

Posvet Avtomatizacija strege in montaže 2017 - ASM '17, Ljubljana, 6.12.2017
WWW zbornik člankov s posveta

Kraj posveta: Gospodarska zbornica Slovenije, Dimičeva 13, 1000 Ljubljana

Datum posveta: 06.12.2017

Organizatorji:

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za strego in montažo – LASIM
Združenje kovinske industrije na GZS

Organizacijski odbor:

prof.dr. Niko Herakovič, FS, UL
dr. Mihael Debevec, FS, UL
dr. Miha Pipan, FS, UL
Edo Adrovič, FS, UL
mag. Janja Petkovšek, Združenje kovinske industrije na GZS

Uredniki:

dr. Mihael Debevec, FS, UL
dr. Miha Pipan, FS, UL
Edo Adrovič, FS, UL
prof.dr. Niko Herakovič, FS, UL

Izdajatelj:

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

Ljubljana, 2017

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v
Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID=293272576

ISBN 978-961-6980-44-9 (epub)



© Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2017

Vse pravice pridržane. Brez pisnega dovoljenja založnika je prepovedano reproduciranje, distribuiranje, javna priobčitev, predelava ali druga uporaba tega avtorskega dela ali njihovih delov v kakršnemkoli obsegu ali postopku, vključno s tiskanjem ali shranitvijo v elektronski obliki. Tako ravnanje predstavlja, razen v primeru iz 46. in 57. člena Zakona o avtorskih pravicah, kršitev avtorske pravice.

Seznam člankov:

1. Robotska celica za strego žage za razrez polgredi in odlaganje le-teh v transportno embalažo: Hubert Kosler, Aljoša Zupanc, Damian Širaj, Erih Arko, Sandi Košmrlj, Matej Merkač, Yaskawa Slovenija d.o.o. in Yaskawa Ristro d.o.o.
2. Rekonfigurabilna robotska celica za malo in srednjeserijsko proizvodnjo: Martin Bem1, Žiga Gosar2, Timotej Gašpar1, Igor Kovač1, Aleš Ude1, 1 - IJS; 2 - ELVEZ d.o.o.
3. Integracija in kalibracija strojnega vida v sistem z robotsko manipulacijo: Tomaž Koritnik, Darko Koritnik, DAX d.o.o.
4. Izvedba specifičnega prijemala in prijetanje za vizualno kontrolo izdelka: Vid Črešnik3, Jure Škrabar2, Aleš Zore1, Jure Rejc1, Marko Munih1, 1 - UL FE, Laboratorij za robotiko, 2 - Kolektor Group d.o.o., 3 - Kolektor Orodjarna d.o.o.
5. Nekaj izhodišč brez katerih ni Pametne tovarne: Gorazd Rakovec, Kibernova, s.p.
6. Integracija eWON rešitev v okviru Industrije 4.0: Daniel Krašovec, Inea RBT d.o.o.
7. Celostni pogonski sistem drylin®- kako konfigurirati celoten sistem: Stojan Drobnič, Matic Butja, Hennlich d.o.o.
8. Program GOSTOP – Gradniki, orodja in sistemi za tovarne prihodnosti: Igor Kovač1, Vladimir Jovan1, Aleš Hančič2, Aleš Ude1, Janez Štrancar1, 1 - Institut »Jožef Stefan«, 2 - TECOS
9. Visoko-dinamična hidravlična linearna os krmiljena z digitalnim piezo ventilom: Marko Šimic, Niko Herakovič, UL FS, LASIM
10. Načrtovanje osnovnih ročnih montažnih operacij z integracijo simulacijskih orodij v proizvodnem procesu: Maja Turk, Matevž Resman, Miriam Cukjati, Niko Herakovič, UL FS, LASIM
11. Krmilni algoritem za natančno krmiljenje pozicije dveh antagonistično vpetih pnevmatičnih mišic: Jernej Protner, Miha Pipan, Niko Herakovič, UL FS, LASIM
12. Model LASFA: Matevž Resman, Hugo Zupan, Niko Herakovič, UL FS, LASIM

ROBOTSKA CELICA ZA STREGO ŽAGE ZA RAZREZ POL-GREDI IN ODLAGANJE LE-TEH V TRANSPORTNO EMBALAŽO KUPCA

Dr. Hubert KOSLER, Aljoša ZUPANC, Damian ŠIRAJ, Erih ARKO,
Sandi Košmrlj, Matej MERKAČ
Yaskawa Slovenija d.o.o.
Yaskawa Ristro d.o.o.

POVZETEK

Uporaba industrijskih robotov v namen strege stroja pokaže svoj polni potencial, kadar robot opravlja operacije montaže in priprave izdelkov za naslednje operacije in za transport. Robotizacija bistveno razbremeni operaterja in onemogoči vpliv človeškega faktorja na kakovost izdelkov. Prednosti popolne avtomatizacije za izdelavo velike dnevne količine so poznane tako uporabnikom robotskih celic, kot tudi kupcem izdelkov.

1. UVOD

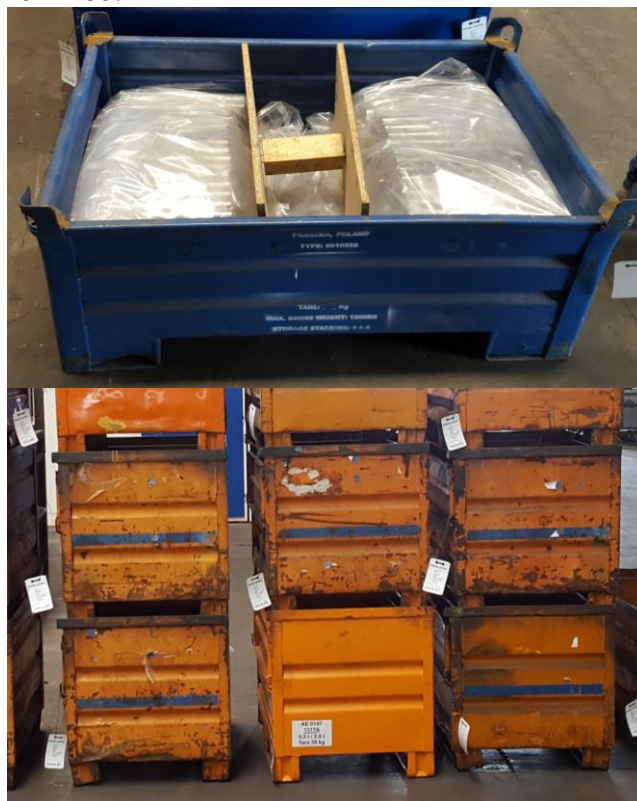
Uporaba industrijskih robotov v namen strege stroja pokaže svoj polni potencial, kadar robot poleg operacij manipulacije z izdelkom opravlja še dodatne operacije montaže, operacije obdelave ali preoblikovanja izdelka.. Enako pomembna je priprava izdelkov na izhodu iz robotske celice. Robot odlaga v namensko transportno embalažo, izdelki so ustrezno orientirani in sortirani glede na tip in glede na zahteve kupca. Robotska celica je samostojna enota in je z žago povezana tako, da operater opravlja z obema preko istega kontrolnega panela. Robotska celica je izpolnila vsa pričakovanja kupca Štore Steel d.o.o..

2. TEHNIČNO TEHNOLOŠKE ZAHTEVE ZA ROBOTIZACIJO

Robotizacija zajema strego žage za razrez jeklenih palic – pol-gredi za avtomobilsko industrijo. Po tehnološki operaciji lupljenja (precizna obdelava na zahtevani premer), se z rezajem na avtomatski žagi zagotovi še ustrezna dolžina. Na žagi se izdelujejo palice različnih dimenzij. Dolžinska mera palice se spreminja s korakom 0.5mm:

- dolžina med od 250mm in 700mm
- premer od $\Phi=20\text{mm}$ do premera $\Phi=40\text{mm}$

Žaga deluje z različnimi kapacitetami glede na debelino palice. Palice premera od $\Phi=20\text{mm}$ do $\Phi=31,5\text{mm}$: v enem taktu se odrežeta dve palici. Čas rezanja traja med 10s in 11s (odvisno od debeline). Izhodni trak žage vsake cca 6s dostavi novo palico (vedno eno hkrati). Palice premera od $\Phi=31.5\text{mm}$ do premera $\Phi=40\text{mm}$: v enem taktu se odreže ena palica. Čas rezanja traja cca 8s. Žaga v taktu rezanja dostavlja eno palico na izhod.



Slika 1: Različni tipi transportne embalaže



Slika 2: Palice na izhodu žage – pred robotizacijo

Teža posamezne palice znaša med 1.5 in 4kg. Palica s premerom manjšim od $\Phi=31.5\text{mm}$ je lahko težka največ 3kg. Z upoštevanjem takta žage: 3000 palic/8h, znese skupna teža cca 6 ton/8h.

Žaga je opremljena z izhodnim trakom z verižnikom, ki prevzame palico (1 kos vsak premik traku) iz vmesnega zalogovnika palic na žagi. Iz traku palice prosto padajo in se zbirajo na izhodni enoti (glej sliko 2). Izhod je ročno nastavljiv glede na dolžino palice in zasnovan tako, da med odvzemom palic žaga lahko nemoteno obratuje.

Žaga, ki jo poslužuje robot, je opremljena zgolj z izhodnim trakom. Palice se iz izhodnega traku prenašajo na vhodno enoto robotske celice. Najprej se zberejo na gravitacijski drči, od koder jih eno po eno prevzame koračni transportni trak in jih vodi v robotsko celico do robotskega odvzemnega mesta (glej sliko 4).

Ob prehodu na drugo dolžino palice se vhod palic v robotsko celico ročno prilagodi na novo dolžino. Operater nastavi gravitacijsko drčo in koračni verižni trak.



Slika 3: Zaščitna PVC folija v zaboju za palice



Slika 4: Izhod žage povezan z robotsko celico

Palice v transportnih zabojnikih se dodatno zaščitijo s PVC folijo in se pripravijo na transport. V prazen zaboj se najprej odloži PVC folija. Ročno se vstavi leseni distančnik in palice se ovijejo v folijo (glej sliko 4).

Priprava zabojev za robotsko celico. Operater robotske celice bo folijo pripravil tako, da bo poravnana s stenami zabojnika, da robot folije ne bo poškodoval med odlaganjem palic. Na zaboj se ročno odloži okvir, ki med odlaganjem palic skrbi, da se PVC folija ne premakne. Okvir je zasnovan tako, da lahko robot pred začetkom vlaganja z uporabo iskanja (Search funkcija) detektira natančno pozicijo zaboja. Transportni zaboji so neponovljivi in niso primerni za iskanje z Vision sistemom ali enostavnimi tipali (glej sliko 3).

Poleg tehnično tehnoloških zahtev, je robotizacija strege vključila še ostale zahteve kupca oziroma procesa.

Komunikacijska povezava robotskega krmilnika s krmilnikom žago je izvedena preko ProfiNet povezave. Operater na posluževalnem pultu žage vnese podatke o izdelku: dolžina, širina, število kosov in tip zaboja. Slednji podatki se prenesejo v robotski krmilnik. Avtomatsko se izbere robotski program za odlaganje palic in za prepoznavo tipa izhodnega zaboja.

V uporabi so trije tipi zabojnikov različnih dimenzij, za katere je zasnovan sistem uvodnic za grobo pozicioniranje. Natančno pozicijo določi robot, ki z laser odbojnim senzorjem na prijemalo "potipa" pozicijo novega praznega zabojnika. Način zlaganja palic v izhodno embalažo je

pogojen z dolžino palice. Za vsak posamezen tip zaboja je možno več načinov zlaganja.

Zaboji v uporabi so različnih dimenzij:

- 1240 x 815 x 550 mm,
teža polnega zaboja 1500kg
- 1100 x 720 x 970 mm,
teža polnega zaboja 1500kg
- 840 x 630 x 660 mm,
teža polnega zaboja 538kg

Vhod v robotsko celico omogoča možnost ročnega odvzema palice na izhodu iz žage. Med žago in robotsko celico je prehod širine cca 800mm.

3. ZASNOVA DELOVANJA ROBOTSKE CELICE

Robotsko celico smo zasnovali s 6-osnim industrijskim robotom Motoman tip MH50 II (nosilnosti 50kg in polmer dosega R=2061mm) z robotskim krmilnikom DX200. Robot je opremljen z dvema pnevmatskimi dvoprstnimi prijemali, ter s povezanim paketom z ventilskim otokom, za dovod medijev do zadnje-šeste robotske osi.

Robotsko prijemalo je zasnovano kot univerzalno, to pomeni da je zasnovano za prijemanje vseh zahtevanih dimenzij, za prijemanje dveh palic hkrati - skupne teže palic do 8kg. Pozicije prijemalnih prstov so senzorirane (prijemalo odprto/zaprto), prav tako pa je dodatno senzorirana prisotnost palic v prijemalu.



Slika 5: Univerzalno robotsko prijemalo

Prijemalo je opremljeno z laser odbojnim kontrolnim senzorjem za iskanje in kontrolo natančne pozicij elementov v robotski celici, kot npr: kontrola nastavljene širine koračnega traku, kontrola pozicije transportne embalaže (Search funkcija),... Uporabi se ob zagonu novega tipa izdelka ali po menjavi zabojnika.

Dodatno je na prijemalu še senzor za kontrolo višine odloženih palic v zabojnik. Zaradi nepredvidljivega načina zbiranja palic v izhodnem zaboju, je potrebno višino odlaganja palic sproti kontrolirati in po potrebi prilagajati.



Slika 6: Odlaganje v zaboje s kontrolo višine

Posamezna palica se prenese iz izhodnega traku žage najprej na gravitacijsko drčo, na koncu katere je mesto za prevzem na vhodni trak robotske celice. Na gravitacijski drči je prostora za 8 palic.

Vhodni trak robotske celice je sestavljen iz dveh koračnih verižnih trakov. Na verigah so pritrjena gnezda, za odvzem in transport palic v robotsko celico, do robotskega odvzemnega mesta (na koncu traku). Vhod v robotsko celico je varovan s tunelom. Trak je opremljen s senzorji za detekcijo polnosti (na prvem gnezdu in obeh robotskih odvzemnih mestih). Robot lahko odvzame iz traku tudi samo eno palico (npr. zadnja palica v seriji,...)

Zasnova robotske celice zagotavlja neprekinjeno delovanje izhodnega traku žage. Na začetku žaganja novega tipa (nova dimenzija palice) operater potrdi ustreznost palic in šele po potrditvi na komandnem pultu robotske celice bo koračni vhodni trak robotske celice začel prevzemati palice in jih transportiral na robotsko odvzemno mesto.

V primeru, da se gravitacijska drča zapolni s palicami in operator še ni potrdil ustrezne kvalitete palic, bo robotski krmilnik ustavil proces rezanja palic na žagi.

Vhod palic v robotsko celico je zasnovan za vse širine palic (od 250 do 700mm) in je ročno nastavljen glede na dolžino palice. Operator nastavi en del gravitacijske drče in en del koračnega verižnega traku.

Robotska celica zajema dve senzorirani mesti za zaboja za palice, ki sta opremljena z uvodnicami in senzoriranim končnim naslonom. Zaradi različnih dimenzij zaboja smo predvideli, da se zaboj vedno pozicionira v isti kot končnega naslona in sicer, kjer se nahaja senzor prisotnosti.

Med menjavo zaboja robotska celica deluje v avtomatskem režimu. Menjava transportne embalaže poteka ročno, preko krilnih vrat opremljenih s ključavnico in varnostnimi senzorji, ki varujejo dostop v robotsko celico.

V sklop varovalne kabine je vključen tudi sistem varovanja iz "notranje strani" robotske celice med menjavo zaboja. Pnevmatski pomični pokrov se nahaja na mestu polnega zaboja in preprečuje dostop v robotsko celico, medtem ko operator odvzame poln zaboj iz robotske celice in vstavi nov, prazen zaboj.



Slika 7: Sistem varovanja za zabojnike

Zasnova robotske celice omogoča enostaven prehod na obdelavo/rezanje drugega tipa palice, različne dimenzije.



Slika 8: Robotska celica – posluževalni pult

V avtomatskem režimu delovanja robotske celice skrbi operator za menjavo transportne embalaže za palice. Med menjavo tipa izdelka pa operator opravi vse potrebne nastavitve na žagi in na robotski celici. Nastavi ustrezno širino na enoti za vhod palic v robotsko celico. Vnese podatke o novem tipu na posluževalnem panelu žage, potrebni podatki pa se prenesejo na robotski krmilnik. Morebitne popravke števila kosov in ostali nadzor nad delovanjem robotske celice operator opravi na posluževalni pultu robotske celice.

5. ZAKLJUČEK

Ob zagonu robotske celice smo izdelali robotske programe za vse tipe palic - 150 različnih dimenzij, ki se trenutno izdelujejo za tri tipe transportnih zabojev. S kupcem smo se dogovorili, da smo po montaži v podjetju Štore Steel d.o.o. optimirali robotske trajektorije za 5 različnih tipov palic. Optimiranje robotskih trajektorij za vse ostale tipe, pa je izvedla ekipa operaterjev kupca, ki so pri nas opravili robotsko šolanje. Robotska celica deluje v zahtevam taktu.

Z našimi rešitvami smo uspeli zadovoljiti vse zahteve kupca. Robotizacija bistveno razbremeni operaterja, zagotavlja kakovost izdelkov in omogoči izdelavo velikih dnevnih količin palic.

Literatura

[1] <http://yaskawa.eu.com/>

Rekonfigurabilna robotska celica za malo in srednjeseerijsko proizvodnjo

Martin Bem¹, Žiga Gosar², Timotej Gašpar¹, Igor Kovač¹, Aleš Ude¹

¹Institut »Jožef Stefan«, ²ELVEZ d.o.o.

POVZETEK

Za uporabo robotov v maloserijski proizvodnji je potrebno obiti številne težave. Menjava serije izdelkov je drag časovno zamuden proces zato se robotska proizvodnja običajno uporablja v velikoserijski proizvodnji. Da bi omejitev obšli je bila v sklopu projekta ReconCell razvita robotska celica naslednje generacije, ki s pomočjo fleksibilnih in rekonfigurabilnih pristopov obvladuje proizvodnjo raznolikih izdelkov. V članku so opisani ključni mehanski in programski pristopi, ki to omogočajo. Obravnavana je tudi njihova implementacija ter rezultati njihove uporabe na področju proizvodnje avtomobilskih žarometov.

1. UVOD

Roboti se najpogosteje uporabljajo v velikoserijski proizvodnji z majhno raznolikostjo. Glavni razlog za to je drag in zamuden proces ob menjavi serije proizvodov. Za proizvodnjo majhnih serij raznolikih izdelkov klasični pristopi robotske proizvodnje niso primerni.

Robot je izredno prilagodljiva naprava, saj omogoča programsko definicijo poljubnega giba znotraj svojega delovnega območja. Težava pa je, da programiranje robota zahteva izobražen kader in je pogosto časovno potraten proces.

Periferni moduli robotske celice so z vidika prilagodljivosti bistveno bolj problematični. Ti so običajno specifični in povezani z izdelavo enega produkta. Ob menjavi serije je potrebno periferne elemente na novo zasnovati, izdelati ter nazadnje fizično namestiti. Primer takšnih perifernih elementov so vpenjala, zamenjava katerih je drag, časovno potraten proces, ki zahteva visoko kvalificiran kader. Večje spremembe gabaritnih dimenzij produkta pa lahko privedejo tudi do potrebe po spremembi ogrodja robotske celice. Prav tako se ob menjavi produkta občasno pojavi potreba po dodatnih funkcionalnostih npr. vijačenje, vtiskovanje, strojni vid, ipd..

Da bi omilili vpliv zgoraj navedenih omejitev je v sklopu projekta ReconCell nastala robotska celica naslednje generacije (Slika 1). Le-ta uporablja fleksibilne in rekonfigurabilne pristope s katerimi minimizira kompleksnost, stroške in čase povezane s spremembo serije produktov.

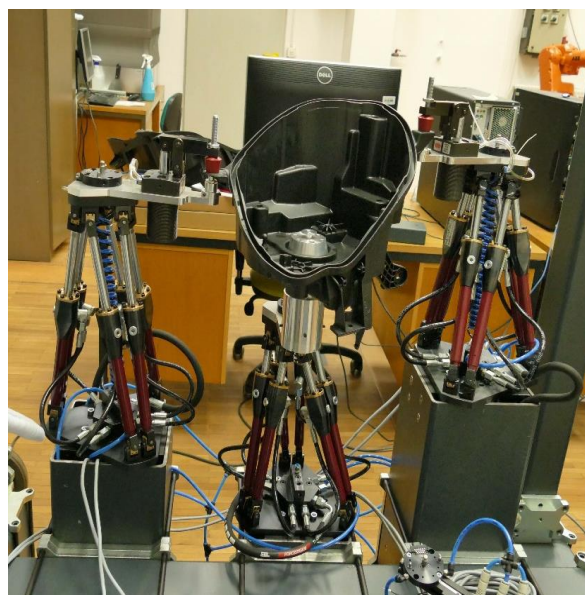
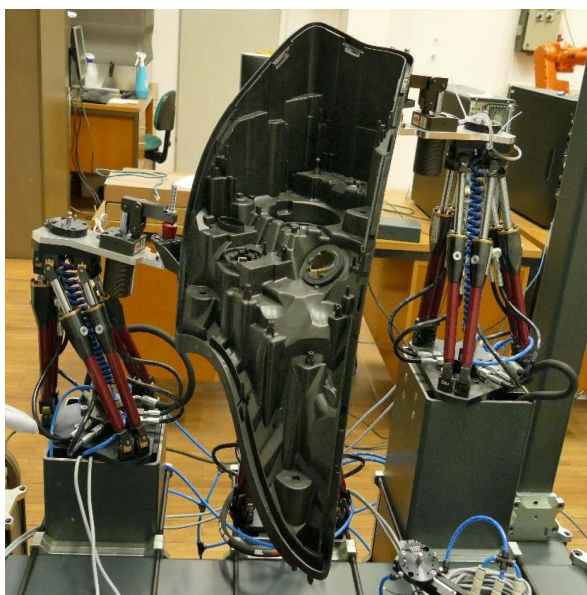


Slika 1: Robotska celica razvita v ReconCell projektu

2. REKONFIGURABILNA STROJNA OPREMA

Robotska celica projekta ReconCell je sestavljena iz ogrodja, dveh UR10 robotov, vpenjal ter številnih perifernih modulov. Vsi elementi so bili od začetka zasnovani tako, da omogočajo hitro in učinkovito prilagoditev proizvodnim potrebam.

V celici tako ločimo tri mehanizme rekonfiguracije. Prvi, ki ga omogoča fleksibilna vpenjalna priprava (Hexapod), je v celoti avtonomen in zato najhitrejši. Gre za t.i. robotsko podprto rekonfiguracijo saj za prilagoditev vpenjalnih priprav uporabljamo robota [1]. Drugi



Slika 2: Dva modela avtomobilskih luči vpeta v fleksibilno vpenjalo

je mehanizem Plug and Produce. Je nekoliko počasnejši saj ga izvajamo ročno. Rekonfiguracija s Plug and Produce mehanizmom omogoča dodajanje perifernih elementov opremljenih z istoimenskim konektorjem. Zadnji mehanizem rekonfiguracije je ročna rekonfiguracija ogrodja, ki je od naštetih najpočasnejša in najredkeje uporabljena. Mehanski elementi, ki omogočajo naštete mehanizme rekonfiguracije so opisani v nadaljevanju poglavja.

2.1. Ogrodje

Ogrodje celice je element, ki mehansko povezuje robota z vsemi elementi periferije. Kljub navidezni preprostosti pa gre za element robotske celice, kjer lahko s premišljeno zasnovo znatno izboljšamo prilagodljivosti na morebitne bodoče spremembe.

Najpomembnejša lastnost ogrodja je mehanska togost in cenena izvedba. Visoka togost je potrebna, ker lahko že majhne deformacije privedejo do napak robotskih operacij ali neustrezne kakovosti izdelkov. V primeru varjene izvedbe ogrodja, ki je sicer zelo togo, je prilagodljivosti celice pomanjkljiva.

Alternativno lahko ogrodje robotske celice izdelamo iz standardnih aluminijastih profilov. Tako ogrodje, katerega montaža je enostavna ter hitra, omogoča povečano prilagodljivost, saj ne potrebuje varjenja in omogoča kasnejše modifikacije. Slabost uporabe aluminijastih

profilov pa je bistveno manjša togost ter visoka cena.

V projektu uporabljena rešitev, ki združuje prednosti obeh zgoraj navedenih možnosti je uporaba t.i. BoxJoint sistema [2]. Gre za sistem, ki jeklene pravokotne profile različnih dimenzij spoji z jeklenimi ploščami, namenskimi maticami in vijaki. Uporaba jeklenih profilov pomeni visoko togost uporaba vijačnih zvez pa omogoča kasnejše enostavne spremembe konfiguracije ogrodja.

Tovrstni spoji so bili razviti za letalsko industrijo, v projektu ReconCell pa je bila tehnologija prvič uporabljena v avtomobilski industriji. Tehnologija se je izkazala kot izjemno učinkovita, saj bistveno skrajša čas in stroške postavitve ter poenostavi izpeljavo modifikacij robotske celice.

2.2 Fleksibilna vpenjalna priprava

Vpenjalna priprava je del robotske celice, ki je odgovorna za pravilno pozicioniranje in fiksiranje obdelovancev med izvajanjem robotskih nalog. Običajno so vpenjalne priprave specifične določenemu obdelovancu. V primeru menjave serije jih je potrebno na novo zasnovati, izdelati in montirati. Ta proces je drag, časovno zamuden in potrebuje kvalificirano delovno silo.

Da bi se temu izognili je bila v projektu uporabljena fleksibilna vpenjalna priprava, ki temelji na pasivni Stewartovi platformi (Hexapodu). Fleksibilna vpenjalna priprava, je

produkt predhodnega razvoja. Med projektom je nastalo tudi odcepljeno podjetje, odgovorno za komercializacijo omenjene tehnologije [3].

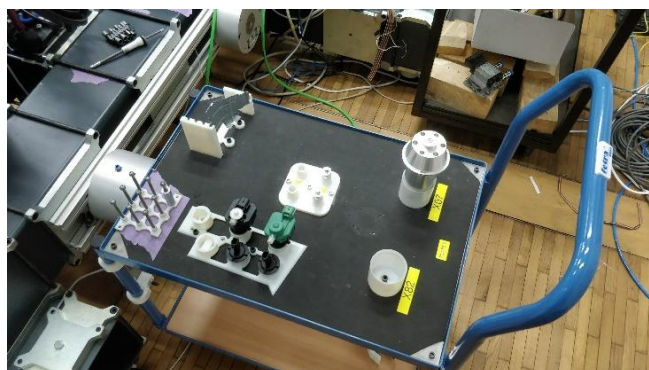
Stewartov mehanizem, ki omogoča rekonfiguracijo vpenjala je sestavljen iz dveh plošč povezanih z šestimi pasivnimi prizmatičnimi vezmi. Spodnja plošča mehanizma je toga pritrjena na ogrodje celice, zgornja pa ima šest prostostnih stopenj. Vsaka od šestih prizmatičnih vezi ima vgrajeno hidromehansko zavoro, ki lahko mehanizem zaklene. Zaradi paralelne narave je mehanizem v zaklenjenem stanju zelo tog. Rekonfiguracijo je mogoče izvesti ročno ali s pomočjo zunanjega mehanizma npr. robota.

Za vpetje vsakega obdelovanca, v našem primeru avtomobilskega žaromet, smo v celici uporabili po tri rekonfigurabilne vpenjalne priprave (glej Slika 2). Dve sta opremljeni s pnevmatsko spono eno pa pasivno podpira ohišje luči. V primeru potrebe po uporabi različnih dimenzij ostalih podpornih elementov, lahko izvedemo robotsko menjavo leteh.

Fleksibilne vpenjalne priprave smo testirali na dveh različicah avtomobilskih žarometih. Oba smo vpeli v ustrezno nastavljene vpenjalne priprave (Slika 2) ter pri obeh izvedli robotsko montažno nalogo. Rekonfiguracija je bila izvedena popolnoma avtonomno brez človeškega posredovanja in je trajala manj kot 3 minute. S tem smo pokazali, da tehnologija omogoča prilagoditev celice znotraj družine izdelkov. Avtonomnost ter čas rekonfiguracije sta v tem primeru zelo pomembna, saj so tovrstne spremembe proizvodnje najpogostejše.

2.3 Plug and produce (PnP) tehnologija

Plug and produce je izraz izpeljan iz izraza Plug and play, ki na področju računalništva implicira enostavno priključitev perifernih računalniških naprav (npr. tiskalnik). V primeru PnP gre za način dodajanja perifernih modulov robotske celice, ki so specifični za določeno serijo izdelkov in ki robotski celci dajo določeno funkcionalnost. Ključna omogočitelna tehnologija je v projektu razvit PnP konektor, ki omogoča prenos podatkov preko interneta ter povezavo napajanja in pnevmatike. PnP konektor omogoča tudi togo in ponovljivo mehansko



Slika 3: PnP modul za shranjevanje sestavnih delov

povezavo z ogrodjem celice. Ponovljivost povezave je pomembna, saj robotu omogoča neposredno manipulacijo s priključenimi moduli.

S PnP moduli celici dodamo zahtevane funkcionalnosti. V primeru menjave proizvodne naloge module zamenjamo in s tem celico prilagodimo novim zahtevam.

Do sedaj so bili implementirani številni PnP moduli. Primeri modulov, ki so uporabljeni v montaži avtomobilskih žarometov so: modul za shranjevanje sestavnih delov, modul za shranjevanje robotskih prijemalk, in modul za vpenjanje ohišja luči. Koncept smo eksperimentalno potrdili tako, da smo celico, ki je bila konfigurirana za montažo avtomobilskih žarometov, v manj kot 10 minutah rekonfigurirali v celico namenjeno izdelavi motorjev za pametno pohištvo. PnP modul za shranjevanje sestavnih delov je prikazan na Slika 3.

3. PROGRAMSKA OPREMA

Robotske celice se običajno programira neposredno z uporabo tovarniškega vmesnika robota ali s pomočjo simulacijskega okolja. Oba pristopa zahtevata znanje specifično za proizvajalca robota. V primeru izdelave novega programa celice, podjetje najame zunanje storitve, kar dodatno povečuje stroške in podaljša čase menjave serij.

Da bi te težave zmanjšali, smo v projektu razvili programski sistem, namenjen poenostavitvi in pospešitvi programiranja robotske celice. Programski sistem ponuja orodja, ki omogočajo intuitivno programiranje robota.

Celoten sistem robotske celice deluje znotraj ekosistema Robot Operating System (ROS) [4], za nizkonivojsko vodenja robota pa skrbi Matlab

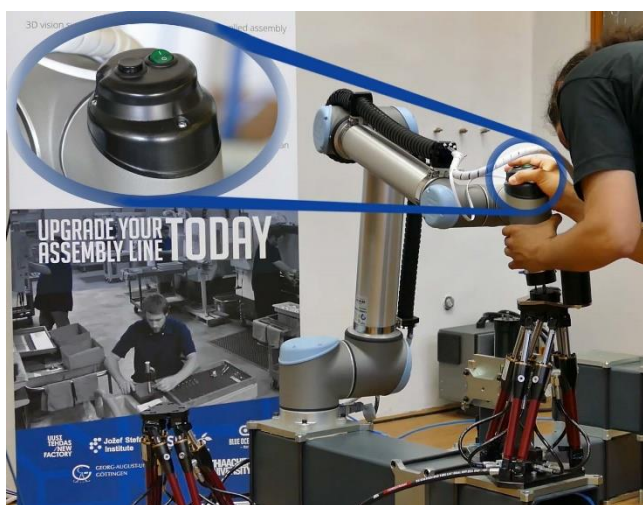
Simulink Real-Time (SLRT) strežnik [5]. ROS ponuja zanesljivo odprtokodno ogrodje, možnost razvoja programov na različnih platformah ter veliko zbirko knjižnic in orodij za razvijanje robotskih aplikacij, SLRT strežnik pa skrbi za časovno kritične procese.

3.1 Kinestetično učenje robotskih nalog

V zadnjih letih se je na trgu pojavil trend uvajanja sodelujočih (kolaborativnih) robotov. Zanje je značilno, da so certificirani za sodelovanje s človekom brez potrebe po varnostnih ogradah. Ta tehnologija je pogojena z zaznavali navorov v vsakem robotskem sklepu in jo je mogoče uporabiti za t.i. kinestetično vodenje. Robote sposobne kinestetičnega vodenja je mogoče premikati po prostoru tako, da robota primemo in premaknemo v želeno lego. S pomočjo enkoderjev v sklepih ter znanega kinematičnega modela je tako mogoče robota učiti proizvodne naloge.

V projektu uporabljen robot omogoča kinestetično vodenje, s katerim smo izdelali uporabniške aplikativne programe. Razvit sistem omogoča kinestetični zajem posameznih točk ali celotne trajektorije v sklepni ali kartezičnih koordinatah.

Tehnologija je bila uspešno uporabljena pri učenju montažne naloge avtomobilskih žarometov. Tako smo proces programiranja robota bistveno pospešili in zmanjšali potrebo po kvalificirani delovni sili. Sistem, razvit v projektu, je neodvisen od proizvajalca in modela robota kar



programiranje dodatno poenostavi. Izdelan je bil tudi vmesnik, nameščen na robotu s pomočjo

katerega je mogoče vključiti kinestetični način manipulacije robota ter shranjevati točke ali trajektorije. Prikazan je na **Error! Reference source not found.**

3.2 Napredni algoritmi krmiljenja robota

Razvita programska oprema, omogoča tudi implementacijo naprednejših metod generacij trajektorij. Do sedaj so razviti algoritmi za generacijo trajektorij so:

- trapezni hitrostni profil v sklepni koordinatah,
- premik po ravni črti v kartezičnih koordinatah po najmanjšem odvodu pospeška za translacijo ter SLERP [6] za orientacijo
- admitančno vodenje [7],
- dinamični generatorji gibov v sklepni koordinatah,
- dinamični generatorji gibov v kartezičnih koordinatah [8].

4. ZAKLJUČEK

V članku je predstavljena inovativna robotska celica namenjena uporabi v maloserijski proizvodnji. Celica omogoča hitro postavitve, učinkovito rekonfiguracijo ter intuitivno programiranje. Tako skrajšamo čase in zmanjšamo stroške povezane z menjavo serije proizvajanih produktov s čimer postane maloserijska robotska podprta proizvodnja ekonomsko upravičljiva.

V članku opisane tehnologije smo preizkusili na področju montaže avtomobilskih žarometov. Razvite mehanske in programske inovacije so bistveno povečale učinkovitost menjave serije žarometov. Tehnologije izkazujejo velik potencial vendar je za njihovo množično uporabo v industriji potreben nadaljnji razvoj.

Literatura:

- [1] M. Goeidl, I. Kovač, and A. Frank, "A robot guided reconfigurable assembly system," presented at the 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor Michigna USA, 2005.
- [2] "BoxJoint," *Prodtex*. [Online]. Available: <http://www.prodtex.com/boxjoint/>. [Accessed: 01-Dec-2017].

- [3] “Home,” *FlexHex Robot*. [Online]. Available: <http://flexhex-robot.com/>. [Accessed: 01-Dec-2017].
- [4] M. Quigley *et al.*, “ROS: an open-source Robot Operating System,” in *ICRA workshop on open source software*, 2009, vol. 3, p. 5.
- [5] “Simulink Real-Time - Simulink - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/simulink-real-time.html>. [Accessed: 14-Mar-2017].
- [6] K. Shoemake, “Animating rotation with quaternion curves,” vol. 19, no. 3, pp. 245–254, 1985.
- [7] L. Villani and J. De Schutter, “Force control,” in *Springer handbook of robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Berlin: Springer, 2008, pp. 161–185.
- [8] A. Ude, B. Nemec, T. Petric, and J. Morimoto, “Orientation in cartesian space dynamic movement primitives,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, pp. 2997–3004.

INTEGRACIJA IN KALIBRACIJA STROJNEGA VIDA V SISTEMU Z ROBOTSKO MANIPULACIJO

Tomaž KORITNIK, Darko KORITNIK
DAX d.o.o.

POVZETEK

Strojni vid je v industrijskih robotskih aplikacijah standardno orodje in večina proizvajalcev robotov ponuja svoje rešitve, ki so integrirane v robotsko razvojno okolje. Zaradi tega je te sisteme praviloma preprosto kalibrirati, uporabljati in nastavljanje. Če želimo v sistemu združiti strojni vid in robot različnih proizvajalcev, pa je treba izvesti kalibracijo po računskem postopku, ki je odvisen od konfiguracije kamere in robota. Prispevek prikazuje kalibracijo fiksne kamere za zajem planarne lege objektov in odjem z robotom s pomočjo inverzne homogene transformacije ter kalibracijo s psevdoinverzno matriko.

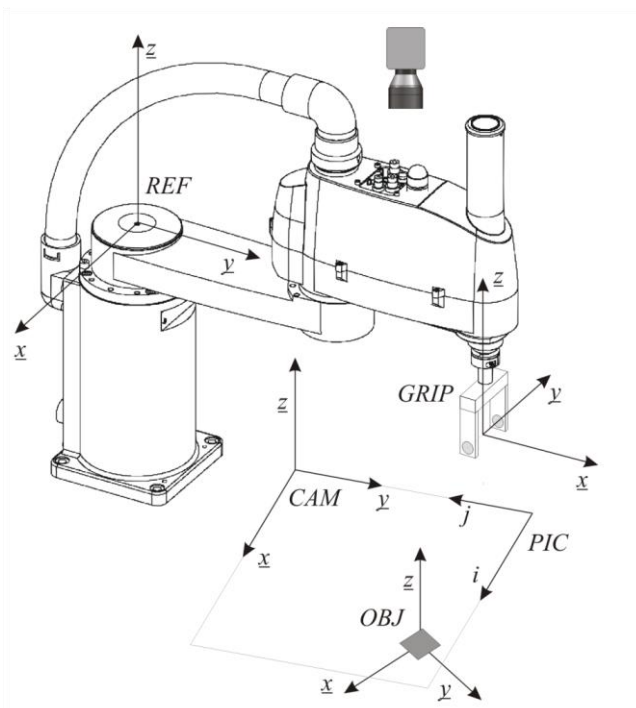
1. UVOD

Uporaba strojnega vida v povezavi z robotsko manipulacijo je standardna rešitev, ki od uporabnika ob predpostavki, da obvladuje obe področji, ne zahteva posebnih dodatnih znanj, saj proizvajalci robotskih sistemov v večini primerov poskrbijo za nizkonivojsko integracijo, ki preko intuitivnega vmesnika omogoča hitro kalibriranje, programiranje in nastavljanje ter preprosto uporabo v novem razvojnem okolju. Če želimo v sistemu združiti nekompatibilne komponente za manipulacijo in vid, pa moramo integracijo izvesti po računskem postopku, ki sledi neposredno iz geometrijskega opisa problema. Glavni poudarek pri robotskem vidu je na razpoznavanju objektov ali vzorcev ter njihovih leg v prostoru. Poleg obdelave same slike je torej bistvena umeščenost slikovnega področja v delovno območje robotskega manipulatorja. Kamero je treba kalibrirati glede na robot, kar pomeni podati odgovor v matematičnem zapisu na vprašanje, kje leži in kakšno je slikovno področje kamere glede na manipulator.

V kontekstu avtomatizacije prevladujejo planarni problemi, torej razpoznavanje objektov na znani ravnini/globini, robotska manipulacija s pomočjo strojnega vida pa predstavlja del rešitve praviloma časovno občutljivega in dragega procesa manipulacije in transporta objektov iz neurejenih stanj v urejene in definirane lege.

2. GEOMETRIJSKI OPIS

Medsebojno lego objektov v prostoru opišemo tako, da vsakemu objektu določimo lasten koordinatni sistem, ki je vedno fiksni glede na objekt. Medsebojna lega objektov je enaka medsebojni legi njihovih koordinatnih sistemov. Koordinatne sisteme postavimo kot kaže slika 1.



Slika 1: Postavitev koordinatnih sistemov.

Referenčni koordinatni sistem REF je fiksiran v prostoru, lahko ga postavimo kamorkoli, najbolj priročno ga je postaviti v koordinatno izhodišče baze robota. Robotsko orodje označimo s sistemom GRIP, ki predstavlja vrh kinematične verige robotske roke, lego objekta pa s sistemom OBJ. Sedaj vključimo še lego kamere. Ta za kalibracijo ni bistvena, bolj pomembna je lega slikovnega področja, zato v njegovo koordinatno izhodišče postavimo sistem CAM. Ti sistemi so vsi desnosučni in v enakih enotah (mm). Koordinatni sistem slike nekalibriranega slikovnega področja ima za enoto slikovni element in ima po konvenciji izhodišče v zgornjem levem kotu slike, označimo ga s PIC.

$${}^A H_B = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & x \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{en. 1})$$

Za opis medsebojne lege koordinatnih sistemov bomo uporabili homogene transformacije [1]. V prikazanem primeru imajo vse matrike enako obliko (en. 1), ki je nekoliko poenostavljena glede na splošno, saj so osi z vseh koordinatnih sistemov vzporedne in je torej za opis vseh medsebojnih rotacij dovolj samo en kot α okrog osi z. Medsebojne lege koordinatnih sistemov v homogenem zapisu so enostavno izražene kot multiplikacija homogenih transformacij:

$${}^i H_n = \prod_i^{n-1} {}^i H_{i+1} {}^{i+1} H_{i+2} \dots {}^{n-1} H_n, \quad (\text{en. 2})$$

Preko kalibrirane kamere lahko izrazimo lego objekta, ki je znana le kameri, tudi v referenčnem koordinatnem sistemu robota:

$${}^{REF} H_{GRIP} = {}^{REF} H_{CAM} {}^{CAM} H_{PIC} {}^{PIC} H_{OBJ} {}^{OBJ} H_{GRIP} \quad (\text{en. 3})$$

Dana postavitev omogoča poenostavitvi:

- Izmed vseh leg orodja GRIP nas zanima le tista, ko orodje prime želen objekt OBJ; takrat sta legi GRIP in OBJ poravnani

(istoležna sistema) in transformacija med njima dobi obliko enotske matrike.

- Razlika med sistemoma CAM in PIC je vedno le v predznaku ($j \rightarrow -y$) ter faktorju skaliranja med slikovnimi elementi in milimetri, ki ga enostavno izračunamo samo enkrat (npr. z meritvijo znane milimetske dimenzije objekta v slikovnih elementih), zato za sistem slike lahko privzamemo kar CAM.

Z upoštevanjem poenostvitev se en. 3 skrči v:

$${}^{REF} H_{OBJ} = {}^{REF} H_{CAM} {}^{CAM} H_{OBJ} \quad (\text{en. 4})$$

3. KALIBRACIJA Z INVERZNO HOMOGENO TRANSFORMACIJO

Teoretično najenostavnejša pot do kalibrirane kamere sledi kar direktno iz en. 4; objekt postavimo na poljubno mesto v vidno polje kamere. Če to storimo z robotom, lahko neposredno odčitamo lego vrha robota v trenutku, ko ta odloži objekt in dobimo ${}^{REF} H_{OBJ}$. To omogoča vsak uporabniški vmesnik za vodenje robotov in v splošnem dobimo 3 koordinate za pozicijo ter 3 za rotacijo. V prikazanem primeru gre za 3 koordinate pozicije in en kot rotacije okrog osi z. Nato robot umaknemo iz vidnega polja in lego odloženega objekta zajamemo s kamero ter tako dobimo ${}^{CAM} H_{OBJ}$. Zdaj sta znani 2 od treh matrik iz en. 4 in ${}^{REF} H_{CAM}$ izrazimo kot:

$${}^{REF} H_{CAM} = {}^{REF} H_{OBJ} {}^{CAM} H_{OBJ}^{-1} \quad (\text{en. 5})$$

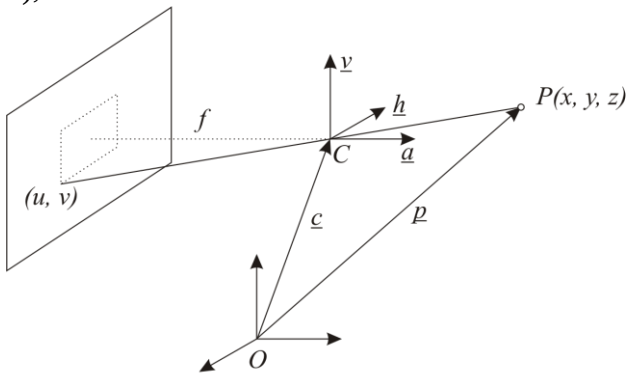
To je matematični odgovor na vprašanje, kje leži slikovno področje kamere glede na robot. Vprašanju, kakšno je to področje, pa je zadoščeno s podatkom o skaliranju med slikovnimi elementi in milimetri, ki je neposredno odvisen od goriščne razdalje uporabljenega objektiva in oddaljenosti od delovne ravnine.

Za kalibracijo smo uporabili geometrijsko rešitev, ki izhaja iz opisa sistema, ki je natanko determiniran, kar pomeni, da vsebuje le natanko toliko informacije, kot je nujno potrebno za rešitev. Ker ni redundance, ne vemo kako točna

in natančna je dobljena rešitev. Potrebno je torej pozorno in natančno pozicioniranje robota in objekta ter zanesljiv algoritem za določitev lege objekta glede na kamero. Velikost pogreškov se opazi šele ob uporabi rešitve, ko dobljeno matriko uporabimo v obratni smeri za preračun lege objekta OBJ iz sistema CAM v sistem REF in spremljamo pogreške robota glede na dejansko lego objektov. Najbolj teoretično preprosta rešitev se ne izkaže kot najbolj praktično uporabna.

4. KALIBRACIJA S PSEVDONINVERZNO MATRIKO

Pri kalibraciji poizkušamo najti sistem, ki bo poleg rešitve vseboval tudi redundantno informacijo o tem, kako dobra je dobljena rešitev. Kamero lahko opišemo kot vektorski model (slika 2),



Slika 2: Vektorski model kamere.

preslikavo med koordinatami kamere in točko v prostoru pa v matrični obliki [2]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = w'''(x, y, 1), \quad (\text{en. 6})$$

Če to matrično enačbo zapišemo kot sistem in vstavimo izraženo konstanto w''' , dobimo:

$$\begin{aligned} u_i S_{11} + v_i S_{21} + S_{31} - u_i x_i S_{13} - v_i x_i S_{23} - S_{33} x_i &= 0, \\ u_i S_{12} + v_i S_{22} + S_{32} - u_i y_i S_{13} - v_i y_i S_{23} - S_{33} y_i &= 0, \end{aligned} \quad (\text{en. 7})$$

Sistem spet zapišemo v matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_1 & -v_1 x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_n & -v_n x_n \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1 y_1 & -v_1 y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & u_n & v_n & 1 & -u_n y_n & -v_n y_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \\ S_{12} \\ S_{22} \\ S_{32} \\ S_{13} \\ S_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (\text{en. 8})$$

Zaradi homogenosti privzamemo, da je element $S_{33} = 1$, ali pa vsakega od ostalih elementov skaliramo z deljenjem z S_{33} , kar na sistem enačb nima vpliva. Sistem enačb (en. 8) je zapisan v obliki $\underline{A}\underline{x} = \underline{B}$ in je predeterminiran, zato rešitev za $\underline{x}$ poiščemo z uporabo psevdoinverzne matrike

$$\underline{x} = (\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{B} \quad (\text{en. 9})$$

$(\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T$ je psevdoinverzna ali Moore-Penrose inverzna matrika matrike $\underline{A}$ [2] in vrne rešitev parametrov z metodo najmanjših kvadratov za sistem (en. 8).

Pozicije točk v referenčnem in koordinatnem sistemu kamere dobimo podobno kot pri metodi z inverzno transformacijo, le da lahko to pot uporabimo več točk, saj večanje števila točk povečuje verjetnost, da bo kalibracija natančnejša. S to metodo dobimo sicer le pozicije točk v referenčnem koordinatnem sistemu, ki ustrezajo pozicijam v sistemu kamere. Kot rotacije, ki je potreben za popoln opis lege, pa lahko tudi tu izrazimo s funkcijo $\arctan$, pri čemer lahko vzamemo kateri koli par točk, rezultat pa je čim natančnejši, tem bolj narazen ležita izbrani točki. Za točnejši rezultat lahko upoštevamo več parov točk in vzamemo povprečje izračunanih kotov.

5. ZAKLJUČEK

Pokazali smo, da je integracija strojnega vida v robotsko manipulacijo le razširitev geometrijskega problema direktne kinematike

mehanizmov. Ker poznamo teoretični opis ter rešitev problema, vsi potrebni podatki pa so pridobljivi na enostaven način (lega objekta glede na robot in glede na kamero), ni ovir, da ne bi v sistem združili v izhodišču nekompatibilnih komponent različnih proizvajalcev. Potrebne so le minimalne možnosti programske komunikacije in programiranja. Od dveh prikazanih načinov za kalibracijo kamere ima praktično uporabno vrednost način s psevdoinverzno matriko, ki poleg kalibracije ob zadostnem številu točk ponuja tudi dobro oceno o natančnosti kalibracije. Z večanjem števila točk kvaliteta kalibracije narašča, vendar le do neke meje, saj prikazani vektorski model kamere zgolj približno opisuje realnost (za sisteme z večjo zahtevano točnostjo in natančnostjo je nujno upoštevati vsaj še model radialnega popačenja objektiva).

V industriji še prevladuje 2D robotski vid (hitrost, zanesljivost, preprostost), prihodnost pa je gotovo tridimenzionalna. Zanesljiv Bin-picking sistem (pobiranje poljubno na gosto naloženih in prekrivajočih se objektov) ima predispozicijo, da poenostavi in poceni proces transporta objektov v urejena stanja. V industrijski avtomatizaciji je oboje odločilno.

Literatura

- [1] Bajd, T.: Robotika, Založba FE in FRI, 2002.
- [2] Nagchaudhuri, A. Thint, M. Garg, D. P.: Camera-Robot Transform for Vision-Guided Tracking in a Manufacturing Workcell, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 5 (1992), str. 283 - 298.

IZVEDBA SPECIFIČNEGA PRIJEMALA IN PRIJEMANJE ZA VIZUALNO KONTROLO IZDELKA

Vid Črešnik³, Jure Škrabar², Aleš Zore¹, Jure Rejc¹, Marko Munih¹

¹ Laboratorij za robotiko, UL FE

² Kolektor Group d.o.o., ³ Kolektor Orodjarna d.o.o.

POVZETEK

V sklopu projekta GOSTOP smo zasnovali testno robotsko aplikacijo za nadzor kakovosti proizvodnih izdelkov z metodami strojnega vida. Uporabili smo sodelujoči robot UR5 na katerega smo namestili posebno prijemalo. Poleg robota in prijemala smo za zajemanje slik uporabili programsko okolje Kolektor Imaging Software podjetja Kolektor Orodjarna d.o.o., ki je tekel na osebem računalniku, ter kamero.

Delovanje sistema lahko razdelimo na tri podsklope in sicer na inicializacijo, prenašanje objekta (ang. pick and place) in vizualni nadzor (automated optical inspection - AOI). V inicializaciji vzpostavimo komunikacijo robota in računalnika preko TCP/IP komunikacijskega protokola, vnesemo parametre objekta in začetno mesto v paleti. V drugem podprogramu natakemo objekt s pomočjo posebnega prijemala in ga prinesemo pred kamero, kjer se prične tretji podprogram – vizualni nadzor.

1. UVOD

Dandanes je kontrola kakovosti zelo pomemben del serijske proizvodnje. Uporabljenih je več metod nadzora od vizualnega pregleda s strani delavca, ki išče večje nepravilnosti v oblikah in na površini, do dimenzijskega preverjanja s kalibri ali raznimi merilniki (kljunasto merilo, mikrometer itd.), kar pa lahko doprinese k upočasnitvi proizvodne linije oz. popolna kontrola ni mogoča. V zadnjem času pa se tudi v proizvodnjah pojavljajo metode vizualnega nadzora z optičnimi metodami.

Za nadzor kakovosti s kamero je potrebno zagotoviti, da se objekt oziroma področje zanimanja na objektu, ki ga želimo pregledati, nahaja v goriščni razdalji optične postavitve, med drugim pa je potrebno zagotoviti tudi ustrezno pozicijo in orientacijo objekta. Poleg visoke ponovljivosti, hitrosti delovanja ter prilagodljivost robota, sta zagotavljanje ponovljive pozicije in orientacije objekta pred optičnim sistemom pglavitna razloga za uporabo robota, saj z njim lahko zelo hitro premaknemo ali zasukamo objekt in preko komunikacijskih vodil prožimo zajem slike.

Adaptivnost, avtonomnost in pohitritev nadzora kakovosti ter hkrati pridobivanje podatkov za globoko učenje je cilj adaptivne robotske celice (ARC) znotraj raziskovalnega programa GOSTOP

(Gradniki, orodja in sistemi za tovarne prihodnosti) [1]. Avtonomnost ARC pomeni komunikacijo robota med ostalimi zunanjimi napravami in rekonfigurabilnost - odločanje na podlagi pridobljenih podatkov.

Poglavje 3 opisuje uporabljeno opremo v robotski aplikaciji, 4. poglavje opisuje delovanje aplikacije, v zadnjem, 5. poglavju pa so strnjene misli o nadaljnjem delu.

2. O PROGRAMU GOSTOP

Cilj predlaganega programa GOSTOP je pospešiti razvoj in izgradnjo koncepta pametnih tovarn v Sloveniji in odgovoriti na aktualne potrebe slovenskega gospodarstva, kjer nekatera industrijska podjetja že skušajo uvajati koncept pametnih tovarn v svojo proizvodnjo. V programu so združene raziskovalne skupine iz trinajstih podjetij in šestih raziskovalnih organizacij, ki imajo kompatibilne raziskovalno-razvojne programe in že izvajajo raziskave na področju pametnih tovarn. Upoštevajoč slovensko strategijo pametne specializacije kot tudi strategijo razvoja koncepta pametnih tovarn, ki se uveljavlja v EU, smo identificirali štiri področja, na katerih lahko Slovenija doseže pomembne preboje v bližnji prihodnosti: tehnologije vodenja, orodjarstvo, robotika in fotonika. S tem je v GOSTOP združena večina horizontalnih področij iz strategije pametne

specializacije Slovenije na področju pametnih tovarn.

3. UPORABLJENA OPREMA

Z namenom avtomatizacije meritev oziroma za avtomatiziran zajem slik merjenja je uporabljen:

- sodelujoči robot UR5 (slika 1), proizvajalca Universal Robots A/S [2],
- namensko zasnovano prijemalo za natikanje in iztikanje merjenja,
- programsko okolje KiS (Kolektor Imaging Software) za zajem in obdelavo slik, ki teče na osebnem računalniku,
- paleta merjencev.

Sodelujoči robot UR5

Robot UR5 je po zasnovi sodelujoči robot (ang. collaborative robot), tj. robot, ki lahko deluje v odprtem delovnem okolju brez zaščitne kletke tudi v primeru bližine človeka, kar je odvisno od zasnove same aplikacije oz. od uporabljenega orodja, obdelovanca ter hitrosti in način gibanja robota.

Glavne lastnosti, ki so pripomogle, da robot šteje med sodelujoče robote so:

- zaznavanje trkov,
- omejitev sile in moči,
- omejitev hitrosti gibanja v sklepih in na vrhu robota,
- omejitev delovnega prostora,
- vodenje z roko.

Tabela 1: Specifikacije sodelujočega robota UR5.

Doseg:	850 mm
Nosilnost:	5 kg
Število stopenj prostosti:	6
Ponovljivost:	0,1 – 0,0039 mm

Poleg »sodelujočih« lastnosti se robot lahko ponaša z razmeroma visoko nosilnostjo (5 kg) glede na lastno maso (18,4 kg), sorazmerno enostavno programiranje s pomočjo širokega zaslona na dotik in učenje točk z vodenjem z roko.

Za namene izvedbe eksperimentalne aplikacije ima tudi zadovoljiv doseg in ponovljivost.

Robot podpira številne komunikacijske protokole za komunikacijo z drugimi perifernimi enotami, kot so Ethernet TCP/IP, Modbus in ProfiNet [3].

Prijemalo

Zasnova prijemala temelji na osnovi *merilnega trna*, ki se ga uporablja tudi v proizvodnih procesih za manipulacijo in preizkušanje merjencev. Trn je posebno zasnovana konica na katero se največkrat



Slika 1: Sodelujoči robot UR5 [2].



Slika 2: Slika merilnega trna.

natika merjence in preverja ustreznost izvrtin oziroma drugačnih odprtin.

Z namenom natikanja objekta smo merilno pripravo ustrezno prilagodili tako, da ga je možno namestiti na prirobnico, katero smo namestili na vrh robota.

Z merilnim trnom lahko merjenec samo natakemo, saj sta premer merilnega trna in izvrtina v središču merjenca dimenzionirana na tesni ujem.

Izmet merjencev smo rešili z dodanim servo motorjem in 3D natisnjenim plaščem valja. Plašč valja preko ekscentrika, ki pretvori rotacijo motorja v vertikalno translacijo, potisne merjenec z merilnega trna (slika 3).

Krmiljenje servo motorja je izvedeno z mikrokrmilnikom NXP LPC2138, ki je povezan s krmilnikom robota.

PC / Programska oprema KiS 2.6.2

Na osebnem računalniku se uporablja v Kolektorju razvito programsko opremo za obdelavo slik KiS (**K**olektor **I**maging **S**oftware), ki izhaja iz približno 20 let internega razvoja in izkušenj na aplikacijah. Okolje predstavlja skupek posameznih gradnikov za zajem slik in širokega nabora operatorjev za obdelavo slik. Integrirano ima tudi podporo za povezovanje s kamerami, krmilniki, motorji itd. Povezavo s perifernimi enotami je mogoče vzpostaviti preko ProfiNet, Modbus, RS232 in TCP/IP komunikacijskih protokolov.

Program je sestavljen z uporabo časovnega zaporedja ukazov za inicializacijo robota ter optičnega sistema, ukazov za zajem slike, preračun začetnega zasuka in poravnavo merjenca (poglavje 4).

Trenutno je komunikacija med robotom in programskim okoljem KiS vzpostavljena preko TCP/IP protokola in temu ustrezno iz obeh strani pošiljamo ukaze v podatkovni obliki stringov. Želja v prihodnosti je prehod na ProfiNet komunikacijo, kjer bi se pošiljalo oziroma preverjalo ustrezno postavljene bite v registrih robota in splošno namenskih vhodno/izhodnih priključkih.

4. DELOVANJE APLIKACIJE

Delovanje aplikacije delimo na dva glavna dela, glede na lokacijo izvajanja programa (slika 4):

- robotski del in
- programski del za zajem in obdelavo slik - KiS.

Oba dela pa lahko v nadaljevanju razdelimo še na:

- inicializacijo in
- vizualni nadzor.

Pri robotskem delu imamo znotraj delovanja integriran poddel za manipulacijo merjencev iz palete in v paletu. Oba glavna dela aplikacije delujeta kot dva neodvisna dela, ki za nadaljevanje izvajanja čakata na ustrezne medsebojne ukaze.

Inicializacija

Tik ob zagonu delovanja se na obeh straneh izvede inicializacija v kateri preverimo komunikacijsko povezavo in delovanje prijemala. Najprej se izvede vzpostavitev TCP/IP povezave med robotom in računalnikom, nato pa v naslednjem koraku KiS pošlje številski podatek o dimenzijskih vrednostih merjenca in začetno mesto v paleti, kjer so razvrščeni merjenci. Na strani robota se preveri delovanje izmeta



Slika 3: Prijemalo - skupek plašča valja, merilnega trna (v središču plašča valja) in servo motorja (v ozadju).

merjencev – delovanje servo motorja na prijemalu. Preveri se ali se prijemalo aktivira ob postavljenem digitalnem signalu. V kolikor bi pred inicializacijo že imeli nataknen merjenec, bi ga med samo inicializacijo izvrgli in s tem preprečili poškodbe ob natikanju novega merjenca.

Pobiranje in manipulacija merjencev

Angleški izraz za pobiranje, manipulacijo in odlaganje objektov z robotom je *pick and place*. Merjenci so zloženi v paleti 10x15. S pomočjo čarovnika za palete znotraj programskega okolja za programiranje UR robota se z vhodnimi parametri določi pozicije oglišč ter število objektov med posameznimi oglišči palete. Mesta na paleti so ustrezno oštevilčena z indeksom.

Indeks lokacije posameznega merjenca, kateri je predmet kontrole, se preko TCP/IP povezave pošlje iz KiS-a kot vhodni parameter krmilniku robota. Ustreznemu merjencu se približamo, upočasnim hitrost gibanja, da merjenca ob natikanju ne poškodujemo ter ga natakne s pomočjo prijemala. Merjenec natakne do te mere, da se ob prenašanju ne iztakne, saj so si palete med seboj dimenzijsko podobne a dimenzijsko minimalno odstopajo, kar ima za posledico, da v paleti niso vsi merjenci identično poravnani. Optimalno natikanje dosežemo s kalibracijskim prislonom merjenca ob naležno

površino. S tem zagotovimo, da se površina merjenca predvidena za zajem slike, nahaja v goriščni razdalji optičnega sistema in preprečimo navidezno opletanje slik okoli središča rotacije. Po zajetu slik se merjenec manipulira nazaj na mesto odvzema v paleti.

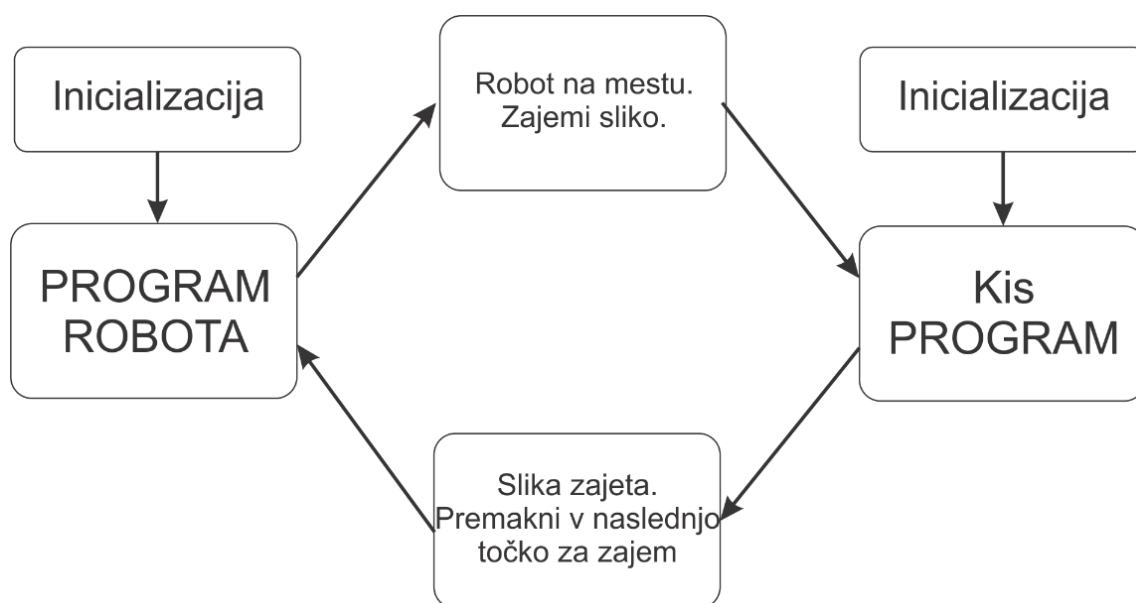
Učenje točk za manipulacijo merjencev je pohitrilo omogočeno vodenje z roko. Ker človek s svojimi čutili ni sposoben zagotoviti ustrezno natančnost orientacije, se vsem točkam, naučenim z metodo vodenje z roko, naknadno ustrezno precizno popravi orientacijo. Tako je zagotovljena zahtevana pravokotnost oziroma vzporednost z ravninami.

Vizualni nadzor

To je najpomembnejši del aplikacije. Potrebno je zajeti večje število kvalitetnih slik v kratkem časovnem obdobju za kreiranje zbirke slik, nad katerimi se bo v nadaljnjih korakih izvedlo globoko učenje za detekcijo napak na površini merjencev.

Na strani robota je vizualni nadzor še dodatno razdeljen na štiri podsklope glede na smer pogleda kamere na srebrno površino merjenca:

- čelno,
- z vrha,
- iz leve strani in
- iz desne strani.



Slika 2: Shematski prikaz delovanja programa robota in Kis-a, ter potek komunikacije.

Na vsakem izmed pogledov se zajame po osem slik (odvisno od vrste merjenja), torej skupaj 32 zajetih slik. Ker so poškodbe srebrne površine v večini primerov lokalne narave, a preko robov stičnih površin povezane, je potrebno merjenec pregledati iz štirih različnih smeri - optimalno izrazimo napako.

Pred samim začetkom nadzora oziroma zajemanjem slik izvedemo poravnavo merjenja. Ko objekt premaknemo pred optični sistem zajamemo prvo sliko in na podlagi te slike se izračuna začetni zasuk (ang. offset) merjenja glede na optični sistem in merjenec ustrezno poravnamo.

Po poravnavi vrh orodja skupaj z merjencem zasukamo tako, da imamo s kamero čelni pogled na srebrno površino merjenja. Na samem merjencu je v našem primeru osem, po obodu enakomerno razporejenih, srebrnih površin. Zato je potrebno za zajem slik površin merjenec osemkrat zasukati za konstanten kot 45° . Po vsakem opravljenem zasuku robot signalizirala KiS-u s poslanim sporočilom in čaka na povratno sporočilo o zajeti sliki. S tem so zajete slike iz čelne strani. V naslednjem koraku izvedemo premik/zasuk prijemala okoli ene osi koordinatnega sistema središča orodja (TCP – tool center point) tako, da je omogočen zajem slik vrha srebrne površine. Sledi osem zajemov slik vrha srebrne površine po predhodno opisanem postopku ter po enakem kopitu še srebrne površine iz obeh stranskih smeri/pogledov.

5. ZAKLJUČEK

Uspešno smo vzpostavili delovanje eksperimentalne aplikacije za zajem slik srebrne površine merjenja z optičnim sistemom z različnimi pogledi. Aplikacija se je vzpostavila z namenom generiranja slikovne baze podatkov za potrebe razvoja AOI metod. Uporabljena oprema je sestavljena iz robota UR5, posebno zasnovanega prijemala, optičnega sistema sestavljenega iz kamere, objektiva in svetilnega vira, ter osebni računalnik s programsko opremo za zajem in obdelavo slik (slika 5). Komunikacija

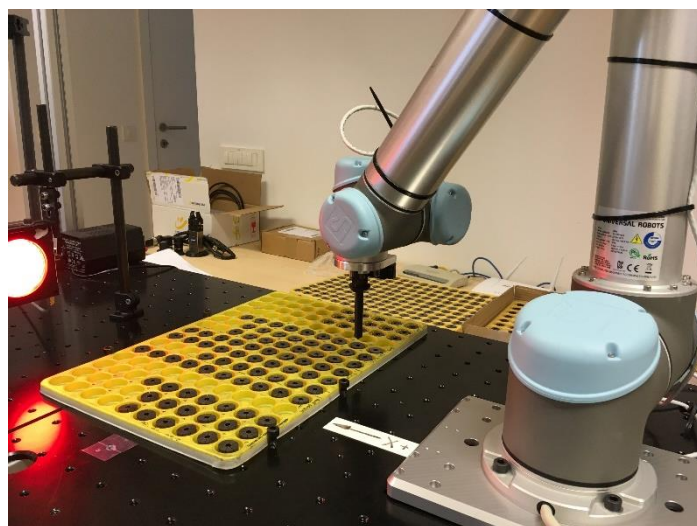
med robotom in računalnikom temelji na TCP/IP standardu.

Za vsak objekt je zajetih 32 slik, zato je bila zelo zaželeno optimizacija delovanja. Časovni cikel zajema slik se je z optimizacijo skrajšal iz dveh minut in pol na slabo minuto oz. iz 6,25h/paleto na 2,45h/paleto (150 kosov v paleti). Za nadaljnje delo ostaja tudi želja po dodatni optimizaciji časovnega cikla. Potrebno je tudi raziskati možnosti drugega načina vnosa in shranjevanja ogliščnih točk palete, saj je v sedanji izvedbi robot ročno voden v posamezne točke, ideja pa je po avtomatiziranem procesu na podlagi vizualne informacije.

Zadnji korak v optimizaciji je tudi prehod iz TCP/IP na ProfiNet komunikacijski protokol, ki omogoča hitrejši pretok informacij, boljše modularnost in lažji nadzor delovanja ter vodenja celotnega procesa.

Literatura

- [1] GOSTOP: <https://www.gostop.si/>
- [2] Universal robots: <https://www.universal-robots.com/>
- [3] ProfiNet, <http://www.profinet.com/technology/profinet/>



Slika 3: Končna postavitev robota s prijemalom, kamere z osvetlitvijo ter palete z merjenci.

NEKAJ IZHODIŠČ BREZ KATERIH NI PAMETNE PROIZVODNJE

Gorazd RAKOVEC
Kibernova, s.p.

POVZETEK

Dejstvo je, da v 4. industrijski revoluciji serije komponent in sklopov izdelkov ostajajo, zato ostaja CIM jedro Pametne proizvodnje. Dobimo hibridno Smart&CIM Pametno proizvodnjo. V serijski proizvodnji delov ostaja Ghost shift proizvodnja najoptimalnejša oblika proizvodnje. Bližnjic za poenostavitev projektov transformacije Pametne proizvodnje ni. Prvi pogoj za koristno izvedbo transformacije je kompetenten CDO in arhitekt Pametne proizvodnje, ki je opravil šolo tovarne bodočnosti prof. Peklenika. Ta postaja tudi velika konkurenčna prednost Slovenije. Združevanje 4. revolucije s projekti vitke proizvodnje, ki temelji na ravno obratnih principih, z namenom da bi z eno ekipo istočasno naredili dvakratni dobiček, povzroči konec revolucije. Umetna inteligenca ni cilj razvoja Pametne proizvodnje, večjo vlogo lahko doseže v storitvah. Slepo zajemanje vseh podatkov iz krmilnikov večine strojev in tvorjenje velikih baz neuporabnih podatkov je ena večjih pridobitniških prevar.

1. CIM KONCEPT OSTAJA JEDRO 4. REVOLUCIJE

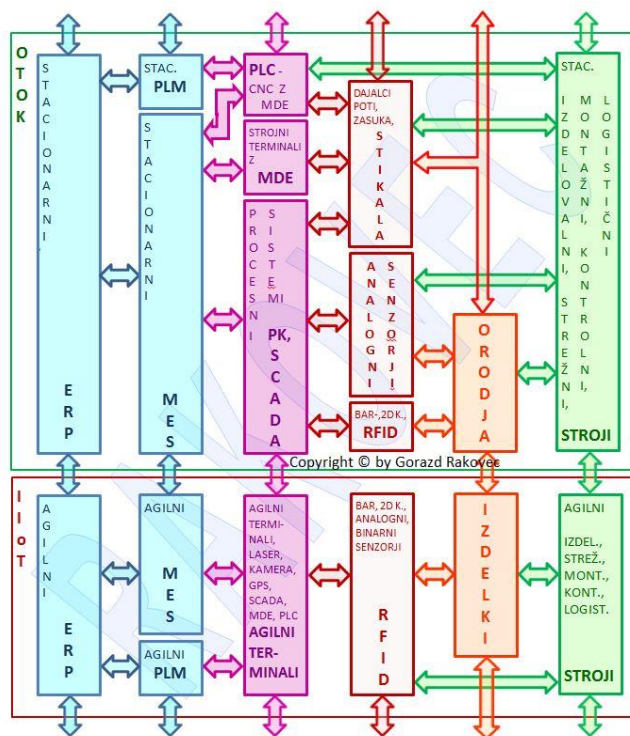
Ko govorimo o 4. industrijski revoluciji, moramo najprej pogledati njeno pomensko definicijo; v angleščini «Customized mass production (širše Mass customization)«, kar konkretno pomeni; izdelki po naročilu kupca izdelani v kolaborativno fleksibilni proizvodnji po ceni ne dosti večji od izdelkov masovne proizvodnje. Ta strategija bo določala stanje preživetja ali blaginje v industriji, posledično v storitvah, s skupnim učinkom v celotnih državah in nacijah v naslednjem desetletju in več. Nemci so revolucijo začeli, drugje pa se šele prebujajo. To ni še eden od projektov, je transformacija podjetja, kvalitetni preskok, kot iz ličinke v metulja.

Vsak izdelek naj bi bil drugačen, vendar večinoma to ni možno v vseh sestavnih delih. Pri avtomobilih, ki imajo več tisoč sestavnih delov, bo različnih okrog 10 % delov. V globalnem svetu poteka tekma, kdo bo dosegel večjo individualnost. Pri izdelkih z manj deli bo ta odstotek lahko večji. Torej bo do 90% delov še vedno skupnih, kar pomeni v serijah. Te se bodo sicer manjšale, a serije delov in sklopov bodo ostale. Ker imamo v Sloveniji večino proizvodnje delov in sklopov, je za nas to bistvenega pomena.

Zato moramo narediti adaptacijo strategije in modelov Pametne proizvodnje.

Kjer ostane serijska proizvodnja, ostane znani CIM (Computer Integrated Manufacturing) koncept iz 3. revolucije, ki pa mu bo treba dograditi ustrezno Smart nadgradnjo, tako da bomo dobili hibridni Smart&CIM Factory koncept proizvodnje v kateri je delež CIM-a tudi do 90% ali več (Slika 1). Smart nadgradnja CIM-a pa bo v vsaki proizvodnji drugačna in odvisna predvsem od znanja arhitekta CDO (Chief Digital Officer). Dejstvo je, da gre v 4. revoluciji predvsem za nadgradnjo CIM sistemov in procesov. CIM tovarno prihodnosti je pri nas predaval svetovno znani prof. Janez Peklenik, ki je leta 1964 na Univerzi Birmingham v Angliji ustanovil prvo katedro za računalniško vodene stroje na svetu. Kot akademski pionir 3. Industrijske revolucije je razvil tudi CIM koncept tovarne prihodnosti in ga predaval na Ljubljanski Fakulteti za strojništvo od leta 1973 do 1996, ko se je upokojil. Predavanja so nadaljevali njegovi asistenti, ki so postali profesorji. Zato lahko rečemo, da imamo v Sloveniji šolo tovarne prihodnosti že od leta 1973 in tudi več sto izobraženih inženirjev, magistrov, doktorjev na tem področju. CIM šola tovarne bodočnosti profesorja Peklenika je edinstvena v Evropi in svetu in je danes glavna konkurenčna prednost Slovenije v 4. Industrijski revoluciji. Peklenikov

diplomant, ki je nenehno delal v proizvodnji na vseh sistemih 4. revolucije, si je nabral tudi dovolj izkušenj, da je danes po dvajset, trideset letih projektov v proizvodnji postal kompetenten za nadgradnjo v Pametno proizvodnjo 4. Industrijske revolucije.



Slika 1: Sinteza Smart&CIM sistemov v stacionarni otok in agilni IloT (Industrial Internet of Things)

2. VITKA PROIZVODNJA KOT BLOKADA REVOLUCIJE

Med tretjo industrijsko revolucijo so v industriji, največ v japonski Toyoti, razvili tudi mnogo metod za optimiranje proizvodnje, ki so združene pod nazivom vitka proizvodnja (Lean production), ki ima namen odstraniti iz proizvodnje vse, kar ni dodana vrednost. Lobi vitka proizvodnja je v Sloveniji dokaj močan in propagira projekte vitke proizvodnje kot 4. revolucijo. Ponekod so razmišljali, da bodo naredili dvakrat več prihrankov, če združijo projekte vitke proizvodnje in 4. revolucije. Marsikje so dali osebi zadolženi za vitko proizvodnjo, da nadaljuje z delom, pa bo kar

hkrati z lean projekti narejena še 4. revolucija. Žal so projekti 4. Industrijske revolucije in vitkosti nezdružljivi. Zakaj?

Dejstvo je, da gre za dva popolnoma nasprotna-nezdružljiva razvojna koncepta (Preglednica 1). Vitka proizvodnja odstranjuje iz proizvodnje vse odvečno (waste), 4. Industrijska revolucija pa dodaja najmodernejšo kibernetsko tehnologijo za večanje dodane vrednosti v vse proizvodne oddelke, kar ima posledice v izboljšanju procesov, načinu razmišljanja, dela, organizacije, itd. 4. Industrijska revolucija niso projekti optimizacije, temveč transformacija-preobrazba cele proizvodnje na višji nivo. V globalnem svetu poteka tekma, kdo bo dosegel višjega.

Dejstvo je, da gre za dva popolnoma nasprotna-nezdružljiva razvojna koncepta (Preglednica 1). Vitka proizvodnja odstranjuje iz proizvodnje vse odvečno (waste), 4. Industrijska revolucija pa dodaja najmodernejšo kibernetsko tehnologijo za večanje dodane vrednosti v vse proizvodne oddelke, kar ima posledice v izboljšanju procesov, načinu razmišljanja, dela, organizacije, itd. 4. Industrijska revolucija niso projekti optimizacije, temveč transformacija-preobrazba cele proizvodnje na višji nivo. V globalnem svetu poteka tekma, kdo bo dosegel višjega.

Preglednica 1: Dodajanje-nadgradnja (smart) in odvzemanje (lean) prvin proizvodnje kot živega organizma

Dodajanje kibernetskih sistemov za večanje dodane vrednosti proizvodnje kot organizma (smart)	Odvzemanje odvečnih prvin proizvodnje – hujšanje (lean)
Večje znanje oseb: razmišljanje z več dimenzijami in parametri	materialnih zalog
Več učenja: novih informacij in slik nevidnih procesov	podatkov
Večanje možganskih kapacitet: večje baze podatkov, več programov, mikroprocesorjev, spominskih enot	procesov, energije
Večanje mišic, dodatne roke,	časov

noge: več robotov, strojev, avtomatskih vozičkov	
Ojačitev živčnega sistema: dodatni agilni računalniki v brezžičnem omrežju, merilniki, senzorji	dokumentov
Izboljšana prebava: optimiran energetski sistem	poti
Boljša zdravstvena oskrba: prediktivno vzdrževanje	površin, prostorov
Večja hitrost organizma: agilnost, odzivnost, hitrost fizičnih procesov	delovnih sredstev, inventarja, ...
Izboljšanje čutil: dograditev senzorjev, stikal, števecv	
Dodatna nova čutila: procesni senzorji z merilniki: sile, tlaka, akustike, vibracij, temperature, električnega toka, poti, hitrosti, časov, ...	
Boljši izobraževalni sistem: multimedijška izobraževanja na delovnem mestu	

V 4. revoluciji torej dodajamo najmodernejšše kibernetske sisteme za povečanje dodane vrednosti, spremenjeni procesi, novi poslovni modeli, pa so rezultat njihove uporabe. Ker se dodaja moderna kibernetska delovna sredstva, so potrebne velike investicije. Pri metodah vitkosti fizično zmanjšujemo stroške neposredno na mestih v proizvodnji in logistiki in včasih posledično tudi večamo produktivnost in kakovost. Ker gre za izobraževanje in motiviranje zaposlenih, pri vitkosti večinoma ni velikih investicij. 4. revolucija je nova znanost, novi sistemi, novi procesi, poslovni modeli, nov način razmišljanja, novi podatki, nove metode optimiranja, preskok v delu in razmišljanju, nova era, lean production je optimiranje obstoječega stanja, nič bistveno novega.

Če pogledamo Preglednico 2 vidimo, da so si aktivnosti za vodenje in razvoj 4. revolucije in vitkost v močnem nasprotju. Obeh aktivnosti ne morejo voditi in razvijati iste osebe istočasno. Obeh vrst projektov ni možno začeti istočasno. 4. revolucija ni avtomatizacija lean metod! Lahko se

projekte vitkosti razvije in izvede pred revolucijo ali po njej. Če so že razviti preje, se jih med revolucijo neopazno vzdržuje. Če podjetje v dvajsetih letih ni uvedlo metod vitkosti, lahko še počaka nekaj let, da najprej izvede 4. revolucijo, kjer je čas bistven. Če se preobrazbo Pametne proizvodnje izvaja na enak način, kot projekte vitkosti, revolucija zaide v slepo ulico in propade, dragi nabavljeni sistemi pa ostanejo kot spomenik revolucije v proizvodnji.

Preglednica 2: Primerjave razvoja in menedžmenta Smart&CIM transformacije ter Lean projektov.

<u>Smart&CIM proizvodnja</u>	<u>Lean proizvodnja</u>
Dodajanje najmodernejših kibernetskih tehnologij in njena sinteza z obstoječo CIM proizvodnjo	Odstranjevanje vsega odvečnega iz proizvodnje
Celovita transformacija cele proizvodnje	Klasični projekti brez bistvenih sprememb
Sistemska nadgradnja proizvodnje za en nivo višje (iz 3. v 4. ero)	Optimizacije istega sistema proizvodnje
Sisteme načrtuje in vodi projekte samo nekaj posameznikov, realizacijo izdelajo znani inženiring izvajalci, uporabljajo vsi	Spremembe načrtujejo in izvajajo in uporabljajo skoraj vsi v proizvodnji timsko
Kompetentne osebe imajo najvišjo proizvodno kibernetsko izobrazbo	Vključene so vse izobrazbe z najnižjimi vred
Potrebne izkušnje v proizvodnji 20, 30 ali več let	Člani tima imajo izkušnje od nič let do odhoda v pokoj
CIM inženirska izobrazba avtomatizacije je potrebna	Inženirska izobrazba ni potrebna
Sistemski preskok za en nivo	Postopne izboljšave z majhnimi koraki na istem nivoju
Nove metode temeljijo na uporabi nove kibernetske tehnologije	Metode se izvajajo ročno ali z obstoječimi orodji z motivacijo in

	prepričevanjem oseb
Uporaba novih nenapisanih menedžerskih metod	Uporaba metod iz menedžerskih in MBA šol
Industrija 4.0 je nova znanost, novo področje	Vitkost se izvaja z znanostmi 3. revolucije
Potrebna nova kibernetska pisarna z dodatnimi kompetentnimi osebami	Projekte izvajajo obstoječe osebe in organizacija proizvodnje ostaja ista
Potrebno le nekaj kibernetsko kompetentnih oseb, ki jih vodi CDO	Projekte vodi obstoječe vodstvo proizvodnje
Samo nekaj kompetentnih oseb razume celoto koncepta Pametne proizvodnje, ostalim celote ni treba poznati, delajo na parcialnih nalogah.	Vsi na projektu razumejo metode vitkosti
Temelji na kapitalističnih odnosih	Velika možnost vračanja v samoupravljanje

Dovolj je, da je za pametno proizvodnjo kot celoto v večjem podjetju kompetentnih samo nekaj ljudi: CDO, arhitekt in nekaj kibernetskih projektnih vodij zbranih v kibernetski pisarni. Ti se ukvarjajo samo s 4. revolucijo. Ostali ne poznajo sistema nadgradenj Pametne proizvodnje kot celote. Dovolj je, da vsakdo pozna samo svoj del. Mnogi inženiring izvajalci s področja strojništva, elektrotehnike, informatike dobijo specifikacije in ne rabijo poznati celote. CDO razvije koncept celotne Pametne proizvodnje in potem usklajuje projekte realizacije, da proizvodnja postane ena celota. Kibernetska pisarna skrbi tudi za razvoj in izvedbo izobraževanj in nadaljnjih nadgradenj. Kibernetska pisarna je močno ločena od morebitne lean pisarne, lean specialistov, ipd.

3. GHOST SHIFT PROIZVODNJA KOT NAJOPTIMALNEJŠA SERIJSKA PROIZVODNJA DELOV

V osemdesetih letih, ko so se razmahnili poslovni informacijski sistemi, so se pojavili tudi prvi procesni nadzorni sistemi na obdelovalnih strojih kosovne proizvodnje. Procesni sistem ima

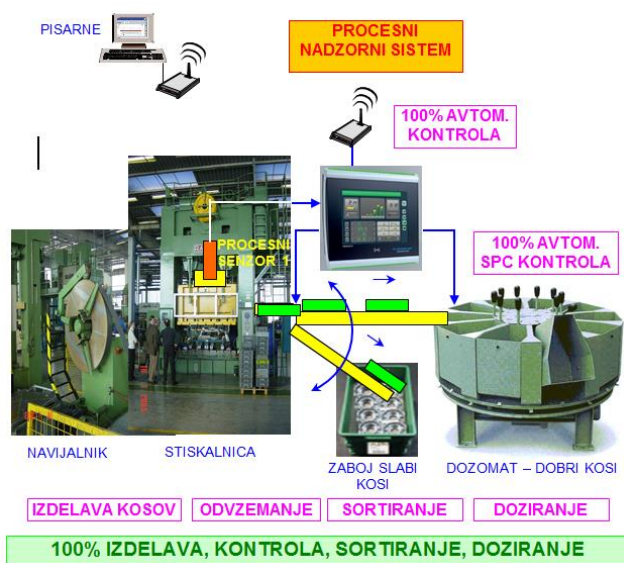
analogne senzorje za merjenje sile vgrajene v orodjih in strojih, merilnik pa nadgrajen z računalnikom, ki prikazuje, analizira in diagnosticira analogne krivulje mehanskega procesa na ekranu. V kosovni proizvodnji je bil pionir profesor Brankamp iz Nemčije, ki je razvil in v lastni firmi začel izdelovati prve procesne nadzorne sisteme. Slika procesa pove več kot sto besed. Digitalizirana krivulja cikličnega procesa mehanskega stroja je glavna informacija 4. revolucije. Nadzorni sistem (Slika 2) avtomatsko postavi tudi meje po procesih, izvaja razne analize procesov in tako čuva orodje pred poškodbami, zagotavlja kakovost izdelkov proti 0PPM, istočasno pa povečuje produktivnost strojev.



Slika 2: Procesni nadzorni sistem BRANKAMP MARPOSS X7 za nadzor nevidnih mehanskih cikličnih procesnih parametrov sile, akustike, ultraemisije, z umetno inteligenco, s signali za ustavitev stroja v nekaj milisekundah po prekoračitvi meje procesa, deluje pri delovnih ciklih preko 2000/minuto, za 100% kontrolo 0PPM med procesom, s 24 analognimi vhodi-senzorji, 20 binarnimi vhodi/izhodi hkrati, z avtomatskim učnim postopkom nastavljanja mej procesov, avtomatskim diagnosticiranjem,...

(www.brankamp.com)

Kot ima v kosovni proizvodnji vsak stroj svoj krmilnik, tako je potrebno vsakemu stroju dograditi tudi svojo procesno nadzorno enoto - PK, ki ob napačnih procesih ustavlja stroj v milisekundnih časih. Vizualizacija, izdelava podatkov in avtomatsko diagnosticiranje se izvajajo istočasno. Profesor Brankamp je leta 1989 izumil in postavil tudi prvo Ghost shift proizvodnjo (nemško: Geisterschicht) na osnovi strojev z dograjenimi procesnimi nadzornimi in avtomatiziranimi strežnimi sistemi (Slika 3). Nadzorni sistem izvaja 100% avtomatsko kontrolo tehnoloških procesov (namesto izdelkov) med procesom (in process control) in krmili dozomat, ki avtomatizira tudi SPC kontrolo. Procesni senzorji sile, akustike, ipd. so kot kamere s katerimi se snema dejanski za optične kamere neviden proces. S svetlobno kamero ni možno industrijsko snemati mehanskih tehnoloških procesov. Ghost shift proizvodnja je najbolj optimalna oblika avtomatizirane kosovne proizvodnje delov.



Slika 3: Reducirana proizvodnja Ghost shift® (Brankamp Marposs, www.brankamp.com)

Ghost shift ostaja jedro proizvodnje delov tudi v 4. revoluciji. V Sloveniji je edino Ghost shift proizvodnjo postavila firm Brankamp Marposs v kosovni proizvodnji s preko 60 stroji in deluje od leta 2014.

4. UMETNA INTELIGENCA NI CILJ 4. REVOLUCIJE

V informatiki velja umetna inteligenca kot najvišja oblika softvera. Seveda je tudi to področje staro preko 30 let. Problem je, da v kosovni proizvodnji v tako dolgem času ni nastalo skoraj nič pomembnih aplikacij umetne inteligence. Razlog je v izjemno kompleksnih in nepredvidljivih procesih. Tehnološki procesi so še vedno isti in še bolj kompleksni. Istočasno so razviti klasični programi za simulacije večine procesov, ki pa niso najbolj natančni. Umetna inteligenca je preko trideset let star izraz. Revolucija uporablja pridevnik pametni, kar je širši pojem. Sistem je pameten lahko tudi brez umetne inteligence. Kolaborativni sistemi ojačujejo pamet z dodajanjem človeške pameti in imamo sintezo obeh; umetne in človeške inteligence - pameti... Umetna inteligenca mora vplivati na stroje preko ustreznih aktuatorjev in ti naprej na orodja, da se spremeni nekaj na procesih, v obratnem primeru ne povečuje dodane vrednosti.

5. ZAJEMANJE VSEH PODATKOV IZ KRMILNIKOV STROJEV JE PREVARA

Pojavljajo se ponudniki informacijsko komunikacijskih sistemov, ki ne razumejo strojev, in ne proizvodnje, bi pa radi prodali čimveč svojih sicer modernih sistemov. Ker ne vedo, katere podatke zajemati iz strojev in orodij, priporočajo sisteme zajema kar vseh podatkov iz krmilnikov strojev. Ker ne vedo, iz katerih strojev bi zajemali podatke, predlagajo kar vse stroje, da bi morali izdelati čimveč ustreznih vmesnikov po naročilu. Večina strojev nima vgrajenih procesnih senzorjev in zato nimajo procesnih podatkov v krmilnikih. Enaki podatki različnih strojev večinoma niso primerljivi. Zajeti podatki iz večine strojev se stekajo v velike baze podatkov, kjer bi se večletno kopičila ogromna količina večinoma neuporabnih podatkov in tako bi maksimalno lahko zaslužili tudi z bazami podatkov. Potem naj bi uporabniki kupili samo še orodja za rudarjenje podatkov in kar sami rudarili

– izdelovali analize. Večina neuporabnih podatkov naj bi jim koristila šele čez nekaj let, kar je doba, v kateri bi spretneži dovolj zaračunavali tudi vzdrževanje vmesnikov, komunikacij in baz podatkov, programskih licenc, ipd. Odgovornost za izdelavo analiz tako spretno prenesejo na uporabnike. Z rudarjenjem po tako dobljenih podatkih ni možno dobiti skoraj nič koristnega. Sistemi za rudarjenje podatkov so stari preko dvajset let in jih skoraj nihče ne uporablja za spremljanje proizvodnje. Ponudniki iščejo nekompetentne stranke, ki tega ne vedo. Tako želijo prodati maksimalno omrežje, vse možne vmesnike in najobsežnejše baze večinoma neuporabnih podatkov, odgovornost za neuporaben sistem pa spretno podtaknejo uporabnikom.

6. SKLEP

Marsikje začenjajo z razvojem Pametne proizvodnje. Različni lobiji bi radi revolucijo izkoristili za svoj vpliv. Bistvo 4. revolucije pa temelji na matematičnih zakonitostih, ki vsako najmanjšo napako ali odstopanje neizprosno kaznujejo. V 4. revoluciji ni prostora za nekompetentnost. Timsko delo po pravilih menedžerskih šol iz 3. revolucije ne daje pozitivnih učinkov. Kompetentno in nekompetentno zgrajeni sistemi v praksi delujejo, a z bistveno razliko tako, da sistemi nepravilno izvedenih projektov dodano vrednost zmanjšujejo, namesto večajo. Vsako podjetje potrebuje najmanj enega arhitekta- CDO, ki skrbi, da je Pametna proizvodnja zgrajena kot celota. Vsi ostali lahko poznajo samo svoj del celote. Po izvedbi in uvedbi sistemov pa mora CDO skrbeti za neprestane treninge in nadgrajevanje Pametne proizvodnje.

Integracija eWON rešitev v okviru Industrije 4.0

Daniel KRAŠOVEC

Inea RBT d.o.o.

POVZETEK

Internet je v preteklosti transformiral delovanje številnih panog, v prihodnosti pa se bo transformacija delovanja odvijala tudi v proizvodnji, avtomobilski industriji, energetiki in ostalih panogah. Človek se v okviru industrijskega interneta stvari povezuje s (pametnimi) stroji in napravami, s čimer naj bi dosegal večjo učinkovitost in produktivnost ter globalno delovanje. Internet stvari na ravni avtomatizacije proizvodnje ne sloni zgolj na povezovanju naprednih naprav v avtomatizirane sisteme, ampak je nadgrajen tudi z zagotavljanjem velikega obsega informacij v pravem času, kar lahko vodi do hitrejših poslovnih odločitev. Blagovna znamka eWON zagotavlja in razvija rešitve in produkte za oddaljen dostop do naprav, ter tako sooblikuje in uresničuje koncepte Industrija 4.0, Internet stvari in Industrijski internet stvari. eWON svoje rešitve za koncept IIoT gradi na podlagi petih členov verige – povezati (Connect), dostopati (Access), prikazati oz. vizualizirati (Monitor), zbirati (Collect) in integrirati (Integrate).

1. UVOD

Koncept IIoT obsega globalni pristop preko interneta z možnostjo neposrednega nadzora fizičnega »sveta«, ter obsega stroje, tovarne in infrastrukturo, ki sočasno obstajajo in delujejo v človekovemu (življenjskemu) prostoru. Koncept bo v prihodnosti transformiral tehnologije in sprožal konvergenco (novih) tehnologij – mobilnih naprav, povezovanje preko kapacitet v oblaku in »big-data« tehnologij. Velika industrijska podjetja (z veliko sredstvi) že imajo veliko izkušenj s povezanimi napravami, vendar vseeno obstaja razlika med lastniškimi zaprtimi sistemi povezanih naprav in konceptom Interneta stvari.

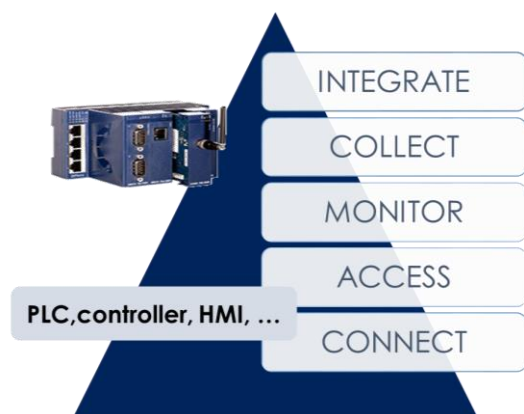
IIoT omogoča nove poslovne priložnosti, proizvajalci in upravljalci industrijskih kapacitet pa bodo nove poslovne priložnosti našli na številnih področjih. S pomočjo neprekinjenega delovanja strojev bodo proizvajalci strojev izboljšali njihove storitve, tudi s pomočjo predvidljivega vzdrževanja in oddaljenega dostopa/upravljanja. Za upravljalce proizvodnih kapacitet in sredstev bo prednost predvsem v oddaljeni (daljinski) vidljivosti naprav, s katerimi bo mogoče stopiti v stik na daljavo. Na ta način se lahko poveča skupna produktivnost, kar bi v primeru javnih dobrin lahko občutili državljani, v primeru zasebnih podjetij in privatnih

storitev/produktov pa končni potrošniki in stranke.

Tako kot pri predhodni internetni revoluciji, bo IoT revolucija prinesla nove priložnosti podjetjem in storitvam, ki slonijo na programski opremi – njihove aplikacije bodo zgrajene v povezan ekosistem večjega števila deležnikov, ki bodo povezali svoje produkte in storitve, da bi zadovoljili potrebe (industrijskih) potrošnikov.

eWON kot vodja v proizvodnji industrijskih internetnih modemov zaseda mesto v temu »ekosistemu« že dlje časa z zagotavljanjem strojne in programske opreme, s pomočjo katere se je mogoče oddaljeno povezovati do naprav in industrijskih strojev. Osnovni produkt eWON je industrijski modem, ki zagotavlja več funkcionalnosti kot enostavni »IT« modem. Funkcionalnosti so razširjene z rešitvami povezljivosti industrijskega interneta in arhitekturami oddaljenega dostopa do podatkov. Bolj nazoren prikaz gradnikov pristopa blagovne znamke eWON prikazujemo v nadaljevanju s petimi nivoji – povezati, dostopati, nadzirati oziroma vizualizirati, zbirati in integrirati.

Stran 1



Slika 1: Prikaz petih nivojev pristopa podjetja eWON h konceptu IIoT.

2. PRVI NIVO – POVEZATI (angl. CONNECT)

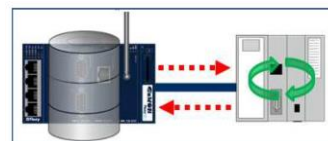
Osrednji fokus eWON produktov je fizična povezanost strojev oziroma industrijskih naprav, torej PLC krmilnikov oziroma drugih krmilnikov, ki omogočajo avtomatizacijo.

IIoT programski aplikatorji so navadno bolj seznanjeni s spletnimi tehnologijami, programskimi in / ali skriptnimi jeziki kot inženirji za avtomatizacijo. Vendar je njihov cilj dostop do oddaljenih podatkov industrijskih naprav, kot so PLC-ji ali specializirane avtomatizacijske naprave. Zato je izziv za razvijalce informacijske tehnologije, da se ne spuščajo na nivo PLC programiranja, torej da bi postali strokovnjak za avtomatizacijo, hkrati pa se inženirji za avtomatizacijo ne spuščajo na nivo razvijalcev IT tehnologij. Skupni cilj je povezati delo PLC inženirjev na nivo IT tehnologij za daljinski nadzor.

Namen nivoja Povezati (angl. Connect) je torej izogibanje zapletom pri povezovanju IT inženirjev in inženirjev za avtomatizacijo, da bi skupaj ustvarili most čez oba sveta. Industrijski usmerjevalniki eWON lahko povezujejo te PLC-je z uporabo namenskih komunikacijskih protokolov, ki omogočajo branje in pisanje podatkov iz/v PLC-je (glej sliko 2). Podatki se shranijo v namenske registre in so na voljo na način, da jih razvijalec informacijskih tehnologij zlahka razume (npr. preko podatkovnih datotek - besedila ali binarnih ali preko vmesnika

notranjega spletnega strežnika). PLC komunikacijski protokoli morajo biti združljivi z glavnimi proizvajalci PLC-jev, ki so na voljo na trgu (Mitsubishi Electric, ABB, Omron, Rockwell, Schneider in Siemens). Ne smemo pozabiti na univerzalni protokol Modbus.

Večina PLC-jev je danes opremljena z Ethernet ali USB vmesnikom, vendar je potrebno podpreti tudi PLC-je, ki so opremljeni s serijskim vhodom (RS485 / RS232). V ta namen so razviti tudi pripadajoči serijski protokoli.



Slika 2: Izmenjava podatkov med PLC in eWON napravo.

Vrednosti oziroma podatki, ki se preberejo iz registrov, se lahko shranijo tudi v arhivske datoteke (kot kaže simbol baze podatkov na sliki 2). Pri arhiviranju posamezne vrednosti vsebovane v enem registru je vrednost tudi označena s časovno značko z interno vrednostjo ure (ki se lahko sinhronizira na internetu s protokolom NTP). Namen arhivskih datotek je ohranjanje preteklih podatkov, da bi sledili ciklu trenda stroja, snemali učinkovitost ali vedenje ob določenem času. Shranjevanje datotek temelji na trajni povezavi z oddaljenim centralnim strežnikom. To je opisano v okviru 4. nivoja, ko bomo govorili o Zbiranju podatkov (angl. Collect).

3. DRUGI NIVO – DOSTOPATI (angl. ACCESS)

Drugi nivo se osredotoča na zmogljivost interneta, ki povezuje napravo z internetom kadarkoli in kjerkoli. Koncept IIoT pravzaprav pomeni, da ima strojna oprema IoT dostop do interneta, ter tudi iz interneta, torej v nasprotni smeri. Torej, poznamo dve vrsti primerov dostopa do naprav:

1. odhodno, ki deluje enosmerno in temelji na potisku podatkov (angl. Push Data) na oddaljeni strežnik ali platformo v oblaku. Temelji na osnovi datotek (FTP) in na podlagi transakcij (HTTP/HTTPS), je enostavna za implementiranje, a samo za branje in »offline« način delovanja.

2. dohodna, dvosmerna vrsta dostopa temelji na potisku podatkov, omogoča nadzor naprave iz oddaljenega dostopa, ter vzdrževanje stroja z daljinskim upravljanjem. Omogoča odpravljanje napak z daljinskim upravljanjem, VPN omogoča varno povezavo, prehod požarnega zidu je enostaven, poleg tega pa omogoča branje in pisanje operacijskega načina delovanja. Vizualizacija vrednosti je mogoča v realnem času.

eWON priporoča dvosmeren dostop do podatkov, zato so vse naprave eWON usmerjevalnikov opremljene z VPN, ki omogoča dvosmerni komunikacijski kanal. Za zelo preprosta sredstva za spremljanje (zajem podatkov) je dvosmeren dostop lahko preveč sofisticiran, da bi ga izpostavili. Odvisno je od vrste aplikacije. Glede na tip eWON usmerjevalnika se internetna povezava lahko vzpostavlja prek povezave WAN, lahko se uporablja Ethernet vmesnik ali pa vgrajen vmesnik GSM/Wi-Fi. Prednosti in slabosti povezav LAN, Wi-Fi, mobilnega interneta in telefonske linije PSTN/ADSL so različne. Prednostna vrsta dostopa znamke eWON je torej VPN, a namen tega članka ni razprava o razlogih za to. Lahko bi se uporabljale tudi druge tehnologije.

eWON na strani VPN serverja ponuja dve možnosti izbire, ki vključujejo VPN tehnologije, pri čemur je eWON usmerjevalnik vedno stranka – tj. »Client«.

Pri VPN povezovanju preko Talk2M oblaka se uporabniki in eWON usmerjevalniki povezujejo z VPN strežnikom, ki se nahaja na oblaku. Omogoča dostop do oddaljenih storitev, uporabniško povezavo na zahtevo, strežniška strojna oprema pa ni potrebna. Omogoča odhodne povezave, statičen IP internetni naslov pa ni potreben. VPN temelji na več protokolih (poveča možnost, da preidejo požarne zidove). Integracija

ni potrebna, skupni stroški lastništva pa so nizki. Ta vrsta je uporabna za strojogradnike, OEM proizvajalce in končne uporabnike s potrebo po storitvah na daljavo.



Slika 3: Prikaz arhitekture VPN povezljivosti preko Talk2M oblaka.

Pri VPN strežniku, ki koristi napravo eFive, vse povezave usmerjevalnikov in uporabnikov eWON konvergirajo na centralno točko, ki jo upravlja strežnik naprave (topologija omrežja). Omogoča dostop v realnem času, trajno komuniciranje, potrebna strojna oprema je VPN strežnik, statični dostopni IP naslov je potreben na centralni točki. Potrebna je integracija v IT oddelku za končnega uporabnika. Skupni stroški lastništva so visoki. Uporablja se v aplikacijah za daljinsko upravljanje, pri katerih je potreben stalni dostop centralnega strežnika do oddaljenih naprav.



Slika 4: Prikaz arhitekture VPN strežnika z uporabo eFive naprave.

Nivo dostopa (angl. Access) je verjetno najbolj koristen nivo IIoT piramide, saj razvijalcu in končnemu uporabniku omogoča, da doseže katerikoli oddaljeni stroj kjerkoli in kadarkoli v vseh okoliščinah.

4. TRETJI NIVO – PRIKAZATI OZIROMA VIZUALIZIRATI (angl. MONITOR)

Pri nadzoru in spremljanju naprav je glavni namen, da imamo možnost spremljanja informacij na daljavo, ter da so informacije neposredno dostopne iz naprave ali industrijskega stroja. Zato je smiselno, da uporabimo dvosmerno vrsto dostopa.

Prve naprave za spremljanje in vizualizacijo stroja/naprave so običajno HMI paneli. Na njih se prikazujejo oz. hranijo podatki, ki prihajajo iz PLC-ja, in se uporabijo za prikaz stanj delovanja in obratovanja stroja/naprave. Operater lahko preko panela upravlja z napravo (start/stop stroja/naprave in nastavitve proizvodnih parametrov itd.).

Za daljinski nadzor/upravljanje Talk2M predlaga uporabo spletnega portala, imenovan M2Web, ki poenostavlja vizualizacijo HMI-jev. Ta portal omogoča vsakemu spletnemu brskalniku povezavo s katere koli pametne naprave (pametni telefon, tablični računalnik ali osebni računalnik) na eWON usmerjevalnik. Vsak spletni brskalniki postane vstopna točka do oddaljene HMI naprave.

V ta namen M2Web uporablja VNC protokol (Virtual Network Computing), protokol RDP (Remote Desktop Protocol) in HTML5.0 pretvornike. Protokol VNC se pogosto uporablja v panelih, protokol RDP pa je na voljo na računalnikih z Microsoft Windows.

Na tem mestu lahko omenimo dva primera, kjer bi razvijalci IIoT lahko razvili nove rešitve. Prvi primer so denimo stroji in industrijska sredstva, ki delujejo samostojno, brez operaterja – take naprave HMI-ja niti nimajo. Drugi primer je področje varnosti pri programiranju HMI panelov in SCADA sistemov. Le te večinoma programirajo inženirji za avtomatizacijo, njihova prva skrb pa je oblikovanje HMI z vizualizacijo in potrebnimi vrednostmi za delovanje stroja/naprave. Vendar so pogosto prav ti podatki informacije, ki zaradi varnosti ne smejo biti na voljo z daljinskega vidika.

V obeh primerih je treba razviti namenski HMI nadzor za daljinsko spremljanje, npr. nadzorne plošče za proizvodnjo, kazalnike uspešnosti, števce proizvodnje, grafe za trende podatkov, pregled alarmov, in podobno. eWON omogoča programsko orodje imenovano ViewON, ki je pravzaprav grafično okolje. Uporablja se za oblikovanje vizualizacije, ki temelji na HTML5.0 strani, ki se nato naloži v eWON-ov spletni strežnik. Tako v nivoju povezovanja (angl. Connect) pridobimo možnost za branje/pisanje podatkov iz PLC-ja. ViewON HTML strani tako postanejo del industrijske naprave kjerkoli, kadarkoli in iz katere koli naprave. Potreben je dostop do spletnega brskalnika, portal M2Web pa tako postane edinstvena vstopna točka do oddaljenih strojev/naprav.

5. ČETRTO NIVO – ZBIRATI (angl. COLLECT)

Četrty nivo se osredotoča na zajem podatkov iz oddaljenih strojev in naprav. Podatki se iz vseh oddaljenih naprav združujejo v centralno mesto za nadaljnjo obdelavo.

V eWON piramidi koncepta IIoT se nivo zbiranja podatkov opira na nivo povezovanja (angl. Connect), kar pomeni, da morajo podatki biti v predpomnilniku eWON usmerjevalnika.

Shranjevanje mora biti zanesljivo. Potrebno je upoštevati internetno komunikacijo, s tem tudi internetne dejavnike, kot so pretočnost, čas zakasnitve in zanesljivost komunikacije. V primeru da nimamo dostopa do LAN / Wi-Fi interneta, lahko uporabimo mobilno komunikacijo. Pojavijo se sledeča vprašanja, ki jih mora razvijalec IIoT programske opreme obravnavati pri oblikovanju aplikacije za oddaljeno zbiranje podatkov:

-kako pogosto je treba zbirati podatke (vsako sekundo, vsako minuto, vsako uro)?

-kakšna je velikost podatkov, ki jih je treba na daljavo zbirati?

-kolikšno je število oddaljenih mest, za zbiranje podatkov iz različnih oddaljenih mest?

Ko so ta vprašanja obravnavana, je mogoče postaviti tudi bolj praktična vprašanja:

-kako pomembni so moji podatki in ali so odvisni od zanesljivosti komuniciranja?

-ali je izpustitev podatkov za zbiranje lahko kritična?

-ali se lahko v primeru zgrešitve podatkov, podatke lahko kasneje zbere?

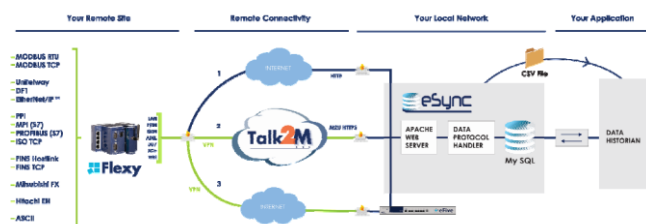
Zaradi teh vprašanj je občutljivost zbiranja podatkov v aplikaciji IIoT eden od ključnih dejavnikov odločanja zasnovane arhitekture. Da bi zagotovili različne arhitekture, imamo na voljo tri razpoložljive načine zbiranja podatkov. »Polling« podatkov na daljavo se uporablja kadar se zahteva daljinski nadzor ali daljinsko spletno spremljanje. Dostop do trenutnih vrednosti oddaljenega stroja temelji na »Poll« strategiji. Potrebno je upoštevati kdaj je potrebna integracija realnega časa z oddaljenimi industrijskimi stroji. Drugi način zbiranja temelji na potiskanju »Push« podatkov na centralni strežnik. Pri tem vsak oddaljeni stroj potisne svoje podatke do centralnega strežnika samodejno, občasno ali na podlagi pogojev

(sprememba vrednosti, stanje alarma, in ostalo). Tretji način je »Push-Poll« podatkov na RDV strežnik. V tem primeru vsak oddaljeni stroj samodejno potisne podatke redno ali na podlagi pogojev (sprememba vrednosti, stanje alarma, in ostalo) do vmesnega strežnika v oblaku. Pri tem prihaja do centralne aplikacije za pridobivanje podatkov na tem vmesnem strežniku.

Trije različni načini, opisani zgoraj, se lahko izvajajo glede na raven dostopa, ki je izbrana za projekt. Vendar pa je eWON razvil nekaj komponent, da bi olajšal izvajanje teh treh vzorcev. Vzorci so odvisni od dodanih komponent programske opreme za uporabo IIoT razvijalca za pomoč pri zbiranju podatkov z rešitvami na ključ.

Pri »Pollingu« podatkov na daljavo preko direktnega internetnega dostopa ni razvite rešitve. Orodje Talk2M omogoča M2Web API – portalu M2Web so dodane funkcije API-ja, ki jih je mogoče poklicati iz kateregakoli programskega jezika, da bi dobili dostop do eWON usmerjevalnika preko Talk2M. eFive je tipičen primer uporabe SCADE, s »Pollingom« podatkov do oddaljene naprave.

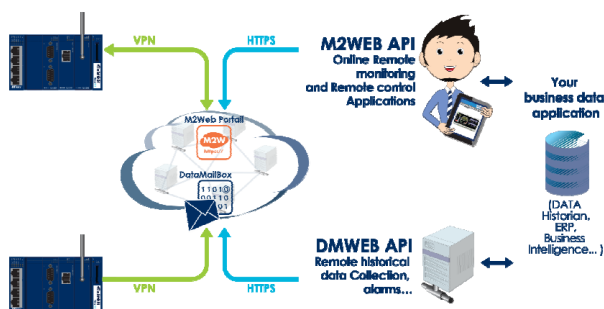
Pri potisku podatkov na centralni strežnik se uporablja eSync, ki temelji na potisku v HTML-ju od usmerjevalnika eWON do centralnega strežnika. Na centralnem strežniku se lahko namesti programski paket eSync, ki je izdelan iz spletnega strežnika (Apache) in baze podatkov (MySQL). Vsako zahtevo HTTP obdeluje strežnik Apache, ki ga sproži katerakoli oddaljena naprava. Vsak zahtevk se nato obdelava in vsi podatki se shranijo v bazo podatkov. eSync je univerzalen in lahko deluje neposredno prek interneta z uporabo programa eFive in Talk2M. Pri uporabi Talk2M lahko zahtevo HTTP vnesemo v HTTPS sejo, da zagotovimo potiskane pakete podatkov. Ko so podatki shranjeni v DB, jih je mogoče zbrati s pomočjo SQL poizvedb. Vendar pa mora uporabnik ohraniti vrednost datuma in časa, da bi se izognili vnovični uporabi podatkov. eSync je ustvaril tudi datoteko CSV v namenskem imeniku, vsakič ko usmerjevalnik eWON potisne svoje podatke na strežnik eSync.



Slika 5: Prikaz arhitekture Talk2M in eSync.

Pri »Push-Poll« podatkov na RDV strežnik preko direktnega internetnega dostopa in preko eFive ni rešitve. Preko Talk2M programske opreme je mogoč API Datamailbox in DMWeb. Koncept Datamailbox zagotavlja obliko začasnega medpomnilnika v oblaku Talk2M, kjer shranjuje podatke, ki jih potisne vsak usmerjevalnik eWON. Vsak usmerjevalnik ima svoj podatkovni predal. Vsak uporabnik lahko prenaša te podatke na zelo preprost način z uporabo DMWeb API-jev. Dve glavni prednosti v primerjavi z eSync sta:

- ni več potreben strežnik, ki je viden na internetu, da bi obdeloval podatke, ki jih potiskajo poljubni oddaljeni stroji oz. industrijska naprava.
- način zbiranja podatkov iz poštnega nabiralnika je zelo preprost in se izogiba potrebi po ohranjanju podatkov o časovnem žigu za pridobivanje novih podatkov brez odvečnih informacij.



Slika 6: Prikaz koncepta API in API M2Web.

6. PETI NIVO – INTEGRIRATI (angl. INTEGRATE)

V prejšnjih nivojih je bil fokus na vzpostavitvi oddaljenega dostopa do strojev in prejemanja »trenutnih« podatkov iz strojev/naprav. Vidik integracije se osredotoča na povezovanje z ostalimi produkti z namenom zadovoljitve potrebe končnega uporabnika po aplikacijah IIoT. Izdelki in rešitve eWON se osredotočajo na povezavo oddaljenih naprav z lokalnimi uporabniki za oddaljeno vzdrževanje in odpravljanje težav. Omogočajo daljinske nadzorne možnosti na napravah HMI, načine za oblikovanje daljinske nadzorne plošče in ponujajo tudi več vzorcev za pridobivanje podatkov iz oddaljenih strojev in industrijskih naprav.

Če želite doseči višji nivo aplikacij, je potrebna integracija z obstoječo programsko opremo na trgu. Glede na ta izziv bi se lahko prizadevanja za integracijo zelo razlikovala, zato bi želeli predstaviti različne aplikacije, ki jih predvidevamo. Naprimer:

1. aplikacije SCADA, ki se uporabljajo v aplikaciji za daljinski nadzor in bi se lahko uporabljale v različnih panogah industrije. Te aplikacije so zelo enostavne za vmesnik. Običajno je potrebno integracijska dela opraviti na spletnem mestu IT.
2. oddaljena spletna aplikacija za spremljanje, ki omogoča nadzor daljinskega nadzora na vsaki lokaciji (kot je razloženo na ravni nadzora (angl. Monitoring)). V tem primeru se integracija naredi v sami aplikaciji za zagotovitev načina dostopa do oddaljenih naprav. Daljinsko spremljanje je zagotovljeno centralno, kar pomeni, da se vključi integracija za pridobivanje podatkov iz vseh spletnih mest, ter se jih združuje in prikazuje preko orodij za poročanje.
3. aplikacije za oddaljeno uporabo z zgodovino, nadzorom stroja, vzdrževalnimi napovednimi in preventivnimi sistemi, itd.

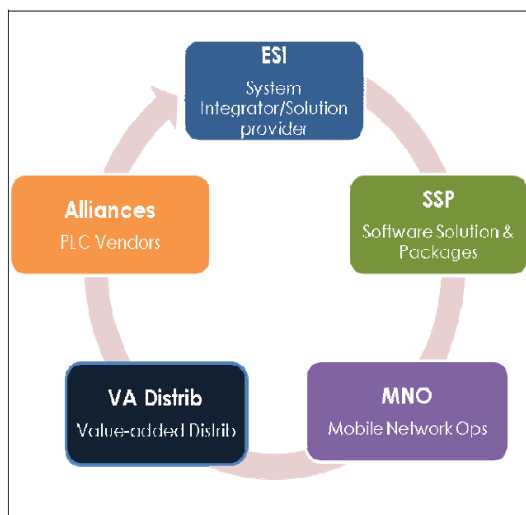
4. aplikacije za shranjevanje podatkov in uporabo podatkovno usmerjenih aplikacij.

7. ZAKLJUČEK

Za vzpostavitev IIoT je po konceptu eWON potreben »Ekosistem« 5 deležnikov, specializiranih za svoje področje.

Literatura

[1] eWONs vision on Industrial IoT – White Paper for IIoT developers, eWON SA, 2016



Slika 7: Prikaz »ekosistema« petih skupin deležnikov.

Skupine deležnikov so:

- ESI (sistemski integratorji / ponudniki rešitev): podjetja, ki bodo zagotovila rešitev za stranke glede na njihove zahteve
- SSP (programska rešitev): razvijalci programskih paketov, za predstavitev podatkov v njihovih aplikacijah glede na želje stranke
- MNO (operaterji mobilnih omrežij): ponudniki mobilnih storitev, ki ponujajo SIM kartice, zaračunavanje in upravljanje s karticami / SIM kartami
- VA Distrib (distributorji opreme): distributerji eWON, ki zagotavljajo potrebno prodajo in tehnično podporo za eWON izdelke in rešitve.

Za zaključek - IIoT se ukvarja s pripravo končne rešitve za stranke, ne pa več s posameznimi produkti.

CELOSTNI POGONSKI SISTEM DRYLIN® - KAKO KONFIGURIRATI CELOTEN SISTEM

Stojan DROBNIČ
Hennlich d.o.o.

POVZETEK

Celostni pogonski sistem drylin® - kako konfigurirati celoten sistem

Dršenje namesto kotaljenja.

Paleta izdelkov linearnih vodil drylin® temelji na principu "drsenja namesto kotaljenja". V kombinaciji z materiali, ki ne korodirajo, se kot drsna površina uporabljajo tribo-polimeri, ki ne potrebujejo mazanja in so neobčutljivi na vplive, kot so umazanija, voda, kemikalije, toplota. Poleg tega delujejo zelo tiho.

Na osnovi testov in testnih rezultatov v svojih laboratorijih, so igusovi strokovnjaki izdelali več spletnih orodij, kalkulatorjev življenjske dobe in konfiguratorjev sistemov drylin®.

Na osnovi vnešenih podatkov lahko določimo in izberemo primeren sistem, vključno z motorjem in dodatno opremo ter dobimo tudi podatek o predvideni življenjski dobi ter sestavnico sistema.

1. UVOD

Paleta izdelkov linearnih vodil drylin® temelji na principu "drsenja namesto kotaljenja". V kombinaciji z materiali, ki ne korodirajo, se kot drsna površina uporabljajo visoko zmogljivi tribo-polimeri iglidur®. Linearna vodila drylin® delujejo brez mazanja in ne potrebujejo vzdrževanja ter so neobčutljiva na vplive, kot so umazanija, voda ali kemikalije. Poleg tega so zaradi uporabljenih materialov in posebnega oblikovanja izjemno tiha. S temi lastnostmi se linearna vodila drylin® lahko uporabljajo v različnih okoljih, vključno v skrajnih pogojih. Modularni sistem omogoča visoko fleksibilnost z različnimi vodili in vozički. Konkretni pogonski sistemi se lahko konfigurirajo, vključno z motorji in ostalimi dodatki.

Plastične zglobne roke je mogoče nastaviti in razširiti tako, da ustrezajo skoraj za vsako aplikacijo.

Zglobne roke so različnih dolžin in oblik, različnih velikosti, vključno z dodatnimi krmilnimi kablji. Orodja (funkcionalne enote) kot so prijemala, kljuke, vakuumske skodelice, kamere in tako naprej je mogoče prilagoditi glede na potrebe.

2. OSNOVA ZA KONFIGURATORJE

Osnova za konfiguratorje so tribo-polimerne raziskave: trenje, obraba, mehatronski testi v laboratoriju igus®

2.1. TESTNI LABORATORIJ

V največjem industrijskem testnem laboratoriju podjetja igus® opravljajo teste s preskusnimi nastavitvami za energijske verige, fleksibilne kable, polimerne ležaje, kroglične ležaje in linearna vodila ter linearne pogone.



Slika 1: Tesni laboratorij

2.2. DEJSTVA O LABORATORIJU

- 2.750 m² testnega laboratorija
- 4.100 testov energijskih verig na leto na 180 testnih postajah; klimatska komora, testi na prostem, zvočna komora, hodi do 130 m, robotski sistemi itd.
- dve milijardi testnih ciklov na leto za fleksibilne kable
- en milijon zabeleženih električnih meritev letno
- 15.000 triboloških testov (trenje in obrabe) na 300 testnih postajah
- 140 trilijonov preizkusnih gibanj na testnih enotah za ležaje

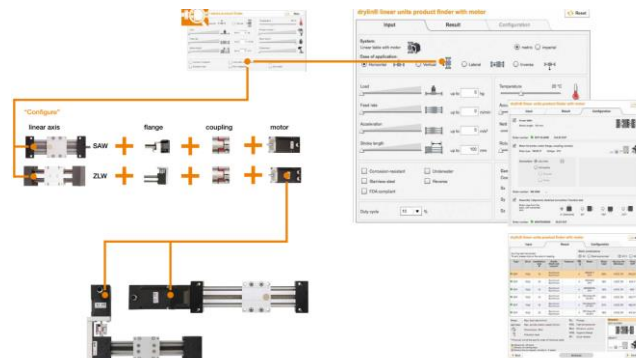


Slika 2: Testiranje, testiranje, testiranje,....

Na osnovi vseh teh testov in testnih rezultatov, so igusovi strokovnjaki izdelali več spletnih orodij, kalkulatorjev življenjske dobe in konfiguratorjev sistemov drylin

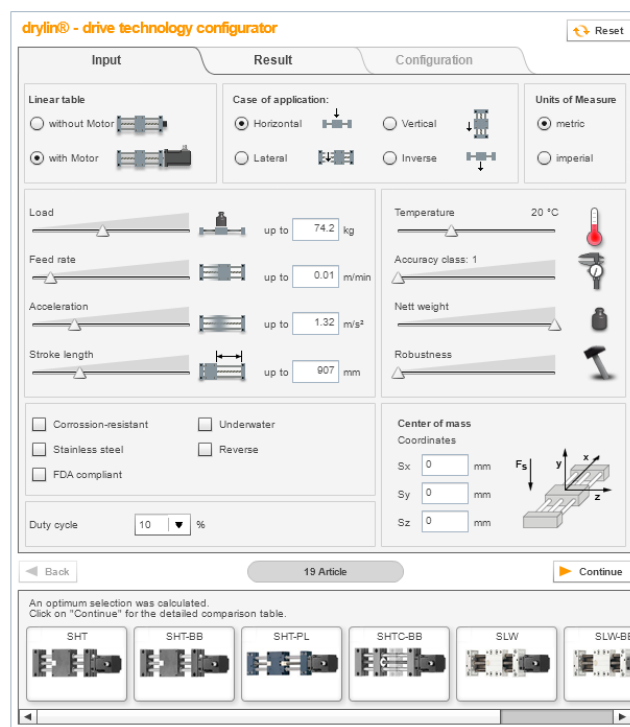
3. KONFIGURATORJI

Konfiguratorje najdemo na spletni strani, kjer so na voljo vsi konfiguratorji za izračun življenjske dobe, za izbiro primerne materiala, primerne artikla,..... za vse njihove izdelke od kablov in verig pa do puš, vodil in robotskih enot. (https://www.igus.si/wpck/6647/online_tools)



Slika 3: Konfigurator drylin® E

3.1. VHODNI PODATKI



Slika 4: Izberemo linearni sistem, izberemo obremenitve in pogoje

3.2. REZULTAT

Dobimo ponujeno optimalno rešitev, artikel, motor, podatke o življenjski dobi,....

The screenshot shows the 'drylin® - drive technology configurator' interface. It has tabs for 'Input', 'Result', and 'Configuration'. The 'Result' tab is active, displaying a table of motor combinations. The table has columns for Type, Drive, Installation size, Shafts / Shaft end support, Features, Motor, Motor load, Service life, and Total price. Below the table, there are sections for 'Precision class', 'PL: Preload', 'HTX: High temperatures', 'Mini: Miniature version', 'HYD: Hygienic Design', and 'FF: Quick release'. A 'Selection' section shows images of the selected components: SLW-2080-20 and NEMA23XL.

Type	Drive	Installation size	Shafts / Shaft end support	Features	Motor	Motor load	Service life	Total price
SLW	18x4	20	Aluminium / Aluminium		2 NEMA23XL 24V	76%	12.834	REQ
SHT	18x4	20	Aluminium / Aluminium		4 NEMA34 24V	48%	13.132	REQ
SHT-PL	18x4	20	Aluminium / Aluminium	PL	5 NEMA23XL 24V	94%	11.295	REQ
SHT-PL	18x4	20	Aluminium / Aluminium	PL	5 NEMA34 24V	55%	11.295	REQ
SHT	24x5	30	Aluminium / Aluminium		4 NEMA34 24V	73%	26.809	REQ
SHT-PL	24x5	30	Aluminium / Aluminium	PL	5 NEMA34 24V	80%	23.257	REQ
SHT-BB	24x5	30	Aluminium / Aluminium	BB	4 NEMA34 24V	40%	26.809	REQ
SHT-BB	24x5	30	Aluminium / Aluminium	BB	4 DC-Motor35-10 24V	71%	26.809	REQ
SHT-BB	24x5	30	Aluminium / Aluminium	BB	4 DC-Motor35-18 24V	71%	26.809	REQ
SHT-BB	24x5	30	Stainless steel / Aluminium	BB	4 NEMA34 24V	40%	37.533	REQ

4. PRIMER DOBRE PRAKSE

Več strank si je samih konfiguriralo linearni sistem na spletu. Sistem konfiguriranja je zelo enostaven, tako, da si vsak sam lahko izbere primerno rešite, prilagojeno potrebam, ki jih ima.

5. ZAKLJUČEK

Plastika uspešno prodira na vsa področja našega življenja. Od najpreprostejših pripomočkov pa do najbolj zapletenih in zmogljivih tehničnih izdelkov. Tako si lahko tudi stranke same konfigurirajo rešitve, ki so optimalne.

Literatura

[1] Tehnična dokumentacija podjetja Igus

Slika 5: Rezultat

3.3. SESTAVNICA



24.11.2017 Page 1/3

DryLin® linear table system

igus® GmbH
Spicher Str. 1a
51147 Köln (Porz-Lind)
Tel.: +49 (0) 2203-96 49-0
Fax: +49 (0) 2203-96 49-222
E-Mail: i_info@igus.de

System

Preliminary configuration

Part list

The parts list provides all parts of one configuration

Pos.	Piece	Part number / Description	Illustration
1	1	Linear table Order number: SLW-2080-20 Stroke length: 907 mm Overall lead screw length: 1187 mm Shaft end length: 26 mm Shafts / Shaft end support: Aluminium / Aluminium Shaft length: 0 mm Accuracy class: 2	
2	1	Motor kit (motor, motor flange, coupling, screws) Order number: MK-0040 Motor type: NEMA23XL Connection: Litz wires	
3	1	Assembly / alignment, electrical connection / function test Order number: MONT0030000 Alignment: 0° (Standard)	
4	1	Initiator kit (End- and reference switch, bracket, screws, spacers) Order number: IK-0009-BG-3 Version: Inductable NC, PNP Proximity switch: 3 m	

Slika 6: Izpisana sestavnica

Program GOSTOP – Gradniki, orodja in sistemi za tovarne prihodnosti

Igor Kovač¹, Vladimir Jovan¹, Aleš Hančič², Aleš Ude¹, Janez Štrancar¹

¹ Institut »Jožef Stefan«, ² TECOS

POVZETEK

Cilj Programa **GOSTOP** je pospešiti razvoj in izgradnjo koncepta pametnih tovarn v Sloveniji in odgovoriti na aktualne potrebe slovenskega gospodarstva, kjer nekatera industrijska podjetja že skušajo uvajati koncept pametnih tovarn v svojo proizvodnjo. V tri in pol letnem Programu, ki se je začel konec leta 2016, smo združili raziskovalne skupine iz trinajstih podjetij in šestih raziskovalnih organizacij, ki imajo kompatibilne raziskovalno-razvojne programe in že izvajajo raziskave na področju pametnih tovarn. Upoštevajoč slovensko strategijo pametne specializacije, ki jo je pripravila SVRK, kot tudi strategijo razvoja koncepta pametnih tovarn, ki se uveljavlja v EU in jo promovira na primer EFFRA, smo identificirali štiri področja, na katerih lahko Slovenija doseže pomembne preboje v bližnji prihodnosti: **tehnologije vodenja, orodjarstvo, robotika in fotonika**. S tem smo v Programu GOSTOP združili večino horizontalnih področij iz strategije pametne specializacije Slovenije na področju pametnih tovarn. Na vseh štirih področjih smo izbrali najperspektivnejše raziskovalne teme, ki jih je pripravljena podpreti slovenska industrija in na katerih obstajajo ustrezna znanja v slovenskih raziskovalnih organizacijah, in poiskali sinergije med njimi. V Program smo vključili več vertikalnih verig vrednosti, ki bodo v bližnji prihodnosti vodile do novih produktov, s katerimi bo slovenska industrija izboljšala svojo konkurenčnost. Zato Program GOSTOP vključuje razvoj novih izdelkov in tehnologij, ki jih razvijajo agilna manjša in srednja podjetja, kot tudi razvoj celotnega koncepta pametne tovarne, ki bo pripeljal do celovitih in integriranih sistemov, s katerimi bodo lahko večja slovenska podjetja optimizirala lastne proizvodne procese in razvila nove produkte z veliko dodano vrednostjo. Primer takšnega produkta je vizija tovarne na ključ za globalni trg, ki jo vključuje naš program. Uspešna izvedba predlaganega Programa, bo prispevala k bistvenemu dvigu dodane vrednosti in k povečanju izvoza v sodelujočih podjetjih.

1. UVOD

Približno desetina EU podjetij je danes klasificiranih kot proizvodna podjetja. Proizvodni sektor je vedno predstavljal enega osnovnih stebrov EU ekonomije. Zato poteka vrsta aktivnosti tako v EU kot pri nas, s katerimi naj bi trenutni delež industrijske proizvodnje v EU GDP s sedanjih 16% dvignili do 2020 na 20%. Posledično je v teku že vrsta projektov, kjer se razvija nova proizvodna paradigma - Tovarne prihodnosti -, ki predstavlja vizijo, kakšna naj bo industrijska proizvodnja v prihodnosti.

Izvedljivost koncepta pametnih tovarn/tovarn prihodnosti temelji na dejstvu, da je večina tehnoloških področij, ki jih potrebuje koncept pametnih tovarn že dosegla potrebno stopnjo zrelosti, potrebna pa je še integracija vseh omogočitvenih tehnologij, ki bo zagotovila učinkovito visoko avtomatizirano in prilagodljivo proizvodnjo brez izmeta in ob čim manjši vlogi človeškega faktorja. Zato morajo imeti oprema in uporabljene tehnologije v tovarnah prihodnosti zmožnost izboljševanja proizvodnih procesov s samooptimizacijo in avtonomnim odločanjem.

Tako bo struktura tovarn prihodnosti bistveno različna od sedanje: vzpostavljena bo popolna povezava/sodelovanje med inteligentnimi proizvodnimi napravami in odločanja ter človekom na vseh nivojih vodenja proizvodnje.

Program GOSTOP je zbral slovenska raziskovalna in inovacijska znanja ter izkušnje iz industrijske in akademske sfere z namenom, da uvrsti Slovenijo med ugledne evropske ponudnike izdelkov, tehnologij in storitev za tovarne prihodnosti. Kritično maso znanj in izkušenj smo iskali predvsem na tehnoloških področjih, ki imajo v Sloveniji že danes komparativne prednosti in imajo realne možnosti za večjo uveljavitev slovenskega znanja tudi v svetu. To so predvsem: tehnologije vodenja sistemov, robotika, orodjarstvo in fotonika.

2. TEHNOLOGIJE VODENJA SISTEMOV

Steber zajema razvoj portfelja izbranih gradnikov, ki bodo prispevali k močnejši integraciji fizikalnega in digitalnega sveta v tovarnah prihodnosti. Porajajoča tehnologija interneta stvari in njena vpeljava v industrijsko

okolje je zelo kompleksna in predstavlja velik izziv na področju raziskav. Trenutno še ni jasno definiranih standardov na področju zajema podatkov, pošiljanja množice podatkov v zaščiteni obliki v (privatni ali javni) oblak, zagotavljanja varnega dostopa do podatkov in zanesljivosti delovanja sistema v javnih komunikacijskih omrežjih. Sistem v oblaku bo moral velike količine procesnih podatkov (v stisnjeni obliki) shranjevati, jih analizirati in široki množici uporabnikov pretvoriti v koristne informacije, z namenom zgodnjega odkrivanja problemov ter hitrejšega informiranja in ukrepanja.

Izreden razvoj omogočitvenih tehnologij, ki omogočajo hitri dostop do ogromne količine proizvodnih podatkov, kot so na primer internet stvari, porazdeljena senzorska omrežja, komunikacijske tehnologije, shranjevanje in obdelava v oblaku, so omogočile tudi razvoj novih zmogljivih orodij za iskanje informacij v proizvodnih podatkih s pomočjo matematičnih modelov.

Razviti bodo novi postopki, ki zagotavljajo samodejno vsestransko in globinsko analizo kakovosti izdelkov z namenom zagotavljanja 100% kakovosti izdelkov.

Skupni cilj vseh raziskovalno-razvojnih korakov je razvoj platforme za nadzor, napovedovanje in sintezo optimalnih ukrepov pri adaptivnem vodenju proizvodnje na podlagi razvitih proizvodnih modelov (prediktivno vodenje, simulacija).

Realizirani bodo industrijski prototipi več samostojnih izdelkov, ki slonijo pretežno na rezultatih raziskovalnih aktivnosti, ter bodo ovrednoteni v industrijskem okolju.

3. ROBOTIKA

Steber robotika predstavlja raziskave, ki so usmerjene k integraciji robotskih tehnologij v tovarne prihodnosti v okviru paradigme Industrija 4.0. Cilj je povečanje fleksibilnosti proizvodnje in stopnje avtomatizacije, z namenom višanja produktivnosti in kakovosti izdelkov.

Namen je doseči preboje na tistih področjih robotike, na katerih v Sloveniji že obstajajo močne raziskovalne skupine in podjetja. Pregled stanja robotike v Sloveniji je pokazal, da obstajata znanje in skupen interes raziskovalnih organizacij in podjetij ter potrebe za nadaljnji razvoj predvsem na štirih področjih, na katere se program osredotoča:

- Adaptivne robotske tehnologije in celice
- Inteligentni senzorji in pogoni
- Robotsko podprte laserske obdelave
- Povezovanje poslovnosti, avtomatizirane proizvodnje, robotike in izdelka na harmoniziran način.

Današnje robotske celice že omogočajo avtomatizacijo številnih proizvodnih procesov, vendar pa pri tem niso dovolj fleksibilne. Zato je potrebno razviti nove robotske tehnologije, ki bodo omogočale hitrejšo in enostavnejšo prilagajanje robotskih celic na nove produkte. Razvoj je osredotočen na fleksibilno



predvsem prijemanje in manipulacijo, strojni vid in strojno učenje. Cilj je razvoj adaptivne robotske celice za kontrolo kakovosti izdelkov, s čimer bomo omogočili uporabo robotov v številnih proizvodnih procesih, ki se danes še vedno izvajajo ročno.

Trendi pogonske tehnike predvsem v robotskih industrijah gredo v izdelovanje inteligentnih prenosnih sistemov z algoritmi krmiljenja navora in z že vgrajenim nadzornim sistemom in možnostjo predvidevanja vzdrževanja posameznega pogonskega sklopa v celotnem sistemu. Za ta namen bo opravljena študija možnosti uporabe koncepta »internet stvari« pri vzdrževanju pogonskih sklopov z enkoderji, senzorji navora in motorji za pogon. Razvili bomo algoritme, ki so potrebni za spremljanje in nadzor celotnega pogonskega sistema.

V številnih sektorjih industrije in medicine se zaradi visoke natančnosti vnosa energije ter visoke fleksibilnosti vse bolj uveljavljajo laserske

tehnologije. Posebno mesto zasedajo robotizirane daljinske laserske obdelave, ki predstavljajo integracijo robotskega manipulatorja z lasersko skenirno optiko. Takšne konfiguracije omogočajo veliko delovno območje, visoko geometrijsko fleksibilnost obdelovancev in ultra kratke čase obdelave, kot so na primer lasersko varjenje, rezanje in mikrostrukturiranje. S tem namenom bodo razviti novi pristopi, ki bodo omogočili uporabo inteligentnih robotiziranih daljinskih laserskih obdelav v splošni industriji SME-jev, kjer imamo opraviti z majhnimi serijami izdelkov in je danes potrebna investicija previsoka za rentabilno robotizacijo.

Platforma virtualne tovarne bo razvita z namenom izdelave inteligentnega, konkurenčnega, trajnostnega sistema, z vključenimi elementi robotizacije. Vključeval bo raziskave na področju inteligentnih algoritmov, simulacije diskretnih dogodkov v realnem času in Plug & Produce vmesnikov z načeli interneta stvari. S tem bomo omogočili, da bo realizacija naročila izvedena na osnovi samo-organizacije (LEAN), samo-konfiguracije (AGIL) in samo-kontrole kakovosti (TQM) PPS-a z avtomatskim zbiranjem ključnih kazalnikov uspešnosti (KPI) z vsemi elementi digitalne sledljivosti produkta. Takšen pristop bo zagotovil povečanje učinkovitosti proizvodnega procesa v realnem času.

4. ORODJARSTVO

Steber zajema razvoj orodja z namenom nadgradnje iz sedanjega pasivnega elementa v aktivno omrežen element z lastno umetno inteligenco, ki je popolnoma integriran v informacijski ekosistem podjetja. Tako orodje bo sposobno v vsakem trenutku aktivno spremljati dogajanje znotraj orodja, ter preko vgrajene umetne inteligence aktivno sprožiti potrebne aktivnosti, ki bodo v realnem času odpravljale posledice nepredvidenih dogodkov ter se tako izognile zastojem v proizvodnji. To bo omogočilo izboljšanje učinkovitosti celotnega cikla proizvodnje izdelkov, od načrtovanja, izdelave orodja, do same proizvodnje, saj bodo vsi proizvodni parametri merjeni in korigirani v

realnem času. Poleg tega pa bo inteligentno orodje tudi sposobno samostojnega učenja, kar pomeni, da ne bo samo korigiralo procesne parametre na osnovi vnaprej pripravljenih protokolov, ampak bo na osnovi analize vhodnih podatkov ter odzivov na njihove spremembe, sposobno predvideti katera kombinacija procesnih parametrov omogoča optimalno delovanje kombinacije orodje-stroj.

Za obdelavo in analizo podatkov s senzorjev z namenom izboljšanja upravljanja orodij bo izdelan modul Intelligent Tool Management in modul Intelligent Tool Analytics za MES Cloud.

Namen modula Intelligent Tool Management je spremljanje, nadzor in upravljanje z orodji uporabljenih na pametni liniji, kar pomeni spremljanje zgodovine in življenjske dobe orodij, spremljanje uporabe in obrabe orodij, spremljanje stanja orodij na skladišču in v proizvodnji, izboljšanje uporabniške izkušnje itd..

Namen modula Intelligent Tool Analytics je analiza uporabe in stanja orodij uporabljenih na pametni liniji, kar bo omogočalo oceno stanja iztrošenosti orodij, analizo vzrokov napak orodij, napoved predvidene življenjske dobe orodja, itd..

Naslednja aktivnost zajema, vzporedno z digitalizacijo orodij, celostno digitalizacijo tehničnih in poslovno odločitvenih procesov. To pomeni na izhodiščni ravni digitalizirati vse proizvodne procese in jih povezati v skupno bazo. Novi načini zajemanja, obdelave in uporabe podatkov, avtomatizacija proizvodnje, povezanost naprav in novi uporabniški vmesniki bodo omogočili nov način upravljanja tovarne. Zato bomo v sklopu Programa zasnovali nov koncept proizvodnje linije tako, da bo omogočen zajem in pretok ustreznih podatkov o tehnoloških parametrih kot tudi o lastnostih, razpoložljivosti materialov, virov polizdelkov in izdelkov.

Cilj je razviti linijo oz. proizvodno celico, ki bo delovala avtonomno in kjer bo kontrola kvalitete ter nadzor potekal čimbolj na daljavo. Potreben bo zajem stanja resursov in izdelkov na vhodu na linijo ter upravljanje relevantnih dejavnikov tekom opazovanega procesa.

V projektu bomo tako stremeli k temu, da z industrijskimi raziskavami ter eksperimentalnim razvojem dosežemo točko, ko bomo sposobni

narediti prototip inteligentnega samoregulacijskega mehatronskega orodja, ki bo popolnoma vpeto v informacijsko omrežje podjetja in oblačnega delovanja. Proizvodnja linija oz. robotska celica bo opremljena s senzorji in vmesniki za zajem številnih parametrov, kar bo omogočilo čimbolj avtonomno delovanje in nadzor na daljavo.

5. FOTONIKA

Aktivnosti stebra bodo osredotočene na razvoj konceptov ter prototipov novih naprednih laserskih tehnologij za digitalizacijo proizvodnih in terapevtskih procesov s točkovnim dovajanjem energije v ali na snov. Razviti bodo novi koncepti in laboratorijske demonstracije ter validacije sistemov, povezanih z novimi procesi, tehnologijami in sistemskimi sklopi, ki bodo preko inteligentnih nadzornih algoritmov omogočili polno izkoriščanje fleksibilnosti digitalne narave laserskega procesiranja v samoregulativnih in adaptivnih laserskih sistemih ter njihovo integracijo v samoorganizirane pametne tovarne in klinike prihodnosti. Med njimi naj omenimo sisteme za doseganje specialnih pogojev za lasersko transferno tiskanje z zelo visokimi hitrostmi, razviti koncept novega tipa laserskega izvora, sisteme za doseganje natančnega in krajevno omejenega doziranja energije laserskih sunkov, ki bodo hkrati omogočali diagnostično ter terapevtsko delovanje. Za



personalizirano daljinsko obdelavo organskih površin bo razvit koncept inteligentnega laserskega in skenirnega sistema z detekcijo termalnega polja v obdelovancu (»ILOOP«), za razvoj pametnih adaptivnih sistemov pa bodo razviti in validirani detekcijski koncepti za nadzor lege gorišč laserjev, doz laserskih sunkov, vzorcev zaporedja, modulacijskih vzorcev in koncepti za spremljanje temperaturnih polj. Pri tem bomo postavili laboratorijske validacijske sisteme, na katerih bomo validirali sklopljene sisteme novih laserskih izvorov ter detekcijskih shem za inteligentno kontrolo.

6. ZAKLJUČEK

V programu sodeluje devetnajst partnerjev. Pet javno-raziskovalnih organizacij (Institut "Jožef Stefan", Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru in Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko) ter en razvojni center (Razvojni center orodjarstva Slovenije TECOS). S strani industrije so vključena tako velika kot tudi srednja in mala podjetja, kompetentna na vseh področjih stebrov (Kolektor Group d.o.o., INEA d.o.o., METRONIK d.o.o., HIDRIA ROTOMATIKA d.o.o., YASKAWA Slovenija d.o.o., PODKRIŽNIK d.o.o., NELA razvojni center d.o.o., COSYLAB d.d., L-TEK d.o.o., ŠPICA INTERNATIONAL d.o.o., OPTOTEK d.o.o., LPKF d.o.o., FOTONA d.o.o.). Program je vreden skupno 9,4 mio EUR od tega je 5,95 mio EUR sofinanciranja. Naložbo sofinancira Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- [1] GOSTOP – Gradniki, orodja in sistemi za tovarne prihodnosti, Predstavitev Programa, Javni razpis »Spodbujanje izvajanja raziskovalno-razvojnih programov (TRL3-6)«, Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport, Evropska Unija, Evropski sklad za regionalni razvoj, 70 strani.

VISOKO-DINAMIČNA HIDRAVLIČNA LINEARNA OS KRMILJENA Z DIGITALNIM PIEZO VENILOM

Marko ŠIMIC, Niko HERAKOVIČ
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, LASIM

POVZETEK

Prispevek predstavlja visoko-dinamično hidravlično linearno os, ki je krmiljena z digitalnim piezo ventilom in ima integriran nov merilnik pomika direktno v hidravlični valj. Visoko dinamiko ventila dosežemo z uporabo piezo aktuatorjev, optimizacije oblike krmilnega bata in ohišja ventila, ustrezno krmilno elektroniko in algoritmom za pozicijsko regulacijo batnice valja kakor tudi z novim zaznavalom senzorja pomika, ki je integriran v ohišje hidravličnega valja in batnico na kateri je kodni zapis. Poleg hitrega odziva linearne osi dosegamo tudi visoko ločljivost pomika do 1 mikro meter. V prispevku so predstavljene glavne komponente sistema, krmilna metoda in delovanje sistema. Na koncu so prikazani eksperimentalni rezultati odziva sistema in pozicijske ločljivosti batnice hidravličnega valja.

1. UVOD

Danes vse večji izziv predstavljajo napredne aplikacije v proizvodnih procesih, ki zahtevajo od sistemov hiter odziv, visoko pozicijsko ločljivost in nizko porabo električne energije [1], [2]. Rešitev za doseganje teh zahtev se kaže v visoko-dinamičnih linearnih pogonih krmiljenih s piezo ventili v kombinaciji z naprednimi senzorji in krmilnimi algoritmi [3], [4].

Za zgoraj omenjene aplikacije se še vedno uporabljajo hidravlični pogoni krmiljeni z visoko-odzivnimi servo ventili. Dinamične karakteristike so zaradi omejitev mehanske konstrukcije in uporabe konvencionalnih aktuatorjev (linearnih motorjev pri proporcionalnih ali momentnih motorjev pri servo ventilih) omejene na frekvence do 200 Hz [5], [6]. Optimizacijske metode in razvoj novih ventilov so zato osredotočene na razvoj novih komponent krmilnih ventilov kot so geometrijska optimizacija krmilnih batov ventilov v smislu zmanjšanja vztrajnostnih sil in tokovnih sil fluida [7], [8], [9], [10] in [11]. Nadalje lahko konvencionalne aktuatorje nadomestimo z naprednimi piezo aktuatorji kar poveča dinamiko ventilov na približno 600 Hz (pri faznem zamiku 90°) oz. se odziv ventila izboljša iz 5 ms na manj od 1 ms [12], [13].

V svetu se zato razvija novo področje digitalne hidravlike in digitalnih ventilov kot alternativa visoko-dinamičnim servo ventilom

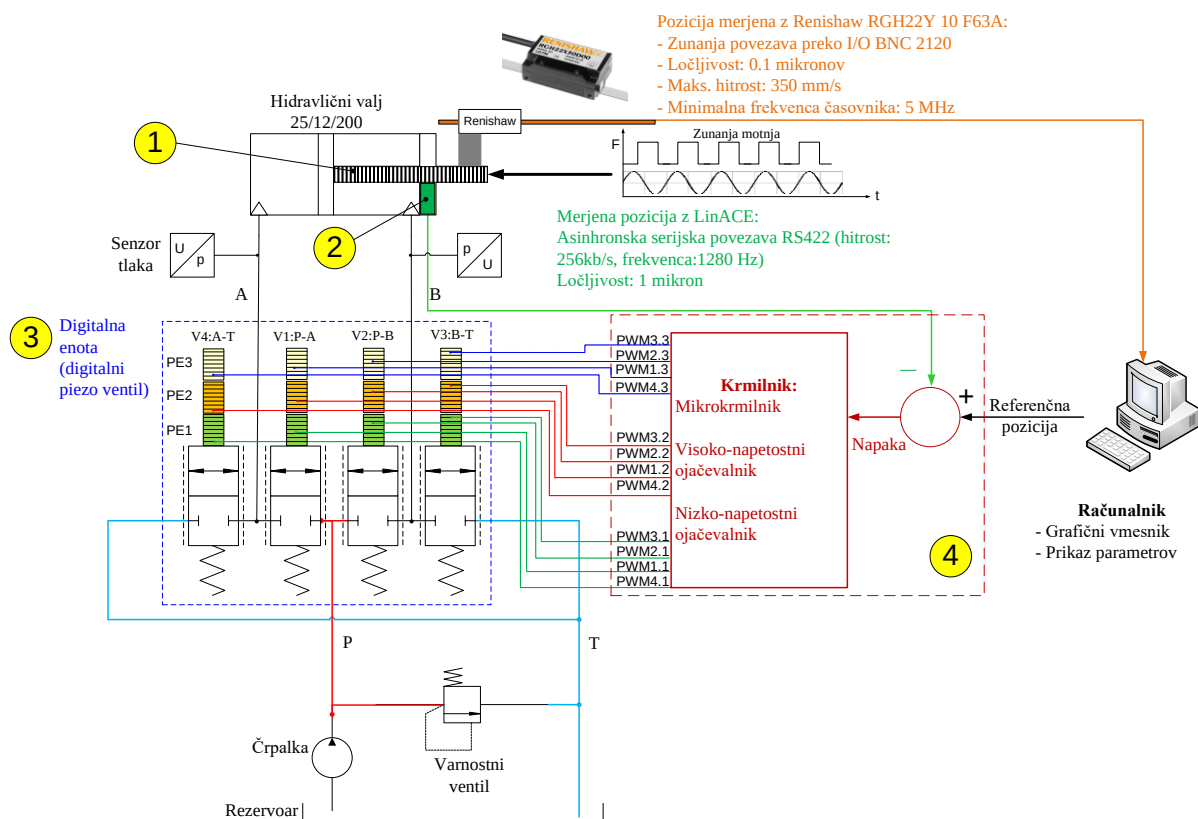
[14]. Za krmiljenje digitalnih ventilov se običajno uporablja pulzno številčna (PNM) in pulzno širinska (PWM) modulacija [15]. Z razvojem novih krmilnih batov iz naprednih materialov, uporabe piezo aktuatorjev in napredne krmilne elektronike ter krmilnih metod so digitalni hidravlični ventili postali mnogo bolj uporabni, tudi za visoko-dinamične hidravlične linearne pogone [16], [17].

2. VISOKO-DINAMIČNA HIDRAVLIČNA LINEARNA OS

Visoko-dinamična hidravlična linearna os je sestavljena iz 3 novih podsistemov:

- Hidravlični valj, ki sestavljata dve novi komponenti (batnica s kodnim zapisom in senzor pomika batnice vgrajen v glavo hidravličnega valja).
- Digitalnim hidravličnim piezo ventil sestavljen iz 4 preklopnih ventilov krmiljenih s piezo aktuatorji.
- Krmilno elektroniko in krmilni algoritem za izvajanje pozicijske regulacije batnice hidravličnega valja.

Shemo pozicijske regulacije batnice hidravličnega valja s pripadajočimi podsistemi prikazuje slika 1.



Slika 1: Shema visoko-dinamične hidravlične linearne osi krmiljene z digitalnimi piezo ventilom.

Za pozicijsko regulacijo batnice hidravličnega valja uporabljamo računalnik (kreiranje referenčne, želene vrednosti pomika), na novo razvito krmilno elektroniko (pozicija 4 na sliki 1, za generiranje ustreznih krmilnih signalov PWM za digitalni ventil), digitalno enoto oz. digitalni piezo ventil (pozicija 3 na sliki 1), hidravlični valj z integriranim senzorjem pomika *LinACE* (pozicija 1,2 na sliki 1) ter zunanjim merilnikom pomika visoke ločljivosti Renishaw za zajem in analizo pomika. Regulacija se izvaja z uporabo integriranega senzorja pomika *LinACE*. Servo ventil 4/3, prikazan na sliki 1, smo zamenjali z digitalnim hidravličnim piezo ventilom. Funkcionalnost 4/3 batnega drsniskega servo ventila (stanja P-A, B-T in P-B, A-T) smo zagotovili s štirimi visoko-dinamičnimi preklopnimi sedežnimi ventili krmiljeni s piezo aktuatorji. Tako en preklopni ventil nadomešča en krmilni rob konvencionalnega 4/3 batnega drsniskega ventila. Hidravlični piezo ventil je podrobneje predstavljen v nadaljevanju kot tudi ostale pomembne komponente sistema.

2.1. Hidravlični valj

Podjetje RLS (Rotary and linear motion sensors) razvija novo generacijo merilnikov pomika *LinACE TM*, ki jih lahko vgradimo v hidravlične valje [18]. Merilnik je sestavljen iz batnice in zaznavala kot je prikazano na sliki 2.

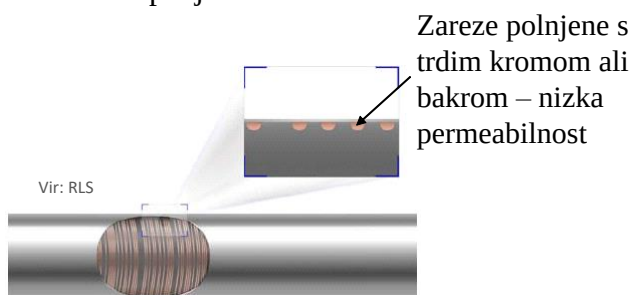


Vir: RLS

Slika 2: *LinACE TM* merilnik pomika.

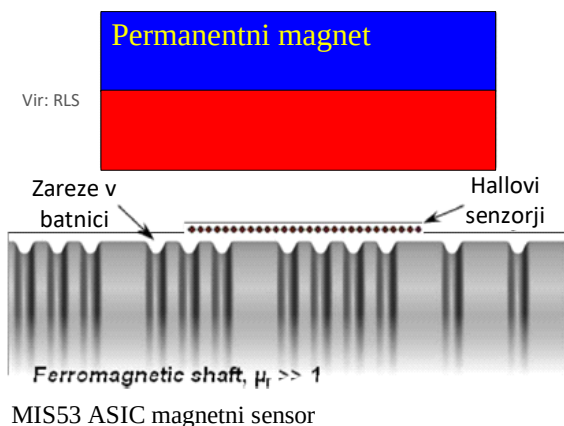
Posebnost predstavlja batnica (prikazana na sliki 1 kot pozicija 1) na kateri je kodni zapis kot je prikazan na sliki 3 [18]. Zapis na batnici predstavlja zareze polnjene z materialom nizke

permeabilnosti (krom, baker). Drug možen način zapisa kode na batnico je izdelava kode z laserskim žarkom. Na ta način izdelamo področja nizke permeabilnosti, ki so rezultat lokalne strukturne spremembe zaradi toplotne obdelave – NOVA TEHNOLOGIJA. Glavni problem pri tem predstavlja zagotavljanje toleranc batnice po obdelavi z laserjem. Zaostale notranje napetosti zaradi visoke koncentracije vnosa energije laserskega žarka povzročajo ukrivljenost batnice in s tem odstopanja od toleranc.



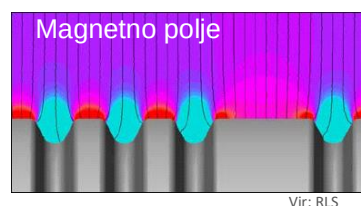
Slika 3: Hidravlični valj z integriranim senzorjem pomika batnice.

Nadalje ta kodni zapis prepoznavamo z optičnim senzorjem *LinACE TM* (pozicija 2 na sliki 1) sestavljenim iz velikega števila Hall senzorjev postavljenih v vrsto (slika 4).



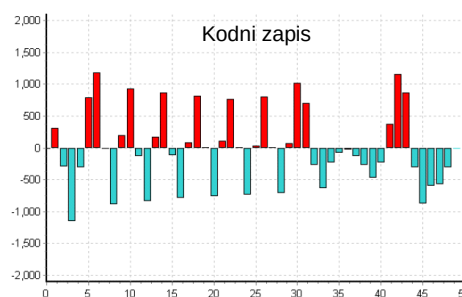
Slika 4: Branje kodnega zapisa s Hall senzorji.

Hall senzorji zaznavajo majhna odstopanja magnetnega polja kot prikazuje slika 5. Hall senzorji delujejo po dveh principih: bipolarno delovanje omogoča zaznavanje majhnih magnetnih polj, medtem ko unipolarno delovanje zaznava spremembe magnetnega polja permanentnega magneta zaradi vpliva bližine kovinskih predmetov.



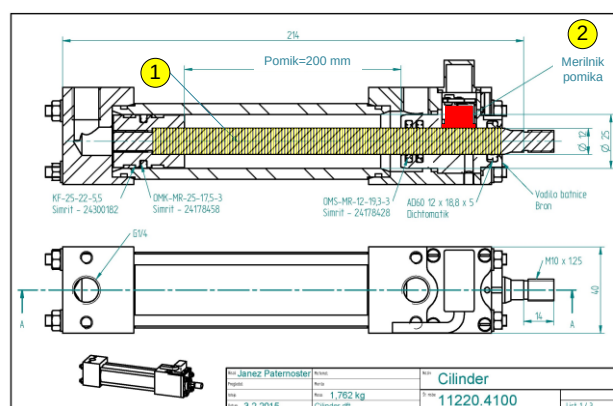
Slika 5: Magnetno polje v območju kodnega zapisa na batnici.

Kot rezultat zaznavanja sprememb magnetnega polja dobimo nov kodni zapis primeren za nadaljnjo obdelavo (slika 6).



Slika 6: Kodni zapis kot posledica zaznavanja magnetnega polja s Hall senzorji.

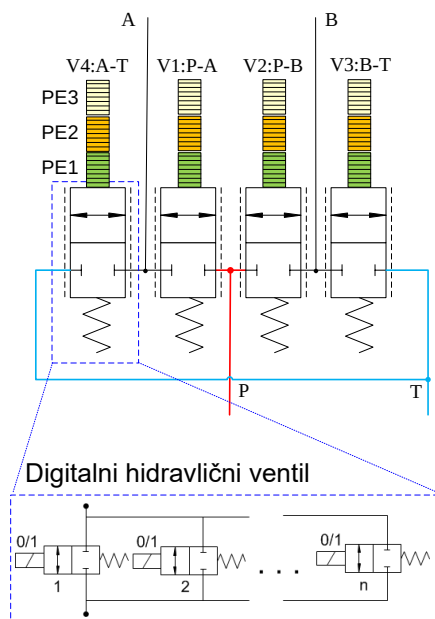
Na novo razvite komponente merilnika pomika smo vgradili v hidravlični valj kot prikazuje slika 7. Batnica s kodnim zapisom je dejansko batnica hidravličnega valja (pozicija 1 na sliki 7) medtem ko je senzor vgrajen v glavo hidravličnega valja (pozicija 2 na sliki 7). Merilnik predstavlja absolutni merilnik pomika, ki je izredno robusten, omogoča delovanje do hitrosti 5 m/s (pomik batnice) in zagotavlja ločljivost do 0,5 mikro metra.



Slika 7: Hidravlični valj z integriranim merilnikom pomika.

2.2. Digitalni hidravlični piezo ventil

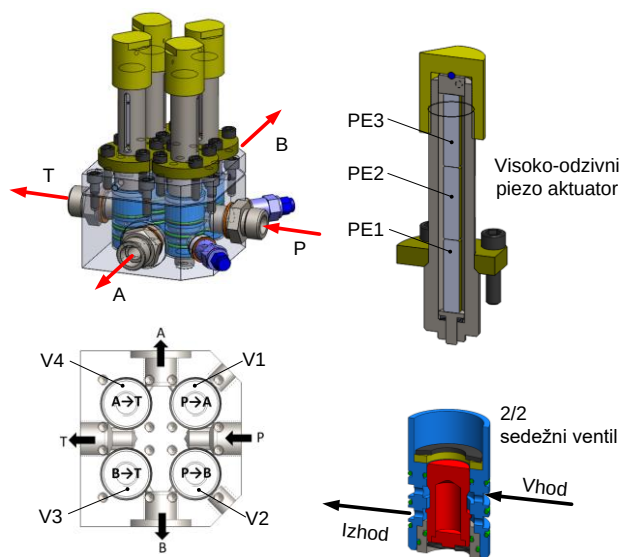
Eno od glavnih komponent hidravlične linearne osi predstavlja digitalni hidravlični piezo ventil. Kaj pomeni digitalni ventil v hidravliki lahko pojasnimo s sliko 8. Vsak preklopni ventil lahko dosega več diskretnih stanja zato ga lahko obravnavamo kot več vzporedno vezanih preklonnih ventilov. Ti so lahko enake velikosti ali različne. V našem primeru velikost odprtja ventila in s tem diskretna stanja izhodne veličine dosežemo poljubno. Z enim preklonnim ventilom v prvi fazi lahko dosežemo tri diskretna stanja pri vklopu posameznih piezo elementov PE v enem aktuatorju ventila (PNM metoda). Nadalje lahko s PWM metodo dosežemo še vmesna diskretna stanja. Ravno to dejstvo, da uporabimo en preklonni ventil v kombinaciji z naprednim piezo aktuatorjem, ki ga lahko krmilimo z več diskretnimi stanji je ena od prednosti v primerjavi z digitalnimi hidravličnimi ventili ko za doseganje večjih diskretnih izhodnih veličin potrebujemo veliko število preklonnih ventilov.



Slika 8: Digitalni hidravlični ventili.

Digitalni hidravlični piezo ventil je sestavljen iz 4 preklonnih ventilov (V1 do V4 prikazan na sliki 9) krmiljenih s piezo aktuatorji (slika 9). Hiter odziv ventila je dosežen zaradi optimizacije oblike krmilnega bata in ohišja ventila, kjer smo tokovne sile fluida zmanjšali za okrog 30%. Na ta

način smo dosegli tudi bolj stabilno delovanje. Piezo aktuator je sestavljen iz treh piezo elementov, ki so vgrajeni v primerno ohišje za zagotavljanje ustreznega prednapetja in možnost vgradnje v ventilski blok. Maksimalni pomik aktuatorjev znaša 75 mikronov kar določa pretok skozi en preklonni ventil približno $Q = 20 \text{ l/min}$ pri tlačni razliki 35 bar. Odzivnost ventila znaša pod 0,3 ms kar je do 15x boljše od odzivnosti konvencionalnega servo ventila (5-10 ms). Glavna prednost digitalnega hidravličnega piezo ventila se kaže v odzivnem času v celotnem območju signalov. Bistvene razlike v času za doseganje 10% ali 100% odprtja ventila NI (razlika 0,05 ms). Vemo, da je odzivni čas servo ventila močno odvisen od velikosti odprtja ventila. V območju malih signalov (do 10%) ima servo ventil dobro dinamiko, medtem ko se pri večjih signali dinamika ventila močno poslabša.



Slika 9: Digitalni hidravlični piezventil - zgradba.

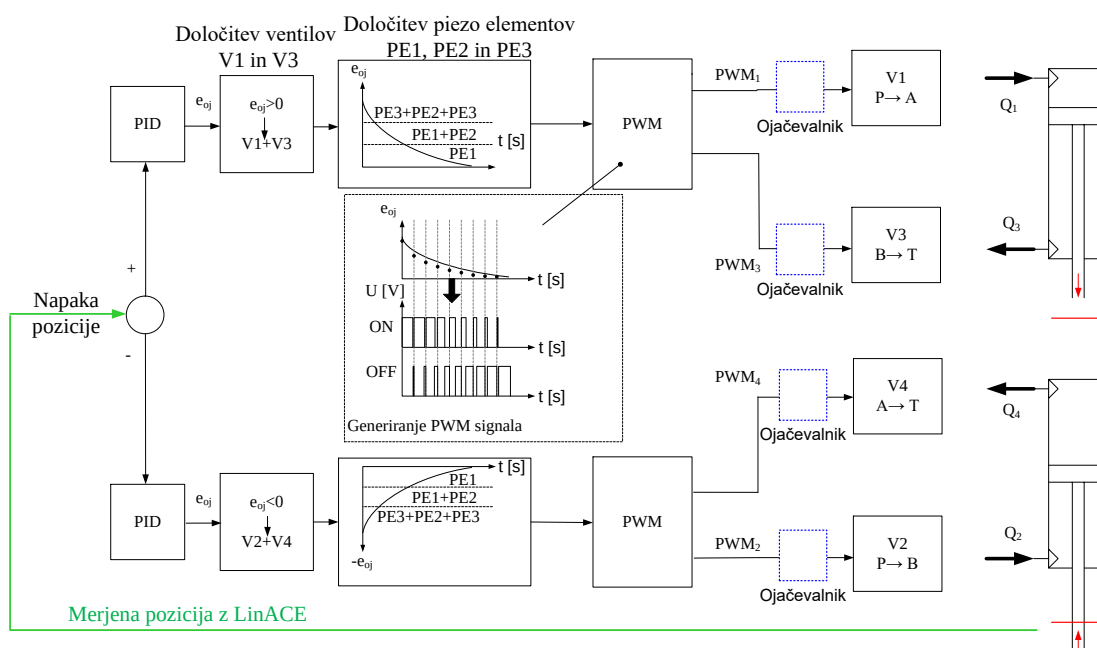
2.2. Krmilna elektronika in krmilni algoritem

V laboratoriju LASIM (UL, FS) smo razvili novo krmilno elektroniko za kriljenje 12 piezo elementov, ki so vgrajeni v aktuatorje digitalnega hidravličnega ventila. Piezo elementi so krmiljeni popolnoma neodvisno, kar daje sistemu visoko fleksibilnost in možnost razvoja novih krmilnih algoritmov.

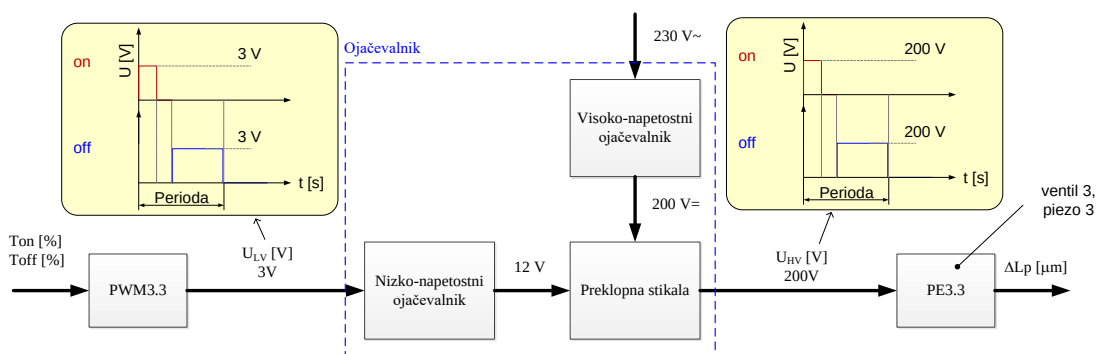
Krmilni sistem, shematično predstavljen na sliki 10, je sestavljen iz treh glavnih komponent: računalnik, mikrokrmilnik in ojačevalniki.

Računalnik je povezan z mikrokrmilnikom, ki krmili podsistem ojačevalnikov. Preko računalnika zajemamo signale senzorjev. Kreiramo lahko poljubne referenčne signale pozicije, izbiramo vrste krmilnih metod in parametrov (PID, PWM, PNM). V osnovi je uporabljena PID regulacija (slika 10). Željeni referenčni signal pomika primerjamo z dejansko izmerjeno vrednostjo pomika (merilnik LinACE)

in dobimo napako pozicije. Nato se na podlagi pozitivne ali negativne napake (pomik premajhen, pomik prevelik) določijo aktivni in neaktivni preklopni ventili (V1 do V4). Glede na velikost napake v poziciji v nadaljnjem koraku določimo število aktivnih in neaktivnih piezo elementov aktuatorjev ventilov (PE1 do PE3) – PNM metoda. Sledi generiranje ustreznih PWM signalov nizke napetosti (3-12 V) in visoke napetosti (200 V) za aktivne piezo elemente, ki krmilijo odprtje ventila in s tem pretok ventila.



Slika 10: Shema krmilnega algoritma.



Slika 11: Generiranje PWM signalov in pretvorba v visoko-napetostni krmilni signal.

Krmilni algoritem in krmilni signali potekajo na nivoju nizko-napetostnega električnega kroga (3-12 V). Z nizkonapetostnimi signali vklapljammo preklopna stikala za povezavo visoko-

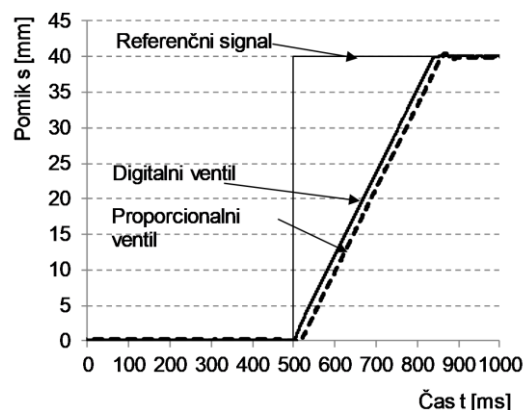
napetostnega električnega kroga in generiranje PWM krmilnega signala visoke napetosti (200 V), ki je potrebna za krmiljenje piezo elementov v aktuatorjih ventilov. Na primeru vklopa ventila

V3 in generiranja PWM signala za 3. piezo element ventil V3 si pogledjmo kako generiramo ustrezen PWM signal visoke napetosti (slika 11). Za posamezen piezo element (PE3, V3-PWM3.3) določimo vklopne in izklopne pulze PWM signala (primer: PWM3.3. → 40% ON, 60% OFF). PWM signal naprej pretvorimo v signal napetosti 12 V, ki je potreben za krmiljenje preklopnih stikal visoko-napetostnega ojačevalnika. Ta napetost iz omrežja pretvori v ustrezno napetost primerno za krmiljenje piezo elementov (200 V). Na ta način dobimo PWM signal PWM3.3 velikosti amplitude 200 V in lahko krmilimo piezo element PE3.3.

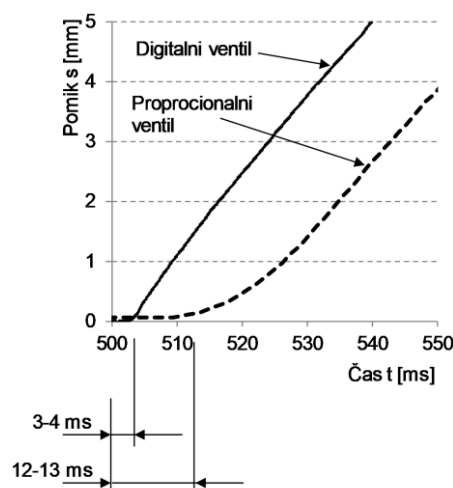
5. EKSPERIMENTALNI PREIZKUSI

V sklopu eksperimentalnih preizkusov smo primerjali krmiljenje hidravlične linearne osi krmiljene s konvencionalnim proporcionalnim ventilom in novim digitalni piezo ventilom. Izvedli smo dva testa. Prvi test predstavlja odziv sistema pri krmiljenju batnice hidravličnega valja ko izvedemo pomik iz začetne lege v končno želeno pozicijo (slike 12, 13 in 14). Pri tem opazujemo prehodno območje pospeševanja in zaviranja batnice hidravličnega valja. Drugi test predstavlja pozicijsko ločljivost, ki smo jo izvedli le za linearno os krmiljeno z digitalnim ventilom (sliki 15).

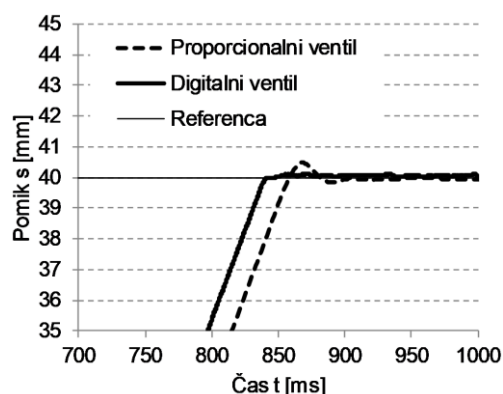
Slika 12 prikazuje krmiljenje batnice hidravličnega valja od začetne pozicije 0 mm do končne pozicije 40 mm. Podrobneje smo analizirali prehodna področja prikazana s sliko 13 (odziv sistema in pospeševanje) in sliko 14 (odziv sistema in zaviranje). Opazimo lahko, da je sistem krilen z digitalnim piezo ventilom bolj odziven tako pri pospeševanju kot tudi pri zaviranju batnice hidravličnega valja. Predvsem se opazi razlika pri času zakasnitve kjer sistem krmiljen z digitalnim signalom reagira hitreje (3-4 ms na sliki 13). Podobno velja pri doseganju končne pozicije batnice hidravličnega valja, kjer se pri sistemu krmiljenem s proporcionalnim ventilom pojavi prenehanje sistema in potreben je določen čas za ustalitev pozicije batnice. Pri sistemu krmiljenem z digitalnim ventilom prenehanja sistema ni zaslediti.



Slika 12: Primerjava med digitalnim piezo ventilom in konvencionalnim proporcionalnim ventilom.

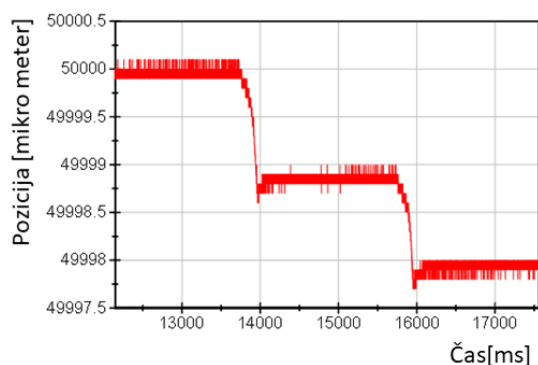


Slika 13: Odziv sistema 1.



Slika 14: Odziv sistema 2.

Na sliki 15 je prikazan odziv sistema pri krmiljenju po korakih 1 mikrometer. Digitalna hidravlična linearna os krmiljena z digitalnim ventilom omogoča pozicijsko ločljivost do 1 mikron tako za gibanje batnice valja naprej kot tudi nazaj.



Slika 15: Ločljivost pomika batnice 1.

5. ZAKLJUČEK

Prispevek predstavlja novo hidravlično linearno os, ki je krmiljena z digitalnim piezo ventilom in novim integriranim merilnikom pomika. Dokazujemo, da so digitalni hidravlični piezo ventili v kombinaciji z ustrezno krmilno elektroniko, krmilnim algoritmom in senzoriko za izvajanje pozicijske regulacije batnice hidravličnega valja dobra alternativa za zamenjavo servo ventilov v visoko-dinamičnih hidravličnih pozicionirnih sistemih. Z uporabo novih komponent dosegamo boljše odzive hidravlične linearne osi in tudi boljšo pozicijsko ločljivost (do 1 mikron) v primerjavi s konvencionalnimi servo hidravličnimi pogoni (5-8 mikronov).

Literatura

- [1] Esposito, A. Fluid Power with applications: International fifth edition. Miami University, Oxford, Ohio, Department of Manufacturing Engineering, 2000
- [2] Bower, J. Digital Fluid Control System. US Patent No. 2999482, 1961
- [3] Motohiro, K., Hitoshi I., Makoto I., Hiromu H. Fast-response and high-precision positioning using iterative learning control. Department of Electrical and Computer Engineering, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2007
- [4] Herakovič, N. Mechatronische Systeme in der Ventilentwicklung. Int. j. autom. Austria, 2007, letn. 15, št. 1, str. 43-52
- [5] Uusi-Heikkilä J. IHA-Intelligent Hydraulics and Automation [online]. Finland: Tampere University of Technology, [view at the time 10.10.2011]. Available on: <http://www.iha.tut.fi/research/digihydraulics/>
- [6] Johannes Kepler University Linz. Austria. Institute of Machine Design and Hydraulic Drives. [view at the time 11.10.2011]. Available on: <http://imh.jku.at/research/index.en.php>
- [7] Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS). RWTH Aachen. [view at the time 11.10.2011]. Available on: http://www.ifas.rwth-aachen.de/index_e.php
- [8] Centre for Power Transmission and motion control. United Kingdom: University of Bath. [view at the time 11.10.2011]. Available on: <http://www.bath.ac.uk/ptmc/research/index.html>
- [9] Herakovič, N. Die Untersuchung der Nutzung des Piezoeffektes zur Ansteuerung fluidtechnischer Ventile. Der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen vorgelegte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften. Aachen: [N. Herakovič], 1995. IV, 152 f., ilustr
- [10] Herakovič, N. Flow-force analysis in a hydraulic sliding-spool valve. Strojstvo, 2007, letn. 49, št. 3, str. 117-126
- [11] Herakovič, N. Zmanjševanje krmilnih sil v hidravličnih ventilih = The reduction of control forces in hydraulic valves. Ventil (Ljubl.), 2001, letn. 7, št. 4, str. 214-217
- [12] Reichert, M., Murrenhoff H. New Concepts and Design of High Response Hydraulic Valves Using Piezo-Technology. Institute for Fluid Power Drives and Controls, RWTH Aachen University, Germany, 2010
- [13] Reichert, M. Development of High-Response Piezo-Servovalves for Improved Performance of Electrohydraulic Cylinder Drives. Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation, 04.02.2010
- [14] Linjama, M., Laamanen, A. & Vilenius, M. Is it time for digital hydraulics? Proceedings of the Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, May 7-9, 2003, Tampere, Finland, pp. 347-366
- [15] Linjama, M. Energy saving digital hydraulics. In Proc. Of The Second Workshop on Digital Fluid Power, DFP' 09, stran 5-20, Linz, Avstrija, 12-13 November 2009
- [16] Uusitalo, J. P. A novel Digital Hydraulic Valve package: A fast and Small Multiphysics Design. Thesis for the degree of doctor of Science in Technology, Tampere university of technology, Publication 912, 30th of September 2010
- [17] Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff. Trends in Valve Development. Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS), RWTH Aachen, O + P »Ölhydraulik und Pneumatik« 46 Nr. 4 (2003)
- [18] Matjaz Sivec: LinACE in-axis absolute linear encoder. RLS: Rotary and linear motion sensors.

NAČRTOVANJE OSNOVNIH ROČNIH MONTAŽNIH OPERACIJ Z INTEGRACIJO SIMULACIJSKIH ORODIJ V PROIZVODNEM PROCESU

Maja TURK, Matevž RESMAN, Miriam CUKJATI, Niko HERAKOVIČ
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za strego, montažo in pnevmatiko

POVZETEK

Pri načrtovanju osnovnih ročni montažnih operacij smo se osredotočali na simulacijski model. Simulacijski model se ukvarja z vlogo delavca pri montaži v virtualnem okolju. Delavec izvaja zaporedje osnovnih gibov oz. nalog, ki so pogoste v proizvodnem okolju, kot so seganje, prijemanje, hoja, dvig itd. Raziskava, ki smo jo izvedli, primerja časovno poročilo analitične MTM metode in avtomatično generirano časovno poročilo s simulacijskim orodjem Siemens Jack 8.3. Metodologija nam poda vpogled v vplivne parametre, kot sta masa in dimenzija objekta, s katerim delavec izvaja montažne operacije (npr. dvig škatle s tal) in kako te vplivni parametri vplivajo na časovni poročili. Rezultati raziskave prikazujejo, da imata masa in dimenzija objekta različen vpliv na trajanje celotnega zaporedja nalog, če ju ovrednotimo po MTM oz. simulacijski metodi. Poudariti moramo, da se je raziskava osredotočala le na časovno analizo in ne na ergonomski vidik izvedbe nalog.

1. UVOD

Industrijska podjetja se srečujejo z novimi izzivi zaradi povečanja mednarodne konkurence na trgu, kot so dvig produktivnosti, novi proizvodi in skrajševanje pretočnega časa. Ob vsem tem pa morajo upoštevati tudi ergonomijo pri oblikovanju delovnih mest, saj tako dvigujejo produktivnost in učinkovitost ter zagotavljajo zdravje delavcev ter privabljajo nove delavce [1].

Mnoga podjetja si v zgodnji fazi razvoja za oblikovanje delovnega mesta primerne za delavca pomagajo z DHM (ang. *Digital Human Modelling*). Z uporabo orodja digitalnega modeliranja ljudi (DHM) se dvigne kvaliteta dela, saj se zmanjša število odvečnih sprememb, ki jih morajo podjetja izvajati, da zagotovijo ustrezne pogoje dela. Poleg tega pa se izboljša varnost proizvodov, ker se eliminira ergonomske probleme že v fazi razvoja [2].

DHM je široko uporaben pri ergonomskih analizah proizvoda in delovnega mesta. DHM je orodje, ki primarno odgovori na vprašanja povezana s fizičnimi interakcijami med ljudmi in objekti [3]. Prednost DHM orodij so simulacije, ki jasno podajo potencialne probleme, ki jih lahko pri oblikovanju spregledamo [4].

Technomatix JACK je programski paket, ki se uporablja za preprečevanje napak povezanih z oblikovanjem delovnih mest za človeka (človeški

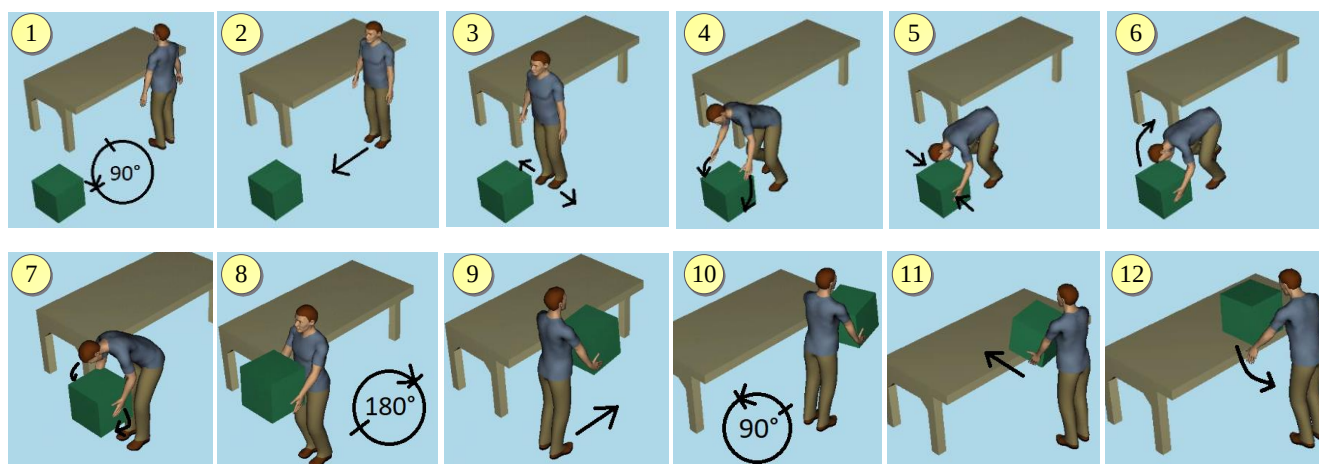
faktor, ergonomija). JACK je celosten sistem za generiranje 3D okolja v virtualnem svetu. Z JACK-om lahko ustvarimo virtualne delavce, analiziramo človeški faktori, analiziramo delavce v simulaciji delovnega okolja, ocenjujemo primernost delovnih operacij in vzdrževanja, itd. Časovna poročila se generirajo avtomatično za vsako simulacijsko nalogo. Izračun časa za posamezno nalogo je osnovan na MTM (ang. *Methods Time Measurement*) časovnem standardu. [5].

MTM metoda je postopek, ki analizira katerokoli ročno operacijo oz. metoda osnovnih gibov, ki so potrebni za njeno izvedbo. Vsakemu gibu predpiše vnaprej določen časovni standard, ki je opredeljen z naravo giba in s pogoji, znotraj katerih je bil gib opravljen. Metoda je dobro preverjena, rezultati so ponovljivi in je praktično uporabna. Metoda upošteva tudi sociološki vidik delavca.

2. ŠTUDIJA PRIMERA

Študija zajema preprost in pogost problem, ki se pojavlja v procesu ročne montaže. Za isti primer smo ločeno izvedli časovno analizo po MTM metodi in s simulacijskim orodjem JACK.

V začetnem stanju delavec stoji pred mizo, škatla pa levo od delavca. Delavec mora iti po škatlo, jo dvigniti in odložiti na mizo.



Slika 1: Zaporedje nalog obravnavanih v študiji, kot osnova za časovno analizo.

Slika 1 prikazuje zaporedje nalog/gibov, ki jih izvaja delavec v danem primeru. Iz začetnega stanja, se delavec obrne za 90° (1) in prehodi razdaljo 1200 mm proti škatli (2). Ko pride do škatle se razkorači za boljše ravnotežje pri dvigovanju bremena (3). Nato se seže po škatlo (4). Delavec aplicira silo pravokotno na stranice škatle (5) in jo dvigne (6). Za lažje rokovanje s škatlo, jo med dvigovanjem preprime (7). Sledi obrat za 180° (8), hoja do izhodiščne točke (9), obrat za 90° proti mizi (10), odlaganje škatle (11) ter postavitve v začetno držo (12). Zaporedje nalog je bilo enako tako za določanje časa po MTM metodi, kot tudi za simulacijo v programu JACK.

Za dani primer smo primerjali petindvajset različnih kombinacij škatle. Parametra, ki sta se spreminjala sta masa in dimenzija škatle kockaste oblike. Preučili smo kako ta parametra vplivata na trajanje nalog, ki jih izvaja delavec.

3. REZULTATI

V tem poglavju bomo predstavili rezultate časovnih poročil, ki smo jih pridobili z MTM izračuni in JACK simulacijo. MTM metoda je analitična metoda, za izračun časovne analize si pomagamo s podatkovnimi tabelami za vsako nalogo, medtem ko JACK samodejno generira časovno poročilo brez poseganja analitika v izračune.

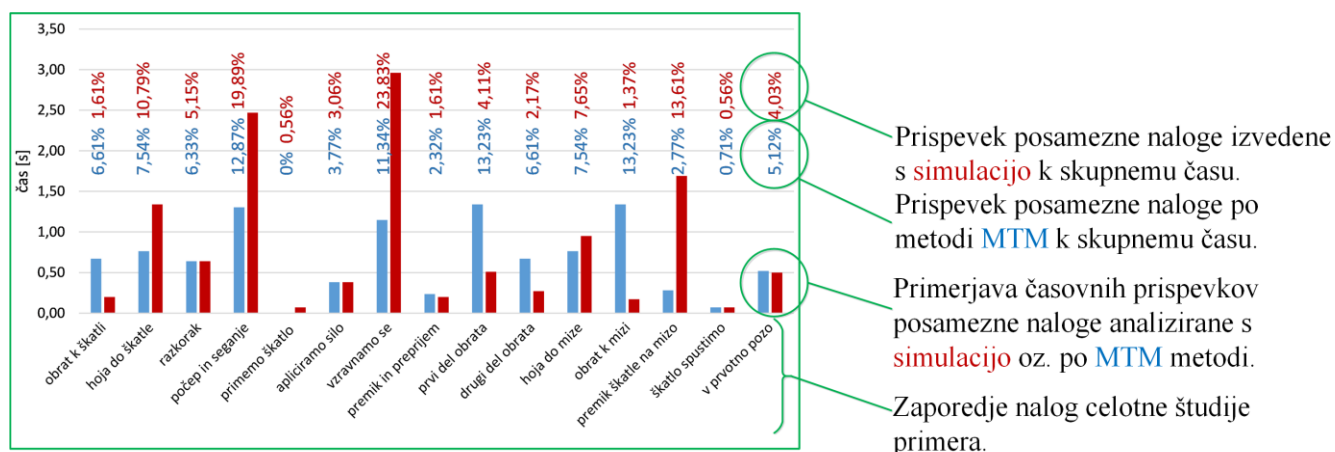
Slika 2 predstavlja vse gibe, ki jih je delavec izvajal v študiji glede na izračune časov po MTM

metodi in gleda na čase simulacije po JACK-u. Opazimo lahko, da stolpci za posamezen gib niso poravnani, ampak se v nekaterih primerih tudi precej razlikujejo. To nam pove, da enaki gibi prispevajo k skupnem času različen delež, če upoštevamo MTM metodo oz. simulacijo. Pri gibu »vzravnamo se« vidimo, da je prispevek časa k skupnem času po MTM metodi 11,34 %, pri simulaciji pa ta gib prispeva kar 23,83 %. Sklepamo lahko, da ima enak gib večji oz. manjši vpliv na skupni čas, če upoštevamo prvi oz. drugi pristop merjenja časa.

Skupni čas vseh nalog po MTM metodi znaša 10,12 sekund, s simulacijo pa 12,42 sekund. Razlika je približno 20 %.

Metodi se poleg različnega pristopa določanja časa (analitični izračun, avtomatično generiranje) razlikujeta tudi po hitrosti spreminjanja objektov, ki sodelujejo. Pri MTM metodi moramo za vsako spremembo osebe ali objekta, časovni izračun izvesti od začetka. Pri JACK-u pa se uporabi »kaj-če« scenarije za različne primere. S tem lahko v simulaciji hitro zamenjamo npr. parametre objektov (masa, dimenzija) ali celo delavca (spol, antropometrične značilnosti).

Preglednici 1 in 2 prikazujeta rezultate skupnega časa zaporedja vseh nalog za različne kombinacije dimenzij in mas škatle. Rezultati MTM metode prikazujejo linearno odvisnost med skupnim časom in maso ter med skupnim časom in dimenzijo škatle (preglednica 1).



Slika 2: Časovni prispevek posameznih nalog k skupnemu času.

Preglednica 1: Skupni čas po MTM metodi za različne dimenzije in mase škatle.

		Masa škatle [kg]				
		4.5	9.1	13.6	18.1	20.4
Dimenzija škatle [mm]	203.2	9.32	9.60	9.89	10.17	10.34
	304.8	9.43	9.72	10.01	10.29	10.44
	406.4	9.54	9.83	10.12	10.42	10.56
	508.0	9.66	9.95	10.24	10.54	10.68
	609.6	9.77	10.06	10.36	10.66	10.80

Preglednica 2: Skupni čas simulacije JACK za različne dimenzije in mase škatle.

		Masa škatle [kg]				
		4.5	9.1	13.6	18.1	20.4
Dimenzija škatle [mm]	203.2	12.06	12.20	12.34	12.51	12.57
	304.8	12.18	12.31	12.43	12.56	12.62
	406.4	12.15	12.28	12.41	12.54	12.60
	508.0	12.05	12.17	12.30	12.43	12.47
	609.6	12.36	12.48	12.60	12.72	12.79

Pri rezultatih s simulacijo v programu JACK (preglednici 2) pa ugotovimo, da niti masa niti dimenzija škatle ne vplivata na skupni čas, oz. spremembo le tega, kar ni logično v primerjavi z realnim svetom.

Skupni časi se spreminjajo zaradi ročno podaljšanega časa pri apliciranju sile, da se delavec lažje prilagodi na težje breme ter zaradi prilagoditve sklepov virtualnega delavca pri manjši oz. večji dimenziji škatle.

4. ZAKLJUČEK

Za analizo danega primera smo uporabili MTM metodo in programski paket JACK 8.3. Zaporedje nalog, ki smo jih obravnavali je preprosto primer dvigovanja škatle iz tal na mizo. Cilj je bil določiti, ali masa in dimenzija škatle vplivata na skupni čas. Ugotovili smo, da se pri MTM metodi skupni čas linearno podaljša tako s spremembo mase kot s spremembo dimenzije škatle. Pri časovni analizi s simulacijo Jack smo ugotovili, da masa in dimenzij škatle na vplivata na skupni čas, kar ni konsistentno z realnim okoljem, kjer človek težjo in večjo škatlo dviguje dlje časa, kot lažjo in manjšo.

Literatura

- [1] Törnström, L., Amprazis, J., Christmansson, M. and Eklund, J. (2008). A corporate workplace model for ergonomic assessments and improvements. *Applied Ergonomics*, 39, 219–228.
- [2] Onan Demireli, H. and Duffy, V.G. (2007). Applications of Digital Human Modelling in Industry. V.G. Duffy (Ed.), *Digital Human Modeling*, 824–832. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [3] Reed, M.P., Faraway, J., Chaffin, D.B. and Martin B.J. (2006). The HUMOSIM Ergonomics Framework: A New Approach to Digital Human Simulation for Ergonomic Analysis. *SAE International*, 2006-01-2365.
- [4] Chaffin, D.B. (2005). Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics*, 48:5, 478-491.
- [5] Siemens Technomatix Jack (2015). Jack user manual version 8.3. *Siemens Product Lifecycle Management Software*. California, USA.

KRMILNI ALGORITEM ZA NATANČNO KRMILJENJE POZICIJE DVEH ANTAGONISTIČNO VPETIH PNEVMATIČNIH MIŠIC

Jernej PROTNER, mag. inž. str., dr. Miha PIPAN, prof. dr. Niko HERAKOVIČ
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

POVZETEK

Zaradi visokega razmerja med maso in generirano silo ter fleksibilnosti sistema pnevmatičnih mišic, se je v zadnjem času povečala želja po njihovi uporabi. Glavna pomankljivost pnevmatičnih mišic je njihova nelinearna karakteristika, ki otežuje natančnost krmiljenja. Prispevek obravnava razvoj novega krmilnega algoritma za natančno krmiljenje pozicije dveh antagonistično vpetih pnevmatičnih mišic. Krmiljenje pozicije in tlaka smo izvedli s štirimi PID krmilniki (za vsak ventil posebej), krmiljenje ventilov pa je za antagonističen sistem izvedeno z že razvitim A-PID krmilnim algoritmom, laboratorija LASIM. S tem smo dosegli za 66,6% boljšo natančnost držanja pozicije glede na primerljive sisteme drugih raziskovalcev.

1. UVOD

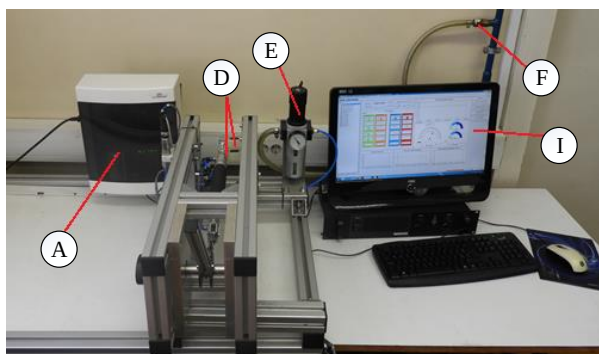
S pospešenim razvojem tako industrijskih kot tudi bio-mehanskih robotskih sistemov, se je v zadnjem času močno povečalo zanimanje za uporabo umetnih mišic kot novih načinov akcije. K temu je močno prispeval razvoj novih materialov, kot so npr. karbonske nanocevice, prevodni polimeri, kovine in polimeri s "spominom" itd. ter podrobne raziskave tistih lastnosti umetnih mišic, ki zagotavljajo prednosti pred klasičnimi aktuatorji [1].

V prispevku so obravnavane pnevmatične umetne mišice, ki imajo v primerjavi z ostalimi umetnimi mišicami največjo hitrost odziva in hitrost krčenja. Tako kot ostale umetne mišice jih odlikujejo tudi fleksibilnost ter visoko razmerje med maso in generirano silo [2]–[4]. Kljub naštetim prednostim pa je njihova uporaba v industriji dokaj redka, kar je posledica primanjkljaja ustreznih krmilnih algoritmov, ki bi omogočali natančno pozicioniranje in hitro odzivnost [5]. Velik problem pri krmiljenju predstavljajo tudi nelinearne karakteristike mišice, lekaže ventilov ter pojav histereze [6]–[8]. Zato krmiljenje sistema dveh antagonistično povezanih pnevmatičnih mišic običajno temelji na naprednih PID krmilnih algoritmihi, ki pa so zaradi počasnega odziva pri hitrih spremembah in neprilagodljivosti na spremembe v sistemu nadgrajeni z nevronske

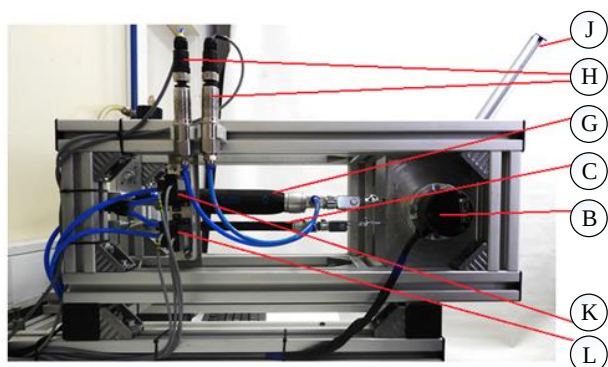
mrežami, mehko logiko, prediktivno kontrolo itd. [9]–[11]. Za krmiljenje tlaka se običajno uporabljajo proporcionalni in nekoliko redkeje servo ventili, uporaba hitrih preklopnih ventilov s PWM modulacijo pa je redkejša. V prispevku je predstavljen krmilni algoritem za natančno krmiljenje pozicije, ki predstavlja nadgradnjo obstoječega adaptivnega PID (A-PID) krmilnega algoritma razvitega v LASIM-u [12].

2. OPIS SISTEMA

Preizkuševališče, ki smo ga razvili za testiranje odziva pnevmatičnih mišic je prikazano na Sliki 1 in Sliki 2, pri čemer oznaka A predstavlja krmilnik Beckhoff CX5010 z ustreznimi moduli, B predstavlja inkrementalni rotacijski enkoder, C predstavlja antagonistično mišico, z oznako D so predstavljeni senzorji sile, z E regulator tlaka, s F omrežje stisnjenega zraka, z oznako G je predstavljena agonistična mišica, s H senzorji tlaka, z I krmilni računalnik, z J roka aktuatorja, z K ventili MHJ10-MF in z L ventili MHJ10-LF.



Slika 1: Preizkuševališče



Slika 2: Sestavni deli preizkuševališča

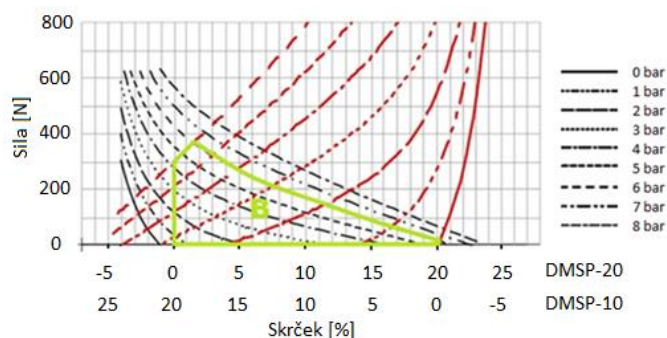
Preizkuševališče je sestavljeno iz dveh antagonistično povezanih Festo pnevmatičnih mišic, pri čemer tip DMSP-20-200N RM-RM služi kot agonist, tip DMSP-10-200N RM-RM pa kot antagonist. Za krmiljenje tlaka v mišici DMSP-20 je uporabljen par Festo hitro-preklopnih ventilov MHJ10-S-2.5-MF, v mišici MDSP-10 pa par Festo hitro-preklopnih ventilov MHJ10-S-2.5-LF. Merjenje tlaka je izvedeno z dvema senzorjema Festo SDET-22T-D10-G14-U-M12. Merjenje sile pa z dvema senzorjema Elane ELC-L116. Preizkuševališče je postavljeno tako, da sta pnevmatični mišici vpeti na zasučni bobn preko jeklene vrvi. Spodrsavanje vrvi na bobnu je preprečeno z dvojnimi ovitjem jeklenice in dodatnim varnostnim vijakom. Na bobn je pritrjena roka pnevmatičnega aktuatorja, ki določa njegovo delovanje. Za meritev pozicije je uporabljen inkrementalni rotacijski enkoder Heidenhain Rod 426E.004 1080. Vhodni/izhodni signal so procesirani z industrijskim krmilnikom Beckhoff CX 5010 z ustreznimi moduli, ki so prikazani v Preglednici 1.

Preglednica 1: Specifikacije modulov krmilnika

	Opis	Specifikacije
CX5010 [17]	Krmilnik	1,1 GHz Intel Atom Z510 procesor
EL5101 [18]	Modul za enkoder	5 V DC, 0,5 A, 32 bit, 1 MHz
2x EL2502 [19]	2-kanalni PWM izhod	24 V DC, 1 A, 16 bit
EL3104 [20]	4-kanalni analogni vhod	-10...10 V, 16 bit
2x EL3351 [21]	1-kanalni vhod za sensor sile	-20...20 mV, 5 V DC, max. 20 mA, 16/32 bit

3. DELOVNO OBMOČJE

Maksimalni zasučni kot pnevmatičnega aktuatorja je 140° . Začetna oz. nična pozicija pnevmatičnega aktuatorja je v najnižji legi roke, pri kotu $\theta_0 = 0^\circ$. Določena je ročno v spodnji legi roke pnevmatičnega aktuatorja t.j. ko je tlak v mišici DMSP-10 6 bar, tlak v mišici DMSP20 pa 0 bar. Potreben skrček mišice za doseganje kota $\theta = 140^\circ$, je 20 % kar določa delovno območje pnevmatičnega aktuatorja. Le-to je določeno s prekritjem grafov generirane sile, mišice DMSP10 ter DMSP20 v odvisnosti od skrčka pri določenem tlaku (Slika 3). Tlačne krivulje mišice DMSP20 so zrcaljene preko y osi.

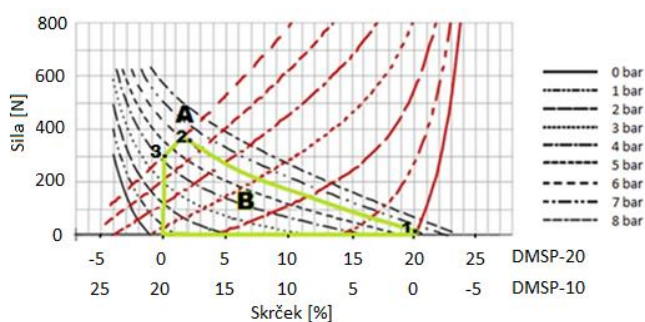


Slika 3: Delovno območje pnevmatičnega aktuatorja (B) [13]: tlačne krivulje mišice DMSP10 (črna barva) in DMSP20 (rdeča barva).

Ker je maksimalni delovni tlak ventila MHJ10 – MF $P_{MF} = 6$ bar, smo delovno območje zmanjšali na območje B. Mišici tako omogočata 20 % skrček in generirata maksimalno silo ~ 400 N pri tlaku $P_{DMSP10} = 6$ bar in $P_{DMSP20} = 6$ bar.

4. NAČIN KRMILJENJA

Najprej ohranjamo konstanten tlak v mišici DMSP10 $P_{DMSP10} = 6$ bar in referenčni poziciji sledimo s povečevanjem tlaka v mišici DMSP20 (krivulja med točkama 1. in 2.). Ko presežemo točko (A) v kateri sta tlaka v mišicah enaka 6 bar, ohranjamo konstanten tlak $P_{DMSP20} = 6$ bar v mišici DMSP20 in referenčni poziciji sledimo z zmanjševanjem tlaka v mišici DMSP10 (krivulja med točka 2. in 3.). Točka A je določena programsko s povečevanjem tlaka v obeh mišicah do 6 ± 0.25 bar, kjer je vrednost zasučnega kota shranjena kot θ_A . Potek je predstavljen na Sliki 4.



Slika 4: Potek krmiljenja pnevmatičnega aktuatorja

5. KRMILNI ALGORITEM

Krmilni algoritem je sestavljen iz štirih ločenih PID krmilnih algoritmov (po en za vsak ventil). Takšna konfiguracija omogoča ločeno kontrolo vhodnih in izhodnih ventilov obeh mišic in tako poveča natančnost določanja pozicije. Poleg tega vsebuje kontrolni algoritem za ventile in modifikacijo PID algoritma, ki sta na podlagi A-PID krmilnega algoritma prilagojena za antagonističen sistem. Za določitev parametrov PID algoritma je bila uporabljena Ziegler-Nicholasova metoda, prilagojena za diskretne sisteme [14].

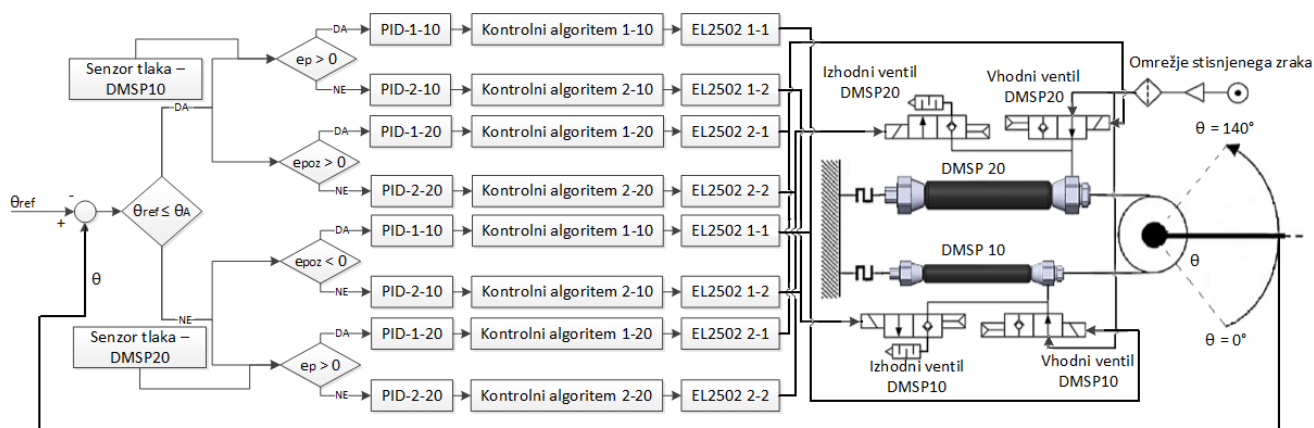
Kot je dokazano v [12], se hitro-preklopni ventili začnejo odpirati šele ko PWM signal doseže najmanjšo potrebno širino pulza, kar pomeni da je nekaj časa sistem v stanju, ko je napaka prisotna vendar se nanjo ne odzove. Krmilni algoritem za ventile tako omogoča hitrejše odzivnost ventilov in posledično manjšo napako pozicije (ki je izračunana kot razlika med

referenčno in dejansko pozicijo). Zaradi nelinearnih lastnosti mišic in posledičnih sprememb togosti in dušenja v mišici, naš algoritem optimira PID parameter glede na referenčno pozicijo (zaradi različnih tlakov v mišici v različnih pozicijah, se notranja sktruktura mišice različno deformira in posledično spreminja njeno togost). Blokovna shema razvitega algoritma je prikazana na Sliki 5, kjer je θ_A zasučni kot v točki A, θ_{ref} je referenčni zasučni kot, θ je dejanski izmerjeni zasučni kot, e_p je pogrešek tlaka (izračunan kot razlika med referenčnim tlakom 6 bar in dejanskim tlakom v antagonistični mišici), e_{poz} je pogrešek pozicije (izračunana kot $\theta_{ref} - \theta$) DMSP10 je antagonistično vpeta mišica, DMSP20 je agonistično vpeta mišica, PID-1/2-10/20 je PID algoritem vhodnega/izhodnega ventila antagonistično/agonistično vpete mišice, Kontrolni algoritem 1/2-10/20 je kontrolni algoritem vhodnega/izhodnega ventila antagonistično/agonistično vpete mišice in EL2502 1/2-1/2 je prvi/drugi modul ter prvi/drugi kanal modula EL2502.

6. REZULTATI IN DISKUSIJA

Analizo krmilnega algoritma smo izvedli s štirimi skočnimi funkcijami različnih amplitud, ki si sledijo ena za drugo. Zaradi večje preglednosti je odziv sistema predstavljen za vsako skočno funkcijo posebej. Pri testiranju na vsako od štirih amplitud smo najprej določili PID parametre nato pa, zaradi nelinearnosti sistema, programsko prilagodili vrednosti PWM signalov (odprtost ventilov) za posamezne referenčne pozicije, glede na odstopek pozicije.

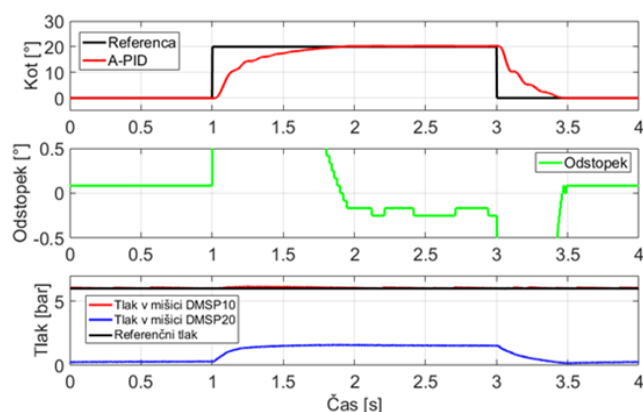
Na Sliki 6 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo 20° . Iz rezultatov je razvidno, da je odstopek negativen kar je posledica lekaže vhodnega ventila, ki jo sistem poskuša kompenzirati z odpiranjem izhodnega ventila. Sistem ne more povsem izničiti vpliva lekaže ventilov, saj je PWM signal izhodnega in vhodnega ventila programsko zmanjšan.



Slika 5: Blokovna shema krmilnega algoritma

Razlog za to omejitev je nelinearnost sistema oz. nestabilnosti sistema brez prilagoditve PWM signala in pojava oscilacije. Drug razlog za negativen odstopok in posledično popravljanje pozicije so zaostale napetosti v mišici, le-ta se namreč pri napihovanju (krčenju) deformira, kar pomeni, da se mišica zaradi deformacije notranjih sten gumijastega plašča skrči tudi zatem, ko se dovodni ventil zapre. Če smo PID parametre povečali z namenom doseganja večje natančnosti je sistem postal nestabilen.

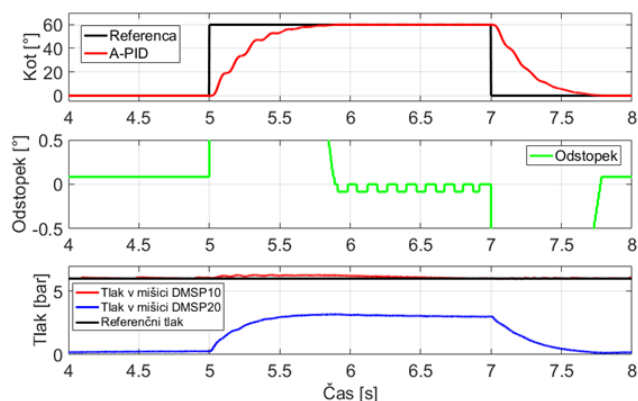
Ker smo krmilni algoritem zasnovali tako, da ima vsak ventil svoj PID krmilni algoritem, smo lahko optimirali PID parametre izhodnega ventila za doseganje hitrejšega izhodnega odziva, ter manjšega odstopka pozicije od reference 0° .



Slika 6: Odziv na skočno funkcijo z amplitudo 20°

Na Sliki 7 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo 60° . Iz rezultatov je razvidno, da ker vhodni in izhodni ventil delujeta pri približno

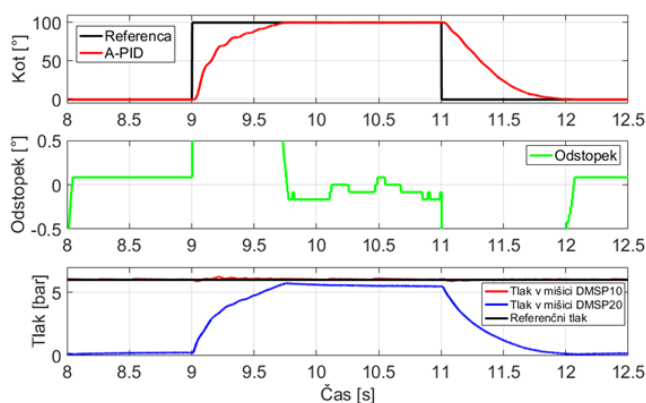
enaki tlačni razliki, je hitrost njenega odziva skoraj enaka. Zato je odstopok pozicije manjši kot pri odzivu na referenco 20° (Slika 6). Razvidno je, da je prisotna lekaža vhodnega ventila, ki jo sistem stalno kompenzira z vklopom izhodnega ventila. Poleg tega na zmanjševanje odstopka pozicije vpliva tudi ločljivost enkoderja (okoli $0,07^\circ$). Ker sistem ne zazna napake manjše od te vrednosti, se sistem odzove šele, ko je napaka večja in vklopi izhodni ventil mišice DMSP20.



Slika 7: Odziv sistema na skočno funkcijo z amplitudo 60° .

Na Sliki 8 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo 100° . Iz rezultatov je razvidno, da je začetni odstopok pozicije delno posledica lekaže vhodnega ventila, zaostalih napetosti v mišici ter previsoke vrednosti proporcionalnega člena (pri manjši vrednosti se občutno zmanjša hitrost odziva sistema). Sistem pozicijo popravlja z vklopom izhodnega ventila, ki pa deluje pri

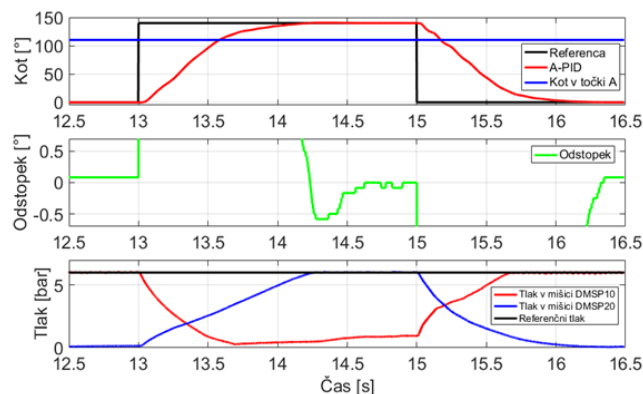
višji tlačni razliki kot vhodni ventil, kar pomeni, da je njegov odziv počasnejši. Iz grafa tlaka v odvisnosti od časa je razvidno, da tlak na začetku naraste do točke, ko sistem doseže referenčno pozicijo, nato pa počasi pada. Ko sistem doseže referenčno pozicijo, se vhodni ventil mišice DMSP20 izklopi, vendar ker je mišica deformabilna se še naprej krči (pojavi se deformacija notranjega plašča in notranje napetosti). Zaradi nastanka notranjih, zaostalih napetosti ter trenja med ojačitvenimi vlakni in gumo plašča se pri vklopu izhodnega ventila mišice DMSP20, mišica ne raztegne sorazmerno s padcem tlaka (zaradi napetosti v notranjem plašču se razteguje počasneje), kar sistem rešuje z zmanjševanjem tlaka v mišici (zmanjšuje odprtost izhodnega ventila).



Slika 8: Odziv sistema na skočno funkcijo z amplitudo 100°.

Na Sliki 9 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo 140°. Iz rezultatov je razvidno, ker tlak v mišici DMSP10, pri dvigu čez točko A, pade skoraj na 0 bar (kar je posledica večje vrednosti proporcionalnega člena, za doseganje občutno krajšega časa odziva sistema), mišica DMSP20 kratek čas ni omejena s silo, ki jo ustvarja manjša mišica, kar posledično, poleg lekaže vhodnih ventilov ter deformacije notranjosti mišice, pomeni precej večji odstopke v trenutku, ko sistem doseže referenčno pozicijo. Ker tlak v mišici DMSP20 v območju nad točko A počasi narašča do 6 bar in ker mišica DMSP20 v tem stanju generira večjo silo kot mišica DMSP10, le-to poleg lekaže izhodnega ventila mišice

DMSP10 vpliva na povečevanje odstopka. To sistem pokuši kompenzirati z vklopom vhodnega ventila mišice DMSP10.



Slika 9: Odziv sistema na skočno funkcijo z amplitudo 140°.

Dobljene rezultate smo primerjali z rezultati dveh drugih primerljivih sistemov (Preglednica 2). Problem, na katerega smo naleteli pri primerjavi rezultatov je v tem, da večina raziskovalcev krmilnih algoritmov ne testira za referenčne funkcije z amplitudami višjimi od 40° ter da so amplitude referenčnih funkcij pogosto naključno generirane. Iz primerjalne tabele je razvidno, da ima naš sistem v primerjavi z krmilnikom na podlagi mehke logike (SOFC) za 33,3 % počasnejši odzivni čas, vendar je naša napaka pozicije za 38,4 % manjša. Za 39,1 % je manjša tudi napaka pozicije pri zasučnem kotu 140°. V primerjavi s krmilnikom na podlagi LVQ nevronske mreže, ima naš sistem pri amplitudi referenčne funkcije 60°, za 27 % krajši odzivni čas, ter za 89,7 % manjšo napako pozicije.

Preglednica 2: Primerjava rezultatov

Krmiljenje	Mišice	Referenčna funkcija	Rezultati
Krmilnik podlagi mehke logike (SOFC) [15]	Par Festo MAS-10-260N-AA-MC-O-ER	Skočna od 0° do 18°	$t_{dv} = 0,6 \text{ s}$ $t_{um} = 0,6 \text{ s}$ $e = \pm 0,32^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
Inteligentni krmilnik na podlagi LVQ nevronske mreže [16]	Par Festo MAS-10-N-220-AA-MCFK	Linearna funkcija 45°	$t_{dv} = 3,3 \text{ s}$ $t_{um} = 4,3 \text{ s}$ $e = \pm 0,39^\circ$ $\theta_p = 2,5^\circ$
Naš algoritem	Festo DMSP-10-200N RM-RM in Festo DMSP-20-200N RM-RM	Skočna od 0° do 20°	$t_{dv} = 0,90 \text{ s}$ $t_{um} = 0,90 \text{ s}$ $e = -0,195^\circ \pm 0,002^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
		Skočna od 0° do 60°	$t_{dv} = 0,89 \text{ s}$ $t_{um} = 0,89 \text{ s}$ $e = -0,038^\circ \pm 0,002^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
		Skočna od 0° do 100°	$t_{dv} = 0,76 \text{ s}$ $t_{um} = 0,76 \text{ s}$ $e = -0,085^\circ \pm 0,003^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
		Skočna od 0° do 140°	$t_{dv} = 1,23 \text{ s}$ $t_{um} = 1,23 \text{ s}$ $e = -0,184^\circ \pm 0,011^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$

7. ZAKLJUČEK

V prispevku je predstavljen razvoj krmilnega algoritma za natančno krmiljenje pozicije dveh antagonistično vpetih pnevmatičnih mišic, ki je nadgradnja predhodno razvitega A-PID krmilnega algoritma. Iz eksperimentalno dobljenih rezultatov je razvidno, da ima naš algoritem v primerjavi z dvema primerljivima sistemoma za 66,6 % večjo natančnost pozicije glede na delovno območje pnevmatične mišice.

Literatura

- [1] I. W. Hunter, S. Lafontaine: *A Comparison of Muscle with Artificial Actuators*. Solid-State Sensor Actuator Workshop. 5th Technical Digest, IEEE (1992) str. 178 – 185.
- [2] M. Zupan, M. F. Ashby, N. A. Fleck: *Actuator Classification and Selection – The Development of a*

- Database*. Advanced Engineering Materials **4**:12 (2002) str. 933 – 939.
- [3] T.-J. Yeh, M.-J. Wu, T.-J. Lu, F.-K. Wu, C.-R. Huang: *Control of McKibben Pneumatic Muscles for a Power-Assist, Lower-Limb Orthosis*. Mechatronics **20** (2010) str. 686 – 697.
 - [4] L. Stubbs: *The Development of Artificial Muscles Using Textile Structures: doktorska disertacija*. Manchester, 2011 Sowa, J. F.: *Conceptual Structures*, Addison-Wesley, 1984, str. 1 – 26
 - [5] M. Tavakoli, L. Marques, A. T. de Almeida: *A Comparison Study on Pneumatic Muscles and Electrical Motors*. V: Z. Wang (ur.): *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Tajska, 2009, str. 1590 – 1594.
 - [6] J. Xianzhi, X. Caihua, S. Ronglei, X. Youlun: *Fuzzy Hybrid Force-Position Control for the Robotic Arm of an Upper Limb Rehabilitation Robot Powered by Pneumatic Muscles*. V S. Walcheski (ur.): *2010 International Conference on E-Product, E-Service and E-Entertainment*. Henan, Kitajska, 2010, str. 1 – 4.
 - [7] K. Balasubramanian, K. S. Rattan: *Trajectory Tracking Control of Pneumatic Muscle System Using Fuzzy Logic*. V: D. Fliev (ur.): *2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. Detroit, ZDA, 2005, str. 472 – 477.
 - [8] J. Zhao, J. Zhong, J. Fan: *Position Control of a Pneumatic Muscle Actuator Using RBF Neural Network Tuned PID Controller*. Mathematical Problems in Engineering **2015** (2015) str. 1 – 16.
 - [9] D. Büchler, H. Ott, J. Peters: *A Lightweight Robotic Arm with Pneumatic Muscles for Robot Learning*. V: A. Okamura (ur.): *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Stockholm, Švedska, 2016, str. 4086 – 4092.
 - [10] M. K. Chang, P. L. Yen, T. H. Yuan: *Angle Control of a one – Dimension Pneumatic Muscle Arm using Self-Organizing Fuzzy Control*. V B.-F. Wu (ur.): *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Taipei, Taiwan, 2006, str. 3834 – 3838.
 - [11] C. Song, S. Xie, Z. Zhou, Y. Hu: *Modeling of Pneumatic Artificial Muscle Using a Hybrid Artificial Neural Network Approach*. Mechatronics **31** (2015) str. 124 – 131.
 - [12] M. Pipan: *Karakterizacija in krmilni algoritem pnevmatičnih mišic: doktorska disertacija*. Ljubljana, 2016.
 - [13] Festo: *Fluidic Muscle DMSP/MAS*. Dostopno na: https://www.festo.com/cat/sl_si/data/doc_engb/PDF/EN/DMSP-MAS_EN.PDF, ogled 25.4.2017.
 - [14] V. V. Patki, D. N. Sonwane, D. D. Ingole, V. V. Naik: *Design and Implementation of Discrete Augmented Ziegler-Nichols PID Controller*.
 - [15] M. K. Chang, P. L. Yen, T. H. Yuan: *Angle Control of a one – Dimension Pneumatic Muscle Arm using Self-Organizing Fuzzy Control*. V B.-F. Wu (ur.): *2006*

- IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Taipei, Taiwan, 2006, str. 3834 – 3838.
- [16] K. K. Ahn, H. T. C. Nguyen: *Intelligent Switching Control of a Pneumatic Muscle Robot Arm Using Learning Vector Quantization Neural Network*. *Mechatronics* **17** (2007) str. 255 – 262.
- [17] Beckhoff: *CX5010 | Embedded PC with Intel® Atom™ processor*. Beckhoff, 2017.
- [18] Beckhoff: *Documentation for EL5101-00xx Incremental Encoder Interface*. Dostopno na: <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/el5101/index.html&id>, ogled 23.4.2017.
- [19] Beckhoff: *Documentation for EL2502 2 channel pulse width output terminal, 24VDC*. Dostopno na: <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/el5101/index.html&id>, ogled 23.4.2017.
- [20] Beckhoff: *EL3104 | 4-channel analog input terminal - 10...+10 V*. Dostopno na: <https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el3104.htm>, ogled 14.5.2017.
- [21] Beckhoff: *EL3351 | 1-channel resistor bridge terminal (strain gauge)*. Dostopno na: <https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el3351.htm>, ogled 14.5.2017.

Model LASFA

Matevž Resman, Hugo Zupan, Niko Herakovič
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

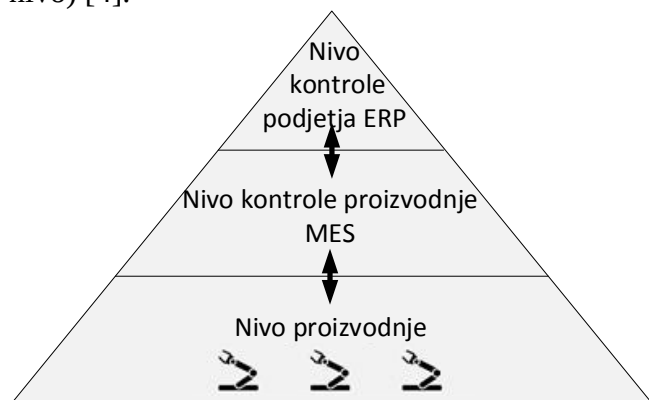
POVZETEK

Pri načrtovanju pametnih tovarn je nujno potrebno poznavanje arhitekturnih modelov. Glavni cilj predstavlja vertikalna integracija IT sistema v proizvodnjo in avtomatizacijo ter horizontalna integracija različnih IT sistemov na različnih mestih. Za raziskavo, ki je predstavljena, sem za osnovo vzel referenčni arhitekturni model RAMI 4.0 (ang. Reference Architectural Model Industrie 4.0). Model je zgrajen na uveljavljenih standardih za avtomatizacijo (IEC 62890, IEC 62264, IEC 61512). Model LASFA za razliko od RAMI 4.0 ni 3 dimenzionalen, zato je mnogo enostavnejši za razumevanje in je v veliko pomoč pri načrtovanju pametnih tovarn.

1. UVOD

Glavni cilj Industrije 4.0 je vertikalna integracija IT sistema v proizvodnjo in avtomatizacijo, horizontalna integracija različnih IT sistemov na različni položajih, dosledni razvoj skozi celotni življenjski cikel in nova delovna infrastruktura [5].

Informacijska piramida proizvodnje prikazuje najpogostejše predstavljeno IT arhitekturo v praksi (Slika 1). V poenostavljeni verziji je piramida razdeljena na tri hierarhične nivoje (nivo nadzora podjetja, nivo kontrole proizvodnje in proizvodnji nivo) [4].



Slika 1: Hierarhični model proizvodnje.

Digitalizacija proizvodnih operacij se kaže v enormnih količinah različnih podatkov na vseh nivojih hierarhične piramide in skozi celotni življenjski cikel izdelka.

V prispevku bodo predstavljeni različni arhitekturni modeli, ki so bili razviti za potrebe Industrije 4.0. Vsak model ima nekoliko drugačen pogled na tematiko, razlikujejo pa se tudi po okolju, v katerem so nastali. Posebej bo izpostavljen referenčni arhitekturni model RAMI 4.0, na podlagi katerega smo razvili model LASFA (LASIM Smart Factory).

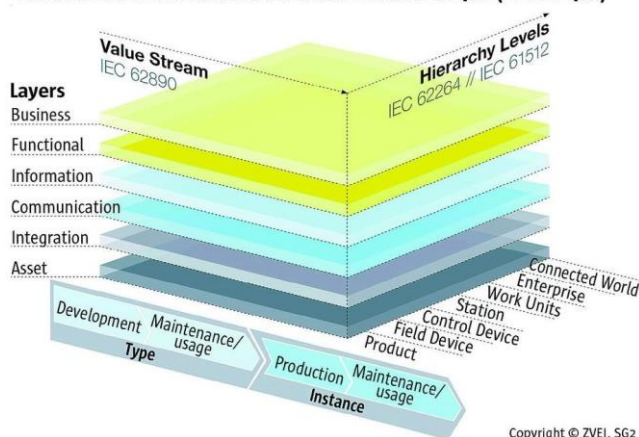
2. ARHITEKTURNI MODELI

Najpogostejše se omenja tri arhitekturne modele. Prvi model je razvit s strani industrijskega konzorcija (IIC – ang. *Industrial Internet Consortium*). Imenuje se ang. *Industrial Internet Reference Architecture* (IIRA). Zavzema štiri stališča, to so: posel, uporaba, funkcionalnost in implementacija [3]. Drugi predstavljeni arhitekturni model so razvili raziskovalci v Nemčiji, imenuje se SITAM (ang. *Stuttgart IT-Architecture for Manufacturing*) [2].

Tretji arhitekturni model je politična realizacija Industrije 4.0. RAMI 4.0 (ang. *Reference Architecture Model Industrie 4.0*) je več-nivojski arhitekturni vidik na Industrio 4.0. Model je zgrajen na uveljavljenih standardih za avtomatizacijo (IEC 62890, IEC 62224, IEC 61512/ISA95 (Slika 2) [6].

Model RAMI 4.0 kombinira ključne elemente Industrije 4.0 v 3D plastni model. Ima značilni tri dimenzionalni koordinatni sistem, ki vključuje ključne dejavnike Industrije 4.0. Na ta način

Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)



Slika 2: Referenčni arhitekturni model Industrije 4.0 RAMI 4.0.

lahko zapletene notranje povezave razbijemo na manjše in enostavnejše podsklope.

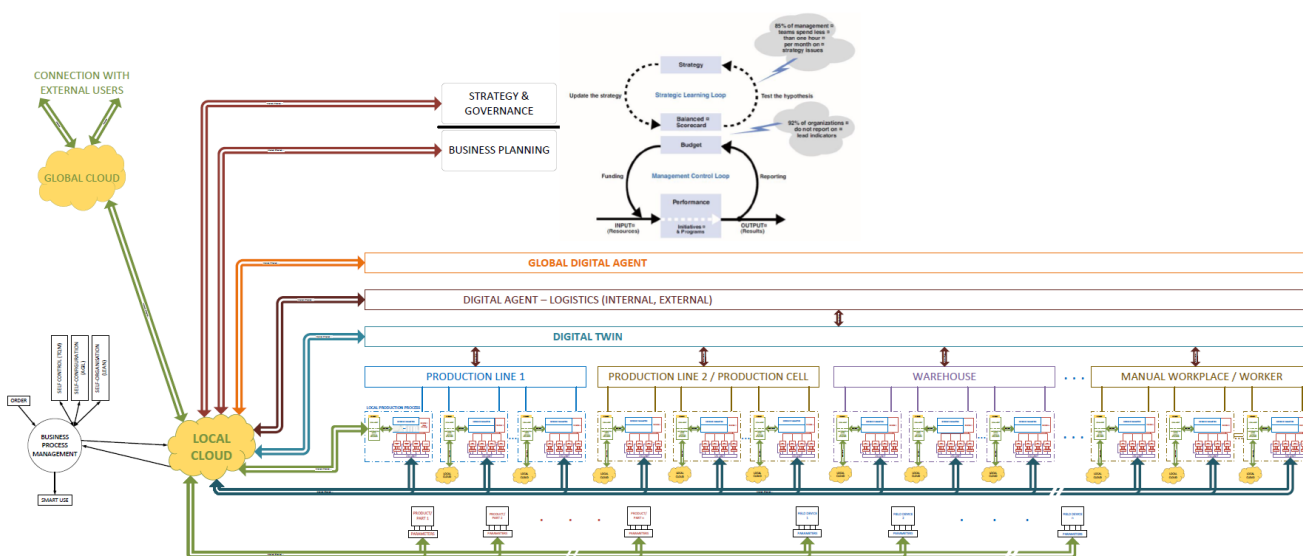
Prva vodoravna os predstavlja hierarhične nivoje. Druga vodoravna os predstavlja življenjski cikel proizvodnje in izdelka. Zadnja os je vertikalna in predstavlja virtualno strukturo podjetja po nivojih. Lastnosti kompleksnih sistemov se na ta način razčlenijo po plasteh [1].

3. RAZVOJ MODELA LASFA

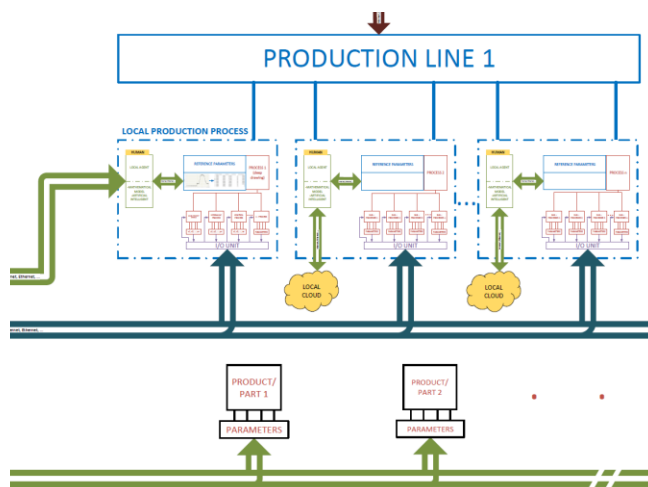
Za osnovo razvoja modela LASFA smo vzeli referenčni arhitekturni model RAMI 4.0. Za razliko od RAMI 4.0 je naš model

dvo-dimenzionalen, kar predstavlja bistveno lažje razumevanje. Model RAMI 4.0 je izdelan bolj na abstraktnem nivoju, medtem ko je model LASFA osredotoča predvsem na proizvodno industrijo. Iz modela LASFA na Sliki 3 se natančno vidijo posamezni nivoji, ki gradijo pametno tovarno. Gradi ga vseh šest vertikalnih nivojev, tako kot RAMI 4.0. Logično so prikazane in razporejene vse povezave za izmenjavo informacij in podatkov znotraj pametne tovarne. Model je grajen tako, da je vsak sistem svoja enota s svojim krmilnikom. To omogoča odvzem in dodajanje enot brez večjih težav. Vsi sistemi znotraj modela so med seboj povezani, zato lahko trdimo, da nimamo klasičnega piramidnega modela. Podatki se zbirajo v lokalnem oblaku, do katerega imajo dostop vsi sistemi v proizvodnji. Za nemoteno delovanje je nujno tudi pridobivanje in izmenjava podatkov med izdelki in senzorji na proizvodni liniji (ang. *field device*).

Proizvodno linijo na Sliki 4 predstavlja več različnih lokalnih proizvodnih procesov z različnimi lastnostmi in zahtevami. Izmenjevanje informacij in podatkov z lokalnim oblakom poteka s pomočjo brezžičnega omrežja ali s pomočjo optičnega kabla, za večje količine podatkov in informacij. Izmenjava podatkov in informacij je dvosmerna, saj ima vsak lokalni proizvodni proces za delovanje svojega digitalnega agenta.

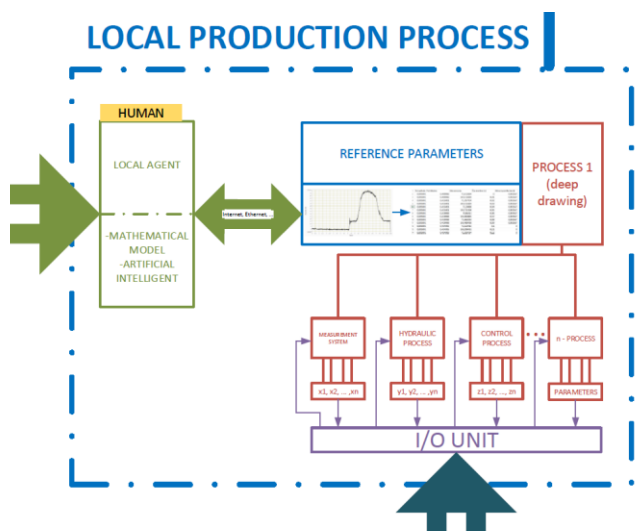


Slika 3: Model LASFA z vsemi elementi Industrije 4.0.



Slika 4: Proizvodna enota znotraj modela LASFA.

Proizvodna enota je povezana z digitalnim dvojčkom, ki je preslikava realnega sistema. Za delovanje pametnih tovarn je digitalni dvojček nujno potreben. Digitalni dvojček ima funkcijo pomočnika lokalnega digitalnega agenta. Agent ima samo-odločitvene sposobnosti. V primeru, da nastane kompleksnejši problem odločitev sprejme globalni digitalni agent.



Slika 5: Lokalni proizvodni proces.

Na Sliki 5 vidimo povečano sliko lokalnega proizvodnega procesa. Vsak proces je popisan z različnimi parametri (kontrolni, mehanski, itd.). Vsi ti parametri se dvosmerno izmenjavajo z lokalnim oblakom. To pomeni, da imajo dostop do teh podatkov vsi digitalni agenti. Pri vsakem

procesu sodeluje lokalni digitalni agent, ki informacije prejema od lokalnega oblaka. Lokalni agent je lahko matematični model, lahko pa vključimo tudi umetno inteligenco. Trenutno ta segment pokriva človek. Lokalni digitalni agent deluje s pomočjo referenčnih parametrov in tabelarnih popisov spreminjanja vrednosti parametrov. V primeru, da pride do nenavadnega odstopanja, lokalni digitalni agent to zazna in javi napako. Prav tako se iz trenda spreminjanja parametrov da razbrati, kdaj bo potrebno opraviti vzdrževalna dela (npr. menjava rezilnega noža, matrice, itd.).

4. ZAKLJUČEK

Za razvoj lastnega arhitekturnega modela smo se odločili predvsem zato, ker na razpolago ni modela, ki bi nazorno prikazal koncept pametne tovarne. Model jasno prikaže področje delovanja digitalnih agentov, ki so nujni element pametnih tovarn. Druga ključna prednost pred ostalimi modeli je natančen prikaz izmenjave podatkov in informacij med posameznimi sistemi in lokalnim oblakom. Ena od ključnih lastnosti pametnih tovarn je distribuiran sistem, saj se v primeru napake na enem sistemu celotna linija ne ustavi, pač pa se ustavi le sistem z napako. Digitalni agenti za logistiko poskušajo s pomočjo digitalnega dvojčka to napako čim bolj omejiti.

Literatura

- [1] Adolphs, P.: Rami 4.0. 2015.
- [2] Gröger, C. et al.: The Data-driven Factory: Leveraging big industrial data for agile, learning and human-centric manufacturing. ICEIS vol. 1, str. 40–52, 2016.
- [3] Industrial internet consortium: Industrial Internet Reference Architecture. Version 1.7, 2015.
- [4] Kemper, H.-G., Baars, H., Lasi, H.: An Integrated Business Intelligence Framework Closing the Gap Between IT Support for Management and for Production. Springer-Verlag London, 2013.
- [5] VDMA, ZVEI: Implementation strategy Industrie 4.0. 2016.
- [6] Weber, C., Königsberger, J., Kassner, L., Mitschang, B.: M2DDM – A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing. Procedia CIRP vol. 63, str. 173–178, 2017.