PC-model motornog upravljanja

Prirodna nadgradnja λ-modela

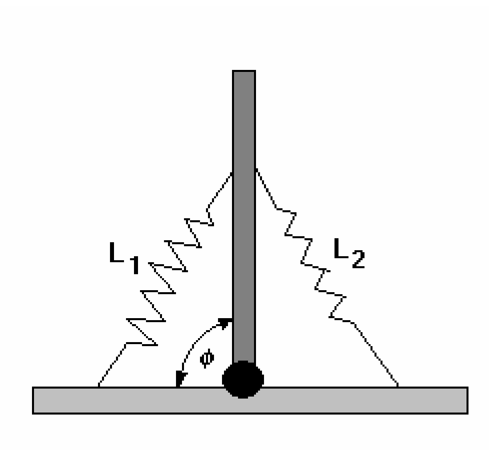
1. Uvodna razmatranja

Naziv PC-model dolazi od *Precission control model* koji predstavlja, prirodnu nadgradnju λ-modela, koji je teoretski razvijen da bi objasnio razmenu između tačnosti i brzine. Ovu zakonitost razmene opisuju Fitsov i Schmidtov zakon, koji su empirijski otkriveni. U želji da sebi (kao studentu) objasnim ovaj zakon pokušao sam da pronađem neuromuskularni mehanizam koji bi ga objasnio. Rezultat tih nastojanja je PC-model, koji je prvenstveno nastao raznim modeliranjem i simuliranjem uz pomoć računara.

Da bih prezentovao ovu ideju[1] motornog upravljanja moram krenuti od osnovnih ideja TRP (teorije raznotežnog položaja) i λ-modela, te od njihovih nedostataka. Moram napomenuti da je sve ovo proizvod mog ograničenog znanja i unapred se izvinjavam za greške i propuste kojih nisam svestan u ovom trenutku.

2. Teorija ravnotežnog položaja (TRP)

Prema TRP segment je u ravnotežnom položaju u kojem je suma svih spoljašnjih i unutrašnjih momenata jednaka nuli (Ilić, 1999). Jednostavnije rečeno, TRP predstavlja mišić kao oprugu čije su karakteristike elestičnosti promenjive od strane CNS-a. Ovo može da se ilustruje mehaničkim modelom tkz. «vratima kaffea». Segmentom upravljaju agnonist (mišić koji deluje u smeru pokreta) i antagonist (onaj koji mu se opire). U ovom primeru položaj »vrata» je uslovljen elastičnošću opruga. Ako pretpostavimo da momenat koji razvijaju opruge zavisi od ugla, onda možemo da izračunamo TP (terminalni položaj) odnosno ugao u kojem će se segment nalaziti u ravnoteži.



$$M = \phi k_1 - (\pi - \phi) k_2$$

Ako je M jednak nuli (za ravnotežni položaj prema TRP) onda je ugao u kojem se segment nalazi u ravnoteži jednak

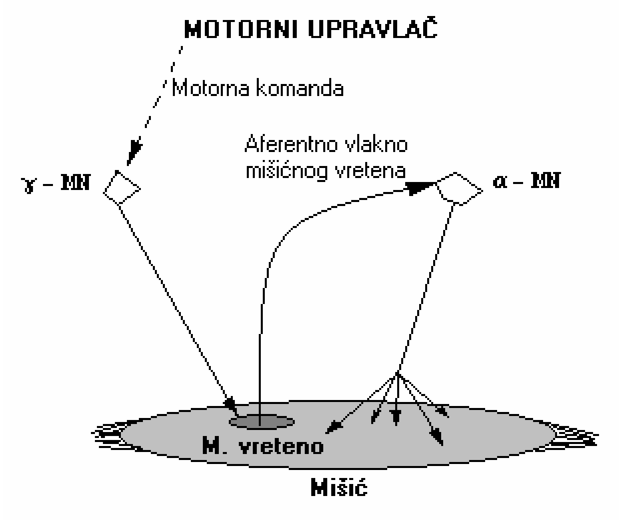
$$\phi = \frac{\pi k_2}{k_1 + k_2}$$

k_1 - koeficient elastičnosti opruge L_1 k_2 - koeficient elastičnosti opruge L_2

[1] Možda je i bolje ovaj model nazvati idejom, jer je on još uvek u toj fazi razvoja

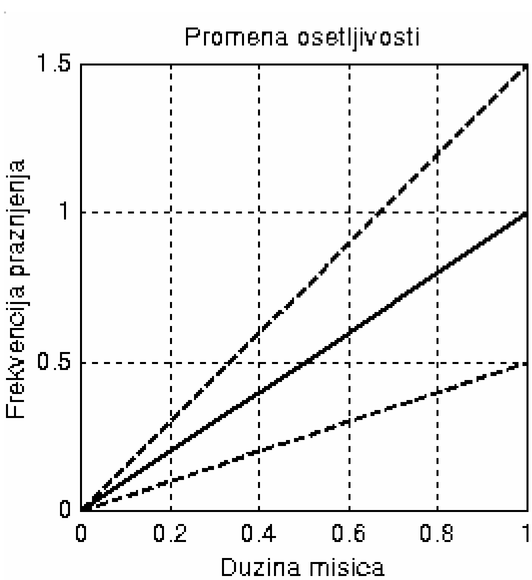
Iz jednačine se vidi da je ugao u kojem će se naći segment definisan koeficientima elastičnosti opruga. Promena segmenta se vrši promenama koeficienata. Ukoliko je opruga L_1 kruća (ima veći k_1) od opruge L_2 segment će se naći u novom položaju koji je manji od 90°. Po TRP, CNS je u mogućnosti da menja koeficiente elastičnosti mišića čime se segment postavlja u novi ravnotežni položaj.

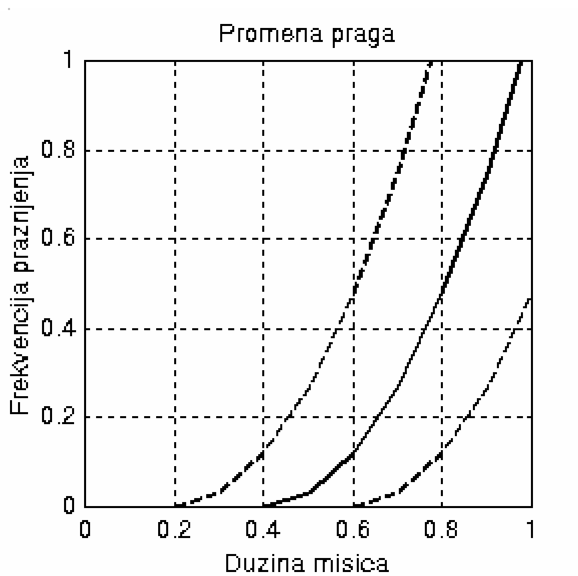
Neuromuskularni mehanizam koji može da stoji iza ovakve vrste upravljanja jeste mišićni refleks, tačnije *miotatički refleks*. CNS bi uz pomoć γ-motornog sistema mogao da postavi novi ravnotežni položaj (odnosno terminalni položaj TP) tako što bi modulirao *osetljivost* mišićnog vretena na dužinu mišića, koje bi zatim refleksnim putem uticalo na kontrakciju mišića. Time bi mišić jače ili slabije reagovao na svoje istezanje. Pri tome se ovde ne misli na pasivnu komponentu mišićne sile već na refleksnu aktivnost mišića. Ovaj model se još naziva i *servo modelom*.



Mišićnom vretenu bi se u ovom slučaju menjala osetljivost na dužinu mišića međutim, mišićno vreteno poseduje i određen prag koji predstavlja dužinu mišića ispod koje je ono (mišićno vreteno) neosetljivo.

Pitanje: Da li se ekscitacijom γ-MN menja osetljivost ili prag osetljivosti mišićnog vretena? (videti donje slike[2])



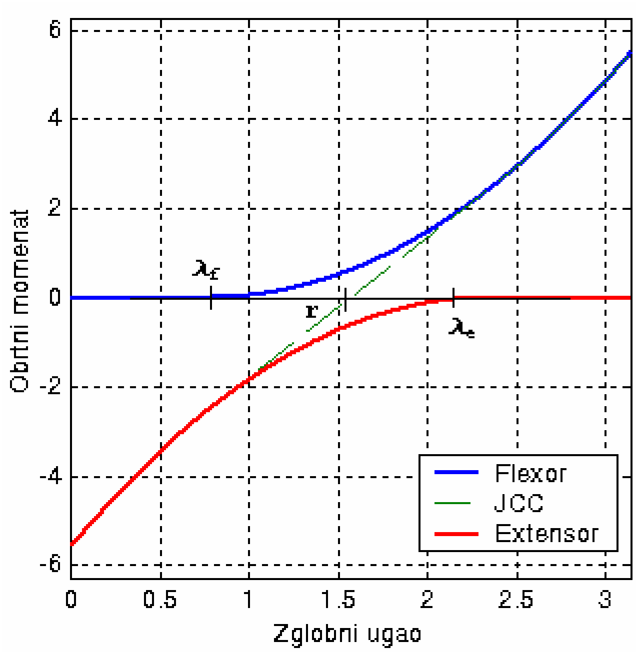


[2] Veličine na grafovima nemaju realni značaj

3. λ-Model

Za razliku od gore opisanog mehanizma motornog upravljanja u kojem se smatra da je novi ravnotežni položaj postignut menjanjem *osetljivosti* mišićnog vretena, λ-model uzima da se motornom komandom menja *prag TRI* (toničkog refleksa istezanja). Taj prag predstavlja dužinu mišića kod koje dolazi do autogenog pobuđivanja α-MN i označava se sa λ (Ilić, 1999).

I λ-model možemo da prikažemo vratima kafea, samo što ćemo oprugama L_1 i L_2 umesto njihovih koeficienata elastičnosti menjati prag – λ. Ako nacrtamo graf momenta i duzine mišića dobićemo sledeće:



Dakle, naredba motornog upravljača je λ kako za fleksor tako i za ekstenzor. Ravnotežni položaj je određen karakteristikama mišićnih momenata i nalazi se u onom zglobnom uglu gde se momenti poništavaju. U tu svrhu računamo algebarski zbir karakteristika momenat-ugao(JCC).

$$JCC(\phi) = M_f(\phi) + M_e(\phi)$$

Ravnotežni položaj se nalazi u tački gde je JCC nula. Ukoliko su krive mišića identične ali obrnute, ravnotežni položaj može da se izračuna i ovako

$$r = \frac{\lambda_{fl} + \lambda_{ext}}{2}$$

Još jedna karakteristična veličina λ-modela je *mišićna koaktivacija c*

$$c = \frac{|\lambda_{fl} - \lambda_{ext}|}{2}$$

Mišićna koaktivacija c je tim veća što su λ_f i λ_e razmaknutije. Efekat c varijable je povećanje nagiba JCC krive. Ukoliko JCC krivu posmatramo kao oprugu koja polazi iz ravnotežnog položaja, varijabla c bi bila njen koeficient elastičnosti. Videćemo kasnije da od varijable c zavisi trajanje pokreta MT odnosno srednja brzina[3]. Dakle, da bi se segment pomerio iz jednog ravnotežnog položaja u drugi, po λ-modelu, motorni upravljač mora da pravilno proračuna kombinacijom pragova λ_f i λ_e. Pri tome nije važno

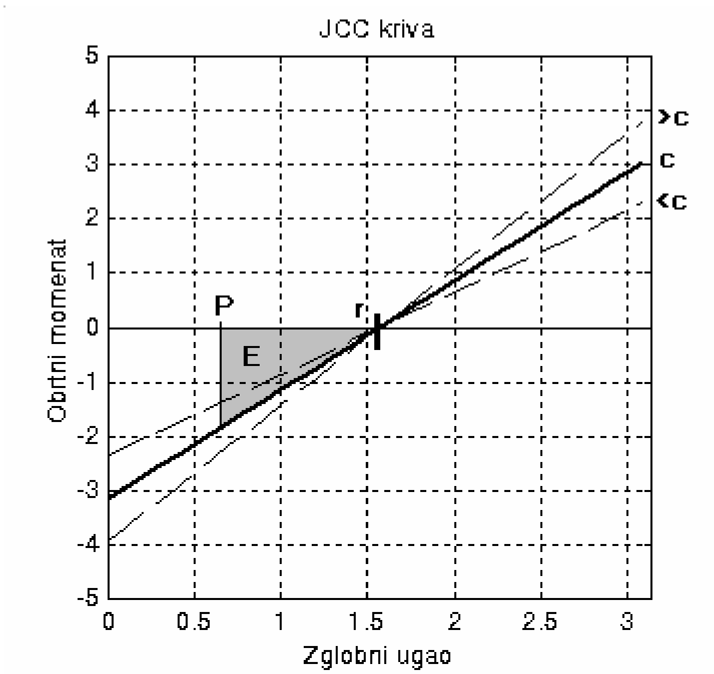
[3] Slična vrednost mogla bi da se izračuna i za sistem u kojem se upravlja sa osetljivošću, međutim pošto su njoj pragovi fiksni onda je i c konstanta. Efekti koje varijabla c ostvaruje na kinematiku pokreta razdvajanjem λ_f i λ_e mogu da se izvedu i u sistemu sa modulacijom osetljivosti tako da se povećaju oba koeficienta simultano.

gde se segment trenutno nalazi. Po ovom modelu, jedine varijable pokreta koje se uče su λ_f i λ_e odnosno terminalni položaj koje njihova kombinacija postavlja.

4. Kinematika pokreta

Pre nego počnemo da analiziramo «šta se dešava» kada segment počne da se kreće iz početnog položaja u ravnotežni položaj (ili u tom smislu terminalni položaj TP) moramo malo da se pozabavimo JCC krivom. Kao što se vidi na slici (na prethodnoj strani), JCC kriva je skoro linearna. Njeno ishodište i nagib određeni su položajima λ_f i λ_e. Ukoliko su krive momenat-ugao mišića istog oblika ali suprotnog smera, možemo slobodno da zaključimo da je ishodište JCC krive jednako varijabli r.

Što se tiče nagiba krive on je veći što su λ_f i λ_e razmaknutije. Mera za razmaknutost λ_f i λ_e jeste mišićna koaktivacija c. Stim u vezi možemo da zaključimo da su mišićna koaktivacija c i nagib JCC proporcionalni. Dakle terminalni položaj (TP) segmenta predstavlja ravnotežni položaj r. Ukoliko segment postavimo u novi položaj P, ili promenimo TP, segment počinje da se kreće u smeru TP. Segment ubrzava sve do TP u kojem je zbir momenata nula. Međutim on se tu ne zaustavlja (zbog inercije) nego prelazi u TP gde ga koče suprotni momenti. Kada se segment zaustavi on se nalazi izvan TP i ponovo počinje prema njemu da se kreće. Pošto nema gubitaka energije, segment će beskonačno da oscilira oko TP (kao klatno). Da bi to dokazali koristićemo se matematičkim modelom. Krivu JCC predstaviti ćemo ishodištem TP (ili r) i nagibom k (koji je proporcionalan mišićnoj koaktivaciji c)[4].



JCC(ϕ)= -(ϕ-TP)k

Da bi opisali ponašanje ovog sistema moramo da formiramo diferencijalnu jednačinu

I ϕ'' = JCC(ϕ)

[4] U formuli je stavljen znak minus jer se potkrala greška u definisanju JCC krive koja mora da ima suprotan smer, što znači da pri višim zglobnim uglovima ona mora da ima veći momenat ali negativan. Greška se takođe nalazi na prethodnoj strani jer fleksor mora da stvara negativan momenat da bi vršio fleksiju.

Gde je I moment inercije segmenta. Da bi rešili ovu jednačinu moramo da znamo početne uslove, a oni su:

$\phi'(0) = 0$ (ugaona brzina)
$\phi(0) = P$

Rešavanje ove diferencijlne jednačine izlazi izvan okvira ovog teksta, te ću stoga prikazati gotovo rešenje.

$$\phi(t) = TP + (P - TP)\,\mathrm{Cos}\left(\frac{\sqrt{k}}{\sqrt{I}}\,t\right)$$

$$\omega(t) = \frac{\sqrt{k}\,(-P + TP)\,\mathrm{Sin}\left[\frac{\sqrt{k}}{\sqrt{I}}\,t\right]}{\sqrt{I}}$$

Ovime smo dokazali da će sistem da zaoscilira oko TP. Frekvencija osciliranja je jednaka i zanimljivo je da se primeti da ne zavisi od početnog položaja.

$$f = \frac{\sqrt{k}}{2\pi\sqrt{I}}$$

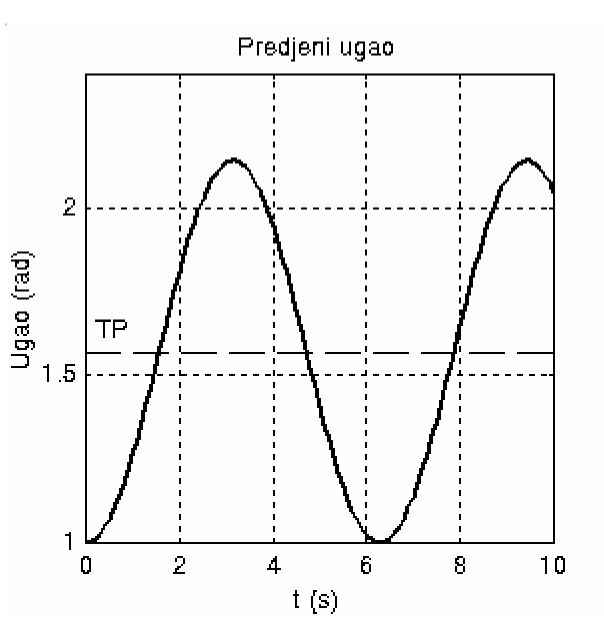
Sada ćemo grafički prikazati ove oscilacije uzevši da je

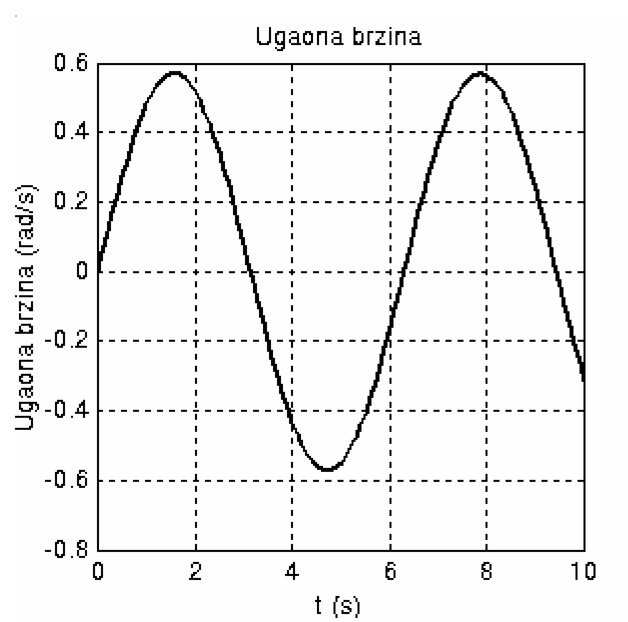
$$TP = \frac{\pi}{2}\ (\mathrm{rad})$$

$$k = 1$$

$$I = 1$$

$$P = 1\ (\mathrm{rad})$$





Primetite da frekvencija titranja zavisi od nagiba krive JCC i od inercije segmenta. Isto tako maksimalna ugaona brzina koja se dostiže zavisi od nagiba krive, momenta inercije segmenta i od dužine pokreta D (P-TP)

$$\omega_{max} = \frac{\sqrt{k}\,D}{\sqrt{I}}$$

Iz ovog je vidljivo da mišićna koaktivacija c, pomerajuć nagib krive JCC menja njen faktor k i time indirektno određuje maksimalnu ugaonu brzinu pokreta a samim time i trajanje pokreta MT. Iako je ovde MT beskonačno (pošto sistem osciluje) ovu vezu između MT i c primetićemo i kasnije.

Međutim primećujemo da se mi ne "klatimo" okolo već imamo finu motoriku, što znači da nešto u ovom modelu ne štima. Da bi se vibracije otklonile, u sistemu moraju da postoje takozvane disipativne sile koje rasipaju energiju (pretvaraju kinetičku energiju u toplotnu). Primer takvih sila su trenje i viskoznost. Pošto su sile koštanih interakcija male a podmazivanje između zglobova još bolje, na silu trenja ne možemo da računamo. Ostaje nam jos viskozitet mišića kao rešenje.

5. Viskoznost mišića

Viskoznost je svojsvo nekog fluida da se opire svom vlastitom kretanju ili kretanju nekog tela u njemu samom. U mišiću se takođe pojavljuje viskoznost kao posledica «trenja» između njegovih gradivnih elemenata. Da rezimiramo, silu viskoznosti ćemo predstaviti kao proporcionalnu brzini kretanja a zavisnu od nekog faktora η (koji je specifičan mišiću)

$$\mathbf{F_v} = \eta\,\mathbf{v}$$

Međutim u ovom slučaju razmatramo ugaono kretanje pa ćemo ovu formulu preformulisati da je momenat viskoznosti proprcionalan ugaomoj brzini:

$$\mathbf{M_v} = \eta\,\omega$$

Ako uvrstimo viskoznost u diferencijalnu jednačinu (kojom opisujemo ponašanje sistema, odnosno kinematiku i dinamiku) dobijamo

$$\mathbf{I}\,\phi'' = \mathbf{JCC}(\phi) - \eta\,\phi'$$

Rešenje ove diferencijalne jednačine je jako veliko i nije potrebno da se ovde prikazuje, zato ćemo samo prikazati grafičke rezultate. Ono što očekujemo jeste prigušenje oscilacija ovisno o faktoru η.

Za početak ćemo uzeti vrednosti sistema iz prethodnog primera samo ćemo još postaviti i η.

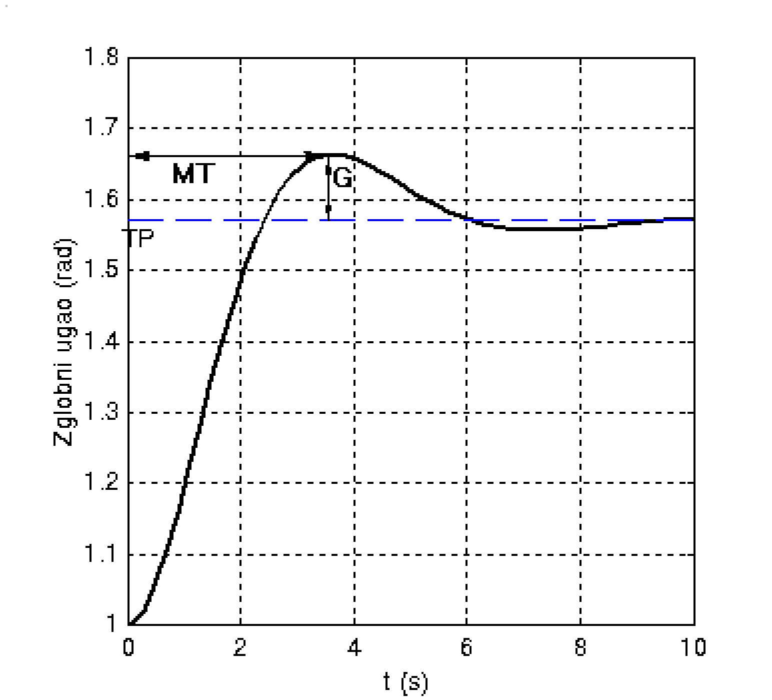
$$TP = \frac{\pi}{2} \text{ (rad)}$$

$$k = 1$$

$$I = 1\,\text{kgm}^2$$

$$P = 1 \text{ (rad)}$$

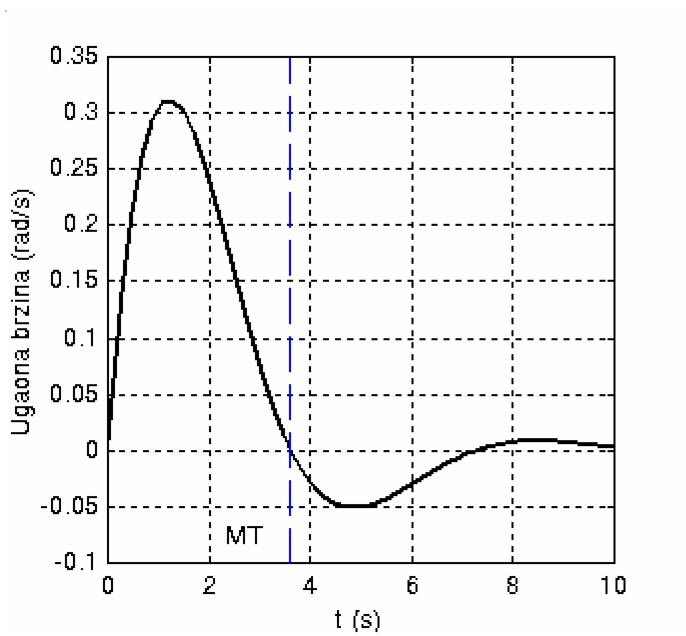
$$\eta = 1$$



Iz slike je vidljivo da je sistem stabilan, odnosno da se oscilacije prigušuju što dovodi da se nakon nekog vremena segment smiruje. Ukoliko se usporedi ovaj sistem sa prethodnim(bez prigušenja) primećuje se da segment sporije dolazi do TP. Međutim to je posledica prigušenja. Stim u vezi moramo naći neke varijable za opis sistema.

Ptanje: Kada pokret završava?

Odgovor na ovo pitanje nije lako dati, a on nam je potreban da bi pokret opisali. Za potrebe ovog rada uzećemo da pokret završava u onom trenutku kada ugaona brzina prvi put dosegne nulu. To je ona tačka gde kriva ugaone brzine prvi put seče apcisu (x pravac). Vreme koje je potrebno da se to desi jeste MT ili trajanje pokreta. Ako pogledamo gde se nalazi segment u tom trenutku primetićemo da se on nalazi iznad terminalnog položaja (TP). To je lokalni maksimum krive ugla i on predstavlja maksimalno odstupanje od TP, te ćemo njega predstaviti varijablom G. Varijabla G predstavlja sistematsku grešku pokreta, odnosno odstupanje od TP u radijanima.



6. Igranje sa varijablama

Kao što sam podnaslov kaže, sada ćemo se igrati sa varijablama da bismo videli kako se sistem ponaša. Kao kontrolnu krivu uzećemo onu na prethodno strani, odnosno ove parametre sistema:

$$TP = \frac{\pi}{2}\ (rad)$$

$$k = 1$$

$$I = 1\,kgm^2$$

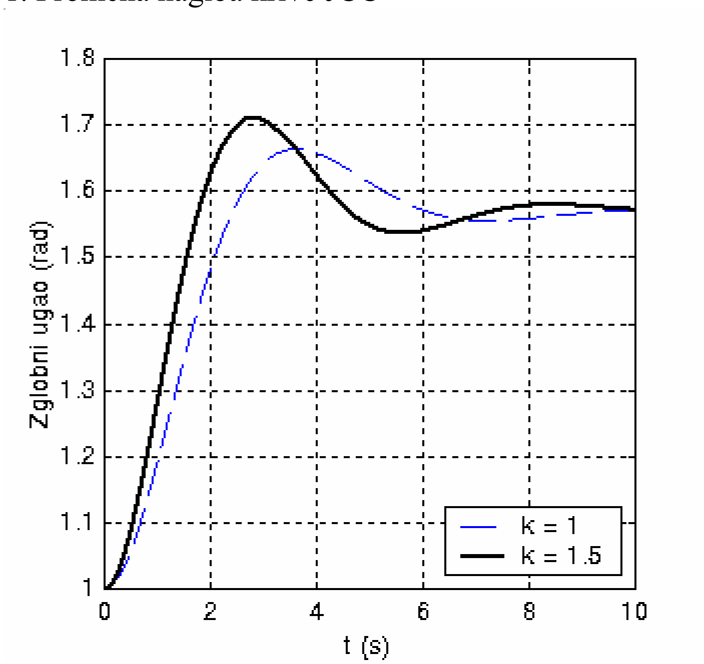
$$P = 1\,(rad)$$

$$\eta = 1$$

Pri ovim parametrima vredi da je

MT = 3.628 s
G = 0.0931 rad

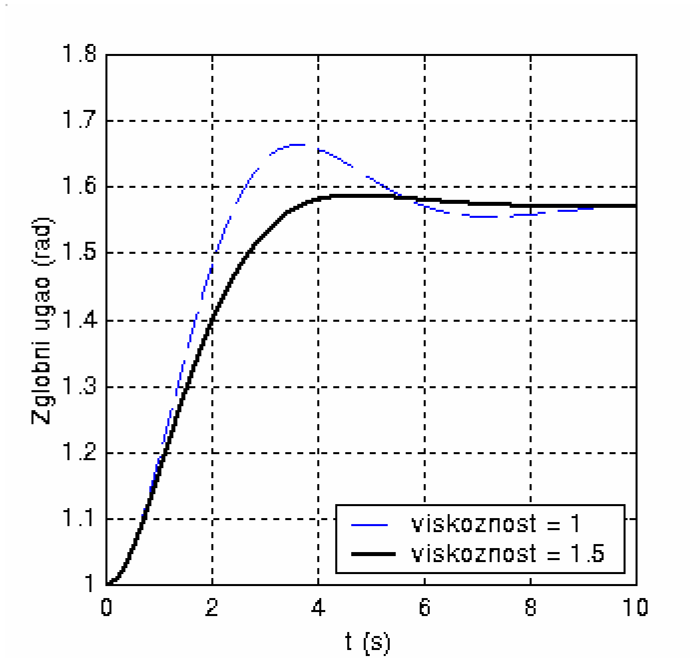
1. Promena nagiba krive JCC



MT = 2.81 s
G = 0.1401 rad

Iz rezultata se vidi da povećanjem nagiba JCC krive (što je uslovljeno mišićnom koktivacijom c) smanjuje vreme MT a povećava greška G. Dakle može se reći ukoliko želimo da izvršimo brži pokret, motorni upravljač treba da poveća varijablu c. Time se naravno povećava i greška G čime može da se objasni razmena između tačnosti i brzine

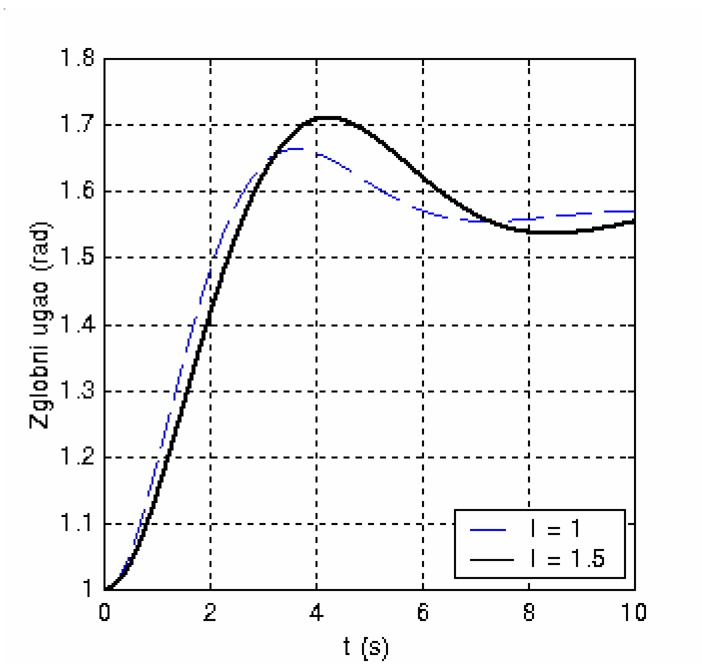
2. Promena faktora prigušavanja



MT = 4.75 s
G = 0.0162 rad

Povećanjem viskoznosti odnosno faktora prigušenja povećava se trajanje pokreta MT ali je greška G mnogo manja. Pošto je mišićna viskoznost fiksna, centralni upravljač NE MOŽE da menja ovu varijablu. Međutim veza između centralnog upravljača i faktora prigušenja možda i postoji (ovom je pretpostavkom nastao PC-model) no o tome ćemo kasnije.

3. Promena momenta inercije



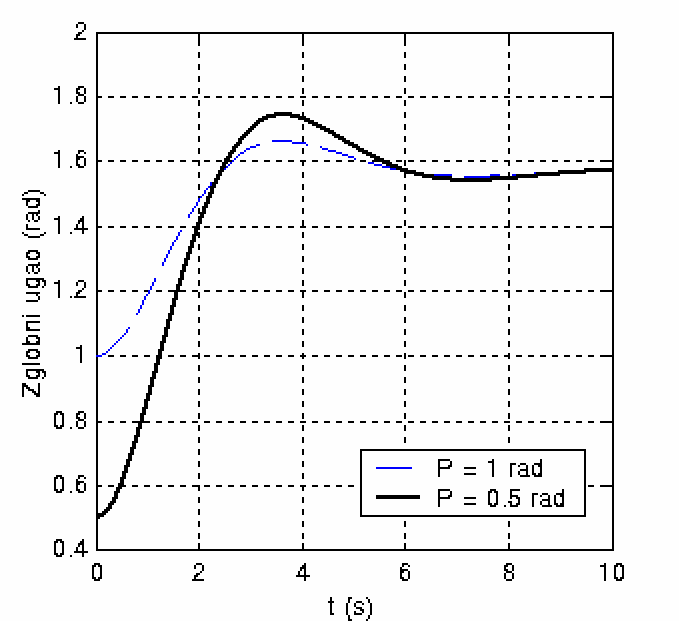
MT = 4.215 s
G = 0.1401 rad

Kao što se vidi iz slike, povećanje momenta inercije povećavaju se i trajanje pokreta MT i greška G[5]. Zaključak bi bio da je u zahtevu tačnosti i brzine dobar izbor smanjiti momenat inercije. Ukoliko se segment sastoji samo od jednog dela, momenat inercije je nemoguće promeniti. Međutim ukoliko se segmenat sastoji od više delova momenat inercije je moguće promeniti menjanjem prostornog odnosa između delova segmenta. To se koristi u raznim sportovima prilikom usporavanja pokreta, recimo kod krošea u boksu. Međutim promena momenta inercije u toku pokreta za sobom povlači dodatne proračune pošto se menja kinetička energija sistema i to izlazi izvan dometa ovog teksta.

[5] Mislim da ovaj rezultat nije baš u skladu sa istraživanjima koja govore da sistematska greška G ostaje konstanta kada se poveća momenat inercije segmenta dok se u tom slučaju povećava samo MT

4. Promena dužine pokreta D

Promena dužine pokreta se može promeniti pomeranjem ili terminalnog položaja (TP) ili promeno početnog položaja P. U našem primeru pomerićemo početni položaj P.



MT = 3.628 s
G = 0.17 rad

Interesantno je primetiti da je trajanje pokreta identično kontrolnoj krivi. To je posledica «linearizacije» JCC krive a može se reći i zato što je frekvencija osciliranja (u sistemu bez prigušenja) nezavisna od početnog položaja. Međutim to nema realnu vrednost jer je MT veće ukoliko je dužina pokreta veća. Greška se u ovom slučaju isto povećala.

Zaključak bi bio da kinematika segmenta zavisi od mišićne koaktivacije, viskoznosti, momenta inercije i dužine pokreta. Pošto je mišićna viskoznost nepromenjiva od strane motornog upravljača, njemu preostaje jedino da modulira mišićnu koaktivaciju c da bi regulisao trajanje pokreta MT i grešku G. Time može da se objasni razmena tačnosti i brzine.

Pitanje: Ukoliko se ispitaniku koji izvodi maksimalno brz osnovni pokret zada zahtev za većom tačnošću, da li on svesno smanjuje maksimalnu brzinu pokreta odnosno modulira mišićnu koaktivaciju c, ILI postoji neki mehanizam između motornog upravljača i konstante prigušivanja i da li je ona promenjiva?

Pod pretpostavkom da je mišićna viskoznost nepromenjiva od strane motornog upravljača, mora da postoji nekakva vrsta prigušivanja koja može da se kontroliše.

U ovom se trenutku PC-model odvaja od λ-modela. *Precission control model* smatra da osim kontrolisanja TP i mišićne koaktivacije c, motorni upravljač može da kontroliše i prigušenje i time postavi zahtev za preciznošću (tačnošću) pokreta. Samim time u procesu motornog učenja, uz TP i c, treba da se uči i faktor preciznosti.

Da bi ovo funcionisalo potrebno je još «samo» pronaći mehanizam regulacije faktora prigušenja. Međutim to nije ni malo težak posao, u stvari odgovor nam je pred nosom...

7. Mišićno vreteno i njegovo Ia aferentno vlakno

Mišićno vreteno spada u proprioceptivne senzore a nalazi se u mišiću. Sastoji je od specifičnih mišićnih vlakana (intrafuzna vlakna) koja se dele u dve grupe:

- vlakna sa jedrima u lancu (lančasta)
- vlakna sa jedrima u vreći (vrećasta ili kesasta),

od kojih su lančasta brojnija. Mišićno vreteno je inervisano γ-MN, tačnije krajevi vlakana u kojima se nalaze kontraktilni elementi, dok se u središtu vlakana nalaze senzori. γ-MN u ovisnosti koji tip vlakana u vretenu inervišu možemo da podelimo na

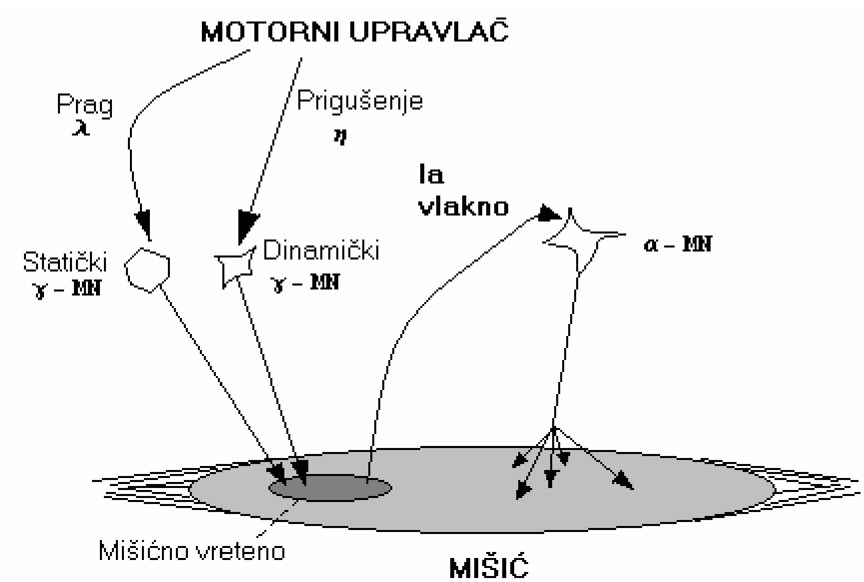
- statička, koja inervišu lančasta vlakna
- dinamička, koja inervišu vrećasta vlakna.

Naime, lančasta vlakna su osetljiva na dužinu mišića, dok su vrećasta na brzinu kontrakcije. γ –MN moduliraju njihovu osetljivost i/ili prag. Ako je frekvencija pražnjenja γ-MN veća utoliko je i veća osetljivost i/ili je prag niži.
Izlaz iz mišićnog vretena delimo na

- Ia (primarni)
- II (sekundarni)

Ia vlakna polaze iz oba tipa vlakana mišićnog vretena dok II vlakna polaze samo iz statičkih vlakana(lančastih). S tim u vezi možemo da zaključimo da Ia aferentni neuron prenosi sumu (zbir) osetljivosti lančastog i vrećastog vlakna, što znači da prenosi informaciju i o brzini i o trenutnoj dužini mišića.

Ukoliko bi Ia vlakno bilo to koje završava na α-MN, ono bi bilo ekscitirano sa obzirom i na dužinu i na brzinu kontrakcije. Time bi centralni upravljač pomoću statičkog i dinamičkog γ-MN mogao da menja prag i faktor prigušenja tako što bi menjao osetljivost vretena na brzinu,koje bi zatim refleksnim putem uticalo na mehaniku mišića.



Ovime bi mogao da se objasni mehanizam PC-modela. Naime mišić bi posedovao vlastito prigušenje pomoću viskoznosti η_v, dok bi motorni upravljač mogao da postavi dodatno prigušenje refleksnim putem η_r. Ako bi se mišić brže istezao to bi u njemu razvijalo veću silu opiranja. Dakle faktor prigušenja bi se sastojao od:

$$\eta = \eta_v + \eta_r$$

Pitanje: Može li se pomoću ovog mehanizma objasniti razmena tačnosti i brzine u kojoj je brzina veća od 70% maksimalne (pri kojoj se tačnost povećava)?

8. Divergencija silaznih puteva

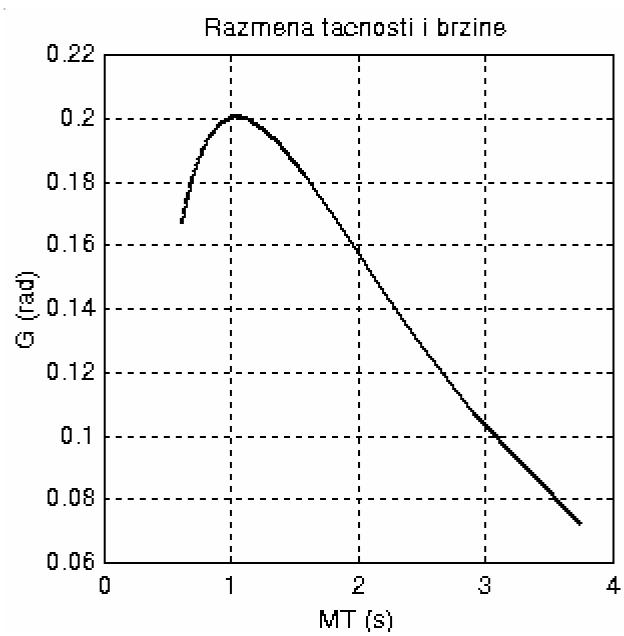
Iako Fitsov i Schmidtov zakon kažu da se tačnost smanjuje povećanjem brzine i dužine pokreta, realno to nije najtačnije. Naime ukoliko se brzina pokreta (srednja brzina) poveća preko 70% maksimalne tačnost se povećava umesto da pada (Ilić, 1999).

Ovo bi moglo da se objasni nekakvim specifičnim razmerom između koaktivacije c (koja je proizvod pragova antagonističkih mišića i koja uslovljava brzinu pokreta) i prigušenja. Možda motorni upravljač, kada se brzina poveća preko 70% maksimalne, poveća i faktor prigušenja i time poveća tačnost a da to ne utiče na brzinu pokreta.

Da bi ispitao ovu pretpostavku, napravio sam niz simulacija u kojima sam postavio da mi faktor prigušenja zavisi od mišićne koaktivacije c (odnosno od nagiba JCC krive). Pri tome sam računao MT i G i posle prikazao njihov odnos.

Tok eksperimenta je bio ovakav:

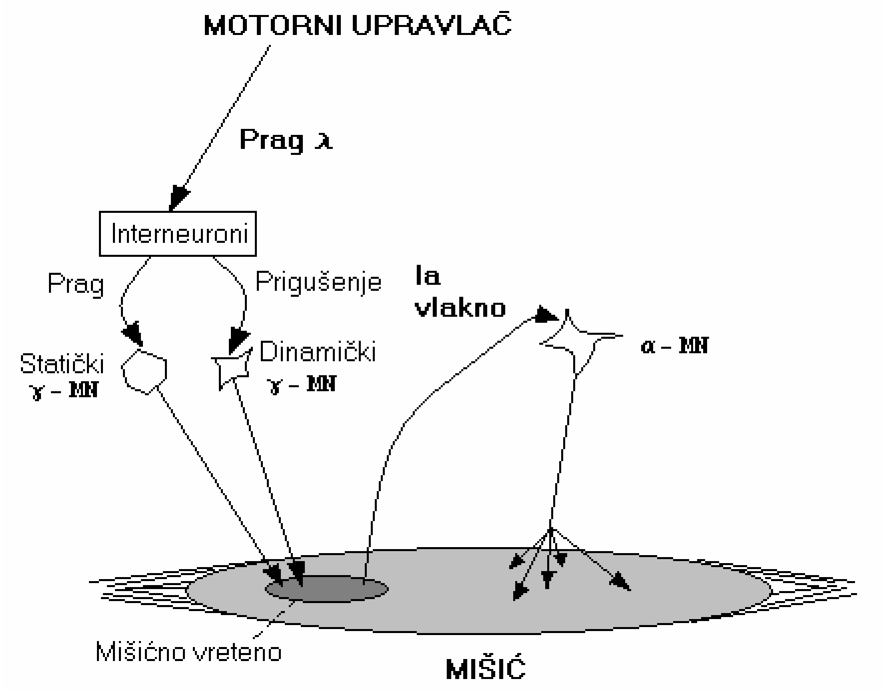
1. Postaviti da su TP = $\frac{1}{2}\pi$ rad
   I = 1 kgm^2
   P = 1 rad
2. Za početni nagib krive JCC uzeti da je k = 0.1, te ga povećavati za 0.5 sve dok ne dođe do 20.
3. Postaviti faktor prigušenja u korelaciju sa nagibom krive. Pri tome sam uzeo u obzir da postoji nekakvo nulto prigušenje(mišićna viskoznost, vidi prethodnu stranu) koje se ne može menjati refleksnim putem. Time sam dobio da mi je faktor prigušenja $\eta = 1 + 0.1 * k$
4. Za svaku simulaciju izračunati MT i G, te ih kasnije prikazati.



Rezultat ovog simulacijskog ksperimenta vidi se na slici. Na apcisi se nalazi trajanje pokreta MT a na ordinati greška G. Vidljivo je da kako se brzina povećava (naravno povećanjem mišićne koaktivacije c koja rezultuje povećanjem k faktora JCC krive odnosno njenog nagiba) ili bolje reći kako vreme trajanja pokreta MT pada, greška G se povećava. Međutim nakon nekog praga, povećanje brzine dovodi do smanjenja greške G.

Šta ovo praktično znači? To znači da motorni upravljač povećanjem koaktivacije c (a time i brzine) simultano povećava i faktor prigušenja η. Kakav je odnos između njih to tek treba otkriti, jer ovaj odnos koji sam ja uzeo služi čisto u simulacijske svrhe, međutim dokazao je da za takvu razmenu tačnosti i brzine mora da postoji veza između njih.

Daljnjim razmišljanjem došao sam na ideju da silazni put iz motornog upravljača (lateralni ili medijalni) ne inerviše specijalno statičke i dinamičke γ-MN, već divergira na oba putem interneurona. U interneuronima se dešava specifična modulacija prigušenja ovisno o pragu i time se dobija reazmena između tačnosti i brzine.



9. Zaključak

PC-model smatra da uz mogućnost da postavi prag TRI (λ), motorni upravljač može da postavi i faktor prigušenja η. Prigušenje se sastoji od viskoznosti mišića koje je nepromenjivo i od prigušenja putem refleksne modulacije. Modulacija prigušenja se odvija tako da se promeni osetljivost mišićnog vretena na brzinu kontrakcije čime bi mišić reagovao većom silom u suprotnom smeru (usporenju). Time bi se refleksnim mehanizmom «simulirala» veća viskoznost. Ovime bi se objasnila manja greška kod većeg zahteva za tačnošću. Međutim još nisam uspeo da dobijem odgovor da li se u tom slučaju voljno smanjuje brzina pokreta i kao rezultat povećava tačnost ili se postavlja veće prigušenje.

Što se tiče zakona razmena tačnosti i brzine, on se može objasniti ovim modelom. Međutim u tom slučaju «nestaje» sliazni put za tačnost i ostaje samo onaj za postavljanje praga. Međutim on divergira i na dinamička γ vlakna najverovatnije putem interneurona i time postavlja odnost prigušenja sa pragom. Ukoliko silazni put većom frekvencijom pražnjenja postavlja niži prag TRI time bi postavio i veće prigušenje. Na određenoj brzini tačnost bi se popravila. Ovaj odnost treba tek otkriti ali je on simulaciom dokazan.

Ovaj model je nastao kao proizvod mog ograničenog znanja i još jednom se izvinjavam za moguće greške.

Mladen Jovanović
April, 2004.
mladen.jovanovic@istramail.com