



## طراحی الگوریتم کنترلی بر مبنای سیستم تعلیق نیمه فعال برای کنترل آرایش مجموعه ربات‌های متحرک همکار به هنگام انتقال جسم

علی غفاری<sup>1</sup>، علیرضا خدایاری<sup>2\*</sup>، محمد کسمائی میرمیران<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی 4435/11365، arkhodayari@dena.kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 تیر 1394

پذیرش: 25 مرداد 1394

ارائه در سایت: 08 مهر 1394

کلید واژگان:

کنترل آرایش

ربات‌های متحرک

روش راهنما پیرو

سیستم کنترلی تعلیق نیمه فعال

کنترل امپدانس چندگانه

### چکیده

حمل و جابه‌جایی جسم توسط چندین ربات متحرک با کنترل آرایش، روش مؤثری در مهار اجسام سنگین و پیچیده در محیط‌های ناشناخته و شناخته شده است. در این مقاله، برای سه ربات متحرک و کنترل نیروهای تعاملی بین آن‌ها و جسم هنگام جابه‌جایی جسم از کنترل آرایش استفاده شده است و همچنین در حضور اغتشاش، الگوریتم کنترلی بر مبنای سیستم تعلیق (RCC) نیمه فعال طراحی شده است. هدف اصلی ساختار کنترلی سیستم تعلیق نیمه فعال، کنترل آرایش مطلوب هم‌زمان با انتقال مناسب جسم بوده است و همچنین مجزا نمودن جسم و دیگر ربات‌ها از تأثیرات خطای رخ داده به هنگام بروز اغتشاش در یک ربات مشخص و جلوگیری از اثر گذاشتن آن به دیگر ربات‌ها از دیگر نتایج روش پیشنهادی است. برای از بین بردن ناپایداری در روش‌های امپدانس، کنترل امپدانس چندگانه، جهت جابه‌جایی جسم توسط ربات‌های همکار استفاده شده است. جهت تعقیب مسیر مطلوب و همچنین تشکیل آرایش هندسی ربات‌های متحرک، از روش راهنما پیرو استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم کنترلی تعلیق نیمه فعال در راستای به کمینه رساندن ارتعاشات به همراه اغتشاش منتقل شده به مجموعه ربات‌ها، نسبت به سیستم کنترلی تعلیق غیرفعال، بهینه‌تر و پایدارتر است.

## Designing a control algorithm based on semi-active suspension system for formation control of mobile robots transporting an object

Ali Ghaffari<sup>1</sup>, Alireza Khodayari<sup>2\*</sup>, Mohammad Kasmaei Mirmiran<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, STB Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Pardis Branch, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 4435-11365 Tehran, Iran, arkhodayari@dena.kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 03 July 2015  
Accepted 16 August 2015  
Available Online 30 September 2015

#### Keywords:

Formation control  
mobile robots  
Leader follower method  
semi-active remote center compliance  
multiple impedance control

### ABSTRACT

Transporting an object using several mobile robots by formation control is an effective method in handling heavy and complicated objects either in known or unknown places. In this paper, to control the formation of three mobile robots and also to control interactive, a control algorithm has been designed based on semi-active suspension system of remote center compliance (RCC). The main objective of control structure of semi-active suspension system is to control the desired formation and appropriate transportation of the object at the same time and also separate the object and other robots from the effect of the errors occurred during creation of disturbance in a certain robot and prevent it from having effects on other robots. In order to terminate instability in impedance methods, multiple impedance control has been used in moving the object by cooperating robots. To follow the desired path and control of mobile robots formation, Leader follower method has been used. Simulation results indicate that the semi-active suspension control system, in order to minimize the vibrations caused by disturbance transferred to the set of robots, is optimum and more stable compared to passive suspension control system.

### 1- مقدمه

و غارها، آتش‌سوزی در جنگل‌ها، افزایش تعداد وظایفی که مقیاس کاری آن‌ها با زمان تغییر پیدا می‌کنند و وظایفی که اجرای آن توسط یک ربات امکان‌پذیر نیست (برای نمونه جابه‌جایی اجسام بسیار بزرگ و سنگین) اشاره کرد [۲، ۱]. از دیگر برتری استفاده از مجموعه ربات‌ها نسبت به یک ربات، انجام فعالیت‌های خطرناک و فعالیت‌هایی با نیازمندی به زمان محاسباتی بالا اشاره کرد. از مزیت‌های گروه ربات‌های آرایش‌یافته نسبت به استفاده از تک

کنترل آرایش ربات‌های غیرهولونومیک در سال‌های اخیر به دلیل افزایش کاربرد این ربات‌ها در مراقبت، ناوبری، زیردریایی‌ها و سفینه‌های فضایی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اغلب کاربرد چندین ربات در حالت گروهی بسیار بهتر از کاربرد جداگانه چند ربات است. برای نمونه استفاده ربات‌های گروهی در مکان‌های پرخطر مانند تجسس در میادین جنگی و تخریب معادن

Please cite this article using:

A. Ghaffari, A. Khodayari, M. Kasmaei Mirmiran, Designing a control algorithm based on semi-active suspension system for formation control of mobile robots transporting an object, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 33-42, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کنترلی نیرو یا امیدانسی مورد نیاز است. برای از بین بردن ناپایداری ناشی از اغتشاش در روش‌های امیدانسی، کنترل امیدانس چندگانه ( $MIC^2$ )، جهت جابه‌جایی جسم توسط چندین ربات همکار طراحی شده است [21]. کنترل امیدانس چندگانه سبب می‌شود تا نقطه گیرش ربات و جسم مورد جابه‌جایی، هر دو مانند یک امیدانس مرجع عمل کنند. به این معنی که جسم مورد جابه‌جایی و نقطه گیرش ربات‌ها چنان کنترل می‌شوند تا رفتاری هماهنگ، هنگام اغتشاش وارده به جسم را داراست. الگوریتم کنترل امیدانس چندگانه، می‌تواند بر سیستم ربات‌های فضایی [22] یا سیستم ربات‌های چرخ‌دار اعمال شود [23]، همچنین گیرش مجازی میان ربات و جسم، جهت کنترل نیروهای داخلی جسم به‌کار گرفته شده است [24].

در این مقاله الگوریتمی نوین و کارآمد از ترکیب توانمندی‌های الگوریتم کنترلی  $MIC$  و  $RCC$  نیمه‌فعال جهت کنترل آرایش مجموعه ربات‌ها به هنگام انتقال جسم و در حضور اغتشاش طراحی شده است. رویکردهای در نظر گرفته شده در این مقاله بدین صورت است که ابتدا در حالت  $RCC$  نیمه‌فعال، از طریق کنترل‌کننده  $PID$  به تعیین مقدار مناسب ضریب دمپینگ مجموعه  $RCC$  پرداخته شده است، که این روش به‌صورت برخط بوده و بسته به شرایط عملکردی متفاوت براساس نقطه تنظیم<sup>3</sup> تعریف شده، سعی بر تعیین مناسب ضریب دمپینگ یادشده را دارد. سپس در حالت  $RCC$  غیرفعال به بهینه‌سازی مقادیر ضریب مستهلک‌کننده و فنریت  $RCC$  از نقطه نظرهای متفاوت شامل کمینه‌بودن گشتاور مصرفی، همواری مسیر و یکنواختی توزیع بار و از طریق یک بهینه‌ساز چند هدفه پرداخته شده است. این روش این امکان را به وجود می‌آورد که با تعیین محدوده شرایط عملکردی و به‌کارگیری الگوریتم‌های هوشمند در فضای برون خط، عملکرد  $RCC$  را بهینه کرد. در این مقاله، جهت حفظ آرایش هندسی مناسب از روش راهنما پیرو بهره گرفته شده است، همچنین کنترل‌کننده امیدانس چندگانه برای کنترل آرایش و انجام وظیفه گرفتن جسم توسط ربات‌ها طراحی شده است. در این مقاله، ابتدا در بخش 2 معادلات سینماتیکی و سینتیکی مربوط به سیستم ربات و جسم استخراج می‌شود، سپس در بخش 3 طراحی سیستم کنترل آرایش مجموعه ربات‌های متحرک همکار جهت حمل جسم، در بخش 4 نتایج شبیه‌سازی‌ها، در پایان و بخش 5 جمع‌بندی مقاله ارائه می‌شود.

## 2- معادلات سینماتیکی و سینتیکی سیستم ربات و جسم

نخست یک سیستم که در آن ربات‌های مجموعه با همکاری یکدیگر جسم را جابه‌جا می‌کنند در نظر گرفته می‌شود که در شکل 1 نشان داده شده است. معادلات سینتیکی حاکم بر این سیستم از دو قسمت مجموعه ربات‌ها و جسم تشکیل شده و با در نظر گرفتن اثر متقابل بین ربات‌ها و جسم به‌صورت مجزا استخراج شده است. در ادامه به معرفی این معادلات و نحوه به‌دست‌آمدن آن‌ها پرداخته می‌شود.

### 2-1- مدل‌سازی سینماتیکی ربات

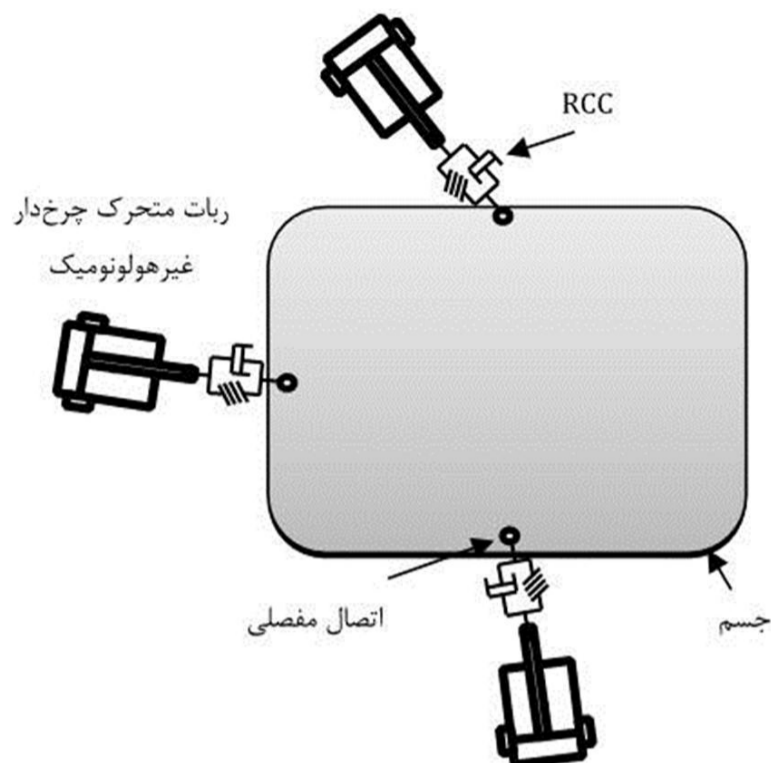
ربات متحرکی که در شکل 2 نشان داده شده، نمونه‌ای از یک سیستم مکانیکی غیرهولونومیک است [5]. این سیستم یک ربات متحرک با دو چرخ محرک است که بر یک محور سوار شده و دارای یک چرخ هرزگرد بوده که برای حفظ پایداری به آن اضافه شده است. حرکات انتقالی و راستای مطلوب برای ربات از طریق عملگرهای مستقل که بر هر چرخ قرار دارد، به‌دست می‌آید. موقعیت ربات در دستگاه اینرسی  $XY$  به‌وسیله بردار  $q_c = [x_c \ y_c \ \varphi]^T$

ربات‌ها می‌توان به بهره‌وری از منابعی مانند اشتراک استفاده از حسگرها، امکان موازی کردن ربات‌ها، بالا رفتن اطمینان و مقاومت بیشتر در برابر اغتشاش اشاره کرد. آرایش کنترلی سیستم‌های رباتیک چند عضوی که به‌صورت هوشمند عمل می‌کنند مورد بررسی قرار گرفته است [3]. کنترل آرایش هندسی توسط گروه ربات‌های متحرک با سه روش انجام می‌شود. روش کنترلی رفتارمحور، که مبتنی بر هدف مشخصی مانند جلوگیری از برخورد با مانع یا جستجو و یافتن مکان از پیش مشخص شده است. این روش کنترلی، همراه با پیچیدگی در تحلیل سینتیکی و برای مجموعه ربات‌ها با تعداد اعضای زیاد مناسب است [4].

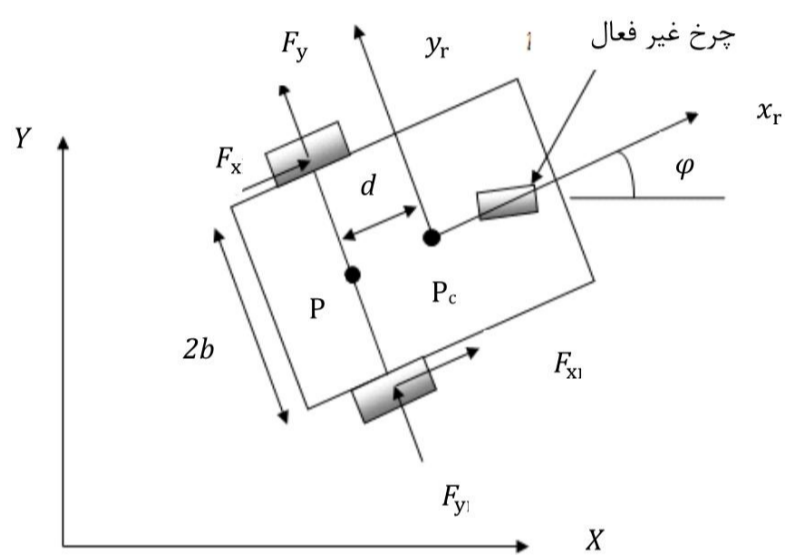
در روش کنترلی ساختار مجازی، کل آرایش مجموعه ربات‌ها مانند یک ساختار واحد و کاملاً صلب در نظر گرفته می‌شود. در این روش حرکت مطلوب، به هر یک از ربات‌ها یک مسیر حرکت اختصاص داده می‌شود که وظیفه اصلی هر ربات دنبال کردن آن مسیر خواهد بود. از معایب این روش تحلیل پایداری ریاضی پیچیده و همچنین لزوم ارسال مقادیر متغیرهای حالت هر ربات به مجموعه است [5]. همچنین طراحی کنترلی آرایش گروهی بر پایه ساختار مجازی مطالعه شده و از برخورد با مانع با استفاده از روش کنترلی رفتارمحور جلوگیری شده است [6]. در روش راهنما پیرو، یکی از ربات‌های گروه به‌عنوان راهنما و موظف به تعقیب مسیر مطلوب در نظر گرفته می‌شود و سایر ربات‌ها موظف به پیروی از راهنما براساس موقعیتشان نسبت به ربات راهنما هستند. به این ترتیب مسئله هدایت آرایش یافته ربات‌ها تبدیل به دو مسئله ساده‌تر می‌شود که یکی تعقیب مسیر توسط راهنمای گروه و دیگری حفظ آرایش، توسط سایر ربات‌های گروه است. از متداول‌ترین روش‌های کنترلی راهنما پیرو، روش خطی‌سازی پس‌خور [7، 8]، پس‌گام<sup>1</sup> [9] و کنترل مود لغزشی مرتبه نخست است. قانون کنترلی توسعه‌یافته‌ای برای روش کنترلی راهنما پیرو ارائه شده است که نیازمند به سرعت مطلق و شتاب راهنماست [10]. داشتن کمینه خطای تعقیب و حفظ آرایش مطلوب از برتری‌های اصلی روش کنترلی راهنما پیرو است. وجود اغتشاش در سیستم‌های رباتیک غیرقابل اجتناب است. از جمله روش کنترلی توانمند در زمینه کنترل آرایش ربات‌ها در برابر خطا و یا اغتشاش، روش کنترلی سیستم تعلیق است. به‌طور کلی دو نوع سیستم کنترل تعلیق ( $RCC$ ) وجود دارد. سیستم غیرفعال شامل فنر و مستهلک‌کننده با مشخصات ثابت است. سیستم کنترل تعلیق نیمه‌فعال، متشکل از مستهلک‌کننده قابل کنترل و فنر با مشخصات فیزیکی ثابت است [11]. از میان انواع مستهلک‌کننده‌های نیمه‌فعال مورد بررسی، شاخص‌ترین‌ها عبارتند از مستهلک‌کننده مغناطیسیب-رئولوژیکی که عملکرد آن متناسب با میدان مغناطیسی اعمال شده است [11]، مستهلک‌کننده الکترو رئولوژیکی که عملکرد آن متناسب با میدان الکتریکی اعمال شده است [12]، مستهلک‌کننده پنوماتیک و مستهلک‌کننده اصطکاک خشک که براساس اصطکاک بین سطوح در تماس عمل می‌کنند [13]. سیستم‌های تعلیق فعال توانایی تنظیم خود را به‌طور مداوم به تناسب تغییر شرایط عملکردی داراست، به‌طوری که عناصر مکانیکی (فنرها و مستهلک‌کننده‌ها) می‌توانند با عملگرهایی دارای توانایی اعمال نیرو جایگزین شوند [14-17]. علاوه بر این، سیستم‌های کنترلی تعلیق نیمه‌فعال و فعال می‌تواند فراجهدش حرکتی ربات‌ها و جسم را در بیشینه محدوده‌های فرکانسی و همچنین خطاها را کاهش دهند [18، 19]. در زمینه مجموعه ربات‌های همکار تنها سیستم کنترلی تعلیق نوع غیرفعال مطالعه شده است [20]. برای کنترل نیروهای تعاملی بین ربات‌ها و جسم هنگام جابه‌جایی جسم، روش‌های

2- Multi Impedance Control  
3- Set Point

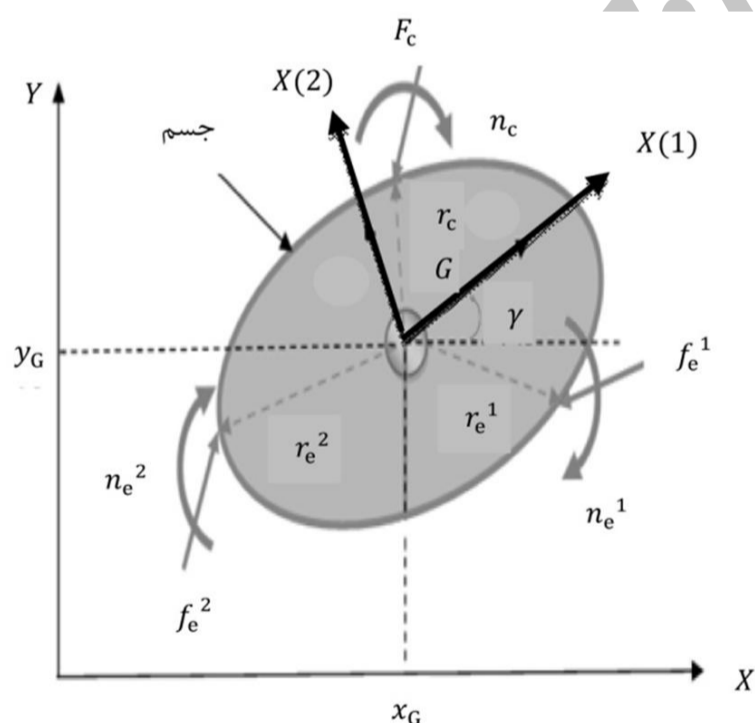
1- Backstepping



شکل 1 شماتیک ربات‌های مجموعه و جسم به همراه نمایش نحوه اتصال



شکل 2 ربات با دو چرخ محرک



شکل 3 جسم مورد جابه‌جایی با در نظر گرفتن نیروها و گشتاورهای مجریان

$$\begin{aligned} \sum F &= m_{obj} a_G \rightarrow f_c + f_o + f_e^1 + f_e^2 = m_{obj} a_G \\ \sum M_G &= \dot{H}_G \rightarrow \\ n_c + n_o + r_c \times f_c + r_e^1 \times f_e^1 + r_e^2 \times f_e^2 \\ + n_e^1 + n_e^2 &= I_G \times \dot{\omega} + \omega \times I_G \omega \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن جرم جسم  $m_{obj}$  و ماتریس ممان اینرسی جسم است. برای ساده‌تر شدن تحلیل روابط، می‌توان این معادلات را به صورت رابطه (9) ماتریسی نوشت.

مشخص می‌شود که در آن  $(x_c, y_c)$  و  $\varphi$  به ترتیب مختصات نقطه  $P_c$  (مرکز جرم ربات) و راستای بدنه متحرک با توجه به دستگاه مرجع اینرسی است. با توجه به این نکته که بدنه متحرک توسط دو چرخ محرک رانده می‌شود، با فرض فقدان لغزش جانبی، ربات تنها می‌تواند در جهت عمود بر محور رابط دو چرخ حرکت کند که بدین صورت معادله (1)، قید غیرهولونومیک آن به دست می‌آید.

$$\dot{x}_c \sin(\varphi) - \dot{y}_c \cos(\varphi) + \dot{\varphi} d = 0 \quad (1)$$

معادله (1) را می‌توان به صورت  $A(q)\dot{q} = 0$  نیز نوشت که در آن به صورت رابطه (2) داریم.

$$A(q) = [\sin(\varphi) \quad -\cos(\varphi) \quad d] \quad (2)$$

با تجزیه و تحلیل سینماتیکی می‌توان به صورت رابطه (3) نشان داد [6].

$$\dot{q} = S(q)V \quad (3)$$

که در آن  $S(q)$  ماتریس رابط بین فضای مفصلی و فضای کارترین به صورت رابطه (4) است.

$$S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2b}(b\cos(\varphi) - d\sin(\varphi)) & \frac{r}{2b}(b\cos(\varphi) + d\sin(\varphi)) \\ \frac{r}{2b}(b\sin(\varphi) + d\cos(\varphi)) & \frac{r}{2b}(b\sin(\varphi) - d\cos(\varphi)) \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در رابطه (4)، شعاع چرخ ربات است و بردار  $V$  شامل سرعت‌های چرخ‌های ربات در فضای مفصلی است.

$$V = [\dot{\theta}_r \quad \dot{\theta}_l]^T \quad (5)$$

## 2-2- مدل‌سازی سینتیکی ربات

برای به دست آوردن مدل سینتیکی ربات، دو روش وجود دارد. نخست، روش معادلات نیوتن اولر؛ در این روش براساس نیروها و گشتاورهای وارد بر مفاصل، معادلات حرکت سیستم به دست می‌آید، اما در سیستم‌هایی که تعداد مفاصل زیاد باشد روش مناسبی به شمار نمی‌آید. دوم، روش معادلات دینامیک لاگرانژ است. در این روش می‌توان مدل سینتیکی ربات را استخراج کرد [5].

روابط (6) و (7) بر اساس معادلات انرژی سیستم به دست می‌آید. در رابطه (6)،  $M(q_c)$  ماتریس متقارن و مثبت معین جرمی،  $C(q_c, \dot{q}_c)$  ماتریس مرکزگرا و کوریولیس،  $\lambda$  ضرایب لاگرانژ،  $B(q_c)$  ماتریس انتقال دهنده گشتاورهای ربات به مدل ورودی و  $\tau = [\tau_r \quad \tau_l]^T$  بردار گشتاور چرخ‌های راست و چپ است.

$$\bar{M}(q_c)\dot{V} + \bar{C}(q_c, \dot{q}_c) = \bar{B}(q_c)\tau \quad (6)$$

$$\bar{M}(q_c) = S^T M S$$

$$\bar{C}(q_c, \dot{q}_c) = S^T M S V + S^T C$$

$$\bar{B}(q_c) = S^T B \quad (7)$$

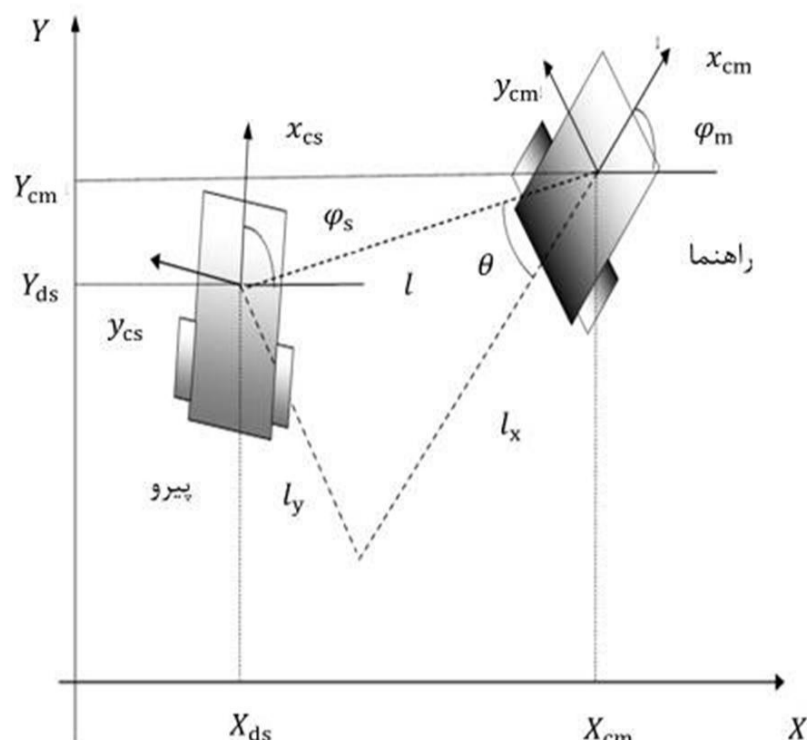
در این مقاله از روش دوم، جهت به دست آوردن معادلات سینتیکی ربات استفاده می‌شود.

## 3-2- دینامیک جسم

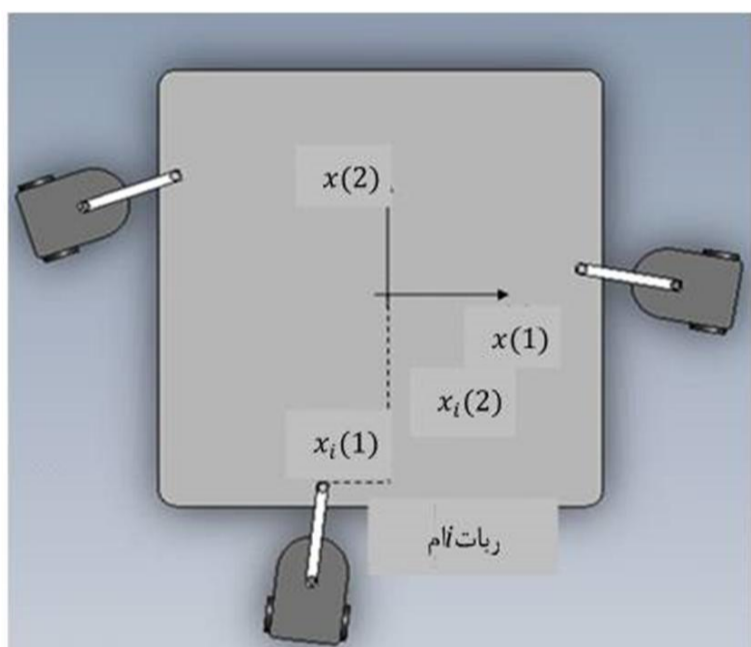
در شکل 3 موقعیت نقطه اتصال جسم با مجری نهایی<sup>1</sup> به صورت اتصال مفصلی<sup>2</sup> در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن جسمی که توسط چند ربات همکار جابه‌جا می‌شود، می‌توان روابط سینتیکی حاکم بر جسم صلب را از طریق معادلات نیوتن اولر به دست آورد.

1- Manipulator  
2- Pivot





شکل 4 شماتیک الگوریتم فاصله- زاویه جهت کنترل آرایش گروه نهایی



شکل 5 مجموعه ربات‌های همکار و پارامترهای

پارامترهای گیرش به پارامترهایی گفته می‌شود که موقعیت ربات با توجه به موقعیت جسم مورد نظر سنجیده می‌شود. یک دستگاه مختصات محلی به بدنه جسم متصل شده و موقعیت هر ربات با استفاده از پارامترهای گیرش به روشنی قابل توصیف خواهد بود. در شکل 5، مجموعه ربات‌های همکار و پارامترهای گیرش آن نشان داده شده‌اند. با توجه به اتصال مفصلی ربات‌ها با جسم جهت اجرای وظیفه جابه‌جایی جسم، برای سایر ربات‌ها که پیروهای ربات راهنماست نیز باید مسیری مشخص به صورت رابطه (15) تعریف شود.

$$\begin{aligned} x_{ds}^{(i)} &= x_m + l_x^{(i)} \cos(\varphi_m) - l_y^{(i)} \sin(\varphi_m) \\ y_{ds}^{(i)} &= y_m + l_x^{(i)} \sin(\varphi_m) + l_y^{(i)} \cos(\varphi_m) \end{aligned} \quad (15)$$

با توجه به موقعیت ربات‌ها نسبت به جسم مورد نظر، سنجش پارامترهای آرایش ربات‌های پیرو نسبت به موقعیت ربات راهنما نیازمند روابطی خواهد بود. بدین منظور، باید الگوریتمی طراحی شود که در آن پارامترهای آرایش برای ربات‌های پیرو به نحوی تعیین شوند که اجرای وظیفه حمل جسم به درستی اجرا شود. با توجه به موقعیت گیرش ربات‌های پیرو نسبت به موقعیت مرکز دستگاه مختصات متصل به جسم و فاصله این ربات‌ها نسبت به راهنمای گروه، نحوه به‌دست آوردن پارامترهای آرایش براساس روابط (16) امکان‌پذیر می‌شود.

$$\begin{aligned} a &= (x_s^{(i)}(1) - x_m(1)) \cos(\gamma_d) \\ &\quad - (x_s^{(i)}(2) - x_m(2)) \sin(\gamma_d) \\ b &= (x_s^{(i)}(1) - x_m(1)) \sin(\gamma_d) \end{aligned}$$

$$M_{obj} \ddot{X} + F_\omega = F_c + F_0 + GF_e \quad (9)$$

در معادله (9) ماتریس جرم جسم،  $F_c$  نیروها و گشتاورهای برخورد،  $F_0$  سایر نیروهای جسم از جمله وزن،  $F_e$  نیروها و گشتاورهای مجریان نهایی،  $F_\omega$  آرایه جملات غیرخطی سرعت نظیر جملات نیروهای جانب مرکز و کوریولیس است.  $G$  ماتریس گیرش ربات‌هاست و به صورت رابطه (10) به‌دست می‌آید.

$$G = \begin{bmatrix} 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} \\ E^T [r_e^1]_{in}^{obj} R & E^T E^T [r_e^2]_{in}^{obj} R \\ 0_{3 \times 3} & \dots & 1_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ E^T \dots E^T [r_e^n]_{in}^{obj} R & E^T \end{bmatrix}_{6 \times 6n} \quad (10)$$

که  $E^T$  ماتریس اولر و  $R$  ماتریس انتقال است. رابطه (9)،  $\ddot{X}$  آرایه شتاب مرکز جرم جسم است و  $X = \begin{bmatrix} X_G \\ \delta \end{bmatrix}^T$  آرایه مختصات مرکز جرم در فضای کاری است، به طوری که موقعیت مرکز جرم جسم نسبت به اینرسی و جهت‌گیری جسم را با مجموعه زوایای اولر توصیف می‌کند. در معادله (10) که بیان‌کننده ماتریس گیرش ربات‌هاست، برداری متشکل از پارامترهای آرایش ربات‌ها که در شکل 3 مشخص است. برای نمونه برای ربات نام ماتریس مربوطه به صورت رابطه (11) است.

$$r_e^i = \begin{bmatrix} x_i(1) \\ x_i(2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

حال اگر خواسته شود که جسم در مسیری مشخص جابه‌جا شود می‌توان نیروها و گشتاورهای مجریان نهایی جهت اعمال بر جسم برای جابه‌جایی را با استفاده از رابطه (9) به شکل رابطه (12) به‌دست آورد.

$$F_e = G^* (M \ddot{X} + F_\omega - F_c - F_0) \quad (12)$$

در رابطه (12)، ماتریس  $G^*$ ، ماتریس شبه معکوس  $G$  است.

$$G^* = W^{-1} G^T (G W^{-1} G^T)^{-1} \quad (13)$$

در رابطه (13)،  $W$  ماتریس وزن است به گونه‌ای که متغیرهای خطی و زوایای را هم‌وزن می‌کند. با توجه به این‌که، طراحی سیستم کنترلی در نظر گرفته‌شده بر پایه مدل دینامیکی سیستم است، می‌توان با در نظر گرفتن دینامیک ربات و جسم، در بخش 3-4 در طراحی کنترل‌کننده MIC از آن استفاده کرد.

### 3- طراحی سیستم کنترل آرایش مجموعه ربات‌های متحرک همکار

#### جهت حمل جسم

#### 3-1- روش راهنما پیرو

در این مقاله، جهت کنترل آرایش مجموعه ربات‌ها از روش کنترلی راهنما پیرو استفاده شده است. یک ربات به‌عنوان راهنما و دیگر ربات‌ها به‌عنوان پیرو در نظر گرفته می‌شوند. ربات‌های پیرو براساس موقعیت نسبی خود با راهنما آرایش مجموعه ربات‌ها را حفظ می‌کند. از الگوریتم فاصله- زاویه، برای کنترل آرایش گروه استفاده شده است [25].

شماتیک این طرح کنترلی با دو ربات در همسایگی یکدیگر، در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود، با پارامترهای  $l$  و  $\theta$  (روش فاصله- زاویه) ربات پیرو می‌تواند فاصله نسبی خود را با ربات راهنما ایجاد کند. هدف کنترل آرایش با الگوریتم راهنما پیرو این است که مجموعه ربات‌ها بتوانند جسمی را در طی مسیری مشخص جابه‌جا کنند. ابتدا نحوه تعریف مسیر برای ربات راهنمای گروه مشخص می‌شود. با توجه به پارامترهای گیرش که در شکل 5 مشخص شده است، مسیر ربات راهنما با توجه به مسیر مطلوب جسم با رابطه (14) به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} x_{dm} &= x_{Gd} + x_m(1) \cos(\gamma_d) - x_m(2) \sin(\gamma_d) \\ y_{dm} &= y_{Gd} + x_m(1) \sin(\gamma_d) + x_m(2) \cos(\gamma_d) \end{aligned} \quad (14)$$

در رابطه (14)،  $x_{Gd}$ ،  $y_{Gd}$  مسیر و  $\gamma_d$  راستای مطلوب جسم با افق و  $x_m(1)$  و  $x_m(2)$  پارامترهای گیرش برای ربات راهنماست.

محاسبه شده است، معرف میزان خطای کنترل آرایش است.

$$E_{\text{track}} = (x_i(t) - x_{di}(t))^2 + (y_i(t) - y_{di}(t))^2 \quad (20)$$

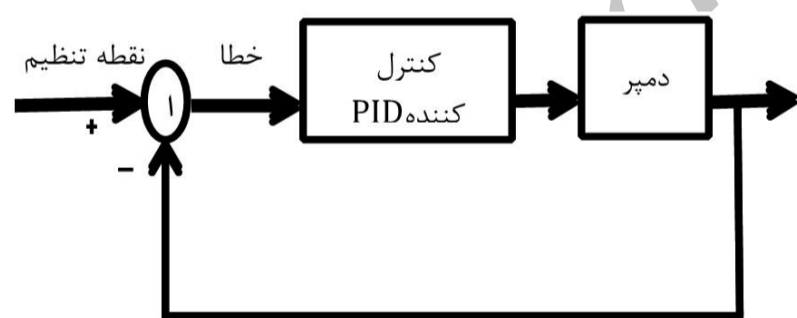
$$E_{\text{form}} = (x_i(t) - x_{ni}(t))^2 + (y_i(t) - y_{ni}(t))^2 \quad (21)$$

$$\text{تابع خطا} = \frac{E_{\text{form}}}{E_{\text{track}}} \quad (22)$$

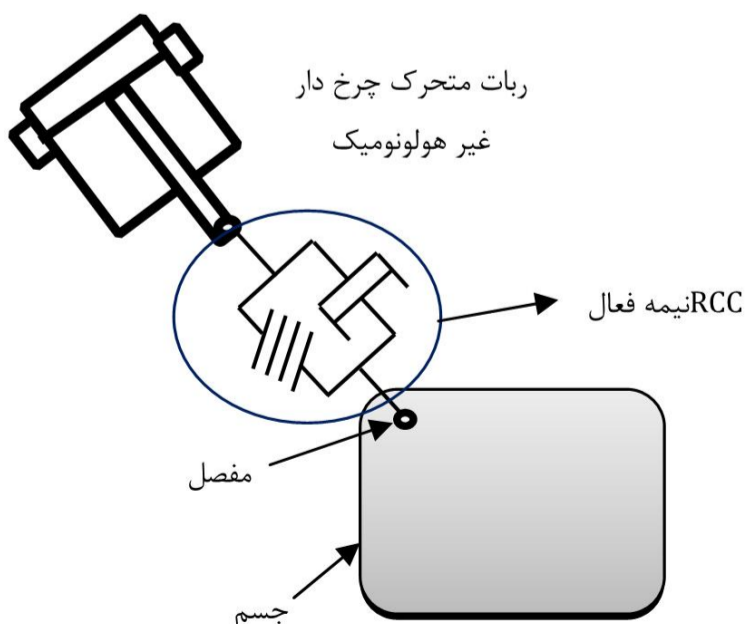
از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر برای تعیین مقدار مناسب ضریب دمپینگ مستهلک‌کننده استفاده شده است. اهداف کنترلی کنترل‌کننده (RCC) نیمه‌فعال براساس رابطه بین خطای آرایش و خطای تعقیب مسیر است. کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر براساس نسبت خطای توصیف‌شده همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است و با استفاده از معادله (22) به‌دست آورده می‌شود. به این صورت که به هنگام خطای آرایشی زیاد، مقدار دمپینگ افزایش پیدا کرده تا مستهلک‌کننده به حالت صلب متمایل شود و ربات‌ها به آرایش مطلوب بازشوند، همچنین به هنگام ایجاد خطای ناشی از تعقیب، میزان دمپینگ کاهش پیدا می‌کند و به ربات‌ها اجازه تغییر بیشتر، برای تأمین هدف کاهش خطای تعقیب مسیر می‌دهد. در شرایط عادی عملکردی، این کنترل‌کننده هر دو خطای آرایش و تعقیب مسیر را در نظر می‌گیرد. در ساختار کنترلی پیشنهادی مقدار یک (به معنی برابری خطاها) به‌عنوان نقطه مرجع در نظر گرفته شده است. تعیین ضرایب کنترل‌کننده به‌صورت سعی و خطای بسیار صورت پذیرفته است. در حالت RCC نیمه‌فعال بهینه، مقادیر ضرایب کنترل‌کننده براساس بهینه‌سازی براساس تابع هدف و با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شده است، همچنین شکل 7 تصویری از مدل ربات به همراه جسم و مدل RCC نیمه‌فعال ارائه می‌کند.

### 3-3- تابع هدف

برای تعیین تابع هدف مناسب در بهینه‌سازی RCC، مسأله کنترل آرایش ربات‌ها هنگام وقوع خطا بررسی می‌شود. در حضور خطا و اغتشاش، رفتار ربات‌ها به‌صورت نوسانی خواهد بود و کنترل بهینه باید نوسانات را کاهش دهد. در نتیجه، تابع هدف براساس کاهش تأثیرات اغتشاش بر دیگر ربات‌ها



شکل 6 الگوریتم کنترلی RCC نیمه‌فعال گیرش



شکل 7 مدل RCC نیمه‌فعال

$$+ (x_s^{(i)}(2) - x_m(2)) \cos(\gamma_d) \\ l_x^{(i)} = a \cos(\varphi_{dm}) + b \sin(\varphi_{dm}) \\ l_y^{(i)} = b \cos(\varphi_{dm}) - a \sin(\varphi_{dm}) \quad (16)$$

فرض می‌شود که یکی از ربات‌های گروه هنگام مانور آرایشی، دچار اشکال و در نتیجه از مسیر مطلوب مشخص شده به‌صورت رابطه (17) خارج شود.

$$x_j = x_G + x_j(1) \cos(\gamma) - x_j(2) \sin(\gamma) \\ y_j = y_G + x_j(1) \sin(\gamma) + x_j(2) \cos(\gamma) \quad (17)$$

با توجه به رابطه (17)، هر یک از این ربات‌ها موقعیت هندسی مشخصی نسبت به جسم دارد که با پارامترهای  $x_j(1)$  و  $x_j(2)$  به‌دست می‌آید؛ بنابراین موقعیت جدید فرضی جسم براساس هندسه مشخص گیرش و میزان انحراف ربات مورد اغتشاش با استفاده از رابطه (17) به‌دست آورده می‌شود. بدین طریق میزان انحراف برای سایر ربات‌ها با استفاده معادله (18) به‌دست می‌آید.

$$\Delta x_i = \sum_{j=1 \neq i}^{N=3} (x_{cj}(t) - x_{ci} + (x_i(1) - x_j(1)) \\ \cos(\gamma) + \sin(\gamma) \times (x_j(2) - x_i(2))) \\ \Delta y_i = \sum_{j=1 \neq i}^{N=3} (y_{cj}(t) - y_{ci} + (x_i(1) - x_j(1)) \\ \sin(\gamma) + \cos(\gamma) \times (x_i(2) - x_j(2))) \quad (18)$$

رابطه (18) بیان‌گر میزان انحراف ایجادشده در ربات  $i$ ام، به دلیل انحراف در ربات  $j$ ام است. با اضافه کردن این تغییرات به مسیر ربات  $i$ ام، مسیر جدید این ربات به صورت رابطه (19) شکل می‌گیرد.

در رابطه (19)  $x_i(t)$ ،  $y_i(t)$  مسیر واقعی ربات  $i$ ام و  $x_{ni}(t)$ ،  $y_{ni}(t)$  مسیر جدید ایجاد شده است.

$$\begin{bmatrix} x_{ni}(t) \\ y_{ni}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ci}(t) \\ y_{ci}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

با در نظر گرفتن الگوریتم راهنما پیرو، با توجه به مسیر مطلوب جسم، موقعیت و مسیر مطلوب هر ربات به‌دست خواهد آمد و با در نظر گرفتن مسیرهای مطلوب برای هر ربات و با استفاده از کنترل‌کننده MIC (مطالب بیشتر در بخش 3-4) می‌توان هر ربات را وادار به دنبال مسیر مرجع کرد. علاوه بر آن، با در نظر گرفتن معادله (19)، مسیر هر ربات در هنگام بروز اغتشاش به‌دست خواهد آمد که با در نظر گرفتن میزان جابه‌جایی‌های ناخواسته در ربات‌ها، در استراتژی کنترلی RCC از آن باید استفاده کرد.

### 3-2- روش های کنترلی RCC غیرفعال و نیمه‌فعال

در این بخش، الگوریتم‌های متفاوتی از RCC برای بررسی میزان توانمندی سیستم کنترلی در زمینه کنترل آرایش و تعقیب مسیر به هنگام حضور خطا مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. رویکردها شامل RCC غیرفعال، RCC بهینه غیرفعال، RCC نیمه‌فعال و RCC بهینه نیمه‌فعال است. اگرچه به هنگام بهینه‌سازی RCC براساس شرایط عملکردی، پارامترهای RCC در راستای کاهش اثرات ناشی از اغتشاش به‌صورت برون‌خط، تعیین می‌شوند، اما در روش کنترلی RCC نیمه‌فعال هدف به کمینه رساندن اثر اغتشاش توسط مجموعه‌ای از قوانین کنترلی است؛ بنابراین حالت RCC نیمه‌فعال بهینه از ترکیب اثرات مثبت بهینه‌سازی (بصورت برون‌خط) و نیمه‌فعال (قوانین کنترلی برخط) برای توسعه سیستم کنترلی توانمند بهره‌مند است.

روش RCC نیمه‌فعال جهت بهبود توابع هدف در مجموعه ربات‌های متحرک همکار، از نسبت خطا تأثیر می‌پذیرد که در معادله (22) توصیف شده است. در معادله (20)، میزان خطا براساس نقطه تنظیم، بدون در نظر گرفتن تأثیر انحرافات ناشی از نوسان ربات دیگر ( $i$ ام) محاسبه شده که معرف میزان خطای تعقیب مسیر است. در معادله (21)، میزان خطایی که براساس نقطه تنظیم با در نظر گرفتن تأثیر انحرافات ناشی از نوسان ربات دیگر ( $i$ ام)

در الگوریتم MIC، لازم است که از معادلات حرکت سیستم در فضای کارکرد استفاده شود. معادله سینتیکی ربات نام براساس رابطه (6) بیان شده است (برای توضیحات بیشتر مرجع 15 دیده شود). فرض کنیم معادله دینامیکی ربات نام مشارکت‌کننده در هدایت جسم در فضای وظیفه به شکل رابطه (28) باشد.

$$\bar{M}^i(q_c^i) \dot{V}^i + \bar{C}^i(q_c^i, \dot{q}_c^i) = Q^i \quad (28)$$

در تمام معادلات، بالانویس  $i$  مطابق با شماره رباتی است که در جابه‌جایی جسم مشارکت می‌کند. آرایه گشتاورهای مفاصل ( $Q$ ) به شکل رابطه (29) بیان می‌شود.

$$Q = Q_{app} + Q_{react} \quad (29)$$

که  $Q_{react}$  گشتاور واکنشی بر مجریان نهایی و  $Q_{app}$  گشتاور کنترلی اعمالی به ربات است که از دو بخش تشکیل شده است؛ بخش نخست مربوط به حرکت ربات و بخش دوم مربوط به نیروی اعمالی وارد بر جسم به صورت رابطه (30) است.

$$Q_{app} = Q_m + Q_f \quad (30)$$

که  $Q_m$  گشتاور کنترلی است که منجر به حرکت ربات می‌شود و  $Q_f$  گشتاور مورد نیازی است که در نهایت جهت اعمال به جسم توسط ربات وارد می‌شود. قانون امیدانس برای حرکت جسم به شکل رابطه (31) انتخاب می‌شود.

$$\bar{M}_{des} \ddot{e}_{obj} + \bar{K}_d \dot{e}_{obj} + \bar{K}_p e_{obj} = -F_c \quad (31)$$

در رابطه (31)،  $e_{obj}$  خطای تعقیب جسم را توصیف می‌کند به طوری که معمولاً قطری انتخاب می‌شوند و  $\bar{M}_{des}$  ماتریس جرم مطلوب جسم است. نیروی مطلوب جهت اعمال به جسم با استفاده از رابطه (12) به صورت رابطه (32) به دست می‌آید.

$$F_{req} = G^* \{ M_{obj} \bar{M}_{des}^{-1} (\bar{M}_{des} \ddot{x}_{Gd} + \bar{K}_d \dot{e}_{obj} + \bar{K}_p e_{obj} + F_c) + F_\omega - F_c - F_0 \} \quad (32)$$

مطابق با بخش نیرو در رابطه (28)، گشتاور کنترلی براساس رابطه (33) به دست می‌آید.

$$Q_f^i = S^{iT} F_{req}^i \quad (33)$$

مشابه رابطه بالا، بخش حرکتی آن نیز به صورت رابطه (34) به دست می‌آید.

$$Q_m^i = [M_{des} (\dot{S}_d^{iT} V_d^{iT} + \dot{V}_d^{iT} S_d^{iT}) + K_d \dot{e}^i + K_p e^i + F_c] S^{iT} M^i(q_c^i) M_{des}^{-1} + S^{iT} C^i(q_c^i, \dot{q}_c^i) \quad (34)$$

حال با قرار دادن روابط (34،33) در رابطه (30)، گشتاورهای مورد نیاز هر ربات جهت ایجاد آرایش مطلوب و جابه‌جایی جسم به دست خواهد آمد. بدین ترتیب ربات‌ها توانایی حمل جسم و تعقیب مسیر مرجع را به طور هم‌زمان داراست.

#### 4- بررسی نتایج

در این بخش عملکرد الگوریتم‌های کنترلی طراحی شده شبیه‌سازی و مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند. برای شبیه‌سازی از ماژول شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب استفاده شده و مسیر مرجع در شبیه‌سازی مطابق معادلات (35) در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} x_{Gd} &= 0 \\ y_{Gd} &= 0.4t \\ y_d(t) &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

در جدول 1 مشخصات ربات متحرک مورد نظر ارائه شده است. مقادیر هندسی و پارامترهای جرمی مربوط به جسم و ربات به ترتیب در جدول 2 و جدول 3 نمایش داده شده است. سه ربات همسان در یک مجموعه، ساختار مثلثی شکل را تشکیل می‌دهند و

تعریف شده است تا هم حفظ آرایش و هم هدف کنترلی که همان تعقیب مسیر است برآورده شود. جهت بهینه‌سازی، ترم‌های متفاوتی شامل همواری مسیر طی‌شده، کمینه بودن انرژی مصرفی، توزیع بار مناسب روی ربات‌ها در نظر گرفته شده است [26]، که بدین ترتیب، مقادیر مناسب پارامترهای فنر و مستهلک‌کننده تعیین می‌شود. تابع هدف نهایی از ترم‌هایی تشکیل شده است که ملاحظه تأثیرات انرژی مصرفی، توزیع بار و همواری مسیر در الگوریتم بهینه‌سازی و مقادیر مناسب پارامترهای فنر و مستهلک‌کننده را در نظر می‌گیرد. کمینه کردن انرژی مصرفی مجموعه ربات‌ها متناظر با کمینه نمودن مقادیر گشتاورها به‌عنوان یکی از اهداف کنترلی در نظر گرفته شده است. معادله (23) تابع هدف به منظور کمینه کردن گشتاور چرخ‌هاست.

$$J_p = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^n (\tau_{ri}^2 + \tau_{li}^2) dt \quad (23)$$

که در آن  $\tau_{li}$  و  $\tau_{ri}$  گشتاورهای چرخ چپ و راست ربات است. بر ربات‌ها، بار به صورت مناسب و یکسان توزیع شده است تا از اعمال بار زیاد بر یک ربات پرهیز شود. معادله (24) جمع مقادیر نسبت بارهای ربات‌های مجموعه است.  $\|f_{ei}\|$  معرف نیروی مؤثر روی ربات  $i$ ام است و در حالت بهینه مقدار این پارامتر برابر با یک خواهد بود. عملیات ریاضی تقسیم بر 6 به دلیل حذف تأثیر جایگشت‌ها در محاسبه نسبت بار بوده است.

$$J_l = \frac{1}{6} \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\|f_{ei}\|}{\|f_{ej}\|} dt \quad (24)$$

جهت مشاهده همواری مسیر در تابع هدف، پارامتر تغییرات انحنای مسیر ربات‌ها از معادله (25) محاسبه شده است. در این معادله  $S(t)$  طول کمان در راستای مسیر ربات و  $K(s)$  معرف انحنای مسیر است که در معادله (26) نشان داده شده است.

$$J_s = \frac{\sum_{i=1}^N \|\Delta K_i\| \Delta S_i}{\rho} \quad (25)$$

$$K(s) = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} \quad (26)$$

همچنین  $\rho$  فاصله بین نقاط نخستین و نهایی مسیر است. برای محاسبه مسیر ربات به  $N$  قسمت تقسیم می‌شود، سپس براساس معادله  $\Delta K_i = K_i - K_{i-1}$  و معادله  $\Delta S_i = S_i - S_{i-1}$  تغییرات انحنای مسیر و تغییرات پارامتر  $S$  محاسبه می‌شوند. جهت لحاظ کردن تمامی پارامترهای مورد نظر برای بهینه‌سازی مجموعه ربات‌ها، رابطه (27) برای توصیف تابع هدف نهایی متشکل از سه پارامتر در نظر گرفته شده است. پارامترهای  $W_p, W_l, W_s$  ضرایب وزنی مثبتی هستند که براساس اهمیت نسبی هر تابع هدف تنظیم می‌شوند. معادله (27) به عنوان تابع هدف، الگوریتم بهینه‌ای است که در یافتن مقادیر مناسب ضریب دمپینگ و فنریت سیستم RCC در حالت نیمه‌فعال استفاده می‌شود. میزان بهینگی و تناسب راه‌حل‌های به دست آمده از این تابع هدف از منظر هر سه ملاک عنوان شده؛ کمینه بودن گشتاور مصرفی، همواری مسیر و یکنواختی توزیع بار، ارزیابی می‌شود و بهینه‌سازی چندهدفه، از طریق تابع هدف توصیف‌شده در معادله (27) میسر می‌شود.

$$J_{total} = W_p J_p + W_l J_l + W_s J_s \quad (27)$$

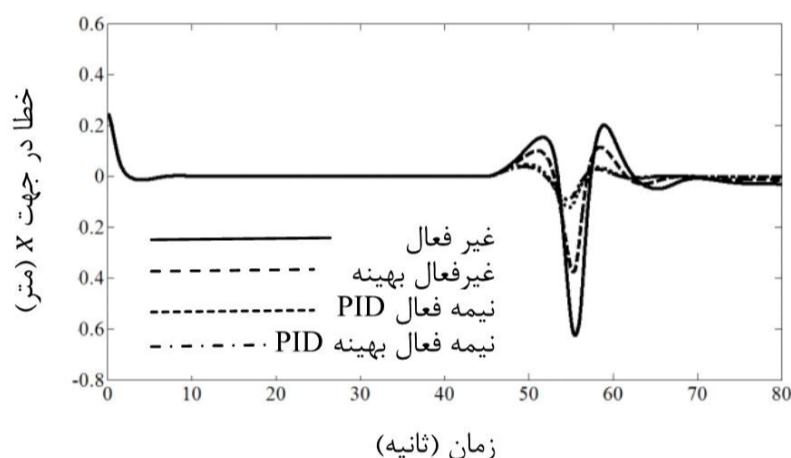
#### 4-3- قانون MIC

الگوریتم MIC یک روش تعیین گشتاورها و نیروهای کنترلی مناسب سیستم برای ایجاد رفتار مطلوب برای کنترل آرایش مجموعه و جابه‌جایی جسم است. این روش، پایداری مجموعه را تضمین می‌کند و می‌تواند رفتار کنترلی مطلوب به هنگام حمل جسم را تأمین کند. برای تعیین دستورهای کنترلی

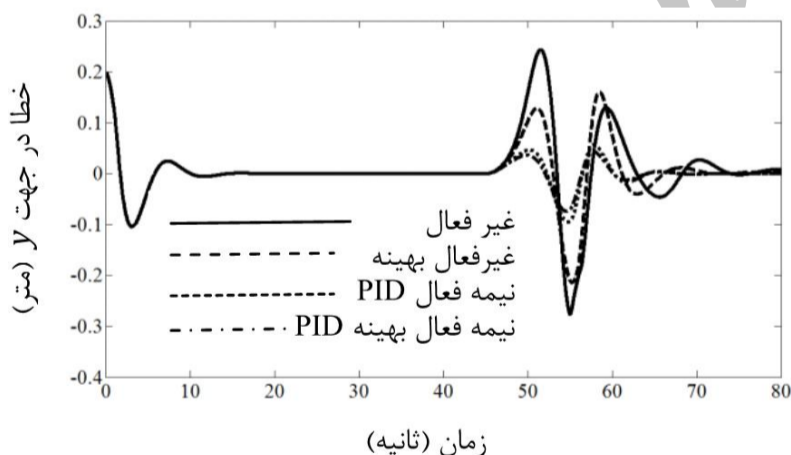


MIC و با در نظر گرفتن چهار روش یادشده مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تأثیرات اغتشاش و توانمندی الگوریتم‌های کنترلی در کاهش آن، یک اغتشاش شدید (مانند سرخوردن) به یک ربات در مجموعه وارد شده است. اغتشاش یادشده طی بازه زمانی 45-55 ثانیه به ربات وارد شده است. به عبارتی، مجموعه ربات‌ها در حال حرکت و تعقیب مسیر است که در زمان یادشده خطا روی ربات 2 اتفاق می‌افتد و در مسیر به سمت هدف نهایی مجموعه را با مشکل مواجه می‌کند.

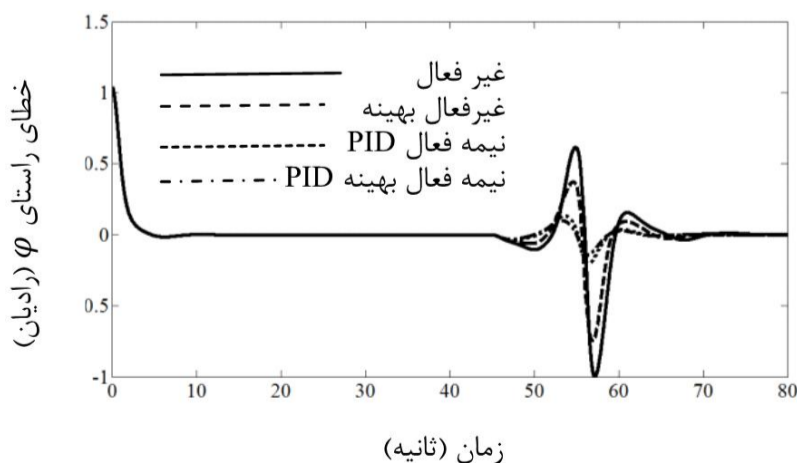
شکل‌های 8-16 خطای روش‌های متفاوت به‌کارگرفته‌شده محورهای مختصات  $(x, y)$  و جهت‌دهی برای هر ربات را نشان می‌دهند. با مشاهده آن‌ها نتیجه گرفته می‌شود که از میان روش‌های RCC غیرفعال، RCC غیرفعال بهینه، RCC نیمه‌فعال و RCC نیمه‌فعال بهینه، الگوریتم طراحی‌شده بر مبنای RCC نیمه‌فعال بهینه در مقابل اغتشاش وارد شده بهترین عملکرد را نشان داده است و مقدار خطا در سریع‌ترین زمان ممکن به سمت صفر میل پیدا کرده است و این نشان‌دهنده برتری الگوریتم طراحی‌شده نسبت به سایر الگوریتم‌هاست. با توجه به آن‌که در هنگام اعمال اغتشاش به هر کدام از ربات‌ها پاسخ سایر ربات‌ها و جسم به اغتشاش واردشده متفاوت است، خطای سایر ربات‌ها در راستای محور  $x$  و  $y$ ، همچنین در جهت  $\varphi$  آورده شده است.



شکل 8 مقایسه خطای ربات 1 در راستای محور  $x$  در روش‌های کنترلی متفاوت



شکل 9 مقایسه خطای ربات 1 در راستای محور  $y$  در روش‌های کنترلی متفاوت



شکل 10 مقایسه خطای راستای ربات 1 در روش‌های کنترلی متفاوت

جسم توسط یک اتصال مفصلی به مجری نهایی بازوی ربات‌ها متصل است. حمل جسم سنگین از موقعیت نخستین به موقعیت نهایی طبق مسیر یادشده در معادله (35) است. زمان شبیه‌سازی 80 ثانیه است که در طی این زمان اغتشاش به سیستم اعمال خواهد شد و توانمندی سیستم کنترلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل 1 نحوه اتصال RCC با مجری نهایی مشخص است. موقعیت ابتدایی ربات  $x_G = -0.25, y_G = -0.2, \gamma = 0$  و موقعیت ابتدایی مطلوب ربات  $x_{Gd} = 0, y_{Gd} = 0, \gamma_d = 0$  است که براساس معادله (35) موقعیت مطلوب ربات به سمت نقطه هدف میل می‌کند. مقادیر مناسب ضرایب مستهلک‌کننده و فنر توسط الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک معمولاً در مدت زمان کوتاه حل مناسبی از مساله را ارائه می‌کند. برای مسیر مطلوب جسم تعیین‌شده در معادله (35)، مقادیر مناسب فنر و مستهلک‌کننده برای هر ربات توسط الگوریتم ژنتیک براساس تابع هدف منعکس‌شده در رابطه (27) تعیین شده است.

نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک در جدول 4 ارائه شده است. جدول 5، مقدار ضرایب کنترلی برای کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده را نشان می‌دهد. پارامترهای  $K_D$  و  $K_S$  مقادیر ضرایب مستهلک‌کننده و فنر به‌کارگرفته‌شده در ساختار RCC است و فرض می‌شود که فنر در حالت نخستین فشرده‌گی و یا بازشدگی ندارد.

جدول 1 موقعیت ربات‌های متحرک همکار

ربات‌ها	$x_i(1)(m)$	$x_i(2)(m)$
ربات 1	-1/5	0/5
ربات 2	1/5	0/5
ربات 3	0	-0/5

جدول 2 پارامترهای مرتبط با جسم

عرض (m)	طول (m)	ممان اینرسی ( $kgm^2$ )	جرم (kg)
1	3	40	30

جدول 3 پارامترهای مهم مرتبط با ربات متحرک در نظر گرفته شده

پارامتر ربات متحرک	مقدار پارامتر
فاصله $P_c$ - $P$ (m)	0/2
فاصله چرخ تا $P$ (m)	0/3
شعاع چرخ (m)	0/1
جرم ربات (kg)	10
ممان اینرسی ( $kgm^2$ )	2/12

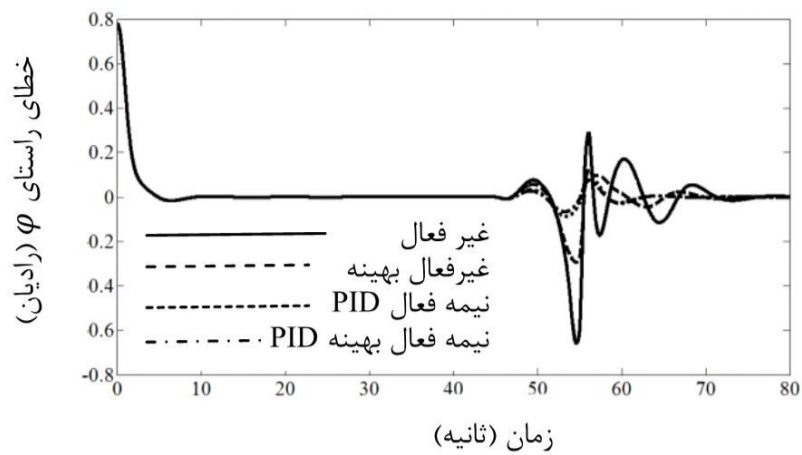
جدول 4 نتایج بهینه‌سازی

روش بهینه‌سازی	مقادیر تابع هزینه
بهینه غیرفعال RCC	9248/8621
بهینه نیمه‌فعال RCC	9245/6217

جدول 5 ضرایب کنترلی ربات‌ها

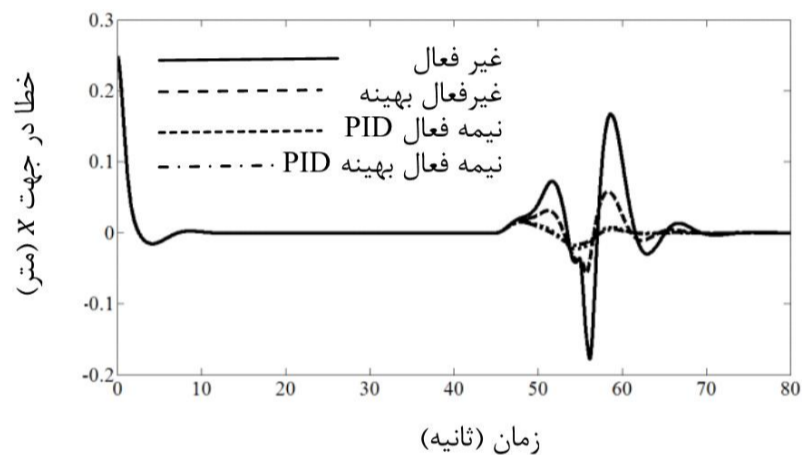
$K_D$	$K_S$	$M_{deso}$	$K_{do}$	$K_{po}$	$M_{desr}$	$K_{dr}$	$K_{pr}$	RCC
300	150	1	10	7	1	15	10	غیرفعال
427	232	1	10	7	1	15	10	غیرفعال بهینه
500	150	1	10	7	1	15	10	نیمه‌فعال براساس کنترل‌کننده PID
500	240	1	10	7	1	15	10	نیمه‌فعال بهینه براساس کنترل‌کننده PID

شبیه‌سازی برای مجموعه ربات نمایش داده شده در شکل 1، براساس قانون

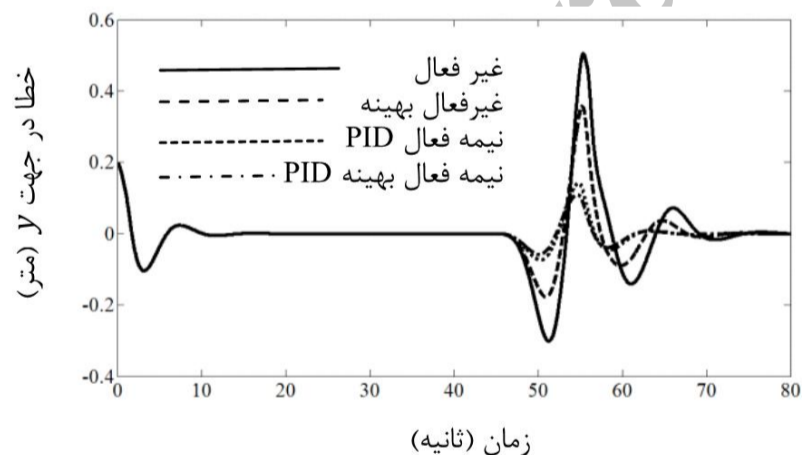


شکل 16 مقایسه خطای راستای ربات 3 در روش‌های کنترلی متفاوت

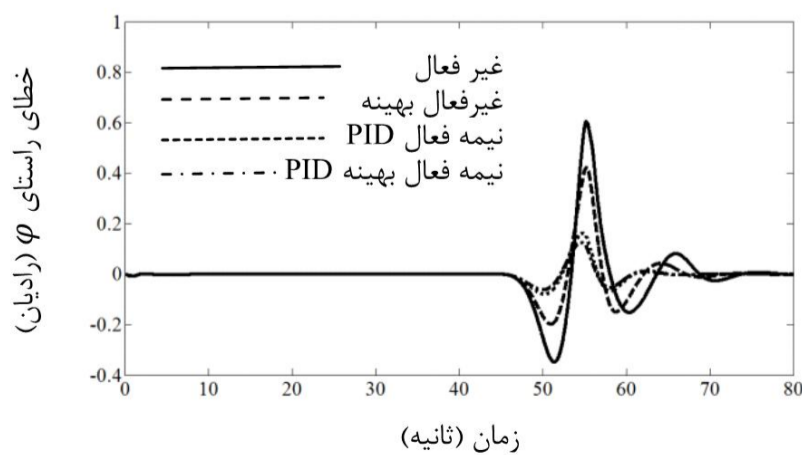
همچنین خطای حمل جسم توسط ربات‌ها در راستاهای مختلف در شکل‌های 17-19 قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل‌ها قابل مشاهده است ربات‌ها پس از قرار گرفتن بر مسیر مطلوب (صفر شدن مقدار خطا) در زمان 45-55 ثانیه دچار اغتشاش در سیستم می‌شوند. هر یک از ربات‌ها با کنترل‌کننده طراحی شده تلاش به غلبه بر اغتشاش وارد شده دارد. در این میان کنترل‌کننده RCC نیمه‌فعال بهینه بهترین عملکرد را در میان کنترل‌کننده‌ها از خود نشان می‌دهد و کمترین اثر اغتشاش وارد شده را به ربات منتقل می‌کند. همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، کنترل‌کننده RCC غیرفعال بیشترین اثر اغتشاش را به ربات‌ها وارد می‌کند.



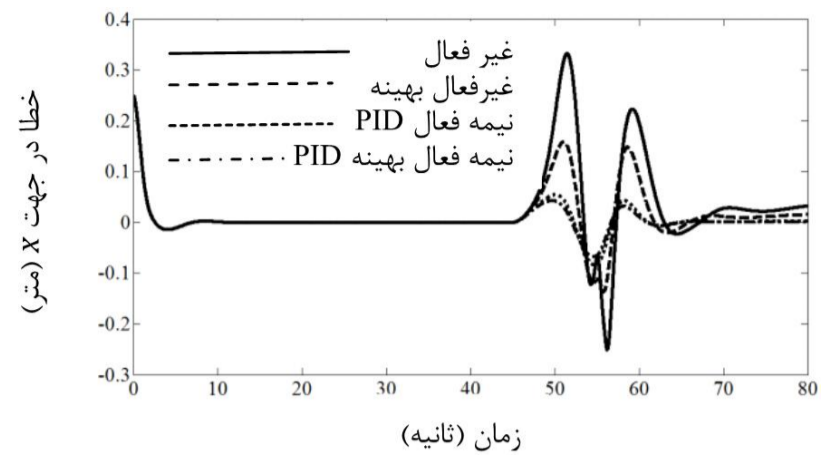
شکل 17 مقایسه خطای راستای جسم در روش‌های کنترلی متفاوت



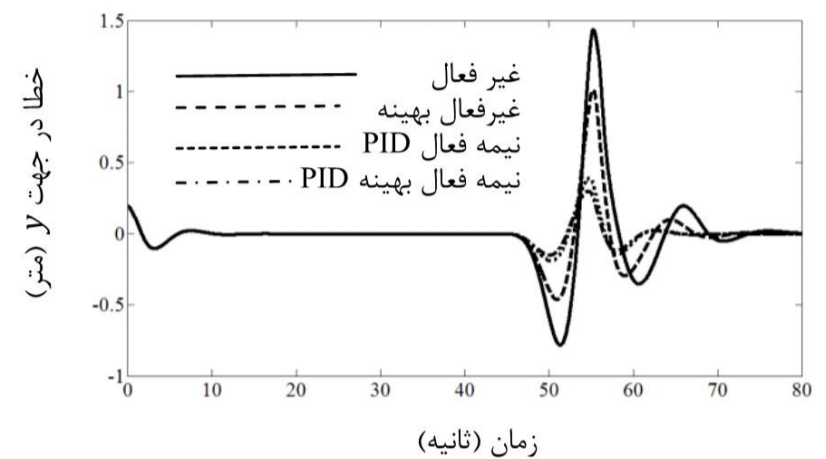
شکل 18 مقایسه خطای جسم در راستای محور y در روش‌های کنترلی متفاوت



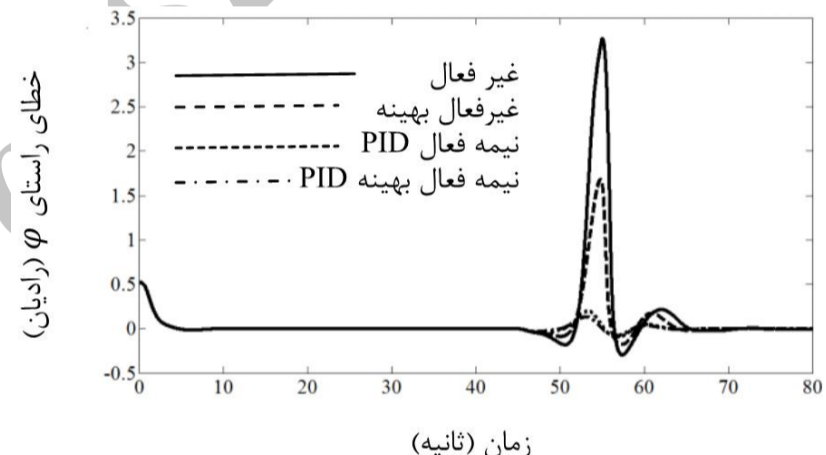
شکل 19 مقایسه خطای جسم در روش‌های کنترلی متفاوت



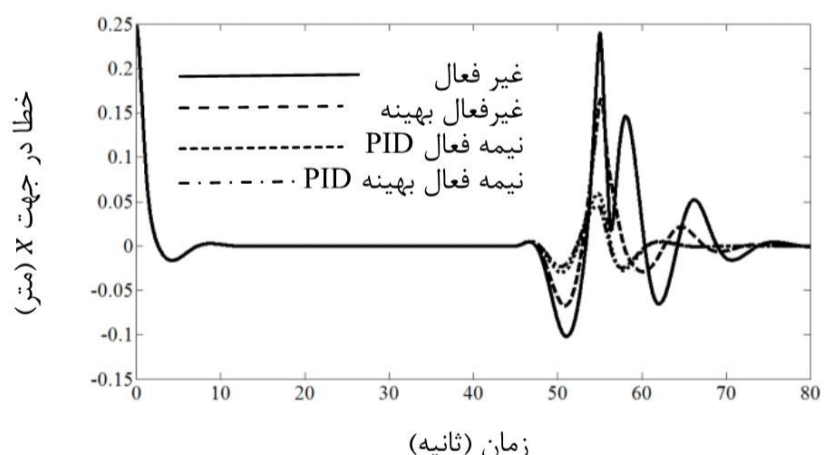
شکل 11 مقایسه خطای ربات 2 در راستای محور x در روش‌های کنترلی متفاوت



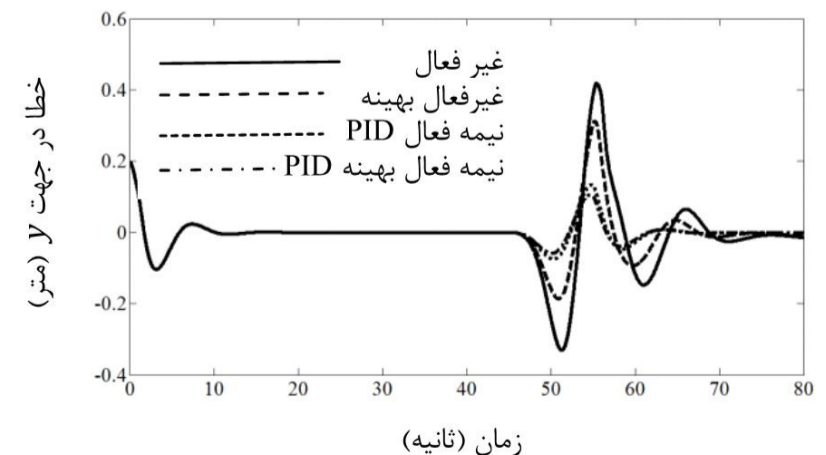
شکل 12 مقایسه خطای ربات 2 در راستای محور y در روش‌های کنترلی متفاوت



شکل 13 مقایسه خطای راستای ربات 2 در روش‌های کنترلی متفاوت



شکل 14 مقایسه خطای ربات 3 در راستای محور x در روش‌های کنترلی متفاوت



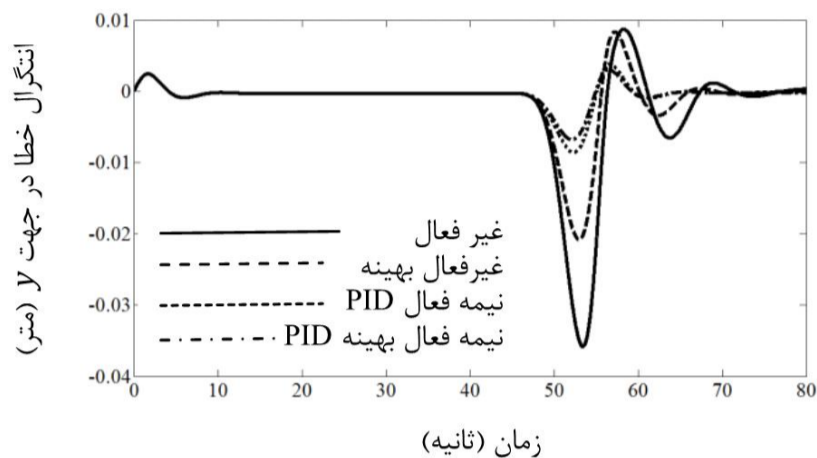
شکل 15 مقایسه خطای ربات 3 در راستای محور y در روش‌های کنترلی متفاوت



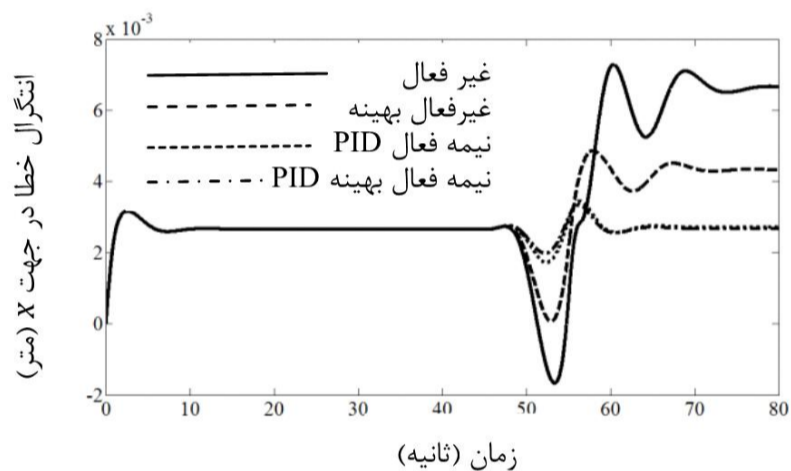
در نتیجه به هنگام وقوع خطا و یا اغتشاش در یک ربات‌ها به سرعت به حالت پایدار خود بازگشته و جسم را در مسیر مطلوب به سمت هدف نهایی حمل می‌کنند.

### 5- نتیجه‌گیری

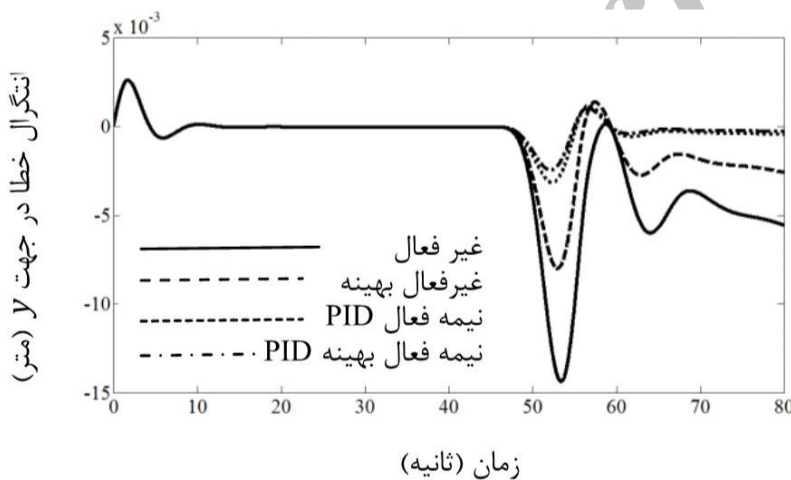
در این مقاله، عملکرد RCC غیرفعال و نیمه‌فعال در کنترل آرایش مجموعه ربات‌ها مورد بررسی قرار گرفت. روش کنترلی RCC نیمه‌فعال برای نخستین بار در این مقاله برای کنترل آرایش مجموعه ربات‌ها پیشنهاد شد.



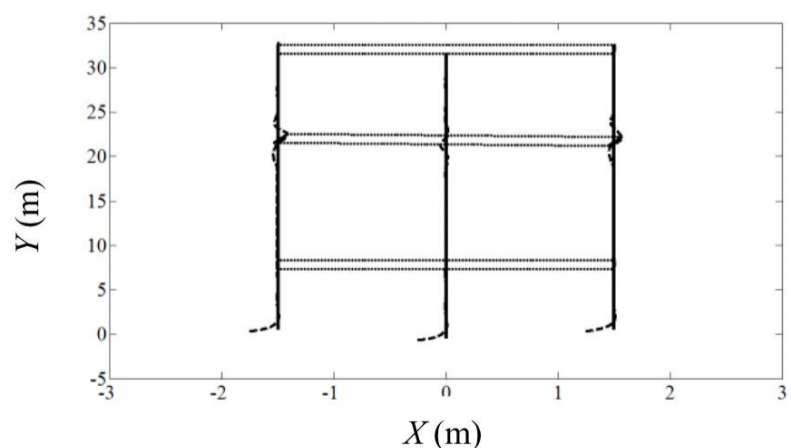
شکل 23 مقایسه انتگرال خطای ربات 2 در راستای محور  $Y$  در روش‌های کنترلی متفاوت



شکل 24 مقایسه انتگرال خطای ربات 3 در راستای محور  $X$  در روش‌های کنترلی متفاوت

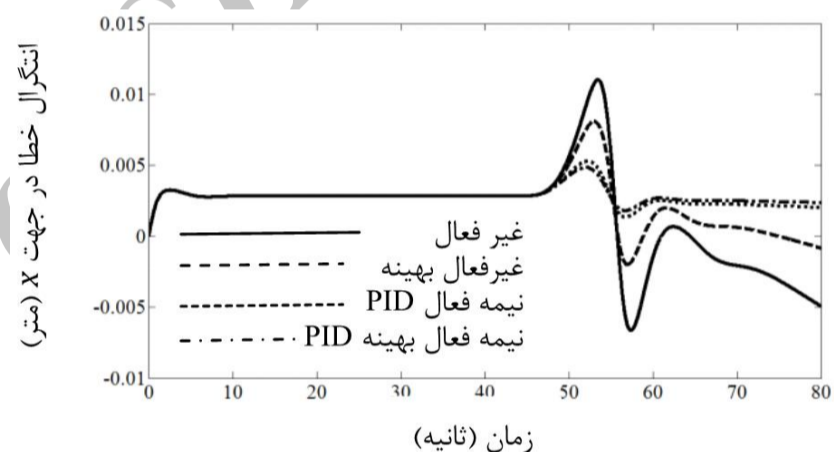


شکل 25 مقایسه انتگرال خطای ربات 3 در راستای محور  $Y$  در روش‌های کنترلی متفاوت

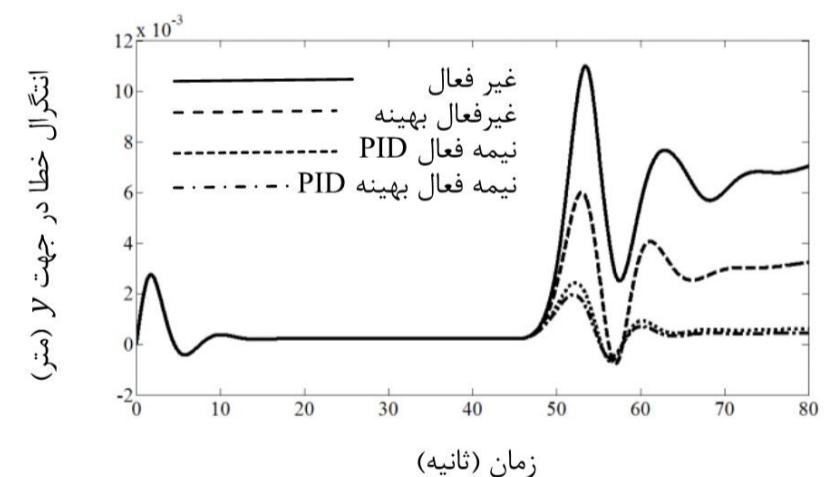


شکل 26 مسیر مطلوب و طی شده برای ربات‌های مجموعه هنگام به کارگیری سیستم کنترلی RCC نیمه‌فعال بهینه

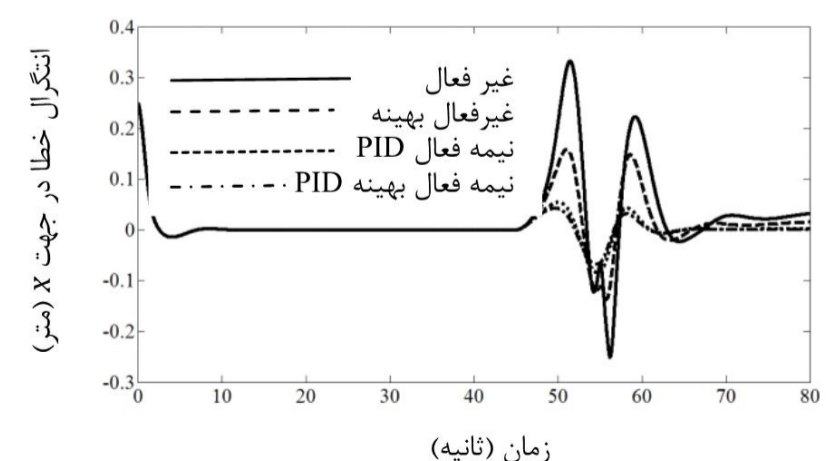
در ادامه جهت بررسی توانمندی روش‌های کنترلی یادشده، انتگرال خطای هر روش در شکل‌های 20-25 نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است الگوریتم RCC نیمه‌فعال بهینه طراحی شده نسبت به سایر روش‌ها خطای کمتری داشته و مقدار خطا با سرعت بیشتری در تمام جهات به صفر میل کرده است. می‌توان دریافت که RCC غیرفعال بیشترین خطا را دارد. از سوی دیگر الگوریتم طراحی شده در این مقاله، RCC نیمه‌فعال بهینه، کمترین خطا و یا بهترین عملکرد را در کنترل مجموعه ربات‌ها و جسم و همچنین خنثی کردن اثر اغتشاش از خود نشان داده است. برای ارزیابی دقیق‌تر از میزان کارایی ساختار پیشنهادی میزان انتگرال خطا نیز به نمایش گذاشته شده است. پس از اطمینان از بهینه بودن الگوریتم طراحی شده بر مبنای RCC نیمه‌فعال بهینه، برای درک بهتر مسیر مطلوب و طی شده توسط ربات‌های مجموعه و جسم به هنگام به کارگیری سیستم کنترلی RCC نیمه‌فعال بهینه به ترتیب در شکل 26 و 27 نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است پس از عبور از اغتشاش، ربات‌ها به وضعیت مطلوب رسیده‌اند و خطای آن‌ها صفر شده است. می‌توان مشاهده کرد که با استفاده از ترکیب سیستم کنترلی RCC نیمه‌فعال، الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک و قانون MIC، اگر اغتشاشی در مسیر حرکت به هر یک از ربات‌ها وارد شود، خطای بسیار کمی در انتقال جسم و پیروی از مسیر مطلوب صورت می‌پذیرد.



شکل 20 مقایسه انتگرال خطای ربات 1 در راستای محور  $X$  در روش‌های کنترلی متفاوت

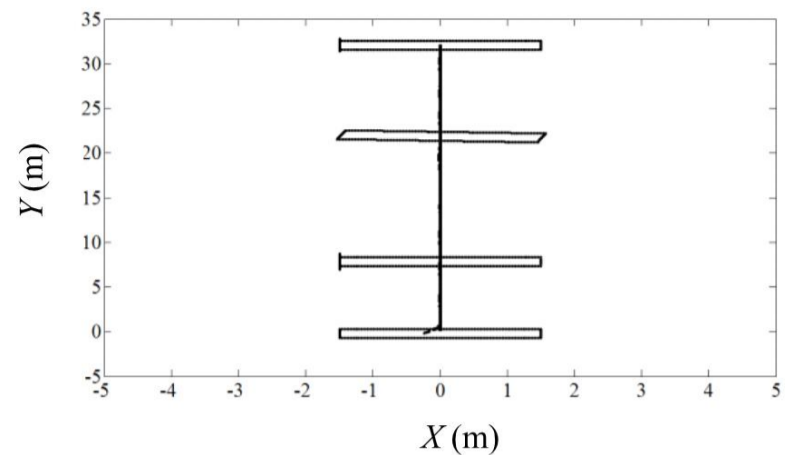


شکل 21 مقایسه انتگرال خطای ربات 1 در راستای محور  $Y$  در روش‌های کنترلی متفاوت



شکل 22 مقایسه انتگرال خطای ربات 2 در راستای محور  $X$  در روش‌های کنترلی متفاوت

- [6] H. Rezaee, F. Abdollahi, A Decentralized Cooperative Control Scheme With Obstacle Avoidance for a Team of Mobile Robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 1, pp. 347–354, 2014.
- [7] P. Desai, J.P. Ostrowski, V. Kumar, Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots, *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 17, No. 6, pp. 905–908, 2001.
- [8] A. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, C. Taylor, A vision-based formation control framework, *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 18, No. 5, pp. 813–825, 2002.
- [9] X. Li, J. Xiao, Z. Cai, Backstepping based multiple mobile robots formation control, in *Proc. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 887–892, 2005.
- [10] J. Sanchez, R. Fierro, Sliding mode control for robot formations, in *Proc. IEEE Symp. Intell. Control*, pp. 438–443, 2003.
- [11] L.A. Aguilera, O.I. Padilla, M.A. González-Palacios, E.J. González-Galván, Simulación de una suspensión semi-activa us,o amortiguador magnetoreológico, in *Memorias del XIII Congreso Intern. de la SOMIM y Congreso Intern. de Metal Mecánica*, México, 2007.
- [12] S. Ikenaga, F.L. Lewis, J. Campos, L. Davis, Active Suspension Control of Ground Vehicle based on a Full-Vehicle Model, in *Proceedings of American Control Conference*, Vol. 6, pp. 4019–4024, 2000.
- [13] B. Creed, N. Kahawatte, S. Varnhagen, Design of an LQR Control Strategy for Implementation on a Vehicular Active Suspension System, in *MAE 272*, Vol. II, 2010.
- [14] T.L. De Fazio, D.S. Seltzer, D.E. Whitney, The Instrumented Remote Centre Compliance, *Journal of The Industrial Robot*, Vol. 11, No. 4, pp. 238-242, 1984.
- [15] S.A.A. Moosavian, E. Papadopoulos, Cooperative Object Manipulation with Contact Impact Using Multiple Impedance Control, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 314-327, 2010.
- [16] J.J. Craig, *Introduction to Robotics. Mechanics and Control*, 3rd ed., Pearson Education Inc., 2005.
- [17] M. Senthil-kumar, Development of Active Suspension System for Automobiles using PID Controller, in *Proceedings of the World Congress on Engineering 2008, WCE 2008, London, U.K.*, Vol. II, 2008.
- [18] J. Wang, D. Wilson, W. Xu, D. Crolla, Active Suspension Control to Improve Vehicle Ride and Steady-State Handling, in *44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, Seville, Spain, 2005.
- [19] N. Yagiz, I. Yuksek, Sliding mode control of active suspensions for a full vehicle model, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 26, No. 2, pp. 264–276, 2001.
- [20] T.L. De Fazio, D.S. Seltzer, D.E. Whitney, The instrumented remote centre compliance, *Ind. Robot*, Vol. 11, No. 4, pp. 238–242, 1984.
- [21] S. Ali, A. Moosavian, R. Rastegari, E. Papadopoulos, Multiple impedance control for space free flying robots, *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 28, No. 5, pp. 939-947, 2005.
- [22] R. Rastegari, S. Ali, A. Moosavian, Multiple impedance control of nonholonomic wheeled mobile robotic systems performing object manipulation tasks, *Journal of Engineering Faculty, Tehran University*, Vol. 39, No. 1, pp. 15-30, 2005. (In Persian)
- [23] R. Rastegari, S. Ali, A. Moosavian, Multiple impedance control of cooperative manipulators using virtual object grasp, in *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, Munich, Germany, 2006.
- [24] D.W. Meer, S.M. Rock, Coupled system stability of exible-object impedance control, in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1839- 1845, Nagoya, Japan, 1995.
- [25] G. Mariottini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, G. Pappas, K. Daniilidis, Leader-follower formations. Uncalibrated vision-based localization and control, in *Proc. IEEE Conf. Robot. Autom.*, pp. 2403–2408, 2007.
- [26] A. Abbaspour, Kh. Alipour, H. Zarejafari, S. Ali, A. Moosavian, Optimal formation and control of cooperative wheeled mobile robots, *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 343, No. 5, pp. 307-321, 2015.



شکل 27 مسیر مطلوب و طی شده برای ربات‌های مجموعه به هنگام بکارگیری سیستم کنترلی RCC نیمه‌فعال بهینه

برای مقایسه عملکرد سیستم کنترلی پیشنهاد شده، روش‌های RCC غیرفعال و نیمه‌فعال در حالات بهینه و غیربهینه در کنترل آرایش مجموعه ربات‌ها و تعقیب مسیر مطلوب به هنگام وقوع خطا بررسی شد، همچنین از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی استفاده شده است. این الگوریتم به‌عنوان یک بهینه‌ساز سراسری تضمین می‌کند که در نقاط بهینه محلی متوقف نشود و در مدت زمان کم جواب بهینه مناسبی را ارائه می‌نماید. به دلیل توانمندی بهینه‌سازهای سراسری از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. یکی از برتری‌های ساختار پیشنهادی یعنی RCC نیمه‌فعال، توانمندی در کاهش تأثیرات اغتشاش یک ربات بر مجموعه ربات‌ها و جسم است. با استفاده از شبیه‌سازی، چگونگی غلبه بر اغتشاش ربات‌ها هنگام حمل جسم و وقوع خطا با به‌کارگیری قانون MIC و همچنین RCC غیرفعال و نیمه‌فعال بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که ساختار کنترلی RCC نیمه‌فعال عملکرد بسیار بهتری در تأمین اهداف اصلی تعقیب مسیر و کنترل آرایش ربات‌ها را نسبت به دیگر روش‌های مطرح شده داراست. از الگوریتم پیشنهادی می‌توان در محیط‌هایی که آگاهی و شناخت نسبت به آن محدود است، استفاده کرد. نه تنها در زمینه کنترل آرایش مجموعه ربات‌ها و فعالیت‌های تعریف‌شده در فضای مجموعه ربات‌ها توانمند و کاراست بلکه در زمینه کاربردهای انفرادی ربات‌ها در زمینه کنترل جبران‌ساز خطا نیز کارآمد است.

## 6- مراجع

- [1] L.D. Baskar, B. De Schutter, H. Hellendoorn, Traffic Management for Automated Highway Systems Using Model-Based Predictive Control, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 838 – 847, 2012.
- [2] V. Kumar, N. Michael, Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 31, pp. 1279-1291, 2012.
- [3] H. Choi, K. W. Yang, E. Kim, Simultaneous Global Localization and Mapping, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 1160 – 1170, 2014.
- [4] P. De Cristoforis, S. Pedre, M. Nitsche, T. Fischer, F. Pessacq, C. Di Pietro, A Behavior-Based Approach for Educational Robotics Activities, *IEEE Transactions on Education*, Vol. 56, No. 1, pp. 61–66, 2013.
- [5] A. Abbaspour, A. Moosavian, Kh. Alipour, A Virtual Structure-based Approach to Formation Control of Cooperative Wheeled Mobile Robots, in *First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, Sharif University, Tehran, Iran, 2013.