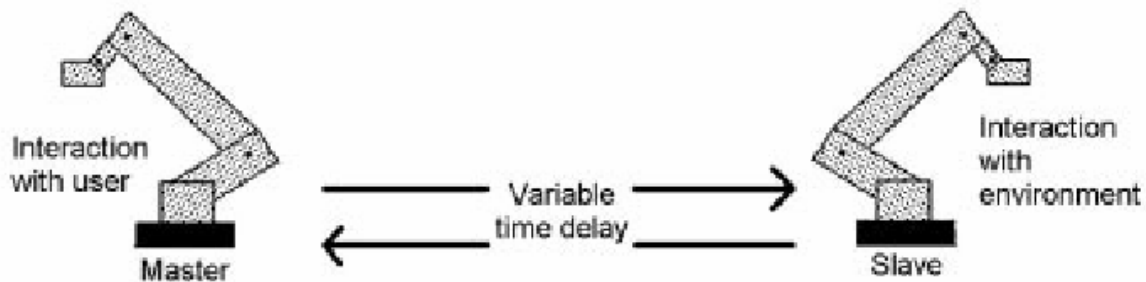


VJEŽBA 3: Daljinsko upravljanje s povratnom vezom po sili

I. Cili vježbe: Ispitivanje utjecaja kašnjenja komunikacijske mreže na kvalitetu upravljanja te mogućnosti kompenzacije istog

II. Opis vježbe:

Veliki je broj raznih procesa kod kojih se pojavljuje potreba za daljinskim upravljanjem preko komunikacijske mreže. U ovoj vježbi obrađuje se bilateralno upravljanje, gdje je povratna veza od objekta kojim upravljamo (prateći manipulator, *slave*), prema objektu koji njime upravlja (vodeći manipulator, *master*), izvedena po sili. Na taj način operater ima bolji osjećaj o udaljenoj operaciji. Budući da se upravljački signal i signal povratne veze prenose preko mreže, pojavljuju se problemi sa kvalitetom odziva i stabilnošću sustava zbog komunikacijskog kašnjenja koje unosi mreža. Pritom komunikacijsko kašnjenje može biti konstantno ili vremenski promjenljivo. Slika 1 prikazuje osnovnu strukturu bilateralnog upravljanja s promjenljivim vremenskim kašnjenjem.



Slika 1. Osnovna struktura bilateralnog upravljanja

Radi jednostavnosti u ovom istraživanju vodeći i prateći manipulator imaju jedan stupanj slobode gibanja i jednakih su dimenzija.

Jednadžba gibanja vodećeg manipulatora dana je sljedećim izrazom:

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = \tau_m, \quad (3-1)$$

gdje je J_m moment tromosti, b_m faktor prigušenja, k_m elastičnost, $\ddot{\theta}_m$ ubrzanje kraka, $\dot{\theta}_m$ brzina kraka i τ_m zakretni moment. Indeks m znači da se radi o vodećem manipulatoru (masteru).

Jednadžba gibanja pratećeg manipulatora (slave) dana je sljedećim izrazom:

$$J_s \ddot{\theta}_s + b_s \dot{\theta}_s = \tau_s. \quad (3-2)$$

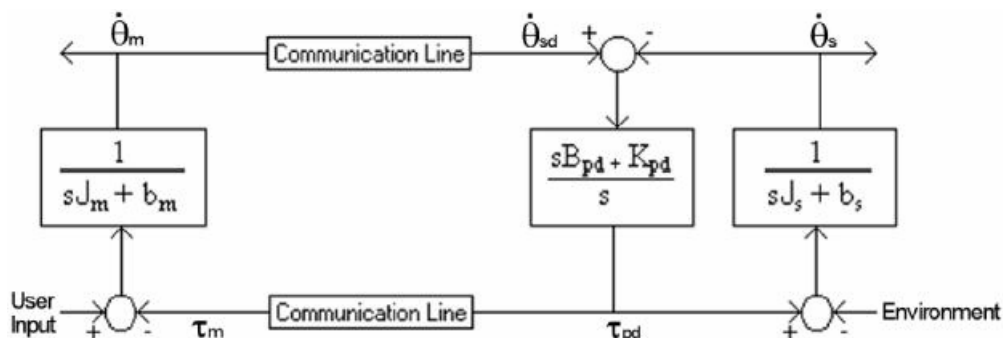
Indeks s znači da se radi o pratećem manipulatoru (slave).

Da bi prateći manipulator pratio vodeći primjenjuje se PD regulator:

$$\tau_{pd} = K_{pd} (\theta_m - \theta_s) + B_{pd} (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s), \quad (3-3)$$

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

Slika 2 prikazuje blok dijagram osnovne strukture bilateralnog upravljanja, dane izrazima (3-1)-(3-3).



Slika 2. Blok dijagram osnovne strukture bilateralnog upravljanja

Ovaj je sustav stabilan samo ako je kašnjenje u komunikacijskoj mreži manje od nekog graničnog kašnjenja. To se najbolje može vidjeti ako se provede analiza stabilnosti. Prijenosna funkcija otvorenog kruga dana je izrazom:

$$G_{ol}(s) = \frac{(B_{pd}s + K_{pd})(J_s s + b_s)}{(J_m s + b_m)(J_s s^2 + (B_{pd} + b_s)s + K_{pd})} e^{-sT}. \quad (3-4)$$

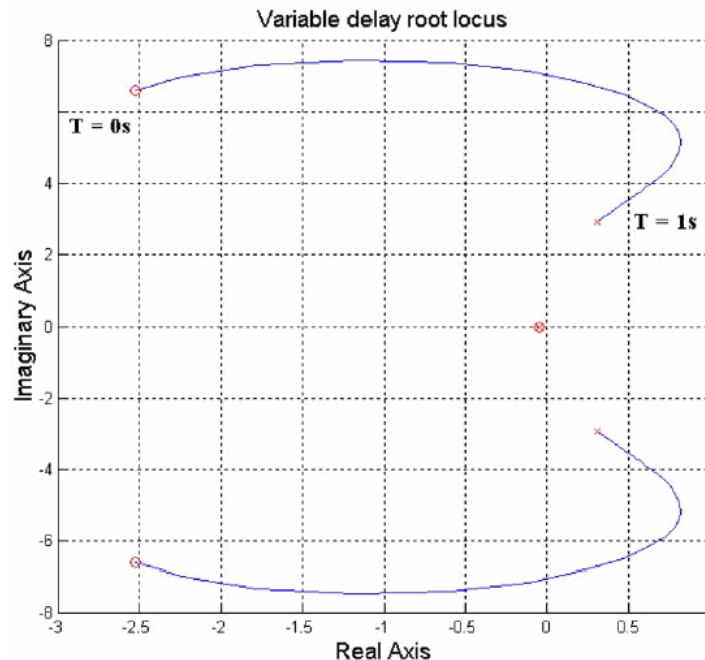
Karakteristična jednadžba sustava dana je izrazom:

$$G_{ol} + 1 = 0. \quad (3-5)$$

Budući da ova jednadžba ima beskonačan broj rješenja, rješava se preko faznog uvjeta:

$$\begin{aligned} |\hat{G}_{ol}(s)| e^{-sT} &= 1 \\ \angle \hat{G}_{ol}(s) &= \omega T + \pi + 2\pi k \end{aligned} \quad (3-6)$$

Na slici 3 prikazana je krivulja mjesta korijena karakteristične jednadžbe sustava (3-5), pri čemu je vrijeme kašnjenja T mijenjano od vrijednosti 0-1 sekunde. Na slici se vidi da za vrijeme kašnjenja T veće od nekog graničnog vremena, krivulja mjesta korijena prelazi u desnu poluravninu kompleksne ravnine s , što znači da sustav postaje nestabilan.



Slika. 3. Krivulja mjesta korijena

Opisani sustav bilateralnog daljinskog vođenja može se učiniti pasivnim (stabilnim) za proizvoljni iznos komunikacijskog kašnjenja T , ako se komunikacija između vodećeg i pratećeg manipulatora ostvaruje u prostoru valnih varijabli. Primjena valnih varijabli opisana je u predavanjima (III. dio: Sustavi za daljinsko vođenje), pa se ovdje ne opisuje.

U ovoj je vježbi, radi jednostavnosti, pretpostavljeno da su vodeći i prateći manipulator jednaki. Osim toga, pretpostavlja se da je komunikacijsko kašnjenje konstantno. Parametri sustava su sljedeći:

$$\begin{aligned} J_m &= J_s = 2 \text{ kg m}^2 \\ b_m &= b_s = 1 \text{ kg m}^2/\text{s} \end{aligned} \quad (1.1)$$

III. Rad na vježbi:

- Projektirajte PD regulator zadanog sustava za slučaj bez komunikacijskog kašnjenja. Izaberite metodu projektiranja regulatora po želji. Simulirajte sustav u Matlab/Simulinku i prikažite odzive položaja (tj. kuta) i kutne brzine vodećeg i pratećeg manipulatora, razlike položaja i brzine između vodećeg i pratećeg manipulatora te zakretnog momenta vodećeg i pratećeg manipulatora. Pritom pretpostavite da korisnik djeluje na vodeći manipulator momentom iznosa 1 Nm u trajanju od 1 sekunde, te da je početna kutna brzina vodećeg manipulatora 0.3 s^{-1} , a početna brzina pratećeg manipulatora, kao i početni kutovi vodećeg i pratećeg manipulatora jednaki su nuli.

- b) Simulirajte sustav projektiran pod a), ali sa umetnutim komunikacijskim kašnjenjem od 400 ms u upravljački signal i u povratnu vezu kao na slici 2. Prikažite odzive kao pod a). Što možete zaključiti o stabilnosti sustava?
- c) Koristeći se uputama iz predavanja (III. dio, slide 41), uvedite valne varijable. Komunikacijsko kašnjenje postavite na 400 ms te snimite odzive kao pod a). Pretpostavite da korisnik djeluje na vodeći manipulator momentom iznosa 1 Nm u trajanju od 1 sekunde. Pritom odaberite parametar $b=1$, a početne brzine i položaji vodećeg i pratećeg manipulatora jednaki su nuli. Što možete zaključiti o stabilnosti i kvaliteti odziva sustava?
- d) Kod korištenja valnih varijabli javlja se problem valne refleksije. Kako bi reducirali valnu refleksiju, u sustav projektiran pod c) uvedite kompenzacijske članove na vodećoj strani (predavanja, III. dio, slide 67) i na pratećoj strani (predavanja, III. dio, slide 68). Primjer u predavanjima sadrži manipulatore koji imaju samo masu, dok je u vježbi pretpostavljeno da imaju i prigušenje. Stoga je potrebno izvesti izraze za parametar D u slučaju kada postoji prigušenje (parametri b_m i b_s) kojim se postiže isto vladanje sustava kao da nema prigušenja. Izvod mora biti dan u izvještaju sa vježbe. Nakon toga simulirajte vladanje sustava i snimite odzive kao pod a). Odaberite parametar $b=1$, te lomnu frekvenciju $\lambda_s = 10 \text{ s}^{-1}$.
Napomena: Parametar R će u ovom slučaju biti negativan.
- e) Potrebno je ispitati vladanje sustava iz prethodne točke u odnosu na vanjski poremećaj. U ovom slučaju korisnik djeluje cijelo vrijeme na vodeći manipulator konstantnim momentom iznosa 1 Nm. Pretpostavimo da pritom prateći manipulator udari u kruti zid, koji se može modelirati tako da se brzina pratećeg manipulatora resetira na nulu kada kut prijeđe određenu vrijednost. U tu svrhu može se koristiti integrator s omogućenim ulazom za resetiranje (parametar *external reset* integratora postavite na *level*). Nakon toga simulirajte vladanje sustava i snimite odzive kao pod a). Javlja li se valna refleksija u odzivu sustava? Obrazložite!
- f) Potrebno je smanjiti valne refleksije uslijed promjena u okruženju uvođenjem filtra valnih varijabli (predavanja, III. dio, slide 72). Dakle, u sustav projektiran pod e) potrebno je dodati valni filter u obje grane valnih varijabli, te simulirati vladanje sustava i snimiti odzive kao pod a). Je li smanjen utjecaj valnih refleksija na vladanje sustava? Kako vladanje sustava ovisi o iznosu presječne frekvencije filtra λ ?

Napomena: Izvješće s vježbe izraditi prema Uputama za izradu izvješća. Osim izvješća, potrebno je predati i sve razvijene simulacijske sheme i pripadajuće materijale (npr. mat datoteke).