

# کنترل غیرخطی روبات سیار چرخدار با روش محاسبات فازی

جعفر کیقبادی<sup>i</sup>؛ محمدباقر منهاج<sup>ii</sup>؛ منصور کبگانیان<sup>iii</sup>

## چکیده

در این مقاله، کنترل غیرخطی روبات سیار چرخدار برای پیمودن مسیره‌های مطلوب ارایه می‌شود. روبات سیار دو چرخ محرک مستقل و دینامیک غیرهولونوم دارد و امروزه افراد زیادی این مسأله را در کاربردهای گوناگون عنوان کرده‌اند. در کنترل غیرخطی روبات سیار، پارامترهای نامعین بایستی تخمین زده شود. در این مقاله تاثیر معادلات جدید دینامیکی در مختصات ثابت (Global) و متحرک (Local) بر سیستم کنترلی و تخمین پارامترهای نامعین روبات بررسی می‌شود. مدل دینامیکی ارایه شده در مختصات ثابت، خواص مفیدی برای طراحی سیستم کنترلی غیرخطی دارد. با استفاده از این مدل امکان جبران انحراف زیاد از مسیر مطلوب به وجود آمده و ماتریس رگرسیون جدید غنی می‌شود؛ بدین مفهوم که تخمین دقیق پارامترها انجام می‌شود. سیستم کنترلی جدید غیرخطی؛ که پارامترهای آن با محاسبات فازی (قواعد اگر-آنگاه فازی) تنظیم می‌شود، طراحی شده است. با تنظیم فازی پارامترهای سیستم کنترلی، مقاومت آن به نویزهای اندازه‌گیری افزایش یافته و گشتاور ورودی سیستم کاهش می‌یابد. سپس یک کنترل‌کننده فازی جدید؛ که فقط براساس قواعد زبانی کنترل خطای تعقیب مسیره‌های مطلوب را انجام می‌دهد، طراحی می‌شود. در این سیستم کنترلی؛ که ساختار ساده‌تری دارد، حذف فرایند تخمین پارامترها موجب افزایش کارایی و سرعت سیستم کنترلی می‌شود.

## کلمات کلیدی:

روبات سیار، مدل‌سازی دینامیکی، کنترل غیرخطی، تطبیقی، فازی، تخمین پارامتر، شناسایی سیستم

## *Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robot: A Fuzzy Approach*

Jafar Keyghobadi, Mohammad B. Menhaj and Mansour Kabganian

### ABSTRACT

In this paper, nonlinear control for path tracking of a 2-DOF Wheeled Mobile Robot (WMR) is presented. This problem nowadays has been tackled by many authors in various applications. Nonlinear control for WMRs requires unknown parameters estimation. This paper fully examines the effects of new dynamical models in both local and global coordinates on both estimation and tracking. The dynamic model in global coordinates has a profound effect on designing a nonlinear control, because it makes perfect compensation for initial off-track conditions and let the regressor matrix be highly excited leading to a better parameter estimation. A nonlinear controller whose parameters are tuned using fuzzy computations is developed. It is shown that fuzzy tuning of the controller instead of keeping the gains fixed makes the overall system more robust against noise while the input torque is remarkably reduced. This paper further introduces a fuzzy controller merely based on linguistic rules to control the WMR tracking problem. In this approach, in order to make the design simple and yet efficient, the process of parameter estimation which is very time consuming is eliminated.

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، keighobadi@aut.ac.ir

<sup>ii</sup> استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، mbmenhaj@yahoo.com

<sup>iii</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، kabgan@aut.ac.ir

## KEYWORDS:

Mobile Robot, Dynamic Modelling, Nonlinear control, Adaptive, Fuzzy, Estimation, Identification.

## ۱- مقدمه

موضوع این مقاله، کنترل خطای تعقیب موقعیت و سرعت روبات سیار چرخدار دو درجه آزادی غیرهولونم از مسیره‌های مطلوب است. در این مقاله، کنترل غیرخطی WMR (Wheeled Mobile Robot) برای دنبال کردن مسیره‌های مطلوب با استفاده از مدل‌های جدید دینامیکی ثابت (Global) و متحرک (Local) انجام می‌شود. مدل‌سازی دینامیکی را می‌توان با روش‌های نیوتن-اولیر، معادلات لاگرانژ، معادلات کین و غیره انجام داد [۱۴]. اوریلو نشان داده است که پس‌خوراند خطی‌ساز یک ابزار طراحی کارا برای هر دو نوع مسأله تعقیب و رگولاتور WMR می‌باشد [۱۱]. دونگ، کنترل خطای تعقیب مسیر برای روبات سیار با دینامیک نامعلوم را انجام داده است؛ اما تخمین پارامترهای نامعین و تأثیر نویز ملاحظه نشده است [۲]. در کنترل تطبیقی سیستم‌های غیرخطی بایستی پارامترهای نامعین شناسایی شوند [۵]، [۶]. سیستم کنترل طراحی شده براساس دینامیک محلی، تعقیب کامل مسیره‌ها را با دقت بالایی انجام می‌دهد، اما انحراف اولیه روبات از مسیر حرکت را تشخیص نداده و کاری برای جبران آن نمی‌کند. در طراحی این نوع سیستم کنترل باید فرضیات عدم لغزش، عدم اصطکاک، هموار بودن مسیر حرکت و صلبیت مجموعه روبات و مسیر لحاظ شود. در طراحی سیستم کنترلی با استفاده از دینامیک ثابت این فرضیات ضرورتی ندارند؛ اما پیچیدگی محاسباتی افزایش می‌یابد. در این مقاله، پارامترهای نامعین به روش خودتنظیم و با استفاده از ضریب فراموشی نمایی تخمین زده می‌شوند. تخمین پارامترها در سیستم کنترلی غیرخطی با دینامیک ثابت بدون تورش (Bias) و با سرعت زیادی انجام می‌گیرد. این بخاطر غنی بودن ماتریس رگرسیون معادلات دینامیکی ثابت است؛ اما تخمین پارامترها بر اساس معادلات دینامیک محلی با تورش بزرگی همراه است.

اندازه‌گیری مختصه‌های دینامیک ثابت نیازمند استفاده از روش‌های پرهزینه مانند ناوبری اینرسی است. به علت دریافت ژيروسکوپ و سایر خطاهای موجود در حساسه‌های اینرسی، ضروری است سیستم اینرسی را با سیستم‌های کمکی از قبیل سیستم موقعیت‌یاب جهانی، دوربین‌های تصویری و غیره که کواریانس خطای آنها مستقل از زمان است، ترکیب کرد [۱۳]. تخمین پارامترهای روبات سیار غیرهولونم با قیود انتگرال‌ناپذیر برای تعقیب مسیر به وسیله محققین زیادی به

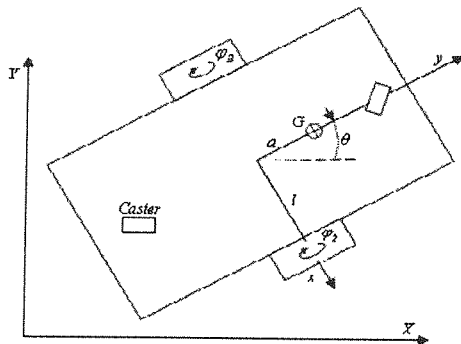
انجام رسیده است [۲]-[۴]، [۷]، [۱۰]، [۱۶]. برخی از آنها، قوام سیستم کنترلی را با وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل دینامیکی بررسی کرده‌اند. در این مقاله، قوام سیستم‌های کنترلی طراحی شده به تغییر زیاد پارامترهای WMR بررسی می‌شود. محاسبات فازی روش دیگری برای طراحی سیستم کنترلی تعقیب مسیر برای WMR است [۸]، [۹]. کنترل فازی موقعیت روبات سیاری را؛ که ساختمان ساده و متقارن دارد، Lee و سایرین انجام داده‌اند؛ اما کنترل سرعت و خطای تعقیب آن انجام نشده است [۹]. Yim و باتلر، طراحی حرکت روبات سیار با محاسبات فازی و به کمک دو حسگر فاصله‌یاب را انجام داده‌اند؛ ولی بحثی روی همگرایی خطا ارائه نشده است [۱۸]. سیستم کنترل فازی تنظیم شده با کنترل‌کننده تناسبی موجب بهبود عملکرد روبات شده است. آنها کنترل فازی Heuristic را برای انجام تعقیب مسیر استفاده کرده‌اند. این سیستم کنترلی فقط برای حالت‌های خاصی از فاصله شعاعی و زاویه سمت روبات؛ که ورودی‌های سیستم فازی هستند، طراحی شده و تعقیب مسیر سرعت حتی برای حالت خاص انجام نشده است. سیستم کنترلی Locomotion براساس تلفیق کنترل‌کننده‌های سینماتیکی و شبکه‌ای-فازی انجام شده است. روش یاددهی تکاملی خطای پس‌خور، برای به کارگیری دانش فرد خبره با قوانین اگر-آنگاه فازی ارائه شده است [۱۵]. کاربرد کنترل‌کننده‌های فازی و PID برای کنترل سرعت WMR نشان داده است که هر دو سیستم عملکرد مشابهی دارند؛ اما پیاده‌سازی PID مشکلات بیشتری دارد [۸]. است.

در کارهای قبلی که محاسبات فازی برای مسأله تعقیب مسیر WMR استفاده شده است، تعقیب کامل مسیره‌های سرعت، موقعیت و قوام سیستم کنترلی به نویز اندازه‌گیری بررسی نشده است. در این مقاله دو سیستم جدید کنترلی برای انجام تعقیب کامل مسیره‌های سرعت و موقعیت WMR طراحی می‌شود. سیستم اول ساختار غیرخطی دارد که پارامترهای آن با محاسبات فازی تنظیم می‌شود. محاسبات فازی گشتاور دریافتی از موتور محرک را کاهش داده و موجب هموار شدن منحنی آن می‌شود؛ بعلاوه قوام سیستم به نویز اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. برای حذف محاسبات تخمین پارامترها، سیستم کنترلی جدید دوم؛ که فقط از قوانین اگر-آنگاه فازی استفاده می‌کند طراحی می‌شود. قوانین فازی براساس رابطه گشتاور ورودی چرخ‌ها با سرعت و موقعیت زاویه‌ای تولید می‌شوند.

در بخش دوم مقاله، مدل‌های جدید دینامیکی WMR ارائه می‌شود. در بخش سوم، کنترل غیرخطی WMR و در بخش

$$m_{12} = m_{21} = M\left(\frac{R^2}{4} - \frac{aR^2}{4l^2}\right) - I_z\left(\frac{R}{2l}\right)^2 \quad (10)$$

در (۸)،  $T \in R^2$  گشتاور ورودی به چرخ‌های محرک و  $V(q, \theta)$  توابع غیرخطی از پارامترها و حالت‌های سیستم است. در شکل (۱) پارامترهای هندسی  $R$  شعاع چرخ محرک،  $a$  فاصله



شکل (۱): شماتیک مدل روبات و مختصه‌های عمومی مربوطه

محور محرک از مرکز جرم و  $2l$  طول محور است. با استفاده از قیود سینماتیکی (۲) تا (۵) معادلات دینامیک متحرک (۱۱) با مختصه‌های  $x$  و  $y$  به دست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_{21} - m_{11})l/aR & (m_{12} + m_{22})/R \\ (m_{11} - m_{12})l/aR & (m_{21} + m_{22})/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + V \quad (11)$$

معادلات جدید دینامیکی در مختصات ثابت  $X, Y$  با استفاده

از (۱) تا (۷) به شکل زیر استخراج می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix} + V(X, Y, \dot{X}, \dot{Y}, \theta) \quad (12)$$

$$m_{11} = \left(\frac{-MaR}{2l} - \frac{l}{aR}I - \frac{R}{2la}I_z\right)\cos\theta - \left(\frac{1}{R}I + M\frac{R}{2}\right)\sin\theta$$

$$m_{12} = \left(\frac{-MaR}{2l} - \frac{l}{aR}I - \frac{R}{2la}I_z\right)\sin\theta + \left(\frac{1}{R}I + M\frac{R}{2}\right)\cos\theta$$

$$m_{21} = \left(\frac{MaR}{2l} + \frac{l}{aR}I + \frac{R}{2la}I_z\right)\cos\theta - \left(\frac{1}{R}I + M\frac{R}{2}\right)\sin\theta$$

$$m_{22} = \left(\frac{MaR}{2l} + \frac{l}{aR}I + \frac{R}{2la}I_z\right)\sin\theta + \left(\frac{1}{R}I + M\frac{R}{2}\right)\cos\theta$$

مؤلفه‌های  $V$  در دینامیک جدید (۱۲) به شکل زیر است:

$$v_1 = \left(\frac{MaR}{2l} + \frac{l}{aR}I + \frac{R}{2la}I_z\right)(\dot{X}\dot{\theta}\sin\theta - \dot{Y}\dot{\theta}\cos\theta) + \left(\frac{1}{R}I + M\frac{R}{2}\right)(-\dot{X}\dot{\theta}\cos\theta - \dot{Y}\dot{\theta}\sin\theta) - \frac{R}{2a}M(\dot{X}\cos\theta + \dot{Y}\sin\theta)^2 - \frac{R}{2l}M(\dot{X}\cos\theta + \dot{Y}\sin\theta)(-\dot{X}\sin\theta + \dot{Y}\cos\theta) \quad (13)$$

$$v_2 = \left(\frac{MaR}{2l} + \frac{l}{aR}I + \frac{R}{2la}I_z\right)(-\dot{X}\dot{\theta}\sin\theta + \dot{Y}\dot{\theta}\cos\theta) + \left(\frac{1}{R}I + M\frac{R}{2}\right)(-\dot{X}\dot{\theta}\cos\theta - \dot{Y}\dot{\theta}\sin\theta) - \frac{R}{2a}M(\dot{X}\cos\theta + \dot{Y}\sin\theta)^2 + \frac{R}{2l}M(\dot{X}\cos\theta + \dot{Y}\sin\theta)(-\dot{X}\sin\theta + \dot{Y}\cos\theta) \quad (14)$$

چهارم، دو سیستم جدید فازی و ویژه‌گی‌های آنها ارایه می‌شود. در دو بخش ۵ و ۶ عملکرد سیستم‌های کنترلی طراحی شده در بخش‌های قبلی به ترتیب روی WMR با پارامترهای متغیر و نویزهای اندازه‌گیری بررسی می‌شود. نهایتاً در بخش هفتم، نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری مقاله ارایه می‌شود.

## ۲- مدل دینامیکی

بدنه روبات سیار مطابق شکل (۱) توسط دو چرخ محرک مستقل و دو چرخ هرزگرد حمل می‌شود. گشتاور سیستم کنترل موقعیت و وضعیت، از دو موتور متصل به چرخ‌های محرک تأمین می‌شود. مختصه‌های عمومی  $q$  در مدل‌سازی دینامیکی روبات با روش لاگرانژ استفاده می‌شود [۱]:

$$q = [X \ Y \ x \ y \ \theta \ \varphi_2 \ \varphi_3] \quad (1)$$

در این رابطه  $Y, X$  موقعیت مرکز جرم روبات سیار در دستگاه مختصات ثابت و  $x, y$  مختصه‌های متحرک چسبیده به مرکز جرم هستند.  $\varphi = [\varphi_2 \ \varphi_3]^T$  زاویه دوران چرخ‌های محرک و  $\theta$  زاویه سمت روبات از محور  $X$  است. شکل (۱) شماتیک روبات سیار و مختصه‌های عمومی را نشان می‌دهد. لاگرانژین  $L$  برای استخراج معادلات دینامیکی در نظر گرفته می‌شود:

$$L = \frac{1}{2}M(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}(\dot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_3^2) \quad (2)$$

که  $M$  و  $I_z$  جرم و ممان اینرسی روبات حول محور قائم و  $I$  ممان اینرسی چرخ محرک است. از سینماتیک روبات در حرکت بدون لغزش قیود (۲) تا (۵) به دست می‌آیند:

$$\dot{x} = -\frac{aR}{2l}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) \quad (3)$$

$$\dot{y} = \frac{R}{2}(\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = \frac{R}{2l}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) \quad (5)$$

در استخراج معادلات دینامیک، ماتریس تبدیل از مختصات

متحرک به مختصات ثابت (۶) استفاده می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

با استفاده از روش لاگرانژ معادلات دینامیکی (۷) با عباراتی

از مختصه‌های متحرک  $\varphi_2$  و  $\varphi_3$  نتیجه می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \end{bmatrix} + M\frac{aR^3}{4l^2} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_2\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_3^2 \\ \dot{\varphi}_2\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

و یا به شکل ماتریسی (۸) تا (۱۰) می‌توان نوشت:

$$T \quad M\ddot{\varphi} \quad V \quad (8)$$

$$m_{11} = m_{22} = I + M\left(\frac{R^2}{4} + \frac{a^2R^2}{4l^2}\right) + I_z\left(\frac{R}{2l}\right)^2 \quad (9)$$

$$w_{23} = -R^2(\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_3)/4l^2 \quad (29)$$

مؤلفه‌های  $W$  برای مدل (۱۲) مطابق (۳۰) تا (۳۵) است. خطا و سرعت همگرایی تخمین پارامترها به میزان غنی بودن ماتریس رگرسور  $W$  بستگی دارد. معیار بررسی غنای سیستم

$$w_{11} = \frac{-aR}{2l}(\cos\theta\ddot{x} + \sin\theta\ddot{y}) - \frac{R}{2}(\sin\theta\dot{x} + \cos\theta\dot{y}) + \frac{aR}{2l}(\sin\theta\dot{x} - \cos\theta\dot{y})\dot{\theta} - \frac{R}{2}(\sin\theta\dot{y} + \cos\theta\dot{x})\dot{\theta} - \frac{R}{2a}(\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta)^2 - \frac{R}{2l}(\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta)(\dot{x}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta) \quad (30)$$

$$w_{12} = \frac{-l}{aR}\cos\theta\ddot{x} - \frac{1}{R}\sin\theta\ddot{x} - \frac{l}{aR}\sin\theta\ddot{y} + \frac{1}{R}\cos\theta\ddot{y} + \frac{l}{aR}(\sin\theta\dot{x} - \cos\theta\dot{y})\dot{\theta} - \frac{1}{R}(\sin\theta\dot{y} + \cos\theta\dot{x})\dot{\theta} \quad (31)$$

$$w_{13} = \frac{-R}{2la}\cos\theta\ddot{x} - \frac{R}{2la}\sin\theta\ddot{y} - \frac{R}{2la}(\sin\theta\dot{x} \cos\theta\dot{y})\dot{\theta} \quad (32)$$

$$w_{21} = \frac{aR}{2l}(\cos\theta\ddot{x} + \sin\theta\ddot{y}) - \frac{R}{2}(\sin\theta\dot{x} + \cos\theta\dot{y}) - \frac{aR}{2l}(\sin\theta\dot{x} - \cos\theta\dot{y})\dot{\theta} - \frac{R}{2}(\sin\theta\dot{y} + \cos\theta\dot{x})\dot{\theta} - \frac{R}{2a}(\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta)(\dot{x}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta) \quad (33)$$

$$w_{22} = \frac{l}{aR}\cos\theta\ddot{x} - \frac{1}{R}\sin\theta\ddot{x} + \frac{l}{aR}\sin\theta\ddot{y} + \frac{1}{R}\cos\theta\ddot{y} + \frac{l}{aR}(-\sin\theta\dot{x} + \cos\theta\dot{y})\dot{\theta} - \frac{1}{R}(\sin\theta\dot{y} + \cos\theta\dot{x})\dot{\theta} \quad (34)$$

$$w_{23} = \frac{R}{2la}\cos\theta\ddot{x} + \frac{R}{2la}\sin\theta\ddot{y} - \frac{R}{2la}(\sin\theta\dot{x} \cos\theta\dot{y})\dot{\theta} \quad (35)$$

دینامیکی و در نتیجه تخمین بدون تورش پارامترها شرط انتگرالی (۲۶) است و اگر ثابت‌های مثبت  $T, \alpha$  یافت شوند، طوری که (۲۶) برقرار باشد، آنگاه خطای تخمین بردار پارامترها به صورت نمایی به صفر همگرا می‌شود [۱۲].

$$\int_t^{t+T} W^T W dr \geq \alpha I \quad (36)$$

ماتریس رگرسور بیان شده در (۳۰) تا (۳۵) به علت عبارت‌های سینوسی فراوان از غنای زیادی برخوردار است. انتگرال (۲۷) نشان می‌دهد که  $\alpha$  برای هر بازه زمانی  $T$  و حتی برای  $T \rightarrow \infty$  برای عبارت‌های سینوسی وجود دارد.

$$\int_t^{t+T} \sin^2 r dr = |.5r - .25\sin 2r|_t^{t+T} \quad (37)$$

قانون کنترلی پسخور خطی‌ساز (۱۵) تا (۱۹) و تخمین پارامترها (۲۲) تا (۲۳) مطابق بلوک دیاگرام (۲) با استفاده از سه مدل دینامیکی به کار گرفته می‌شود تا روبات مسیر مطلوب دایره‌ای با معادلات زیر برای  $\theta, \varphi_2$  و  $\varphi_3$  را تعقیب کند [۱].

$$\theta = 20\pi^3 / 60^3 - 30\pi^4 / 60^4 + 12\pi^5 / 60^5 \quad (38)$$

$$\dot{\varphi}_2 = 3.9596\dot{\theta} + 100\theta \quad (39)$$

$$\dot{\varphi}_3 = -3.9596\dot{\theta} + 100\theta \quad (40)$$

شبیه‌سازی در شکل‌های (۳) نشان می‌دهد که کنترل‌کننده

سیستم کنترلی پسخور خطی‌ساز؛ که روشی براساس مدل است، با استفاده از هر سه مدل دینامیکی روبات، که در بخش قبل به دست آمد، به شکل (۱۵) تولید می‌شود:

$$T \hat{M} U \hat{V} \quad (15)$$

که در آن  $\hat{M}$  و  $\hat{V}$  تخمین ماتریس اینرسی  $M$  و بردار غیرخطی  $V$  هستند. برای معادلات دینامیکی (۷) داریم:

$$U = \ddot{\varphi}_d - k_d \dot{e} - k_p e \quad (16)$$

$$e = \varphi - \varphi_d \quad (17)$$

برای مدل‌های دینامیکی جدید (۱۱) و (۱۲) می‌توان نوشت:

$$U = \begin{bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} - k_d \dot{e} - k_p e, \quad e = [x \ y]^T \quad (18)$$

$$U = \begin{bmatrix} \ddot{X}_d \\ \ddot{Y}_d \end{bmatrix} - k_d \dot{e} - k_p e, \quad e = [X \ Y]^T \quad (19)$$

نرخ همگرایی خطاهای تعقیب  $e$  و با پارامترهای  $k_p$  و  $k_d$  تنظیم می‌شود. برای استفاده از قانون کنترل (۱۵) باید پارامترهای نامعین  $P = [M, I_z, I]$  تخمین زده شوند که برای این منظور از کمینه کردن تابع هزینه (۲۰) استفاده می‌شود.

$$J = \int_0^t e^T e ds - \int_0^t \lambda(r) dr \quad (20)$$

که در آن  $e_p = \hat{T} - T$  بردار خطای پیش‌بینی و  $\lambda$  ضریب فراموشی نمایی است. معادلات دینامیکی به شکل ماتریس رگرسور  $T = WP$  مرتب می‌شوند. تخمین بردار گشتاور  $\hat{T}$  را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\hat{T} = W\hat{P} \quad (21)$$

با کمینه کردن  $J$  نسبت به بردار خطای  $e_p$ ، دینامیک تخمین پارامترها و ماتریس بهره  $\Gamma$  به شکل زیر درمی‌آید:

$$\dot{\hat{P}} = -\Gamma W^T e_p \quad (22)$$

$$\dot{\Gamma} = \lambda(1 - \|\Gamma\|)\Gamma - \Gamma W^T W \Gamma \quad (23)$$

نرم ماتریس  $\|\Gamma\|$ ، بزرگ‌ترین مقدار تکین آن  $\sigma_{\Gamma}$  است. مؤلفه‌های  $W$  برای دینامیک (۸) به شکل (۲۴) تا (۲۹) درمی‌آید:

$$w_{11} = R^2(\ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3)/4 + a^2 R^2(\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_3)^2/4l^2 + aR^3(\dot{\varphi}_2\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_3^2)/4l^2 \quad (24)$$

$$w_{12} = \ddot{\varphi}_2 \quad (25)$$

$$w_{13} = R^2(\ddot{\varphi}_2 - \ddot{\varphi}_3)/4l^2 \quad (26)$$

$$w_{21} = R^2(\ddot{\varphi}_2 + \ddot{\varphi}_3)/4 + a^2 R^2(\ddot{\varphi}_3 - \ddot{\varphi}_2)^2/4l^2 + aR^3(\dot{\varphi}_2\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2^2)/4l^2 \quad (27)$$

$$w_{22} = \ddot{\varphi}_3 \quad (28)$$

$$y^* = (y^1 w_1 + y^2 w_2) / (w_1 + w_2) \quad (43)$$

که  $w_1$  و  $w_2$  درجه ارتفاع مجموعه‌های فازی است. عملگرهای ضرب جبری برای  $t$  نرم،  $\max$  برای  $s$  نرم و استنتاج مددانی نوع  $\min$  برای موتور فازی استفاده می‌شود.

#### ۴-۲- استخراج قوانین فازی

قوانین پایگاه قواعد فازی (Rule Base) با توجه به تغییرات گشتاورهای  $T_2, T_3$  نسبت به  $e_3, \dot{e}_3, e_2, \dot{e}_2, e_1, \dot{e}_1$  مطابق جدول جستجوی (۱) تولید می‌شود. توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم فازی با جزئیات کافی در شکل‌های (۵) تا (۸) نشان داده می‌شود. که در آنها  $p$  مثبت،  $n$  منفی،  $z$  صفر،  $s$  بزرگ،  $m$  متوسط و  $l$  بزرگ را نشان می‌دهد.

#### ۴-۳- سیستم کنترلی فازی

سیستم غیرخطی-فازی به مدل و محاسبات پیچیده تخمین پارامترها وابسته است. اکنون سیستم کنترلی فازی شکل (۹) ارائه می‌شود تا فقط براساس محاسبات فازی تنگناهای سیستم غیرخطی-فازی برطرف شود. در این سیستم گشتاور محرک برای انجام تعقیب مسیر از (۴۴) محاسبه می‌شود:

$$T = f(e, \dot{e}) \quad (44)$$

مشابه کنترل‌کننده غیرخطی-فازی سیستم استنتاج فازی برای محاسبه  $f(e, \dot{e})$  با استفاده از بردار اندازه‌گیری تولید می‌شود. پس از بررسی دقیق داده‌های خروجی و رفتار دینامیکی روبات سیار مجموعه‌های ذیل تعیین شده است:

$$e_i = \{n_l, n_m, n_s, p_s, p_m, p_l\} \quad (45)$$

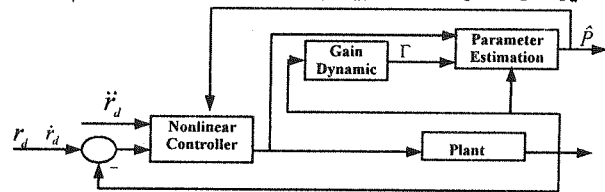
$$\dot{e}_i = \{n_l, n_m, z_r, p_m, p_l\} \quad (46)$$

$$T_i = \{n_l, n_m, n_s, p_s, p_m, p_l\} \quad (47)$$

توابع عضویت  $e_i$  و  $\dot{e}_i$  مشابه توابع سیستم کنترلی غیرخطی-فازی است. توابع عضویت  $T_i$  مطابق شکل‌های (۷) تا (۸) است. قوانین فازی از جدول (۱) انتخاب می‌شوند.

کاربرد سیستم‌های کنترلی غیرخطی-فازی و فازی برای روبات سیار چرخدار در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تحقق نتایج پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. از شکل‌های (۱۰) و (۱۱) درمی‌یابیم که علی‌رغم کاهش قابل توجه گشتاور ورودی با استفاده از سیستم غیرخطی-فازی دقت تعقیب مسیر در صفحه  $XY$  افزایش می‌یابد. نرخ همگرایی تخمین بدون تورش پارامترها در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کاهش یافته است که به علت گشتاور ورودی کمتر و هموارتر از قبل قابل پیش‌بینی است. سیستم کنترلی فازی که بلوک دیاگرام ساده شکل (۹) را دارد، برای مسأله روبات سیار استفاده شده و تعقیب دقیق مسیرهای مطلوب در شکل‌های (۱۱) تصدیق شده است.

غیرخطی با مختصه‌های  $\varphi_3, \varphi_2$  و یا  $x, y$  می‌تواند خطای تعقیب سرعت از مقادیر مطلوب را در مختصات متحرک و ثابت به سمت صفر همگرا کند. ولی نمی‌تواند انحراف اولیه روبات از مسیرهای  $X$  و  $Y$  را از بین ببرد. در شکل (۴) سیستم کنترلی



شکل (۲): بلوک دیاگرام سیستم کنترل غیرخطی و غیرخطی-فازی

غیرخطی با استفاده از دینامیک ثابت، خطای تعقیب مسیرهای  $X, Y, \dot{X}, \dot{Y}$  از مقادیر مطلوب را به سمت صفر همگرا کرده و انحراف اولیه روبات را جبران کرده است. همگرایی سریع و بدون تورش تخمین پارامترها در شکل (۴) غنای ماتریس رگرسیون مدل دینامیکی ثابت را تصدیق می‌کند.

#### ۴-۴- سیستم‌های فازی

در سیستم کنترلی غیرخطی؛ که براساس مدل دینامیکی است مقادیر همه پارامترها و یا تخمین آنها ضروری است. تخمین پارامترها به معادلات پیچیده‌ای منجر می‌شود که زمان پردازش زیادی را نیاز دارد و اگرایی احتمالی آنها موجب شکست سیستم کنترلی غیرخطی می‌شود. با توجه به مشکلات فوق و حساسیت سیستم کنترلی غیرخطی به نویز، طراحی کنترل‌کننده‌ای مستقل از مدل و پارامترهای آن ضروری است. پارامترهای ثابت کنترلی  $(k_p, k_d)$  موجب افت عملکرد و افزایش گشتاور ورودی می‌شود؛ با تنظیم تطبیقی آنها گشتاور کاهش یافته و کارایی سیستم افزایش می‌یابد. در اینجا دو روش جدید فازی و غیرخطی-فازی طراحی و استفاده می‌شود.

#### ۴-۱- سیستم کنترلی غیرخطی-فازی

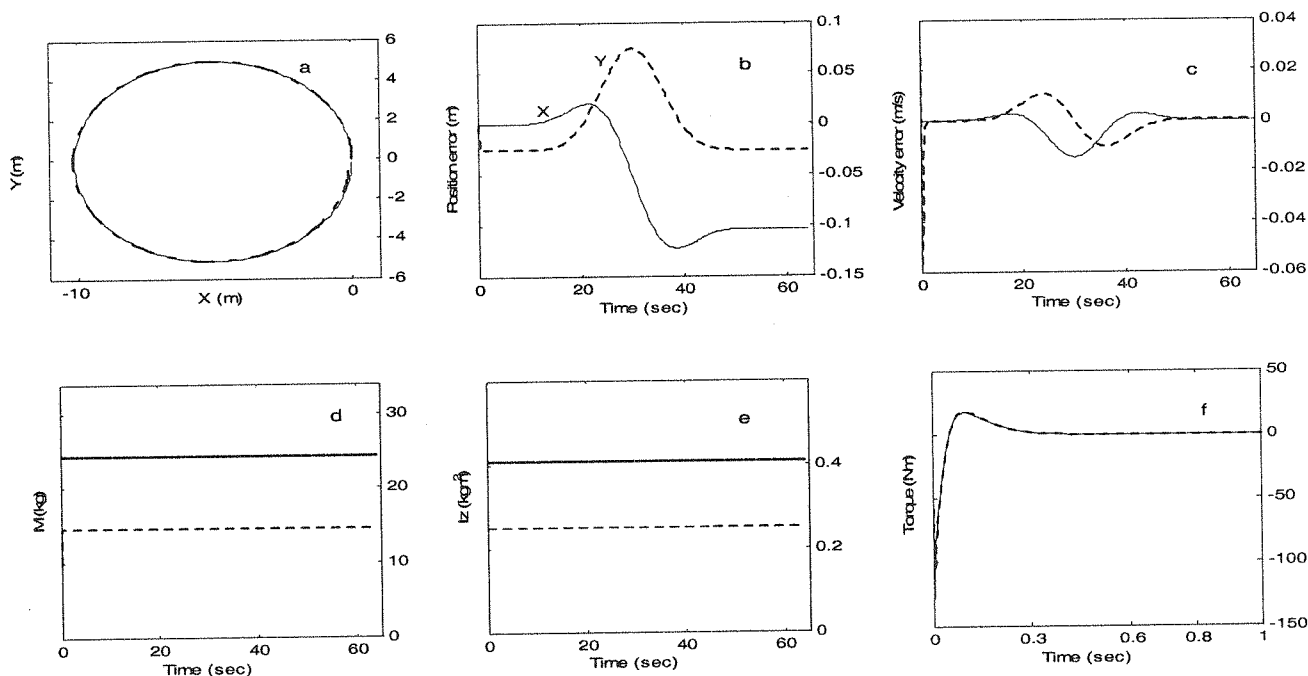
در سیستم غیرخطی-فازی،  $f$  تابعی فازی از خطاهای تعقیب  $e$  و  $\dot{e}$  است که جایگزین  $k_p e$  و  $k_d \dot{e}$  در  $U$  می‌شود:

$$U = \ddot{\phi}_d + f(\dot{e}, e) \quad (41)$$

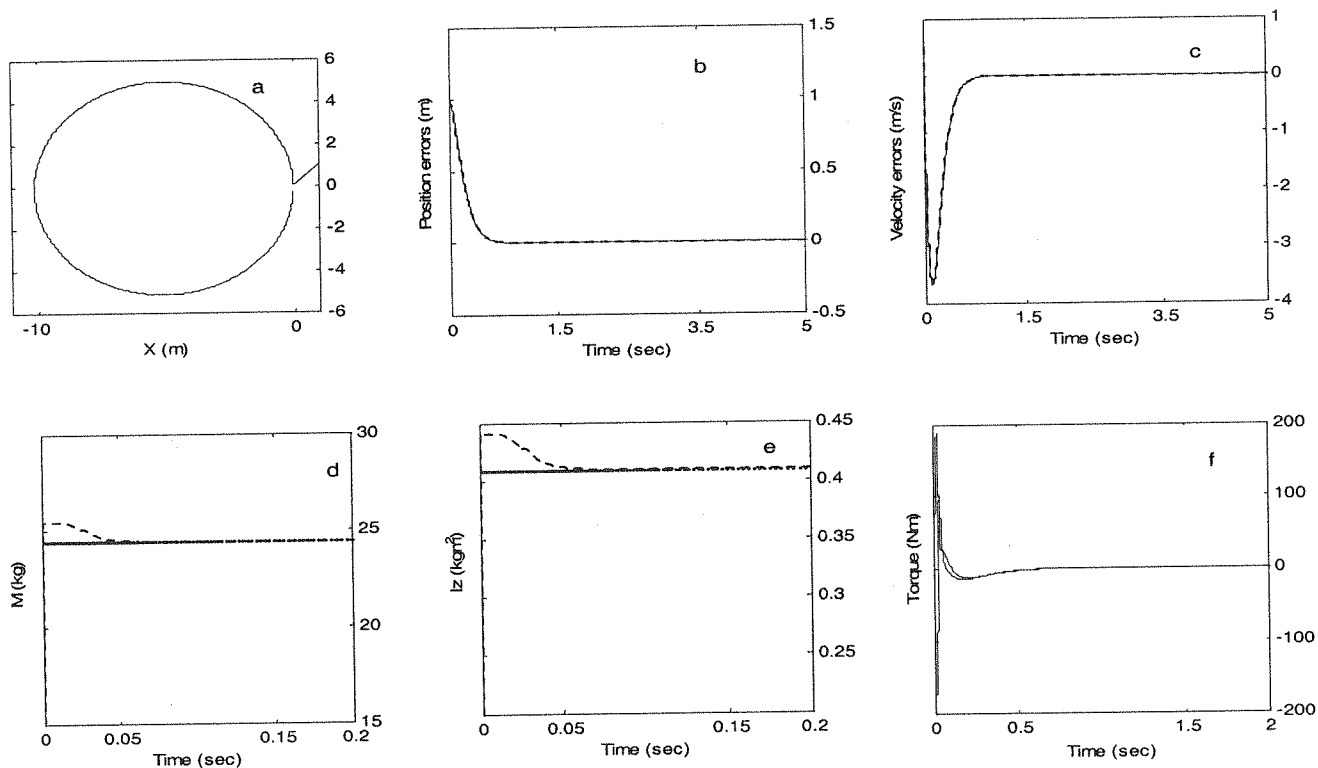
در (۱۵)، دو مؤلفه  $U_2$  و  $U_3$  بردار  $U$  به گشتاور ورودی دو چرخ محرک مربوط است که در اینجا از قواعد فازی به دست آمده از دینامیک WMR، محاسبه می‌شود. مؤلفه‌های  $f = [f_2 \ f_3]^T$  خروجی دو سیستم فازی مددانی با ورودی‌های  $e$  و  $\dot{e}$  است که قواعد زبانی آنها به شکل عمومی زیر است: اگر  $e_i, A_1$  و  $\dot{e}_i, A_2$  است آنگاه  $f_i$   $B'$  است. مجموعه فازی  $B'$  و خروجی غیرفازی شده  $y^*$  را داریم:

$$B'(y) = \max_{i=1}^M [Sup(A'(x), \min\{\prod_{i=1}^n A'_i(x_i), B'(y)\})] \quad (42)$$

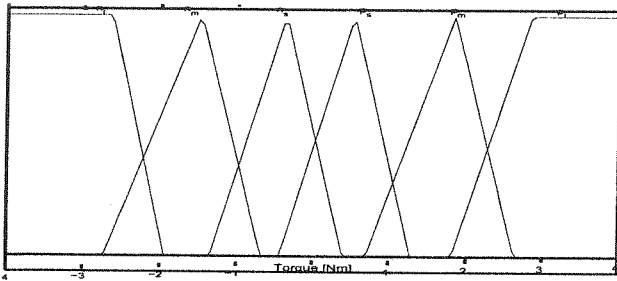
خطاهای سرعت به صفر همگرا شده است؛ ولی تورش جزئی در تعقیب مسیرهای  $X, Y$  و  $\varphi_2, \varphi_3$  وجود دارد و این تورش کمتر از دو درصد مقدار مطلوب است که بخشی از آن را می‌توان با افزایش گشتاور ورودی به WMR جبران کرد.



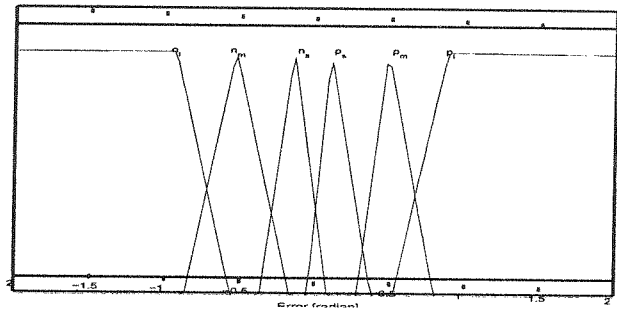
شکل (۳): عملکرد سیستم کنترلی غیرخطی با دینامیک متحرک و مؤلفه‌های  $\varphi_2, \varphi_3$ :  $a$ : مسیرهای مطلوب و دنبال شده در صفحه  $X, Y$ ;  $b, c$ : خطای تعقیب  $X, Y$  و  $\dot{X}, \dot{Y}$  از مقادیر مطلوب؛  $d, e$ : مقایسه تخمین  $M$  و  $I_z$  با مقادیر واقعی؛  $f$ : گشتاور ورودی



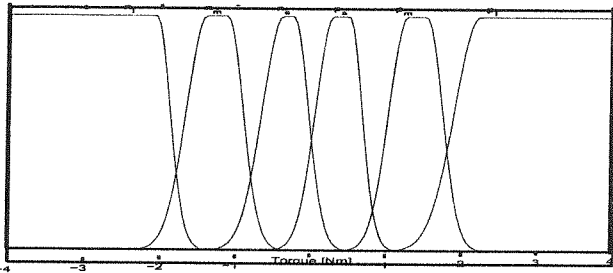
شکل (۴): عملکرد سیستم کنترلی غیرخطی با دینامیک ثابت جدید:  $a$ : مسیرهای مطلوب و دنبال شده در صفحه  $X, Y$ ;  $b, c$ : خطای تعقیب  $X, Y$  و  $\dot{X}, \dot{Y}$  از مقادیر مطلوب؛  $d, e$ : مقایسه تخمین  $M$  و  $I_z$  با مقادیر واقعی؛  $f$ : گشتاور ورودی



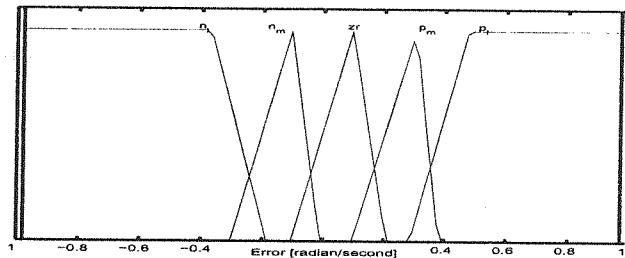
شکل (۷): توابع عضویت خروجی سیستم غیرخطی فازی



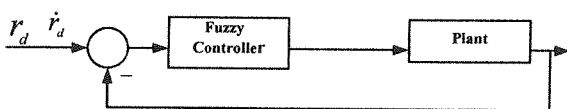
شکل (۵): توابع عضویت ورودی  $e_i$



شکل (۸): توابع عضویت خروجی گشتاور سیستم فازی



شکل (۶): توابع عضویت ورودی  $\dot{e}_i$



شکل (۹): بلوک دیاگرام سیستم کنترل فازی

سرعت WMR در راستای  $X$  استفاده می‌شود. قوانین این سیستم فازی مشابه قوانین جدول (۱) تعیین شده است. شبیه‌سازی در شکل (۱۲) خطای محدود تعقیب سرعت و موقعیت را نشان می‌دهد.

### ۵- تغییر پارامترها

قوام سیستم‌های کنترلی به تغییرات پارامترهای  $M$  و  $I_z$  روبات بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) نشان می‌دهد که تعقیب مسیرها علی‌رغم تغییر ۴۰ درصدی پارامترها انجام می‌شود. پس سیستم‌های کنترلی به تغییر پارامترها؛ که در واقع نوعی عدم قطعیت در مدل محسوب می‌شود، مقاوم هستند. عملکرد سیستم غیرخطی- فازی در شکل (۱۰) مقداری افزایش در خطای تعقیب مسیرهای  $X, Y$  در مقایسه با حالت ثابت پارامترها نشان می‌دهد. پس  $\dot{X}$  و  $\dot{Y}$  در مقایسه با حالت ثابت پارامترها، احتمال انحراف روبات به خارج از محدوده مجاز خطای تعقیب مسیرها پیش‌بینی می‌شود. عملکرد سیستم کنترلی فازی، در روبات سیاری که پارامترهای متغیر دارد، بسیار مطلوب است. در این سیستم، خطای تعقیب مسیرهای موقعیت در مقایسه با حالت پارامترهای ثابت سه مرتبه کاهش نشان می‌دهد. همچنین خطای تعقیب مسیرهای سرعت صفر می‌شود. مطابق شکل (۱۵) سرعت همگرایی خطاها

جدول (۱): جدول جستجوی قواعد فازی پایگاه قوانین

$$e = \varphi_d - \varphi$$

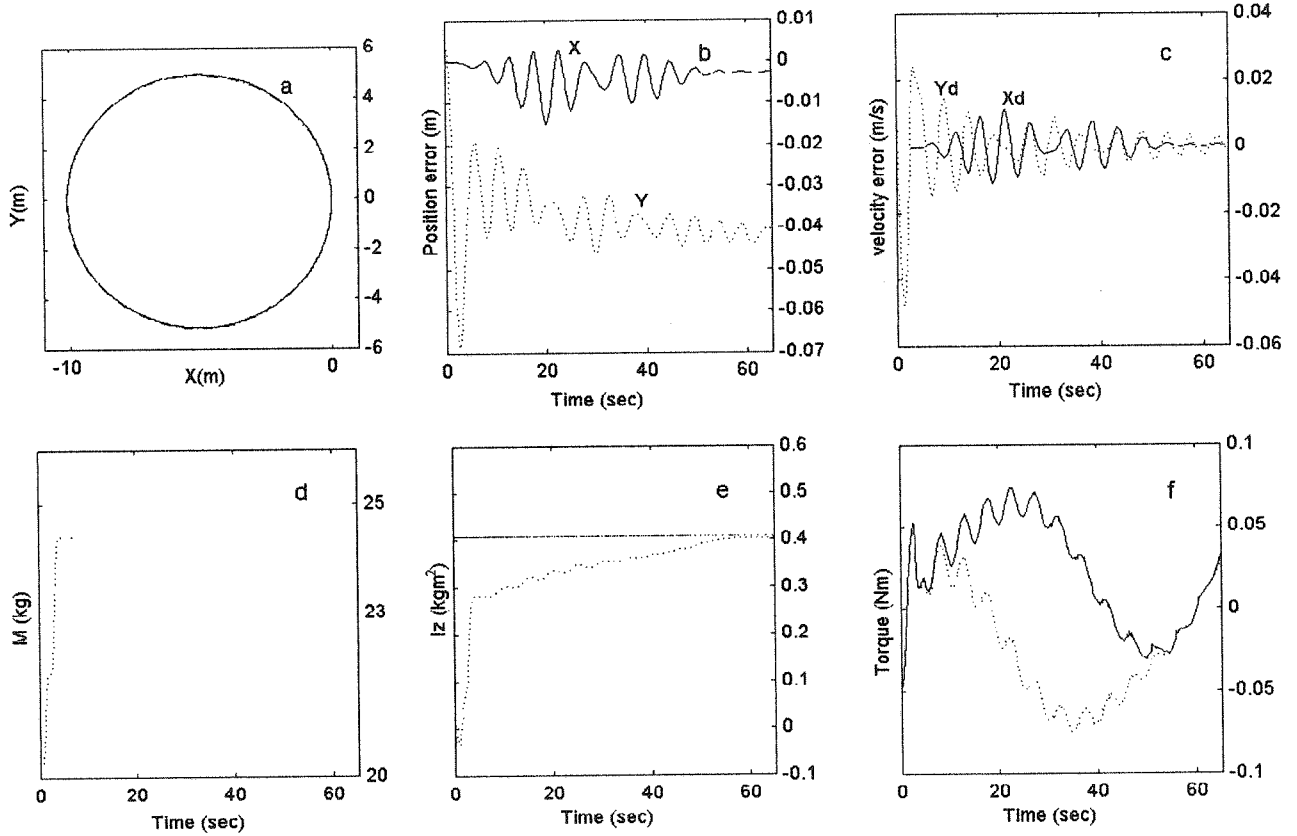
$\dot{e}$	$n_1$	$n_m$	$n_s$	$p_s$	$p_m$	$p_l$
$n_1$	$n_1$	$n_l$	$n_l$	$n_m$	$n_s$	$p_s$
$n_m$	$n_l$	$n_l$	$n_m$	$n_s$	$p_s$	$p_m$
$z$	$n_l$	$n_m$	$n_s$	$p_s$	$p_m$	$p_l$
$p_m$	$n_m$	$n_s$	$p_s$	$p_m$	$p_l$	$p_l$
$p_l$	$n_s$	$p_s$	$p_m$	$p_l$	$p_l$	$p_l$

گشتاور وارده به چرخ‌های محرک محدود و منحنی همواری دارد و نرخ همگرایی خطاها واقعی‌تر است.

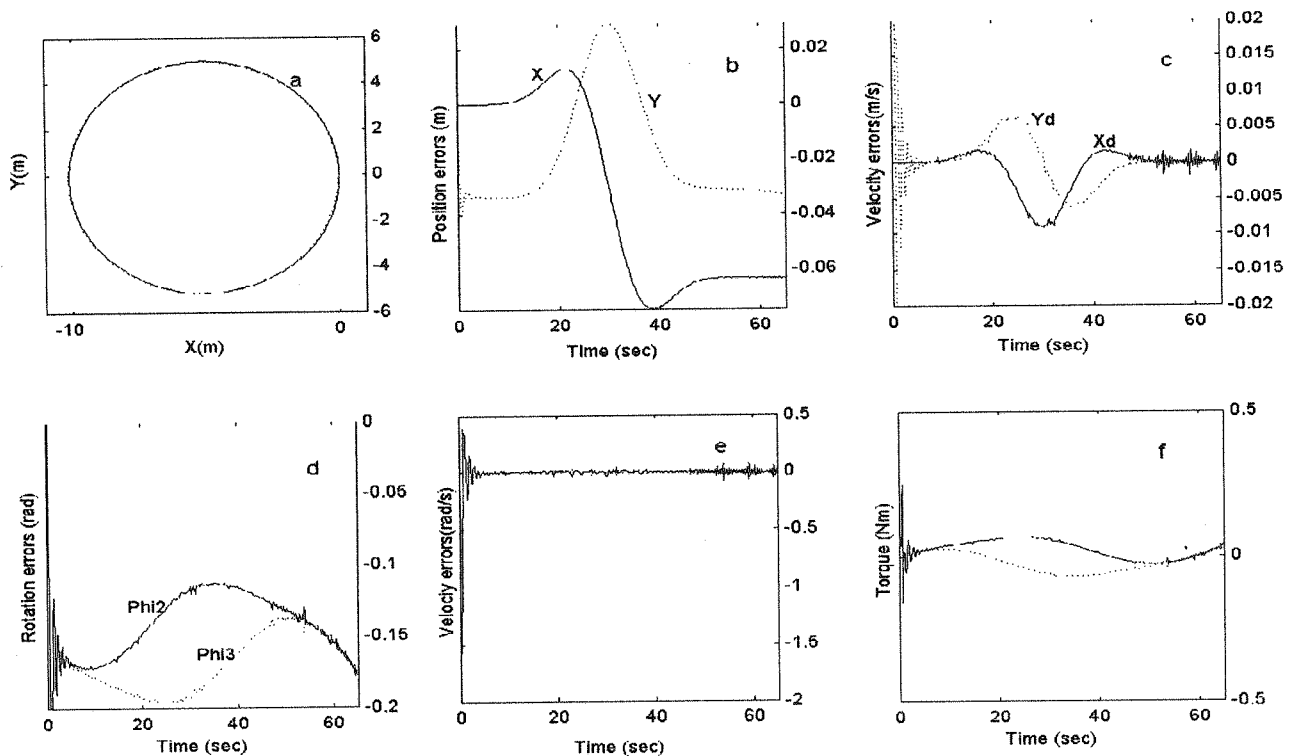
### ۶-۶- سیستم کنترل فازی در مختصات ثابت

اگر سیستم کنترلی بر اساس اندازه‌گیری  $X, Y, \theta, \dot{X}, \dot{Y}$  طراحی شود فرضیات محدود کننده حذف می‌شود؛ اما هزینه اندازه‌گیری افزایش می‌یابد؛ زیرا مقادیر دقیق  $X, Y, \theta$  با تلفیق خروجی حسگرهای گران‌قیمت اینرسی و سیستم‌های اندازه‌گیری کمکی از قبیل صفحه حرکت هوشمند (خط‌کشی مسیر با علائم مغناطیسی [۱۷])، سیستم موقعیت‌یاب جهانی و روش‌های دیگری قابل دستیابی است. تعداد قوانین سیستم فازی با شش ورودی  $X, Y, \theta, \dot{X}, \dot{Y}$  و  $\theta$  بسیار زیاد است؛ زیرا برای شش ورودی سیستم؛ که هر یک دارای سه تابع عضویت باشند، تعداد قوانین فازی مورد نیاز برابر ۳<sup>۶</sup> است. اکنون یک سیستم کنترلی فازی؛ که ورودی‌اش خطای متغیرهای  $X$  و  $\dot{X}$  از مقادیر مطلوب و خروجی آن گشتاور ورودی به چرخ‌های محرک است، برای کنترل موقعیت و

بالا رفته و نوسانات خطا به مقدار زیادی کاهش یافته است.

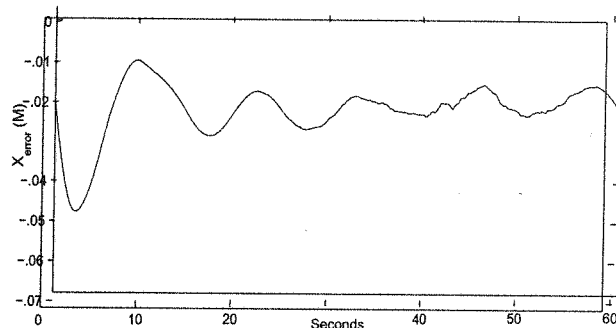
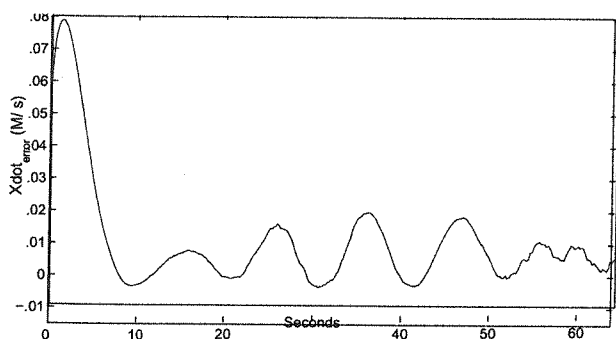


شکل (۱۰): عملکرد سیستم کنترلی غیرخطی - فازی:  $a$ : مسیرهای مطلوب و دنبال شده در صفحه  $X, Y$ ;  $b, c$ : خطای تعقیب  $X, Y$  و  $\dot{X}, \dot{Y}$  از مقادیر مطلوب;  $d, e$ : مقایسه تخمین  $M$  و  $I_z$  با مقادیر واقعی;  $f$ : گشتاور ورودی

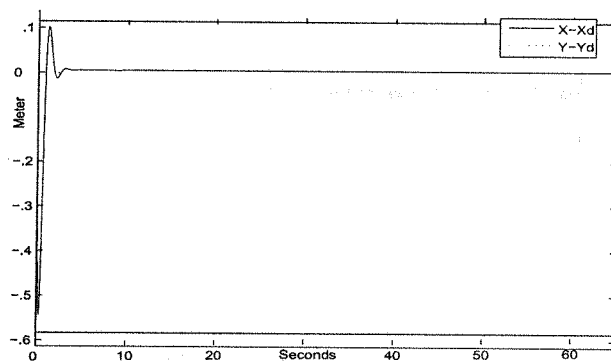
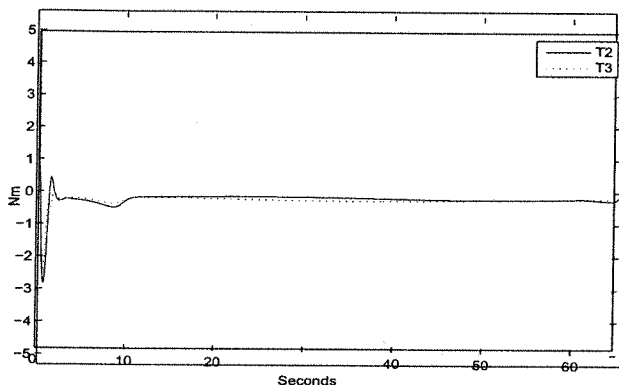


شکل (۱۱): عملکرد سیستم کنترلی فازی:  $a$ : مسیرهای مطلوب و دنبال شده در صفحه  $X, Y$ ;  $b, c$ : خطای تعقیب  $X, Y$  و  $\dot{X}, \dot{Y}$  از مقادیر مطلوب;  $d, e$ : خطای تعقیب  $\phi_2, \phi_3$  و  $\dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3$  از مقادیر مطلوب;  $f$ : گشتاور ورودی

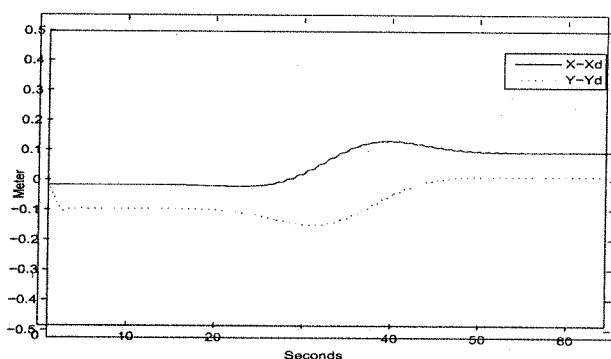
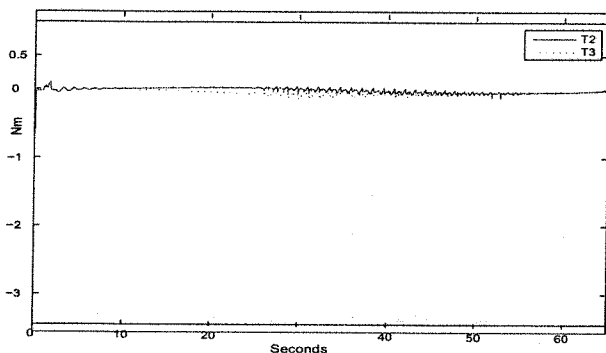




شکل (۱۲): خطای تعقیب مسیره‌های  $X$  و  $\dot{X}$  دنبال شده از مقادیر مطلوب در سیستم کنترلی فازی طراحی شده در مختصات ثابت



شکل (۱۳): خطای تعقیب مسیره‌های  $X$ ،  $Y$  از مقادیر مطلوب در سیستم غیرخطی با پارامترهای متغیر با زمان و بردار گشتاور آن



شکل (۱۴): خطای مسیره‌های  $X$ ،  $Y$  از مقادیر مطلوب در سیستم غیرخطی-فازی با پارامترهای متغیر با زمان و بردار گشتاور آن

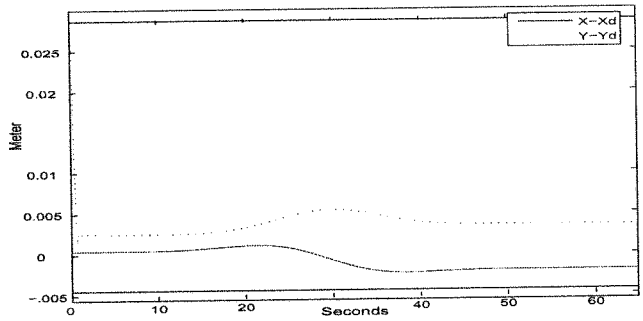
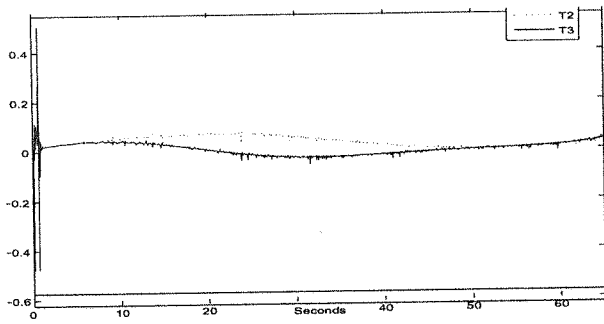
فازی در حضور نویز در شکل (۱۷) خلاصه شده است. خطای تعقیب مسیره‌های سرعت نسبت به سیستم کنترلی غیرخطی کاهش یافته است. دامنه خطای  $\dot{X}$  و  $\dot{Y}$  از مقادیر مطلوب در سیستم کنترلی غیرخطی  $0/3$  متر در ثانیه و مقدار آن در سیستم غیرخطی-فازی برابر  $0/4$  متر در هر ثانیه است.

در سیستم کنترلی فازی مطابق شکل (۱۸) افزایش خطای تعقیب  $X$  و  $Y$  از مقادیر مطلوب به علت نویز اندازه‌گیری قابل اغماض است. نویز اندازه‌گیری موجب می‌شود دامنه خطای تعقیب در مسیره‌های  $\dot{X}$  و  $\dot{Y}$  حداکثر به  $0/1$  متر در ثانیه برسد. به عبارت دیگر، عملکرد سیستم فازی بهتر از سیستم کنترلی غیرخطی و ضعیف‌تر از عملکرد سیستم غیرخطی-فازی است.

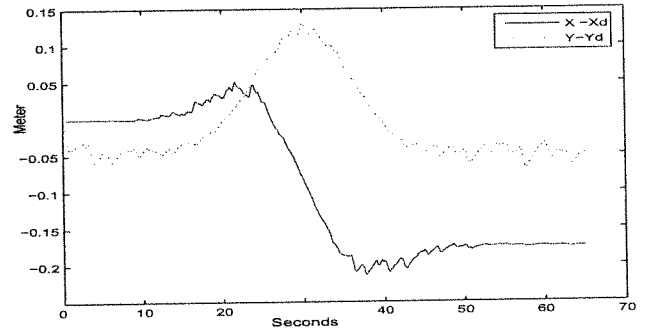
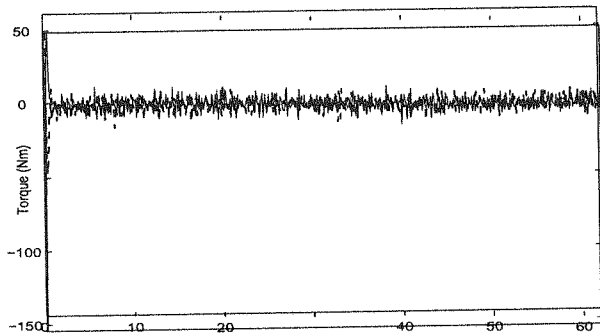
به عبارت دیگر، عملکرد سیستم کنترلی فازی در مدل متغیر با زمان تاثیرات بسیار مثبتی داشته و کارایی این سیستم کنترلی به مراتب از سیستم‌های غیرخطی و غیرخطی-فازی در صورت وجود عدم قطعیت در پارامترها، مطلوب‌تر است.

## ۶- حساسیت به نویز اندازه‌گیری

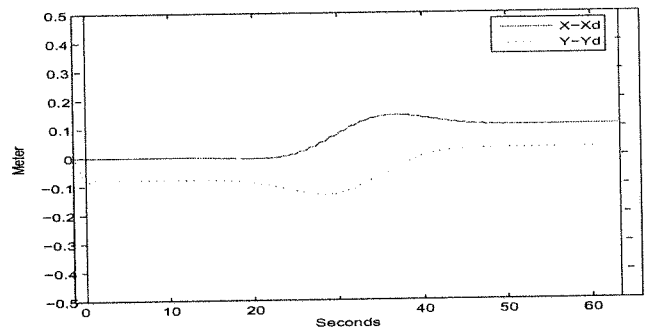
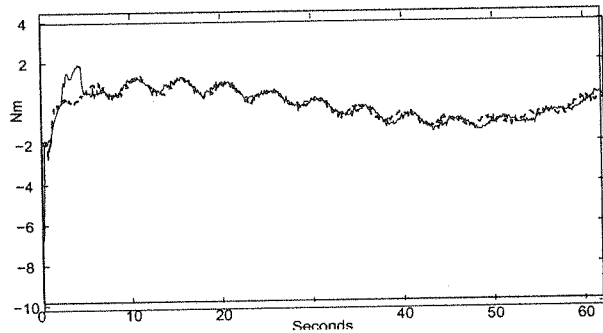
برای بررسی قوام سیستم‌های کنترلی در حضور نویز اندازه‌گیری، یک رشته نویز سفید گوسی به سیگنال‌های  $\phi_2$  و  $\phi_3$  اضافه می‌شود. تاثیر نویز اندازه‌گیری بر عملکرد سیستم کنترلی غیرخطی در شکل (۱۶) نشان می‌دهد که با وجود افزایش خطای تعقیب  $\phi_2$ ،  $\phi_3$  از مقادیر مطلوب، خطای تعقیب در مسیره‌های  $X$ ،  $Y$  زیاد نیست. عملکرد سیستم غیرخطی-



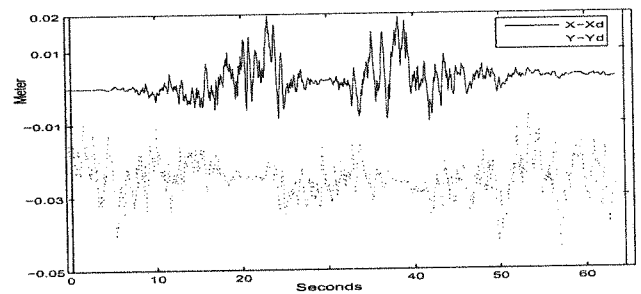
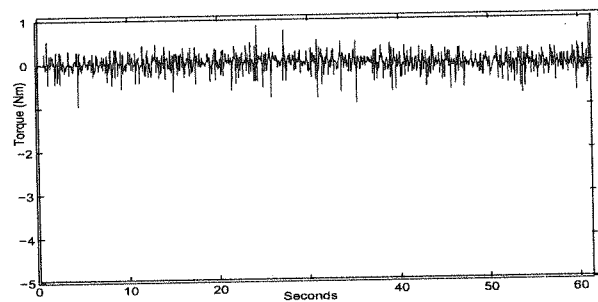
شکل (۱۵): خطای تعقیب مسیره‌های  $X, Y$  از مقادیر مطلوب در سیستم کنترلی فازی با پارامترهای متغیر با زمان و بردار گشتاور آن



شکل (۱۶): خطای تعقیب مسیره‌های  $X, Y$  از مقادیر مطلوب در سیستم کنترلی غیرخطی با اندازه‌گیری نویزی و بردار گشتاور آن



شکل (۱۷): خطای مسیره‌های  $X, Y$  از مقادیر مطلوب در سیستم کنترلی غیرخطی- فازی با اندازه‌گیری نویزی و بردار گشتاور آن



شکل (۱۸): خطای تعقیب مسیره‌های  $X, Y$  از مقادیر مطلوب در سیستم کنترلی فازی با اندازه‌گیری نویزی و بردار گشتاور آن

از مقادیر مطلوب طراحی شده است. روابط سینماتیکی فقط بین مؤلفه‌های سرعت ثابت و متحرک برقرار است، پس جبران انحراف اولیه موقعیت در صفحه  $XY$  فقط با سیستم کنترلی طراحی شده با دینامیک ثابت امکان‌پذیر است؛ به طوریکه خطای تعقیب مسیره‌های  $X, Y, \dot{X}, \dot{Y}$  از مقادیر مطلوب به طور

## ۷- نتیجه‌گیری

با استفاده از معادلات دینامیکی مدل‌های جدید در مختصات ثابت و متحرک، سیستم کنترلی غیرخطی پسخور خطی‌ساز برای کنترل خطای تعقیب مسیره‌های سرعت و موقعیت WMR

of mobile robots in the presence of uncertainties in the dynamical model' Journal of Robotic Systems, v 18, n 6, p 317-323, June, 2001.

Dixon, W. E., Jiang, Z. P., Dawson, D. M., 'Global exponential set point control of wheeled mobile robots: A Lyapunov approach' Automatica, v 36, n 11, p 1741-1746, Nov, 2000.

Dixon, W. E., Dawson, D. M., Zergeroglu, E., Behal, A., 'Adaptive Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot via an Uncalibrated Camera System', IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, PART B, VOL. 31, NO. 3, p 342-351, June, 2001.

Dixon, W. E., Queiroz, M. S., Dawson, D. M., 'Adaptive Tracking and Regulation of a Wheeled Mobile Robot with Controller/Update Law Modularity', IEEE Int conf on Robotics & Automation, p 2620-2625, May, 2002.

Kim, J., Park, Y., Park, F. C., 'Design analysis and control of a wheeled mobile robot with a nonholonomic spherical CVT' Int Journal of Robotics Research, v21 n 5, p 409-426, May, 2002.

Lee, T. H., Lam, H. K., Leung, F. H. F., Tam, P. K. S., 'A practical fuzzy logic controller for the path tracking of wheeled mobile robots', IEEE Control Systems Magazine, v 23, n 2, p 60-65 April, 2003

Lee, T. H., Leung, F. H., Tam, P. S., "Position control for wheeled mobile robots using a fuzzy logic controller" ECON Proceedings, v2, p 525-528, 1999.

Liu, G.-Y., Wu, C.-J., 'A discrete method for time-optimal motion planning of a class of mobile robots' Journal of Intelligent and Robotic Systems, v 32, n 1, p 75-92, September, 2001.

Oriolo, G., Luca, A., Vendittelli, M., 'WMR Control via Dynamic Feedback Linearization: Design Implementation and Experimental Validation', IEEE Trans on Control Systems technology. v 10, n 6, p 835-852, N Nov, 2003.

Slotine, J. J. E., Li, W., Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, 1991.

Souma, M. A., Xiaquan, L., Ghaffari, M., Ernest, H. 'Dynamic simulation of computed-torque controllers for a wheeled mobile robot autonomous navigation in outdoor environments', Proceedings of the Artificial Neural Networks in Engineering Conf, p 511-516, 2003.

Thanjavur, K., Rajagoplan, R., 'Ease of Dynamic Modelling of Wheeled Mobile Robots using Kane's Approach', IEEE Int Conf on Robotics and Automation, p 292-293, Apr, 1997.

Topalov, A. V., Kim, J. H., Proychev, T. P., 'Fuzzy-net control of non-holonomic mobile robot using evolutionary feedback-error-learning', Robotics and Autonomous Systems, v23, n3, p187-200, Apr, 1998.

Wang, D. and Xu, G. 'Full-state tracking and internal dynamics of nonholonomic wheeled mobile robots', IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v 8, n 2, p 203-214, June, 2003.

Yang, Y., Farrell, J. A., 'Magnetometer and Differential Carrier Phase GPS-Aided INS for Advanced Vehicle Control' IEEE Transactions on Robotics and Automation, v 19 n 2, p 269-82 April 2003.

Yim, H., Butler, A. C., "Motion Planning using fuzzy logic control with minimum sensors", IEEE International Symposium on Intelligent Control, p 558-564, 1995.

## 9- زیر نویس ها

'Drift Evolutionary Feedback Error Learning

کامل به سمت صفر همگرا می‌شود. فراوانی عبارتهای سینوسی در ماتریس رگرسیون این سیستم موجب تخمین بدون تورش پارامترها با نرخ همگرایی بالا می‌شود. مزیت دیگر استفاده از مدل دینامیکی ثابت، حذف فرضیات عدم لغزش و هموار بودن مسیر حرکت است. تورش بزرگ در تخمین پارامترهای روبات در سیستم غیرخطی با مختصه‌های  $\phi$  و  $\dot{\phi}$  موجب افزایش جزئی در خطای تعقیب  $X, \dot{X}, Y, \dot{Y}$  می‌شود.

استفاده از محاسبات فازی و طراحی سیستم کنترلی غیرخطی- فازی موجب کاهش زیاد گشتاور ورودی می‌شود. با طراحی سیستم کنترلی فازی، ضرورت تخمین پارامترها برای تعقیب کامل مسیره‌های مطلوب حذف می‌شود.

کنترل خطای تعقیب در مسیره‌های  $X$  و  $\dot{X}$  با استفاده از سیستم فازی طراحی شده با مختصه‌های ثابت انجام می‌شود. عملکرد تمامی سیستم‌های کنترلی روی مدل روبات سیار چرخدار با جرم و ممان اینرسی متغیر با زمان ارزیابی شده است. فقط در سیستم کنترلی فازی، خطای تعقیب مسیره‌های مطلوب نسبت به حالت پارامترهای ثابت کاهش یافته است. قوام بالای این سیستم کنترلی به تغییر پارامترها به علت مستقل بودن آن از مدل روبات سیار و پارامترهای آن است.

عملکرد سیستم‌های کنترلی در مواقعی که بردار خروجی سیستم با نویز اندازه‌گیری ترکیب شده، بررسی شده است. سیستم‌های کنترلی فازی- غیرخطی و فازی در مقایسه با سیستم کنترلی غیرخطی، حساسیت کمتری نسبت به نویز دارند برای کارهای آتی و تکمیل مسأله تعقیب بدون محدودیت روبات سیار پیشنهاد می‌شود، جزئیات ناهمواری مسیر حرکت و دینامیک لغزش‌های احتمالی در قانون کنترل وارد شود. بعلاوه برای حذف دینامیک حرکت لغزشی و نقشه ناهمواری جاده در سیستم کنترلی، طراحی سیستم فازی با مختصه‌های ثابت پیشنهاد می‌شود. تضعیف نویزهای اندازه‌گیری با استفاده از طراحی فیلترهای مقاوم برای ترکیب خروجی حسگرهای ناوبری اینرسی، سیستم موقعیت‌یاب ماهواره‌ای، روش‌های تصویری و غیره برای ناوبری روبات سیار توصیه می‌شود.

## 8- مراجع

- [۱] کیبادی، جعفر؛ کبگانیان، منصور؛ "کنترل تطبیقی روبات سیار چرخدار با روش خود تنظیم"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک- ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس اردیبهشت، ۱۳۸۳.
- [۲] Akihiko T., Yukio H., Naohiko H.; Hiromitsu H.; Mitsuhsa Y., 'Feedback control of non-holonomic mobile robots by path-generating regulator', Transaction of JSME, Part C, v 70 n 1, p 120-126, Jan, 2004.
- [۳] Corradini, M. L., Orlando G., 'Robust tracking control