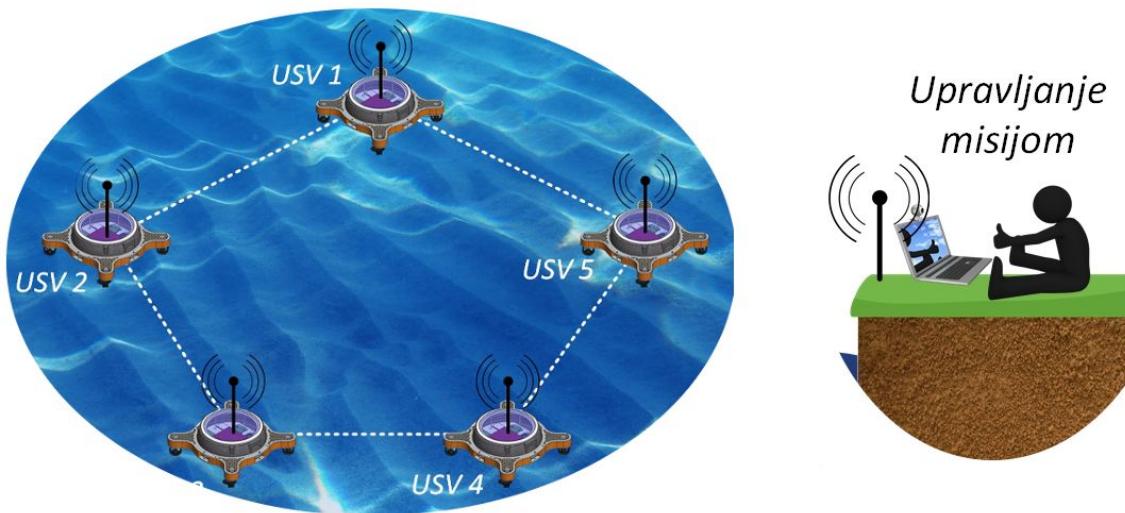




## D3.3 Algoritam za distribuirano upravljanje formacijom



Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Laboratorij za podvodne sustave i tehnologije



# Sadržaj

<b>Uvod</b>	<b>2</b>
<b>Algoritam upravljanja formacijom</b>	<b>3</b>
Teorija grafova	3
Informacijski konsenzus	4
Osnovni algoritam upravljanja formacijom	5
Izbjegavanje kolizija	5
Virutalna sila	6
Algoritam upravljanja formacijom s izbjegavanjem kolizija	6
<b>Simulacijski eksperimenti</b>	<b>7</b>
Topologija razmjene informacija	7
Scenarij sastavljanja formacije	8
Topologija 1	9
Topologija 2	11
Topologija 3	12
Scenarij promjene formacije	14
<b>Eksperimenti na stvarnim vozilima</b>	<b>16</b>
Scenarij sastavljanja formacije	16
Scenarij promjene formacije	18
Promjena formacije trokut	18
Promjena formacije linija	18
<b>Zaključak</b>	<b>20</b>

## Uvod

Da bi mogli izvoditi eksperimente u okruženju kao što je more, moramo paziti na sigurnost vozila. Jedan od zahtjeva koji proizlaze iz toga je odabir komunikacijske arhitekture koja nam omogućuje upravljanje vozilima s kopna. U D3.2 smo definirali komunikacijsku arhitekturu koja nam omogućava decentraliziranu razmjenu informacija potrebnu za izvršavanje zadataka upravljanja formacijom površinskih vozila.

Koristit će se platforme za dinamičko pozicioniranje imena PlaDyPos razvijena u LAPOST-u (Laboratorij za podvodne sustave i tehnologije) na Fakultetu Elektrotehnike i Računarstva u Zagrebu. Razvijeno je pet autonomnih bespilotnih plovnih platformi koje imaju funkciju autonomne mreže za nadzor podmorja. Kako bi uspješno izvodile svoju zadaću, autonomne platforme moraju se moći autonomno gibati na moru, održavati željenu poziciju, ostvariti okupljanje, translaciju i rotaciju formacije, kao i njenu promjenu.

Prilikom dugotrajnog autonomnog rada na moru, jedna od važnijih stvari je sigurnost opreme. Kako ne bi radili modifikacije na vozilima potrebno je ostvariti programsko rješenje koje će osigurati sigurnost platformi. Iz tog razloga je nužno, u postojeći algoritam upravljanja, integrirati sustav izbjegavanja kolizija tijekom gibanja, okupljanja i promjene formacije.

U sklopu ovog rada razvijen je algoritam za decentralizirano upravljanje formacijom platformi. Upravljački algoritam ostvaruje sve zahtjeve navedene u D3.1. Algoritam je implementiran u ROS-u (*engl.* Robotic Operating System) okruženju. Kontinuirana razmjena informacija o poziciji i referentnom izgledu formacije je također implementirana u ROS-u. Nadalje, rezultati testiranja algoritma će biti prikazani za simulacijske testove i testove na stvarnim vozilima.

## Algoritam upravljanja formacijom

Upravljanje formacijom pristupom na bazi postizanja konsenzusa je metoda koja se u zadnje vrijeme dosta istražuje. Informacijski konsenzus omogućava da vozila koja međusobno komuniciraju, u zašumljenoj vremenski promjenjivoj mrežnoj topologiji, imaju konzistentne informacije koje su ključne za izvođenje koordiniranih zadataka. Algoritmi za postizanje konsenzusa su dizajnirani tako da se izvode distribuirano. Vozila osvježavaju stanje informacije na temelju informacija koje su primile od susjednih vozila u komunikacijskom dometu. Cilj je dizajnirati algoritam za postizanje konsenzusa takav da informacija na svakom vozilu u formaciji konvergira ka istoj vrijednosti.

Ako ostvarimo prikladno postizanje informacijskog konsenzusa, konsenzus algoritam se može primijeniti u rješavanju problema upravljanja formacije.

## Teorija grafova

Prirodno je modelirati izmjenu informacija između vozila usmjerenim ili neusmjerenim grafom. Usmjereni graf se sastoji od parova  $(N, \rightarrow)$ , gdje je  $N = \{1, \dots, n\}$  konačni neprazni set čvorova, a  $\in N^2$  je set uparenih čvorova, zvani rubovi. Čvorovi označavaju stvari koje sadrže i izmjenjuju informacije, a rubovi označavaju tok izmjene informacija. U neusmjerrenom grafu, u usporedbi s usmjerenim, vrijedi da je  $_{ij} = _{ji}$ , što predstavlja dvosmernu izmjenu informaciju između i-tog i j-tog čvora.

Usmjereni graf naziva se čvrsto povezanim ako postoji direktni put od bilo kojeg čvora do bilo kojeg drugog čvora. Neusmjereni graf naziva se povezanim ako postoji put između bilo kojeg para čvorova.

Matrica  $G = [g_{ij}]$  usmjerenog grafa je definirana kao  $g_{ii} = 0$ , i  $g_{ij} = 1$  ako postoji direktna veza od  $j$ -tog do  $i$ -tog čvora, odnosno ukoliko  $i$ -ti čvor prima informacije od  $j$ -tog čvora. Može se reći da matrica  $G$  predstavlja matricu povezanosti grafa. Matrica  $K = [k_{ij}]$  je matrica otežanja veze između čvorova i za nju vrijedi  $k_{ij} > 0$ . Matrica  $A = [a_{ij}] = [g_{ij}k_{ij}]$  je matrica susjedstva (*engl. adjacency*) otežanog grafa koja označava prima li čvor  $i$  informacije od čvora  $j$ , i s kojim otežanjem. Matrica  $L = [l_{ij}]$  se naziva laplasijan, gdje je  $l_{ii} = \sum_{i \neq j} a_{ij}$ , i  $l_{ij} = -a_{ij}$ ,  $\forall i \neq j$ .

Nakon definicije toka informacija u sustavu, predstavljen je algoritam za postizanje informacijskog konsenzusa.

## Informacijski konsenzus

Promatrani sustav vozila se može aproksimirati dinamikom prvog reda. Kako bi postigli informacijski konsenzus za sustav dinamike prvog reda, koristi se sljedeći konsenzus algoritam:

$$_i = - \sum_{j \in N} g_{ij} k_{ij} (i - j) \quad (1)$$

gdje i predstavlja jedno vozilo,  $_i \in R^m$ ,  $g_{ii} = 0$ ,  $g_{ij} = 1$  ako vozilo  $i$  prima informaciju od vozila  $j$ ,  $g_{ij} = 0$  u suprotnom, a  $k_{ij} > 0$  predstavlja otežanje informacije koju vozilo  $j$  šalje vozilu  $i$ .

U tekstu,  $\xi$  i  $\zeta$  predstavljaju općenite vrijednosti između kojih se uspostavlja konsenzus. Međusobni odnos između veličina dan je relacijom:

$$= \quad (2)$$

Ovakvim algoritmom, krajnji cilj je postići da  $_i \rightarrow_j$ ,  $\forall (i, j)$  kako  $t \rightarrow +\infty$ . U promatranom sustavu površinska vozila se gibaju u ravnini, pa se može pretpostaviti da je  $m = 2$ . Željena brzina vozila  $_i = [u_i, v_i]^T$  odgovara veličini  $_i$ , a pozicija vozila  $_i = [x_i, y_i]$  odgovara veličini  $_i$ . Ovime algoritam za postizanje konsenzusa dobiva oblik:

$$_i = - \sum_{j \in N} g_{ij} k_{ij} (i - j) \quad (3)$$

Konsenzus algoritam, u obliku u kojem je napisan trenutno, postiže  $_i \rightarrow_j$ ,  $\forall (i, j)$  kako  $t \rightarrow +\infty$ .

Dobivenu jednadžbu za postizanje konsenzusa pozicije je potrebno dodatno modificirati kako bi vozila mogla postići željenu formaciju u dvodimenzionalnom prostoru.

U sljedećem poglavlju ćemo definirati način zadavanja izgleda formacije, te ga upotrijebiti u algoritmu upravljanja formacijom.

## Osnovni algoritam upravljanja formacijom

Kako bi algoritam za postizanje formacije sastavio formaciju, mora je se na neki način zadati. Predlaže se rješenje zadavanja izgleda formacije pomoću sljedeće matrice:  $D \in N^2 \times m = [d_{ij}]$ , gdje je  $N$  veličina formacije, a  $d_{ij} = [d_{xij}, d_{yij}]^T$  je željena udaljenost od vozila  $i$  do vozila  $j$  u  $x$  i  $y$  smjeru. Karakteristike ovakvog načina zadavanja su:  $d_{ii} = 0$ ,  $d_{ij} = -d_{ji}$ , i zbog toga je redundantno pisati cijelu matricu. Sve potrebne informacije su sadržane u gornjem desnom ili donjem lijevom trokutu matrice.

Primjenom ovog rješenja na algoritam iz jednadžbe (3), predlaže se sljedeće rješenje za postizanje upravljanja formacijom:

$$_i = - \sum_{j \in N} g_{ij} k_{ij} ({}_i - {}_j - d_{ij}) \quad (4)$$

Ovakvom modifikacijom algoritma postiže se  ${}_i \rightarrow {}_j + d_{ij}$ ,  $\forall (i, j)$  kako  $t \rightarrow +\infty$ .

Komunikacija između vozila se događa u diskretnim vremenskim trenucima, što znači da se informacije u pojedinim vozilima osvježavaju korištenjem jednadžba diferencija. Zbog realizacije algoritma na računalu, bilo u simulaciji ili na stvarnom sustavu, prirodno je zapisati algoritam u diskretnom obliku:

$$_i[k+1] = - \sum_{j \in N} g_{ij} k_{ij} ({}_i[k] - {}_j[k] - d_{ij}) \quad (5)$$

gdje  $k$  označava događaj izmjene informacija.

## Izbjegavanje kolizija

Jedan od ciljeva projekta subCULTron je razvijanje sustava koji može autonomno nadgledati podvodni ekosustav tijekom dugog vremenskog perioda. Tijekom sastavljanja formacije pozicije vozila se mogu preklapati jer algoritam, kako je napisan trenutno, ne sadrži sigurnosne mjere. Preklapanje pozicija u sustavu s više vozila je veoma opasno ponašanje i može dovesti do oštećenja ili uništenja opreme.

Kako bi osigurali siguran rad sustava, mora se implementirati sustav za izbjegavanje kolizija između pojedinih vozila. Za rješenje ovog problema, predlaže se primjena koncepta virtualne sile.

## Virtualna sila

Virtualnu silu definiramo kao funkciju udaljenosti između susjednih agenata koja konvergira na predefiniranoj udaljenosti. Drugim riječima, virtualna sila između dva vozila privlači ih ako su udaljeniji od predefinirane udaljenosti, a odbija ih ako su bliži od predefinirane udaljenosti. Pošto je cilj korištenja virtualne sile izbjegavanje međusobnih kolizija, vozila bi se samo trebala odbijati ako udaljenost među njima dođe u potencijalno opasnu zonu. Stoga, matematički izraz za virtualnu silu je prikazan sljedećom jednadžbom:

$$\Delta F_i = \begin{cases} \sum_{j \in N} -\left(\frac{2k_r}{r_{ji}^2} + k_\delta\right) \mathbf{n}_{ji}, & 0 < r_{ji} < r_d \\ 0, & r_{ji} \geq r_d \end{cases} \quad (6)$$

gdje je  $\Delta F_i$  suma virtualnih odbijajućih sila između vozila  $i$  i ostalih vozila u formaciji,  $k_r$  i  $k$  su korekcijski parametri,  $r_{ji}$  je euklidska udaljenost između vozila  $j$  i  $i$ ,  $r_d$  je radijus zone odbijanja oko svakog vozila, i  $\mathbf{n}_{ji}$  je normalizirani vektor koji gleda od vozila  $i$  do vozila  $j$ , čiji matematički izraz glasi:  $\mathbf{n}_{ji} = (\mathbf{n}_j - \mathbf{n}_i)/\|\mathbf{n}_j - \mathbf{n}_i\|$ .

## Algoritam upravljanja formacijom s izbjegavanjem kolizija

Sljedeći korak je dodavanje predložene odbijajuće virtualne sile iz jednadžbe (6) postojećem algoritmu za sastavljanje i održavanje formacije iz jednadžbe (5). Rezultat spajanja dva algoritma je sljedeći:

$$_i[k+1] = \Delta F_i[k] - \sum_{j \in N} g_{ij} k_{ij} ({}_i[k] - {}_j[k] - d_{ij}) \quad (7)$$

Iz jednakosti (5) i (6) se može vidjeti ako je udaljenost između dva vozila  $r_{ji}$  veća od radijusa zone odbijanja  $r_d$ , virtualna sila neće imati nikakav utjecaj na sastavljanje i održavanje formacije. U slučaju da je udaljenost između dva vozila  $r_{ji}$  manja od radijusa zone odbijanja  $r_d$ , virtualna sila će stvarati "silu" na vozilo  $i$  u suprotnom smjeru od vozila  $j$ .

Iz jednadžbe (6) se vidi da je iznos sile obrnuto proporcionalan kvadratu udaljenosti između vozila  $r_{ji}$ . Na ovaj način se daje veći prioritet virtualnoj sili da nadjača upravljački signal algoritma za upravljanje formacijom, kako bi se omogućio dodatni stupanj sigurnosti u slučaju neželenog ponašanja algoritma za upravljanje formacijom.

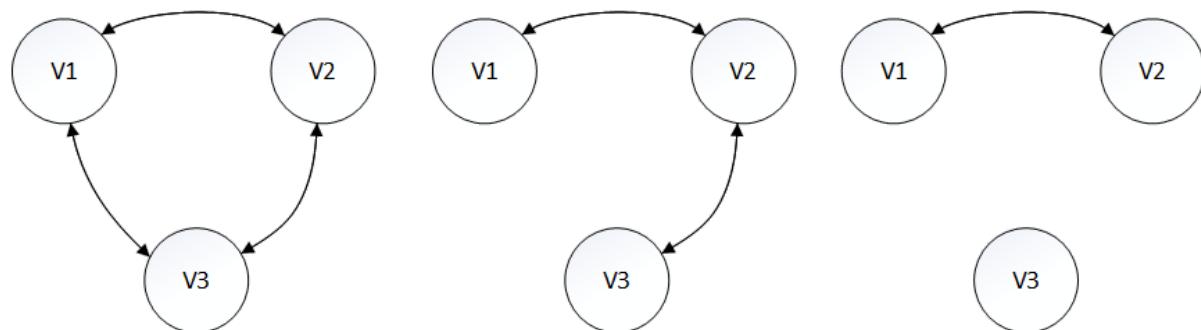
## Simulacijski eksperimenti

U ovom poglavlju prikazani su simulacijski rezultati algoritma za upravljanje formacijom za tri vozila. Simulacijski eksperiment sastavljanja formacije je provedeni za tri različite topologije razmjene informacija. Uspoređeni su algoritmi bez i s korištenjem algoritma za izbjegavanje kolizija. Nadalje, simulacijski scenarij promjene formacije je proveden samo za topologiju 1.

Sva tri vozila su simulirana unutar programskog alata ROS na jednom računalu.

## Topologija razmjene informacija

Kod simulacijskih eksperimenata smo koristili tri topologije prikazane na slici 1.



Slika 1. Grafovi topologija razmjene informacija

Prva topologija prikazana je lijevo na slici 1 u kojoj sva vozila međusobno razmjenjuju informacije o poziciji. U središtu slike 1 prikazana je topologija 2, kod koje je prekinuta razmjena informacija između vozila 1 i vozila 3. Zadnja topologija 3 je prikazana desno na slici 1 iz koje se vidi da je vozilo 3 izgubilo komunikaciju s ostalim vozilima.

Matrice povezanosti grafa za definirane topologije su:

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Za matricu otežanja odabrana je sljedeća matrica:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

## Scenarij sastavljanja formacije

Scenarij sastavljanja počinje s vozilima postavljenim na određene početne pozicije. Definirana je odbojna zona od 1.6m oko vozila, koja označava mogućnost oštećenja opreme ako drugo vozilo dođe unutar iste. Scenarij počinje s vozilima postavljenim na pozicije:

- $\mathbf{x}_1 = [x_1, y_1] = [5, 5]$
- $\mathbf{x}_2 = [x_2, y_2] = [5, -5]$
- $\mathbf{x}_3 = [x_3, y_3] = [-5, 5]$

Zatim se pokreće scenarij čija zadaća je sastavljanje formacije. Formacija odabrana za scenarij je sljedeća:

$$D_{1x} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 1.5 \\ -3 & 0 & -1.5 \\ -1.5 & 1.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D_{1y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 3 \\ -3 & -3 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

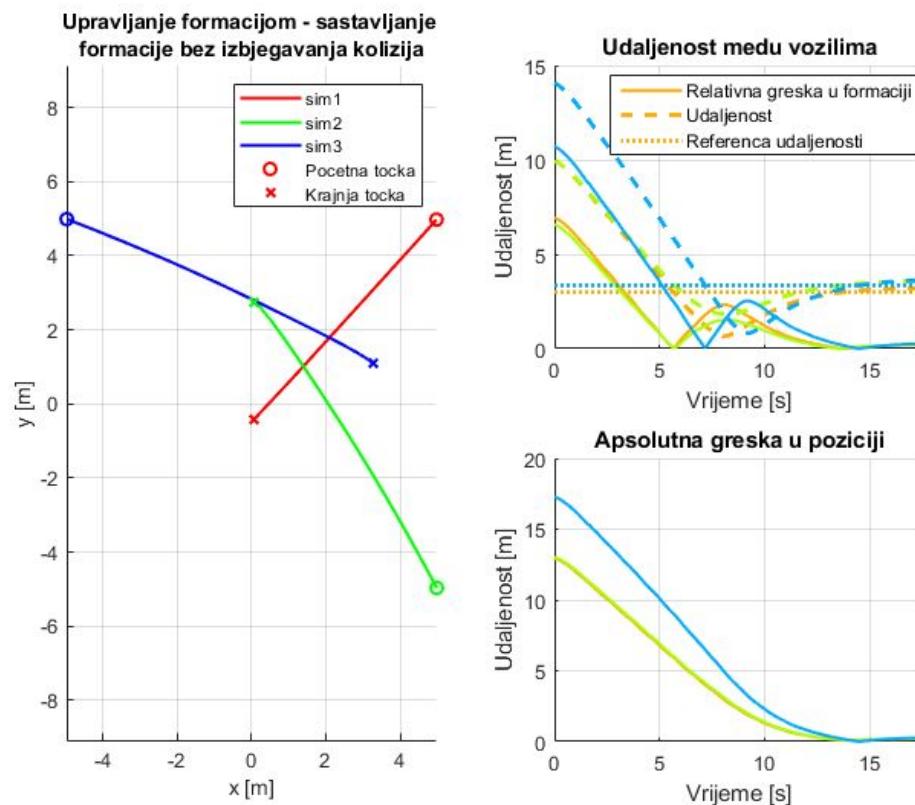
gdje su  $D_{1x}$  i  $D_{1y}$  matrice izgleda formacije po x i y osi. Ovakva odabir formacije je prikladan za demonstraciju algoritma za izbjegavanje kolizija zato što tijekom sastavljanja formacije dolazi do preklapanja pozicija pojedinih vozila, odnosno ulaska vozila u zonu odbijanja.

## Topologija 1

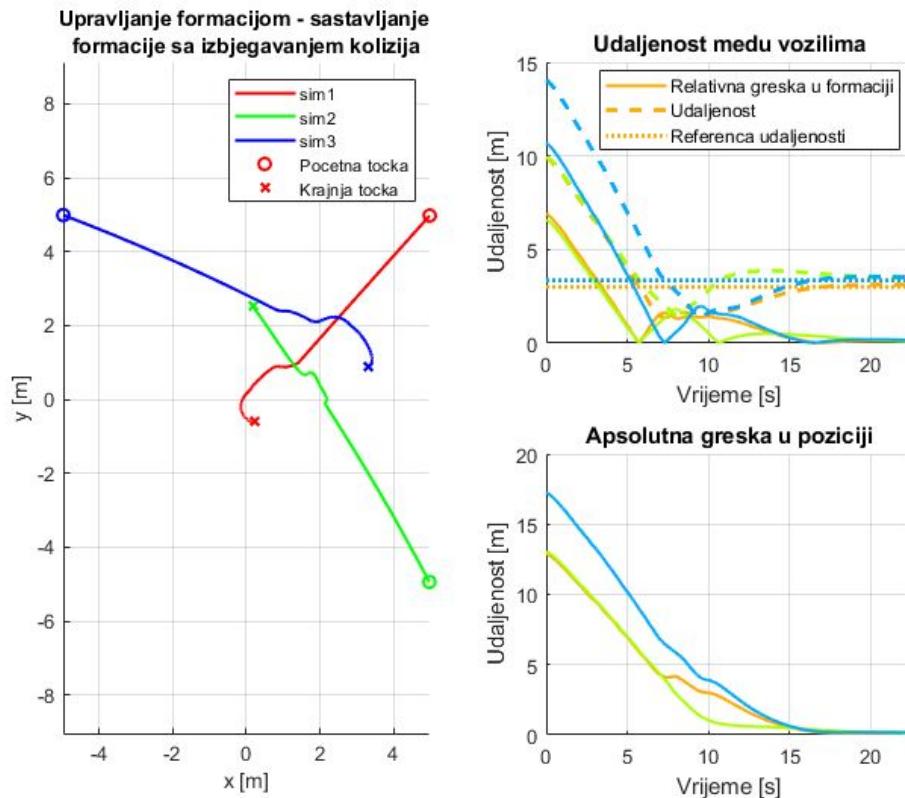
Slika 2 prikazuje pozicije vozila i udaljenosti među njima prilikom sastavljanja formacije bez algoritma za izbjegavanje kolizija. Na slici 2 se vidi da vozila putuju po relativno ravnim putanjama, što upućuje na optimalnu putanju. Algoritam za upravljanje formacijom je uspješno sastavio željenu formaciju. Sa slike 2 se može primjetiti da udaljenosti između vozila 1 i 2, te 2 i 3 značajno ulaze u opasnu zonu, što nije poželjna situacija. Sa slike se također vidi kako vrijeme potrebno za promjenu formacije nešto manje od 15-ak sekundi.

Slika 3 prikazuje pozicije vozila i udaljenosti među njima prilikom sastavljanja formacije s uključenim algoritmom za izbjegavanje kolizija. Na slici 3 se vidi da vozila putuju po relativno ravnim putanjama, do trenutka kada uđu u zonu odbijanja. Nakon ulaska u zonu odbijanja, algoritam generira upravljački signal koji ih nastoji odaljiti. Sa slike 3 se može primjetiti da se udaljenosti između vozila ne zadržavaju dugi period vremena u opasnoj zoni, te uspješno sastavljaju željenu formaciju. Sa slike se također vidi kako vrijeme potrebno za promjenu formacije nešto veće od 15-ak sekundi. Time primjećujemo kako je algoritam za izbjegavanje kolizija usporio sastavljanje formacije, što se da zaključiti iz spoznaje da algoritam generira upravljački signal koji skreće vozila od trenutne putanje.

Može se zaključiti da algoritam upravljanja formacijom uspješno sastavlja formaciju pod topologijom 1. Algoritam za izbjegavanje kolizija je uspješno održavao udaljenosti između vozila izvan opasne zone.



Slika 2. Sastavljanje formacije bez izbjegavanja kolizija pod topologijom 1



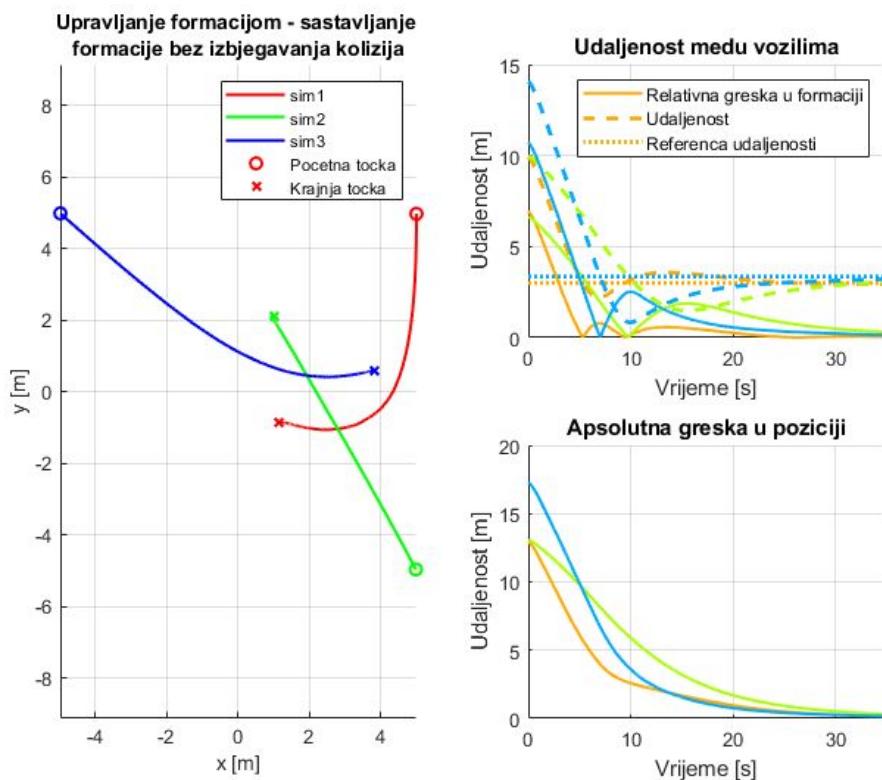
Slika 3. Sastavljanje formacije s izbjegavanjem kolizija pod topologijom 1

## Topologija 2

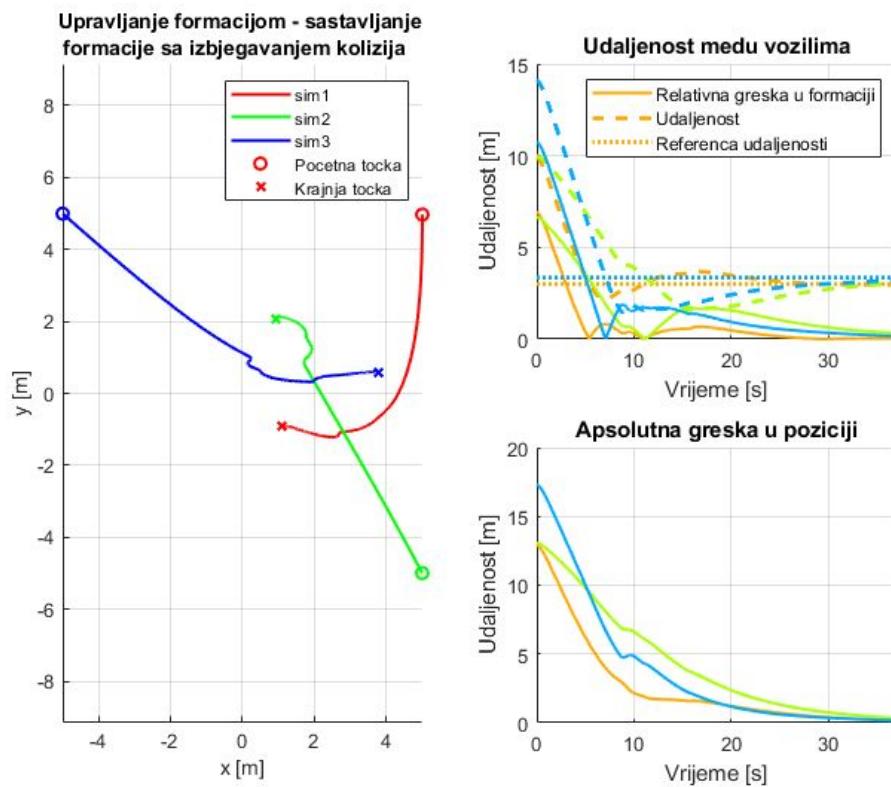
Slika 4 prikazuje pozicije vozila i udaljenosti među njima prilikom sastavljanja formacije bez algoritma za izbjegavanje kolizija. U usporedbi sa slikom 4, vozila na slici 4 sporije konvergiraju željenoj formacijskoj rasporedu. Razlog tome je što vozila 1 i 3 ne izmjenjuju informacije o poziciji, odnosno algoritam upravljanja formacijom na oba vozila dobiva informaciju o poziciji samo od vozila 2. Iz tog razloga generira slabije upravljačke signale. Unatoč tome, algoritam je uspješno sastavio željenu formaciju. Sa slike 4 se može primjetiti da udaljenosti između vozila 2 i 3 značajno ulaze u opasnu zonu, što nije poželjna situacija.

Slika 5 prikazuje pozicije vozila i udaljenosti među njima prilikom sastavljanja formacije s uključenim algoritmom za izbjegavanje kolizija. Na slici 5 se vidi da vozila putuju po relativno glatkim putanjama, do trenutka kada uđu u opasnu zonu. Nakon ulaska u opasnu zonu, algoritam generira upravljački signal koji ih nastoji odaljiti. Sa slike 5 se može primjetiti da se udaljenosti između vozila ne zadržavaju dugi period vremena u opasnoj zoni, te uspješno sastavljaju željenu formaciju.

Vidljivo je da algoritam upravljanja formacijom uspješno sastavlja formaciju pod topologijom 2. Algoritam za izbjegavanje kolizija je uspješno održavao udaljenosti između vozila izvan opasne zone.



Slika 4. Sastavljanje formacije bez izbjegavanja kolizija pod topologijom 2



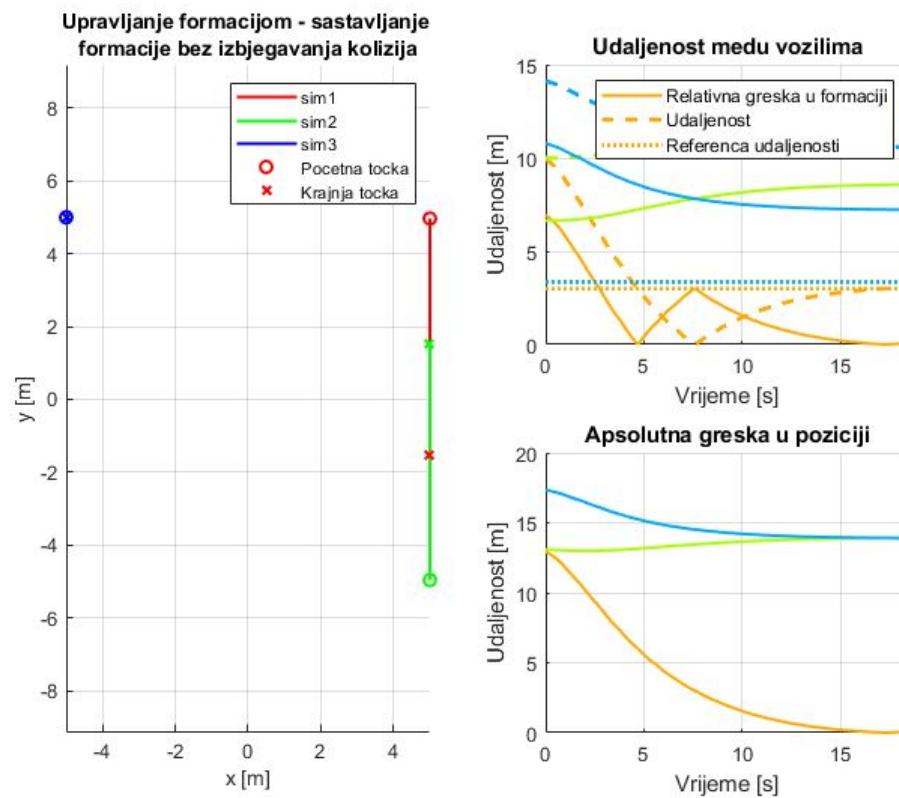
Slika 5. Sastavljanje formacije s izbjegavanjem kolizija pod topologijom 2

### Topologija 3

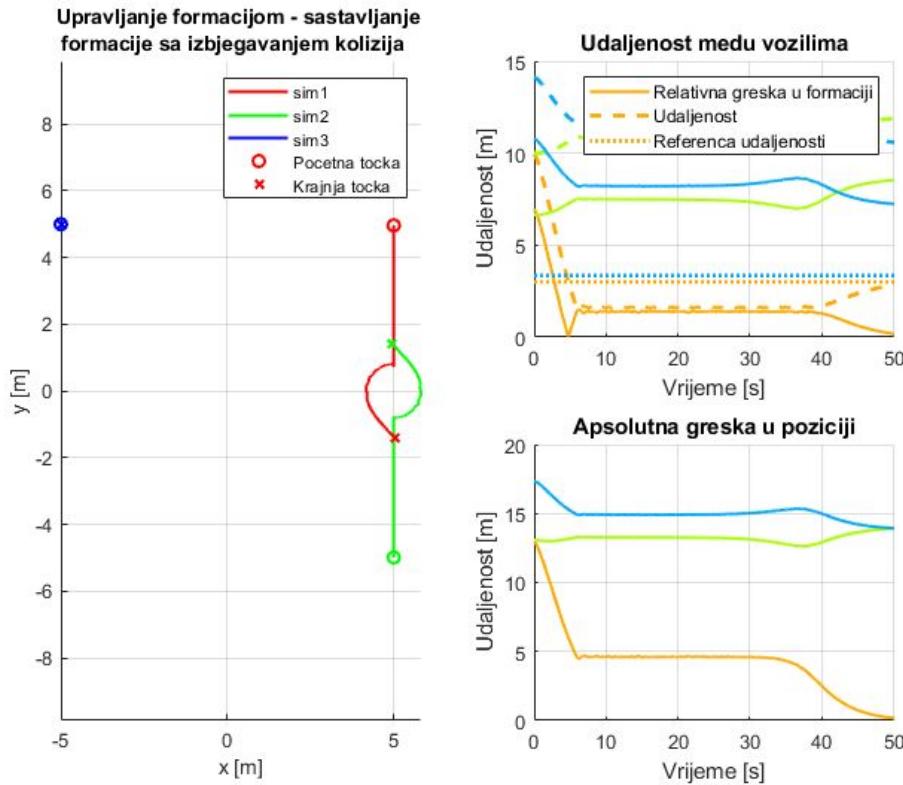
Slika 6 prikazuje pozicije vozila i udaljenosti među njima prilikom sastavljanja formacije bez algoritma za izbjegavanje kolizija. Sa slike 7 se vidi da vozila 1 i 2 nastoje sastaviti formaciju, dok vozilo 3 ne mijenja svoju poziciju, i time neuspješno sastavljuju željenu formaciju. Sa slikom 6 se može primijetiti da udaljenosti između vozila 1 i 2 značajno ulaze u opasnu zonu, što nije poželjna situacija, .

Slika 7 prikazuje pozicije vozila i udaljenosti među njima prilikom sastavljanja formacije s uključenim algoritmom za izbjegavanje kolizija. U usporedbi sa slikom 6, udaljenosti između vozila ne ulaze značajno u opasnu zonu. Pri ulasku u zonu opasnosti, vozila 1 i 2 se zaustavljaju te se zaobilaze održavajući udaljenost veličine opasne zone.

Vidljivo je da algoritam upravljanja formacijom neuspješno sastavlja formaciju pod topologijom 3. Algoritam za izbjegavanje kolizija je uspješno održavao udaljenosti između vozila izvan opasne zone.



Slika 6. Sastavljanje formacije bez izbjegavanja kolizija pod topologijom 3



Slika 7. Sastavljanje formacije s izbjegavanjem kolizija pod topologijom 3

## Scenarij promjene formacije

Scenarij promjene formacije započinje nakon uspješnog ili neuspješnog sastavljanja formacije iz prethodnog scenarija. Ovaj scenarij demonstrira mogućnost promjene izgleda formacije. Formacija odabrana za scenarij je prikazana sljedećim jednadžbama:

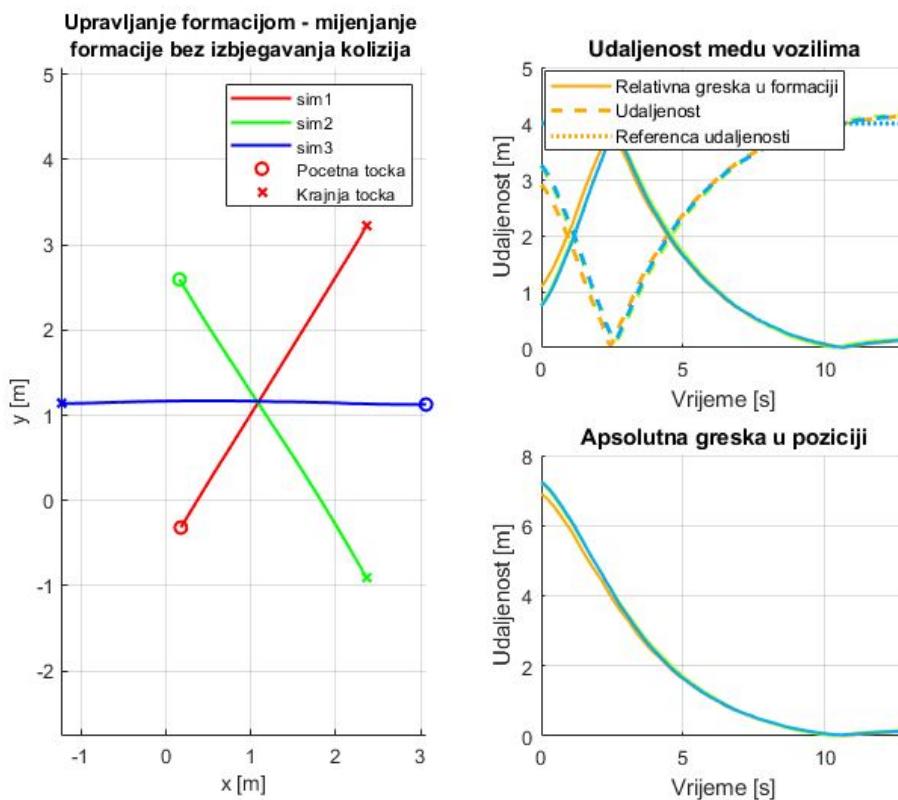
$$D_{2x} = \begin{bmatrix} 0 & -4 & -2 \\ 4 & 0 & 2 \\ 2 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D_{2y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -3.46 \\ 0 & 0 & -3.46 \\ 3.46 & 3.46 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

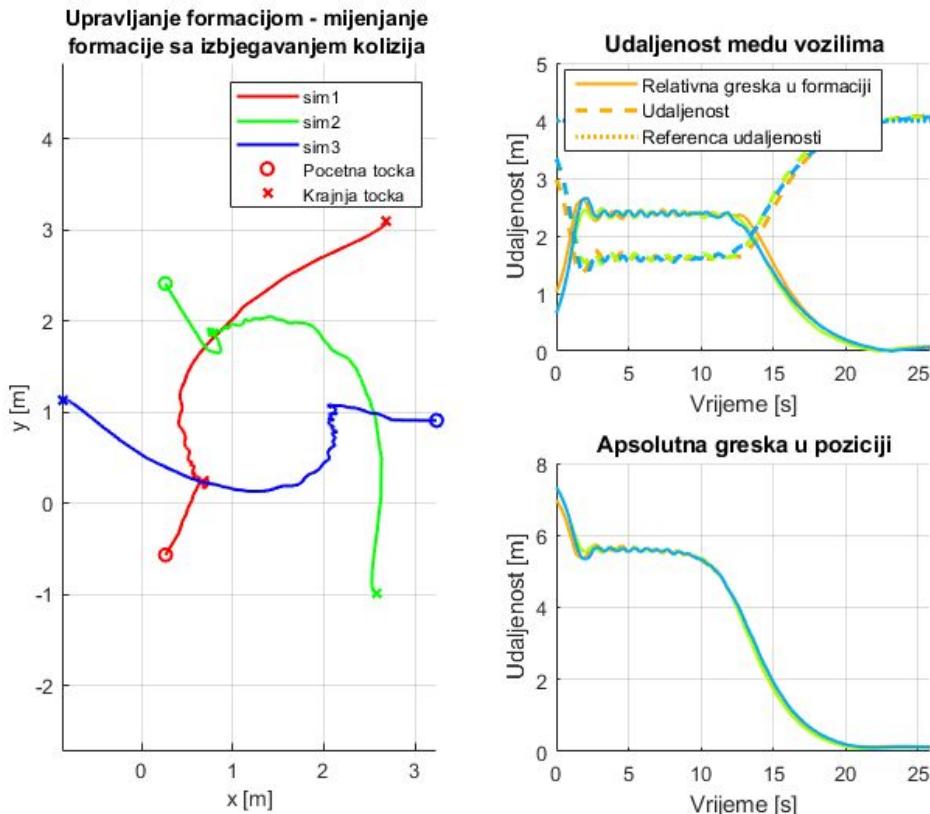
Rezultati simulacije scenarija za promjenu formacije su provedeni samo za topologiju 1. uz uključen ili isključen algoritam za izbjegavanje kolizija. Scenarij služi za demonstraciju mogućnosti promjene izgleda formacije.

Na slici 8 su prikazane pozicije i udaljenosti između vozila tijekom promjene izgleda formacije bez uključenog izbjegavanja kolizija. Sa slike 8 je vidljivo da je formacija uspješno promijenjena, ali udaljenosti između vozila značajno ulaze u opasnu zonu.

Nakon uključivanja sigurnosnog izbjegavanja kolizija, na slici 9 se vidi kako se udaljenosti između vozila ne zadržavaju dugi period vremena u opasnoj zoni, te je promjena formacije s uključenim izbjegavanjem kolizija također uspješno izvršena.



Slika 8. Promjena formacije bez izbjegavanja kolizija



Slika 9. Promjena formacije s izbjegavanjem kolizija

## Eksperimenti na stvarnim vozilima

U eksperimentima na stvarnim vozilima će se koristiti dvije stvarne platforme i jedna virtualna. Kako bi spriječili mogućnost nastajanja havarije, proveli smo prave eksperimente s uključenim algoritmom za izbjegavanje kolizija.

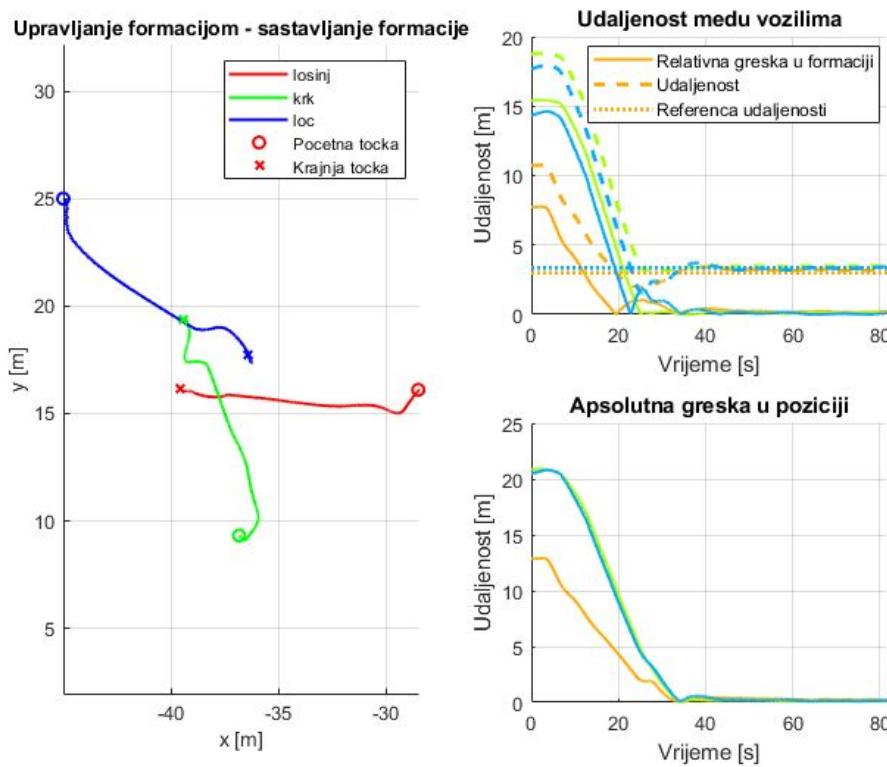
Upravljanje stvarne platforme se izvode na lokalnom računalu na vozilima. Virtualna platforma je simulirana na vanjskom računalu, te stvarni i virtualni sustav komuniciraju preko WiFi komunikacije. Stvarna platforma koristi GPS i kompas za estimaciju pozicije. Razmjena informacija će biti modelirana kao topologija 1 kao i kod simulacijskih scenarija.

U usporedbi s eksperimentima u simulaciji, dodan je još jedan scenarij unutar scenarija promjene formacije kako bi se dodatno prikazala mogućnost promjene odnosno rotacije formacije.

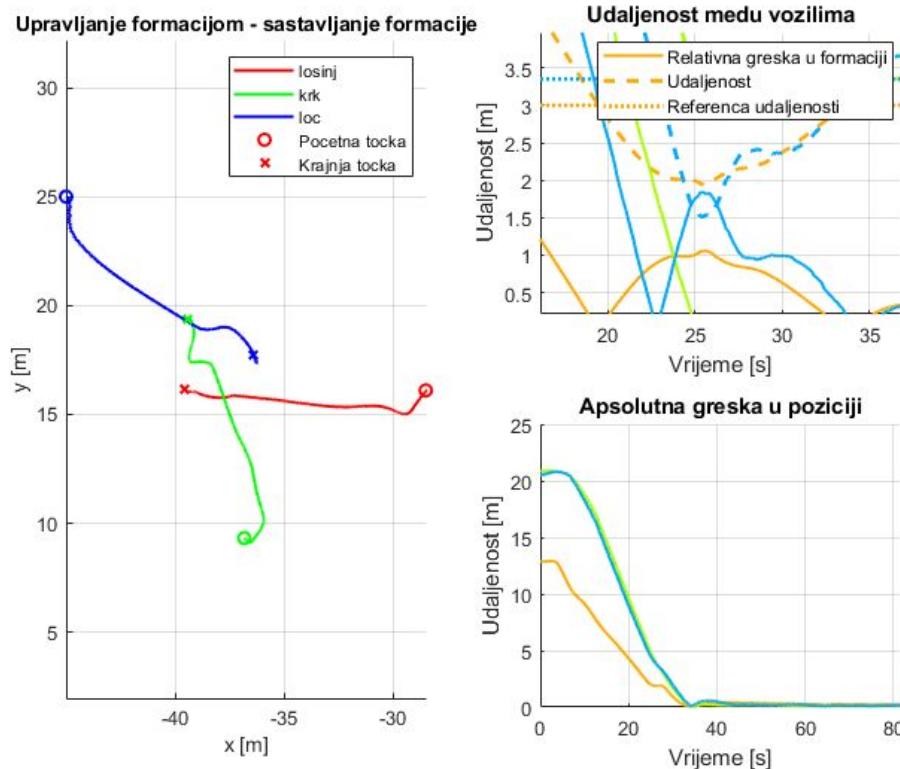
## Scenarij sastavljanja formacije

Slika 10 prikazuje pozicije vozila i udaljenosti među njima prilikom sastavljanja formacije s uključenim algoritmom za izbjegavanje kolizija. Sa slike se vidi da putanje vozila nisu pravocrtne što odgovara eksperimentima u stvarnom okruženju. Nakon ulaska u zonu odbijanja, algoritam generira upravljački signal koji ih nastoji odaljiti. Sa slike 10 se može primijetiti da se udaljenosti između vozila ne zadržavaju dugi period vremena u opasnoj zoni, te uspješno sastavljaju željenu formaciju. Na slici 11 je prikazana uvećana slika udaljenosti među vozilima koja prikazuje kako udaljenost među vozilima nije bila manja od 1.5m.

Može se zaključiti da algoritam upravljanja formacijom uspješno sastavlja formaciju pod topologijom 1 u stvarnim eksperimentalnim uvjetima. Algoritam za izbjegavanje kolizija je uspješno održavao udaljenosti između vozila izvan zone opasnosti.



Slika 10. Sastavljanje formacije s izbjegavanjem kolizija u stvarnom okruženju



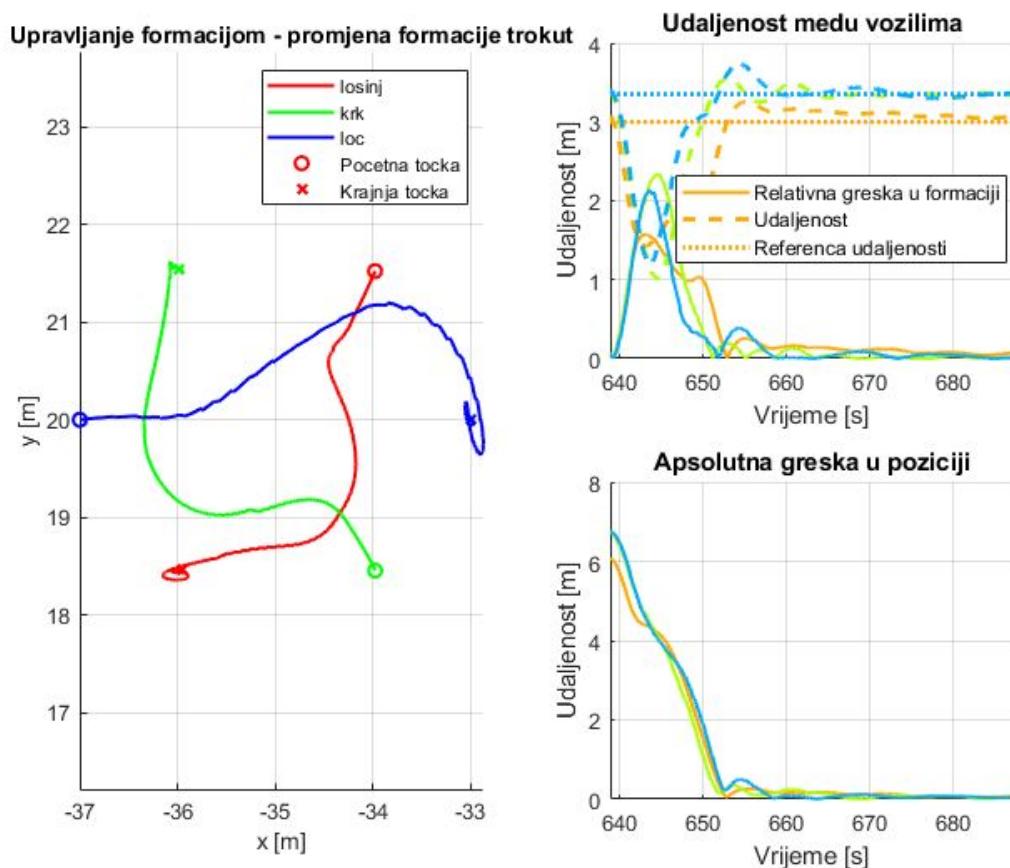
Slika 11. Sastavljanje formacije s izbjegavanjem kolizija u stvarnom okruženju -  
uvećano

## Scenarij promjene formacije

U eksperimentima u stvarnim uvjetima provedena su dva scenarija promjene formacije, iz trokuta u trokut, te iz linije u liniju.

### Promjena formacije trokut

Na slici 12 su prikazane pozicije i udaljenosti između vozila tijekom promjene izgleda formacije s uključenim izbjegavanjem kolizija. Sa slike 12 je vidljivo da je formacija uspješno promijenjena, te udaljenosti između vozila ne ulaze značajno u opasnu zonu. Sa slike se također vidi kako vrijeme potrebno za promjenu formacije je oko 15-ak sekundi. To vrijeme približno odgovara simulacijskim rezultatima.

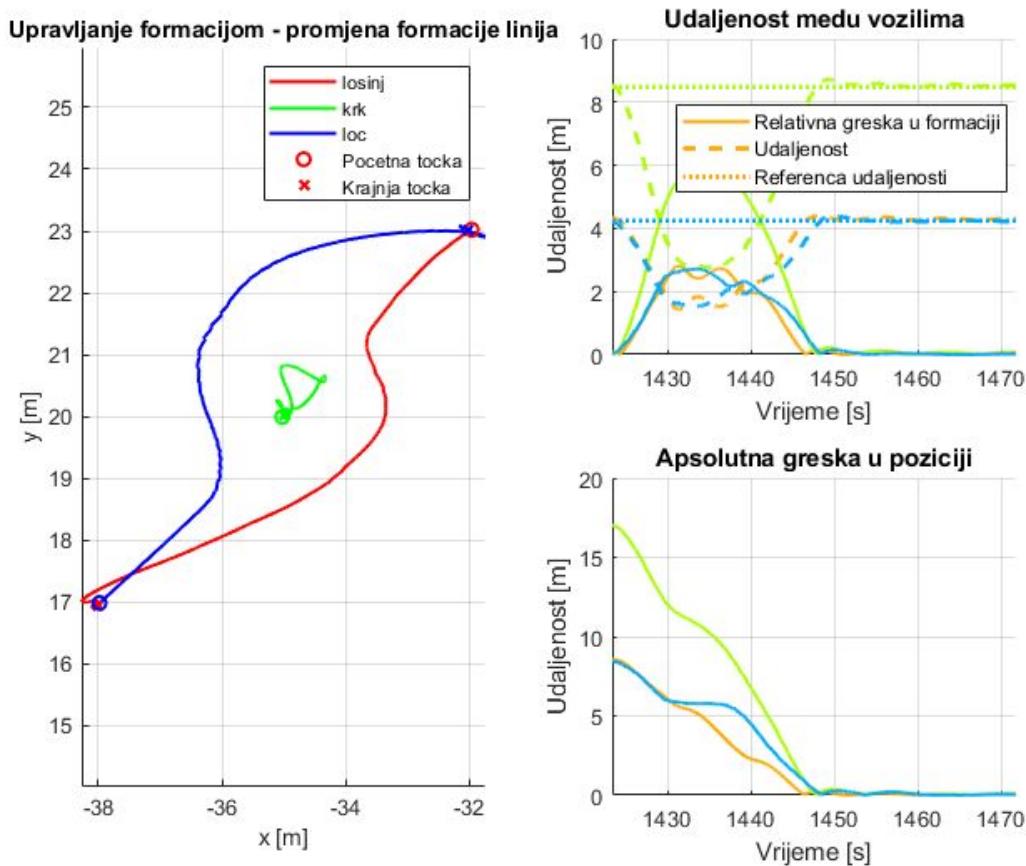


Slika 12. Promjena formacije trokut s izbjegavanjem kolizija u stvarnom okruženju

### Promjena formacije linija

Na slici 13 su prikazane pozicije i udaljenosti između vozila tijekom promjene izgleda formacije s uključenim izbjegavanjem kolizija. Sa slike 12 je vidljivo da je formacija uspješno promijenjena, te udaljenosti između vozila ne ulaze značajno u opasnu

zonu. Može se primijetiti putanja središnjeg vozila sa slike kako nije ostalo na istom mjestu. Zbog algoritma za izbjegavanje kolizija, vozilo je bilo istisnuto sa svoje pozicije kako bi izbjeglo potencijalnu koliziju.



Slika 13. Promjena formacije linija s izbjegavanjem kolizija u stvarnom okruženju

## Zaključak

Cilj ovog dokumenta bio je razvoj algoritma za upravljanje formacijom. Iskorišten je decentralizirani pristup na bazi informacijskog konsenzusa među vozilima. Kao sigurnosna mjera, razvijen je i algoritam za izbjegavanje kolizija. Izbjegavanje kolizija je postignuto korištenjem virtualne odbojne sile, gdje svako vozilo generira upravljački signal u suprotnom smjeru od drugih vozila kako ne bi došlo do potencijalne havarije.

Simulacijski rezultati pokazuju testove algoritama za različite topologije razmjene informacija. Uspoređuju se eksperimenti s i bez algoritma za izbjegavanje kolizija. Eksperimenti pokazuju očekivane rezultate s uspješnim sastavljanjem i promjenom formacije autonomnih bespilotnih plovnih platformi.

Rezultati na stvarnim vozilima također pokazuju zadovoljavajuće rezultate koji odgovaraju simulacijskim rezultatima.