

# TAČR TREND

## Název projektu:

Flexibilní robotické pracoviště pro malosériovou výrobu  
(FW03010501)

Technická zpráva

## [O] Intuitivní programování robotu - operátorské navádění robotu

Martin Švejda (ZČU), Arnold Jáger (ZČU), Jan Reitinger (ZČU), Tomáš Čechura (ZČU)

datum: 27.10.2022



## Identifikátor účastníka projektu:

IMI: Integrated Micro-Electronics Czech Republic s.r.o.

ZČU: Západočeská univerzita v Plzni

# Obsah

<b>Popis z přihlášky projektu</b>	<b>2</b>
<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>Alternativní možnosti intuitivního navádění robotu</b>	<b>3</b>
Lankový systém odměřování polohy nástroje robotu	3
Bezkontaktní trekovací systém	7
<b>Finální koncept operátorského navádění robotu</b>	<b>8</b>
Uvažovaná pilotní aplikace	8
Koncepce intuitivního navádění	9
Specifika interfacu mezi nadřazeným řídicím systémem a kontrolerem robotu UR5:	13
<b>Závěr</b>	<b>13</b>
<b>Reference</b>	<b>14</b>

## Popis z přihlášky projektu

ZČU: Vývoj a testování algoritmů pro koncepcí navádění robotu operátorem:

- a) Navádění za rukou (kontaktní systém tažení efektoru a/nebo ramen robotu)
- b) Trackovací systém (bezkontaktní systém snímání pohybu operátora)

Algoritmy budou implementovány na virtuálních simulačních modelech robotů a verifikovány na reálně dostupných zařízeních z technického vybavení ZČU a IMI. Předpokládá se výběr minimálně jednoho systému navádění vhodný pro nasazení v pilotní aplikaci.

IMI: Transfer poznatků s ručním naváděním robotů Universal Robots, které jsou používané v některých inter-firemních aplikacích. Předkládání návrhů na vylepšení v důsledku identifikovaných problémů.

# Úvod

V rámci předložené technické zprávy byla zpracována analýza možnosti finálního technického řešení pro intuitivní navádění robotu v procesu průmyslové aplikace. Analýza doplňuje a rozšiřuje technickou zprávu [1], kde byla předložena koncepce navádění robotu prostřednictvím 3D SpaceMouse senzoru a byl vytvořen demonstrátor s robotem Stäubli TX40.

## Alternativní možnosti intuitivního navádění robotu

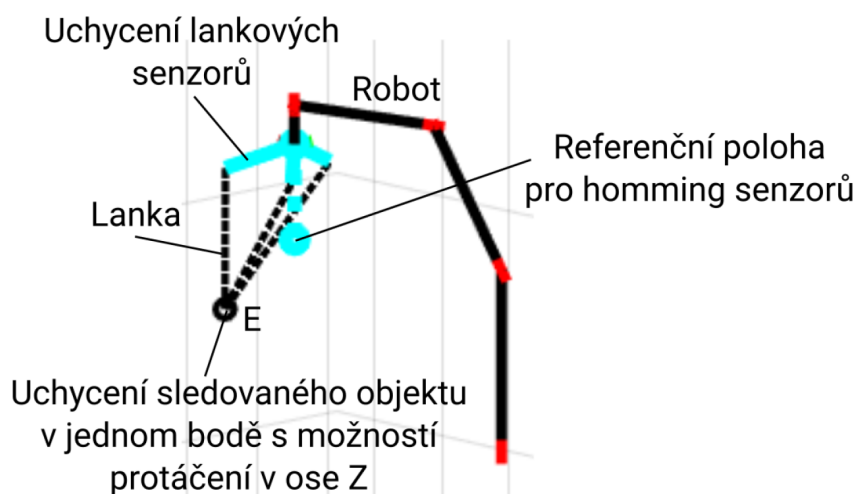
Z hlediska intuitivního navádění robotu byla v roce 2022 zvažována alternativní koncepce, a to ve dvou technologických variantách:

### Lankový systém odměřování polohy nástroje robotu

Původní myšlenka byla již dříve představena v projektu *FV20597 (Nová technologie pro inteligentní plánování pohybu robotů v průmyslových procesech)*, viz technická dokumentace [2, 3], jako jedna z možností trekování pohybu, která se v projektu *FV20597* již dále nevyužívala.

Myšlenka spočívala v připojení trojice lankových enkodérů pevně uchycených na základně na přírubu robotu a v důsledku odměřování odvinutí lanek rekonstruovat pohyb pracovního nástroje (pouze v translaci XYZ), viz Obrázek 1. Systém byl dále navržen tak, aby řídicí systém robotu reagoval na aktuální odměřování polohy a svým pohybem sledoval základnu s enkodéry takovým způsobem, že délka odvinutí lanek bude kompenzována (volně řečeno, robot "nadbíhá" lankovým enkodérům, což dovoluje výrazně navýšit rozsah měření).

Demonstrační video s principem lze nalézt [zde](#).

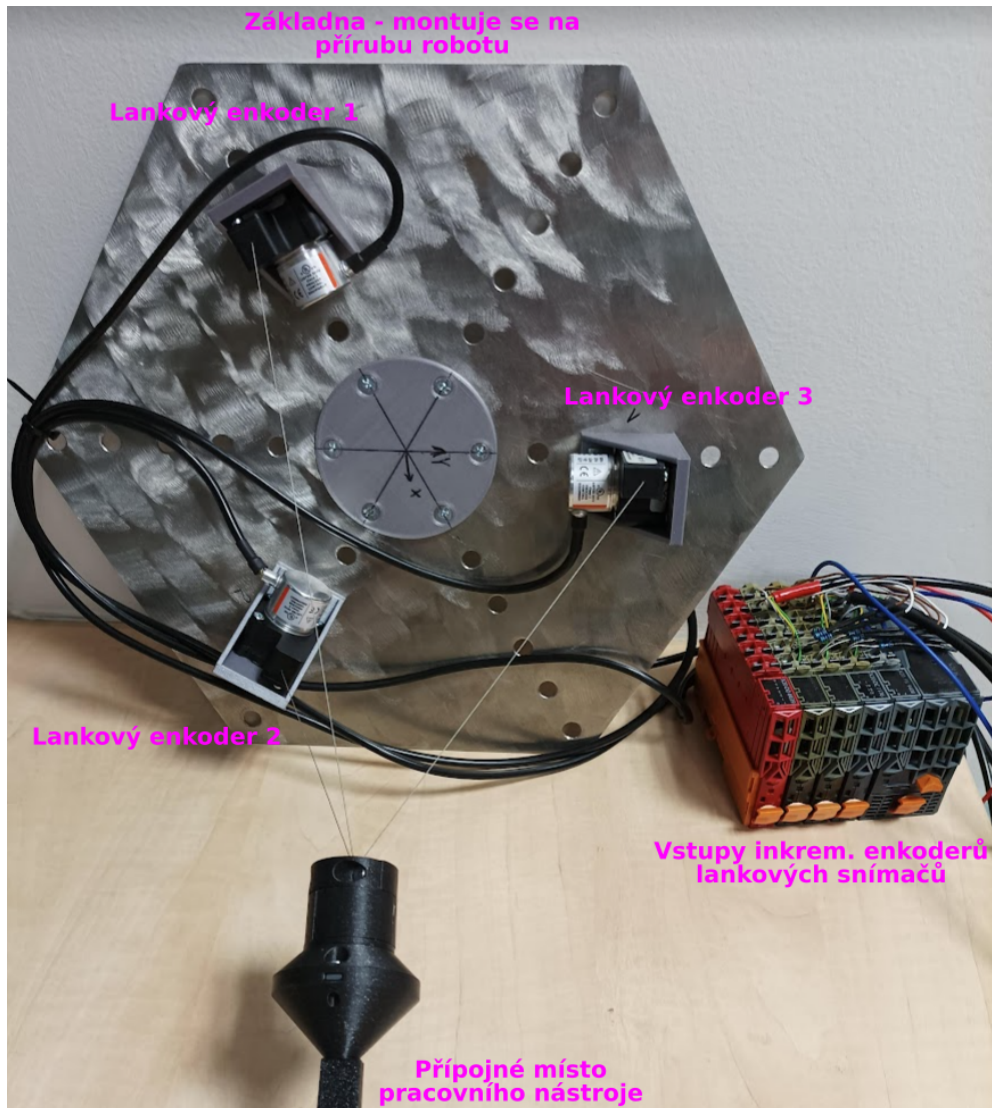


Obrázek 1: Schematický princip odměřování polohy podle délky odvinutí lanek

**V rámci současně řešeného projektu byly realizovány následující činnosti:**

1. Výše uvedený princip byl implementován jako dílčí funkční vzorek odměřovací sestavy (základna s enkodéry), viz Obrázek 2.





Obrázek 2: Funkční vzorek odměřovací sestavy s lankovými enkodéry a s připojeným systémem sběru dat (vzdálené vstupy inkrementálních enkodérů)

2. Funkční vzorek byl otestován s robotem Stäubli TX40, viz Obrázek 3.
3. Byla provedena kinematická kalibrace ve smyslu získání přesných kinematických parametrů sestavy s lankovými enkodéry (konkrétně poloha lankových enkodéru na základně resp. na přírubě robotu, offsety lankových enkodérů).  
Kalibrační metoda byla implementována v programu Matlab s následujícím výsledkem:
  - Referenční měřidlo: Robot Stäubli TX40
  - Kalibrované parametry: XYZ poloha enkodérů, offset měření lanek enkodérů
  - Kalibrace na vybraných kalibračních polohách (bodech): Celkem 40
  - Výstupní přesnost na kalibračních polohách (translace XYZ): 0.2 mm
  - Kalibrační metoda: Nelineární iterační nejmenší čtverce. Relativně stabilní na vhodném setu kalibrovaných parametrů (nezávislost parametrů).
4. Bylo navrženo rozšíření lankového systému o IMU jednotku, která by zajišťovala snímání orientace nástroje. Po jejím nakalibrování a experimentech se však ukázalo,

že snímání orientace není dostatečně přesné - zejména v úhlech okolo gravitační přímky (tzv. heading)

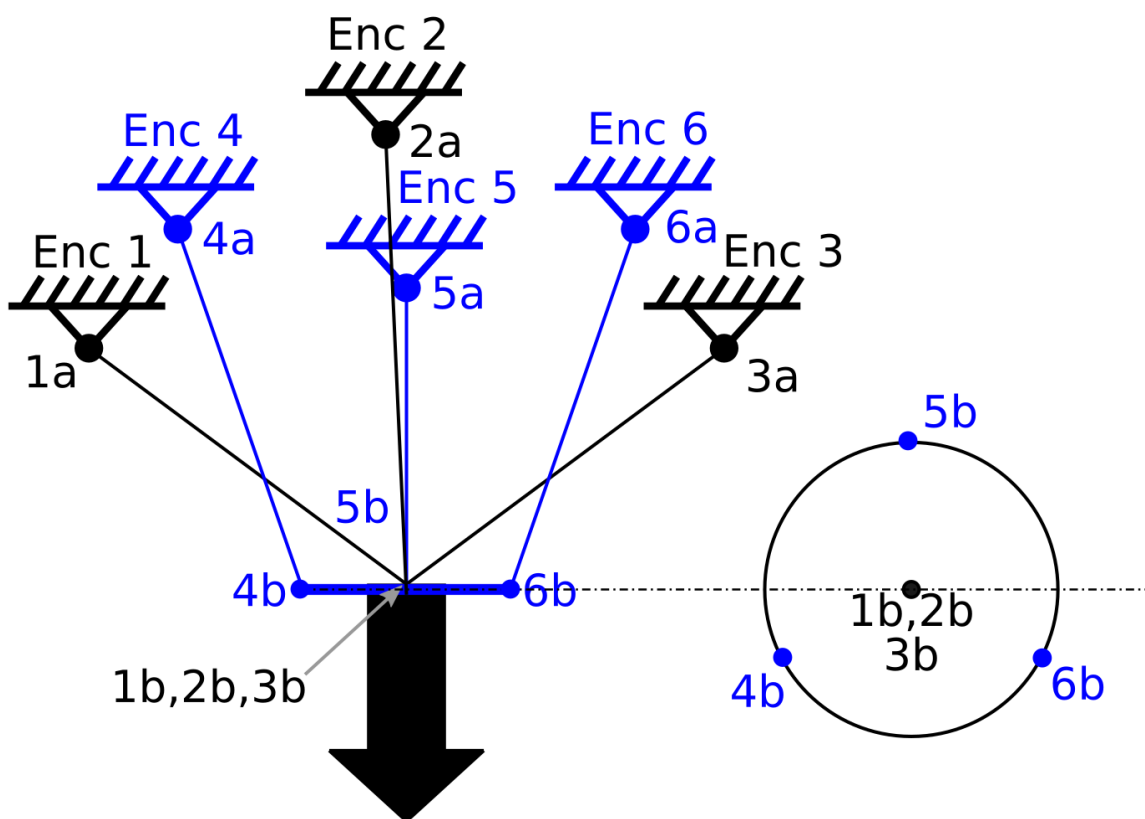
5. Bylo navrženo rozšíření lankového systému o další trojici lankových enkodérů, které by měly zajistit měření orientace s dostatečnou přesností. Koncept umístění enkodérů je znázorněn na Obrázku 4. Návrh nebyl v roce 2022 ověřen na funkčním vzorku a zůstal pouze v teoretické rovině.

Video z experimentu demonstrující funkci sledování základy s lankovými enkodéry robotem lze nalézt [zde](#).





Obrázek 3: Sestava s lankovými enkodéry pro odhad polohy nástroje



Obrázek 4: Návrh sestavy s lankovými enkodéry. Původní koncept (3 enkodéry, jen měření translace) - černě, uvažované rozšíření (přidané další 3 enkodéry, měření translace i orientace) - modře

## Bezkontaktní trekovací systém

Bezkontaktní systém založený na snímači *HTC Vive Tracker* byl vyvinut opět v rámci projektu *FV20597 (Nová technologie pro inteligentní plánování pohybu robotů v průmyslových procesech)*. V rámci uvedeného projektu byl trekovací systém realizován v podobě prototypu, viz technická dokumentace [4, 5].

**V rámci současně řešeného projektu byl trekovací systém z hlediska možného použití analyzován a bylo rozhodnuto, že není pro uvažované aplikace (flexibilní manipulace s díly na jedoučelových pracovištích) vhodný** především z následujících důvodů:

- Trackovací systém byl určen pro úlohy s přesností snímání polohy v řádu nižších centimetrů (translace), jednotek stupňů (orientace) - nevyhovuje požadované přesnosti (např. pro polohování desek plošných spojů (PCB<sup>1</sup>) do testerů)
- Trekovací systém je bezkontaktní a jeho robustnost je omezená (např. výpadky při snímání)
- Zástavbový prostor trekovacího systému je nevyhovující - nutnost instalovat zařízení nejen na pracovní nástroj, ale i do okolní technologie (typicky bazové snímací stanice *HTC Vive Trackeru*)

<sup>1</sup> Printed Circuit Board

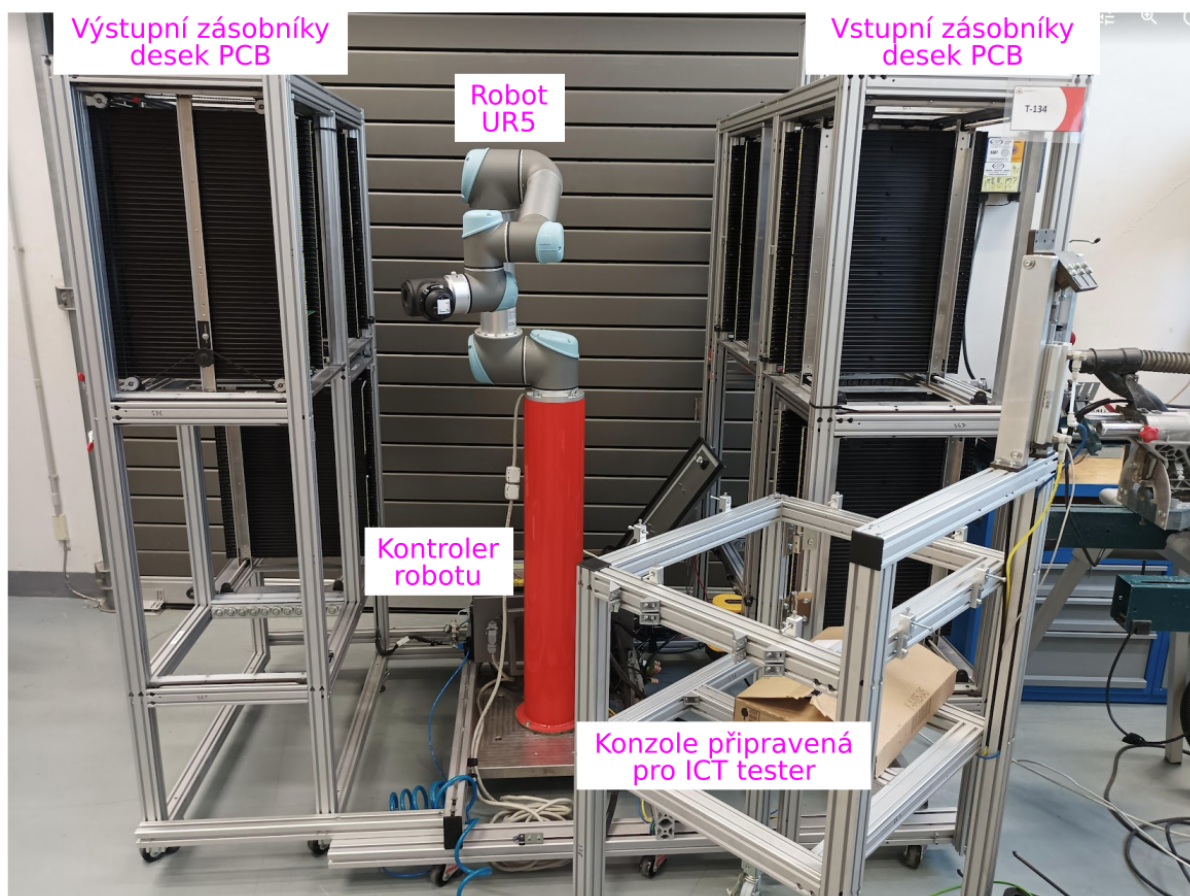


# Finální koncept operátorského navádění robotu

Finální myšlenka operátorského navádění robotu byla koncipována na následující uvažovanou pilotní aplikaci v projektu.

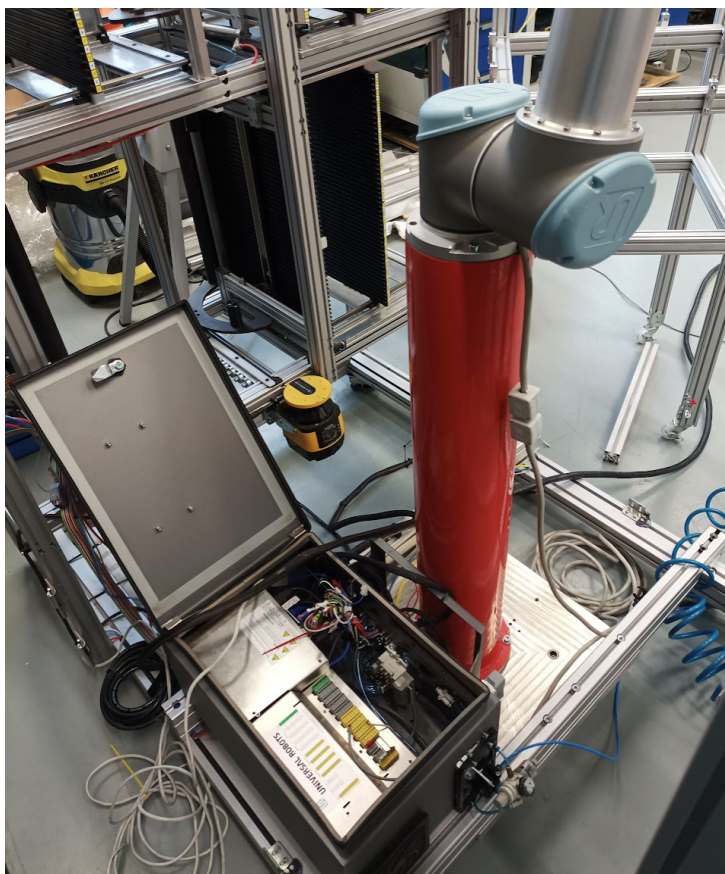
## Uvažovaná pilotní aplikace

Pilotní aplikace byla navržena v podobě plně automatizovaného pracoviště ICT<sup>2</sup> za účelem funkčního testování osazených desek plošných spojů. Zkušební linka byla poskytnuta hlavním řešitelem projektu IMI, viz Obrázek 5.



---

<sup>2</sup> In-Circuit Test



Obrázek 5: Zkušební linka pro ICT testy

## Koncepce intuitivního navádění

Byla ustálena koncepce intuitivního navádění robotu ve smyslu využití 3D senzoru připojeného ke koncovému efektoru robotu, viz Obrázek 6. Jedná se o 3D SpaceMouse zařízení výrobce 3Dconnexion (dále jen myš), viz Obrázek 7, standardně využívané např. pro kreslení v 3D softwarech.

Samotné šasi 3D myši bylo redesignováno za účelem její instalace na robot a systémové integrace do nadřazeného řídicího systému robotu.

Nadřazený řídicí systém robotu byl implementován v prostředí REXYGEN<sup>3</sup>. Schématické uspořádání nadřazeného řídicího systému robotu za účelem rozšíření kontroly robotu UR5 možností intuitivního navádění je znázorněno na Obrázku 8.

Poznamenejme, že roboty UR mají ve své výbavě také možnosti určitého navádění v režimu Hand-Guidance, nicméně se jedná o režim, kdy je robot odbrzděn, držen v regulaci a dílčí klouby jsou rozvolněny takovým způsobem, že je možné je přestavovat manuálně. Takový režim sice umožňuje robot přestavit do požadované polohy, nicméně jakékoliv koordinované a přesné navádění koncového efektoru je velmi obtížně realizovatelné. Navíc musí operátor vyvinout poměrně velkou sílu k natočení dílčích ramen robotu.

---

<sup>3</sup> [www.rexygen.com](http://www.rexygen.com)

### **Předložené intuitivní navádění robotu je implementováno ve dvou režimech:**

1. 3D myš je instalována přímo na koncovém efektoru robotu - Hand-Guidance systém:
  - a. Operátor je v bezprostřední blízkosti robotu
  - b. Operátor "táhne" robot za jeho koncový efektor
2. 3D myš je umístěna samostatně a slouží jako bezdrátový ovladač robotu:
  - a. Operátor je v libovolné vzdálenosti od robotu
  - b. Operátor ovládá robot podobně jako joystickem - operátorské navádění robotu na dálku

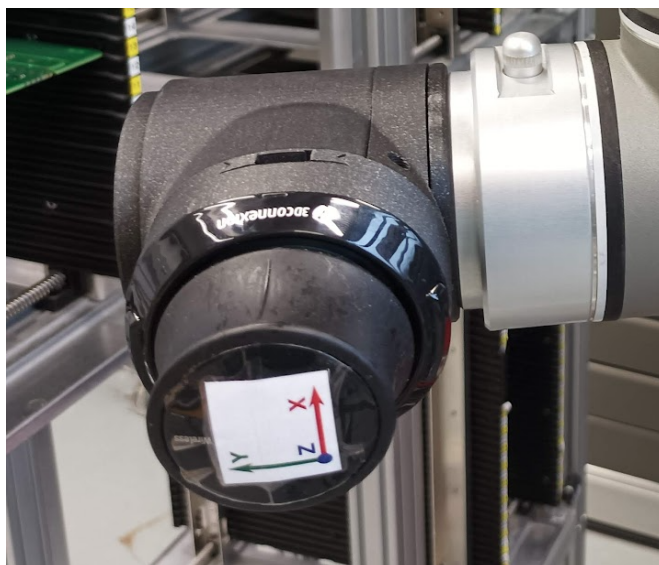
Průběh experimentů původního navádění robotu UR5 a předložené koncepce navádění prostřednictvím 3D myši je demonstrováno na následujícím [videu](#).

Intuitivní navádění robotu lze konfigurovat následujícím způsobem, viz příslušná sekce operátorského panelu na Obrázku 9:

1. **Citlivost myši:** (*Velocity factor*) Umožňuje měnit rychlost pohybu robotu od rychlého pohybu až po možnosti precizního přesného navádění.
2. **Režim ovládání:** (*Jog mode*)
  - a. *World*: Není relevantní pro ovládání 3D myši (koordinovaný JOG v souřadném systému základny robotu při ovládání tlačítka v sekci *COORD JOG*)
  - b. *Tool*: Není relevantní pro ovládání 3D myši (koordinovaný JOG v souřadném systému efektoru/nástroje robotu při ovládání tlačítka v sekci *COORD JOG*)
  - c. **Mouse**: Hand-Guidance ovládání robotu tažením za 3D myš připnutou na koncovém efektoru robotu
  - d. *AutoAlignX/Y/Z*: Není relevantní pro ovládání 3D myši (automatické zarovnání osy X/Y/Z souřadného systému efektoru kolmo do nejbližší XY nebo YZ nebo XZ roviny)
  - e. **Remote Mouse (Base)**: Ovládání robotu 3D myši, která je sejmuta z robotu (ovládání na dálku) v souřadném systému základny robotu.
  - f. **Remote Mouse (Tool)**: Ovládání robotu 3D myši, která je sejmuta z robotu (ovládání na dálku) v souřadném systému koncového efektoru/nástroje robotu.
3. **Mouse DoF lock**: Možnosti blokáce vybraných stupňů volnosti pohybu (DoF<sup>4</sup>) - vhodné pro precizní polohování s omezeným požadavkem na pohyb koncového efektoru robotu
  - a. **XYZ ROT**: Povolen plný pohyb - 6 DoF (translace i rotace)
  - b. **XYZ**: Povolen pouze translace - 3 DoF
  - c. **ROT**: Povolen pouze orientace - 3 DoF
  - d. **XYZ XROT**: Specifický režim, kdy je povolena translace (3 DoF) a orientace kolem osy X (1 DoF) - 4 DoF

---

<sup>4</sup> Degrees Of Freedom



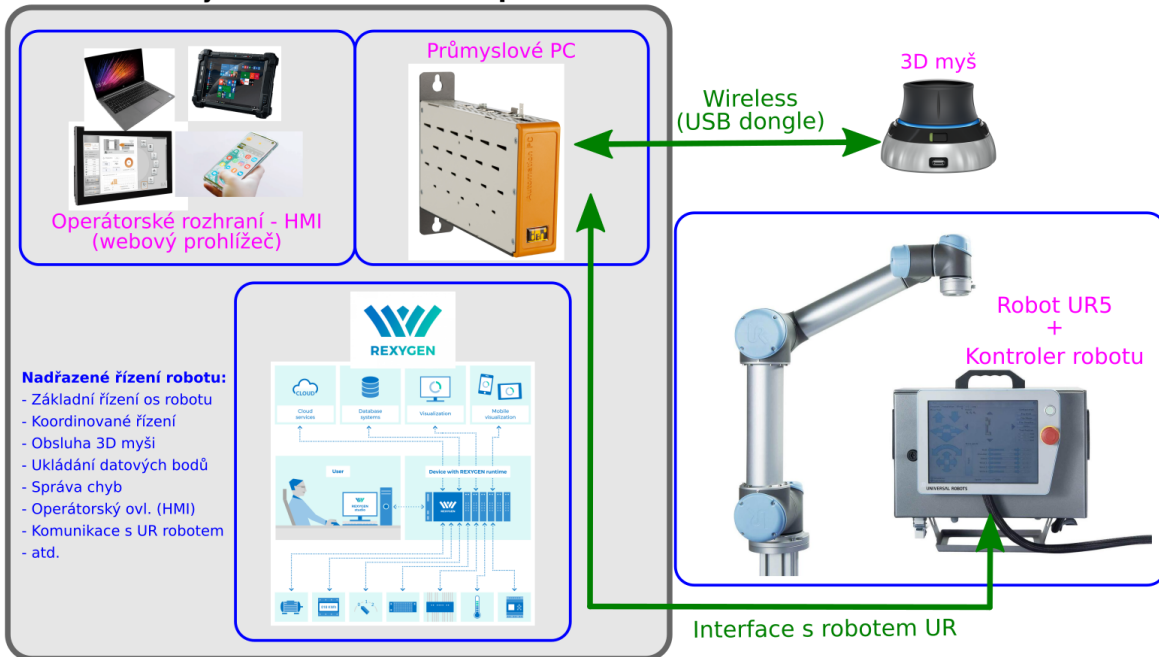
Obrázek 6: Senzor 3D myši připevněný na koncovém efektoru robotu UR5



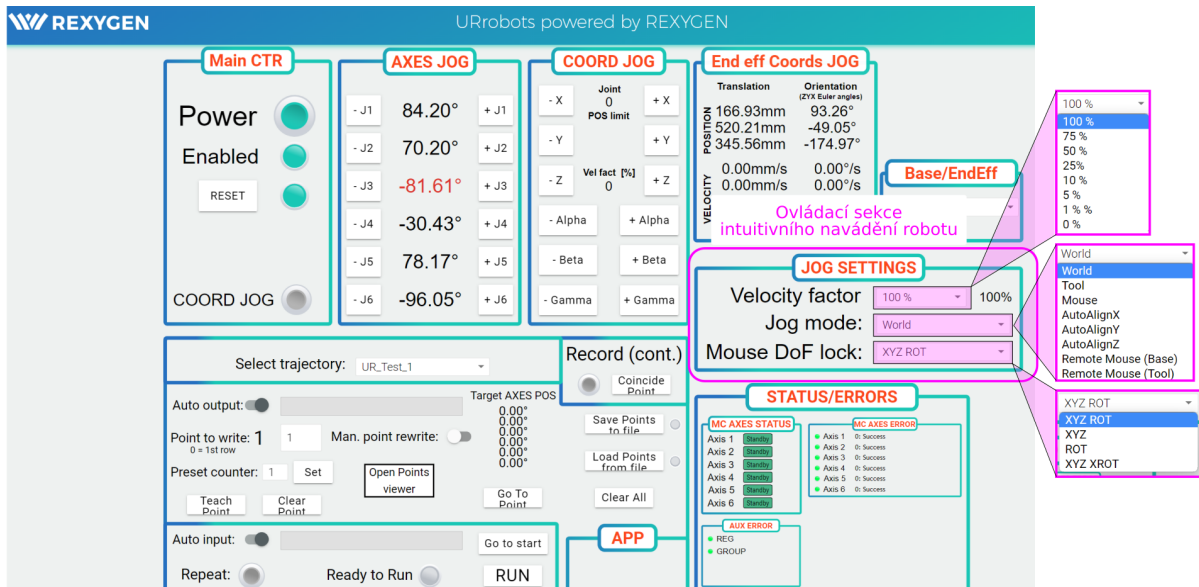
Obrázek 7: Senzor 3D myši, který byl integrován s robotem UR5



## Nadřazený kontroler robotu (aplikace)



Obrázek 8: Schématické uspořádání nadřazeného řídicího systému (pro intuitivní ovládání robotu)



Obrázek 9: Operátorské rozhraní nadřazeného řídicího systému (HMI) s vyznačenou sekcí ovládání intuitivního navádění robotu

## Specifika interfacu mezi nadřazeným řídicím systémem a kontrolerem robotu UR5:

Společnost Universal Robots (UR) nabízí několik možností, jak vzdáleně komunikovat s jejich roboty a jak je vzdáleně řídit. Tyto možnosti byly podrobně zkoumány v projektu *FV20597 (Nová technologie pro inteligentní plánování pohybu robotů v průmyslových procesech)*, viz technická dokumentace [6]. Tamtéž byly také vytipovány tři TCP/IP komunikační interface připravené na kontrolerech společnosti Universal Robots. Na kontroleru běží servery těchto rozhraní a implementací klientů je možné roboty do velké míry vzdáleně ovládat. Komunikační klient je vždy implementován v řídicím systému REXYGEN do programovatelného bloku REXLANG, doplněn o potřebné vstupy, výstupy, parametry a v případě potřeby o pomocné bloky. Logicky ucelený soubor bloků určený pro konkrétní komunikaci pak tvoří subsystém. Jedná se o následující subsystémy:

- UR\_SendScript - Subsystém implementuje Primary a Secondary klienty<sup>5</sup> a jeho účelem je nahrání do kontroleru URScript uložený ve formě textového souboru a spuštění tohoto skriptu. Pomocí skriptu se nastaví například požadované napětí na konektoru nástroje, které je měnitelné, a požadovaný režim analogového vstupu. Dále se ve skriptu nastavuje Watchdog kvůli bezpečnosti a registry využívané pro Real-Time ovládání robota pomocí subsystému UR\_RTDE.
- UR\_Dashboard - Využívá jednoduchého tzv. Dashboard serveru a dokáže číst a měnit stav robotu. Robot a kontroler se mohou nacházet v mnoha různých stavech, které lze pomocí Dashboard měnit podobně, jako by to dělala obsluha přes teach pendant. Jediný stav, který nelze takto programově obejít je Emergency Stop. Dashboard komunikace je lehce jiná pro e-series<sup>6</sup> a cb-series<sup>7</sup> roboty. Pro aktuální použití ale UR\_Dashboard funguje stejně na obou verzích a není potřeba je rozlišovat.
- UR\_RTDE - Subsystém využívá RTDE<sup>8</sup> komunikaci k řízení pohybu robotu, čtení a zápisu I/O. Pro CB-series mohou být data komunikována s frekvencí až 125 Hz, pro e-series až 500 Hz.

Tyto dříve vytvořené subsystémy byly v současné době revidovány a upraveny pro aktuální potřeby projektu. Subsystémy byly umístěny do knihovny bloků kvůli udržitelnosti. Předpokládají se další drobné úpravy, aby knihovna mohla být co nejefektivněji použita v aktuálním projektu.

## Závěr

Předložená technická zpráva se zabývá popisem nadřazeného řídicího systému robotu UR5 za účelem intuitivního navádění robotu operátorem výroby. Navržený koncept byl experimentálně otestován přímo na zkušební lince automatizovaných ICT testů osazených desk PCB.

---

<sup>5</sup> [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/16496/ClientInterfaces\\_Primary.pdf](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/16496/ClientInterfaces_Primary.pdf)

<sup>6</sup> <https://www.universal-robots.com/articles/ur/dashboard-server-e-series-port-29999/>

<sup>7</sup> <https://www.universal-robots.com/articles/ur/dashboard-server-cb-series-port-29999/>

<sup>8</sup> <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/real-time-data-exchange-rtde-guide/>

Virtuální simulační model robotu (pilotní aplikace) nebyl zatím implementován, neboť bylo možné všechny experimenty realizovat přímo na skutečném robotu UR5.

## Reference

- [1] M. Švejda, A. Jáger, J. Reitinger: *Koncepce operátorské navádění robotu za účelem intuitivního programování*, technická zpráva, ZČU, 2022.
- [2] M. Švejda, J. Reitinger, M. Goubey: *Návrh senzorického systému a zpracování dat*, ZČU, 2020.
- [3] A. Jáger, V. Štrunc, J. Jirásko: *Výkresové dokumentace prototypu*, ZČU, 2020.
- [4] M.Švejda, A. Jáger, J. Reitinger, O. Severa: *Prototyp záznamového zařízení (Uživatelská dokumentace)*, ZČU, 2021.
- [5] Video dokumentace projektu FV2597:  
<https://drive.google.com/file/d/1nrb5jfy3G7YkD3ilyYCsjEvOZWwt7ec/view?usp=sharing>
- [6] J. Reitinger, V. Šetka: *Aktivita 3.3: Vývoj interfacu s průmyslovým robotem*, ZČU, 2019.