

# MPO TRIO

Název projektu:

Nová technologie pro inteligentní plánování pohybu robotů v průmyslových procesech  
(FV 20597)

## Výzkumná zpráva

Návrh senzorického systému a zpracování dat  
(Kalibrace a testování systému OTUS tracker)

Jan Reitinger, Martin Švejda (ZČU)

27. 12. 2018



MINISTERSTVO  
PRŮMYSLU A OBCHODU

**Identifikátor účastníka:**

ZČU: Západočeská univerzita v Plzni, LT: LaserTherm spol. s r.o.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2 Komunikační interface se zařízením OTUS tracker</b>	<b>5</b>
<b>3 Analýza přesnosti měření zařízení OTUS tracker</b>	<b>7</b>
3.1 Kalibrace umístění senzoru OTUS tracker na přírubu průmyslového robotu Stäubli TX40 . . . . .	10
3.2 Měření přesnosti snímače OTUS tracker s pomocí robotu Staübli TX40 . . . . .	14
<b>4 Závěr</b>	<b>20</b>
<b>A Datasheet systému OTUS tracker</b>	<b>22</b>
<b>B Datasheet robotu Stäubli TX40</b>	<b>27</b>
<b>C Kinematický model robotu Stäubli TX40</b>	<b>33</b>
<b>D Výsledky kalibrace umístění senzoru OTUS tracker na přírubu průmyslového robotu Stäubli TX40</b>	<b>34</b>
<b>E Fotodokumentace z testování</b>	<b>36</b>

# 1 Úvod

V rámci výzkumné zprávy byly analyzovány možnosti konfigurace senzorického systému pro sběr prostorových dat pohybujícího se objektu. V rámci řešeného projektu je pohybujícím se objektem chápáno dílčí technologické zařízení, jehož pohyb je dán lidským operátorem výroby. Jedná se typicky o svařovací hořáky či lakovací pistole a další.

Jednou z konkrétních předpokládaných aplikací v řešeném projektu je sledování pohybu lakovací pistole vedené lakýrníkem. Celý proces lakování je realizován uvnitř speciální lakovací buňky, viz Obrázek 1.



Obrázek 1: Lakovací buňka (firma JANTAR Plzeň s.r.o.)

Prioritním cílem výzkumu zařízení (dále jen *trekovací zařízení*), prostřednictvím kterého by byl zaznamenáván pohyb operátora výroby přímo během technologického procesu za účelem následné interpretace dat robotem, bylo podrobně analyzovat některý stávající systém pro zachytávání pohybu. Vzhledem k faktu, že lze v současnosti na trhu nalézt celou řadu systémů prioritně určených zejména pro herní a filmový průmysl jako (Xsens MVN, OptiTrack, VICON, Leap, atd.), je rozumné se zabývat myšlenkou, zda-li by nebylo možné některé z takových zařízení přímo využít pro snímání pohybu nástroje vedeného operátorem výroby během technologického procesu. Vzhledem k dostupnosti, ceně a technologii snímání pohybu (kde systémy založené výlučně na snímání kamerami ve viditelném pásmu se nezdají příliš vhodné vzhledem k technologickému procesu) byl vybrán jako testovací HW produkt vyvinutý firmou Vave pro uživatele SteamVR (<https://steamcommunity.com/steamvr>) a HTC Vive (<https://www.vive.com/us/>) s koncovým názvem *OTUS tracker* (<https://www.rcbenchmark.com/pages/otus-tracker>), viz Obrázek 2, který v součinnosti se stanicemi *HTC Vive Base Station* (<https://www.vive.com/us/accessory/base-station/>), viz Obrázek 3, tvoří kompletní systém zachytávání pohybu.



Obrázek 2: Systém Otus Tracker (pevně spojen s pohybujícím se objektem)



Obrázek 3: Měřicí základny HTC Vive

## Princip činnosti systému OTUS tracker a deklarované vlastnosti

Systém může být osazen jednou či dvěma základnami HTC Vive, které vyzařují IR synchronizační pulzy a dále generují ve dvou osách rozmítaný IR laser. Každý sledovaný objekt (OTUS tracker) má několik (jednotky až desítky) fotodiód. Z rozdílů časů mezi synchronizačním pulzem a ozářením konkrétní fotodiody laserem lze určit prostorový úhel mezi základnou a fotodiódou. Z více fotodiód a základen pak lze určit 6DoF polohu. Systém je tzv. *line-of-sight*, a tedy musí být zajištěna přímá viditelnost mezi dostatečným počtem fotodiód a dvěma základnami. Maximální doporučená vzdálenost mezi základnami činí 5 m a sledované zařízení by mělo být podle výrobce ve vzdálenosti 0,7 - 5 m od obou základen.

Prioritně je OTUS tracker určen především pro sledování pohybů robotů a dronů ve vnitřních prostorech.

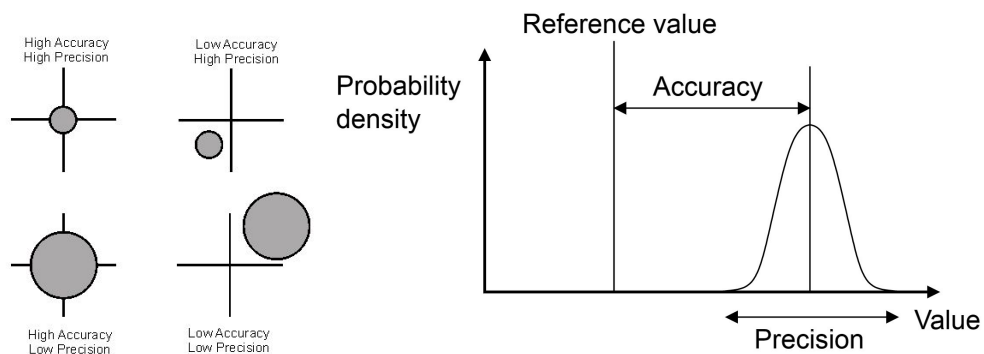
Deklarované vlastnosti systému OTUS tracker jsou uvedeny v příloze A.

## Relevance systému OTUS tracker k řešenému projektu

Systém OTUS tracker byl vybrán pro podrobné testování vzhledem k výzkumu a vývoji trekovacího zařízení z následujících důvodů:

- Optický systém v neviditelném IR spektru (s předpokladem malé závislosti na kvalitě osvětlení)

- Kompaktní design - zejména pak relativně subtilní tělo vlastního snímače (rozměr 102x88x98mm, hmotnost cca 60g)
- Možností duplikovat nasazený systém a pokrýt velké prostory (pro 2 základní stanice garantován rozsah pohybu v krychli 5x5x5m)
- Garance vysoké přesnosti ve sledování polohy: Position precision  $\pm 1mm$ , Position accuracy  $\pm 10mm$ , Orientation precision  $\pm 1deg$



- Možnosti rychlého synchronního online přenosu dat: Pose update rate up to 400 Hz
- Možnost integrace systému OTUS tracker do komplexního systému trekovacího zařízení jako dílčí součást

Následující text zprávy se dělí do dvou klíčových kapitol, a to:

### **Komunikační interface se zařízením OTUS tracker, komunikace snímaných dat do řídicího systému reálného času REXYGEN**

Popis komunikačního rozhraní mezi zařízením OTUS tracker a řídicím systémem REXYGEN, viz [4], který je používán pro řízení průmyslových systémů, řízení pohybu a zpracování dat na našem výzkumném pracovišti.

#### **Analýza přesnosti měření zařízení OTUS tracker**

Za účelem ověření přesnosti snímače OTUS tracker byla vyvinuta metodika měření sestávající se z dvou fází: 1) Kalibrace umístění senzoru OTUS tracker na přírubu průmyslového robotu Staubli TX40 [1], viz technická specifikace v Kapitole B, 2) Měření přesnosti snímače OTUS tracker s pomocí robotu Staubli TX40.

## **2 Komunikační interface se zařízením OTUS tracker**

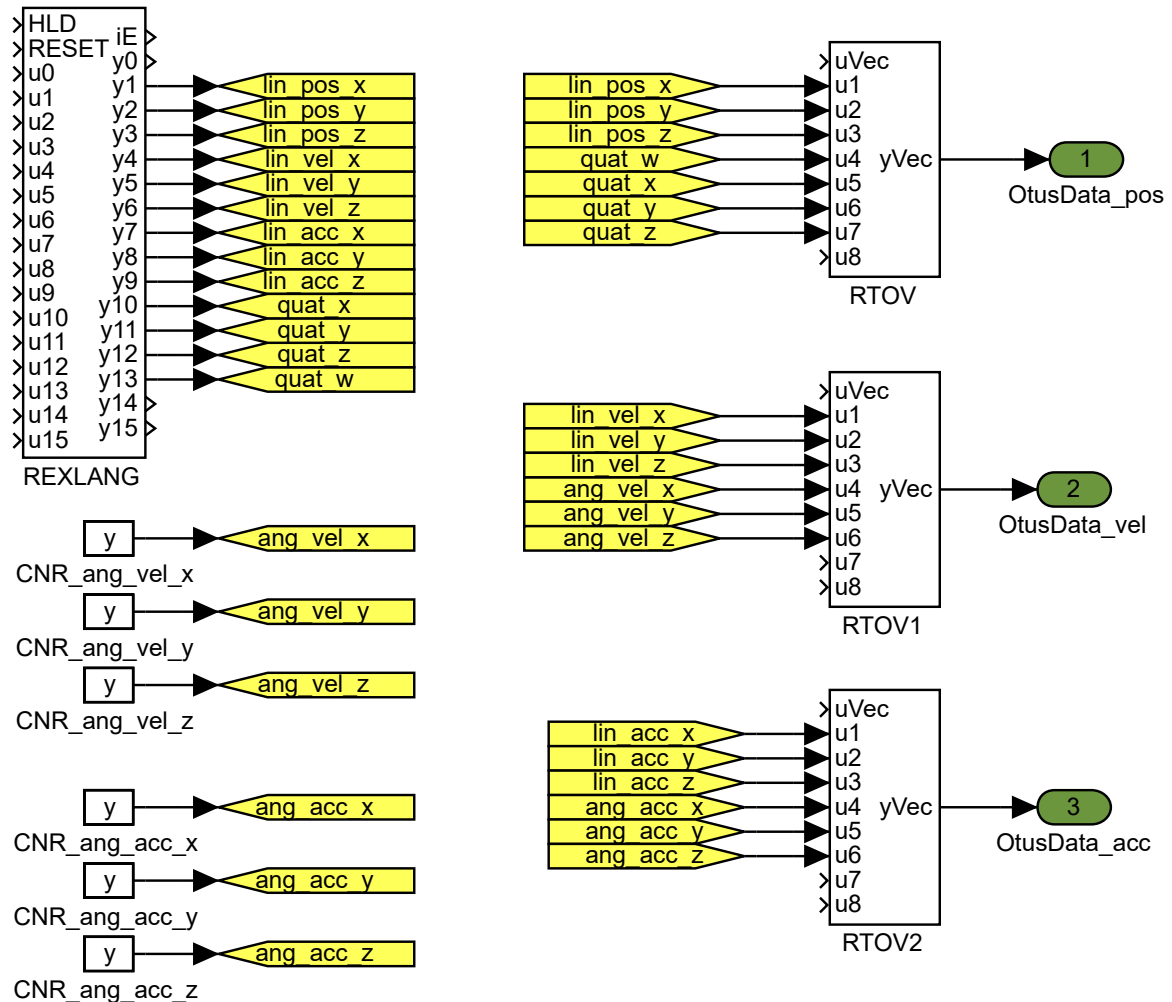
Data z OTUS trackeru mohou být přenášena do počítače buď pomocí USB kabelu nebo pomocí WiFi USB dongle. Pro přenos pomocí kabelu udává výrobce maximální frekvenci (Pose update rate) 400 Hz a pro bezdrátový přenos 250 Hz. Pro vyhodnocování dat je potřeba mít na počítači nainstalovanou a spuštěnou aplikaci RCbenchmark Tracking Lab, která zobrazuje polohu objektu a může ji zaznamenávat do CSV souboru nebo ji streamovat pomocí UDP packetů na nějaké další zařízení. V současné době je aplikace dostupná pouze pro OS Windows. Analýza přesnosti měření, která je popsána v další kapitole, byla prováděna pomocí bezdrátového přenosu dat a veškeré nasbírané informace byly posílány s využitím protokolu UDP do zařízení s řídicím systémem REXYGEN. Struktura packetů je uvedena v Tabulce 1.

O čtení UDP packetů v REXYGENU se stará task otus\_tracker. Jeho hlavní částí je programovatelný blok REXLANG, na jehož výstupech jsou zobrazovány popořadě aktuální hodnoty

byte	význam
0-7	ID OTUS zařízení
8-15	Časová značka
16-23	Lineární pozice v ose x
24-31	Lineární pozice v ose y
32-39	Lineární pozice v ose z
40-47	Lineární rychlost v ose x
48-55	Lineární rychlost v ose y
56-63	Lineární rychlost v ose z
64-71	Lineární zrychlení v ose x
72-79	Lineární zrychlení v ose y
80-87	Lineární zrychlení v ose z
88-95	Kvaternion x
96-103	Kvaternion y
104-111	Kvaternion z
112-119	Kvaternion w
120-127	Úhlová rychlost x
128-135	Úhlová rychlost y
136-143	Úhlová rychlost z
144-151	Úhlové zrychlení x
152-159	Úhlové zrychlení y
160-167	Úhlové zrychlení z
168-175	HW tlačítko 1
176-183	HW tlačítko 2

Tabulka 1: Struktura UDP packetu

lineárních pozic, rychlostí, zrychlení a kvaternionů. Vzhledem k malému množství výstupů bloku jsou úhlové rychlosti a zrychlení zapisovány REXLANGem do bloků CNR. Signály jsou následně multiplexovány do tří vektorů pomocí bloků RTOV, přičemž každý vektor sdružuje dohromady pozice/kvaterniony, rychlosti a zrychlení. Tyto vektory jsou pak výstupy tasku a porovnávají se s referenčními daty. Celý task otus\_tracker je na Obrázku 4.



Obrázek 4: Vyčítání dat z Otus trackeru v REXYGEN

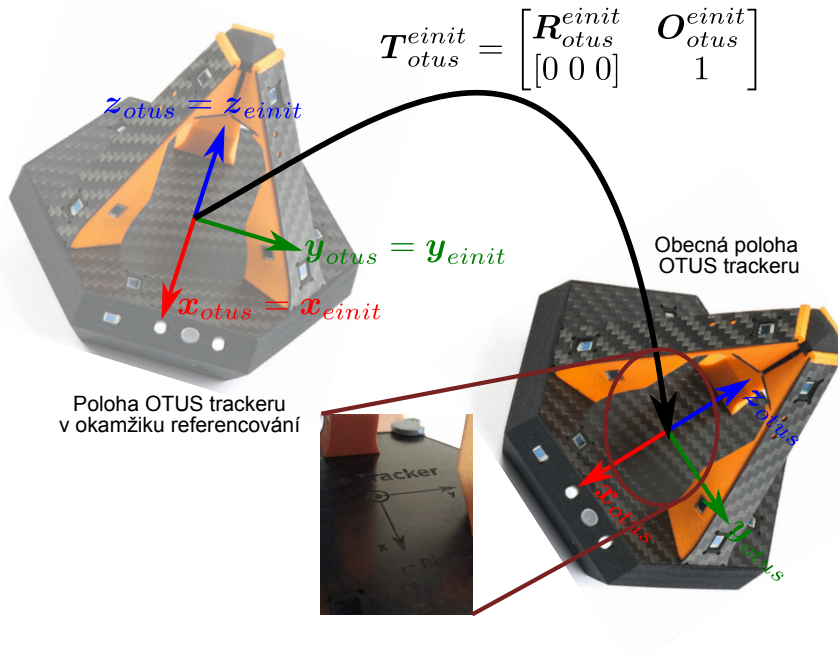
### 3 Analýza přesnosti měření zařízení OTUS tracker

Metoda měření přesnosti sledování prostorového pohybu pomocí snímače OTUS tracker je založena na umístění snímače na koncový efektor průmyslového robotu (Stäubli TX40). Definovaný pohyb robotu ve smyslu referenčního měřidla je pak porovnáván se zaznamenávaným pohybem snímače a jsou vyhodnocovány konkrétní odchylky měření. Vzhledem ke garantované opakovatelnosti polohování robotu ( $\pm 0.02mm$  dle ISO 9283) a opakovatelnosti/přesnosti snímače OTUS tracker ( $\pm 1mm / \pm 10mm$ ) je vybraný robot vhodným referenčním měřidlem k uvažované úloze. Poznamenejme, že absolutní přesnost robotu není relevantní, neboť bude měření prováděno diferenčně, jak je popsáno dále.

#### Princip měření prostorové polohy snímačem OTUS tracker

OTUS tracker měří absolutní polohu (posun v osách  $x$ ,  $y$  a  $z$  a orientaci v kvaternionu) vzhle-

dem k lokálnímu souřadnému systému (s.s.). Lokální s.s. je definován jako s.s. pevně spojený se snímačem v místě, kde byl snímač referencován (v ovládacím programu snímače - aplikace RCbenchmark Tracking Lab - resetován lokální s.s.). Tzn. snímač OTUS tracker měří polohu svého s.s. vzhledem k poloze téhož s.s. v místě, kdy byl snímač referencován, viz Obrázek 5.



Obrázek 5: Princip měření polohy snímačem OTUS tracker

Data přenášená prostřednictvím aplikace RCbenchmark Tracking Lab do řídicího systému REXY-GEN, viz Kapitola 2, jsou reprezentována vektorem posunutí a kvaternionem<sup>1</sup> a lze je obecně reprezentovat homogenní transformační maticí

$$\mathbf{T}_{otus}^{einit} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{otus}^{einit} & \mathbf{O}_{otus}^{einit} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde  $\mathbf{R}_{otus}^{einit}$  je matice rotace (přepočtená z kvaternionu) a  $\mathbf{O}_{otus}^{einit}$  je vektor posunutí s.s.<sup>2</sup>  $F_{otus}$  vzhledem k s.s.  $F_{einit}$ , viz [5, 3, 7].

Lze předpokládat, že kinematickou architekturu robotu Stäubli TX40 známe přesně (včetně všech návrhových parametrů reprezentovaných délkami ramen a vzájemnou orientací os rotace, viz Kapitola C). Snímač OTUS tracker je umístěn na přírubu koncového efektoru robotu (přes vhodnou konstrukční redukci - 3D tisk) a jeho s.s.  $F_{otus}$  tedy reprezentuje tzv. kompenzaci polohy koncového efektoru robotu  $F_e = F_{otus}$ . Jinými slovy OTUS tracker představuje nástroj umístěný na koncovém efektoru robotu - kompenzace mezi polohami s.s.  $F_6$  (poslední rameno robotu) a  $F_e$ , viz Obrázek 6.

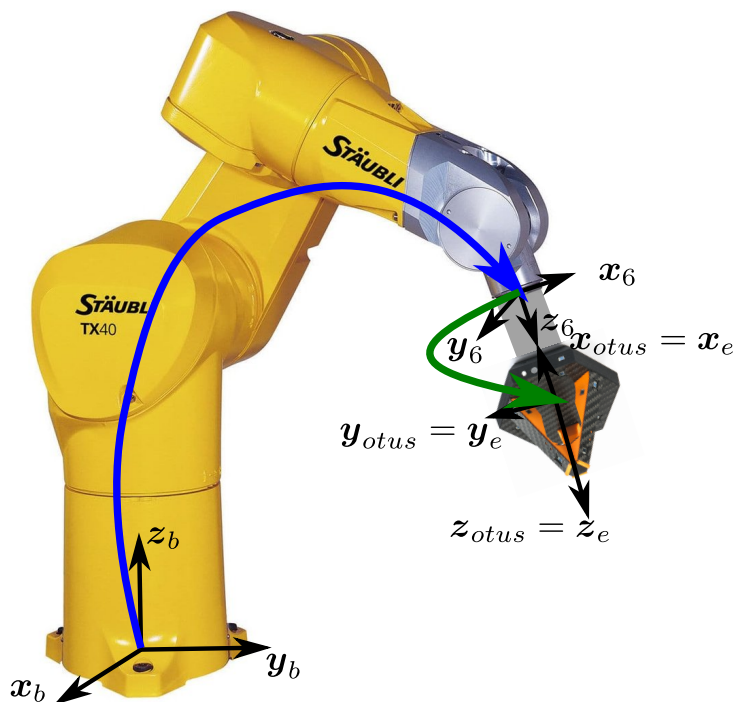
Výsledné kinematické schéma sestavy robotu a snímače je reprezentováno na Obrázku 7.

Dílní kinematické transformace reprezentované homogenními transformačními maticemi mají následující význam:

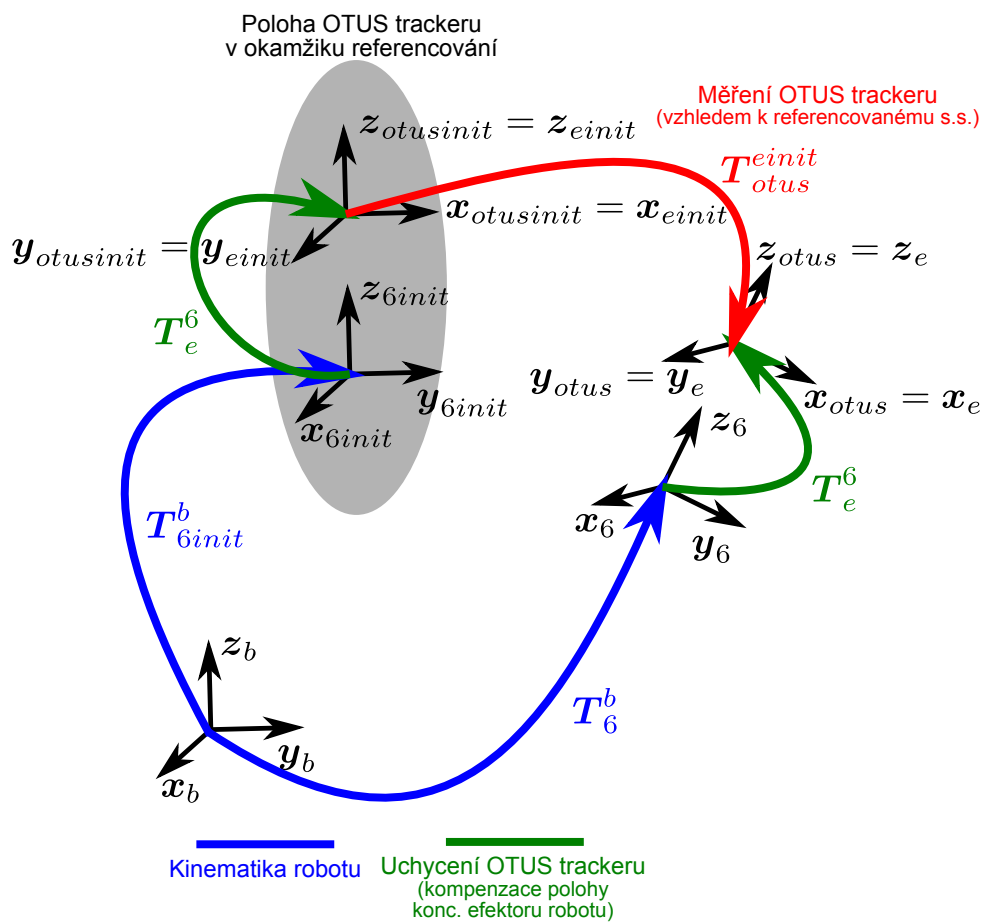
<sup>1</sup>Kvaternion představuje jednu z možností reprezentace orientace tělesa v prostoru.

<sup>2</sup> $F_i$  označuje s.s. s počátkem  $\mathbf{O}_i$  a souřadnicovými osami  $\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{z}_i$ .





Obrázek 6: Umístění OTUS trackeru na přírubě robotu (kompenzace polohy koncového efektoru)



Obrázek 7: Kinematické schéma Staubli TX40 + OTUS tracker

$T_6^b$  Transformace daná vlastním pohybem kloubů robotu. Transformace je závislá na poloze kloubů robotu a lze ji počítat standardním postupem pro výpočet dopředné kinematické úlohy pro sériové manipulátory [6, 5]. Transformace reprezentuje polohu s.s. posledního ramene manipulátoru - příruby (bez uvažování kompenzace polohy koncového efektoru).

**Transformace je známá pro známé (měřené) klouby robotu.**

Kinematický model robotu (včetně definice umístění s.s.  $F_6$  na přírubě robotu je uveden v Kapitole C).

$T_e^6$  Transformace reprezentující umístění OTUS trackeru (obecně nástroje) na přírubu robotu.

**Transformace není přesně známá a její nalezení je cílem kalibrace.**

Dokumentace OTUS trackeru sice uvádí umístění s.s.  $F_{otus}$  na těle snímače, nicméně vlastní umístění snímače na přírubu robotu prostřednictvím konstrukční redukce není zcela přesné. V průběhu testování bylo navíc zjištěno, viz dále, že umístění s.s.  $F_{otus}$  na těle snímače sice odpovídá svou orientací, nicméně počátek s.s. vykazuje nezanedbatelnou odchylku v posunutí v osách  $x$ ,  $y$  a zásadní odchylku v posunutí v ose  $z$ .

$T_{otus}^{einit}$  Transformace daná měřením OTUS trackeru vůči referencované poloze, tzn. poloha s.s.  $F_{otus} = F_e$  vzhledem k s.s.  $F_{otusinit} = F_{einit}$ . Data jsou streamovaná přes popsanou komunikaci v Kapitole 2 do řídicího systému REXYGEN a jsou přepočtena do standardního tvaru homogenní transformační matice.

**Transformace je známá a daná měřením OTUS trackeru.**

### 3.1 Kalibrace umístění senzoru OTUS tracker na přírubu průmyslového robotu Stäubli TX40

Vzhledem k faktu, že umístění OTUS trackeru na přírubě robotu, tedy transformace  $T_e^6$ , není přesně známo, je třeba nejprve tuto transformaci identifikovat (kalibrovat umístění snímače).

Z uzavřené kinematické smyčky, viz Obrázek 7, lze psát následující podmínku:

$$T_{6init}^b \cdot T_e^6 \cdot T_{otus}^{einit} = T_6^b \cdot T_e^6 \quad (2)$$

kde  $T_{6init}^b$  reprezentuje polohu robotu v okamžiku referencování OTUS trackeru,  $T_6^b$  reprezentuje obecnou polohu robotu (aktuální referenční měřicí poloha),  $T_{otus}^{einit}$  je měřená poloha OTUS trackerem (vůči s.s. v okamžiku referencování) a  $T_e^6$  je hledané (kalibrované) umístění OTUS trackeru na přírubě robotu.

#### Kalibrace orientace

Za účelem kalibrace orientace umístění OTUS trackeru na přírubu robotu lze rovnici (2) přepsat do tvaru matic rotace jednotlivých transformací a upravit následovně<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} R_{6init}^b \cdot R_e^6 \cdot R_{otus}^{einit} &= R_6^b \cdot R_e^6 \\ R_{otus}^{einit} &= (R_e^6)^T \cdot \underbrace{(R_{6init}^b)^T \cdot R_6^b}_{R_6^{6init}} \cdot R_e^6 \\ R_{otus}^{einit} &= (R_e^6)^T \cdot R_6^{6init} \cdot R_e^6 \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_e^6 \cdot R_{otus}^{einit} = R_6^{6init} \cdot R_e^6 \quad (4)$$

kde  $R_6^{6init}$  je diferenciální známá orientace příruby robotu vzhledem k její poloze při referencování OTUS trackeru,  $R_{otus}^{einit}$  je měřená orientace OTUS trackerem a  $R_e^6$  je hledaná orientace (orientace OTUS trackeru na přírubě robotu).

<sup>3</sup>Matrice rotace je ortogonální maticí, tzn. transpozice je ekvivalentní operace k inverzi:  $R^T = R^{-1}$ .

Řešení maticové rovnice (4) typu (Sylvestrova rovnice s nulovou pravou stranou)

$$\mathbf{X} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{X} \quad (5)$$

se známými maticemi  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{3,3}$ ,  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{3,3}$  a hledanou maticí  $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{3,3}$  kde

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_e^6, \quad \mathbf{A} = \mathbf{R}_{otus}^{einit}, \quad \mathbf{B} = \mathbf{R}_6^{6init} \quad (6)$$

lze nalézt přepsáním rovnice do tvaru soustavy lineárních rovnic, viz [https://en.wikipedia.org/wiki/Sylvester\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Sylvester_equation):

$$\underbrace{(\mathbf{I}_{3 \times 3} \otimes \mathbf{B} - \mathbf{A}^T \otimes \mathbf{I}_{3 \times 3})}_{\in \mathbb{R}^{9,9}} \cdot \underbrace{\mathbf{vect} \mathbf{X}}_{\in \mathbb{R}^{9,1}} = \mathbf{O} \quad (7)$$

kde  $\otimes$  je Kronekerův součin matic, viz [https://en.wikipedia.org/wiki/Kronecker\\_product](https://en.wikipedia.org/wiki/Kronecker_product),  $\mathbf{I}_{3 \times 3}$  je jednotková matice a hledaná proměnná<sup>4</sup>

$$\mathbf{vect} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(:, 1) \\ \mathbf{X}(:, 2) \\ \mathbf{X}(:, 3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Rovnice (5) zahrnuje jedno měření (jednu polohu robotu), pro  $N$  měření dostáváme soustavu rovnic:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{vect} \mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (9)$$

kde

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{m}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{m}_N \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{9N,9}, \quad \mathbf{m}_i = (\mathbf{I}_{3 \times 3} \otimes \mathbf{B}_i - \mathbf{A}_i^T \otimes \mathbf{I}_{3 \times 3}) \quad (\text{pro } i\text{-té měření})$$

Rovnici (9) lze dále upravit na:

$$\underbrace{(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})}_{\in \mathbb{R}^{9,9}} \cdot \mathbf{vect} \mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (10)$$

Lze ukázat, že matice  $(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})$  v rovnici (10) je singulární, tzn. existuje její netriviální řešení ( $\mathbf{vect} \mathbf{X} \neq \mathbf{0}$ ). V případě použití reálných dat měření však dochází v důsledku nepřesností k tomu, že rovnice (10) se stává nekonzistentní (neplatí rovnost). Nalezení vektoru  $\mathbf{vect} \mathbf{X}$  pak vede na řešení optimalizačního problému:

$$\mathbf{vect} \mathbf{X}^* = \min_{\mathbf{vect} \mathbf{X}} \frac{\|(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M}) \cdot \mathbf{vect} \mathbf{X}\|}{\|\mathbf{vect} \mathbf{X}\|} = v_{min}(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M}) \quad (11)$$

kde  $\|\star\|$  je 2-norma vektoru a  $v_{min}(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})$  je pravý singulární vektor matice  $(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})$  příslušející minimálnímu singulárnímu číslu.

Nástin důkazu spočívá v tvrzení, že pro pravý  $v_i^R$  resp. levý  $v_i^L$  singulární vektor příslušejícímu singulárnímu číslu  $\sigma_i$  obecné matice  $\mathbf{H}$  platí:

$$\sigma_i \cdot v_i^L = \mathbf{H} \cdot v_i^R \quad (12)$$

Zpětnou substitucí, viz (6, 8) tedy dostáváme hledanou matici rotace  $\mathbf{X} = \mathbf{R}_e^6$ .

<sup>4</sup>Zápis  $\mathbf{X}(:, i)$  je ekvivalentní se zápisem matic a vektorů v prostředí Matlab a označuje výběr  $i$ -tého sloupce matice  $\mathbf{X}$ .

Poznamenejme, že v případě že skutečná orientace OTUS trackeru na přírubě robotu není pouze exaktní pootočení a může docházet k dílčí nekolmosti souřadnicový os (zkreslení včetně změny měřítka), nemusí být nalezená matice rotace striktně ortogonální s jednotkovými sloupcovými vektory. Zároveň může být řešením, viz (5), i opačná matice  $-\mathbf{X}$  (znaménko lze určit jednoduše z podmínky, že se jedná o pravotočivé s.s., tzn.  $\det(\mathbf{R}_e^6) = 1$ ).

Chyba metody pro  $N$  měření ve smyslu součtu kvadrátu vzdáleností (metoda nejmenších čtverců) lze psát jako:

$$E_{rot} = \frac{1}{N-1} \cdot \| (\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M}) \cdot \mathbf{vect} \mathbf{X} \| \quad (13)$$

### Kalibrace translace

Předpis pro uzavřenou kinematickou smyčku (2) lze dále upravit (z definice homogenních transformačních matic) následovně:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_e^6 \cdot \mathbf{T}_{otus}^{einit} &= \mathbf{T}_6^{6init} \cdot \mathbf{T}_e^6 \\ \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \mathbf{R}_e^6 \cdot \mathbf{R}_{otus}^{einit} & & & \mathbf{O}_e^6 + \mathbf{R}_e^6 \cdot \mathbf{O}_{otus}^{einit} & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & & & \\ \hline & & & & & 1 \end{array} \right] &= \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \mathbf{R}_6^{6init} \cdot \mathbf{R}_e^6 & & & \mathbf{O}_6^{6init} + \mathbf{R}_6^{6init} \cdot \mathbf{O}_e^6 & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & & & \\ \hline & & & & & 1 \end{array} \right] \\ (\mathbf{I}_{3x3} - \mathbf{R}_6^{6init}) \cdot \mathbf{O}_e^6 &= \mathbf{O}_6^{6init} - \mathbf{R}_e^6 \cdot \mathbf{O}_{otus}^{einit} \end{aligned} \quad (14)$$

kde  $\mathbf{O}_6^{6init}$  resp.  $\mathbf{R}_6^{6init}$  je diferenciální známá poloha resp. orientace příruby robotu vzhledem k její poloze při referencování OTUS trackeru,  $\mathbf{O}_{otus}^{einit}$  je měřená translační poloha OTUS trackerem,  $\mathbf{R}_e^6$  je již známá identifikovaná orientace umístění OTUS trackeru na přírubě robotu a  $\mathbf{O}_e^6$  je hledaný vektor posunutí (translace OTUS trackeru na přírubě robotu).

Rovnice (14) zahrnuje opět pouze jedno měření (jednu polohu robotu), pro  $N$  měření dostáváme soustavu rovnic:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3x3} - \mathbf{R}_6^{6init} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{3x3} - \mathbf{R}_6^{6init} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{O}_e^6 = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_6^{6init} - \mathbf{R}_e^6 \cdot \mathbf{O}_{otus}^{einit} \\ \vdots \\ \mathbf{O}_6^{6init} - \mathbf{R}_e^6 \cdot \mathbf{O}_{otus}^{einit} \end{bmatrix} \quad (15)$$

kde  $\mathbf{O}_6^{6init}$ ,  $\mathbf{R}_6^{6init}$  a  $\mathbf{O}_{otus}^{einit}$  odpovídá  $i$ -tému měření.

Přeurčenou soustavu lineárních rovnic (15) lze řešit metodou nejmenších čtverců (MNČ) a nalézt tak hledaný vektor posunutí  $\mathbf{O}_e^6$  následovně:

$$\mathbf{K}_1 \mathbf{O}_e^6 = \mathbf{K}_2 \Rightarrow (\text{MNČ}) \Rightarrow \mathbf{O}_e^6 = (\mathbf{K}_1^T \cdot \mathbf{K}_1)^{-1} \cdot \mathbf{K}_1^T \cdot \mathbf{K}_2 \quad (16)$$

kde

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3x3} - \mathbf{R}_6^{6init} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{3x3} - \mathbf{R}_6^{6init} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_6^{6init} - \mathbf{R}_e^6 \cdot \mathbf{O}_{otus}^{einit} \\ \vdots \\ \mathbf{O}_6^{6init} - \mathbf{R}_e^6 \cdot \mathbf{O}_{otus}^{einit} \end{bmatrix}$$

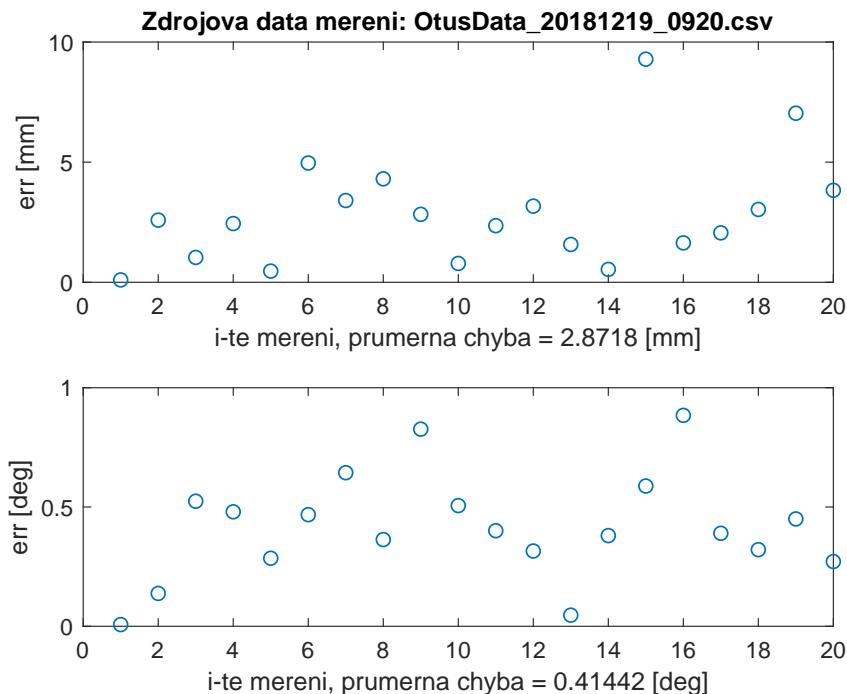
Chybu metody pro  $N$  měření ve smyslu součtu kvadrátu vzdáleností (metoda nejmenších čtverců) lze psát jako:

$$E_{trans} = \frac{1}{N-1} \cdot \| \mathbf{K}_1 \mathbf{O}_e^6 - \mathbf{K}_2 \| \quad (17)$$

## Výsledky kalibrace umístění OTUS trackeru na přírubu robotu

Identifikace umístění OTUS trackeru na přírubu průmyslového robotu byla vypočtena průměrováním ze 6-ti nezávislých měření. Každé měření bylo realizováno v 21 zadaných bodech (polohách koncového efektoru robotu). V těchto měřících polohách byl pohyb robotu zastaven a měřená data z OTUS trackeru byla po dobu 4s průměrována. Získané průměrované měřené hodnoty společně se známými odpovídajícími polohami koncového efektoru robotu byly využity v algoritmu kalibrace popsaného v Kapitole 3.1. Vzhledem k dále podrobně neprozkoumaným nahodilým poruchám (podmínky viditelnosti základen na tracker, chyba v komunikaci, atd.), které není možné nějakým způsobem identifikovat v poskytnutém komunikačním protokolu OTUS trackeru, lze pozorovat v některých měřeních evidentně neodpovídající hodnoty - takové hodnoty byly při výpočtu umístění označeny jako nerelevantní a příslušné měření v takovém bodě bylo vyloučeno.

Příklad pro jednu sadu ze 6-ti měření<sup>5</sup> je znázorněn na Obrázku 8. Výsledky kalibrace pro všech 6 sad měření je shrnuto v Kapitole D.



Obrázek 8: Jedna sada ze 6-ti měření pro 21 různých poloh robotu (1 měření vyloučeno) - výsledná chyba v poloze a orientaci měření OTUS trackeru od referenční polohy (poloha robotu), (1. hodnota odpovídá místu referencování OTUS trackeru  $\Rightarrow$  nulová chyba)

Výsledné naměřené (kalibrované) hodnoty umístění OTUS trackeru na přírubě robotu Stäubli TX40 (homogenní transformační matice  $T_e^6$ ):

<sup>5</sup>Chyba v translaci je dána normou rozdílu mezi referenční a měřenou translací. Chyba v orientaci je dána rozdílem referenční a měřené orientace ve smyslu úhlu rotace okolo dané osy rotace ( $\Leftarrow$  každá rotace lze vyjádřit jako *osa rotace + úhel okolo této osy*).

Posun v ose  $XYZ$ :

$$\mathbf{O}_e^6 = [ 13.55 \quad 1.82 \quad 49.17 ]^T [mm]$$

$$\text{Průměrná chyba identifikace: } E_{trans} = 8 \cdot 10^{-4} [mm]$$

$$\text{Průměrná chyba translace pro dílčí měření: } = 2.667 [mm]$$

$$\text{Maximální chyba translace pro dílčí měření: } = 9.47 [mm]$$

Rotace (kvaternion):

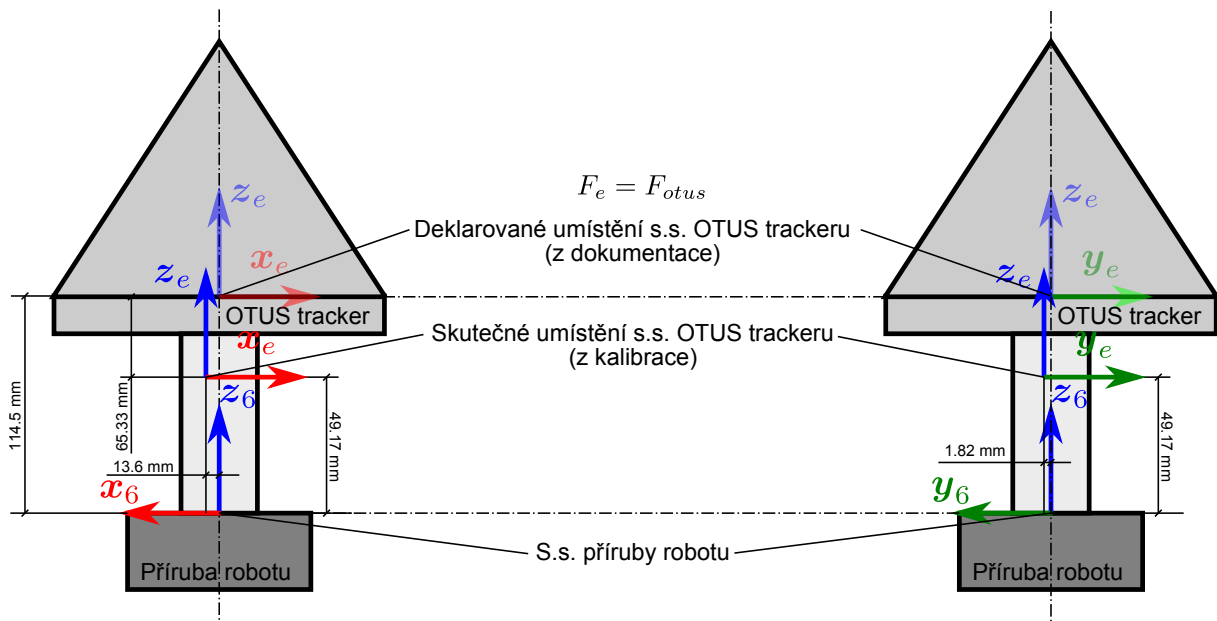
$$\mathbf{R}_e^6 \Leftarrow \mathbf{Quat}_e^6 = [ 0.004 \quad 0.005 \quad -0.002 \quad -1 ]^T [-]$$

$$\text{Průměrná chyba identifikace: } E_{rot} = 4.47 \cdot 10^{-5} [-]$$

$$\text{Průměrná chyba orientace pro dílčí měření: } = 0.396 [deg]$$

$$\text{Maximální chyba orientace pro dílčí měření: } = 0.797 [deg]$$

Poznamenejme, že umístění OTUS trackeru na s.s. příruby robotu koresponduje s vyznačeným s.s. na OTUS trackeru, viz Obrázek 5, velmi dobře v orientaci (OTUS tracker natočen o 180 stupňů okolo osy  $z$ ), ale posun počátku s.s. OTUS trackeru je v porovnání s předpokládaným vyznačeným počátkem vyosen (viz posun v osách  $XY$ ) a zásadním způsobem posunut pod základnu OTUS trackeru (viz posun v ose  $Z$ ). Skutečné umístění s.s. OTUS trackeru je znázorněno na Obrázku 9.



Obrázek 9: Skutečné umístění s.s. OTUS trackeru: Orientace je v podstatě totožná s deklarovanou, translace je oproti deklarované výrazně odlišná

Fotodokumentace z testování OTUS trackeru je uvedena v příloze E.

### 3.2 Měření přesnosti snímače OTUS tracker s pomocí robotu Staübli TX40

V následující kapitole byla analyzována možnost použití systému OTUS tracker za účelem sledování pohybu lidského operátora. OTUS tracker byl umístěn na průmyslový robot Staübli TX 40 a byl proveden proces kalibrace umístění OTUS trackeru na přírubě robotu (kompenzace polohy konc. efektoru / nástroje), viz Kapitola 3.1. V řídicím systému robotu byl naprogramován

dynamický pohyb (průjezd několika body s polynomiálním napojováním se změnou translace a orientace). Polohy a rychlosti kloubů robotu (komunikace do systému REXYGEN přes komunikaci EtherCAT prostřednictvím HW karty Stäubli uniVAL<sup>6</sup>) a měřené polohy a rychlosti OTUS trackeru (komunikace do systému REXYGEN přes rozhraní popsané v Kapitole 2) byly vyhodnoceny pro různou dynamiku pohybu.

Porovnávanými veličinami byly absolutní přesnost v translaci a orientaci a přesnost sledování požadované translační a úhlové rychlosti. Vzhledem k opakovatelnosti robotu Stäubli TX 40 a úspěšné kalibraci umístění OTUS trackeru na přírubu robotu, lze tuto sestavu považovat za vhodné referenční měřidlo.

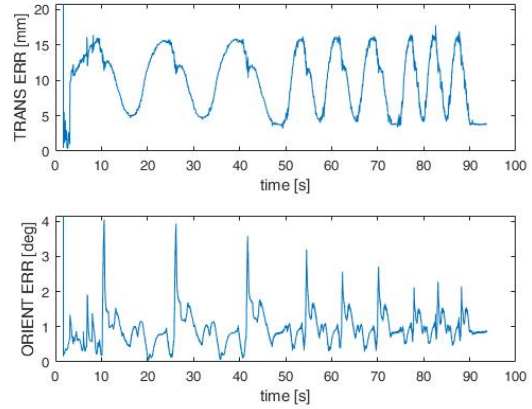
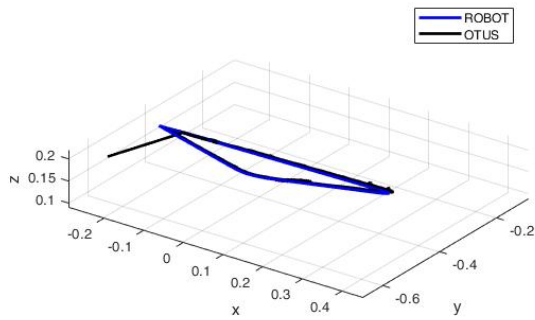
---

<sup>6</sup>Driving Stäubli robots with industrial PLCs: <https://www.staubli.com/en/robotics/product-range/robot-software/val3-robot-programming/unival-solutions/unival-plc/>

### Měření 1 (pomalý pohyb):

Translační rychlost (cca): 0.1 - 0.35 m/s

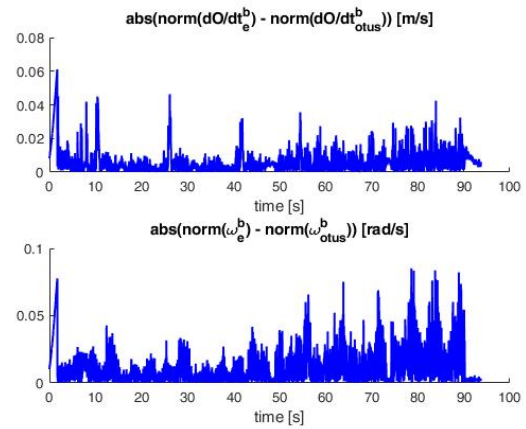
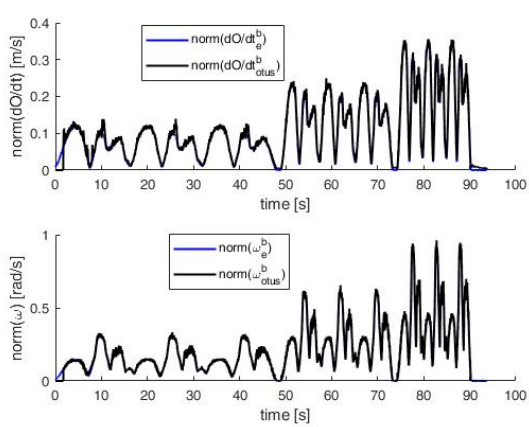
Úhlová rychlost (cca): 0.3 - 1 rad/s



(a) Porovnání translace počátku OTUS trackeru v prostoru  $XYZ$

(b) Absolutní chyba v translaci a rotaci

Obrázek 10: Měření 1: Polohy



(a) Porovnání translační a úhlové rychlosti

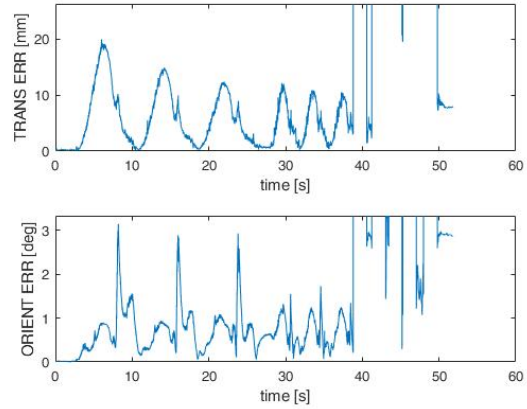
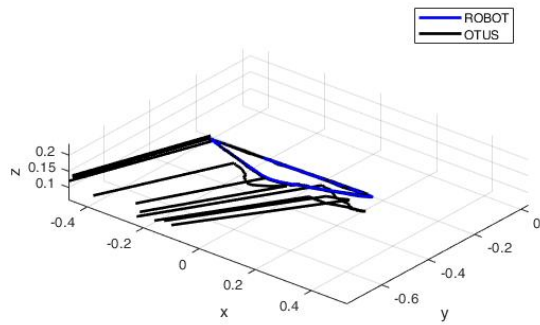
(b) Absolutní chyba v translační a úhlové rychlosti

Obrázek 11: Měření 1: Rychlosti



## Měření 2 (střední pohyb):

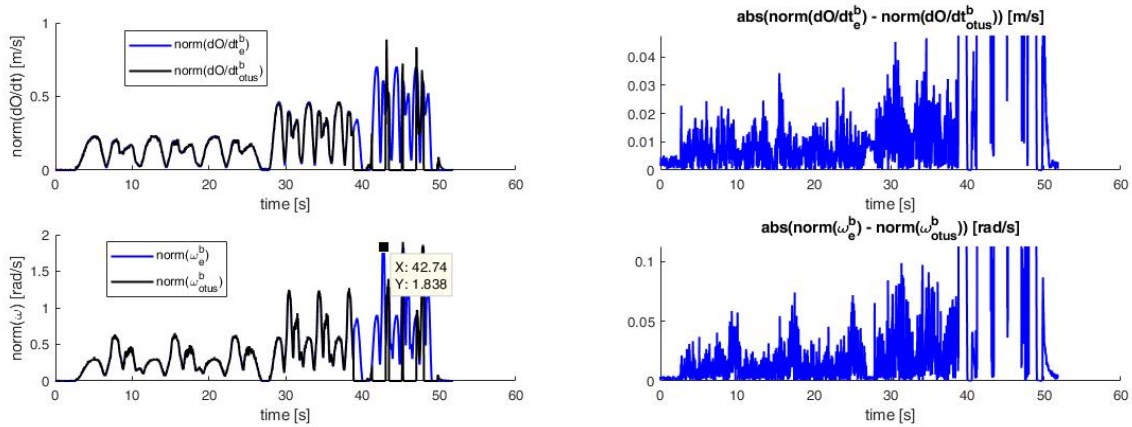
Translační rychlost (cca): 0.2 - 0.7 m/s  
 Úhlová rychlost (cca): 0.6 - 1.8 rad/s



(a) Porovnání translace počátku OTUS trackeru v prostoru  $XYZ$

(b) Absolutní chyba v translaci a rotaci

Obrázek 12: Měření 2: Polohy



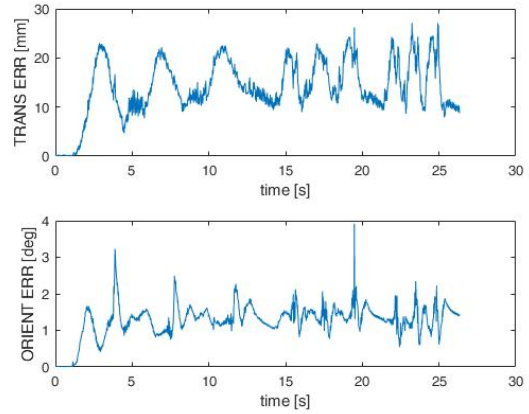
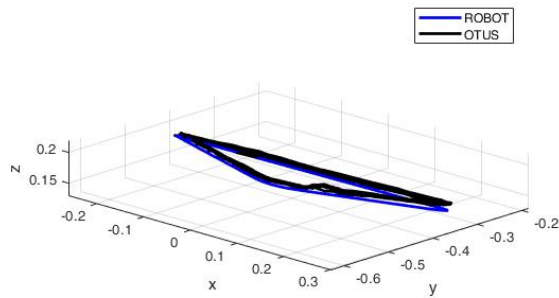
(a) Porovnání translační a úhlové rychlosti

(b) Absolutní chyba v translační a úhlové rychlosti

Obrázek 13: Měření 2: Rychlosti

### Měření 3 (rychlý pohyb):

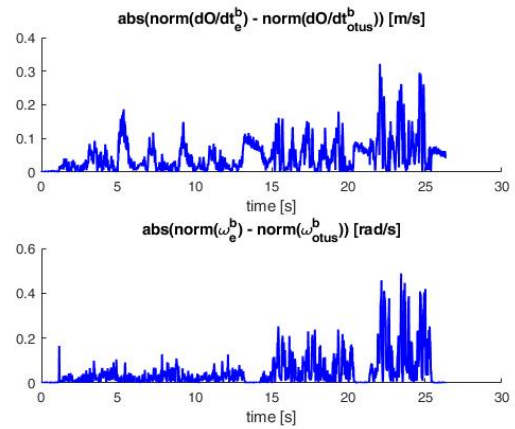
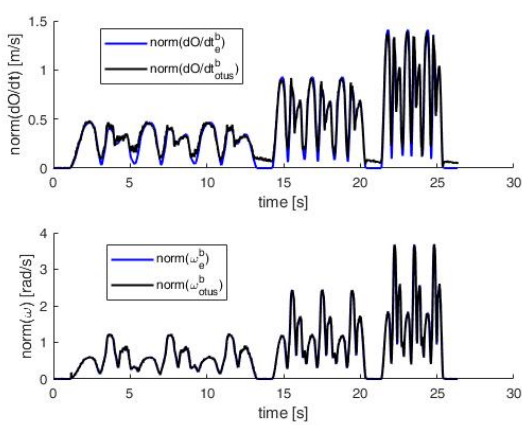
Translační rychlost (cca): 0.5 - 1.4 m/s  
 Úhlová rychlost (cca): 1.2 - 3.7 rad/s



(a) Porovnání translace počátku OTUS trackeru v prostoru  $XYZ$

(b) Absolutní chyba v translaci a rotaci

Obrázek 14: Měření 3: Polohy



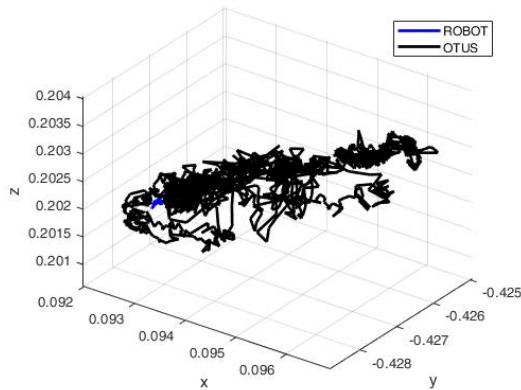
(a) Porovnání translační a úhlové rychlosti

(b) Absolutní chyba v translační a úhlové rychlosti

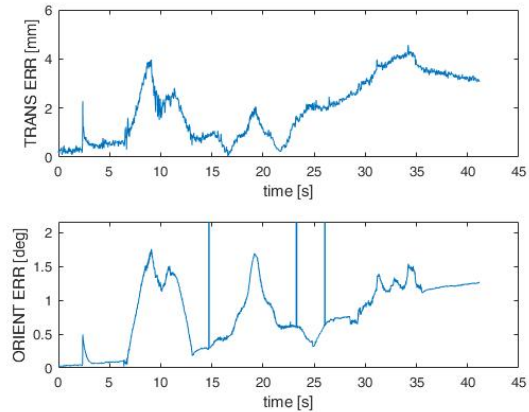
Obrázek 15: Měření 3: Rychlosti

**Měření 4 (pouze rotace):** Pohyb robotem tak, aby se s.s. OTUS trackeru pouze otáčel, nikoliv posouval.

Úhlová rychlost: 0.2 rad/s

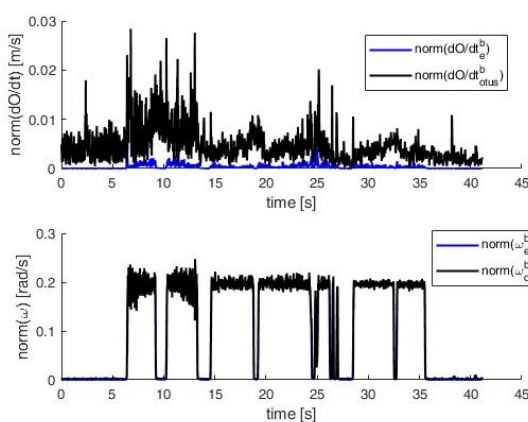


(a) Porovnání translace počátku OTUS trackeru v prostoru XYZ

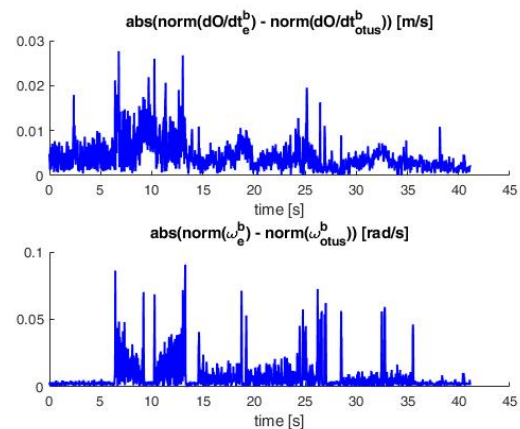


(b) Absolutní chyba v translaci a rotaci

Obrázek 16: Měření 4: Polohy



(a) Porovnání translační a úhlové rychlosti



(b) Absolutní chyba v translační a úhlové rychlosti

Obrázek 17: Měření 4: Rychlosti

Výsledky dynamického měření lze shrnout následovně:

- Nepředvídatelné nesprávné hodnoty měření  
Tyto artefakty se objevují nejčastěji v případě měření na středních rychlostech. Jejich původ nebyl zcela identifikován a není prokazatelně způsoben ztrátou přímé viditelnosti mezi základnami a OTUS trackerem (všechna měření byla realizována pohybem robotu mezi identickými body, pouze s jinou rychlostí). Problém by mohl být způsoben chybami v komunikaci (OTUS tracker - logovací SW v PC (komunikace přes WiFi)).
- Průměrné odchylky v absolutním měření polohy cca  $\pm 15$  mm,  $\pm 1$  deg jsou téměř nezávislé na rychlosti pohybu.

- Průměrné odchylky v měření rychlosti do cca  $\pm 10 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ rad/s}$  jsou téměř nezávislé na rychlosti pohybu.
- Driftování měřených poloh není signifikantní.

## 4 Závěr

Předložená zpráva sumarizuje poznatky o možnostech sledování dynamického pohybu senzorem OTUS tracker. Bylo prokázáno, že OTUS tracker musí být v případě použití kalibrován ve smyslu umístění referenčního s.s. samotného senzoru, neboť oproti dokumentovanému s.s. je skutečný s.s. sice velmi přesně orientován (v podstatě zanedbatelně vzhledem k šumu měření), nicméně zásadním způsobem posunut (vyosen v rovině základny senzoru o cca -13.5 mm resp. -1.8 mm ve směru os X resp. Y a posunut ve směru osy Z o 65.3 mm).

Co se týká dynamického měření, bylo prokázáno, že absolutní přesnost ve sledování translace resp. rotace se pohybuje cca do 25 mm resp. do 3 deg. Přesnost ve sledování translační resp. úhlové rychlosti se pohybuje do 40 mm/s resp. 3 deg/s. Tyto hodnoty jsou v podstatě nezávislé na rychlosti referenčního pohybu. Hodnoty překračují garantovanou opakovatelnost výrobcem OTUS trackeru.

Kritickým nedostatkem je časté naměření „nesmyslných hodnot“ jejichž původ nebyl zcela objasněn, tyto poruchy nelze předvídat z komunikovaných dat z OTUS trackeru ve formě informace o relevanci měřených dat (žádná taková funkcionalita nebyla v dokumentaci OTUS trackeru nalezena, v případě zajištění relevance měřených dat bude muset být jistě realizována další pokročilá filtrace).

Bylo zjištěno, že **měřicí základny musí být velmi pevně uchyceny**, neboť v opačném případě je v důsledku vibrací vznikající od motorizovaného rozmítání IR paprsků měření zásadním způsobem zkresleno (řádově horší měřené hodnoty).

Vzhledem k získaným poznatkům se jeví zařízení OTUS tracker jako možný stavební prvek vyvíjeného senzorického systému v řešeném projektu. Výsledné trekovací zařízení bude však muset být (dle předpokladů v projektu) zřejmě dále osazeno dalšími systémy snímání pohybu a zejména pak systémy filtrace dat (Kalmanův filtr, atd.).

## Poděkování

Tento výzkum byl podpořen z projektu č. FV 20597 v programu TRIO Ministerstva průmyslu a obchodu.

## Reference

- [1] *Stäubli: TX40 6-axis robot.*  
URL <https://www.staubli.com/en-us/robotics/product-range/6-axis-scara-picker-industrial-robots/6-axis-robots/tx40/>
- [2] Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Trans. of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, ročník 22, 1955: s. 215–221.  
URL <http://ci.nii.ac.jp/naid/10008019314/en/>
- [3] 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=nyrY0Pu5kl0C>
- [4] REXControls: REXYGEN (Programming Automation Devices without Hand Coding). 2018.  
URL <https://www.rexygen.com/>
- [5] 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>
- [6] Švejda, M.: Kinematika robotických architektur. Katedra Kybernetiky, ZČU v Plzni (online: [http://home.zcu.cz/~msvejda/\\_publications/2011/rigo.pdf](http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/rigo.pdf)), 2011.
- [7] Švejda, M.: *robotLib* (knihovna předimplementovaných funkcí a funkčních bloků). 2016.  
URL [http://home.zcu.cz/~msvejda/PhD\\_disertace/Algoritmy/robotLib/](http://home.zcu.cz/~msvejda/PhD_disertace/Algoritmy/robotLib/)

## A Datasheet systému OTUS tracker

Následující text shrnuje vlastnosti systému OTUS tracker deklarované výrobcem.

## Otus Tracker and RCbenchmark Tracking Lab

### Typical use

- Control of indoor UAVs and robots
- Dynamical characterisation of robots
- Development of SLAM and vision systems
- Development of control systems and sensor fusion.



### Hardware features list

- Position, velocity, orientation, and rotational velocity measurement
- No calibration.
- Ultra light for mounting on UAVs
- Fast to install and portable
- Two input buttons
- Wireless communication
- Low latency
- Compact size: fits in a cube 10 cm wide.
- Small USB dongle for communication with the computer
- Wide field of view of the base stations to maximize tracking space in small rooms.
- Use up to 14 trackers in a single room.

### Technical specifications

**Table 1:** Design specifications of the RCbenchmark motor testing tool.

Specification	Value	Unit
Position precision	±1	mm
Position accuracy	±1	cm
Orientation precision	±1	degree
Wireless communication rate	250	Hz
Pose update rate*	0.1 - 400	Hz
Latency	<4	ms
Weight	60	g
Supply voltage	4.3 - 5.5	V
Tracking area	5x5	m <sup>2</sup>

\*The update rate is how often the Otus communicates with the computer. Using the optical information and the IMU readings, the computer can reconstruct the pose at a rate independent from the wireless communication rate.

**Software features list**

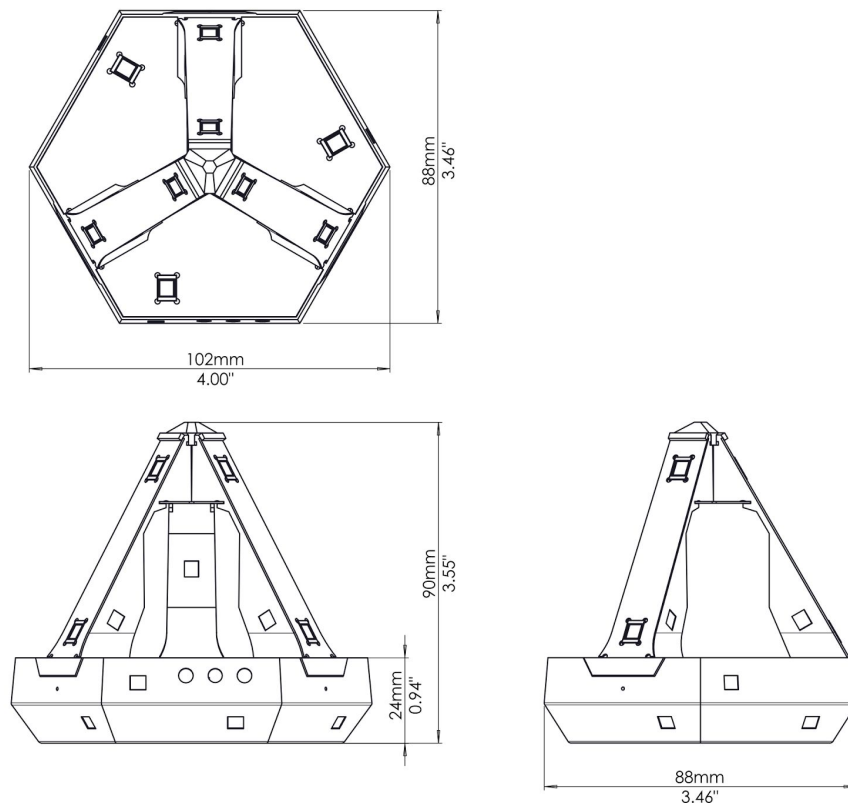
- Plugins for Matlab, C, C++, C#, ROS, and Python
- Simple integration with other languages supporting UDP
- Easy to use interface
- Export to CSV for analysis in almost any software
- Reset local axis with a single click
- Specify custom local axis for all controllers
- Uniquely identified controllers
- Prediction of future velocity and position to compensate for latency in control code

**Safety**

Be careful when testing flying vehicles and robots. They have the potential to cause serious harm or even death.

**Hardware**

The Otus tracker uses two base stations as tracking references. The base stations are passive emitters of infrared light. Please visit our website for installation [instructions](#). The dimensions of the Otus tracker are presented in figure 1. A CAD model of the Otus tracker is available [here](#) (FBX, OBJ and STL).



**Fig. 1: Otus tracker dimensions**



## Power

The Otus tracker is designed to be used on robots where weight is a constraint. Accordingly, the Otus tracker is powered by USB and does not include a battery. For onboard applications, a usb to female 0.1" three-pin header is provided. The header is the same size as a standard servo header.

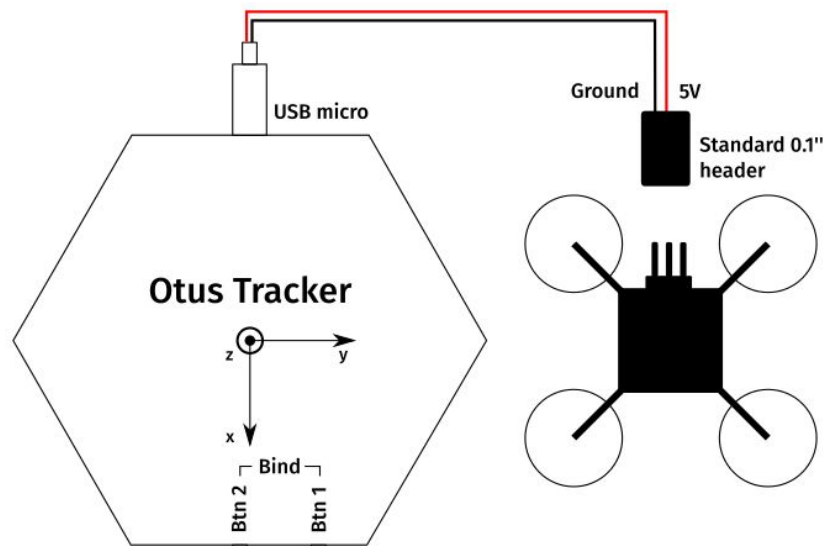


Fig. 2: Otus tracker dimensions

## Wireless connection

The Otus tracker system includes a small USB dongle. For better reception, we recommend increasing the distance between the computer and the dongle, as well as using the USB extension cable provided.

## Software

Minimum recommended specifications:

- Windows computer
- 4 GB of RAM
- i5 processor of second generation or better
- For smoother 3D rendering, we recommend a separate graphics card

The software is multithreaded to maximize performance and keep a fast update rate even on low power computers. We recommend using an i5 of second generation or better and 4 GB of RAM.

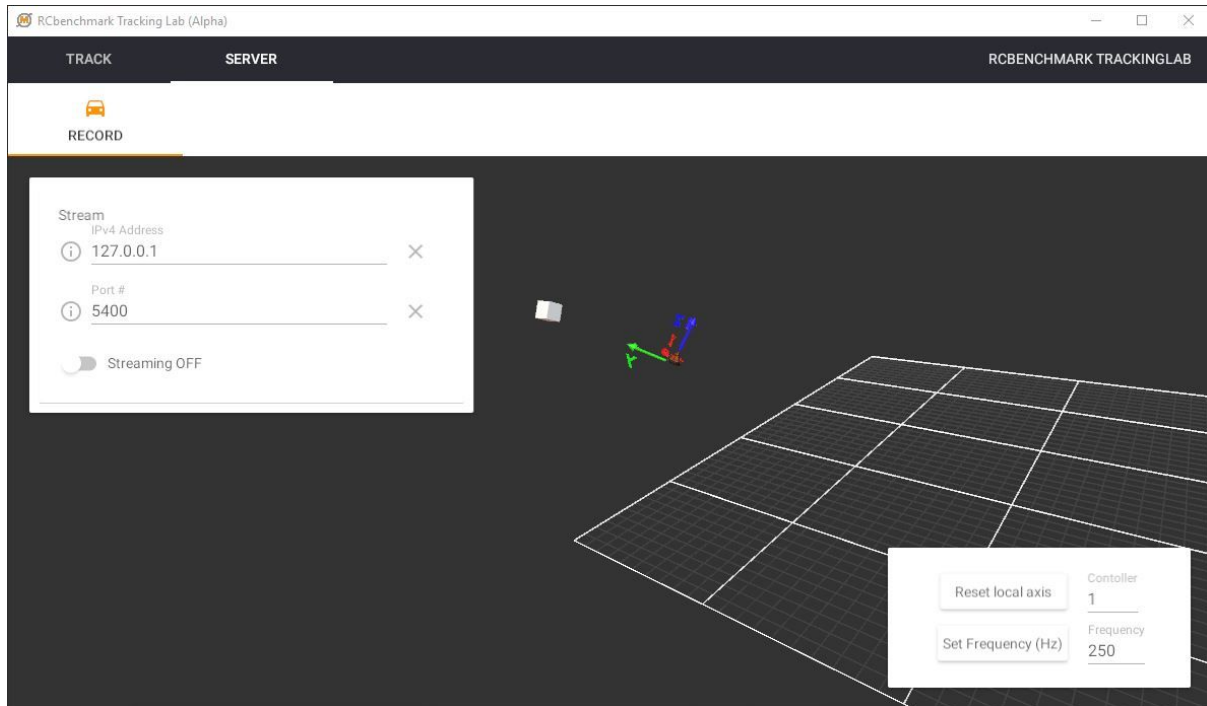


Fig. 3: RCbenchmark Tracking Lab interface

## Software feature

- Record to CSV file
- Offset center of coordinates
- Stream data via UDP
- Display pose information
- Set refresh rate
- Predict location of tracker in the future to compensate for controller latency.
- Reset local axis
- Display the controllers and base stations in a 3D environment

## Integration with other software

Multiple programming languages are supported and plugins are included for C, C++, Labview, Matlab, C#, ROS, and Python. Please visit the [download page](#) for more information. The software communicates with the UDP protocol. This means that the pose information can be sent to a program running on the same computer, or on another computer on a wired or wireless LAN network, as well as over the internet. The UDP packets are documented on our [website](#), so the software can communicate with any programming language that supports UDP.

## **B Datasheet robotu Stäubli TX40**

Následující text shrnuje vlastnosti robotu Stäubli TX40 deklarované výrobcem.

FAST MOVING TECHNOLOGY

*STÄUBLI*

# TX40

6 axis industrial robot





## A unique 4 axis and 6 axis robot range for all applications

Whenever industrial companies need speed, repeatability and reliability, Stäubli robots provide the most appropriate answer. To satisfy its customers, Stäubli Robotics has developed specific solutions, meeting the needs of all industries: electronics, medical, automotive, food, plastics, mechanical or painting.

Designed to work in the most hostile environments, but also to meet stringent cleanroom requirements, Stäubli robots demonstrate their efficiency in all circumstances.

**With performance always in mind.**

MAN AND MACHINE

# Reliability, flexibility, performance



TX 6-axis industrial robots feature an articulated arm for extraordinary dexterity and flexibility. This range of robots is designed to handle various applications in many industrial sectors. The compactness of

the arm and the large work envelope allow maximum utilization of cell workspace. The integration of the robot on the production line is easier thanks to multiple attachment methods (floor, wall, ceiling). The robot arm's

rugged, fully enclosed structure makes it ideal for applications in harsh environments.



TX40 model



**High precision, long life time and reduced maintenance**  
JCS gearbox designed by Staubli

**Optimum use of the work area**  
Less floorspace needed, large work envelope

**Eliminating complex cable management**  
Connections directly on the robot forearm

**Flexible integration on the production line**  
Multiple attachment methods

**Work in difficult environments**  
Vertical outlet, complete protection of connection

## The added values of Staubli robot arms

**Optimum cleanliness, arm motion freedom and production reliability**

- All cables and pipes routed through the arm removing obstacles from the work area
- Enclosed structure

**Texture and color customization**

- Choice of arm finish

**Precise trajectory performance**

- Increased part quality
- Reduced rework costs

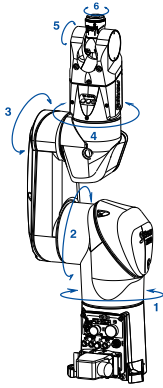
**Certifications**



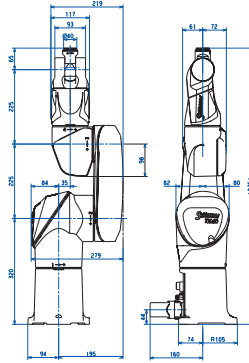
# Characteristics

MODEL	TX40
Maximum load	2 kg, 4.4 lb (2.3 kg, 5 lb under conditions)
Nominal load	1.7 kg, 3.8 lb
Reach (between axis 1 and 6)	515 mm, 20.2 in
Number of degrees of freedom	6
Repeatability – ISO 9283	± 0.02 mm
Stäubli CS8 series controller	CS8C
Weight	27 kg, 59.52 lb
<b>MAXIMUM SPEED</b>	
Axis 1	555°/s
Axis 2	475°/s
Axis 3	585°/s
Axis 4	1035°/s
Axis 5	1135°/s
Axis 6	1575°/s
Maximum speed at load gravity center	8.2 m/s
Maximum inertia axis 4	0.14 kg.m <sup>2</sup>
Maximum inertia axis 5	0.1 kg.m <sup>2</sup>
Maximum inertia axis 6	0.03 kg.m <sup>2</sup>
<b>WORK ENVELOPE</b>	
Maximum reach between axis 1 and 5 (R.M)	450 mm, 17.7 in
Minimum reach between axis 1 and 5 (R.m1)	151 mm, 5.9 in
Minimum reach between axis 2 and 5 (R.m2)	162 mm, 6.4 in
Reach between axis 3 and 5 (R.l.b)	225 mm, 8.8 in
<b>RANGE OF MOTION</b>	
Axis 1 (A)	± 180°
Axis 2 (B)	± 125°
Axis 3 (C)	± 138°
Axis 4 (D)	± 270°
Axis 5 (E)	+133.5°/-120°
Axis 6 (F)	± 270° <sup>(1)</sup>
<b>INSTALLATION ENVIRONMENT</b>	
Working temperature according to NF EN 60 204-1	+5°C to +40°C, 41°F to + 104°F
Humidity according to NF EN 60 204-1	30% to 95% max. non-condensation
Attachment methods	Floor/Wall/Ceiling
Vertical cable outlet version	•
Pressurized version	•
<b>FOREARM CONNECTIONS</b>	
Pneumatic	2 direct lines between the base and the forearm 1 optional solenoid valve 5/2-way (compressed air) or 3/2-way (vacuum) monostable
Electrical	1 female 8-contact socket (2 shielded twisted pairs, 3 power contacts)
Protection class according to EN 60529	IP65 / IP67
<b>MARKET SPECIFIC VERSIONS</b>	
ESD (ElectroStatic Discharge) version	•
SCR (Supercleanroom) – classe 2 cleanliness – ISO 14644-1	•
CR (Cleanroom) – classe 4 cleanliness – ISO 14644-1	•
Stericlean version	•
Plastics – Euromap 12/67 and SPI Interface	•
NSF H1 Food graded oil	•

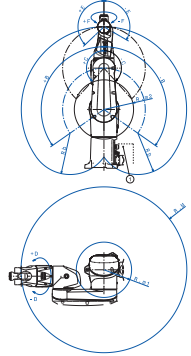
### Motion range



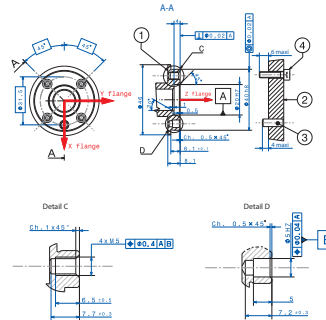
### Dimensions



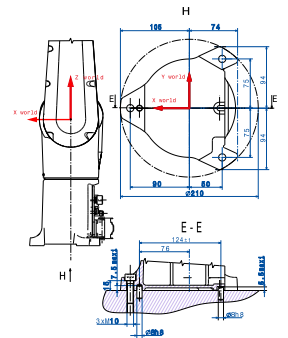
### Work envelope



### Wrist



### Mounting (not for vertical cable outlet option)



(1) Software configurable up to ± 18 000°.



■ Stäubli Units    ○ Agents

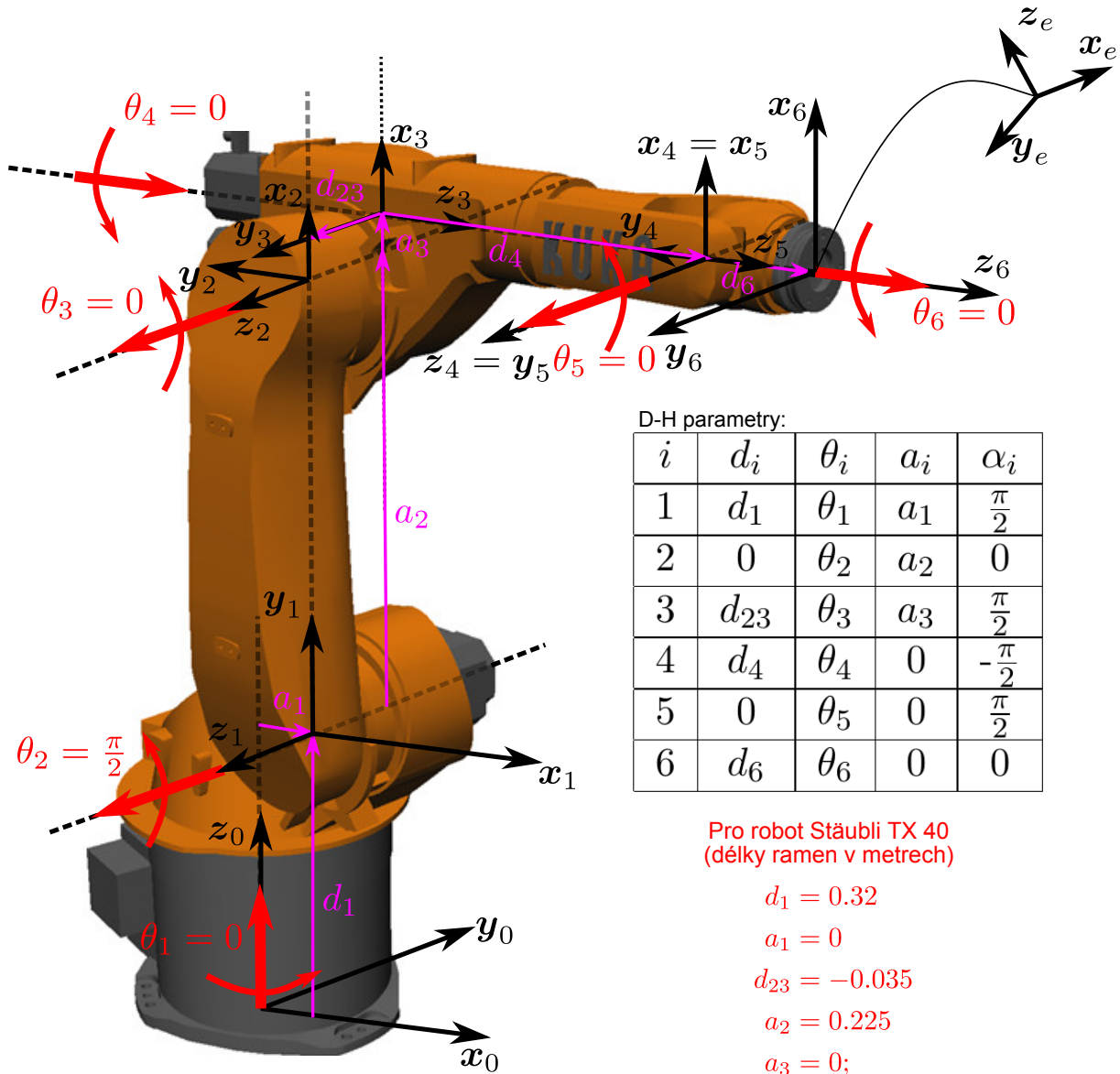
# Global presence of the Stäubli Group

[www.staubli.com](http://www.staubli.com)



## C Kinematický model robotu Stäubli TX40

Zavedení s.s. ramen robotu dle Denavit-Hartenbergovy úmluvy [2] včetně definic nulových poloh kloubů robotu a umístění s.s.  $F_6$  příruby (posledního ramene) robotu.



## D Výsledky kalibrace umístění senzoru OTUS tracker na přírubu průmyslového robotu Stäubli TX40

Zdrojový soubor dat měření:	Výstupy kalibračního algoritmu						Chyba identifikace (chyba MNČ)		Průměrná chyba		Maximální chyba		
	Identifikovaná translace [m]	Identifikovaná orientace [kvaternion]	E <sub>trans</sub> [mm]	E <sub>rot</sub> [deg]	[mm]	[deg]	[mm]	[deg]	[mm]	[deg]			
OtusData_20181219_0916.csv	0.0136	0.0018	0.0492	0.0039	0.0053	-0.0023	-1	0.0008166	0.0000453	2.68	0.3994	9.37	0.8837
OtusData_20181219_0920.csv	0.0134	0.0017	0.0492	0.0039	0.0053	-0.0022	-1	0.0008523	0.0000468	2.8718	0.4144	9.285	0.8841
OtusData_20181219_0924.csv	0.0135	0.0017	0.0493	0.004	0.0052	-0.0023	-1	0.0008272	0.0000469	2.7261	0.4151	9	0.8563
OtusData_20181219_0934.csv	0.0136	0.0019	0.049	0.0041	0.0052	-0.0023	-1	0.0008578	0.0000476	2.7826	0.4187	9.669	0.4187
OtusData_20181219_0941.csv	0.0136	0.0019	0.0491	0.0041	0.0052	-0.0023	-1	0.00081	0.0000452	2.6102	0.3974	9.85	0.8576
OtusData_20181219_0945.csv	0.0136	0.0019	0.0492	0.004	0.0052	-0.0023	-1	0.0006506	0.0000361	2.3258	0.3299	9.634	0.8795
<b>Průměr:</b>	<b>0.01355</b>	<b>0.001817</b>	<b>0.049167</b>	<b>0.004</b>	<b>0.005233</b>	<b>-0.00228</b>	<b>-1</b>	<b>0.000802417</b>	<b>0.00004465</b>	<b>2.666083333</b>	<b>0.395816667</b>	<b>9.468</b>	<b>0.79665</b>
<b>Rozptyl:</b>	<b>5.83E-09</b>	<b>8.06E-09</b>	<b>8.89E-09</b>	<b>6.67E-09</b>	<b>2.22E-09</b>	<b>1.39E-09</b>	<b>0</b>	<b>4.91281E-09</b>	<b>1.53692E-11</b>	<b>0.029767808</b>	<b>0.000933331</b>	<b>0.079333</b>	<b>0.028701426</b>



## E Fotodokumentace z testování

