ДИСТРИБУИРАНО УПРАВЉАЊЕ ФОРМАЦИЈОМ МОБИЛНИХ АГЕНАТА DISTRIBUTED CONTROL OF THE MOBILE AGENT FORMATION

Милош Милетић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – Тема овог рада је управљање формацијом возила која може да има произвољан облик. Облик формације треба да буде одржан током читаве симулације. Такође, возила требају да прате референтну трајекторију. Поред тога, на референтној путањи се могу наћи препреке које формација возила треба да избегне.

Кључне речи: Управљање формацијом возила, избегавање препрека, предиктивно управљање

Abstract - The topic of this paper is vehicle formation control. Formation shape must be maintained during the simulation. Beside formation maintenance, vehicles have task to follow referent trajectory. Finally, vehicles must avoid obstacles that can appear at the referent trajectory.

Keywords: Vehicle formation control, predictive control, obstacle avoidance

1. УВОД

Тема овог рада јесте оптимално управљање формацијом возила која имају задатак да одржавају облик формације и прате референтну путању. Такође, формација возила треба да обиђе све препреке које се нађу на жељеној путањи. Данас постоје разне примјене управљања формацијом објеката, а најчешће се односе на управљање мобилним агентима [1]. Најчешћи приступ рјешавању проблема управљања формацијом возила јесте такозвани вођа-пратилац приступ [1]. У овом приступу, нека возила су дефинисана као вође, док су друга возила дефинисана као пратиоци. У овом раду кориштен је управо приступ вођа-пратилац, гдје се формација састоји од једног вође који има задатак да прати референтну путању али и одржава облик формације, док сва остала возила имају само задатак да одржавају унапријед дефинисани облик формације. Да би читав концепт управљања формацијом возила могао функционисати, мора се дефинисати начин интеракције између возила. Све чешће се примјењује децентрализовани приступ доношења одлука. Самим тим, потребно је пронаћи начин за рјешавање конфликта приликом доношења одлука. У ту сврху се најчешће користе принципи теорије игара [1]. Поред задатака праћења референтне трајекторије и одржавања облика формације, возила имају задатак да обилазе препреке које се нађу на жељеној путањи.

НАПОМЕНА:

Овај рад произтекао је из мастер рада чији ментор је био др Милан Рапаић, ванр. проф.

Најчешће се слични проблеми рјешавају декомпозицијом основног проблема у мање проблеме који су значајно мање компликовани. Ти мали проблеми се често називају задацима. Тада је потребно пронаћи одговарајућу стратегију управљања задацима, пошто задаци могу да буду у конфликту, односно могу да имају контрадикторне захтјеве. У тим ситуацијама потребно је одредити приоритет задацима, као и начин како ће се израчунавати резултујућа корективна акција. У овом раду коришћено је стратегија управљања базираног на кернелима (енг. Null-space based) [2, 3].

2. МОДЕЛ ПРОБЛЕМА

Посматраћемо општи случај, када се возила могу кретати по m степени слободе. Формација се састоји од N возила. Свако возило има динамику дуплог интегратора. Вектор позиције сваког возила $i \in N$ можемо означити као $p_i = [z_i, \dots, z_i^m]^T \in \mathbb{R}^m$. Тада је вектор стања за свако возило $x_i(t) = [p_i(t)^T, \dot{p}_i(t)^T]^T \in \mathbb{R}^{2m}$, док жељени вектор стања за свако возило можемо означити са $x_i^d(t) = [p_i^d(t)^T, \dot{p}_i^d(t)^T]^T \in \mathbb{R}^{2m}$. Дефинисани жељени вектор стања x_i^d биће од помоћи приликом дефинисања грешке формације. Вектор управљања за свако возило $i \in N$ означаћемо са $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$. Као што је већ речено, сматрамо да је динамика сваког возила линеарна, те стога математички модел кретања возила и жељеног вектора стања можемо записати као

$$\dot{x}_i(t) = ax_i(t) + bu_i(t) \quad (1)$$

$$\dot{x}_i^d(t) = ax_i^d(t) + bu_i^d(t), \quad (2)$$

гдје су a и b матрице дефинисане са

$$a = \begin{bmatrix} 0 & I_{(m)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{(m)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тада, динамика читавог тима возила и њихова жељена динамика могу се записати као

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=1}^N B_i u_i(t), \quad (4)$$

$$\dot{x}^d(t) = Ax^d(t) + \sum_{i=1}^N B_i u_i^d(t), \quad (5)$$

гдје је $A = I_{(N)} \otimes a$ и $B_i = [0, \dots, 1, \dots, 0]^T \otimes b$. Оператор $\otimes$ представља Кронекеров производ. Сам облик формације може бити дефинисан употребом графова. У овом раду користимо усмјерени граф са ивицама само ка сусједним возилима. Наравно да матрице инциденција и тежина зависе од изгледа формације возила, па их

нећемо наводити овде, него ће бити наведене приликом симулација, док ћемо их овде користити у општем облику. Жељени вектор удаљености између два сусједна возила v_i и v_j је $d_{ij}^d = x_i^d - x_j^d$. Тада је грешка формације између два сусједна возила $\epsilon_{ij} = x_i - x_j - d_{ij}^d$. Грешка формације комплетног тима може се изразити као

$$\sum_{(i,j) \in E} w_{ij} \|x_i - x_j - d_{ij}^d\| = (x - x^d)^T \tilde{B} \tilde{W} \tilde{B}^T (x - x^d) \quad (6)$$

гдје је $\tilde{B} = B \otimes I_{(2m)}$, $\tilde{W} = W \otimes I_{(2m)}$. W је матрица тежина графа, док је матрица матрица инциденција. Лапласијан матрица графа G је $Q = BWB^T$, или $\tilde{Q} = \tilde{B} \tilde{W} \tilde{B}^T$. Лапласијан матрица графа је симетрична и њене карактеристичне вриједности су не-негативне реалне вриједности, па су ове матрице позитивно семи-дефинитне. Ово је битно због рјешавања критеријума оптималности који ће бити формулисан у наставку.

2.1 Критеријуми оптималности

Пошто смо дефинисали структуру графа који репрезентује формацију возила, потребно је дефинисати критеријуме оптималности, на основу којих ће се одржавати распоред возила унутар формације, али и пратити референтна путања. Једно од возила из формације треба да буде вођа формације. Сва возила имају задатак да оржавају распоред возила у формацији, а вођа има још задатак да прати референтну путању. Прво ћемо размотрити ситуацију када сва возила имају задатак да одржавају формацију. Управљање ће бити формулисано у форми предиктивног управљања [4], те је сходно томе критеријуме оптималности потребно дефинисати у односу на хоризонт коначне дужине. Дакле, на крају коначног хоризонта очекујемо да распоред возила унутар формације буде у формату који је унапријед дефинисан. Такође, током трајања коначног хоризонта, возила треба да одрже дефинисани облик формације.

Знајући све наведене чињенице, критеријум оптималности за свако возило i у односу на хоризонт коначне дужине може се дефинисати у линеарној квадратној форми као

$$J_i = h_i(T, x(T)) + \int_0^T g_i(\tau, x(\tau), u(\tau)) d\tau \quad (7)$$

$$h_i(T, x(T)) = \|x(T) - x^d(T)\|_{H_{if}}^2 \quad (8)$$

$$g_i(\tau, x(\tau), u(\tau)) = \|x(\tau) - x^d(\tau)\|_{G_i}^2 + \sum_{(i,j) \in E} \|u_j(\tau)\|_{R_{ij}}^2. \quad (9)$$

Као што видимо у претходним једначинама, у крајњем тренутку грешка треба да буде одступање од жељеног распореда возила у формацији. Слично g_i посједује члан који је задужен за одржавање формације, међутим са другачијим тежинским коефицијентима. Поред тога, функција g_i садржи члан који има задатак да ограничи управљање тиме што неће дозволити велике вредности и велике промјене управљања. У претходним изразима важи да су матрице $H_{if} = \tilde{Q}_{if} = \tilde{B} \tilde{W}_{if} \tilde{B}^T$, $\tilde{W}_{if} = W_{if} \otimes I_{(2m)}$, $W_{if} = \text{diag}[w_{ij}]$, односно ова матрица је заправо Лапласијан матрица иницијалног графа. Слично, важи да је $G_i = \tilde{Q}_i =$

$\tilde{B} \tilde{W}_i \tilde{B}^T$, $\tilde{W}_i = W_i \otimes I_{(2m)}$, $W_i = \text{diag}[\lambda_{ij}]$. Јасно је да су H_{if} и G_i симетричне и позитивно семи-дефинитне матрице, а да λ_{ij} и R_{ij} представљају тежинске факторе, док T представља крајњи тренутак хоризонта који посматрамо. Претходно описани критеријуми оптималности погодни су за пратиоце, међутим вођа треба да прати жељену трајекторију коју можемо означити са x_l^d , а да притом одржава жељену удаљеност са сусједним возилима. Да би испунио наведени задатак, критеријум оптималности вође мора укључити грешку која је последица одступања од жељене трајекторије, што се може дефинисати као

$$h_l(T, x(T)) = \|x(T) - x^d(T)\|_{H_{lf}}^2 + \|x_l(T) - x_l^d(T)\|_{h_{lf}}^2 \quad (10)$$

$$g_l(\tau, x(\tau), u(\tau)) = \|x(\tau) - x^d(\tau)\|_{G_l}^2 + \|x_l(\tau) - x_l^d(\tau)\|_{g_l}^2 + \|u_l(\tau)\|_{R_{ll}}^2 \quad (11)$$

гдје су $h_{lf} = \text{diag}[w_l]$, и $g_l = \text{diag}[\lambda_l]$,

3. УПРАВЉАЊЕ ФОРМАЦИЈОМ ВОЗИЛА

У овом раду се за управљање возилима користи предиктивно управљање [4]. Предиктивно управљање базирано је на итеративној оптимизацији управљања над хоризонтом коначне дужине. Наиме, у тренутку t се одреди тренутно стање система, након чега се на основу одређеног критеријума оптималности одреди оптимално управљање за интервал $[t, t + T]$, гдје T представља дужину хоризонта који се посматра. Тада се примјењује само први корак из стратегије управљања која је израчуната, а хоризонт се помјера за T_s , односно за време одабирања. Тада се опет врши оптимизација за нови хоризонт и ново стање система. Да би се координисале акције које појединачна возила захтјевају искористићемо принципе теорије игара, прецизније алгоритам диференцијалних игара са отвореном спрегом [5]. Доказано је да за линеарно-квadratни проблем оптималног управљања, који се користи у предиктивном управљању, употребом диференцијалних игра са отвореном спрегом, постоји јединствено рјешење које доводи систем у Нешов еквилибријум. Доказ за ову тврдњу дао је Јакоб Енгверда (Jacob Engwerda) [5]. За класу проблема који обухватају диференцијалне игре N играча и који је описан у претходном поглављу, постоји јединствени сет рјешења $\{L_i, i \in N\}$ матрице Рикатијевих једначина дефинисаних изразом

$$\dot{L}_i = -L_i A - A^T L_i - G_i + L_i \sum_{j=1}^N B_j R_{j,j}^{-1} B_j^T L_j, \quad (12)$$

$$L_i(T) = H_{if}. \quad (13)$$

У претходним једначинама фигуришу матрице $G_i, R_{i,i}$ и H_{if} . Ове матрице су дефинисане у претходном поглављу, приликом описа структуре формације и дефинисања критеријума оптималности за сва возила. У крајњем тренутку T хоризонта коначне дужине, вриједност матрица L_i мора бити једнака H_{if} , што представља гранични услов приликом рјешавања система Рикатијевих диференцијалних једначина. Познато је да се рјешавањем Рикатијевих једначина стичу сви услови за израчунава-

ње оптималног управљања. Због тога, диференцијална игра са N играча посједује јединствено рјешење које доводи систем у Нешову равнотежу уколико се примјени управљање

$$u_i^*(t) = -R_{i,i}^{-1} B_i^T L_i(t) e_i(t), \quad (14)$$

гдје $e_i(t)$ представља грешку за возило са индексом $i \in N$. За возило $i = 1$ може се дефинисати грешка као

$$e_i = \begin{bmatrix} x_1 - x_1 - d_{1,1}, x_1 - x_2 - d_{1,2}, \dots, x_1 - x_N - d_{1,N} \end{bmatrix}^T. \quad (15)$$

У претходним изразима елементи $d_{i,j}$ представљају жељену разлику између два сусједна возила. Ове вриједности се одређују приликом дефинисања облика формације возила.

3.1 Избјегавање препрека

Последњи захтјев који формација возила треба да испуњава јесте обилажење препрека које се могу наћи на референтној путањи. У те сврхе, кориштена је стратегија базирана на пројектовању задатка нижег приоритета у кернел простор задатака вишег приоритета. Ова стратегија позната је као управљање базирано на кернелима (енг. *Null-space based*). Стратегија је детаљно описана у радовима [2, 3], те овде не наводимо опис него само примјену. Проблем ћемо подијелити на два дијела. Обилажење препрека које представља задатак вишег приоритета и одржавање облика формације уз праћење референтне путање, што ће престављати мање приоритетан задатак. Када говоримо о избјегавању препрека, логичан избор за промјенљиву која представља задатак би била удаљеност од возила од препреке. Наравно поред израчунавања удаљености од препреке, потребно је одредити управљање које ће одржавати возило на сигурној удаљености од препреке. Јасно је да за успјешно избјегавање препрека, управљање које израчунава овај задатак мора да посједује информацију у правцу на коме се налази препрека у односу на возило. Ова информација садржана је у матрици J_1 . На основу свега наведеног, избјегавање препрека се може дефинисати задатком на следећи начин

$$\sigma_1 = \|p - p_o\| \quad (16)$$

$$\sigma_{1,d} = d \quad (17)$$

$$J_1 = \begin{pmatrix} \frac{p - p_o}{\|p - p_o\|} \end{pmatrix}^T. \quad (18)$$

У претходним изразима p представља позицију возила, p_o позицију препреке, док d представља пречник кружнице око препреке унутар кога возило не би требало ући. Као што је већ најављено, σ_1 представља удаљеност возила од препреке, док J_1 јединични вектор у правцу возило-препрека. На основу основног концепта комбиновања задатака приказаног у [3] добија се израз за израчунавање управљања које генерише задатак задужен за обилажење препрека

$$v_1 = J_1^\dagger \Lambda_1 (d - \|p - p_o\|). \quad (19)$$

Са друге стране, када говоримо о задатку који дефинише одржавање облика формације и праћење референтне путање, очигледно је да управљање мора бити дозвољено у свим правцима, односно матрица J_2 је представљена јединичном матрицом. Због тога може се доћи до закључка да је $v_2 = u_l^*$, гдје l представља вођу. Логич-

но је да вођа буде задужен за одређивање путање којом ће се избјећи ударање у препреку. Израчунавање коначног вектора управљања на основу поједначних задатака објашњено је [3], а може се записати као

$$u_l = v_1 + (I - J_0^\dagger J_0) v_2. \quad (20)$$

Дакле, када су у близини препреке, вођа ће израчунавати вектор управљања према претходном изразу, док ће у случају када препрека није близу управљање бити u_l^* .

4. СИМУЛАЦИЈЕ

Посматраћемо формацију од десет возила ($N=10$). На Слици 1 приказан је жељени облик формације возила, као и тежине које је потребно искорисити за дефинисање матрице тежина графа формације возила. На основу графика, лако је дефинисати матрицу инциденција графа формације. У претходним поглављима показано је да дефинисањем матрица тежина графа, можемо добити матрице H_{if} које су гранични услов за рјешавање система Рикатијевих једначина.

Слика 1: Приказ жељеног изгледа формације возила, као и тежина потребних за дефинисање графа формације.

Матрице G_i су идентичне за све агенте, осим лидера. Матрице G_i су дијагоналне матрице, у којима сви елементи који су различити од нула имају вриједност 20. Као што је већ речено, за возило које представља лидера, претходно дефинисане матрице се разликују у односу на остала возила. Потребно је на већ дефинисане матрице додати тежине праћења $h_{lf} = g_l = 10I_4$, гдје I_4 представља јединичну матрицу. Матрице $R_{i,i}$ могу бити идентичне за све агенте и могу се дефинисати са $0.3I_{i,i}$. У овој симулацији изабрана је дужина хоризонта од 10 секунди, док је вријеме одабирања (вријеме које протекне између два израчунавања оптималног управљања за задани хоризонт) 0.1 секунд. Такође, потребно је дефинисати параметре који се тичу обилажења препрека, односно потребно је одредити λ и пречник круга који преставља сигурну удаљеност, d . У овој симулацији λ је постављено на 0.1, док је симулација извршена у два случаја, када је вриједност $d = 30$, као и у случају када је $d = 20$. За овако постављене услове симулиран је систем који има задатак да прати путању која представља линеарну зависност између оса. Притом, препрека се налази на референтној путањи, те возила треба да обиђу препреку.

На Слици 2 приказана је кретња возила у xu равни, када је $d = 30$. Очигледно је да возила успјешно прате референтну путању све до наилаaska на препреку. Потом, главни задатак постаје обилазак препреке који возила такође успјешно извршавају, након чега се поново враћају на референтну путању и настављају да је прате.

Слика 2: Приказ крeтње формације возила у ху-равни.

Слике 3 и 4 приказују вриједност грешке свих возила у односу на референтну путању. Као што се види на сликама, грешке имају константну разлику што потврђује одржавање облика формације током времена.

Слика 5 приказује крeтњу возила у ху равни у случају када је $d = 20$. Као што се види на слици, возила и у овом случају прате референтну путању када је то главни задатак. Такође, облик формације је одржан током времена. Међутим, као што се види на слици, не успијевају сва возила да обиђу препреку, тј. нека возила дођу у контакт са препреком. Јасно је да је то последица лоше изабране вриједности пречника сигурне удаљености од препреке.

Слика 3: Приказ грешке у односу на референтну путању за сва возила (х-оса).

Слика 4: Приказ грешке у односу на референтну путању за сва возила (у-оса).

Слика 5: Приказ крeтње формације возила у ху-равни приликом лошег одабира параметра d .

5. ЗАКЉУЧАК

Овај рад првенствено је посвећен децентрализованом управљању формацијом возила. Фокус је био на примјени принципа предиктивног управљања на управљање формацијом возила. На основу симулација може се закључити да предложени алгоритам функционише у складу са очекивањима. Такође, симулације показују осјетљивост алгоритма на избор параметра који представља сигурну удаљеност од препреке.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Eren Mehmet Erdogan, Mario Innocenti, and Lorenzo Pollini. „Obstacle avoidance for a game theoretically controlled formation of unmanned vehicles”. 2011.
- [2] Filippo Arrichiello and S. Chiaverini. „The null-space-based behavioral control for mobile robots”.
- [3] Filippo Arrichiello and Stefano Chiaverini. „The null-space-based behavioral control for autonomous robotic systems”. *Intelligent Service Robotics*, 1:27_39, 01 2008.
- [4] Yu-Geng XI, Dewei Li, and Shu Lin. „Model predictive control- status and challenges”. *Acta Automatica Sinica*, 39:222_236, 03 2013.
- [5] Jacob Engwerda. „Lq dynamic optimization and differential games”. *Journal of Banking and Finance - J BANK FINAN*, 01 2005.

Kratka biografija:

Милош Милетић рођен је у Мркоњић Граду 1995. године. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Рачунарско и аутоматика одбранио је 2018. године. Исте године уписао је мастер студије. контакт: m.miletic@uns.ac.rs