

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

RIADENIE ROBOTOV
S POHONMI DYNAMIXEL
S VYUŽITÍM GUI

Jaroslava Žilková, Martin Lešo, Marek Vacek

Košice, 2015

Učebný text je určený pre študentov z oblasti robotiky. Predpokladajú sa základné vedomosti z tejto oblasti.

Učebný text bol vydaný s podporou projektu KEGA č. 011TUKE-4/2013.

Publikácia je nepredajná.

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechny a informatiky

Vydanie prvé, náklad 50ks

Miesto a rok vydania : Košice,2015.

© Doc. Ing. Jaroslava Žilková, PhD.

Ing. Martin Lešo

Ing. Marek Vacek, PhD.

ISBN: 978-80-553-2435-7

Obsah

Zoznam použitých symbolov a skratiek.....	6
Slovník termínov	7
1. Úvod.....	8
2. Robotické pracovisko.....	10
2.1. Opis robotického pracoviska	10
2.2. Robotické rameno a jeho parametre.....	11
3. Grafické užívateľské prostredie	17
3.1. Východisková poloha.....	19
3.2. Komunikácia	21
3.3. Výpočet kinematických úloh.....	22
3.3.1 Priama kinematická úloha.....	22
3.3.2 Inverzná kinematická úloha	23
3.4. Transformačná matica	25
3.5. Tvorba trajektórií pohybu	26
3.6. Vizualizácia.....	29
3.7. Snímanie parametrov pohonov.....	33
3.8. Spustenie programu.....	40
4. Príklady použitia GUI.....	41
4.1. Priama a inverzná kinematická úloha	41
4.2. Príklad použitia GUI	43
4.3. Použitie Robotics Toolbox-u	49
Príloha A: Technické parametre elektromagnetu	58
Príloha B: Rozmery motorov pre 3D modely pohonov	59
Zoznam obrázkov	62
Zoznam použitej literatúry	65

Zoznam použitých symbolov a skratiek

DH	Denavit-Hartenbergova notácia
GUI	Graphical User Interface, Grafické užívateľské rozhranie
IKÚ	Inverzná Kinematická Úloha
Nm	Newton meter
P	prizmatický pohyb
PC	Personal Computer, Osobný počítač
R	rotačný pohyb
RPM	Revolutions Per Minute, Otáčky za minútu
TTL	Transistor-transistor Logic, tranzistorová logika
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, Univerzálne asynchrónne sériové rozhranie
USB	Universal Serial Bus, Univerzálna sériová zbernica
3D	trojdimenzionálny, trojrozmerný

Slovník termínov

Robotické rameno	robot, ktorý napodobňuje funkcie ruky človeka v značne redukovanej forme, je charakterizovaný možnosťou ľubovoľnej orientácie a polohy v určitom priestore
Robotika	vedecká a technická oblasť návrhu, stavby, riadenia a užívania robotov
Manipulátor	automaticky riadená mechanická sústava, ktorá uskutočňuje pracovné úlohy ako uchopovanie predmetov a ich premiestňovanie
Rám	teleso (člen) robota, ktorý nesie prvý kĺb kinematického reťazca manipulátora
Rameno	sústava členov spojených poháňanými kĺbmi, ktorý premiestňuje koncový efektor manipulátora
Efektor	zariadenie pripevnené k vonkajšiemu koncu manipulátora
Inteligentný robot	robot, ktorý si určuje svoju činnosť ako odozvu na informácie zo svojich senzorov
Servomotor	motor pre hlavne elektrický pohon, u ktorého je možné nastaviť presnú polohu natočenia osi
Autonómny	schopný samostatného rozhodovania
Toolbox	zásuvný, doplnkový modul, ktorý rozširuje základné funkcie programu

1. Úvod

Pre podporu výučby predmetu Robotika, pre poslucháčov Fakulty elektrotechniky a informatiky, TU v Košicach, v 1. ročníku 2. stupňa štúdia v študijnom programe „Riadenie elektromechanických systémov“, bolo vytvorené pracovisko s menším experimentálnym robotickým ramenom s 5-timi stupňami voľnosti, ktoré slúži na overenie všetkých aktuálnych a v budúcnosti navrhnutých programov pre experimentálny robot, na overenie princípov riadenia servomotorov robotického ramena a prepočet a zobrazenie dráh jeho pohybu.

Základným ovládacím prvkom experimentálneho robotického ramena s pohonmi Dynamixel je grafické užívateľské prostredie, vytvorené v programe MATLAB, ktoré zabezpečuje grafické prostredie, umožňuje komunikáciu a základné riadenie robotického ramena, prepočet oboch kinematických úloh, tvorbu trajektórií pohybu, animáciu pohybu, snímanie a zobrazovanie vybraných veličín.

Predložený učebný text sa zaoberá stručným opisom robotického pracoviska s experimentálnym robotickým ramenom a objasňuje čitateľovi prácu v grafickom a ovládacom užívateľskom prostredí.

Učebný text pozostáva z 4 kapitol. Druhá z nich je venovaná opisu robotického pracoviska s experimentálnym robotickým ramenom. V tejto časti sú uvedené aj parametre jednotlivých použitých servomotorov Robotis Dynamixel ako aj 3D model experimentálneho ramena spolu s jeho rozmermi.

Tretia kapitola učebného textu je venovaná opisu užívateľského prostredia (GUI) a práci s ním. Samotné GUI je rozdelené do viacerých častí.

Úvodná časť je venovaná opisu troch základných polôh robotického ramena.

Nasledujúca časť sa zaoberá nastavením a riadením komunikácie medzi počítačom a robotickým ramenom.

Tretia podkapitola uvádza spôsob nastavenia hodnôt natočenia jednotlivých kĺbov ramena a prepočty priamej a inverznej kinematickej úlohy s možnosťou zadávania hodnoty polohy jednotlivých kĺbov číselnými hodnotami alebo posuvníkmi.

Štvrtá podkapitola vysvetľuje štruktúru a farebné odlíšenie blokov transformačných matíc.

Piata podkapitola vysvetľuje tvorbu trajektórií, umožňuje uloženie, načítanie, prepočet trajektórií robotického ramena s možnosťou nastavenia trvania každého pohybu a ich zobrazenie.

Šiesta podkapitola vysvetľujúca GUI a prácu s ním sa zaoberá možnosťami zobrazovania 3D modelu ramena. Všetky zmeny simulácií je možné kontrolovať nielen číselnými výsledkami v kontextových menu GUI, ale aj v grafickom okne zobrazením vybraného 3D modelu robotického ramena. Okrem priestorového pohľadu umožňuje zobrazenie aj z iných pohľadov, ako je nárys, bokorys a pôdorys.

Veľmi dôležitou časťou GUI je snímanie a možnosť zobrazenia priebehov vybraných veličín robotického ramena, ktoré umožňuje voľbu snímania iba pri pohybe ramena, alebo pri celej simulácii, ktorej sa venuje siedma podkapitola. GUI umožňuje voľbu, na ktorom servomotore chceme snímať vybranú veličinu (polohu, rýchlosť, zaťaženie...). Po dokončení pohybu alebo celej simulácie umožňuje zobraziť priebehy veličín v grafoch v zobrazovacom okne, pričom na výber je žiadané natočenie pohonu, výsledná hodnota natočenia pohonu, prípadne ich rozdiel.

Posledná podkapitola opisujúca GUI opisuje možnosti spustenia GUI, parametre simulácie, jej spustenie a ukončenie.

Na príkladoch dosiahnutia nulovej a štandardnej polohy robotického manipulátora v záverečnej 4 kapitole je vysvetlené praktické použitie GUI.

Záverečná štvrtá kapitola je venovaná praktickým príkladom použitia GUI. V prvom príklade je uvedený, použitie GUI pre premiestňovanie kovového predmetu, pričom daný príklad zahrňuje riešenie priamej a inverznej úlohy. Záver tejto kapitoly je venovaný opisu práce s Robotics Toolbox-om. Táto časť bližšie opisuje spôsob vytvorenia modelu robotického ramena, výpočet priamej a inverznej kinematickej úlohy a ďalšie možnosti vizualizácie robotického ramena.

2. Robotické pracovisko

2.1. Opis robotického pracoviska

V nasledujúcej časti sú stručne opísané jednotlivé časti, z ktorých pozostáva robotické pracovisko: robotické rameno, riadiaci systém a grafické a ovládacie užívateľské prostredie:

- **Robotické rameno** – s piatimi stupňami voľnosti, s pracovnou obálkou menšou ako jeden meter štvorcový
- **Riadiaci systém** – predstavuje počítač s obrazovkou, ktorý zabezpečuje komunikáciu, vizualizáciu a ovládanie robotického ramena riadiacimi signálmi.
- **Grafické ovládacie užívateľské prostredie** – realizované v jednom programe, je prehľadné, zobrazuje všetky potrebné prvky ovládania a riadenia robotického pracoviska. Pomocou externých zariadení sníma vybrané veličiny, spracúva zosnímané údaje a riadi robotické rameno, pričom program je otvorený pre ďalšie zmeny a úpravy všetkých svojich častí. Grafické a ovládacie užívateľské prostredie, zobrazujúce sa na obrazovke počítača je vytvorené v prostredí MATLAB.

Na Obr. 1 je uvedený pohľad na robotické pracovisko. Za východiskovú polohu robotického ramena je z dôvodu lepšieho pohľadu užívateľa na pracovisko zvolená vzpriamená, „parkovacia“ poloha.



Obr. 1 Robotické pracovisko

2.2. Robotické rameno a jeho parametre

Pre zostavenie robotického ramena boli použité servopohony Dynamixel od firmy Robotis, ktorá sa venuje vývoju a výrobe riadiacich systémov a servopohonov. Existuje niekoľko modelových radov pohonov Obr. 2, pričom každý pohon má podobnú štruktúru. Skladá sa zo samotného servopohonu, zabudovanej prevodovky so snímačom natočenia a riadiacej jednotky, ktorá komunikuje so servopohonmi posielaním užívateľom generovaných paketov.



Obr. 2 Servopohony systému Dynamixel

K hlavným výhodám pohonov Dynamixel patrí ich spätná väzba užívateľovi a riadiacemu systému. Dokážeme získať informácie o dosiahnutí požadovanej polohy, preťaženi alebo prehriati. Servopohony sú schopné vzájomnej komunikácie pomocou riadiacich paketov.

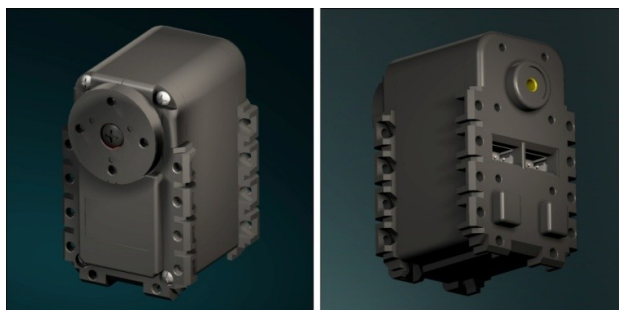
Pri realizácii robotického ramena boli použité tri typy servopohonov:

- Pre 5. a 4. kĺb – Robotis Dynamixel AX-12A (Obr. 3)
- Pre 3. a 2. kĺb – Robotis Dynamixel MX-64T (Obr. 4)
- Pre 1. kĺb – Robotis Dynamixel MX-28T

Všetky dôležité parametre vybraných servomotorov a merateľné rozdiely sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

Tab.1: Parametre nami zvolených servomotorov Dynamixel

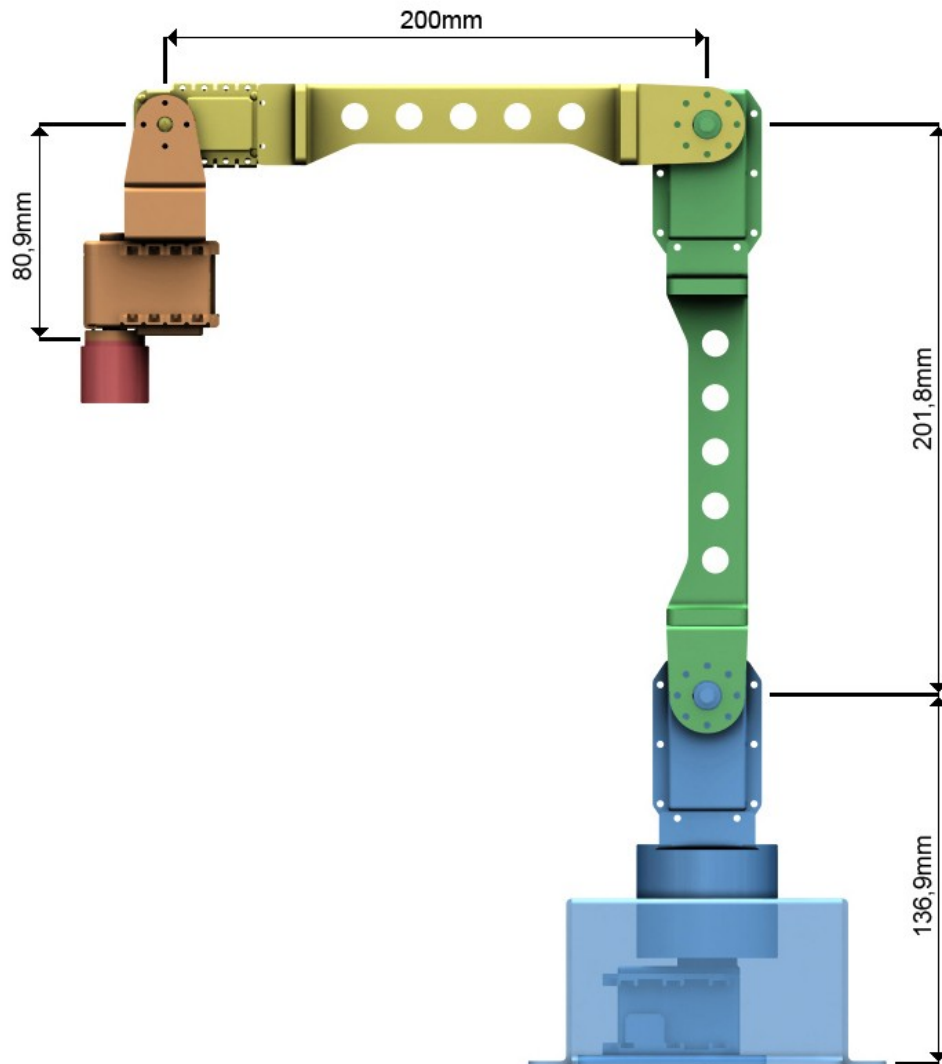
Typ	AX-12A	MX-64T	MX-28T
Hmotnosť (g)	54,6	126	72
Rozmery (mm)	32x50x40	40x61x41	36x50x35
Prevod (materiál prevodovky)	254:1 (plast)	200:1 (kov)	193:1 (kov)
Komunikačné rozhranie	TTL	TTL	TTL
Polohový senzor (rozlíšenie ° a počet polôh)	Potenciometer (300°/1024)	Bezkontaktný snímač (360°/4096)	Bezkontaktný snímač (360°/4096)
Motor	S kovovým jadrom	Maxon	Maxon
Pracovné napätie (V)	12	12	12
Max. krútiaci moment (Nm)	1,5	6	2,5
Maximálny prúd (A)	1,5	4,1	1,4
Otáčky (RPM) bez záťaže	59	63	55



Obr. 3 3D model servomotoru Dynamixel AX- 12A



Obr. 4 3D model servomotoru Dynamixel MX-64



Obr. 5 3D model robotického ramena – farebné odlíšenie symbolizuje rozdelenie do jednotlivých funkčných celkov

Tab.2: Zoznam použitých servomotorov

1.časť	Rotačný kĺb – Dynamixel MX-28T – umiestnený v základni
2.časť	Rotačný kĺb – Dynamixel MX-64T
3.časť	Rotačný kĺb – Dynamixel MX-64T
4.časť	Rotačný kĺb – Dynamixel AX-12A
5.časť	Rotačný kĺb – Dynamixel AX-12A

Do základne ramena je umiestnený aj spínací obvod pre efektor robota – elektromagnet. Keďže ide o jednoduchý solenoid, nie je možné natívne riadiť jeho spínanie a rozpínanie pomocou PC. Na tento účel je použitý spínací obvod, ktorý využíva pomocný signál posielaný z PC do servomotorov na jeho spínanie a rozpínanie. Elektromagnet potrebuje napájacie napätie 12V, rovnaké ako servomotory a riadiaca jednotka motorov, takže celé robotické rameno je napájané z jedného zdroja napätia.

Na Obr. 5 je zobrazený 3D model robotického ramena s farebným odlišením jednotlivých funkčných celkov – vôlí pohybu.

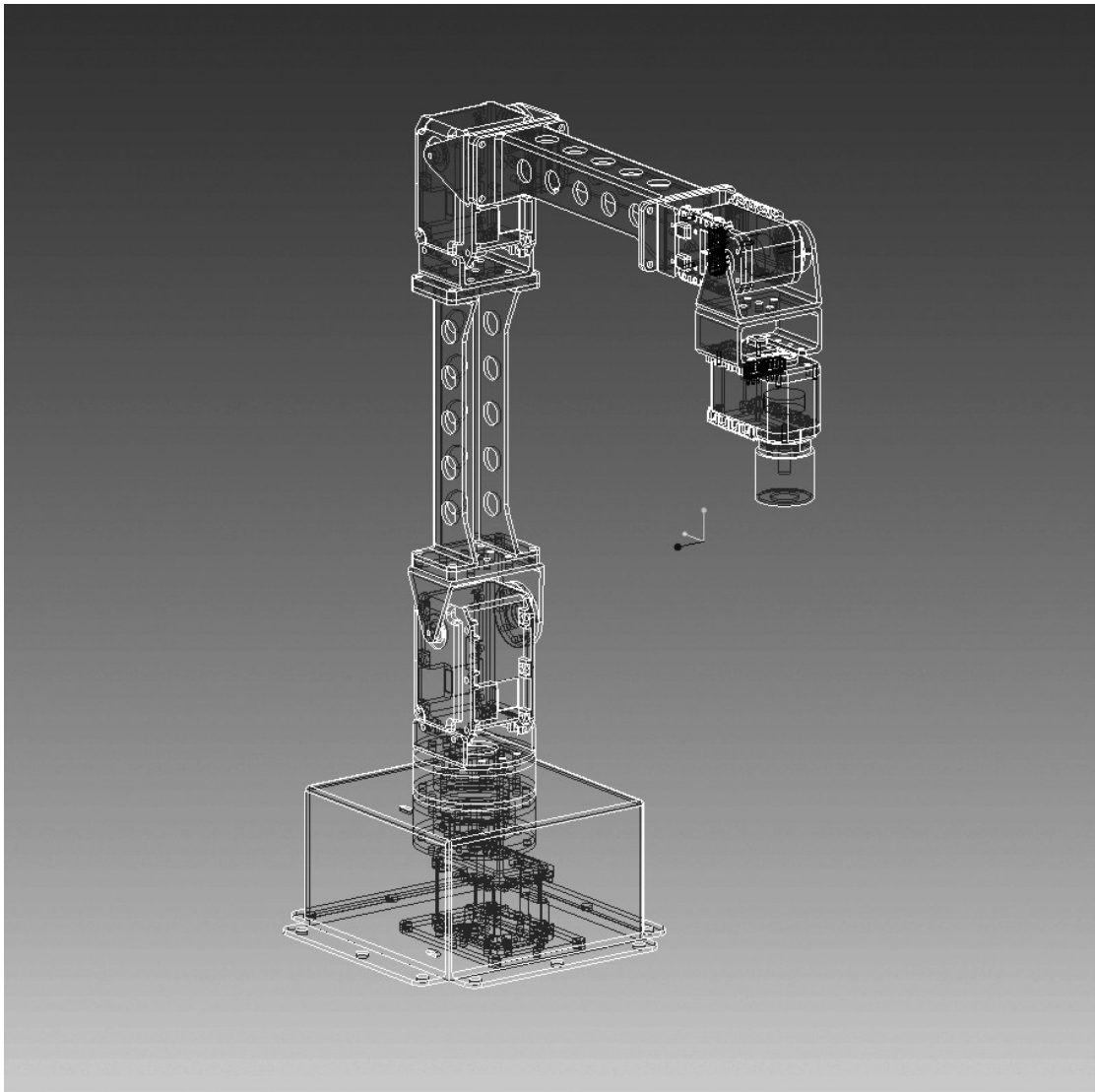
Každá farba symbolizuje jeden celok – 5-klbový robot má 5 vôlí pohybu. Taktiež sú tu uvedené výsledné rozmery robotického ramena. Pracovná obálka tohto ramena tvorí polguľový priestor s priemerom približne 100 cm a výškou 62 cm.

K výhodám motorov Dynamixel patrí ich spätná väzba k užívateľovi a riadiacemu systému. Dokážeme získať informácie o dosiahnutí požadovanej polohy, preťaženi alebo prehriati. Servomotory sú taktiež schopné vzájomnej komunikácie pomocou riadiacich paketov.

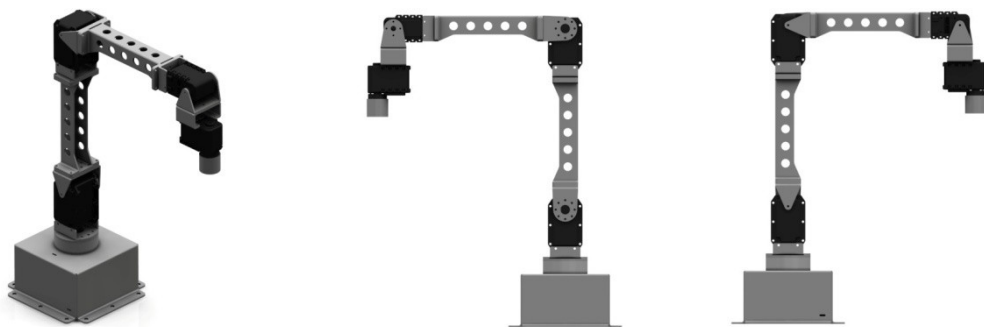
Robotické rameno je vyrobené kvôli čo najnižšej váhe a najvyššej možnej pevnosti z eloxovaného hliníka s hrúbkou 2 mm. 3D „drôtený“ model je zobrazený na Obr. 6 a zhrnutie všetkých pohľadov je na Obr. 7 a na Obr. 8.

Celá signálová a napájacia kabeláž je vyvedená do komunikačnej jednotky servopohonov a napájacieho zdroja vo vyfrézovanej drážke zospodu prichytávacej dosky robotického ramena.

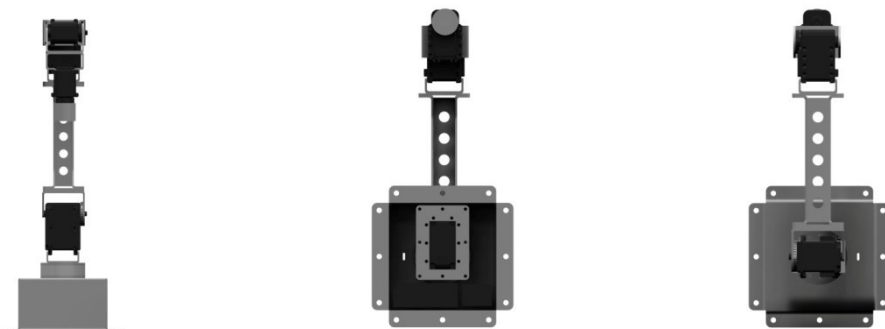
Pomocou využitia elektromagnetu ako efektora robotického ramena budeme programovať pohyb ramena s presunom ľahších kovových predmetov (max. do 200 g).



Obr. 6 3D „drôtený“ model robotického ramena



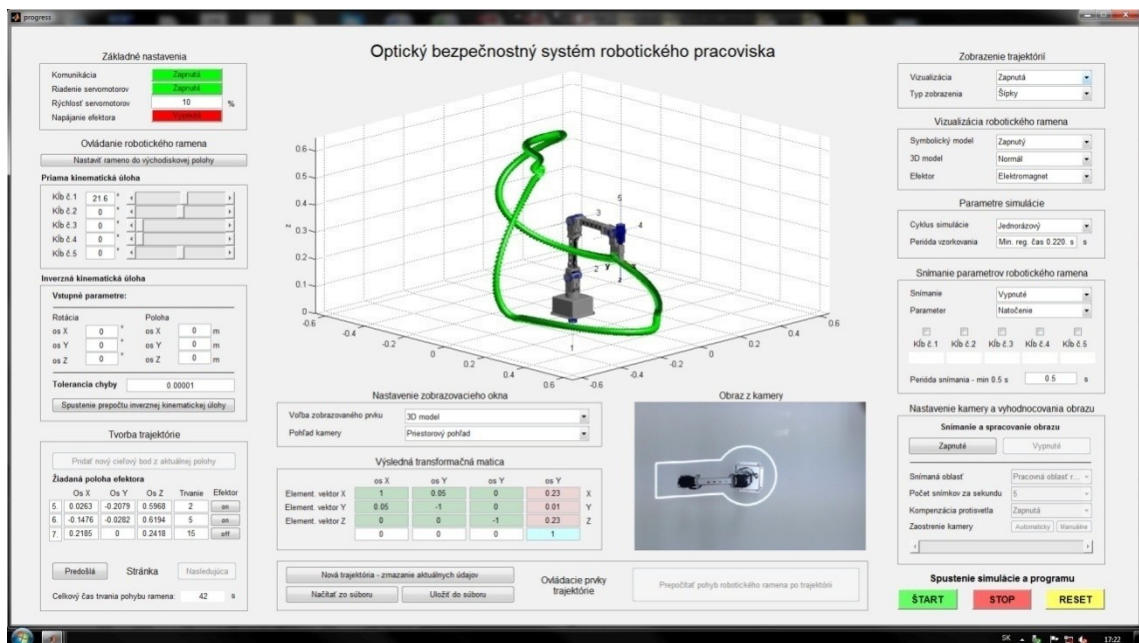
**Obr. 7 3D model robotického ramena verzie 3 – zobrazenie vo všetkých pohľadoch
– 1.časť**



**Obr. 8 3D model robotického ramena verzie 3 – zobrazenie vo všetkých pohľadoch
– 2.časť**

3. Grafické užívateľské prostredie

Základným ovládacím prvkom robotického ramena je grafické užívateľské prostredie - GUI (Obr. 9.), vytvorené v programe MATLAB, ktoré zabezpečuje grafické prostredie, komunikáciu a základné riadenie robotického ramena, prepočet oboch kinematických úloh, tvorbu trajektórií pohybu, animáciu pohybu, snímanie veličín a generovanie, snímanie a vyhodnocovanie obrazu pracoviska.



Obr. 9 Grafické užívateľské prostredie robotického pracoviska

GUI je zložené z viacerých podprogramov vytvorených v prostredí MATLAB, ktoré je otvorené a dostupné budúcim zmenám a nastavbám iných užívateľov.

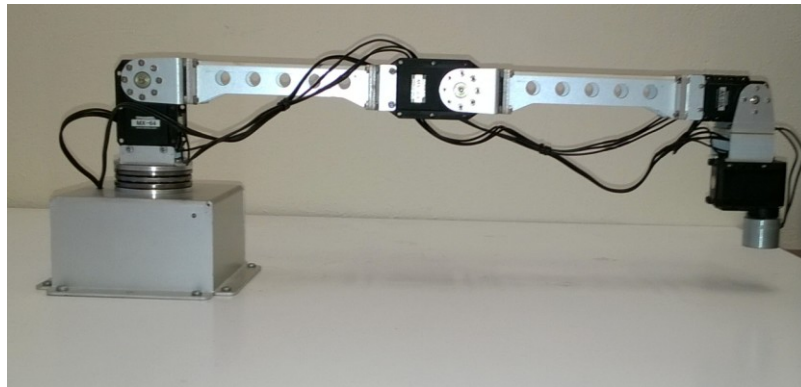
V nasledujúcich kapitolách je uvedený opis jednotlivých funkcií a parametrov tohto GUI. Opis ovládacieho prostredia je postupne rozdelený do funkčných celkov podľa ich umiestnenia z ľavej hornej časti obrazovky až po jej pravú dolnú časť:

- východisková poloha
- komunikácia
- výpočet kinematických úloh
 - Priama kinematická úloha
 - Inverzná kinematická úloha
- transformačná matica
- tvorba trajektórií pohybu
- vizualizácia 3D modelu robotického ramena
- snímanie parametrov pohonov robotického ramena
- zobrazovanie vybraných veličín
- spustenie programu a parametre simulácie

3.1. Východisková poloha

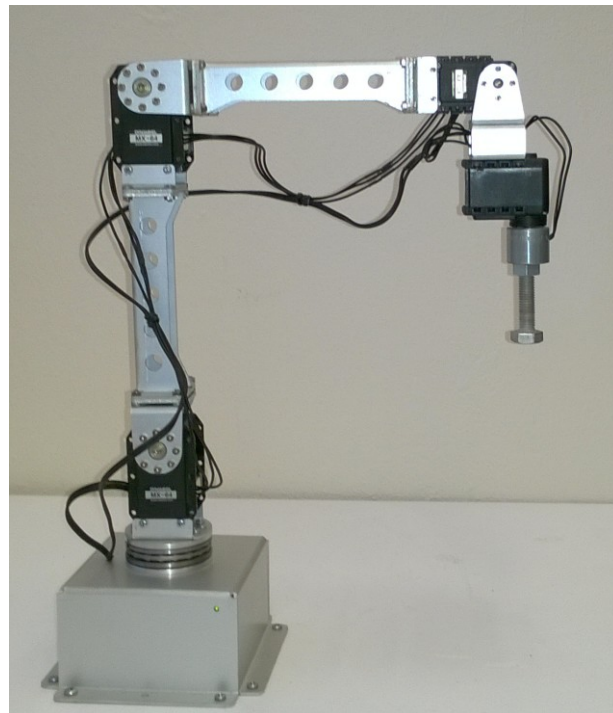
Na Obr. 10 - Obr. 12 sú uvedené zobrazenia modelu robotického ramena pomocou Denavit-Hartenbergových parametrov v troch základných polohách.

Nulová poloha robotického ramena pre prípad, ak hodnoty všetkých kĺbových premenných q sú rovné 0, je zobrazená na Obr. 10.



Obr. 10 5-kĺbový robotický manipulátor v nulovej polohe

Štandardná poloha robotického ramena – „ready“ poloha je uvedená na Obr. 11.



Obr. 11 5-kĺbový robotický manipulátor v štandardnej polohe

Za východiskovú polohu robotického ramena je z dôvodu lepšieho pohľadu užívateľa na pracovisko zvolená vzpriamená, „parkovacia“ poloha, uvedená na Obr. 12.



Obr. 12 5-kĺbový robotický manipulátor v parkovacej polohe

3.2. Komunikácia

Jednou z úloh GUI je riadenie komunikácie s komunikačným modulom USB2 Dynamixel a riadenie posielania paketov do servomotorov robotického ramena.

Pri spustení GUI prebehne na pozadí prvá inicializácia systému a nastaví sa východiskové parametre motorov. Štandardné nastavenie systému pre komunikáciu s USB2Dynamixel modulom je stav vypnutý. Akákoľvek zmena vykonaná v GUI nie je posielaná ďalej. Celý systém môžeme v tomto stave označiť ako odpojený, alebo ako systém v stave OFFLINE. Pri tomto stave sú všetky tlačidlá komunikácie deaktivované a čaká sa na vstup zo strany užívateľa. Po zapnutí komunikácie a riadenia servomotorov je systém aktívny a všetky zmeny vykonávané v GUI sa posielajú a vykonávajú na robotickom ramene (Obr. 13).



Obr. 13 Nastavenie komunikácie a riadenia so servomotormi robotického ramena

Menu obsahuje aj tlačidlo na odskúšanie funkčnosti efektora „Napájanie efektor“, bez nutnosti programovania pohybu robotického ramena. Aktiváciou tlačidla je možné zapnúť alebo vypnúť napájacie napätie efektoru. Týmto tlačidlom vieme vypnúť efektor aj počas behu programu.

3.3. Výpočet kinematických úloh

V tejto časti sú uvedené možnosti GUI pre prepočty priamej a inverznej kinematickej úlohy robotického ramena .

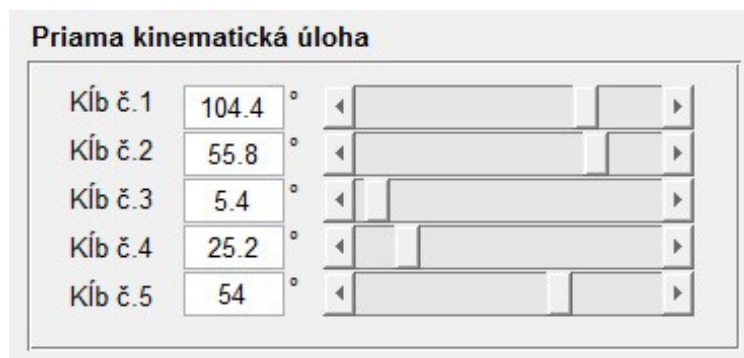
Okrem prepočtu oboch kinematických úloh je na pozadí aktívna protikolízna ochrana robota voči podlahe, na ktorej je robot pripevnený. Táto virtuálna zábrana je plocha vo výške 3 cm nad touto podlahou. Ak je definovaný pohyb ramena alebo jeho výsledná poloha tak, že rameno počas vykonávania tohto pohybu potenciálne narazí do podlahy, program robotické rameno zastaví. Na pozadí však stále prepočítava jeho požadovanú polohu. Keď je výsledná poloha ramena opäť mimo tejto „bezpečnostnej“ zóny, robotické rameno pokračuje vo svojom pohybe. Vďaka takejto ochrane nie je teda možné, aby aj pri zadefinovaní nevhodných údajov pohybu robota došlo k jeho poškodeniu.

3.3.1 Priama kinematická úloha

Ak užívateľ pozná polohy jednotlivých kĺbov, program mu automaticky prepočíta zadanú polohu a zobrazí ju v prekresľovacom grafickom okne GUI.

Okrajové polohy jednotlivých kĺbov sú nastavené nasledovne:

1. kĺb - rozsah od -176° do 186°
2. kĺb - rozsah od -90° do 90°
3. kĺb - rozsah od 0° do 180°
4. kĺb - rozsah od -150° do 150°
5. kĺb - rozsah od 0° do 180°



Obr. 14 Nastavenie hodnôt natočenia jednotlivých kĺbov robotického ramena

GUI umožňuje zadávanie hodnôt kĺbov: pomocou klávesnice do textového okna, alebo posuvníkmi v menu – oboje v stupňoch (Obr. 14). Na pozadí systému sú pevne definované obmedzenia jednotlivých kĺbov nášho robotického ramena. Tie sú nastavené podľa fyzických možností natočenia každého kĺbu pri danej konštrukcii ramena. Pri prekročení týchto hodnôt program neakceptuje zadané hodnoty natočenia kĺbu. Pri posuvníkoch je toto rozmedzie pohybu pevne definované okrajovými polohami.

3.3.2 Inverzná kinematická úloha

Ak užívateľ chce robotické rameno natočiť do požadovanej polohy a rotácie, ale nepozná natočenia jednotlivých kĺbov, môže využiť panel pre výpočet inverznej kinematickej úlohy. V nej si zadefinuje polohu a rotáciu koncového bodu robotického ramena – efektora na a okolo osi x , y a z .

Program na pozadí prepočíta natočenia jednotlivých kĺbov a zobrazí robotické rameno v grafickom okne. Kvôli výpočtovej náročnosti neprebíha prepočet inverznej kinematickej úlohy automaticky, ako pri priamej kinematickej úlohe. Po zadaní požadovaných hodnôt musí užívateľ potvrdiť výpočet tlačidlom.

Rotáciu definujeme v stupňoch a polohu v metroch (Obr. 15).

Inverzná kinematická úloha

Vstupné parametre:

Rotácia		Poloha	
os X	<input type="text" value="0"/> °	os X	<input type="text" value="0,10"/> m
os Y	<input type="text" value="0"/> °	os Y	<input type="text" value="0,12"/> m
os Z	<input type="text" value="0"/> °	os Z	<input type="text" value="0,08"/> m

Tolerancia chyby

Obr. 15 Nastavenie polohy a rotácie efektora robotického ramena

Keďže neexistuje iba jedno riešenie výsledného natočenia robotického manipulátora, nie je isté, že vypočítaná hodnota natočenia bude vhodná (robotické rameno môže byť aj napriek správnej polohe efektora nezmyselne pretočené v niektorom z piatich kĺbov).

Pri numerickom výpočte vieme tento problém eliminovať, a to definíciou tolerancie chyby – teda hodnotou odchýlky polohy efektora od požadovanej hodnoty. Program sa vždy snaží nájsť čo najpresnejšiu polohu ramena podľa požiadaviek užívateľa, avšak pri zadaní takmer nulovej tolerancie chyby sa môže stať, že program nenájde žiadne riešenie. Opačný stav je, že pri vysokej hodnote tolerancie program nájde príliš veľa riešení, medzi ktorými sa nájdu aj logicky nezmyselné (ale numericky správne) riešenia.

3.4. Transformačná matica

Počas všetkých výpočtov a práce s robotickým ramenom máme možnosť sledovať jeho požadovanú hodnotu konečného bodu – efektora, pomocou výslednej transformačnej matice (Obr. 16). Tá je pre užívateľa dôležitá nielen na overenie správnosti riešení kinematických úloh, ale aj ako informácia pre odčítanie polohy na ďalšie použitie (plánovanie trajektórií, umiestnenie obrobkov...).

	os X	os Y	os Z	Poz.	
Element. vektor X	1	0	0	0.22	X
Element. vektor Y	0	-1	0	0	Y
Element. vektor Z	0	0	-1	0.24	Z
	0	0	0	1	

Obr. 16 Výsledná transformačná matica polohy efektora robotického ramena

Transformačná matica sa skladá z viacerých farebne odlíšených blokov:

- Zelená matica s rozmerom 3x3 – informácia o rotácii – natočení konečného bodu – efektora robotického ramena (označenie v stupňoch)
- Ružová matica s rozmerom 1x3 – informácia o polohe – natočení konečného bodu – efektora robotického ramena (označenie v metroch)
- Modrá matica s rozmerom 1x1 – doplnková informácia (väčšinou sa používa na označenie mierky)
- Biela matica s rozmerom 3x1 – doplnenie pre rozmer matice 4x4

3.5. Tvorba trajektórií pohybu

Pre výpočet hodnoty natočenia robotického ramena nám vždy stačí prepočítať iba priamu alebo inverznú kinematickú úlohu. Ak potrebujeme vypočítať pohyb po viacerých bodoch umiestnených v priestore, potrebujeme vytvoriť trajektórie jeho pohybu.

Na tento účel je slúži „Tvorba trajektórie“, pomocou ktorej:

- užívateľ pomocou priamej alebo inverznej kinematickej úlohy vypočíta polohu robotického ramena a následne ju tlačidlom pridá do zoznamu bodov trajektórie
- vieme meniť parametre žiadanej polohy pomocou editovateľných hodnôt v zozname bodov
- vieme definovať trvanie pohybu ramena z bodu do bodu (rýchlosť ramena)
- vieme nastaviť stav efektora – zapnutý / vypnutý

Po každej zmene trvania pohybu ramena sa automaticky mení aj výsledná doba trvania pohybu po trajektórii. Výsledný automaticky počítaný čas trvania môžeme skontrolovať v spodnej časti bloku (Obr. 17).

	Os X	Os Y	Os Z	Trvanie	Efaktor
1.	0.2185	0	0.2418		off
2.	0.2352	0.1946	0.0472	5	on
3.	0.0383	-0.3029	0.0472	10	off
4.	0.0307	-0.2429	0.5161	5	on

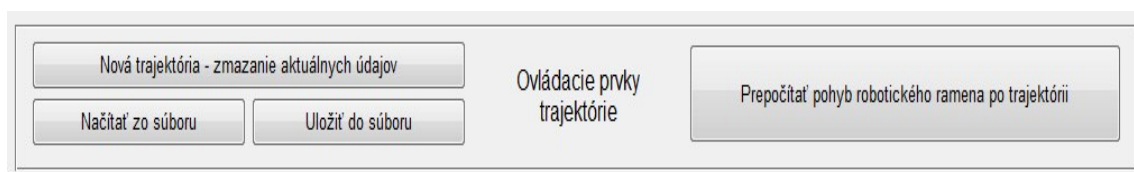
Celkový čas trvania pohybu ramena: 42 s

Obr. 17 Tvorba trajektórií pohybu robotického ramena

Vo väčšine prípadov definujeme pre požadovaný pohyb ramena viac ako štyri body trajektórie. Keďže tento počet zobrazených bodov v zozname je obmedzený miestom na obrazovke, pre ďalšie body je použité listovanie v zozname. Na zobrazenie piateho a ďalších bodov navrhutej trajektórie listujeme v zozname pomocou tlačidiel dopredu a späť.

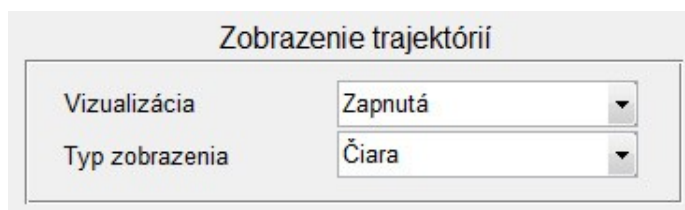
Po zedefinovaní všetkých bodov trajektórie musíme prepočítať samotnú trajektóriu pohybu. Počet krokov pohybu robotického ramena medzi jednotlivými bodmi je stanovený minimálnym časom vzorkovania, ktorý závisí od rýchlosti počítača. Všeobecne však platí, že čím pomalší pohyb ramena požadujeme, tým viac vzoriek vie počítač vypočítať a odoslať do robotického ramena.

Ak je užívateľ s vytvorenou trajektóriou spokojný, pomocou GUI ju vie uložiť a v budúcnosti znovu načítať z pevného disku počítača, z USB kľúča, alebo z pamäťovej karty. V prípade nespokojnosti môžeme trajektóriu tlačidlom vymazať a začať s tvorbou odznova (Obr.17).



Obr. 18 Ovládacie prvky trajektórie pohybu robotického ramena

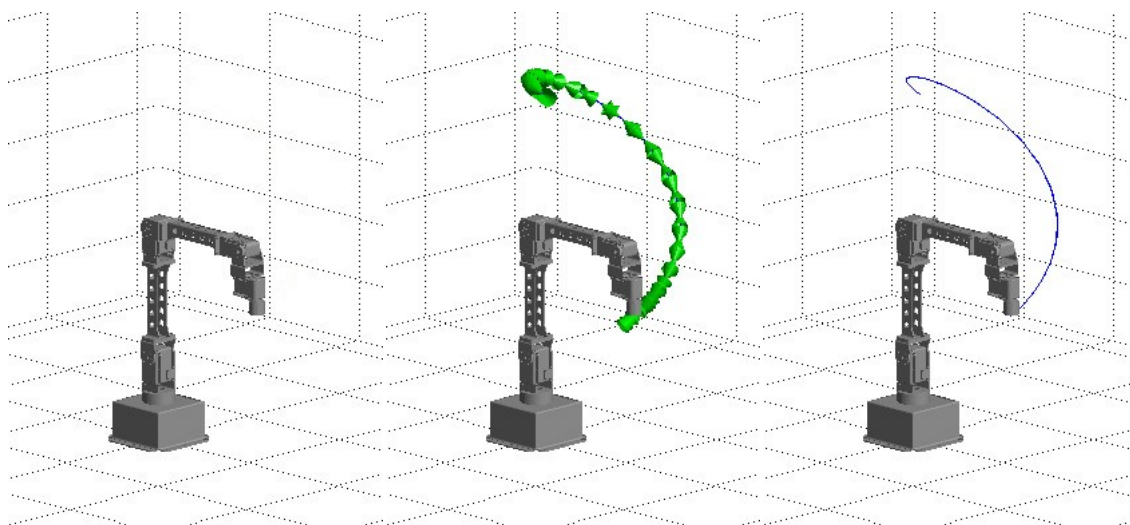
Po vytvorení a prepočítaní trajektórie sa v prekresľovacom grafickom okne zobrazuje okrem 3D modelu robotického ramena aj vizualizácia trajektórie jeho pohybu (Obr. 19, Obr. 20)



Obr. 19 Ovládacie prvky vizualizácií trajektórie pohybu robotického ramena

Užívateľ si môže vybrať z viacerých typov zobrazenia:

- **šípky** – vykreslenie trajektórie pomocou zelenej čiary doplnenej o šípky smeru pohybu. Počet šípok symbolizuje počet generovaných a odoslaných vzoriek do robotického ramena
- **čiara** – modrá čiara symbolizujúca iba priebeh trajektórie pohybu ramena
- **žiadna (vypnutá)** – ak užívateľ nepotrebuje trvale vidieť zobrazenie trajektórie pohybu, môže ju vypnúť. Docielime tým úsporu výkonu počítača.



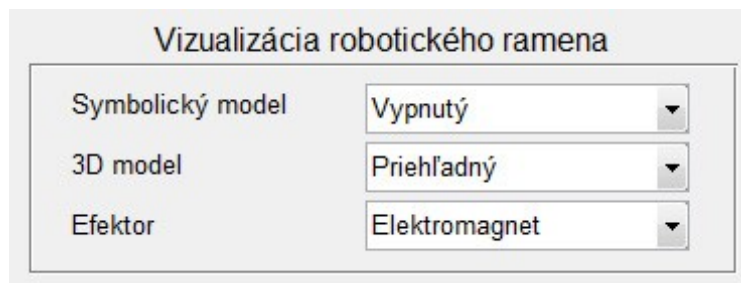
Obr. 20 Vizualizácia trajektórií pohybu robotického ramena: zľava – vypnutá, v strede – šípky, napravo – čiara

3.6. Vizualizácia

Zobrazovanie požadovanej polohy robotického ramena je veľmi dôležitou súčasťou pri každej simulácii a tvorbe pohybu robota. Okrem transformačnej matice s požadovanou polohou prekresľujeme v GUI aj 3D model robotického ramena. Podľa neho si užívateľ môže skontrolovať v priestore zvolenú polohu ramena a prípadne upraviť jeho polohu podľa svojich požiadaviek.

V menu vizualizácie (Obr. 21) môžeme meniť tri parametre:

- Zapnutie alebo vypnutie symbolického modelu
- Zmenu typu zobrazenia 3D modelu
- Zmenu typu efektora, alebo jeho úplné vypnutie



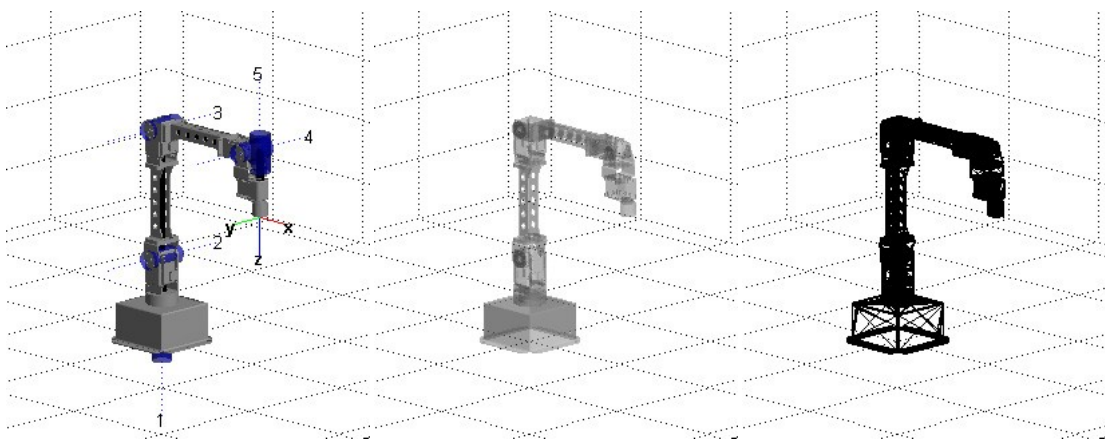
Obr. 21 Menu 3D vizualizácie robotického ramena.

Pri simuláciách je možné zvoliť prepínačom aktivovanie alebo deaktivovanie symbolického modelu robotického ramena. Symbolický model „paličkový“ – čiarový model robotického ramena, symbolizuje fyzikálne prepojenie všetkých mechanických častí robotického ramena. Obsahuje číselné označenie jednotlivých kĺbov a zobrazuje polohu a orientáciu výsledného súradnicového systému efektora. Keďže sa vykresľuje simultánne s 3D modelom robotického ramena, požiadavky na výkon počítača sú vyššie. Keďže oba modely sú stále aktívne a prekresľujú sa v reálnom čase, jediná možnosť úspory výkonu je vypnutie tohto modelu, keď ho užívateľ nepotrebuje.

Ďalšie zmeny zobrazenia sa týkajú vizualizácie 3D modelu robotického ramena.

Užívateľ môže vybrať jeden z troch typov zobrazenia (Obr. 22):

- plnohodnotný 3D model robotického ramena
- polopriehľadný 3D model – priehľadnosť robotického ramena nastavená na 60%
- drôtený tzv. „wireframe“ model



Obr. 22 Vizualizácia 3D modelu robotického ramena:

zľava – plnohodnotný model spolu so symbolickým modelom

v strede – polopriehľadný model

napravo – drôtený model

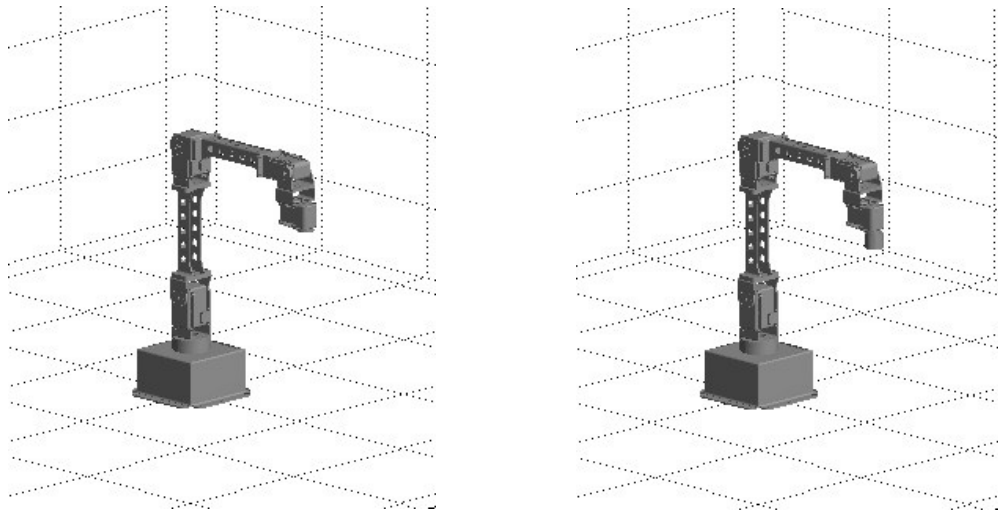
Rozdiel v požiadavkách na výkon PC je pri zmene 3D modelu zanedbateľný a je na užívateľovi, ktorý model si zvolí.

Posledná možnosť zmeny sa týka efektora. Ten si môžeme zapnúť alebo vypnúť, prípadne, ak máme načítaných viacero efektorov, vieme medzi nimi prepínať (

Obr. 23). V prípade, ak užívateľ vypne vizualizáciu efektora, udejú sa dve zmeny:

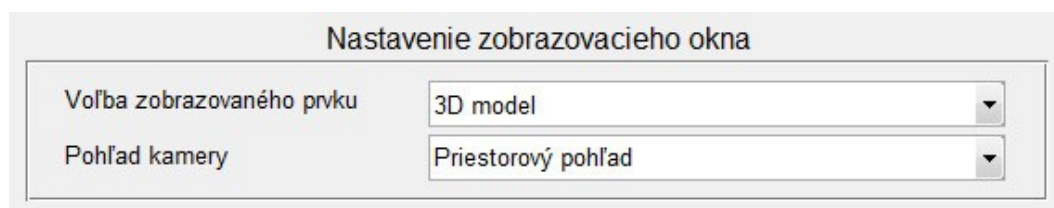
- 3D model ramena je zmenený – robotické rameno je vizualizované bez efektora

- koncový bod súradnicového systému je posunutý na výstupný hriadeľ piateho (posledného) servomotora robotického ramena. Od momentu vypnutia GUI automaticky prepočítava priamu aj inverznú kinematickú úlohu pre nový koncový bod robota.



Obr. 23 Vizualizácia efektoru robotického ramena: naľavo – efektor je vypnutý, napravo – efektor je zapnutý.

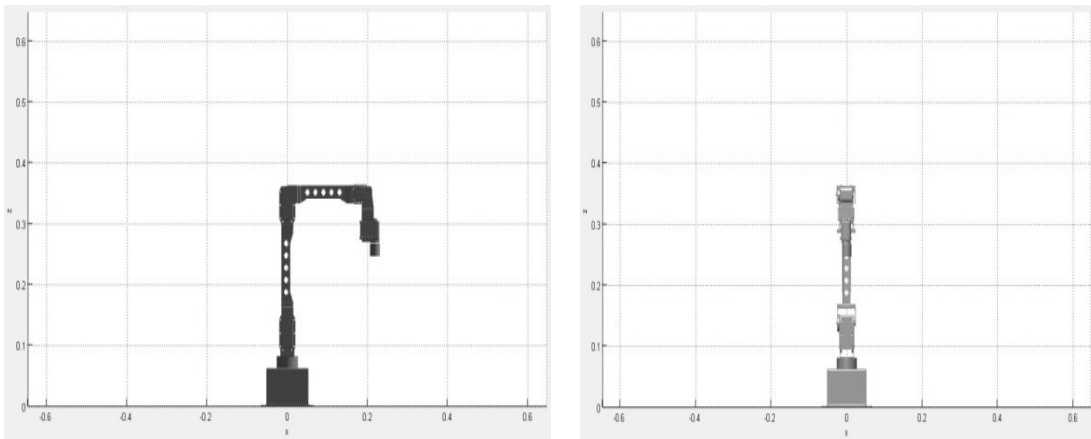
Nie v každej situácii je vhodná vizualizácia robotického ramena z 3D perspektívy. Ak chce užívateľ skontrolovať polohu ramena zhora alebo z boku, má možnosť prepnúť si toto zobrazenie v nastaveniach zobrazovacieho okna (Obr. 24). Pri prestavení zobrazenia na iný pohľad sa okrem 3D modelu ramena automaticky prekresľuje aj priebeh trajektórie a symbolický model robota.



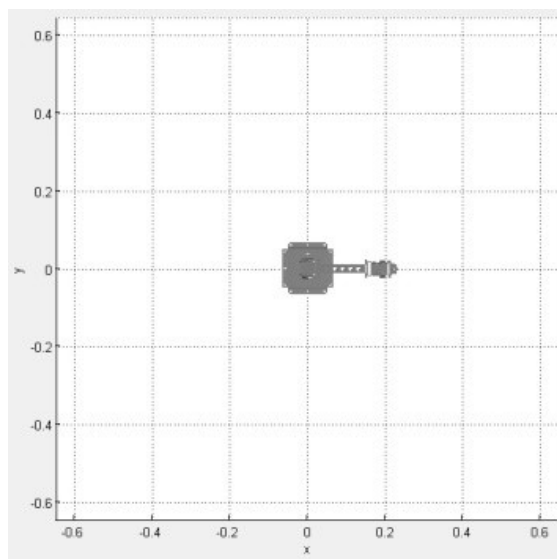
Obr. 24 Nastavenie zobrazovacieho okna GUI

Môžeme si vybrať zo štyroch možností vizualizácie (Obr. 25, Obr. 26):

- perspektíva
- nárys
- bokorys
- pôdorys



Obr. 25 Vizualizácia 3D modelu robotického ramena: naľavo – nárys, napravo – bokorys



Obr. 26 Vizualizácia 3D modelu robotického ramena – pôdorys

3.7. Snímanie parametrov pohonov

Jeden z najdôležitejších ovládacích blokov programu tvoria funkcie na snímanie parametrov servomotorov robotického ramena. Ich dôležitosť spočíva v informovaní užívateľa o spätnej väzbe servomotora. Bez nej nevieme s istotou povedať, v akej reálnej polohe je každý servomotor, resp. nevieme jeho aktuálny stav. Pomocou týchto funkcií vieme z každého servomotora v reálnom čase odčítať informácie o:

- aktuálnom uhle natočenia servomotora [$^{\circ}$]
- hodnote uhlovej rýchlosti [$^{\circ}/s$]
- hodnote zaťaženia pohonu [%]

Pomocou kontextového menu užívateľ označí, ktorý parameter ktorého servomotora chce snímať (buď samostatne, alebo všetky servomotory naraz). Taktiež si môže zvoliť režim snímania: nepretržite alebo iba počas priebehu simulácie (pohybu ramena). Posledná možnosť sa týka periódy snímania. Najnižšia možná hodnota je nastavená na 0,5 sekundy (ak užívateľ zvolí nižšiu hodnotu periódy snímania ako 0,5 s, program túto hodnotu neakceptuje).

Po spustení snímania sa pod označením každého servomotora každého kĺbu zobrazí nameraná hodnota zvoleného parametra. Údaje sa automaticky obnovujú a informujú užívateľa o aktuálnom stave robotického ramena (Obr. 27).

Okrem aktuálneho stavu môže užívateľ zapnúť alebo vypnúť prekresľovanie zaznamenaných priebehov parametrov do grafických priebehov. Grafy sa vykresľujú do grafického okna zobrazenia 3D modelu robotického ramena. Užívateľ zvolí, ktorý parameter ho zaujíma a podľa toho si zvolí grafický priebeh. Má na výber z grafických priebehov pre parametre požadovaných hodnôt (5 grafov), grafických priebehov pre parametre nameraných hodnôt odčítaných zo servomotorov (4 grafy) a spoločné vykreslenie požadovaných a nameraných hodnôt (2 grafy). Po ich preštudovaní užívateľ môže naspäť prepnúť grafické okno zobrazenia na 3D model robotického ramena.

Snímanie parametrov robotického ramena

Snímanie Zapnuté ▾

Parameter Natočenie ▾

Kĺb č.1
-173.45

Kĺb č.2
-180.22

Kĺb č.3
-90.22

Kĺb č.4
-60.15

Kĺb č.5
-150.15

Periódá snímania - min 0.5 s 0.5 s

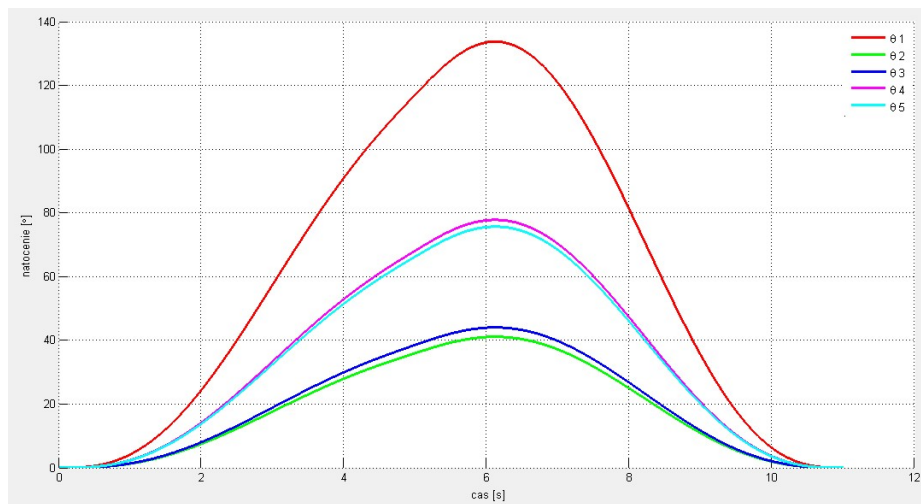
Obr. 27 Snímanie parametrov robotického ramena

Na nasledujúcich grafoch sú zobrazené všetky priebehy meraných veličín, ktoré môžeme v programe vykresliť. Výstupné priebehy zodpovedajú nasledujúcim parametrom pohybu robotického ramena (nastavený jednorazový cyklus simulácie z východiskovej polohy do definovanej polohy a späť do východiskovej polohy, zapnuté snímanie pre všetky servomotory):

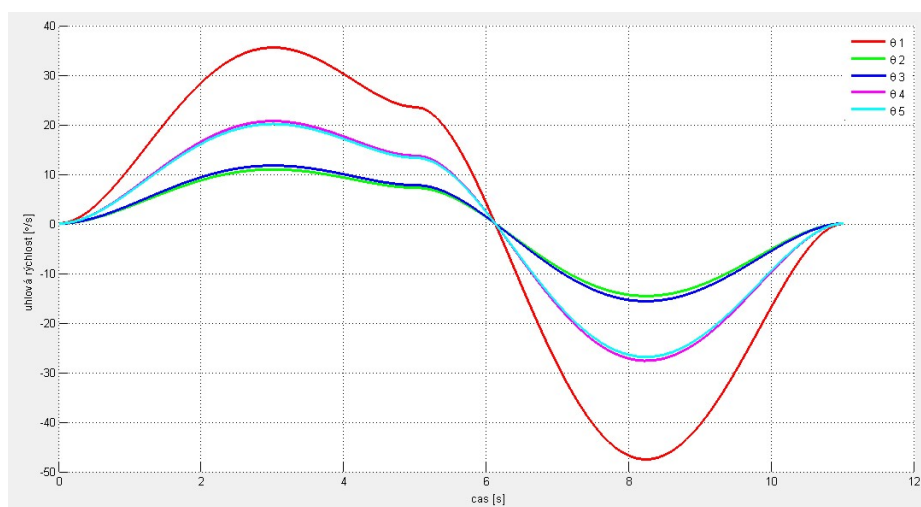
Tab.3: Tabuľka nastavených parametrov pre snímanie parametrov (žiadaná poloha efektora robotického ramena)

Os X [m]	Os Y [m]	Os Z [m]	Trvanie pohybu [s]
0,2185	0	0,2418	
0,0097	-0,0189	0,5957	5
0,2185	0	0,2418	6

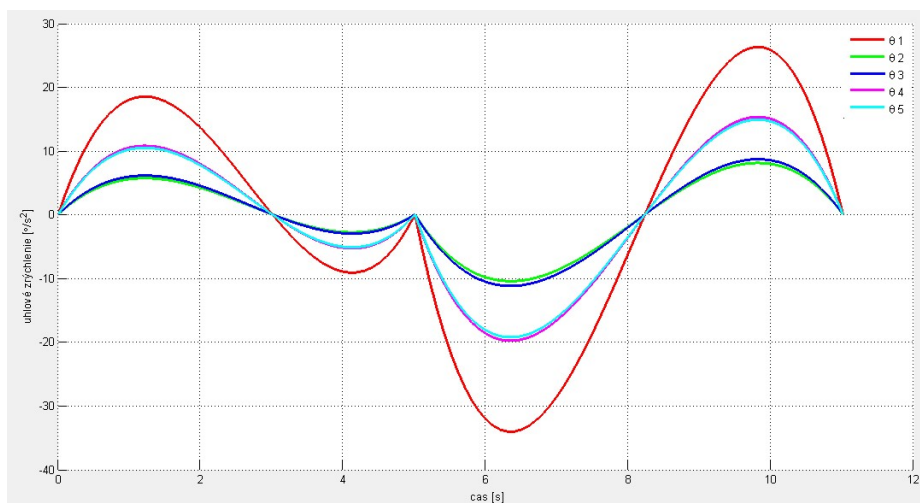
Vo všetkých priebehoch sú jednotlivé kĺby robotického ramena farebne odlišené (vo všetkých priebehoch sú pridelené farby kĺbov nemenné). Na Obr. 28 - Obr. 31 sú zobrazené požadované veľkosti natočenia, uhlovej rýchlosti, uhlového zrýchlenia a pozície. Všetky parametre sú generované na základe užívateľom definovaných trajektórií a počas simulácie sú odosielané v reálnom čase do jednotlivých servomotorov.



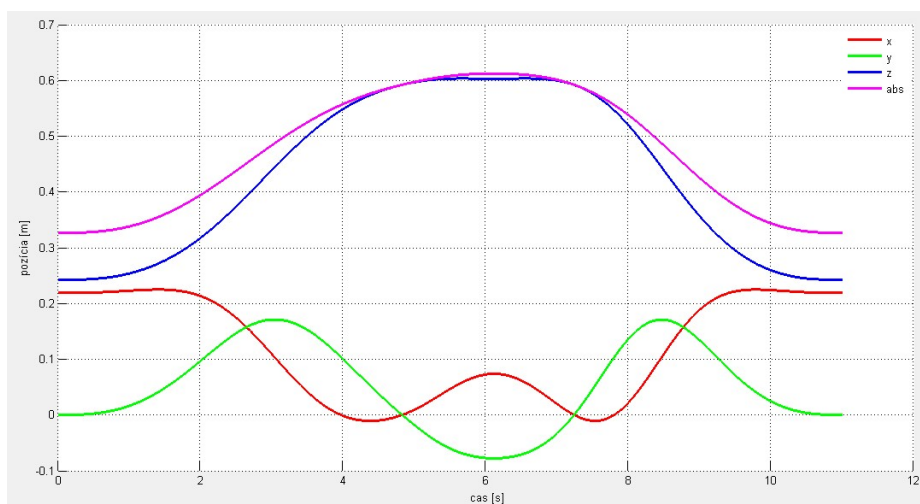
Obr. 28 Grafický priebeh požadovaného natočenia servomotorov robotického ramena



Obr. 29 Grafický priebeh požadovanej uhlovej rýchlosti servomotorov robotického ramena



Obr. 30 Grafický priebeh požadovaného uhlového zrýchlenia servomotorov robotického ramena

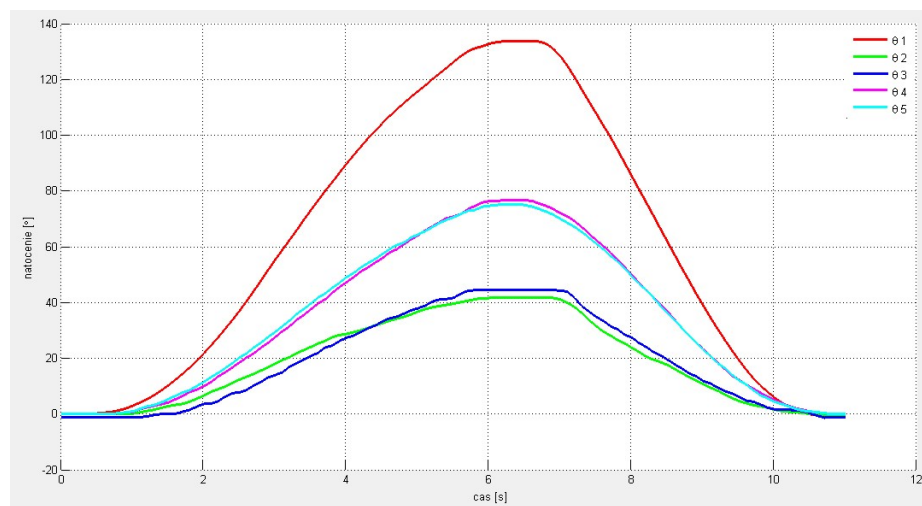


Obr. 31 Grafický priebeh požadovanej pozície servomotorov robotického ramena v priestore

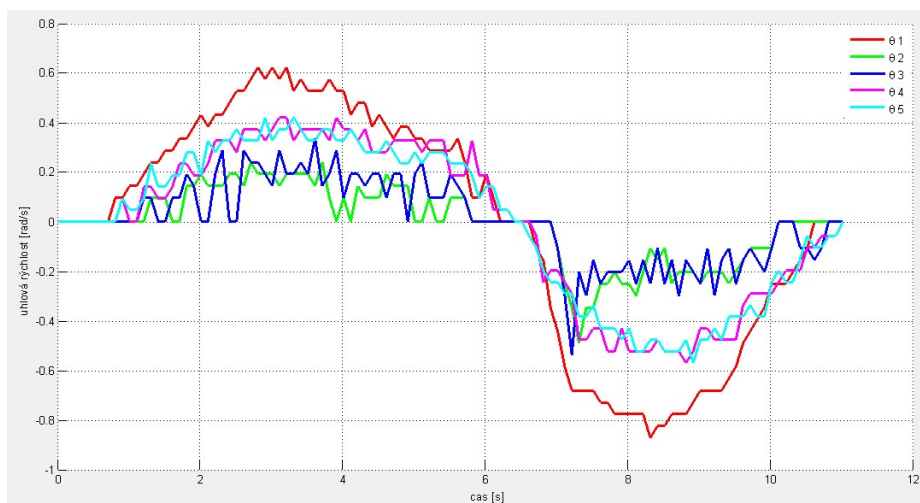
Na priebehoch zobrazených na Obr. 32 - Obr. 34 sú zobrazené namerané hodnoty zvolených veličín – natočenia servomotorov, ich uhlovej rýchlosti a zaťaženia. Merania boli uskutočnené podľa definovanej periódy - 0,5s.

Pre jednoduché odčítanie odchýlok je možné porovnať priebehy požadovaných hodnôt natočenia a uhlovej rýchlosti s nameranými hodnotami (Obr. 35, Obr. 36).

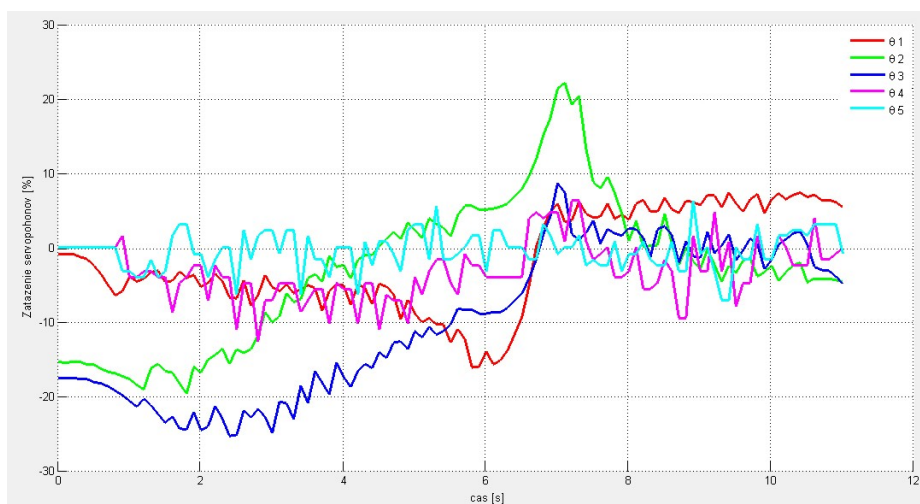
Z priebehov je zrejmé, že medzi požadovanými a nameranými hodnotami sú merateľné odchýlky. Tie sú spôsobené nepresnosťou a pomalšou odozvou regulátorov v použitých servomotoroch a vo vŕňach ich prevodoviek.



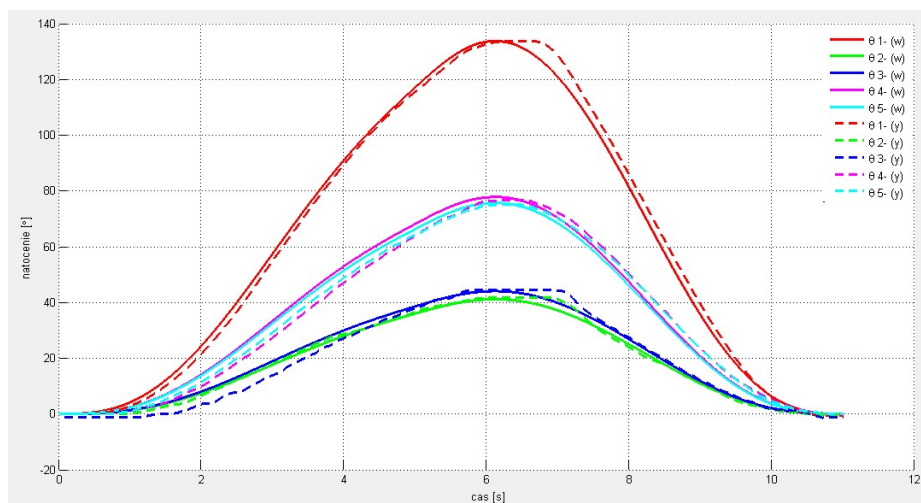
Obr. 32 Grafický priebeh nameraného natočenia servomotorov robotického ramena



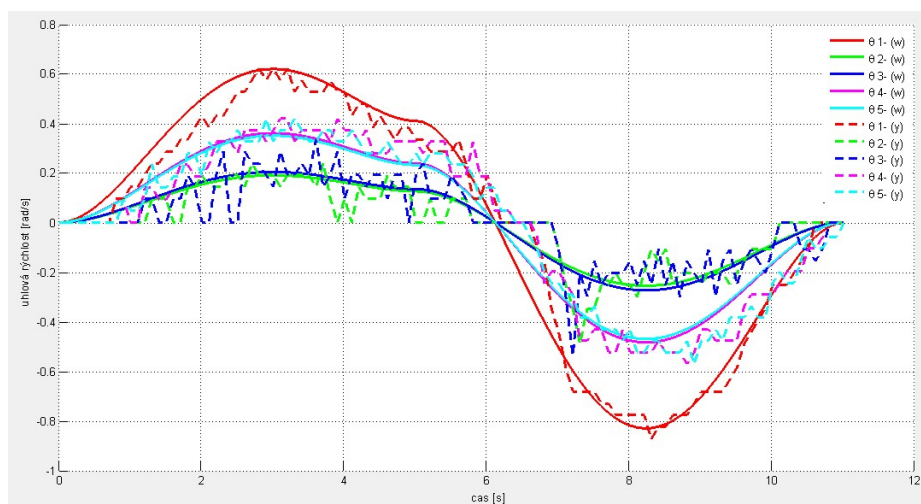
Obr. 33 Grafický priebeh nameranej uhlovej rýchlosti servomotorov robotického ramena



Obr. 34 Grafický priebeh nameraného zaťaženia servomotorov robotického ramena



Obr. 35 Porovnanie priebehov požadovaného a nameraného natočenia servomotorov robotického ramena

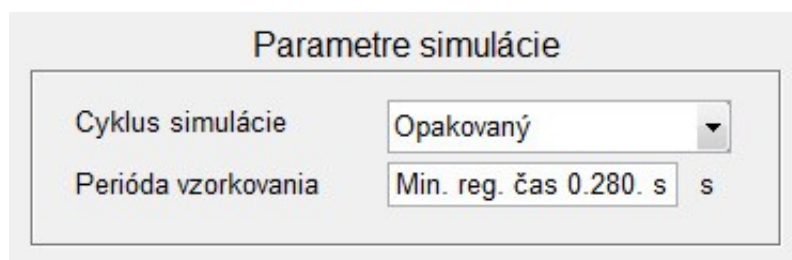


Obr. 36 Grafický priebeh porovnania požadovanej a nameranej uhlovej rýchlosti servomotorov robotického ramena

3.8. Spustenie programu

Výsledné spustenie simulácií a programov, ktoré využívajú všetky vyššie uvedené funkcie, vieme ovládať pomocou dvoch funkčných blokov.

Po zadefinovaní všetkých parametrov GUI užívateľ môže zvoliť, či chce simuláciu alebo program spustiť iba jeden raz alebo opakovane – cyklicky až do manuálneho zastavenia (Obr. 37).



Obr. 37 Parametre simulácie a behu programu

Pod cyklom simulácie je uvedená informácia o perióde vzorkovania. Tento údaj o minimálnom regulačnom čase sa počas behu programu nemení a je vypočítaný na základe požiadaviek užívateľa na vykonávané úlohy v GUI (napr. už spomínaný pohyb robotického ramena po trajektórii).

Výsledné spustenie programu neprebíha automaticky. Nezávisle od typu behu programu musí užívateľ výsledný program/simuláciu spustiť tlačidlom ŠTART a v prípade potreby zastaviť tlačidlom STOP (Obr. 38).



Obr. 38 Spustenie a zastavenie simulácie a výsledného programu

V prípade poruchy alebo zamrznutia nášho programu máme k dispozícii tlačidlo RESET. Po jeho stlačení sa GUI automaticky ukončí, vymažú sa všetky premenné v pamäti systému, odznova sa načítajú všetky súčasti a podprogramy systému GUI.

4. Príklady použitia GUI

V nasledujúcich podkapitolách budú uvedené spôsoby využitia GUI pre riadenie robotických ramien v rámci výučby základného kurzu robotiky, v ktorom budú rozobrané príklady na priamu kinematickú úlohu, inverznú kinematickú úlohu, reprezentovanie pozície a orientácie objektov v priestore prostredníctvom transformačných matic. Záverečná časť je venovaná využitiu Robotic Toolboxu, pre simuláciu modelov robotických ramien.

4.1. Priama a inverzná kinematická úloha

Riešením priamej kinematickej úlohy je transformačná matica koncového bodu – efektora robotického manipulátora, ktorá popisuje jeho polohu a orientáciu. Hodnotu takejto matice je možné určiť na základe natočení jednotlivých kĺbov robotického ramena. V rámci GUI je aplikované riešenie priamej kinematickej úlohy prostredníctvom panelu pre priame ovládanie kĺbov robotického ramena (Obr. 14), pričom výsledok priamej kinematickej úlohy je zobrazený vo forme transformačnej matice (Obr. 16). Riešenie tejto úlohy je tiež možné pozorovať aj na vizualizácií robotického ramena, alebo na reálne riadenom robotickom ramene.

Inverzná kinematická úloha predstavuje opak priamej kinematickej úlohy, čiže na základe požadovanej pozície a orientácie robotického ramena sú vypočítané požadované natočenia jednotlivých kĺbov robotického ramena. V rámci GUI je tento výpočet realizovaný numerickou metódou. Dĺžku výpočtu tejto úlohy je v rámci GUI možné ovplyvniť nastavením maximálnej možnej veľkosti chyby (so zvyšovaním maximálnej veľkosti chyby sa urýchluje jej výpočet). Ako vstup pre výpočet inverznej kinematickej úlohy sa zadáva transformačná matica. Všeobecne je možné rozdeliť transformačnú maticu na dve časti, pričom prvá časť vyjadruje polohu (Obr. 39a) a druhá orientáciu (Obr. 39b).

Výsledná transformačná matica

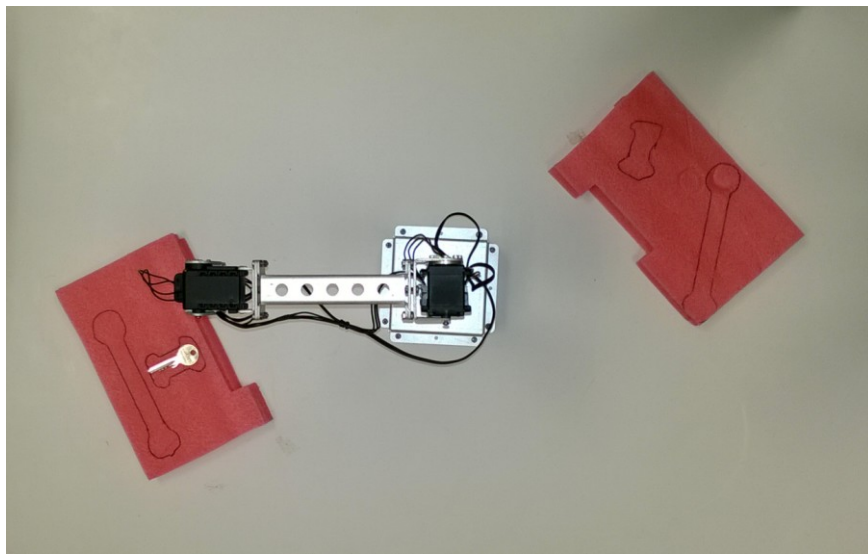
	(a) os X	os Y	os Z	Poz. (b)	
Element. vektor X	1	0	0	0.22	X
Element. vektor Y	0	-1	0	0	Y
Element. vektor Z	0	0	-1	0.24	Z
	0	0	0	1	

Obr. 39 Časti transformačnej matice (a) - definícia orientácie (b) - definícia pozície

V rámci GUI sa v paneli pre výpočet inverznej kinematickej úlohy (Obr. 15) definuje pozičná časť matice zadaním požadovanej polohy v jednotlivých osiach. Rotačná časť sa definuje pomocou postupnosti rotácií elementárneho vektora po osiach x , y a z . Vytvorená požadovaná matica sa vždy definuje na nulový bod systému, ktorý je totožný s transformačnou maticou základne robota, ktorá je jednotková.

4.2. Príklad použitia GUI

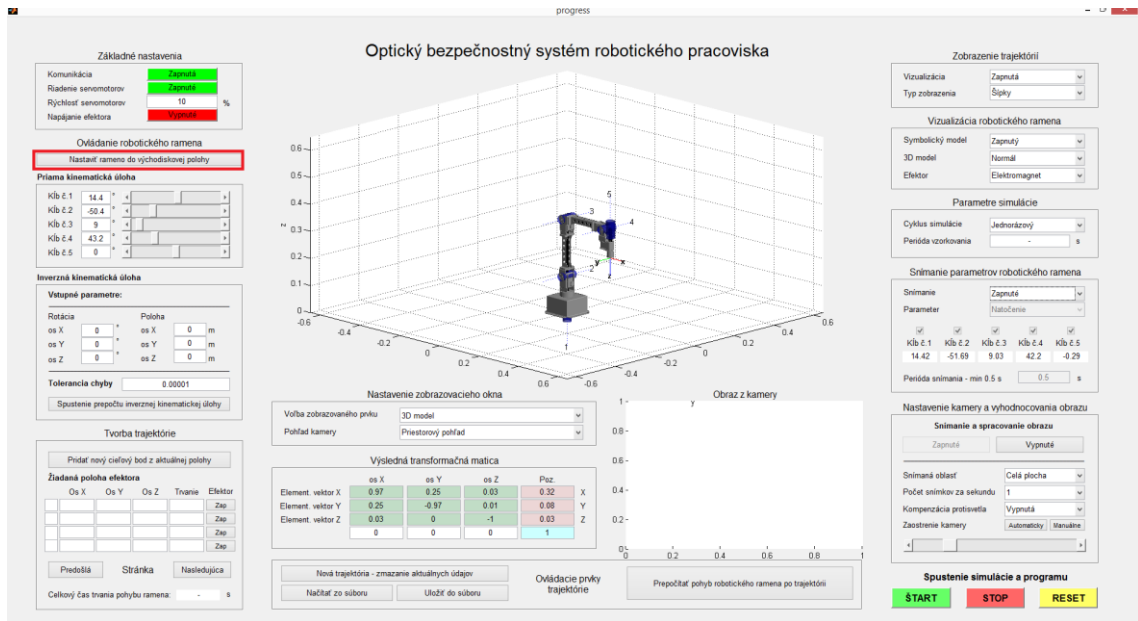
Pre demonštráciu využitia priamej a inverznej kinematickej úlohy si predstavme nasledujúci príklad. Na robotickom pracovisku máme umiestnený objekt, ktorý chceme premiestniť na presne definované miesto, pričom nepoznáme presnú polohu žiadaného objektu (Obr. 40).



Obr. 40 Východisková poloha robotického ramena

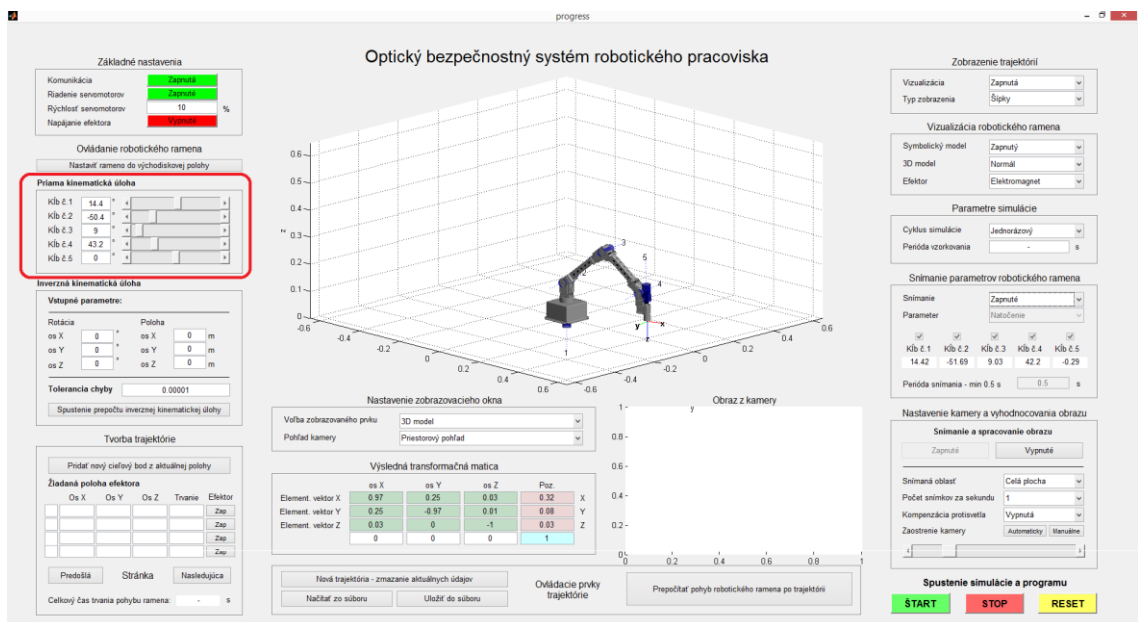
Na Obr. 40 je zobrazené pracovisko pre riešenie danej úlohy, na ktorom je vidieť vytýčené pracovisko robotického ramena (rovina stola) s dvomi červenými podložkami. Našou úlohou bude zdvihnúť daný objekt zo zeme použitím elektromagnetu a premiestniť objekt na presne určenú pozíciu na druhej podložke.

Ako prvé je potrebné inicializovať robotické rameno do počiatkovej polohy (Obr. 41).



Obr. 41 Nastavenie robotického ramena do východiskovej polohy

Následne priamym ovládaním jednotlivých kĺbov robotického ramena presuneme efektor tesne nad požadovanú súčiastku (Obr. 42, Obr. 43).



Obr. 42 Nastavenie robotického ramena pre zdvih súčiastky

Priama kinematická úloha

Kĺb č.1	14.4 °	◀			▶
Kĺb č.2	-50.4 °	◀			▶
Kĺb č.3	9 °	◀			▶
Kĺb č.4	43.2 °	◀			▶
Kĺb č.5	0 °	◀			▶

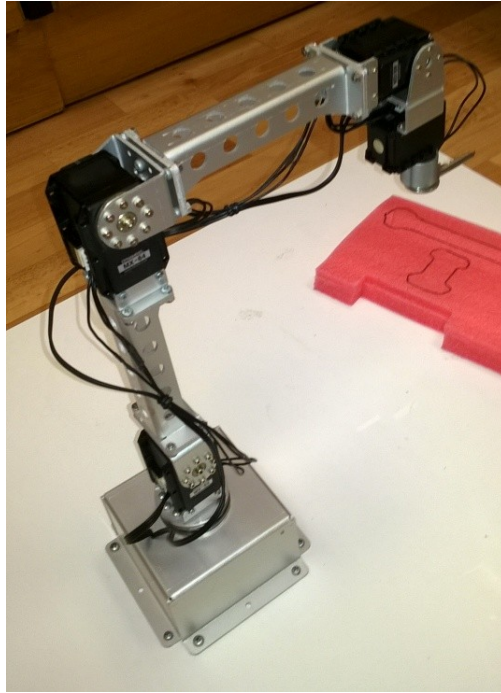
Obr. 43 Nastavenie robotického ramena pre zdvih súčiastky - detail

Po spustení napájania efektora elektromagnet pritiahne danú súčiastku (Obr. 44).



Obr. 44 Zdvihnutie kovového predmetu

Následne môžeme vrátiť robotické rameno späť do východiskovej pozície (Obr. 40).



Obr. 45 Robotické rameno vo východiskovej polohe s uchopenou súčiastkou

V ďalšom kroku vypočítame inverznú kinematickú úlohu tak, aby sme daný objekt presunuli na určenú pozíciu $[-0,4 \ -0,1 \ 0,02]$. To vykonáme definovaním požadovanej pozície a orientácie (Obr. 46, Obr. 47). Nastavenie pozíčnej časti je zrejmé z Obr.46, pričom elementárne rotácie pre orientačnú časť nastavíme na $[180^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]$. Rotáciu po x-ovej osi zadávame o 180° z dôvodu, že z-tová os efektora vždy smeruje kolmo od efektora smerom von.

Inverzná kinematická úloha

Vstupné parametre:

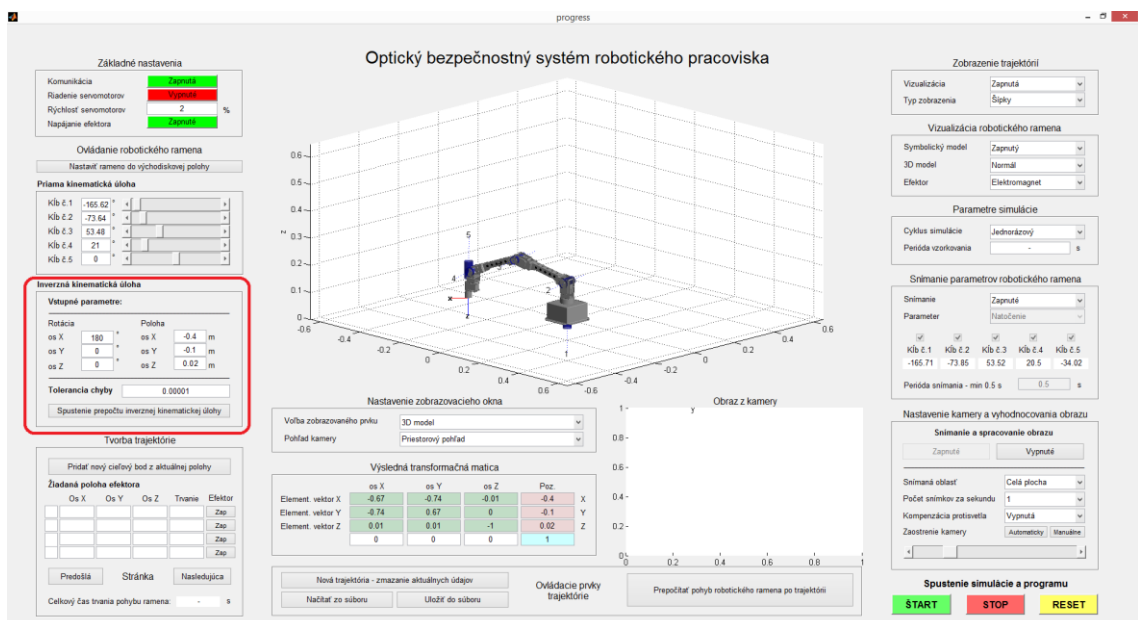
Rotácia		Poloha	
os X	<input type="text" value="180"/> °	os X	<input type="text" value="-0.4"/> m
os Y	<input type="text" value="0"/> °	os Y	<input type="text" value="-0.1"/> m
os Z	<input type="text" value="0"/> °	os Z	<input type="text" value="0.02"/> m

Tolerancia chyby

Obr. 46 Výpočet inverznej kinematickej úlohy - detail

Kedže chceme docieľiť, aby robotické rameno položilo súčiastku na zem, potrebujeme aby efektor smeroval smerom na zem, pričom orientácia z-tová os pre jednotkovú maticu smeruje smerom nahor.

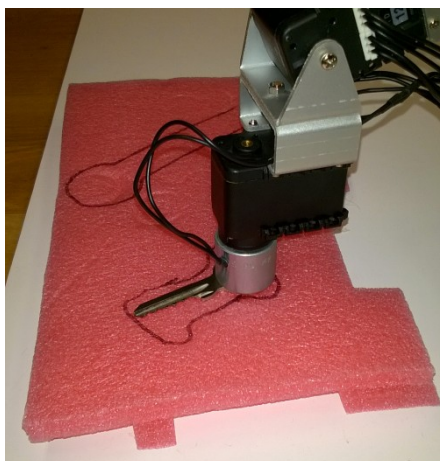
Pred spustením výpočtu inverznej kinematickej úlohy je vhodné vypnúť ovládanie servomotorov, z dôvodu možného zlého výpočtu požadovaného riešenia (napr. robotické rameno nájde správnu polohu a orientáciu, ale niektorá s častí robotického ramena sa nachádza v kolíznom stave, pri takomto prípade je potrebné zmeniť počiatočné podmienky pre výpočet, čo môžeme docieľiť približným nastavením požadovanej polohy, a následným opätovným spustením výpočtu inverznej kinematickej úlohy)(Error! Not a valid bookmark self-reference.).



Obr. 47 Výpočet inverznej kinematickej úlohy

V prípade, ak máme vypočítanú správnu polohu robotického ramena, môžeme opätovne povoliť riadenie servopohonov, a dané robotické rameno sa presunie na nami požadovanú pozíciu.

Vypnutím efektora docieľime upustenie súčiastky na podložku, a robotické rameno môžeme vrátiť do predvolenej polohy (Obr. 48).



Obr. 48 Položenie súčiastky na požadovanú pozíciu

Tým sme vyriešili danú úlohu. Všetky pozície robotického ramena je možné pridať do zoznamu trajektórií a daný pohyb cyklicky opakovať.

4.3. Použitie Robotics Toolbox-u

Pri programovaní GUI bol využitý Robotics Toolbox[21], ktorý predstavuje rozšírenie programu MATLAB o širokú škálu funkcií používaných v oblasti robotiky. Popis jednotlivých funkcií, metód a tried sa nachádza v dokumentácii k Robotics Toolboxu [20].

Pre prácu s robotickými ramenami ponúka Robotics Toolbox možnosť vytvorenia objektu robotického ramena, na ktoré je následne možné používať široké spektrum funkcií. Medzi súčasťou Robotics Toolbox-u patria funkcie pre výpočet trajektórií, rôzne funkcie pre prácu v 3D priestore a tiež funkcie určené na spracovanie obrazu. Pre spustenie toolboxu je potrebné spustenie spúšťacieho skriptu `startup_rvc`.

V nasledujúcom príklade bude prezentovaný postup pre vytvorenie modelu robotického ramena v Robotics Toolbox-e. Model robotického ramena sa v rámci Robotics Toolbox-u skladá z jednotlivých častí – funkcia `link`. Tieto časti sú definované parametrami, ktoré boli určené pomocou Denavit-Hartenbergovej notácie a sú zapísané v nasledujúcej tabuľke:

Tab.4: Parametre DH notácie návrhu 5-kĺbového robotického ramena

Kĺb č.	d	a	α	θ
1.	136,9 mm	0mm	-90°	0°
2.	0mm	201,8 mm	0°	0°
3.	0mm	200 mm	-90°	0°
4.	0 mm	18,5 mm	0°	0°
5	80,9 mm	0mm	0°	0°

Jednotlivé kĺby je možné zapísať nasledovnými parametrami – pomocou funkcie `link`, ktorá je súčasťou Robotics Toolboxu.

```
L(1)=Link([0 0.1369 0 pi/2 ]);
```

```
L(2)=Link([0 0 0.2018 0 ]);
```

```
L(3)=Link([0 0 0.2000 0 ]);
L(4)=Link([0 0 0.0185 pi/2]);
L(5)=Link([0 0.0809 0 0 ]);
```

V prípade, ak máme vytvorené všetky časti robotického ramena zapísane vo vektore, môžeme zadať tento vektor ako vstupný argument pre funkciu SerialLink, ktorá vytvorí model robotického ramena, na ktorý je možné ďalej aplikovať rôzne metódy, ako napr metódy na výpočet priamej a inverznej kinematickej úlohy.

```
RT_MVrobot=SerialLink(L)
```

```
RT_MVrobot =
```

```
robot (5 axis, RRRRR, stdDH)
```

j	theta	d	a	alpha
1	q1	0.1369	0	1.571
2	q2	0	0.2018	0
3	q3	0	0.2	0
4	q4	0	0.0185	1.571
5	q5	0.0809	0	0

```
grav =      0  base = 1  0  0  0  tool = 1  0  0  0
           0          0  1  0  0          0  1  0  0
           9.81       0  0  1  0          0  0  1  0
                   0  0  0  1          0  0  0  1
```

Uvedená notácia poskytuje podrobný zápis robotického ramena. Keďže všetky kĺby manipulátora sú rotačného typu, jeho štruktúra kĺbov je zapísaná ako „RRRRR“. V rámci notácie sú zadefinované aj gravitácia a to klasicky v osi z, označenia všetkých kĺbových premenných písmenom q od 1 do 5 a názov robota zadaný pre ďalšie výpočty ako `MV_robot`.

Po definícii robota je možný prepočet priamej kinematickej úlohy pomocou funkcie `fkine`. Hodnoty všetkých kĺbových premenných q sú rovné 0 (nulová poloha robotického ramena):

```
MV_robot.fkine([0 0 0 0 0])
```

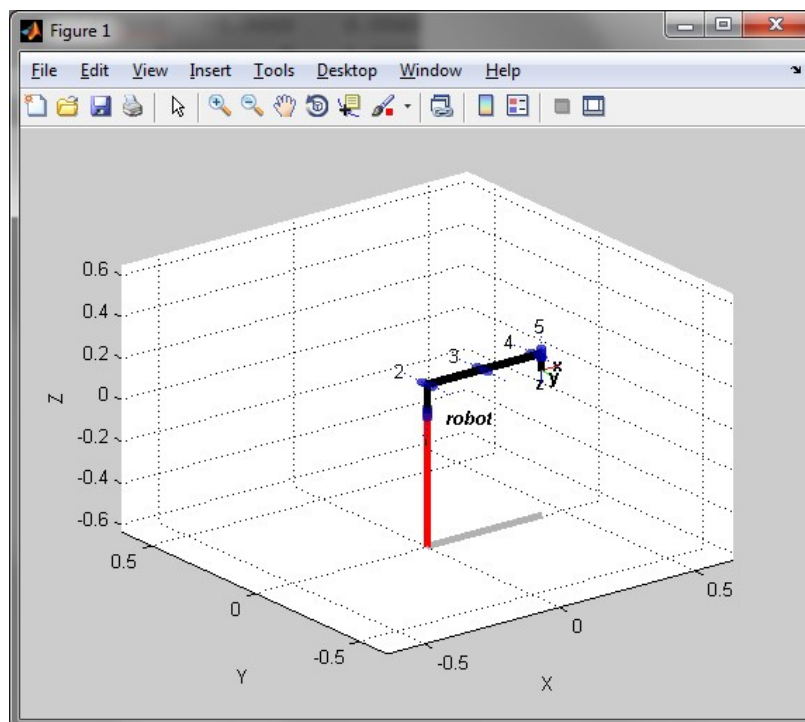
```
ans =
```

```
1.0000    0    0    0.4203
0   -1.0000   -0.0000   -0.0000
0    0.0000   -1.0000    0.0560
0    0    0    1.0000
```

Uvedená funkcia prepočíta a vygeneruje homogénnu transformačnú maticu uvádzajúcu polohu a rotáciu výsledného súradnicového systému efektora robotického manipulátora.

Výslednú polohu pre nulové hodnoty kĺbových premenných (nulovú polohu) je možné vykresliť pomocou funkcie `plot`:

```
MV_robot.plot([0 0 0 0 0])
```



Obr. 49 5-kĺbový robotický manipulátor v nulovej polohe

Ako príklad môžeme uviesť tzv. „ready“ polohu – štandardnú polohu robotického ramena – označíme ju qr :

```
qr=([0 pi/2 -pi/2 0 0])
```

```
qr =
```

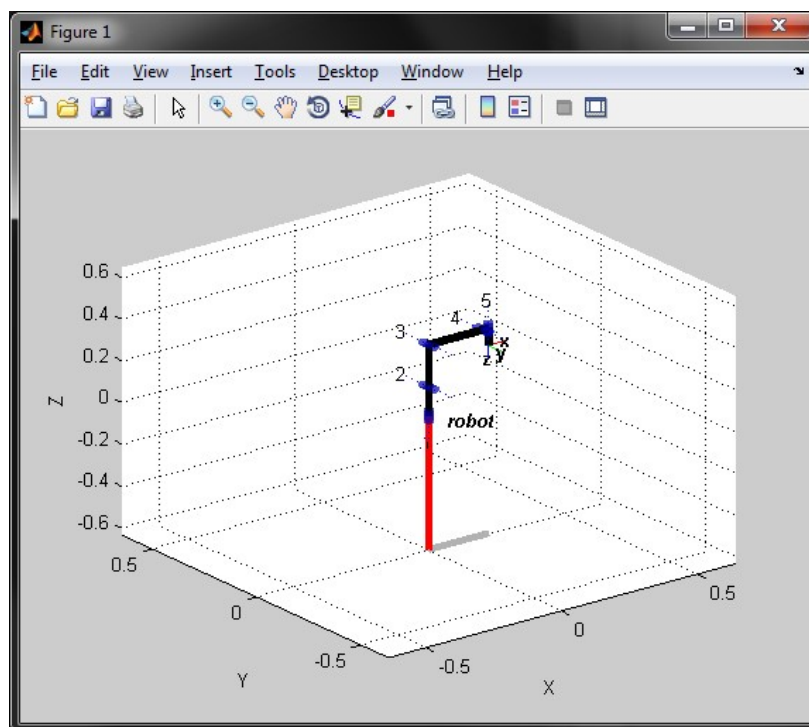
```
0 1.5708 -1.5708 0 0
```

```
MV_robot.fkine(qr)
```

```
ans =
```

```
1.0000 0 0 0.2185  
0 -1.0000 -0.0000 0.0000  
0 0.0000 -1.0000 0.2578  
0 0 0 1.0000
```

```
MV_robot.plot(qr)
```



Obr. 50 5-kĺbový robotický manipolátor v štandardnej polohe

Pri inverznej kinematickej úlohe určujeme, ako máme natočiť jednotlivé kĺby manipolátora, aby sme dostali jeho koncový bod do požadovanej polohy.

Pre výpočet inverznej kinematickej úlohy využijeme funkciu `ikine`, ktorá používa numerickú metódu výpočtu. Jej výpočet prebieha na pozadí nasledovne:

Zadáme požadovanú hodnotu natočenia do matice `qn`:

```
qn=( [pi/2, pi/2, 0, 0, 0])
```

```
qn =
```

```
1.5708    1.5708         0         0         0
```

Priamou kinematickou úlohou prepočítame transformačnú maticu polohy `T`:

```
T=MV_robot.fkine(qn)
```

```
T =
```

```
-0.0000    1.0000    0.0000   -0.0000  
0.0000   -0.0000    1.0000    0.0809  
1.0000    0.0000   -0.0000    0.5572  
0         0         0         1.0000
```

Následne z nej pomocou funkcie `ikine` spätne prepočítame hodnotu kĺbových premenných:

```
qi= MV_robot.ikine(T,qn,M)
```

```
qi =
```

```
1.5708    1.5708         0         0         0
```

kde `M` je maska pre definovanie počtu kĺbových premenných:

```
M=[1 1 1 1 1 0]
```

M =

```
1 1 1 1 1 0
```

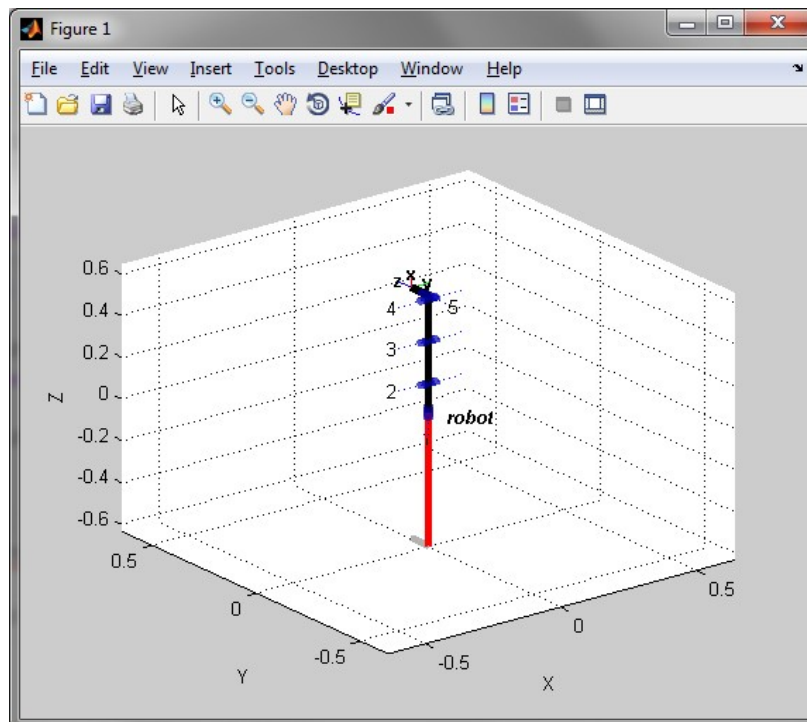
Z výpočtu vidíme, že po prepočte priamej kinematickej úlohy a spätne inverznej kinematickej úlohy nám vyšli rovnaké hodnoty kľbových premenných. Pôvodnú transformačnú maticu vieme porovnať s novo prepočítanou a taktiež si vieme polohu robotického ramena zobrazit' v grafe:

```
MV_robot.fkine(qi)
```

ans =

```
-0.0000 1.0000 0.0000 -0.0000
0.0000 -0.0000 1.0000 0.0809
1.0000 0.0000 -0.0000 0.5572
0 0 0 1.0000
```

```
MV_robot.plot(qi)
```



Obr. 51 Vypočítaná výsledná poloha 5-kľbového robotického ramena

Poznámky:

Prílohy

Príloha A: Technické parametre elektromagnetu

Príloha B: Rozmery motorov pre 3D modely pohonov:

Dynamixel AX-12(A)

Dynamixel MX-28T

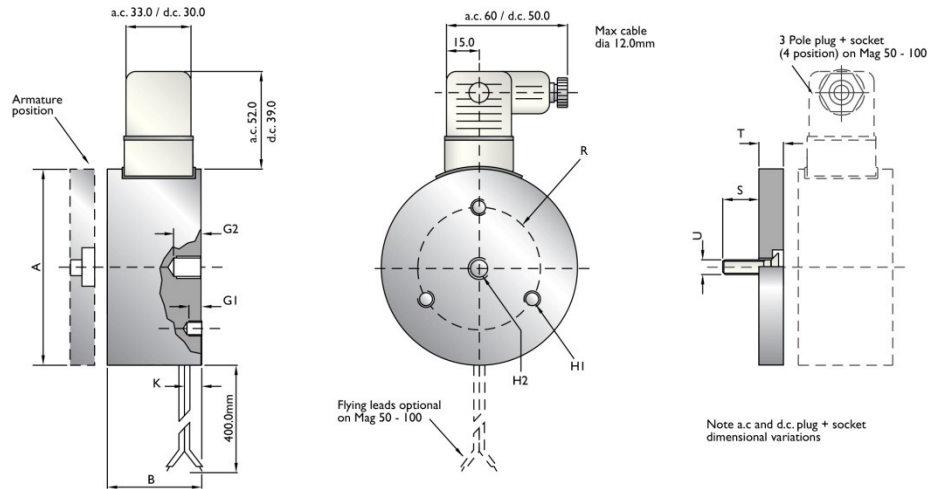
Dynamixel MX-64T

Priloha A: Technické parametre elektromagnetu

Geofire Type 58 Magnet



TYPE 58 MAGNET TECHNICAL INFORMATION



Size	AXIAL FORCE N	P20 W	MAGNET WEIGHT kg	ARMATURE WEIGHT kg	A	B	G1	G2	H1	H2	k	R	S	T	U	MAGNET DESIGN No.		MAGNET+ARM DESIGN No.	
																LEADS	PLUG+SOCKET	LEADS	PLUG+SOCKET
20	90	3.0	0.05	0.01	20	15.0	-	4.0	-	M4	5	-	7	3	M3	0120	-	0320	-
25	140	3.7	0.07	0.01	25	20.5	4	10.0	M3	M5	6.5	15	7	3	M3	0125	-	0325	-
30	230	3.8	0.20	0.04	30	24.0	5	5.0	M3	M5	7	18	8	5	M4	0130	-	0330	-
40	500	4.6	0.23	0.05	40	27.5	5	10.0	M4	M6	9	26	8	5	M4	0140	-	0340	-
50	750	5.4	0.40	0.10	50	30.5	5	10.0	M4	M6	8.5	34	10	6	M4	0150	0250	0350	0450
65	1400	9.0	0.75	0.20	65	35.5	6	12.0	M5	M8	8.5	40	12	8	M5	0165	0265	0365	0465
80	2200	14.2	1.25	0.40	80	38.5	7	15.0	M6	M8	10.5	50	14	10	M6	0180	0280	0380	0480
100	3500	20.0	2.20	0.75	100	43.5	8	18.0	M6	M10	12.5	75	20	12	M8	0110	0210	0310	0410

TECHNICAL SPECIFICATION	
Voltage	24 Vd.c. or 240 Va.c. (± 10%)
Duty cycle	100% ED
Ambient Temp.	0-65°C
Protection	IP51
Standard Finish	Bright Zinc
Insulation	Class B

- 24 Vd.c. or 230 Va.c. Operating Voltages.
- Axial Forces ranging from 140 to 3500N
- Special Voltages / Forces / Mountings available on request
- High Quality, Cost effective package

GENERAL INFORMATION

- 1) Force is measured with an armature in 220 M07 material with a finish of 0.38µm max. and minimum thickness 'T'.
- 2) All magnets can be supplied with mounting flanges to suit any particular mounting requirements.
- 3) Pole faces can be supplied electro-plated, however this will result in approx 10% reduction in Axial force.
- 4) All magnets can be supplied with flying leads, and the size 50 and above can be fitted with a 3-pole plug and free socket.

MAGNET NO. DESIGN NO. VOLTAGE SUPPLY

2-58 - 0350 - 24 - D.C.

Geofire reserve the right to change the specifications in this data sheet without prior notification

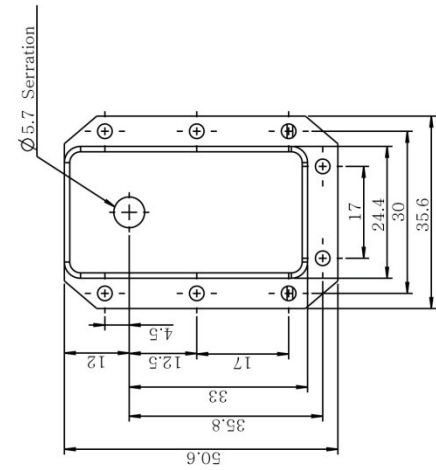
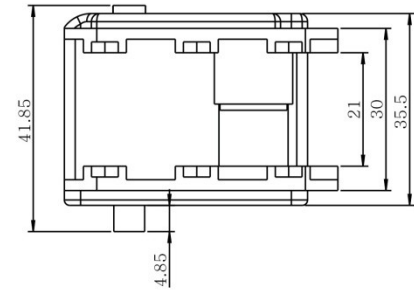
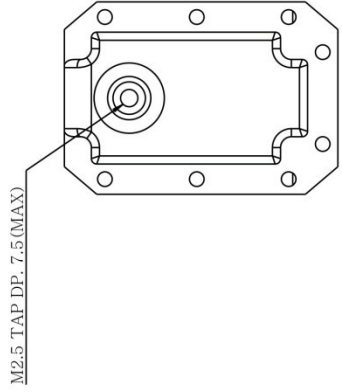
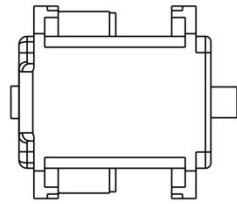
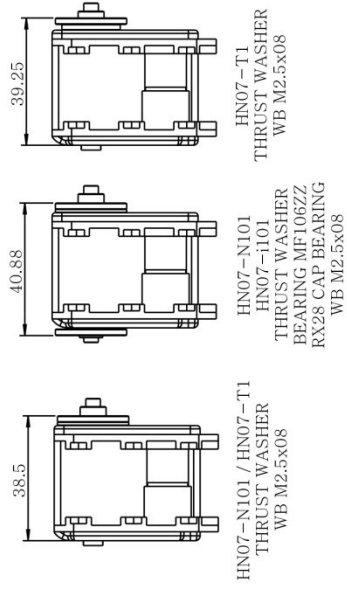
INNOVATORS OF FIRE SECURITY

A Stephenson Gobin Group Company. - Data Sheet No. 3-58-0901 - Issue 06/13

GEOFIRE
20 Longfield Road, South Church Enterprise Park,
Bishop Auckland, County Durham, UK, DL14 6XB
Tel: +44 (0)1388 770 360 Fax: +44 (0)1388 779 197
Email: enquiries@geofire.co.uk Web: www.geofire.co.uk



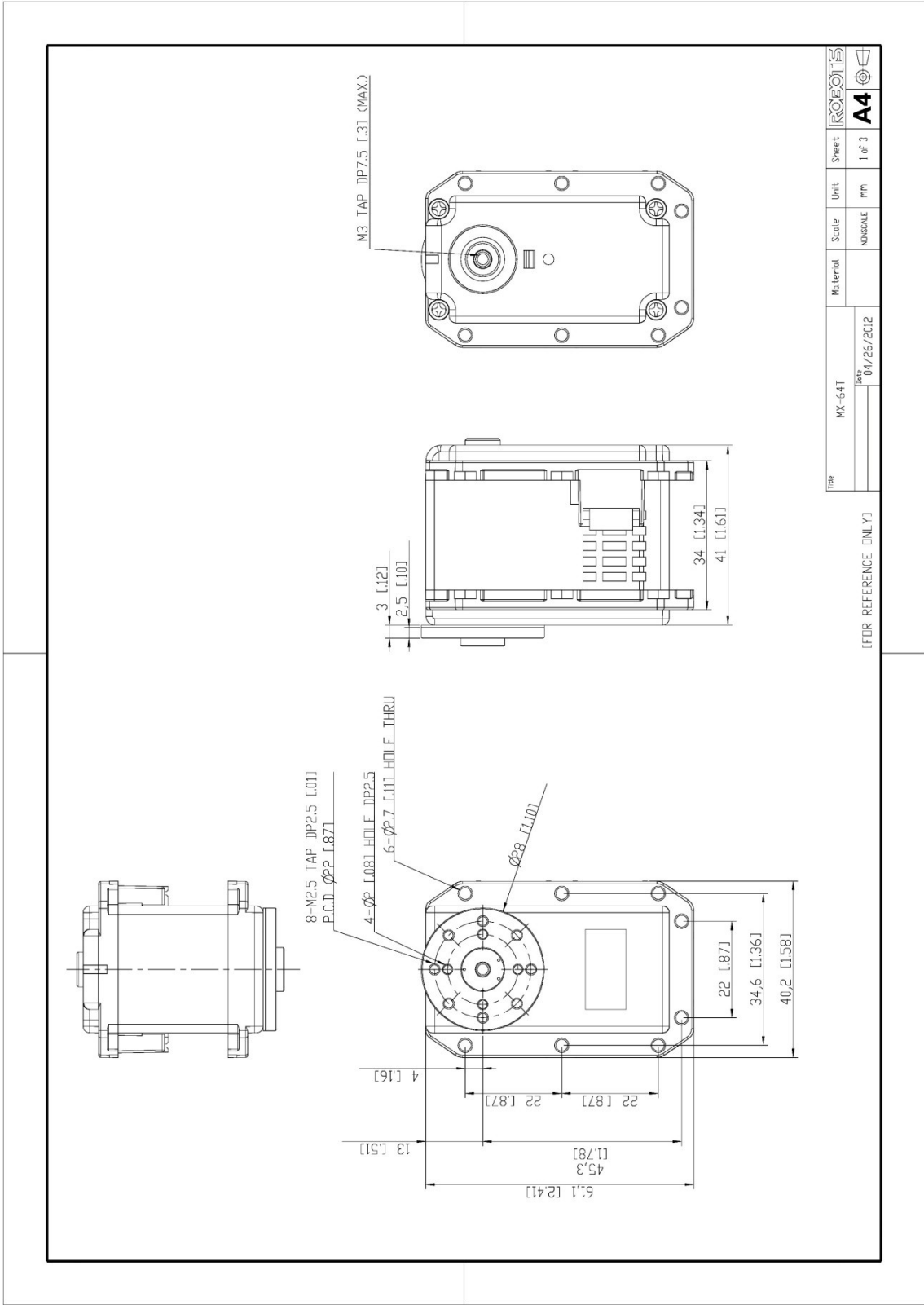
Dynamixel MX-28T



File	RX-10 / 24F / 28	Material	Scale	Unit	Sheet
Rev	1/07/2011	NONSCALE	mm	1 of 1	
					ROBOTS
					A4

IFOR REFERENCE ONLY

Dynamixel MX-64T



Zoznam obrázkov

Obr. 1 Robotické pracovisko	10
Obr. 2 Servopohony systému Dynamixel.....	11
Obr. 3 3D model servomotora Dynamixel AX- 12A	12
Obr. 4 3D model servomotora Dynamixel MX-64.....	12
Obr. 5 3D model robotického ramena – farebné odlišenie symbolizuje rozdelenie do jednotlivých funkčných celkov.....	13
Obr. 6 3D „drôtený“ model robotického ramena	15
Obr. 7 3D model robotického ramena verzie 3 – zobrazenie vo všetkých pohľadoch – 1.časť.....	15
Obr. 8 3D model robotického ramena verzie 3 – zobrazenie vo všetkých pohľadoch – 2.časť.....	16
Obr. 9 Grafické užívateľské prostredie robotického pracoviska.....	17
Obr. 10 5-kĺbový robotický manipulátor v nulovej polohe.....	19
Obr. 11 5-kĺbový robotický manipulátor v štandardnej polohe.....	19
Obr. 12 5-kĺbový robotický manipulátor v parkovacej polohe	20
Obr. 13 Nastavenie komunikácie a riadenia so servomotormi robotického ramena	21
Obr. 14 Nastavenie hodnôt natočenia jednotlivých kĺbov robotického ramena	23
Obr. 15 Nastavenie polohy a rotácie efektora robotického ramena.....	24
Obr. 16 Výsledná transformačná matica polohy efektora robotického ramena	25
Obr. 17 Tvorba trajektórií pohybu robotického ramena	26
Obr. 18 Ovládacie prvky trajektórie pohybu robotického ramena	27
Obr. 19 Ovládacie prvky vizualizácií trajektórie pohybu robotického ramena	27
Obr. 20 Vizualizácia trajektórií pohybu robotického ramena: zľava – vypnutá, v strede – šípky, napravo – čiara	28
Obr. 21 Menu 3D vizualizácie robotického ramena.	29
Obr. 22 Vizualizácia 3D modelu robotického ramena:	30
Obr. 23 Vizualizácia efektora robotického ramena: naľavo – efektor je vypnutý, napravo – efektor je zapnutý.	31

Obr. 24 Nastavenie zobrazovacieho okna GUI	31
Obr. 25 Vizualizácia 3D modelu robotického ramena: naľavo – nárys, napravo – bokorys	32
Obr. 26 Vizualizácia 3D modelu robotického ramena – pôdorys.....	32
Obr. 27 Snímanie parametrov robotického ramena.....	34
Obr. 28 Grafický priebeh požadovaného natočenia servomotorov robotického ramena	35
Obr. 29 Grafický priebeh požadovanej uhlovej rýchlosti servomotorov robotického ramena	35
Obr. 30 Grafický priebeh požadovaného uhlového zrýchlenia servomotorov robotického ramena	36
Obr. 31 Grafický priebeh požadovanej pozície servomotorov robotického ramena v priestore	36
Obr. 32 Grafický priebeh nameraného natočenia servomotorov robotického ramena	37
Obr. 33 Grafický priebeh nameranej uhlovej rýchlosti servomotorov robotického ramena	38
Obr. 34 Grafický priebeh nameraného zaťaženia servomotorov robotického ramena	38
Obr. 35 Porovnania priebehov požadovaného a nameraného natočenia servomotorov robotického ramena	39
Obr. 36 Grafický priebeh porovnania požadovanej a nameranej uhlovej rýchlosti servomotorov robotického ramena	39
Obr. 37 Parametre simulácie a behu programu	40
Obr. 38 Spustenie a zastavenie simulácie a výsledného programu	40
Obr. 39 Časti transformačnej matice (a) - definícia orientácie (b) - definícia pozície.....	42
Obr. 40 Východisková poloha robotického ramena	43
Obr. 41 Nastavenie robotického ramena do východiskovej polohy	44
Obr. 42 Nastavenie robotického ramena pre zdvih súčiastky	44
Obr. 43 Nastavenie robotického ramena pre zdvih súčiastky - detail	45

Obr. 44	Zodvihnutie kovového predmetu.....	45
Obr. 45	Robotické rameno vo východiskovej polohe s uchopenpou súčiastkou	46
Obr. 46	Výpočet inverznej kinematickej úlohy - detail.....	46
Obr. 47	Výpočet inverznej kinematickej úlohy.....	47
Obr. 48	Položenie súčiastky na požadovanú pozíciu	48
Obr. 49	5-kĺbový robotický manipulátor v nulovej polohe.....	51
Obr. 50	5-kĺbový robotický manipulátor v štandardnej polohe.....	52
Obr. 51	Vypočítaná výsledná poloha 5-kĺbového robotického ramena.....	54

Zoznam použitej literatúry

- [1] SafetyBUS Technology.: <http://www.safetybus.com/>
- [2] ROBOTIS, DYNAMIXEL, http://www.robotis.com/xe/dynamixel_en
- [3] SCHENK, M.: Workspace Monitoring and dynamic safe area planning, Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF, 2010.
- [4] CORKE, P.: Robotics, Vision and Control – Fundamental Algorithms in MATLAB, Springer, Springer Tracts in Advanced robotics, Volume 73, 2011
- [5] VACEK, M.: Modelovanie priemyselných robotov, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, 2011
- [6] VACEK, M.: Optický bezpečnostný systém robotického pracoviska, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, 2015
- [7] LEŠO, M.: Vizualizácia robotov, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, 2012
- [8] SIVÝ, R.: Ovládanie servopohonov robota Bioloid, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, 2012
- [9] LEŠO, M.: Modulárne GUI pre riadenie robotických ramien, Technická univerzita v Košiciach, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, 2014
- [10] VACEK, M.-ŽILKOVÁ, J.: Porovnanie programov pre modelovanie a simulácie robotických ramien v univerzitnom prostredí EE časopis. Roč. 18, č. 4 (2012), s. 32-33.
- [11] VACEK, M.-ŽILKOVÁ, J.: Modelovanie a riadenie experimentálneho robotického ramena. Časopis pre elektrotechniku a energetiku. Roč. 20, č. 2 (2014), s. 35-37.
- [12] VACEK, M.-ŽILKOVÁ, J.: Regulácia servopohonov experimentálneho robotického ramena. EE časopis. Roč. 20, č. 6 (2014), s. 42-43.
- [13] VACEK, M. - ŽILKOVÁ, J. - PÁSTOR, M.: Regulation of Dynamixel Actuators in Robot Manipulator Movement. Acta Electrotechnica et Informatica. Roč. 14, č. 3 (2014), pp. 32-35.
- [14] VACEK, M. - ŽILKOVÁ, J. - LACKO, M.: Vytvorenie 3D modelu robota a jeho ovládacieho prostredia pre MATLAB Electrical Engineering and Informatics 4 :

proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. - Košice: FEI TU, 2013 pp. 295-300.

- [15] VACEK, M. - ŽILKOVÁ, J. - LEŠO, M.: Regulácia servopohonov Dynamixel pri pohybe robotického manipulátora 5 Proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. - Košice: TU, 2014 pp. 747-751.
- [16] VACEK, M. - LEŠO, M.: Creation of a 3D Robot Manipulator Model for Use in MATLAB. 13th Scientific Conference of Young Researchers: May 14th, 2013, Herľany, Slovakia. - Košice: TU, 2013 pp.. 304-306.
- [17] VACEK, M. - LEŠO, M.: Use of the Robotics Toolbox in the creation of GUI in MATLAB. 13th Scientific Conference of Young Researchers: May 14th, 2013, Herľany, Slovakia. - Košice: TU, 2013 pp. 433-435.
- [18] VACEK, M.: Modeling and control of an experimental seriallink robot manipulator. SCYR 2014: 14th Scientific Conference of Young Researchers: proceedings from conference: May 20th, 2014, Herľany, Slovakia. - Košice: TU, 2014 pp. 82-83
- [19] VACEK, M.: Optical Safety System of a Robotic Manipulator Workspace .5th Scientific Conference of Young Researchers: proceedings from conference: May 19th, 2015, Herľany, Slovakia. - Košice: TU, 2015.
- [20] Robotics Toolbox E-manual, [online]. Dostupné internet: <http://www.petercorke.com/RTB/>.
- [21] Robotic Toolbox zásuvný modul do programu MATLAB, [online]. Dostupné internet: http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html

Citácie obrázkov

- [1] ROBOTIS CO.,LTD., USB2DYNAMIXEL User's Manuals, version 1.2, www.robotis.com
- [2] ROBOTIS CO.,LTD., Dynamixel AX, MX User's Manuals, www.robotis.com

NÁZOV: **Riadenie robotov s pohonmi Dynamixel
s využitím GUI**

AUTORI: Žilková Jaroslava, Lešo Martin, Vacek Marek

MIESTO VYDANIA: Košice

VYDAVATEĽ: Technická univerzita v Košiciach

ROK VYDANIA : 2015

VYDANIE: prvé

NÁKLAD: 50 ks

ROZSAH: 68 strán

ISBN: 978-80-553-2435-7