



Vision-Based Model Predictive Control of Wheeled Mobile Robot

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khonsarian R.¹ *MSC*,
Farrokhi M.*¹ *PhD*

How to cite this article

Khonsarian R, Farrokhi M. Vision-Based Model Predictive Control of Wheeled Mobile Robot. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1767-1777.

ABSTRACT

In this article, a novel control of wheeled mobile robot based on machine vision is considered. One of the common methods for controlling such systems is the use of Model Predictive Control (MPC) algorithms. In these systems, the response speed of the control algorithm and the optimality of these are two basic factors for achieving the optimal performance. Also, the impossibility of achieving precise values of the robot parameters and their variation during the operation of the robot is an important challenge in the implementation of the controller; therefore, this paper focuses on real-time and robust MPC, so that it can ensure the system against uncertainties and environmental disturbances in addition to the optimal and real-time response. Hence, the optimization based on projection recurrent neural network (PRNN) has been used as an optimizer to reduce the calculation time cost. The combination of PRNN optimization with MPC leads to new formulation and constraints that are considered to be the article innovations. Finally, in order to verify the validity of the proposed algorithm, the robot passes through the corridor with the presence of obstacles, which is simulated in the V-REP software. The results show that the optimum control input speed has been increased in comparison with similar methods, and the optimal path selection by the fuzzy system in the presence of obstacles has been well suited.

Keywords Model Predictive Control; Optimization; Projection Recurrent Neural Network; Non-holonomic Mobile Robot; Fuzzy System

¹Control Department, Electrical Engineering School, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Electrical Engineering School, Iran University of Science & Technology (IUST), Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 77326525
Fax: +98 (21) 73021589
farrokhi@iust.ac.ir

Article History

Received: July 12, 2018
Accepted: January 15, 2019
ePublished: July 01, 2019

CITATION LINKS

[1] A taxonomy of vision systems for ground mobile robots [2] Adaptive vision-based leader-follower formation control of mobile robots [3] Visual servoing of nonholonomic mobile robots with uncalibrated camera-to-robot parameters [4] A novel vision-based tracking algorithm for a human-following mobile robot. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems [5] Visual servo regulation of wheeled mobile robots with simultaneous depth identification [6] State of the Art in Predictive Control of Wheeled Mobile Robots [7] Model predictive control of nonholonomic chained systems using general projection neural networks optimization [8] Point stabilization of nonholonomic spherical mobile robot using nonlinear model predictive control [9] Robust tube-based predictive control for visual servoing of constrained differential-drive mobile robots [10] Vision-based model predictive control for steering of a nonholonomic mobile robot [11] Robust stabilization of a wheeled mobile robot using model predictive control based on neuro-dynamics optimization [12] Control of mechanical systems with rolling constraints: Application to dynamic control of mobile robots [13] A unified quadratic-programming-based dynamical system approach to joint torque optimization of physically constrained redundant manipulators [14] A Course in Fuzzy Systems and Control [15] Trifocal, Tensor-based adaptive visual trajectory tracking control of mobile robots [16] Inside the virtual robotics challenge: Simulating real-time robotic disaster response [17] Pioneer 3 operations manual with mobile robots exclusive advanced robot control & operations software [18] Nonlinear model predictive control with neural network optimization for autonomous autorotation of small unmanned helicopters [19] Model predictive control of mobile robot in presence of obstacles

کنترل مدل پیش‌بین مبتنی بر بینایی برای ربات متحرک چرخ‌دار

رویا خونساریان MSc

گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد فرخی * PhD

گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله کنترل ربات متحرک چرخ‌دار بر مبنای بینایی ماشین مورد توجه واقع شده است. یکی از روش‌های رایج در کنترل سیستم‌های مذکور، استفاده از الگوریتم‌های مدل‌پیش‌بین می‌باشد. در این دست از سیستم‌ها، سرعت پاسخ الگوریتم کنترلی و بهینگی آن دو فاکتور اساسی برای رسیدن به عملکرد مطلوب می‌باشد. همچنین عدم امکان دستیابی به مقادیر دقیق پارامترهای ربات و تغییر آن‌ها در حین عملکرد ربات، چالش مهمی در پیاده‌سازی کنترل‌کننده است، لذا تمرکز این مقاله روی الگوریتم کنترلی مدل‌پیش‌بین مقاوم و بی‌درنگ می‌باشد تا بتواند علاوه بر پاسخ بهینه و بی‌درنگ، پایداری ربات را در برابر ناپایداری‌ها و اغتشاشات محیطی تضمین نماید. به این منظور از روش بهینه‌سازی شبکه عصبی بازگشتی تصویر به‌عنوان بهینه‌ساز کنترل مدل‌پیش‌بین استفاده شده تا بتواند به‌صورت بی‌درنگ مقادیر بهینه ورودی‌های کنترلی را محاسبه نماید. ترکیب بهینه‌سازی شبکه عصبی بازگشتی تصویر با کنترل مدل‌پیش‌بین منجر به فرمول‌بندی و قیود جدیدی شده که نوآوری مقاله محسوب می‌شود. در نهایت به‌منظور بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، عبور ربات از راهرو با حضور موانع در نرم افزار V-REP شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان محاسبه ورودی کنترلی بهینه در مقایسه با روش‌های مشابه کاهش یافته است و همچنین انتخاب مسیر بهینه توسط سیستم فازی در حضور موانع به‌شکل مناسبی انجام شده است.

کلیدواژه‌ها: کنترل مدل‌پیش‌بین، بهینه‌سازی، شبکه عصبی بازگشتی تصویر، ربات متحرک غیرهولونومیک، سیستم فازی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵

* نویسنده مسئول: farrokhi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

کنترل حرکت ربات‌های متحرک چرخ‌دار علاوه بر کاربردهای عملی آن، چالش تحقیقاتی مهمی نیز به‌شمار می‌رود که در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و انواع روش‌های نوین کنترلی برای هدایت این‌گونه ربات‌ها پیشنهاد شده است.

انتخاب حسگر مناسب برای دریافت اطلاعات جهت هدایت ربات‌های متحرک یکی از مسایل مهم در طراحی و ساخت آن به حساب می‌آید. با توجه به کاربرد و نحوه عملکرد این ربات‌ها، نیاز به حسگرهایی با وزن کم و دقت بالا محسوس است. حسگرهای متداولی که در ربات‌های متحرک زمینی استفاده می‌شوند، شامل سنسور لمسی، رمزگذار چرخ (انکودر)، سیستم تعیین موقعیت جهانی (جی‌پی‌اس)، سنسورهای سمت حرکت (هدینگ) شامل ژيروسکوپ و قطب‌نما، شتاب‌سنج‌ها، واحد اندازه‌گیری اینرسی، سنسورهای فاصله‌یاب و دوربین دیجیتال هستند [1]. دوربین دیجیتال از جمله حسگرهایی است که به‌منظور دریافت اطلاعات محیط، درک و شناخت ربات استفاده می‌شود. سایر حسگرهای موجود به‌دلیل محدودیت‌هایی که دارند نمی‌توانند به‌تنهایی مورد استفاده قرار گیرند.

کنترل و هدایت ربات متحرک مبتنی بر فیدبک بینایی از جمله مباحث متداولی است که به‌طور ویژه در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور کلی مساله هدایت ربات با استفاده از فیدبک بینایی به سه صورت شامل کنترل مبتنی بر بینایی بر مبنای موقعیت ربات، کنترل مبتنی بر بینایی بر مبنای تصویر و ترکیبی از

هر دو روش انجام می‌شود. در حالت اول، از ویژگی‌های به‌دست‌آمده از تصویر موقعیت ربات در محیط سه‌بعدی فضای کارترین تخمین زده می‌شود. در واقع قانون کنترلی با استفاده از اطلاعات بخش پردازش تصویر به‌دست می‌آید. از جمله معایب این روش، نیاز به بازسازی و اندازه‌گیری مسافت‌ها یا موقعیت است. این روش علاوه بر زمان‌بر بودن موجب کم‌شدن دقت اندازه‌گیری نیز می‌شود. در حالت دوم، هدایت ربات با استفاده از ویژگی‌های تصویر دوربین در فضای دوبعدی (تصویر) استفاده می‌شود. در این روش، هدف اصلی کنترل و هدایت ربات در مسیر مطلوب است و نیازی به بازسازی موقعیت‌ها و مسافت‌ها نیست. به‌علاوه، از به‌وجود آمدن خطای مربوط به مدل‌سازی سنسورها و کالیبراسیون دوربین جلوگیری می‌شود. همچنین در این روش امکان دنبال‌کردن نقطه موجود در تصویر بدون خروج از محدوده دید دوربین وجود دارد. روش سوم، به‌منظور غلبه بر مشکلات دو روش توسعه یافته و محدودیت‌های این دو روش را تا حدی برطرف می‌نماید [2,3].

در مطالعه‌ای به‌منظور طراحی الگوریتم برای ربات متحرک دنبال‌کننده انسان از روش مبتنی بر بینایی استفاده شده است [4]. در این روش، الگوریتم ردیابی از مدل دینامیکی که با گذشت زمان تکامل پیدا می‌کند تغییرات آنی در تصویر را لحاظ می‌کند. پژوهشی دیگر [5]، کنترل‌کننده بهینه ردیاب به‌همراه تشخیص هم‌زمان عمق به کمک دوربین همه‌جهته را ارائه می‌دهد. در این مقاله هدایت ربات متحرک در مسیر دلخواه انجام می‌شود. همچنین اطلاعات عمق ویژگی‌های مورد نظر به‌صورت هم‌زمان به‌کمک قانون تطبیقی به‌روزرسانی می‌شود.

با توجه به وجود قیود داخلی و محدودیت‌های سرعت که در ربات متحرک وجود دارد، استفاده از کنترل مدل‌پیش‌بین بر مبنای بینایی ماشین مورد توجه پژوهش‌ها واقع شده است. برخلاف روش‌های کنترلی موجود که در آنها قانون کنترلی براساس خروجی گذشته سیستم به دست می‌آید، کنترل مدل‌پیش‌بین (MPC; Model Predictive Control) روشی بهینه مبتنی بر مدل است که از پیش‌بینی خروجی آینده سیستم برای به‌دست‌آوردن قانون کنترلی استفاده می‌کند.

از جمله مزایای MPC به این موارد [6] شامل ساده‌بودن فرمول‌بندی مساله، تنظیم ساده پارامترهای کنترل‌کننده با تغییر تعریف تابع هزینه، بهینه‌بودن، سادگی در تعمیم به سیستم‌های چنددرودی-چندخروجی، قابل استفاده برای سیستم‌های نامینیم‌فاز و فرآیندهای ناپایدار، استفاده مستقیم از مدل‌های غیرخطی برای پیش‌بینی، جبران تاخیر و امکان در نظر گرفتن قیود روی ورودی-خروجی‌ها مانند محدودیت‌های عملگرها می‌توان اشاره کرد. تحقیقات MPC روی ربات متحرک عمدتاً روی مساله پایداری، بهینه‌سازی یا مدل‌سازی سیستم متمرکز است. مساله پایداری در بسیاری از تحقیقات مربوط به ربات بررسی شده است؛ اما به‌دلیل وجود قیود متفاوت روی سیستم‌ها و نوع ربات مورد استفاده، روش‌های تحلیل متفاوتی دارد [7,8].

کنترل مدل‌پیش‌بین قابلیت پیش‌بینی رفتار ربات تا چند مرحله جلوتر را داشته و می‌تواند به نحو مطلوب عملیات کنترل و هدایت ربات را انجام دهد. در این روش، تابع هزینه به‌صورت دنباله‌ای از ورودی کنترلی و حالت‌های سیستم تعریف می‌شود و کنترل مدل‌پیش‌بین با بهینه‌سازی این دنباله، بهترین پاسخ برای کمینه‌کردن تابع هزینه را ارائه می‌دهد. بهینه‌سازی به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که برخی روش‌ها بسیار زمان‌بر و ناکارآمد است چرا که داشتن پاسخ در کوتاه‌ترین زمان برای ادامه روند کنترلی ضروری

بر اساس قضیه براکت، فیدبک استاتیکی نامتغیر با زمان هموار از متغیرهای حالت نمی‌تواند یک سیستم غیرهولونومیک را حول نقطه تعادل به‌طور مجانبی پایدار سازد [11]. در ۲۰ سال اخیر، نظریه MPC سعی در حل این مساله کنترلی داشته است. MPC تلاش می‌کند تا مساله بهینه‌سازی را با استفاده از افق پیش‌بینی، رفتار سیستم با قیود ورودی و حالت‌ها حل کند.

مدل‌سازی ربات متحرک در دو حوزه دینامیکی و سینماتیکی انجام می‌شود که در معادلات آن، رابطه بین مشخصات مکانی و تغییرات زمانی با نیروها و گشتاورهای مورد نیاز برای ایجاد چنین تغییرات و حرکاتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حوزه سینماتیک ربات‌های متحرک، مکان‌ها و سرعت‌های ربات‌های مد نظر است، در حالی که در حوزه دینامیک، نیروهای لازم برای ایجاد حرکت در ربات‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. به‌طور کلی سیستم ربات n بعدی در فضای پیکربندی C با مختصات عمومی (q_1, q_2, \dots, q_n) می‌تواند با رابطه زیر توصیف شود [12]:

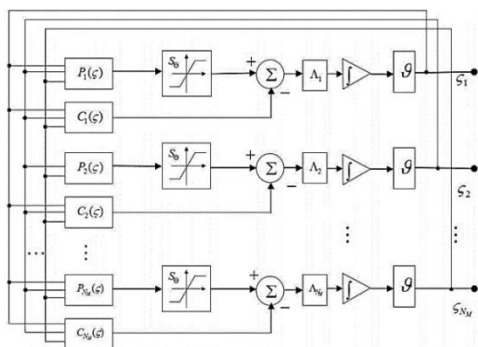
(۲)

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F_r(\dot{q}) + G_r(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda$$

که در آن $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس متقارن مثبت اینرسی، $V(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز، $F_r(\dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ اصطکاک سطح، $G_r(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ بردار نیروهای گرانش، $\tau_d \in \mathbb{R}^{n \times r}$ بردار اغتشاش‌های خارجی، $B(q) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ ماتریس تبدیل ورودی، $\tau \in \mathbb{R}^{n \times r}$ بردار گشتاور ورودی، $A(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ماتریس مرتبط با قیود و $\lambda \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ بردار نیروهای مقید هستند. در این مقاله، هدف هدایت ربات متحرک چرخ‌دار با دینامیک توصیف‌شده در رابطه (۲) است که توسط کنترل مدل‌پیش‌بین مبتنی بر شبکه عصبی بازگشتی تصویر انجام می‌شود. در واقع محاسبات مربوط به بهینه‌سازی تابع هزینه شبکه عصبی بازگشتی تصویر به‌صورت بی‌درنگ انجام می‌شود.

۲-۱- شبکه عصبی بازگشتی تصویر

در شکل ۱، بلوک دیاگرام مربوط به شبکه عصبی بازگشتی تصویر مشاهده می‌شود. شبکه عصبی بازگشتی تصویر، مساله بهینه‌سازی را به یک سیستم حلقه‌بسته تبدیل کرده و با تغییر ورودی این سیستم، سعی در همگرایی حالت‌های آن دارد. همگرایی حالت‌های سیستم تبدیل‌شده، به معنای بهینگی پاسخ مساله مورد نظر است. متغیرهای حالت سیستم تبدیل‌شده ترکیبی از حد بالا و پایین قیود و حالت‌های سیستم اصلی در افق N_p مرحله جلوتر است. این مفهوم در معادله حالت و خروجی بهینه‌سازی شبکه عصبی بازگشتی تصویر در بلوک دیاگرام شکل ۱ بیان شده است. با توجه به ترکیب مساله بهینه‌سازی و کنترل مدل‌پیش‌بین، پارامترهای مربوط به این شکل، در بخش ۳ معرفی شده‌اند.



شکل ۱) بلوک دیاگرام شبکه عصبی تصویر [11]

است. ضمن این که برخی از روش‌های بهینه‌سازی قادر به ارایه پاسخ در شرایط خاص نیستند. بنابراین پژوهش‌های متفاوتی برای دستیابی به پاسخ بهینه بی‌درنگ در کنترل مدل پیش‌بین انجام شده است. یکی از روش‌های مناسب به‌منظور بهینه‌سازی تابع هزینه، استفاده از شبکه عصبی بازگشتی تصویر است. در پژوهش‌هایی [9-11] از کنترل مدل پیش‌بین مبتنی بر شبکه عصبی بازگشتی تصویر (پروجکشن) برای هدایت ربات استفاده شده است. در یک مطالعه [9]، مدل سینماتیکی ربات در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی در دو سطح سینماتیکی و دینامیکی در لحظات نمونه‌برداری انجام می‌شود [10]. همچنین، کنترل مدل پیش‌بین مقاوم روی مدل سینماتیک سیستم به‌منظور داشتن عملکرد مطلوب حین تغییرات پارامترها استفاده شده است [11]. در این مقاله از روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبکه عصبی بازگشتی تصویر برای مدل دینامیکی ربات استفاده شده است. استفاده از مدل سینماتیکی در ربات‌هایی با سرعت پایین ممکن است قابل قبول باشد؛ اما در کاربرد با سرعت بالا مدل سینماتیکی توصیف دقیقی از سیستم نیست و دقت لازم برای توصیف سیستم را ندارد. استفاده از مدل دینامیکی موجب افزایش دقت پاسخ‌ها و نزدیک شدن پاسخ‌های شبیه‌سازی با پاسخ‌های عملی می‌شود. در این مقاله مساله به‌گونه‌ای فرمول‌بندی شده است که به‌جای حل دو مساله بهینه‌سازی روی مدل سینماتیکی و مدل دینامیکی در هر لحظه زمانی، تنها یک مساله بهینه‌سازی نیاز باشد که زمان کمتری برای انجام محاسبات مصرف می‌شود، و بی‌درنگ بودن پاسخ بهینه کنترلی را تضمین می‌کند. همچنین در این مقاله وجود موانع در مسیر حرکت ربات نیز در نظر گرفته شده است تا بتوان الگوریتم پیشنهادی را در محیطی با مسیر ازپیش‌تعیین‌نشده مورد ارزیابی قرار داد. در روش پیشنهادی، ربات با توجه به اطلاعات محیط اطراف که در هر نمونه‌برداری توسط دوربین نصب‌شده روی خود دریافت می‌کند، اقدام به جابه‌جایی در مسیر می‌نماید. بنابراین در هر لحظه، موقعیت ربات و موانع با استفاده از اطلاعات دریافت‌شده از دوربین تعیین‌شده و سپس با استفاده از مدل پیش‌بینی، موقعیت‌های بعدی ربات مشخص می‌شود.

در بخش دوم این مقاله، ابتدا به معرفی سیستم مورد نظر پرداخته می‌شود. در بخش سوم و چهارم به ترتیب طراحی کنترل‌کننده مدل پیش‌بین مقاوم بر مبنای شبکه عصبی تصویر و نیز انتخاب مسیر بهینه به‌کمک سیستم فازی انجام می‌شود. در ادامه نتایج شبیه‌سازی این الگوریتم در شرایط مختلف بررسی و با سایر روش‌های موجود مقایسه می‌شود.

۲- بیان مساله

ربات متحرک چرخ‌دار از جمله سیستم‌های رایجی است که به‌طور ذاتی دارای قیود غیرهولونومیک است؛ به‌معنای آن که در حرکت چرخ‌هایش دارای محدودیت است.

قیود غیرهولونومیک، قیود سینماتیک یا دینامیکی هستند که به‌صورت روابط بین متغیرهای مختصات تعمیم‌یافته سیستم و مشتقات مرتبه اول و دوم زمانی آنها ظاهر شده و قابل انتگرال‌گیری نباشد. به‌عبارت دیگر، به هر قیدی که به شکل رابطه (۱) قابل بیان نباشد، قید غیرهولونومیک می‌گویند:

$$F(q, t) = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ بردار مختصات تعمیم یافته است.

۳- کنترل مدل پیش‌بین مقاوم مبتنی بر شبکه عصبی

کنترل‌کننده مدل پیش‌بین، یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در صنایع مختلف است. امکان در نظر گرفتن قیود متفاوت سیستم از جمله مزایای MPC است. رفتار آینده سیستم با توجه به مدل مفروض در هر زمان نمونه‌برداری در افق تعیین شده تخمین زده می‌شود. در الگوریتم MPC، بهینه‌ساز وظیفه تعیین ورودی کنترلی بهینه در افق از پیش تعیین شده را بر عهده دارد. این کار بر اساس راهبرد کنترلی تعریف شده و خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط بلوک پیش‌بینی انجام می‌شود. بهینه‌سازی همواره یکی از مهم‌ترین مراحل در پردازش و انجام روش‌های متفاوت کنترلی بوده است. در زمینه MPC، انجام محاسبات به منظور دستیابی به پاسخ بهینه و بی‌درنگ امری ضروری است. شبکه‌های عصبی بازگشتی تصویر یکی از ابزارهای مفید در حل مساله بهینه‌سازی است که اساس آنها بر مبنای نظریه‌ی تصویر است.

در این بخش، کنترل مدل پیش‌بین مبتنی بر بینایی به منظور هدایت ربات در مسیر مطلوب به همراه حفظ قیود معرفی می‌شود. به منظور هدایت ربات به کمک کنترل مدل پیش‌بین، ابتدا مدل دینامیکی ربات (رابطه (۲)) به فرم گسسته تبدیل می‌شود:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) \quad (۳)$$

در این رابطه x متغیرهای حالت سیستم است و رابطه (۳) در واقع معادله سیستم در فضای حالت را نمایش می‌دهد. به منظور داشتن کنترل مدل پیش‌بین مقاوم، رابطه (۳) با در نظر گرفتن اغتشاش به فرم زیر بازنویسی می‌شود [11]:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + d(k) \quad (۴)$$

فرض می‌شود بردار اغتشاشاتی d که به حالت‌های سیستم مربوط است، کران‌دار باشد. حال با در نظر گرفتن حالت برای سیستم و ورودی کنترلی و همچنین وجود محدودیت روی حالت‌ها و ورودی‌های کنترلی، قیود به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$u_{1\min} \leq u_1(k) \leq u_{1\max} \quad (۵)$$

$$u_{2\min} \leq u_2(k) \leq u_{2\max} \quad (۶)$$

$$u_{3\min} \leq u_3(k) \leq u_{3\max} \quad (۷)$$

$$x_{1\min} \leq x_1(k) \leq x_{1\max} \quad (۸)$$

$$x_{2\min} \leq x_2(k) \leq x_{2\max} \quad (۹)$$

$$x_{3\min} \leq x_3(k) \leq x_{3\max} \quad (۱۰)$$

$$d_{1\min} \leq d_1(k) \leq d_{1\max} \quad (۱۱)$$

$$d_{2\min} \leq d_2(k) \leq d_{2\max} \quad (۱۲)$$

$$d_{3\min} \leq d_3(k) \leq d_{3\max} \quad (۱۳)$$

باتوجه به کران‌دار بودن اغتشاشات، می‌توان آنها را در طول افق پیش‌بین به صورت زیر تعریف کرد:

$$\bar{d}_1(k) = [d_1(k+1|k), d_1(k+N_p|k)]^T$$

$$(۱۴)$$

$$\bar{d}_2(k) = [d_2(k+1|k), d_2(k+N_p|k)]^T$$

$$(۱۵)$$

$$\bar{d}_3(k) = [d_3(k+1|k), d_3(k+N_p|k)]^T$$

بنابراین با در نظر گرفتن $\bar{d}(k) = [d_1(k), d_2(k), d_3(k)]^T$ و نیز $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ رابطه کلی سیستم (۳) برحسب تغییرات ورودی به صورت رابطه (۱۶) خواهد بود:

$$\bar{x}(k) = G\Delta\bar{u}(k) + \tilde{f} + \tilde{g} + \bar{d}(k) \quad (۱۶)$$

همچنین در رابطه (۱۶) ماتریس‌های G ، \tilde{f} و \tilde{g} به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$(۱۷)$$

$$G = \begin{pmatrix} g(x(k|k-1)) & \dots & 0 \\ g(x(k+1|k-1)) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(x(k+N_p-1|k-1)) & \dots & g(x(k+N_p-1|k-1)) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3N_p \times 2N_u} \quad (۱۸)$$

$$\tilde{f} = \begin{pmatrix} f(x(k|k-1)) \\ f(x(k+1|k-1)) \\ \vdots \\ f(x(k+N_p-1|k-1)) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3N_p} \quad (۱۹)$$

$$\tilde{g} = \begin{pmatrix} g(x(k|k-1))u(k-1) \\ g(x(k+1|k-1))u(k-1) \\ \vdots \\ g(x(k+N_p-1|k-1))u(k-1) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3N_p} \quad (۲۰)$$

تابع هزینه با تعریف روی حالت‌ها و ورودی کنترلی به صورت رابطه (۲۰) بیان می‌شود. همچنین در این روابط R و Q ماتریس‌های وزنی مربوط به حالت‌ها و ورودی سیستم است:

$$\min \| G\Delta\bar{u}(k) + \tilde{f} + \tilde{g} + \bar{d}(k) \|_Q^2 + \| \Delta\bar{u}^T(k+j|k) \|_R^2 \quad (۲۱)$$

در نهایت رابطه نهایی مساله بهینه‌سازی به شکل (۲۱) بیان می‌شود:

$$s. t. E \begin{bmatrix} \Delta\bar{u}(k) \\ \bar{d}(k) \end{bmatrix} \leq b. \min \begin{bmatrix} \Delta\bar{u}(k) \\ \bar{d}(k) \end{bmatrix}^T W \begin{bmatrix} \Delta\bar{u}(k) \\ \bar{d}(k) \end{bmatrix} + c^T \begin{bmatrix} \Delta\bar{u}(k) \\ \bar{d}(k) \end{bmatrix}$$

که در رابطه (۲۱) ماتریس‌ها بدین شکل تعریف می‌شوند:

$$W = \begin{pmatrix} G^T Q G + R & G^T Q \\ Q G & Q \end{pmatrix}, c = \begin{bmatrix} 2G^T Q(\tilde{g} + \tilde{f}) \\ 2Q(\tilde{g} + \tilde{f}) \end{bmatrix}$$

$$b_1 = \begin{pmatrix} -\bar{u}_{\min} + \bar{u}(k-1) \\ \bar{u}_{\max} + \bar{u}(k-1) \\ -\bar{x}_{\min} + \tilde{f} + \tilde{g} \\ \bar{x}_{\max} - \tilde{f} - \tilde{g} \end{pmatrix} \in . E = \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & I \\ 0 & -I \end{pmatrix}$$

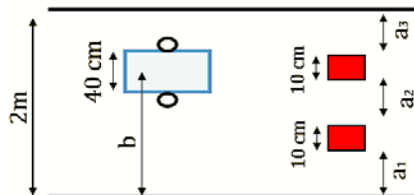
چنانچه معادله دینامیکی اخیر همگرا شود، پاسخ بهینه مساله (فرمان کنترلی u^*) به دست آمده است. این روند در هر لحظه زمانی k تکرار می‌شود. با استفاده از رابطه (۲۷) و با توجه به دو رابطه $\zeta = [\Delta \bar{u}(k), \bar{d}(k)]^T$ و $\varsigma = [\zeta, y]^T$ به دست می‌آید. در نهایت، با توجه به رابطه $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ برای هدایت ربات در لحظه k به دست می‌آید.

بافرض $\Lambda = I + M^T, P(\varsigma) = \varsigma - (M\varsigma + \eta), C(\varsigma) = \varsigma$ رابطه (۲۷) به صورت زیر ساده‌نویسی می‌شود:

$$\zeta = \vartheta \Lambda \{S_{\theta}(P(\varsigma)) - C(\varsigma)\} \quad (28)$$

۴- انتخاب مسیر بهینه

سناریوی در نظر گرفته شده برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی شامل راهرو و تعدادی مانع است. هدف نهایی، عبور ربات از دورن راهرو با فاصله مناسبی از موانع یا دیوارها است به صورتی که ربات همیشه از وسط راهرو عبور کند، با توجه به حضور موانع در مسیر حرکت، ربات متحرک بایستی بتواند بدون برخورد با آنها مسیر بهینه خود را مشخص نماید؛ به همین دلیل ربات باید در طول مسیر حرکت به تصمیم‌گیری و انتخاب مسیر بهینه اقدام نماید. مسیر انتخابی باید با توجه به موقعیت فعلی ربات و موقعیت موانع اتخاذ شود. در این بخش برای انتخاب مسیر مناسب، از سیستم فازی برای تصمیم‌گیری استفاده می‌شود [14]. مطابق شکل ۲، عرض راهرو ۲ متر، عرض ربات ۴۰ سانتی‌متر و ابعاد موانع ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ ساختار در نظر گرفته شده برای ربات و موانع در راهرو

به صورت پیش فرض دو مانع در مسیر حرکت ربات قرار دارد که با توجه به موقعیت آنها مقادیر فواصل a_1, a_2, a_3 تعیین می‌شود. حال با توجه به موقعیت ربات (فاصله مرکز ربات از دیوار پایینی (b))، مسیر بهینه تعیین می‌شود. مسیر انتخابی به نحوی تعیین می‌شود که ربات کمترین مسافت را توأم با عدم برخورد با موانع بپیماید. همچنین خروجی سیستم فازی مسیر انتخاب شده توسط الگوریتم فازی است. در شکل ۳، بلوک دیاگرام سیستم فازی مورد نظر مشاهده می‌شود.

توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی، مثلثی و در سه مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ در نظر گرفته شده‌اند (نمودار ۱).



شکل ۳ بلوک دیاگرام ورودی-خروجی سیستم فازی

$$E_1 = [-\tilde{I}, \tilde{I}, -G, G]^T \in \mathbb{R}^{(4N_c+6N_p) \times 2N_c} \quad \text{و} \quad \mathbb{R}^{4N_c+6N_p}$$

است.

حال با فرض $\zeta = [\Delta \bar{u}(k), \bar{d}(k)]^T$ رابطه (۲۱) به صورت رابطه (۲۲) بازنویسی می‌شود:

$$s. t. E\zeta \leq b, \min \zeta^T W \zeta + c^T \zeta \quad (22)$$

مساله برنامه‌ریزی مرتبه دو کنترل مدل پیش‌بین (۲۱) و (۲۲) نیاز به روشی برای حل برخط مساله دارد، یکی از راه حل‌های موثر، روش بهینه‌سازی شبکه عصبی بازگشتی تصویر است که در این مقاله از این روش استفاده شده است.

بردار تصمیم تصویر در مساله بهینه‌سازی به صورت $\varsigma = [\zeta, y]^T$ تعریف می‌شود و دارای کران‌های بالا/پایین ς^{\pm} است. همچنین y بردار دوگان تصمیم مربوطه است. مجموعه محدب Θ به شکل $\Theta = \{\varsigma^- \leq \varsigma \leq \varsigma^+\}$ تعریف می‌شود. ماتریس ضرایب $M \in \mathbb{R}^{N_M \times N_M}$ و بردار $\eta \in \mathbb{R}^{N_M}$ به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$(23)$$

$$M = \begin{bmatrix} W & -E^T \\ E & 0 \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} c \\ -b \end{bmatrix}$$

ابعاد ماتریس‌های M و η برابر $N_M = \alpha(N_c + mN_p)$ است که در آن m تعداد حالت‌های سیستم، N_c افق کنترلی، N_p افق پیش‌بین و α مربوط به تعداد قیود سیستم است. تعداد سلول‌ها در شبکه عصبی تصویر برابر با N_M است که با توجه به قیود مساله و افق‌های پیش‌بین و کنترلی تعریف می‌شود [11].

هدف از حل مسایل برنامه‌ریزی مرتبه دو توسط شبکه عصبی بازگشتی تصویر (روابط (۲۱) و (۲۲)) یافتن بردار $\varsigma^* \in \Theta$ در مجموعه $\{\varsigma | \varsigma^- \leq \varsigma \leq \varsigma^+\}$ است که شرایط نامساوی متغیر خطی زیر را برآورده نماید [13]:

$$(24)$$

$$(\varsigma - \varsigma^*)^T (M\varsigma^* + \eta) \geq 0 \quad \forall \varsigma \in \Theta$$

که در آن ضرایب M و η در روابط (۲۳) تعریف شده‌اند. نامساوی خطی می‌تواند به صورت معادله تکه‌ای خطی به شکل سیستم زیر تبدیل شود:

$$(25)$$

$$S_{\theta}(\varsigma - (M\varsigma + \eta)) - \varsigma = 0$$

که در آن S_{θ} اپراتور تصویر بر فضای Θ است و به صورت $S_{\theta}(\varsigma) = [S_{\theta}(\varsigma_1), S_{\theta}(\varsigma_{N_M})]^T$ تعریف می‌شود که در آن:

$$(26)$$

$$S_{\theta}(\varsigma_i) = \begin{cases} \varsigma_i^- & \text{if } \varsigma_i < \varsigma_i^- \\ \varsigma_i & \text{if } \varsigma_i^- \leq \varsigma_i \leq \varsigma_i^+ \\ \varsigma_i^+ & \text{if } \varsigma_i > \varsigma_i^+ \end{cases}, \quad \forall i \in \mathbb{R}^{N_M}$$

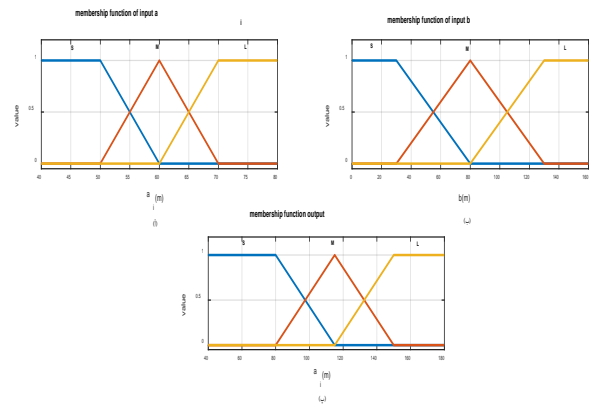
برای حل معادله (۲۵)، از رابطه دینامیکی زیر استفاده می‌شود که در آن ضریب ϑ ، پارامتر مثبت معین طراحی است:

$$(27)$$

$$\zeta = \vartheta (I + M^T) \{S_{\theta}(\varsigma - (M\varsigma + \eta)) - \varsigma\}$$

توسط الگوریتم کنترلی پیشنهادی به دست می‌آید، جابه‌جا می‌شود. اطلاعات پردازش‌شده مربوط به موقعیت موانع توسط دوربین به‌عنوان ورودی به سیستم تصمیم‌گیر فازی اعمال می‌شود. پس از انتخاب مسیر مناسب توسط سیستم فازی، کنترل مدل پیش‌بین به‌کمک بهینه‌ساز، ورودی کنترلی جهت هدایت ربات در مسیر را ارائه می‌دهد.

به‌منظور بررسی و اعتبارسنجی الگوریتم‌های کنترلی از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز رباتیک استفاده می‌شود. دو نرم‌افزار شناخته‌شده در این زمینه V-REP و GAZBO هستند. در حال حاضر، این دو نرم‌افزار در بسیاری از مقالات علمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [15, 16]. در این مقاله، به‌دلیل داشتن محیط کاربرپسند و نیز حرفه‌ای نرم‌افزار V-REP، شبیه‌سازی در این محیط انجام می‌شود. در نرم‌افزار V-REP ربات و محیط در نظر گرفته‌شده با واقعیت انطباق زیادی دارد. در واقع در این نرم‌افزار، در مدلی که برای ربات متحرک در نظر گرفته شده است اصطکاک با سطح، لغزش چرخ‌ها، تفاوت موتورهای ربات و سایر پارامترهای موجود در محیط واقعی لحاظ شده است. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به نتایج عملی بسیار نزدیک باشد. در این شبیه‌سازی، V-REP از طریق ارتباط با نرم‌افزار MATLAB، اقدام به هدایت ربات می‌نماید.



نمودار (۱) (آ) تابع عضویت ورودی سیستم فازی (a_i)، (ب) تابع عضویت ورودی سیستم فازی (b)، (پ) تابع عضویت خروجی سیستم فازی

با توجه به مقادیر ورودی‌های سیستم، مسیر انتخاب‌شده به‌نحوی تعیین می‌شود که ربات کمترین مسافت را (در صورت امکان عبور از مسیر انتخاب‌شده با توجه به عرض ربات و موقعیت ربات) پیماید. پایگاه قواعد در نظر گرفته‌شده در این سیستم به‌صورت زیر است:

- IF b is Small and a₁ is Medium or Large, THEN path is a₁
- IF b is Small and a₁ is Small and a₂ is Medium or Large, THEN path is a₂
- IF b is Small and a₁ is Small and a₂ is Small, THEN path is a₃
- IF b is Medium and a₂ is Medium or Large, THEN path is a₂
- IF b is Medium and a₂ is Small and a₁ is Large, THEN path is a₁
- IF b is Medium and a₂ is Small and a₃ is Large, THEN path is a₃
- IF b is Large and a₃ is Medium or Large, THEN path is a₃
- IF b is Large and a₃ is Small and a₂ is medium or large, THEN path is a₂
- IF b is Large and a₃ is Small and a₂ is Small, THEN path is a₃

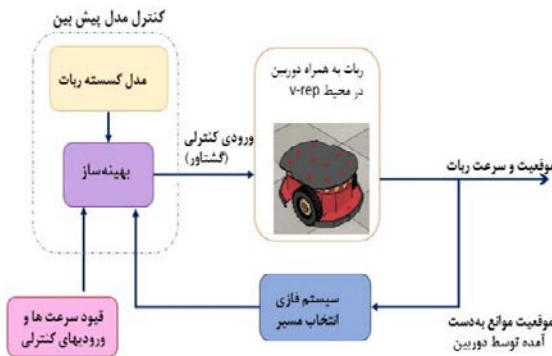
ساختار سیستم فازی از موتور استنتاج ضرب ممدانی، فازی‌گر تکین، فازی‌زدای میانگین مراکز و توابع عضویت مثلثی تشکیل شده است [14]:

$$(۲۹)$$

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left[\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right]}$$

که در آن $f(x) \subset \mathbb{R}, x \subset \mathbb{R}^n$ ، تعداد قواعد، n تعداد ورودی‌ها، \bar{y}^l مرکز تابع عضویت خروجی سیستم فازی متناظر با قاعده l ام و $\mu_{A_i^l}$ تابع عضویت متناظر با قاعده l ام مربوط به نامین ورودی است.

دیگرام بلوکی حلقه‌بسته سیستم کنترلی به‌صورت شکل ۴ است. در بلوک دیگرام کنترلی حلقه‌بسته سیستم، ربات به‌همراه دوربین در محیط نرم‌افزار شبیه‌ساز V-REP، با توجه به فرمان کنترلی که



شکل ۴) شمای کلی کنترل حلقه‌بسته‌ی سیستم

۵- نتایج شبیه‌سازی

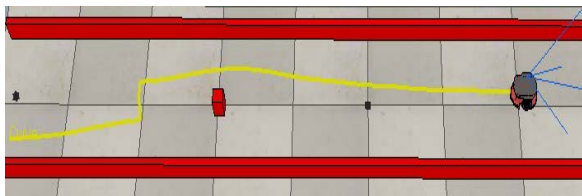
به‌منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی مدل پیش‌بین برای هدایت ربات، سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سناریوها شامل حرکت در حضور موانع، وجود نامعینی‌ها (تغییر موقعیت ربات توسط عامل خارجی، تغییر وزن ربات در حین حرکت و قطع شدن تصویر) و نیز مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی است. در تمامی سناریوها ربات بدون داشتن اطلاعات قبلی در مورد موقعیت موانع شروع به حرکت می‌کند و براساس اطلاعاتی که دوربین نسبت به محیط پیش‌روی خود به دست می‌آورد، مسیر عبوری از بین موانع را انتخاب کرده و برای هدایت در مسیر انتخاب‌شده، از الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌کند.

منحنی زرد رنگ در تمامی تصاویر شبیه‌سازی، مسیری را نشان می‌دهد که ربات با توجه به شرایط محیط انتخاب نموده و حرکت کرده است.

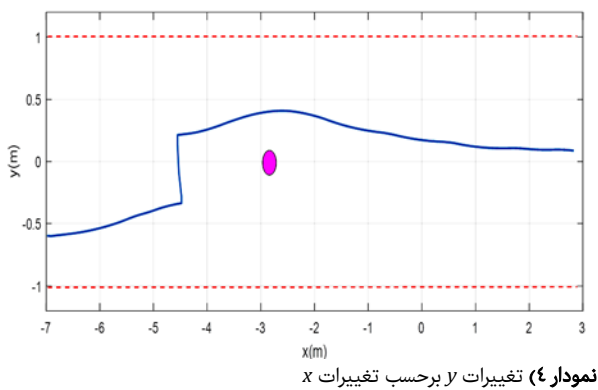
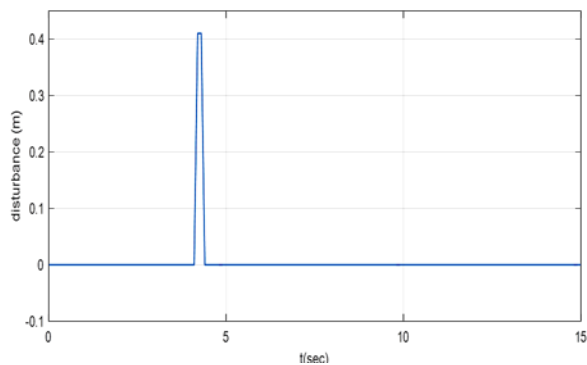
در این شبیه‌سازی که در محیط MATLAB و V-REP انجام شده است، افق پیش‌بین در نظر گرفته‌شده ۵ و افق کنترلی یک است. زمان نمونه‌برداری در این شبیه‌سازی ۱۰۰ میلی‌ثانیه فرض شده است. مقادیر پارامترهای ربات متحرک چرخ‌دار، به‌صورت جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند [17].

۲-۵- اعمال اغتشاش

به‌منظور اعمال اغتشاش خارجی، فرض شده در لحظه ۴/۲۵ ثانیه به ربات اغتشاش وارد شده به‌طوری که آن را در جهت محور y به‌میزان ۰/۴۱ سانتی‌متر جابه‌جا می‌نماید. بنابراین ربات در حال حرکت، تحت عامل خارجی از مسیر خود منحرف شده و روبه‌روی مانع قرار می‌گیرد. مسیریابی در محیط V-REP به‌صورت شکل ۶ خواهد بود. نمودار ۴، نشان‌دهنده تغییرات y برحسب تغییرات x است. در نمودار ۵، تغییرات اغتشاش خارجی برحسب زمان نمایش داده شده است.



شکل ۶) مسیر حرکت ربات در محیط شبیه‌سازی پس از اعمال اغتشاش

نمودار ۴) تغییرات y برحسب تغییرات x نمودار ۵) اغتشاش خارجی اعمال شده به ربات در جهت y

۳-۵- تغییر جرم

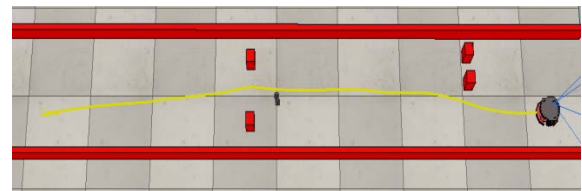
با توجه به این که در کنترل مدل پیش‌بین، نیاز به مدلی دقیق از سیستم است و امکان دستیابی به مقدار دقیق پارامترها امکان‌پذیر نیست، بنابراین در این بخش با توجه به روابط بخش ۳، از کنترل مدل پیش‌بین مقاوم استفاده می‌شود تا این نقیصه جبران شود. در این شبیه‌سازی جرم در نظر گرفته شده برای ربات ۱۶ کیلوگرم است. در حالی که در معادلات مربوط به مدل گسسته سیستم در کنترل مدل پیش‌بین، مقدار ۱۶ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. مسیریابی در محیط V-REP به‌صورت شکل ۷ خواهد بود. در نمودار ۶، تغییرات y برحسب تغییرات x نشان داده شده است.

جدول ۱) مقادیر پارامترهای ربات pioneer 3dx [17]

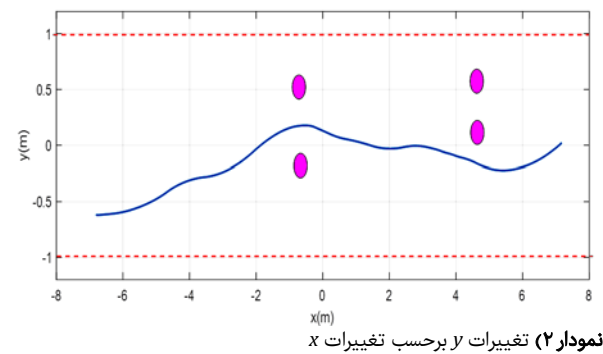
پارامترها	مقادیر
r	۰/۰۹۵ متر
R	۰/۲۴ متر
d	۰/۰۵ متر
L	۰/۱ متر
m_c	۱۶ کیلوگرم
m_w	۱/۵ کیلوگرم
I_c	۰/۵۳۷ کیلوگرم*مترمربع
I_w	۰/۰۲۳ کیلوگرم*مترمربع
I_m	۰/۰۱۱ کیلوگرم*مترمربع

۱-۵- حرکت در حضور موانع

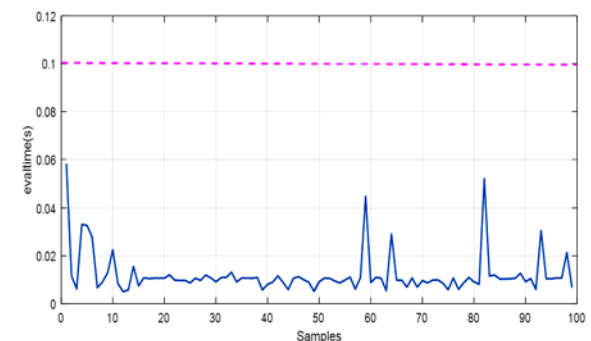
در این بخش، حرکت ربات در مسیری با دو دیوار در طرفین در موقعیت‌های $b = \pm 1m$ به‌همراه چهار مانع در موقعیت‌های متفاوت انجام می‌شود. موقعیت اولیه ربات در محل $(-۰/۶, -۷)$ ؛ برحسب متر) یعنی نزدیک به دیوار پایینی است. هدف، هدایت ربات بین دو دیوار توأم با اجتناب از برخورد با موانع است. شکل ۵ و نمودار ۲، مسیر حرکت ربات در نرم‌افزار شبیه‌ساز را نشان می‌دهد.



شکل ۵) مسیر حرکت ربات در محیط شبیه‌سازی با وجود موانع

نمودار ۲) تغییرات y برحسب تغییرات x

ربات سعی در قرارگرفتن در وسط راهرو دارد و پس از آن با توجه به موقعیت خود و موانع، اقدام به جابه‌جایی می‌نماید. مطابق نمودار ۳، زمان انجام محاسبات در تمام نمونه‌برداری‌های صورت‌گرفته کمتر از زمان نمونه‌برداری بوده است که بیانگر بی‌درنگ بودن الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای شبکه عصبی بازگشتی تصویر است.



نمودار ۳) منحنی تغییرات زمان محاسبه برحسب نمونه

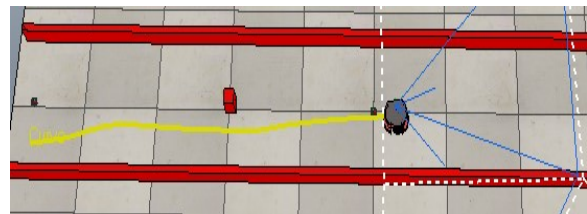
که با توجه به نمودار ۲، مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی به‌خوبی توانسته به هدایت ربات در مسیر شامل موانع متعدد اقدام نماید. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، روش بهینه‌سازی شبکه عصبی بازگشتی، تبدیل مساله بهینه‌سازی به سیستم دینامیکی است، بنابراین انتظار می‌رود با تکرار این روش نتیجه بهتری در همگرایی شبکه حاصل شود؛ اما این کار موجب بالا رفتن زمان کلی انجام محاسبات می‌شود و در نتیجه بایستی مصالحه‌ای بین پاسخ بهینه و زمان انجام محاسبات انجام داد. هر مرحله بهینه‌سازی، زمانی در مقیاس هزارم ثانیه دارد که با تکرار این روش این زمان افزایش می‌یابد. همچنین در روش پیشنهادی از الگوریتم فازی برای انتخاب مسیر استفاده شده است که مشاهده می‌شود ربات با توجه به موقعیت اولیه خود و موقعیت مانع، مسیر پایینی را انتخاب می‌کند که کوتاه‌ترین مسیر ممکن است. در صورت عدم استفاده از سیستم فازی مسیر بالایی انتخاب می‌شود که مسیر بهینه نیست.

حال به منظور مقایسه روش‌های مختلف کنترلی برای هدایت ربات متحرک، می‌توان مطالعه‌ی و همکاران^[10] را در نظر گرفت. در این مطالعه، هدایت ربات متحرک توسط الگوریتم کنترل مدل پیش‌بین انجام شده است. همچنین حسگر مورد استفاده برای دریافت اطلاعات، دوربین است. در این مطالعه، بهینه‌سازی در دو سطح دینامیکی و سینماتیکی به صورت جداگانه و در هر نمونه‌برداری صورت می‌گیرد که موجب افزایش حجم محاسبات می‌شود. در این مرجع به موانع اشاره‌ای نشده است. همچنین سرعت ربات حداکثر ۵ سانتی‌متر بر ثانیه است که باعث می‌شود زمان همگرایی سیستم نزدیک به ۱۰۰ ثانیه باشد. بنابراین در مقایسه با روش مطالعه‌ی و همکاران^[10]، روش پیشنهادی دارای مزیت‌هایی است که مشخصاً برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به در نظر گرفتن مانع در مسیر حرکت ربات، تغییر پارامترها و نیز سرعت بیشتر ربات در طی کردن مسیر نام برد. همچنین کنترل‌کننده در روش فوق، به‌طور هم‌زمان از دو بهینه‌سازی در هر نمونه‌برداری استفاده می‌کند (سینماتیکی و دینامیکی)، که این امر موجب افزایش زمان انجام محاسبات شده و در نتیجه انجام بی‌درنگ آن در عمل بسیار مشکل یا غیرممکن خواهد بود. بررسی مشکلات مربوط به دوربین و نیز تغییرات پارامترها و اغتشاشات از دیگر مواردی است که در مطالعه‌ی و همکاران^[10] بررسی نشده است.

در مطالعه‌ی زارع/تابکی^[19] هدایت ربات متحرک به وسیله کنترل مدل پیش‌بین انجام شده است. بهینه‌سازی تابع هزینه به کمک روش FMINCON در نرم‌افزار متلب صورت گرفته است که زمان پاسخ بسیار بیشتری نسبت به روش پیشنهادی این پایان‌نامه برای هر مرحله از بهینه‌سازی را می‌طلبد. همچنین در این مطالعه موانع در نظر گرفته شده و عملکرد کنترلی به‌خوبی هدایت ربات را انجام داده است. به منظور هدایت مناسب ربات به هنگام تغییرات پارامترهای ربات از سیستم فازی برای تعیین مدل ربات متحرک و شناسایی سیستم استفاده شده است. که این امر علی‌رغم پاسخ مطلوب شناسایی منجر به افزایش زمان انجام محاسبات می‌شود. در این مطالعه نحوه دریافت اطلاعات از محیط بررسی نشده و اطلاعات محیط به صورت داده اولیه در نظر گرفته شده است.

حال به منظور امکان مقایسه بهتر، عملکرد الگوریتم‌های کنترلی ذکر شده در جدول ۲، بیان شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد روش پیشنهادی علاوه بر داشتن زمان کوتاه‌تر نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی از نظر عملکرد کنترلی نیز نتیجه بهتری دارد.

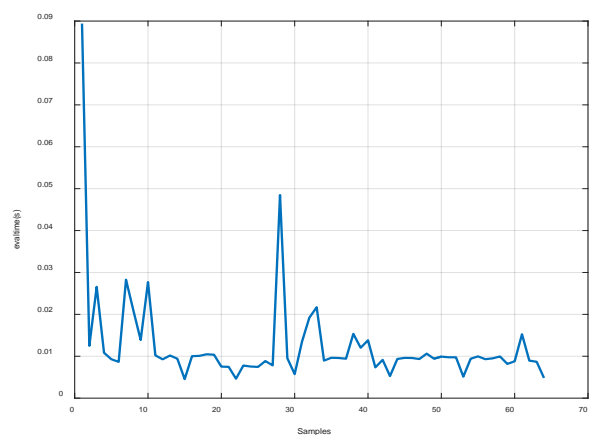
به کمک روش QUADPROG انجام می‌شود. شکل ۱۰ مسیر حرکت ربات در محیط شبیه‌ساز را نشان می‌دهد. در نمودار ۹، زمان انجام محاسبات برحسب نمونه نمایش داده شده است.



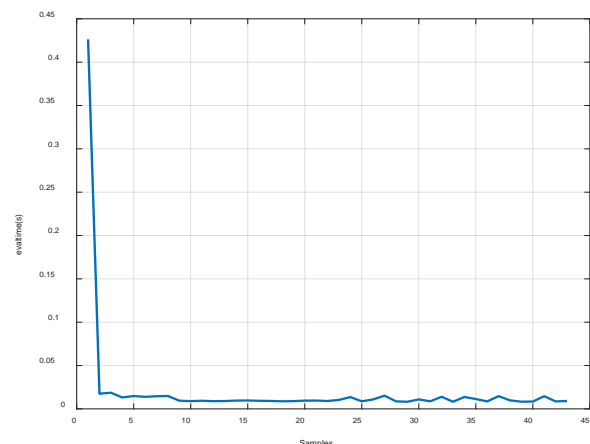
شکل ۹) مسیر حرکت ربات به روش بهینه‌سازی شبکه عصبی بازگشتی تصویر



شکل ۱۰) مسیر حرکت ربات به روش بهینه‌سازی QUADPROG



نمودار ۸) زمان انجام محاسبات برحسب نمونه



نمودار ۹) زمان انجام محاسبات برحسب نمونه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم بهینه‌سازی QUADPROG قادر به ردیابی و هدایت ربات در مسیر مناسب نبوده و ربات پس از طی مسافتی با دیوار برخورد می‌نماید. در حالی

معیارهای کارایی	روش پیشنهادی	مرجع [10]	مرجع [19]
تضمین پایداری	وجود دارد	وجود دارد	وجود دارد
حساسیت نسبت به نویز	مقاوم	*	*
مقاومت در برابر اغتشاش	مقاوم	*	مقاوم
مقاومت در برابر عدم قطعیت	مقاوم	*	مقاوم
حرکت در حضور موانع	در نظر گرفته شده	*	در نظر گرفته شده
میانگین زمان انجام محاسبات	در مقیاس هزارم ثانیه	در هر زمان نمونه برداری دو بهینه سازی هرکدام در مقیاس هزارم ثانیه	در مقیاس صدم ثانیه
پیاده سازی الگوریتم	متلب و V-REP	عملی	متلب

* بررسی انجام نشده است.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، از الگوریتم مدل پیش بین مقاوم برای هدایت و از دوربین به عنوان حسگر برای دریافت اطلاعات محیط استفاده شده است. استفاده از دوربین علاوه بر داشتن مزایا؛ دشواری‌هایی نیز دارد. از جمله این دشواری‌ها نیاز به پردازش تصویر مناسب به منظور حذف نویزهای احتمالی تصویر و نیز قطع ارتباط دوربین با سیستم کنترل در حین انجام فرآیند است. علاوه بر این وجود اغتشاشاتی مانند تغییر وزن ربات در حین حرکت یا تغییر موقعیت ربات توسط عامل خارجی، ضرورت استفاده از کنترل مدل پیش بین مقاوم را نشان می‌دهد، که در مطالعه حاضر در قوام الگوریتم پیشنهادی نسبت به شرایط ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور افزایش سرعت بهینه سازی و بی‌درنگ بودن ورودی کنترلی، از بهینه سازی شبکه عصبی بازگشتی تصویر (نگاشت) استفاده شد که به موجب آن، زمان انجام محاسبات بهینه سازی کمتر از زمان نمونه برداری سیستم شد. در حالی که در روش‌های بهینه سازی متداول، زمان بهینه سازی بسیار بیشتر از زمان نمونه برداری است و بنابراین سیستم با کندی و تاخیر همراه خواهد بود. همچنین در مطالعه حاضر به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، شبیه سازی در محیط نرم افزار V-REP انجام شد که مسیر شامل راهرو دارای موانع بوده است؛ ربات اطلاعات اولیه‌ای از موقعیت موانع ندارد و تنها از طریق اطلاعات دوربین، بایستی مسیر بهینه را انتخاب و حرکت خود را برای عبور از آن مسیر با استفاده از الگوریتم پیشنهادی کنترل کند به طوری که با موانع برخورد نداشته باشد و حتی المقدور در وسط راهرو حرکت کند. در ادامه تحقیقات روی کنترل مدل پیش بین ربات متحرک، پیاده سازی عملی الگوریتم انجام خواهد شد. همچنین استفاده از الگوریتم کنترلی پیشنهادی روی ربات‌های همکار و دسته جمعی دارای پتانسیل بررسی در تحقیقات آتی است.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از کلیه اساتید محترم گروه برق-کنترل دانشگاه علم و صنعت تشکر و قدردانی می‌شود.
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
سهم نویسندگان: رویا خونساریان (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ محمد فرخی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪).
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Martinez-Gomez J, Fernandez-Caballero A, Garcia-Varea I, Rodriguez L, Romero Gonzalez C. A taxonomy of vision systems for ground mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014;11(7).
- Wang H, Guo D, Liang X, Chen W, Hu G, Leang KK. Adaptive vision-based leader-follower formation control of mobile robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;64(4):2893-2902.
- Zhang X, Fang Y, Li B, Wang J. Visual servoing of nonholonomic mobile robots with uncalibrated camera-to-robot parameters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;64(1):390-400.
- Gupta M, Kumar S, Behera L, Subramanian VK. A novel vision-based tracking algorithm for a human-following mobile robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017;47(7):1415-1427.
- Li B, Zhang X, Fang Y, Shi W. Visual servo regulation of wheeled mobile robots with simultaneous depth identification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018;65(1):460-469.
- Harasim P, Trojnacki M. State of the Art in Predictive Control of Wheeled Mobile Robots. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*. 2016;10(1):34-42.
- Li Z, Xiao H, Yang C, Zhao Y. Model predictive control of nonholonomic chained systems using general projection neural networks optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2015;45(10):1313-1321.
- Azizi MR, Keighobadi J. Point stabilization of nonholonomic spherical mobile robot using nonlinear model predictive control. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017;98:347-359.
- Ke F, Li Z, Yang C. Robust tube-based predictive control for visual servoing of constrained differential-drive mobile robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018;65(4):3437-3446.
- Li Z, Yang C, Su CY, Deng J, Zhang W. Vision-based model predictive control for steering of a nonholonomic mobile robot. *IEEE Transaction on Control Systems and Technology*. 2016;24(2):553-564.
- Xiao H, Li Z, Yang C, Zhang L, Yuan P, Ding L, et al. Robust stabilization of a wheeled mobile robot using model predictive control based on neuro-dynamics optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;64(1):505-516.
- Sarkar N, Yun X, Kumar V. Control of mechanical systems with rolling constraints: Application to dynamic control of mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*. 1994;13(1):55-69.
- Zhang Y, Ge SS, Lee TH. A unified quadratic-programming-based dynamical system approach to joint torque optimization of physically constrained redundant manipulators. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 2004;34(5):2126-2132.
- Wang LX. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. New Jersey: Prentice Hall PTR; 1997.
- Chen J, Jia B, Zhang K. Trifocal, Tensor-based adaptive visual trajectory tracking control of mobile robots. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2017;47(11):3784-3798.
- Agüero CE, Koenig N, Chen I, Boyer H, Peters S, Hsu J, et al. Inside the virtual robotics challenge: Simulating

18- Dalamagkidis K, Valavanis KP, Piegł AL. Nonlinear model predictive control with neural network optimization for autonomous autorotation of small unmanned helicopters. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2007;19(4):818-831.

19- Zare-Atabaki A. Model predictive control of mobile robot in presence of obstacles [Dissertation]. Tehran: Iran University of Science and Technology; 2007. [Persian]

real-time robotic disaster response. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2015;12(2):494-506.

17- MobileRobots Inc. Pioneer 3 operations manual with mobile robots exclusive advanced robot control & operations software. Version 3. [Internet]. 2006 [Cited 2018 July 01]. Available from: https://www.inf.ufrgs.br/~prestes/Courses/Robotics/manual_pioneer.pdf