

Robotski krmilnik za hidravlično teleskopsko dvigalo

Justin ČINKEJ, Roman KAMNIK, Peter ČEPON, Matjaž MIHELJ, Marko MUNIH

Izveček: Avtomatizacija v gradbeništvu lahko skrajša čas izvedbe in izboljša delovne pogoje. V prispevku predstavljamo razvoj robotskega vodenja za hidravlično teleskopsko dvigalo, ki je namenjeno za avtomatizacijo montaže fasadnih elementov. Projekt je izveden na pobudo in s financiranjem podjetja Trimo iz Trebnjega. V delu so predstavljene lastnosti teleskopskega dvigala, identifikacija parametrov in razvoj zaprtozračnega vodenja. Eksperimentalni preizkusi na stroju kažejo zadovoljive lastnosti za uporabo v praktični aplikaciji.

Ključne besede: hidravlični sistem, teleskopski manipulator, robotsko vodenje

■ 1 Uvod

V gradbeništvu gradbeni delavci opravljajo težaška opravila v vseh vremenskih razmerah. Trendi uvajanja avtomatizacije v gradbeništvu, ki bi izboljšali delovne pogoje in kvaliteto, zaostajajo za trendi uvajanja robotskih sistemov v klasičnih industrijskih okoljih [1]. Če so v industriji roboti že postali standardni del proizvodne tehnologije, predvsem za manipulacijo in varjenje obdelovancev, je v gradbeništvu mogoče srečati le posamezne primere prototipnih naprav za avtomatizacijo nekaterih delovnih operacij [2, 3, 4]. Vzrok za težave pri razvoju avtomatizacije v gradbeništvu je moč iskati v izraziti nestrukturiranosti delovnega okolja, spremenljivosti posameznih projektov, velikosti delovnega prostora in velikih obremenitvah. Delo pred-

stavlja razvoj robotskega sistema za avtomatizacijo montaže fasadnih panelov v gradbeništvu [5]. Projekt avtomatizacije montaže fasadnih panelov je zasnovalo in financiralo podjetje Trimo iz Trebnjega. V projektni skupini so sodelovali raziskovalci podjetja Trimo, Fakultete za elektrotehniko v Ljubljani, Tehniške univerze v Gradcu in podjetja Motoman, Ribnica.

Operacija montaže fasadnega panela je sestavljena iz manipulacije oz. prenosa panela do fasade, finega pozicioniranja in vstavitve v režo ter privijačenja. Za namene prijema panela, finega pozicioniranja, vstavitve v režo in privijačenja je bil razvit robotski mikromanipulator, ki je nameščen na vrhu teleskopskega dvigala. Za manipulacijo montažnega panela skupaj z mikromanipulatorjem od odjemnega mesta do mesta montaže na fasado služi hidravlično teleskopsko dvigalo. Skupna obremenitev dvigala s težo panela in mikromanipulatorja znaša 2000 kg. Zahteve za natančnost pozicioniranja bremena znašajo 0,1 m znotraj krogelnega delovnega prostora polmera 10 m. V prispevku je predstavljen zaprtozračni robotski sistem vodenja za komercialno dosegljivo

teleskopsko dvigalo, ki ustreza zastavljenim zahtevam in omogoča uporabo v različnih načinih delovanja. Drugo poglavje predstavlja mehansko konfiguracijo in zasnovano programske opreme za zaprtozračno vodenje. Tretje poglavje predstavlja metodologijo praktične evalvacije kvalitete vodenja v zunanjih koordinatah, četrto pa izmerjene rezultate.

■ 2 Opis sistema

2.1 Zasnova strojne opreme

Za osnovo sistema za manipulacijo mikromanipulatorja in panelov smo izbrali komercialno dosegljivo avtodvigalo s teleskopsko roko Merlo Roto 45.21 MCSS. Zaradi potrebe po hkratnem gibanju več osi je bila pri proizvajalcu vgrajena večja hidravlična črpalka s pretokom 145 l/min pri najvišjih obratih dizelskega motorja 2300 obr/min ter hidravlični ventili z deljenim pretokom, ki omogočajo hkratno gibanje več osi tudi ob preseženi pretočni zmogljivosti črpalke.

Za doseganje poljubne pozicije in orientacije vrha mora mehanizem vsebovati šest prostostnih stopenj gibanja. Osnovna konfiguracija dvi-

Dr. Justin Činkelj, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Roman Kamnik, univ. dipl. inž., mag. Peter Čepon, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Matjaž Mihelj, univ. dipl. inž., prof. dr. Marko Munih, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko



Slika 1. Hidravlično teleskopsko dvigalo Merlo ROTO MCSS 45.21 za manipulacijo bremena z maso 2000 kg

gala jih vsebuje le štiri, zato sta bili na dvigalo dodatno vgrajeni še dve orientacijski prostostni stopnji, gnani s hidravličnimi aktuatorji. Na *sliki 1* je prikazano hidravlično teleskopsko dvigalo z nadgrajeno konfiguracijo 6 prostostnih stopenj (DOF).

Za izvedbo zaprtzančnega vodenja smo v posamezne osi dvigala vgradili senzorje pozicije in razvili strojno in programsko opremo za vodenje. Na dvigalo je bilo vgrajenih 5 rotacijskih resolverjev in 1 žični merilnik razdalje.

Na *sliki 2* so prikazani ključni elementi osnovnega dvigala (zelena barva) ter dodatno vgrajene komponente (rumena barva). Pri osnovnem dvigalu krmilnik dvigala preslika signal ene osi krmilne palice v krmilno napetost ustrezne hidravlične osi, kar omogoča zgolj ročno vodenje v sklepem koordinatnem sistemu. Varnostna enota lahko ustavi gibanje z izklopom glavnega ventila. Za izvedbo zaprtzančnega vodenja sta poleg dveh dodatnih prostostnih stopenj in senzorjev pozicije ključna RT-krmilnik (ang. real-time) in WDT-modul (ang. watchdog timer). RT-krmilnik zajema signale senzorjev pozicije in zaprtzančno izračunava krmilno napetost ventilov. Programska oprema omogoča gibanje v kartezičnem koordinatnem sistemu ter gibanje med vnaprej posnetimi ali sproti izračunanimi točkami. WDT-modul nadzoruje časovno pravilnost delovanja RT-krmilnika (tj. ali RT-krmilnik deluje v realnem

času, znotraj podanih časovnih omejitev). Če se ta ne odziva v določenem časovnem oknu, WDT-modul izklopi električno napajanje hidravličnih ventilov. Zadnji dve komponenti sta še GUI (ang. graphical user interface) PC in zaslon na dotik. GUI PC izvaja poleg uporabniškega vmesnika še izračun ciljnih točk za dvigalo, ki jih nato pošlje RT-krmilniku. GUI PC in RT-krmilnik sta grajena na osnovi procesorskih modulov PC/104. RT-krmilnik vsebuje tri dodatne module – za analogne vhode, analogne izhode in CAN-vodilo (ang. Controller area network).

2.2 Zasnova strojne opreme

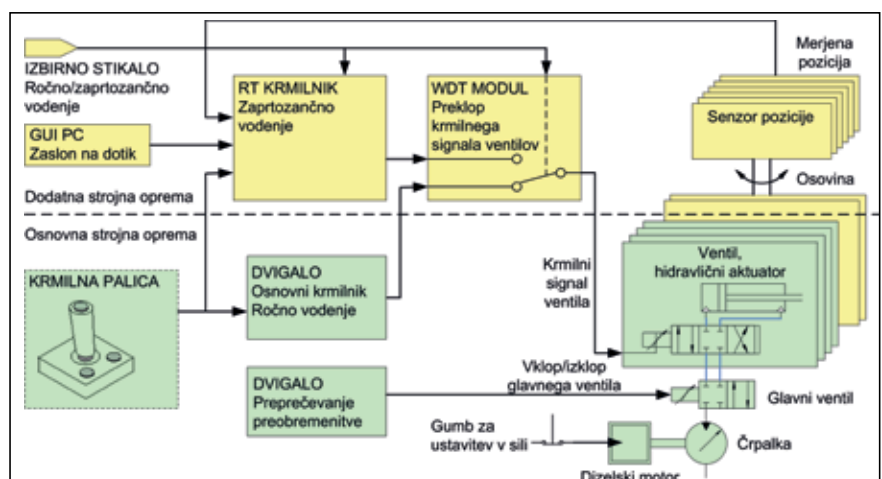
Za zaprtzančno vodenje gibanja smo na najnižjem nivoju za vsako os realizirali svoj regulator, ki deluje neodvisno od ostalih osi. Struktura regulatorja je prikazana na *sliki 3*. Vhoda sta referenčna hitrost in pozicija. Za rotacijske osi (prva in šesta os) sta to kar hitrost in pozicija same osi. Enako velja za tretjo (izteg teleskopa) in peto os. Pri drugi in četrti osi pa smo izvajali regulacijo na nivoju gibanja cilindra in upoštevali

nelinearno povezavo med zasledkom sklepa in pomikom cilindra. Pri vodenju četrtega sklepa (nagib vilic) smo upoštevali še hidravlično povezavo z drugim sklepom (nagib teleskopa), ki ohranja konstanten naklon. Oba sklepa skupaj s kompenzacijskim cilindrom namreč predstavljata hidravlični paralelogram.

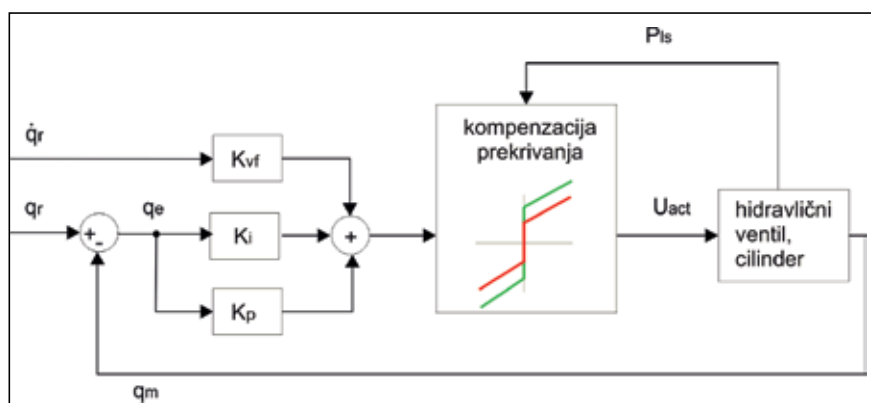
Strukturo regulatorja predstavlja regulator PI s hitrostno naprej zaključeno zanko in kompenzacijo pozitivnega prekrivanja bata ventila. Hitrostna naprej zaključena zanka je namenjena skrajšanju odzivnega časa ventila in s tem tudi sistema, kompenzacija pozitivnega prekrivanja bata ventila odpravlja mrtvi hod kot največjo nelinearnost sistema, integrirni člen pa odpravi napako v ustaljenem stanju.

Na *sliki 3* je hitrostna naprej zaključena zanka predstavljena s konstantnim ojačanjem, čeprav je v resnici realizirana z vpogledno tabelo (vhod - hitrost, izhod - krmilna napetost). Na ta način smo upoštevali nelinearnost statične karakteristike ventila. Ojačanja K_p in K_i sta konstantni, zaradi asimetričnosti hidravličnih cilindrov pa uporabljamo dve različni vrednosti, ki sta odvisni od smeri gibanja (predznaka hitrosti) posameznega sklepa.

Hidravlični sistem je napajan s črpalko, ki deluje po principu zaznavanja bremena. Princip delovanja vnaša zakasnitve v odzivu, kar niža frekvenčno širino zaprtzančnega



Slika 2. Komponente sistema za zaprtzančno vodenje hidravličnega teleskopskega dvigala



Slika 3. Regulacijska shema za zaprtozančno vodenje posameznega sklepa dvigala

vodenja, hkrati pa to vpliva na delovanje ventila. Zato smo izvedli kompensacijo prekrivanja ventila glede na tlak zaznavanja bremena. Pri nižjem tlaku uporabimo višjo krmilno napetost (rdeča krivulja) kot pri višjem tlaku (zelena krivulja).

Za zaprtozančno vodenje dvigala v zunanjih koordinatah (tj. v svetovnem, kartezičnem koordinatnem sistemu – WCS) smo razvili direktni kinematični model, tj. preslikavo iz notranjih koordinat – pozicij sklepov (JCS), v zunanje koordinate ter inverzni kinematični model, tj. preslikavo iz zunanjih koordinat v notranje. Direktno kinematiko smo opisali po Denavit-Hartenbergovi metodi. Inverzna kinematika serijskih mehanizmov s 6 DOF je analitično rešljiva samo za tipe mehanizmov, pri katerih se tri zaporedne osi rotacije sekajo v isti točki ali so paralelne. To za obravnavni mehanizem ne velja, zato smo uporabili iterativni numerični algoritem. Pozicijsko napako v zunanjih koordinatah $v(t_k)$ pretvorimo v notranje koordinate preko množenja z inverzno analitično Jakobijevo matriko $J^{-1}q(t_k)$. Dobljeno hitrost $\Delta q'(t_k)$ uporabimo za izračun popravka pozicije sklepov $\Delta q(t_k)$. Z $\Delta q(t_k)$ korigiramo trenutno vrednost pozicije sklepov $q(t_k)$, da dobimo novo vrednost $q(t_{k+1})$ za naslednjo iteracijo. Numerična vrednost matrike J je izračunana iz geometrijske Jakobijeve matrike J_g . Uporabljeni postopek zahteva kot vhodne podatke Denavit-Hartenbergove parametre in trenutne pozicije sklepov.

Planiranje trajektorije gibanja je bilo izvedeno na nivoju programske opreme. Vsak korak za premik panela pomeni eno ciljno točko za dvigalo. Vmesne lege med začetno in končno točko izračunava RT-krmilnik z uporabo trapeznega hitrostnega profila. Vnaprej definirane omejitve hitrosti in pospeška so uporabljene pri izračunu hitrostnega profila. Izračunane vrednosti dinamično omejujemo glede na kapacitete hidravlične črpalke, pri gibanju v bližini končne lege sklepov in pri preprečevanju trčenja med mikro-manipulatorjem in segmenti dvigala.

■ 3 Praktična evalvacija robotsko vodenega dvigala

Izvedli smo praktično evalvacijo kvalitete zaprtozančnega vodenja v zunanjih koordinatah. Gibanje vrha dvigala smo izmerili z neodvisnim merilnim sistemom za merjenje kinematike gibanja. Uporabili smo brezkontaktni optični merilni sistem Optotrak Certus. Sistem uporablja pozicijske senzorje (kamere), ki merijo pozicijo aktivnih infrardečih markerjev. Dosegljiva je natančnost prostorskega merjenja

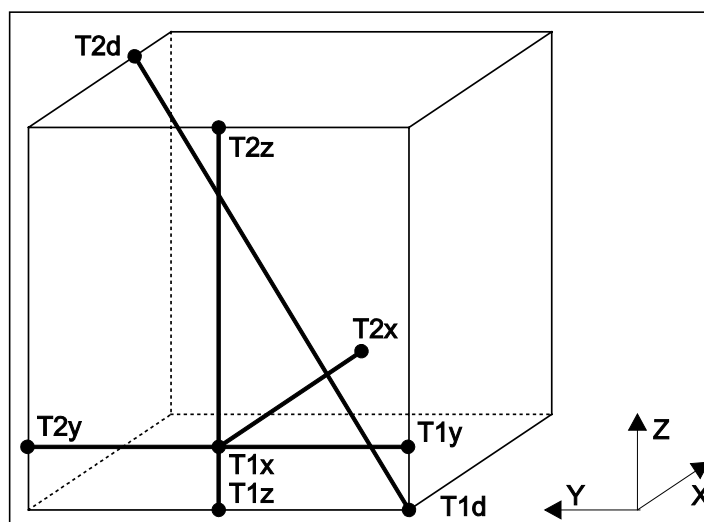
pozicije do 0,1 mm. Na vrh dvigala smo pritrdili dve skupini štirih markerjev, ki vsaka določa lego enega koordinatnega sistema.

Definirali smo tri skupine testnih gibov. Prva skupina sledi standardu za testiranje industrijskih robotov ISO 9283 (ang. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods), ki predpisuje gibe med točkami t. i. ISO-kocke. ISO-kocka je predstavljena na sliki 4. Da bi testirali čim daljše gibe, smo testne točke ustrezno premaknili, s čimer je kocka postala kvader. Testni gibi so na sliki poudarjeni z debelo črto. Vključeni so diagonalni gib (točki T_{1d} in T_{2d}) ter gibi vzdolž osi zunanjega koordinatnega sistema (pari točk T_x , T_y in T_z).

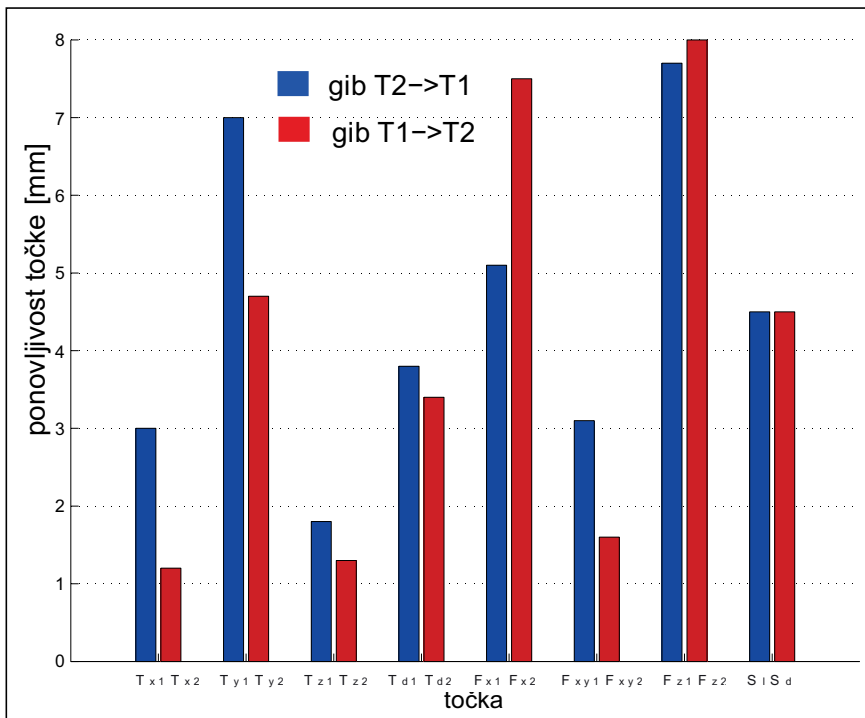
■ 4 Rezultati

Najpodrobneje smo analizirali hkratno večosno gibanje vrha dvigala v zunanjih koordinatah. Zanimali so nas parametri ponovljivosti končnih točk, napaka sledenja trajektorije in ponovljivost sledenja trajektorije pri izbranih testnih gibih. Ponovljivost končnih točk vseh gibov je prikazana na sliki 5.

Vsak gib vsebuje dve točki, zato je rezultat podan z dvema številčkama za vsak par točk. Gibu vzdolž stranic diagonale ISO-kocke ustrezajo točke T_x , T_y , T_z in T_d , gibom za posnemanje nameščanja panela na fasado točke F_x , F_y in F_z , gibu s hitro zaustavitvijo pa točki SI in Sd .



Slika 4. Testni gibi glede na ISO-kocko



Slika 5. Ponovljivost doseganja točk

Najslabša izmerjena ponovljivost znaša 8 mm. Med gibi vzdolž stranic ISO-kocke je najslabši rezultat pri gibu med točkama T_y . Pri tem gibu večino pomika opravi prva os, medtem ko je pri pomikih vzdolž X- in Z-osi prva os skoraj mirovala. Tako lahko pojasnimo slabšo ponovljivost tega giba z zračnostjo v pogonu prve osi. Ponovljivost pri gibu s hitro ustavitvijo v nasprotju s pričakovanji ni bila slabša kot pri ostalih testih.

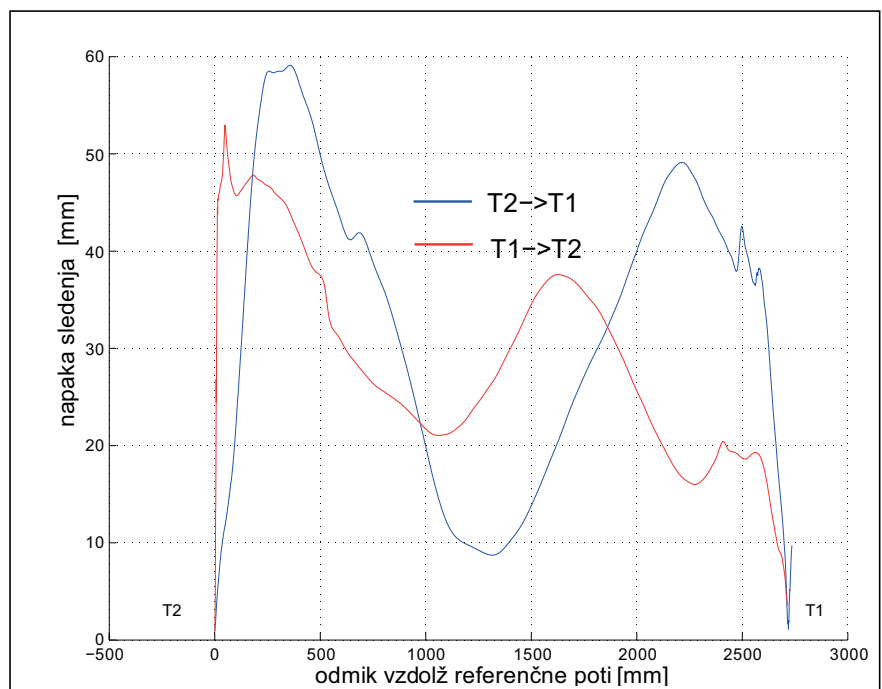
Na *sliki 6* je prikazana napaka sledenja trajektorije vzdolž celotne poti diagonalnega giba. Vidimo, da po začetku giba vrh dvigala zavije v stran, nato se približuje in oddaljuje od referenčne poti in na koncu doseže končno točko. Napaka sledenja trajektorije je definirana kot maksimum napake sledenja trajektorije vzdolž celotne poti. Pri primeru diagonalnega giba sta to vrednosti 53 in 59 mm.

Napaka sledenja trajektorije za vse gibe je prikazana na *sliki 7*. Največja napaka sledenja trajektorije znaša 77 mm.

5 Zaključek

Razviti sistem omogoča programirano ali ročno vodeno izvajanje gibanja dvigala glede na spremenljivke sklepov, koordinatni sistem baze ali koordinatni sistem vrha robota. Sistem vodenja je razvit na način, da na dvigalu ohranja originalni krmilnik in mehanizme zagotavljanja var-

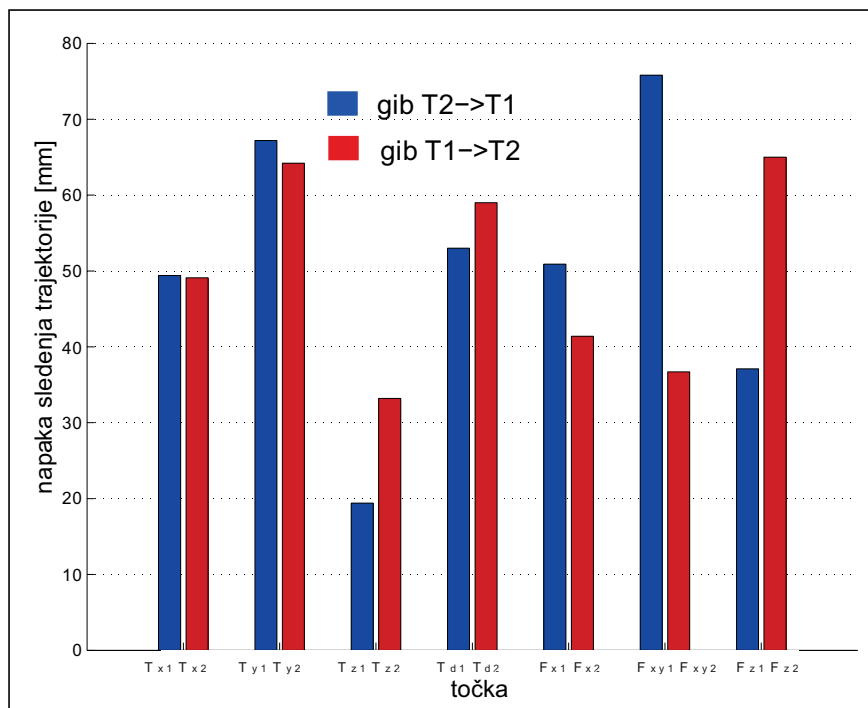
nosti, s čimer so ohranjeni obstoječi varnostni certifikati. Dodan je varnostni sistem, ki nadzira delovanje zaprtozančnega sistema vodenja. Kvaliteto zaprtozančnega vodenja smo preverili z neodvisnim optičnim merilnim sistemom. Parametri kvalitete gibanja tako poleg napake regulacije vključujejo tudi napake kinematičnega modela oz. mehanske strukture dvigala. Parametre kvalitete gibanja (ponovljivost točke, napaka sledenja trajektorije in ponovljivost sledenja trajektorije) smo izračunali v skladu s standardom ISO 9283. Testni gibi so bili delno izbrani v skladu s standardom ISO 9283, deloma so posnemali gibe, potrebne za montažo fasadnega panela, deloma pa smo poizkusili doseči čim večji vpliv zračnosti med segmenti teleskopa. Rezultati so pokazali ponovljivost točke do 8 mm, napaka sledenja trajektorije je bila do 77 mm, napaka ponovljivosti trajektorije pa do 59 mm, s čimer je zastavljeni cilj natančnosti pozicioniranja znotraj napake 0,1 m dosežen. Razvito robotizirano dvigalo je možno uporabiti tudi za druge naloge, ki vključujejo manipulacijo težjih bremen v velikem delovnem prostoru ter ponovljivo ali predprogramirano gibanje v zunanjih koordinatah.



Slika 6. Napaka sledenja v smeri naprej in nazaj pri diagonalnem gibu

Literatura

- [1] B. Peter, B. Martin, W. Hans: Information technology support to construction design and production, *Computers in industry* 35 (1) (1998), 1–12.
- [2] K. Nisita, M. Itou, S. Miyaki: Development & Application of Column-Field-Welding Robot, v: Proc. of the 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2000), Taipei, Taiwan, 2000.
- [3] P. Gonzales de Santos, J. Estremera, M. A. Jimenez, E. Garcia, M. Armanda: Manipulators help out with plaster panels in construction, *Industrial robot: an international journal* 30 (2) (2003), 508–514.
- [4] P. Gonzales de Santos, J. Estremera, E. Garcia, M. Armanda: Power assist devices for installing plaster panels in construction, *Automation in Construction* 17 (4) (2008), 459–466.
- [5] J. Činkelj, R. Kamnik, P. Čepon, M. Mihelj, M. Munič: Closed-loop control of hydraulic telescopic handler, *Automation in Construction* 19 (7) (2010), 954–963.



Slika 7. Napaka sledenja trajektorije

Zahvala

Delo sta financirala podjetje Trimo, d. d., Trebnje in Evropska komisija (program EUREKA, projekt E!-3902 ETECH). Avtorji se zahvaljujejo za prispevke pri idejni zasnovi in razvoju projekta Mihe Šantavca, univ. dipl. inž., Zorana Goljufa, univ. dipl. inž., Lojzeta Culjkarja, univ. dipl. inž., in mag. Danijela Zupančiča iz podjetja Trimo, d. d., ter Marka Gračnerja, univ. dipl. inž., in dr. Igorja Kovača s Tehniške univerze v Gradcu.

Robotic controller for hydraulic telescopic handling device

Abstract: Automation can reduce needed time and dangerous working conditions in construction industry. This paper presents development of a robot controller for a hydraulic telescopic handler aimed at automation of montage buildings assembly. The project is designed and financed by the company Trimo, Trebnje. We present key properties of the telescopic handler, identification of system parameters and development of a controller. Experiments on real machine showed acceptable performance for a real world application.

Keywords: hydraulic system, telescopic handler, robotic control

nadaljevanje s strani 232

3. Internationale Kompressoren-Anwender Forum – 3. Mednarodni forum uporabnikov kompresorjev

27. in 28. 09. 2012

Dusseldorf, BRD

Organizator:

– VDMA Fachverband Kompressoren, Druckluft- und Vakuumtechnik

Opomba: prireditev je organizirana sočasno z 10. Mednarodnim forumom uporabnikov črpalk (10. Internationale Pumpenanwenderforum) in 7. Konferenco EFRC

Informacije:

– www.introequipcon.com