

Technická 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:

Návrh robotického systému pro testování návarů
prostupů víka reaktorové nádoby

Zapsáno (místo, datum):
KKY, 16. listopadu 2018

Autor:
Arnold Jáger
Martin Švejda

Úvod

Předložená technická zpráva se zabývá přehledem dosavadní výzkumné činnosti související s návrhem realizace technického řešení robotického zařízení pro nedestruktivního testování návarů nátrubků víka reaktorové nádoby.

Technická zpráva navazuje na zprávu [1] a dále konkretizuje navržený postup testování včetně návrhu řídicího systému. V současnosti je navržené robotické zařízení ustáleno v následující podobě:

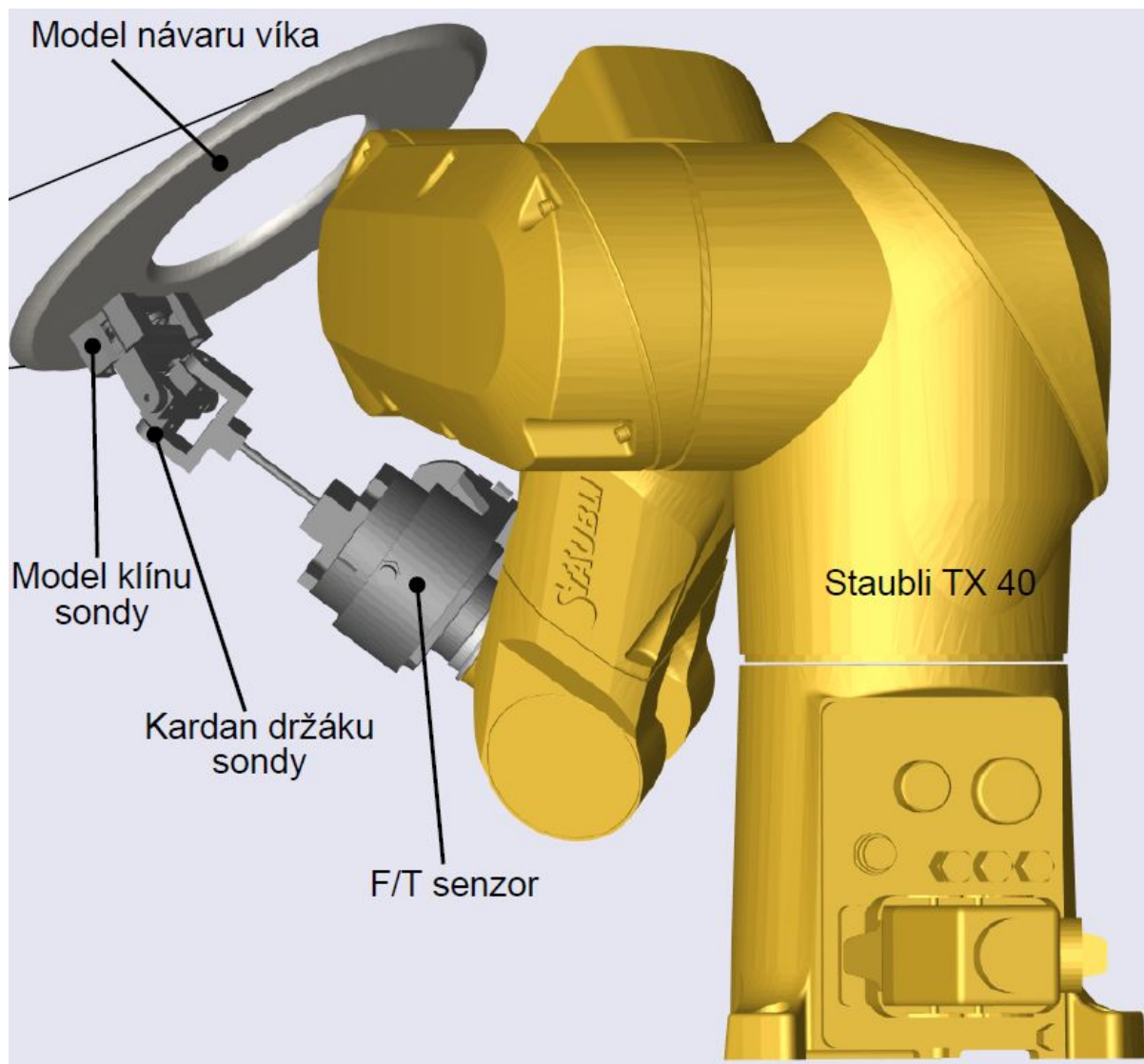
- Průmyslový robot Staubli TX40 [4] (pro testovací účely) resp. RX160L pro finální realizaci (obsluha všech návarů jedním robotem).
- Pasivní držák NDT sondy (pasivní kardanův kloub s posuvným uložením pro kompenzaci nerovností návaru) připevněný na koncový efektor průmyslového manipulátoru.
- Specifický řídicí systém robotu Staubli (externí povelování kontroleru robotu vlastním řídicím SW/HW) za účelem řízení polohy a orientace (heading) sondy.

Předložená technická zpráva obsahuje následující části:

1. Navržená robotická technologie včetně vyvinutého držáku sondy (vývoj Škoda JS).
2. Řídicí systém robotu včetně SW pro generování požadované trajektorie včetně systému automatického zaměření návaru (auto-kalibrace robotu).
3. Testování navržených algoritmů řízení implementovaných do řídicího systému REXYGEN, testování na maketě víka reaktorové nádoby robotem Staubli TX 40.
4. Virtuální simulační model robotické technologie s finálním předpokládaným robotem Staubli RX160L (vhodný k obsluze všech požadovaných návarů).

Navržená robotická technologie

Technologie pro testování návarů víka reaktorové nádoby se finálně ustálila na konfiguraci průmyslového robotu Staubli TX40 s vlastním řídicím systémem (REXYEGEN) a vlastní konstrukcí pasivního držáku NDT sondy, viz Obrázek 1.

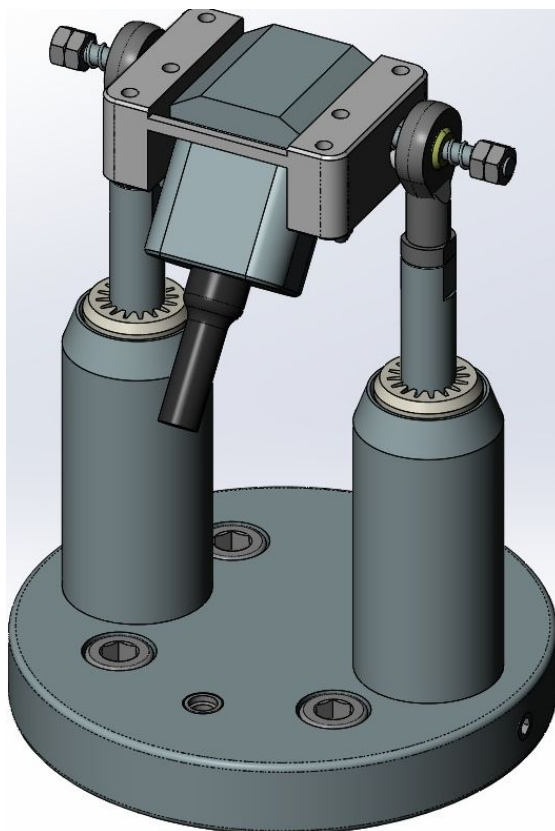


Obrázek 1: Konfigurace robotické technologie (testovací pasivní držák NDT sondy - finálně nahrazen řešením, viz Obrázek 2)

Poznamenejme, že řešení s robotem Staubli TX40 je určeno pouze pro testovací účely, neboť je rozsah pracovního prostoru robotu nedostatečný pro obsluhu všech návarů víka reaktorové nádoby. Finálně použitý robot bude typu Staubli RX160L (v současnosti tímto modelem nedisponujeme, bude pořízen v budoucnu), viz virtuální simulační model v Kapitole "Virtuální simulační model robotické technologie s finálním předpokládaným robotem Staubli RX160L".

Pasivní držák NDT sondy (vývoj Škoda JS)

V rámci projektu byl vyvinut držák sondy s dvěma pasivními rotačními stupni volnosti (v Obrázku 1 nahrazen pro testovací účely jednoduchým Kardanovým kloubem realizovaným prostřednictvím 3D tisku). Finálně vyvinutý držák se od zjednodušené testovací varianty liší především v realizaci pasivních stupňů volnosti, kde jsou dodrženy dva stupně volnosti reprezentující pohyb kardanu a jeden stupeň volnosti ve směru kolmém k povrchu testovaného návaru zajišťující přítlak sondy k povrchu.

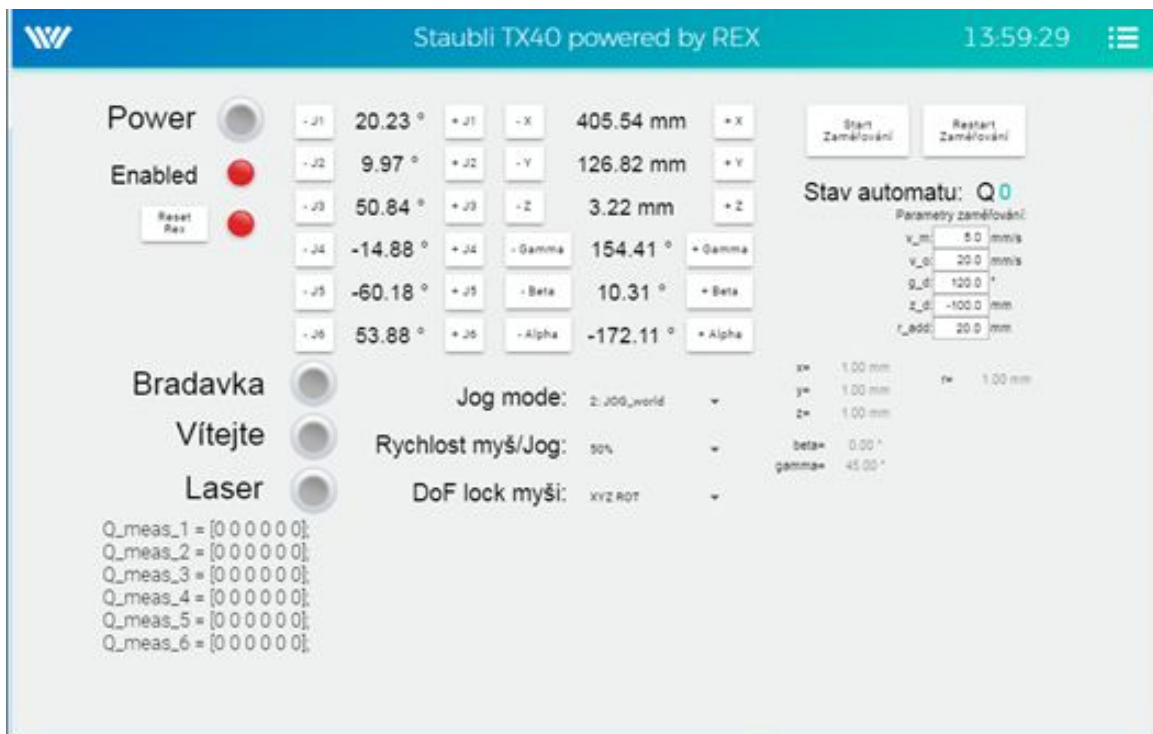


Obrázek 2: Pasivní držák NDT sondy

Řídicí systém robotu Stäubli TX40

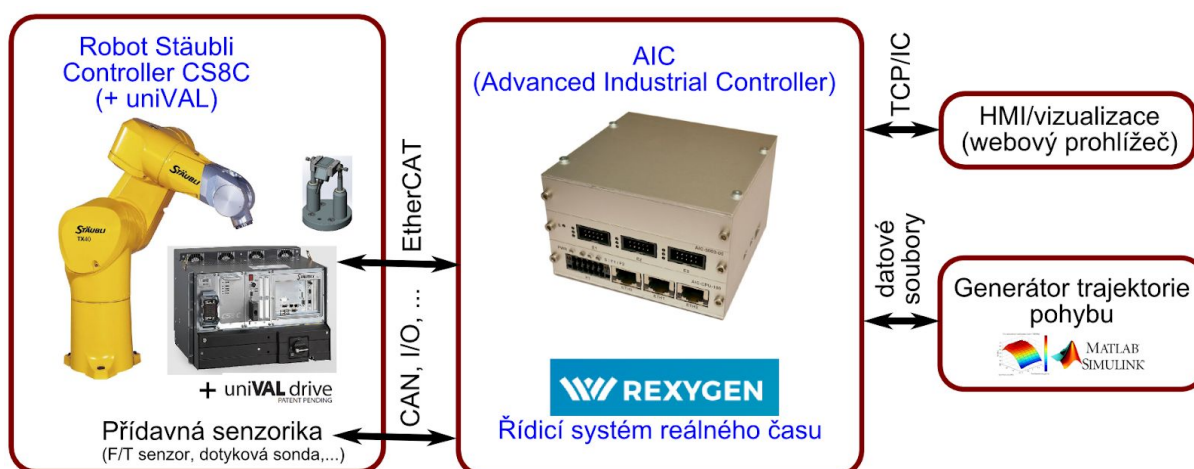
Vzhledem k požadavkům na vykonávanou úlohu robotem, především pak nutnosti polohovat orientaci sondy (tzv. heading) vzhledem k rovině návaru a dále nutnosti provádění automatické identifikace (zaměření návarů), není v podstatě možné využít standardní řídicí systém robotu, tak jak jej výrobce nabízí (např. programování robotu přes teachpendant, interakce s robotem přes digitální vstupy a výstupy, atd.). V takovém případě je vhodnou variantou využít dodávanou kartu uniVAL [3], která umožňuje komunikovat s robotem přes rozhraní EtherCAT takovým způsobem, že je možné nezávisle posílat požadované polohy do všech os robotu (setpointy na polohové regulátory v kontroleru robotu). Řídicí systém robotu (koordinované řízení a další podpůrné funkce) tak mohou být realizovány vně kontroleru robotu nezávislým řídicím HW/SW.

Řídicí systém robotu byl kompletně implementován v řídicím SW REXYGEN [2], včetně tvorby HMI (vizualizace), viz příklad ovládacího panelu na Obrázku 3.



Obrázek 3: Ovládací panel testovací aplikace celé robotické technologie

Funkční schéma uspořádání řídicího systému včetně HW implementace je znázorněno na Obrázku 4. Průmyslový počítač AIC (HW) a řídicí systém REXYGEN (SW) je vlastním řešením ZČU a dlouhodobě spolupracující firmy REX Controls s.r.o. Pasivní držák sondy je unikátním řešením Škoda JS, a.s. Robot včetně kontroleru a přídatné karty uniVAL je produktem firmy Stäubli.



Obrázek 4: Schéma uspořádání řídicího systému

Generátor trajektorie pohybu robotu, řídicí systém (kinematika)

Různé varianty generátoru trajektorie pohybu byly již odzkoušeny a dokumentovány ve zprávě [1]. Jako finální varianta byla vybrána následující podoba generátoru trajektorie včetně identifikace konkrétního návaru:

1. Přesné automatické zaměření konkrétního návaru s pomocí dotykové sondy (a prostřednictvím známých apriorních dat o geometrii víka a umístění robotu) - *Dotyk 6 libovolných bodů návaru (3 na rovině návaru, 3 v prostupu návaru)*, viz [1].
2. Automatické testování (pohyb sondy po návaru po vygenerované trajektorii)

Stručný popis algoritmizace lze shrnout následovně:

Vstupy:

- Geometrický model víka (s omezenou přesností, odhad: +/- 2cm v umístění os prostupů víka)
- Parametrizace trajektorie pohybu manipulátoru po návaru:
 - Poloměry, po kterém se pohybuje sonda (typicky průměr prostupu + offset) pro každý testovaný návar
 - Parametrizace rychlosti/zrychlení pohybu sondy
 - Parametrizace odklonu držáku sondy (= posledního ramene robotu) od osy kolmé k rovině návaru (víka) (možnost najíždět posledním ramenem robotu na návar "ze strany" kvůli případným kolizím)
 - Parametrizace subsystému automatického zaměření návaru (povolené rozsahy pohybu dotykové sondy, rychlosti, zrychlení, timeouty, atd.)

Výstupy:

- Požadovaný pohyb sondy vedené manipulátorem po konkrétním návaru

Algoritmus:

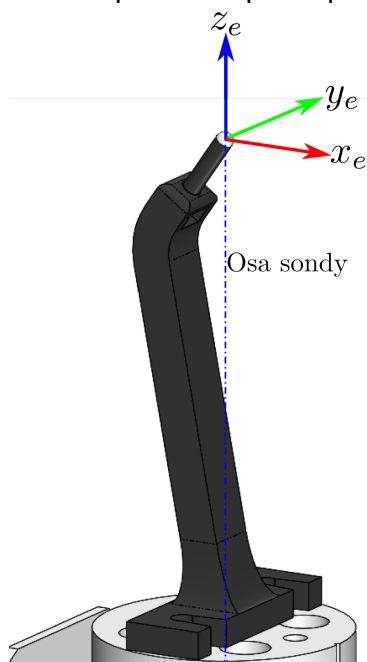
1. Prvotní hrubá kalibrace umístění robotu vzhledem k víku reaktorové nádoby (ruční proces vykonávaný operátorem - vlastní způsob realizace bude dále detailněji specifikován)
2. Automatický proces zaměření návaru/návarů dle uvažované varianty:
 - a. Zaměření všech návarů - výměna dotykové sondy za testovací sondu - testování všech návarů (pravděpodobně ruční výměna nástroje/sondy)
 - b. Zaměření jednoho návaru - výměna dotykové sondy za testovací sondu - testování konkrétního návaru (nutnost automatické výměny nástroje-sondy)
 - c. Zaměření vybraných návarů - dopočítání polohy zbývajících návarů dle geometrického modelu víka - výměna dotykové sondy za testovací sondu - testování všech návarů (pravděpodobně ruční výměna nástroje/sondy)
3. Vlastní testování návarů (dle varianty v bodu 2))
4. Vyhodnocení (operátorem) - případné opravné testování vybraných návarů

Automatický systém zaměření návarů - realizace

Automatický systém zaměření návarů slouží k určení přesné polohy návaru vůči robotu pomocí dotykové sondy umístěné na koncovém efektoru robotu. V případě zaměření více návarů lze určit polohu samotného víka. Systém zaměření návarů je parametrizovatelný algoritmus, který postupně provede zaměření šesti bodů návaru (tři bodů prostupu a tři bodů roviny návaru), je zahrnut v řídicím systému robotu a tudíž je realizován v řídicím systému REXYGEN:

Vstupy:

- Přesný geometrický model víka s neurčitostí z důvodu nepřesného usazení víka vůči robotu ve směru X a Y (odhad +/- 2cm).
- Parametry určující zaměřovací pohyby:
 - Rychlost zaměřovacího pohybu
 - Rychlost ostatních pohybů
 - Úhel rozestupu zaměřování
 - Změna výšky pro zaměření roviny návaru
 - Přírůstek ke změřenému poloměru prostupu pro zaměření roviny návaru



Obrázek 5: Model dotykové sondy s naznačeným souřadným systémem (měřící směr je ve směru osy x_e a z_e)

Před spuštěním samotného automatické zaměření návaru se předpokládá, že dotyková sonda je zavedena do přibližného středu prostupu s dostatečným zasunutím tak, aby bylo možné provést zaměření tří bodů prostupu. Navedení robotu do této pozice bude provedeno buď operátorem nebo automaticky na základě znalosti geometrického modelu víka (s předpokladem, že nepřesné usazení víka nezabraňuje bezpečnému napolohování dotykové sondy do prostupu).

Algoritmus:

- Zarovnání dotykové sondy kolmo k rovině podlahy a natočení do směru prvního bodu dotyku v prostupu.
- Postupné zaměření tří bodů prostupu v zadaném úhlovém rozestupu
- Výpočet souřadnic středu ($[S_x, S_y]$) a poloměru kružnice r (průsečík prostupu a roviny rovnoběžné s podlahou)
- Změna polohy sondy pro zaměření roviny návaru - posunutí o zadanou změnu výšky a do vypočtených souřadnic středu zaměřené kružnice
- Postupné zaměření tří bodů roviny návaru v zadaném úhlovém rozestupu a ve vzdálenosti $r +$ zadaný přírůstek os středu zaměřené kružnice
- Výpočet normálového vektoru zaměřené roviny návaru
- Najetí dotykovou sondou do středového bodu návaru kolmo k jeho rovině

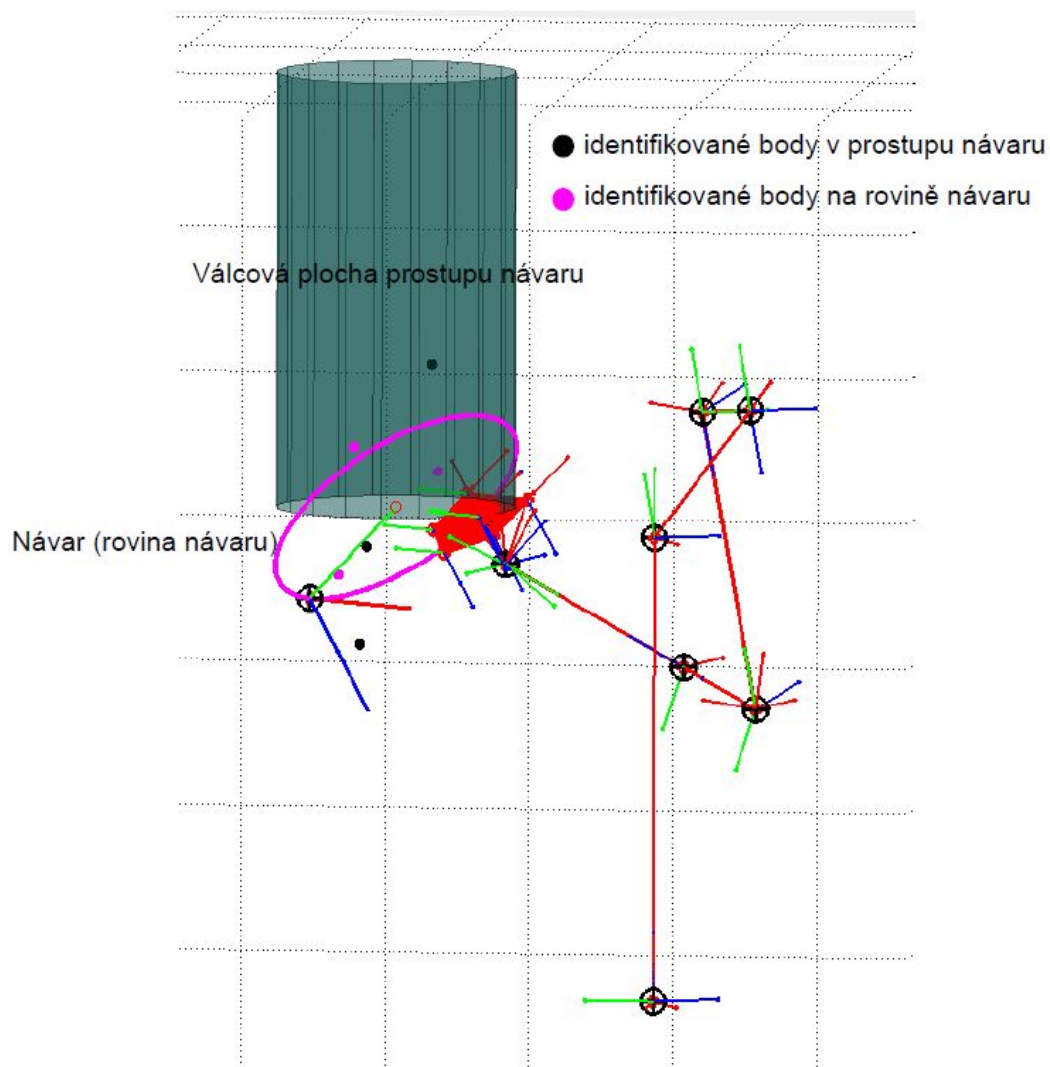
Výstup:

- Středový bod návaru $[S_x, S_y, S_z]$
- Normálový vektor roviny návaru $[S_{nx}, S_{ny}, S_{nz}]$

Generátor trajektorie - realizace

Vlastní generování trajektorie pohybu manipulátoru bylo založeno na metodě identifikace 6-ti bodů (na jeden návar), viz [1]. Automatická identifikace (nalezení) bodů bylo realizováno výše uvedeným algoritmem. Modelová situace s vyznačením nalezených bodů je znázorněna na Obrázku 6. Algoritmus generování trajektorie lze shrnout následovně:

1. Identifikace trojice bodů ležící uvnitř prostupu návaru (dotyk sondou na vnitřní povrch prostupu) => identifikace osy prostupu (střed návaru)
2. Identifikace trojice bodů ležící na povrchu návaru => identifikace normálového vektoru roviny návaru
3. Výpočet požadovaných parametrů eliptické trajektorie pohybu
 - a. střed návaru: $[S_x, S_y, S_z]$
 - b. osa návaru (prostupu), normálový vektor: $[S_{nx}, S_{ny}, S_{nz}]$
 - c. definování velikosti hlavní a vedlejší poloosy elipsy ležící v rovině návaru: a, b (dle typu zkoušeného návaru z modelu víka)
 - d. definování požadovaného odklonu posledního ramene robotu (držáku sondy) od normály k rovině návaru (viz algoritmus výše)
 - e. parametrizace trajektorie pohybu elipsy (s požadovanou rychlostí/zrychlením)
4. Generování vlastní trajektorie pohybu jako časově závislá data požadované polohy sondy (X,Y,Z souřadnice + požadovaná orientace-heading sondy). Poznamenejme, že 2 zbývající stupně volnosti orientace sondy, tak aby sonda dosedla na povrch návaru, jsou zajištěny pasivním držákem sondy (kardanův kloub).

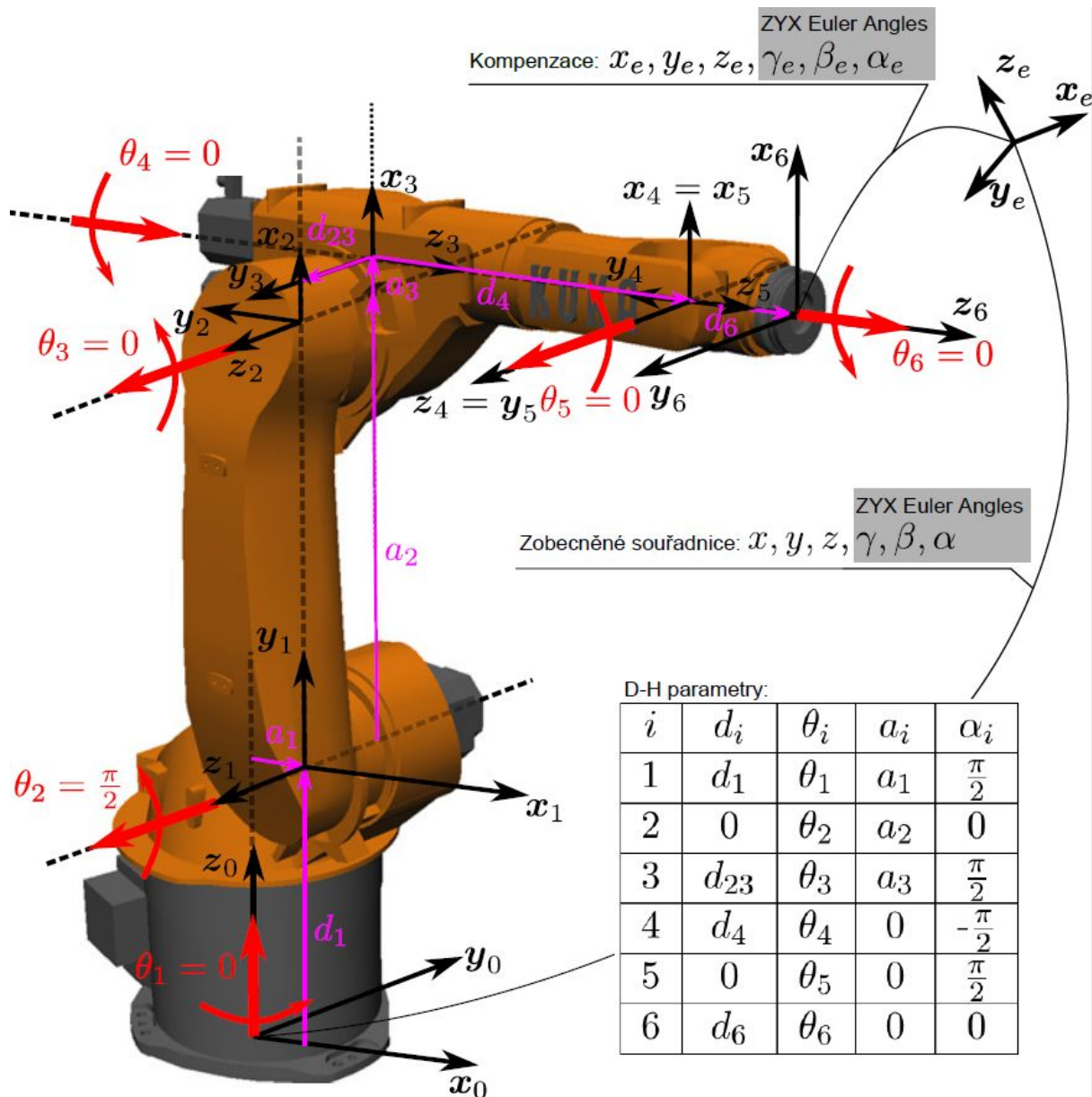


Obrázek 6: Schématické uspořádání robotu s pasivním držákem sondy v prostředí Simulink/SimMechanics s vyznačenými identifikovanými body

Kinematika manipulátoru - realizace

Robot Stäubli TX 40 (resp. RX 160L) je průmyslový robot standardní kinematické architektury (první trojice rotačních kloubů následovaná trojicí rotačních kloubů realizující tzv. sférické zápěstí). Prostřednictvím tzv. Denavit-Hartenbergovy úmluvy, lze kinematiku robotu popsat kinematickými parametry (Denavit-Hartenbergovy parametry), viz Obrázek 7, a řešit přímou a inverzní kinematickou úlohu, detaily lze nalézt v [5, 6] (včetně konkrétních příkladů)¹.

¹ **Přímá kinematická úloha:** Přepočítání z poloh/rychlostí/zrychlení kloubů na polohu/rychlost/zrychlení koncového efektoru manipulátoru (vždy jediné řešení pro sériové manipulátory). **Inverzní kinematická úloha:** opačný přepočítání (lze řešit pro uvažovaný typ manipulátorů analyticky, existuje 8 různých řešení - konfigurace ramen robotu pro stejnou požadovanou polohu koncového efektoru).



Obrázek 7: Zavedení souřadných systému jednotlivých ramen dle Denavit-Hartenbergovy úmluvy

Úloha (kinematického) řízení průmyslového robota ve standardním případě znamená přepočítání z požadované polohy (souřadnice X,Y,Z) a orientace (zpravidla např. 3 Eulerovy úhly, α, β, γ , matice rotace, kvaternion, atd., viz [5, 6]), tedy z požadované 6 DoF² polohy koncového efektoru, na polohy 6-ti nezávislých aktuátorů.

V uvažovaném případě se však kinematické výpočty odlišují od takové standardní podoby, neboť je na koncový efektor manipulátoru připojena navíc ještě 2 DoF pasivní držák sondy. Nové řízené souřadnice takového efektoru jsou pak dále uvažovány jako:

- X,Y,Z poloha středu sondy
- α, β odklon posledního ramene robota od kolmé osy k rovině návaru
- γ orientace (heading) sondy

² DoF (Degrees Of Freedom) - stupně volnosti.

Poznamenejme, že výše uvedené standardní souřadnice polohy koncového efektoru jsou závislé na souřadnicích nově zvolených přes podmínku, že pasivní kardanův kloub držáku sondy svazuje pohyb (a orientaci) sondy na povrch testovaného návaru. Z pohledu kinematiky se v podstatě jedná o paralelní manipulátor, kde první rameno (kinematický řetězec) tvoří samotný průmyslový robot a druhý kinematický řetězec uzavírající kinematickou smyčku je fiktivně představován pasivním držákem sondy a samotou sondou, která je vázána k povrchu návaru kluznou vazbou (2 DoF translační pohyb po povrchu návaru a 1 DoF rotační pohyb jako heading).

Taková kinematická struktura již není standardní a musí být řešena jako celek (kinematika průmyslového robotu + kinematika pasivního držáku).

Celá speciální kinematika byly vyřešena a simulačně otestována v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics a implementována do vlastního generátoru trajektorie. Poznamenejme, že předložená speciální kinematika v podstatě znemožňuje použít standardní kontrolér robotu. Právě proto bylo celé řízení robotu kompletně řešeno ve vlastním řídicím HW/SW a kontrolér robotu byl použit pouze ve funkci servozesilovače, který byl povelován přes rozhraní EtherCAT nezávisle pro každou řízenou rotační osu robotu.

Testování navržených algoritmů řízení implementovaných do řídicího systému REXYGEN.

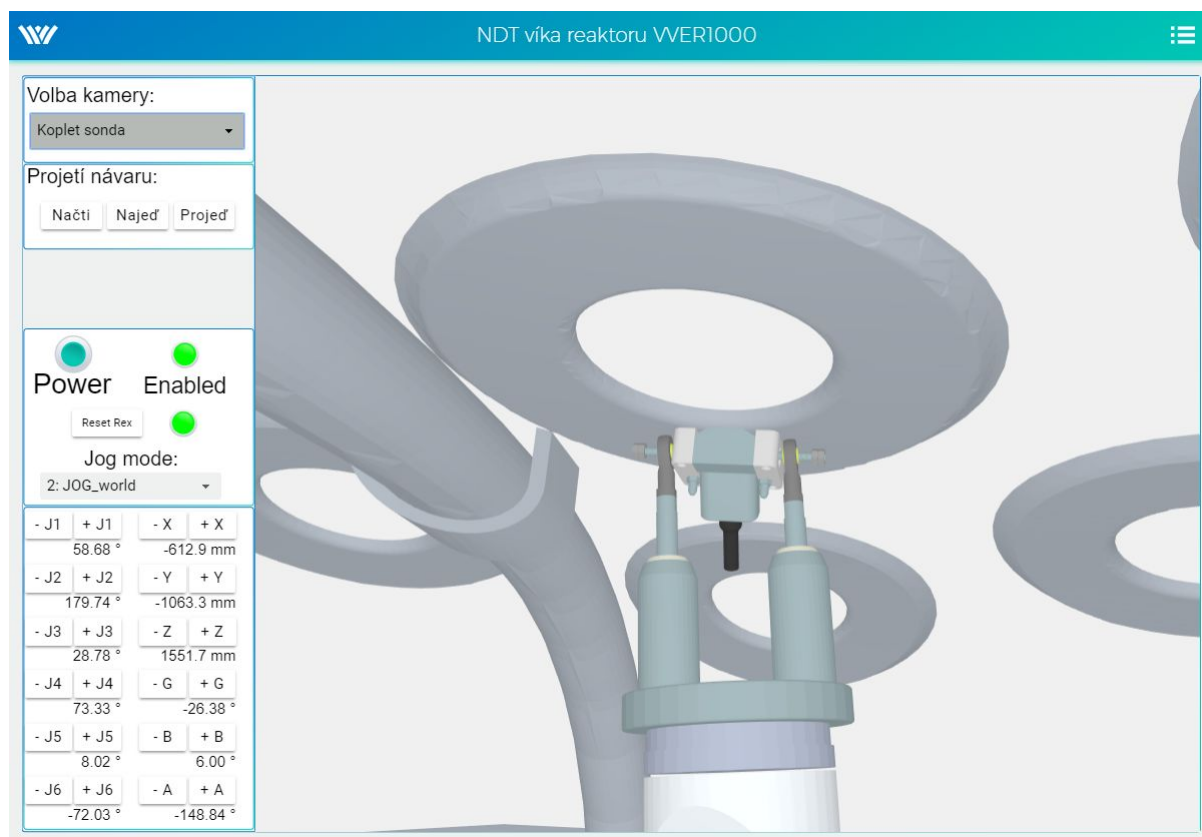
Navržené algoritmy implementované v řídicím systému REXYGEN byly otestovány na reálném robotu Stäubli TX40 a čtvrtinové maketě víka reaktorové nádoby VVER1000. V rámci testování byl několikrát vyzkoušen systém automatického zaměření návaru víka reaktoru s následným provedením zkušebního měřicího pohybu s použitím vyvinutého pasivního držáku NDT sondy, viz Obrázek 8.



Obrázek 8: Fotografie z reálného testování navržených algoritmů

Virtuální simulační model robotické technologie s finálním předpokládaným robotem Stäubli RX160L

Za účelem ověření prostorového uspořádání a dosahu finálně použitého robotu Stäubli RX160L pod víkem reaktorové nádoby byl vytvořen simulační model (v podobě reálné konfigurace řídicího systému a 3D vizualizace pohybu robotu) v řídicím systému REXYGEN.



Obrázek 9: Uživatelské rozhraní pro ovládání virtuálního modelu

Řídicí systém virtuálního robotu

Řídicí systém použitý pro virtuální simulační model robotu Stäubli RX160L je odvozený od řídicího systému implementovaného pro řízení robotu Stäubli TX40, použitého pro testování navržených algoritmů. Změnami oproti implementovanému řídicímu systému jsou odlišné parametry kinematiky robotu a pouze virtuální zapojení vstupů a výstupů řídicího systému ovládající reálný robot. Zřejmou výhodou tohoto přístupu je rychlý postup při převedení navrženého řídicího systému z virtuálního modelu robotu do finálního řešení s reálným robotem pouze s minimem úprav.

Pro ovládání virtuálního modelu robotu bylo vytvořeno uživatelské rozhraní, viz Obrázek 9, které umožňuje základní ovládání robotu, nekoordinované pohyby i koordinované pohyby ve světovém souřadném systému a souřadném systému koncového

efektoru. Dále je rozhraní upraveno pro zobrazení virtuálního modelu robotu a výběr pohledu (kamery) na robot (3D vizualizace).

Převedení CAD modelu pro virtuální model

Pro použití CAD modelu za účelem zobrazení v uživatelském rozhraní je nutné provést několik kroků. Podrobně se této tématice věnuje [7]. Stručně tyto kroky jsou:

- Případné zjednodušení CAD modelu pro snížení náročnosti vykreslování.
- Převedení struktury modelu na hierarchickou strukturu ve smyslu kinematických celků tak, aby souřadné systémy těchto celků byly zavedeny podle Denavit-Hartenbergovy úmluvy, viz [6].
- Převedení 3D modelu do formátu *.X3D.
- Zařazení vizualizační komponenty do uživatelského rozhraní
- Propojení hodnot z řídicího systému s vizualizační komponentou pro správnou funkčnost vizualizace.

Závěr

Předložená technická zpráva shrnuje všechny dosavadní poznatky nad vývojem robotického zařízení pro automatické testování návarů prostupů víka reaktorové nádoby. Hlavním přínosem uvedených činností je podrobné odzkoušení navržených metod pokročilého řízení robotického zařízení skládajícího se ze standardního průmyslového robotu a přidané technologie představující novou konstrukci držáku NDT sondy. Celkově byly odzkoušeny dvě následující konfigurace robotického systému:

1. Manipulátor Stäubli TX40 + vyvinutý držák NDT sondy (včetně reálné sondy) na maketě čtvrtiny víka reaktorové nádoby + vlastní nadřazený řídicí systém (HW + SW řešení pro povelování robotu, včetně automatického zaměření v prostupů a generátoru trajektorie)
2. Virtuální simulační model finálně plánovaného robotu Stäubli RX160L + vyvinutý držák NDT sondy na virtuálním modelu víka reaktorové nádoby + identický (přeparametrizovaný dle potřeb kinematiky nového robotu) řídicí systém.

Výsledky provedených testů ukazují na efektivní možnosti využití předloženého systému pro uvažovanou aplikaci.

Literatura

- [1] T. Čechura, M. Švejda: *Testy robotických ramen pro použití při kontrole svaru nátrubku víka reaktoru VVER1000*, technická zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [2] REXYGEN, <https://www.rexygen.com/>.
- [3] uniVAL drive - innovative robot control, <https://www.unival-drive.com/>.
- [4] Stäubli Robotics, <https://www.staubli.com/en/robotics/>.
- [5] M. Švejda: *Kinematika robotických architektur*, Západočeská univerzita v Plzni, 2011, http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/rigo.pdf.
- [6] M. Švejda: *Úvod do robotiky a mechatroniky*, materiály k přednáškám, Západočeská univerzita v Plzni, 2012, <http://home.zcu.cz/~msvejda/URM/>
- [7] O. Severa, A. Jáger, M. Štětina. Virtual model of manipulator for advanced vessel integrity inspection build on latest W3C standards. In: *2013 International Conference on Process Control (PC)* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 540-545 [cit. 2018-11-15]. DOI: 10.1109/PC.2013.6581467. ISBN 978-1-4799-0927-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6581467/>