

Robotska celica za manipulacijo malih motorjev*

Borut POVŠE, Boštjan MUROVEC, Darko KORITNIK, Tadej BAJD

Izvleček: V članku je predstavljena robotska celica za manipulacijo malih motorjev. Njen namen je robotizacija delovnega mesta, kjer je do sedaj človek opravljal manipulacijo z motorji med tekočim trakom, paletnim sistemom in strojem za valjanje polža. Aplikacija je zahtevna predvsem zaradi taktnega časa in zaradi že obstoječih naprav, ki niso prilagojene za delo z robotom.

Ključne besede: manipulacija z motorji, robotska prijemala, dvojno prijemalo, dvoprstni prijem in razvrščanje proizvodnih procesov,

■ 1 Uvod

Naš industrijski problem je zahteval gradnjo robotske celice za manipulacijo malih motorjev v tovarni BSH v Nazarjih. Pred robotizacijo je manipulacijo z motorji opravljal človek. Motor je bilo potrebno s vhodne proge pobrati in ga v pravilni orientaciji vstaviti v prazno paletu paletnega sistema (slika 1). Paleta je napredovala po fazah obdelave in se vrnila do delavca. Delavec je moral vzeti motor iz palete in ga položiti v stroj za valjanje (slika 1). Po končani obdelavi je delavec vzel motor iz stroja, obrisal olje z gredi motorja in ga odložil na izhodno proggo. V prazno paletu je vstavil naslednji motor iz vhodne proge. Omeniti je še potrebno, da je naenkrat na transportnem sistemu okoli 15 palet.

Zgoraj omenjena opravila mora robot izvajati s 15-sekundnim ali nižjim taktnim časom. Od hitrosti delovanja

Borut Povše, univ. dipl. inž., DAX, d. o. o. Trbovlje; Doc. dr. Boštjan Murovec, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko; Darko Koritnik, univ. dipl. inž., DAX, d. o. o. Trbovlje; Prof. dr. Tadej Bajd, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko



Slika 1. Delovno mesto pred robotizacijo

robotov so namreč odvisni merilna in magnetilna postaja ter delavci, ki sestavljajo in izvajajo vgradnjo motorja. Taktni čas robotov nikakor ne sme predstavljati ozkega grla v proizvodnji in s tem nižati proizvodnih kapacitet celotne linije.

■ 2 Razvrščanje proizvodnih procesov

V proizvodnji se nenehno pojavlja problem razvrščanja, saj je potrebno čim uspešneje izvesti določen nabor operacij z uporabo po številu in kapaciteti omejenega nabora proizvodnih resorjev. Operacije so v večini prime-

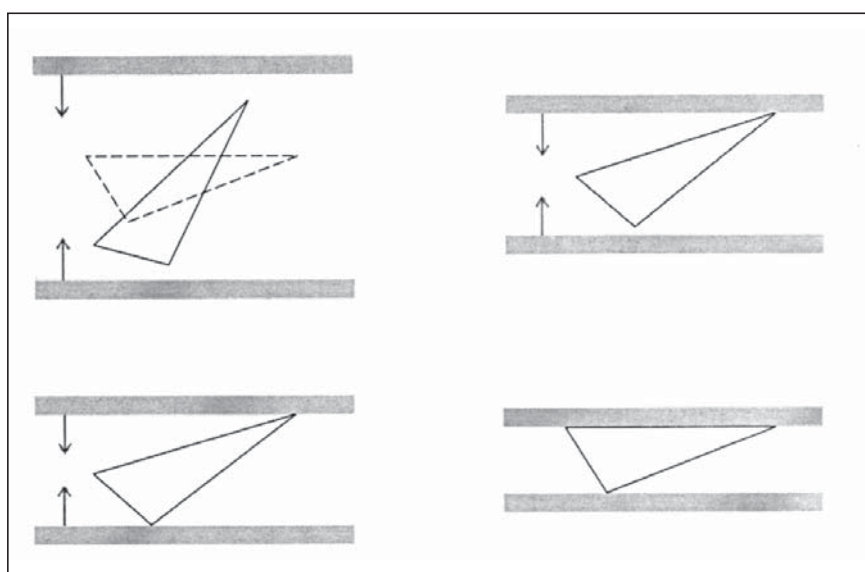
rov med seboj odvisne, saj so pogosto podvržene tehnološkim omejitvam. Posamezna operacija se tako zaradi omejitev ne more izvršiti, dokler niso izvedene vse njene tehnološke predhodnice.

Nespretno zastavljen urnik bo povzročil predolgo čakanje določenih operacij na tehnološke predhodnice, stroji pa bodo stali neizkoriščeni. To je posledica prekomernega kopičenja in zastojev operacij na drugih strojih, kjer te operacije čakajo na izvršitev in s tem blokirajo izvajanje svojih tehnoloških naslednic [1].

■ 3 Dvoprstni prijem

Prijem predmeta je sestavljen iz dotikov prsta in predmeta. Vsak dotik med prstom in predmetom zmanjša število prostostnih stopenj predmeta in omogoča, da na predmet delujejo zunanje sile. Preden predmet uspešno primemo z dvema prstoma, nastopi najprej potiskanje in zatem njegovo stiskanje. Obe operaciji sta neobčutiljivi na omejeno nezanesljivost v začetni legi predmeta, ki ga želimo prijeti [2, 4].

3.1 Potiskanje, stiskanje stabilen prijem



Slika 2. Primer stiskanja in potiskanja pri robotskem prijemu

Za ponazoritev operacij potiskanja, stiskanja in na koncu stabilnega prijema vzemimo trikoten predmet, ki leži na ravni površini (slika 2). Predmet želimo prijeti z robotskim prijemalom, ki ima dva vzporedna prsta [3].

Kot kaže slika 2 levo zgoraj, začetna lega trikotnika ni povsem določena. V fazi prijema se prsta prijemala približujeta drug drugemu. Obstaja velika verjetnost, da se bo eden od prstov prej dotaknil predmeta kot drugi. Nastopi operacija potiskanja, med katero se predmet zavrti okrog točke dotika med prstom in predmetom (slika 2 desno zgoraj). Med približevanjem prstov drug drugemu se kmalu tudi drugi prst dotakne predmeta. Prične se operacija stiskanja

(slika 2 levo spodaj). Slika 2 desno spodaj prikazuje povsem stisnjen predmet, ko se prsta ne moreta več pomikati. Dobili smo stabilen prijem predmeta. Potrebno je poudariti dejstvo, da je kljub nedoločenosti začetnega položaja predmeta prijemanje uspelo. Opisani način prijemanja odstrani dve od treh prostostnih stopenj nezanesljivosti v legi trikotnika. Prijemalo omejuje predmet v orientaciji in v vertikalni smeri glede na pozicijo. Nedoločen pa je položaj predmeta v horizontalni smeri [3].

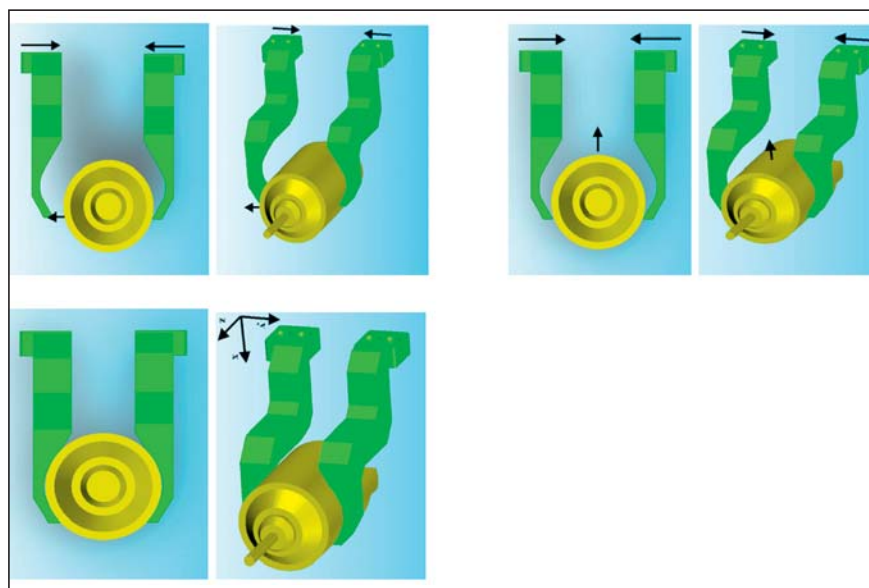
3.2 Odjem motorjev s traku

V procesu manipulacije je ena izmed nalog robota odjem motorjev s traku. Težavo predstavlja nedoločenost lege motorja na traku. Ograda tekočega traku dopušča motorju nekaj milimetrov manevrskega prostora, zato se pozicija in orientacija spreminjata za nekaj milimetrov oziroma stopinj. To težavo rešuje način prijemanja, sestavljen iz potiskanja in stiskanja motorja. S tem načinom dosežemo stabilen prijem, čeprav ne poznamo natančne pozicije in orientacije motorja. Slika 3 prikazuje faze prijema.

Opisana naloga odstrani štiri od šestih prostostnih stopenj v nedoločenosti lege motorja. S prijemom sta določeni koordinati x in y (slika 3 levo spodaj) ter rotaciji okrog x in y osi.

■ 4 Izdelava robotske celice

V robotsko celico je vgrajen Epsonov robot Pro Six. To je šestosni serijski mehanizem, namenjen uporabi v industriji. Njegovo zgradbo lahko opišemo kot odprto serijsko kinematično verigo s šestimi prostostnimi stopnjami. Vsi sklepi so rotacijski. Robot lahko razdelimo na dva dela. Prvi, pozicijski del, predstavljajo prve tri osi, katerih naloga je postaviti orodje v želeno pozicijo. Zadnje tri osi predstavljajo orientacijski del in služijo za doseganje želene orientacije orodja.



Slika 3. Faze prijema motorja: levo zgoraj potiskanje, desno zgoraj stiskanje in levo spodaj stabilen prijem

4.1 Prva rešitev robotske celice

V celici je robot postavljen na mesto, kjer je prej stal človek. Celoten proces manipulacije in obdelave motorjev v robotski celici se lahko razdeli na dve opravili, kot je prikazano v *tabeli 1*.

Tabela 1. Predpis izvajanja tehnoloških operacij prve rešitve

Izdelek	Tehnološke faze											
	a		b		c		d		e		f	
	M	p	M	p	M	p	M	p	M	p	M	p
J_1	R	2	R	3	V	10	R	3	I	1	R	2
J_2	R	2	R	7	R	2						

Oznake v tabeli imajo sledeči pomen:

- M – stroj, na katerem se izvaja operacija (R – robot, V – stroj za valjanje, I – izpihvalnik olja)
- J – opravilo oziroma motor v fazi obdelovanja
- p – število časovnih enot, ki jih zahteva operacija

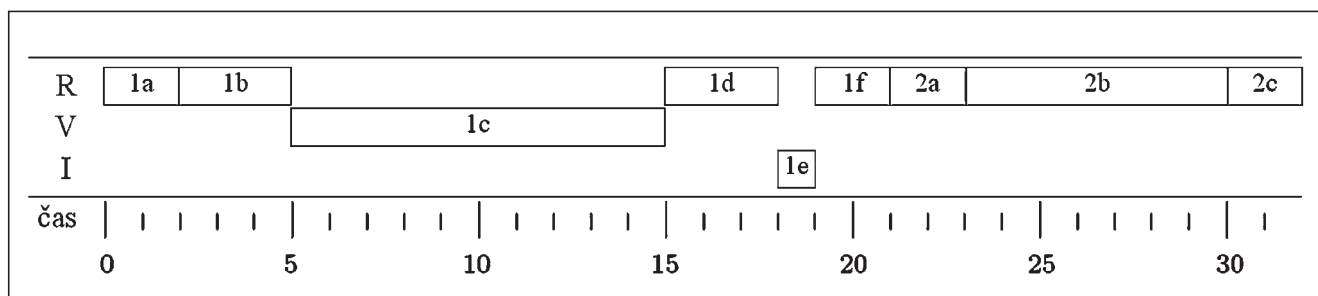
Z urnikom, prikazanem na sliki 4, deluje robot s taktim časom 32 sekund, kar je 17 sekund več od maksimalnega dopustnega taktnege časa. Že na prvi pogled opazimo, da je ta urnik zelo nespretno določen. Operacije 2a, 2b in 2c bi se lahko izvajale med čakanjem robota na

konec operacije 1c. Izboljšani urnik je prikazan na *sliki 5*.

Urnik, prikazan na sliki 5, še vedno ne zagotavlja ustreznega taktnege časa. Kako izboljšati urnik, prikazan na sliki 4, je očitno. Pojavi pa se vprašanje, ali je možno s postopki razvrščanja proizvodnih procesov

izhodišča za izvajanje učinkovitih premikov operacij urnika, ki z veliko verjetnostjo vodijo k manjšanju izvršnega časa. Za izvajanje premikov operacij urnika, prikazanega na sliki 5, sta pomembna predvsem dva teorema. Prvi teorem pravi, da so pri optimiranju urnika z zamenjavami sosednjih kritičnih operacij samo spremembe na robovih kritičnih blokov zmožne same zase zmanjšati izvršni čas urnika. Drugi teorem pa pravi, da se izvršni čas urnika zanesljivo ne more zmanjšati, kadar premaknemo neprvo operacijo prvega kritičnega bloka na njegov začetek in se pri tem ne spremeni konec kritičnega bloka (to je v primeru, ko ne premaknemo zadnje operacije v bloku). Analogno velja tudi za premik nezadnje operacije zadnjega kritičnega bloka na njegov konec [1].

Kritična bloka {1e} in {1f} sta sestavljena iz samo po ene operacije, zato sprememb na njunih robovih



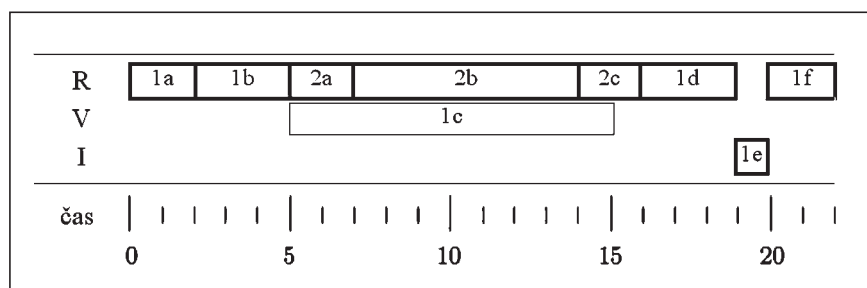
Slika 4. Urnik manipulacije in obdelave motorjev

Opravilo J_1 je sestavljeno iz sedmih operacij. Najprej robot izvede odjem motorja iz paletnega sistema, to je operacija 1a, ki traja dve časovni enoti. Zatem robot odloži motor v stroj za valjanje, kar je operacija 1b. Stroj za valjanje izvaja operacijo 1c deset časovnih enot. Po končanem valjanju robot prime motor in ga odnese iz stroja za valjanje, kar je operacija 1d. Za trenutek se robot ustavi pred izpihvalnikom olja, ki opravi operacijo 1e. V končni operaciji 1f robot odloži motor na izhodno progo. Drugo opravilo J_2 je sestavljeno iz treh operacij. V operaciji 2a robot izvede odjem motorja z vhodne proge, sledi določanje orientacije motorja 2b, na koncu robot odloži motor v paleto, kar predstavlja operacijo 2c. Eden izmed urnikov, ki upošteva predpis izvajanja tehnoloških operacij tabele 1, je prikazan na *sliki 4*.

izboljšati tudi urnik, prikazan na sliki 5. Na to vprašanje je možno odgovoriti s pomočjo teorije razvrščanja proizvodnih procesov.

Graf urnika s slike 5 vsebuje kritično pot, sestavljeno iz kritičnih operacij, ki so na grafu prikazane odebeljeno. Kritično pot lahko razdelimo na 3 kritične bloke: {1a, 1b, 2a, 2b, 2c, 1d}, {1e} in {1f}. Obstajajo teoretična

ne moremo doseči, torej ne moreta prispevati k skrajšanju časa izvajanja. Le spremembe prvega kritičnega bloka lahko vodijo do skrajšanja časa izvajanja. Prvi teorem pravi, da je potrebno zamenjati operacije na robovih kritičnega bloka, drugi pa, da moramo premakniti zadnjo operacijo kritičnega bloka, če želimo doseči krajši čas izvajanja. S premikom operacij 2a, 2b, 2c na konec kritičnega

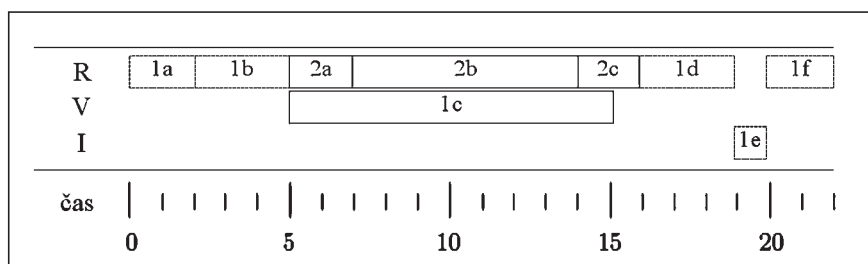


Slika 5. Izboljšani urnik manipulacije in obdelave motorjev v robotski celici

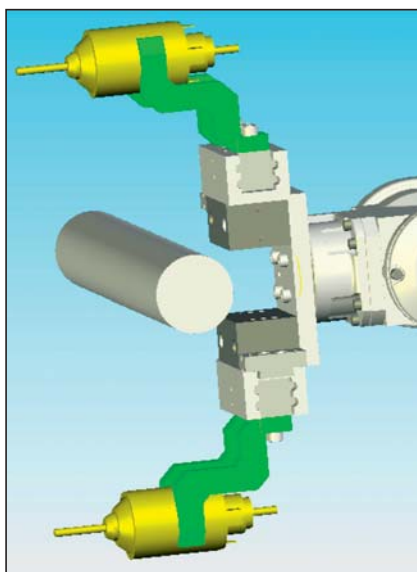
bloka oziroma s premikom operacije 1d naprej se čas izvajanja urnika lahko le podaljša ali ostane enak. Torej je razvidno, da se urnika s krajšim časom izvajanja ne da določiti.

Ob tem spoznanju je jasno, da je potrebno za doseg krajšega taktnege časa spremeniti segmente, ki sestavljajo robotsko celico. Pri določanju potrebnih sprememb je lahko urnik v veliko pomoč.

4.2 Izbira prijemala



Slika 6. Urnik manipulacije in obdelave motorjev v robotski celici



Slika 7. Dvojno prijemalo

Časovno najbolj potratna operacija je valjanje polža na gred motorja. Pred valjanjem in po njem se izvede še pet drugih operacij prvega opravila, ki skupaj prispevajo k predolgemu taktnemu času. Te operacije so na sliki 6 označene s prekinjeno črto. Potrebno je zmanjšati število teh operacij in skrajšati čas njihovega izvajanja. Rešitev tega problema je uporaba dvojne prijemala namesto enega.

Z dvojnimi prijemalom je potek odjema in vstavljanja motorja v stroj za valjanje sledeč. Robot s prvim prijemalom, ki je prazen, izvede odjem motorja iz stroja za valjanje. Zadnja os robota se nato zasučje za 180°, s čimer se prijemali zamenjata.

Na koncu robot z drugim, polnim, prijemalom odloži motor v stroj za valjanje. Takoj zatem se valjanje lahko prične. Stroj za valjanje je tako prazen le v času odjema motorja, zasukanja prijemal in odlaganja motorja.

4.3 Zamenjava naprave za določanje orientacije motorja

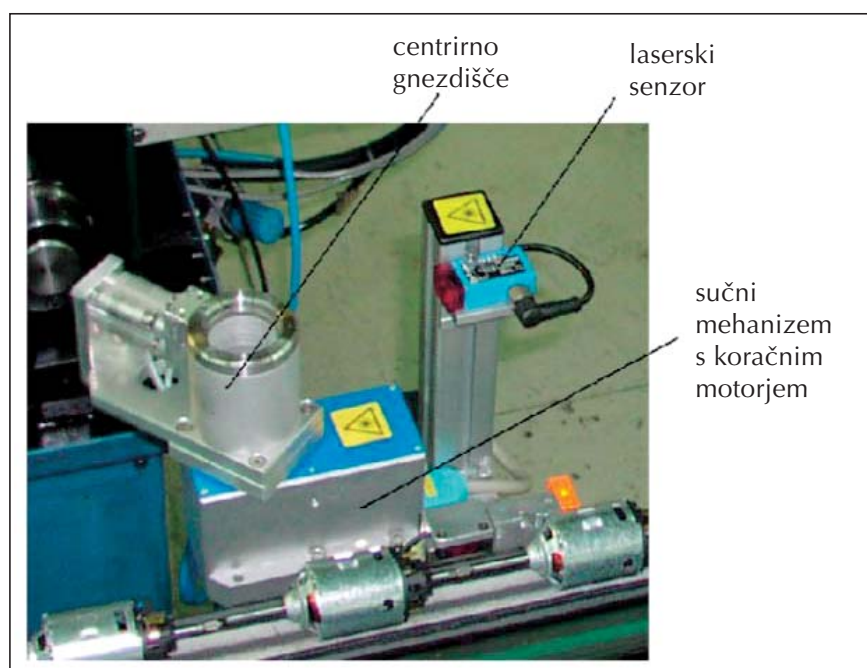
Če upoštevamo dejstvo, da je valjanje motorja časovno najbolj potratna operacija, se mora čim več operacij izvesti vzporedno z valjanjem. Med manipulacijo z motorji robot izvaja tudi določanje orientacije motorja okoli osi z, kar je druga časovno najbolj potratna operacija. Na sliki 6 to operacijo ponazarja pravokotnik z oznako 2b. Smiselno je torej vgraditi napravo, ki bo sama določala orientacijo motorja, robot pa bo imel več časa za izvajanje preostalih operacij. Naprava za določanje orientacije je prikazana na sliki 8.

Robot vstavi motor v centrirno gnezdišče, sučni mehanizem pa vrti centrirno gnezdišče toliko časa, dokler robotski krmilnik s pomočjo laserskega senzorja ne zazna luknjice na spodnjem delu plašča motorja. Ko je orientacija motorja določena, robot izvede odjem motorja iz centrirnega gnezdišča, ga vstavi v paleto, sučna enota pa zavrti centrirno gnezdišče v prvotni položaj.

4.4 Končna rešitev ustrezna zahtevanemu delovnemu taktu

Z vsemi spremembami robotske celice je dosežen ustrezen taktni čas

Pri manipulaciji z enim prijemalom pa je bil stroj za valjanje prazen ves čas odjema motorja iz stroja, izpihovanja olja iz gredi motorja, odlaganja motorja na izhodno progo, odjema motorja iz paletnega sistema ter odlaganja motorja v stroj za valjanje. Z dvojnimi prijemalom je torej število operacij manjše in čas med dvema cikloma valjanja krajši.



Slika 8. Naprava za določanje orientacije motorja

delovanja 15 sekund. Celoten proces manipulacije in obdelave motorjev končne rešitve robotske celice se lahko razdeli na tri opravila, kar je prikazano v tabeli 2.

stroja za valjanje. Ti dve operaciji imata zato na grafu enako oznako 3b. Prvo opravilo sestavlja odjem motorja iz vhodne proge (operacija 1a), odlaganje motorja v stroj za valjanje

Tabela 2. Predpis izvajanja operacij prve rešitve

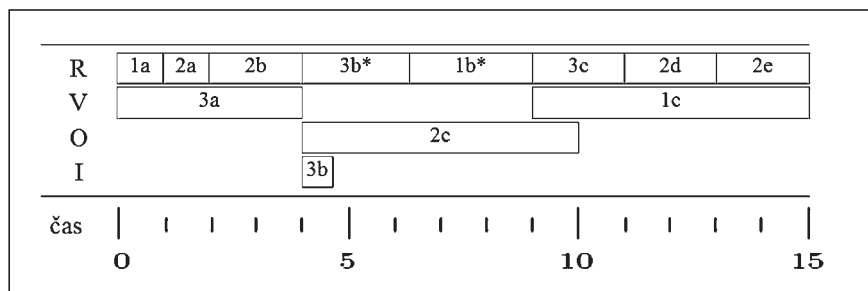
Izdelek	Tehnološke faze									
	a		b		c		d		e	
	M	p	M	p	M	p	M	p	M	p
J_1	R	1	R	2.5	V	6				
J_2	R	1	R	2	O	6	R	2	R	2
J_3	V	4	R+I	2.5	R	2				

Oznake v tabeli imajo sledeči pomen:

- M – stroj, na katerem se izvaja operacija (R – robot, V – stroj za valjanje, I – izpihvalnik olja,
- O – naprava za iskanje orientacije, R+I – robot in izpihvalnik vzporedno izvajanje)
- J – opravilo oziroma motor v fazi obdelovanja
- p – število časovnih enot, ki jih zahteva operacija

(operacija 1b) ter valjanje polža na gred motorja (operacija 1c).

Pri drugem opravilu robot najprej izvede odjem motorja z vhodne proge (operacija 2a) in ga vstavi v centrino gnezdišče naprave za določanje orientacije (operacija 2b). Sledi določanje orientacije motorja (operacija 2c), nato robot izvede odjem motorja iz naprave za določanje orientacije (operacija 2d) in ga na koncu vstavi v paleto (operacija



Slika 9. Urnik manipulacije in obdelave motorjev v robotski celici (vrstnega reda operacij, označenih z zvezdico, se zaradi tehnoloških omejitev ne da zamenjati)

Urnik, ki upošteva vse predpise iz tabele 2, je prikazan na sliki 9. Valjanje 1c se ne zaključi v enem ciklu, zato se nadaljuje še v drugi ciklu kot operacija 3a. Operacija izpiha olja iz gredi motorja se izvaja vzporedno z odjemom motorja iz

2e). Tretje opravilo pa sestavlja valjanje polža na gred motorja iz prejšnjega cikla (operacija 3a), odjem motorja iz stroja za valjanje z vzporednim izvajanjem izpiha olja iz gredi motorja (operaciji 3b) ter odlaganje motorja na izhodno progo.

5 Zaključek

Robotika prevzema in bo prevzemala vedno večjo vlogo v industriji. Razvoj robotske tehnologije bo omogočal večjo interakcijo med človekom in robotom, zato bodo lahko poleg klasičnih aplikacij roboti opravljali vse težje in zahtevnejše naloge.

V tem delu je predstavljena robotizacija delovnega mesta, kjer namesto človeka monotono in naporno delo opravlja robot. Pri izdelavi robotske celice so se pojavile določene težave, ki smo jih uspešno rešili. Nekatere naprave, s katerimi je prej delal človek, niso bile primerne za delo z robotom. Potrebno je bilo predelati pogon vhodne proge, zaradi težko dostopnega ležišča za motor v stroju za valjanje pa smo skonstruirali posebne prste prijemale. Največjo težavo je povzročal zahtevani taktni čas. Celotno opravilo manipulacije z motorji je bilo potrebno opraviti v 15 sekundah.

Literatura

- [1] B. Murovec, Preprečevanje neizvedljivosti urnikov pri metahevrstičnem razvrščanju proizvodnih procesov, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 2004.
- [2] R. C. Brost, Automatic grasp planning in the presence of uncertainty, International Journal of Robotics Research, 7(1): 3–17, 1988.
- [3] J. Lenarčič, T. Bajd, Robotski mehanizmi, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2003.
- [4] Z. Balorda, T. Bajd, Reducing positioning uncertainty of objects by robot pushing, IEEE Transactions of Robotics and Automation, 10(4): 535–541, 1994.

Robot cell for small motor manipulation

Abstract: The paper presents a robot cell for the manipulation of small motors. The purpose of this cell is to substitute a human worker with a robot. Previously, the worker had to pick up the motors from the incoming line, serve the palette system and the roll machine. This application is quite complex because of the time frame in which the robot has to perform all the tasks and because some machines were not built to work with robots.

Keywords: small motor manipulation, robot grippers, double gripper, two-fingered grasping, and production scheduling,

* Prispevek je bil objavljen in predstavljen na 16. mednarodni Elektrotehniški in računalniški konferenci (The Sixteenth International Electrotechnical and Computer Science Conference, ERK 2007), ki je potekala v Portorožu od 24. do 26. septembra 2007.