



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Design of a Hierarchical Fuzzy Control System to Guide the Robot and Prevent Collisions with Obstacles

Alireza Makvandi ^a, Hesam Makvandi ^{b,*}, Sayed Ehsan Alavi^c

^a MSc Student, Department of Engineering, Abadan Branch, Islamic Azad University, Abadan, Iran

^b Assistant Professor, Department of Engineering, Abadan Branch, Islamic Azad University, Abadan, Iran

^c Assistant Professor, Faculty of Engineering, Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, DashtAzadegan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 15 February 2022

Revised: 30 May 2023

Accepted: 17 February 2024

Keywords:

Smart routing,
Hierarchical fuzzy control,
Mobile robot,
Value function,
Fuzzy control type II.

ABSTRACT

Among the advantages of utilizing fuzzy control as an intelligent controller, one can name the elimination of the need for repetitive calculations as well as the ability to use the experience of experts in controlling the robots' motions in uncharted environments. Instead of solving an optimization problem or formulating rules, the fuzzy control method can transfer these rules irregularly to a robot or a group of robots. The fuzzy controller proposed in the current contribution consists of three agents: A robot navigation agent, which helps the robot reach the target point using a fuzzy-based controller, an obstacle avoidance agent which exploits a hierarchical fuzzy control to keep the robot away from obstructions, and a perception agent that employs eight sensors to provide the required information concerning the environment. A value function is proposed to coordinate the aforementioned factors eliminating possible conflict scenarios. The simulation results confirm the effectiveness and efficiency of the proposed approach. Moreover, it is shown that the robot can reach the target point without colliding with obstacles.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.26135.2218>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: h.makvandi@iauabadan.ac.ir

How to cite this article:

Makvandi, A., Makvandi, H., & Alavi, S. E. (2024). Design of a hierarchical fuzzy control system to guide the robot and prevent collisions with obstacles. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(78), 327-337. doi: 10.22075/jme.2024.26135.2218

طراحی یک سیستم کنترل کننده فازی سلسله مراتبی به منظور هدایت ربات و پیشگیری از برخورد با موانع

علیرضا مکنونی^۱، حسام مکنونی^{۲*}، سید احسان علوی^۳

چکیده	اطلاعات مقاله
از مزایای کنترل فازی به عنوان یک کنترلر هوشمند، عدم نیاز به محاسبات تکراری و همچنین قابلیت استفاده از تجربه کارشناسان در زمینه کنترل حرکت ربات‌ها در محیط‌های ناشناخته می‌باشد. لذا می‌توان به جای استفاده از حل یک مسئله بهینه و فرموله کردن قوانین، از روش کنترل فازی برای انتقال این قوانین به صورت بی‌قاعده به ربات و یا مجموعه‌ی ربات‌ها استفاده نمود. معماری کنترل کننده فازی پیشنهادی در این پژوهش از سه عامل تشکیل شده است: عامل ناوبری ربات، که با یک کنترل کننده مبتنی بر فازی به کنترل ربات در رسیدن به نقطه هدف کمک می‌کند. عامل اجتناب از موانع، که با استفاده از یک کنترل فازی سلسله مراتبی وظیفه دور نگه داشتن ربات از موانع را بر عهده دارد و یک عامل ادراک که با استفاده از هشت حسگر اطلاعات لازم در مورد محیط را ارائه می‌دهد. برای هماهنگی میان عوامل نامبرده، تابع ارزش به منظور حذف موقعیت‌های تضاد بین عامل‌ها ارائه شده است. نتایج شبیه سازی تایید کننده اثربخشی و کارایی روش پیشنهادی ارائه شده است، به طوری که ربات می‌تواند بدون برخورد با موانع در محیطی با موانع مختلف به موقعیت هدف برسد.	دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸
	واژگان کلیدی: مسیریابی هوشمند، کنترل فازی سلسله مراتبی، ربات سیار، تابع ارزش، کنترل فازی نوع دوم.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.26135.2218>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مسیر اشاره شده کارایی چندانی ندارند. از این رو برخی موسسات برای اینکه بتوانند یک محیط کاملاً کنترل شده برای ربات‌ها به وجود آورند از تعداد زیادی سیستم بینایی فعال و غیر فعال، انواع سنسور و همچنین برنامه‌های استدلالی پیچیده‌ای استفاده می‌کنند. با وجود آنکه این ربات‌ها با چنین سیستم‌هایی بسیار قدرتمند و همه کاره هستند ولی هزینه تامین و نگهداری آن‌ها بسیار سنگین است. از این رو هر شرکتی توانایی تامین آن‌ها را ندارد و عملاً از دسترس همه خارج است. یک راه حل مناسب برای

۱- مقدمه^۱

طراحی مسیر حرکت و هدایت خودکار ربات‌های مستقل در یک محیط ناشناخته یکی از چالش‌های پیش رو محققان در این زمینه است. ربات‌های با هدایت خودکار که در کارخانجات و کارگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای یک مسیر مشخص می‌باشند که این مسیر به وسیله کابل‌های نوری یا مغناطیسی بر روی زمین مشخص شده است. بنابراین ربات‌ها کارایی بالایی برای حمل مواد در این محل‌ها دارند ولی خارج از این محیط‌ها به دلیل عدم وجود

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.makvandi@iaubadan.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکترونیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی،

آبادان، ایران

۲. استادیار گروه مکترونیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران

اهواز- پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، ایران

استناد به این مقاله:

مهرز و همکاران [۵]، از یک روش براساس بهینه‌سازی برای کنترل ردیاب مسیر نسبی و ردیاب موقعیت نسبی در سیستم‌های چند رباته استفاده نمودند. در این روش، یک یا چند ربات در یک مکان قرار می‌گیرند و با توجه به ربات مرجع در مسیرهای مختلف هدایت می‌شوند. باکدی و همکاران [۶]، از سیستم دوربین کینکت دوپل و الگوریتم ژنتیک برای تولید یک مسیر بهینه بدون تصادف و دستیابی به هدف استفاده نمودند. آن‌ها، یک کنترل‌کننده منطق فازی تطبیقی برای ردیابی ربات سیار در مسیر ارائه نمودند. رضایی نوده و همکاران [۷] با ترکیب منطق فازی با شبکه عصبی و مود لغزشی مرتبه بالا به کنترل یک بازوی رباتیک تحت اختلال قابل توجه و نامعینی پارامتری پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که روش ارائه شده نسبت به روش مود لغزشی کلاسیک نسبت به حضور نامعینی و اختلال مقاوم‌تر است و به خوبی از عهده کنترل بازوی رباتیک تحت شرایط مورد نظر برمی‌آید.

نیکخوی تنها و همکاران [۸] با استفاده از روش کنترل فازی به هدایت و مسیریابی ربات در حضور موانع ثابت و متحرک پرداختند و موفق شدند با استفاده از این روش راهکاری را به منظور هدایت ربات در محیط‌های ناشناخته با حضور انسان و موانع ارائه نمایند. تیکنی و شهبازی [۹] با استفاده از الگوریتم کنترل فازی به کنترل موقعیت زاویه‌ای کوادراتور پرداختند. آن‌ها به منظور حذف نویزهای موجود در خروجی حسگرها از فیلتر کالمن استفاده نمودند. قنواتی و همکاران [۱۰] به منظور کنترل یک ربات کابلی صفحه‌ای از کنترل‌کننده فازی تناسبی-انتگرالی-مشتقی استفاده نمودند. آن‌ها برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی دسته میگو استفاده نمودند و موفق شدند ضمن هدایت سریع ربات، کششی بودن نیرو در کابل‌ها را حفظ کنند.

وی و همکاران [۱۱] به منظور بهبود توانایی مسیریابی ربات‌های مستقل از هوش مصنوعی و الگوریتم بینایی ماشین بهره گرفتند. همچنین به منظور بهبود تشخیص لبه‌های مسیر از ترکیب الگوریتم مورچگان و الگوریتم کنی استفاده نمودند. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده افزایش محسوس عملکرد سیستم ناوبری می‌باشد. چانگ و همکاران [۱۲] نیز با استفاده از شبکه عصبی و یادگیری عمیق سلسله

کم کردن هزینه‌ها و ساده نمودن محاسبات استفاده از یک سیستم چندعامله هوشمند می‌باشد. ایده اصلی که پشت یک سیستم چندعامله هوشمند قرار دارد، این است که یک گروه از عامل‌های مستقل، برای رسیدن به یک هدف مشترک با یکدیگر همکاری کنند.

سنا و همکاران [۱]، یک سیستم چندعامله هوشمند با استفاده از سخت‌افزاری شامل ربات‌ها با سه و چهار پا و دوربین IP و نرم‌افزاری مشتمل بر پردازش تصویر، ارتباطات، تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی و تولید مسیر ارائه داده‌اند. یک سیستم چند عامله توسط /ینوچنتی و همکارانش [۲] با استفاده از چهار زیر سیستم متشکل از عوامل ادراک، رفتار، مشورت و محرک ارائه شده است. آن‌ها از مجموعه‌های فازی برای مدل‌سازی ارتباط بین کنترل‌کننده‌های مختلف استفاده نموده‌اند و آن‌ها را برای دستیابی به رفتارهای مطلوب ترکیب کردند. علاوه بر این، تعداد عوامل ادراک با تعداد سنسورها برابر در نظر گرفته شده‌اند. انو و همکاران [۳] یک معماری چندعامله برای کنترل یک صندلی چرخ‌دار ارائه کردند. در این معماری، چهار عامل در نظر گرفته شده عبارتند از: کنترل‌کننده سنسور، شناساگر راهرو، اجتناب از برخورد (با استفاده از سیستم‌های منطق فازی) و محرک.

کاتزوراکیس و همکاران [۴]، سیستم پیشگیری خروج از جاده (RDP) در موقعیت اضطراری را توسط شبیه‌سازی رانندگی ارزیابی نمودند. این سیستم در دو سطح اتوماسیون ارزیابی شد: (۱) بازخورد لمسی (HF) که در آن RDP گشتاور فرمان مشاور را فراهم می‌کند به نحوی که انسان و ماشین با همکاری هم خودرو را هدایت می‌کنند. (۲) رانندگی توسط سیم (DBW) که در آن RDP به طور خودکار و مستقل از ورودی فرمان اعمال شده توسط انسان، زاویه چرخ جلو را تصحیح می‌کند. این تست بر روی سی شرکت‌کننده اجرا گردید به طوری که رانندگان باید بدون برخورد با موانع خودرو را بر روی جاده نگه دارند. نتایج نشان داد که بازخورد لمسی تاثیر قابل توجهی بر روی گشتاور فرمان اندازه‌گیری شده چرخ‌ها دارد، اما هیچ تاثیری بر روی زاویه چرخ و مسیر خودرو ندارد. DBW مانع خروج از جاده می‌گردد ولی منجر به فرمان‌های ناخواسته انسان و در نتیجه برخورد با موانع خواهد شد

⁴ Drive By Wire

² Road-Departure Prevention

³ Haptic Feedback

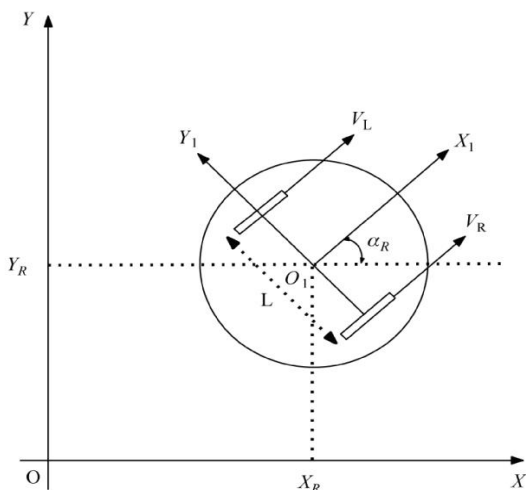
ناوبری ربات و اجتناب از برخورد با مانع است، تشریح خواهد شد.

۲-۱- سینماتیک ربات

در این بخش به بررسی سینماتیک رباتی همانند شکل (۱) که یک ربات سیار غیرهولونومیک دارای دو چرخ با حرکت مستقل از هم است، پرداخته شده است. برای هدایت ربات لازم است که سرعت چرخ‌ها کنترل شود. لذا مدل حرکتی ربات به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \frac{dX_R}{dt} = \frac{V_R + V_L}{2} \cos \alpha_R \\ \frac{dY_R}{dt} = \frac{V_R + V_L}{2} \sin \alpha_R \\ \frac{d\alpha_R}{dt} = \frac{V_R - V_L}{L} \end{cases} \quad (1)$$

در جائیکه V_L و V_R به ترتیب سرعت چرخ سمت های راست و چپ، α_R زاویه ربات نسبت به محور X و L فاصله بین دو چرخ ربات است.



شکل ۱- مدل شماتیکی از ربات سیار

۲-۲- ساختار کنترلی ربات

روش اتخاذ شده برای کنترل ربات شامل ترکیبی از رفتارهای ناهمزمان و مستقل متفاوت است. هر رفتار توسط یک عامل برای انجام یک وظیفه خاص مدل شده است. این عوامل می‌توانند با هم به منظور برقراری هماهنگی و اطمینان از صحت رفتار کل گروه ارتباط برقرار کنند. ساختار پیشنهادی برای کنترل ربات در شکل (۲) ارائه شده است. در این ساختار سه عامل وجود دارد، (۱) عامل ادراک (۲) عامل ناوبری ربات (۳) عامل اجتناب از مانع.

مراتبی راهکاری را به منظور ناوبری یک دسته ربات و پیشگیری از برخورد ربات با موانع در محیط‌های ناشناخته ارائه نمودند. یو و همکاران [۱۳] از شبکه عصبی و معماری DQN دو گانه به منظور هدایت رباتهای کشاورزی و پیشگیری از تصادم این ربات‌ها با یکدیگر و با موانع استفاده نمودند. آنها به منظور آموزش کارآمد مدل‌ها، سه موقعیت رویارویی (مقابل، عبور و سبقت) در یک محیط شبیه‌سازی دینامیک مدل‌سازی نمودند. نتایج بدست آمده توسط ایشان نشان‌دهنده کارایی و عملی بودن روش ارائه شده می‌باشد. مدل‌سازی و طراحی سیستم‌های فازی سلسله مراتبی توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است [۱۴ و ۱۵]. این سیستم‌ها شامل یک سیستم فازی متشکل از چندین زیر سیستم فازی با اندازه کوچکتر هستند که به صورت سلسله مراتبی به هم مرتب می‌باشند. این زیر سیستم‌های فازی سلسله مراتبی امکان کاهش تعداد قوانین فازی را در مقایسه با یک سیستم فازی استاندارد فراهم می‌سازند [۱۶]. در این تحقیق، هدف کنترل ربات توسط کنترل همکارانه غیر متمرکز سیستم‌های چندعامله برای رسیدن به موقعیت مطلوب بدون برخورد با موانع است. بدین منظور ابتدا دو رفتار مذکور یعنی رسیدن به موقعیت و اجتناب از برخورد با موانع توسط دو عامل، مدل خواهد شد. در واقع عامل ناوبری ربات یک کنترل ساده فازی است. در حالی که، برای عامل اجتناب از برخورد با موانع تمامی سنسورها برای تعیین مکان موانع بکار برده می‌شوند. در این مورد کنترل کننده فازی دارای متغیرهای ورودی و قوانین فازی بسیار بیشتری می‌باشد. در نتیجه، اجرای چنین کنترل کننده‌های دشوار است از اینرو کنترل کننده فازی سلسله مراتبی برای توسعه این عامل پیشنهاد داده شده است. لازم به ذکر است که به منظور کاهش اثر عدم قطعیت‌های سیستم، کنترل فازی نوع دوم بازه‌ای به عنوان کنترل کننده‌های فازی مذکور بکارگیری شده است. در ادامه پس از معرفی سینماتیک ربات مورد نظر، روش کنترل فازی سلسله مراتبی معرفی شده، ارائه می‌شود و نتایج بدست آمده برای چند حالت مختلف ارائه می‌گردد.

۲- مبنای نظری و روش انجام پژوهش

در این بخش ابتدا به تشریح ساختار ربات چرخدار مورد نظر و ارائه روابط دینامیکی حاکم بر آن پرداخته خواهد شد. سپس، ساختار کنترلی ربات که شامل سه عامل ادراک،

شده است، در حالی که زاویه φ در بازه $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ تعریف شده است. توابع عضویت پارامترهای d و φ به فرم گوسی همانند رابطه (۵) تعریف شده‌اند.

$$Gauss(x, \sigma, a) = \exp\left[-\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

در اینجا پنج تابع عضویت فازی (VS: بسیار کوچک، S: کوچک، M: متوسط، L: بزرگ، VL: بسیار بزرگ) برای فاصله d و هفت تابع عضویت (NL: منفی بزرگ، NM: منفی متوسط، NS: منفی کوچک، Z: صفر، PS: مثبت کوچک، PM: مثبت متوسط، PL: مثبت بزرگ) برای زاویه φ منجر به نتایج مطلوب می‌گردد. بنابراین، این کنترل‌کننده فقط دارای ۳۵ قانون فازی است. قوانین فازی پیشنهادی برای سرعت چرخ راست و سرعت چرخ چپ به ترتیب در جداول استنتاج فازی ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. خروجی کنترل‌کننده فازی سرعت چرخ‌های چپ و راست (V_R و V_L) هستند.

جدول ۱- قانون فازی برای سرعت چرخ راست

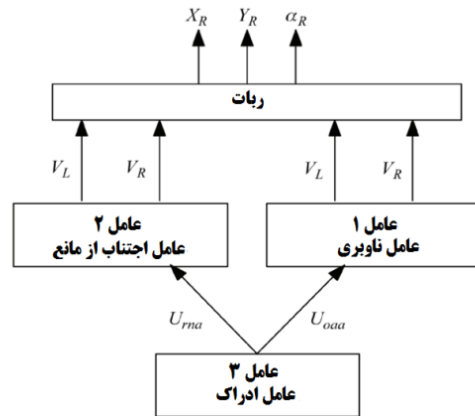
		φ						
		V_R	NL	NM	NS	Z	PS	PM
d	VS	S	S	Z	Z	S	M	L
	S	M	S	S	S	M	L	VL
	M	L	M	S	M	L	VL	VL
	L	L	L	M	L	VL	VL	VL
	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL

جدول ۲- قانون فازی برای سرعت چرخ چپ

		φ						
		V_L	NL	NM	NS	Z	PS	PM
d	VS	L	M	S	Z	Z	S	S
	S	VL	L	M	S	S	S	M
	M	VL	VL	L	M	S	M	L
	L	VL	VL	VL	L	M	L	L
	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL

۲-۲-۲- عامل اجتناب از مانع

در این بخش هدایت ربات با در نظر گرفتن موانع صورت می‌گیرد. برای اطمینان از امنیت ربات و انسان، ربات باید



شکل ۲- ساختار پیشنهادی برای کنترل ربات.

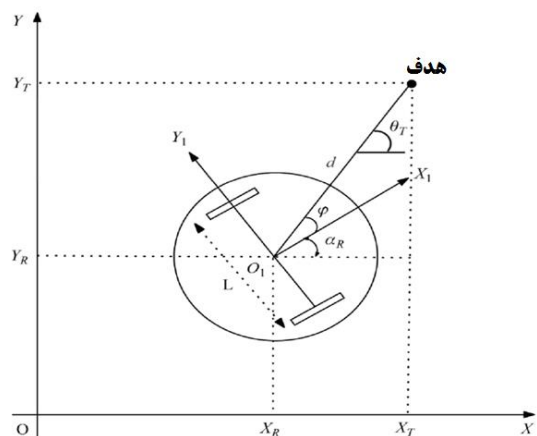
۲-۲-۱- عامل ناوبری ربات

در این بخش، محیط بدون مانع فرض شده است. ربات باید مسیری برای رسیدن به موقعیت هدف بیابد. کنترل‌کننده فازی دارای ورودی‌های d (که نشان‌دهنده فاصله مرکز ربات تا موقعیت هدف است) و φ (که نشان‌دهنده زاویه بین ربات و هدف است) می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. پارامترهای d و φ به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند:

$$d = \sqrt{(X_T - X_R)^2 + (Y_T - Y_R)^2} \quad (2)$$

$$\varphi = \theta_T - \alpha_R \quad (3)$$

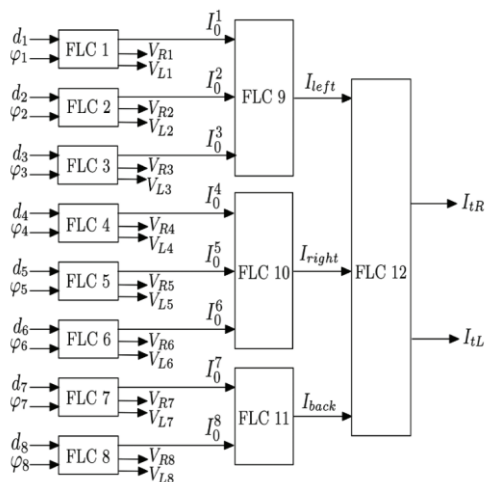
$$\theta_T = \arctan \frac{Y_T - Y_R}{X_T - X_R} \quad (4)$$



شکل ۳- زاویه بین ربات و هدف.

برخلاف متغیرهای دودویی (درست یا غلط)، متغیرهای فازی دامنه تغییرات وسیعی از متغیرهای ورودی را ارائه می‌دهند. فاصله d بین ۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته

قوانین مرتبط با اندیس I_0^i را ارائه می دهد. این جدول دارای سه مقدار عددی به صورت زیر است: ۰: اشاره به دور بودن موانع از ربات دارد. ۱: اشاره به نسبتاً نزدیک بودن موانع به ربات دارد. ۲: اشاره به نزدیک بودن موانع به ربات دارد.



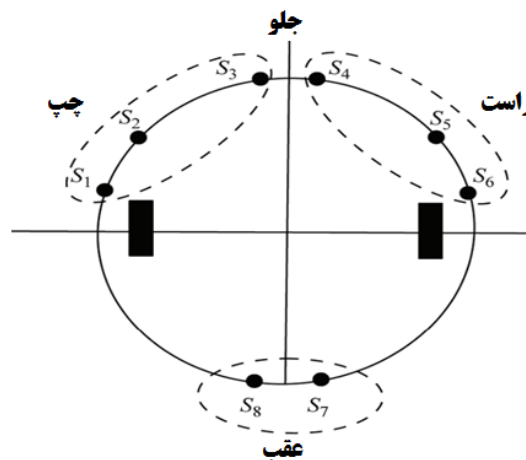
شکل ۵- بلوک دیاگرام سیستم فازی سلسله مراتبی

جدول ۳- قوانین فازی مربوط به اندیس I_0^i

		φ_i							
		I_0^i	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
d_i	VS	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	
	S	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱	
	M	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	
	L	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	
	VL	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	

برای هر شاخص I_0^i سه تابع عضویت گوسی در نظر گرفته شده است. سنسورهای S_3, S_2, S_1 برای تشخیص موانع در سمت چپ ربات و سنسورهای S_6, S_5, S_4 در سمت راست و S_8, S_7 در پشت ربات نصب شده اند. همچنین برای ارتباط هر گروه سنسور یک کنترل کننده فازی همانند شکل (۵) به منظور تشخیص موانع محلی در اطراف ربات بکار رفته است. بنابراین، از طریق کنترل کننده های $FLC10, FLC9$ و $FLC11$ شاخص های I_{right}, I_{left} و I_{back} که نشان دهنده درجه برخورد بین ربات و موانع به ترتیب در سمت چپ، راست و پشت است، به دست می آید. قوانین فازی مرتبط با این شاخص ها در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است. در این جداول مقادیر ۰، ۱ و ۲ به همان مفاهیم که در جدول ۳ بیان شد، اشاره دارند.

قادر به جلوگیری از برخورد با موانع باشد. برای تشخیص موانع، هشت سنسور بر روی ربات همانند شکل (۴) استفاده شده است.



شکل ۴- موقعیت هشت سنسور بر روی ربات

اگر زاویه ربات با محور افقی X ها را صفر فرض کنیم، سنسورها با زاویه ای مطابق رابطه ۶ بر روی ربات نصب شده اند:

$$S_1 = 70^\circ, S_2 = 50^\circ, S_3 = 10^\circ, S_4 = -10^\circ, S_5 = -50^\circ, S_6 = -70^\circ, S_7 = -170^\circ, S_8 = 170^\circ \quad (6)$$

هر سنسور اطلاعات مربوط به محیط محلی را فراهم می کند. این اطلاعات شامل فاصله d_i ، همچنین زاویه φ_i بین ربات و موانع است ($i = 1, 2, \dots, 8$). اگر تنها از یک کنترل کننده فازی برای اجتناب از موانع استفاده شود، باید تمامی زوایا و فواصل بین ترکیبات ممکن ارایه شده توسط ۸ سنسور را در نظر گرفت. در این مورد، اگر ۵ تابع عضویت برای هر فاصله و ۷ تابع عضویت برای هر زاویه لحاظ گردد، تعداد قوانین فازی برابر با $5^8 \times 7^8$ خواهد بود. بنابراین نوشتن این تعداد قوانین مشکل و یا غیر ممکن است. برای حل این مشکل، رویکرد مبتنی بر سیستم های فازی سلسله مراتبی استفاده شده است. این رویکرد شامل کنترل کننده های فازی با توجه به هر سنسور و اتصال کنترل کننده ها به روش سلسله مراتبی است. در شکل (۵) ساختار فازی سلسله مراتبی پیشنهادی نمایش داده شده است.

خروجی دیگر این کنترل کننده ها یک اندیس I_0^i است که نشان دهنده درجه برخورد ربات با موانع است. جدول ۳

جدول ۷- مقادیر گسسته برای شاخص I_{tL} :

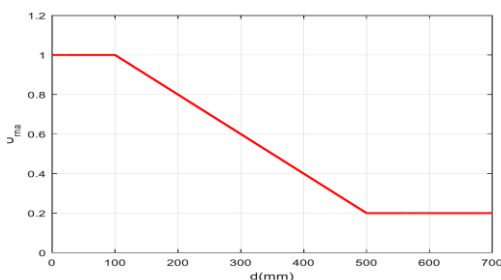
I_{tL}		I_{left}								
		Z			M			L		
		I_{right}			I_{right}			I_{right}		
		Z	M	L	Z	M	L	Z	M	L
I_{back}	Z	۱۰	۵	۰	۱۰	۱۰	۰	۱۰	۱۰	۰
	M	۱۰	۵	۰	۱۰	۱۰	۰	۱۰	۱۰	۰
	L	۱۰	۵	۰	۱۰	۵	۰	۱۰	۱۰	۰

جدول ۸: مقادیر گسسته برای شاخص I_{tR}

I_{tL}		I_{left}								
		Z			M			L		
		I_{right}			I_{right}			I_{right}		
		Z	M	L	Z	M	L	Z	M	L
I_{back}	Z	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۵	۱۰	۰	۰	۱۰
	M	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۵	۱۰	۰	۰	۱۰
	L	۱۰	۱۰	۱۰	۵	۱۰	۱۰	۰	۰	۱۰

۲-۲-۳- تابع سودمندی

عامل ناوبری ربات حرکت ربات را به سمت هدف ممکن می‌سازد و عامل اجتناب از مانع، مسئول جلوگیری از برخورد با موانع است. این دو عامل به منظور کنترل ربات ممکن است رفتارهای متناقضی نشان دهد. برای رفع این تعارض، یک تابع سودمندی که مقدار آن در بازه $[0, 1]$ تعریف شده است، پیشنهاد داده شده است. ایده اصلی مرتبط کردن یک تابع سودمندی به هر عامل است. این تابع امکان مذاکره بین عوامل کنترلی ربات را فراهم خواهد کرد. در مرحله نخست، مقدار سودمندی عامل ناوبری ربات محاسبه می‌گردد. این مقدار، تابعی از فاصله باقیمانده تا رسیدن به هدف است. این تابع در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- تابع کاربردی عامل ناوبری ربات

جدول ۴- مقادیر گسسته برای شاخص I_{left}

I_{left}		I_0^1								
		Z			M			L		
		I_0^2			I_0^2			I_0^2		
		Z	M	L	Z	M	L	Z	M	L
I_0^3	Z	۰	۱	۲	۰	۱	۲	۱	۱	۲
	M	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲
	L	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

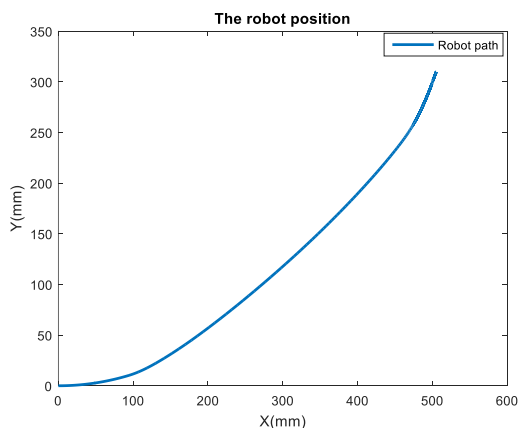
جدول ۵- مقادیر گسسته برای شاخص I_{right}

I_{right}		I_0^6								
		Z			M			L		
		I_0^5			I_0^5			I_0^5		
		Z	M	L	Z	M	L	Z	M	L
I_0^4	Z	۰	۱	۲	۰	۱	۲	۱	۱	۲
	M	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲
	L	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

جدول ۶- مقادیر گسسته برای شاخص I_{back}

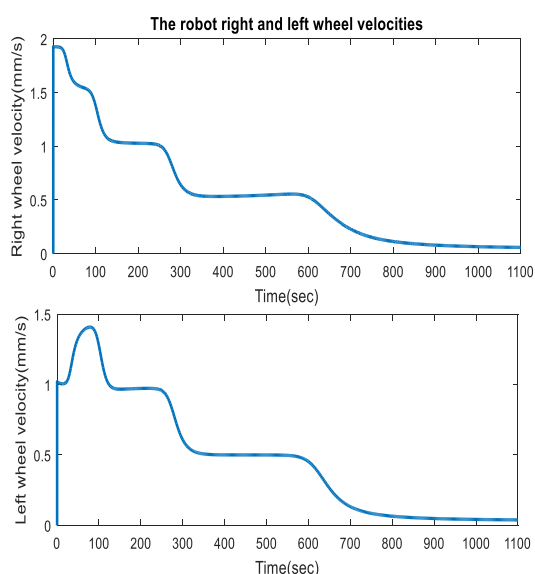
I_{back}		I_0^7		
		Z	M	L
I_0^8	Z	۰	۱	۲
	M	۱	۱	۲
	L	۲	۲	۲

در این سطح، یک کنترل‌کننده که مسئول حفظ جهت با هدف و اجتناب از موانع است، اضافه خواهد شد. این کنترل‌کننده درجه عدم وجود موانع را توسط دو شاخص خروجی I_{tL} و I_{tR} تامین می‌کند، به طوری که با توجه به آن ربات می‌تواند جهت هدف را بیابد. قوانین مربوط به خروجی‌های I_{tR} ، I_{tL} در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده است، سه مقدار عددی به عنوان شاخص استفاده شده است. اما در این مورد، مقدار صفر نشان‌دهنده نزدیکی مانع به ربات است. بنابراین، ربات باید جهت حرکت خود را تغییر دهد. مقدار ۵ نشان‌دهنده نسبتاً نزدیک بودن مانع به ربات است که در این حالت ربات می‌تواند با سرعت کم پیش‌رود و همزمان جهت حرکت خود را اصلاح نماید. زمانی که هیچ مانعی در اطراف ربات وجود ندارد، از مقدار ۱۰ استفاده خواهد شد، در این مورد ربات می‌تواند بدون به هیچ گونه ای مشکلی به پیشروی ادامه دهد.



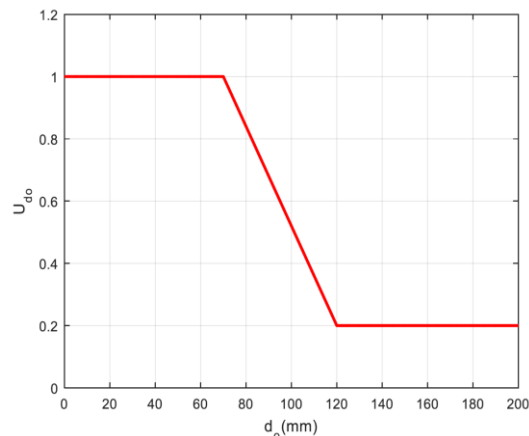
شکل ۹- مسیر طی شده توسط مرکز ربات

شکل (۱۰)، سرعت چرخ راست و چپ ربات را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد در ابتدای حرکت دامنه سرعت ربات بالا بوده و با گذشت زمان و نزدیک تر شدن ربات به مکان هدف سرعت کاهش می‌یابد و با رسیدن ربات به موقعیت هدف به مقدار صفر میل می‌کند. این امر موید درستی و صحت عملکرد عامل ناوبری پیشنهادی است، زیرا در ابتدای حرکت با توجه به دور بودن موقعیت ربات از مکان مطلوب، ربات به منظور رسیدن هر چه سریع‌تر به مکان مطلوب باید سرعت خود را افزایش دهد. در ادامه مسیر و با نزدیک شده ربات به مکان هدف، دقت دستیابی به مکان مطلوب و باقی ماندن در آن مکان اهمیت می‌یابد، بنابراین، ربات باید از سرعت خود بکاهد به نحوی که پس از رسیدن به مکان مطلوب سرعت آن باید صفر گردد.

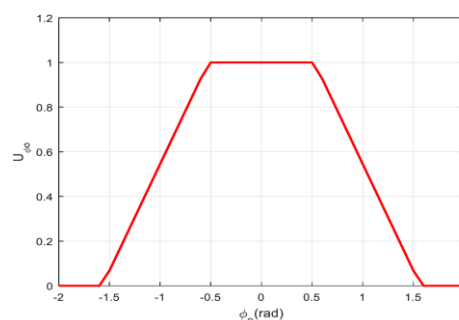


شکل ۱۰- سرعت چرخ راست و چپ ربات

از سوی دیگر، عامل اجتناب از مانع نیز به صورت تابع سودمندی وابسته به فاصله باقیمانده تا مانع d_0 و زاویه بین جهت ربات و مانع ϕ_0 محاسبه می‌شود، که این توابع را می‌توان به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده نمود.



شکل ۷- تابع سودمندی عامل اجتناب از مانع وابسته به فاصله



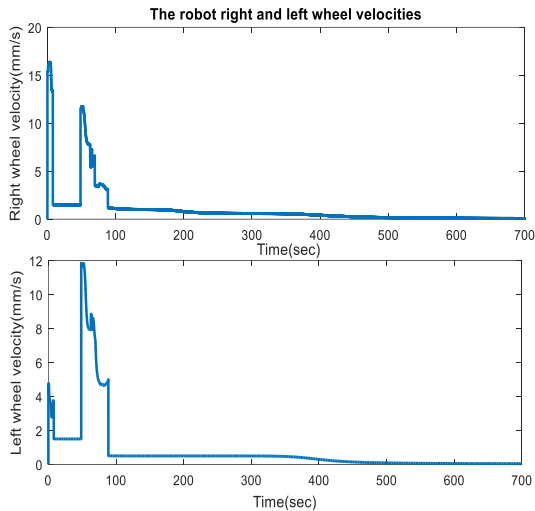
شکل ۸- تابع سودمندی عامل اجتناب از مانع وابسته به زاویه

۳- نتایج

۳-۱- محیط بدون وجود مانع

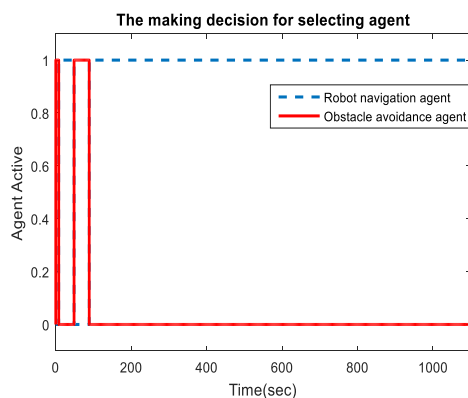
هدف از این بخش، ارزیابی کارایی عامل ناوبری ربات به منظور رسیدن به موقعیت مطلوب است. بنابراین در این سناریو، در محیط حرکت ربات هیچ مانعی وجود ندارد و ربات آزادانه به منظور رسیدن به مکان هدف در تمامی جهات می‌تواند حرکت کند. در اینجا ربات در شروع حرکت در موقعیت اولیه $(X_R, Y_R) = (0, 0)$ قرار دارد و هدف نیز رسیدن ربات به مکان $(X_T, Y_T) = (500, 300)$ است. لازم به ذکر است که فاصله دو چرخ ربات برابر $L = 80\text{mm}$ در نظر گرفته شده است. در شکل (۹)، مسیر طی شده توسط ربات به منظور رسیدن به موقعیت هدف نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل به وضوح مشاهده می‌گردد، با بکارگیری الگوریتم ناوبری پیشنهادی، ربات توانسته به مکان مطلوب برسد و در همان مکان بماند.

در شکل (۱۲)، مسیر طی شده توسط ربات به منظور رسیدن به موقعیت هدف در حضور موانع نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل به وضوح مشاهده می‌گردد، با بکارگیری الگوریتم کنترل چندعامله پیشنهادی ربات توانسته از بین موانع بدون برخورد و با حفظ فاصله مناسب از آنها به مکان مطلوب برسد و در همان مکان بماند.



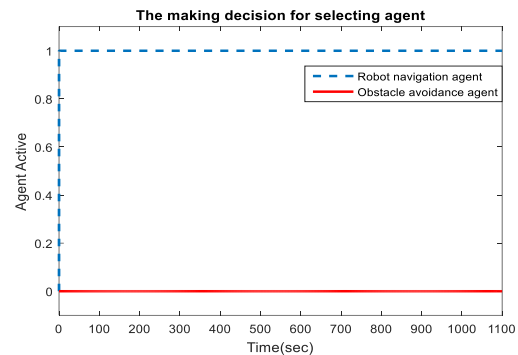
شکل ۱۲: سرعت چرخ راست و چپ ربات در حضور دو مانع

در شکل (۱۳)، سرعت چرخ راست و چپ ربات در حضور موانع در هر دو سمت ربات را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد در ابتدای حرکت دامنه سرعت چرخ راست ربات به منظور دور زدن مانع اول از سمت راست، از سرعت چرخ چپ بیشتر است. در ادامه مسیر نیز دامنه سرعت چرخ چپ ربات به منظور دور زدن مانع دوم از سمت چپ، از سرعت چرخ راست بیشتر می‌گردد. پس از آن با عبور از مانع عامل ناوبری ربات از ثانیه ۱۰۰ ام به بعد کنترل سرعت ربات به عهده گرفته و از سرعت هر دو چرخ نیز به منظور دستیابی دقیق‌تر به موقعیت هدف کاسته شده است.



شکل ۱۳: نحوی فعال شدن عوامل ناوبری ربات و اجتناب از مانع در حضور دو مانع

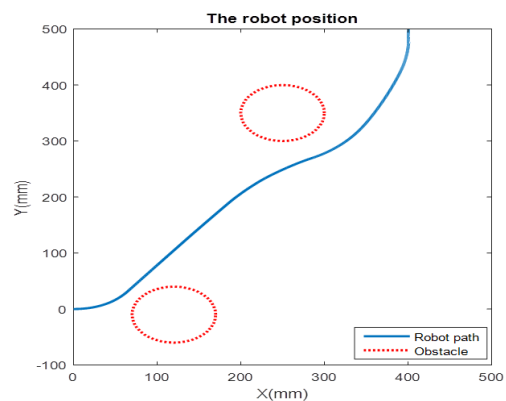
شکل (۱۱)، نحوه‌ی فعال شدن عوامل ناوبری ربات و اجتناب از مانع را نمایش می‌دهد. مقدار یک نشان‌دهنده فعال شدن عامل مربوطه و عدد صفر موید غیر فعال بودن عامل مورد نظر است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، عامل ناوبری ربات در تمامی طول مسیر فعال بوده و عامل اجتناب از مانع نیز در کل مسیر غیر فعال باقی مانده است. این نتیجه از عملکرد موفق تابع سودمندی حکایت دارد. زیرا، در سناریو تعریف شده در این بخش هیچ مانعی وجود ندارد تا منجر به فعال شدن عامل اجتناب از مانع گردد.



شکل ۱۱- نحوی فعال شدن عوامل ناوبری ربات و اجتناب از مانع

۳-۲- وجود دو مانع در هر مسیر ربات

هدف از این بخش، نشان دادن عملکرد موفق الگوریتم کنترل‌کننده چندعامله پیشنهادی در مواجهه با موانع در هر دو سمت ربات به منظور رسیدن به موقعیت مطلوب و اجتناب از موانع است. بنابراین، دو مانع به شکل دایره‌ای در مختصات $(X_{O1}, Y_{O1}) = (120, -10)$ و $(X_{O2}, Y_{O2}) = (250, 350)$ هر کدام با شعاع $d_o = 50mm$ در نظر گرفته شده‌است. همچنین، ربات در شروع حرکت در موقعیت اولیه $(X_R, Y_R) = (0, 0)$ قرار دارد و هدف نیز رسیدن ربات به مکان $(X_T, Y_T) = (400, 500)$ است.



شکل ۱۴: مسیر طی شده توسط مرکز ربات در حضور دو مانع

سه عامل در نظر گرفته شد: عامل اول رسیدن ربات به محل مطلوب را تضمین می‌کرد و این عامل براساس یک کنترل کننده فازی ساده پیاده‌سازی شد. نقش عامل دوم جلوگیری از برخورد ربات با موانع موجود در مسیر بود، این عامل نیز با استفاده از یک کنترل کننده فازی سلسله مراتبی توسعه داده شد. این کنترل کننده سلسله مراتبی تعداد قوانین فازی را با توجه به تعداد متغیرهای ورودی فازی کاهش داد. البته لازم به ذکر است که به منظور کاهش اثر عدم قطعیت‌ها سیستم، کنترل فازی نوع دوم بازه‌ای به عنوان کنترل کننده‌های فازی مذکور بکارگیری شده است. در نهایت عامل سوم یا عامل ادراک مسئول جمع‌آوری و ارائه اطلاعات محیط اطراف ربات بود. هدف از بکارگیری عوامل کمتر کاهش تضاد بین وضعیت عوامل مختلف و در نتیجه دستیابی به حداقل حجم ارتباطات به منظور هماهنگی این عوامل است. روش پیشنهادی به منظور هماهنگی و حذف تعارض بین عوامل در این مطالعه بکارگیری یک تابع سودمندی بود. نتایج شبیه‌سازی مویده عملکرد موفق معماری کنترل کننده پیشنهادی بود، به طوری که ربات در یک محیط با موانع مختلف قادر به رسیدن به موقعیت هدف بدون برخورد با موانع بود.

شکل (۱۴)، نحوه‌ی فعال شدن عوامل ناوبری ربات و اجتناب از مانع را نمایش می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، در ابتدای حرکت به علت وجود مانع و همچنین دور بودن ربات از موقعیت مطلوب عامل اجتناب از مانع هدایت ربات را تا ثانیه ۱۰ام به عهده دارد، پس از آن با عبور از مانع اول عامل ناوبری ربات تا نزدیک شدن به مانع دوم (تا ثانیه ۵۰ام) فعال شده است. با نزدیک شدن به مانع دوم یکبار دیگر عامل اجتناب از مانع در ثانیه ۵۰ام فعال شده و تا ثانیه ۱۰۰ام فعال باقی می‌ماند. با عبور از مانع دوم عامل اجتناب از مانع نیز غیر فعال شده و عامل ناوبری ربات تا انتهای مسیر فعال گشته است. این نتیجه از عملکرد موفق تابع سودمندی و هماهنگی کامل عوامل با یکدیگر حکایت دارد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، ایجاد یک مسیر بدون تصادف برای ربات‌های متحرک بود، به طوری که ربات قادر به رسیدن به هدف بدون برخورد با مانع باشد. بدین منظور یک کنترل همکارانه جدید براساس الگوی سیستم چندعامله به منظور کنترل ربات پیشنهاد داده شد. در معماری این کنترل کننده

مراجع

- [1] C.G. Cena, P.F. Cardenas, R.S. Pazmino, L. Puglisi, and R.A. Santonja. "A cooperative multi-agent robotics system: Design and modelling." *Expert Systems with Applications* 40, (2013): 4737-4748.
- [2] B. Innocenti, B. López, and J. Salvi. "A multi-agent architecture with cooperative fuzzy control for a mobile robot." *Robotics and Autonomous Systems* 55, (2007): 881-891.
- [3] Y. Ono, H. Uchiyama, and W. Potter. "A mobile robot for corridor navigation: a multi-agent approach." *In Proceedings of the 42nd annual Southeast regional conference*, (2004): 379-384.
- [4] D.I. Katzourakis, J.C. de Winter, M. Alirezaei, M. Corno and R. Happee. "Road-departure prevention in an emergency obstacle avoidance situation." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 44, no. 5 (2014): 621-629.
- [5] M.W. Mehrez, G.K. Mann, and R.G. Gosine. "An Optimization Based Approach for Relative Localization and Relative Tracking Control in Multi-Robot Systems." *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, (2017): 1-24.
- [6] A. Bakdi, A. Hentout, H. Boutami, A. Maoudj, O. Hachour and B. Bouzouia. "Optimal path planning and execution for mobile robots using genetic algorithm and adaptive fuzzy-logic control." *Robotics and Autonomous Systems* 31, no. 89 (2017): 95-109.
- [7] S. Mohammadrezaei Nodeh, M.H. Ghasemi, H.R. Mohammadi Daniali. "Hybrid Control of Fuzzy Type 2-Neural Network and Higher Order Sliding Mode for Robotic Manipulator with Parametric Uncertainties and Perturbations." *Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University* 51, no. 1 (2021): 228-219 (In Persian).
- [8] S.D.N. Tanha, M.H. Korayem, S.F. Dehkordi. "Path Design and Control of a Moving Social Robot in an Environment with Moving Obstacles in Order to Reach a Moving Target through Fuzzy Control." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 53, no. 2 (2021): 1-22. (in Persian)

- [9] V. Tikani, H. Shahbazi. "Design and Implementation of Pure Fuzzy Controller for Attitude Control of Quadrotor using Kalman Filterl." *Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University* 48, no. 2 (2018): 65-73. (in Persian)
- [10] A. Ghanavati, M.J. Mahmoodabadi, M. Beigzadeh Abbasi. " Optimal Design of the Proportional-Integral-Derivative Fuzzy Controller for a Three Degree-of-Freedom Plane Cable Robot based on Krill Herd Optimization. " *Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University* 51, no. 1 (2021): 183-192. (in Persian)
- [11] P. Wei, X. Yu, Z. Di, X. Dai, B. Wang, Y. Zeng. "Design of robot automatic navigation under computer intelligent algorithm and machine vision." *Journal of Industrial Information Integration* 28, (2022): 10-21.
- [12] L. Chang, L. Shan, W. Zhang, Y. Dai. "Hierarchical multi-robot navigation and formation in unknown environments via deep reinforcement learning and distributed optimization." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2023): 102570.
- [13] Y. Yu, Y. Liu, J. Wang, N. Noguchi, Y. He. "Obstacle avoidance method based on double DQN for agricultural robots." *Computers and Electronics in Agriculture* 204 (2023): 107546.
- [14] G.V.S. Raju, J. Zhou, and R.A. Kisner. "Hierarchical fuzzy control." *International Journal of Control* 54, no. 4 (1991): 1201–1216.
- [15] M.G. Joo and J.S. Lee. "Hierarchical fuzzy control scheme using structure Takagi-Sugeno type fuzzy inference." *IEEE Int. Fuzzy Systems* (1995).
- [16] M.L. Lee, H.Y. Chung, and F.M. Yu. "Modeling of hierarchical fuzzy systems." *Fuzzy Sets and Systems* 138, (2003): 343–361.