

Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu

Sveučilište U Zagrebu

Usmjeravanje i kontrola pomorskih vozila

Seminar iz Pomorske robotike

Pero Drobac 0036523011

Lovre Grašo 0036524804

Enio Krizman 0069083848

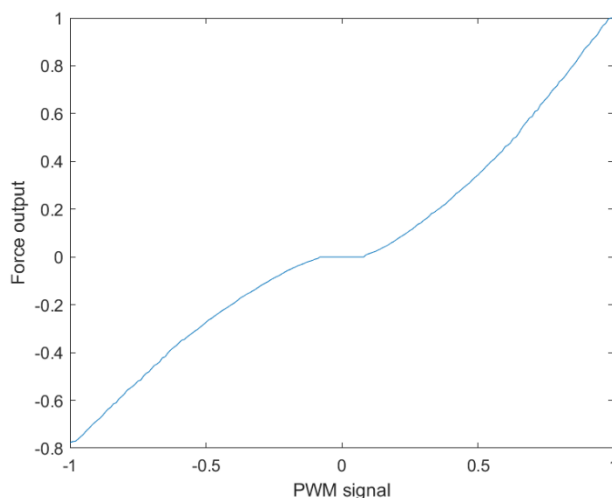
U Zagrebu, 2023.

1. Kontrola položaja robota

1.1. Kompenzacija nelinearnosti potisnika

Pitanje: Dijagram PWM u odnosu na silu vašeg skupa podataka. Komentirajte oblik. Je li već linearan ili ne?

Graf ulaznog PWM signala i izlazne sile nije linearan, već ima oblik izlomljene krivulje što je prikazano na Slici 1:



Slika 1 : Oblik grafa, odnosno odnos ulaznog PWM signala i izlazne sile, nije linearan.

1.2. Aproksimacija krivulje PWM vs. Sila

Pitanje: Komentirajte koja funkcija može biti aproksimativna Force vs. PWM krivulja i zašto ste je odabrali. Navedite parametre funkcije koji se primaju pomoću cft alata ili sličnog alata.

Aproksimacija inverza, odnosno krivulje PWM vs. Sila, se može dobiti sljedećom polinomskom formulom:

$$n = p1 * f^4 + p2 * f^3 + p3 * f^2 + p4 * f + p5$$

$$p1 = 0.5869;$$

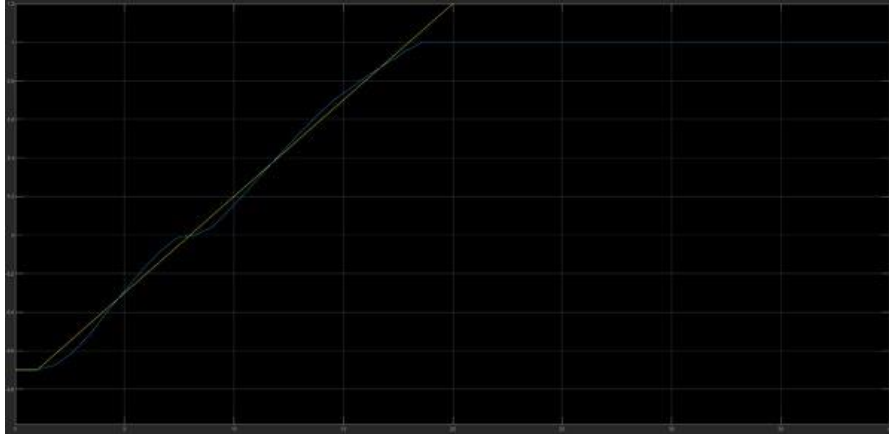
$$p2 = -0.9109;$$

$$p3 = -0.3809;$$

$$p4 = 1.6743;$$

$$p5 = -0.0089;$$

Polinomska funkcija je izabrana jer je dovoljno dobra aproksimacija inverza funkcije na Slici 1. Svrha ove pretvorbe je linearizacija izlaznog signala tj. ako se ulaz koji prođe kroz ovu pretvorbu iskoristi kao ulaz u T200 potiskivač, izlaz će biti približna aproksimacija linearnog signala. Parametri funkcije su pronađeni koristeći cftool na inverzu funkcije. Rezultat je prikazan na Slici 2 prikazano na sljedećoj stranici.



Slika 2: Usporedba aproksimacije inverza i linearne funkcije

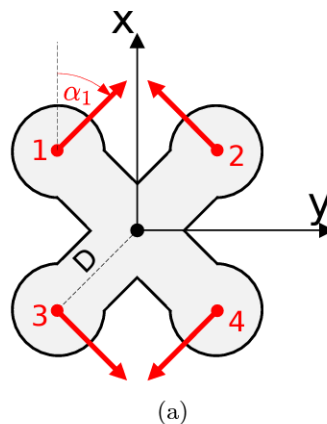
Inverz funkcije blisko prati linearnu funkciju do maksimalne vrijednosti (1), nakon koje stagnira, što je ispravno ponašanje.

1.3. Raspodjela kontrole

Pitanje : Alokacija aktuatora B određena sa slike 3.

Raspodjela aktuatora B određena je sa slike 3. U matrici B prvi redak predstavlja transformaciju za silu napredovanja (surge, smjer X), drugi za silu zanošenja (sway, smjer Y) i treći za moment zaošijanja. Apsolutne vrijednosti matrice nisu važne sve dok imamo razumne vrijednosti koje se mogu dobiti pomoću kosinusa i sinusa (-1,1). Ako promijenimo apsolutne vrijednosti, također možemo promijeniti pojačanja u regulatorima što dovodi do istih rezultata u simulaciji. Ono što je važno su predznaci vrijednosti. Matrica B ima oblik:

$$B = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & -0.25 & -0.25 \\ -0.25 & 0.25 & -0.25 & 0.25 \\ -0.25 & 0.25 & 0.25 & -0.25 \end{bmatrix}$$



Slika 3: Konfiguracija potisnika na vozilu

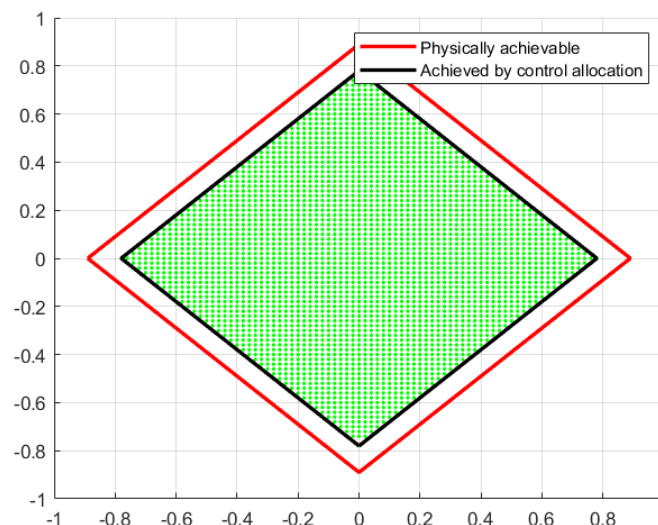
Koristeći koordinatni sustav sa slike 3 vidljivo je da predznaci za potisnike 1 i 2 imaju pozitivan X smjer što znači da je X predznak pozitivan. Slično, potisnici 3 i 4 imaju negativne predznake jer je njihov smjer X negativan. S druge strane, potisnici 1 i 3 imaju pozitivne predznake Y, dok su potisnici 2 i 4 predznaci obrnuti. Udaljenost D za svaki potisnik je ista, a predznaci ovise o kvadrantu u kojem se nalaze potisnici (prvi i treći kvadrant su pozitivni, drugi i četvrti negativni). To znači da drugi i treći potisnik imaju pozitivne predznake, a prvi i četvrti potisnik negativne.

Pitanje: Opišite metodu raspodjele kontrole (obrnutu od dodjele aktuatora) koju ste odabrali za izračun B^\dagger .

Metoda koja je korištena za izračunavanje B^\dagger bila je Moore Penrose pseudo inverzna (PI) metoda. Moore Penrose metoda izračunava inverziju pomoću formule $B^{-1} = (B^T B)^{-1} B^T$. Prvi razlog zašto smo odabrali PI metodu je taj što matrica raspodjele B koja se koristi nije kvadratna. Također, matrica ima dimenzije 3x4 i rang matrice 3 što znači da imamo samo jedno rješenje. Drugo, s obzirom na to da radimo u simulaciji, možemo pretpostaviti da su potisnici simetrični, zbog čega nismo morali uvoditi težinske funkcije.

Pitanje: Usporedite pokrivenost vaše metode u prostoru X-Y pomoću kontrolnu skriptu dodjele coverage.m i priložite odgovarajuću sliku. Komentirajte pokrivenost.

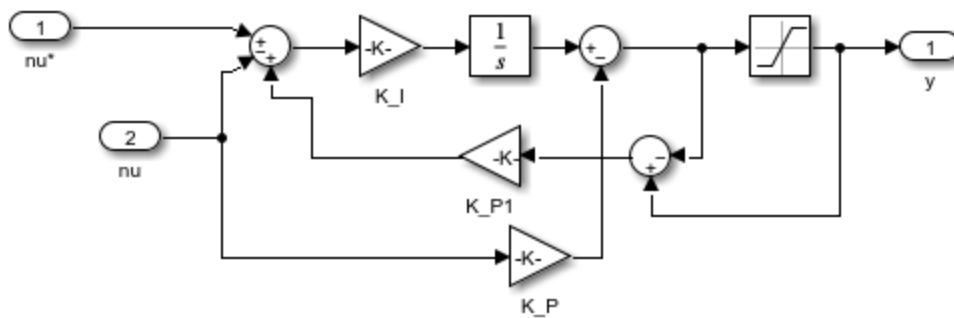
Rezultati korištenja PI metode su vrlo dobri i zadovoljavajući kao što vidimo na slici ispod. Većina fizički dostupnog prostora pokrivena je metodom kontrolne raspodjele.



Slika 4: Prikaz dohvatljivosti virtualnih sila koristeći Moore-Penrose pseudoinverz

2. Regulator brzine

Za upravljanje brzinom korišten je I-P regulator prikazan na Slici 5.



Slika 5: Blokovski dijagram regulatora brzine

Pitanje: Opišite i argumentirajte svoju odluku za odabir kaskadnog ili jednog PID dizajna. Argumentirajte svoj izbor PID regulatora i zašto ste koristili ili niste koristili proporcionalne, integralne i/ili izvedene dijelove.

Izabrali smo PD regulator za kontrolu pozicije i I-P regulator za kontrolu brzine. Kaskada dva regulatora izabrana je radi lakše provjere i upravljanja odziva zasebnih upravljačkih veličina (brzine i pozicije) koji su odvojeni jedan od drugog. Izborom kaskadnog regulatora u procesu ugađanja prvo se postavljala i regulirala brzina dok nisu dobiveni zadovoljavajući rezultati, a tek onda je ugađana pozicija. To je omogućilo sigurnije postavljanje pojačanja regulatora i lakše otkrivanje pogrešaka jer su pogreške nastale zbog brzine vozila i krivog pozicioniranja bile lakše uočljive nego da smo koristili jedan regulator za oboje. Proporcionalno dijelovi korišteni su kako bi se postavile željene vrijednosti jer bez toga ne bi bilo moguće. U regulatoru za kontrolu brzine se koristi integracijski član kako bi se izbjeglo naslagivanje grešaka, odnosno kako bi u stanju mirovanja potisnici bili isključeni. D član nije korišten u regulatoru brzine jer brzina ne oscilira značajno tj. ovisi o poziciji.

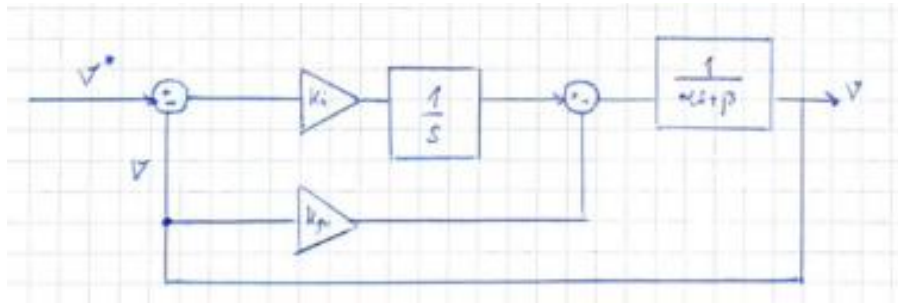
Pitanje: Izvedite prijenosnu funkciju zatvorene petlje $G_d(s) = \psi/\psi^$. Opišite kako ste prilagodili regulator? Koji su parametri korišteni?*

Postavljeni zahtjevi na izgled prijenosne funkcije bili su nadvišenje manje od 5% ($\sigma_m < 5\%$) te vrijeme smirivanja manje od 5 sekundi ($T_s < 5s$). Iz postavljenih zahtjeva izračunati su koeficijent prigušenja ζ i karakteristična frekvencija unutrašnjeg kruga ω_n . Dobivene vrijednosti uvrštavaju se u prijenosnu funkciju drugog reda prikazano u nastavku:

$$\zeta = \frac{|l_n \cdot \sigma_m|}{\sqrt{\pi^2 + (l_n \sigma_m)^2}} = 0.6901$$

$$\omega_n = \frac{\pi}{T_s \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}} = 0.08682 \text{ rad/s}$$

$$G(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$$



Slika 6 : Skica za određivanje prijenosne funkcije zatvorenog kruga regulatora brzine

Iz Slike 6. prikazanim postupkom u nastavku dobivena je prijenosna funkcija unutrašnjeg zatvorenog kruga za regulaciju brzine u ovisnosti o pojačanjima K_p i K_i . Prijenosna funkcija zatvorenog kruga s I-P regulatorom smjera drugog je reda te se može aproksimirati PT2 članom koji sadrži koeficijent prigušenja ζ i karakterističnu frekvenciju ω_n . Shodno tomu, dobivena prijenosna funkcija izjednačena s prijenosnom funkcijom 2. reda s postavljenim zahtjevima za nadvišenje i vrijeme smirivanja.

$$[(v^* - v)) \cdot \frac{K_i}{s} - v K_p] \cdot \frac{1}{\alpha s + \beta} = v$$

$$G_1(s) = \frac{v}{v^*} = \frac{1}{\frac{\alpha}{K_i} s^2 + \frac{(K_p + \beta)}{K_i} s + 1} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$$

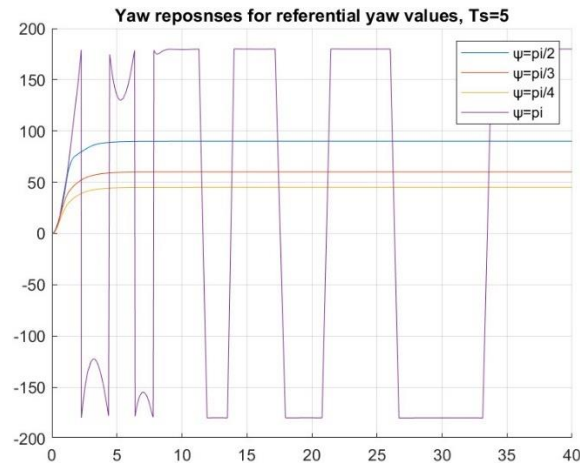
Sređivanjem i izjednačavanjem izraza, uz ranije dobivenu frekvenciju i prigušenje, dobivamo sljedeće izraze za pojačanja K_i i K_p :

$$K_p = \alpha \omega_n^2$$

$$K_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} K_p - \beta$$

Pitanje: Ciljajte vrijeme smirivanja od 5 sekundi za referencu $\psi^ = \pi/2$ Nacrtajte normalizirani odziv koraka (ψ/ψ^*) za reference $\psi^* \in (\pi/4, \pi/3, \pi/2, \pi)$. Prikažite sve odgovore skretanja na istom crtežu. Što opažate?*

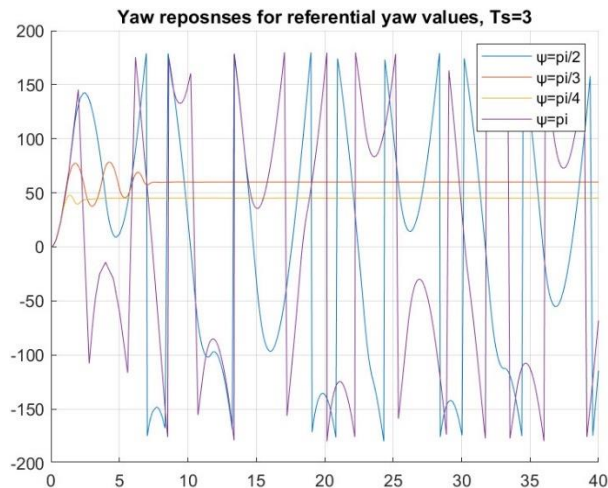
Napomena: odzivi sa slike 7 i slike 8 prikazani su bez anti wind-up dijela u I-P regulatoru.



Slika 7: Prikaz odziva raznih kuteva za $T_s=5s$

Odziv je zadovoljavajući za sve kutove osim π , koji je nestabilan jer nema stacionarno stanje već vozilo mijenja kotve zakreta kako bi probalo postići položaj zaošijanja π , međutim ne uspijeva. To se događa za π stupnjeva jer izlaz I dijela I-P regulatora premašuje ograničenja potisnika zato što akumulira pogrešku sustava tijekom vremena.

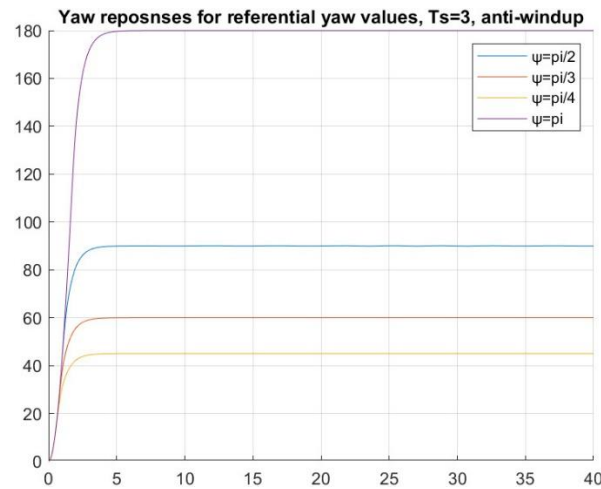
Pitanje: Povećajte podešavanje PID-a kako biste postigli vrijeme smirivanja od 3 sekunde i ponovite dijagram od prije. Koja je razlika? Zašto?



Slika 8: Prikaz odziva raznih kutova za $T_s=3s$

Za $T_s = 3$ odzivi više osciliraju jer dolazi do prejake reakcije zbog zahtjeva za brzim odzivom. Sustav zbog akumuliranja pogreške ne može dovoljno brzo reagirati na promijene i postaje nestabilan za veće kutove od $\frac{\pi}{2}$ te ne može postići stacionarnu vrijednost. Stabilni odzivi manji od $\pi/2$ imaju oscilacije i veće nadvišenje od željenog što nije željeno ponašanje. Rješenje je dodavanje anti wind-up dijela u I-P regulator što je već prikazano na Slici 5.

Pitanje: Implementirajte i koristite mehanizam anti wind-up uzimajući u obzir zasićenje za moment koji je $\sim 0,85$. Zabilježite odgovore za vrijeme smirivanja od 3 sekunde pomoću mehanizma anti wind-up.

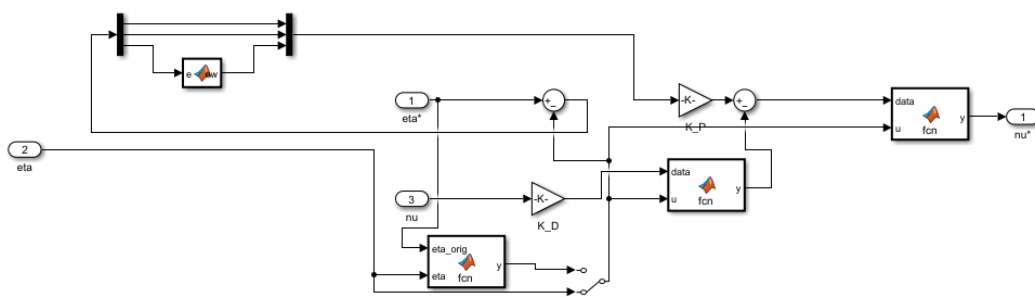


Slika 9: Prikaz odziva raznih kuteva za $T_s=3s$ uz anti-windup

Implementiranjem anti wind-upa rješava problem akumuliranja pogreške u I dijelu I-P regulatora te sustav ima željene odzive koji odgovaraju zahtjevima nadvišenja i vremena smirivanja, bez oscilacija. Zaključno, implementacijom anti wind-up mehanizma nestabilni odzivi postaju stabilni za iste vrijednosti te odziv sustava postaje brži s manje oscilacija što je željeno ponašanje.

3. Regulator pozicije

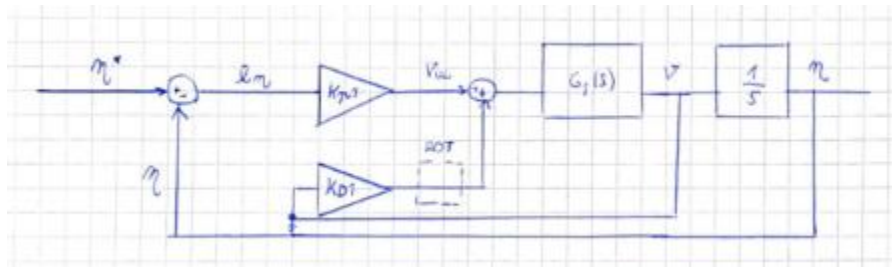
Pitanje: Opišite i argumentirajte svoju odluku za odabir kaskade ili jedan PID dizajn. Argumentirajte svoj izbor PID regulatora i zašto ste ili niste koristili proporcionalni, integral i/ili izvedenih dijelova.



Slika 10: Blokovski dijagram regulatora pozicije

Objašnjenje izbora kaskadnog regulatora cijelog nalazi se u poglavlju 2. Izabran je PD regulator za kontrolu pozicije. Proporcionalni P član neizostavan je dio svakog regulatora, a D član korišten je kako bi se smanjile oscilacije prilikom dolaska vozila u željeno stacionarno stanje kako ne bi titrao oko njega prije nego li se ustali. I član nije bilo potrebno koristiti kod regulatora pozicije jer je pogreška stacionarnog stanja neznajna jer regulator pozicije nema brzi odziv kao regulator brzine, a može prouzrokovati akumulaciju pogreške.

Pitanje: Opišite kako ste podesili kontroler? Koji su parametri bili koristio?



Slika 11: Skica za određivanje prijenosne funkcije zatvorenog kruga cijelog sustava

Iz Slike 10 i 11 određena je prijenosna funkcija cijelog sustava $G(s)$. Prijenosna funkcija regulatora brzine $G1(s)$ uzeta je kao idealna ($G1(s)=1$) radi olakšavanja numeričkog postupka kako bi sustav bio prvog reda. Shodno tomu, prijenosna funkcija zatvorenog kruga s PD regulatorom pozicije je prvog reda te se može aproksimirati PT1 članom koji sadrži karakterističnu frekvenciju vanjskog kruga ω . Postupak je prikazan u nastavku:

$$((y_r - y)) (K_p + K_d s) \frac{1}{s} = y$$

$$y_r(K_p + K_d s) = sy + (K_p + K_d s)y$$

$$G(s) = \frac{y}{y_r} = \frac{K_p + K_d s}{K_p + K_d s + s} \Rightarrow \frac{\frac{K_d s + 1}{K_p}}{\frac{K_d + 1}{K_p} s + 1} = \frac{1}{\frac{s}{\omega} + 1}$$

Izjednačavanjem izraza i sređivanjem dobivenu su izrazi za pojačanje regulatora K_p :

$$\frac{K_d + 1}{K_p} = \frac{1}{\omega}$$

$$K_p = \omega(K_d + 1) = \frac{\omega_1}{4}(K_d + 1)$$

Karakteristična frekvencija vanjskog kruga mora biti 3 do 4 puta manja od frekvencije unutarnjeg kruga kako bi regulator pozicije bio sporiji od regulatora brzine, jer u suprotnom sustav će postati teško upravljiv. Vrijednost K_d dobivena je empirijskim zaključivanjem i metodom pokušaja i pogrešaka, a vrijednost K_p u gornjem postupku je izvedena u ovisnosti o postavljenom K_d i frekvenciji unutrašnjeg kruga.

Iskorišteni su sljedeći parametri za kontroler, izabrani empirijski, promatrajući prikladnost odziva:

$$\omega = \frac{\omega_n}{4};$$

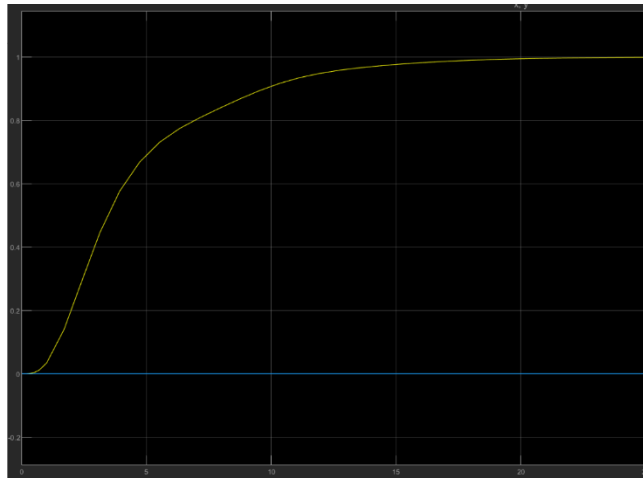
$$K_d_{pose} = [1, 1, 0.33]'$$

$$K_p_{pose} = \omega n1 * (K_d_{pose} + 1)$$

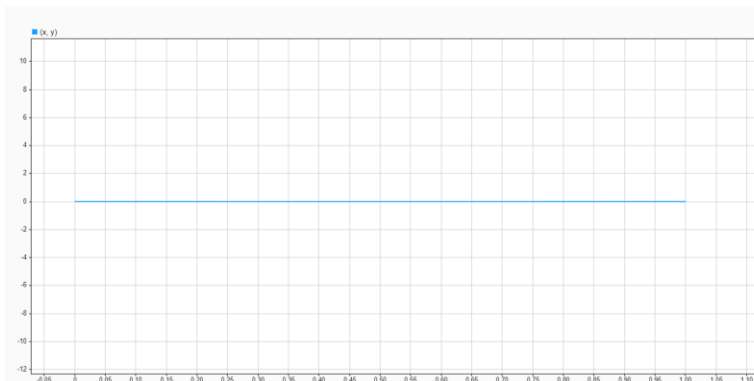
Pitanje: Implementirajte anti-windup iz prethodnog koraka. Koje su granice zasićenja postavljene?

Granice zasićenja na anti-windupu su $[-0.85, 0.85]$.

Pitanje: Postavite smjer $\psi^ = 0$ i sjever (x) referencu na $x^* = 1$ m i zabilježite vremenski prikaz. Dodajte vremenski dijagram i x – y dijagrame u izvještaj.*



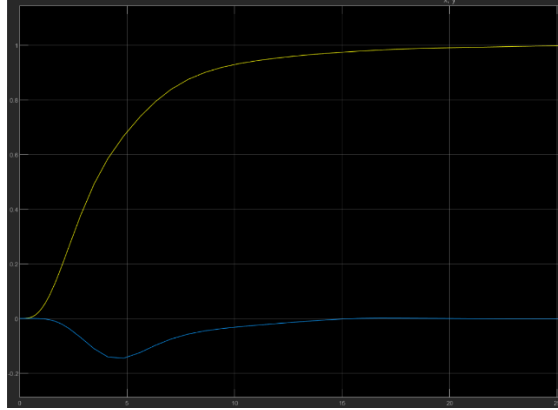
Slika 12: Vremenski dijagram za $x^*=1$



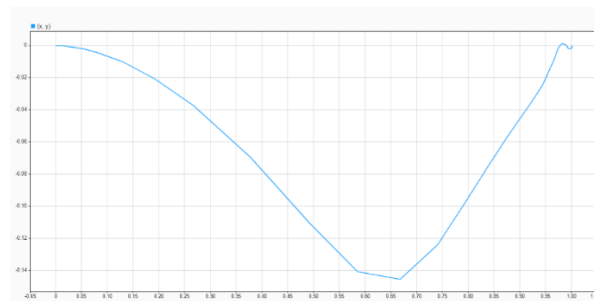
Slika 13: x-y dijagram za $x^*=1$

U odzivu sustava ispravno nema pomaka po y-osi.

Pitanje: Postavite početni heading modela na $\psi = \pi/2$. Ponovite prethodnu točku. Potvrdite da se platforma kreće u pravom smjeru?



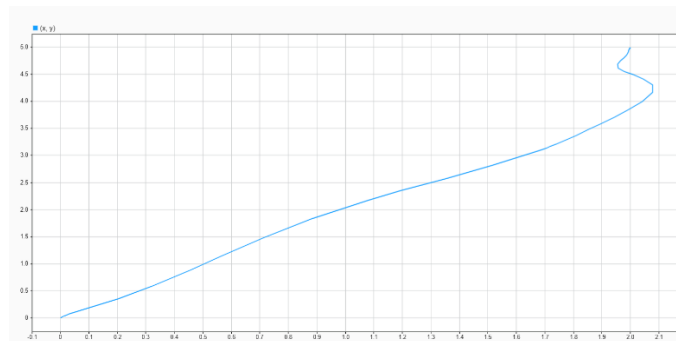
Slika 14: Vremenski dijagram za $x^*=1$ uz $\psi = \pi/2$



Slika 15: x-y dijagram za $x^*=1$ uz $\psi = \pi/2$

Zbog zasićenja u početnom stanju se vozilo kreće gibati u krivom smjeru, no ubrzo se ispravi – vidljiva je promjena vrijednosti y , no nije značajna u usporedbi s x .

Pitanje: Resetirajte početni heading na nulu i postavite sljedeće $x^ = 2$, $y^* = 5$. Priložite $x - y$ dijagram. Kreće li se vozilo ravno? Zašto?*

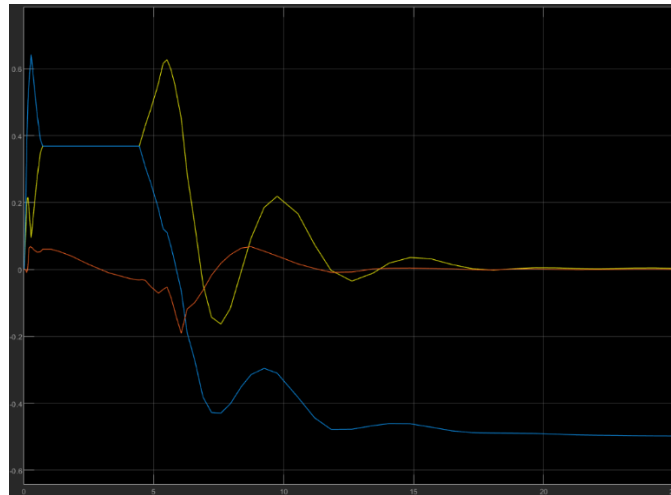


Slika 16: x-y dijagram za $x^*=2$, $y^*=5$

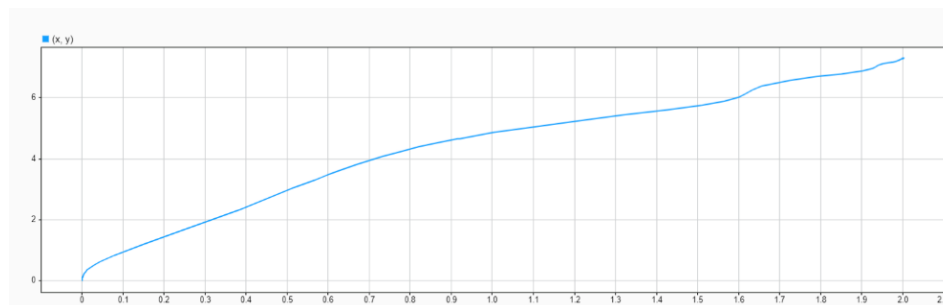
Za poziciju (2,5) vozilo se ne kreće ravno zbog zasićenja potiskivača.

Pitanje: Zadržite iste reference kao i prije. Dodajte 0,5 m/s struje u bilo kojem željeni smjer i opišite što se događa? Pokažite graf za τ kao i $x - y$.

Uz struju od 0.5m/s prema istoku, dobijemo sljedeće grafove:



Slika 17: Vremenski dijagram τ (stabilizira se u $[0, -0.5, 0]$)



Slika 18: x-y dijagram uz struju od 0.5m/s

Vozilo se prilagodi na struju te se vrijednost τ , umjesto u $[0, 0, 0]$, stabilizira u $[0, -0.5, 0]$. Posljedica toga je odmak od tražene vrijednosti. (vidljivo na x-y grafu – vrijednost y nadilazi 5).

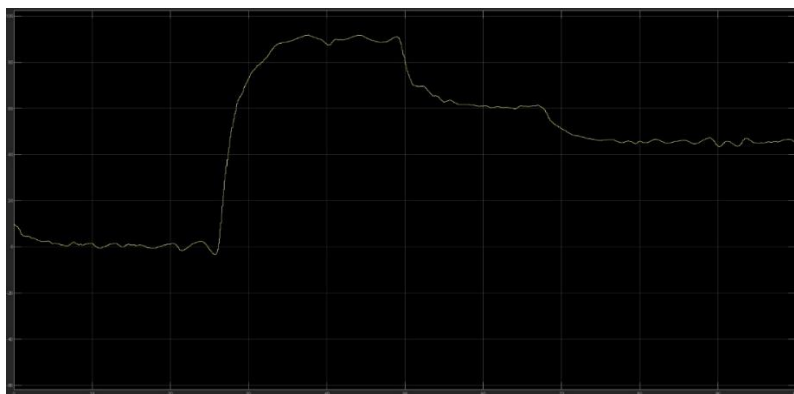
Prelazak iz simulacije na vozilo

4. Ručno upravljanje

Ručno upravljanje je postavljeno uspješno: u neutralnom stanju upravljača vozilo miruje i potiskivači su tihi. Kada na upravljaču zadamo naredbu, vozilo se kreće u ispravnom smjeru. Empirijski se da estimirati da je upravljanje linearno. Simulacija se izvodi u stvarnom vremenu, odnosno Simulinkov brojač je usporediv sa satom.

5. Regulator brzine

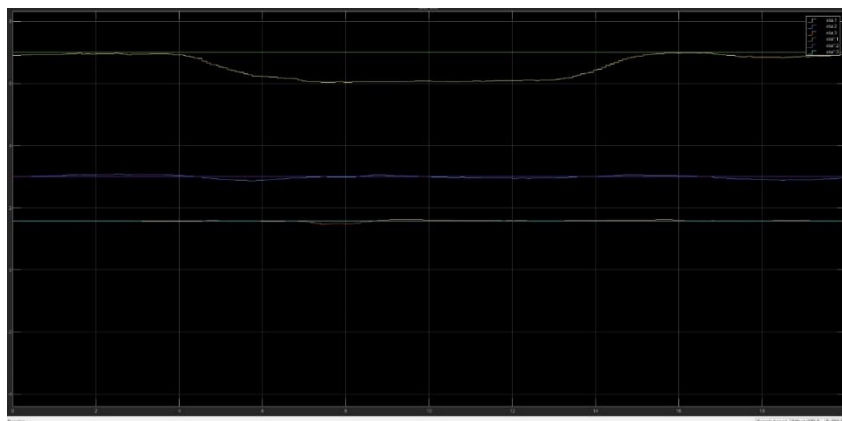
Pitanje: Ciljajte razumno vrijeme smirivanja za referentni $\psi^ = \pi/2$. Nacrtajte normalizirani odziv koraka (ψ/ψ^*) za reference $\psi^* \in (\pi/4, \pi/3, \pi/2, \pi)$. Prikažite sve kutove zaošijanja na istom crtežu. Je li ponašanje sličan?*



Slika 19: Vremenski dijagram zaošijanja za razne kutove (0 , π , $2/3 * \pi$, $\pi/2$)

Na slici 19 vidljivo je kako je od 30. do 50. sekunde postavljen kut π , nakon toga je od 50. do 70. sekunde postavljen kut $2/3 * \pi$, a od 70. sekunde kut iznosi $\pi/2$. Odmaci u zaošijanju nastaju zbog smetnji u praktičnoj izvedbi zbog djelovanja sila u stvarnome svijetu koje nisu bile uključene u simulaciju kao što su kašnjenja kamere, utjecaja valova i drugih smetnji. Unatoč tome može se iščitati da je ponašanje približno simulaciji – prijelaz između zadanih kutova je intuitivan i zadovoljavajuć bez primjetnog nadvišenja uz brze promjene stanja. Također je praćenje reference i zadovoljavajuće jer je stvarni kut zaošiljanja približan referentnoj vrijedosti.

Pitanje: Koristite kuku za čamac (mezzo-marinaio) da ometate vozilo, tj. zakačite metalnu petlju i pokušajte okrenuti H2OmniX. Pokažite odbijanje poremećaja kao zaseban crtež. Napomena: možete koristiti i ruke ako nemate kuku za čamac, ali nemojte se smočiti.

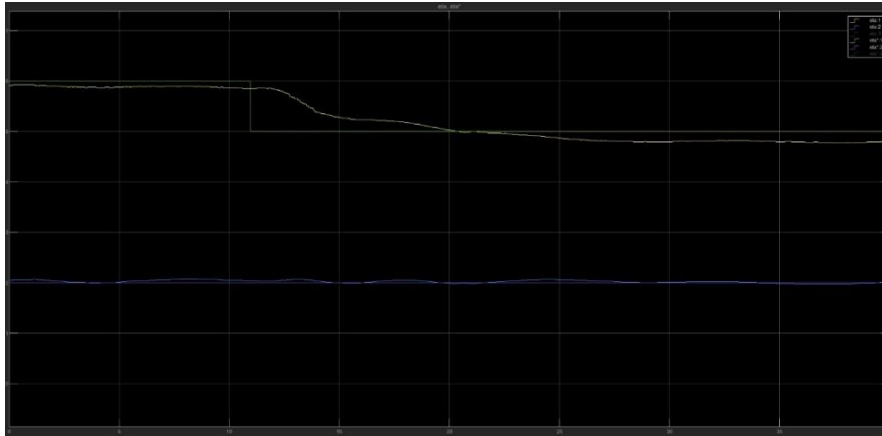


Slika 20: Vremenski dijagram pozicije uz ručno pomicanje robota

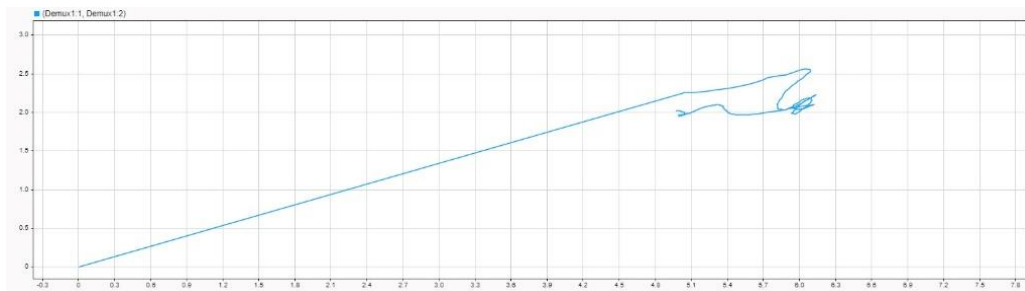
Na početku grafa se robot nalazi u zadanoj poziciji. U 4. sekundi dolazi do namjernog ometanja: vanjska sila u obliku kuke za čamac tj. ljudska sila povlači vozilo od stacionarnog stanja, što se može iščitati promjenom pozicije vozila. Vanjska sila nakon nekog vremena prestaje djelovati, te se vozilo vraća u zadani položaj. Tokom vraćanja nema nadvišenja zbog ispravne implementacije anti-windupa te možemo zaključiti kako vozilo ima željeno ponašanje – samostalno se vraća u stacionarno stanje nakon djelovanja vanjske sile.

6. Regulator pozicije

Pitanje: Postavite heading na $\psi^ = 0$ i sjever (x) referencu na odabranu početnu poziciju. Neka vozilo konvergira prema ishodištu. Jednom u ishodištu povećajte ili smanjite x^* referencu za 1 m i zabilježite vremenske dijagrame za x i y. Dodajte vremenski prikaz i x – y graf.*



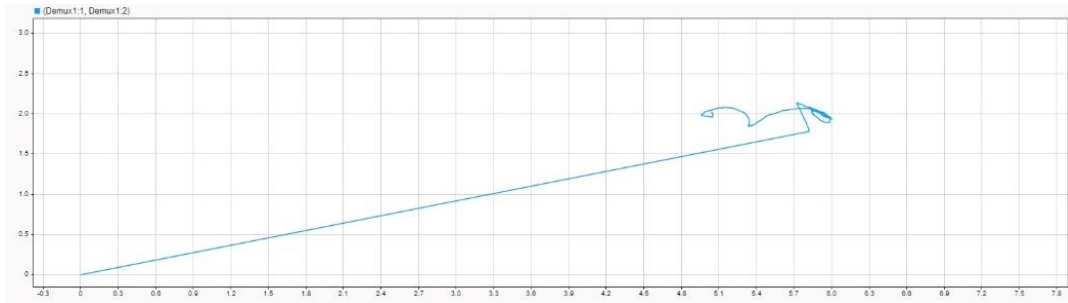
Slika 21: Vremenski dijagram pozicije uz promjenu reference za 1m



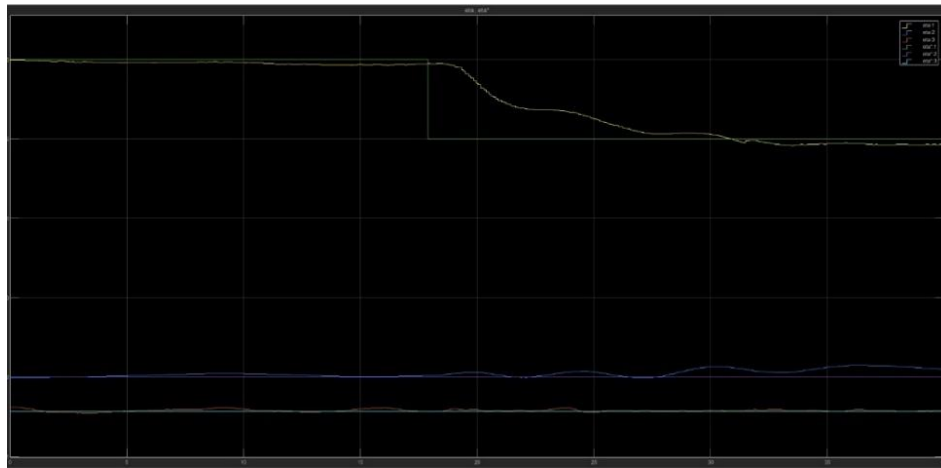
Slika 22: x-y dijagram pozicije uz promjenu reference za 1m

Vozilo iz početnog položaja konvergira u poziciju (6,2) te mu je zatim dana nova referentna vrijednost iznosa (5,2). Na x-y grafu može se iščitati prvo dolazak vozila u stacionarno stanje, te potom pomak po x-osi iz pozicije (6,2) u poziciju (5,2) prilikom primanja nove referentne vrijednosti te da zaključiti da vozilo također ima željeno ponašanje, odnosno ispravno kretanje po jednoj osi.

Pitanje: Postavite zadani smjer modela na $\psi^ = \pi/2$ i ponovite prethodnu točku. Potvrdite da se platforma kreće u dobrom smjeru?*



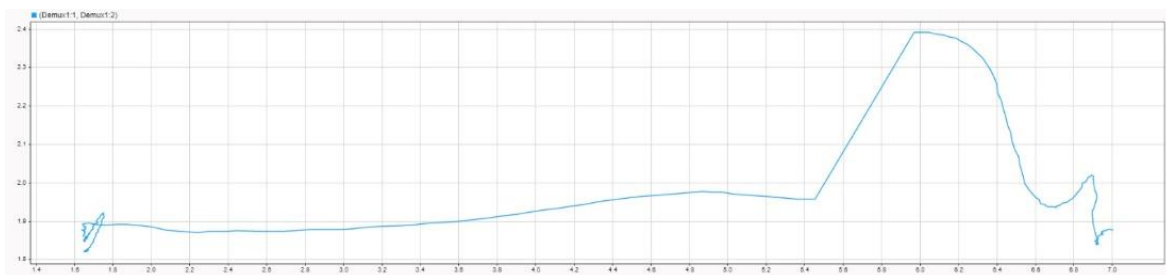
Slika 23: x-y dijagram pozicije uz promjenu reference za 1m i $\psi^* = \pi/2$



Slika 24: Vremenski dijagram pozicije uz promjenu reference za 1m i $\psi^* = \pi/2$

Koristeći isto početno stanje i drugu referentnu vrijednost, uz $\psi^* = \pi/2$, robot također uspješno dolazi do tražene pozicije bez značajne devijacije od optimalnog puta. Za razliku od prošlog zadatka, ovaj se put na vremenskom dijagramu nalazi i vrijednost traženog zaošijanja (eta3 u grafu) koja iznosi $\psi = \pi/2$. Vozilo dakle ima željeno ponašanje neovisno o zadanom kutu zaošijanja.

Pitanje: Ponovo postavite heading na nulu i postavite reference koje želite napraviti da bi se vozilo kretalo preko bazena, tj. od $T1 = (1,5, 2)$ do $T2 = (7, 2)$. Snimi prijelaz i komentiraj. Koliki je overshoot?



Slika 25: x-y dijagram kretnje preko bazena

Iz slike se može vidjeti kako su početna i završna postignute, ali se dogodio neočekivani pomak robota u x smjeru u zadnjem dijelu kretnje, a uzrok tome je nepoznat. Možemo pretpostaviti da se u nekom trenutku dogodio poremećaj u sustavu na kojeg regulatori nisu mogli pravovremeno reagirati i kompenzirati ga te je bilo potrebno određeno vrijeme kako bi se djelovanje poremećaja neutraliziralo te se sustav vratio u željenu putanju.

7. Literatura

- [1] Predavanja iz kolegija Pomorska robotika 2022./2023., Nikola Mišković, Đula Nađ
- [2] Thor I. Fossen (2002.), Marine Control Systems
- [3] Thor I. Fossen (2011.), Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons