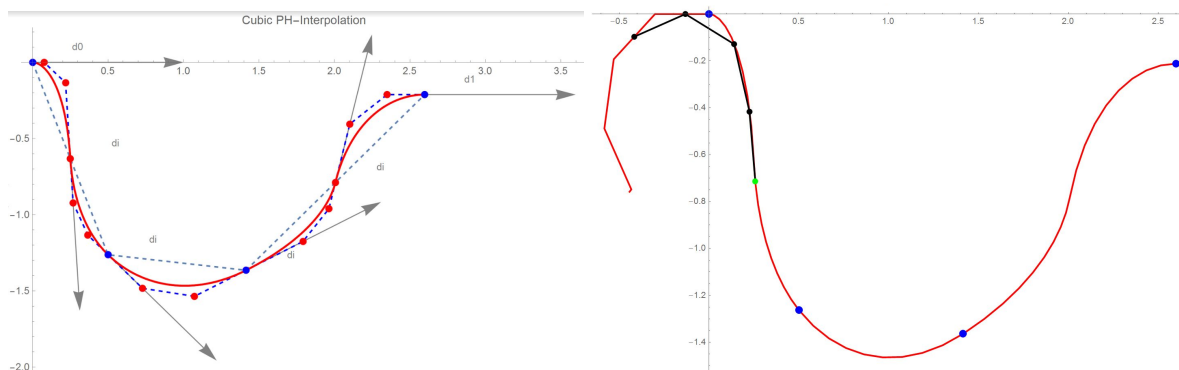


Obrázek 7: Umístění robotu ROBIN na obvodovém pojezdu

Navržené principy řízení pohybu robotu ROBIN

Vzhledem ke speciálnímu použití snake-like robotu pro průmyslové inspekce (zejména potrubních svarů komplexních technologických provozů) je nutné hledat odpovídající způsoby řízení robotu a často tak nelze vycházet ze známých algoritmů řízení pohybu snake-like robotů. V rámci přípravné fáze k vývoji konkrétních algoritmů pohybu robotu ROBIN byly analyzovány dva přístupy:

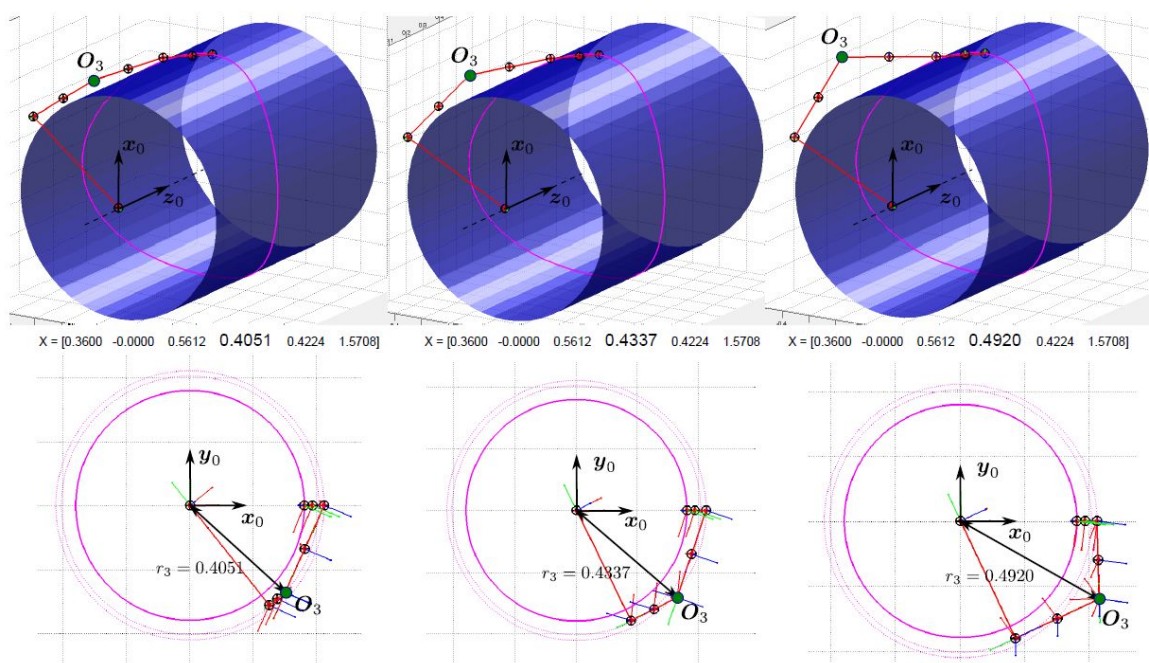
1. **Operátorské navádění robotu po definované křivce, viz Obrázek 8:** Definovanou křivkou rozumíme konkrétní trajektorii těla robotu, podél které se bude robot pohybovat v důsledku "odvíjení" svého těla po obvodu potrubí prostřednictvím obvodového pojezdu. Možnosti generování cesty, s ohledem na překonávání překážek, projetí prostupy, apod., je společně s metodami generování trajektorií pohybu a ustavování těla robotu na danou křivku diskutováno v technické zprávě [5].



Obrázek 8: Interpolace zadaných (modrých) bodů PH křivkou (vlevo) a pohyb těla robotu podél křivky (vpravo).

2. **Optimální řízení redundantních DoF robotu, viz Obrázek 9:** V dostupně známých aplikacích NDT potrubních svarů a dalších technologických komponent je často

koncový efektor manipulátoru vybaven držákem NDT sondy, který pasivně zajišťuje (klopný mechanismus) dosednutí sondy na zkoumaný povrch (2 rotační DoF). Cílem manipulátoru je tak polohovat pouze translaci (3 DoF - poloha sondy v prostoru) a rotaci čela sondy (1 DoF). Ve výzkumné zprávě [6] je analyzována možnost optimálního (kinematického) řízení první (konvenční) části robotu ROBIN s ohledem na požadované tvarování těla robotu (konkrétně vzdálenosti "loktů" od povrchu potrubí) za účelem minimalizace zaujímaného prostoru robotem a/nebo obcházení překážek na povrchu potrubí.



Obrázek 9: Příklad řízení vzdálenosti prvního lokte (bodu O_3) konvenční části robotu s obvodovým pojezdem od povrchu potrubí

Navržené řešení integrované řídicí elektroniky robotu ROBIN

Vzhledem k rozměrovým požadavkům na vyvíjený prototyp robotu ROBIN nelze využít standardní osazení řídicí elektroniky robotu ve formě samostatných rozvaděčových skříní (jak bývá běžné u průmyslových robotických systémů), neboť v důsledku velkého počtu aktuátorů a senzorů není možné (z technických ani konstrukčních důvodů) vézt samostatnou kabeláž od každého dílčího pohonu. Samostatné řídicí jednotky motorů (Maxon EPOS2, MAXPOS), případně speciální testovací I/O karty pro řízení nitinolových drátů [3] budou použity pouze za účelem testování vyvinutých článků robotu a ověření vyvinutých algoritmů řízení pohybu robotu. V rámci řešení projektu bylo rozhodnuto, že finální elektronika (konkrétně procesorová deska s přidanými moduly *pro řízení motorů konvenčních článků a řízení nitinolových drátů* použitých v alternativní části robotu) bude integrována přímo do těla robotu, viz Obrázek 6, a jednotlivé články robotu budou vzájemně propojeny pouze napájením a komunikací (EtherCAT). Základní studie hierarchie procesorové desky s motorovými řídicími jednotkami je uvedena ve výzkumné zprávě [7].

4 Závěr

Předložená technická zpráva shrnuje současný stav stávajících robotických technologií pro průmyslovou inspekci tak, jak je uvedeno v Kapitole 2, a jasně potvrzuje nutnost výzkumu a vývoje ambiciózního cíle řešeného projektu v podobě *multi-redundantního robotu pro nedestruktivní průmyslovou inspekci*. Z dostupných informací a zdrojů je patrné, že nelze potřeby moderních nedestruktivních kontrol uspokojit dostupnými řešeními, a to zejména s ohledem na zásadní požadavky na omezené prostorové nároky, vyhýbání se překážkám a komplexnost požadovaných pohybů v reálných technologických procesech.

Vzhledem k předpokládané technické náročnosti projektu, která byla detailně identifikována na základě doplněných průzkumů, bylo mezi partnery ustanoveno, že je bezprostředně nutné již v prvním roce řešení projektu zdokumentovat možné technické řešení plánovaného prototypu (konstrukce, instrumentace, řízení) tak, aby bylo v následujících letech možné postupovat již konkrétním vytýčeným směrem. V Kapitole 3 jsou proto shrnuty výsledky prvotních výzkumných prací zahrnující navrženou hybridní architekturu robotu ROBIN (ROBotic INspection), nástin řídicích algoritmů a koncept instrumentace včetně samotného řídicího systému založeném na integrované elektronice v jednotlivých člancích robotu.

Seznam odkazovaných výzkumných zpráv

- [1]** Jáger, A. "Tripod s hydraulickými aktuátory - ověření možnosti řízení pohybu", výzkumná zpráva, ZCU, 2017, (ident: O1_1_hydraulika.pdf).
- [2]** Trylc, M. "Možnosti konstrukčního provedení robotu ROBIN (ROBotic INspection)", výzkumná zpráva, SM, 2017, (ident: O1_2_ROBIN_construction.pdf).
- [3]** Ježek, O. "Control electronics of Shape-Memory Alloy wires", research report, ZCU, 2017, (ident: O1_3_SMA_HW.pdf).
- [4]** Toupal, M. "Řízení paralelního manipulátoru s nitinolovými (flexinolovými) aktuátory", výzkumná zpráva, ZCU, 2017, (ident: O1_4_nitinolActuators.pdf).
- [5]** Bláha, L. "Path planning for snake-like NDT manipulator", research report, ZCU, 2017, (ident: O1_5_path planning.pdf).
- [6]** Švejda, M. "Preliminary architecture design and control algorithm of ROBIN robot", research report, ZCU, 2017, (ident: O1_6_conventionalCells_control.pdf).
- [7]** Šetka, V. "Control System and Motor Control Design for ROBIN", research report, ZCU, 2017, (ident: O1_7_MotorControlSystem_control.pdf).
- [8]** Horáček, L. "Manipulátory TAČR (Současný vývoj manipulátorů ve světě)", UJV, 2017, (ident: O1_8_manipulatory.pdf)