

Robotsko vodenje hidravličnega teleskopskega dvigala

Justin Činkelj, Roman Kamnik, Peter Čepon, Matjaž Mihelj, Marko Munih
Laboratorij za robotiko, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, 1000 Ljubljana

{justin.cinkelj, roman.kamnik, peter.cepon, matjaz.mihelj, marko.munih}@robo.fe.uni-lj.si

Robotic control of hydraulic telescopic handler

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.

Kratek pregled prispevka

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 zaprtizančnega vodenja. Eksperimentalni preizkusi na stroju kažejo zadovoljive lastnosti za uporabo v praktični aplikaciji.

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 moč 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, velikostjo delovnega prostora in velikim obremenitvam. Pričujoče delo predstavlja 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 Grazu in podjetja Motoman, Ribnica.

Operacija montaže fasadnega panela se sestoji iz manipulacije 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 zaprtozančni 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 zasnovo programske opreme za zaprtozančno vodenje. Tretje poglavje predstavlja metodologijo praktične evalvacije kvalitete vodenja v zunanjih koordinatah, četrte poglavje pa izmerjene rezultate.

2 Opis sistema

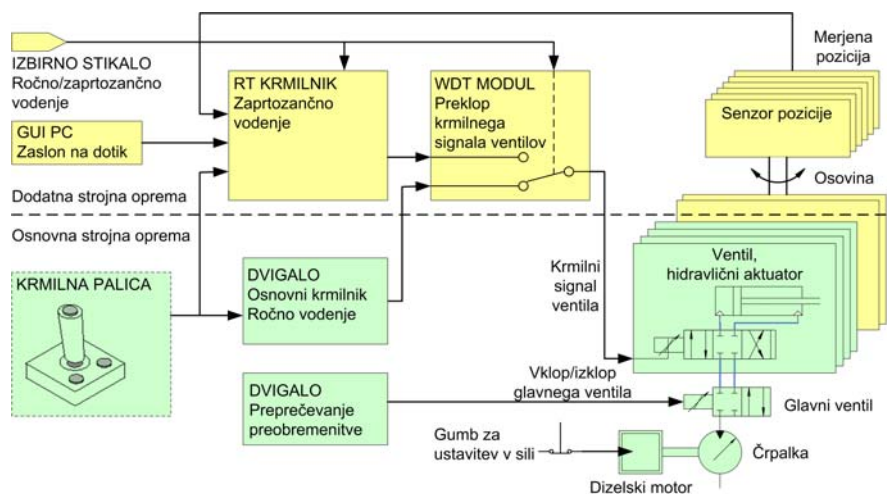
2.1 Zasnova strojne opreme

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 pri proizvajalcu bila 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 dvigala 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 DOF in bremenom.



Slika 1: Hidravlično teleskopsko dvigalo Merlo ROTO MCSS 45.21 za manipulacijo bremena 2000 kg



Slika 2: Komponente sistema za zaprtozančno vodenje hidravličnega teleskopskega dvigala

Za izvedbo zaprtozančnega 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 zajema krmilnik dvigala signale krmilne palice ter generira ustrezne krmilne napetosti za hidravlične ventile. Varnostna enota lahko ustavi gibanje z izklopom glavnega ventila. Za izvedbo zaprtozančnega vodenja sta poleg dveh dodatnih prostostnih stopenj in senzorjev pozicije ključna RT (ang. real-time) krmilnik in WDT (ang. watchdog timer) modul. RT krmilnik zajema signale senzorjev pozicije in zaprtozančno izračunava krmilno napetost ventilov. WDT modul nadzoruje časovno pravilnost delovanja RT krmilnika (tj. ali RT krmilnik deluje v realnem času, znotraj podanih časovnih omejitev). Poleg tega, glede na položaj izbirnega stikala določa, ali dvigalo premika krmilna napetost iz RT krmilnika ali iz krmilnika dvigala. 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 PC/104

procesorskih modulov. RT krmilnik vsebuje tri dodatne module - za analogne vhode, analogne izhode in CAN vodilo.

Dodatna varnost je zagotovljena z WDT modulom, ki nadzoruje časovno izvajanje RT krmilnika. Če se ta ne odziva v določenem časovnem oknu, WDT modul izklopi električno napajanje hidravličnih ventilov. Pravilnost časovnega izvajanja preverja diskretno vezje, izvedeno z logičnimi vrati in časovnikom.

2.2 Zasnova programske opreme

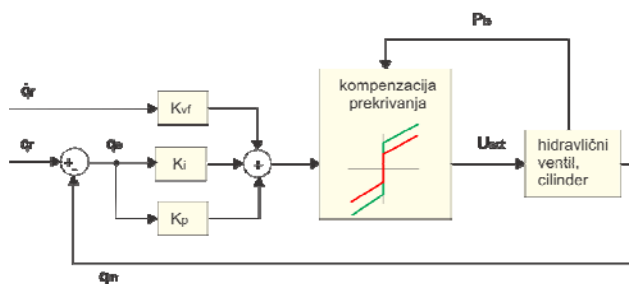
Za zaprtozančno vodenje gibanja smo na najnižjem nivoju za vsako os realizirali svoj regulator, ki deluje neodvisno od ostalih osi. Struktura regulatorja je prikazana na sliki 3. Vhoda sta referenčna hitrost in pozicija. Za rotacijske osi (prva in šesta os) sta to kar hitrost in pozicija same osi. Enako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

Struktura regulatorja je PI regulator s hitrostno naprej zaključeno zanko in kompenzacijo

prekrivanja ventila. Hitrostna naprej zaključena zanka je namenjena pohitritvi odziva, kompenzacija prekrivanja 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 napajen s črpalko, ki deluje po principu zaznavanja bremena. Princip delovanja vnaša zakasnitve v odzivu, kar niža frekvenčno širino zaprtozračnega vodenja, hkrati pa to vpliva na delovanje ventila. Zato smo izvedli kompenzacijo prekrivanja ventila glede na tlak zaznavanja bremena. Pri nižjem tlaku uporabimo višjo krmilno napetost (rdeča krivulja) kot pri višjem tlaku (zelena krivulja).



Slika 3: Regulacijska shema za zaprtozračno vodenje posameznega sklepa dvigala

Za zaprtozračno vodenje dvigala v zunanjih koordinatah (t.j. v svetovnem, kartezičnem koordinatnem sistemu - WCS) smo razvili direktni kinematični model, t.j. preslikavo iz notranjih koordinat - pozicij sklepov (JCS), v zunanje koordinate ter inverzni kinematični model, t.j. preslikavo iz zunanjih koordinat v notranje. Direktno kinematiko smo opisali po Denavit-Hartenberg metodi. Inverzna

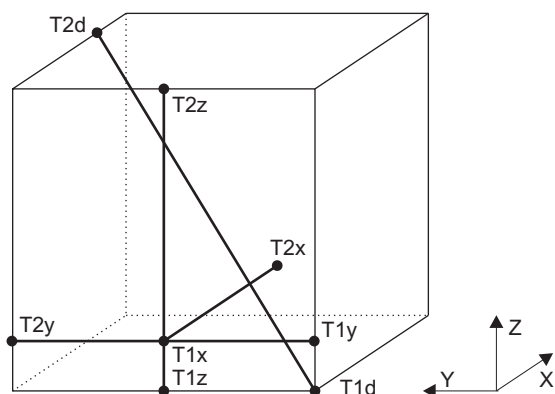
kinematika serijskih mehanizmov s 6 DOF je analitično rešljiva samo za tipe mehanizmov pri katerih se tri zaporedne osi rotacije sekajo v isti točki ali so paralelne. To za obravnavni mehanizem ni primer, zato smo uporabili iterativni numerični algoritem. Pozicijsko napako v zunanjih koordinatah $v(t_k)$ pretvorimo v notranje koordinate preko množenja z inverzno analitično Jakobijevo matriko $J^{-1}q(t_k)$. Dobljeno hitrost $\Delta \dot{q}(t_k)$ 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 . Uporabljen postopek zahteva kot vhodne podatke Denavit-Hartenberg 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 mikromanipulatorjem in segmenti dvigala.

3 Praktična evalvacija robotsko vodenega dvigala

Izvedli smo praktično evalvacijo kvalitete zaprtozračnega 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.



Slika 4: Testni gibe glede na ISO kocko

Testni gibe so na sliki poudarjeni z debelo črto. Vključen je diagonalni gib (točki T_{1d} in T_{2d}) ter gibe vzdolž osi zunanega koordinatnega sistema (pari točk T_x , T_y in T_z).

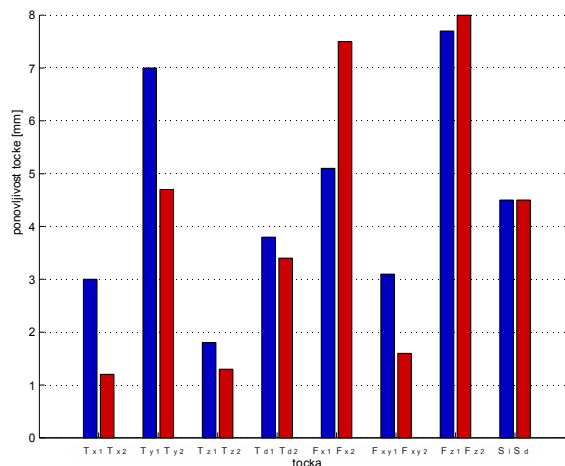
4 Rezultati

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.

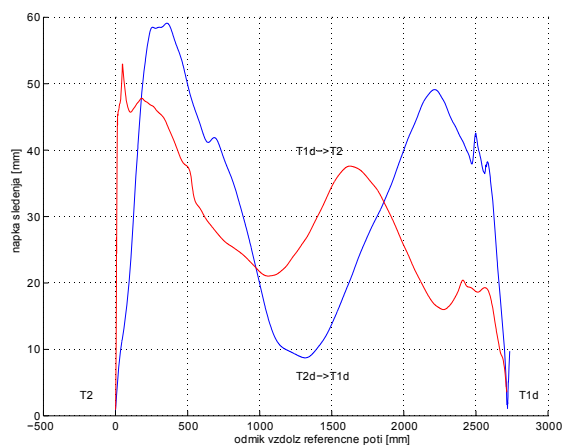
Vsak gib vsebuje dve točki, zato je rezultat podan z dvema števkama za vsak par točk. Gibu vzdolž stranic in diagonale ISO kocke ustrezajo točke T_x , T_y , T_z in T_d , gibom za posnemanje nameščanja panela na fasado točke F_x , F_y in F_z , gibu s hitro zaustavitvijo pa točki S_l in S_d .

Najslabša izmerjena ponovljivost znaša 8 mm. Med gibe 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.



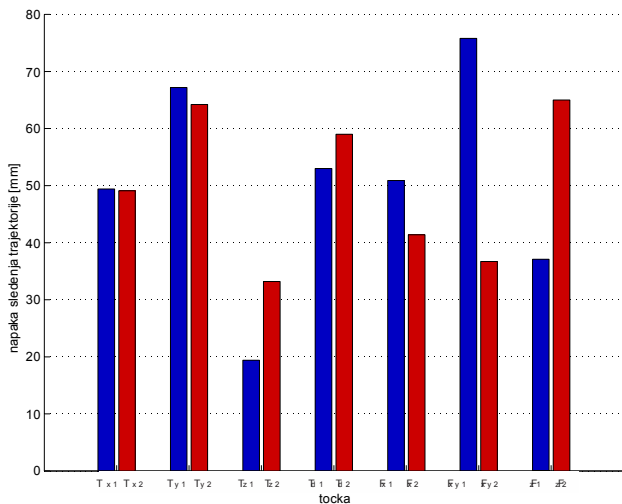
Slika 5: Ponovljivost doseganja točk



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

Na sliki 6 je prikazana napaka sledenja trajektorije vzdolž celotne poti diagonalnega giba. Vidimo, da po začetku giba vrh dvigala zavije vstran, 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.



Slika 7: Napaka sledenja trajektorije

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 varnosti, s čimer so ohranjeni obstoječi varnostni certifikati. Dodan je varnostni sistem, ki nadzira delovanje zaprtzančnega sistema vodenja.

Kvaliteto zaprtzančnega 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 ISO 9283 standardom. Testni gibi so bili delno izbrani v skladu s ISO 9283 standardom, 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.

Zahvala

Delo je bilo financirano s strani podjetja Trimo d.d., Trebnje in Evropske komisije (EUREKA program, 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. ing. in dr. Igorja Kovača s Tehniške univerze v Grazu.

6 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. Armada, 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. Armada, 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. Munih, Closed-loop control of hydraulic telescopic handler, Automation in Construction 19 (7) (2010) 954-963.