

# Kooperacija robot-robot s kolaborativnimi roboti

Dimitrije Prelević

Mentor: izr. prof. dr. Aleš Hace, univ. dipl. inž. el.

asist. Rok Pučko, mag. inž. elektroteh.

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Inštitut za robotiko

Laboratorij za industrijsko robotiko

Koroška cesta 46, 2000 Maribor

dimitrije.prelevic1@um.si

## *Robot-robot cooperation with collaborative robots*

In this project, two UR3 collaborative robots were used for cooperative load manipulation. The goal of the project was to robotize a “pick and place” operation of an object that cannot be handled by a single robot, either because of its weight or inappropriate dimensions. The “master-slave” configuration, in which one of the robots is defined as a leader or “master” and the other one follows its movements, is used. The leader is strictly position controlled and dictates the trajectory of the manipulated object via its movements. The follower is in the role of the “slave”, and adjusts its movements, so that it follows the leaders’ trajectory together with the object. The chosen control type is admittance control since the technique allows position adjustability of the follower robot. The control was implemented with the combination of admittance and velocity control loops which allows control of the follower’s velocity in Cartesian coordinates. The vector of reference velocity is generated based on the measurement of interactive force between the two robots.

## *Kratek pregled prispevka*

V okviru tega projekta smo z uporabo dveh UR3 kolaborativnih robotov izvedli kooperativno manipulacijo tovora. Cilj projekta je bil robotizirati »poberi in odloži« (ang. pick and place) operacijo objekta, ki ga sicer en sam robot ne zmore, zaradi prevelike mase, ali pa neustreznih dimenzij. Uporabljena je konfiguracija »gospodar-suženj« (ang. master-slave), pri kateri je en robot izbran, kot vodilni, drugi pa, kot sledilni. Vodilni robot je v vlogi gospodarja in diktira pot premikanja manipuliranega objekta, pri čemer je izbrana shema vodenja »togo po položaju«. Sledilni robot je v vlogi sužnja in svoje gibanje prilagaja tako, da skupaj z objektom sledita gibanju vodilnega robota. Pri tem je izbrana admitančna metoda vodenja, saj ta sledilnemu robotu omogoča položajno prilagodljivost. Vodenje je izvedeno s pomočjo kombinacije hitrostne in admitančne regulacijske zanke, ki omogoča hitrostno vodenje robota v kartezičnih koordinatah, pri čemer je vektor referenčne hitrosti tvoren na podlagi meritve interakcijske sile med robotoma.

## 1 Uvod

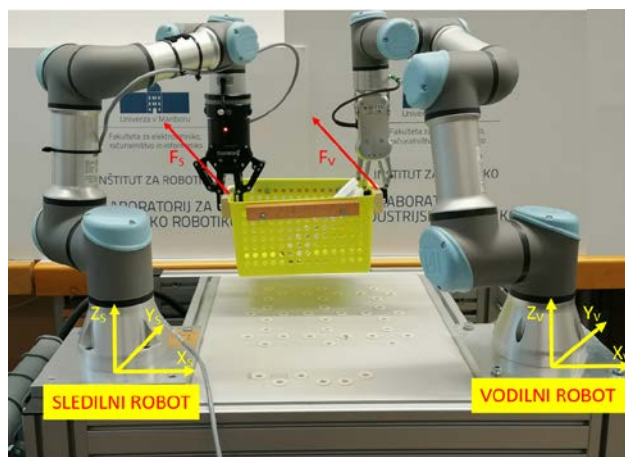
Robotizirani procesi v industriji občasno zahtevajo sodelovanje dveh robotskih manipulatorjev, pri čemer se lahko uporabljajo dvoročni roboti (ang. bimanual robots) ali pa kooperacija dveh ločenih robotov. Uporaba dveh manipulatorjev zvišuje nosilnost robotskega sistema [1], ter omogoča izvajanje kompleksnih nalog, kot so preprijem [2] ali manipulacija fleksibilnih objektov [1]. Dvoročna robotska aplikacija s sabo prinaša tudi nekatere izzive, kot so reševanje zaprte kinematične verige [3], [4], ter sinhronizacija gibanja manipulatorjev [5].

Pri izvedbi projekta je uporabljen sistem dveh ločenih robotskih manipulatorjev, pri čemer postane usklajevanje manipulatorja toliko bolj zahteven problem, saj si roboti ne delita krmilnika. Dvoročno robotsko kooperacijo smo raziskali na primeru manipulacije objekta, ki po dimenzijah in končnem največjem bremenu lahko presega zmogljivost ene same robotske roke z univerzalnim dvoprstnim prijemalom. V kolikor bi lahko manipulacijo izvedli s samo enim robotskim manipulatorjem, bi za to zadostovalo položajno vodenje robota. Pri dvoročni izvedbi manipulacije, pa je zaradi različnih nedoločenosti v sistemu potrebno vključiti še obravnavo interakcijskih sil. Tako je vodenje po sili ključna funkcija, potrebna za uspešno realizacijo naloge, saj dovoljuje kompenzacijo položajnega pogreška med dvema robotskima manipulatorjema. Tovrstna korekcija posledično zmanjšuje sile v sklepih robota in v manipuliranem objektu [6].

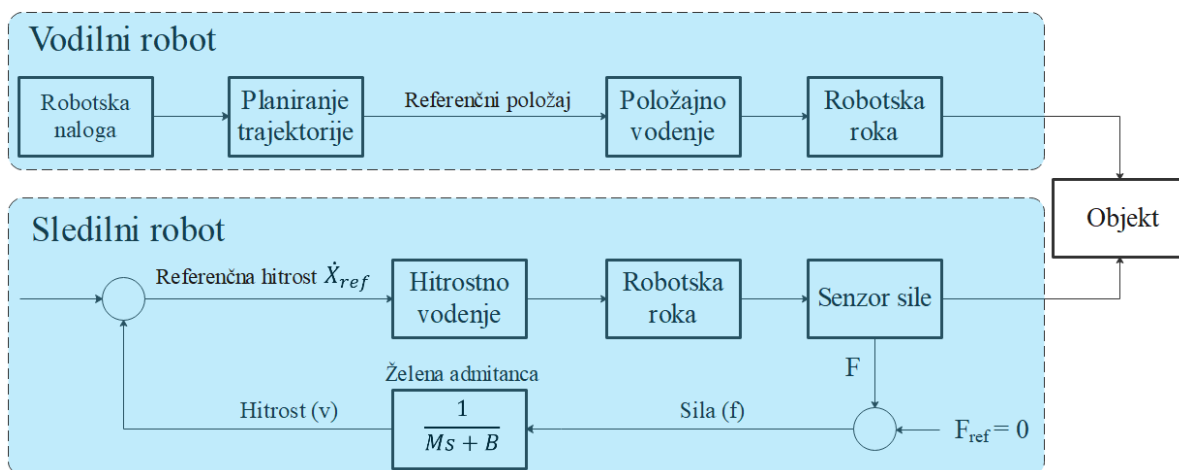
V nadaljevanju tega prispevka, v drugem poglavju utemeljujemo izbiro konfiguracije »gospodar-suženj« pri izvedbi vodenja dvoročne manipulacije, ter opišemo prednosti in slabosti takšnega načina kooperacije. V tretjem poglavju je predstavljena blokovna shema vodenja robotskega sistema. Prav tako je opisan princip admitančnega vodenja sledilnega robota. Postopek merjenja interakcijske sile ter izvedba in rezultati eksperimentov so prikazani v poglavju 4.

## 2 Konfiguracija dvoročnega robotskega sistema

Robota sta v konfiguraciji »gospodar-suženj«, kar pomeni, da je eden od njiju definiran, kot »vodilni robot« (»gospodar«), drugi pa, kot »sledilni robot« (»suženj«). V laboratoriju sta na voljo dve podobni »namizni« kolaborativni robotski roki podjetja »Universal Robots« z nazivno nosilnostjo 3kg, t.i. UR3 in UR3e. Za vodilnega robota je izbran starejši model UR3, za sledilnega pa novejši UR3e (glej sliko 1). Novejši model robotske roke je definiran kot sledilni, ker ima na svojem vrhu vgrajen 6-osni senzor sile, kar zagotavlja natančno informacijo o usmerjenosti in velikosti vektorja sile, ki deluje na vrh robota. Poleg tega, pa ima tudi novejši model krmilnik z bistveno višjo frekvenco osveževanja (500 Hz na UR3e v primerjavi s 125 Hz na UR3), kar omogoča hitrejšo obdelavo podatkov in izvedbo regulacijske zanke. Robotska krmilnika sta ločena, torej med njima ni pretoka električnih signalov in informacij. Edina povezava med robotoma je interakcijska sila med njima, ki deluje preko manipuliranega objekta, kar je tudi glavna slabost takšne povezave. Pomankanje signalne in programske povezave med robotoma zagotavlja visoko stopnjo neodvisnosti sledilnega robota ter izloča potrebo po spreminjanju njegovega programa v fazi učenja naloge, saj celotni postopek lahko poteka preko vodilnega robota.



Slika 1: Dvoročna robotska kooperacija



Slika 2: Shema vodenja dvoročnega kooperativnega robotskega sistema

### 3 Vodenje robotskega sistema

Slika 2 predstavlja shemo vodenja dvoročnega kooperativnega robotskega sistema.

**Vodilni robot:** Vodilna robotska roka je položajno vodena na podlagi pogojev zadanih v procesu definiranja robotske naloge. S svojim premikanjem vodilni robot ustvari silo na manipulirani objekt, ki ga robota držita z univerzalnimi prijemali. Nastalo interakcijsko silo izmeri senzor sile vgrajen, na vrhu sledilnega robota. Vektor izmerjene sile je uporabljen kot vhodna spremenljivka pri vodenju sledilnega robota.

**Sledilni robot:** Naloga sheme vodenja sledilnega robota je izničenje interakcijske sile (pri  $F_{ref} = 0$  N), ki nastane zaradi želenega premika manipuliranega objekta. To dosežemo s kombinacijo notranje hitrostne in zunanje admitančne regulacijske zanke. Z zunanjo regulacijsko zanko določimo želeno admitančno obnašanje sledilnega robota na podlagi vhodne informacije o sili, ki deluje na robota ( $f$ ), s podano admitanco pa potem izračunamo želen robotski odziv v obliki hitrosti ( $v$ ). To hitrost uporabimo pri izračunu vhodne referenčne vrednosti  $\dot{X}_{ref}$  notranje regulacijske zanke, ki skrbi za hitrostno vodenje robotske roke. S takšnim vodenjem dosežemo, da se sledilni robot premika glede na nanj delujočo silo in tako sledi gibanju vodilnega robota. Posledično sledilni robot dejansko tudi prilagaja svoj položaj vodilnemu robotu.

#### 3.1 Admitančna regulacijska zanka

Mehanska admitanca opisuje odnos med silo, ki deluje na telo in gibanjem telesa, ki je posledica delovanja te sile. Enačba (1) poda želeno admitanco prvega reda v skalarni obliki:

$$\frac{v}{f} = \frac{1}{Ms + B} \quad (1)$$

kjer je:

- $v \rightarrow$  hitrost (izhod)
- $f \rightarrow$  sila (vhod)
- $M \rightarrow$  masna vztrajnost
- $B \rightarrow$  koeficient linearnega dušenja

Sila, ki jo uporabimo v shemi vodenja, se v splošnem izračuna po enačbi 2:

$$f = F_{ref} - F \quad (2)$$

kjer je:

- $F_{ref} \rightarrow$  referenčna sila
- $F \rightarrow$  izmerjena sila vrha robota

Če upoštevamo  $F_{ref} = 0$  in vstavimo enačbo (2) v enačbo (1), potem z enačbo (3) izrazimo hitrost  $v$ :

$$v = \frac{-F}{Ms + B} \quad (3)$$

Če izberemo  $M = 0$ , potem se želeno admitanco reducira v obnašanje, kjer z zunanjo silo vplivamo na hitrost zgolj z izbranim koeficientom linearnega dušenja tako, da velja zakonitost, v angleščini imenovana »damping control« [9] opisana v enačbi 4:

$$B \cdot v = f \quad (4)$$

## 4 Eksperimentalna naloga

### 4.1 Programska izvedba sheme vodenja

Vodilnega robota smo med eksperimentiranjem vodili in programirali s pomočjo učne naprave (ang. teach pendant). Pri tem je vodenje med procesom učenja robotske naloge izvedeno s pomočjo ukazov za gibanje na učni napravi. Robotski program je prav tako napisan preko učne naprave, in sicer preko grafičnega vmesnika »PolyScope« in je sestavljen iz ukazov za linearno gibanje v zunanjih koordinatah (»move!«).

Shema vodenja sledilnega robota je programsko realizirana v programskem jeziku URScript. Pri tem je hitrostna zanka izvedena s pomočjo funkcije »speedl« [7], ki omogoča vodenje hitrosti robota v zunanjih koordinatah baznega koordinatnega sistema (v nadaljevanju {B}). V program sledilnega robota je bilo potrebno implementirati še nizkopasovni filter meritve senzorja sile. Izmerjena sila vrha sledilnega robota je edina veličina, na podlagi katere se izvaja njegovo vodenje, zato je kakovost meritve sile ključnega pomena za uspešno izvedbo kooperacije. Izkazalo se je namreč, da je nefiltrirani signal iz senzorja sile za potrebe vodenja neuporaben, saj je v signalu prisotno preveč šuma.

### 4.2 Opis eksperimentalne naloge

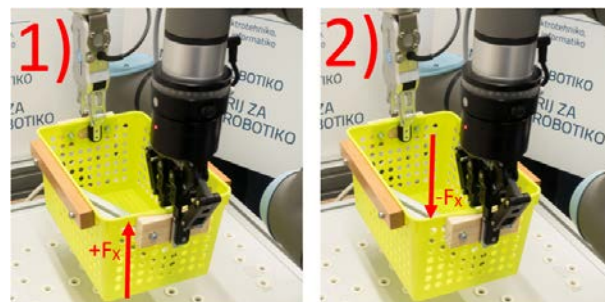
Pri izvedbi eksperimentalne naloge je kot manipulirani objekt uporabljena plastična košara, katere stranice so ojačane s togimi lesenimi deskami, ki olajšajo prijem in dvig košare z robotskim prijematlom. V košari se je tekom eksperimentiranja nahajal kos inženirskega aluminijskega profila mase 250 g, ki med prenašanjem košare ni bil pritrjen, s čimer smo ponazarjali objekt s spreminjajočim se masnim središčem.

Kolaborativna robota UR3 in UR3e sta na platformi postavljena tako, da sta njuna bazna koordinatna sistema koplanarna in isto orientirana, da se jima X osi prekrivata, kakor kaže Slika 1. Pri izvedbi dvoročne manipulacije

smo blokirali orientacijo objekta v začetni legi. S tem smo gibanje sledilnega robota, in s tem tudi celega dvoročnega robotskega sistema, omejili le na linearne gibe vzdolž kartezičnih osi.

Eksperiment je potekal v treh fazah:

Prva faza - Preizkus admitančnega vodenja sledilnega robota: Shema vodenja sledilnega robota poskuša ves čas ohraniti ravnovesje med robotskima manipulatorjema tako, da interakcijsko silo med njima izničuje. Zato je pred začetkom izvajanja kooperativne naloge potrebno to ravnovesno stanje določiti. To storimo s kalibracijo senzorja sile s programskim ukazom »zero\_ftsensor()« [8], ki izmerjeno vrednost interakcijske sile v trenutku klicanja ukaza postavi na 0 in s tem definira trenutno medsebojno lego manipulatorja kot ravnovesno lego. V prvi fazi eksperimenta torej testiramo sposobnost sledilnega robota, da ohranja nično vrednost interakcijske sile, in s tem tudi ravnovesno lego. Robota držita plastično košaro s tovorom in se nahajata v ravnovesni legi. Vodilni robot med eksperimentom drži košaro v fiksni legi. Sledilni robot premaknemo iz ravnovesne lege tako, da na košaro delujemo z zunanjo silo, najprej navzgor, po tem pa navzdol (v smeri Z - osi {B}, kot kaže slika 3).



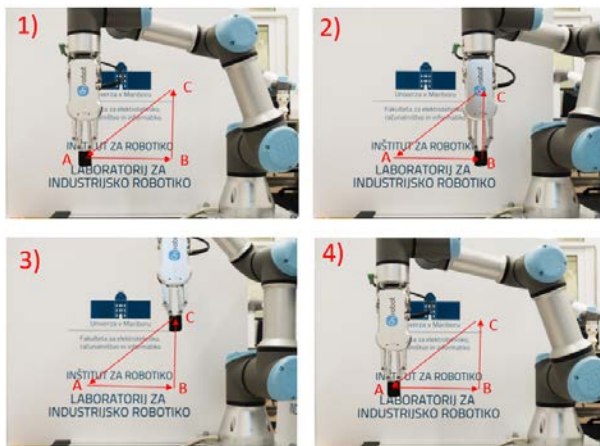
Slika 3: Sili s katerima poskušamo premakniti sledilnega robota iz ravnovesne lege

Druga faza - Učenje robotske naloge: Delovanje dvoročne kooperativne manipulacije smo demonstrirali na primeru linearnega gibanja dvoročnega robotskega sistema skupaj z objektom po trikotni trajektoriji v YZ ravnini {B}, kakor kaže slika 4. Načrtovani premiki so kot sledi – Robot prične gibanje v točki A, se premakne v točko B, potem pa v točko C, na kar

se ponovno postavi v točko A. Pozicije točk v milimetrih so:

- A = (-180, 350, 150) (mm)
- B = (-180, 180, 150) (mm)
- C = (-180, 350, 270) (mm)

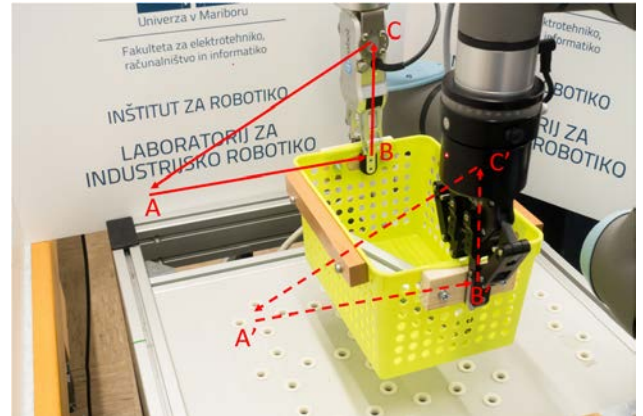
Učenje dvoročnega robotskega sistema poteka preko vodilnega robota, torej preko ukazov za gibanje na učni napravi. Vodilnega robota z linearnimi gibi vzdolž kartezičnih osi pripeljemo v želeni položaj in ta položaj shranimo kot referenčno točko (ang. »waypoint«). Privzeta hitrost gibanja vodilnega robota med vodenjem preko učne naprave je 100 mm/s. Med premikanjem vodilnega robota preko učne naprave mu sledilni robot ves čas sledi, saj sta povezana z manipuliranim objektom – košaro.



Slika 4: Prikaz trikotne trajektorije vodilnega robota v YZ ravnini

Tretja faza - Samostojna izvedba robotske naloge: V zadnji fazi eksperimentiranja vodilni robot naučeno trajektorijo samostojno ponovi, pri čemer mu sledilni robot sledi. Med samostojnim izvajanjem naloge je linearna hitrost gibanja vodilnega robota nastavljena na 200 mm/s, linearni pospešek pa na 1,2 mm/s<sup>2</sup>.

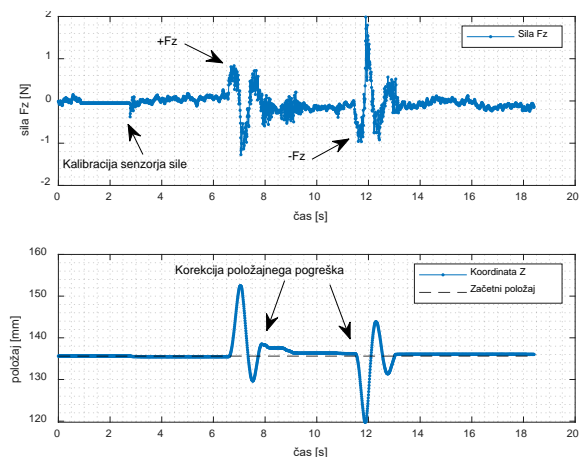
Slika 5 kaže trajektoriji vodilnega in sledilnega robota v skupnem delovnem prostoru. Vodilni robot smo naučili točke A, B in C, in je znano, da jih bo ta robot dosegel s ponovljivostjo, ki jo je podal proizvajalec. Točke A', B' in C' pa so le približki predvidenih položajev sledilnega robota med samostojnim izvajanjem dvoročne naloge. Enako velja za trikotno trajektorijo, ki jo točke A', B' in C' definirajo.



Slika 5: Trajektoriji vodilnega in sledilnega robota med samostojno izvedbo kooperativne naloge

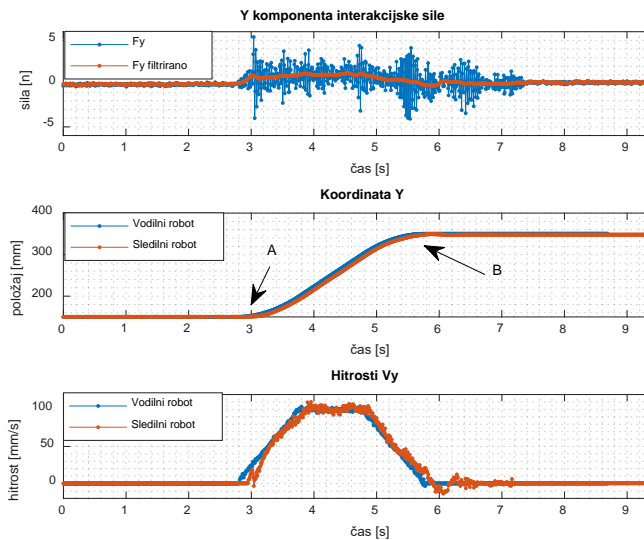
### 4.3 Rezultati

Slika 6 prikazuje poteko sile  $F_z$  (komponenta vektorja interakcijske sile v smeri Z - osi {B}) in vrednosti Z koordinate sledilnega robota med preizkusom delovanja admitančnega vodenja. Razviden je tudi trenutek kalibracije senzorja sile. Opazimo lahko povrnitev sledilnega robota v izhodiščno ravnovesno lego.



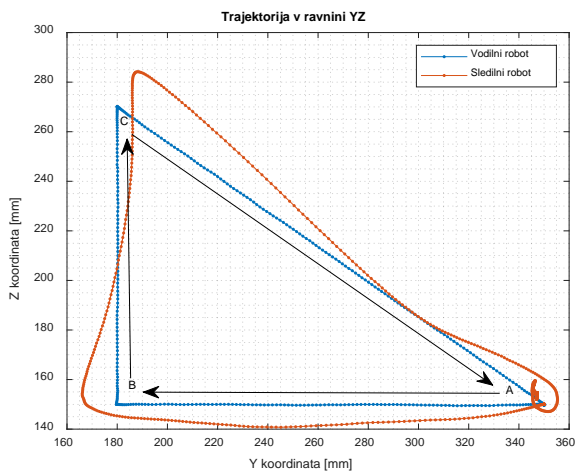
Slika 6: Izmerjena sila  $F_z$  (zgoraj) in Z - koordinata vrha sledilnega robota (spodaj)

Slika 7 prikazuje potek sile  $F_y$  (komponenta vektorja interakcijske sile v smeri Y - osi {B}), ter spremembo vrednosti Y - koordinate obeh robotov, med učenjem vodilnega robota. Na sliki je razviden tudi potek hitrosti obeh robotov. Meritev je izvedena pri premiku vodilnega robota za 200 mm v pozitivni smeri Y - osi.



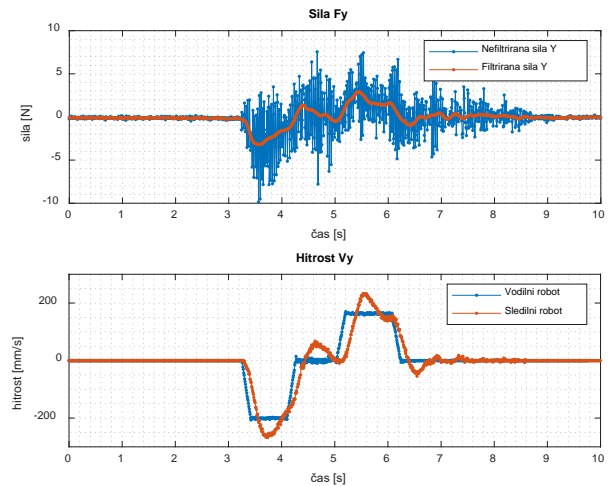
Slika 7: Potek sile  $F_y$  (zgoraj), sprememba  $Y$  koordinate obeh robotov (sredina) ter potek hitrosti  $V_y$  obeh robotov

Slika 8 prikazuje trajektoriji vodilnega in sledilnega robota med samostojnim izvajanjem dvoročne kooperativne naloge.



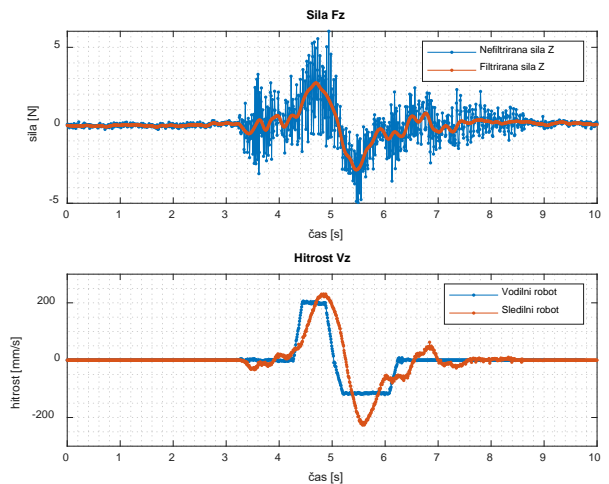
Slika 8: Trajektoriji vodilnega in sledilnega robota med samostojnim izvajanjem dvoročne kooperativne naloge

Slika 9 prikaže poteke sile  $F_y$  in hitrosti  $V_y$  obeh robotov.



Slika 9: Potek sile  $F_y$  (zgoraj) in hitrosti  $V_y$  (spodaj)

Slika 10 prikaže poteke sile  $F_z$  in hitrosti  $V_z$  obeh robotov.



Slika 10: Potek sile  $F_z$  (zgoraj) in hitrosti  $V_z$  (spodaj)

## 5 Zaključek

V tem članku smo se posvetili problemu robotske manipulacije s kooperativnim dvoročnim robotskim sistemom, ki smo ga sestavili iz dveh kolaborativnih robotskih rok. Ti dve robotski roki sta med sabo povezani fizično s skupnim manipulirancem, signalne povezave pa nismo predvideli. Za namen kooperativne dvoročne robotske manipulacije smo zasnovali shemo vodenja s konfiguracijo vodilnega in sledilnega robota. Vodilni robot je voden po položaju, medtem, ko smo na sledilnem robotu implementirali preprosto admitančno vodenje s pomočjo integriranega senzorja sile na vrhu

robota. Predlagano shemo vodenja smo tudi eksperimentalno preizkusili.

S kombinacijo hitrostnega vodenja in nastavljanja želena admitance sledilnega robota dosežemo uspešno korekcijo položajnega pogreška med vodilnim in sledilnim robotom v konfiguraciji »gospodar-suženj«, kakor smo dokazali s prvim eksperimentom. Pri testiranju zasnovanega vodenja med gibanjem robota pa opazamo zakasnitve sledilnega robota, kakor med položajnim sledenjem, tako tudi pri sledenju hitrosti gibanja vodilnega robota. Največja odstopanja se pojavijo pri nagli spremembi sile vrha sledilnega robota (pri začetku in koncu giba), kajti shema vodenja ne upošteva masne vztrajnosti oz. inercije, ki pa je v največji meri prisotna pri hitri spremembi želene hitrosti. To se še bolj pozna pri samostojnem gibanju vodilnega robota po trikotni trajektoriji, kajti smer interakcijske sile večkrat tekom izvedbe naloge spremeni svojo smer.

V naših eksperimentih smo opazili, da visoka admitanca, ki dovoljuje fleksibilno sledenje vodilnega robota, sledilnemu robotu odvzame lastno togost pri vzdrževanju položaja. To pomeni, da bo tudi pri ponavljanju sledenja iste trajektorije vodilnega robota sledilni robot v vsaki iteraciji imel različno tirnico, ki jo je nemogoče v naprej določiti

Admitančno vodenje se je tako izkazalo kot zadovoljiva rešitev za izvedbo dvoročne kooperativne manipulacije, še bolj v primeru, ko ni zahtevana visoka položajna ponovljivost. Vendar pa se pri samostojni izvedbi kooperativne naloge pokaže tudi relativno nizka dinamika realiziranega gibanja zaradi reaktivnega principa delovanja sledilnega robota.

V prihodnem raziskovalnem delu se bomo posvetili izboljšanju dinamike dvoročne robotske kooperacije in zmanjšanju položajne negotovosti. V ta namen bomo obravnavali tudi možnost vključitve impedančnega vodenja [10].

## 6 Literatura

[1] H. Kikuchi, T. Niinomi, M. Sato and Y. Matsumoto, »Heavy Parts Assembly by Coordinative Control of Robot and Balancing Manipulator«, in Proc.

IFAC 9th World Congress, Budapest, vol. VI, pp. 175-180, July 1984

[2] R. Zapata, P. Dauchez and P. Coiffet, »Cooperation of Robots in Gripping Tasks: the Exchange Problem«, *Robotica*, vol. 1, no. 2, pp. 73-77, 1983.

[3] Y. F. Zheng and J. Y. Luh, »Joint Torques for Control of Two Coordinated Moving Robots«, in Proc. 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, pp. 1375-1380, April 1986

[4] T. J. Tarn, A. K. Bejczy and X. Jun, »Design of Dynamic Control of Two Cooperating Robot Arms: Closed Chain Formulation«, in Proc. 1987 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Raleigh, pp. 7-13, March 1987

[5] P. Dauchez and R. Zapata, »Co-ordinated Control of Two Cooperative Manipulators: the Use of a Kinematic Model«, in Proc. 15th Int. Symp. Industrial Robots, Tokyo, pp. 640-648

[6] M. Uchiyama and P. Dauchez, »A Symetric Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of Two robots«, Tohoku University, Aoba, IEEE, 1988

[7] URScript programing manual, Version 5.9, page 41, Universal Robots, available at: <https://www.universal-robots.com/download/manuals-e-series/script/script-manual-e-series-sw-59/>

[8] URScript programing manual, Version 5.9, page 119, Universal Robots, available at: <https://www.universal-robots.com/download/manuals-e-series/script/script-manual-e-series-sw-59/>

[9] D. E. Whitney »Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control«, The Charles Start Draper Laboratory, Inc. Cambridge, MA, 02139, IEEE, 1985

[10] C. Ott, R. Mukherjee, Y. Nakamura »Unified Impedance and Admittance Control«, 2010 IEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, AK, USA, 2010