

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

INTELIGENTNO ROBOTSKO
SKLAPANJE
DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

IGOR KORAJAC

Zagreb, 2007.

SAŽETAK

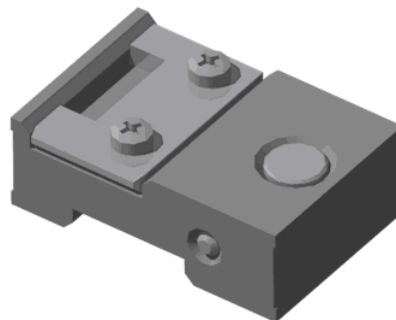
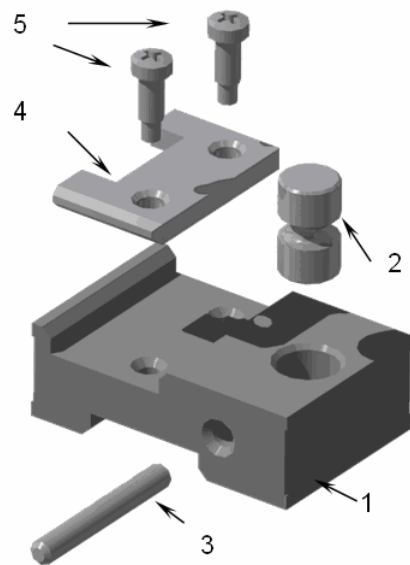
Tržišna utakmica, promjenjivi zahtjevi tržišta, povećanje cijene ljudskog rada, zakonski propisi o uvjetima sigurnosti i rada, nalažu brz razvoj naprednih tehnologija, među kojima su i visokoautomatizirani, visokoautonomni – inteligentni, sustavi robotskog sklapanja. U svjetlu toga, u radu su detaljno razmotrene mogućnosti unaprjeđenja postojećeg procesa robotskog sklapanja u kojemu je (već) primijenjen strojni vid.

U Laboratoriju za inteligentne proizvodne sustave Zavoda za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, instaliran je sustav kojega čine robot AdeptSix 300 i vizijski sustav HexSight. Sustavom je omogućeno automatsko sklapanje sklopa od šest ugradbenih elemenata, koji su prvotno u nesređenom stanju (stohastičke pozicije i orijentacije ugradbenih elemenata).

Međutim, uočeno je da su moguća značajna unaprjeđenja postojećeg procesa sklapanja, poglavito u smislu postizanja višeg stupnja autonomije strojnog sklapanja, i to iskorištenjem potencijala koje nudi vizijski sustav.

U tu je svrhu načinjeno proširenje rada HexSight aplikacije, nadopunom baze modela, čime je omogućeno prepoznavanje svih orijentacija dijelova potrebnih za sklapanje. Pored toga, razmotren je i način unaprjeđenja prepoznavanja dijelova koji se preklapaju. Primjerenim hvatanjem dijelova, osigurava se točnost izvođenja sklapanja, pa su zato uzeti u obzir svi mogući problemi koji se mogu javiti prilikom hvatanja, te su predloženi principi unaprjeđenja. Nužan uvjet za odgovarajuću montažu dijelova (prepoznatih orijentacija dijelova korištenih za sklapanje), proširenje je varijanti sklapanja ali i njegova algoritmizacija. Razmatranjem i zapisom svih mogućih varijanti sklapanja, uz odgovarajući program koji će ih moći obraditi, robot postaje sve inteligentniji pri procesu sklapanja. Pored toga, uzeta je u obzir i mogućnost demontaže sklopa robotom.

Na taj način, postavljene su osnove za znatno samostaljniji strojni rad u procesu montaže.



Slika 1. Sklop na temelju kojega će se razmatrati problem inteligentnog robotskog ponašanja

Lokator

Konfiguracija Dodaci

100 200 300 400 500 600 Pixel

600

400

300

200

100

0

0.000 0.000

Prikazana Scena Nista (samo slika)

Konfiguracija Akvizicije

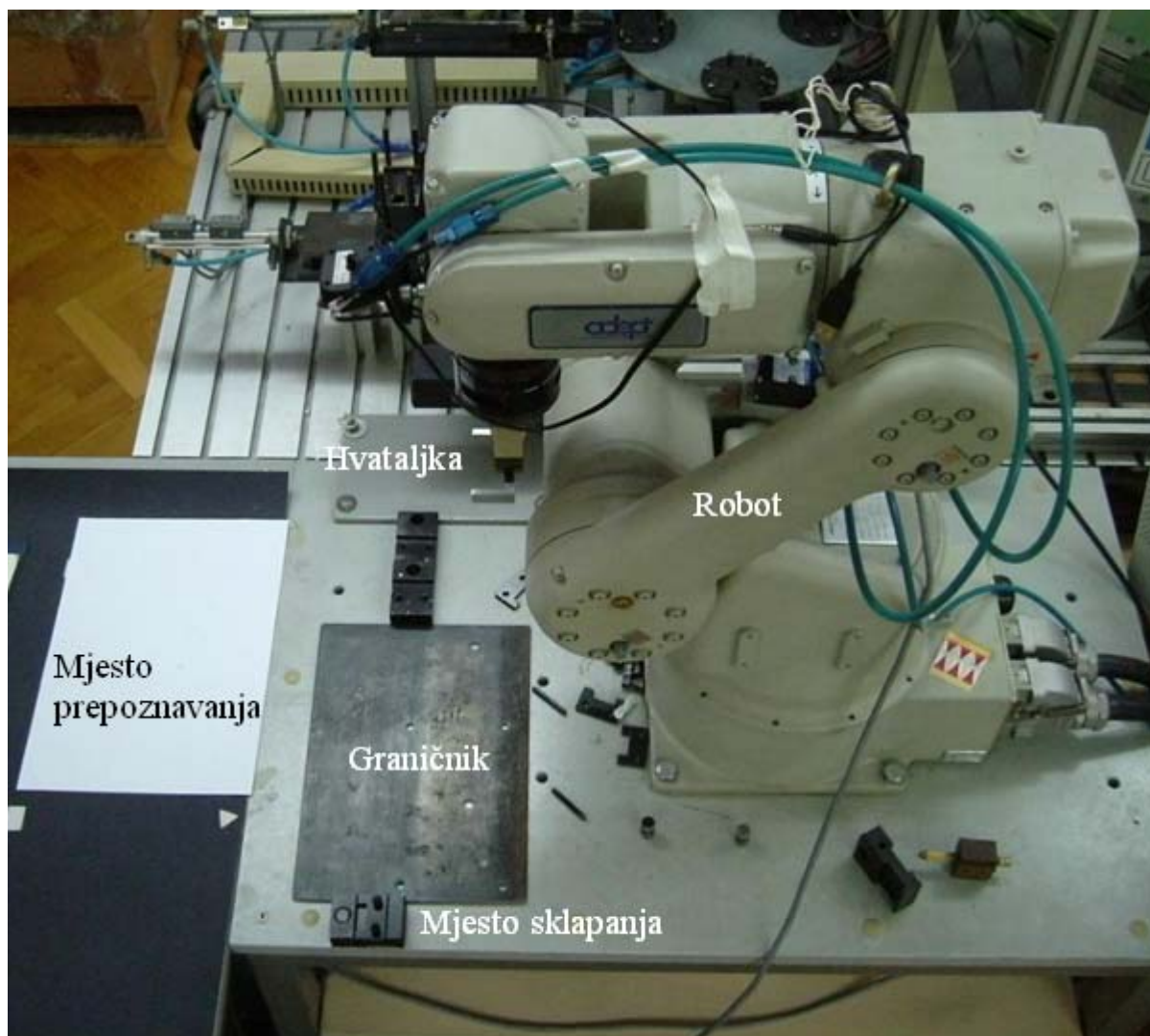
Aktivna Konfiguracija Camera

Emulacijska Baza Učitaj

Pokreni Kontinuirani Mod Vrijeme (msec) 1312 Kraj

Instanca	Vrsta	Pozicija X	Pozicija Y	Rotacija	Mjerilo
1	bazni	564.82	-70.45	-121.31	1.00
0	valjak	634.12	-22.87	-7.82	1.00
4	zatic	576.23	77.89	-152.97	1.00
2	plocica	605.93	18.59	-209.40	1.00
6	vijak	522.42	83.57	1.94	1.00
7	vijak	550.06	121.66	-133.12	1.00

Slika 2. Sučelje programske podrške strojnog vida s rezultatima prepoznavanja

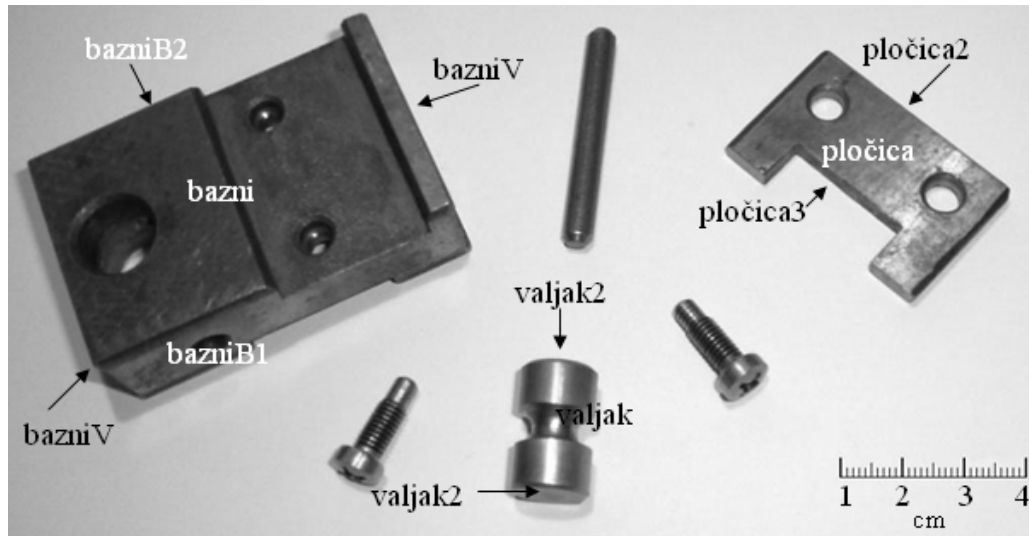


Slika 3. *Mjesto predviđeno za sklapanje sklopa*

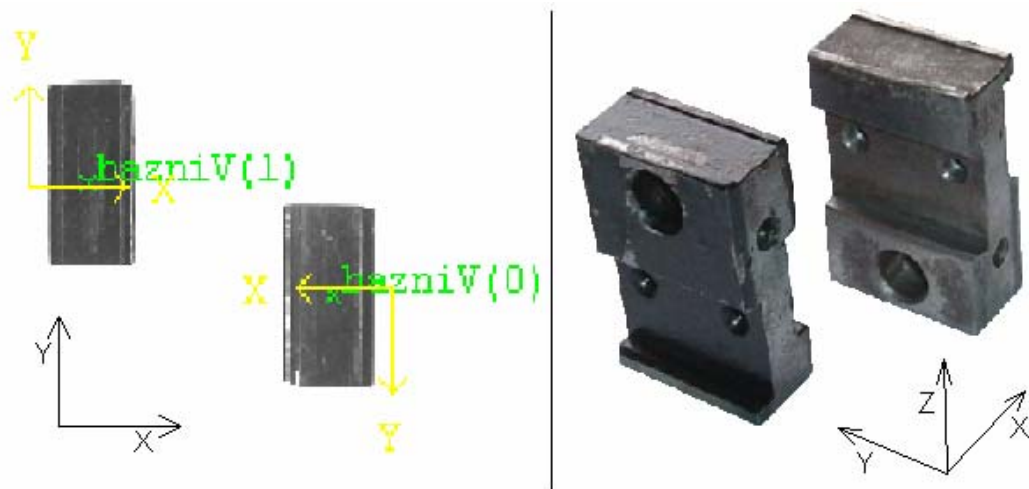
Mogućnosti unaprjeđenja procesa sklapanja

Imajući u vidu trenutačni stupanj razvoja i primjene naprednih tehnologija, kao što su vizijski sustavi i (još uvijek) roboti, u industrijskoj montaži, zahtijeva se rješavanje niza poteškoća koji se mogu javiti u radu takvih sustava. To podrazumijeva proširenje sadržaja i kompleksnosti prepoznavanja i robotskog rada, pri čemu se mogu identificirati sljedeće problemske cjeline i razine:

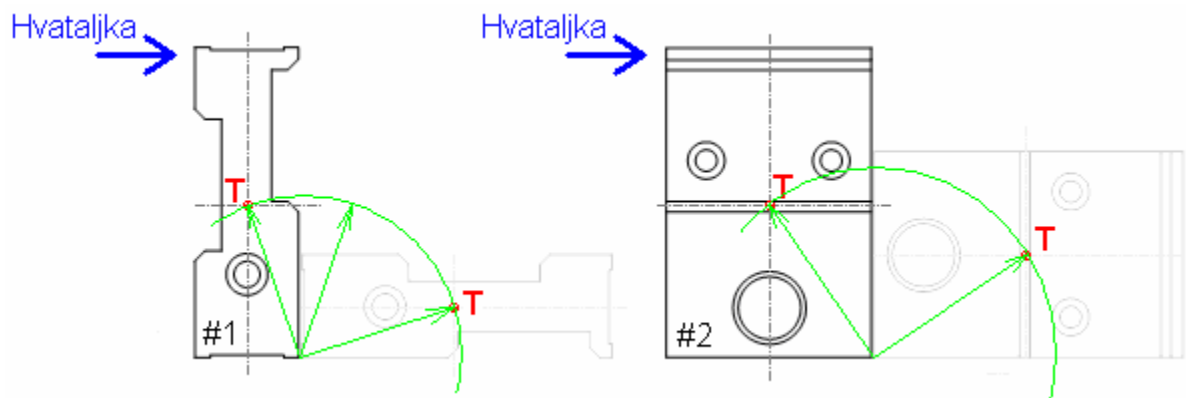
1. dodavanje dijelova
 - kombinacije konvejskog rada
 - ciklusi vibracija vibracijskih staza
 - dodavanje dijelova na stazu
2. vizijski sustav
 - prepoznavanje stohastičkih (prirodnih) orijentacija dijelova
 - prepoznavanje preklapljenih dijelova
3. hvatanje dijelova
 - nedostatak mjesta za hvatanje (hvataljku)
 - visina hvatanja dijelova koji se preklapaju
 - pomicanja dijelova pri hvatanju drugih dijelova
 - usklađivanje hvatanja, brzine prepoznavanja i pokretne staze
4. plan sklapanja dijelova
 - varijante sklapanja uvjetovane stohastičkim orijentacijama dijelova
 - nedostatak dijelova za sklapanje (npr. *on-line* generiranje redoslijeda sklapanja)
 - odlaganje montiranog sklopa
5. algoritmizacija plana sklapanja
6. demontaža sklopa
 - proces rasklapanja
 - mjesto odlaganja dijelova
7. programiranje (i upravljanje) sustava sklapanja
8. kvaliteta rada
 - trošenje dijelova
 - oštećenje prstiju hvataljke.



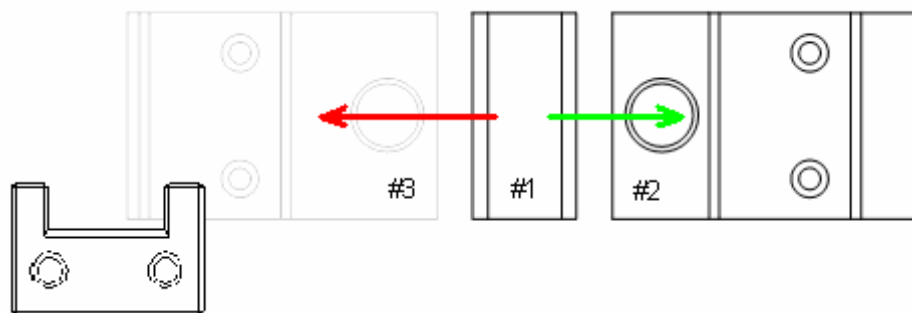
Slika 4. Nazivi orijentacija dijelova za sklapanje



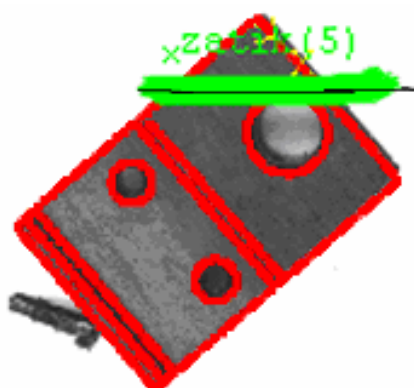
Slika 5. Problem jednakih orijentacija postolja: a) pogled odozgo (kamerom), b) pogled sa strane



Slika 6. Strana obaranja postolja s obzirom na točku težišta dijela



Slika 7. Obaranje postolja na odgovarajuću stranu (pogled odozgo)



Slika 8. Preklapanje postolja, vijka i zatika

Tablica 1. Varijante plana sklapanja postolja

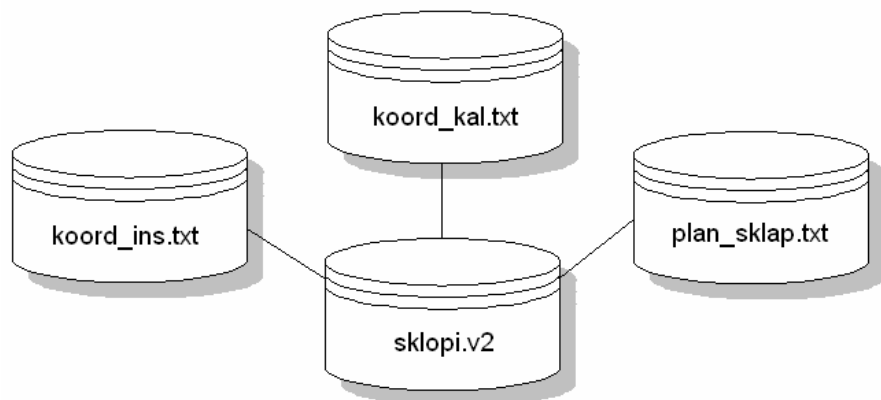
Obaranje #1	Plan sklapanja	Obaranje #2
bazniV	bazni	bazniB1
	bazni2	bazniB2

Tablica 2. Varijante procesa (redoslijeda) sklapanja dijelova

Korak #1	Korak #2	Korak #3	Korak #4	Korak #5
Postolje	Valjak	Zatik – Pločica – Vijci		Sklop
		Pločica	Zatik – Vijci	
	Pločica		Valjak – Zatik – Vijci	
		Vijci – Valjak – Zatik		
Valjak	Postolje	Pločica	Zatik – Vijci	
			Vijci – Zatik	
		Zatik – Pločica – Vijci		

Tablica 3. *Varijante procesa (redosljed) demontaže*

Korak #1	Korak #2	Korak #3
Vijci	Pločica – Zatik – Valjak	Postolje
	Pločica+Zatik – Valjak	
Zatik	Valjak – Vijci – Pločica	
Pločica+Vijci	Zatik – Valjak	



Slika 9. *Potrebne datoteke za rad programa upravljanja procesa sklapanja*

Prilog 1. Datoteka “*koord_kal.txt*“

648] ————— X, Y koordinate prve točke prilikom kalibracije
-166.38

648] ————— X, Y koordinate druge točke prilikom kalibracije
54.04

Prilog 2. Datoteka “*koord_ins.txt*“

6 - broj prepoznatih dijelova na sceni
0 - redni broj prepoznavanja
valjak2 - ime prepoznatog dijela (njegove orijentacije)
113.93 - ishodište koordinatnog sustava za hvatanje dijela po X-osi
86.31 - ishodište koordinatnog sustava za hvatanje dijela po Y-osi
-160.43 - rotacija koordinatnog sustava za hvatanje dijela

1
zatic
48.31
56.23
-132.14

2
plocica
101.47
12.29
81.53

3
bazni2
75.55
162.03
-90.42

4
vijak
161.68
119.03
22.84

5
vijak
168.12
51.62
-13.36

Prilog 3. Datoteka "plan_sklap.txt"

6 - broj potrebnih dijelova za sklapanje
(X, Y, Z, y, p, r):
bazni2 - ime dijela koji se prvi sklapa
18.6 - korekcija visine hvatanja
1 - stanje hvataljke prije hvatanja
3 - broj korištenih točaka ta sklapanje dijela
348.43 - koordinata po X pozicije hvataljke prije sklapanja dijela
211.34 - koordinata po Y pozicije hvataljke prije sklapanja dijela
-90 - koordinata po Z pozicije hvataljke prije sklapanja dijela
0 - rotacija y robota prije sklapanja dijela
180 - rotacija p robota prije sklapanja dijela
-90 - rotacija r robota prije sklapanja dijela

348.43 - koordinata po X pozicije hvataljke za vrijeme sklapanja dijela
211.34 - koordinata po Y pozicije hvataljke za vrijeme sklapanja dijela
-141.93 - koordinata po Z pozicije hvataljke za vrijeme sklapanja dijela
0 - rotacija y robota za vrijeme sklapanja dijela
180 - rotacija p robota za vrijeme sklapanja dijela
-90 - rotacija r robota za vrijeme sklapanja dijela

348.43 - koordinata po X pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
211.34 - koordinata po Y pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
-90 - koordinata po Z pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
0 - rotacija y robota nakon sklapanja dijela
180 - rotacija p robota nakon sklapanja dijela
-90 - rotacija r robota nakon sklapanja dijela

valjak2
22
1
3
368.003
237.912
-90
0
180
-90

368.003
237.912
-122
0
180
-90
368.003
237.912
-90

0	
180	
-90	
zatic	
17.7	
1	
6	
360.889	- koordinata po X pozicije hvataljke prije sklapanja dijela
362.190	- koordinata po Y pozicije hvataljke prije sklapanja dijela
-137.67	- koordinata po Z pozicije hvataljke prije sklapanja dijela
0	- rotacija γ robota prije sklapanja dijela
180	- rotacija ρ robota prije sklapanja dijela
-90	- rotacija r robota prije sklapanja dijela
360.889	- koordinata po X pozicije hvataljke za vrijeme sklapanja dijela ¹
262.190	- koordinata po Y pozicije hvataljke za vrijeme sklapanja dijela
-136.67	- koordinata po Z pozicije hvataljke za vrijeme sklapanja dijela
0	- rotacija γ robota za vrijeme sklapanja dijela
180	- rotacija ρ robota za vrijeme sklapanja dijela
-90	- rotacija r robota za vrijeme sklapanja dijela
360.889	- koordinata po X pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
278	- koordinata po Y pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
-137.67	- koordinata po Z pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
0	- rotacija γ robota nakon sklapanja dijela
180	- rotacija ρ robota nakon sklapanja dijela
-90	- rotacija r robota nakon sklapanja dijela
350.262	- koordinata po X pozicije hvataljke prije guranja dijela
278	- koordinata po Y pozicije hvataljke prije guranja dijela
-137.67	- koordinata po Z pozicije hvataljke prije guranja dijela
0	- rotacija γ robota prije guranja dijela
180	- rotacija ρ robota prije guranja dijela
-90	- rotacija r robota prije guranja dijela
350.262	- koordinata po X pozicije hvataljke nakon guranja dijela
260.58	- koordinata po Y pozicije hvataljke nakon guranja dijela
-137.67	- koordinata po Z pozicije hvataljke nakon guranja dijela
0	- rotacija γ robota nakon guranja dijela
180	- rotacija ρ robota nakon guranja dijela
-90	- rotacija r robota nakon guranja dijela
350.262	- koordinata po X pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
362.190	- koordinata po Y pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
-137.67	- koordinata po Z pozicije hvataljke nakon sklapanja dijela
0	- rotacija γ robota nakon sklapanja dijela
180	- rotacija ρ robota nakon sklapanja dijela
-90	- rotacija r robota nakon sklapanja dijela
plocica	
17.7	
0	
3	
355.097	
236.42	
-75.855	
180	
180	
0	
355.097	
236.42	
-124	
180	
180	
0	
355.097	

¹ Ne obavlja se potpuno sklapanje zatika u ovom koraku.

	236.42
	-75.855
	180
	180
	0
vijak	
17.7	
1	
3	
	338.966
	372.788
	-206.278
	-90
	95
	0
	338.966
	372.788
	-256.278
	-90
	95
	0
	338.966
	372.788
	-150.278
	-90
	95
	0
vijak	
17.7	
1	
3	
	339.297
	396.563
	-206.278
	-90
	95
	0
	339.297
	396.563
	-256.278
	-90
	95
	0
	339.297
	396.563
	-150.278
	-90
	95
	0

Prilog 4. Datoteka “sklopi.v2“

```
.PROGRAM sklopi()
; ABSTRACT:
;
; V+ program za robotsko sklapanje dijelova u nesredjenoj okolini.
;
; Program cita pozicije i orijentacije dijelova s vizijskog sustava, pa ih sklapa prema zadanim putanjama.
;
```

```

; Program otvara tri zapisnika (na lokaciji C:\Adept\Disks\Disk_C):
; - koord_ins.txt - pozicije i orijentacije dijelova s vizijskog sustava
;   (format: 1. broj prepoznatih dijelova,
;           2. identifikacijski broj dijela (0, 1, 2, ...),
;           3. naziv dijela, 4. do 6. x i y koordinate pozicije dijela, te kut
;           zakrenutosti dijela prema vizijskom koordinatnom sustavu),
; - koord_kal.txt - koordinate kalibracije - transformacija koordinata – povezivanje
;   koordinatnih sustava vizije i robota
;   (format: 1. do 2. x i y koordinate ishodišta vizijskog koordinatnog sustava
;   ("Ijave donji kut kalibracijskog lista")
;           3. do 4. x i y koordinate druge kalibracijske točke),
; - plan_sklap.txt - planovi sklapanja, s podacima:
;   - redosljed sklapanja
;   - putanje sklapanja
;   - visine (točke) hvatanja dijelova
;   - otvorenost/zatvorenost hvataljke
;   (format: 1. broj dijelova za sklapanje/sklopa
;           2. naziv dijela
;           3. korekcija visine hvatanja dijela
;           4. stanje hvataljke za hvatanje dijela:
;               1 - dijelu se približavati otvorenom hvataljkom,
;               0 - dijelu se približavati zatvorenom hvataljkom
;           5. broj putanja sklapanja (tipično tri:
;               1. približavanje mjestu montaze
;               2. cin spajanja
;               3. odvajanje/udaljavanje robotske ruke)).
;
; Ugradjeno je i nekoliko provjera konzistentnosti ulaznih parametara.
;
; Ako je u zapisniku put_sklap.txt prvi redak 0, sklapanje se ignorira.
;
; 20050323
; Ubaceni izrazi za transformaciju koordinata (pretvorba koordinatnog sustava kamere u
; koordinatni sustav robota).
; 20051014
; Smanjen broj datoteka i promijenjen način njihovog citanja.
;
;
; * Copyright (c) 2002-2005 by FSB
;-----
; Povezivanje s NFS-om

ATTACH (viz, 4) "NFS"
greska = IOSTAT(viz)
IF greska < 0 THEN
    TYPE "Greška prilikom povezivanja s NFS-om", $ERROR(greska)
    GOTO 100
END

ATTACH (kal, 4) "NFS"
greska = IOSTAT(kal)
IF greska < 0 THEN
    TYPE " Greška prilikom povezivanja s NFS-om ", $ERROR(greska)
    GOTO 100
END

ATTACH (plan, 4) "NFS"
greska = IOSTAT(plan)
IF greska < 0 THEN
    TYPE " Greška prilikom povezivanja s NFS-om ", $ERROR(greska)
    GOTO 100
END

; Otvaranje datoteke za čitanje pozicije i rotacije koordinatnih sustava prepoznatih dijelova

FOPENR (viz) "koord_ins.txt"
mistejk = IOSTAT(viz)
IF mistejk < 0 THEN
    TYPE "Datoteka kalibracije se ne otvara", $ERROR(mistejk)
    GOTO 100
END

```

; Otvaranje datoteke za čitanje plana sklapanja

```
FOPENR (plan) "plan_sklap.txt"
mistejk = IOSTAT(plan)
IF mistejk < 0 THEN
  TYPE "Datoteka plana sklapanja se ne otvara!", $ERROR(mistejk)
  GOTO 100
END
```

; Transformacija koordinata - povezivanje koordinatnih sustava vizije i robota

```
FOPENR (kal) "koord_kal.txt"
mistejk = IOSTAT(kal)
IF mistejk < 0 THEN
  TYPE "Datoteka kalibracije se ne otvara", $ERROR(mistejk)
  GOTO 100
END
```

```
READ (kal) x1
READ (kal) y1
READ (kal) x2
READ (kal) y2
```

```
IF ((x1 > x2) AND (y1 < y2)) THEN theta = 90+ATAN2((x1-x2),(y2-y1))
END
IF ((x1 < x2) AND (y1 < y2)) THEN theta = ATAN2((y2-y1),(x2-x1))
END
IF ((x1 < x2) AND (y1 > y2)) THEN theta = 90-ATAN2((y1-y2),(x2-x1))
END
IF ((x1 > x2) AND (y1 > y2)) THEN theta = 90+ATAN2((y1-y2),(x1-x2))
END
IF ((x1 == x2) AND (y1 < y2)) THEN theta = 90
END
IF ((x1 == x2) AND (y1 > y2)) THEN theta = 270
END
IF ((x1 <= x2) AND (y1 == y2)) THEN theta = 0
END
IF ((x1 > x2) AND (y1 == y2)) THEN theta = 180
END
```

; TYPE x1 TYPE y1 TYPE x2 TYPE y2 TYPE theta

```
FOR ind = 0 TO 10 STEP 1
  polje[ind] = 0
; TYPE polje[ind]
END

SPEED 20 ALWAYS
SIGNAL (42)
SET poc_1 = TRANS(230,0,150,0,180,0)
MOVE poc_1
BREAK
```

; Deklaracije varijabli; nd - broj detektiranih dijelova

```
nd = 1
$iddio = ""
x = 0
y = 0
z = 0
fi = 0

vis = 0

nplan = 1
noper = 0
xp = 0
yp = 0
```

```
zp = 0
fip = 0
rotp = 0
valp = 0
```

; Provjera ima li dijelova za sklapanje

```
READ (viz) nd
IF nd < 1 THEN
  TYPE "Nema niti jednog dijela za sklapanje!/No parts found to be assembled!"
  GOTO 100
END
```

; Provjera da li se broj propoznatih dijelova podudara sa brojem dijelova u planu sklapanja

```
READ (plan) nplan
IF nplan <> nd THEN
  TYPE "Plan sklapanja u neskladu s brojem prepoznatih dijelova!"
  GOTO 100
END
```

```
npoziva = 0
```

```
DO
```

```
  npoziva = npoziva+1
```

```
  READ (plan) $iddio
  READ (plan) vis
  READ (plan) hvat
  READ (plan) n_put
```

```
  FCLOSE (viz)
```

```
  FOPENR (viz) "koord_ins.txt"
```

```
  READ (viz) nd
```

```
50  READ (viz) iden
    READ (viz) $idviz
    READ (viz) x
    READ (viz) y
    READ (viz) fi
```

```
; IF (($idviz <> $iddio) OR (polje[iden] == 1)) THEN
  TYPE "Tražim dio u datoteci vizijskog sustava..."
  GOTO 50
```

```
ELSE
```

```
  xt = COS(theta)*x-SIN(theta)*y+x1
  yt = SIN(theta)*x+COS(theta)*y+y1
  fit = -(fi+theta)
  polje[iden] = 1
```

```
END
```

; Korekcija visine (sa ugrađenim senzorim sile i momenata, površina stola se nalazi na visini -161 dok se zbrajanjem korekcije visine određuje stvarna visina hvatanja dijelova)

```
z = -161+vis
```

```
SET kraj_1 = TRANS(xt,yt,z,0,180,fit)
```

```
APPRO kraj_1, 100
```

```
BREAK
```

; Zadavanje stanja hvataljke

```

IF (hvat == 1) THEN
    SIGNAL (42)
ELSE
    SIGNAL (-42)
END

DELAY 0.5

MOVES kraj_1

BREAK

IF (hvat == 1) THEN
    SIGNAL (-42)
ELSE
    SIGNAL (42)
END

DELAY 0.5

DEPART 100

; Čitanje putanja sklapanja

xp = 0
yp = 0
zp = 0
fip = 0
rotp = 0
valp = 0

brojsklap = 0

TYPE "Sklapam dio "+$iddio

DO

    brojsklap = brojsklap+1

    READ (plan) xp
    READ (plan) yp
    READ (plan) zp
    READ (plan) fip
    READ (plan) rotp
    READ (plan) valp

    SET tocki = TRANS(xp,yp,zp,fip,rotp,valp)

    MOVES tocki

    BREAK

    IF ((brojsklap MOD 2) == 0) AND (hvat == 1) THEN
        SIGNAL (42)
    END
    IF ((brojsklap MOD 2) == 0) AND (hvat == 0) THEN
        SIGNAL (-42)
    END

    DELAY 0.5

UNTIL brojsklap == n_put
90 UNTIL npoziva == nd
100 MOVE poc_1
    BREAK
    FCLOSE (plan)

.END

```