



## کنترل مود لغزشی تطبیقی ربات متحرک

محمد مهدی فاتح<sup>۱\*</sup> و علی اصغر عرب<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استاد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی برق و رباتیک

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی برق و رباتیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۴/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۲۰

### چکیده

با توجه به دینامیک غیرخطی ربات‌های متحرک چرخدار و حضور عدم قطعیت، از کنترل مود لغزشی استفاده می‌شود. با این وجود، کنترل مود لغزشی با مشکل انتخاب حدود عدم قطعیت و وجود لرزش سیگنال کنترل مواجه است که عملکرد سیستم کنترل را تضعیف می‌نماید. برای بهبود عملکرد، این مقاله کنترل نوین مود لغزشی تطبیقی را ارائه می‌نماید. نوآوری مقاله در ارائه مدل جدیدی از ربات در فضای حالت و بکارگیری رویکرد کنترل ولتاژ است. موتورهای نیز در سیستم رباتیک منظور شده‌اند. در طرح‌های قبلی که مبتنی بر رویکرد کنترل گشتاور هستند دینامیک موتورهای لحاظ نشده‌اند. در طرح پیشنهادی، حدود عدم قطعیت به صورت تطبیقی تعیین می‌گردد و لرزش سیگنال کنترل بهبود می‌یابد. روش پیشنهادی مبتنی بر تئوری پایداری لیاپانوف بوده و پایداری سیستم کنترل را تضمین می‌نماید. علاوه، از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، به منظور یافتن پارامترهای بهینه سیستم کنترل استفاده می‌شود. کنترل کننده نسبت به اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل نشده نیز مقاوم است. نتایج شبیه‌سازی برتری روش پیشنهادی را نسبت به روش کنترل مود لغزشی مرسوم نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** کنترل مود لغزشی؛ کنترل مود لغزشی تطبیقی؛ ربات متحرک چرخدار؛ الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات.

## Adaptive sliding mode control for a mobile robot

M.M. Fateh<sup>1\*</sup> and A.A Arab<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Prof. of Control Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. of Control Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### Abstract

Sliding mode control is used for a wheeled mobile robot due to the nonlinear dynamics and presence of uncertainty. However, sliding mode control has the chattering problem and difficulty in finding the bounds of uncertainty which degrade the control performance. To improve the performance, this paper presents a novel adaptive sliding mode control for a wheeled mobile robot. The novelties of this paper are to derive a novel state-space model and the use of voltage control strategy in the control design. In addition, motors are included in the control design whereas the electrical dynamics of motors are not considered in the torque-based control approaches. In the proposed design, the bounds of uncertainty are determined adaptively. As a result, the chattering problem is reduced. The proposed approach is based on the Lyapunov theory, thereby guarantees the stability of control system. In addition, the particle swarm optimization for finding the optimal design parameters is used. The proposed control approach is free from the model parameters and robust against the external disturbances and unmodeled dynamics. Simulation results show the superiority of the adaptive sliding mode over the conventional sliding mode for the control of the mobile robot.

**Keywords:** Sliding mode control; Adaptive sliding mode control; Wheeled mobile robot; Particle swarm optimization algorithm.

## ۱- مقدمه

ربات‌های متحرک چرخدار به دلیل بازدهی بالا و ساخت ساده یکی از پر کاربردترین ربات‌ها می‌باشند. به موجب این امر، تحقیقات علمی در مورد ربات‌های متحرک چرخدار در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این نوع ربات، جایگزین مناسبی برای انسان در مکان‌های خطر آفرین برای انجام فعالیت می‌باشد. خودروهای رباتیک، ربات‌های مین‌یاب، صندلی‌های چرخدار هوشمند و ربات‌های نظافتچی شهری [۱] را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از ربات‌های سبک نام برد.

در چند دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کنترل ربات‌های متحرک انجام گرفته و مقالات زیادی در این راستا منتشر گردیده است. می‌توان گفت سهم عمده‌ای از این تحقیقات متوجه مسئله ردگیری مسیر توسط ربات متحرک در حضور نامعینی‌ها بوده است. مشکلات زیادی در پیاده سازی کنترل کننده‌های بر مبنای مدل روی سیستم‌های حقیقی مانند ربات‌های متحرک وجود دارد. یکی از مهمترین علل، عدم توانایی در مدل سازی دقیق سیستم‌های حقیقی است. بعلاوه، حتی اگر این توانایی وجود داشته باشد، مدل حاصل آنقدر پیچیده است که طراحی کنترل کننده را دشوار می‌سازد. عدم دقت در مدل سازی، ناشی از دو مسأله است؛ یکی عدم قطعیت در پارامترهای مدل و دیگری دینامیک‌های مدل نشده سیستم می‌باشد. روش‌های کنترلی بسیاری جهت مقابله با این عدم قطعیت‌ها در مقالات دیده می‌شوند.

بسیاری از روش‌هایی که در ابتدا برای کنترل ربات متحرک پیشنهاد شده‌اند بدون در نظر گرفتن دینامیک ربات، مسئله کنترل ردگیری را تنها با استفاده از مدل سینماتیک ربات طراحی نموده‌اند [۲]. روش پسگام از قدیمی‌ترین روش‌های کنترل سینماتیکی پایدار می‌باشد [۲].

در زمینه کنترل پایدار ربات متحرک، ردگیری پایدار ربات متحرک [۳] و کنترل موقعیت ربات متحرک [۴] ارائه شدند. جهت مقابله با نامعینی‌ها، روش‌های کنترلی چون  $H_\infty$  [۵]، مود لغزشی [۶]، تطبیقی [۷]، مود لغزشی تطبیقی [۸]، خطی سازی تطبیقی پسخورد [۹] و مقاوم تطبیقی [۱۰] مطرح شدند. این مقالات به خوبی به حل مسئله کنترل ردگیری ربات متحرک در حضور نامعینی‌ها پرداخته‌اند.

برخی از مقالات نیز جهت کنترل ربات متحرک در حضور نامعینی‌ها روش‌های هوشمند را پیشنهاد داده‌اند. کنترل عصبی [۱۱]، کنترل عصبی تطبیقی [۱۲]، کنترل فازی [۱۳] و کنترل فازی-عصبی [۱۴] مورد توجه قرار گرفته‌اند. قابلیت ارزشمند سیستم‌های فازی و عصبی در تقریب توابع، امکان طراحی کنترل کننده بصورت آزاد از مدل سیستم را فراهم نموده است. در طراحی کنترل فازی نوع دو [۱۵] و کنترل تطبیقی فازی [۱۶] از الگوریتم‌های هوشمند بهینه سازی بطور موثر استفاده شده است. هنگامی که سیستم پیچیده است و یافتن جواب بهینه با روش‌های تحلیلی میسر نمی‌باشد الگوریتم‌های بهینه سازی هوشمند به میدان آمده و دستیابی به جواب بهینه را میسر می‌سازند.

کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی دو روش مهم و مکملی هستند که برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها پیشنهاد شده‌اند. کنترل تطبیقی جهت مقابله با عدم قطعیت‌های پارامتری و کنترل مقاوم جهت جبران دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش خارجی معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از ساده‌ترین رویکردها در طراحی کنترل کننده مقاوم، کنترل مود لغزشی است. فرکانس بالای سیگنال ورودی در کنترل مود لغزشی باعث تحریک دینامیک‌های مدل نشده سیستم می‌شود. این پدیده که لرزش سیگنال کنترل نامیده می‌شود ضمن دشواری در پیاده سازی، باعث تلفات حرارتی شده و به قطعات مکانیکی آسیب می‌زند. برای غلبه بر این مشکل، اصلاحاتی در کنترل کننده مود لغزشی اولیه پیشنهاد شده است. برای نمونه می‌توان کنترل تطبیقی مود لغزشی [۸] و کنترل مود لغزشی فازی [۱۷] را نام برد.

طرح‌های قبلی کنترل ربات متحرک از جمله [۸] مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور می‌باشند. در این راهبرد، گشتاور مفاصل ربات به عنوان فرمان کنترل یا ورودی سیستم است. اما در عمل، فرمان گشتاور نمی‌تواند بطور مستقیم به ورودی ربات اعمال گردد و در اجرا نیازمند وجود محرکه‌ها است. این راهبرد از دینامیک موتورها در قانون کنترل و اجرای فرمان صرف نظر می‌نماید. این عیب، کارآمدی ربات را برای انجام کارهای سریع و دقیق زیر سوال می‌برد. بعلاوه، راهبرد کنترل گشتاور بخاطر دینامیک ربات، پیچیده می‌شود.

نوآوری این مقاله در ارائه مدل جدیدی از ربات متحرک در فضای حالت و بکارگیری رویکرد کنترل ولتاژ در طراحی

نشان داده شده است از دو بخش مکانیک ربات و موتورهای الکتریکی تشکیل شده است. موتورهای الکتریکی گشتاور مورد نیاز جهت چرخاندن چرخهای ربات را تامین می کنند. این ربات دارای دو چرخ متصل به موتور و دو چرخ هرزگرد در جلو می باشد. به دلیل نحوه قرار گرفتن چرخها، ربات قادر به حرکت در راستای عرض ربات یعنی محور  $y_r$  نمی باشد. این قید حرکت را قید غیرهولونومیک ربات می نامند. ک غلتشی بودن حرکت چرخ ها و عدم لغزش ربات دارای رابطه مستقل از زمان زیر است [۷].

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}=0 \quad (1)$$

که  $x$  و  $y$  در بردار  $\mathbf{q}=[x \ y \ \theta]^T$  نشان دهنده موقعیت مبدا دستگاه مختصات  $x_r P_o y_r$  متصل به ربات در دستگاه مختصات مبنا  $XOY$  و  $\theta$  بیانگر میزان دوران دستگاه مختصات  $x_r P_o y_r$  نسبت به دستگاه مختصات مبنا  $XOY$  در شکل ۱ است. مشتق زمانی بردار موقعیت، بردار سرعت ربات  $\dot{\mathbf{q}}$  می باشد و قید سینماتیکی ربات  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$  به صورت زیر معرفی می گردد.

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})=[-\sin \theta \ \cos \theta \ 0] \quad (2)$$

با توجه به شکل ۱، بردار سرعت ربات  $\dot{\mathbf{q}}$  با شرط عدم وجود لغزش در حرکت چرخ ها چنین است،

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

که در آن  $\mathbf{v}=[v \ \omega]^T$  بردار سرعت،  $v$  اندازه سرعت خطی مرکز جرم ربات در دستگاه مبنا و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای ربات در دستگاه مبنا است.  $\mathbf{S}(\mathbf{q})$  به صورت زیر است:

$$\mathbf{S}(\mathbf{q})=\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

مدل دینامیکی ربات متحرک به کمک معادلات اویلر-لاگرانژ بدست می آید. در این روش، مقدار لاگرانژین به صورت تفاضل انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم تعریف می شود که انرژی جنبشی ربات تابع سرعت و انرژی پتانسیل ربات به دلیل افقی بودن محیط کار ربات، صفر منظور می گردد. با نظر گرفتن گشتاور اعمالی توسط چرخ ها به عنوان ورودی سیستم دینامیکی ربات خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right)-\frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}}=\boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

که لاگرانژین سیستم برابر است با

کنترل کننده است. با این که در رویکرد کنترل ولتاژ، دینامیک موتورها نیز منظور می گردد اما طرح کنترلی در مقایسه با رویکرد کنترل گشتاور ساده تر است. در راهبرد کنترل ولتاژ که برای رباتهای صنعتی ارائه شد [۱۹] ولتاژ موتورها به عنوان ورودی کنترلی سیستم رباتیک عمل می نماید. در حالی که در راهبرد مرسوم کنترل گشتاور، گشتاور مفاصل به عنوان ورودی کنترلی سیستم در نظر گرفته شده است. در رویکرد کنترل ولتاژ، کنترل ولتاژ موتور ها به صورت مستقیم می باشد که باعث حذف یک حلقه کنترل جریان در کنترل گشتاور موتور می شود. این روش کنترلی می تواند مستقیماً سیگنال کنترلی را به روش مدولاسیون عرض پالس به موتور اعمال نماید.

طرح کنترل پیشنهادی از دو حلقه کنترلی به نام حلقه سینماتیک و حلقه دینامیک تشکیل می شود. هدف حلقه سینماتیک، محاسبه سرعت ربات است به نحوی که ربات به صورت مجانبی مسیر مطلوب را ردگیری نماید. حلقه دینامیک نیز ولتاژ موتورها را به صورتی تنظیم می نماید که سرعت محاسبه شده توسط حلقه سینماتیک توسط ربات اجرا گردد. در این طرح، با تطبیق حدود عدم قطعیت ها و بکارگیری تابع اشباع بجای تابع علامت در قانون کنترل به مقابله با پدیده لرزش سیگنال کنترل می پردازیم. بعلاوه، از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات جهت یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی استفاده می شود.

در ادامه مقاله، بخش ۲ مدل فضای حالت ربات متحرک چرخدار غیر هولونومیک با در نظر گرفتن محرکه های DC را ارائه می نماید. بخش ۳ کنترل سینماتیک ربات را تشریح می کند. بخش ۴ کنترل کننده دینامیک ربات با روش مود لغزشی- تطبیقی را طراحی می نماید. در بخش ۵، الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات برای یافتن پارامترهای بهینه سیستم کنترل را توصیف می گردد. در بخش ۶، نتایج شبیه سازی ارائه می شوند. در پایان، بخش ۷ به نتیجه گیری می پردازد.

## ۲- مدل سازی

در این بخش سیستم ربات متحرک چرخدار غیر هولونومیک با در نظر گرفتن محرکه های DC که در صفحه افقی حرکت می کند را مدل سازی نموده تا معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم محاسبه شوند. سیستم ربات متحرک که در شکل ۱

$$\tau = k_m \dot{\mathbf{I}} \quad (10)$$

با جایگذاری معادله (۱۰) در معادله (۹) خواهیم داشت:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}_a \mathbf{k}_m^{-1} \tau + \mathbf{L}_a \dot{\mathbf{I}} + \mathbf{k}_b \mathbf{n} \dot{\mathbf{X}} \mathbf{v} \quad (11)$$

که  $\mathbf{X}$  ماتریس تبدیلی است که بردار سرعت چرخ‌های ربات  $\dot{\mathbf{X}}$  را به بردار  $\mathbf{v}$  مرتبط می‌سازد. به طوری که:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{X} \mathbf{v} \quad (12)$$

با جایگذاری معادله (۱۱) در معادله (۷) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \\ \mathbf{B}(\mathbf{q}) [\mathbf{k}_m \mathbf{R}_a^{-1} (\mathbf{U} - \mathbf{L}_a \dot{\mathbf{I}} - \mathbf{k}_b \mathbf{n} \dot{\mathbf{X}} \mathbf{v}) - \tau_a] - \mathbf{A}^T(\mathbf{q}) \lambda \end{aligned} \quad (13)$$

با مشتق‌گیری از معادله (۳)، داریم،

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{S}}(\mathbf{q}) \mathbf{v} + \mathbf{S}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}} \quad (14)$$

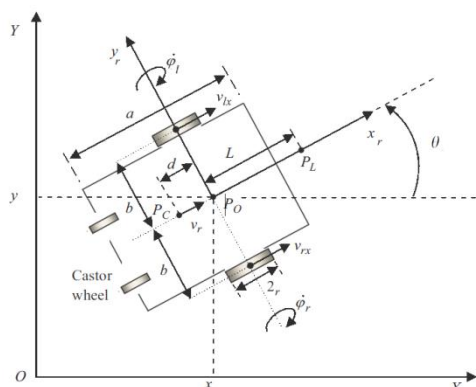
با جایگذاری معادلات (۱۲)، (۱۴) و (۳) در معادله (۱۱) و سپس ضرب  $\mathbf{S}^T(\mathbf{q})$  در طرفین معادله بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\mathbf{F}}(\dot{\mathbf{q}}) + \bar{\tau}_a = \\ \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_m \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{U} - \mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \mathbf{A}^T(\mathbf{q}) \lambda \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) &= \mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{S}(\mathbf{q}) \\ \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{S}}(\mathbf{q}) + \\ &\quad \mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{S}(\mathbf{q}) + \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_m \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{k}_b \mathbf{n} \dot{\mathbf{X}} \\ \bar{\mathbf{F}}(\dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) \\ \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) &= \mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \mathbf{B}(\mathbf{q}) \\ \bar{\tau}_a &= \mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \tau_a \end{aligned}$$

از آنجا که  $\mathbf{S}^T(\mathbf{q}) \mathbf{A}^T(\mathbf{q}) = \mathbf{0}$ ، معادله (۱۵) ساده‌تر می‌شود:



شکل ۱- توصیف ربات در دستگاه‌های مختصات

$$L = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (6)$$

بردار گشتاور ربات به صورت  $\tau = [\tau_r \quad \tau_l]^T$  است که در آن گشتاور چرخ چپ  $\tau_l$  و گشتاور چرخ راست  $\tau_r$  است. با حل معادلات اویلر-لاگرانژ (۵)، دینامیک ربات متحرک در شکل ۱ به صورت زیر توصیف می‌گردد [۷]:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \\ \mathbf{B}(\mathbf{q}) (\tau - \tau_a) - \mathbf{A}^T(\mathbf{q}) \lambda \end{aligned} \quad (7)$$

که  $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{3 \times 3}$  ماتریس متقارن مثبت معین اینرسی ربات،  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^3$  بردار نیروهای ناشی از شتاب کوریولیس و نیروهای گریز از مرکز،  $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in R^3$  بردار نیروهای ناشی از جاذبه گرانشی زمین،  $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) \in R^3$  بردار نیروهای ناشی از اصطکاک‌های ویسکوز و کلومب،  $\mathbf{A}(\mathbf{q}) \lambda \in R^3$  بردار نیروهای ناشی از قیدهای سینماتیکی ربات و  $\tau_a \in R^3$  بردار گشتاورهای ناشی از اغتشاش خارجی وارد به چرخ‌ها است. ماتریس  $\mathbf{B}(\mathbf{q}) \in R^{3 \times 2}$  برای تبدیل بردار گشتاور از چرخ به دستگاه مبنا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}) = \frac{1}{r_w} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ -b & b \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن  $b$  نصف فاصله دو چرخ و  $r_w$  شعاع چرخ در شکل ۱ است.

ولتاژ موتورها به عنوان ورودی‌های کنترلی سیستم عمل می‌نمایند. پس، به منظور کنترل ربات باید ولتاژ مناسب به موتورها اعمال گردد. در نتیجه، برای طراحی کنترل کننده مطلوب باید دینامیک موتورها را در نظر گرفت. معادلات الکتریکی موتور شکل ۲ به صورت ماتریسی زیر بیان می‌شوند:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}_a \mathbf{I} + \mathbf{L}_a \dot{\mathbf{I}} + \mathbf{k}_b \mathbf{n} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (9)$$

$\mathbf{R}_a$  ماتریس قطری مقاومت الکتریکی موتورها،  $\mathbf{L}_a$  ماتریس اندوکتانس موتورها،  $\mathbf{k}_b$  ماتریس ضرایب القاء،  $\mathbf{n}$  ماتریس تبدیل چرخ دنده‌ها،  $\mathbf{I} = [I_r \quad I_l]$  بردار جریان موتورها،  $\boldsymbol{\phi} = [\phi_r \quad \phi_l]$  بردار موقعیت زاویه‌ای چرخ‌ها و  $\mathbf{U} = [U_r \quad U_l]$  بردار ولتاژ موتورها می‌باشد. گشتاور اعمالی به موتورها با جریان موتورها رابطه مستقیم دارد. با فرض انتقال کامل گشتاور از موتورها به چرخ‌های ربات داریم:

$$\mathbf{E}_q = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{q}) \tilde{\mathbf{E}}_q \quad (19)$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

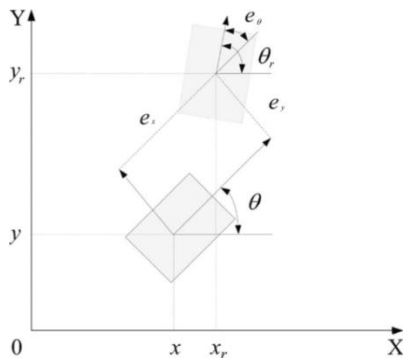
با مشتق‌گیری از بردار خطای  $\mathbf{E}_q$  داریم:

$$\dot{\mathbf{E}}_q = v \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} e_y \\ -e_x \\ -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_r \cos e_\theta \\ v_r \sin e_\theta \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (21)$$

جهت ردگیری مسیر مطلوب توسط ربات متحرک، ضروری است تا قانونی برای کنترل سینماتیکی ربات پیشنهاد گردد تا تضمین کند که  $\mathbf{q} \rightarrow \mathbf{q}_r(t)$  as  $t \rightarrow \infty$  برای این منظور قانون کنترل سینماتیکی پسگام به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد [۲].

$$\mathbf{v}_c(t) = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos(e_\theta) + k_x e_x \\ \omega_r + k_y v_r e_y + k_\theta v_r \sin(e_\theta) \end{bmatrix} \quad (22)$$

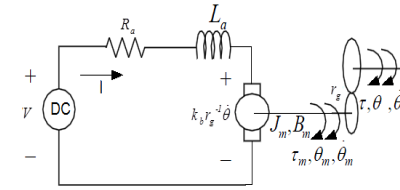
متغیرهای  $e_x$ ،  $e_y$  و  $e_\theta$  قبلاً در (۱۹) تعریف شده و در شکل ۳ نمایش داده شده است.  $k_x$ ،  $k_y$  و  $k_\theta$  مقادیر مثبت هستند و ربات باید حتماً رو به جلو حرکت کند. یعنی، باید  $v_r > 0$  باشد تا کنترل‌کننده پایدار باشد.



شکل ۳- تعریف بردار خطا و تبدیل بردار خطا در ردگیری

#### ۴- طراحی کنترل مود لغزشی تطبیقی

حلقه کنترل دینامیکی ربات جهت اعمال سرعت محاسبه شده از حلقه کنترل سینماتیکی طراحی می‌گردد. این کنترل



شکل ۲- مدار معادل موتور DC مغناطیس دائم

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\mathbf{F}}(\dot{\mathbf{q}}) + \bar{\boldsymbol{\tau}}_d = \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_m \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{U} \quad (16)$$

با در نظر گرفتن بردار حالت  $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}$  و بکارگیری (۳) و

(۱۶)، مدل فضای حالت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}(\mathbf{q}) \mathbf{v} \\ -\bar{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q}) (\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{v} - \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_m \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{U}) \\ 0 \\ -\bar{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q}) [\bar{\mathbf{F}}(\dot{\mathbf{q}}) + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\boldsymbol{\tau}}_d] \end{bmatrix} \quad (17)$$

#### ۳- کنترل سینماتیکی ربات

کنترل سینماتیکی، یک حلقه در سیستم کنترل است و در اکثر طرحهای کنترلی ربات چرخ دار آمده است. آمدن آن در مقاله برای پیوستگی مطلب است. نوآوری مقاله، در حلقه کنترل دینامیکی ربات است که در بخش ۴ بیان می‌شود. کنترل سینماتیکی ربات که به روش پسگام معروف است در بسیاری از مقالات مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. روش پسگام از اولین روش‌های کنترل سینماتیکی پایدار می‌باشد. جهت فرموله کردن مسئله ردگیری، ابتدا مسیر مطلوب را به صورت زیر تعریف می‌نماییم.

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{S}(\mathbf{q}_r) \mathbf{v}_r \quad (18)$$

که  $\mathbf{q}_r = [x_r(t) \ y_r(t) \ \theta_r(t)]^T$  است.  $[x_r(t) \ y_r(t)]^T$  بیانگر موقعیت مطلوب و  $\theta_r(t)$  جهت مطلوب ربات است. بردار  $\mathbf{v}_r = [v_r(t) \ \omega_r(t)]^T$  که  $v_r(t)$  سرعت خطی مطلوب و  $\omega_r(t)$  سرعت زاویه ای مطلوب است. جهت ردگیری مسیر ربات، ابتدا بردار خطای موقعیت ربات به صورت  $\tilde{\mathbf{E}}_q = [x_r - x \ y_r - y \ \theta_r - \theta]^T$  تعریف می‌شود. جهت محاسبه قانون کنترل پسگام بردار خطای  $\mathbf{E}_q$  که تبدیل هندسی بردار  $\tilde{\mathbf{E}}_q$  به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد که در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

پس باید شرط زیر را برقرار ساخت تا همگرایی  $L_1(\mathbf{S}) \rightarrow 0$  برقرار گردد

$$\dot{\mathbf{S}}^T \mathbf{S} \leq -\eta \|\mathbf{S}\| \quad (29)$$

که  $\eta$  ثابت مثبت می باشد. پس از معادله (۲۹) می توان نتیجه گرفت که باید

$$\dot{\mathbf{S}}^T (\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|) \leq -\eta \quad (30)$$

با مشتق گیری از معادله (۲۶) و جایگذاری در معادله (۳۰) می توان نوشت

$$(\dot{\mathbf{E}}_c + \beta \mathbf{E}_c)^T (\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|) \leq -\eta \quad (31)$$

با جایگذاری مشتق معادله (۲۵) در معادله (۳۱) داریم

$$[(\dot{\mathbf{v}}_c - \dot{\mathbf{v}}) + \beta \mathbf{E}_c]^T (\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|) \leq -\eta \quad (32)$$

اکنون معادله (۲۳) را در معادله (۳۲) وارد نموده تا ورودی کنترل کننده، یعنی ولتاژ موتورها در معادلات ظاهر گردد.

$$[(\dot{\mathbf{v}}_c - \mathbf{H}(\mathbf{q})\mathbf{U} - \mathbf{W}(\mathbf{q})) + \beta \mathbf{E}_c]^T (\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|) \leq -\eta \quad (33)$$

محدود بودن متغیر حالت های سیستم در ادامه اثبات می گردد. فرض کنید که بردار  $\mathbf{W}(\mathbf{q})$  محدود است. یعنی

$$\|\mathbf{W}(\mathbf{q})\| < \rho \quad (34)$$

که در آن  $\rho$  یک ثابت مثبت می باشد. قانون کنترل مورد لغزشی به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$\mathbf{U} = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{q}) [\dot{\mathbf{v}}_c + \beta \mathbf{E}_c + (\rho + \eta)(\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|)] \quad (35)$$

با در نظر گرفتن  $\gamma$  به جای ضریب  $\rho + \eta$  معادله (۳۵) به شکل زیر در می آید

$$\mathbf{U} = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{q}) [\dot{\mathbf{v}}_c + \beta \mathbf{E}_c + \gamma \mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|] \quad (36)$$

فرض می نماییم که  $\gamma$  دارای مقدار مناسب  $\gamma^*$  می باشد. پس در این قسمت با پیشنهاد یک تابع مثبت معین مناسب جهت دستیابی به مقدار مناسب  $\gamma^*$  قانون تطبیق محاسبه می گردد. پس با تعریف  $\tilde{\gamma}$  به عنوان خطای تقریب  $\tilde{\gamma} = \gamma - \gamma^*$  تابع مثبت معین زیر را پیشنهاد می دهیم.

$$L_2(S, \tilde{\gamma}) = \frac{1}{2} S^T S + \frac{1}{2\alpha} \tilde{\gamma}^2 \quad (37)$$

با مشتق گیری زمانی از معادله (۳۷) داریم

$$\dot{L}_2(S, \tilde{\gamma}) = S^T \dot{S} + \frac{1}{\alpha} \tilde{\gamma} \dot{\tilde{\gamma}} \quad (38)$$

از آنجا که باید  $\dot{\mathbf{S}}^T (\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|) \leq -\eta$  می توان پیشنهاد داد که  $\dot{\mathbf{S}}^T (\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|) = -\gamma$  که  $\gamma > \eta$ . با جایگذاری (۳۵) در

$$(38) \text{ و رابطه } \dot{\mathbf{S}}^T (\mathbf{S} / \|\mathbf{S}\|) = -\gamma \text{ داریم}$$

کننده ولتاژ موتورها را در هر لحظه به نحوی اعمال می نماید که همگرایی  $\mathbf{v}(t) \rightarrow \mathbf{v}_c(t)$  و کاهش خطای ردگیری تضمین گردد. جهت طراحی کنترل کننده مود لغزشی، مدل ربات متحرک را به صورت زیر در نظر گرفته

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{H}(\mathbf{q})\mathbf{U} + \mathbf{W}(\mathbf{q}) \quad (23)$$

که ماتریس سیستم  $\mathbf{H}(\mathbf{q})$  و بردار نا معینی ها  $\mathbf{W}(\mathbf{q})$  برابر اند با

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{q}) &= \bar{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \mathbf{k}_m \mathbf{R}_a^{-1} \\ \mathbf{W}(\mathbf{q}) &= \bar{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q}) [\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{v} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \bar{\mathbf{F}}(\dot{\mathbf{q}}) + \bar{\tau}_a] \end{aligned} \quad (24)$$

این کنترل کننده، ولتاژ موتورها را به نحوی محاسبه می نماید که سرعت واقعی ربات به سرعت مطلوب در معادله (۲۲) همگرا گردد. بردار خطای سرعت  $\mathbf{E}_c$  را به صورت زیر تعریف می نماییم.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_c &= \mathbf{v}_c - \mathbf{v} \\ &= [e_{c1} \quad e_{c2}]^T \end{aligned} \quad (25)$$

با در نظر گرفتن معادله (۲۳) مشاهده می گردد که این معادله به صورت غیرخطی و از مرتبه یک می باشد. پس صفحه لغزش به صورت تناسبی-انتگرالی ( $\mathbf{PI}$ ) پیشنهاد می شود.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \mathbf{E}_c + \beta \int_0^t \mathbf{E}_c dt' \quad (26)$$

که  $\beta$  ضریب انتگرالی است به نحوی که  $\beta > 0$  می باشد. حال با فرض اینکه مقدار  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$  باشد آنگاه  $\mathbf{E}_c = -\beta \int_0^t \mathbf{E}_c dt'$  پس اگر  $\beta > 0$  باشد معادله هورویتز

بوده  $\int_0^t \mathbf{E}_c dt'$  و  $\mathbf{E}_c$  هر یک به صورت نمایی به صفر

همگرا می گردند. یعنی  $\mathbf{E}_c \rightarrow \mathbf{0}$  as  $t \rightarrow \infty$ . مسیر حالت در دستگاه مختصات ردگیری باید به سوی سطح لغزش  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$  هدایت شود. یعنی  $\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{0}$  برقرار گردد. پس می توان تابع مثبت معین  $L_1(\mathbf{S})$  را به صورت زیر پیشنهاد داد.

$$L_1(\mathbf{S}) = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} \quad (27)$$

حال اگر بتوان شرط  $\dot{L}_1(\mathbf{S}) \leq 0$  را تضمین نمود آنگاه  $L_1(\mathbf{S}) \rightarrow 0$  و می توان گفت که  $\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{0}$  تضمین می گردد. با مشتق گیری از (۲۷)، داریم:

$$\dot{L}_1(\mathbf{S}) = \dot{\mathbf{S}}^T \mathbf{S} \quad (28)$$

بنابراین، با بکارگیری محدود کننده ولتاژ می توان محدودیت فوق را اعمال کرد. لازم است که در انتخاب موتور به این موضوع توجه نمود. به عبارت دیگر، موتور باید بتواند تحت ولتاژ مجاز ربات را به حرکت در آورد و وظیفه کنترلی خود را محقق سازد. بنابراین، موتور به اندازه کافی باید برای تعقیب مسیر پیشنهادی قوی باشد. این مهم می تواند در انتخاب موتور برای ربات مد نظر قرار گیرد. بنابراین، با فرض آنکه ولتاژ موتور کمتر از مقدار ماگزیمم باشد قانون کنترل پیشنهادی معتبر است. یعنی لازم است که

$$|U_i| \leq U_{\max} \quad (47)$$

$U_{\max}$  ماگزیمم ولتاژ موتور و  $U_i$  ولتاژ موتور  $i$ ام است. مادام که کنترل پیشنهادی به موتور اعمال شود پایداری سیستم کنترل برقرار است. چنانچه با اعمال محدودیت مذکور، خروجی کنترل کننده بیش از مقدار ولتاژ ماگزیمم باشد عملاً کنترل کننده از مدار خارج شده و صرفاً ولتاژ ماگزیمم به موتور اعمال می‌شود.

#### ۵- کنترل بهینه

در این بخش پارامترهای کنترل کننده سینماتیکی  $k_x$ ,  $k_y$  و  $k_\theta$  و پارامترهای کنترل کننده دینامیکی،  $\beta$  و  $\alpha$  را توسط الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات محاسبه می شوند. به دلیل پیچیدگی معادلات و غیر خطی بودن سیستم، یافتن مقادیر بهینه از روش های سنتی کنترل بهینه امکان پذیر نمی باشد. بررسی ها نشان می دهند که الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک از حجم محاسبه کمتر، پارامترهای طراحی کمتر و سرعت همگرایی بالاتر برخوردار است [۲۱].

به منظور بکارگیری الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات [۲۲] در یافتن پارامترهای بهینه سیستم کنترل، ابتدا تابع هدف جهت بهینه سازی را به صورت زیر پیشنهاد می دهیم.

$$f = \int_0^T E_q^T E_q dt \quad (48)$$

که  $T$  مدت زمان مسیر مطلوب از آغاز تا پایان است.

در الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات، هر پرده از موقعیت اولیه شروع به حرکت می نماید و تلاش می کند تا موقعیت خود  $x_i$  و جابجایی خود  $a_i$  را با توجه به تجربه های گذشته و همسایگانش بهبود ببخشد تا زمانی که شرایط توقف الگوریتم ایجاد گردد. جابجایی گروهی ذرات در فضای

$$\dot{L}_2(S, \tilde{\gamma}) = -\gamma \|S\| + \frac{1}{\alpha} \tilde{\gamma} \dot{\gamma} \quad (39)$$

با جایگذاری  $\gamma = \gamma^* + \tilde{\gamma}$  در معادله (۳۸) می توان نوشت

$$\dot{L}_2(S, \tilde{\gamma}) = -\gamma^* \|S\| - \tilde{\gamma} \|S\| + \frac{1}{\alpha} \tilde{\gamma} \dot{\gamma} \quad (40)$$

با توجه به معادله (۳۰) و مثبت بودن مقدار  $\gamma^*$  می توان گفت که  $-\gamma^* \|S\| \leq 0$  می باشد. پس با برابر صفر قرار دادن معادله  $0 = -\alpha \|S\| + \tilde{\gamma} \dot{\gamma} / \alpha$  نتیجه می شود  $\dot{\gamma} = -\alpha \|S\|$ . در نتیجه، قانون تطبیق را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\gamma(t) = -\alpha \int_0^t \|S\| dt' + \gamma(0) \quad (41)$$

با توجه به اینکه  $\dot{L}_2(S, \tilde{\gamma}) \leq 0$  است می توان اظهار نمود که در تمام لحظات

$$L_2(S, \tilde{\gamma}) \leq L_2(S(0), \tilde{\gamma}(0)) \quad (42)$$

بنابراین، می توان گفت که  $S$  و  $\gamma$  محدود می باشند. همچنین با محدود بودن  $S$  می توان ادعا نمود که  $\dot{E}_e$  و  $E_e$  محدود بوده و در نتیجه با توجه به اینکه  $v_e$  محدود می باشد سرعت ربات نیز محدود خواهد بود. پس می توان اظهار نمود که تمام متغیرهای حالت سیستم نیز محدود می باشند. در نتیجه، سیستم پایدار از نوع ورودی محدود-خروجی محدود می باشد.

قانون تطبیق (۴۱) حدود مناسب نا معینی ها را به راحتی محاسبه خواهد نمود. پس قانون کنترل مود لغزشی تطبیقی در نهایت به صورت می باشد.

$$U = H^{-1}(q) [\dot{v}_e + \beta E_e + \gamma(t) \text{sgn}(S)] \quad (43)$$

که در آن  $\text{sgn}(S) = [\text{sgn}(S_1) \quad \text{sgn}(S_2)]^T$  تابع علامت است. به منظور کاهش لرزش سیگنال کنترل، به جای تابع علامت  $\text{sgn}(\cdot)$  می توان از تابع اشباع  $\text{sat}(\cdot)$  استفاده نمود [۲۰] که

$$\text{sat}(S / \varepsilon) = [\text{sat}(S_1 / \varepsilon) \quad \text{sat}(S_2 / \varepsilon)]^T \quad (44)$$

$$\text{sat}(S_i / \varepsilon) = \begin{cases} 1 & S_i > \varepsilon \\ S_i / \varepsilon & |S_i| \leq \varepsilon \\ -1 & S_i < -\varepsilon \end{cases} \quad (45)$$

در نتیجه فرمول (۴۳) به صورت زیر باز نویسی می شود:

$$U = H^{-1}(q) \cdot [\dot{v}_e + \beta E_e + \gamma(t) \text{sat}(S / \varepsilon)] \quad (46)$$

بعلاوه، این مقاله با انتخاب تطبیقی حدود عدم قطعیت سعی در کاهش پدیده لرزش سیگنال کنترل دارد.

قابل توجه آنکه سیگنال کنترلی ولتاژ موتور است و موتورهای الکتریکی باید در برابر اضافه ولتاژ محدود شوند.

**مرحله ۵:** در صورت  $k+1 < k_{\max}$  و شرط توقف برقرار نباشد، یک مرحله به الگوریتم اضافه نموده  $k = k+1$  و به مرحله ۲ برگردید.

الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات بصورت "خارج از خط" قابل اجرا است و در طراحی و ارائه طرح بهینه کنترلی استفاده می شود. از آنجا که بهینه سازی وابسته به مسیر حرکت است، الگوریتم بهینه سازی باید برای هر مسیر اجرا شود. چنانچه مسیر حرکت عوض نشود یا تکرار شود بکارگیری الگوریتم بهینه سازی توصیه می شود. در این صورت، کنترل پیشنهادی عملکرد بهینه دارد. اگر مسیر عوض شود و الگوریتم بهینه سازی برای آن اجرا نشود، کنترل پیشنهادی دارای عملکرد بهینه نخواهد بود. زیرا بدون بکارگیری الگوریتم بهینه سازی، پارامترهای کنترل کننده تطبیقی به صورت دیگری خواهند بود که روی عملکرد کنترل کننده اثر دارد. از سوی دیگر، از آنجا که کنترل پیشنهادی از نوع مقاوم تطبیقی است می توان گفت حتی در صورت بهینه نبودن پارامترهای طراحی، عملکرد مناسبی در اجرای "بر خط" دارد.

جمعیت اولیه خیلی خوب انتخاب شده اند. تعداد پرنده ها بیست عدد است. الگوریتم استاندارد بهینه سازی گروه ذرات فرار از بهینه محلی را تضمین نمی کند ولی در مورد بکارگیری الگوریتم استاندارد بهینه سازی گروه ذرات در بهینه سازی مذکور، آن را چندین بار با شرایط اولیه مختلف اجرا نموده و هر بار به یک جواب رسیده ایم. بنابراین، بنظر می رسد که جواب حاصل بهینه محلی نمی باشد.

## ۶- شبیه سازی

در این بخش برای بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در بخش ۳، قانون کنترل (۴۶) را به مدل ربات متحرک (۱۷) اعمال نموده و نتایج را مورد بررسی قرار می دهیم. سپس، عملکرد این کنترل کننده با روش مود لغزشی ساده مقایسه می گردد. با توجه به مطالب بخش مدل سازی، ماتریس های سینماتیکی و دینامیکی سیستم عبارتند از:

$$\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \frac{2k_2}{r^2} & m_c d \dot{\theta} \\ -m_c d \dot{\theta} & \frac{2b^2 k_2}{r^2} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

جستجو توسط الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات استاندارد توسط معادله های زیر محاسبه می گردد [۲۲].

$$a_i(k+1) = w(k)a_i(k) + c_1 r_1 (x_{PB,i}(k) - x_i(k)) + c_2 r_2 (x_{GB}(k) - x_i(k)) \quad (48)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + a_i(k+1) \quad (49)$$

که  $k$  شماره مرحله جستجو،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی در بازه  $[0, 1]$ ،  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب آموزش و  $w(k)$  وزن اینرسی می باشد.  $x_{PB,i}(k)$  بهترین مکانی است که تا مرحله  $k$  ذره  $x_j$  تجربه کرده و  $x_{GB}(k)$  بهترین مکانی است که در میان کل گروه ذرات تا مرحله  $k$  تجربه شده است.  $x_{PB,i}(k)$  به صورت زیر محاسبه می شود: [۲۱]

$$x_{PB,i}(k) = \begin{cases} x_{PB,i}(k-1) & \text{if } f(x_{PB,i}(k-1)) \leq f(x_i(k)) \\ x_i(k) & \text{if } f(x_{PB,i}(k-1)) > f(x_i(k)) \end{cases} \quad (50)$$

سپس  $x_{GB}(k)$  را برای  $m$  ذره می توان به صورت زیر محاسبه نمود.

$$f(x_{GB}(k)) = \min \{f(x_{PB,1}(k)), \dots, f(x_{PB,m}(k))\} \quad (51)$$

وزن اینرسی  $w(k)$  در هر مرحله تاثیر سرعت قبلی را در آن مرحله مشخص می نماید. یک روش مرسوم جهت محاسبه  $w(k)$  تغییرات به صورت خطی بین دو آستانه بالا  $w_{\max}$  و پایین  $w_{\min}$  با شرط  $w(k) \in [w_{\min}, w_{\max}]$  برای همگرایی می باشد.  $0 < w_{\min} < w_{\max} < 1$  (۵۲)

$$w(k) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min})k / k_{\max}$$

الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات استاندارد را می توان به صورت زیر خلاصه نمود.

**مرحله ۱:** الگوریتم را در مرحله اول با مقداری تصادفی برای سرعت و موقعیت گروه ذرات آغاز نمایید.

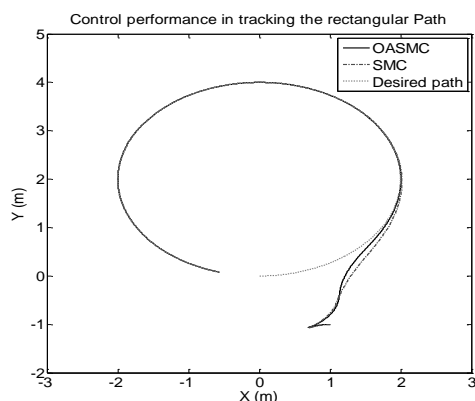
**مرحله ۲:** مقدار تابع هدف  $f(x_i(k))$  را برای هر پرنده محاسبه کنید.

**مرحله ۳:** مقدار  $x_{PB,i}(k)$  و  $x_{GB}(k)$  را با توجه به معادلات (۵۰) و (۵۱) محاسبه نمایید.

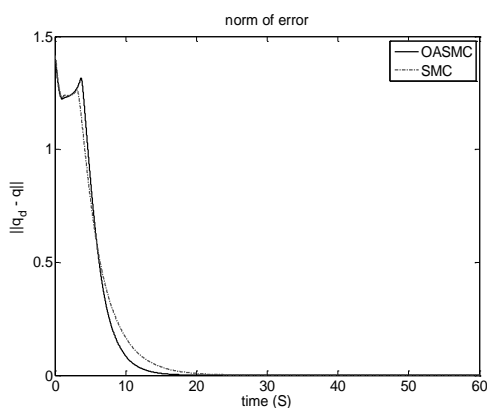
**مرحله ۴:** مقدار سرعت گروهی ذرات  $a_i(k+1)$  و موقعیت گروهی ذرات  $x_i(k+1)$  را به کمک معادلات (۴۹) و (۴۸) اصلاح نمایید.



الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات با ۲۰ پرنده و ۲۰ بار تکرار جهت یافتن مقادیر بهینه اجرا شده است. شکل ۹ همگرایی پارامترهای کنترلی  $k_x, k_y, k_\theta$  و  $\alpha$  و  $\beta$  به مقادیر بهینه در ۲۰ مرحله اجرای الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات را نمایش می دهد. شکل ۱۰ فرآیند کمینه سازی تابع هدف  $J$  در این ۲۰ مرحله را با نشان می دهد.



شکل ۴- ردگیری مسیر دایره ای



شکل ۵- خطای ردگیری

جدول ۱- پارامترهای ربات

$b(m)$	$d(m)$	$I(kgm^2)$	$m_c(kg)$	$r_w(m)$
۰.۲۶۵	۰.۱	۸	۳۲	۰.۱۲۵

$$\mathbf{X} = \bar{\mathbf{B}}^T(\mathbf{q}), \quad \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ b & -b \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \mathbf{0}$$

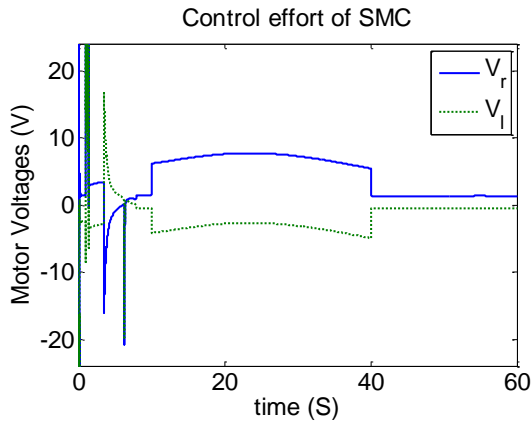
در حالی که  $m$  جرم کل سیستم،  $I$  ممان اینرسی سیستم حول مرکز ربات،  $r$  شعاع چرخ ربات،  $2b$  فاصله بین دو چرخ ربات،  $d$  فاصله مرکز جرم ربات تا چرخ های ربات و  $m_c$  جرم ربات بدون چرخ ها و ضریب  $k_2$  برابر با  $k_2 = k_m k_b n X / R_d$  می باشد. پارامترهای سیستم و موتور در جدول ۱ آمده است.

مقدار بیشینه ولتاژ محرکه های DC،  $U_{max}$  برابر ۲۴ ولت می باشد. مقدار اولیه بردار پارامتر تطبیق  $\gamma(0) = 10$  و مقدار بهینه گین های  $\alpha, \beta, k_x, k_y, k_\theta$  مطابق شکل ۹ انتخاب شده است. همچنین ربات در آغاز حرکت در مکان  $\mathbf{q}(0) = [1(m) \quad -1(m) \quad 0(rad)]^T$  قرار دارد. مسیر طراحی شده در شکل ۴ به صورت دایره می باشد. بردار نیروی ناشی از اصطکاک ربات  $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$  و اغتشاش خارجی  $\bar{\mathbf{t}}_d$  به ترتیب به صورت زیر می باشد.

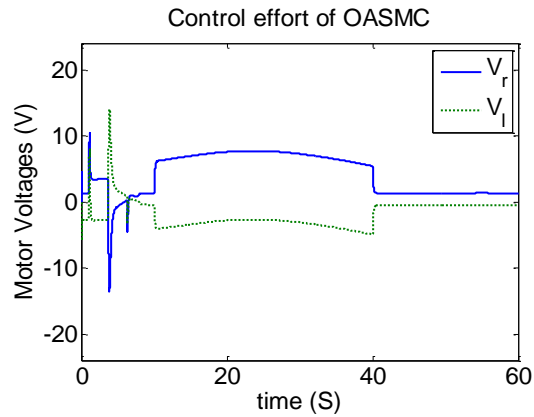
$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = 2\dot{\mathbf{q}} + 0.2\text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) \quad (53)$$

$$\bar{\mathbf{t}}_d = [1 \quad -1] \text{ if } 10 < t < 40 \text{ else } \bar{\mathbf{t}}_d = \mathbf{0} \quad (54)$$

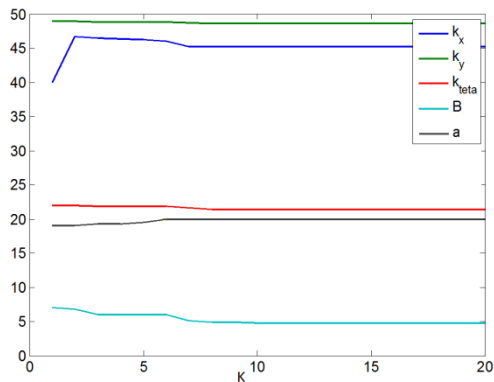
در شکل ۴ ردگیری مسیر دایره ای توسط ربات مشاهده می گردد. مسیر مطلوب (desired pass)، مسیر حاصل از اجرای کنترل مود لغزشی (SMC) و مسیر حاصل از اجرای کنترل مود لغزشی تطبیقی (OASMC). این سه مسیر که در آغاز متفاوتند بهم پیوسته و مسیر مطلوب ردگیری می شود. در شکل ۵ برای توجه به جزئیات، نرم خطای ردگیری در دو طرح کنترل مود لغزشی و طرح کنترل مود لغزشی تطبیقی ترسیم شده اند. در هر دو طرح، مشاهده می شود که خطای ردگیری سریعاً به مقدار کوچکی همگرا می گردد. شکل ۶ تلاش کنترلی طرح کنترل مود لغزشی تطبیقی را نشان می دهد. مشاهده می شود که در ابتدا ناپیوستگی در سیگنال دیده می شود و رفته رفته این ناپیوستگی از بین می رود. مکانیزم تطبیق در کاهش لرزش سیگنال کنترلی نقش بسزایی را ایفا نموده است. در حالی که لرزش سیگنال طرح مود لغزشی در ۵ ثانیه نخست حرکت در شکل ۷ بسیار شدید است. حرکت پارامترهای تطبیقی طرح پیشنهادی در شکل ۸ مشاهده می شوند. در نیمه دوم مسیر به مقدار ثابتی همگرا شده اند.



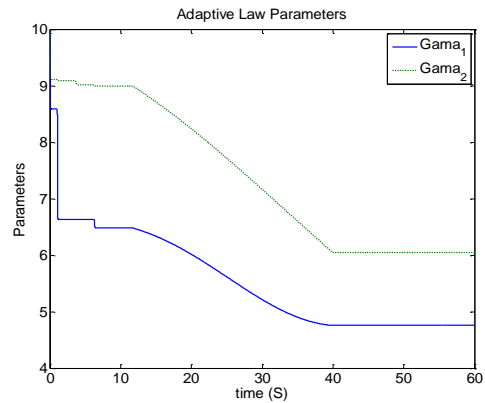
شکل ۷- تلاش کنترلی کنترل مود لغزشی



شکل ۶- تلاش کنترلی کنترل تطبیقی مود لغزشی بهینه



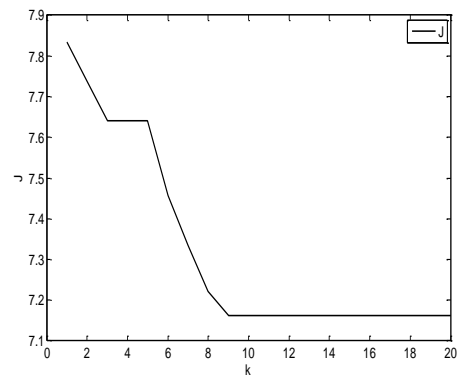
شکل ۹- مقادیر بهینه پارامترهای طراحی



شکل ۸- پارامترها تطبیق فرمول

### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله مدل فضای حالت جدیدی برای ربات متحرک با محرکه‌های DC ارائه شده و کنترل کننده نوین مود لغزشی تطبیقی برای ربات متحرک طراحی گردیده است. طراحی این کنترل کننده مبتنی بر روش لیاپانوف بوده و پایداری را تضمین می نماید. مکانیزم تطبیق پیشنهادی نیز حد بالای عدم قطعیت ها را به خوبی تقریب زده است. در نتیجه لرزش سیگنال کنترلی محو شده است. در انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده، از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات استفاده شده است. نتایج شبیه سازی برتری روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم مود لغزشی را نشان می دهد.



شکل ۱۰- مقدار تابع هدف

جدول ۲- پارامترهای موتورها

$r_g$	$R_a (\Omega)$	$L_a (mH)$	$K_m (N.m / A)$	$K_b$
۰.۰۵	۰.۵	۰.۲	۰.۵۷	۰.۵۷

- mobile robot via neural networks. *Neurocomputing* 88: 54–66.
- [13] Hou Z, Zou A, Cheng L, Tan M (2009) Adaptive Control of an electrically driven Nonholonomic mobile robot via backstepping and fuzzy approach. *IEEE Trans Control System Technology* 17(4): 803–815.
- [14] Su KH, Chen YY, Su SF (2010) Design of neural-fuzzy-based controller for two autonomously driven wheeled robot. *Neurocomputing* 73(13-15): 2478–2488.
- [15] Martiácuti R, nezSoto O Castillo, Aguilar LT (2009) Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous wheeled mobile robot using genetic algorithms. *J Int Sci* 179(13): 2158–2174.
- [16] Sharma KD, Chatterjee A, Rakshit A (2012) A PSO–Lyapunov hybrid stable adaptive fuzzy tracking control approach for vision-based robot navigation. *IEEE Trans on Instrumentation and measurement* 61(7): 1908–1914.
- [17] Hwang C, Chang N (2008) Fuzzy decentralized sliding-mode control of a car-like mobile robot in distributed sensor-network spaces. *IEEE Trans on fuzzy system* 16(1): 97–109.
- [18] Fateh MM (2010) Proper uncertainty bound parameter to robust control of electrical manipulators using nominal model. *Nonlinear Dyn* 61(4): 655–666.
- [19] Fateh MM (2008) On the voltage-based control of robot manipulators. *Int J Cont Autom Syst* 6(5): 702–712.
- [20] Slotine JJE, Li W (1991) *Applied nonlinear control*. Prentice Hall, Inc.
- [21] Kennedy J, Eberhart RC, Shi Y (2001) *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco.
- [22] Kennedy J, Eberhart R (1995) Particle swarm optimization. In: *Proc IEEE Int Conf on Neural Networks*, Piscataway, NJ, 4: 1942–1948.
- مراجع
- [1] Nourbakhsh IR, Siegwart R (2004) *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press, MA, USA.
- [2] Jiang ZP, Nijmeijer H (1997) Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping. *Automatica* 33(7): 1393–1399.
- [3] Kanayama Y (1990) A stable tracking control method for an autonomous mobile robot. *Proc IEEE Conf on Robotics Automation*, 13-18 May, Cincinnati, OH, 1: 384–389.
- [4] Chung Y, Park C, Harashima F (2001) A position control differential drive wheeled mobile robot. *IEEE Trans Ind Control* 48(4): 853–863.
- [5] Chen H, Ma MM, Wang H, Liu ZY, Cai ZX (2009) Moving horizon  $H_\infty$  tracking control of wheeled mobile robots with actuator saturation. *IEEE Trans Control Syst Technol* 17(2): 449–457.
- [6] Yang JM, Kim JH (1999) Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots. *IEEE Trans Robot* 15(3): 578–587.
- [7] Fukao T, Nakagawa H, Adachi N (2000) Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot. *IEEE Trans Neural Network* 16(5): 609–615.
- [8] Chen C, Li TS, Yeh Y, Chang CC (2009) Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots. *mechatronics* 19: 156–166.
- [9] Shojaei K, Mohammad-Shahri A, Tarakameh A (2011) Adaptive feedback linearizing control of nonholonomic wheeled mobile robots in presence of parametric and nonparametric uncertainties. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27(1): 194–204.
- [10] Biglarbegian M (2012), A Novel Robust Leader-Following Control Design for Mobile Robots, *J Intell Robot Syst* DOI 10.1007/s10846-012-9795.
- [11] Fierro R, Lewis FL (1998) Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks. *IEEE Trans Neural Networks* 9(4): 589–600.
- [12] Mohareri O, Dhaouadi R, Rad AB (2012) Indirect adaptive tracking control of a nonholonomic