



Faculty of Electrical Engineering
Department of Automatic Control
and Electronics, Sarajevo

Data Acquisition and Transmission Akvizicija i prijenos podataka



12. Teleoperation systems Sistemi daljinskog vođenja

Doc.dr.sc. Jasmin Velagić, Ph.D.

2007/2008

Sadržaj poglavlja:

- ✚ Sistemi daljinskog vođenja u robotici
 - Sistemi daljinskog vođenja
 - Bilateralni sistem vođenja
 - Koncept pasivnosti
 - Teleoperacija u valnom području
 - Ilustrativni primjer

12.1. Sistemi daljinskog vođenja

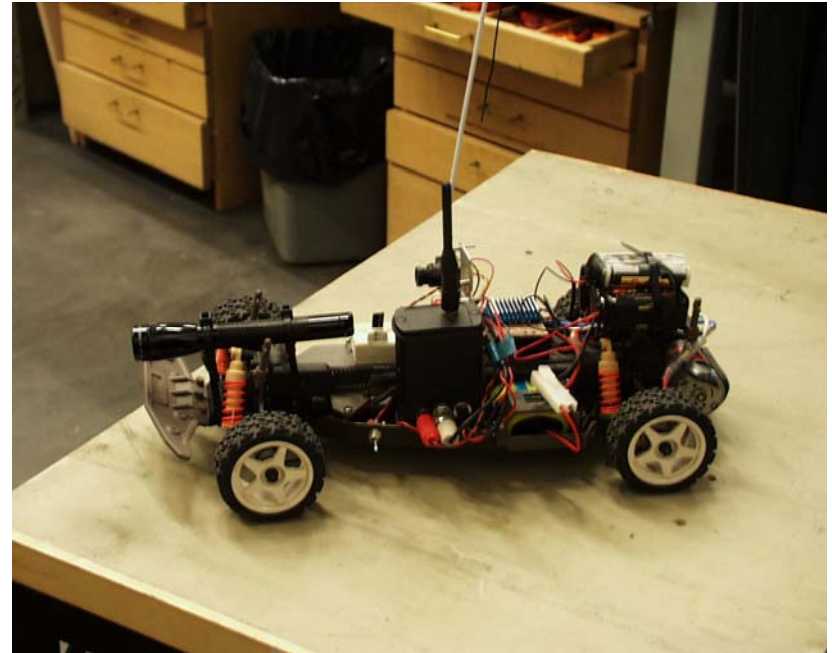
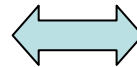
Daljinsko vođenje je tehnika vođenja sistema na daljinu u kojima neposredno (blisko) upravljanje nije ostvarivo, jer je opasno i/ili nedostupno.

Osnovni pojmovi

- ❑ **Teleoperacija:** tehnika vođenja sistema sa udaljenog mjesta.
- ❑ **Operator:** čovjek koji nadzire vođeni stroj i poduzima neophodne upravljačke akcije.
- ❑ **Teleoperator:** daljinski vođeni sistem. U slučaju robota zove se telerobot.
- ❑ **Mehanička manipulacija:** mehanički (ili hidraulički) prijenos upravljačkih naredbi od operatora do teleoperatora.
- ❑ **Telemanipulacija:** prijenos upravljačkih naredbi električnim putem.
- ❑ **Daljinsko upravljanje:** upravljanje na daljinu u kome se upravljani sistem nalazi u vidnom polju operatera.
- ❑ **Teleoperacija:** poopćenje telemanipulacije na mobilne sisteme (robote) i sisteme upravljane preko komunikacijskih medija.
- ❑ **Nadzirano upravljanje:** velika autonomnost udaljenog sistema, a operator samo nadzire njegov rad i djeluje samo povremeno.

Sistemi daljinskog vođenja

- Danas je zastupljena tzv. standardna manipulacija, tj. bežično upravljanje i vizuelna povratna veza preko sistema kamera i monitora.



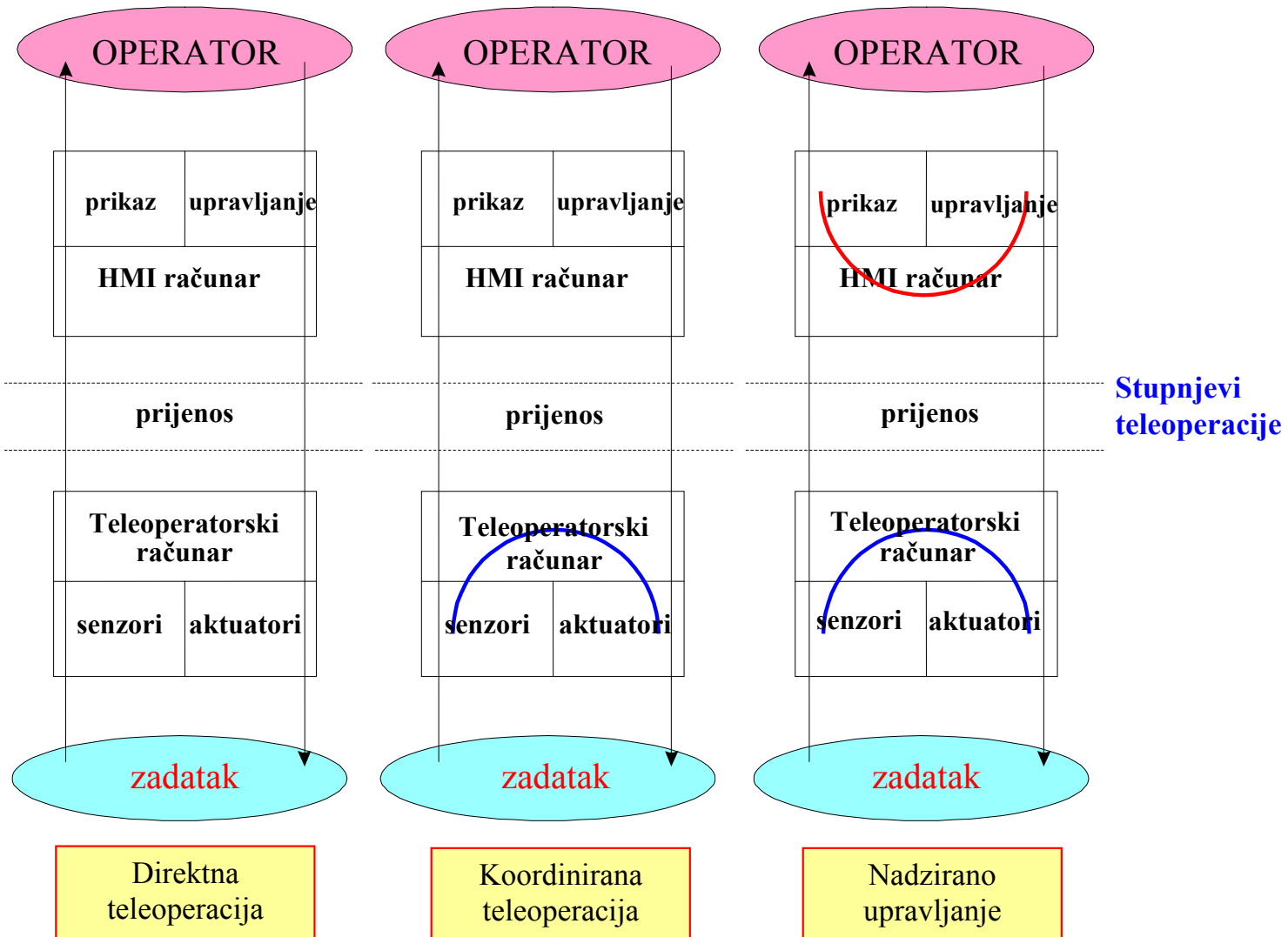
Sistemi daljinskog vođenja

Tipovi teleoperacija:

- **Upravljanje u zatvorenoj petlji (direktna teleoperacija).**
Operator direktno upravlja aktuatorima teleoperatora i dobiva povratne signale u stvarnom vremenu. Ovo je moguće samo kada su kašnjenja u krugu mala i dinamika teleoperatora dovoljno spora.
- **Koordinirana teleoperacija.**
Operator upravlja aktuatorima teleoperatora, ali postoje i neke regulacijske petlje na samom teleoperatoru. Teleoperator nema autonomiju i na njemu se zatvaraju one regulacijske petlje kojima operator ne može upravljati zbog kašnjenja i dinamike.
- **Nadzirano upravljanje.**
Veliki dio upravljanja obavlja se autonomno na teleoperatoru. Operator uglavnom nadzire njegov rad i daje naredbe više razine. Ponekad se koristi i termin “teleoperacija temeljena na zadatku”.

Sistemi daljinskog vođenja

Stupnjevi teleoperacije

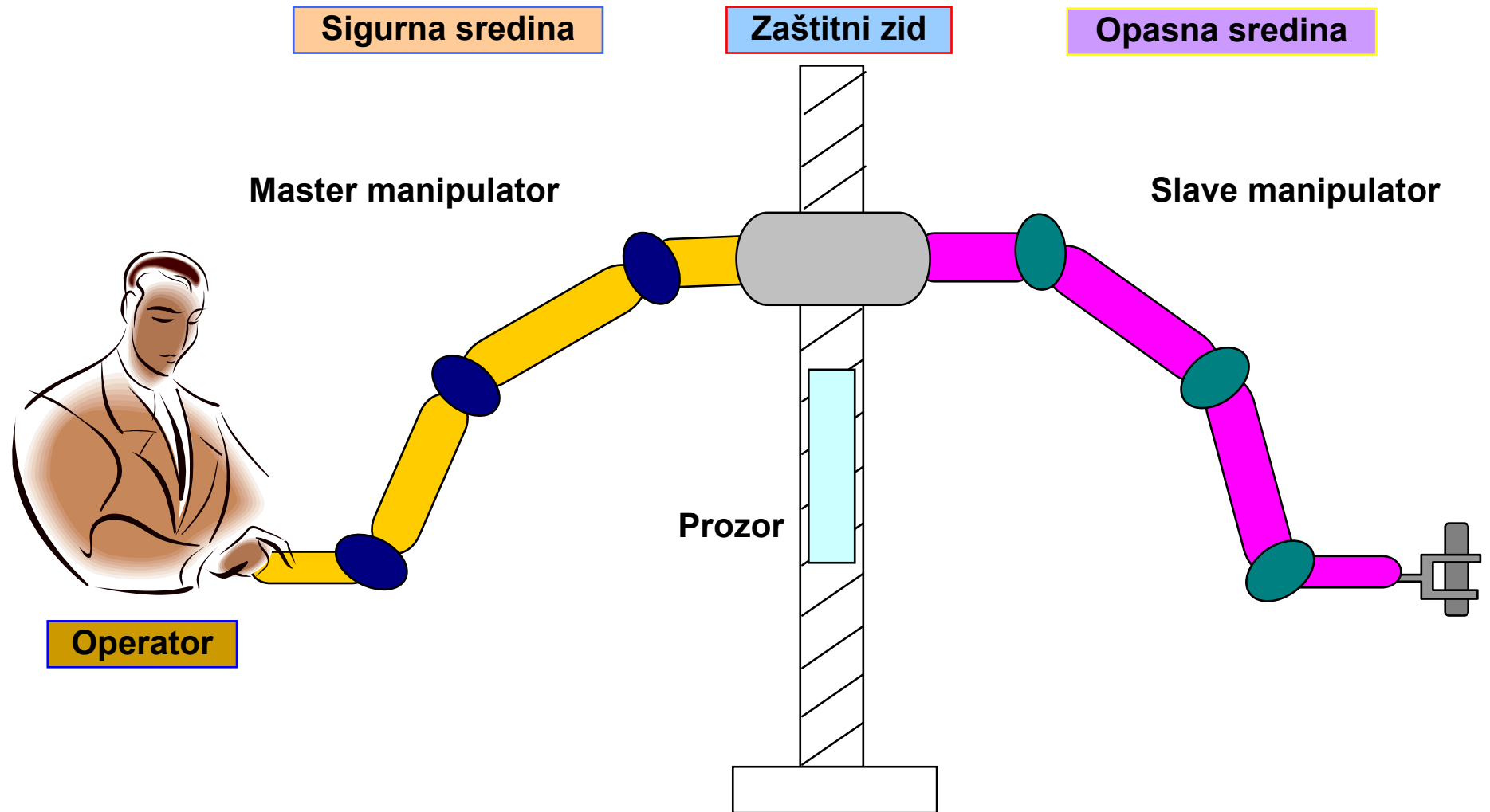


Sistemi daljinskog vođenja

- Primjena novih računarskih tehnologija u teleoperaciji omogućuje operatoru dobivanje osjećaja prisutnosti u udaljenom prostoru.
- 1. **Daljinska prisutnost (Telepresence).** Teleoperater se nalazi izvan vidnog polja operatora, a senzorske informacije (vida, slike, zvuka, sile,...) daju operatoru osjećaj prisutnosti u udaljenom prostoru.
- 2. **Virtualna prisutnost (virtualna stvarnost, Virtual Reality).** Slična pojmu daljinske prisutnosti, s tim da su udaljeni prostor, teleoperator i senzorske informacije generirani virtualno u računar.
- 3. **Proširena stvarnost (Augmented Reality).** Predstavlja kombinaciju virtualne stvarnosti i informacija iz stvarnog udaljenog prostora.

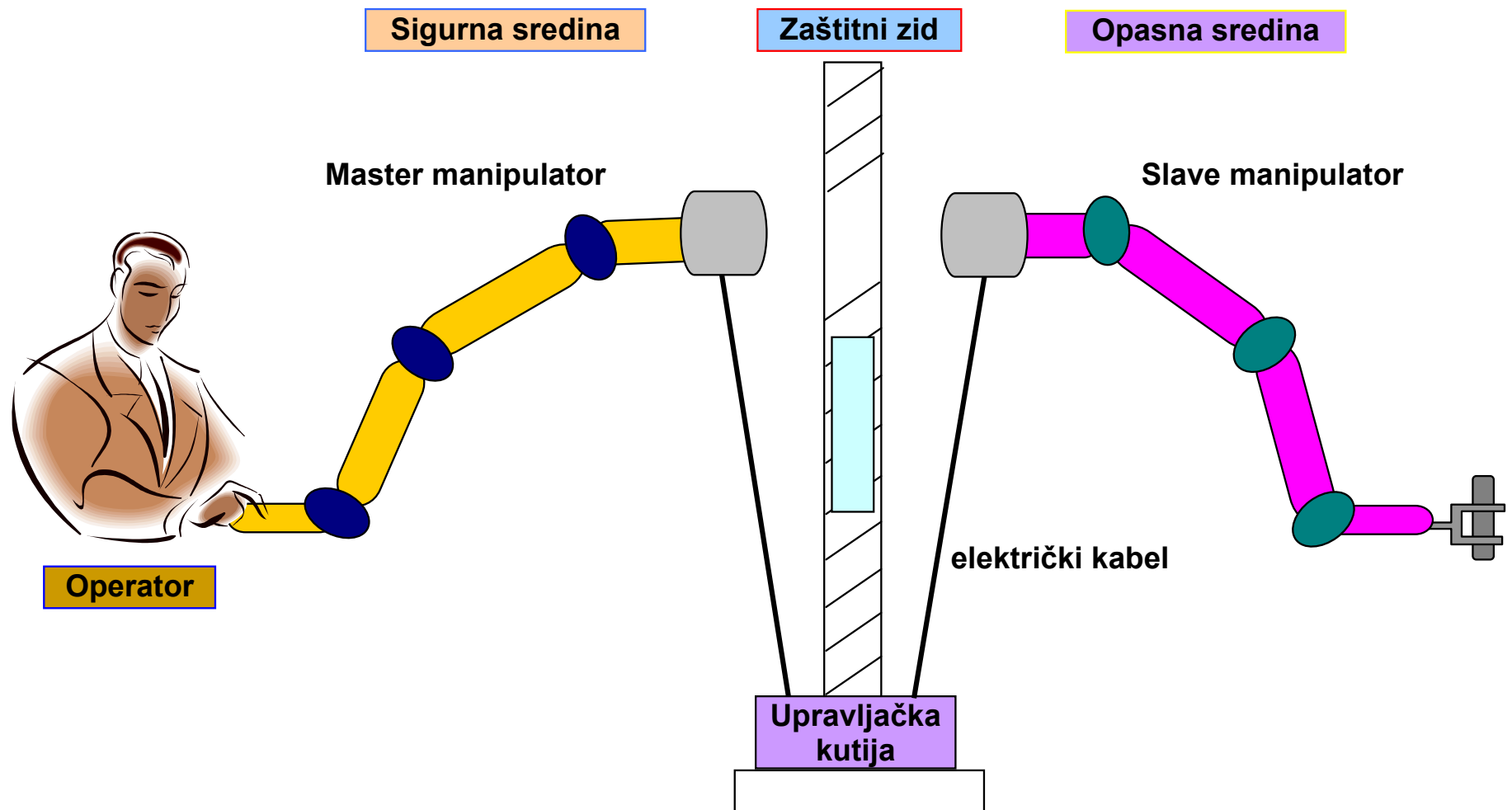
Sistemi daljinskog vođenja

- Mehanička manipulacija (do 1954)



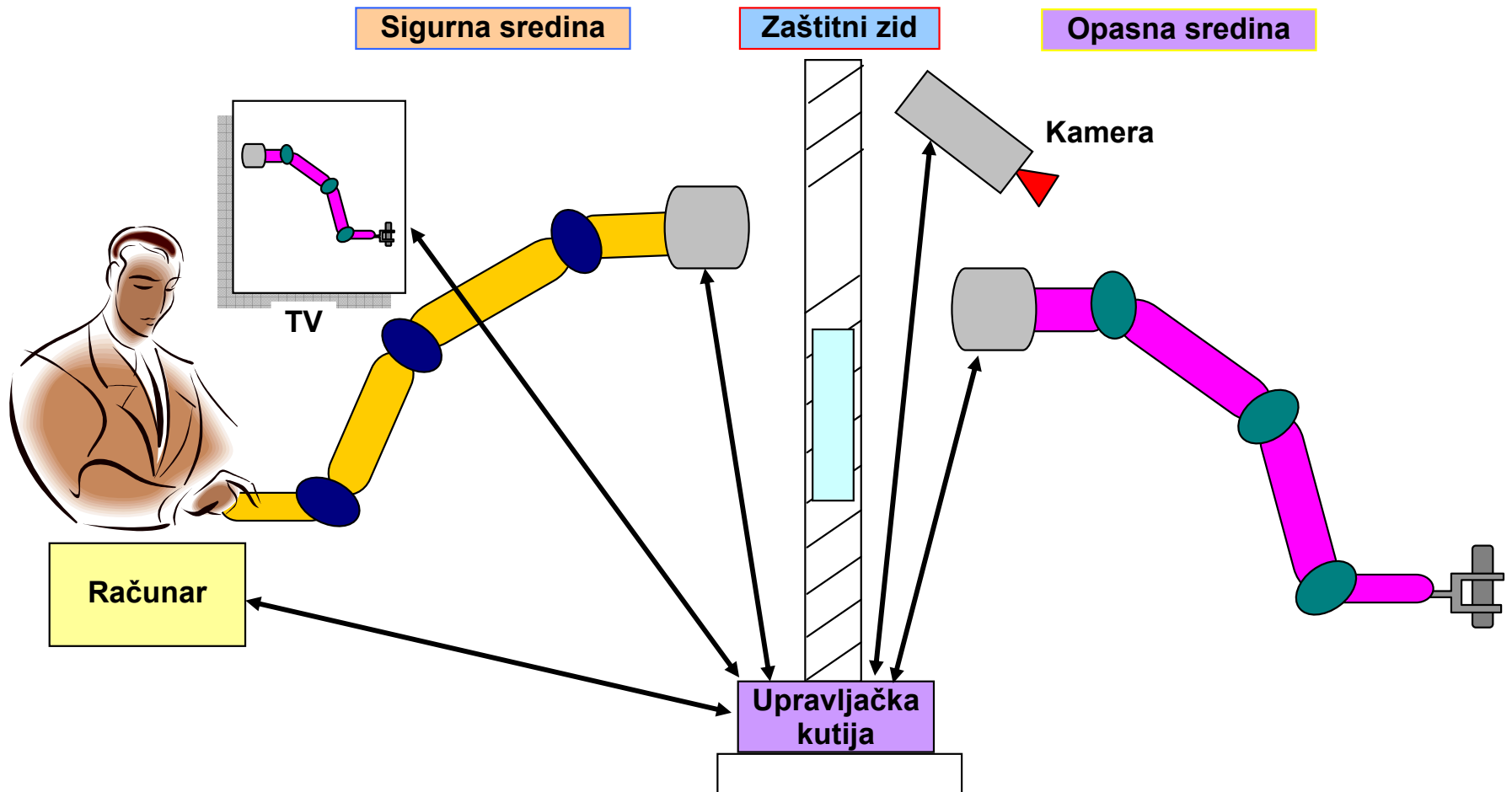
Sistemi daljinskog vođenja

- Telemanipulacija uz električni prijenos signala (od 1954).



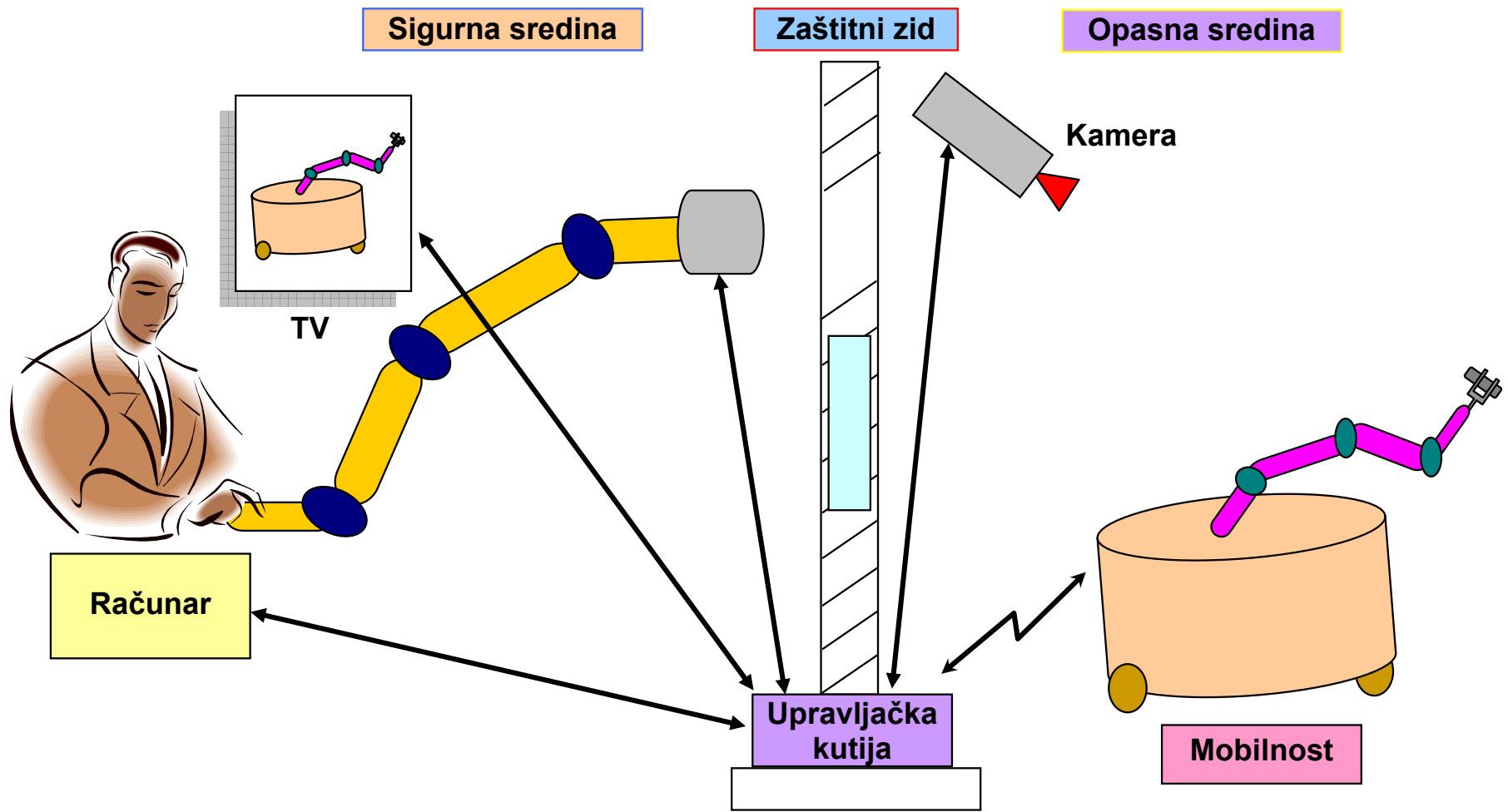
Sistemi daljinskog vođenja

- Telemanipulacija uz električni prijenos signala i vizuelnu povratnu vezu sistema kamera i monitora (od 1975).



Sistemi daljinskog vođenja

- Napredna teleoperacija (od 1985).



Sistemi daljinskog vođenja

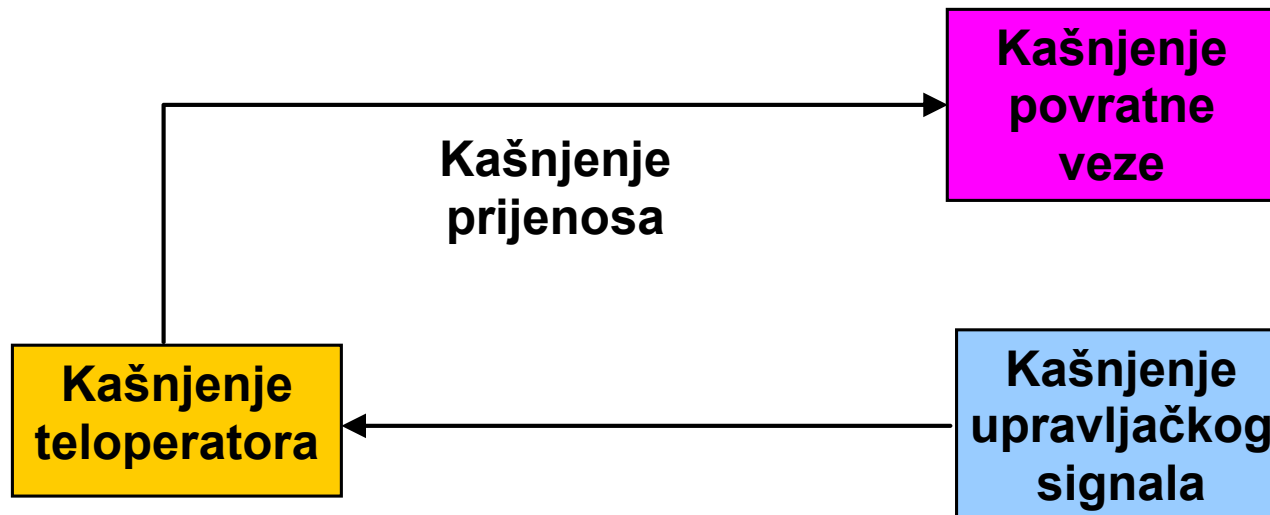
Primjene:

- Podvodna istraživanja.
- Svemirska istraživanja.
- Vojne primjene (podmornice, kopno, zrak, poluautonomna vozila, antiterorističke letjelice, itd.).
- Medicina (endoskopska hirurgija, telehirurgija – operiranje s udaljenih mjesta, itd.).
- Industrija (rudarstvo, radni strojevi, itd.)

Sistemi daljinskog vođenja

Problem kašnjenja:

- Kašnjenje u teleoperacijskoj petlji uvijek postoji.
- Svaki dio sistema ima neko kašnjenje.
- Digitalni sistemi povećavaju kašnjenje.
- Smanjenje utjecaja kašnjenja:
 - Primjena tehnika virtualne i proširene stvarnosti.
 - Povratna veza po sili sa algoritmima predikcije i kompenzacije kašnjenja.



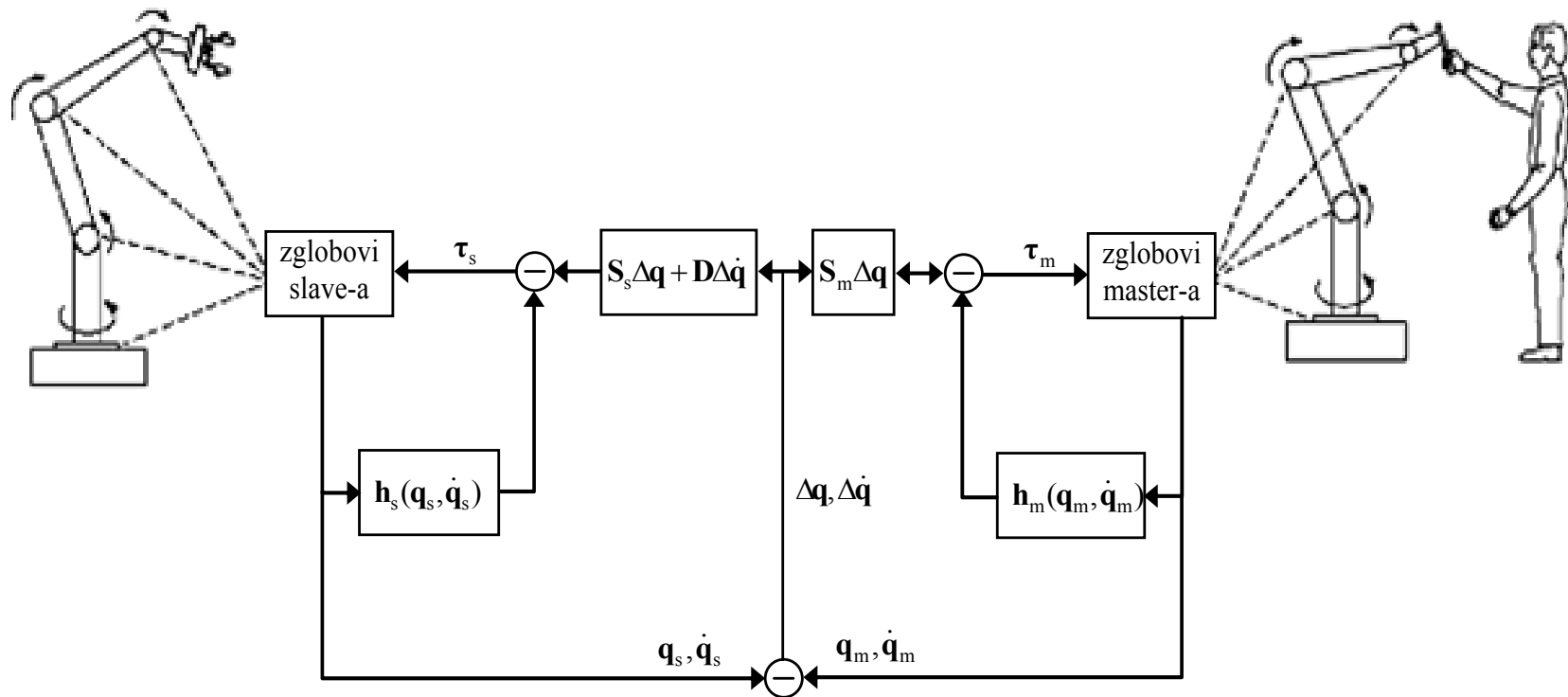
12.2. Bilateralni sistemi vođenja

Problemi kašnjenja u petlji sistema daljinskog vođenja

- ❑ Operator preko vodećeg (master) manipulatora upravlja udaljenim, pratećim (slave) manipulatorom.
- ❑ Poželjno je da na ruku operatora djeluje povratna sila proporcionalna sili u kontaktu pratećeg manipulatora i njegove okoline → **bilateralno daljinsko vođenje**.
- ❑ Na taj način operator ima bolji osjećaj o udaljenoj operaciji.
- ❑ Problem komunikacijskog kašnjenja → **može prouzrokovati nestabilnost sistema**.
- ❑ Nestabilnost se ne može pojaviti u vizuelnoj povratnoj vezi.

Bilateralni sistemi vođenja

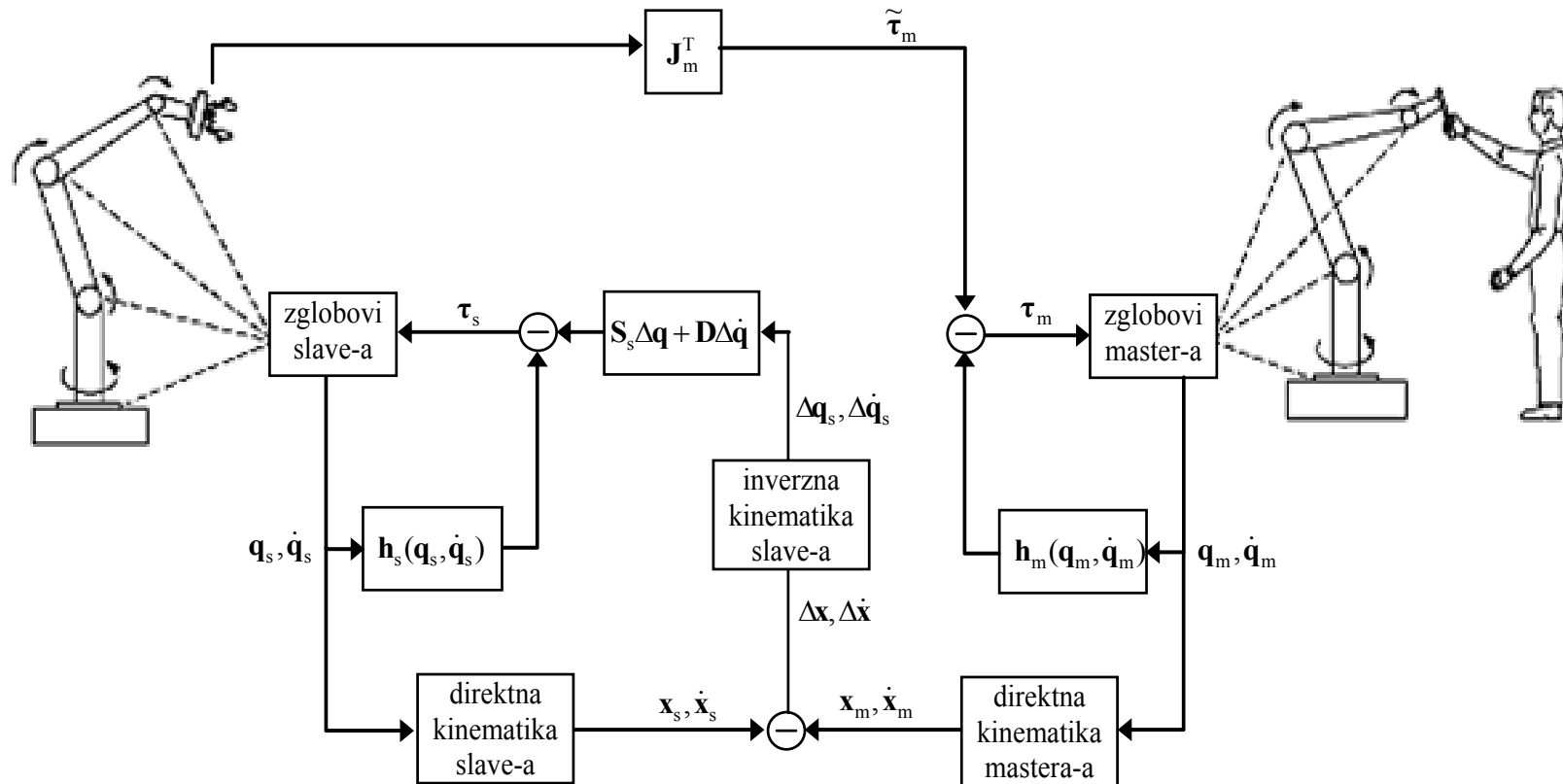
Bilateralno pozicijsko upravljanje



- ❑ Problemi koji se susreću kod bilateralnog sistema upravljanja pozicijom:
 - Operator osjeća silu pri svakom odstupanju u poziciji vodećeg i pratećeg manipulatora.
 - Neelastični sudari sa preprekama.

Bilateralni sistemi vođenja

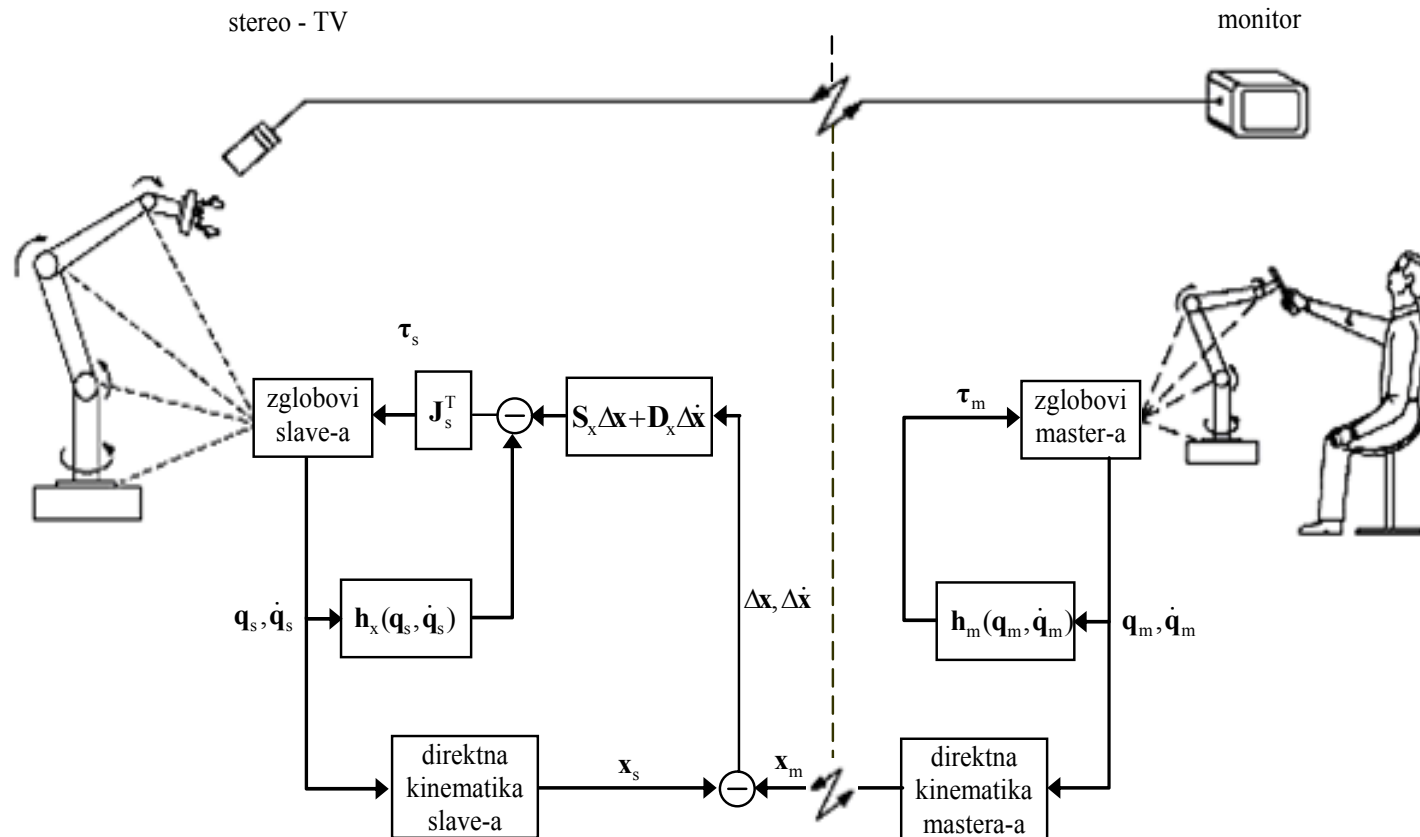
Bilateralno upravljanje silom



- ❑ Kod bilateralnog upravljanja silom problem može nastati kada je prateći manipulator udaljen tako da ga operator ne vidi.
- ❑ Problem se rješava dodavanjem vizuelne povratne veze.

Bilateralni sistemi vođenja

Bilateralno upravljanje sa vizuelnom povratnom vezom

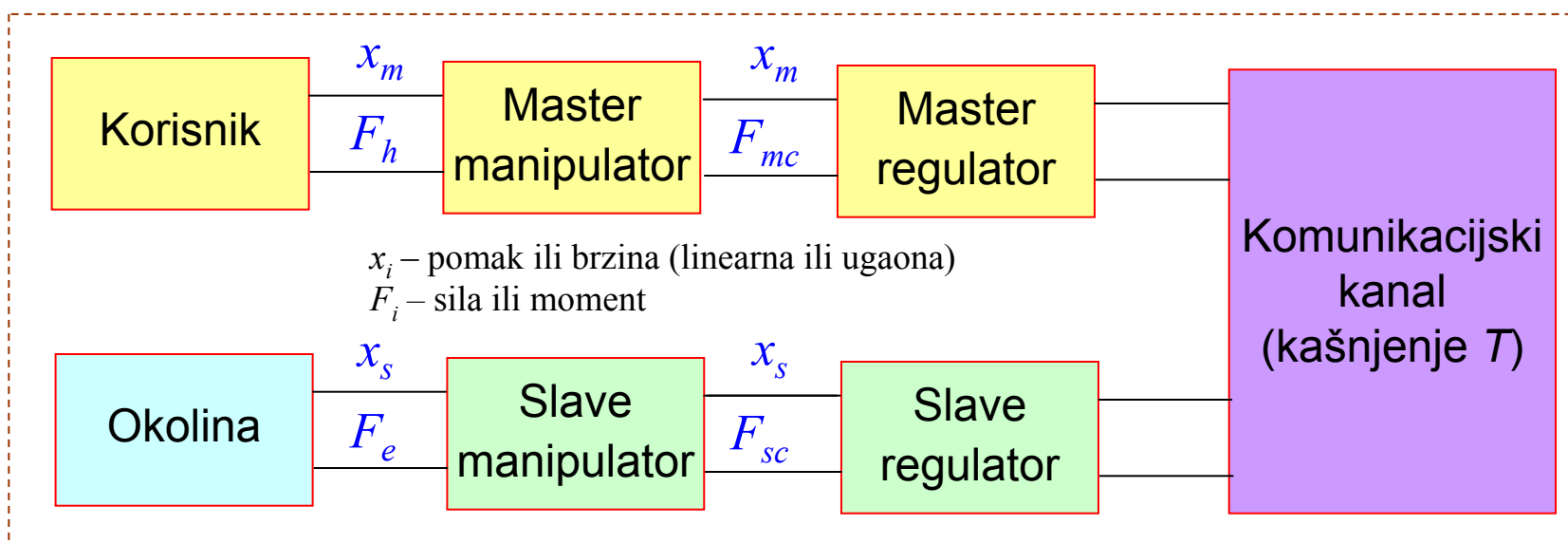
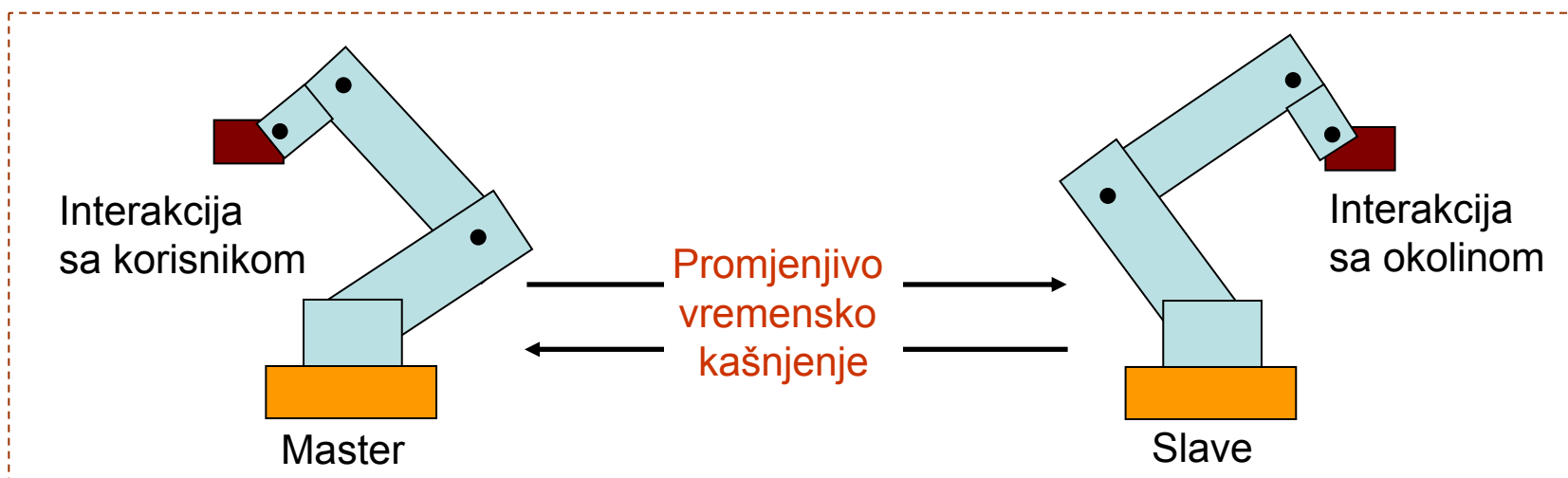


- U slučaju problema navedenog kod bilateralnog upravljanja po sili, rješenje predstavlja upravljanje impedancijom (pogledati sliku, gdje nema povratne veze po sili, nema senzora sile i vrh manipulatora reagira na vanjsku silu f (tzv. aktivno pokoravanje)

12.2. Bilateralni sistemi vođenja

Osnovna struktura bilateralnog vođenja

- “Master-slave” koncept (vodeći i prateći manipulatori)



Bilateralni sistemi vođenja

Osnovna struktura bilateralnog vođenja

- ❑ Zbog jednostavnosti manipulatori sa jednim stupnjem slobode.
- ❑ Jednadžbe kretanja vodećeg (master) i pratećeg (slave) manipulatora:

Master manipulator $\rightarrow J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = \tau_m$

Slave manipulator $\rightarrow J_s \ddot{\theta}_s + b_s \dot{\theta}_s = \tau_s$

J - moment tromosti
 b - faktor prigušenja
 $\ddot{\theta}$ - ubrzanje segmenta
 $\dot{\theta}$ - brzina segmenta
 τ - zakretni moment

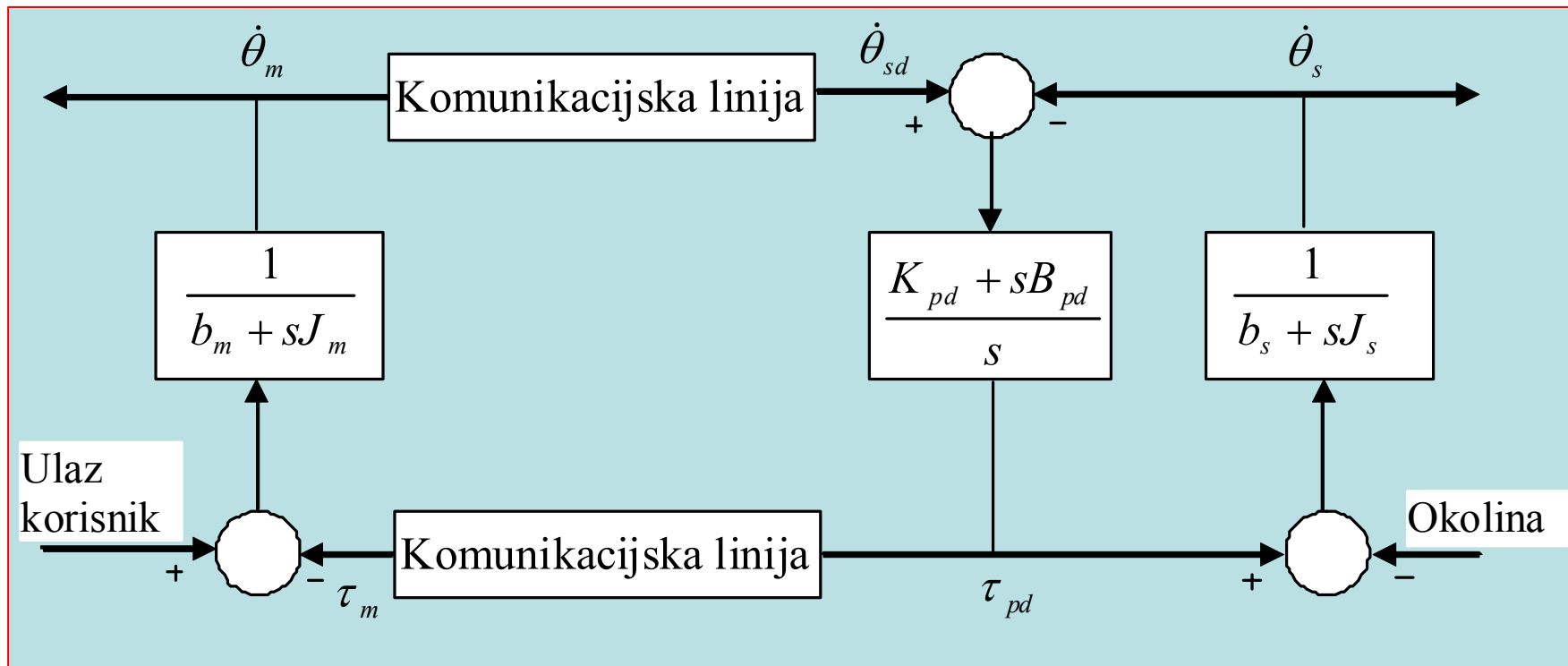
- ❑ Da bi prateći manipulator pratio vodeći primjenjuje se PD regulator:

$$\tau_{pd} = K_{pd} (\theta_m - \theta_s) + B_{pd} (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s)$$
$$\tau_m = -\tau_{pd}, \quad \tau_s = \tau_{pd}$$

τ_{pd} - zakretni moment dobiven iz regulatora,
 K_{pd} - pojačanje regulatora,
 B_{pd} - derivacijska konstanta regulatora.

Bilateralni sistemi vođenja

Osnovna struktura bilateralnog vođenja



- ❑ Ovaj sistem je stabilan samo ako je kašnjenje u komunikacijskoj mreži manje od nekog graničnog kašnjenja.
- ❑ Kada je $T=0$ sistem se ponaša dobro. Za veće T ponašanje sistema se pogoršava i za neko $T>0$ postaje nestabilan.

Bilateralni sistemi vođenja

Analiza stabilnosti

- ❑ Sistem je stabilan samo ako je kašnjenje u komunikacijskoj mreži manje od nekog graničnog kašnjenja → provesti analizu stabilnosti.

Prijenosna funkcija otvorenog kruga:

$$G_o(s) = \frac{(K_{pd} + B_{pd}s)(b_s + J_s s)}{(b_m + J_m s)(J_s s^2 + (b_s + B_{pd})s + K_{pd})} e^{-tT}$$

Karakteristična jednačina:

$$G_o(s) + 1 = 0$$



beskonačno rješenja.

Rješava se preko faznog uvjeta, tj za:

$$\hat{G}_o(s) = \frac{(K_{pd} + B_{pd}s)(b_s + J_s s)}{(b_m + J_m s)(J_s s^2 + (b_s + B_{pd})s + K_{pd})}$$

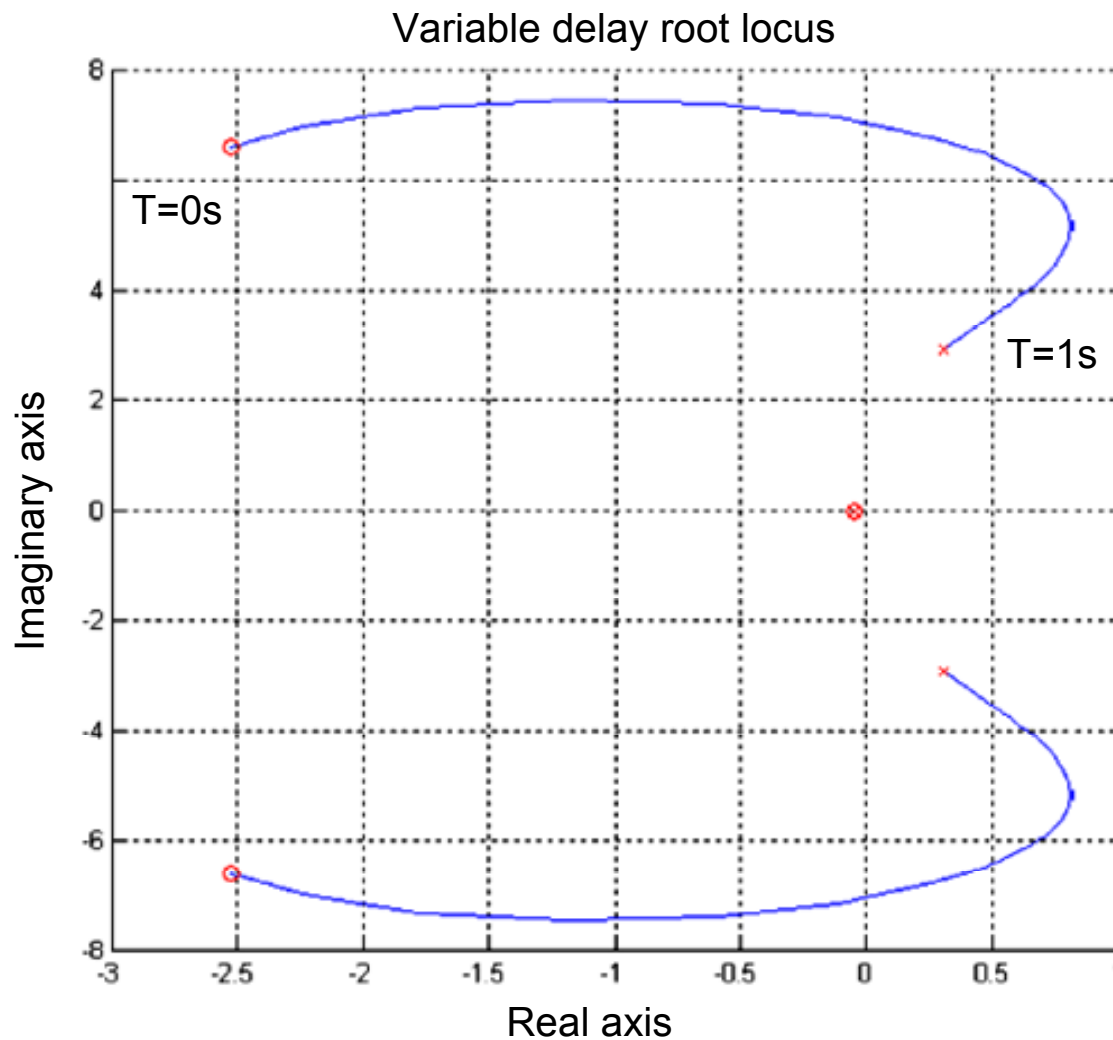
Karakteristična jednačina vrijedit će uz slijedeće uvjete:

$$|\hat{G}_o(s)| e^{-\sigma T} = 1$$

$$\angle \hat{G}_o(s) = \omega T + \pi + 2k\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Bilateralni sistemi vođenja

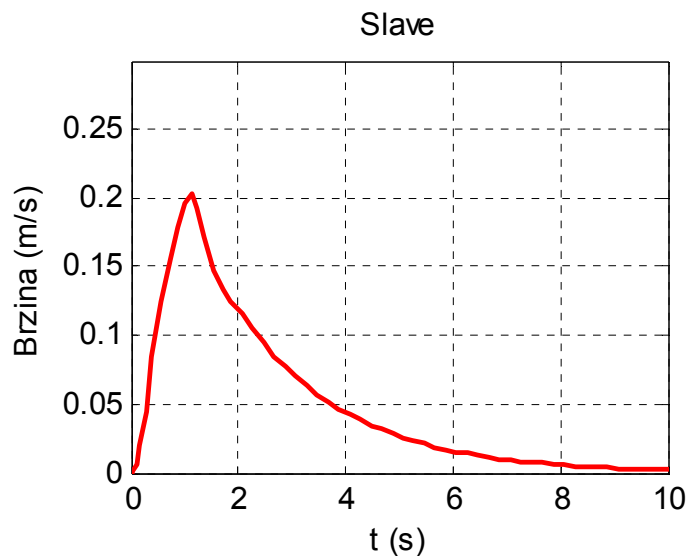
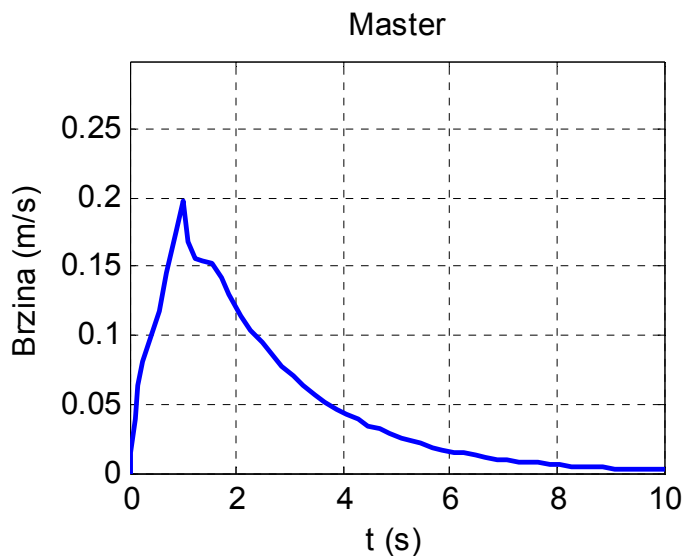
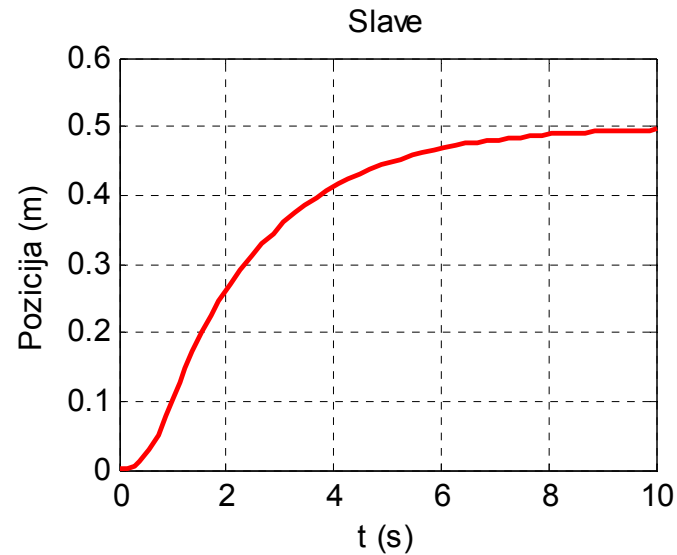
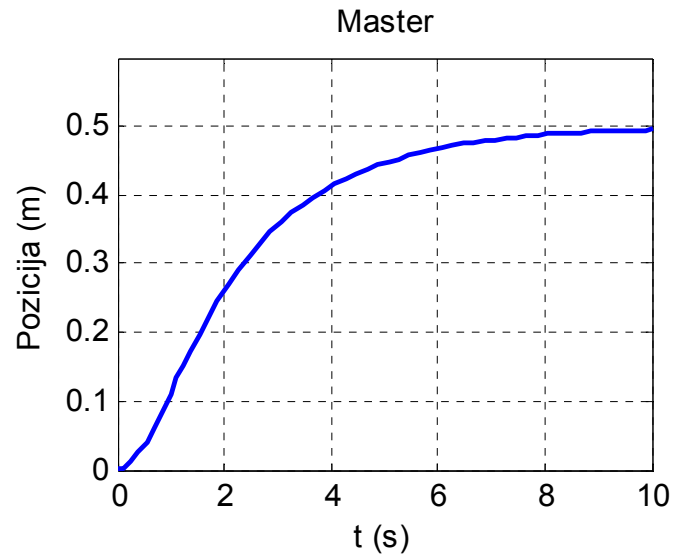
Analiza stabilnosti



Nacrtna je krivulja mjesta korijena samo za $k=0$.
Za veće T sistem postaje nestabilan.
Potrebno je na neki način kompenzirati kašnjenje.

Bilateralni sistemi vođenja

Primjer 1. Bilateralni sistem bez kašnjenja



Parametri:

$$J_m = J_s = 2 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$$

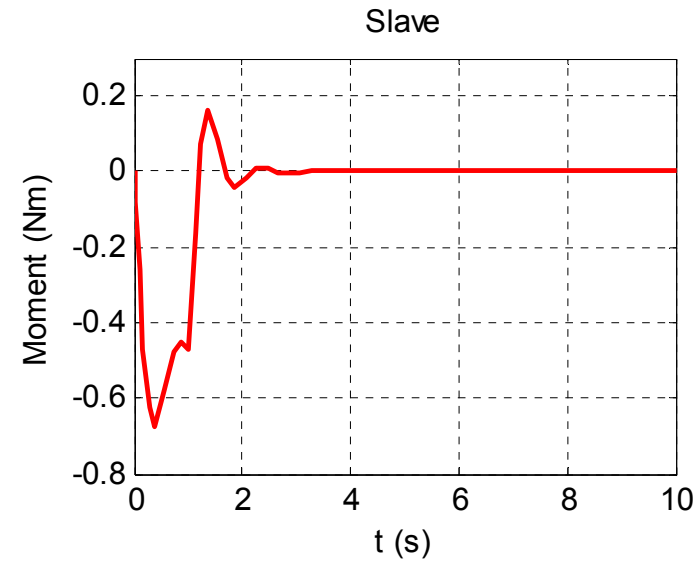
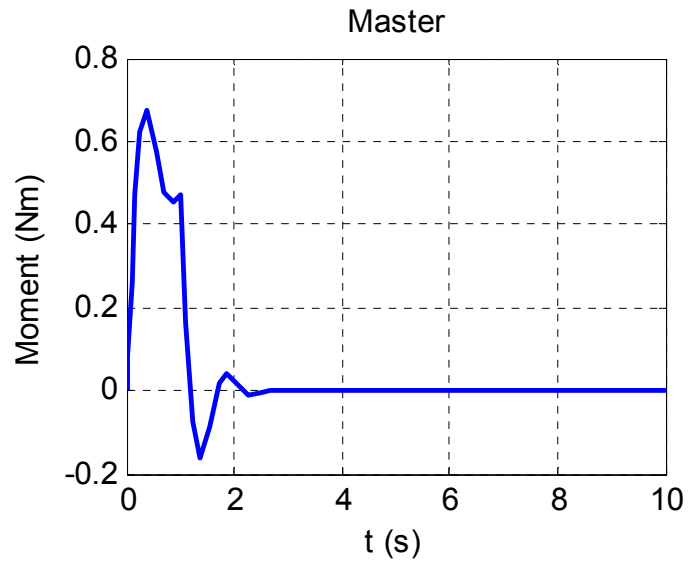
$$b_m = b_s = 1 \text{ Kg}\cdot\text{m/s}$$

$$T = 0 \text{ s.}$$

- Početne brzine mastera i slave-a, kao i početni uglovi vodećeg i pratećeg manipulatora jednaki su nuli.
- Korisnik djeluje na vodeći manipulator momentom iznosa 1 Nm u trajanju od 1 sekunde.

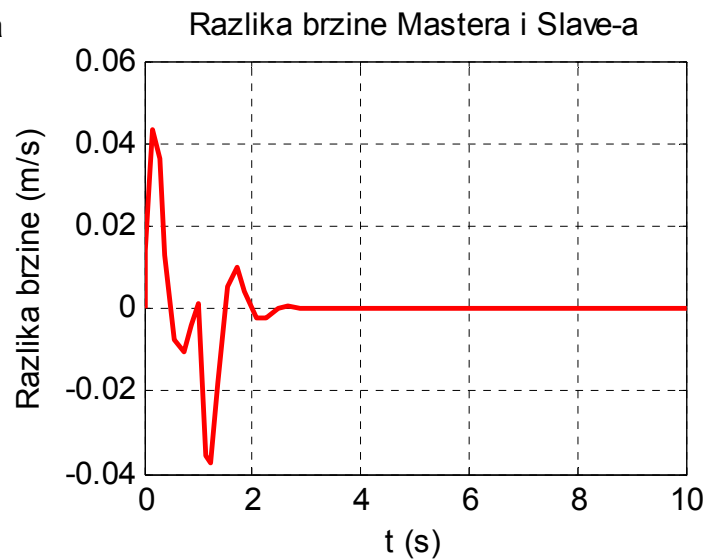
Bilateralni sistemi vođenja

Primjer 1. Bilateralni sistem bez kašnjenja



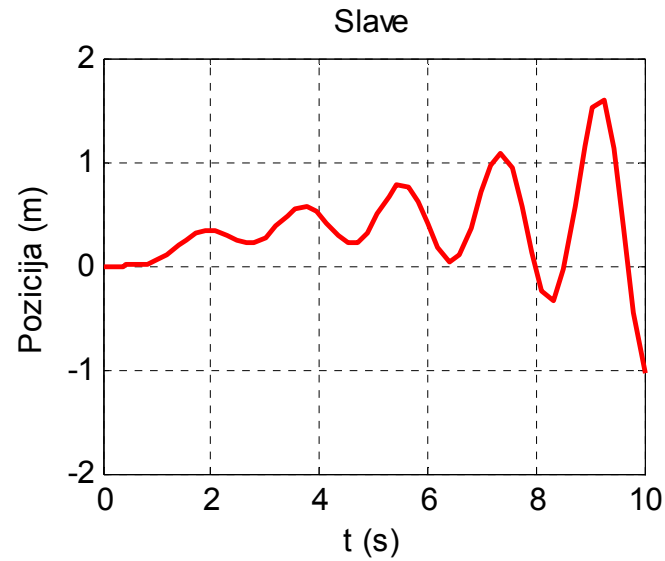
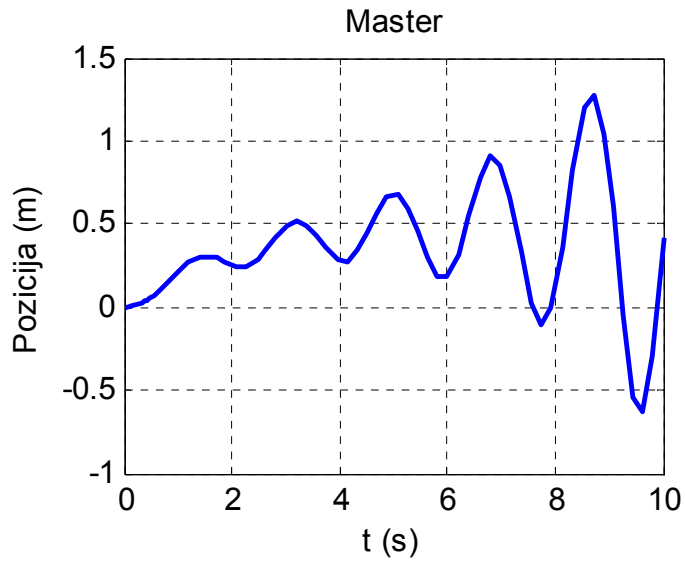
Rezultati:

- Sistem stabilan.
- Prijelazni proces završio za otprilike 2 s.



Bilateralni sistemi vođenja

Primjer 2. Bilateralni sistem sa kašnjenjem

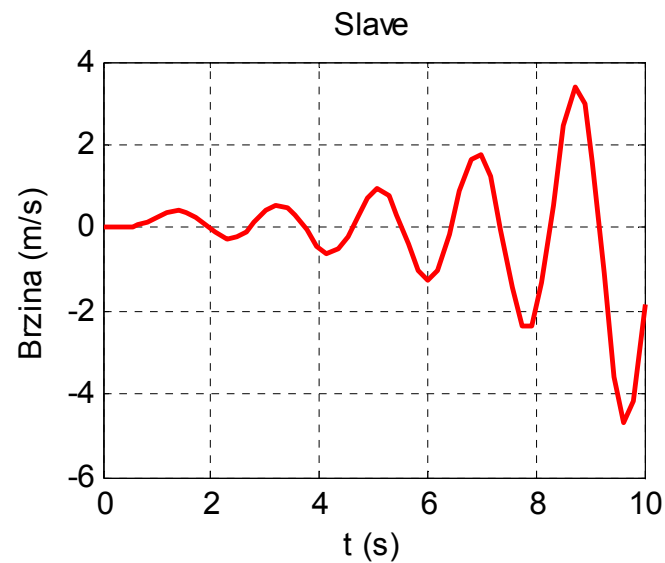
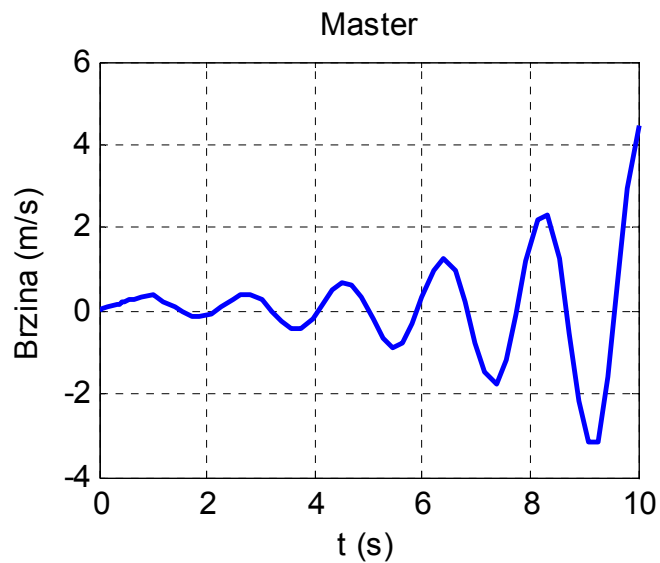


Parametri:

Kao u primjeru 1 i $T=400$ ms.

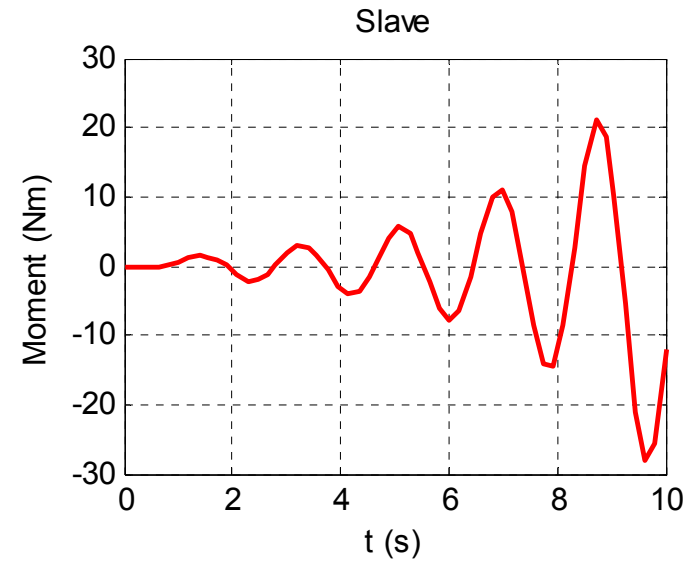
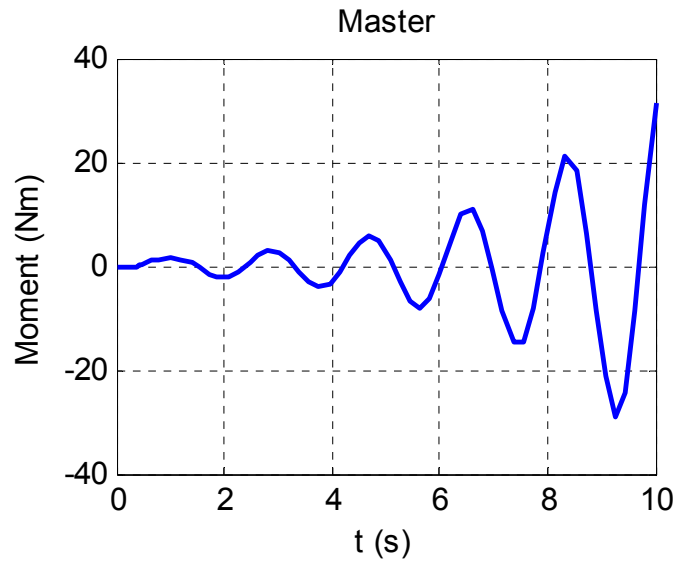
Rezultat:

Sistem postao nestabilan.



Bilateralni sistemi vođenja

Primjer 2. Bilateralni sistem sa kašnjenjem



12.3. Koncept pasivnosti sistema

Bilateralno vođenje sa kašnjenjem temeljeno na valnim varijablama

- ❑ Opisani sistem bilateralnog vođenja može se učiniti pasivnim (stabilnim) za proizvoljan iznos komunikacijskog kašnjenja T , ako se komunikacija između vodećeg i pratećeg manipulatora ostvaruje u prostoru valnih varijabli (jednadžbi).
- ❑ Valne varijable predstavljaju proširenje teorije pasivnosti.
- ❑ Razlog njihovog uvođenja jest u utjecaju na uvjet pasivnosti sistema.
- ❑ Sistem je pasivan ako je energija dovedena u njega veća ili jednaka od energije koju on daje na svom izlazu.
- ❑ Slijedi da je sistem (semi)disipativan, odnosno sistem je stabilan.
- ❑ U slučaju bilateralnog upravljanja to znači da snaga (sila*brzina) koju vodeći manipulator šalje pratećem mora biti jednaka ili veća od snage (sila*brzina) koju mu prateći manipulator vraća.
- ❑ Ako je prateći sistem pasivan, treba osigurati da i komunikacijski kanal bude pasivan i cjelokupni sistem će biti stabilan, a što se osigurava primjenom valnih jednadžbi.

Koncept pasivnosti sistema

Opis koncepta pasivnosti sistema

- ❑ Formalizam pasivnosti predstavlja matematički opis intuitivnog fizičkog koncepta snage i energije.
- ❑ Omogućuje jednostavan i robusan alat za analizu stabilnosti nelinearnih sistema i dozvoljava povezivanje sa drugim sistemima dok su zadovoljena svojstva globalne stabilnosti.
- ❑ U nastavku se opisuje formalizam pasivnosti.

Uvjet pasivnosti sistema:

$$\mathbf{P} = \mathbf{x}^T \mathbf{y} = \frac{dE}{dt} + P_{diss}$$

\mathbf{x} - ulazni vektor sistema,

\mathbf{y} - izlazni vektor sistema,

\mathbf{P} - ulazna snaga u sistem. Ne odgovara nužno fizikalnoj snazi, važno je da varijable \mathbf{x} i \mathbf{y} imaju istu dimenziju.

- ❑ Ulazna snaga se pohranjuje ili disipira u sistemu.
- ❑ Sistem ne može generirati energiju, osigurava samo koliko je ima inicijalno.

Koncept pasivnosti sistema

Opis koncepta pasivnosti sistema

- ❑ Pasivnost se češće izražava preko energije (predznak “-” označava ulaznu energiju):

$$\int_0^t P d\tau = E(t) - E(0) + \int_0^t P_{diss} d\tau \geq -\int_0^t P d\tau \geq E(0) = \text{konst} , \quad \forall t \geq 0$$

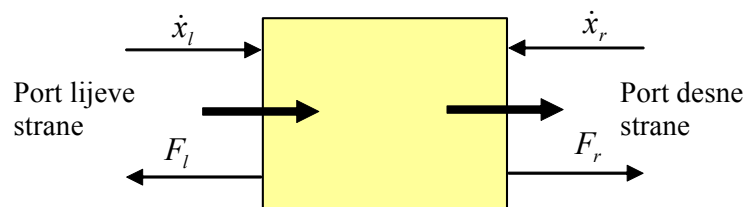
- ❑ Ako je disipirana snaga cijelo vrijeme jednaka nuli, sistem gubi energiju.
- ❑ Suprotno, ako je disipirana snaga pozitivna jednako dugo kao i pohranjena energija, tada neće doseći svoju donju granicu, odnosno sistem je striktno pasivan.
- ❑ Korištenjem pohranjene energije kao Lypunov-ljeve funkcije, može se analizirati stabilnost sistema.
- ❑ Lahko se pokaže da bez djelovanja vanjskog ulaza pasivni sistem je stabilan.
- ❑ Asimptotska stabilnost se postiže za striktno pasivan sistem, pretpostavljajući da pohranjena energija ovisi (pozitivno) o svim stanjima sistema.

Koncept pasivnosti sistema

Kombinacija pasivnih elemenata – tok snage dvoportnih sistema

- Općenito se snaga označava kao pozitivna ukoliko se unosi u sistem i povećava pohranjenu energiju sistema.

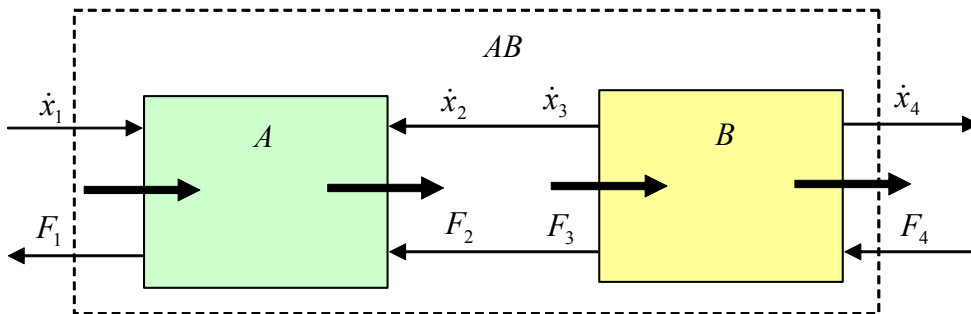
Dvoulazni sistem



Ukupan tok snage:

$$P = \dot{x}_l^T F_l - \dot{x}_r^T F_r$$

Kaskada pasivnih elemenata



Ukupan tok snage:

$$\begin{aligned} P &= \dot{x}_1^T F_1 - \dot{x}_4^T F_4 \\ &= \dot{x}_1^T F_1 - \dot{x}_2^T F_2 + \dot{x}_3^T F_3 - \dot{x}_4^T F_4 \\ &= \frac{dE^A}{dt} + P_{diss}^A + \frac{dE^B}{dt} + P_{diss}^B = \frac{dE^{AB}}{dt} + P_{diss}^{AB} \end{aligned}$$

Funkcije pohranjenje energije i disipativne snage kombinacije sistema:

$$\begin{aligned} E^{AB} &= E^A + E^B \\ P_{diss}^{AB} &= P_{diss}^A + P_{diss}^B \end{aligned}$$

→ Sistem dobiven kaskadnim povezivanjem dva pasivna sistema također pasivan

Koncept pasivnosti sistema

Valne varijable i razdvajanje valova (Wave Scattering)

- Teorija razdvajanja valova (wave scattering) je usko povezana sa formulacijom pasivnosti.
 - Tok energije razdvaja se u dva dijela, koji predstavljaju ulaznu, odnosno izlaznu snagu sistema.
 - Nakon toga se ova dva dijela pridružuju ulaznim i izlaznim valovima.
 - Ovo je motivirano fizikalnim konceptom valova, a može se primijeniti na bilo koji nelinearni sistem.
- U teoriji razdvajanja valova, valovi se interpretiraju na slijedeći način (dvoulazni sistem):

$$\mathbf{P} = \dot{\mathbf{x}}_l^T \mathbf{F}_l - \dot{\mathbf{x}}_r^T \mathbf{F}_r = \frac{1}{2} \mathbf{u}_l^T \mathbf{u} - \frac{1}{2} \mathbf{v}_l^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} \mathbf{u}_r^T \mathbf{u} - \frac{1}{2} \mathbf{v}_r^T \mathbf{v}$$

gdje su \mathbf{u}_l i \mathbf{u}_r , odnosno \mathbf{v}_l i \mathbf{v}_r , ulazni, odnosno izlazni valovi.

Ovi vektori povećavaju protok snage u sistemu.

Koncept pasivnosti sistema

Transformacije između energetske i valnih varijabli

- Transformacija energetske varijabli (\dot{x}, F) u valne varijable (u, v) :

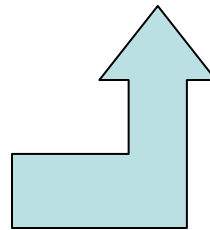
$$\begin{aligned} u_l &= \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_l + b\dot{x}_l), & u_r &= \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_r - b\dot{x}_r) \\ v_l &= \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_l - b\dot{x}_l), & v_r &= \frac{1}{\sqrt{2b}}(F_r + b\dot{x}_r) \end{aligned}$$

b – striktno pozitivan parametar i može se proizvoljno odabrati, definira *karakterističnu impedanciju* koja je pridružena valnim varijablama i koja direktno djeluje na ponašanje sistema.

$$b\dot{x}F = \frac{b}{2}(u - v) \cdot (u + v)$$

$$b\dot{x} = \sqrt{\frac{b}{2}}(u - v)$$

$$F = \sqrt{\frac{b}{2}}(u + v)$$



- Transformacija valnih varijabli u energetske varijable:

$$\begin{aligned} F_l &= \sqrt{\frac{b}{2}}(u_l + v_l), & F_r &= \sqrt{\frac{b}{2}}(u_r + v_r) \\ \dot{x}_l &= \frac{1}{\sqrt{2b}}(u_l - v_l), & \dot{x}_r &= -\frac{1}{\sqrt{2b}}(u_r - v_r) \end{aligned}$$

Koncept pasivnosti sistema

Transformacije između energetske i valnih varijabli

- Osim toga, svaki port je jednoznačno određen ako su specificirane jedna valna i jedna energetska varijabla. Ako su zadane sile F_l i $F_r \rightarrow$ valne transformacije:

$$\begin{aligned} u_l &= \sqrt{\frac{2}{b}} F_l - v_l, & u_r &= \sqrt{\frac{2}{b}} F_r - v_r \\ \dot{x}_l &= \frac{1}{b} (F_l - \sqrt{2b} v_l), & \dot{x}_r &= -\frac{1}{b} (F_r - \sqrt{2b} v_r) \end{aligned}$$

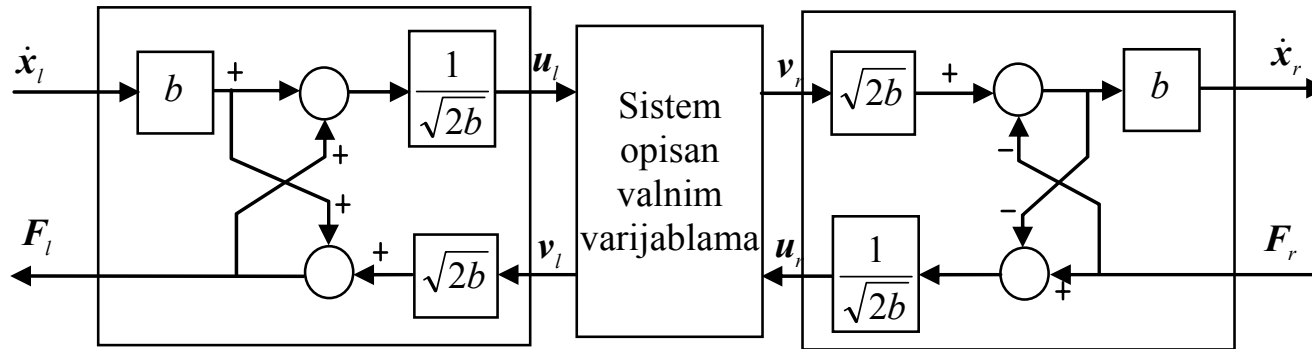
- Ako su dane brzine portova tada se valne transformacije mogu napisati kao:

$$\begin{aligned} u_l &= \sqrt{2b} \dot{x}_l + v_l, & u_r &= -\sqrt{2b} \dot{x}_r + v_r \\ F_l &= b \dot{x}_l + \sqrt{2b} v_l, & F_r &= -b \dot{x}_r + \sqrt{2b} v_r \end{aligned}$$

- Posebno, moguće je specificirati upravljačke brzine na jednom portu koje će proizvesti upravljačke sile na drugom portu. Slijedeća slika prikazuje grafički valne transformacije kada su \dot{x}_l i F_r zadani.

Koncept pasivnosti sistema

Transformacije između energetske i valne varijable



- Povezivajući teorije razdvajanja valova i pasivnosti može se reći da je sistem pasivan ako je energija dobivena na valnim izlazima ograničena sa energijom primljenom preko valnih ulaza, tj.

$$\int_0^t \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} \leq \int_0^t \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{u}$$

- Zadovoljeno kada je amplituda izlaznog vala ograničena amplitudom zakašnjelog ulaznog vala. Dakle, može se uključiti proizvoljno kašnjenje u sistemima opisanih valnim varijablama u pasivnom obliku. Ovo je jedna od fundamentalnih karakteristika ovog pristupa.
- Kada $t \rightarrow \infty$ omjer izlazne i ulazne energije je određen sa H_∞ normom sistema. Ovim je omogućeno povezivanje konceptata razdvajanja valova i pasivnosti u teorem malog pojačanja, koji kaže *da je zatvoreni sistem stabilan ako je H_∞ otvorenog sistema ograničena na jediničnu vrijednost.*

Koncept pasivnosti sistema

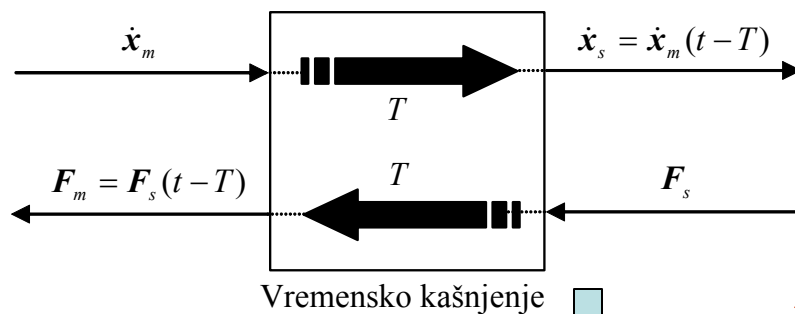
Komunikacija sa vremenskim kašnjenjem

- ❑ Komunikacijski elementi u teleoperacijskom sistemu povezuju lokalne i udaljene sisteme i zatvaraju sve upravljačke petlje.
- ❑ Zbog toga je tipično uvesti vremenska kašnjenja koja mogu biti uzrokovana vremenom fizičkog prijenosa ili ograničenjima komunikacijskog propusnog pojasa (brzina prijenosa).
- ❑ Međutim, tip podataka koji se prenose može biti proizvoljno odabran što će imati prilično jak utjecaj na ponašanje i stabilnost cjelokupnog sistema.
- ❑ Posebno se mogu postaviti zahtjevi za prijenos koji će omogućiti stabilnu teleoperaciju temeljeno na povratnoj vezi po sili dodira sa proizvoljnim vremenskim kašnjenjem.
- ❑ Uvođene vremenskog kašnjenja dovodi u nestabilnost mnoge zatvorene sisteme upravljanja, što se može vidjeti na faznoj rezervi u linearnoj teoriji upravljanja.
- ❑ Kod teleoperacija sa povratnim vezama po sili, ovakva kašnjenja se mogu pojaviti u komunikaciji između lokalne i udaljene strane.
- ❑ Kako je poznato od ranije, malo kašnjenje može dovesti do nestabilnosti sistema. Ova osobina važi i za komunikacijske sisteme i ne ovisi o pojedinačnom regulatoru ili hardverskoj konfiguraciji.
- ❑ Korištenjem teorije pasivnosti moguće je odvojiti komunikacije od ostalog dijela sistema i pokazati kako se pojavljuje nestabilnost kao posljedica vremenskog kašnjenja.

Koncept pasivnosti sistema

Standardna komunikacija

- Standardne komunikacije između lokalnih i udaljenih strana opisane su sa 2-portnim sistemima, gdje je jedan port povezan sa lokalnim regulator/manipulatorom a drugi sa udaljenim sistemom.
- Tipično, struktura ovog elementa je takva da se lokalna brzina prenosi na udaljenu stranu gdje postaje naredba brzine. Simultano, udaljena sila se šalje nazad lokalnoj strani osiguravajući željenu naredbu sile.



Komunikacija:

$$\dot{x}_s = \dot{x}_m(t-T)$$

$$F_m = F_s(t-T)$$

Brzina promjene energije

$$\frac{d}{dt} E = P - P_{diss}$$

$$P = \dot{x}_m(t)F_m(t) - \dot{x}_s(t)F_s(t)$$

$$= \frac{1}{2b}F_m^2(t) + \frac{b}{2}\dot{x}_m^2(t) - \frac{1}{2b}(F_m - b\dot{x}_m)^2(t) \quad \text{Tok snage}$$

$$+ \frac{1}{2b}F_s^2(t) + \frac{b}{2}\dot{x}_s^2(t) - \frac{1}{2b}(F_s + b\dot{x}_s)^2(t)$$

$$= \frac{1}{b}F_m^2(t) - \frac{1}{2b}(F_m - b\dot{x}_m)^2(t) + b\dot{x}_s^2(t) - \frac{1}{2b}(F_s + b\dot{x}_s)^2(t) \quad P_{diss}$$

$$+ \frac{d}{dt} \int_{t-T}^t \left(\frac{b}{2}\dot{x}_m^2(\tau) + \frac{1}{2b}F_s^2(\tau) \right) d\tau \quad E$$

$$P_{diss} > 0 \text{ - sistem pasivan}$$

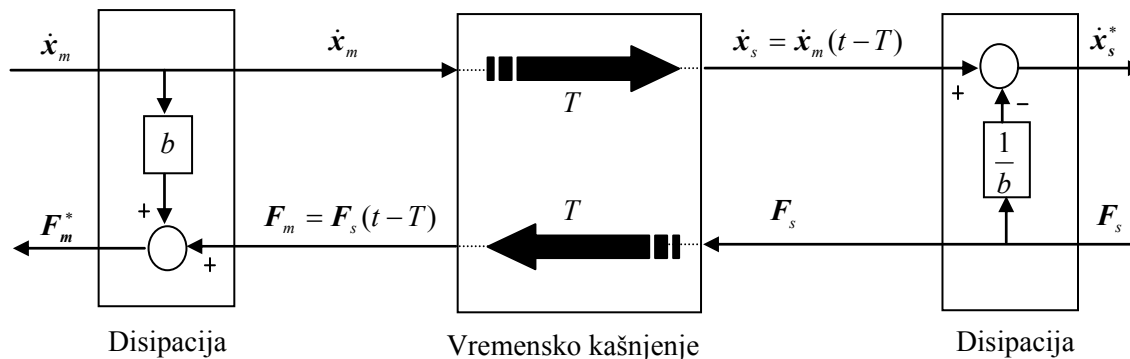
$$P_{diss} < 0 \text{ - sistem nestabilan.}$$

Moguće $P_{diss} < 0$ - problem!!!

Koncept pasivnosti sistema

Pasivizacija sistema bez valnih varijabli

- U prethodnom dijelu vidjelo se da standardna komunikacija može unijeti neodređen iznos energije u sistem i učiniti ga nestabilnim.
- Ovaj problem se može zaobići postavljajući disipativne elemente direktno na slijedeću komunikaciju, garantirajući svojstva pasivnosti bez obzira na kašnjenje i ostatak sistema.



Tok snage:

$$\begin{aligned}
 P &= \dot{x}_m(t) F_m^*(t) - \dot{x}_s^*(t) F_s(t) \\
 &= \frac{1}{b} F_m^2(t) - \frac{1}{2b} (F_m - b\dot{x}_m)^2(t) + b\dot{x}_s^2(t) \\
 &\quad - \frac{1}{2b} (F_s + b\dot{x}_s)^2(t) \\
 &\quad + \frac{d}{dt} \int_{t-T}^t \left(\frac{b}{2} \dot{x}_m^2(\tau) + \frac{1}{2b} F_s^2(\tau) \right) d\tau \\
 &\quad + b\dot{x}_m^2(t) + \frac{1}{2b} F_s^2(t) \\
 &= \frac{1}{2b} F_m^{*2}(t) + \frac{b}{2} \dot{x}_s^{*2}(t) \\
 &\quad + \frac{d}{dt} \int_{t-T}^t \left(\frac{b}{2} \dot{x}_m^2(\tau) + \frac{1}{2b} F_s^2(\tau) \right) d\tau
 \end{aligned}$$

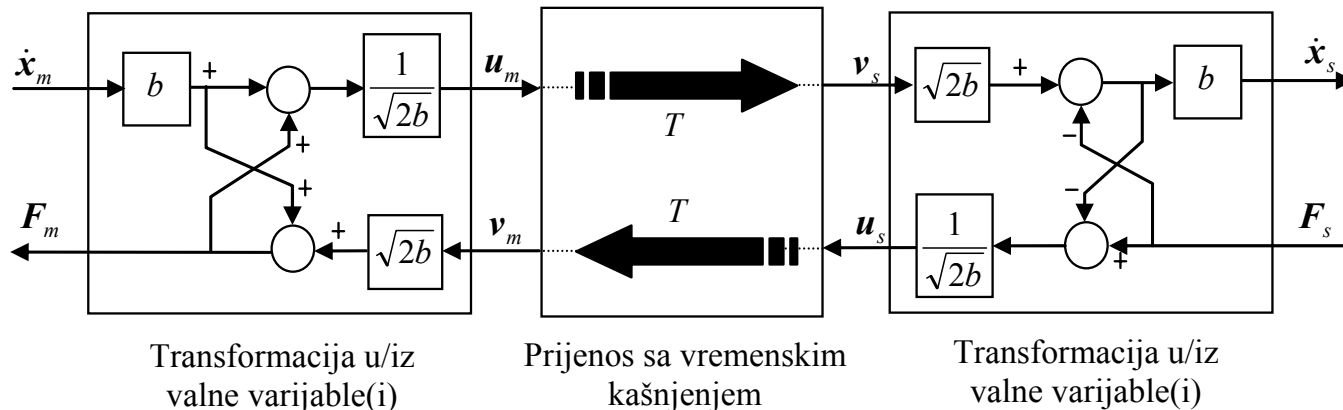
$P_{diss} > 0$, uz \dot{x}_s^* i $F_m^* \neq 0$ \Rightarrow Pasivna komunikacija

- Međutim, nije prihvatljivo da u mirovanju uz konstantnu silu teče energija u sistem.
- Ako sila ne teče (energija) tada operator ne osjeća silu okoline.
- Osim toga, disipacija modificira naredbu brzine, kada se reflektira sila, što dovodi do pomaka položaja pratećeg robota u odnosu na vodeći.

Koncept pasivnosti sistema

Pasivizacija sistema valnim varijablama

- Teorija razdvajanja se temelji na ideji propagacije valova i omogućuju formiranje komunikacijskih procedure koje oponašaju prijenosne linije bez gubitaka, zadržavajući pasivnost uprkos vremenskom kašnjenju.
- Koristeći definicije razdvajanja valova može se uočiti da se pasivna komunikacija može postići *direktnim prijenosom valnih varijabli umjesto energetske varijabli*.



$$v_m(t) = u_s(t - T),$$

$$v_s(t) = u_m(t - T)$$

Tok snage:

$$P = \frac{1}{2} u_m^2(t) - \frac{1}{2} v_m^2(t) + \frac{1}{2} u_s^2(t) - \frac{1}{2} v_s^2(t)$$

$$= \frac{1}{2} u_m^2(t) - \frac{1}{2} u_s^2(t - T) + \frac{1}{2} u_s^2(t) - \frac{1}{2} u_m^2(t - T)$$

$$= \frac{d}{dt} \left[\int_{t-T}^t \left(\frac{1}{2} u_m^2(\tau) + \frac{1}{2b} u_s^2(\tau) \right) d\tau \right]$$

- Dakle ovo je pasivna komunikacija bez gubitaka sa pozitivnom funkcijom pohranjene energije.
- Drugim riječima, komunikacijski kanal je *pasivan i bez gubitaka*, a pohranjena energija je pozitivna i rezultat je integracije snage valova tokom prijenosa.
- Pri tome svojstvo pasivnosti je u cijelosti neovisno o stvarnom vremenskom kašnjenju (T).

Koncept pasivnosti sistema

Pasivizacija sistema valnim varijablama

- Povratkom u energijske varijable, jednačbe prijenosa postaju:

$$\frac{1}{\sqrt{2b}}[\mathbf{F}_m - b\dot{\mathbf{x}}_m](t) = \frac{1}{\sqrt{2b}}[\mathbf{F}_s - b\dot{\mathbf{x}}_s](t - T)$$
$$\frac{1}{\sqrt{2b}}[\mathbf{F}_s + b\dot{\mathbf{x}}_s](t) = \frac{1}{\sqrt{2b}}[\mathbf{F}_m + b\dot{\mathbf{x}}_m](t - T)$$

odnosno

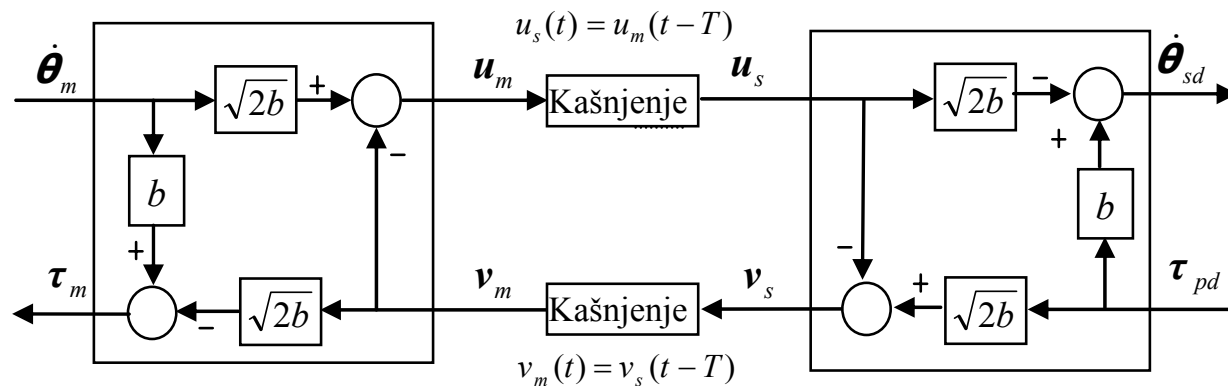
$$\mathbf{F}_m(t) = \mathbf{F}_s(t - T) + b(\dot{\mathbf{x}}_m(t) - \dot{\mathbf{x}}_s(t - T))$$
$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = \dot{\mathbf{x}}_m(t - T) - \frac{1}{b}(\mathbf{F}_s(t) - \mathbf{F}_m(t - T))$$

- Ovi rezultati pokazuju da sa prijenosom valnih varijabli umjesto energetskih varijabli (sila i brzina), *čuvanje ukupne stabilnosti ne zahtijeva poznavanje vremenskog kašnjenja T .*
- Osim toga, korištenje koncepta valnih varijabli omogućuje proširenje mnogih područja.
- Konačno, treba potcrtati da kada je stvarno vrijeme kašnjenja smanjeno na nulu, prijenos valnih varijabli je identično prijenosu energetskih varijabli. Tako gornja procedura osigurava prirodnu robusnost na vremenska kašnjenja sistema.

Koncept pasivnosti sistema

Pasivizacija sistema valnim varijablama

- Primjenom teorije valnih varijabli standardni komunikacijski kanal se transformira u *valni komunikacijski kanal*.
- U slučaju bilateralnog upravljanja robotskim manipulatorom – slika ispod



- Prijelaz sa energetske varijable $(\dot{\theta}, \tau)$ na valne varijable (u, v) dan je slijedećim izrazima:

$$u_m(t) = \frac{b\dot{\theta}_m(t) + \tau_m(t)}{\sqrt{2b}}$$

$$v_m(t) = \frac{b\dot{\theta}_m(t) - \tau_m(t)}{\sqrt{2b}}$$

$$u_s(t) = \frac{b\dot{\theta}_{sd}(t) + \tau_{pd}(t)}{\sqrt{2b}}$$

$$v_s(t) = \frac{b\dot{\theta}_{sd}(t) - \tau_{pd}(t)}{\sqrt{2b}}$$

- U nastavku se provodi analiza pasivnosti u Laplace-ovom području uz korištenje operatora razdvajanja.

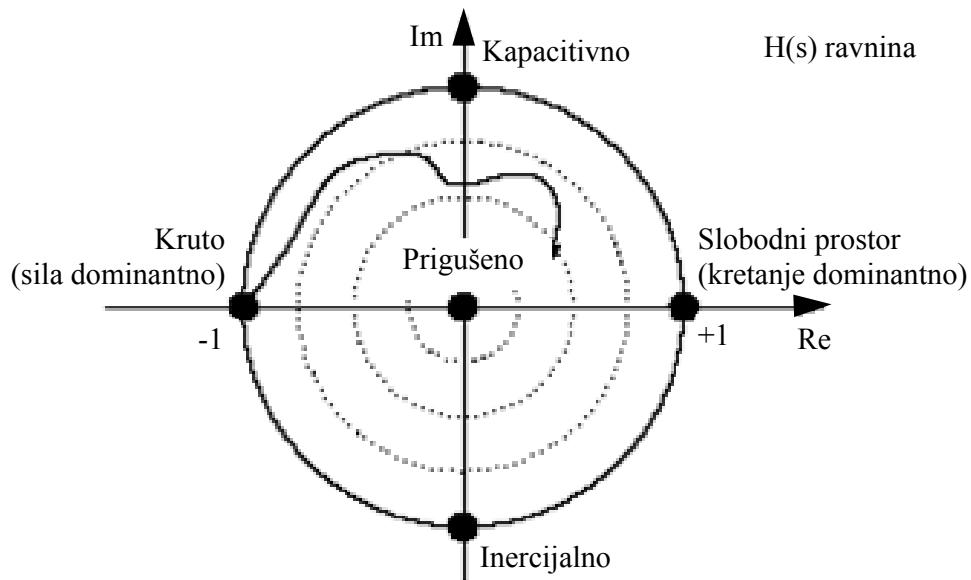
Koncept pasivnosti sistema

Analiza pasivnosti

- Za LTI sisteme, odzivi valova mogu se u Laplace-ovoj domeni dobiti iz:

$$H(s) = \frac{V(s)}{U(s)}$$

- LTI sistem je pasivan samo ako je pozitivan, tj. ako mu je prijenosna funkcija pozitivno realna.
- Za određivanje stabilnosti promatra se frekvencijski odziv $H(j\omega)$. Njegova amplituda predstavlja pojačanje snage na svakoj frekvenciji ω , koja mora ostati ispod jedinice da bi se zadovoljila pasivnost, tako da graf leži isključivo unutar jediničnog kruga $H(s)$ ravnine. Različitim područjima $H(s)$ ravnine odgovaraju različita ponašanja, kako je prikazano na slici.



- Lokacija na realnoj osi opisuje relativnu dominaciju sile u odnosu na kretanje, pozitivna znači dominaciju kretanja, a negativna dominaciju sile.
- U ekstremima, $+1$ definira slobodan prostor bez sile i -1 krutu interakciju bez kretanja.
- Na imaginarnoj osi, pronalazi se kapacitivno nasuprot inercijalnom ponašanju, što odgovara faznom prethođenju ili zaostajanju. Udaljenost do ishodišta označava disipaciju; mala amplituda iskazuje veće gubitke, dok veće amplitude osiguravaju bolju efikasnost, i jedinična amplituda je bez gubitaka.

Koncept pasivnosti sistema

Analiza pasivnosti

- ❑ Sistem sa više ulaza i više izlaza (MIMO) je pozitivno realan ako mu je Hermitian matrica pozitivno semidefinitna, tj.
 - $\mathbf{G}(s) + \mathbf{G}^*(s)$ je pozitivno semidefinitna za sve $\text{Re}(s) \geq 0$, gdje je $\mathbf{G}^*(s)$ transponirana konjugirano kompleksna matrica matrice $\mathbf{G}(s)$.
 - $\mathbf{G}^*(s) = \mathbf{G}^T(s)$ jer prijenosna matrica fizikalnih sistema sadrži samo realne elemente.
- ❑ Za sisteme sa jednim ulazom i jednim izlazom (SISO) ovaj uvjet postaje:
 - $\text{Re}(\mathbf{G}(s)) \geq 0$ za sve $\text{Re}(s) \geq 0$.
- ❑ Operator razdvajanja $S(s)$ i Hermitian matrica povezani su slijedećom relacijom:

$$S(s) = (\mathbf{G}(s) - \mathbf{I})(\mathbf{I} + \mathbf{G}(s))^{-1}$$

- ❑ Umjesto preslikavanja ulaza u izlaz, operator razdvajanja preslikava njihovu razliku u zbroj:

$$(\mathbf{y} - \mathbf{x}) = S(\mathbf{y} + \mathbf{x})$$

- ❑ Sistem je pasivan ako je norma operatora razdvajanja ≤ 1 :

$$\|S\|^2 = \max_{\mathbf{u} \neq 0} \frac{\|S\mathbf{u}\|_{T^2}^2}{\|\mathbf{u}\|_{T^2}^2} = \max_{\mathbf{u} \neq 0} \frac{\int_0^t (S\mathbf{u})^T (S\mathbf{u}) d\tau}{\int_0^t \mathbf{u}^T \mathbf{u} d\tau} \leq 1, \quad \forall t \geq 0$$

Koncept pasivnosti sistema

Analiza pasivnosti

- Norma se može dobiti iz frekvencijskog odziva. Sistem je pasivan ako je:

$$\|S\|^2 = \sup_{\omega} \|S(j\omega)\|^2 = \sup_{\omega} \lambda_{\max}(S^*(j\omega)S(j\omega)) \leq 1$$

- Komunikacijski sistem u Laplaceovom području bez valnih varijabli.
- Za provjeru pasivnosti promatra se ukupna snaga P_{in} koja se unosi u komunikaciju:

$$P_{in} = \dot{\mathbf{x}}_m^T \mathbf{F}_m - \dot{\mathbf{x}}_{sd}^T \mathbf{F}_s$$

$$\mathbf{F}_m(t) = \mathbf{F}_s(t-T)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{sd}(t) = \dot{\mathbf{x}}_m(t-T)$$

- Prijenosna matrica:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_m \\ \dot{\mathbf{x}}_{sd} \end{bmatrix} = \mathbf{G}(s) \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_m \\ -\mathbf{F}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -e^{-sT} \\ e^{-sT} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_m \\ -\mathbf{F}_s \end{bmatrix}$$

- Hermitian matrica:

$$\mathbf{G}(s) + \mathbf{G}^*(s) = \mathbf{G}(s) + \mathbf{G}^T(\bar{s}) = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\bar{s}T} - e^{-sT} \\ e^{-sT} - e^{-\bar{s}T} & 0 \end{bmatrix}$$

Koncept pasivnosti sistema

Analiza pasivnosti

- Provjera pasivnosti:

$$\begin{aligned}e^{-sT} - e^{-\bar{s}T} &= e^{-\sigma T} (e^{-j\omega T} - e^{+j\omega T}) = e^{-\sigma T} (-2i \sin(\omega T)) \\ \lambda^2 &= -(e^{-sT} - e^{-\bar{s}T})^2 = 4e^{-2\sigma T} \sin^2(\omega T) \\ \lambda &= \pm 2e^{-\sigma T} \sin(\omega T)\end{aligned}$$

pri čemu nije ispunjen uvjet:

$$\|S\|^2 = \sup_{\omega} \|S(j\omega)\|^2 = \sup_{\omega} \lambda_{\max}(S^*(j\omega)S(j\omega)) \leq 1$$

- Komunikacijski sistem u Laplaceovom sa valnim varijablama.
- Prijenosna matrica:

$$|G_w(s)| = \begin{bmatrix} \frac{b(1 - e^{-2sT})}{1 + e^{-2sT}} & \frac{2e^{-sT}}{1 + e^{-2sT}} \\ \frac{2e^{-sT}}{1 + e^{-2sT}} & \frac{1 - e^{-2sT}}{b(1 + e^{-2sT})} \end{bmatrix}$$

Koncept pasivnosti sistema

Analiza pasivnosti

- Provjera pasivnosti:

$$\mathbf{S}(s) = \begin{bmatrix} 0 & -e^{-sT} \\ e^{-sT} & 0 \end{bmatrix}$$

odnosno:

$$\mathbf{S}^*(s)\mathbf{S}(s) = \begin{bmatrix} e^{-2\sigma} & 0 \\ 0 & e^{-2\sigma} \end{bmatrix} \Rightarrow \|S(j\omega)\| = 1$$

- Dakle, komunikacijski kanal nije samo pasivan, već je i bez gubitaka.

Koncept pasivnosti sistema

Interpretacija valnih varijabli

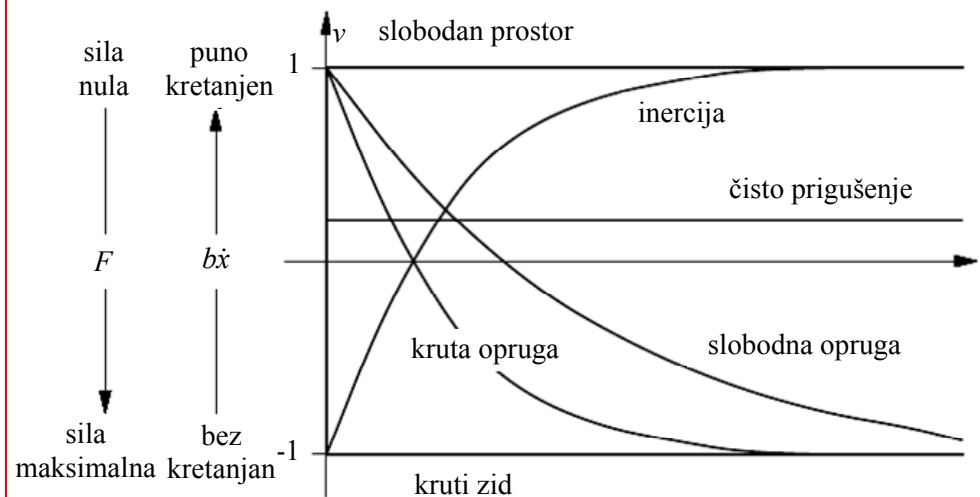
- Za razliku od energetske varijable (brzina, sila), valne varijable nisu fizikalno mjerljive i nisu intuitivne; mjerna jedinica \sqrt{W} . Međutim, valne varijable imaju više korisnih svojstava:
 - **Simetričnost** – i odlazni i povratni val interpretiraju se na jednak način, razlikuju se samo po predznaku sile, tj. interakcija podsistema odvija se jednakim silama suprotnog predznaka (slično Newtonovu zakonu).
 - **Hibridno upravljanje** – gubi se razlika između naredbe za silu i naredbe za brzinu. Kad je prateći manipulator u kontaktu, valna naredba kreirat će silu, a kad je u slobodnom prostoru, kreirat će kretanje. Na ovaj način se izbjegava i pojednostavljuje projektiranje hibridnog upravljanja (automatsko prilagođavanje).
 - **Naredba “pokreni ili gurni”** – predznak valne varijable označava smjer, a iznos energetske sadržaj. Energija se pretvara u kinetičku, odnosno potencijalnu energiju.
 - **Valna impedancija b** – parametar kojim se podešava odnos između brzine kretanja i iznosa sile. Veći b daje veću težinu brzini (manje prigušenje), manji b veću težinu sili (veće prigušenje).

Koncept pasivnosti sistema

Klasični elementi u prostoru valnih varijabli

- ❑ Klasični elementi u prostoru valnih varijabli su kruti zid, slobodan prostor, čista opruga, inercija (nepriгуšenja masa) i čisto prigušenje (između slobodnog kretanja i krute sile).
- ❑ Prikaz prijenosnih funkcija osnovnih elemenata u prostoru valnih varijabli.

Pojedinačni element	Upravljačka jednađzba	Valna prijenosna funkcija
Kruti zid	$\dot{x} = 0$	$H(s) = -1$
Slobodni prostor	$F = 0$	$H(s) = 1$
Inercija	$F = m\ddot{x}$	$H(s) = \frac{s - \lambda}{s + \lambda}, \lambda = \frac{b}{m}$
Prigušenja	$F = B\dot{x}$	$H(s) = \frac{b - B}{b + B} = konst.$
Opruga	$F = Kx$	$H(s) = \frac{s - \lambda}{s + \lambda}, \lambda = \frac{K}{b}$

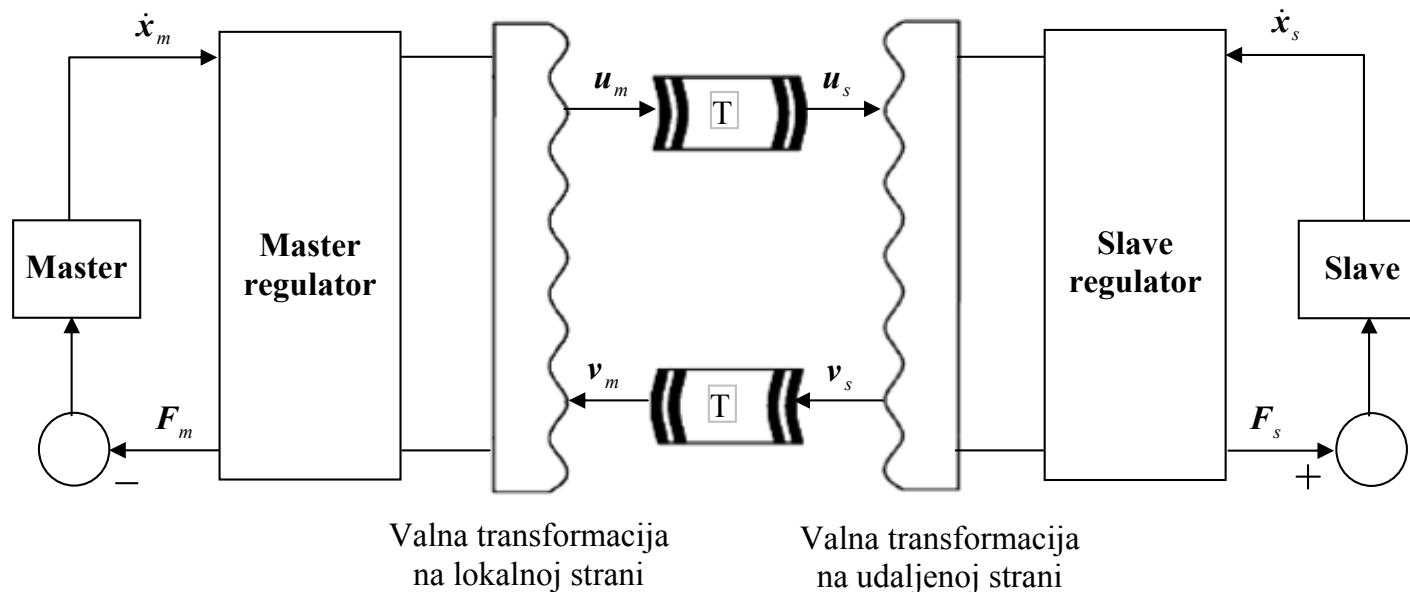


- ❑ Na slici je amplituda ograničena u području između -1 i +1, dok predznak određuje tip akcije: kretanje ili djelovanje sile.
- ❑ Dakle, da bi se osigurala pasivnost amplituda valnog odziva mora biti ograničena originalnom valnom komandom, koja se odnosi na pohranjenu energiju. Zato se koriste relativni iznosi za mjeru gubitka snage signala ili privremene pohranjene energije.

12.4. Teleoperacija u valnom području

Komunikacija u valnom području

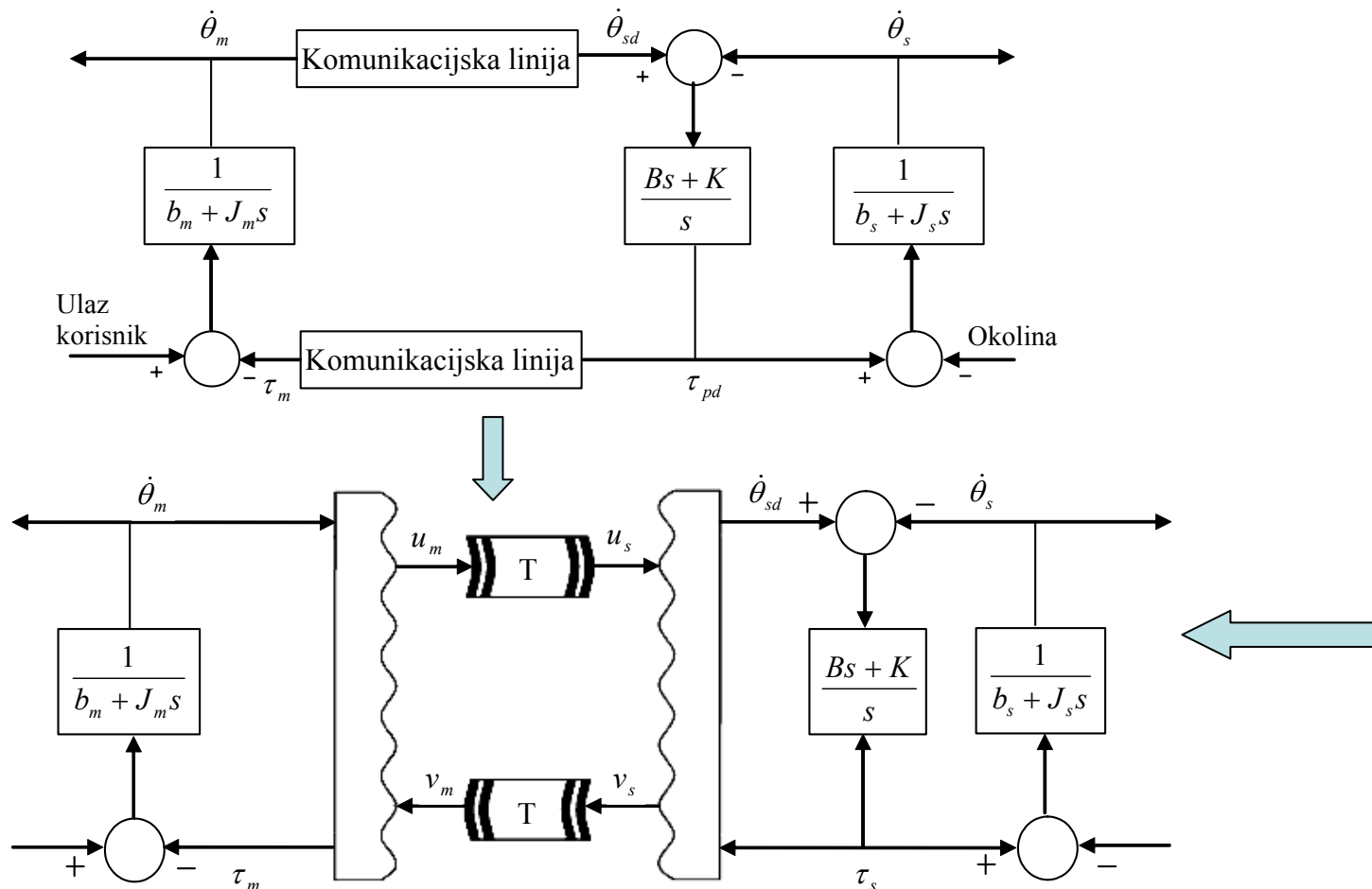
- ❑ Kako je ranije rečeno, formiranje pasivnih valnih varijabli je robusno na vremenska kašnjenja.
- ❑ To sugerira obavljanje komunikacije direktno u valnom području.
- ❑ **Pri tome kašnjenja u direktnoj i povratnoj grani moraju biti jednaka.**
- ❑ Najvažnija karakteristika ove sheme je da se informacija na lokalnoj i udaljenoj strani transformiraju u valne varijable prije prijenosa.
- ❑ U slučaju telerobotske manipulacija, oba manipulatora, i vodeći i prateći, upravljani su u energetske (fizičkim) varijablama. Ovo podrazumijeva mjerenja pozicije i brzine, a na manipulatore se primjenjuju sile. Prije prijenosa ove varijable se pretvaraju u valne, čime se osigurava pasivnost.



Teleoperacija u valnom području

Teleoperacijski sistem u valnom području

- U valnom području sistem sa masterom i slave-om sa jednim stupnjem slobode i sa PD regulatorom. Master primjenjuje željenu silu direktno na palici (joystick). Ovakav sistem je blizak tradicionalnom sistemu sa pozicijskom direktnom (unaprijednom) granom i povratnom vezom po sili.



Teleoperacijski sistem u valnom području

Teleoperacija u valnom području

Teleoperacijski sistem u valnom području

- PD regulator pratećeg manipulatora, u općem slučaju, koristi konstantnu simetričnu pozitivno definitnu matricu za pojačanje brzine B i pojačanje pozicije K za pokretanje pratećeg manipulatora da prati željenu brzinu $\dot{\mathbf{x}}_{sd}$. Potrebna sila za ovo je:

$$\mathbf{F}_s = -B(\dot{\mathbf{x}}_s - \dot{\mathbf{x}}_{sd}) - K(\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_{sd})$$

- Željena brzina se dobiva iz valne transformacije:

$$\dot{\mathbf{x}}_{sd} = \frac{\sqrt{2b}\mathbf{u}_s - \mathbf{F}_s}{b}$$

i povratni val se računa kao:

$$\mathbf{v}_s = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_{sd} - \mathbf{F}_s}{\sqrt{2b}} = \mathbf{u}_s - \sqrt{\frac{2}{b}}\mathbf{F}_s$$

- Problem algebarske petlje rješava se na slijedeći način:

$$\dot{\mathbf{x}}_{sd} = \frac{\sqrt{2b}\mathbf{u}_s + B\dot{\mathbf{x}}_s + K(\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_{sd})}{B + b}$$

Teleoperacija u valnom području

Teleoperacijski sistem u valnom području

- ❑ Također, željena pozicija mora se računati preko brzine na slijedeći način:

$$\mathbf{x}_{sd} = \int_0^t \dot{\mathbf{x}}_{sd}(\tau) d\tau$$

- ❑ Na strani mastera, željena sila primijenjena na joystick je:

$$\mathbf{F}_m = b\dot{\mathbf{x}}_m - \sqrt{2b}\mathbf{v}_m$$

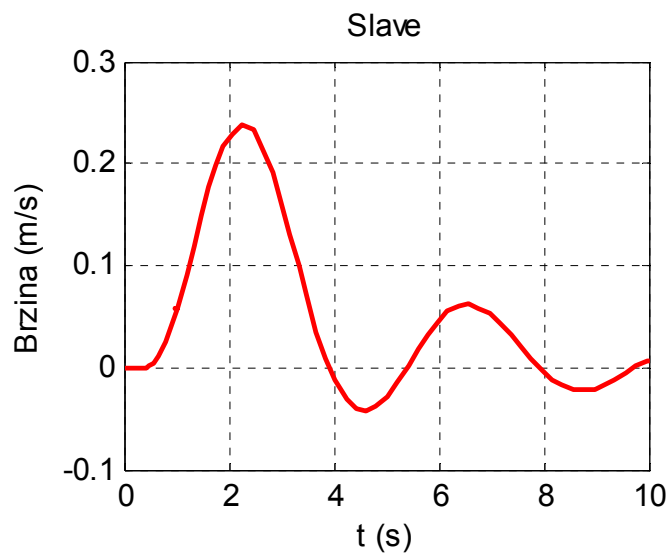
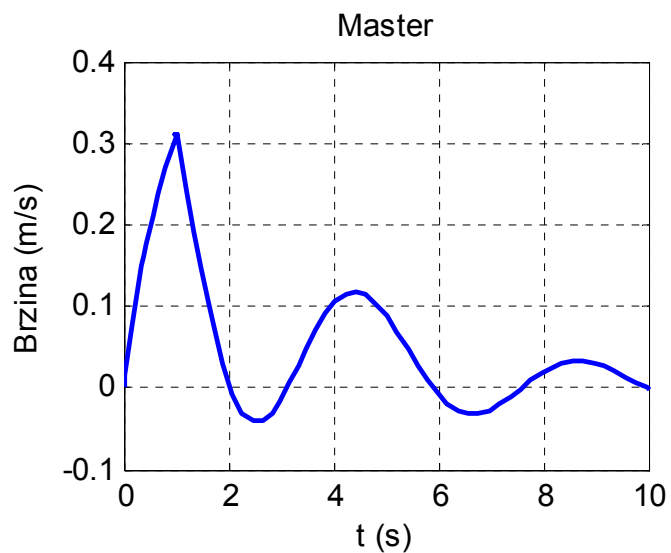
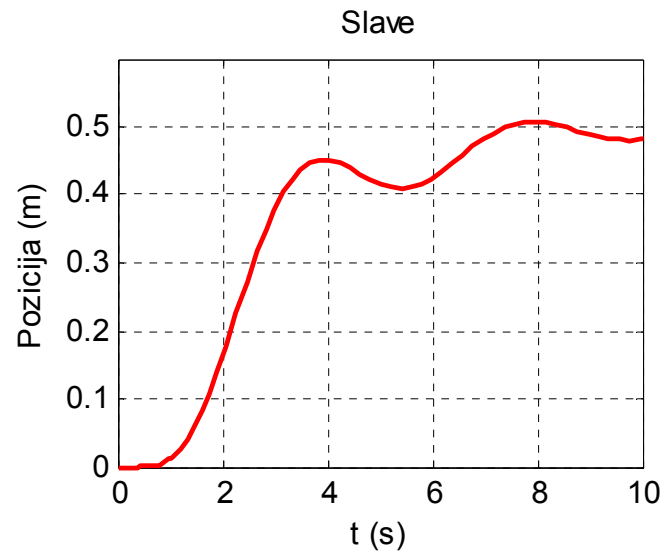
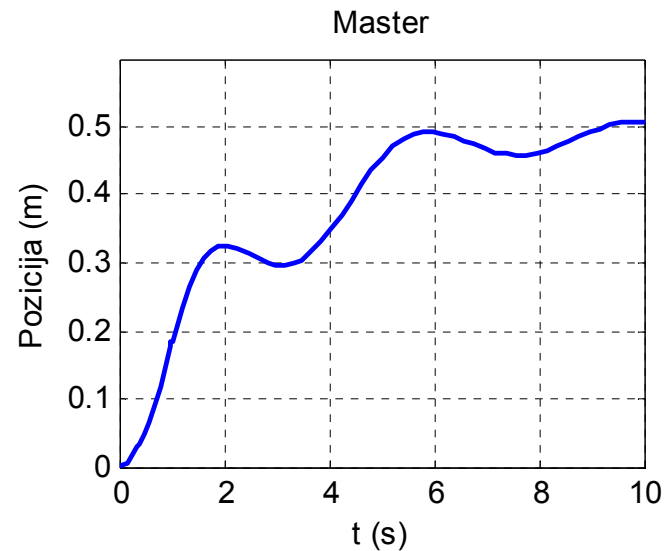
- ❑ Konačno, val od mastera prema slave-u se računa iz:

$$\mathbf{u}_m = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_m + \mathbf{F}_m}{\sqrt{2b}} = \sqrt{2b}\dot{\mathbf{x}}_m - \mathbf{v}_m$$

- ❑ Također se treba istaći da su svi elementi pasivni i da je sistem stabilan, bez obzira na kašnjenje T .
- ❑ Zaista, vrijednost čak i ne treba biti poznata, kao da ona nije upotrebljena nigdje u regulatoru. Za mala kašnjenja, sistem se vraća u jednostavnu PD vezu između master i slave manipulatora.

Teleoperacija u valnom području

Primjer 3. Bilateralni sistem sa valnim varijablama



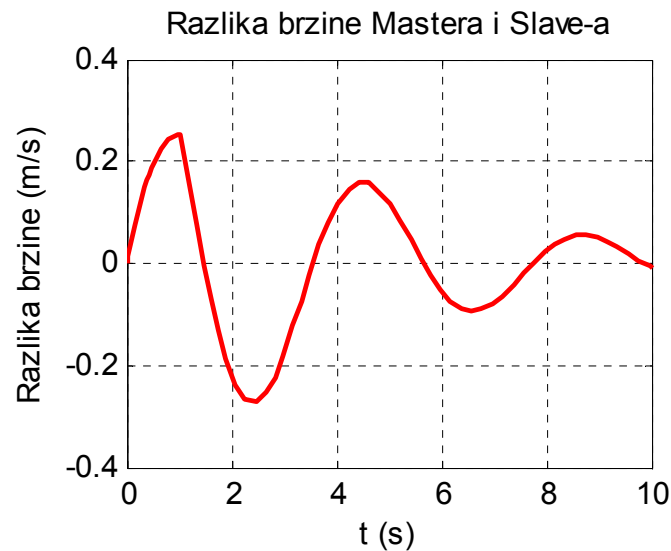
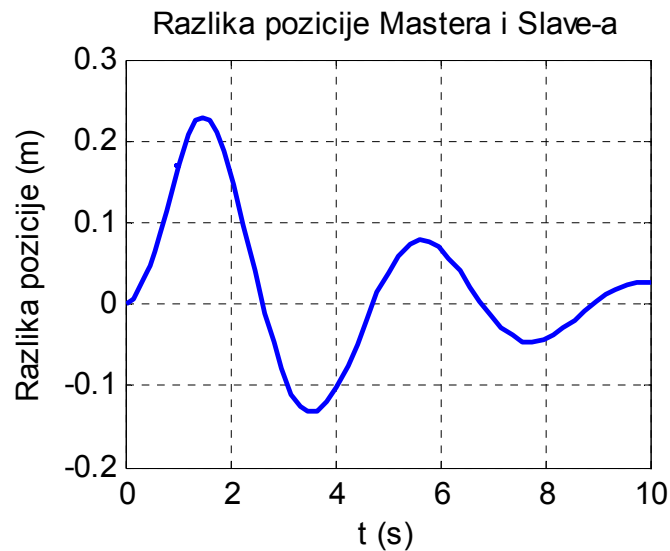
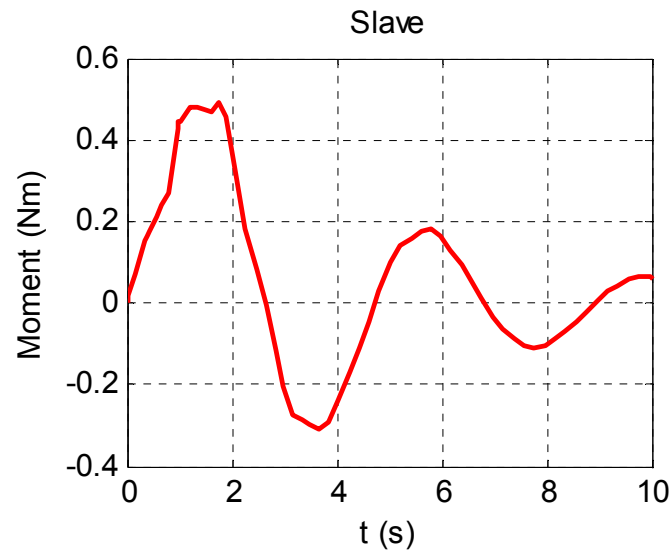
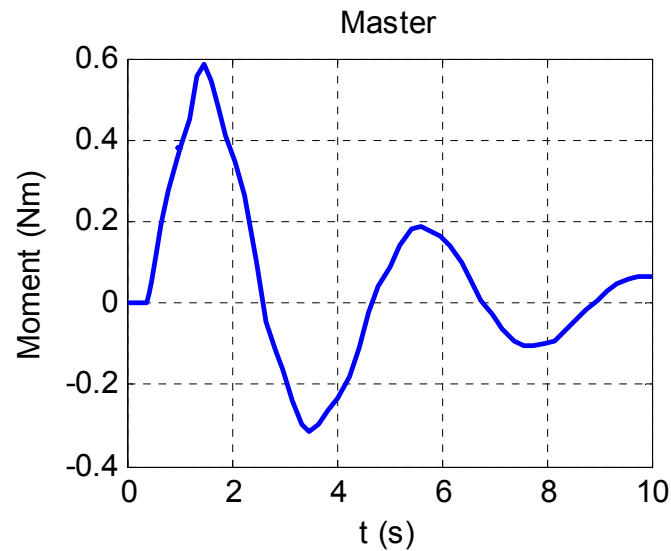
Parametri:

Isti kao u primjerima 1 i 2.
 $T=400$ ms, $b=1$.

- Početne brzine mastera i slave-a, kao i početni uglovi vodećeg i pratećeg manipulatora jednaki su nuli.
- Korisnik djeluje na vodeći manipulator momentom iznosa 1 Nm u trajanju od 1 sekunde.

Teleoperacija u valnom području

Primjer 3. Bilateralni sistem sa valnim varijablama



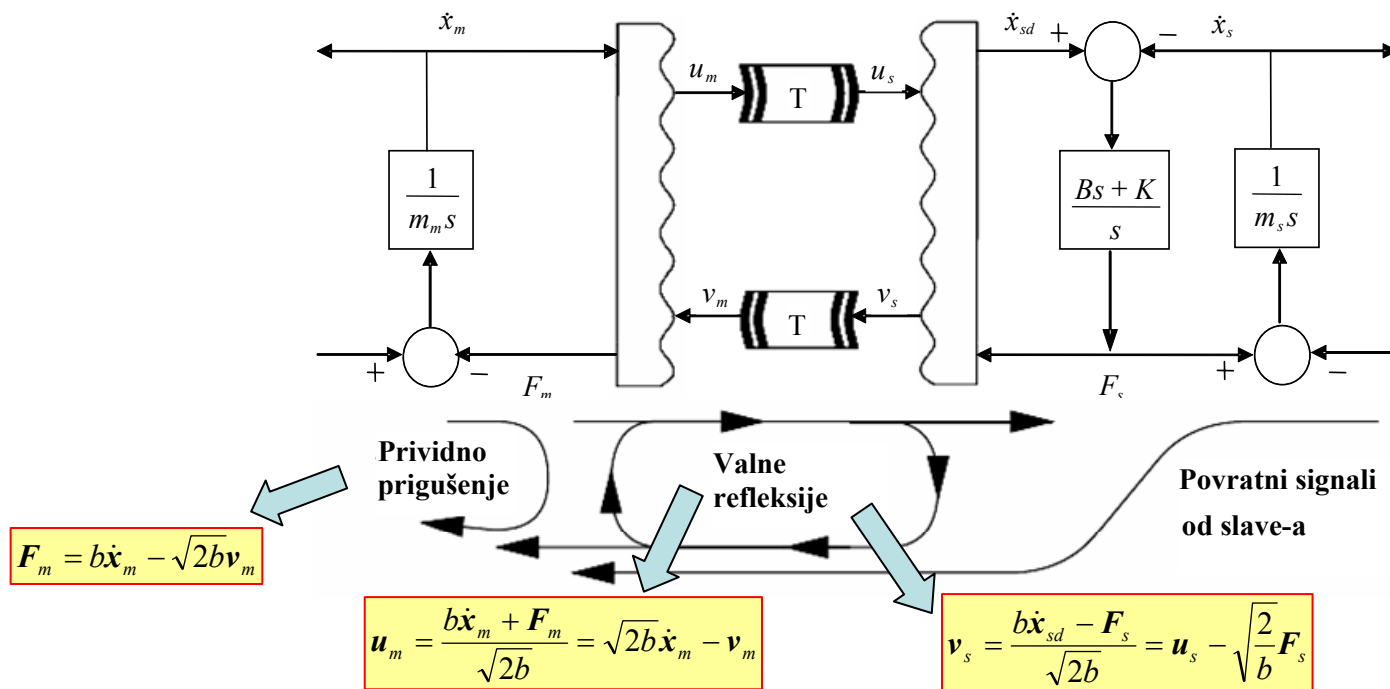
Rezultati:

- Sistem ostao stabilan.
- Prvi problem: narušen kvalitet rada sistema → ovo je veliko ograničenje metode.
- Drugi problem: refleksija valova, tj. odbijanje informacija između mastera i slave-a → veliko vrijeme smirivanja.
- Rješenje problema: Filtriranje valnih varijabli ili uvođenje valnog prediktora.

Teleoperacija u valnom području

Povratne veze u teleoperatorskom sistemu

- U sistemu postoje tri povratne veze:
 - Trenutna povratna veza u obliku prigušenja formirana valnom transformacijom. Ne sadrži u sebi elemente kašnjenja.
 - Druga staza sadrži kašnjenje i zasniva se na refleksiji valova u obje transformacije. Reflektirani valovi ne nose korisne informacije, a mogu trajati i više ciklusa vremenskog kašnjenja. Reflektirani valovi mogu dovesti do velikih poremećaja.
 - Trećom stazom se prenose signali od slave manipulatora preko PD regulatora natrag do operatora. Ovo je glavna petlja povratne veze i osigurava informacije neophodne za kompletiranje zadatka.



Teleoperacija u valnom području

Povratna veza po poziciji

- ❑ Podaci koji se prenose između dvije lokacije sadrže valne signale koji u sebi nose informacije o brzini i sili.
- ❑ Ne postoji direktna povratna veza po pozicija niti eksplicitna garancija konvergencije pozicije između mastera i slave-a. Informacija o poziciji se može izvući integriranjem brzine.
- ❑ Ovo je konzistentno sa pristupom pasivnosti, koji ne može garantirati neophodnu snagu za pomicanje robota iz jedne u drugu lokaciju. Vraćanje pozicije mastera u njegovu izvornu poziciju i zatim natrag u poziciju slave-a može zahtijevati više energije nego što je dostupno.
- ❑ Nepostojanje povratne veze po poziciji je također konzistentno sa strukturom valnog sistema koji mijenja ulogu za adaptiranje trenutnom zadatku. Ako se uspostavi dodir, sistem će djelovati kao regulator sile koji općenito ne razmatra konvergenciju pozicije.
- ❑ U praksi, većina aplikacija zahtijeva postojanje povratne veze po poziciji i njeno praćenje između mastera i slave-a koje bi bilo robusno na numeričke greške i temeljilo se na stvarnom mjerenju pozicije.
- ❑ Jedno od rješenja - može se uz valne signale slati i integrali valova.
- ❑ Ovi integrali sadrže informacije o poziciji i mogu se formirati direktno iz mjerenje pozicije.

Teleoperacija u valnom području

Teorijsko praćenje pozicije

- ❑ Ostvariti praćenje pozicije tako da greška praćenja u stacionarnom stanju bude nula.
- ❑ Ovo olakšava numeričku integraciju željene brzine slave-a u njegovu željenu poziciju, tako da u se praksi master i slave-a mogu „driftati“ odvojeno.
- ❑ Teorijski je praćenje pozicije osigurano:

$$\mathbf{x}_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} \int_0^t (\mathbf{u}_m(\tau) + \mathbf{v}_m(\tau)) d\tau$$
$$\mathbf{x}_{sd} = \frac{1}{\sqrt{2b}} \int_0^t (\mathbf{u}_s(\tau) + \mathbf{v}_s(\tau)) d\tau$$

- ❑ Greška praćenja:

$$\Delta \mathbf{x}_{comm}(t) = \mathbf{x}_m(t) - \mathbf{x}_{sd}(t) = \frac{1}{\sqrt{2b}} \int_0^t (\mathbf{u}_m(\tau) - \mathbf{v}_s(\tau)) d\tau$$

- ❑ U stacionarnom stanju valne jednačbe iščezavaju pa je greška pozicije teoretski jednaka nuli.
- ❑ U stvarnosti se može pojaviti offset pozicije zbog: numeričkih grešaka (uslijed integracije, uzorkovanja), gubitka podataka u komunikaciji i razlike početnih pozicija.

Teleoperacija u valnom području

Prenošenje valnih integrala

- Uz prenošenje valnih varijabli prenose se i njihovi valni integrali:

$$U(t) = \int_0^t u(\tau) d\tau = \frac{bx + p}{\sqrt{2b}}$$
$$V(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau = \frac{bx - p}{\sqrt{2b}}$$

- x – pozicija, p – moment sile (integral sile):

$$p = \int_0^t F(\tau) d\tau$$

- Pozicija se obično direktno mjeri, a moment se mora računati numeričkom integracijom. Preko mreže se moraju prenositi i valovi i njihovi integrali, pa se opis sistema proširuje slijedećim jednadžbama:

$$p_s = \int_0^t F_s(\tau) d\tau$$

$$x_{sd} = \frac{\sqrt{2b}U_s - p_s}{b}$$

$$V_s = \frac{bx_{sd} - p_s}{\sqrt{2b}}$$

$$U_m = \sqrt{2b}x_m - V_m$$

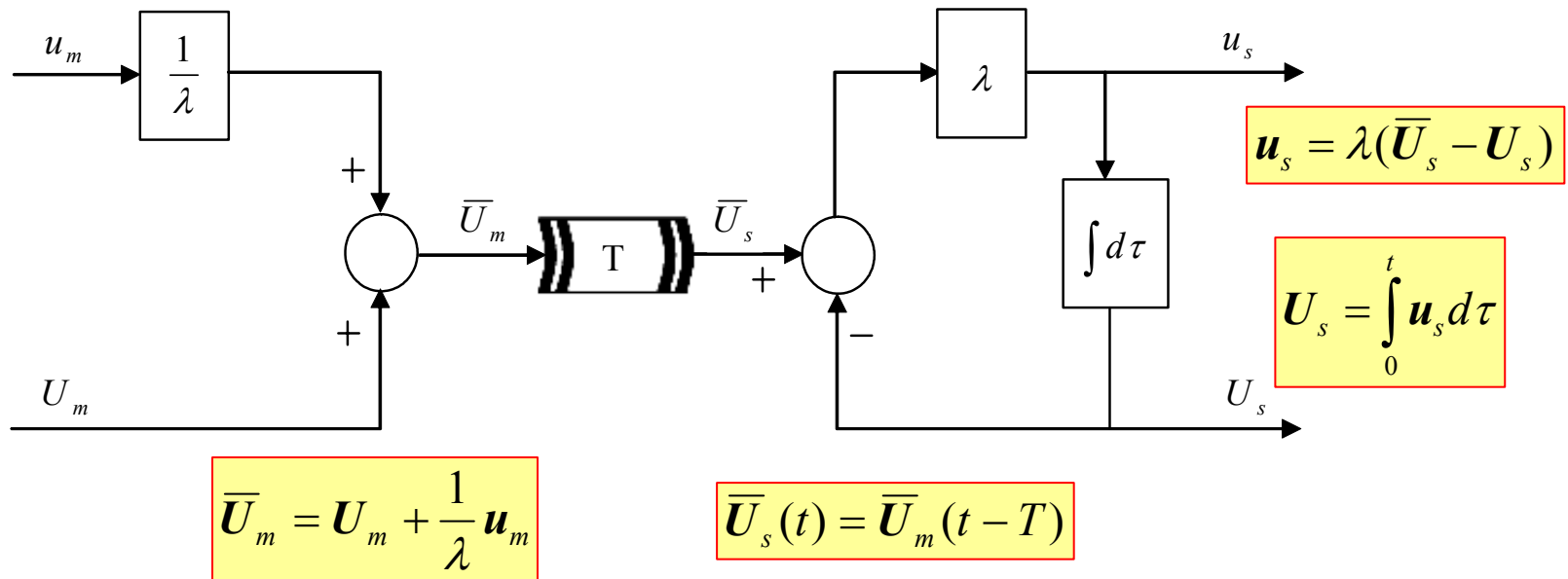
- Može se pokazati da vrijedi (ne treba računati moment sile):

$$x_{sd} = 2x_m(t - T) - x_{sd}(t - 2T) - \frac{1}{b} \int_{t-2T}^t F_s(\tau) d\tau$$

Teleoperacija u valnom području

Prenošenje valova i njihovih integralala

- ❑ Nije potreban poseban komunikacijski kanal za prijenos integrala valnog signala.
- ❑ Valni signal i njegov integral združuju u jedan signal prije prijenosa, a nakon pristizanja na prijemnu stranu, vrši se njihovo razdruživanje.

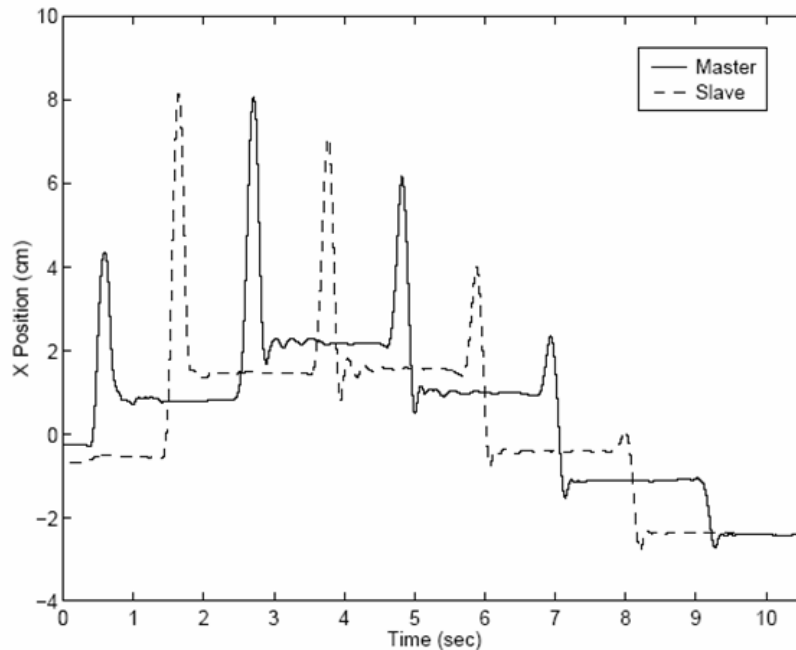


- ❑ Na ovaj način se smanjuje prijenosni opseg komunikacijskog sistema.
- ❑ λ je pozitivna konstanta koja određuje vremensku konstantu filtra. Izbor ove konstante je proizvoljan.
- ❑ Međutim, treba voditi računa o tome da ona mora biti znatno manja od vremena uzorkovanja.
- ❑ \bar{U} sadrži sve potrebne informacije o sistemu (pozicija, brzina, sila)

Teleoperacija u valnom području

Problem valne refleksije

- ❑ Kako je ranije rečeno, reflektirani valovi mogu dovesti do velikih poremećaja.
- ❑ Eksperimentalni rezultati na slici prikazuju ponavljanje valnih refleksija trajanja pet kompletnih ciklusa prije smirivanja.



$$\mathbf{u}_m = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_m + \mathbf{F}_m}{\sqrt{2b}} = \sqrt{2b}\dot{\mathbf{x}}_m - \mathbf{v}_m$$

$$\mathbf{v}_s = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_{sd} - \mathbf{F}_s}{\sqrt{2b}} = \mathbf{u}_s - \sqrt{\frac{2}{b}}\mathbf{F}_s$$

Na slici u trenutku $t=0$ djeluje kratkotrajni poremećaj na master manipulatoru ($T=1s$). Rezultat je kašnjenje, koje je višekratnik T -a. Uočljiv je utjecaj refleksij valova.

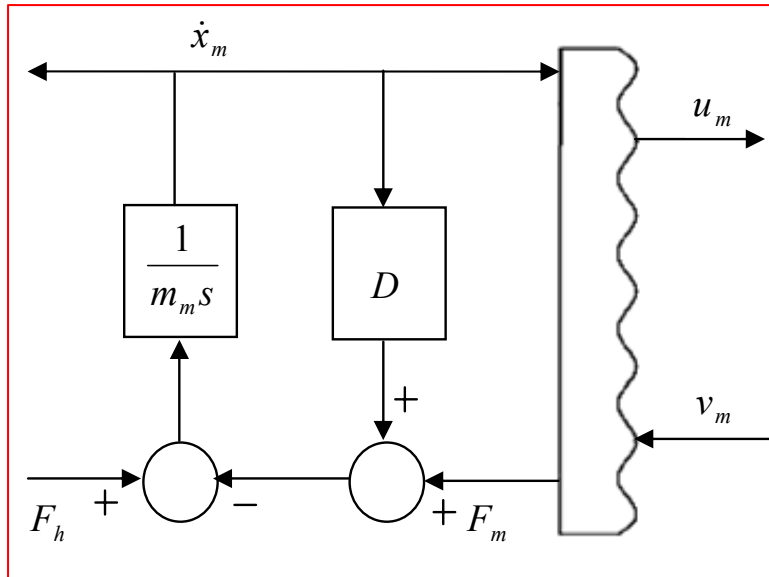
- ❑ Svaki dolazeći val \mathbf{v}_m ili \mathbf{u}_s može se reflektirati i vratiti nazad sa odlazećim valom \mathbf{u}_m i \mathbf{v}_s .
- ❑ Postavlja se pitanje: **Kako spriječiti refleksiju valova?**
- ❑ Postići da se podsystemi ponašaju kao čisti prigušivači pojačanja b .

$$H(s) = konst. = \frac{b - B}{b + B}$$

Teleoperacija u valnom području

Problem valne refleksije

- Na vodećoj (master) strani nije moguće postići čisto prigušenje, odnosno izjednačiti impedanciju mastera sa impedancijom dolaznog vala.



$$\frac{F_m(s)}{sX_m(s)} = m_m s + D$$

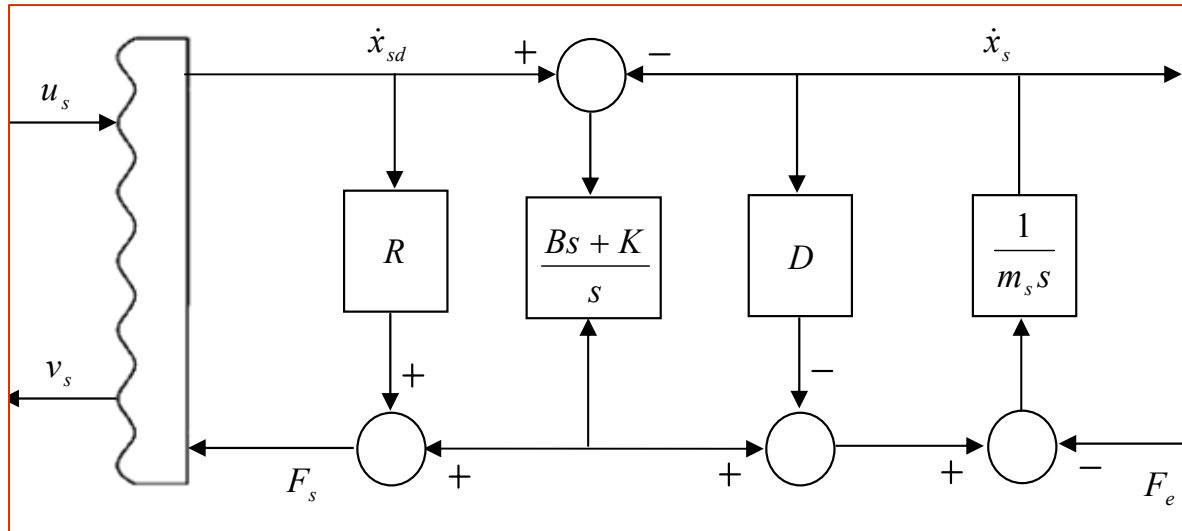
$$U_m(s) = \frac{\sqrt{3}}{m_m s + D + b} F_h(s) - \frac{m_m s + D - b}{m_m s + D + b} V_m(s)$$

- Uz $D=b$ dobije se najmanja refleksija, ali i dalje ostaje visokofrekvencijska refleksija.

Teleoperacija u valnom području

Problem valne refleksije

- Na pratećoj strani dodavanje elemenata prigušenja D i R .



Bez prigušenja:

$$\frac{F_s(s)}{sX_{sd}(s)} = \frac{m_s s(K + Bs)}{m_s s^2 + Bs + K}$$

Najmanja refleksija za:

$$B = b \quad \text{i} \quad K = \frac{b^2}{m_s}$$

Sa prigušenjem:

$$F_s(s) = \frac{Bs + K}{m_s s^2 + (B + D)s + K} F_e(s) + \left[\frac{(m_s s + D)(Bs + K)}{m_s s^2 + (B + D)s + K} + R \right] sX_{sd}(s)$$

Odabirom:

$$D = \lambda_s m_s, \quad B = \lambda_s m_s, \quad K = \lambda_s^2 m_s, \quad R = b - B$$

$$F_s(s) = \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} F_e(s) + bsX_{sd}(s)$$



$$V_s(s) = -\frac{1}{\sqrt{2b}} \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} F_e(s)$$

Teleoperacija u valnom području

Problem valne refleksije

- ❑ Iz zadnjeg izraza zaključuje se da nema refleksije i parametri koji figuriraju u izrazu su λ_s (lomna frekvencija) i b (impedancija prateće strane).
- ❑ Ako je $R=b-B>0$ tada impedancija ne može biti manja od b .

Praćenje pozicije:

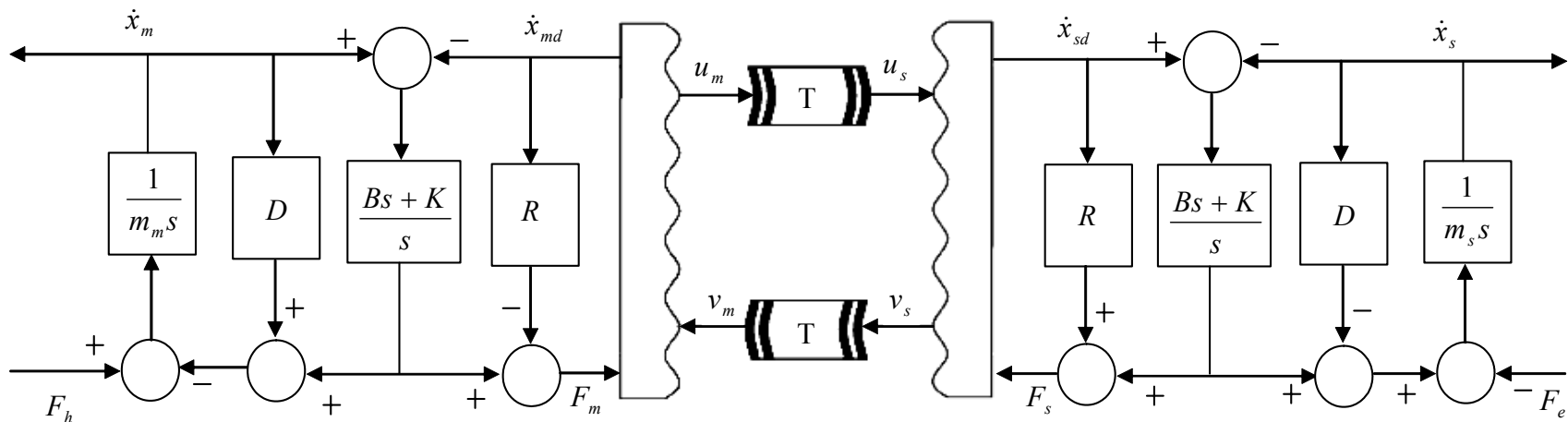
$$sX_s(s) = \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} \frac{1}{\sqrt{2b}} U_s(s) - \frac{2bs + B\lambda_s}{2Bb(s + \lambda_s)} \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} F_e(s)$$

- ❑ Slijedi da brzina pratećeg manipulatora prati val preko PT1 člana.
- ❑ Djelovanje kontaktne sile F_e je prigušeno u nisko-frekvencijskom području.

Teleoperacija u valnom području

Uklanjanje valne refleksije izjednačavanjem impedancija

- ❑ Valne refleksije se pojavljuju kada valni signal „pogodi“ element čija impedancija se razlikuje od impedancije vala b . Da bi se smanjile refleksije nastoji se izjednačiti impedancije za oba podsistema, mastera i slave-a.
- ❑ Simetrična izvedba vodećeg i pratećeg manipulatora.



$$sX_m(s) = \frac{\lambda_m}{s + \lambda_m} \frac{1}{\sqrt{2b}} V_m(s) - \frac{2bs + B_m \lambda_m}{2B_m b(s + \lambda_m)} \frac{\lambda_m}{s + \lambda_m} F_h(s)$$

$$sX_s(s) = \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} \frac{1}{\sqrt{2b}} U_s(s) - \frac{2bs + B_s \lambda_s}{2B_s b(s + \lambda_s)} \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} F_e(s)$$

$$V_s(s) = -\frac{1}{\sqrt{2b}} \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} F_e(s)$$

$$U_m(s) = \frac{1}{\sqrt{2b}} \frac{\lambda_m}{s + \lambda_m} F_h(s)$$

Oba vala se pojavljuju samo kada djeluju vanjske sile F_e i F_h , pri čemu su oba vala isfiltrirana.

Teleoperacija u valnom području

Uklanjanje valne refleksije izjednačavanjem impedancija

- ❑ Pri kontaktu pratećeg manipulatora sa okruženjem (ili naglom pokretu operatora) pojavljuju se refleksije.

$$sX_s(s) = \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} \frac{1}{\sqrt{2b}} U_s(s) - \frac{2bs + B_s \lambda_s}{2B_s b(s + \lambda_s)} \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} F_e(s) = 0$$

$$V_s(s) = -\frac{1}{\sqrt{2b}} \frac{\lambda_s}{s + \lambda_s} F_e(s)$$

$$V_s(s) = -\frac{K_s}{2bs + K_s} U_s(s)$$

Poželjno: u slobodnom prostoru mali b , a u kontaktu veliki b .

- ❑ Moguća rješenja:

- **Filtriranje valnih varijabli.**
- Primjena složenije strukture regulatora.
- Prihvatiti postojanje valnih refleksija i odabrati valnu impedanciju b uz koju će se minimizirati njihov štetan utjecaj.

Teleoperacija u valnom području

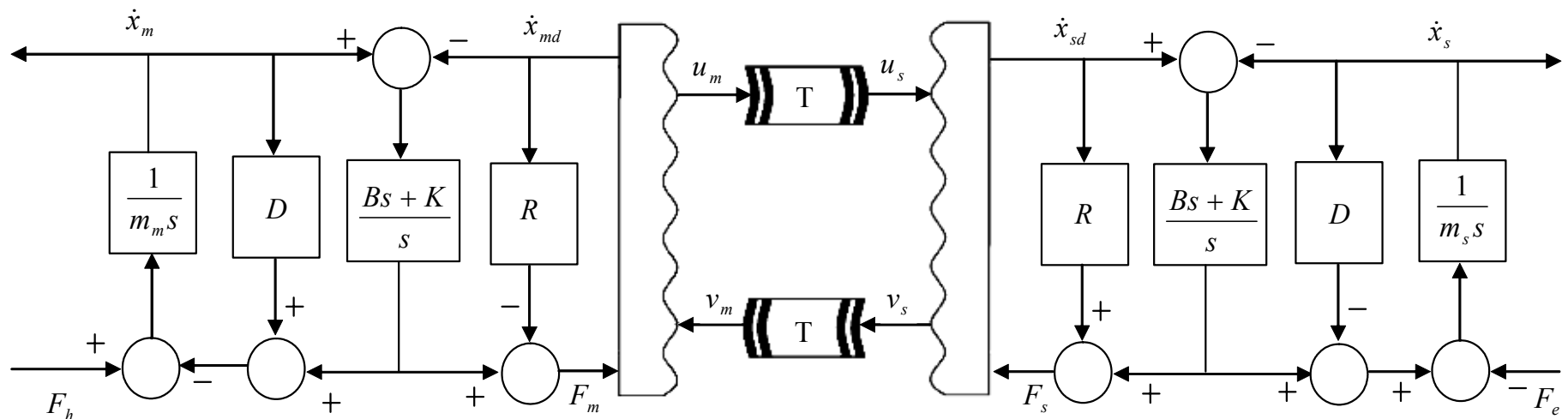
Primjer 4. Uklanjanje valne refleksije izjednačavanjem impedancija

Parametri:

- $T=400$ ms, $b=1$ i $\lambda_s=10$ s⁻¹ Početne brzine mastera i slave-a, kao i početni uglovi vodećeg i pratećeg manipulatora jednaki su nuli.
- Korisnik djeluje na vodeći manipulator momentom iznosa 1 Nm u trajanju od 1 sekunde.
- U slučaju kontakta na pratećoj strani: prepreka će se simulirati na način da se postavi integrator brzine na nulu kada položaj dostigne neku vrijednost na pratećoj strani.

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti dobivaju se vrijednosti slijedećih parametara:

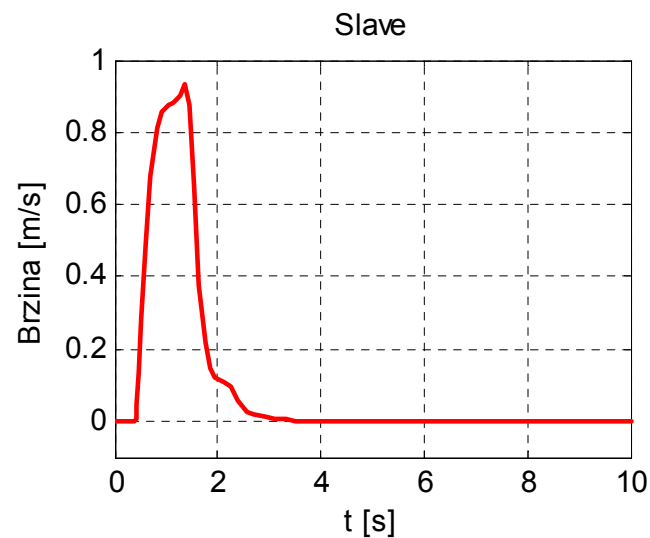
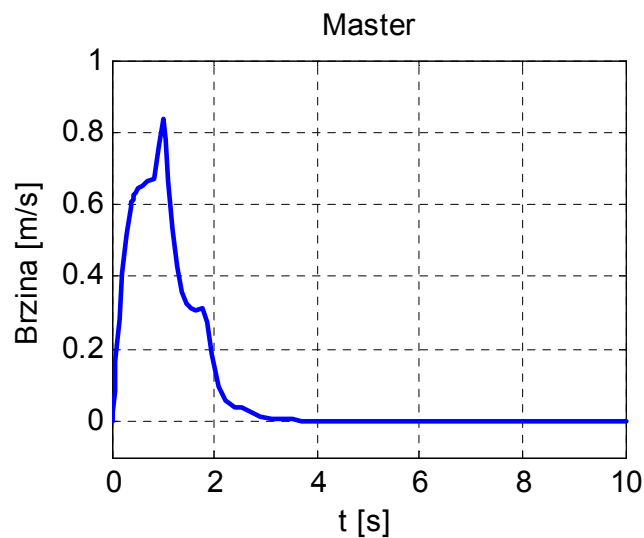
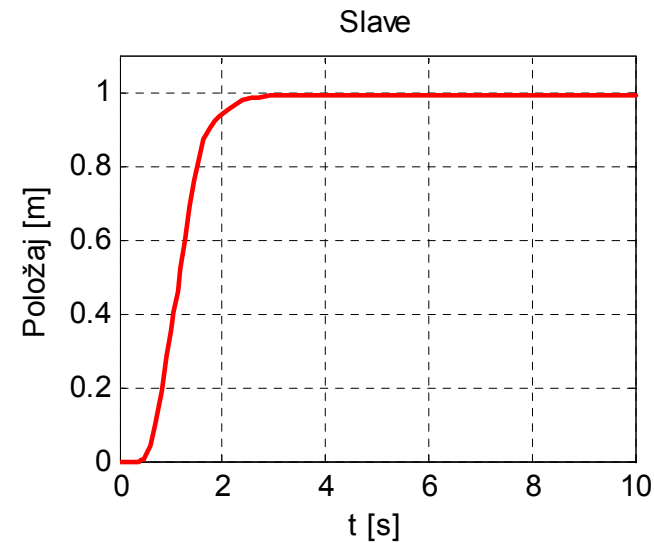
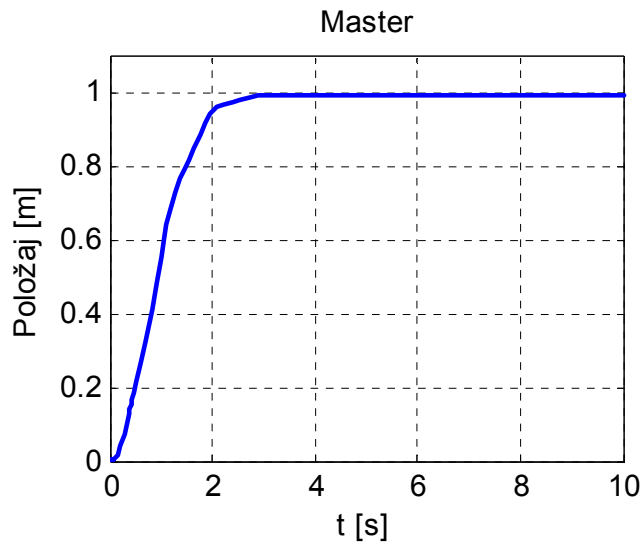
$$D = \lambda_s m_s = 20, \quad B = \lambda_s m_s = 20, \quad K = \lambda_s^2 m_s = 200, \quad R = b - B = -19$$



Teleoperacija u valnom području

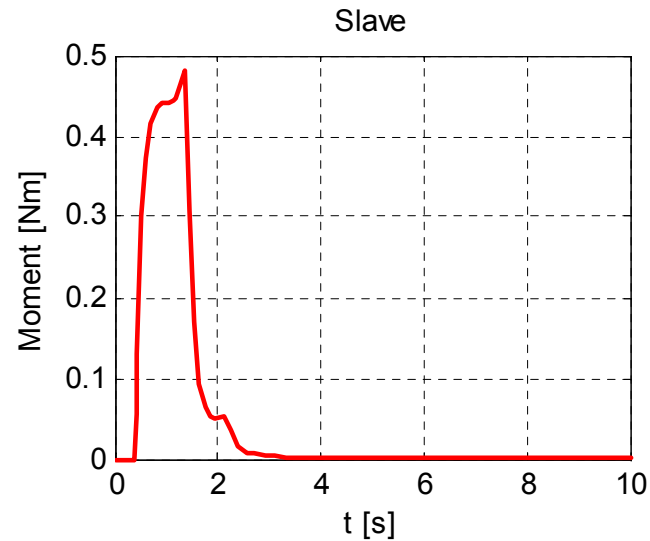
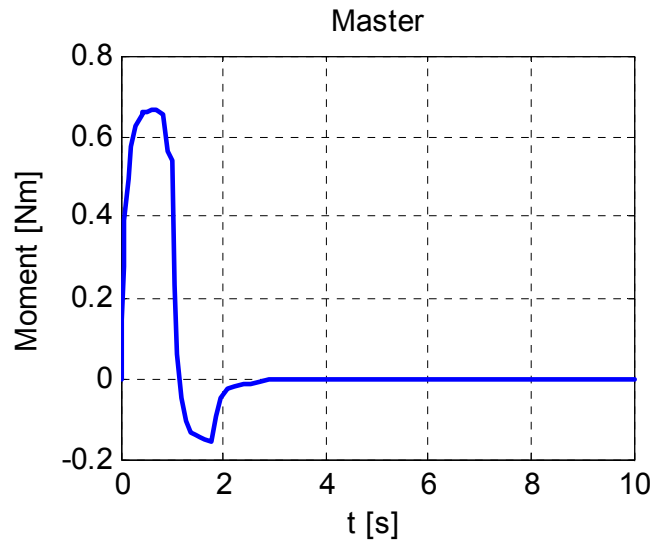
Primjer 4. Uklanjanje valne refleksije izjednačavanjem impedancija

- ❑ Bez kontakta slave manipulatora sa okolinom



Teleoperacija u valnom području

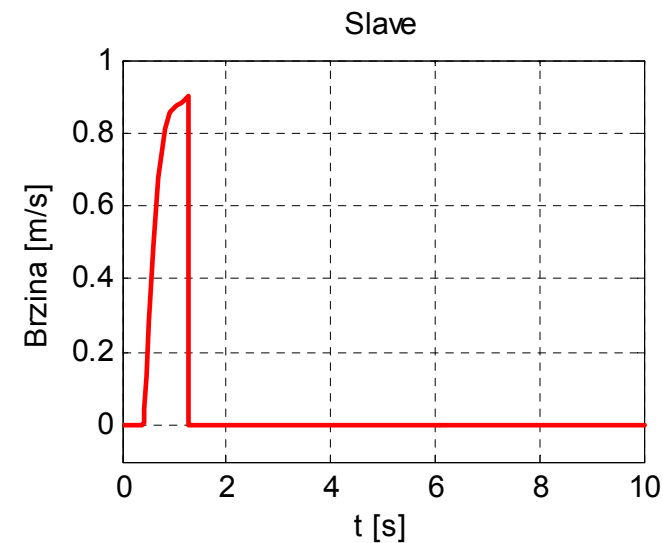
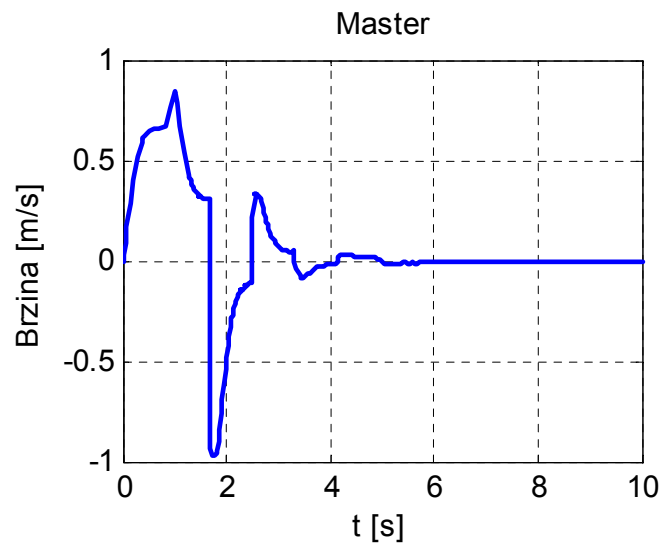
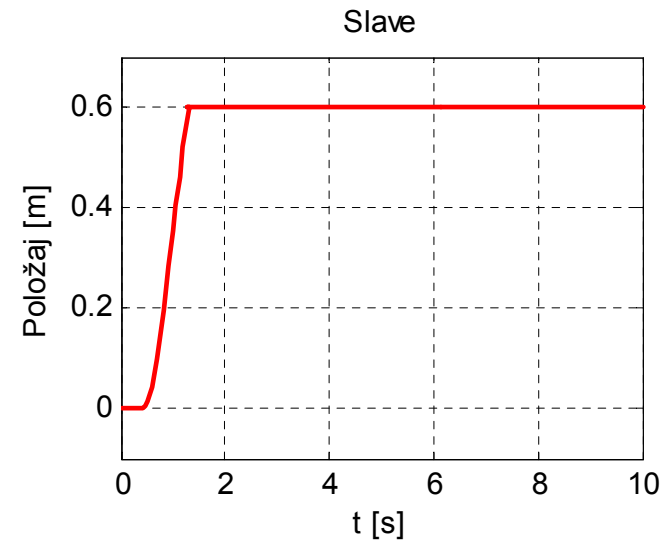
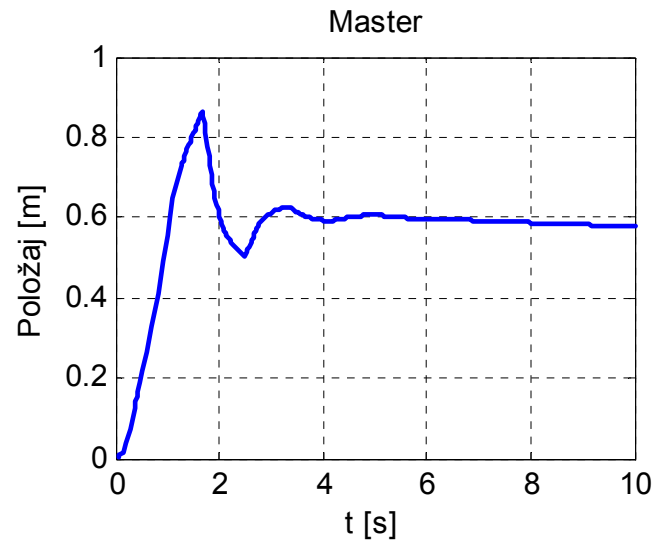
Primjer 4. Uklanjanje valne refleksije izjednačavanjem impedancija



Teleoperacija u valnom području

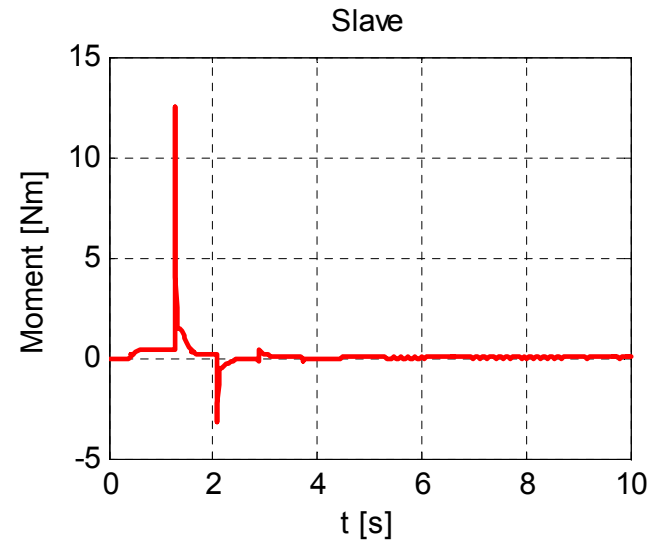
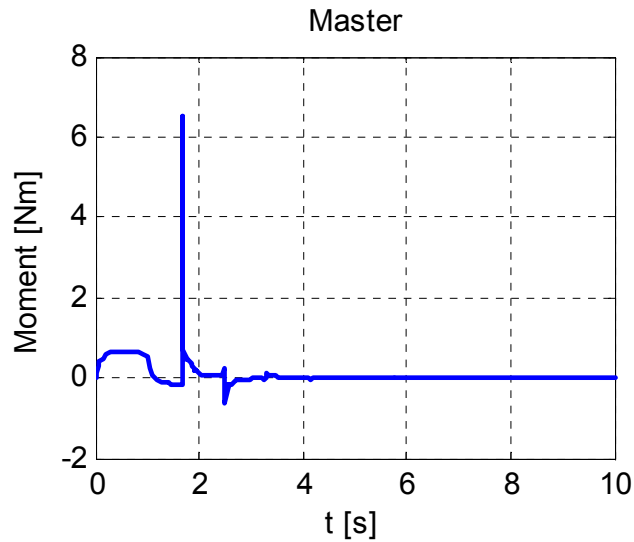
Primjer 4. Uklanjanje valne refleksije izjednačavanjem impedancija

- Slave manipulatoru u kontaktu sa okolinom



Teleoperacija u valnom području

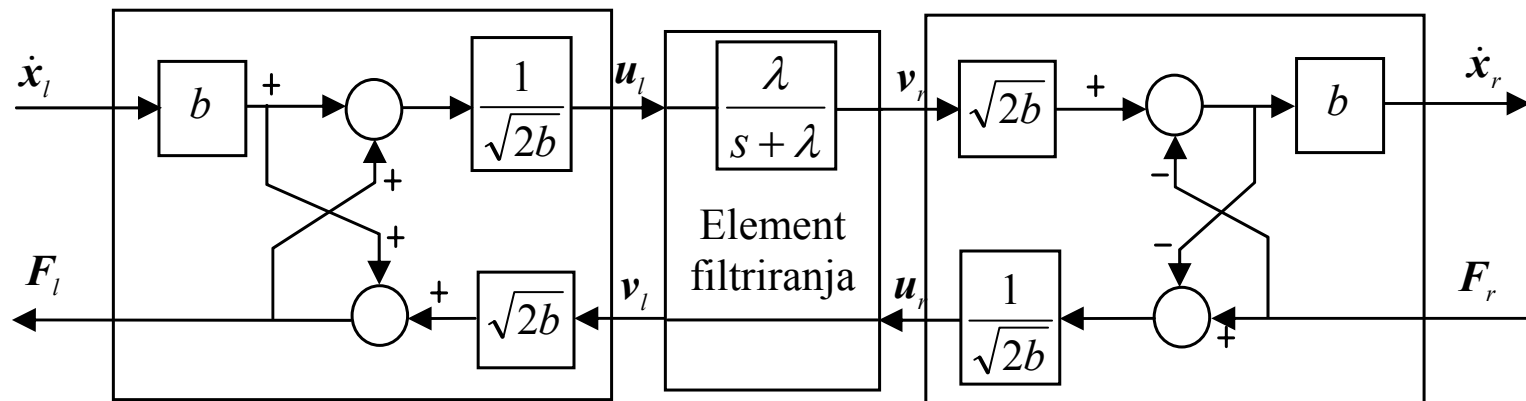
Primjer 4. Uklanjanje valne refleksije izjednačavanjem impedancija



Teleoperacija u valnom području

Filtriranje valnih varijabli

- U sistemima automatskog upravljanja filter se koristi za smanjenje visokofrekvencijskog šuma.
- Međutim, filtriranje unosi dodatno vremensko kašnjenje što povećava rizik nestabilnosti sistema, budući da ovo ima identičan efekat kao povećano mrtvo vrijeme.
- Element filtriranja nije pasivan i može destabilizirati sistem. Međutim, ako se ovaj element postavi u valni prijenos između vodećeg i pratećeg manipulatora tada neće utjecati na pasivnost sistema.



Filtar: $\dot{\mathbf{v}}_r + \lambda \mathbf{v}_r = \lambda \mathbf{u}_l$

Tok snage:

$$\mathbf{P} = \dot{\mathbf{x}}_l^T \mathbf{F}_l - \dot{\mathbf{x}}_r^T \mathbf{F}_r = \frac{1}{2} \mathbf{u}_l^T \mathbf{u} - \frac{1}{2} \mathbf{v}_l^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} \mathbf{u}_r^T \mathbf{u} - \frac{1}{2} \mathbf{v}_r^T \mathbf{v}$$

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2\lambda^2} \dot{\mathbf{v}}_r^T \dot{\mathbf{v}}_r + \frac{d}{dt} \frac{1}{2\lambda} \mathbf{v}_r^T \mathbf{v}_r$$

P_{diss} points to the first term, and dE/dt points to the second term.

Teleoperacija u valnom području

Filtriranje valnih varijabli

- ❑ Zadovoljen je uvjet pasivnosti. Filtriranje u prostoru valnih varijabli je inherentno stabilno bez obzira na iznos faznog kašnjenja koje unosi.

Iz:

$$\int_0^t \frac{1}{2} \mathbf{v}_r^T \mathbf{v}_r \leq \int_0^t \frac{1}{2} \mathbf{u}_l^T \mathbf{u}_l$$
$$E = \frac{1}{2\lambda} \mathbf{v}_r^T \mathbf{v}_r$$
$$P_{diss} = \frac{1}{2\lambda^2} \dot{\mathbf{v}}_r^T \dot{\mathbf{v}}_r$$

- ❑ Filter kontinuirano disipira energiju, ako se valni signal brzo mijenja, te na taj način eliminira snagu visoke frekvencije.
- ❑ Filtar također pohranjuje energiju, kada je valni signal različit od nule.
- ❑ Ako ulaz naglo padne, izlaz se smanjuje postepeno.
- ❑ Ako bi se uzelo $\lambda=1$ (jedinično pojačanje na niskim frekvencijama) dobila bi se pozicijska greška u stacionarnom stanju jednaka nuli.
- ❑ Prelaskom u energetske varijable dobiva se:

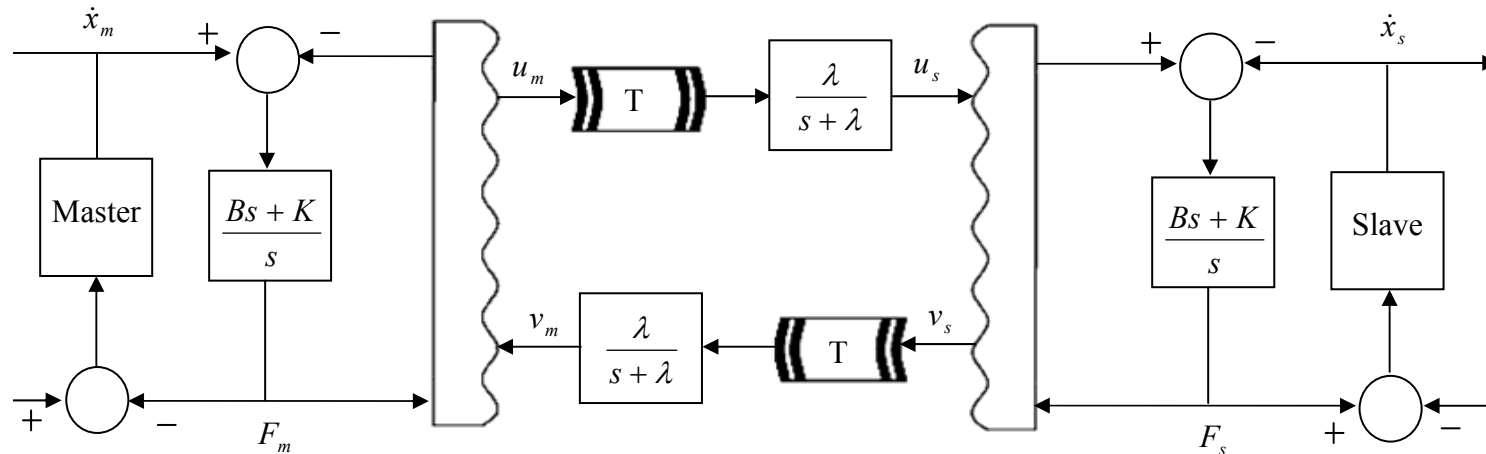
$$\ddot{\mathbf{x}}_r + 2\lambda\dot{\mathbf{x}}_r = 2\lambda\dot{\mathbf{x}}_l - \frac{1}{b}\dot{\mathbf{F}}_r$$
$$\mathbf{F}_l = \mathbf{F}_r + b(\dot{\mathbf{x}}_l - \dot{\mathbf{x}}_r)$$

Omogućuje izračunavanje željenog ubrzanja, koje se može koristiti za izračunavanje momenta potrebnog za održavanje željenog kretanja.

Teleoperacija u valnom području

Filtriranje valnih varijabli

- ❑ Filtriranje valova preporučuje se u slučaju kada izjednačavanje impedancija ne daje dobre rezultate.
- ❑ Izjednačavanje impedancija se provodi uz očekivani odziv i predviđeni radni scenarij, što se može narušiti promjenama u okolini ili djelovanjem operatora.



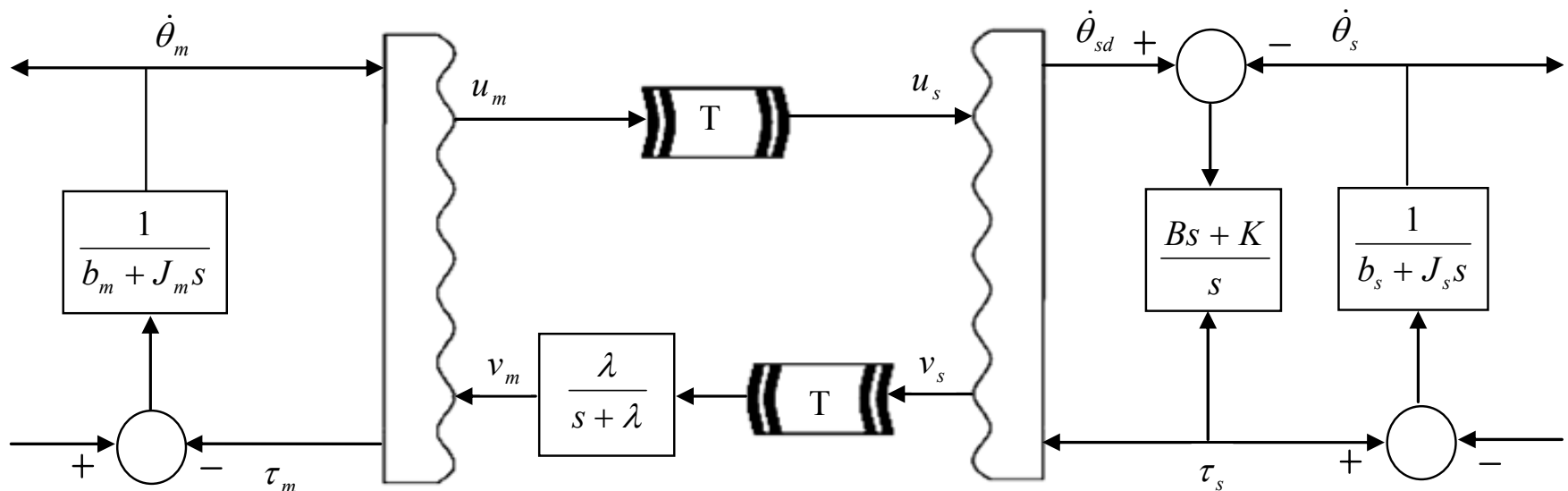
- ❑ Prosječna frekvencija filtra bira se u odnosu na T , jer je frekvencija valnih refleksija $1/2T$.
- ❑ Preporučuje se: $\lambda \geq 1/T$.

Teleoperacija u valnom području

Primjer 5. Bilateralni sistem sa valnim filtrom

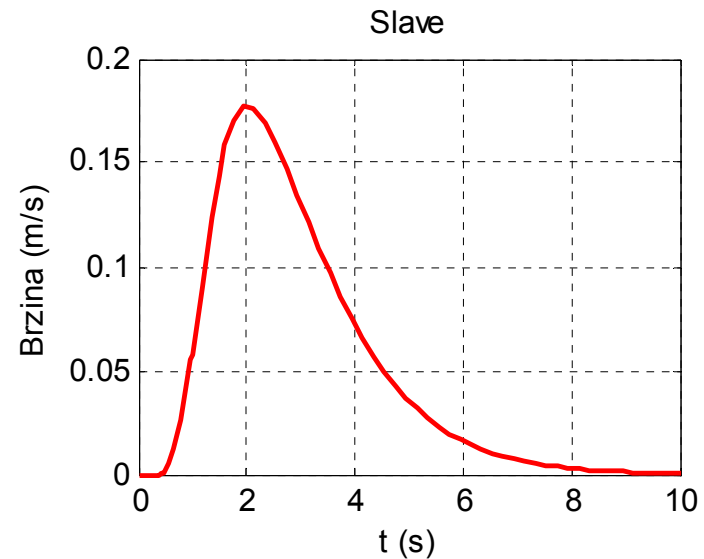
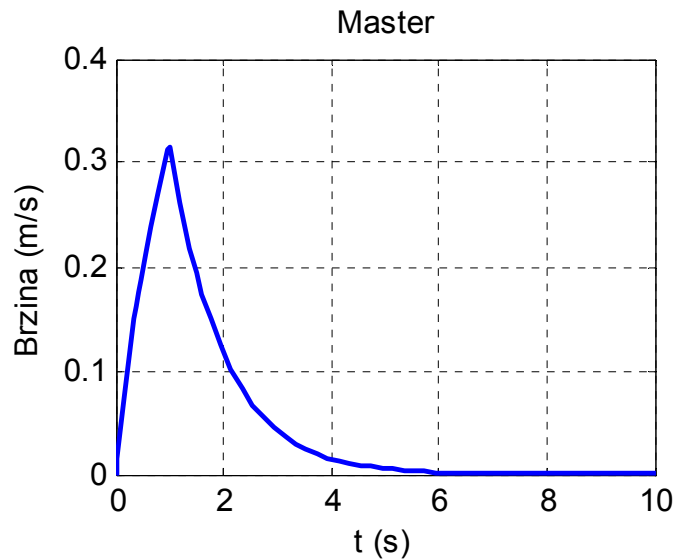
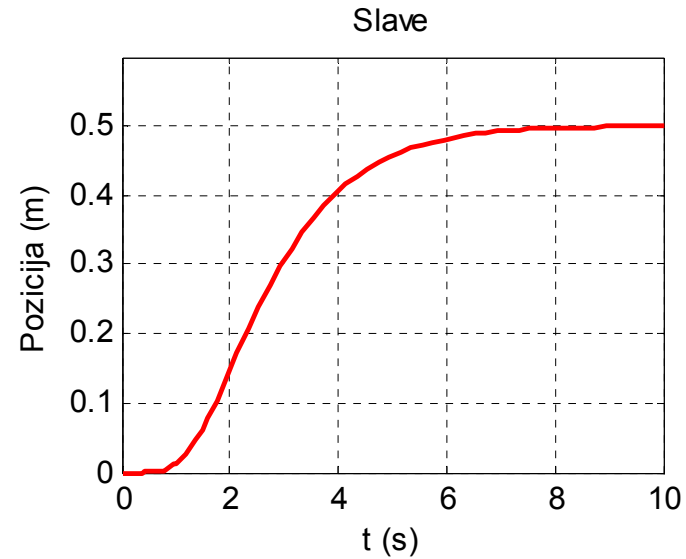
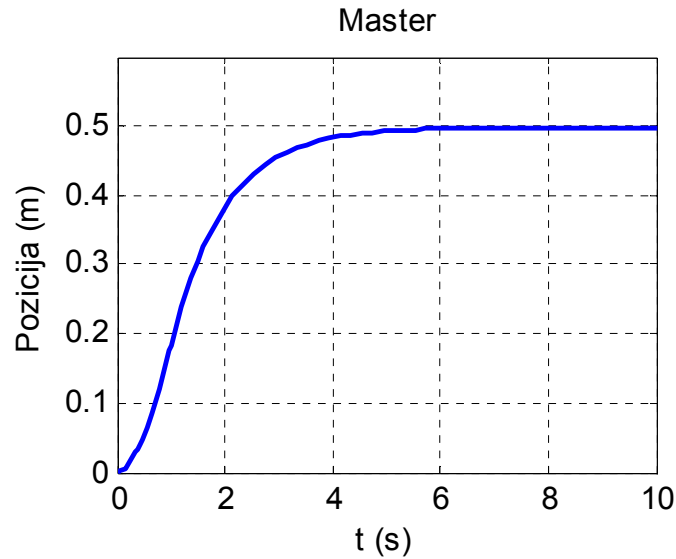
Parametri:

- Isti kao u primjerima 1, 2 i 3. $T=400$ ms, $b=1$, $\lambda=0.004$.
- Početne brzine mastera i slave-a, kao i početni uglovi vodećeg i pratećeg manipulatora jednaki su nuli.
- Korisnik djeluje na vodeći manipulator momentom iznosa 1 Nm u trajanju od 1 sekunde.
- Filter u povratnoj grani, od pratećeg prema vodećem manipulatoru.



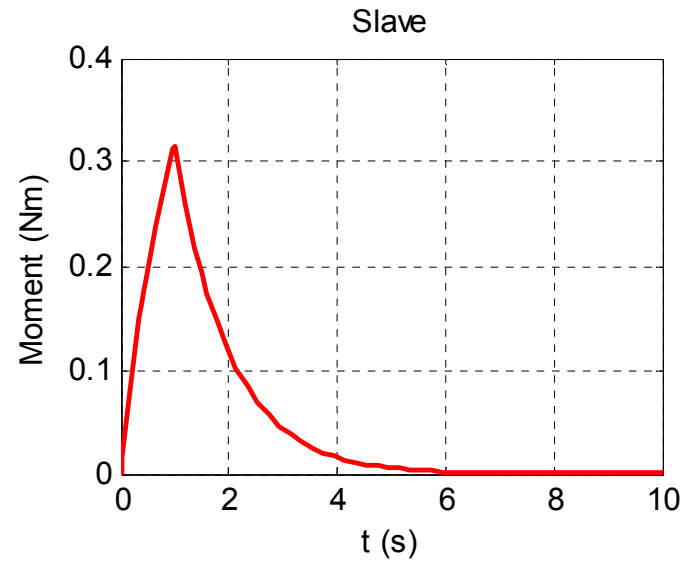
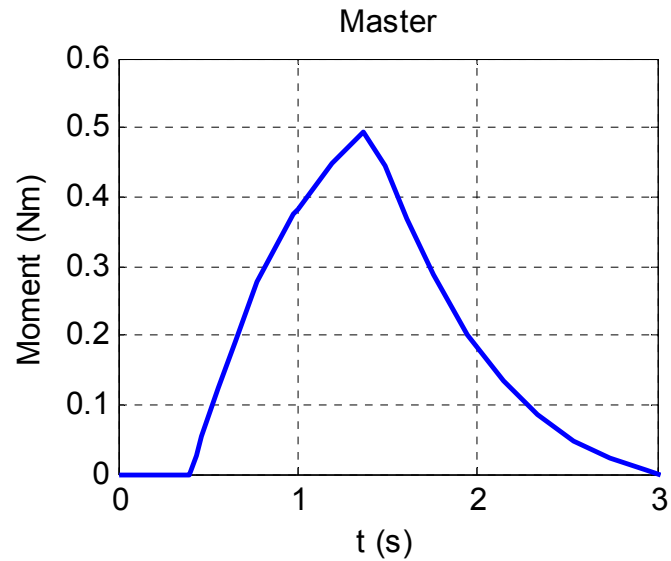
Teleoperacija u valnom području

Primjer 5. Bilateralni sistem sa valnim filtrom



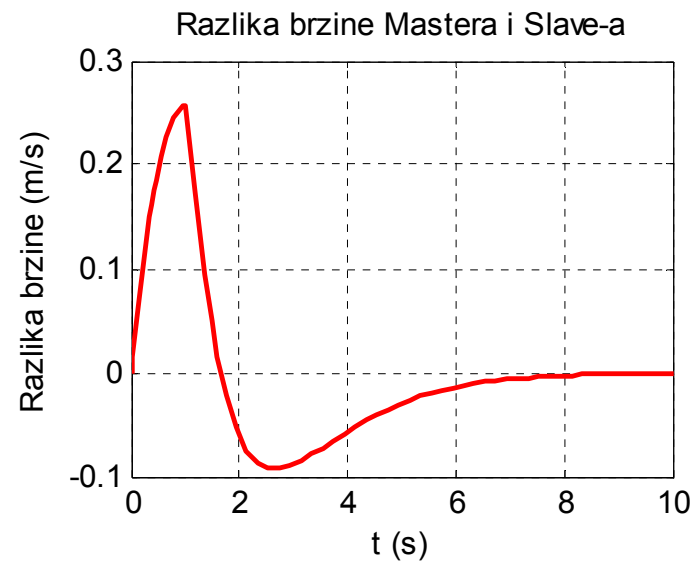
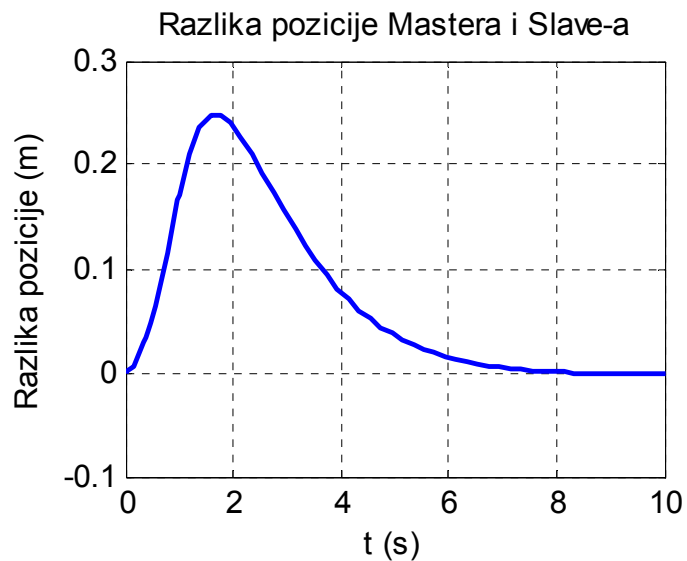
Teleoperacija u valnom području

Primjer 5. Bilateralni sistem sa valnim filtrom



Rezultati:

- Sistem stabilan.
- Dobre performanse upravljanja.
- Eliminiran efekat refleksije valova.

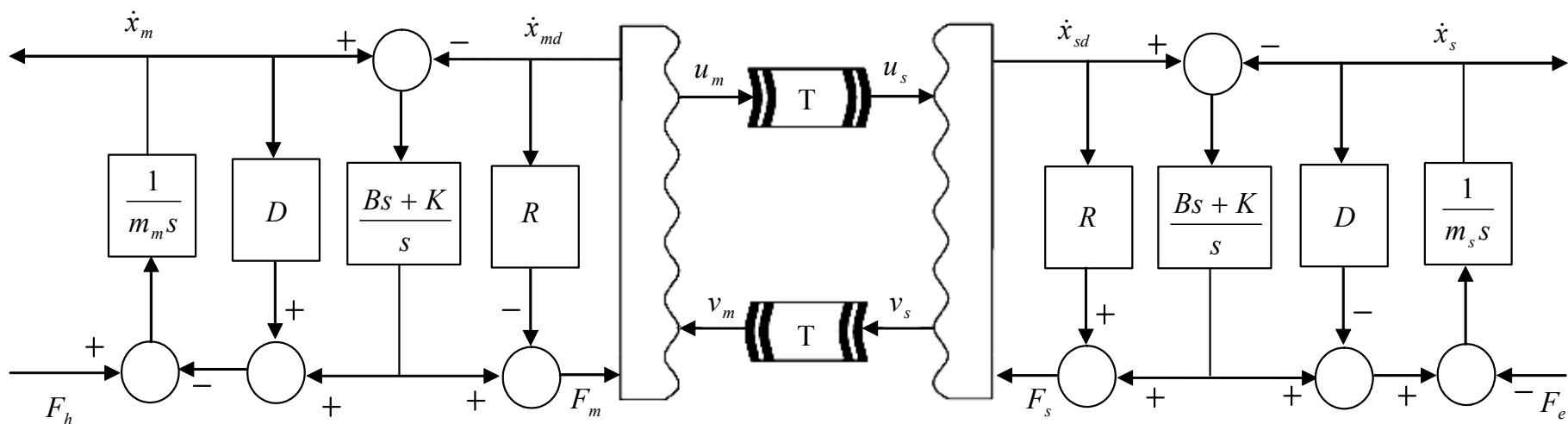


Teleoperacija u valnom području

Primjer 6. Sistem sa izjednačenim impedancijama i valnim filtrom

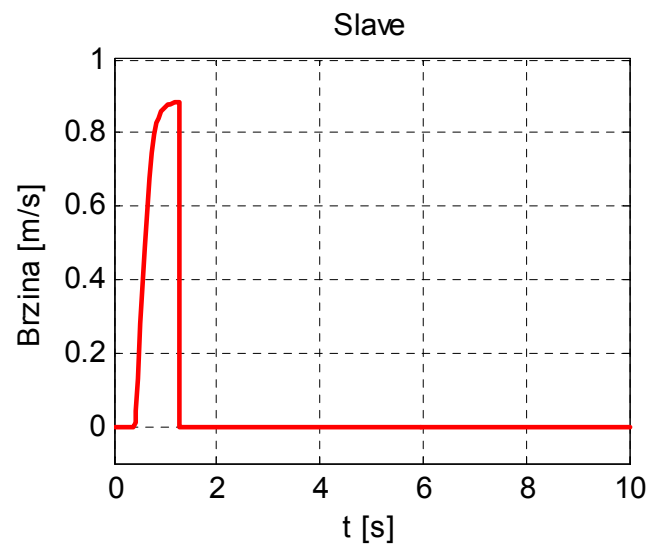
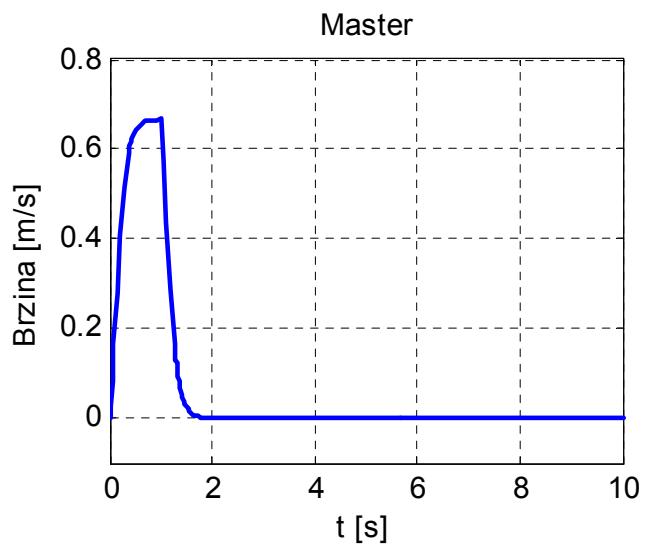
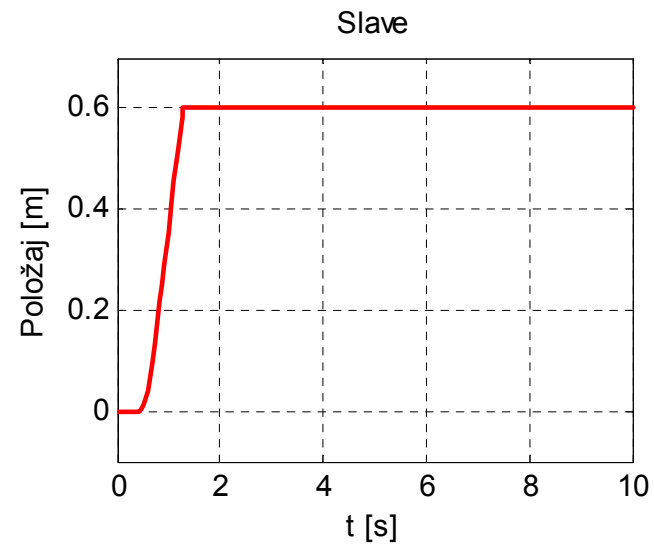
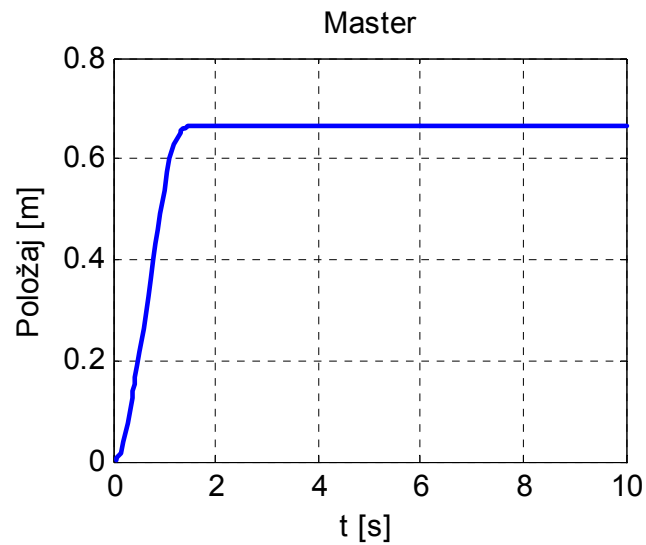
Parametri:

- Identični onima iz primjera 4.
- Na slave manipulator djeluje sila izvana. Prepreka će se simulirati na način da se postavi integrator brzine na nulu kada položaj dostigne neku vrijednost na pratećoj strani.
- Parametar valnog filtra $\lambda=0.004$.



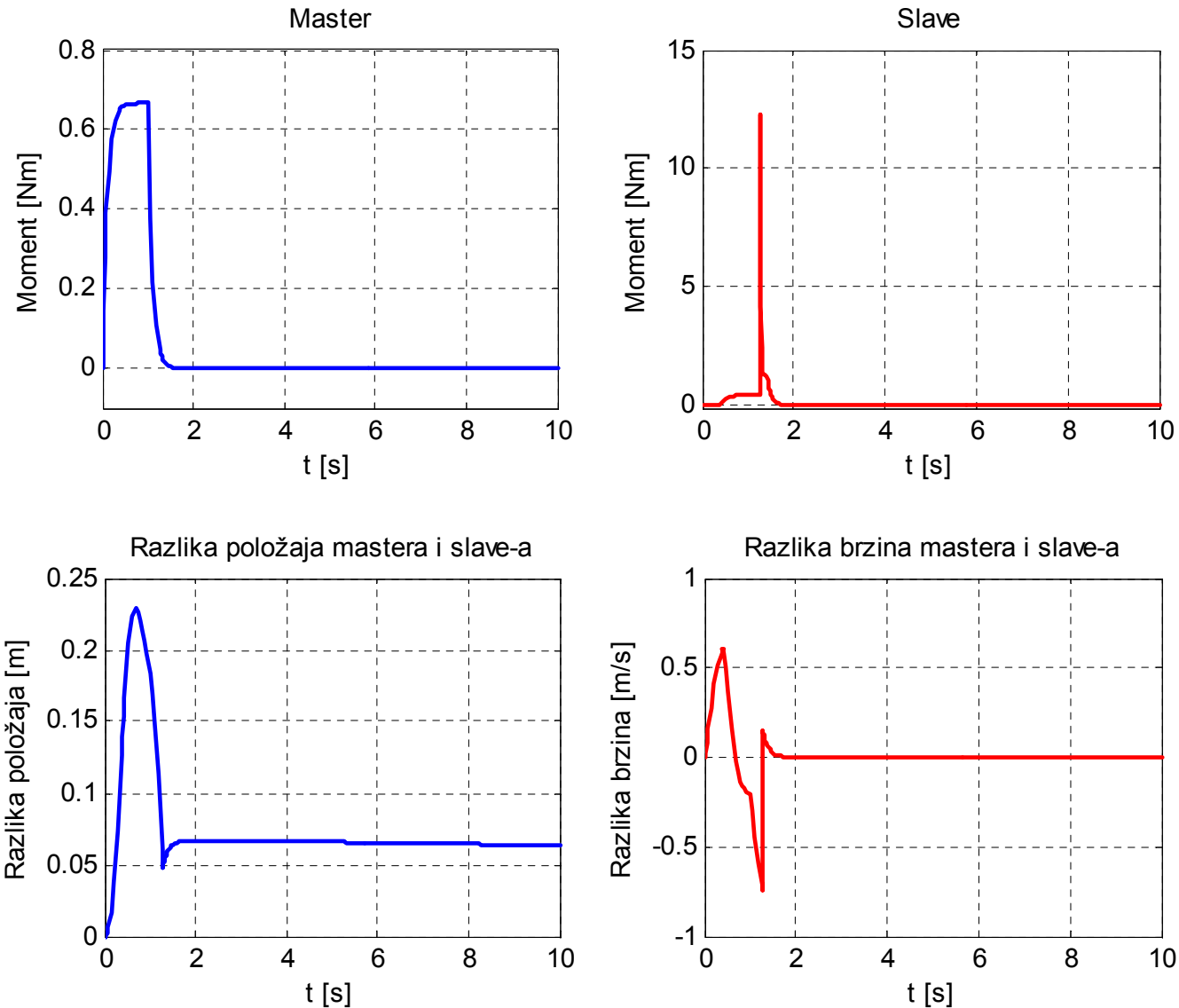
Teleoperacija u valnom području

Primjer 6. Sistem sa izjednačenim impedancijama i valnim filtrom



Teleoperacija u valnom području

Primjer 6. Sistem sa izjednačenim impedancijama i valnim filtrom



Teleoperacija u valnom području

Primjer 6. Sistem sa izjednačenim impedancijama i valnim filtrom

