



UPRAVLJANJE ROBOTSKIM SUSTAVIMA

Nastavnici:

Prof.dr.sc. Zdenko Kovačić
Prof.dr.sc. Ivan Petrović
Prof.dr.sc. Stjepan Bogdan

Voditelji seminara:

Dr.sc. Eduard Ivanjko, Damjan Miklič, dipl.inž.

Informacije o kolegiju:

http://www.fer.hr/predmet/urs_a

Konzultacije: prema dogovoru

1



OPĆENITO O KOLEGIJU

- Izbor aktualnih istraživačkih tema (iznimno velik broj istraživačkih tema u robotici)
- Predznanja: kolegiji Praktikum robotike, Osnove robotike, Mobilna robotika i Sustavi s diskretnim događajima
- Tri ciklusa predavanja (5+4+4 tjedna) – 4 ECTS boda
- Sadržaj predavanja:
 - **1.ciklus (prof. Kovačić):** Metoda planiranja trajektorije s kontroliranim trzajem. Linearne i nelinearne metode estimacije momenta tereta. Upravljanje šesteronožnim hodajućim robotom pomoću cikličkih gentičkih algoritama.
 - Seminar: Projektiranje estimatora momenta tereta za laboratorijski robot
 - **2.ciklus (prof. Petrović):** Sustavi upravljanja robotima na daljinu. Povratna veza po sili – kompenzacija utjecaja komunikacijskog kašnjenja primjenom valnih varijabli. Stvaranje osjećaja nazočnosti operatora u udaljenom prostoru.
 - Seminar: Daljinsko upravljanje mobilnim robotom putem Interneta
 - **3.ciklus (prof. Bogdan):** Matematički modeli letjelica: balon, helikopter, quadrotor. Aktuatori i senzori bespilotnih letjelica: inercijalni mjerni sustav. Upravljanje bespilotnim letjelicama. Gibanje u formacijama.
 - Seminar: Upravljanje laboratorijskim letjelicama
- Svaki ciklus ima po jednu domaću zadaću

2

Način ocjenjivanja

Udio seminara i domaćih zadaća:	SDZ1+SDZ2+SDZ3 = 9+8+8 = 25 bodova
Udio međuispita:	MI1+MI2+ZI3 = 25+25+25 = 75 bodova
Ukupno:	MI1+MI2+ZI3 +SDZ1+SDZ2+SDZ3 = 100 bodova

Napomena 1: Uvjet za izlazak na završni ispit je ostvarenje najmanje 34 boda iz SDZ1+SDZ2+MI1+MI2, te na vrijeme predane domaće zadaće i seminarski radovi.

Napomena 2: Izostanak s nekog od međuispita obvezuje studenta da se unutar dva tjedna nakon međuispita javi nastavniku radi dogovora o održavanju ekvivalentnog usmenog ispita.

Tablica ocjena					
Ocjena	1	2	3	4	5
Broj bodova	0-53	54-64	65-79	80-89	90-100

Generiranje reference za robotske sustave

- Djeluje se na: put brzinu ubrzanje trzaj

$$s(t) \quad v(t) = \frac{ds(t)}{dt} \quad a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad j(t) = \frac{da(t)}{dt}$$

- Planiranje trajektorije** – važan dio svakog industrijskog ili mobilnog robotskog sustava
- Skokovita promjena** referentne veličine – samo kao test funkcija tijekom identifikacije prijelazne karakteristike slijednog sustava te kod podešavanja parametara regulatora (puštanja u pogon)
- Trapezni profil** reference brzine – period ubrzavanja, period gibanja sa zadanom brzinom te period usporavanja - brzina porasta reference određena maksimalno mogućim dinamičkim momentom motora)
- S-profil reference** – oblik reference sličan trapeznom koji onemogućava pojavu vibracija u stroju pri skokovitoj promjeni ubrzanja (derivaciji brzine)
- Spline funkcije (kubni polinomi)** – često se za režime kretanja (prvi segment trajektorije) i zaustavljanja (zadnji segment trajektorije) koriste tzv. prirodni splineovi čija druga derivacija u $t=0$ je jednaka nuli

Planiranje trajektorije s kontroliranim trzajem

- Off-line ili on-line planiranje trajektorije (obično su zadane prolazne točke na trajektoriji te su poznata ograničenja brzina i ubrzanja pogona robota)
- Uvjet kontinuiteta položaja, brzina i ubrzanja u svakoj prolaznoj točki → interpolacija trajektorije pomoću splineova
- Trzaji – javljaju se pri kretanju i zaustavljanju te pri naglim djelovanjima vanjskih sila i momenata
- Interpolacija trajektorije kubnim polinomima → nema kontrole trzaja
- Ho-Cookov postupak planiranja trajektorije s **polinomima 4-3-4 stupnja** – početni i završni segmenti trajektorije opisani su polinomima 4. stupnja → trzaj se unutar segmenata trajektorije drži u poznatim granicama, ali se zbog sekvencijalnog ulančavanja kubnih polinoma u svim zadanim prolaznim točkama trzaj naglo mijenja
- Problem kontrole trzaja javlja se naročito u transportu, manipulaciji krhkim predmetima, tekućinama i sl.
- Postupak planiranja bestrzajne trajektorije → modificirani Ho-Cookov postupak planiranja trajektorije s **polinomima 4-4-5 stupnja**

Modificirani Ho-Cookov postupak

Neka planirana trajektorija ima $N-1$ segmenata određenih sa N zadanih točaka, $P_1 \dots P_N$, i neka su prvi i svi ostali međusegmenti opisani s polinomimam četvrtog stupnja:

$$F_k(t) = B_{k,1} + B_{k,2}t + B_{k,3}t^2 + B_{k,4}t^3 + B_{k,5}t^4$$

Za $1 \leq k \leq N-2$, koeficijenti splineova se mogu izraziti u matricnoj formi:

$$\begin{bmatrix} B_{k,1} \\ B_{k,2} \\ B_{k,3} \\ B_{k,4} \\ B_{k,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{4}{T_{k+1}^3} & \frac{3}{T_{k+1}^2} & \frac{1}{T_{k+1}} & \frac{4}{T_{k+1}^3} & \frac{1}{T_{k+1}^2} \\ \frac{3}{T_{k+1}^4} & \frac{2}{T_{k+1}^3} & \frac{1}{2T_{k+1}^2} & \frac{3}{T_{k+1}^4} & \frac{1}{T_{k+1}^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_k \\ v_k \\ a_k \\ P_{k+1} \\ v_{k+1} \end{bmatrix}$$

gdje:

$$0 \leq t \leq T_{k+1}$$

$$F_k(0) = P_k \quad F_k(T_{k+1}) = P_{k+1}$$

$$v_k(0) = v_k \quad v_k(T_{k+1}) = v_{k+1}$$

$$a_k(0) = a_k$$

Da bi se mogli izračunati koeficijenti splineova, vrijednosti T_{k+1} , v_k , a_k , v_{k+1} i a_{k+1} moraju biti poznate.



Izračunavanje nepoznatih varijabli

T_{k+1} se računa kao kao najkraća udaljenost između zadanih točaka trajektorije P_k i P_{k+1} u prostoru varijabli zglobova (parametričko vrijeme):

$$T_{k+1} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (q_{j,k+1} - q_{j,k})^2} \quad n \text{ je broj zglobova robota, a } q_{j,k} \text{ predstavlja vrijednost } j\text{-tog zgloba } z_j \text{ na } k\text{-toj prolaznoj točki } P_k$$

Na posljednjem segmentu trajektorije vrijedi dodatno ograničenje:

$$a_{N-1}(T_N) = a_N$$

Da bi se opisao posljednji segment, potreban je polinom 5. stupnja:

$$F_{N-1}(t) = B_{N-1,1} + B_{N-1,2}t + B_{N-1,3}t^2 + B_{N-1,4}t^3 + B_{N-1,5}t^4 + B_{N-1,6}t^5$$

To daje:

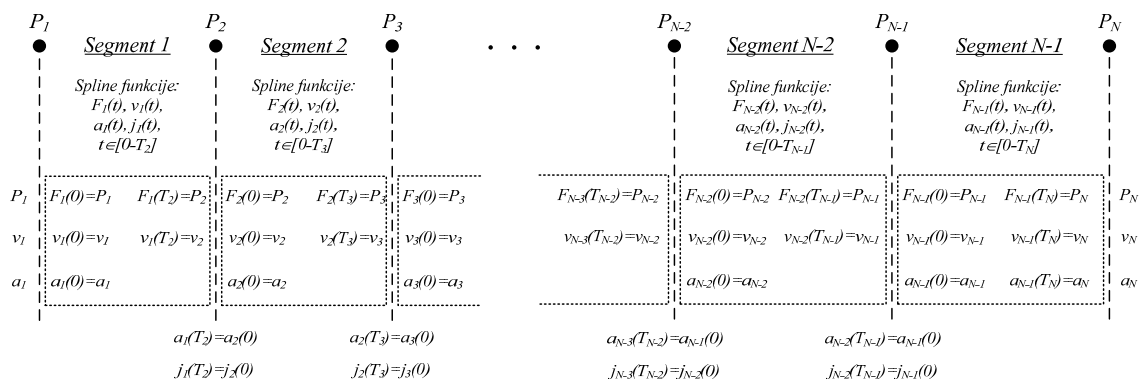
$$\begin{bmatrix} B_{N-1,1} \\ B_{N-1,2} \\ B_{N-1,3} \\ B_{N-1,4} \\ B_{N-1,5} \\ B_{N-1,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{10}{T_N^3} & \frac{6}{T_N^2} & \frac{3}{2T_N} & \frac{10}{T_N^3} & \frac{4}{T_N^2} & \frac{1}{2T_N} \\ \frac{15}{T_N^4} & \frac{8}{T_N^3} & \frac{3}{2T_N^2} & \frac{15}{T_N^4} & \frac{7}{T_N^3} & \frac{1}{T_N^2} \\ \frac{6}{T_N^5} & \frac{3}{T_N^4} & \frac{1}{2T_N^3} & \frac{6}{T_N^5} & \frac{3}{T_N^4} & \frac{1}{2T_N^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{N-1} \\ v_{N-1} \\ a_{N-1} \\ P_N \\ v_N \\ a_N \end{bmatrix}$$

7



Izračunavanje nepoznatih varijabli

- Brzine v_k i ubrzanja a_k mogu se odrediti koristeći uvjete kontinuiteta za ubrzanja i trzaje u zadanim točkama trajektorije



8

Izračunavanje nepoznatih varijabli

Dobije se matricna jednadžba koja se može koristiti za rješavanje $N-2$ nepoznatih brzina i $N-2$ nepoznatih ubrzanja \rightarrow dimenzije od $[\mathbf{M}]$ su $(2N-4) \times (2N-4)$, dimenzije od $[\mathbf{D}]$ su $(2N-4) \times 1$ i dimenzije od $[\mathbf{H}]$ su $(2N-4) \times 1$

$$\mathbf{M} \times \mathbf{D} = \mathbf{H} =$$

$$\begin{bmatrix}
 M_{1,1} & M_{1,2} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 M_{2,1} & M_{2,2} & M_{2,3} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\
 6T_3 & T_3^2 & 6T_3 & -T_3^2 & 0 & 0 & \dots & \vdots \\
 5T_3T_4^3 & T_3^2T_4^3 & 3T_3T_4^3 + 3T_3^3T_4 & T_3^3T_4^2 & T_3^3T_4 & 0 & \dots & \vdots \\
 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & & & & & \\
 & & & 0 & 6T_{N-2} & T_{N-2}^2 & 6T_{N-2} & -T_{N-2}^2 & 0 & 0 \\
 & & & 0 & 5T_{N-2}T_{N-1}^3 & T_{N-2}^2T_{N-1}^3 & 3T_{N-2}T_{N-1}^3 + 3T_{N-2}^3T_{N-1} & T_{N-2}^3T_{N-1}^2 & T_{N-2}^3T_{N-1} & 0 \\
 0 & & & & 0 & \frac{3}{T_{N-1}} & \frac{1}{2} & \frac{3}{T_{N-1}} & \frac{1}{2} & \\
 0 & 0 & \dots & & 0 & \frac{5}{T_{N-1}^2} & \frac{1}{T_{N-1}} & \frac{3}{T_{N-1}^2} + \frac{6}{T_N^2} & \frac{3}{2T_N} &
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 v_2 \\
 a_2 \\
 v_3 \\
 a_3 \\
 \vdots \\
 v_{N-2} \\
 a_{N-2} \\
 v_{N-1} \\
 a_{N-1}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 h_1 \\
 h_2 \\
 h_3 \\
 \vdots \\
 h_{2N-5} \\
 h_{2N-4}
 \end{bmatrix}$$

9

Izračunavanje nepoznatih varijabli

Dobije se matricna jednadžba koja se može koristiti za rješavanje $N-2$ nepoznatih brzina i $N-2$ nepoznatih ubrzanja \rightarrow dimenzije od $[\mathbf{M}]$ su $(2N-4) \times (2N-4)$, dimenzije od $[\mathbf{D}]$ su $(2N-4) \times 1$ i dimenzije od $[\mathbf{H}]$ su $(2N-4) \times 1$

gdje:

$$M_{1,1} = \frac{6}{T_2}$$

$$M_{1,2} = -1$$

$$M_{2,1} = \frac{18}{T_2^2} + \frac{18}{T_3^2}$$

$$M_{2,2} = \frac{6}{T_3}$$

$$M_{2,3} = \frac{6}{T_3^2}$$

$$h_1 = \frac{12}{T_2^2}(P_2 - P_1) - \frac{6}{T_2}v_1 - a_1$$

$$h_2 = \frac{48}{T_2^3}(P_2 - P_1) + \frac{24}{T_3^3}(P_3 - P_2) - \frac{30}{T_2^2}v_1 - \frac{6}{T_2}a_1$$

$$h_{2k-1} = 12(P_{k+1} - P_k)$$

$$k = 2, \dots, N-3$$

$$h_{2k} = 8T_{k+2}^3(P_{k+1} - P_k) + 4T_{k+1}^3(P_{k+2} - P_{k+1})$$

$$h_{2N-5} = \frac{6}{T_{N-1}^2}(P_{N-1} - P_{N-2})$$

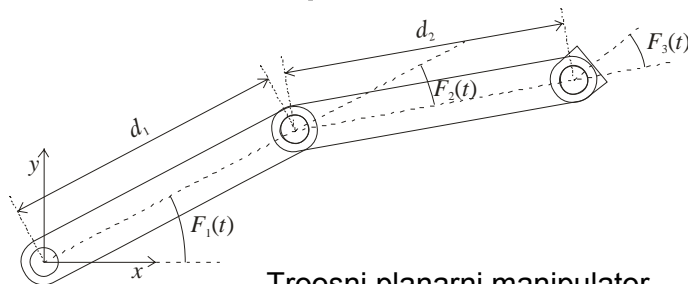
$$h_{2N-4} = \frac{8}{T_{N-1}^3}(P_{N-1} - P_{N-2}) + \frac{10}{T_N^3}(P_N - P_{N-1}) - \frac{4}{T_N^2}v_N + \frac{1}{2T_N}a_N$$

- Ovo je iterativan postupak koji uzima u obzir fizikalna ograničenja svakog zgloba
- Postupak završava kad maksimalne brzine i ubrzanja svih zglobova robota uđu u područje fizikalnih ograničenja
- Rezultat je $N-1 \times n$ splineova koji opisuju cijelu trajektoriju od P_1 do P_N

10

Primjer: Planiranje bestrzajne trajektorije za troosni planarni manipulator

12 zadanih točaka tvori **trokut** s vrhovima (1,0), (0,1) i (1,1). Vektori brzina i ubrzanja na oba kraja trajektorije imaju zadane vrijednosti $\mathbf{v}_1^T = [-0.1, 0.4, 0]$, $\mathbf{a}_1^T = [1, 3, 0]$.

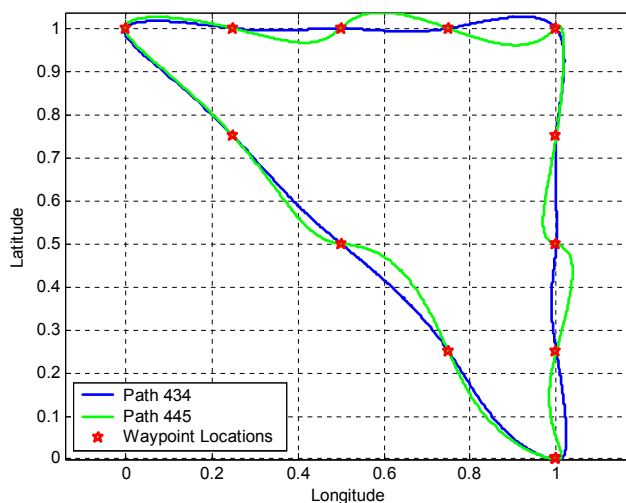


Troosni planarni manipulator

Maksimalne vrijednosti brzina i ubrzanja svih zglobova robota su $v_{gr}=2$ rad/s i $a_{gr}=10$ rad/s².

Testovi su obavljani za "434" i "445" inačice Ho-Cookovog algoritma planiranja trajektorije

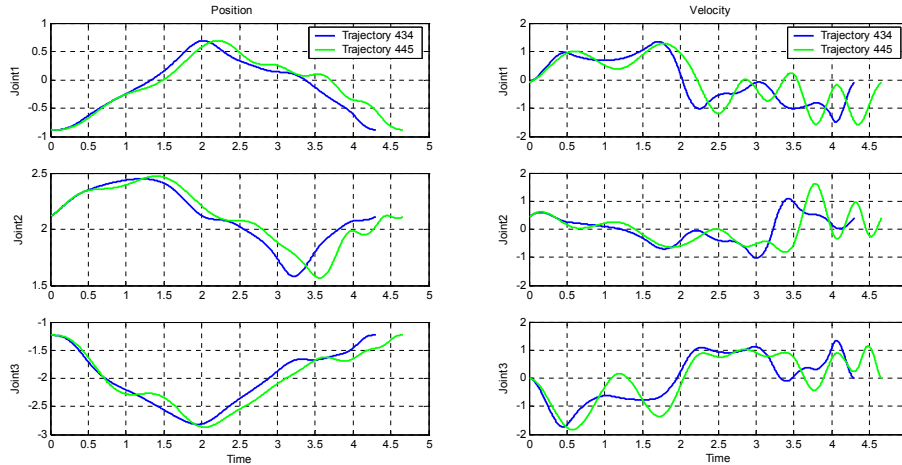
Planirane trajektorije



- Odstupanja kod "Traj. 445" su veća od "Traj. 434"
- Potreba ubacivanja novih točaka – npr. pomoću Taylorovog postupka ograničenih odstupanja
- Ograničenje trzaja u trajektorijama odgovara ograničenju promjene momenta zgloba što doprinosi duljem životnom vijeku robota i točnijem praćenju trajektorije.
- Metoda je prikladna za PTP i CP način gibanja robota

Odzivi položaja i kutne brzine

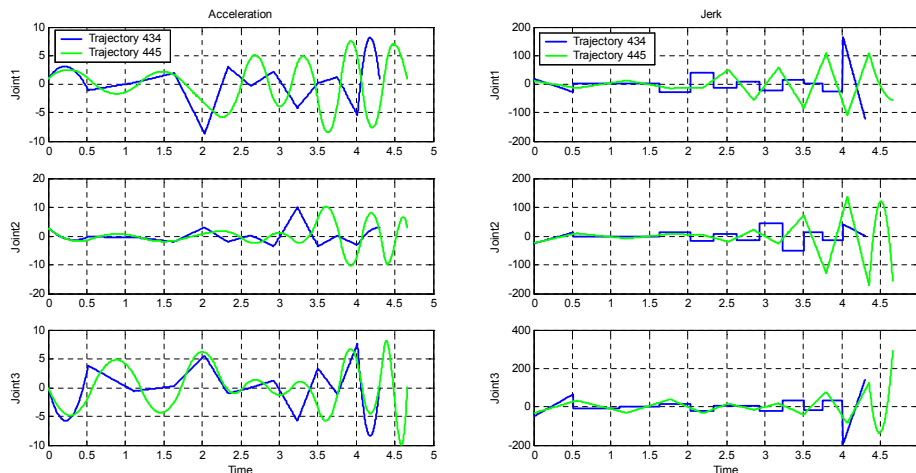
Planirane trajektorije imaju sličan oblik jer obje prolaze kroz iste prolazne točke. Ukupno vrijeme prolaza za "Traj. 445" je dulje nego za "Traj. 434".



13

Odzivi ubrzanja i trzaja

Ubrzanje kod obje trajektorije ostaje unutar zadanog ograničenja. "Traj. 434" ima nagle promjene trzaja na unutarnjim segmentima, dok "Traj. 445" nema.



14

Projektiranje estimatora momenta tereta

Pogoni robota izloženi su konstantnom djelovanju poremećajnih veličina:

- Moment trenja (diskontinuirana statička komponenta)
- Moment tereta uslijed djelovanja sile teže (periodička nelinearna ovisnost)
- Vanjski moment (kod rada više robota koji nose isti teret)

Podsjetnik na Osnove robotike

- Kod PD regulacije položaja uz upravljanje po momentu javljale su se pogreške pozicije u stacionarnom stanju zbog djelovanja sile teže
- Kod PD regulacije s kompenzacijskim proširenjem uvedena je korekcija izlaza iz regulatora – signal proporcionalan procijenjenoj vrijednosti M_{t0}

Momenti tereta se mogu nepredvidljivo mijenjati (npr. trenutak hvatanja predmeta koji je detektiran da se nalazi na pokretnoj traci)

Momenti tereta se mogu i periodički mijenjati (moment sile teže)

Javlja se očigledna potreba za:

- što boljom dinamičkom estimacijom momenta tereta
- što boljom kompenzacijom djelovanja momenta tereta na kvalitetu upravljanja

Projektiranje estimatora momenta tereta

Teorija estimacije:

- Potrebno je poznavanje modela procesa
- Estimiranje varijabli sustava (sustav mora biti osmotriv)
 - Varijable koje se ne mogu mjeriti (npr. ubrzanje u motoru)
 - Varijable koje se mogu mjeriti (npr. kad se ne želi ili ne može koristiti senzor)

Projektiranje estimatora momenta tereta:

Linearne metode estimacije:

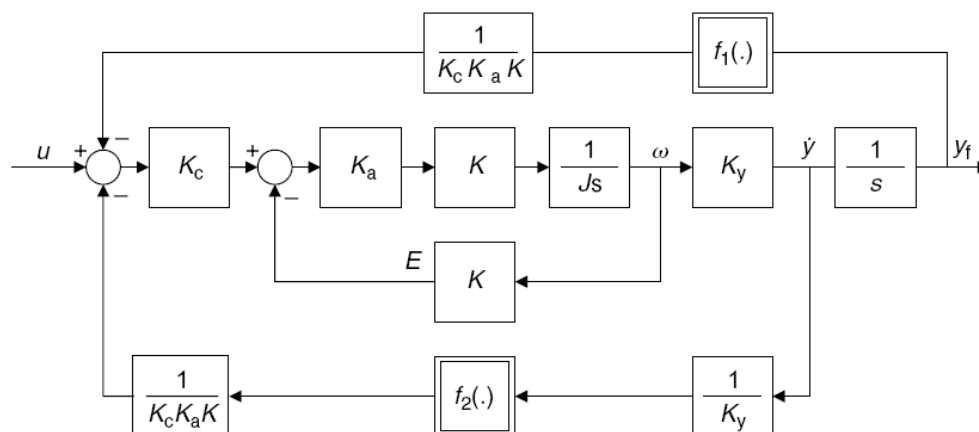
- Dead-beat estimator
- Klasični estimator s izborom polova
- Estimacija korištenjem inverzne funkcije procesa

Nelinearne metode estimacije:

- pomoću neuronskih mreža
- pomoću samoučećih neizrazitih regulatora (i neuronskih mreža)

Projektiranje estimatora momenta tereta

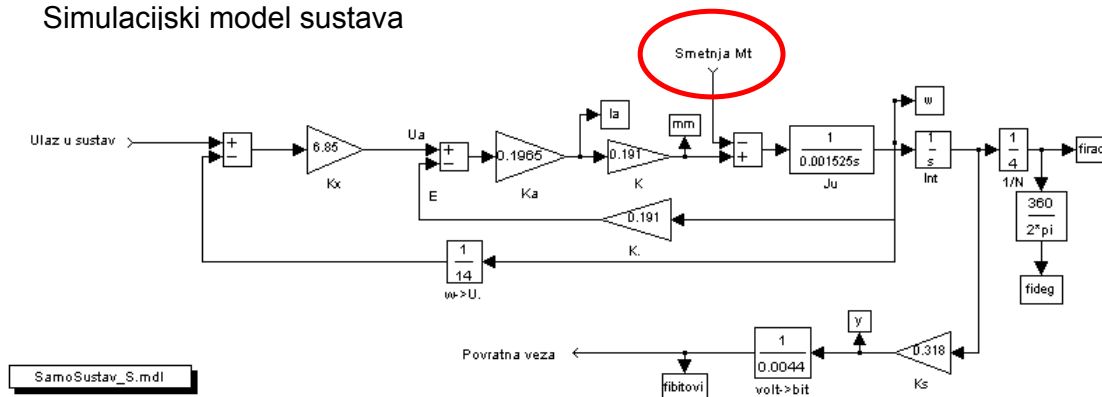
Modifikacija blokovske sheme sustava – utjecaj poremećajnih veličina pomaknut na izlaz iz slijednog regulatora (napomena: $K_c = K_x$, $K_y = U_\omega / N$)



19

Projektiranje estimatora momenta tereta

Simulacijski model sustava



K_x - parametar koji uključuje pojačanje čopera i $I_x R$ kompenzaciju,

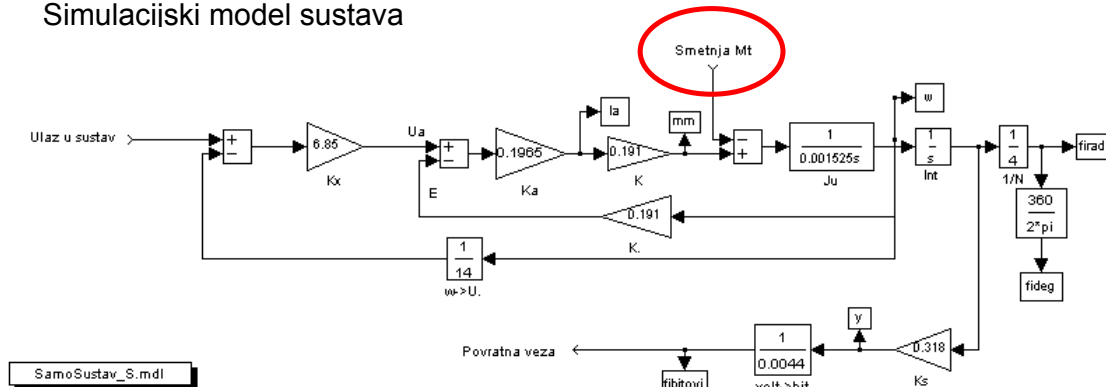
U_ω - konstanta mjernog člana brzine vrtnje osovine motora,

U_{2b} - konstanta pretvorbe D/A pretvornika

20

Projektiranje estimatora momenta tereta

Simulacijski model sustava



Digitalni slijedni regulator – 12-bitna rezolucija pozicije

Za pomak letve od 20° (tj. 0.349 rad), uz poznate parametre slijednog sustava referencu položaja treba promijeniti za:

$$\Delta U_r = 101[\text{bit}]$$

21

Projektiranje estimatora momenta tereta

Matematički model potreban za projektiranje estimatora

$$u_E = K_s \cdot U_{2b} \cdot \varphi_m \rightarrow \frac{d}{dt} \rightarrow \dot{u}_E = K_s \cdot U_{2b} \cdot \omega_m$$

$$\omega = \frac{M_m - M_t}{J_s}$$

$$M_m = K K_a (U_a - K \omega)$$

$$U_a = (Y_r - \omega U_w) K_x$$

$$M_m = \underbrace{K_a K K_x}_{\alpha} Y_r - \underbrace{K_a K (U_w K_x + K)}_{\beta} \omega = \alpha Y_r - \beta \omega$$

$$\omega = \frac{\alpha Y_r - \beta \omega - M_t}{J_s} \Rightarrow J_s \omega = \alpha Y_r - \beta \omega - M_t$$

$$\dot{\omega} = \frac{\alpha}{J} Y_r - \frac{\beta}{J} \omega - \frac{1}{J} M_t$$

gdje su:

U_a - napon armature (V)

I_a - struja armature (A)

ω - kutna brzina osovine motora (rad/s)

E - protuelektromotorna sila (V)

y - izlaz iz mjernog člana (V)

θ - položaj radnog mehanizma (rad),

K_x - koeficijent pojačanja $I_x R$

kompenczacije

K_a - koeficijent pojačanja armaturnog kruga

K - konstanta motora

J - moment inercije

N - omjer prijenosa reduktora

K_s - koeficijent pojačanja mjernog člana

U_E - signal povratne veze položaja

(bitovi)

22

Projektiranje **dead-beat** estimatora momenta tereta

Moguće je sustav opisati u prostoru varijabli stanja:

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_E \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_s \cdot U_{2b} \\ 0 & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_E \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J} & \frac{\alpha}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_t \\ Y_r \end{bmatrix}$$

Moguće je odrediti matrice A_{pek} i C_{pek} estimatora

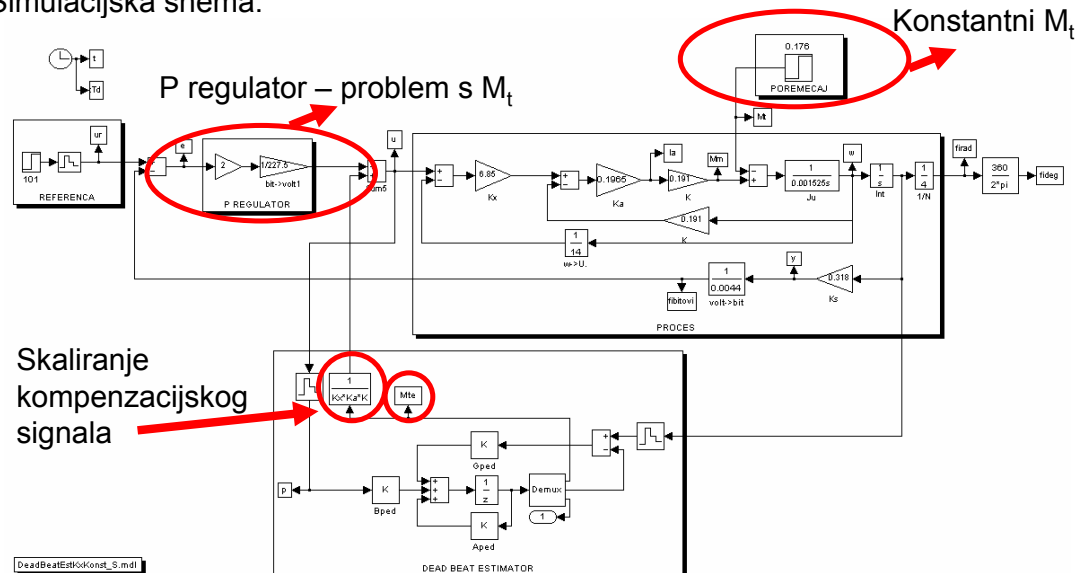
$$\begin{bmatrix} \dot{M}_t \\ \dot{u}_E \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_s \cdot U_{2b} \\ -\frac{1}{J} & 0 & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix}}_{A_{pek}} \begin{bmatrix} M_t \\ u_E \\ \omega \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\alpha}{J} \end{bmatrix}}_{B_{pek}} Y_r$$

Korištenjem Ackermanove formule

$$G_{pek} = A_{pek}^3 \begin{bmatrix} C_{pek} \\ C_{pek} \cdot A_{pek} \\ C_{pek} \cdot A_{pek}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Projektiranje **dead-beat** estimatora momenta tereta

Simulacijska shema:

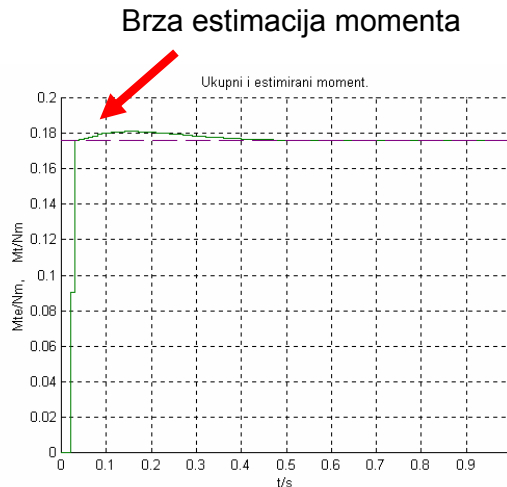


Projektiranje **dead-beat** estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – zanemaren
utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve



Odziv momenata

Projektiranje **dead-beat** estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen
utjecaj A/D pretvornika:



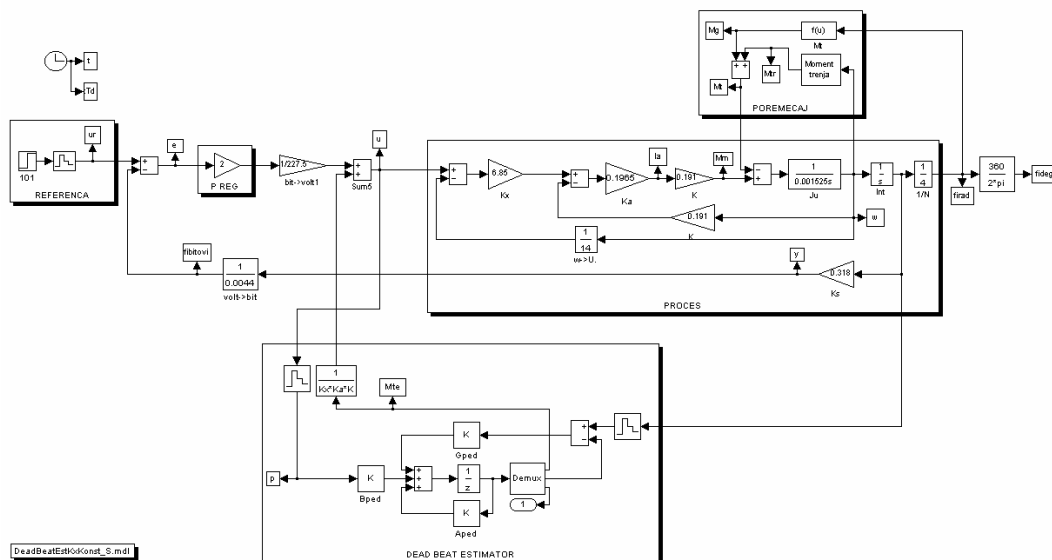
Odziv zakreta letve



Odziv momenata

Projektiranje **dead-beat** estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje:



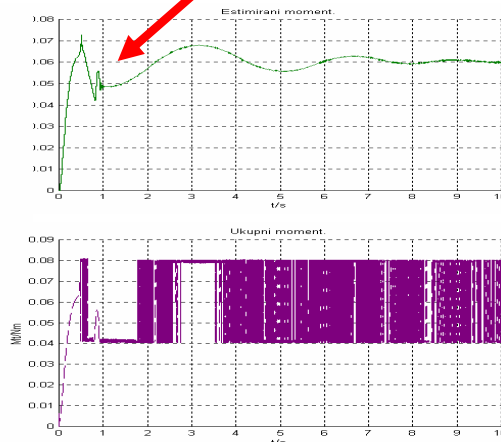
Projektiranje **dead-beat** estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje:

Estimacija srednje vrijednosti



Odziv zakreta letve



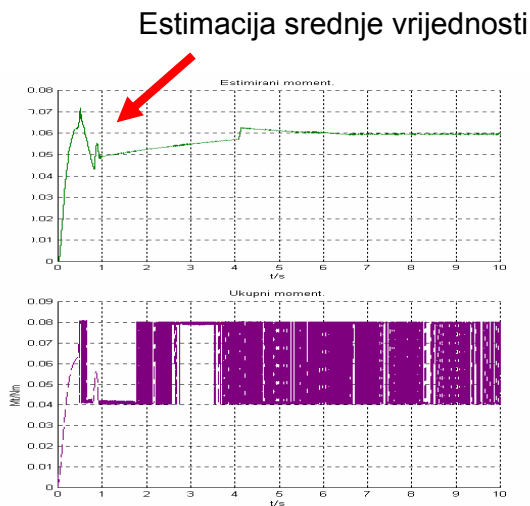
Odziv momenata

Projektiranje **dead-beat** estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje te utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve



Odziv momenata

Projektiranje **klasičnog** estimatora momenta tereta

Isti je opis sustava u prostoru varijabli stanja:

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_E \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_s \cdot U_{2b} \\ 0 & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_E \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J} & \frac{\alpha}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_t \\ Y_r \end{bmatrix}$$

Isto je stoga i izračunavanje matrica A_{pek} i B_{pek} estimatora

$$\begin{bmatrix} \dot{M}_t \\ \dot{u}_E \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_s \cdot U_{2b} \\ -\frac{1}{J} & 0 & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix}}_{A_{pek}} \begin{bmatrix} M_t \\ u_E \\ \omega \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\alpha}{J} \end{bmatrix}}_{B_{pek}} Y_r$$

Različiti su jedino polovi estimatora u Ackermanovoj formuli

$$G_{pek} = (A_{pek} - Ip_1)(A_{pek} - Ip_2)(A_{pek} - Ip_3) \begin{bmatrix} C_{pek} \\ C_{pek} \cdot A_{pek} \\ C_{pek} \cdot A_{pek}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijska shema je ista kao za dead-beat estimator

Početni eksperiment: Konstantni $M_t = M_{t_0}$

- Polovi estimatora biraju se tako da dinamika estimatora bude dovoljno brza u odnosu na dinamiku reguliranog sustava kako bi kompenzacija bila što djelotvornija
 - U pokusima je odabrano da su sva tri pola estimatora jednaka:
 - a) $p_1=p_2=p_3=0.3 \rightarrow$ brža dinamika estimatora
 - b) $p_1=p_2=p_3=0.9 \rightarrow$ sporija dinamika estimatora
 - Provjerava se rad estimatora uz zanemarenje i uz uvažavanje utjecaja digitalizacije ulaza
- Konačni esperiment: djelovanje nelinearnog momenta tereta i momenta trenja
- Provjerava se rad estimatora pri istim uvjetima kao za $M_t = M_{t_0}$

31

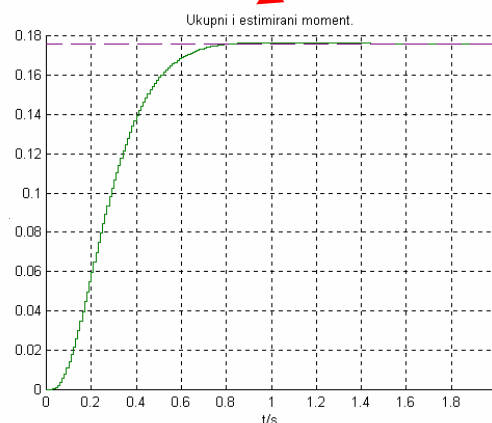
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – zanemaren utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve za $z=0.9$

Sporija estimacija momenta



Odziv momenata za $z=0.9$

32

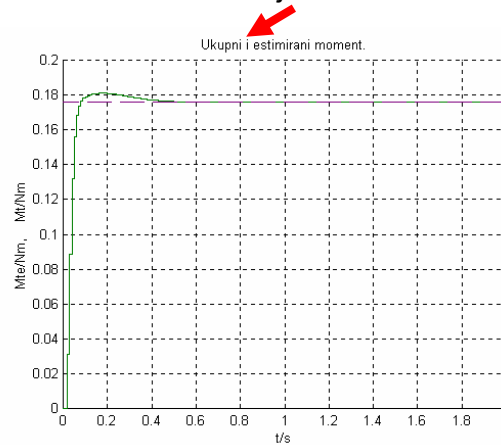
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – zanemaren
utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve za $z=0.3$

Brža estimacija momenta



Odziv momenata za $z=0.3$

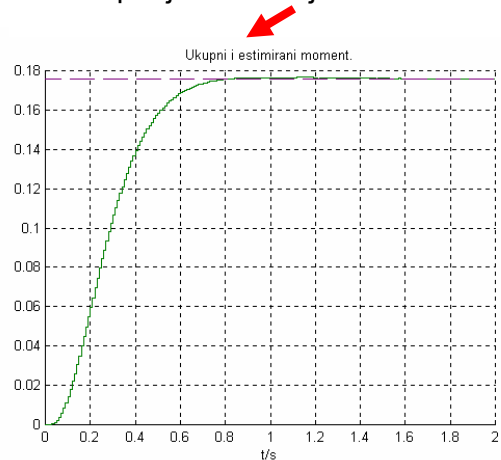
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen
utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve za $z=0.9$

Sporija estimacija momenta



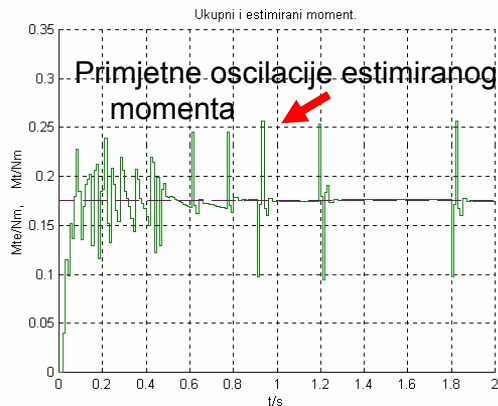
Odziv momenata za $z=0.9$

Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen
utjecaj A/D pretvornika:



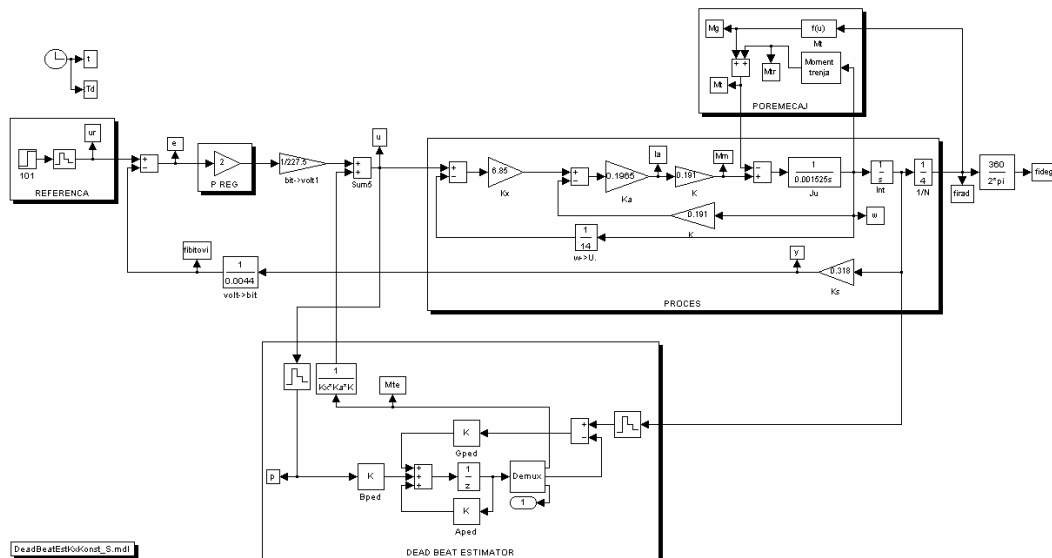
Odziv zakreta letve za $z=0.3$



Odziv momenata za $z=0.3$

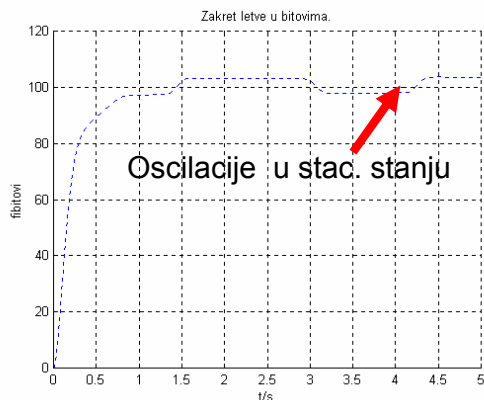
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje:



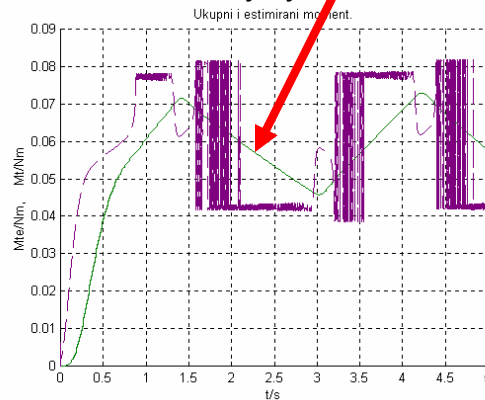
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje:



Odziv zakreta letve za $z=0.9$

Estimacija srednje vrijednosti uz kašnjenje



Odziv momenata za $z=0.9$

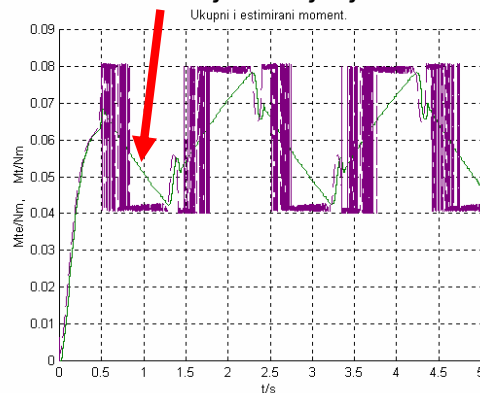
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje:



Odziv zakreta letve za $z=0.3$

Estimacija srednje vrijednosti uz manje kašnjenje

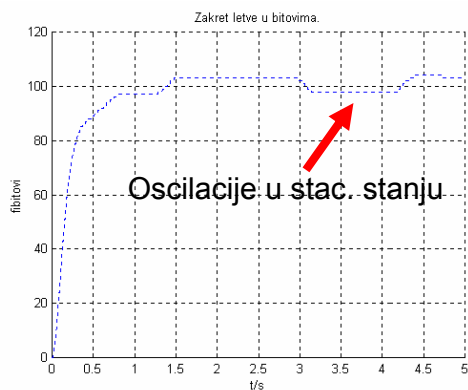


Odziv momenata za $z=0.3$

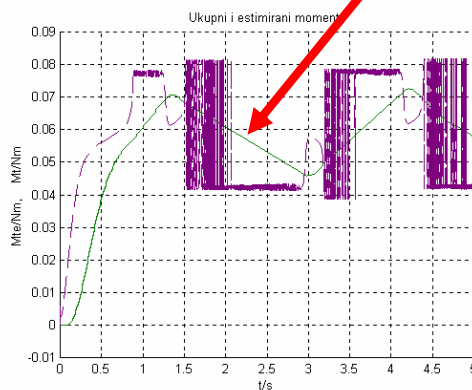
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje te utjecaj A/D pretvornika:

Estimacija srednje vrijednosti s primjetnim kašnjenjem



Odziv zakreta letve za $z=0.9$



Odziv momenata za $z=0.9$

39

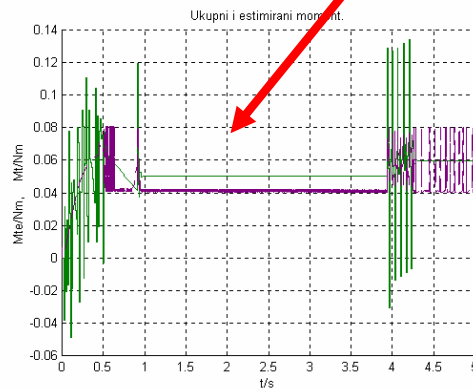
Projektiranje klasičnog estimatora momenta tereta

Simulacijski rezultati – uključen nelinearan teret i trenje te utjecaj A/D pretvornika:

Loša estimacija (praktično neupotrebljiva)



Odziv zakreta letve za $z=0.3$



Odziv momenata za $z=0.3$

40

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Polazna osnovica za projektiranje je model procesa

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_E \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_s \cdot U_{2b} \\ 0 & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_E \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J} & \frac{\alpha}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_t \\ Y_r \end{bmatrix}$$

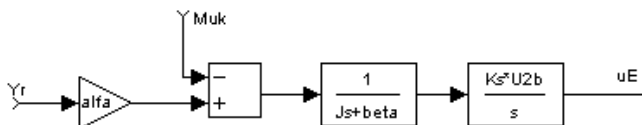
Iz njega se može dobiti blok-shema procesa

$$s u_E = K_s U_{2b} \omega \quad \Rightarrow \quad u_E = \frac{K_s U_{2b} \omega}{s}$$

$$s \omega = -\frac{\beta}{J} \omega - \frac{1}{J} M_t + \frac{\alpha}{J} Y_r \quad \Rightarrow \quad J s \omega = -\beta \omega - M_t + \alpha Y_r \quad \Rightarrow$$

$$J s \omega + \beta \omega = -M_t + \alpha Y_r \quad \Rightarrow \quad \omega (J s + \beta) = -M_t + \alpha Y_r \quad \Rightarrow$$

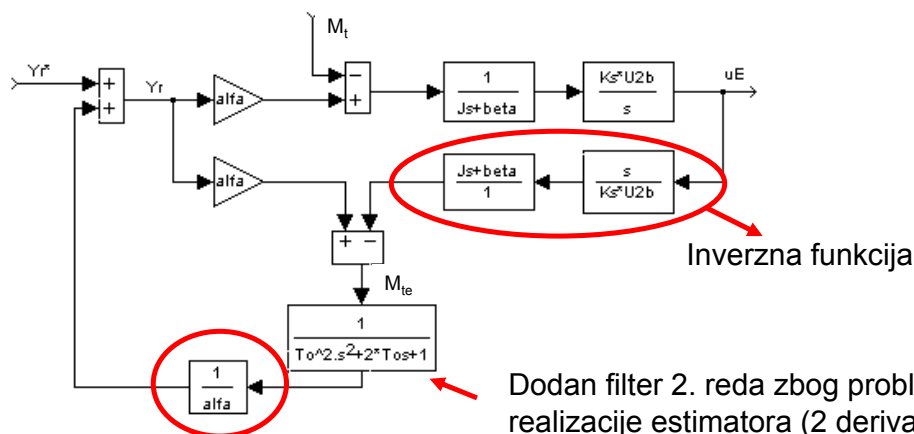
$$\omega = \frac{-M_t + \alpha Y_r}{J s + \beta}$$



41

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Na temelju dobivenog modela procesa formira se nadomjesna shema koja sadrži proces i estimator temeljen na inverznoj funkciji procesa



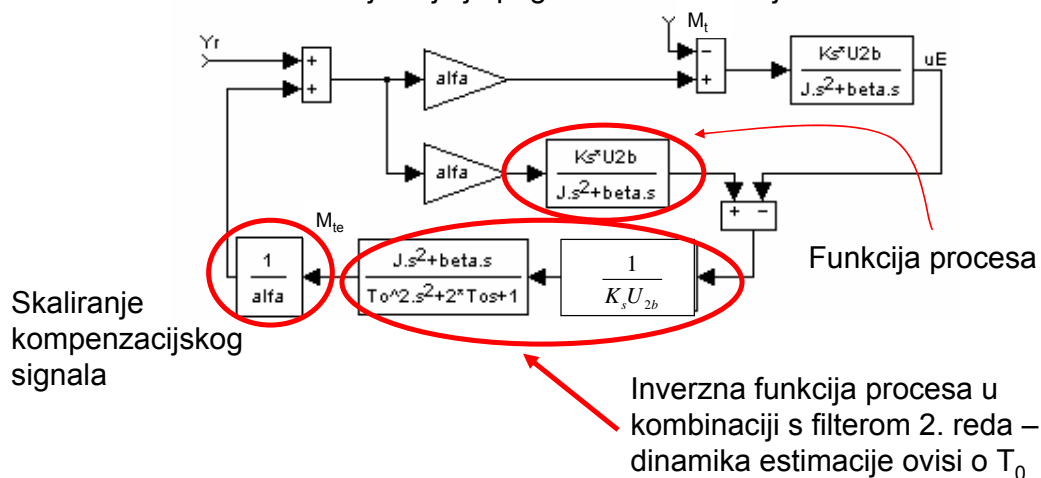
Skaliranje kompenzacijskog signala

Dodan filter 2. reda zbog problema realizacije estimatora (2 derivatora u inverznoj funkciji)

42

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Zbog problema realizacije estimatora (2 derivatora u inverznoj funkciji) radi se konačna transformacija koja je pogodna za realizaciju



43

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Želi se provjeriti utjecaj izbora vrijednosti vremenske konstante filtera T_0

Početni eksperiment: konstantni $M_t = M_{t0}$

- Provjerava se rad estimatora uz zanemarenje i uz uvažavanje utjecaja digitalizacije ulaza

Konačni eksperiment: djelovanje nelinearnog momenta tereta i momenta trenja

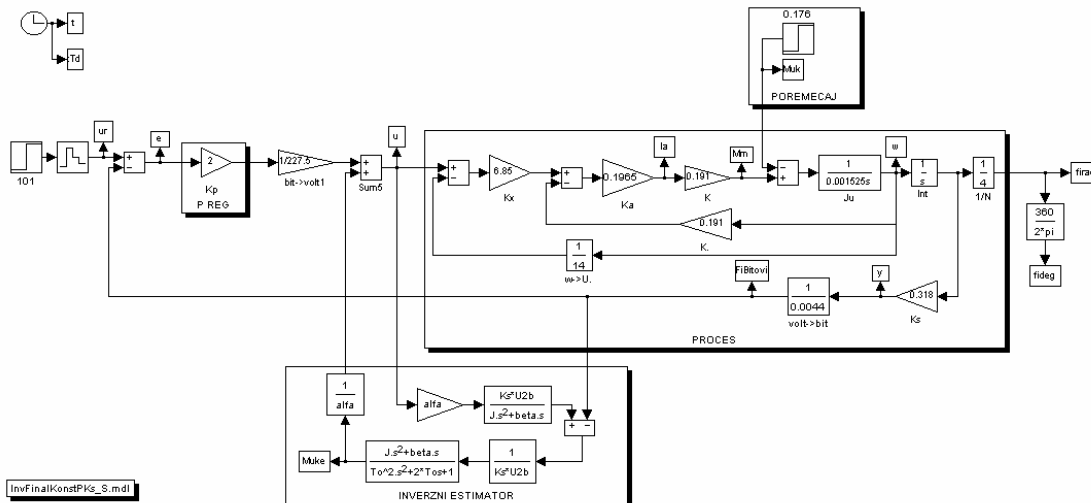
- Provjerava se rad estimatora uz zanemarenje i uz uvažavanje utjecaja digitalizacije ulaza

44



Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Simulacijska shema uz konstantni $M_t = M_{t0}$



45



Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Simulacijski rezultati – $M_t = M_{t0}$ i zanemaren utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve za $T_0=1ms$



Odziv momenata za $T_0=1ms$

46

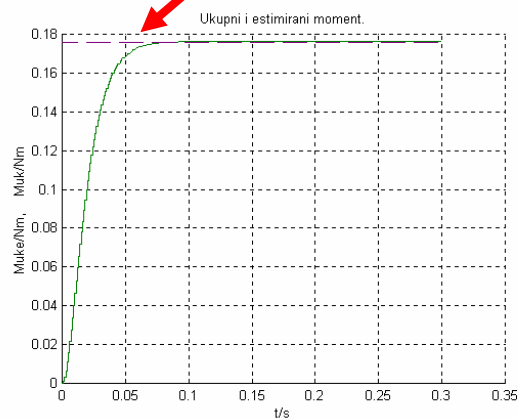
Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Simulacijski rezultati – $M_t = M_{t0}$ i zanemaren utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve za $T_0=10\text{ms}$

Malo sporija estimacija momenta



Odziv momenata za $T_0=10\text{ms}$

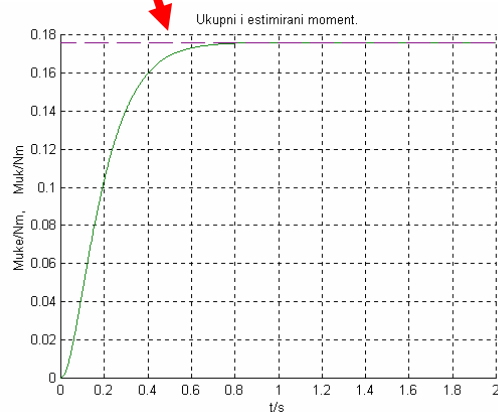
Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Simulacijski rezultati – $M_t = M_{t0}$ i zanemaren utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve za $T_0=100\text{ms}$

Još sporija estimacija momenta



Odziv momenata za $T_0=100\text{ms}$

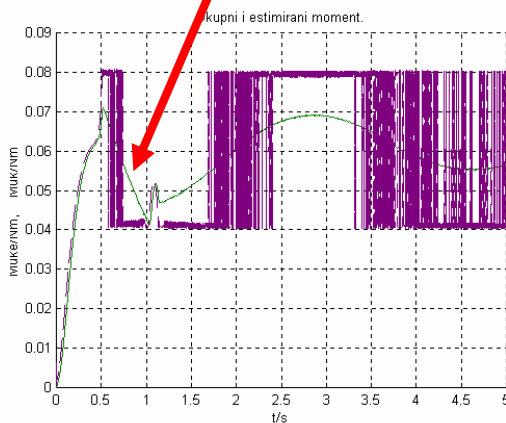
Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom inverzne funkcije procesa

Simulacijski rezultati – nelinearni tereti i zanemaren utjecaj A/D pretvornika:



Odziv zakreta letve za $T_0=10\text{ms}$

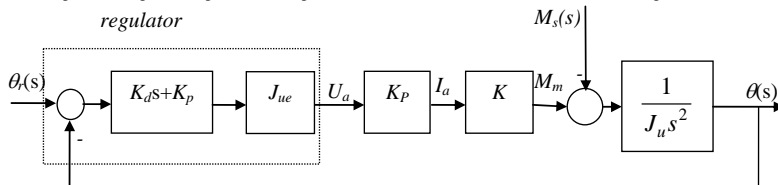
Estimacija srednje vrijednosti momenta



Odziv momenata za $T_0=10\text{ms}$

Projektiranje estimatora momenta tereta za slijedni sustav s PD regulatorom položaja

- PD regulacija položaja ima problema s prisutnošću pogreške u stacionarnom stanju uslijed djelovanja momenta sile teže i trenja



$$\Theta(s) = \frac{[J_{ue}(K_d K_p K)s + J_{ue} K_p K_p K] \Theta_r(s) - M_s(s)}{J_u s^2 + J_{ue} K_d K_p K s + J_{ue} K_p K_p K}$$

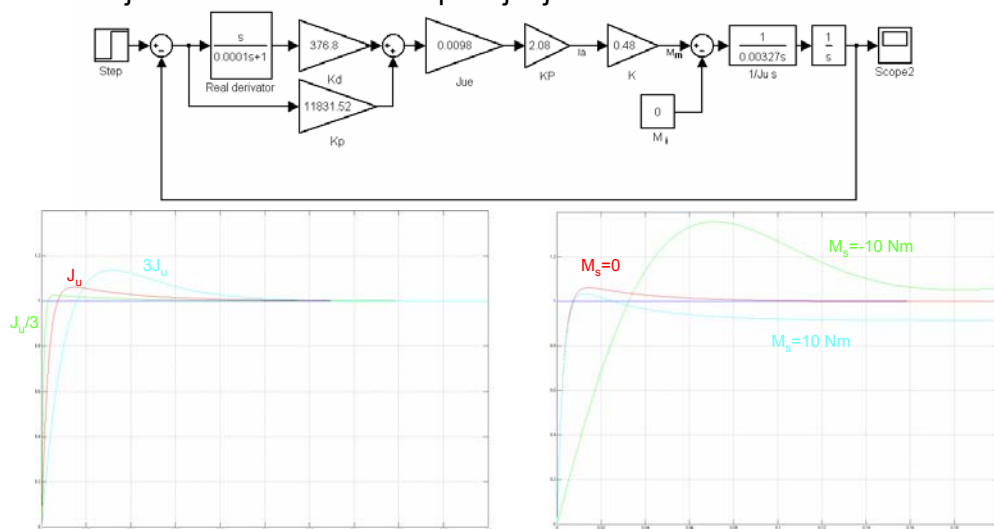
$$\omega_n = \sqrt{\frac{J_{ue} K_p K_p K}{J_u}} = \frac{1}{T} \quad \xi = \frac{K_d K_p K}{2} \sqrt{\frac{J_{ue}}{J_u K_p K_p K}}$$

$$E_\Theta(s) \Big|_{s \rightarrow 0} = \Theta_r(s) - \Theta(s) \Big|_{s \rightarrow 0} = \frac{M_s(s)}{J_{ue} K_p K_p K}$$

- Vrijednosti parametara sustava: $K=0.48 \text{ Vs}$, $R_a=0.66 \text{ } \Omega$, $L_a=1.8 \text{ mH}$, $J_u=0.0098 \text{ kgm}^2$, $B=0 \text{ kgms}^{-1}$. Uz uvjet $K_p K=1 \rightarrow K_p=2 \text{ kgm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$.
- Parametri regulatora uz $J_{ue}=J_u$ za $T=0.1 \text{ s}$ i $\xi=1$: $K_p=11831.5 \text{ s}^{-2}$, $K_d=376.8 \text{ s}^{-1}$.

Projektiranje estimatora momenta tereta za slijedni sustav s PD regulatorom položaja

- Simulacijski model sustava za upravljanje momentom izrađen u MATLAB-u



Odziv položaja pri upravljanju momentom na skokovitu promjenu reference uz različite momente inercije motora

Odziv sustava regulacije položaja pri upravljanju momentom na skokovitu promjenu reference uz J_u i različite momente tereta

51

Projektiranje estimatora momenta tereta za slijedni sustav s PD regulatorom položaja

- Matrična jednadžba sustava:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_u} & \frac{K_p K}{J_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_s \\ Y_R \end{bmatrix}$$

- Matrična jednadžba sustava:

$$\begin{bmatrix} \dot{M}_s \\ \dot{Y} \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{J_u} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_s \\ Y \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_p K}{J_u} \end{bmatrix} Y_R$$

$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{J_u} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{pek}} \quad \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_p K}{J_u} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{pek}}$

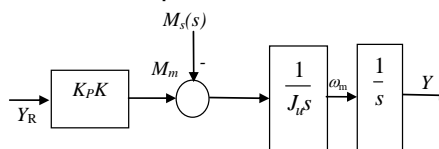
$$\theta = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_{pek}} \begin{bmatrix} M_s \\ Y \\ \omega_m \end{bmatrix}$$

- Model procesa iz matrične jednadžbe sustava:

$$sY = \omega_m \Rightarrow \omega_m = \frac{Y}{s}$$

$$s\omega_m = -\frac{1}{J_u}M_s + \frac{K_p K}{J_u}Y_R \Rightarrow \omega_m = \frac{(K_p K Y_R - M_s)}{J_u s}$$

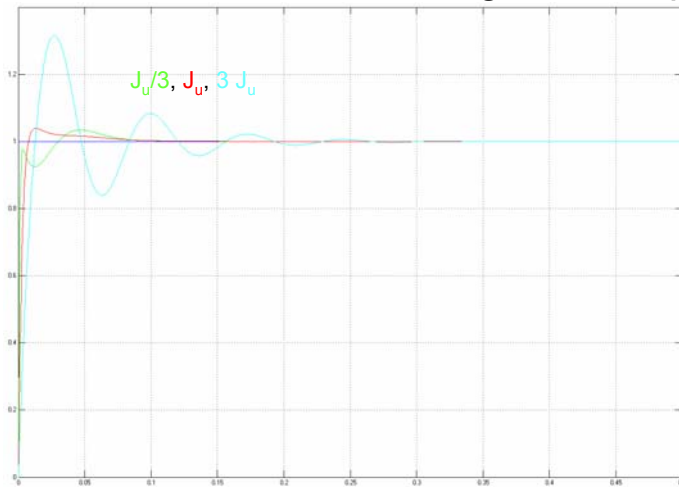
- Blok shema procesa:



- Projektiranje klasičnog, dead-beat i estimatora momenta tereta na osnovi inverzne funkcije procesa

52

Projektiranje estimatora momenta tereta za slijedni sustav s PD regulatorom položaja



Vide se jače oscilacije u odzivima iako je sustav projektiran da budu manje → potvrda da postoji utjecaj dinamike estimatora na dinamiku sustava

Odziv položaja pri upravljanju momentom na skokovitu promjenu reference uz različite momente inercije i prisutan estimator.

55

Projektiranje estimatora momenta tereta za slijedni sustav s PD regulatorom položaja

- Analiza dinamike sustava s estimatorom momenta tereta
- Vrijednost estimiranog momenta može se izračunati:

$$\left. \begin{aligned} Y &= (M_m - M_s) \frac{1}{J_u s^2} \\ M^* &= Y J_u^* s^2 = (M_m - M_s) J_u^* s^2 \\ M_e &= (M^* - M_m) \frac{1}{T_0^2 s^2 + T_0 s + 1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow M_e = \left(M_m \frac{J_u^* - J_u}{J_u} + M_s \frac{J_u^*}{J_u} \right) \frac{1}{T_0^2 s^2 + T_0 s + 1}$$

gdje je: J_u^* - vrijednost momenta inercije koja je uzeta kod projektiranja estimatora
 M^* - interna vrijednost momenta estimatora dobivena obradom izlaznog signala Y

- Vidi se da
 - uz $J_u = J_u^*$, nakon prijelazne pojave određene filtrom, estimirani moment iznosi $M_e = M_s$
 - uz $J_u \neq J_u^*$ kod mirovanja motora ($M_m = M_s$) estimirani moment također iznosi $M_e = M_s$
 - se opisanim estimatorom momenta u potpunosti otklanja statička pogreška uslijed vanjskog momenta smetnji M_s bez obzira na stvarnu vrijednosti J_u .

56

Projektiranje estimatora momenta tereta za slijedni sustav s PD regulatorom položaja

- Korigirani izlaz iz PD regulatora: $U_R = Y_R + Y_R^* = Y_R + \frac{1}{KK_P} M_e$
- Uvrštavanjem izraza za M_e dobije se:

$$U_R = Y_R + \frac{1}{KK_P} \left[\left(M_m \frac{J_u^* - J_u}{J_u} + M_s \frac{J_u^*}{J_u} \right) \frac{1}{T_0^2 s^2 + T_0 s + 1} \right]$$

Kako bi se pojednostavnili izrazi i vidio utjecaj samog estimatora na ponašanje sustava, zanemarit će se utjecaj filtra ugrađenog u estimator momenta ($T_0 \ll$):

$$U_R = Y_R + \frac{1}{KK_P} \left[\left(\frac{M_m}{KK_P U_R} \frac{J_u^* - J_u}{J_u} + M_s \frac{J_u^*}{J_u} \right) \right] \Rightarrow U_R = \frac{J_u}{2J_u - J_u^*} Y_R + \frac{J_u^*}{2J_u - J_u^*} \frac{1}{KK_P} M_s$$

Vidi se da je uz $J_u = J_u^*$ ulazni napon u sustav jednak $U_R = Y_R + \frac{1}{KK_P} M_s$ što znači da estimator momenta uspješno estimira poremećajnu veličinu M_s

Ovisnost izlaza bez estimatora: $\rightarrow Y = \frac{KK_P U_R - M_s}{J_u s^2}$ dodavanje estimatora $\rightarrow Y = \frac{KK_P Y_R - M_s \frac{2J_u^* - 2J_u}{J_u}}{(2J_u - J_u^*) s^2}$

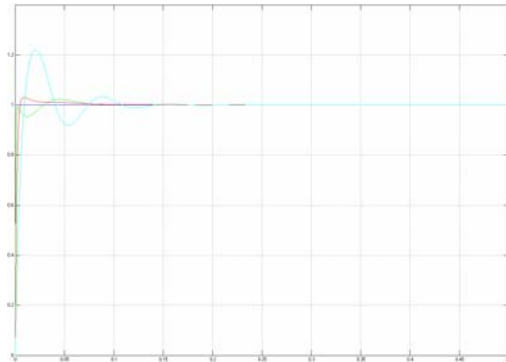
57
promjena prijenosne funkcije sustava

Projektiranje estimatora momenta tereta za slijedni sustav s PD regulatorom položaja

- Izraz pokazuje da je estimator momenta uzrokovao promjenu dinamike sustava:

$$\xi = \frac{K_d K_P K}{2} \sqrt{\frac{J_{ue}}{(2J_u - J_u^*) K_P K_P K}} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{J_{ue} K_P K_P K}{(2J_u - J_u^*)}}$$

Uz $J_u^* = J_{ue}$ dobivaju se sljedeći parametri PD regulatora: $K_p = 19719.2$ i $K_d = 628$.



Smanjene su oscilacije

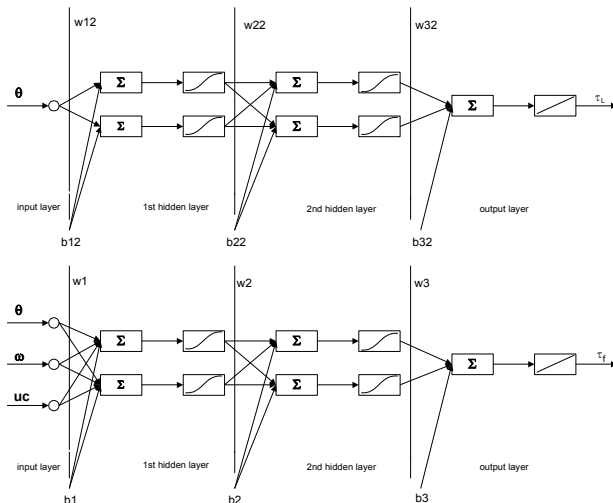
Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom neuronskih mreža

- Neuronske mreže – univerzalni nelinearni aproksimatori
- Pokušaj estimiranja momenta tereta s jednom neuronskom mrežom nije bio uspješan → Estimiranje momenta tereta s dvije neuronske mreže:
 - Estimator nelinearnog momenta sile teže - neuronska mreža s jednim ulazom i izlazom (položaj osovine je ulaz)
 - Estimator trenja - neuronska mreža s više ulaza i jednim izlazom (položaj osovine, brzina vrtnje i izlaz iz regulatora su ulazi)
- Standardna implementacija neuronskih mreža → najbolji rezultati dobiveni su s unaprijednim statičkim neuronskim mrežama
- Treniranje mreža pomoću Levenberg-Marquardtovog algoritma.
- Podaci za treniranje neuronskog estimatora trenja dobiveni su iz simulacijskog modela zasnovanog na prilično dobro identificiranim parametrima modela trenja: $M_{ts} = 0.02 \text{ Nm}$, $M_{td} = 0.002 \text{ Nm}$, $M_{tv} = 1.3825 \cdot 10^{-4} \text{ Nms}$, $\varepsilon = 0.01 \text{ s}^{-1}$

59

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom neuronskih mreža

Četveroslojne unaprijedne statičke neuronske mreže

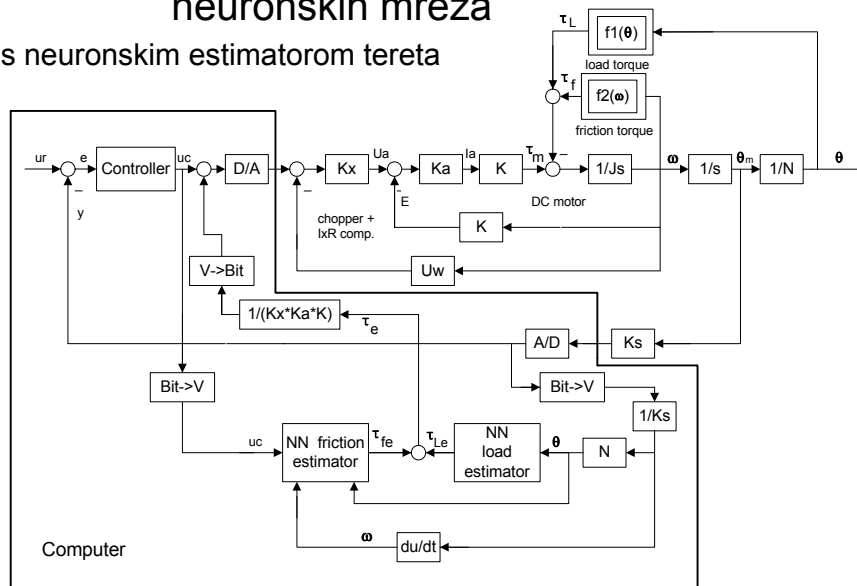


- Koriste se standardne sigmoidalne aktivacijske funkcije u dva skrivena sloja i linearna aktivacijska funkcija u izlaznom sloju
- Izlazi iz neuronskih mreža se zbrajaju i skaliraju kako bi se dobio potreban kompenzacijski signal
- Problem skaliranja – koristi se fiksni koeficijent normiranja (inverz pojačanja u procesu), a u stvarnosti se to pojačanje mijenja (glavni utjecaj ima promjenljivo pojačanje pojačala snage)

60

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom neuronskih mreža

Strukturalna shema s neuronskim estimatorom tereta



61

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom neuronskih mreža

Uz proizvoljno odabrane početne uvjete dobiveni su sljedeći parametri neuronskih mreža:

- Parametri neuronskog estimatora momenta trenja

$$w_1 = \begin{bmatrix} 0.0006 & -0.0004 & 0.0003 \\ 0.0317 & 7.4608 & -0.1882 \end{bmatrix} \quad b_1 = \begin{bmatrix} -0.7963 \\ 0.0022 \end{bmatrix}$$

$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.3646 & 0.0128 \\ -0.3449 & 155.8744 \end{bmatrix} \quad b_2 = \begin{bmatrix} 0.3828 \\ 0.3160 \end{bmatrix}$$

$$w_3 = [-1.3684 \quad 0.0195] \quad b_3 = [0.1924]$$

- Parametri neuronskog estimatora momenta tereta

$$w_1 = \begin{bmatrix} 0.4449 \\ 0.2194 \end{bmatrix} \quad b_1 = \begin{bmatrix} -1.6097 \\ 0.6571 \end{bmatrix}$$

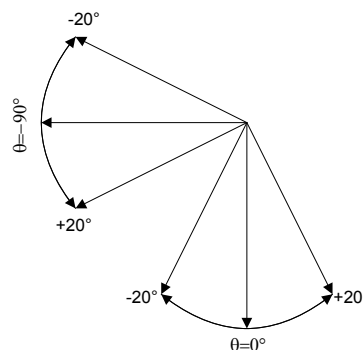
$$w_2 = \begin{bmatrix} 0.5731 & 0.8155 \\ 0.1044 & 2.1488 \end{bmatrix} \quad b_2 = \begin{bmatrix} 0.0374 \\ -1.5222 \end{bmatrix}$$

$$w_3 = [-2.2087 \quad 1.8735] \quad b_3 = [0.632]$$

Parametri referentnog modela su:

$$\sigma_m = 0.5 \%, \quad t_m = 0.6 \text{ s}$$

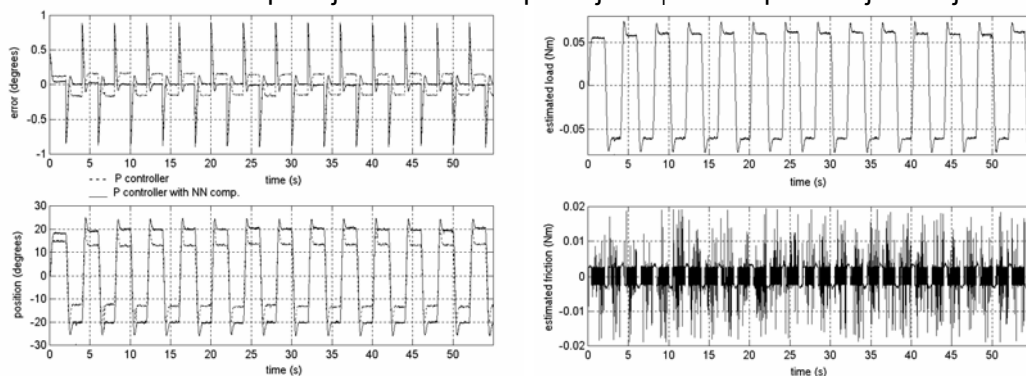
Radne točke eksperimenta:



62

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom neuronskih mreža

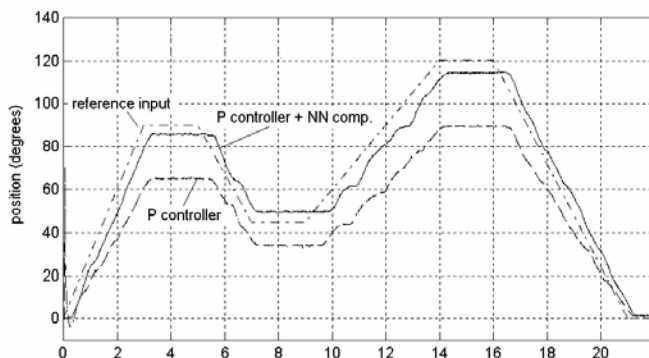
- Simulacijski rezultati – P regulacija položaja poluge s utegom
- Sinteza pojačanja P regulatora prema zahtjevu na kvalitetu odziva: $K_p = 1.5 \text{ V/V}$.
- Testiranje sustava sa P regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom – kompenzatorom momenta tereta
 - Niz skokovitih promjena reference pozicije $\Delta\theta_r = \pm 20^\circ$ u početnoj radnoj točki $\theta_0 = 0^\circ$



63

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom neuronskih mreža

- Simulacijski rezultati – P regulacija položaja poluge s utegom
- Testiranje sustava s P regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom – kompenzatorom momenta tereta
 - Niz od četiri uzastopne promjene reference pozicije po rampi amplituda od 0° do 120° krenuvši i završivši u radnoj točki $\theta_0 = 0^\circ$

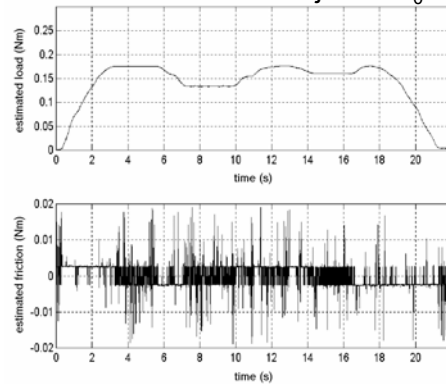


Očigledno poboljšanje odziva uz napomenu da neuronska mreža ne kompenzira u potpunosti statičku pogrešku u onim radnim područjima koja nisu bila pokrivena tijekom procesa treniranja mreže

64

Projektiranje estimatora momenta tereta primjenom neuronskih mreža

- Simulacijski rezultati – P regulacija položaja poluge s utegom
- Testiranje sustava s P regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom – kompenzatorom momenta tereta
 - Niz od četiri uzastopne promjene reference pozicije po rampi amplituda od 0° do 120° krenuvši i završivši u radnoj točki $\theta_0=0^\circ$

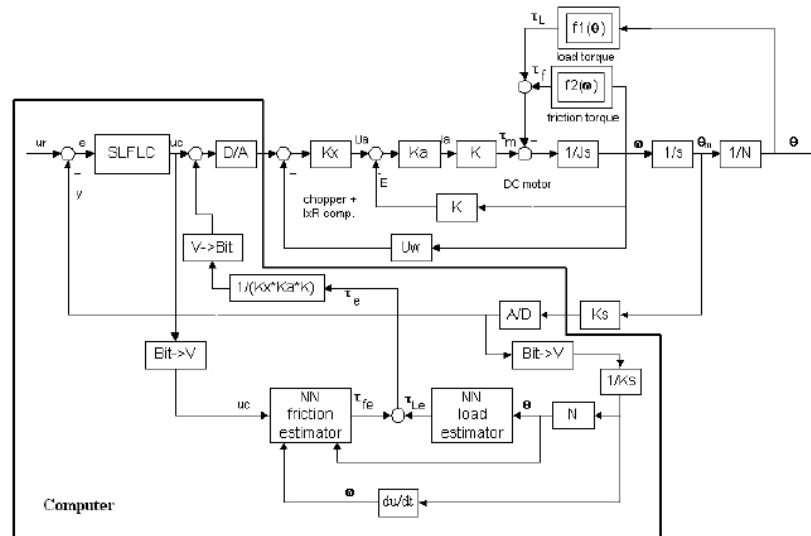


Može se primijetiti da je puno bolje estimiranje nelinearnih komponenti momenta tereta što nije bilo moguće postići s klasičnim estimatorima

65

Regulacija pomoću samoučećeg neizrazitog regulatora (SNR-a) i neuronskog estimatora momenta tereta

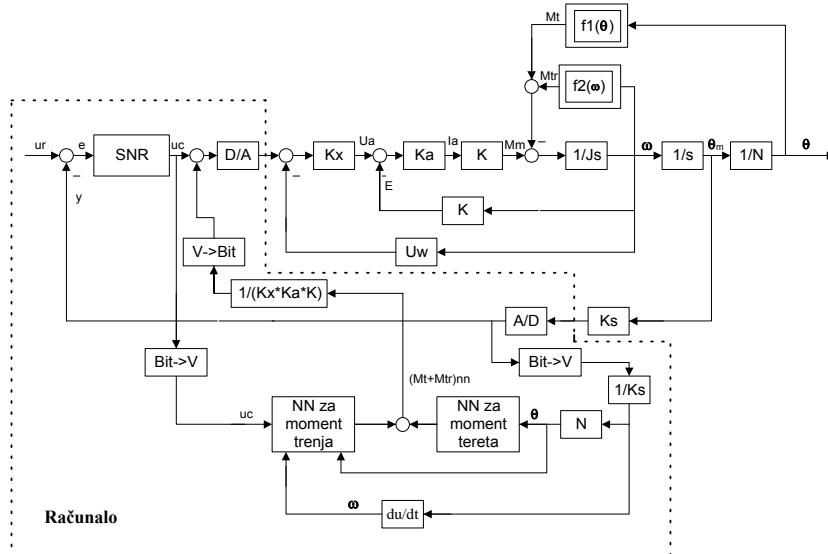
- SNR (engl. SLFLC) regulacija položaja poluge s utegom
- Testiranje rada sustava sa SNR regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom – kompenzatorom momenta tereta → estimacija trenja i momenta sile teže



66

Regulacija pomoću samoučećeg neizrazitog regulatora (SNR-a) i neuronskog estimatora momenta tereta

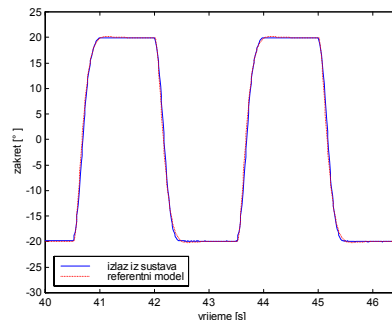
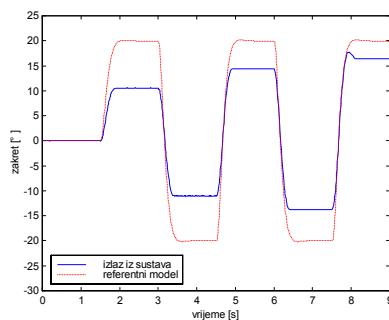
- SNR (engl. SLFLC) regulacija položaja poluge s utegom
- Testiranje rada sustava sa SNR regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom – kompenzatorom momenta tereta → estimacija trenja i momenta sile teže



67

Regulacija pomoću samoučećeg neizrazitog regulatora (SNR-a) i neuronskog estimatora momenta tereta

- Simulacijski rezultati – P + SNR regulacija položaja poluge s utegom
- Pojačanje P regulatora: $K_p = 1.5 \text{ V/V}$.
- Testiranje sustava sa P+SNR regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom
- Niz skokovitih promjena reference pozicije $\Delta\theta_r = \pm 20^\circ$ u početnoj radnoj točki $\theta_0 = 0^\circ$

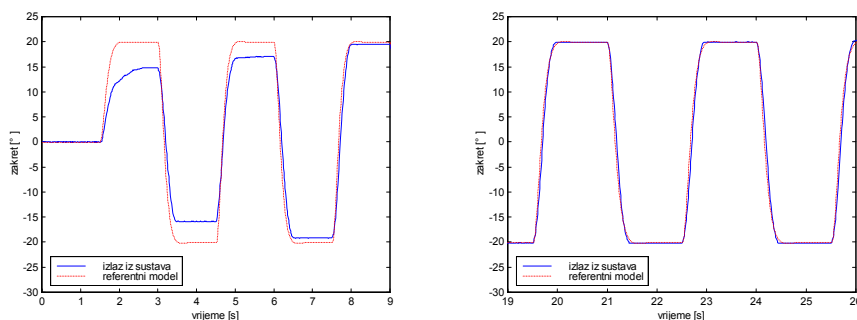


Odzivi položaja bez neuronskog kompenzatora momenta tereta: početak učenja (lijevo), kraj učenja (desno) – trajanje učenja 13 iteracija

68

Regulacija pomoću samoučećeg neizrazitog regulatora (SNR-a) i neuronskog estimatora momenta tereta

- Simulacijski rezultati – P + SNR regulacija položaja poluge s utegom
- Pojačanje P regulatora: $K_p = 1.5 \text{ V/V}$.
- Testiranje sustava sa P+SNR regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom
- Niz skokovitih promjena reference pozicije $\Delta\theta_r = \pm 20^\circ$ u početnoj radnoj točki $\theta_0 = 0^\circ$

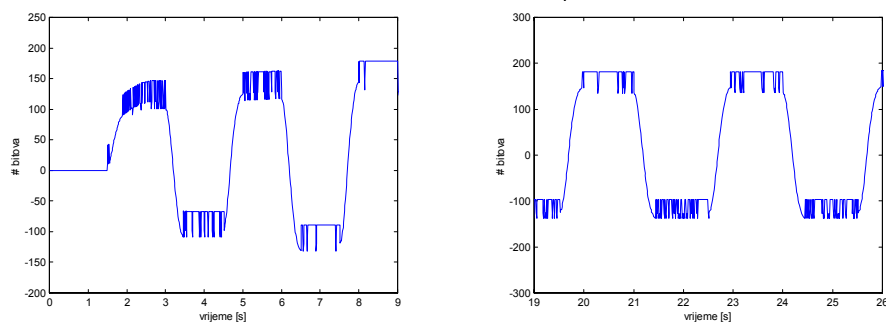


Odzivi položaja s neuronskim kompenzatorom momenta tereta: početak učenja (lijevo), kraj učenja (desno) – trajanje učenja svega 6 iteracija → **znatno ubrzanje konvergencije**

69

Regulacija pomoću samoučećeg neizrazitog regulatora (SNR-a) i neuronskog estimatora momenta tereta

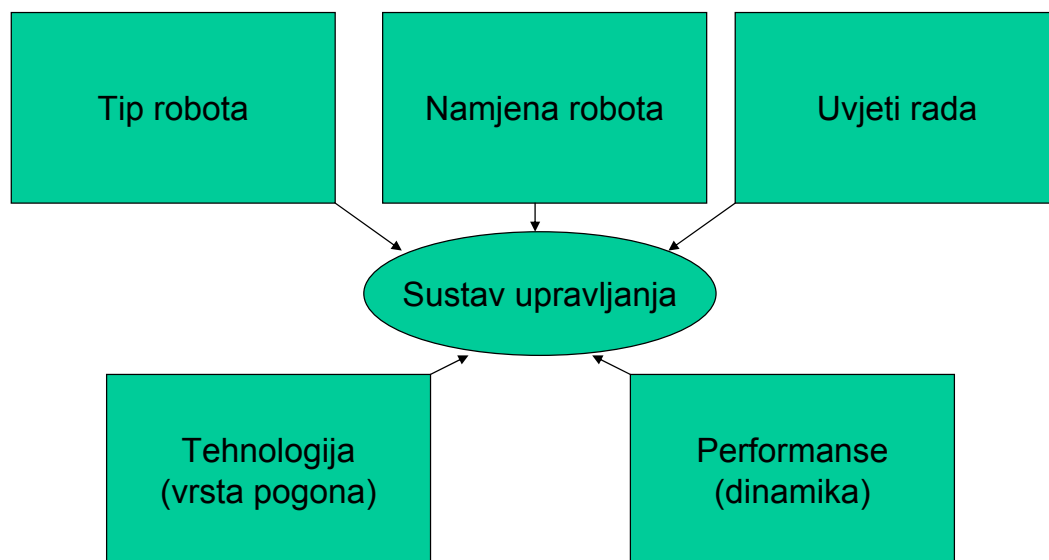
- Simulacijski rezultati – P + SNR regulacija položaja poluge s utegom
- Pojačanje P regulatora: $K_p = 1.5 \text{ V/V}$.
- Testiranje sustava sa P+SNR regulatorom i bez/sa neuronskim estimatorom
- Niz skokovitih promjena reference pozicije $\Delta\theta_r = \pm 20^\circ$ u početnoj radnoj točki $\theta_0 = 0^\circ$



Odzivi izlaza iz neuronskih kompenzatora momenta tereta: početak učenja (lijevo), kraj učenja (desno)

70

Metode upravljanja zglobovima robota



71

Pregled metoda upravljanja robotskim sustavima

- Linearni regulatori – najčešća je kaskadna regulacija
 - brzinski (statički) sustavi upravljanja → struja (moment), brzina (vrtnje)
 - pozicijski (astatički)* sustavi upravljanja → položaj (pozicija), sila dodira
- *Astatički sustav – sustav koji sadrži integralni član
- Nelinearni regulatori – adaptivni, robusni, optimalni, inteligentni, hibridni

72

UPRAVLJANJE ŠESTERONOŽNIM HODAJUĆIM ROBOTOM POMOĆU GA

- Problem: Upravljanje sekvencama hodanja šesteronožnog hodajućeg robota (Hexapod)
- Opis robota
- Opis sekvenci hoda
- Opis cikličkog genetičkog algoritma
- Eksperimentalni rezultati

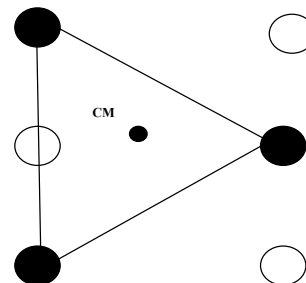
73

Šesteronožni mobilni robot



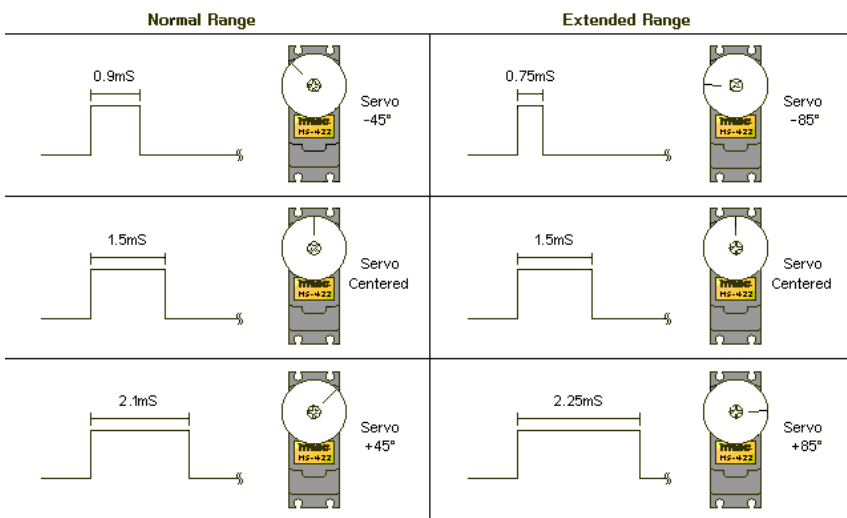
12 servo motora -
2 po svakoj nozi

Statička stabilnost – Centar mase (CM) robota mora uvijek biti unutar potpornog trokuta – 3 spuštene noge



74

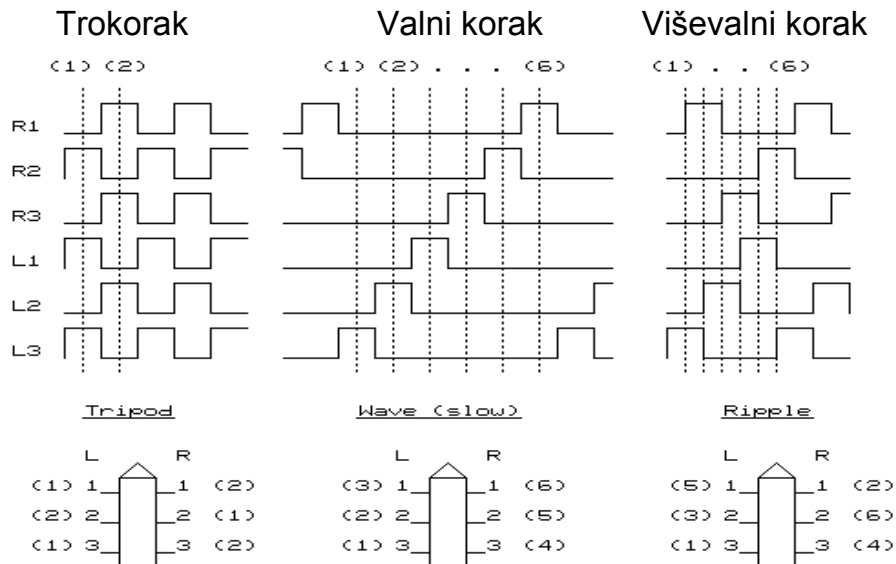
Upravljanje servo motorima



Interne povratne veze po poziciji i brzini – upravljanje u otvorenoj petlji



Koreografija koraka



Definicija hodanja

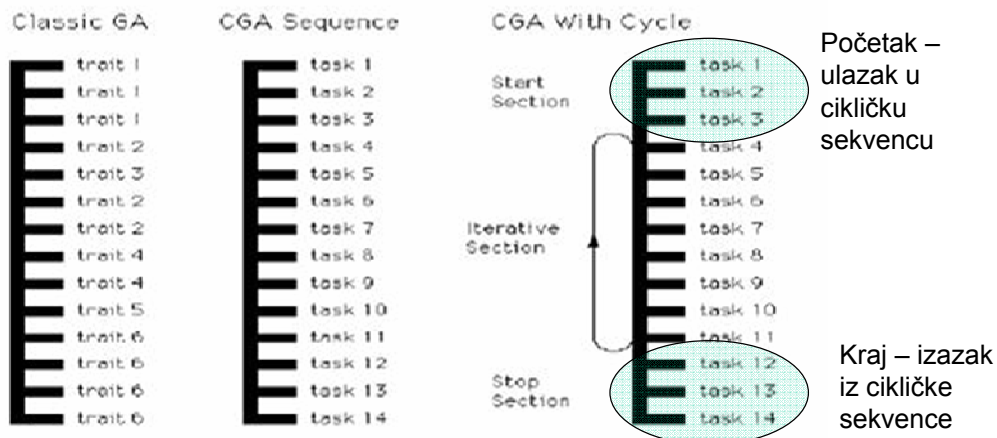
- Hodanje je niz sekvencijalnih pokreta nogu koji se ponavljaju
- U hodu može doći do promjene parametara robota (uključujući kvar noge)
- Sustav upravljanja adaptacijom svojih parametara mora osigurati normalno funkcioniranje robota
- Moguća je i kombinacija različitih tipova hodanja

Genetički algoritmi (GA)

- Iterativni nelinearni optimizacijski algoritmi s osiguranom konvergencijom prema globalnom optimumu
- Obilježja GA:
 - Slučajan izbor jedinki početne populacije
 - Slučajna selekcija jedinki za križanje
 - Križanje selektiranih jedinki iz populacije (elitizam)
 - Mutacije jedinki iz populacije (slučajan proces) s ciljem osvježavanja genetskog materijala
 - Definicija funkcije kazne (kriterija optimalnosti)
- Klasični GA nisu pogodni za optimiranje parametara cikličkih procesa

Ciklički genetički algoritam (CGA)

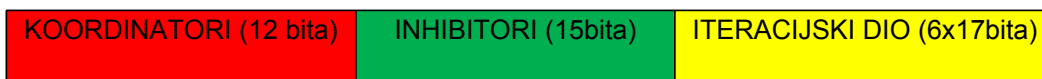
- Modificirana verzija osnovnog GA (Parker, 1994)
- Geni CGA predstavljaju radnje koje se trebaju obavljati ciklički u vremenu



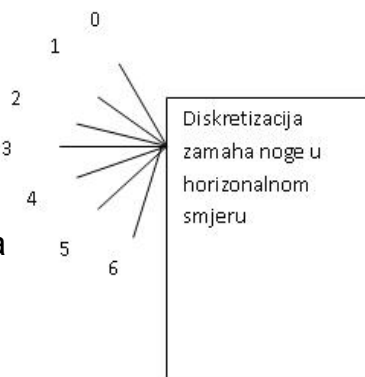
79

Struktura kromosoma

- Prototip kromozoma za upravljanje šesteronožnim robotom širine 129 bita sastoji se od tri dijela:



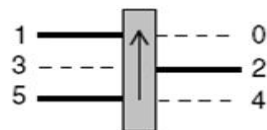
Jednostavan model robota za učenje hodanja → diskretizacija na 7 različitih stanja pomaka (zamaha) nogu



80

Značenje stanja diskretizacije zamaha

- Brojevi 0 i 6 označavaju krajnje položaje nogu
 - U horizontalnom smjeru broj 0 označava krajnji položaj noge ispružene prema naprijed, a broj 6 noge ispružene unatrag.
 - Kod vertikalnog gibanja noge broj 0 označava nogu spuštenu na tlo, a broj 6 nogu maksimalno podignutu.
- Matrični prikaz modela robota:
 - Dva stupca predstavljaju položaj nogu u vertikalnom i horizontalnom smjeru.
 - Retci predstavljaju pojedine noge.



	V	H
0	0	3
1	0	3
2	0	3
3	0	3
4	0	3
5	0	3

Robot stoji uspravno sa svim nogama na podu

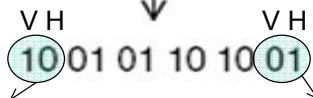
81

Promjene stanja modela robota (kodiranje naredbi)

- Stanje modela robota mijenja se čitanjem naredbi koje se nalaze u iteracijskom dijelu kromozoma
- Iteracijski dio sadrži 6 naredbi, tzv. aktivacija koje određuju smjer pomicanja nogu robota
- gen kromozoma predstavlja set naredbi za pojedini aktuator robota

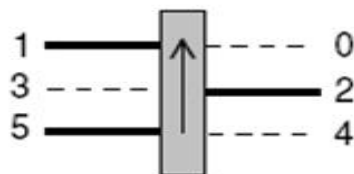
Activation: 100101101001

Aktivacija za 1 korak u tronožnom koraku



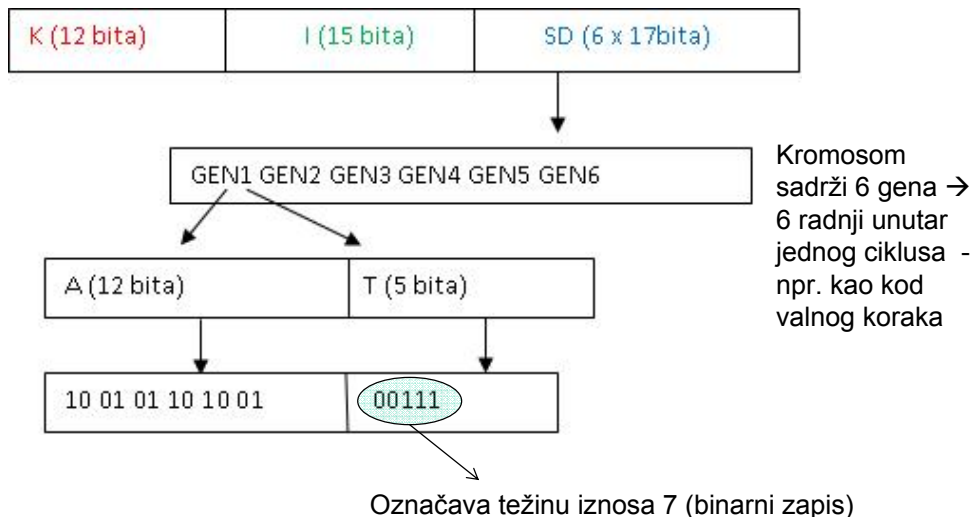
1. noga:
motor 1; V=1 (prema gore)
motor 2; H=0 (prema naprijed)

6. noga:
motor 1; V=0 (prema dolje)
motor 2; H=1 (prema natrag)



Struktura kromozoma

Cilj: Svaka noga može poprimiti 7 položaja u V i H smjeru



83

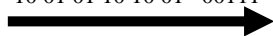
Iterativni dio strukture kromozoma

Primjer: Neka je početno stanje robota:

$$\begin{bmatrix} 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$$

Neka je zadana slijedeća aktivacija:

10 01 01 10 10 01 00111



Npr. digni prvu nogu gore i naprijed za 7 stanja – realno noga ide gore iz 0 u 6, i naprijed iz 3 u 0, jer su 6 i 0 krajnja stanja ($s_H=7>6 \rightarrow s_H=6$, $s_H=-4<0 \rightarrow s_H=0$; isto je i za s_V)

Tada je novo stanje robota:

$$\begin{bmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 6 \\ 0 & 6 \\ 6 & 0 \\ 6 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix}$$

84

Inhibicijski dio strukture kromozoma

- Aktivacija prvo prolazi kroz filter sastavljen od **inhibitora** i **koordinatora**, te se nakon toga koristi u izračunavanju novog stanja robota
- Inhibitori djeluju na parove nogu tako što spriječavaju određeni par nogu da se istovremeno pomiče unatrag
- Kod svakog para nogu na koji inhibitor djeluje, noga koja ima manji indeks ima prednost pred nogom s većim indeksom → Npr. inhibitor djeluje na noge 1 i 4, što znači da će se noga 1 smjeti pomaknuti unatrag dok se noga 4 neće

Rastav inhibitora (definira odnos nogu prema drugim nogama)

0 prema 1-5	1 prema 2-5	2 prema 3-5	3 prema 4-5	4 prema 5
0 0 0 1 1	1 1 0 0	0 0 0	1 0	0

Primjer: Primjena gornjeg inhibitora 00011 1100 000 10 0 na aktivaciju oblika 10 01 01 10 10 01 rezultira novom aktivacijom 10 01 00 10 10 01

Neka se noge 1 i 2 miču se unatrag

Noge 2 i 3 ne smiju se micati unatrag

85

Koordinacijski dio strukture kromozoma

- Nakon inhibitora na aktivaciju djeluju **koordinatori**
- Koordinatori se (poput aktivacije) mogu gledati kao 6 parova po 2 bita
- Svaki od 6 parova koordinira pokret određene noge:
 - Prvi bit u svakom paru naziva se *dolje – nazad* koordinador → ako je 1, osigurava da se noga pomiče dolje, ako kreće prema nazad.
 - Drugi bit u svakom od parova naziva se *naprijed – gore* koordinador → ako je iznosa 1, osigurava da se noga pomiče prema naprijed, ako kreće prema gore.

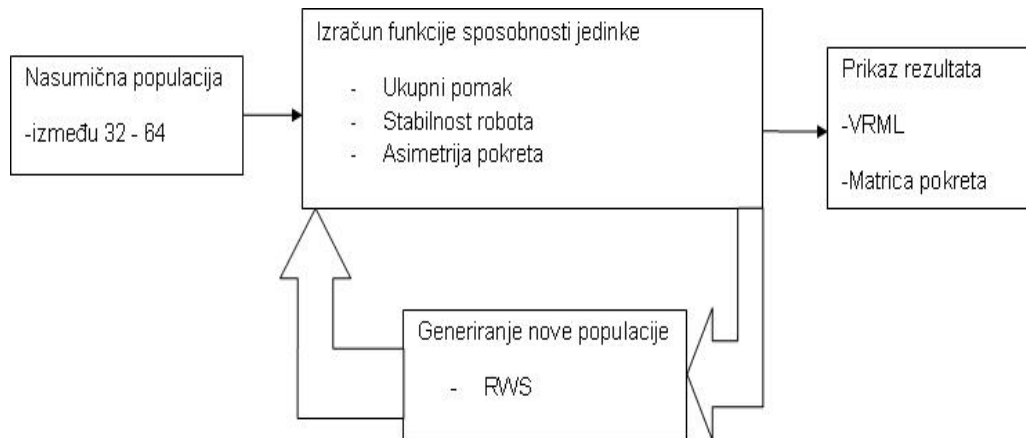
Primjer: Primjena koordinatora 01 00 11 01 11 11 na dobivenu aktivaciju 10 01 00 10 10 01 rezultira konačnom aktivacijom 10 01 00 10 10 01

Bitovi aktivacije su već bili dobro posloženi pa nije došlo do nikakve promjene aktivacije

Djelovanje koordinatora može se opisati s dva pravila:

- Ako je 1. bit koordinatora 1 i 2. bit aktivacije 1, onda je 1. bit aktivacije 0
- Ako je 2. bit koordinatora 1 i 1. bit aktivacije 1, onda je 2. bit aktivacije 0

Osnovni koncept implementacije CGA



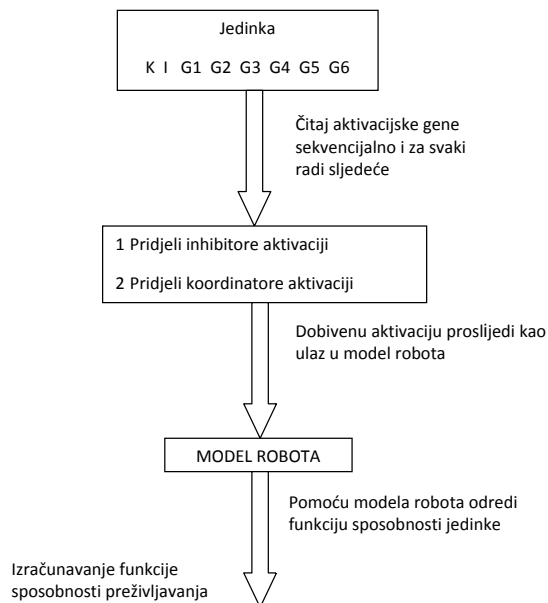
87

Određivanje funkcije sposobnosti jedinki

- Svaka jedinka (kromosom) sadrži 6 naredbenih gena.
- Aktivaciji sadržanoj u genu pridodjeljuju se inhibitori i koordinatori specifični za svaku jedinku.
- Zatim se aktivacija šalje kao ulaz u model robota.
- Pomoću modela robota moguće je odrediti funkciju sposobnosti preživljavanja (engl. fitness function):
 - Prvo se na model robota primjenjuje dio aktivacije zadužen za vertikalnu komponentu → Iz odziva modela može se vidjeti koje se noge nalaze na zemlji i shodno tome odrediti stabilnost robota.
 - Nakon određivanja stabilnosti, na model robota primjenjuje se dio aktivacije vezan uz horizontalnu komponentu → Iz odziva modela može se izračunati pomak lijeve i desne strane robota, te da li postoji asimetrija u gibanju između lijeve i desne strane robota.
- Nakon izračunavanja stabilnosti i pomaka robota, pristupa se određivanju fitness funkcije pojedinog gena → funkcija sposobnosti preživljavanja jedinke jednaka je zbroju funkcija sposobnosti preživljavanja svih njezinih gena.

88

Izvedba CGA



89

Izvedba CGA (nastavak)

Određivanje funkcije sposobnosti preživljavanja jedinice:

1. Primjeni vertikalni dio aktivacije na model robota
2. Odredi stabilnost robota – *Stabilnost_fit*
3. Primjeni horizontalni dio aktivacije na model robota
4. Izračunaj pomak prema naprijed svake strane robota – P_L_S i P_D_S
5. Odredi asimetriju pomaka – *Asimetrija pomaka*

Funkcija sposobnosti preživljavanja gena F_gena iznosi:

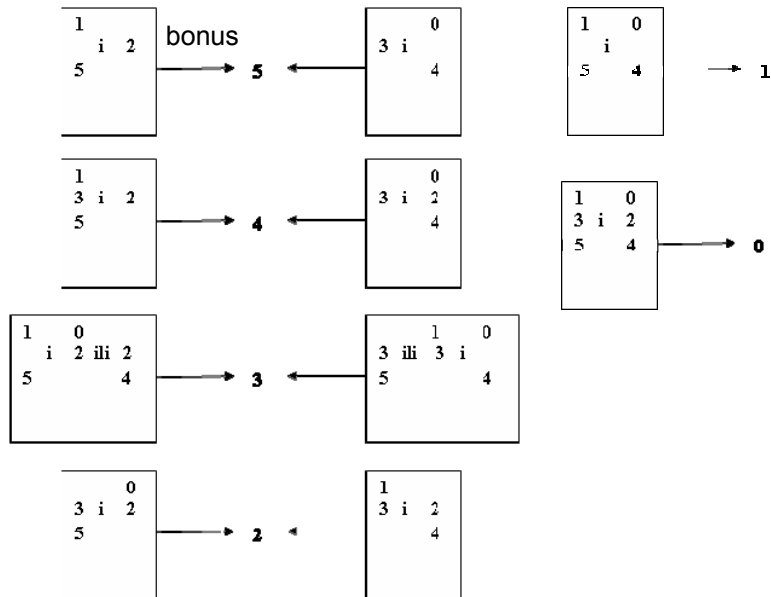
$$F_gena = \min(P_L_S, P_D_S) + Stabilnost_fit - Asimetrija_pomaka$$

6. Funkcija preživljavanja jedinice (kromozoma) jednaka je zbroju funkcija preživljavanja gena dotične jedinice.

90

Određivanje funkcije sposobnosti jedinki

- Iznos funkcije *Stabilnost_fit* dobiva se provjeravanjem svih mogućih kombinacija nogu koje omogućuju stabilnost robota.
- Svaka kombinacija nogu koja osigurava stabilnost dobiva osnovnih 5 bodova, te dodatni bonus svojstven određenoj kombinaciji
- Najveći bonus 5 za raspored nogu kao kod tronožnog koraka
- Maksimalni iznos funkcije *Stabilnost_fit* iznosi 10 (5 + bonus)
- Za ostale kombinacije nogu koje **ne osiguravaju** stabilnost robota, funkcija *Stabilnost_fit* jednaka je broju noga na tlu
- Npr. ako su samo dvije noge na tlu, *Stabilnost_fit* iznosi 2.



91

Izračun pomaka lijeve i desne strane robota

- Iznosi članova P_{L_S} (pomak lijeve strane) i P_{D_S} (pomak desne strane) izračunavaju se iz razlike dvaju stanja robota

Primjer:

$$\begin{bmatrix} 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \text{ Aktivacija } \begin{bmatrix} 6 & 0 \\ 0 & 6 \\ 0 & 6 \\ 6 & 0 \\ 6 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix}$$

10 01 01 10 10 01 00111

- Nakon prijelaza u novo stanje bitne su samo noge koje se nalaze na tlu (budući da jedino one mogu uzrokovati micanje robota) → u ovom slučaju to su noge 1, 2 i 5.
- P_{L_S} i P_{D_S} određuju se prema sljedećim izrazima:

$$P_{L_S} = \frac{\sum (M_{robo(k+1)_{i,j}} - M_{robo(k)_{i,j}})}{\text{broj nogu na tlu s lijeve strane robota}} \quad P_{D_S} = \frac{\sum (M_{robo(k+1)_{i,j}} - M_{robo(k)_{i,j}})}{\text{broj nogu na tlu s desne strane robota}}$$

gdje je P_{L_S} – pomak lijeve strane robota, P_{D_S} – pomak desne strane robota, $M_{robo(k+1)_{i,j}}$ – matrica stanja robota nakon izvršene aktivacije, $M_{robo(k)_{i,j}}$ – trenutna matrica stanja robota, l je iz cijelobrojnog intervala $[0, 2]$.

Za dani primjer je $P_{L_S}=6$, $P_{D_S}=6$

92

Uvođenje ocjene asimetrije pomaka robota

Nakon izračuna P_{L_S} i P_{D_S} lako se odredi, postoji li asimetrija u pokretu između dvije strane robota. Funkcija *Asimetrija_pomaka* određuje se pomoću dva pravila:

- 1) Ako su P_{L_S} i P_{D_S} istog predznaka onda funkcija *Asimetrija_pomaka* iznosi:

$$Asimetrija_pomaka = |P_{L_S} - P_{D_S}|$$

- 2) Ako su P_{L_S} i P_{D_S} različitog predznaka funkcija *Asimetrija_pomaka* iznosi:

$$Asimetrija_pomaka = |P_{L_S}| + |P_{D_S}|$$

Funkcija sposobnosti preživljavanja gena F_{gena} iznosi:

$$F_{gena} = \min(P_{L_S}, P_{D_S}) + Stabilnost_fit - Asimetrija_pomaka$$

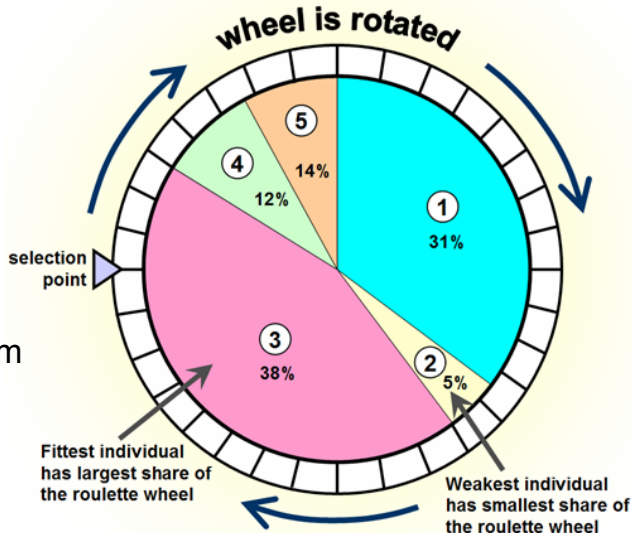
Kod okretanja robota na mjestu koristi se drugačija formulacija funkcije F_{gena} :

$$F_{gena-} = Asimetrija_pomaka + Stabilnost_fit$$

Kod okretanja robota potrebna je asimetrija pomaka, dok je kod ravnog hoda ona nepoželjna ⁹³

Postupak selekcije

- Nakon izračuna funkcije sposobnosti preživljavanja jedinki, pristupa se postupku selekcije.
- U novu generaciju uvijek ulazi najbolja jedinka iz prošle generacije → elitizam.
- Postupak selekcije vrši se na principu **igre ruleta** → Ovakvim postupkom selekcije šansa za reprodukciju jedinke proporcionalna je njezinoj funkciji sposobnosti preživljavanja.



Križanje

- Kod reprodukcije koriste se dvije vrste križanja:
 - Na razini kromozoma – roditeljski geni prenose se na djecu (vidi sliku lijevo)
 - Na razini gena – dva gena roditelja prolaze kroz dvotočkasto križanje iz kojeg nastaju dva nova gena za svakog potomka (vidi sliku desno)

OTAC: C | G1 G2 G3 G4 G5 G6

G1_OCA: 101011 101110 00101

MAJKA: C | G1 G2 G3 G4 G5 G6

G1_MAJKE: 00100 011100 01010

DIJETE_1: C | G1 G2 G3 G4 G5 G6

G1_DIJETETA_1: 101011 011100 00101

DIJETE_2: C | G1 G2 G3 G4 G5 G6

G1_DIJETETA_2 : 00100 101110 01010

- Tijekom reprodukcije segmenti roditeljskih kromozoma koji se odnose na koordinate i inhibitore imaju veću vjerojatnost (65:35) križanja na razini kromozoma
- Iteracijski dio roditeljskih kromozoma ima veću vjerojatnost (55:45) križanja na razini gena

95

Mutacija

- Mutacija se izvodi samo na razini kromozoma → zbog velike duljine kromozoma (129 bita) ispitivanje svakog njegovog bita na mogućnost mutacije oduzimalo bi previše procesorskog vremena.
- Mutacija unutar kromozoma može se manifestirati na dva načina:
 - Zamjena koordinatora i inhibitora novim nasumičnim vrijednostima
 - Zamjene nekog od gena u iteracijskom dijelu slučajnom vrijednošću

Ocjenjivač gena

- Dodatni operator u CGA → Ocjenjivač gena ispituje mali broj slučajno odabranih jedinki dobivenih nakon ciklusa reprodukcije.
- Ocjenjivač gena ocjenjuje svaki gen iteracijskog dijela kromozoma.
- Gen koji ne zadovoljava postavljeni kriterij zamjenjuje se slučajnim novim genom → Ocjenjivač gena mijenja neaktivne gene, te one gene čija funkcija sposobnosti preživljavanja ne zadovoljava zadani minimalni kriterij.

96

Prikaz dobivenih rezultata – trokorak



97

Prikaz dobivenih rezultata – okretanje



98

Prikaz dobivenih rezultata – oštećena noga

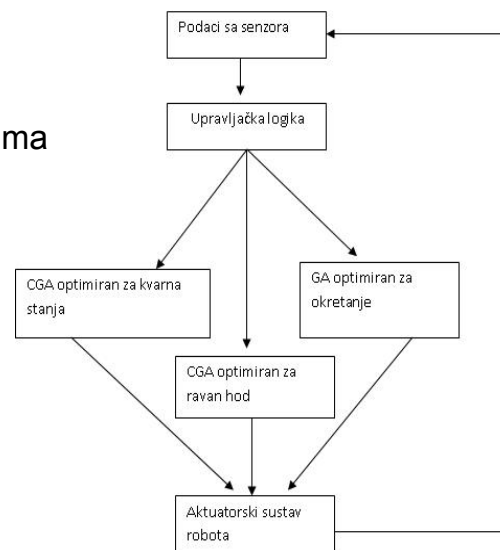


99

Upravljanje kombinacijama sekvenci

Primjene:

- Zaobilazanje prepreka
- Gibanje po zadanim putanjama
- Kombinacija hoda i trčanja
- ...



100