



کنترل آرایش انعطاف پذیر رهبر-پیرو ربات‌های پایه متحرک چرخ‌دار مبتنی بر پسگام تلفیق شده با بیونرودینامیک

مریم عسگری¹، محمدرضا جاهد مطلق²، خلیل عالی‌پور^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشکده برق رایانه و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین

2- دانشیار، مهندسی کنترل، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1439957131، kalipour@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 آذر 1394

پذیرش: 22 بهمن 1394

ارائه در سایت: 24 فروردین 1395

کلید واژگان:

کنترل آرایش رهبر-پیرو

ربات پایه متحرک غیرهولونومیک

تکنیک پسگام

بیونرودینامیک

اجتناب از برخورد با مانع

این مقاله به مسأله کنترل آرایش رهبر-پیرو برای ربات‌های پایه متحرک غیرهولونومیک، مبتنی بر کنترل‌کننده پسگام، در حضور موانع می‌پردازد. مدل سینماتیکی ربات و قید غیرهولونومیک آن معرفی شده، سپس به کمک تکنیک پسگام، رویکرد کنترل آرایش رهبر-پیرو، پیاده می‌شود. برای حل مسأله پرش‌های ناگهانی سرعت، در کنترل‌کننده پسگام، از تلفیق نرودینامیک ملهم از بیولوژیک استفاده شده است. در پژوهش‌های پیشین از مدل فاصله-زاویه استفاده شده و فاصله و زاویه مطلوب ثابت فرض شده‌اند. در این مقاله، به منظور افزایش انعطاف‌پذیری آرایش، این فرض محدودکننده حذف شده و فاصله و زاویه مطلوب، متغیر با زمان فرض می‌شوند. در ادامه، معادلات دینامیک خطا استخراج شده و کنترل‌کننده جدیدی طراحی می‌شود. یک قانون کنترل کمکی نیز برای مشتق زاویه مرجع پیروها ارائه می‌شود تا پایداری مجانبی کلی پیروها و پایداری محلی کل آرایش را به کمک تئوری لیاپانوف تضمین کند. نمونه بارز از نیاز به تغییر فاصله و زاویه مطلوب، زمانی است که مانی در مسیر پیرو وجود دارد که در مسیر رهبر آن نیست. برای اجتناب از برخورد پیرو با مانع، توابع متغیر با زمان مناسب برای فاصله و زاویه مطلوب انتخاب شده و در کنترل‌کننده جدید، جایگزین می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که ربات پیرو می‌تواند رهبر بالادرنگ خود را، با کنترل‌کننده سینماتیکی پیشنهادی، دنبال کند درحالی که از برخورد با موانع نیز اجتناب می‌نماید. به علاوه، ورودی‌های کنترلی در لحظه شروع و نیز به هنگام گذر از موانع، پرش‌های ناگهانی نداشته و قابل قبول هستند که این خود از دستاوردهای تلفیق بیونرودینامیک، با کنترل‌کننده پسگام است.

Leader-follower flexible formation control of wheeled mobile robots based on an integrated bio-inspired neurodynamics approach and backstepping scheme

Maryam Asgari¹, Mohammadreza Jahed motlagh², Khalil Alipour^{3*}

1- Department of Mechatronics, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran

2- Computer Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechatronics Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, k.alipour@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 December 2015

Accepted 11 February 2016

Available Online 12 April 2016

Keywords:

Leader-follower formation control

Nonholonomic mobile robot

Backstepping technique

Bio-Neurodynamics

Obstacle avoidance

ABSTRACT

This paper investigates the leader-follower formation control problem of nonholonomic mobile robots based on backstepping technique integrated with the bio-inspired neurodynamics while avoiding collision with obstacles. Kinematics model of robot and nonholonomic constraint are introduced and formation control scheme is formed based on backstepping technique. In order to solve velocity jump in backstepping kinematics model, the bio-inspired neurodynamic approach is used. In most of the previous studies, researches used separation-bearing approach and also supposed that desired separation and bearing are constant. In this paper this assumption is relaxed and desired separation and bearing are considered to be time varying. Error dynamics equations are derived and a new controller is proposed. Also an auxiliary reference angular velocity control law is proposed to guarantee global asymptotic stability of the followers and local asymptotic stability of the entire formation according to direct method of Lyapunov. A common example of changing the formation is obstacle avoidance, when an obstacle is located within a follower path and is not in its leader path. Time varying functions for desired separation and bearing are chosen and the new controller is developed with its proof of stability. Simulations results reveal that each follower robot can track its real time leader by employing the proposed kinematic controller while avoiding obstacles. Furthermore control inputs at the start moment and also while avoiding obstacles, do not contain impractical jumps and are reasonable thanks to integrating bio-inspired neurodynamic with backstepping technique.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، محققان از ارگانیسم موجودات اجتماعی نظیر ماهی‌ها، پرندگان و مورچه‌ها، برای کشف و آرایه الگوریتم‌های کنترلی الهام گرفته‌اند. درحالی که اهداف هر گروه از موجودات زنده متفاوت است، ولی با هم به صورت مشترک کار می‌کنند تا با همکاری یکدیگر هدف مورد نظر هرچه سریعتر و بهتر نسبت به زمانی که به تنهایی آن را به انجام می‌رسانند، تحقق یابد. در ساختارهای رفتاری این موجودات اجتماعی، هر عضو نسبت به سایرین یا رهبر گروه در یک موقعیت خاص قرار گرفته و موقعیت خود را نسبت به آنها تنظیم می‌کند. در سیستم‌های چندرباته نیز هر ربات بعنوان یک عضو مجموعه در جهت معینی نسبت به رهبر گروه یا نسبت به همسایه خود حرکت می‌کند تا کل مجموعه به هدف مورد نظر خود برسد. در بسیاری از کاربردها استفاده از یک ربات به تنهایی برای به انجام وظیفه مورد نظر کافی نبوده یا بسیار سخت و زمانبر خواهد بود. برای مثال، در اکتشاف یک سیاره یا هل دادن اجسام یا عملیات امداد و نجات و ... استفاده از یک ربات تنها، واقع‌بینانه نبوده و ناکارآمد است. لذا استفاده از سیستم‌های چندرباته، یکی از مهمترین مباحث و شاخه‌های علم رباتیک است [1]. استراتژی‌های متفاوتی برای کنترل آرایش در پژوهش‌های پیشین مطرح شده است که معروفترین آنها عبارتند از رویکرد مبتنی بر رفتار [2-4]، رویکرد ساختار مجازی [5-7] و رویکرد رهبر-پیرو [8-23].

رویکرد مبتنی بر رفتار اولین بار، توسط بالچ و آرکین استفاده شد [2]. آنها از این طرح برای کنترل موتور استفاده کردند. رفتارهای ساده برای هر ربات، تعریف شده، سپس تمام رفتارها با ضرایب وزنی مناسبی با هم جمع شدند طوری که اولویت یا تقدم نسبی بین آنها برقرار شود. در مرجع [3] بالچ و هایبینت، رویکرد توابع پتانسیل را که برای ناوبری یک ربات متحرک استفاده می‌شود، به مسأله کنترل آرایش سیستم‌های چندرباته، اعمال کردند و آن را توابع پتانسیل اجتماعی نامیدند. این توابع بصورت نیروهای جاذبه از جانب هدف و دافعه از سوی موانع و سایر ربات‌ها، مدل شدند. در مرجع [4]، بروننه و همکاران یک رویکرد مبتنی بر رفتار را برای کنترل آرایش میکروروبات‌های مدولار و ناهمگن ارائه کردند که کمتر به آنها پرداخته شده است.

رویکرد ساختار مجازی، کل آرایش را به صورت یک جسم صلب، در نظر می‌گیرد. یکی از اولین کارها در این زمینه، توسط لوییس و تان ارایه گردید [5]. الگوریتم آنها ساختار مجازی را به موقعیتهای ربات‌ها می‌نگارد. اگر چه روش آنها دارای فیدبک از آرایش بود اما همگرایی آرایش به پیکربندی نهایی مطلوب خود تضمین نگردید. در مرجع [6]، وارقس و کی یک مدل ریاضی پیشنهاد کردند که در آن هدف، مرتب کردن اعضای M تایی گروه، در شکل‌های M ضلعی منتظم است. در این پژوهش، چون هر شکل منتظم، می‌تواند به صورت محاط در دایره باشد، لذا از طریق به دست آوردن ریشه $z = x + iy$ مختصات دقیق این نقاط محاسبه می‌شود. در این روش، از راههای مختلفی برای عبور از موانع و درپها استفاده شده است. در مرجع [7]، عباسپور و همکاران یک مسأله آرایش بهینه را به منظور حمل یک شیء، با استفاده از رویکرد ساختار مجازی حل کردند. برای نیل به این هدف یک تابع هزینه مناسب انتخاب شده و با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی عددی، نقاط گیرش شیء انتخاب خواهند شد. در نهایت، کل مجموعه با استفاده از کنترل امپدانس چندگانه، کنترل می‌شود.

روش رهبر-پیرو پرکاربردترین استراتژی کنترل آرایش است. در این رویکرد، ربات رهبر، مسیر مرجع را تولید نموده و سایر ربات‌ها آن را دنبال خواهند کرد. فرض بر این است که سرعت خطی و زاویه‌ای رهبر، معلوم است

و فقط نیاز است سرعت خطی و زاویه‌ای پیروها کنترل شود تا فاصله نسبی و زاویه پیروها با رهبر حفظ شده و آرایش مطلوب برآورده شود [8]. این امر با انتخاب یک قانون کنترل موضعی روی هر پیرو، مبتنی بر دینامیک موقعیت نسبی آن محقق خواهد شد. در نتیجه پایداری گروه تضمین می‌شود به این معنی که کل گروه، آرایش مورد نظر را ایجاد نموده و آن را حفظ خواهد کرد. پس کنترل آرایش سیستم‌های چندرباته، می‌تواند بصورت بسطی از مسأله ردیابی در تئوری‌های مرسوم کنترل، دیده شود. البته رویکردهایی نیز وجود دارند که سرعت رهبر را با تکیه بر رؤیتگرهای غیرخطی و اطلاعات تصویر، تخمین می‌زنند. مثل روش فیلتر کالمن [9] و نیز رؤیتگرهای بهره بالا [10].

روش‌های کنترل ردیابی مختلفی در پژوهش‌های پیشین برای ربات‌های پایه متحرک استفاده شده‌اند از جمله: خطی‌سازی فیدبک [8]، پسگام [11-17]، مد لغزشی [18,19]، منطق فازی [20,21] و شبکه‌های عصبی [14,22].

الگوریتم‌های کنترلی که از مد لغزشی استفاده می‌کنند، پیچیده بوده و از نظر محاسباتی هزینه زیادی دارند. فرامین سرعت تولید شده نسبت به زمان، منحنی‌های همواری نیستند که ممکن است منجر به گسستگی در سرعت ربات شوند. در [18] از یک کنترل کننده لغزشی مرتبه اول استفاده شده که سرعت مطلق و شتاب رهبر را نیاز دارد و در پیرو گذرا از شرایط اولیه تا رسیدن به سطح لغزش، نسبت به تغییر پارامترها حساس است. در [19] کنترل کننده مرتبه دوم بکار گرفته شده تا به کمک مد لغزشی انتگرالی مشکلات مرجع [18] را برطرف کند. در روش‌های مبتنی بر خطی‌سازی فیدبک ورودی-خروجی [8]، نیاز است که خطاهای اولیه بین موقعیت واقعی و موقعیت مطلوب ربات کوچک باشد در نتیجه در این روش پایداری محلی است، علاوه بر این در لحظه شروع، سرعت، معمولاً تغییر بسیار شدیدی دارد. از سوی دیگر، رویکرد خطی‌سازی فیدبک، در برابر سینماتیک و دینامیک‌های مدل نشده مقاوم نبوده و به علاوه، جهت جبران‌سازی مناسب بخش‌های غیر-خطی، به مدل دقیق سیستم، نیاز می‌باشد. رویکردهای کنترل ردیابی مبتنی-بر قوانین فازی، که جهت کنترل ردیابی یک ربات پایه متحرک [20]، یا کنترل آرایش چند ربات [21] آرایه می‌شوند، می‌توانند مسأله‌ی سرعت زیاد، در لحظه شروع را حل کنند اما فرموله کردن قوانین فازی مشکل است و معمولاً براساس سعی و خطا و دانش انسان بدست می‌آید. الگوریتم‌های کنترل ردیابی مبتنی بر شبکه‌های عصبی [14,22]، نیاز به محاسبات پیچیده و آموزش/یادگیری دارند و ممکن است تنها برای شرایط آزمایشی خاص قابل استفاده باشند. در [22] برای کنترل ردیابی یک ربات متحرک که دینامیک آن ناشناخته است از رویکرد شبکه‌های عصبی بهره‌برداری گردیده است. همچنین در [14]، برای تخمین دینامیک رهبر و پیروها از شبکه عصبی استفاده گردیده است.

برای حل مسأله ردیابی، یکی از روش‌های متداول استفاده از کنترل-کننده پسگام است [11-17]. با استفاده از این تکنیک، غیرخطی‌های سیستم نیازی به حذف شدن ندارند. این امر به قوام سیستم کنترلی منجر شده و تلاش کنترل کمتر می‌شود [11]. همچنین با استفاده از تکنیک پسگام، کنترل کننده ردیابی بسیار ساده‌تر شده و پایداری آن به کمک تئوری پایداری لیپانوف تضمین می‌شود. علاوه بر این، برخی از کنترل‌کننده‌های مبتنی بر پسگام می‌توانند بر خطاهای اولیه‌ی محسوس نیز، غلبه نموده و سیستم را کنترل کنند. اما فرامین سرعتی که با رویکرد کنترل پسگام مبتنی بر مدل سینماتیک برای ربات‌ها بدست می‌آیند، در لحظه شروع دارای مقدار اولیه بسیار بزرگی هستند. همچنین، هنگامی که خطای ردیابی بطور ناگهانی تغییر می‌کند، این کنترل‌کننده‌ها متحمل پرش‌های سرعت می‌شوند. خاطر نشان

نماید. معادلات دینامیک خطا استخراج شده و کنترل کننده جدیدی پیشنهاد می شود تا تغییرات مقادیر مطلوب را مد نظر قرار دهد. یک نمونه بارز از نیاز به تغییر آرایش و متغیر بودن فاصله و زاویه مطلوب زمانی است که مانعی بر سر راه پیرو وجود داشته باشد که در مسیر رهبر آن نیست و نیاز است که ربات پیرو از برخورد با مانع اجتناب کند. با انتخاب تابع مناسب متغیر با زمان برای فاصله و زاویه مطلوب و جایگزین کردن آنها در معادلات، اثر تغییرات آرایش ناشی از وجود مانع در مسیر پیروها بررسی خواهد شد.

ادامه میحث به شرح ذیل سازمان یافته است. در بخش های 2 و 3 بر اساس مرجع [17]، به معرفی مدل ریاضی ربات پرداخته و ساختار کنترل آرایش توضیح داده می شود. بخش 4، به معرفی آرایش متغیر با زمان می پردازد. معادلات دینامیک خطا با فرض متغیر بودن فاصله و زاویه مطلوب، استخراج شده و کنترل کننده جدید پسگام طراحی می شود. سپس مدل بیونودینامیک، معرفی خواهد شد [17,16] و در ادامه، کنترل کننده پسگام تلفیق شده با بیونودینامیک طراحی می شود. برای اثبات اثربخشی کنترل کننده جدید، در بخش 5 یک طرح گریز از مانع، معرفی و پیاده سازی می گردد. نتایج شبیه سازی در بخش 6 ارائه شده و در بخش 7، نتیجه گیری و پیشنهادها برای ادامه این تحقیق ارائه شده است.

2- مدل ربات متحرک غیرهولونومیک

رباتی که در شکل 1 نشان داده شده، مثالی از یک ربات غیرهولونومیک است. این سیستم یک ربات متحرک با دو چرخ است که بر روی یک محور سوار شده است. یک گروه نتایی از ربات های متحرک در نظر گرفته می شوند. برای سادگی فرض می شود که همه ربات ها ساختار مشابهی نظیر شکل 1 دارند. موقعیت ربات i ام، $1 \leq i \leq n$ در دستگاه مختصات کارتزین OXY توسط $P_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$ مشخص می شود که در آن $[x_i, y_i, \theta_i]^T$ مختصات جلوی ربات R_i و θ_i زاویه خط عمود بر محور چرخ های ربات با خط افقی است. فاصله بین مرکز چرخ های ربات تا جلوی ربات با d نشان داده شده است. هر ربات با سرعت خطی v_i و سرعت زاویه ای ω_i در حال حرکت است.

در صورتی که چرخ های ربات پایه متحرک غیرهولونومیک R_i نلغزند و غلتش خالص داشته باشند، قید سینماتیکی (1) برقرار است:

$$\dot{y}_i \cos \theta_i - \dot{x}_i \sin \theta_i = d \dot{\theta}_i \quad (1)$$

در نتیجه مدل سینماتیکی یک ربات متحرک غیرهولونومیک مطابق رابطه (2) عبارت است از:

$$\dot{P}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -d \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & d \cos \theta_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

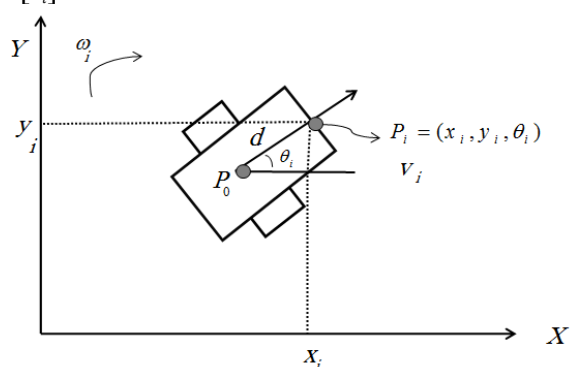


Fig. 1 A nonholonomic mobile robot [17]

شکل 1 یک ربات متحرک غیرهولونومیک [17]

می گردد که در نقاط پرش سرعت، شتاب ها و در نتیجه نیروها یا گشتاورها به صورت نامحدود بزرگ می شوند. در نتیجه، قابلیت پیاده سازی این الگوریتم در عمل، بسیار محدود می گردد. یک نمونه از کنترل کننده پسگام، در مرجع [11] برای ردیابی یک ربات پایه متحرک ارائه گردیده است. برای حل این معضل، برای حل مسأله ردیابی، یکی از روش های متداول استفاده از کنترل کننده پسگام است [11-17]. با استفاده از این تکنیک، غیرخطی های سیستم نیازی به حذف شدن ندارند. این امر به قوام مدل منجر شده و تلاش کمتری برای کنترل سیستم نیاز است. با استفاده از پسگام، کنترل کننده ردیابی بسیار ساده تر شده و پایداری سیستم به کمک تئوری پایداری لیاپانوف تضمین می شود. علاوه بر این برخی از کنترل کننده های مبتنی بر پسگام می توانند بر خطاهای اولیه بزرگ هم غلبه نموده و سیستم را کنترل کنند. اما فرامین سرعتی که با رویکرد کنترل پسگام با استفاده از مدل سینماتیکی برای ربات ها بدست می آیند، در لحظه شروع دارای مقدار اولیه بسیار بزرگی هستند و زمانی که خطای ردیابی بطور ناگهانی تغییر می کند، این کنترل کننده ها متحمل پرش های سرعت می شوند. یعنی شتاب ها و در نتیجه نیروها یا گشتاورها در نقاط پرش سرعت بطور نامحدودی بزرگ می شوند و این مشکل قابلیت پیاده سازی در عمل را سلب می نماید. یک نمونه آن در مرجع [11] برای ردیابی یک ربات متحرک دیده می شود. برای حل این معضل، فیرو و لوئیس در [12]، یک کنترل کننده گشتاور را برای کنترل ردیابی یک ربات پایه متحرک غیرهولونومیک پیشنهاد دادند که سیگنال های گشتاور را یا از طریق محاسبه بدست می آورد یا به کمک یک شبکه عصبی سه لایه، تخمین می زند. کنترل آرایش به روش پسگام، نخستین بار توسط لی و همکاران ارائه شد [13]. آنها یک مدل سینماتیکی را در دستگاه کارتزین ارائه کردند که مشکل پرش های سرعت را دارا بود. در مراجع [15,14] ایده کنترل کننده گشتاور در بحث کنترل آرایش ربات ها پیاده شده و دینامیک ربات ها هم در نظر گرفته شده است. یک روش مناسب، برای فائق آمدن بر مسأله پرش سرعت در کنترل کننده ی پسگام این است که دینامیک های خطا را آنالیز نموده و یک کنترل کننده ردیابی طراحی شود که قادر باشد فرامین سرعت پیوسته و هموار تولید کند بدون اینکه نیاز باشد هیچ کنترل کننده ای برای گشتاور ربات پیش بینی شود. برای این منظور یانگ و همکاران از تلفیق روش پسگام با مدل نرودینامیکی ملهم از بیولوژیک-که به اختصار آن را بیونودینامیک خواهیم خواند- استفاده کرده و مسأله کنترل ردیابی یک ربات متحرک غیرهولونومیک را حل کردند [16]. سپس، پنگ و همکاران این ایده را به مسأله کنترل آرایش یک دسته از ربات های چرخ دار غیرهولونومیک بسط دادند [17]. این کنترل کننده از ویژگی های منحصر بفرد معادله ی غشاء هادکین و هاکسلی الهام گرفته است که برای استخراج مدل های دینامیک عصبی در بیولوژیک بکار می رود. مزیت این روش این است که هیچ پروسه ی یادگیری در آن نیاز نیست. همچنین، نیازی به کنترل کننده گشتاور هم وجود ندارد چرا که کنترل کننده پیشنهادی به تنهایی قادر است سیگنال های کنترلی پیوسته و هموار با مقدار اولیه صفر تولید نماید. در پژوهش [17] به روش پسگام با تلفیق بیونودینامیک، از مدل فاصله-زاویه استفاده شده و فاصله و زاویه مطلوب، مقادیر ثابتی فرض شده اند. در نتیجه مشتق آنها صفر بوده و به این معنی است که آرایش قابلیت تغییر نخواهد داشت. به منظور افزایش انعطاف پذیری آرایش و قابلیت انجام مانورهای بیشتر، این مقاله می کوشد تا علاوه بر مدل سازی روش پسگام با تلفیق بیونودینامیک، فاصله و زاویه مطلوب را متغیر با زمان فرض نموده و اثر مشتقات آنها را در معادلات دخیل

3- ساختار کنترل آرایش

به منظور پیاده سازی کنترل آرایش، نیاز است که روابط بین ربات ها شرح داده شوند. در این مقاله از طرح ارائه شده در شکل 2 استفاده می شود.

موقعیت واقعی ربات رهبر نام با $P_i = [x_i, y_i, \theta_i]$ ، موقعیت واقعی ربات پیرو نام با $P_j = [x_j, y_j, \theta_j]$ ، فاصله و زاویه واقعی بین ربات پیرو نام و ربات رهبر نام با L_{ij} و ψ_{ij} و فاصله و زاویه مطلوب بین ربات پیرو نام و ربات رهبر نام با L_{ij}^d و ψ_{ij}^d نشان داده می شود. هدف الگوریتم کنترلی، حفظ فاصله و زاویه مطلوب بین رهبر و پیرو است. در این راستا، باید ورودی های کنترلی v_j و ω_j برای ربات پیرو R_j طوری طراحی شود که خطای بین موقعیت مطلوب و موقعیت واقعی ربات پیرو صفر شده و شرایط رابطه (3) برقرار گردد:

$$(L_{ij}^d - L_{ij}) = 0 \quad \text{و} \quad (\psi_{ij}^d - \psi_{ij}) = 0 \quad (3)$$

با توجه به شکل 2، از طریق روابط هندسی به سادگی می توان موقعیت مطلوب ربات پیرو یعنی P_j^d و موقعیت واقعی آن یعنی P_j را مطابق روابط (4) و (5) استخراج کرد:

$$P_j = \begin{bmatrix} x_i - d \cos \theta_i + L_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_i) \\ y_i - d \sin \theta_i + L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_i) \\ \theta_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_j^d = \begin{bmatrix} x_i - d \cos \theta_i + L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_i) \\ y_i - d \sin \theta_i + L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_i) \\ \theta_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

اگر فاصله نسبی L_{ij} روی محورهای X و Y تصویر شود در دستگاه مختصات کارترین، روابط (6) صادق خواهند بود:

$$L_{ij} = \sqrt{L_{ijx}^2 + L_{ijy}^2} \quad (6)$$

$$L_{ijx} = x_i - x_j - d \cos \theta_i$$

$$L_{ijy} = y_i - y_j - d \sin \theta_i$$

از طرفی با توجه به شکل 2 می توان رابطه (7) را برای ψ_{ij} نوشت:

$$\psi_{ij} = \arctan\left(\frac{L_{ijy}}{L_{ijx}}\right) - \theta_i + \pi \quad (7)$$

اگر از روابط (6) و (7) مشتق گرفته و مقادیر جایگزین شوند، رابطه (8) بدست می آید:

$$\dot{L}_{ij} = -v_i \cos \psi_{ij} + v_j \cos \gamma_{ij} + d \omega_j \sin \gamma_{ij}$$

$$\dot{\psi}_{ij} = \frac{1}{L_{ij}} (v_i \sin \psi_{ij} - v_j \sin \gamma_{ij} + d \omega_j \cos \gamma_{ij}) - \omega_i \quad (8)$$

که در آنها $\gamma_{ij} = \psi_{ij} + \theta_i - \theta_j$.

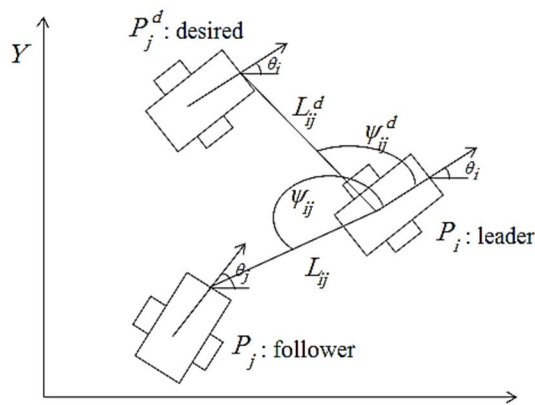


Fig. 2 Leader- follower formation control scheme [17]

شکل 2 ساختار کنترل آرایش رهبر- پیرو [17]

با توجه به هندسه این طرح و جایگزینی از روابط (4) و (5) و نیز استفاده از روابط مثلثاتی ساده، خطاهای ردیابی (اختلاف موقعیت واقعی و مطلوب در دستگاه مختصات جهانی) به شکل معادله (9) خواهند بود:

$$e_j = \begin{bmatrix} x_{je} \\ y_{je} \\ \theta_{je} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & \sin \theta_j & 0 \\ -\sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j^d - x_j \\ y_j^d - y_j \\ \theta_j^d - \theta_j \end{bmatrix}$$

$$e_j = \begin{bmatrix} L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - L_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_{ij}) \\ L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_{ij}) \\ \theta_j^d - \theta_j \end{bmatrix}$$

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (9)$$

4- آرایش متغیر با زمان و تغییرات مقادیر مطلوب

در مرجع [17]، آرایش ثابت فرض شده است و دینامیک خطای آرایش با استفاده از این فرض که فاصله و زاویه مطلوب ثابت هستند و در نتیجه مشتقات آنها صفر خواهند بود، بدست آمده است. این یک فرض محدودکننده است و قابلیت انجام تغییر آرایش را ندارد. تغییر در آرایش در مواردی همچون اجتناب از برخورد با مانع، هنگام گذر از معابر باریک و موارد مشابه ضرورت دارد. اکنون سعی بر آن است تا معادلات کاملتری ارائه گردد که در آن سیستم رباتیک، انعطاف پذیری بیشتری داشته و بتواند از عهده انجام مانورهای شامل تغییر در آرایش، برآید. به عبارت دیگر حالتی بررسی شود که آرایش ثابت نبوده و متغیر با زمان باشد. در نتیجه باید معادلات حالت جدید را برای سیستم، استخراج نموده و کنترل کننده مناسبی برای آن طراحی نمود به شکلی که، هر مانور متغیر با زمان را به نحو شایسته ای به انجام رسانده، و آرایش مطلوب را محقق سازد. کنترل کننده جدید برای هر دو الگوریتم پسگام و پسگام تلفیق شده با بیونودینامیک طراحی می شود.

4-1- دینامیک خطای سیستم با فرض متغیر بودن مقادیر مطلوب

برای بدست آوردن دینامیک خطا در آرایش رهبر-پیرو، مفروضات زیر لحاظ شده اند:

1- موقعیت کنونی ربات رهبر معلوم است. (فرض می شود موقعیت ربات کاملاً و بطور دقیق از طریق سنسورها، تلفیق سنسوری و پردازش سیگنال معلوم است.)

2- هر پیرو مجهز به سنسوری است که قادر است فاصله L_{ij} و زاویه ψ_{ij} را اندازه گیری کند. علاوه بر این رهبر و تمام پیروها مجهز به دستگاه هایی هستند که سرعت خطی و زاویه ای آنها و نیز جهت را اندازه گیری می کنند.

3- سرعت زاویه ای ربات ها همواره محدود است:

$$-\omega_{\max} \leq \omega_j \leq \omega_{\max} \quad \forall t, \omega_{\max} > 0$$

4- ردیابی سرعت کامل است.

5- ارتباط بی سیم بین زامین پیرو و زامین رهبر برقرار بوده و تاخیر ارتباطات صفر است.

6- رهبر نام، سرعت خطی، سرعت زاویه ای و جهت خود را به پیرو نام خود منتقل می کند.

7- آزمایش در یک محیط بدون نویز انجام می شود.

8- عدم قطعیت در موقعیت ربات ها وجود ندارد.

روشن است که دینامیک خطای آرایش، با مشتق گیری از رابطه (9) نسبت به زمان بدست می آید. با در نظر داشتن تغییرات مقادیر مطلوب دینامیک خطای آرایش به فرم معادله (10) خواهد بود:

که $\dot{V}(t)$ منفی معین است [17].

$$V(t) = \frac{1}{2}(x_{je}^2 + y_{je}^2) + \frac{dk_3\theta_{je}^2}{2k_2} \quad (15)$$

4-4- اعمال نرودینامیک ملهم از بیولوژیک به الگوریتم پسگام با

فرض متغیر بودن مقادیر مطلوب

در بخش 1 توضیح داده شد که برای حل مسأله پرش ناگهانی سرعت، یک راه استفاده از کنترل کننده ردیابی است که دینامیک عصبی ملهم از بیولوژیک را با روش پسگام ترکیب می کند. این روش، در ادامه شرح داده می شود.

4-4-1- معرفی مدل بیونرودینامیک

در مراجع [17,16] از مدل عصب بیولوژیکی شانتینگ¹ استفاده شده است که معادله ریاضی آن به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{dx_j}{dt} &= -A_j x_j + (B_j - x_j) S_j^+(t) - (D_j + x_j) S_j^-(t) V(t) \\ &= \frac{1}{2}(x_{je}^2 + y_{je}^2) + \frac{dk_3\theta_{je}^2}{2k_2} \end{aligned} \quad (16)$$

خاصیت این مدل آن است که همواره، خروجی همواری دارد. با بررسی پژوهش های پیشین و آنالیز کنترل کننده ردیابی مبتنی بر پسگام، مشخص می شود هرجا که خطای ردیابی به طور ناگهانی تغییر کند (مثل لحظه شروع حرکت)، پرش های سرعت پدیدار می شود. چنانچه ورودی های این معادله، توابعی از خطا باشند، همیشه خروجی همواری از آنها تولید خواهد شد. حال چنانچه به جای استفاده مستقیم از خطاها، توابعی هموار از آنها جایگزین شوند، می توان اثر پرش های ناگهانی سرعت را حذف نمود. اثر این پرش ها در مؤلفه های x_{je} و y_{je} مشهودتر است. در معادله (16)، x_j فعالیت عصبی زامن نرون در شبکه عصبی است. A_j ، B_j و D_j ثابت های غیرمنفی هستند. A_j نرخ زوال غیرفعال²، B_j حد بالای فعالیت عصبی و D_j حد پایین فعالیت عصبی نامیده می شوند. $S_j^+(t)$ ورودی تحریک کننده به نرون و $S_j^-(t)$ ورودی بازدارنده به نرون می باشند. برای استفاده از این مدل در بحث کنترل آرایش، توابع و روابط استفاده شده به شرح زیر [7]:

$$\begin{pmatrix} x_j \\ y_j \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} x_{je} \\ y_{je} \end{pmatrix} S \begin{pmatrix} g_{1j} x_j \\ g_{2j} y_j \end{pmatrix}$$

با جاگذاری در معادله (16)، یک معادله دینامیکی سرعت برای خطا در جهت طولی به شکل معادله (17) بدست آمده است:

$$\frac{d\alpha_j}{dt} = -A\alpha_j + (B - \alpha_j)f_{1j}(x_{je}) - (D + \alpha_j)g_{1j}(x_{je}) \quad (17)$$

به طریق مشابه، یک معادله دینامیکی سرعت برای خطا در جهت عرضی به شکل معادله (18) بدست آمده است:

$$\frac{d\beta_j}{dt} = -A\beta_j + (B - \beta_j)f_{2j}(y_{je}) - (D + \beta_j)g_{2j}(y_{je}) \quad (18)$$

توابع f_{1j} ، g_{1j} ، f_{2j} ، g_{2j} نیز به شکل معادلات (19) و (20) تعریف شده اند:

$$\begin{aligned} f_{1j}(x_{je}) &= \max\{k_1 x_{je}, 0\} \quad g_{1j}(x_{je}) = \max\{-k_1 x_{je}, 0\} \quad (19) \\ f_{2j}(y_{je}) &= \max\{k_2 y_{je}, 0\} \quad g_{2j}(y_{je}) = \max\{-k_2 y_{je}, 0\} \quad (20) \end{aligned}$$

که در آنها k_1 ، k_2 ثوابت مثبت هستند.

4-5- الگوریتم کنترل پسگام با تلفیق بیونرودینامیک و فرض متغیر

بودن مقادیر مطلوب

$$\begin{aligned} \dot{x}_{je} &= \dot{L}_{ij} \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - L_{ij}^d (\dot{\psi}_{ij}^d + \dot{\theta}_{ij}) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad - L_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_{ij}) + L_{ij} (\dot{\psi}_{ij} + \dot{\theta}_{ij}) \sin(\psi_{ij} + \theta_{ij}) \\ \dot{y}_{je} &= \dot{L}_{ij} \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + L_{ij}^d (\dot{\psi}_{ij}^d + \dot{\theta}_{ij}) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad - L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_{ij}) - L_{ij} (\dot{\psi}_{ij} + \dot{\theta}_{ij}) \cos(\psi_{ij} + \theta_{ij}) \\ \dot{\theta}_{je} &= \omega_j^d - \omega_j \end{aligned} \quad (10)$$

مقادیر $\dot{L}_{ij}$ و $\dot{\psi}_{ij}$ را از معادله (8) در معادلات فوق جایگزین می شوند. علاوه بر این، با توجه به رابطه $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ، مشتق آن در رابطه زیر صدق می کند:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{ij} &= \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_j = \omega_i - \omega_j \\ \text{این رابطه را نیز به همراه معادلات (10) در نظر گرفته و با استفاده از روابط مثلثاتی و ساده کردن معادلات، دینامیک خطای سیستم به شکل معادله (11) خواهد بود:} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{je} &= v_i \cos \theta_{ij} + \omega_j y_{je} - v_j \\ &\quad - L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \dot{y}_{je} &= v_i \sin \theta_{ij} - \omega_j x_{je} - d\omega_j \\ &\quad + L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \dot{\theta}_{je} &= \omega_j^d - \omega_j \end{aligned} \quad (11)$$

اکنون که معادلات حالت سیستم برای آرایش متغیر با زمان بدست آمده اند، می توان به انتخاب قوانین کنترلی و طراحی کنترل کننده پرداخت.

4-2- الگوریتم کنترل پسگام با فرض متغیر بودن مقادیر مطلوب

همان طور که اشاره شد برای رسیدن به آرایش و حفظ آن نیاز است که سرعت خطی و زاویه ای پیروها را کنترل نمود. از طرفی با توجه به اینکه ربات غیرهولونومیک است، نمی تواند در لحظه، به هرسو، گردش کند و برای رسیدن از موقعیت فعلی به موقعیت مطلوب خود ناگزیر از چرخش می باشد. در هنگام چرخش، زاویه مرجع پیروها یعنی θ_j^d نمی تواند با زاویه مبین جهت گیری رهبر یعنی θ_i ، برابر باشد. در نتیجه، یک قانون کنترل کمکی نیز برای تغییرات زاویه مرجع پیروها پیشنهاد می شود به نحوی که پایداری مجانبی همه خطاها بدست آمده و زمانی که ربات پیرو به موقعیت مطلوب خود رسید، $\theta_j^d = \theta_i$ شود. با انتخاب معادله (12) برای مشتق زاویه مرجع، می توان به اهداف فوق دست یافت.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_j^d &= \frac{1}{d} [v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + 2k_2 y_{je}] \end{aligned} \quad (12)$$

ورودی های کنترل پسگام به این شرح معادله (13) انتخاب می شوند:

$$\begin{aligned} v_j &= k_1 x_{je} + v_i \cos \theta_{ij} - L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \omega_j &= \frac{1}{d} [v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + k_2 y_{je} + k_3 \theta_{je}] \\ k_1 &> 0, k_2 > 0, k_3 > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

با جاگذاری معادلات (12) و (13) در معادله (11) دینامیک خطای سیستم سینماتیکی حلقه بسته مطابق معادله (14) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{je} &= \omega_j y_{je} - k_1 x_{je} \\ \dot{y}_{je} &= -\omega_j x_{je} - k_2 y_{je} - k_3 \theta_{je} \\ \dot{\theta}_{je} &= \frac{1}{d} (-k_3 \theta_{je} + k_2 y_{je}) \end{aligned} \quad (14)$$

4-3- تحلیل پایداری الگوریتم کنترل پسگام

برای اثبات اینکه سیستم کنترل ردیابی مسیر (14) تحت قوانین کنترلی (13) بطور مجانبی پایدار است و خطای ردیابی به صفر همگرا می شود، تابع کاندید لیاپانوف به شکل معادله (15) انتخاب می گردد. تابع لیاپانوف ارایه شده، مثبت معین است. با مشتق گیری از آن و استفاده از روابط (14) می توان ثابت نمود

1- Shunting
2- Passive decay rate

$$\dot{V}(t) = -\frac{k_3^2}{k_2}\theta_{je}^2 + \frac{1}{B}\{-A - f_{1j}(x_{je}) - g_{1j}(x_{je})\}\alpha_j^2 + \frac{1}{B}\{-A - f_{2j}(y_{je}) - g_{2j}(y_{je})\}\beta_j^2 \leq 0$$

از آنجاکه $\dot{V}(t) \geq 0$ و $\dot{V}(t) \leq 0$ بنابراین $V(t)$ برای α_j, β_j و θ_{je} غیرافزایشی خواهد بود و نرم 2 آن محدود است. با توجه به فرض محدود بودن ω اثبات می شود که $\|\dot{V}(t)\| < \infty$ و $V(t)$ بطور یکنواخت پیوسته است. با استفاده از لم باربالات وقتی $t \rightarrow \infty$ میل می نماید $\dot{V} \rightarrow 0$ خواهد رفت. پس $t \rightarrow \infty \rightarrow \theta_{je} \rightarrow 0, y_{je} \rightarrow 0, x_{je} \rightarrow 0$. با استفاده از معادلات (17) و (18) و خاصیت ورودی خروجی مدل شانت نشان داده می شود که اگر خروجی به یک مقدار ثابت معینی (صفر) همگرا شود ورودی هم به مقدار ثابتی (صفر) خواهد رفت: $\alpha_j \rightarrow 0, \beta_j \rightarrow 0 \rightarrow x_{je} \rightarrow 0, y_{je} \rightarrow 0$ بنابراین کنترل کننده ردیابی (21) می تواند تضمین کند که سیستم دینامیک حلقه بسته (23) پایدار مجانبی کلی است و خطای ردیابی به صفر همگرا خواهد شد.

اگر فاصله مطلوب L_{ij}^d و زاویه مطلوب ψ_{ij}^d ثابت باشند، در نتیجه $\dot{\psi}_{ij}^d$ و $\dot{L}_{ij}^d$ صفر خواهند بود و معادلات حالت سیستم به شکل (27) در خواهند آمد:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{je} &= \omega_j y_{je} - v_j + v_i \cos \theta_{ij} - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \dot{y}_{je} &= -\omega_j x_{je} - d\omega_j + v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \dot{\theta}_{je} &= \omega_j^d - \omega_j \end{aligned} \quad (26)$$

مشتق زاویه مرجع و ورودی های کنترلی نیز در صورت ثابت بودن آرایش، به ترتیب به شرح (27) و (28) هستند:

$$\dot{\theta}_j^d = \frac{1}{d}[v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + k_2 y_{je} + k_2 \beta_j] \quad (27)$$

$$\begin{aligned} v_j &= k_1 \alpha_j + v_i \cos \theta_{ij} - L_{ij}^d \omega_i \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \omega_j &= \frac{1}{d}[v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d \omega_i \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + k_2 \beta_j + k_3 \theta_{je}] \end{aligned} \quad (28)$$

که همان معادلات بدست آمده در مرجع [17] می باشند.

حال که کنترل کننده طراحی شد، برای آزمایش اثربخشی آن نیاز است یک سناریوی آرایشی متغیر با زمان تعریف شده و برای مقادیر فاصله مطلوب و زاویه مطلوب و مشتقات آنها فرمولی انتخاب شود. یکی از پرکاربردترین نیازها برای تغییرات مقادیر مطلوب، زمانی است که مانعی بر سر راه پیرو وجود داشته باشد که در مسیر رهبر نیست و لذا نیاز است که پیرو فاصله و زاویه مطلوب خود با رهبر را تغییر دهد تا بتواند از برخورد با مانع اجتناب کند. براین اساس، یک طرح گریز از مانع و فرمول های مناسب برای فاصله و زاویه مطلوب متغیر با زمان، از مرجع [14] انتخاب شده و متعاقباً در معادلات کنترل کننده وارد خواهد شد.

5- طرح گریز از برخورد با مانع

روش های مختلفی برای گریز از مانع در پژوهش های گذشته مطرح شده است [23,14]. در مرجع [14] یک طرح گریز از مانع ساده، ولی کارآمد مطابق شکل 3 پیشنهاد شده است تا ربات پیرو λ_m ، همزمان با ردگیری رهبر خود، از برخورد با موانع نیز اجتناب نماید. برای حصول به این امر، L_{ij}^d و ψ_{ij}^d ثابت نبوده و با زمان تغییر می کنند. در این بخش، فاصله و زاویه مطلوب متغیر با زمان، با $L_{ij}^d(t)$ و $\psi_{ij}^d(t)$ نشان داده می شوند. علاوه بر این، فرض می شود فاصله مانع تا مرکز ربات پیرو λ_m با s_j و زاویه نسبی مانع با آن θ_{js} نمایش داده شده و s_j و θ_{js} قابل اندازه گیری هستند. همچنین فرض می شود رهبر i در آرایش، از یک طرح مسیر استفاده می کند به شکلی که با دنبال کردن یک رهبر مجازی، ربات رهبر λ_m می تواند در مواجهه با هر مانعی مسیر خود را

α_j, β_j که توابعی هموار از خطاها هستند، بجای x_{je} و y_{je} در کنترل کننده پسگام (13) جایگزین می شوند. کنترل کننده ردیابی برای ربات پیرو R_j به شکل (21) انتخاب می شود:

$$\begin{aligned} v_j &= k_1 \alpha_j + v_i \cos \theta_{ij} - L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \dot{L}_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \omega_j &= \frac{1}{d}[v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \dot{L}_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + k_2 \beta_j + k_3 \theta_{je}] \end{aligned} \quad (21)$$

مشتق زاویه مرجع ربات پیرو، نسبت به رهبر آن، مجدداً به شکل (22) تعریف می شود:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_j^d &= \frac{1}{d}[v_i \sin \theta_{ij} + L_{ij}^d (\omega_i + \dot{\psi}_{ij}^d) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \dot{L}_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + k_2 y_{je} + k_2 \beta_j] \end{aligned} \quad (22)$$

با قرار دادن معادلات (21) و (22) در معادلات حالت سیستم یعنی معادلات (11) و ساده کردن نتایج، دینامیک خطای سیستم سینماتیکی حلقه بسته به شکل معادله (23) خواهد شد:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{je} &= \omega_j y_{je} - k_1 \alpha_j \\ \dot{y}_{je} &= -\omega_j x_{je} - k_2 \beta_j - k_3 \theta_{je} \\ \dot{\theta}_{je} &= \frac{1}{d}(-k_3 \theta_{je} + k_2 y_{je}) \end{aligned} \quad (23)$$

4-6- تحلیل پایداری الگوریتم کنترل پسگام با تلفیق

بیونودینامیک و فرض متغیر بودن مقادیر مطلوب

یک کاندید لیاپانوف به شکل (24) انتخاب می شود:

$$V(t) = \frac{1}{2}(x_{je}^2 + y_{je}^2 + \frac{dk_3}{k_2}\theta_{je}^2) + \frac{1}{2B}(\alpha_j^2 + \beta_j^2) \quad (24)$$

روشن است که $V(t) \geq 0$ ، اگر $\alpha_j = 0, \beta_j = 0, \theta_{je} = 0$ و فقط اگر $V(t) = 0$ مشتق گیری شود:

$$\dot{V}(t) = x_{je} \dot{x}_{je} + y_{je} \dot{y}_{je} + \frac{dk_3}{k_2} \theta_{je} \dot{\theta}_{je} + \frac{1}{B}(\alpha_j \dot{\alpha}_j + \beta_j \dot{\beta}_j)$$

با جاگذاری مقادیر از معادله (23) و فرض $B = D$ در معادلات شانت (17) و (18)، معادله (25) نتیجه خواهد شد:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -\frac{k_3^2}{k_2}\theta_{je}^2 + \frac{1}{B}\{-A - f_{1j}(x_{je}) - g_{1j}(x_{je})\}\alpha_j^2 \\ &\quad + \{f_{1j}(x_{je}) - g_{1j}(x_{je}) - k_1 x_{je}\}\alpha_j \\ &\quad + \frac{1}{B}\{-A - f_{2j}(y_{je}) - g_{2j}(y_{je})\}\beta_j^2 \\ &\quad + \{f_{2j}(y_{je}) - g_{2j}(y_{je}) - k_2 y_{je}\}\beta_j \end{aligned} \quad (25)$$

براساس تعریف $f_{1j}(x_{je})$ و $g_{1j}(x_{je})$ از معادله (19)، که مبتنی بر توابع ماکزیمم هستند، چه $x_{je} \geq 0$ و چه $x_{je} < 0$ داریم:

$$f_{1j}(x_{je}) - g_{1j}(x_{je}) - k_1 x_{je} = 0$$

به طریق مشابه به سادگی می توان نشان داد که:

$$f_{2j}(y_{je}) - g_{2j}(y_{je}) - k_2 y_{je} = 0$$

علاوه بر این، براساس تعریف $f_{1j}(x_{je})$ و $g_{1j}(x_{je})$ در معادله (19)، $f_{1j}(x_{je}) \geq 0$ و $g_{1j}(x_{je}) \geq 0$ و همچنین چون A و B ثوابت غیر منفی هستند، می توان نشان داد که:

$$\frac{1}{B}\{-A - f_{1j}(x_{je}) - g_{1j}(x_{je})\} \leq 0$$

به طریق مشابه:

$$\frac{1}{B}\{-A - f_{2j}(y_{je}) - g_{2j}(y_{je})\} \leq 0$$

با توجه به جمیع موارد فوق، مشتق تابع لیاپانوف منفی خواهد شد:

مشاهده می شود که $\dot{s}_j$ نیز در معادلات مورد نیاز است. برای این منظور، $\dot{s}_j$ باید تقریب زده شود. فرض کنید s_j یک تابع هموار است. در این صورت، تقریب $\dot{s}_j$ برای یک بازه زمانی دلخواه و کوچک Δt خواهد بود:

$$\dot{s}_j = s_j(t) - s_j(t - \Delta t) / \Delta t \quad (32)$$

حال که فرمول های مناسب برای فاصله و زاویه مطلوب متغیر با زمان با $L_{ij}^d(t)$ و $\psi_{ij}^d(t)$ و مشتقات آنها بدست آمد، به جایگزینی مقادیر در کنترل کننده پرداخته می شود.

1-5- الگوریتم کنترل پسگام به هنگام گریز از مانع

رابطه (11) که معادلات حالت سیستم را توصیف می کند در نظر بگیرید. با جاگذاری معادله (30) در آن، معادلات حالت سیستم به شکل (33) خواهند شد:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{je} &= v_i \cos \theta_{ij} + \omega_j y_{je} - v_j \\ &\quad - L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left[\operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right] \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \dot{y}_{je} &= v_i \sin \theta_{ij} - \omega_j x_{je} - d\omega_j \\ &\quad + L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left[\operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right] \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \dot{\theta}_{je} &= \omega_j^d - \omega_j \end{aligned} \quad (33)$$

علاوه بر این با جایگزینی مقادیر از رابطه (30) در معادله (13)، ورودی های کنترلی پسگام برای مسأله گریز از مانع موجود در مسیر پیروها مطابق (34) خواهند بود:

$$\begin{aligned} v_j &= k_1 x_{je} + v_i \cos \theta_{ij} \\ &\quad - L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left[\operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right] \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \omega_j &= \frac{1}{d} [v_j \sin \theta_{ij} \\ &\quad + L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left(\operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + k_2 y_{je} + k_3 \theta_{je}] \\ &\quad k_3 > 0 \quad k_2 > 0 \quad k_1 > 0 \end{aligned} \quad (34)$$

با جایگزینی مقادیر از رابطه (30)، در معادله (12)، مشتق زاویه مرجع برای مسأله گریز از مانع موجود در مسیر پیروها، با الگوریتم پسگام به شرح (35) بدست می آید:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_j^d &= \frac{1}{d} [(v_i \sin \theta_{ij} \\ &\quad + L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left(\operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + 2k_2 y_{je}] \end{aligned} \quad (35)$$

2-5- الگوریتم کنترل پسگام با تلفیق بیونودینامیک به هنگام گریز از مانع

تغییر داده و از برخورد با مانع اجتناب کند.

در شکل 3، s_d فاصله ایمن از نزدیکترین مانع است که ربات زام باید با رسیدن به این فاصله تغییر مسیر را آغاز کند. زمانی که نزدیکترین لبه ی یک مانع در زاویه θ_{js} با فاصله s_j نسبت به مرکز ربات پیرو، طوری باشد که $s_j < s_d$ شود در اینصورت $L_{ij}^d(t)$ و $\psi_{ij}^d(t)$ باید تغییر کنند تا از برخورد با مانع اطمینان حاصل شود. لذا مقادیر متغیر $L_{ij}^d(t)$ و $\psi_{ij}^d(t)$ براساس معادله (29) انتخاب می شوند:

$$\begin{aligned} L_{ij}^d(t) &= L_{ij}^d - \frac{1}{2} K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) \\ \psi_{ij}^d(t) &= \psi_{ij}^d + \frac{1}{2} K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right)^2 \xi_j \end{aligned} \quad (29)$$

که در آن $\xi_j = \operatorname{sgn}(\psi_{ij}^d) \operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d)$ می باشد و K_L و K_ψ ضرایب مثبت می باشند.

با دقت در معادله (29) مشخص می شود که فاصله و زاویه مطلوب، شامل مقادیر ثابت آنها به انضمام مقادیر جدیدی است که عمل انتقال نقطه مطلوب را انجام می دهند. مقادیر جدید، مشابه توابع پتانسیل دافعه ای هستند که عموماً در طراحی مسیر در رباتیک، استفاده می شوند. در اینجا هم از یک تابع شبه پتانسیل استفاده شده است تا نقطه مطلوب ربات پیرو زام را جابجا کند و به این صورت از مواجهه ربات با مانع اجتناب شود. عبارت $\operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d)$ این امکان را فراهم می کند تا بسته به این که پیرو به لحاظ مکانی در کجای آرایش قرار دارد و مانع نسبت به پیرو کجا قرار داده شده است، از موانعی که سمت راست یا چپ ربات هستند اجتناب شود.

با توجه به معادله (11) روشن است که دینامیک مقادیر فاصله و زاویه مطلوب مورد نیاز است، پس با مشتق گیری از رابطه (29) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{L}_{ij}^d(t) &= \operatorname{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \\ \dot{\psi}_{ij}^d(t) &= -\xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \end{aligned} \quad (30)$$

فاصله قابل اندازه گیری s_j می تواند برحسب مؤلفه های x و y خود نوشته شود:

$$s_j^2 = s_{jx}^2 + s_{jy}^2 \quad (31)$$

در معادله (31) x_0 و y_0 مختصات مانع می باشد.

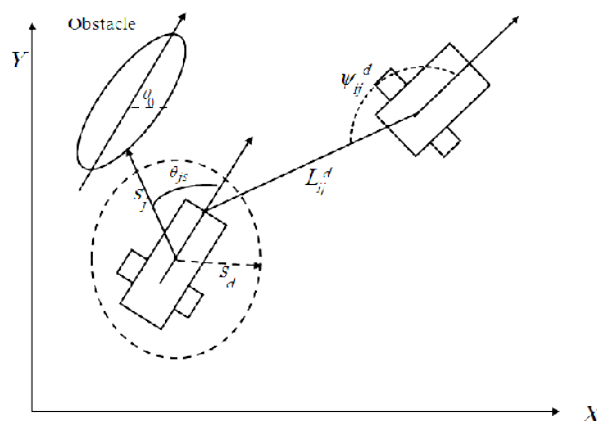


Fig. 3 Obstacle avoidance scheme [14]

شکل 3 طرح گریز از مانع [14]

باید فاصله و زاویه مطلوب پیرو F_1 نسبت به رهبر L برابر $\psi_{11}^d = 4\pi/3$ و $L_{11}^d = 2$ باشد. در نتیجه به راحتی می توان موقعیت مطلوب F_1 را با محاسبه بدست آورد: $P_1^d = [1.7321, -1.1, \pi/2]$. حال اگر موقعیت واقعی F_4 نقطه $e_1^0 = [2.1, \pi/4]$ باشد، خطای اولیه F_1 برابر $P_1^0 = [-1.6744, -1.2955, \pi/4]$ [4] خواهد بود. به همین ترتیب اگر فاصله و زاویه مطلوب پیرو F_2 نسبت به رهبر L برابر $\psi_{12}^d = 2\pi/3$ و $L_{12}^d = 2$ باشد، موقعیت مطلوب F_2 برابر $P_2^d = [-1.7321, -1.1, \pi/2]$ فرض کنید موقعیت واقعی F_2 نقطه $e_2^0 = [-2.1, 3\pi/4]$ باشد، به صورت مشابه می توان نتیجه گرفت که خطای اولیه F_2 برابر $P_2^0 = [-1.6744, 1.2955, 3\pi/4]$ می باشد. در مورد ربات F_3 فرض بر این است که فاصله و زاویه مطلوب آن با رهبر خودش یعنی F_1 برابر $\psi_{13}^d = 2\pi/3$ و $L_{13}^d = 2$ است. پس موقعیت مطلوب F_3 عبارت است از $P_3^d = [2.4469, -1.0026, \pi/4]$. اگر موقعیت واقعی F_3 نقطه $e_3^0 = [3.1, 5\pi/4]$ باشد، $P_3^0 = [-0.5531, -2.5026, \pi/4]$ خطای اولیه F_3 خواهد بود. ربات F_4 فاصله و زاویه مطلوب با رهبر خودش یعنی F_2 را برابر $\psi_{24}^d = 2\pi/3$ و $L_{24}^d = 2$ حفظ خواهد کرد. موقعیت مطلوب F_4 عبارت است از $P_4^d = [-2.4469, -1.0026, \pi]$. چنانچه موقعیت واقعی F_4 نقطه $e_4^0 = [-3.1, 5\pi/4]$ باشد، $P_4^0 = [-0.5531, 2.5026, 3\pi/4]$ خطای اولیه F_4 خواهد بود. با توجه به مفروضات فوق، به کمک الگوریتم پسگام تلفیق شده با بیونودینامیک، در دو حالت عدم وجود مانع و وجود مانع در مسیر پیروها به شبیه سازی مسأله پرداخته خواهد شد.

6-1- شبیه سازی کنترل کننده پسگام تلفیق شده با بیونودینامیک

بدون حضور موانع

با مفروضات لحاظ شده در بخش 6، مسیر طی شده توسط ربات ها با استفاده از کنترل کننده پسگام تلفیق شده با بیونودینامیک، مطابق شکل 5 می باشد. همان طور که دیده می شود ربات های پیرو به خوبی رهبر را دنبال نموده و فاصله و زاویه مطلوب خود را حفظ می نمایند.

در شکل های 6 تا 9 خطاهای ردیابی برای پیروها نشان داده شده اند. همان طور که ملاحظه می شود، خطاها پس از گذشت حدود 4 ثانیه به صفر همگرا می شوند و ردیابی مسیر به خوبی صورت می گیرد. در شکل 10 نیز قدرمطلق خطاهای کل آرایش، برای هر پیرو نمایش داده شده که تأیید دیگری بر صفر شدن خطاهای ردیابی است.

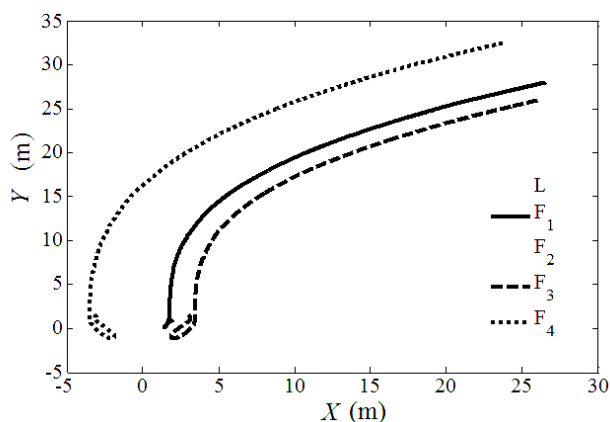


Fig. 5 The real-time trajectories of robots by using controller (28)

شکل 5 مسیر بلادرنگ طی شده ربات ها با استفاده از کنترل کننده (28)

با جایگزینی مقادیر از رابطه (30) در معادله (21) ورودیهای کنترلی پسگام با تلفیق بیونودینامیک برای مسأله گریز از مانع موجود در مسیر پیروها مطابق (36) خواهند بود:

$$\begin{aligned} v_j &= k_1 \alpha_j + v_i \cos \theta_{ij} \\ &\quad - L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left(\text{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \omega_j &= \frac{1}{d} [v_j \sin \theta_{ij} \\ &\quad + L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left(\text{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + k_2 \beta_j + k_3 \theta_{je}] \\ k_3 &> 0 \quad k_2 > 0 \quad k_1 > 0 \end{aligned} \quad (36)$$

با جایگزینی مقادیر از رابطه (30) در معادله (22)، مشتق زاویه مرجع پیروها مطابق (37) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_j^d &= \frac{1}{d} [v_i \sin \theta_{ij} \\ &\quad + L_{ij}^d \left(\omega_i - \xi_j K_\psi \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + \left(\text{sgn}(\theta_{js} \psi_{ij}^d) K_L \left(\frac{1}{s_j} - \frac{1}{s_d} \right) \frac{1}{s_j^2} \dot{s}_j \right) \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ &\quad + k_2 \gamma_{je} + k_3 \beta_j] \end{aligned} \quad (37)$$

بدین ترتیب ورودیهای کنترلی انتخاب شده و می توانند سیستم کنترل ردیابی مسیر (33) را تحت قوانین کنترلی (36) به پایداری مجانبی برسانند.

6- نتایج شبیه سازی

یک آرایش رهبر و پیرو را مطابق شکل 4 در نظر بگیرید. همان طور که از این شکل دیده می شود F_1 و F_2 رهبر L را دنبال می کنند، ربات F_3 ربات F_1 را دنبال می کند و ربات F_4 نیز ربات F_2 را دنبال می کند. در این حالت درواقع F_1 رهبر F_3 و F_2 رهبر F_4 است.

فرض کنید که $d=0.1$ و بهره های کنترلی برای ربات های پیرو به این شرح باشند: $A=10 \quad B=D=0.7 \quad k_1=8 \quad k_2=1 \quad k_3=0.25$. همچنین فرض می شود که موقعیت اولیه رهبر، $P_i^0 = [0, 0, \pi/2]$ و مسیر رهبر L به شرح زیر است:

$$x = \frac{t^3}{1000}, \quad y = t$$

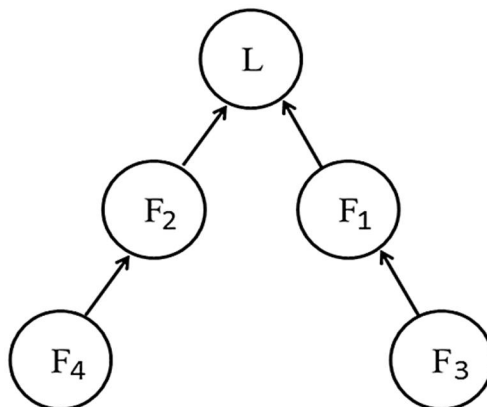


Fig. 4 Leader-follower formation scheme [17]

شکل 4 الگوی آرایش رهبر-پیرو [17]

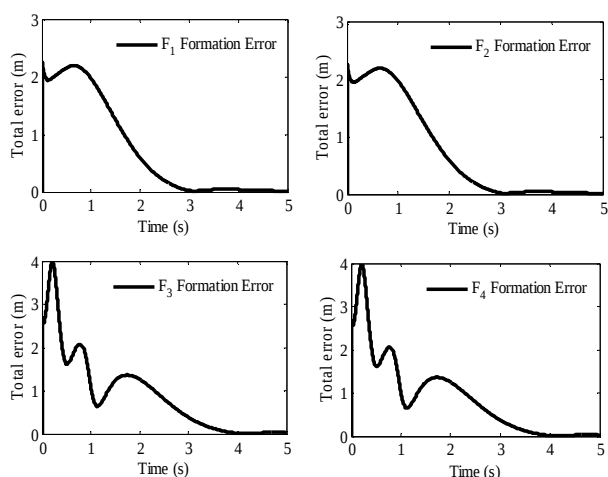


Fig. 10 Total formation errors of the followers by using controller (28)

شکل 10 خطاهای کل آرایش برای پیروها با استفاده از کنترل‌کننده (28)

شکل 11 سرعت خطی و شکل 12 سرعت زاویه‌ای ربات‌ها را نشان می‌دهند. با دقت در این شکل‌ها، مشخص می‌شود که به دلیل تلفیق بیونودینامیک با تکنیک پسگام، فرامین سرعت هموار و منطقی هستند و در زمان اولیه $t=0$ پرش‌های ناگهانی رخ نداده و تغییرات سرعت به آرامی از صفر آغاز می‌شود. در شکل 11 دیده می‌شود که در آغاز حرکت، سرعت خطی ربات‌های F_1 و F_2 تقریباً برهم منطبق بوده و به صورت مشابه، سرعت‌های خطی ربات‌های F_3 و F_4 نیز تقریباً منطبق هستند.

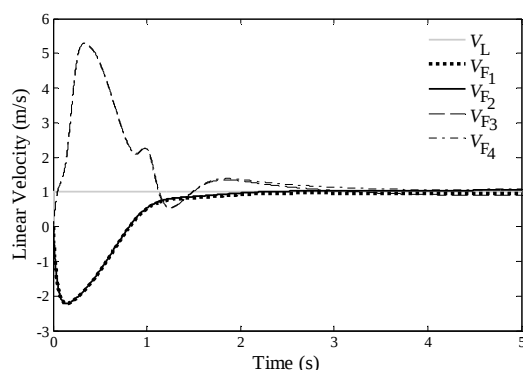


Fig. 11 Linear velocity of robots by using controller (28)

شکل 11 سرعت خطی ربات‌ها با استفاده از کنترل‌کننده (28)

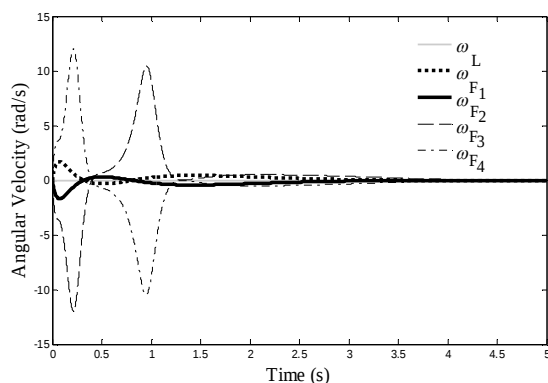


Fig. 12 Angular velocity of robots by using controller (28)

شکل 12 سرعت زاویه‌ای ربات‌ها با استفاده از کنترل‌کننده (28)

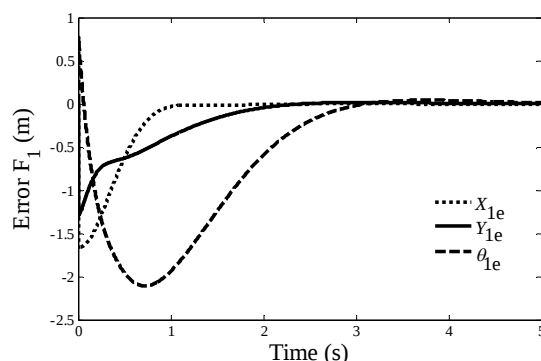


Fig. 6 The tracking errors of the follower1 by using controller (28)

شکل 6 خطاهای ردیابی پیرو 1 با استفاده از کنترل‌کننده (28)

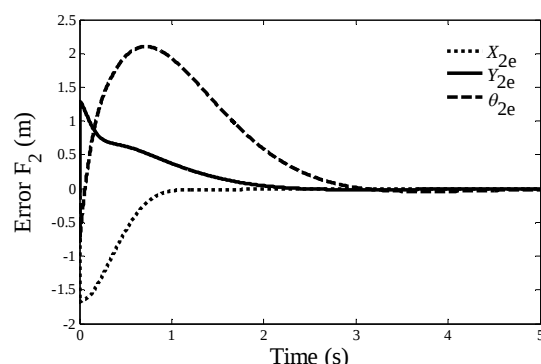


Fig. 7 The tracking errors of the follower2 by using controller (28)

شکل 7 خطاهای ردیابی پیرو 2 با استفاده از کنترل‌کننده (28)

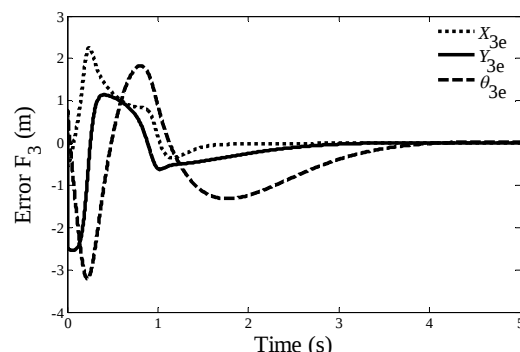


Fig. 8 The tracking errors of the follower3 by using controller (28)

شکل 8 خطاهای ردیابی پیرو 3 با استفاده از کنترل‌کننده (28)

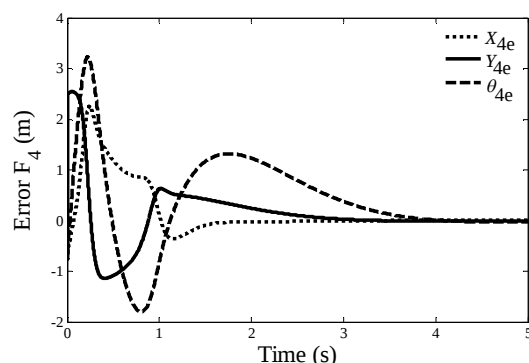


Fig. 9 The tracking errors of the follower4 by using controller (28)

شکل 9 خطاهای ردیابی پیرو 4 با استفاده از کنترل‌کننده (28)

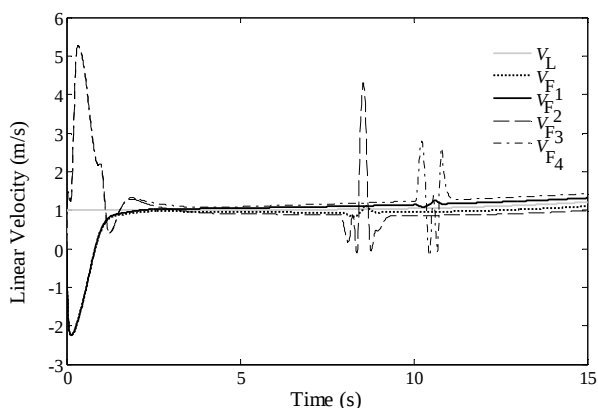


Fig. 15 Linear velocity of robots by using controller (36) in presence of obstacles

شکل 15 سرعت خطی ربات‌ها در حضور موانع با استفاده از کنترل‌کننده (36)

شکل‌های 16 و 17 به بررسی اثر اشباع بر ورودی‌های کنترلی می‌پردازند. در اینجا فرض می‌شود سرعت خطی و زاویه‌ای ربات‌های پیرو کراندار باشند و یک قید اشباع به شرح زیر لحاظ می‌گردد:

$$-5 \leq v_{\max} \leq 5$$

$$-10 \leq \omega_{\max} \leq 10$$

در این حالت با فرض اینکه کلیه ضرایب مانند قبل هستند، با استفاده از کنترل‌کننده (36) نتایج مطابق شکل 16 و شکل 17 خواهند بود.

ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن اشباع، ماکزیمم سرعت، کاهش یافته و تا حد قابل قبولی کنترل‌کننده (36) همچنان خواص خود را داراست.

7- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، کنترل آرایش رهبر-پیرو برای ربات‌های چرخ‌دار غیرهولونومیک- با فرض متغیر بودن آرایش با زمان- مورد بررسی قرار گرفت. کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی، ساده و پایدار بوده و انعطاف‌پذیری بیشتری را فراهم می‌نماید. به علاوه، در عمل نیز، قابلیت پیاده‌سازی دارد. برای طراحی کنترل‌کننده، از مدل سینماتیکی ربات و تکنیک پسگام استفاده گردید. برای حل مشکل پرش سرعت و عملی بودن کنترل‌کننده، از تلفیق کنترل‌کننده

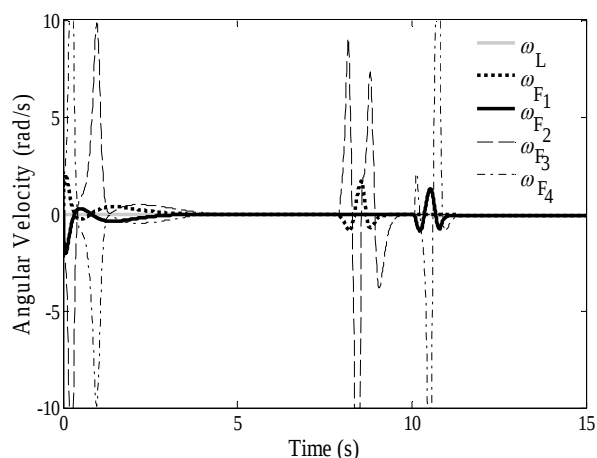


Fig. 16 Angular velocity of robots by using controller (36) in presence of obstacles and considering saturation for angular velocity

شکل 16 سرعت زاویه‌ای ربات‌ها در حضور موانع با استفاده از کنترل‌کننده (36) و در نظر گرفتن حد اشباع برای سرعت زاویه‌ای

2-6- شبیه‌سازی و اعتبارسنجی کنترل‌کننده پسگام تلفیق شده با

نرودینامیک در حضور موانع

همان مثال آرایش رهبر و پیرو مطابق بخش 6 در نظر گرفته می‌شود. با قرار دادن دو مانع یکی در مسیر ربات F_2 و دیگری در مسیر ربات F_1 و استفاده از کنترل‌کننده طراحی شده در بخش 5-4، شبیه‌سازی‌ها مجدداً انجام خواهند شد. فرض می‌شود مختصات مانع اول که در مسیر ربات F_2 قرار دارد (1.1, -1.1) بوده و مختصات مانع دوم که در مسیر ربات F_1 قرار دارد نقطه (7, 1.9) باشد. در این شبیه‌سازی $s_d = 0.5m$ فرض شده است. در شکل 13، مسیر بلادرنگ طی‌شده توسط ربات‌ها رسم شده است.

وقتی ربات F_2 به مانع نزدیک می‌شود آن را دور می‌زند و چون ربات F_2 رهبر F_4 است، به تبع آن حرکت به ربات F_4 نیز منتقل می‌شود. به طریق مشابه، همین امر در مورد ربات‌های F_1 و F_3 نیز صادق است.

شکل 14 و شکل 15 به ترتیب وضعیت ورودی‌های کنترلی سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی را برای کل مسیر حرکت نشان می‌دهند. همان‌طوری که در شکل‌ها مشخص است، هنگام تغییر مسیر حرکت، در نزدیکی مانع نیز ورودی‌های کنترلی قابل قبول بوده و پرش‌های ناگهانی ندارند و با انتخاب ضرایب مناسب به ویژه، برای α_j, β_j می‌توان منحنی‌های مناسب را برای ورودی‌ها ایجاد نمود.

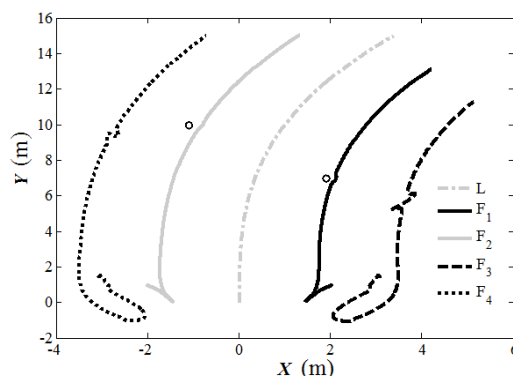


Fig. 13 The real-time trajectories of robots by using controller (36) in presence of obstacles

شکل 13 مسیر بلادرنگ طی‌شده ربات‌ها در حضور موانع با استفاده از کنترل‌کننده (36)

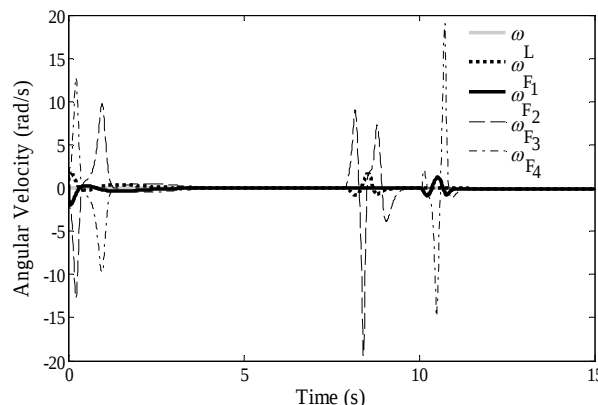


Fig. 14 Angular velocity of robots by using controller (36) in presence of obstacles

شکل 14 سرعت زاویه‌ای ربات‌ها در حضور موانع با استفاده از کنترل‌کننده (36)

- control, Technical Report, Computer Science Department, University of California, Los Angeles, 1997.
- [6] B. Varghese, G. Kee, A mathematical model implementation and study of swarm system robotics and autonomous systems, *Proceeding of the International Conference on Robotic communication and coordination*, UK, Vol. 58, No.2, pp.287-294, March 2010.
- [7] A. Abbaspour, K. Alipour, H.Z. Jafari, S.A.A. Moosavian, Optimal formation and control of cooperative wheeled mobile robots, *Journal of Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 343, No. 5, pp. 307-321, 2015.
- [8] A.k. Das, R. Fierro, V. Kumar, J.P. Ostrowski, J. Spletzer, C.J. Taylor, A vision-based formation control framework, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 5, pp. 813-825, 2002.
- [9] G.L. Mariottini, G.J. Pappas, D. Prattichizzo, K. Daniilidis, Vision-based localization of leader follower formations, *Proceeding of the IEEE International Conference on Decision and Control*, Seville, Spain, pp. 635-640, December 2005.
- [10] O.A. Orqueda, R. Fierro, Robust vision-based nonlinear formation control, *Proceeding of the IEEE American Control Conference*, pp. 1422-1427, Minneapolis, June 2006.
- [11] Q. Zhang, J. Shippen, B. Jones, Robust backstepping and neural network control of a low quality nonholonomic mobile robot, *International Journal of Machine tools manufacture*, Vol. 39, No. 7, pp. 1117-1134, 1999.
- [12] R. Fierro, F.V. Lewis, Control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics, *Robotics and Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 149-163, 1997.
- [13] X. Li, J. Xiao, Z. Cai, Backstepping based multiple mobile robots formation control, *Proceeding Of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Alberto, Canada, pp. 887- 892, August 2-6, 2005.
- [14] T. Dierks, S. Jagannathan, Neural network control of mobile robot formations using RISE feedback, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 39, No. 2, pp. 332-347, 2009.
- [15] T. Dierks, S. Jagannathan, Control of nonholonomic mobile robot formations: Backstepping kinematics into dynamics, *16th IEEE International Conference on control applications*, Singapore, October 2007.
- [16] S.X. Yang, A. Zhu, G. Yuan, M.Q. Meng, A bioinspired neurodynamics-based approach to tracking control of mobile robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 8, pp. 3211-3220, 2012.
- [17] Z. Peng, G. Wen, A. Rahmani, Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots based on a bioinspired neurodynamic based approach, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61, No. 9, pp. 988-996, 2013.
- [18] J. Sanchez, R. Fierro, Sliding mode control for robot formations, *Proceeding of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Houston Texas, pp. 438-443, October 2003.
- [19] M. Defoort, T. Floquet, A. Kokosy, W. Perruquetti, Sliding mode formation control for cooperative autonomous mobile robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, pp. 3944-3953, 2008.
- [20] G. Antonelli, S. Chiaverini, G. Fusco, A Fuzzy logic based approach for mobile robot path tracking, *International Journal of Vehicle and autonomous system*, Vol. 14, No. 2/3, pp. 156-172, 2007.
- [21] M. Amoozgar, K. Alipour, S.H. Sadati, A Fuzzy logic based formation controller for wheeled mobile robots, *International Journal of Industrial Robot*, Vol. 38, No. 3, pp. 269-281, 2011.
- [22] S.X. Yang, T. Hu, An efficient neural network approach to real-time control of a mobile robot with unknown dynamics, *Differential equation dynamic system*, Vol. 10, No. 1-2, pp. 151-168, 2002.
- [23] A. Abbaspour, S.A. Moosavian, K. Alipour, Formation control and obstacle avoidance of cooperative wheeled mobile robots, *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 30, No. 5, pp. 418-428, 2015.

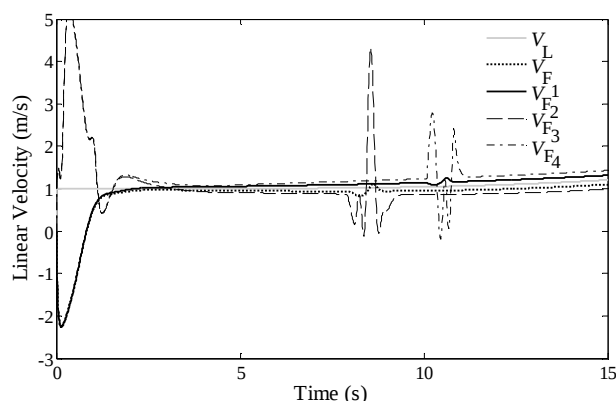


Fig. 17 Linear velocity of robots by using controller (36) in presence of obstacles and considering saturation for linear velocity

شکل 17 سرعت خطی ربات‌ها در حضور موانع با استفاده از کنترل‌کننده (36) و در نظر گرفتن حد اشباع برای سرعت خطی

پسگام با مدل بیونودینامیک استفاده شده و اثر اشباع نیز بررسی گردید. به منظور آزمایش اثربخشی کنترل‌کننده پیشنهادی، یک مانور آرایشی گریز از موانع برای موانع موجود در مسیر پیروها انتخاب و پیاده‌سازی شد. به کمک نرم‌افزار متلب، شبیه‌سازی سیستم با استفاده از کنترل‌کننده‌های پیشنهادی صورت پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی، کارایی کنترل‌کننده‌های پیشنهادی را نشان می‌دهند. به ویژه، نشان داده شد که به هنگام گریز از موانع نیز، ورودی‌های کنترلی نسبتاً هموار و قابل قبول هستند. کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی، در عین سادگی، پیچیدگی محاسباتی چندانی نداشته و به کمک تنظیم ضرایب کنترلی، از عهده شکل‌گیری آرایش، حفظ آن و نیز اجتناب از برخورد با موانع برمی‌آید.

در این مقاله، اثر تأخیر در ارتباط بین ربات‌ها لحاظ نشده است و لذا لحاظ کردن تأخیر متغیر با زمان، مبحث بعدی برای ادامه این تحقیق است. علاوه بر این مقادیر ضرایب کنترلی، با سعی و خطا تعیین شده و این ضرایب با تغییر پارامترهای مسیر نیاز به اصلاح دارند. همچنین لزوم ضرایب کنترلی بهینه نیستند؛ لذا یافتن الگوریتم مناسب برای انتخاب ضرایب بهینه می‌تواند موضوع قابل تأملی باشد. بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی برای موانع متحرک نیز می‌تواند مبحث دیگری برای ادامه این تحقیق باشد.

8- مراجع

- [1] T. Dierks, *Formation control of mobile robots and unmanned aerial vehicles*, PhD Thesis, Faculty Of Graduate School Of The Missouri University of Science and Technology, Missouri, 2009.
- [2] T. Balch, R.C. Arkin, Behavior-based formation control for multi robot teams, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 6, pp. 926-939, 1998.
- [3] T. Balch, M. Hybinette, Social potentials for scalable multi robot formations, *Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 73-80, San Francisco, April 2000.
- [4] A. Brunete, M. Hernando, E. Gambao, S.E. Torres, A behavior-based control architecture for heterogeneous modular multi configurable chained micro robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, No. 12, pp. 1607-1624, 2012.
- [5] K. Tan, M. Lewis, *Virtual structures for high precision cooperative*