Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(2) (2022) 61-64
DOI: 10.22060/mej.2022.19814.7123

Behavior-Based Control of Mecanum Four-Wheeled Omnidirectional Robot

A. Ghasemi, M. Sadedel*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this paper, a four-wheeled omnidirectional robot of the mecanum type is investigated. In this study, the kinematics and dynamics of the robot have been analyzed, emphasizing the influence of parameters and models on equations. The robot-based behavior control is carried out by applying kinematic equations. This method of control will enable the robot to reach its desired position despite obstacles. This method of control will enable the robot to reach its desired position despite obstacles. The work done in the robot control method is the main contribution of this study. This control method uses a behavior-based algorithm to guide a robot toward a target point by bypassing obstacles and selecting appropriate behaviors. We are interested in investigating the rotational motion of this robot, independent of its linear motion since it has three degrees of freedom on the plane. Therefore, during the movement of the robot and reaching the goal, the robot should always be oriented towards a moving point separate from the target point. The results show that this method gives a good estimate of the robot speed and the speed of the robot wheels and their torque.

Review History:

Received: Apr. 04, 2021
Revised: Dec. 27, 2021
Accepted: Jan. 01, 2022
Available Online: Jan. 11, 2022

Keywords:

Mobile robot
Omnidirectional mobile robot
Four-wheeled mecanum robot
Behavior-based control

1- Introduction

Mobile robots are receiving a great deal of attention in the field of industrial applications as well as in the field of scientific research, thanks to their ability to replace humans to achieve difficult, tedious, and dangerous activities. Among the mobile robots, we can mention omnidirectional mobile robots. These robots have three degrees of freedom. Omnidirectional wheels are based on the concept of a central wheel with free rollers positioned at an angle around the wheel. Omnidirectional wheel mechanisms are different depending on the type of roller and the angles of placement of the rollers. Mecanum wheels are one of the types of omnidirectional wheels among other wheels. In this type of wheel, the angle of placement of the rollers in the wheel environment is 45 degrees [1].

Various methods for navigating and controlling independent mobile robots have been proposed in the literature. For example, the linear feedback method to track an omnidirectional mecanum robot [1], and the robust adaptive control method to control the same type of robot [2], and also the feedback control method for Omnidirectional mobile robots [3] have been used.

A suitable method for constructing a control system in order to achieve the movement of moving robots in dynamic and different environments is a behavior-based control strategy [4]. Since the control algorithm method of the behavior-based for such robots has not been studied in the literature, so the innovation is in implementing this control algorithm for such robots. This method was first introduced by Magnus [5]. This method uses behaviors such as going to goal and also the behavior of avoiding obstacles to move the robot. In addition, Ref. [5] explains that separated behaviors can be combined with some priorities to form a new behavior. One of the most essential advantages of this method is that it creates an integrated system, which makes the design procedure simpler. It also gives us the possibility to add new modes to the system without posing any substantial growth in complexity. In this method, there is no need for complex system dynamics and only by examining behaviors such as going to goal, avoiding obstacles, the movement of the robot is controlled. In fact, in Ref. [5], how to model a base behavior system by switching each of the separate parts corresponding to behavior is investigated. (Fig. 1)

2- Methodology

As already mentioned, for autonomous robots operating in a partially unknown, dynamic environment a successful way of structuring the controllers is within a behavior-based framework. In this method, the robot's distinctive behaviors such as going to the goal and avoiding the obstacle

*Corresponding author's email: hami

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

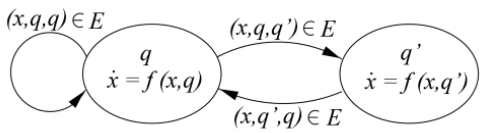


Fig. 1. method of switch between each behavior [5]

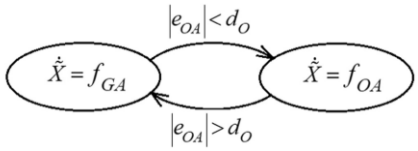


Fig. 2. Goal-to-goal and avoidance of obstacles behaviors [5]

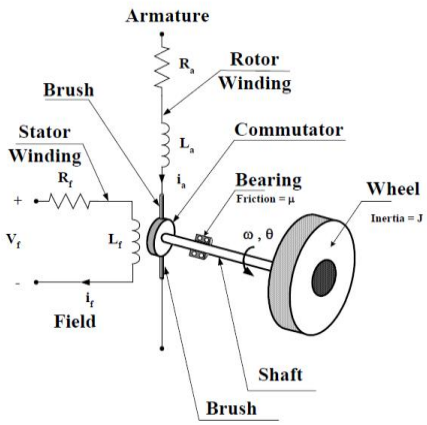


Fig. 3. DC Motor model [6]

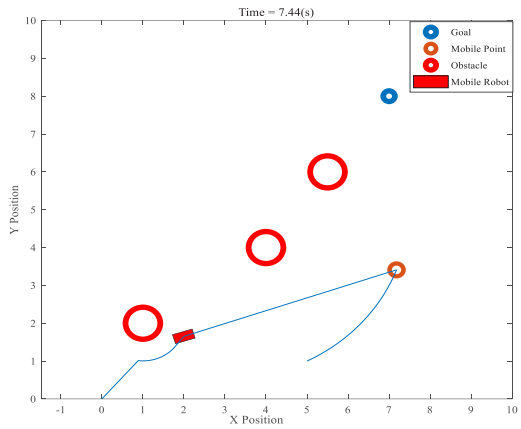


Fig. 4. The path of the robot towards the target and its orientation towards the moving point

are considered and the change between the mentioned behaviors is the sensory data and there is no display of the environment. The simplest way to control a moving robot so that the robot moves toward the target and does not hit an obstacle is to use go to goal behavior and the obstacle-avoiding behavior shown in Fig. 2. At first, the robot has an absorbing behavior towards the target and moves towards the target. If the robot approaches an obstacle while moving, it must avoid this obstacle. The key to designing this algorithm is how to switch between behaviors. How the robot bypasses the obstacle so as not to interfere with the behavior of going to the target. Therefore, in this section, we consider a d_o radius for the obstacle and an e_{OA} confidence interval, which indicates the distance of the robot from the obstacle. Now, if the distance of the robot to the obstacle is less than this e_{OA} value, the robot will be in the behavior of avoiding obstacles.

To calculate the actual speed of the robot wheels, the wheel motor model is needed. Here, Ref. [6] is used to model the robot. A dc motor is used for modeling, which is shown in Fig. 3 of the motor model.

3- Results and Discussion

Considering the kinematic and dynamic relationships of the robot, as well as considering the method of controlling the behavior-based algorithm, the robot has been simulated in a MATLAB environment. In this simulation, the omnidirectional robot starts moving from a certain point of stillness to reach the desired position while moving, the robot must cross several obstacles with specific behaviors. In addition, while moving, the angle of orientation of the robot head should be such that it always follows a moving point.

At the end of the simulation, it was observed that the robot speed and torque follow a similar pattern during the movement. In these diagrams, it is clear that as soon as the obstacle reaches the speed and torque of the robot wheels, it changes drastically.

By modeling the motor for the robot wheels, as shown in Fig. 5, the actual speed of the wheels changes better and smoother when reaching obstacles. This is also physically interpreted correctly. By modeling the motor, it becomes clear that speed and torque are interdependent. Therefore as shown in Fig. 6, the torque graph changes like speed, which depends on the inertia of the motor shaft and the coefficient of friction

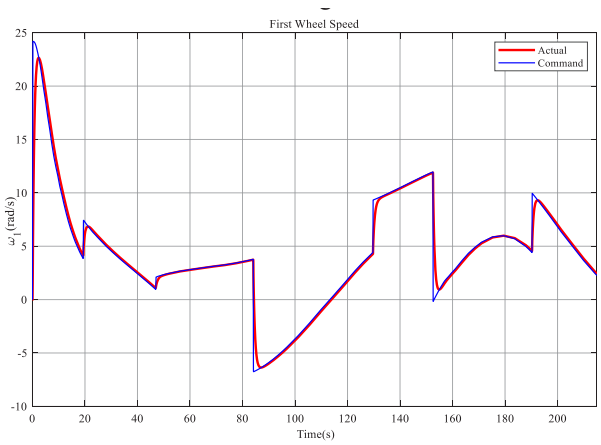


Fig. 5. The rotational speed of the first wheel

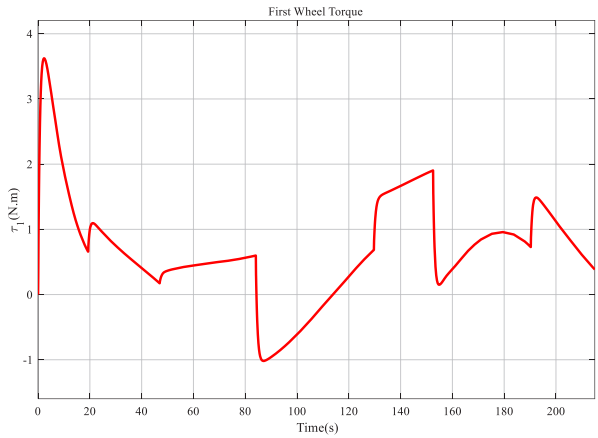


Fig. 6. The amount of torque in the first wheel

between the motor shaft and the bearings in the motor.

4- Conclusion

In this paper, a method of controlling the behavior-based on a four-wheeled mechanic robot was discussed.

The main contribution of this study is the implementation of this algorithm. The wheels were modeled to compute their actual rotational speed. The results proved that the proposed controller leads to a limited range of torque and speed. It was found that the torque is directly related to the rotational speed of the wheel. Finally, it can be concluded that this algorithm accurately controls the linear and rotational motion of the robot.

References

[1] S. Mellah, G. Graton, E.-M. El-Adel, M. Ouladsine, A. Planchais, Trajectory tracking and time delay management of 4-mecanum wheeled mobile robots (4-MWMR), in: ACD'19: 15th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Bologne, Italy, 2019.

[2] V. Alakshendra, S.S. Chiddarwar, Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties, Nonlinear Dynamics, 87(4) (2017) 2147-2169.

[3] K. Watanabe, Y. Shiraishi, S.G. Tzafestas, J. Tang, T. Fukuda, Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 22(3) (1998) 315-330.

[4] M. Khazaee, M. Sadedel, A. Davarpanah, Behavior-Based Navigation of an Autonomous Hexapod Robot Using a Hybrid Automaton, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 102 (2021) 29.

[5] M. Egerstedt, Behavior based robotics using hybrid automata, in: International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control, Springer, 2000, pp. 103-116.

[6] B.M. Nouri, Modelling and control of mobile robots, ICMSAO/05, American University of Sharjah, UAE, (2005).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Ghasemi, M. Sadedel, Behavior-Based Control of Mecanum Four-Wheeled Omnidirectional Robot, Amirkabir J. Mech Eng., 54(2) (2022) 61-64.

DOI: 10.22060/mej.2022.19814.7123

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۳۰۹ تا ۳۳۲
DOI: 10.22060/mej.2022.19814.7123

کنترل رفتار مبنای ربات همه جهته چهار چرخ مکانوم

علی قاسمی زاده ، مجید ساده دل*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

خلاصه: در این مقاله یک ربات همه جهته چهارچرخ از نوع مکانوم، مورد بررسی قرار گرفته شده است. سینماتیک و دینامیک ربات مورد بررسی قرار داده شده است، که تأثیر پارامترهای ربات و مدلسازی آن در روابط مشهود شود. با استفاده از روابط موجود در سینماتیک، کنترل رفتار مبنای ربات انجام شده است. هدف این است که ربات به موقعیت مطلوبی با حضور موانع با این روش کنترل برسد. در بخش سینماتیک روابط بین سرعت چرخ‌های ربات و سرعت خود ربات بررسی شده است. و در بخش دینامیک روابط موجود بین نیروها و شتاب هر چرخ مورد بررسی قرار گرفته است تا گشتاور لازم برای هر چرخ محاسبه شود. نو آوری کار انجام شده در روش کنترل ربات است. با استفاده از روش الگوریتم کنترل رفتار مبنا ربات بایستی با عبور از موانع و تغییر وضعیت بین هر رفتار به نقطه هدف برسد. از آن‌جایی که این نوع ربات دارای حرکت سه درجه آزادی در صفحه است، می‌خواهیم حرکت دورانی ربات را مستقل از حرکت خطی آن بررسی کنیم. بنابراین در طی حرکت ربات و رسیدن به هدف، جهت گیری ربات بایستی همواره به سمت نقطه متحرکی جدای از نقطه هدف باشد. در نهایت به مدلسازی موتور جریان مستقیم در ربات پرداخته شده تا سرعت واقعی چرخ‌ها و گشتاور آن‌ها به دست آید.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

کلمات کلیدی:
ربات متحرک
ربات‌های همه جهته
ربات چهارچرخ مکانوم
کنترل رفتار مبنا

۱- مقدمه

ربات‌های متحرک، به لطف توانایی خود در جایگزینی انسان برای دستیابی به فعالیت‌های سخت، خسته‌کننده و خطرناک، در حوزه کاربردهای صنعتی و همچنین در زمینه تحقیقات علمی مورد توجه بسیاری قرار می‌گیرند.

عمدتاً سه دسته ربات متحرک چرخ دار وجود دارد: ربات‌های تک‌چرخ[1]، ربات‌های چهارچرخ[2] و ربات‌ها همه جهته[3]. ربات‌های تک چرخ و چهارچرخ به ربات‌های غیرهولونومیک[4] معروف‌اند، در حالی که ربات‌های همه جهته به ربات‌های هولونومیک[5] مشهوراند. تفاوت بین این دو دسته ربات‌ها بین درجات آزادی آنهاست [۱].

ربات‌های دسته اول دارای یک یا دو درجه آزادی هستند در حالی که ربات‌های هولونومیک دارای سه درجه آزادی هستند. ربات‌های همه جهته قادرند که حرکت سریع به یک سمت در هر وضعیتی را بدون تغییر جهت گیری انجام دهند. چرخ‌های همه جهته بر اساس مفهوم یک چرخ مرکزی با غلتک‌های آزاد قرار گرفته در یک زاویه در محیط چرخ قرار دارند. مکانیزم چرخ‌های همه جهته مختلف بسته به نوع غلتک و زاویه‌های قرارگیری غلتک‌ها از هم تفکیک می‌شوند. چرخ‌های مکانوم یکی از انواع چرخ‌های چند جهته در بین سایر چرخ‌ها است. در این نوع چرخ‌ها، زاویه قرارگیری غلتک‌ها در محیط چرخ ۴۵ درجه می‌باشد. (شکل ۱)

هنگام توصیف حرکت ربات‌های چرخدار متحرک، به مباحث مربوط به سینماتیک و دینامیک این سیستم‌ها پرداخته می‌شود. هنگام توصیف سینماتیک ربات‌های چرخ متحرک، معادلات سینماتیک به طور کلی ارائه می‌شوند که می‌توان پارامترهای خطی حرکت را تعیین کرد، مانند: فاصله، سرعت یا شتاب هر نقطه انتخاب شده یا پارامترهای زاویه‌ای حرکت، مانند: زاویه چرخش، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای [۲]. در روابط دینامیکی شتاب چرخ‌های ربات، نیروهای اعمالی به چرخ‌ها و گشتاور هر چرخ محاسبه می‌شود.

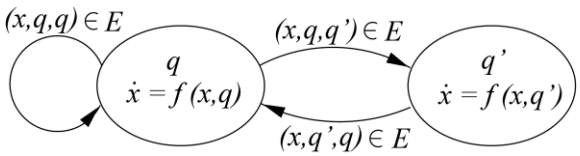
1 Unicycle
2 Carlike
3 Omnidirectional
4 Nonholonomic
5 Holonomic

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: majid.sadedel@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

شکل ۱. یک نوع چرخ مکانوم با غلتک‌های تعبیه شده روی آن[۱]

Fig. 1. A type of mecanum wheel with rollers built into it [1]



شکل ۲. نحوه سوییچ کردن بین هر رفتار[۶]

Fig. 2. How to switch between each behavior [6]

روش‌های مختلفی برای پیمایش و کنترل ربات‌های متحرک مستقل در ادبیات ارائه شده است. به عنوان مثال در مرجع [۱] از روش فیدبک خطی ساز برای ردیابی یک ربات همه جهته مکانوم و در مرجع [۳] از روش کنترل تطبیقی مقاوم برای کنترل همین نوع ربات و همچنین در مرجع [۴] از روش کنترل بازخورد برای ربات‌های همه جهته استفاده شده است. یک روش مناسب برای ساخت یک سیستم کنترل به منظور دستیابی به توانایی حرکت ربات‌های متحرک در محیط‌های پویا و متفاوت، یک استراتژی کنترل مبتنی بر رفتار[1] است [۵]. از آنجایی که روش الگوریتم کنترلی رفتار مبنا برای چنین ربات‌هایی تا کنون در ادبیات مورد بررسی قرار نگرفته است بنابراین نوآوری کار در پیاده سازی این الگوریتم کنترلی برای چنین ربات‌هایی می‌باشد. این روش ابتدا توسط مگنس[2] معرفی شد [۶]. در این روش از رفتارهایی همچون رفتن به سمت هدف و همچنین رفتار دوری از موانع برای حرکت ربات استفاده می‌شود. علاوه بر این، در مرجع [۶] توضیح داده شده است که رفتارهای جدا شده را می‌توان براساس برخی اولویت‌ها با هم ادغام کرد و یک رفتار جدید را شکل داد. این روش مزیت عمده را دارد که سیستم را به صورت یکپارچه در می‌آورد، که هم فرآیند طراحی را ساده می‌کند و هم امکان اضافه کردن رفتارهای جدید به سیستم را بدون ایجاد هیچ‌گونه پیچیدگی فراهم می‌کند. در این روش نیاز به دینامیک پیچیده سیستم نیست و تنها با بررسی رفتارهایی مانند رفتن به هدف، دوری جستن از موانع حرکت ربات کنترل می‌شود. در واقع در مرجع [۶] چگونگی مدل کردن یک سیستم رفتار مبنا با استفاده از سوییچ کردن هریک از بخش‌های جداگانه متناظر با یک رفتار بررسی شده است. (شکل ۲)

همچنین در این مقاله، به مدلسازی موتور چرخ‌های ربات نیز پرداخته شده است. هدف از این مدلسازی دستیابی به سرعت و گشتاور ورودی است که در واقعیت توسط موتور اعمال می‌شود. در قسمت دوم به روابط سینماتیکی پرداخته و سپس روابط موجود برای سرعت زاویه‌ای هرچرخ را استخراج می‌کنیم. سپس در قسمت سوم روابط دینامیکی ربات با فرضیات در نظرگرفته شده به دست آمده است. در قسمت چهارم، روش کنترلی مورد استفاده، توضیح داده شده است. سپس در قسمت بعد صحت سنجی روش ارائه شده با شبیه سازی‌های سایر مراجع انجام گرفته است. در قسمت ششم به شبیه سازی حرکت ربات پرداخته شده است. در قسمت هفتم نتایج و نمودارهای حاصل از شبیه سازی ارائه شده است و درنهایت به نتیجه گیری پرداخته شده است.

۲- توصیف روابط سینماتیکی ربات

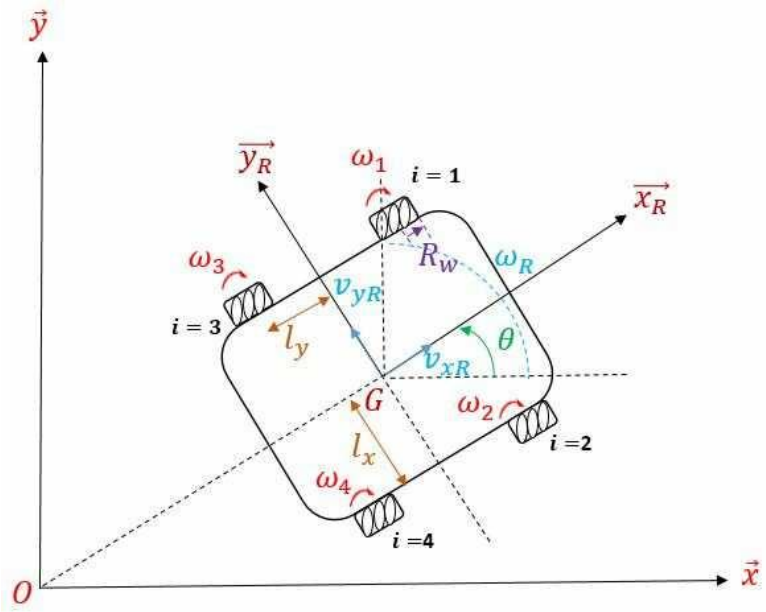
روابط سینماتیک ربات به دو دسته تقسیم بندی می‌شود، سینماتیک مستقیم و سینماتیک معکوس.

در سینماتیک مستقیم سرعت ربات از سرعت چرخ‌ها و درسینماتیک معکوس، سرعت چرخ‌ها از روی سرعت ربات محاسبه می‌شود.

۲- ۱- سینماتیک معکوس

با توجه به شکل ۳، که در این شکل ربات در صفحه xoy قرار گرفته، که دستگاه مختصات اصلی است و دستگاه (G, x_R, y_R) یک دستگاه

1 Behavior based control
2 Magnus Egerstedt



شکل ۳. مشخصات پارامترهای درنظرگرفته شده برای ربات [۷]

Fig. 3. Specifications of parameters intended for the robot [7]

جدول ۱. توصیف متغیرهای ربات [۱]

Table 1. Describe robot variables [1]

متغیر	توصیف متغیرها و واحد آنها
x, y	موقعیت ربات در جهت x, y (متر)
φ	زاویه جهت گیری ربات(رادیان)
l_y	فاصله چرخ‌های جلویی با مرکز ربات(متر)
l_x	فاصله جانبی چرخ‌ها با مرکز ربات (متر)
R	شعاع چرخ‌ها (متر)
ω	سرعت دورانی ربات (رادیان برثانیه)
r	شعاع غلتک‌ها(متر)

مختصات محلی است که بر روی ربات در مرکز جرم آن ثابت شده است. مشخصات ربات در جدول ۱ ارائه شده است [۷].

با در نظر گرفتن پارامترهای فوق روابط سینماتیکی به صورت زیر حاصل می‌شود

$$v_x - v_y - \omega\times(l_x + l_y) - \dot{\phi}_1(R+r) = 0 \quad (۱)$$

$$v_x + v_y + \omega\times(l_x + l_y) - \dot{\phi}_2(R+r) = 0 \quad (۲)$$

$$v_x + v_y - \omega\times(l_x + l_y) - \dot{\phi}_3(R+r) = 0 \quad (۳)$$

$$v_x - v_y + \omega\times(l_x + l_y) - \dot{\phi}_4(R+r) = 0 \quad (۴)$$

که در اینجا V_x V_y , به ترتیب تصویر سرعت نقطه G ربات بر محورهای x_p, y_p ربات می‌باشد.

روابط (۱) تا (۴)، معادلات هولونومیک ربات هستند پس توصیف حرکت ربات با استفاده از روابط ذکر شده، هولونومیک بودن ربات را نشان می‌دهد. با استفاده از روابط مذکور برای سینماتیک معکوس داریم [۸]:

$$\dot{\phi}_1 = \frac{1}{(R+r)}\times\left[v_x - v_y - \omega\times(l_x + l_y)\right] \quad (۵)$$

$$\dot{\phi}_2 = \frac{1}{(R+r)}\times\left[v_x + v_y + \omega\times(l_x + l_y)\right] \quad (۶)$$

$$\dot{\phi}_3 = \frac{1}{(R+r)}\times\left[v_x + v_y - \omega\times(l_x + l_y)\right] \quad (۷)$$

$$\dot{\phi}_4 = \frac{1}{(R+r)}\times\left[v_x - v_y + \omega\times(l_x + l_y)\right] \quad (۸)$$

معادلات (۵) تا (۸) را می‌توان به صورتی که در معادلات (۹) تا (۱۲) بیان شده است نشان داد:

$$\dot{\phi} = JV_G \quad (۹)$$

$$\dot{\phi} = \begin{bmatrix}\dot{\varphi}_1 & \dot{\varphi}_2 & \dot{\varphi}_3 & \dot{\varphi}_4\end{bmatrix}^T \quad (۱۰)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{1}{(R+r)} & -\frac{1}{(R+r)} & \frac{-(l_x+l_y)}{(R+r)} \\ \frac{1}{(R+r)} & \frac{1}{(R+r)} & \frac{(l_x+l_y)}{(R+r)} \\ \frac{1}{(R+r)} & \frac{1}{(R+r)} & \frac{-(l_x+l_y)}{(R+r)} \\ \frac{1}{(R+r)} & -\frac{1}{(R+r)} & \frac{(l_x+l_y)}{(R+r)} \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

$$V_G = \begin{bmatrix} v_x & v_y & \omega \end{bmatrix}^T \quad (۱۲)$$

۲- ۲- سینماتیک مستقیم

در این بخش از روابط بالا، سرعت‌های ربات بر حسب سرعت چرخ‌ها به دست می‌آید. بدین ترتیب داریم:

$$J_{od} = J^+\dot{\phi}J^+ = (J^TJ)^{-1}J^T \quad (۱۳)$$

که در اینجا J^+ ماتریس شبه معکوس مربوط به ماتریس J می‌باشد. حال با داشتن رابطه فوق، ماتریس J_{od} برابر است با [۹]:

$$J_{od} = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} (R+r) & (R+r) & (R+r) & (R+r) \\ -(R+r) & (R+r) & (R+r) & -(R+r) \\ \frac{-(R+r)}{(l_x+l_y)} & \frac{-(R+r)}{(l_x+l_y)} & \frac{-(R+r)}{(l_x+l_y)} & \frac{-(R+r)}{(l_x+l_y)} \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

در نهایت رابطه سینماتیک مستقیم به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$V_G = J_{od}\dot{\phi} \tag{۱۵}$$

$$v_x = (\frac{R+r}{4})[\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4] \tag{۱۶}$$

$$v_y = (\frac{R+r}{4})[-\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 - \dot{\phi}_4] \tag{۱۷}$$

$$\omega = \left(\frac{(R+r)}{4(l_x + l_y)}\right)[-\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3 + \dot{\phi}_4] \tag{۱۸}$$

۲- ۳- توصیف دینامیک حرکت ربات

برای استخراج معادلات دینامیکی از روابط لاگرانژ نوع دوم استفاده شده است. رابطه (۱۹) معادله لاگرانژ را برای یک سیستم هولونومیک بیان می‌کند [۱۰]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j \tag{۱۹}$$

که در این رابطه $j = ۱,۲,۳,.....,s$ ، T انرژی جنبشی سیستم و q_i متغیر مربوط به مختصات تعمیم یافته j ، Q_j مقدارنیروی تعمیم یافته j و s تعداد درجات آزادی سیستم است. در اینجا فرض می‌شود که غلتک‌ها عضوهای غیر فعال سیستم می‌باشند و تاثیری در روابط دینامیکی که شامل انرژی جنبشی و جرم غلتک‌هاست، ندارند.

حال انرژی جنبشی مربوط به حرکت ربات برابر است با:

$$T_1 = \frac{1}{2}m_p(v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2}(I_p)\dot{\omega}^2 \tag{۲۰}$$

که دراینجا m_p جرم ربات و I_p ممان اینرسی مرکز جرم ربات حول محور z آن می‌باشد. از آنجایی که حرکت چرخ‌ها حول محور دورانی خود و همچنین حرکت بر روی صفحه می‌باشد انرژی جنبشی آنها از جمع دو بخش می‌باشد که در رابطه (۲۱) نشان داده شده است:

$$T_2 = \frac{1}{2}\left[m_k(v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2}I_k\dot{\omega}^2\right] + \frac{1}{2}I_k\left(\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2\right) \tag{۲۱}$$

که در اینجا m_k جرم چرخ ربات و I_k ممان اینرسی جرمی چرخ حول محور دورانی خود می‌باشد. درنهایت انرژی جنبشی کل سیستم برابر با جمع انرژی جنبشی ربات و چرخ می‌باشد:

$$T_K = T_1 + T_2 \tag{۲۲}$$

$$T_K = \frac{1}{2}m_{pc}(v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2}I_{pc}\dot{\omega}^2 + \frac{1}{2}I_k\left(\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2\right) \tag{۲۳}$$

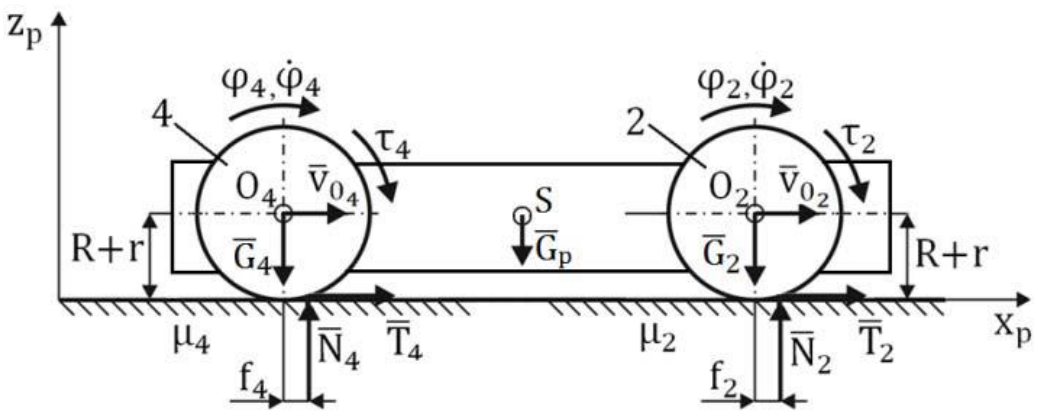
که در اینجا

$$m_{pc} = m_p + 4m_k \tag{۲۴}$$

$$I_{pc} = I_p + 4I_k \tag{۲۵}$$

حال با در نظر گرفتن پارامترهای زیر انرژی جنبشی سیستم به شکل زیر خلاصه می‌شود:

$$A = \frac{m_{pc}(R+r)^2}{8} \tag{۲۶}$$



شکل ۴. نیروها وگشتاورهای وارد بر چرخ ۲ و ۴ [۱۰]

Fig. 4. Forces and torques on wheels 2 and 4 [10]

$$B=\frac{I_{pc}(R+r)^2}{16(l_x+l_y)^2} \tag{۲۷}$$

$$C=I_k \tag{۲۸}$$

$$\begin{aligned} T_K &= \frac{1}{4}(A+B+C)\times \\ &[\dot{\phi}_1^2+\dot{\phi}_2^2+\dot{\phi}_3^2+\dot{\phi}_4^2]+ \\ &(A-B)[\dot{\phi}_1\dot{\phi}_4+\dot{\phi}_2\dot{\phi}_3]+ \\ &B[\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+\dot{\phi}_3\dot{\phi}_4-\dot{\phi}_1\dot{\phi}_3-\dot{\phi}_2\dot{\phi}_4] \end{aligned} \tag{۲۹}$$

سیستم در این حالت دارای چهار درجه آزادی است لذا:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} \tag{۳۰}$$

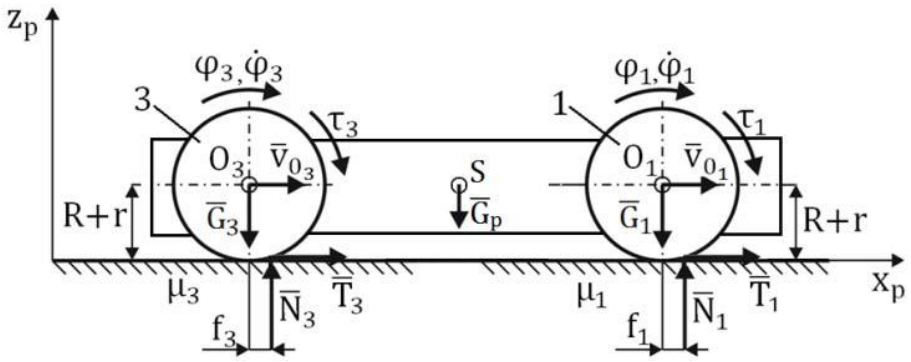
شکل‌های ۴ و ۵، نیروهای اعمالی به هرکدام از چرخ‌های ربات را نشان می‌دهند. فرض شده است که چرخ‌ها با گشتاور اعمالی τ که از سیستم انتقال قدرت ناشی می‌شود حرکت می‌کنند. همچنین فرض شده است که وزن مرکز ربات G_p و وزن مرکز هرچرخ G_iاست و ربات روی یک سطح تخت (با ضریب اصطکاک خشک μ) و تغییر شکل پذیر(ضریب اصطکاک غلتشی f_i) بدون لغزش حرکت می‌کند. همچنین تحلیل شامل نیروی اصطکاک خشک T_iو نیروی عکس العمل N_i برای i امین چرخ می‌باشد. آز انجایی که از اثر لغزش ربات صرف نظر شده است بنابراین فقط نیروی اصطکاک غلتشی در روابط در نظرگرفته شده است.

در این حالت با محاسبه کار سیستم نیروها، نیروهای عمومی از روابط (۳۱) تا (۳۴) به دست می‌آیند:

$$Q_1=\tau_1-N_1 f_1\,\mathrm{sgn}(\dot{\phi}_1) \tag{۳۱}$$

$$Q_2=\tau_2-N_2 f_2\,\mathrm{sgn}(\dot{\phi}_2) \tag{۳۲}$$

$$Q_3=\tau_3-N_3 f_3\,\mathrm{sgn}(\dot{\phi}_3) \tag{۳۳}$$



شکل ۵. دیاگرام نیروهای وارد برچرخ ۱ و ۳ [۱۰]

Fig. 5. Diagram of forces acting on wheels 1 and 3 [10]

$$Q_4 = \tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4) \tag{۳۴}$$

با توجه به رابطه به دست آمده از انرژی جنبشی رابطه (۳۵) برقرار است:

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0 \tag{۳۵}$$

حال با این تحلیل انجام شده، معادلات دینامیکی مربوط به حرکت چرخ‌های ربات به شکل زیر به دست می‌آید [۱۱]

$$M \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{\phi}_3 \\ \ddot{\phi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \tag{۳۶}$$

که ماتریس M برابراست با:

$$M = \begin{bmatrix} A+B+C & -B & B & A-B \\ -B & A+B+C & A-B & B \\ B & A-B & A+B+C & -B \\ A-B & B & -B & A+B+C \end{bmatrix} \tag{۳۷}$$

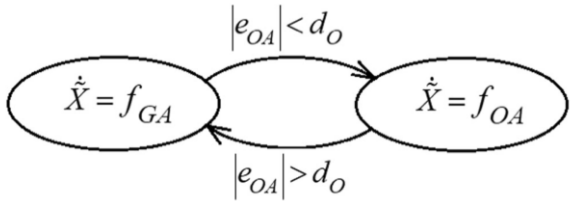
در نهایت باتوجه به رابطه فوق، رابطه دینامیک معکوس سیستم به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{\phi}_3 \\ \ddot{\phi}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_1) \\ N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_2) \\ N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_3) \\ N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\phi}_4) \end{bmatrix} \tag{۳۸}$$

۳- روش کنترل رفتار مبنا و الگوریتم جهت یابی

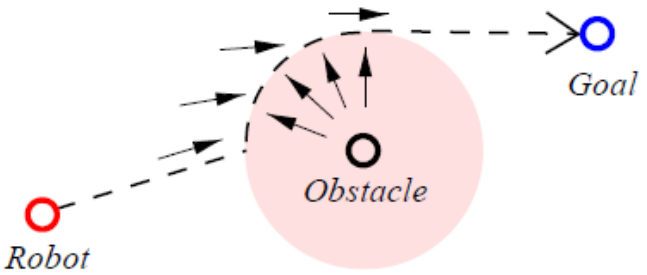
یکی از روش‌های مهم برای سازماندهی کنترلرهای ربات‌های متحرک که در محیط‌های نسبتاً ناشناخته کار می‌کنند، در چهارچوبی مبتنی بر رفتار است. در این روش، رفتارهای متمایز ربات مانند رفتن به هدف[1] و جلوگیری از مانع[2] در نظر گرفته شده است و تغییر بین رفتارهای ذکر شده براساس داده‌های سنسور است و هیچ نمایشی از محیط وجود ندارد. ساده‌ترین روش برای کنترل یک ربات متحرک برای اینکه ربات به سمت هدف حرکت کند و به مانعی برخورد نکند، استفاده از رفتار رفتن به هدف و رفتار جلوگیری از مانع است که درشکل ۶ نشان داده شده است. در ابتدا ربات رفتار جذب شونده به سمت هدف دارد و به سمت هدف حرکت می‌کند. چنانچه در طی حرکت ربات به مانعی نزدیک شود بایستی از این مانع دوری کند. نکته

1 Go to goal
2 Avoid obstacle



شکل ۶. رفتارهای رفتن به هدف و دوری از موانع[۵]

Fig. 6. Goal-to-goal and avoidance of obstacles behaviors [5]



شکل ۷.رفتار دور زدن مانع و رفتن به سمت هدف[٦]

Fig. 7. Behavior bypassing the obstacle and going towards the target [6]

کلیدی در طراحی این الگوریتم قسمت نحوه سوییچ کردن بین رفتارهاست. اینکه ربات چگونه مانع را دور بزند تا در رفتار رفتن به هدف خللی ایجاد نشود. بنابراین در این قسمت برای مانع یک شعاع d_O و یک فاصله اطمینان e_{OA} که نشان دهنده فاصله ربات تا مانع هست را در نظر می‌گیریم. حال اگر فاصله ربات تا مانع از این مقدار e_{OA} کمتر شود ربات در رفتار دوری از موانع قرار می‌گیرد.

اگر رفتار رفتن به هدف و رفتار دوری از مانع را در نظر بگیریم، در اینصورت احتمال به وجود آمدن مشکل در سوییچ کردن بین دو رفتار زمانی که ربات به مانع نزدیک می‌شود وجود دارد. با سوییچ کردن زیاد بین این دو رفتار ربات رفتار ناهمسانی برای دور زدن به مانع و رسیدن به هدف پیدا می‌کند. بنابراین لازم است رفتار دنبال کردن دیوار[1] نیز در نظر گرفت. که در این رفتار در فاصله مناسبی مانع را روی یک خط دور میزند و پس از اینکه به اندازه کافی از مانع دور شد به سمت هدف می‌رود.

در نهایت با در نظر گرفتن همه رفتارها، ربات همانند شکل زیر مانع را دور می‌زند و به سمت هدف حرکت می‌کند. (شکل ۷)

برای کنترل کردن از یک کنترلر P برای کنترل موقعیت و جهت ربات استفاده می‌شود [۶]. باتوجه به سینماتیک ربات چهارچرخ مکانوم، معادله سرعت آن در جهات x و y از رابطه (۳۹) محاسبه می‌شود

$$\dot{x} = u \tag{۳۹}$$

که در این رابطه، $u = ke$ و $e = (x_g - x)$ می‌باشد. با در نظر گرفتن کنترلر فوق، در این حالت رفتار رفتن به هدف ربات، پیاده سازی می‌شود. در مرحله بعد برای پیاده سازی رفتار عبور از موانع می‌توان از کنترلر زیر استفاده نمود.

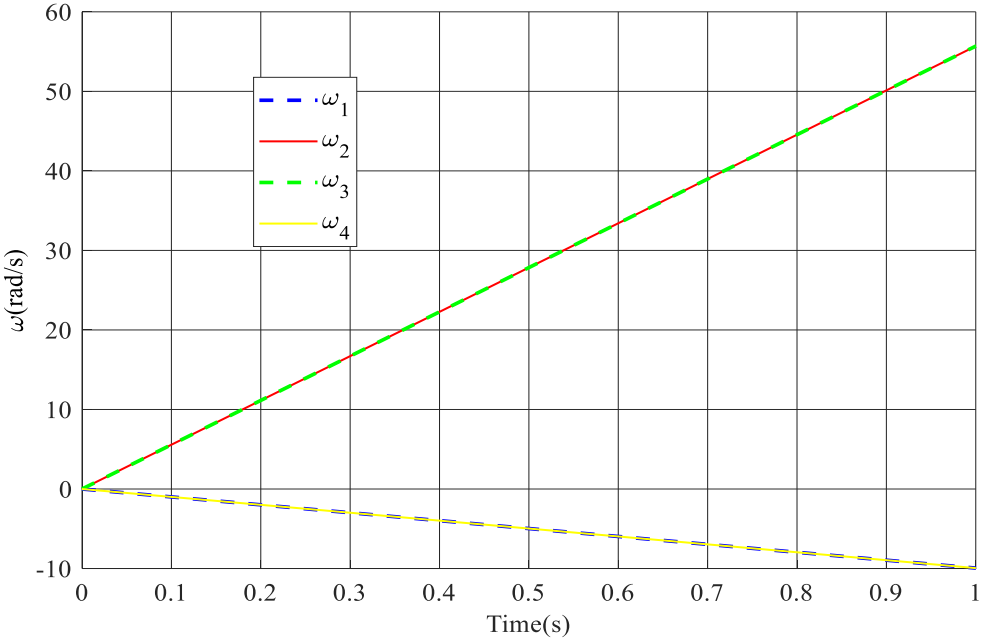
$$u = -k_{Ao} e_{Ao} \tag{۴۰}$$

که در اینجا، k_{Ao}، بهره مناسب برای حرکت ربات در هنگام نزدیک شدن به مانع و e_{Ao} اختلاف موقعیت ربات با موقعیت مانع است. با در نظر گرفتن این کنترلر، با نزدیک شدن ربات به مانع، از مانع دوری می‌کند. برای اینکه ربات مانع را دور بزند و رفتار دنبال کردن دیوار را داشته باشد، با استفاده از ماتریس دوران در حرکت صفحه xy کنترلر دنبال کننده دیوار برای دو حالت ساعتگرد و پادساعتگرد از روابط (۴۱) تا (۴۲) به دست می‌آید:

$$u_{fw}^{c} = R(-\frac{\pi}{2}) \times u_{Ao} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \times u_{Ao} \tag{۴۱}$$

$$u_{fw}^{cc} = R(\frac{\pi}{2}) \times u_{Ao} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \times u_{Ao} \tag{۴۲}$$

1 Follow wall



شکل ۸. سرعت زاویه‌ای چرخ‌های ربات با روش الگوریتم رفتار مبنا

Fig. 8. Angular velocity of robot wheels by behavior - based algorithm method

برای کنترل جهت گیری ربات نیز، از یک کنترلر P طبق رابطه زیر استفاده شده است:

$$\omega = k \times \tan 2^{-1}(\sin(\phi_d - \phi), \cos(\phi_d - \phi)) \qquad (۴۳)$$

که در اینجا ϕ، زاویه سر ربات و ϕ_d زاویه مطلوب می‌باشد.

۴- صحت سنجی

در این بخش ابتدا یک حرکت مستقیم بدون جهت گیری همانند حرکتی که در مرجع [۱۱] در نظر گرفته شده شبیه سازی شده است. با الگوریتم معرفی شده، به بررسی این حرکت پرداخته شده است.

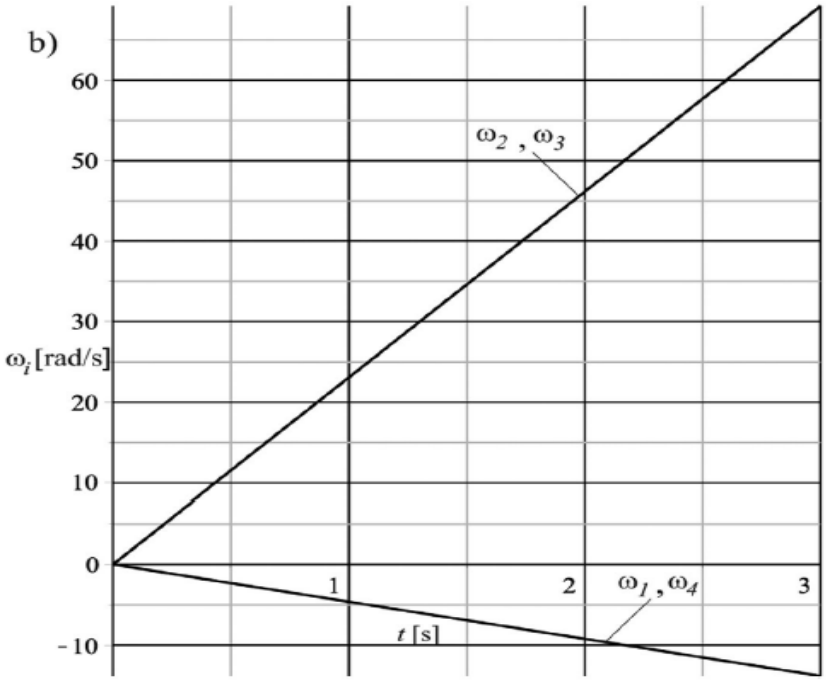
در این حالت x_g=۱۴۰، y_g =۲۱۰ می‌باشد. زاویه سر ربات برابر با صفر می‌باشد و سرعت دورانی ربات برابر با صفر قرار دارد. با در نظر گرفتن این شرایط شبیه سازی انجام شده و نتایج به شرح زیر است.

همانگونه که از شکل ۸ مشخص است در ثانیه اول حرکت، سرعت دورانی چرخ‌های ۱و۳ به میزان ۵۸ رادیان برثانیه و چرخ‌های ۲ و ۴ به ۱۰- رادیان برثانیه می‌رسد که این دقیقاً برابر با نتیجه شکل ۹ می‌باشد که در مرجع [۱۱] شبیه سازی شده است.

در ادامه با توجه به مرجع [۱۲]، حرکت‌های ربات که در این مرجع صورت گرفته است، با الگوریتم جهت یابی انجام شده و سپس نتایج را مورد قیاس داده می‌شود.

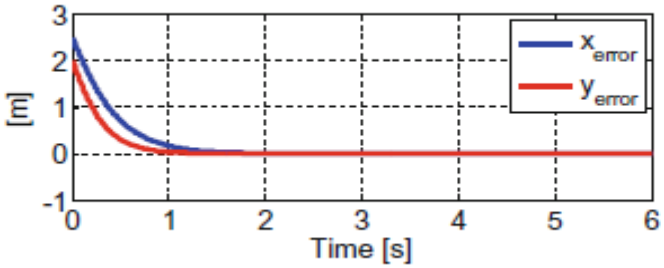
در مرجع [۱۲] یک حرکت خطی با شرایط اولیه $(۰,۰,\frac{\pi}{۳})$ برای رسیدن به نقطه هدف (۲,۲/۵) بررسی شده است که طی حرکت زاویه جهت گیری ربات بایستی در نهایت به مقدار ۴۵ درجه برسد. در این قسمت، این حرکت با روش کنترل رفتار مبنا شبیه سازی شده و نتایج آن ارائه شده است.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتایج حاصل از شبیه سازی در مرجع [۱۲] را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ خطای حرکتی ربات را در طی مسیر حرکت و شکل ۱۱ خطای زاویه سر ربات را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده با روش الگوریتم جهت‌یابی، در شکل ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده‌اند. با مقایسه شکل ۱۲ با شکل ۱۰ که خطای حرکتی ربات را نمایش می‌دهند مشاهده می‌شود که تغییرات این خطاها بسیار به‌هم نزدیک بوده و درنهایت



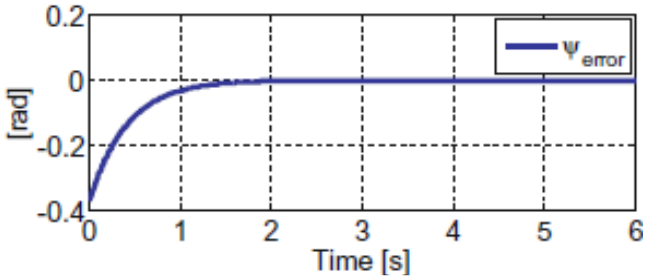
شکل ۹. سرعت دورانی به دست آمده در مرجع [۱۱]

Fig. 9. Rotational velocity obtained in Ref. [11]



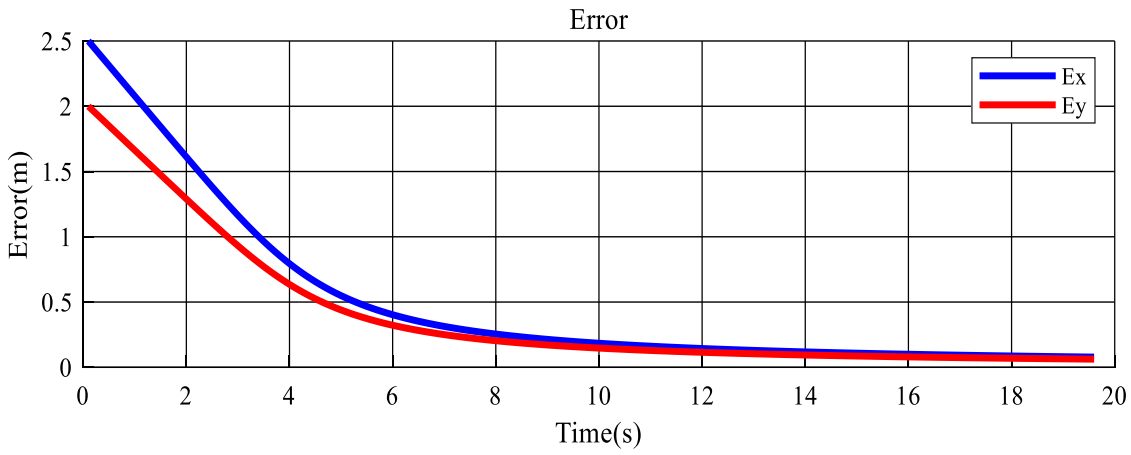
شکل ۱۰. میزان خطای حرکت در جهات x و y در شبیه سازی در مرجع [۱۲]

Fig. 10. The amount of x-y motion error in the reference simulation [12]



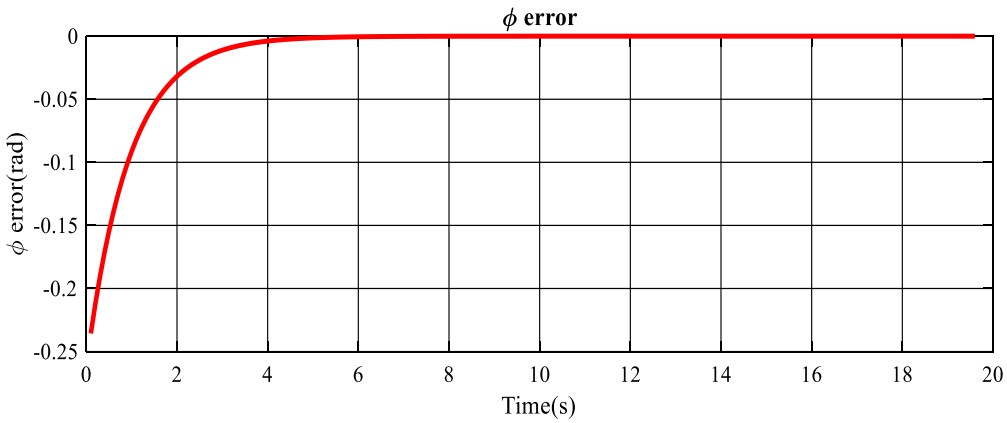
شکل ۱۱. خطای زاویه سر ربات در شبیه سازی مرجع [۱۲]

Fig. 11. Robot head angle error in reference simulation [12]



شکل ۱۲. خطا در جهات x و y با روش کنترل رفتار مبنا

Fig. 12. Error in x and y directions with behavior - based control method



شکل ۱۳. خطای زاویه سر با روش کنترل رفتار مبنا

Fig. 13. Head angle error with behavior-based control method

به صفر می‌رسد که در این حالت ربات به موقعیت مطلوب رسیده است. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۳، خطای زاویه ربات در مدت زمان کمی به صفر می‌رسد.

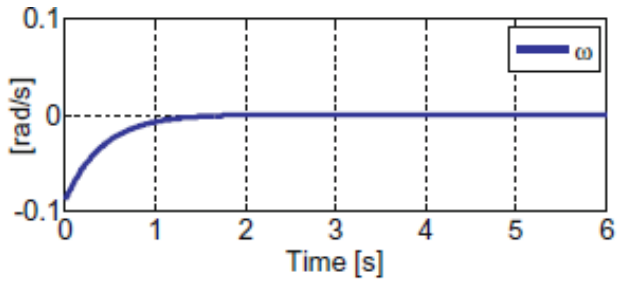
همچنین شکل ۱۴ میزان سرعت دورانی ربات را که در مرجع [۱۲] شبیه سازی شده است نشان می‌دهد، که با مقایسه با شکل ۱۵ که نتایج حاصل از شبیه سازی با الگوریتم جهت یابی است مشاهده می‌شود که سرعت دورانی ربات در شبیه سازی، سرعت دورانی حاصل از شبیه سازی مرجع [۱۲] که در شکل ۱۴ نمایش داده شده است را دنبال می‌کند.

اختلافات جزئی موجود در نمودارهای شبیه سازی شده و همچنین تفاوت در زمان در نمودارها بستگی به پارامترهایی چون سرعت ربات و یا جرم و ضریب اصطکاک و همچنین بهره کنترلر در نظر گرفته شده دارد. بنابراین با مقایسه این حالت‌ها، نتیجه می‌شود که روش به کاربرده شده همانند روش‌های دیگر و حتی در مواردی بهتر از آنها عمل می‌کند و اطمینان کافی از صحت عملکرد آن وجود دارد.

۵- شبیه سازی و مدلسازی

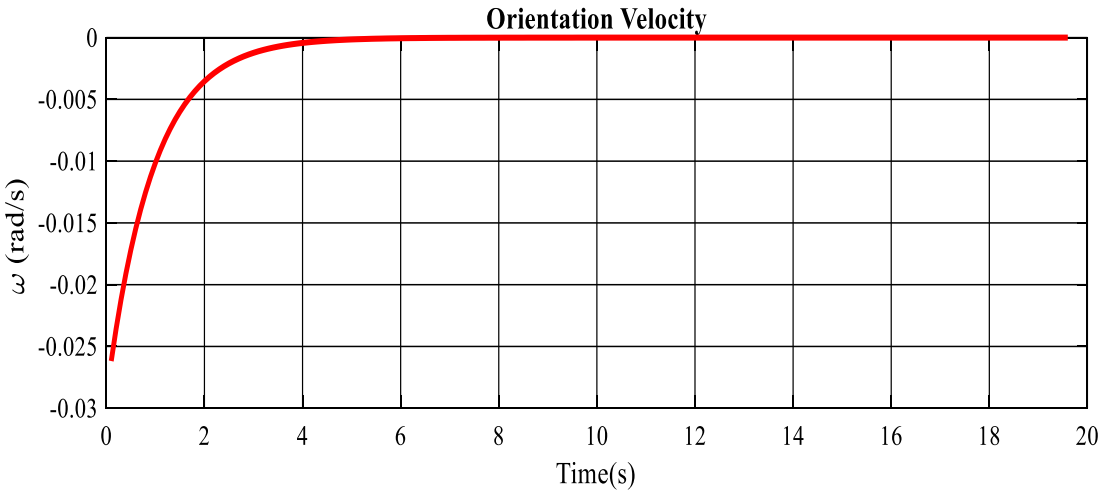
با در نظرگرفتن روابط سینماتیک و دینامیک ربات، همچنین با در نظر گرفتن روش کنترل رفتار مبنا، شبیه سازی ربات در محیط متلب[1] صورت گرفته است. در این شبیه سازی ربات همه جهته از یک نقطه مشخص از

1 MATLAB



شکل ۱۴. میزان سرعت دورانی ربات که از شبیه سازی مرجع [۱۲] به دست آمده

Fig. 14. The rotational speed of the robot obtained from the reference simulation [12]



شکل ۱۵. سرعت دورانی ربات با روش کنترل رفتار مبنا

Fig. 15. Robot rotational speed with behavior- based control method

حال سکون شروع به حرکت می‌کند تا به موقعیت مطلوب برسد. در حین حرکت نیز بایستی از چندین مانع با رفتارهای مشخص عبور کند. علاوه بر آن نیز در حین حرکت بایستی زاویه جهت گیری سر ربات به گونه‌ای باشد که همواره یک نقطه متحرک را دنبال کند (شکل ۱۶). در ادامه، مدلسازی موتور چرخ‌ها صورت گرفته است تا نمودار سرعت واقعی چرخ‌ها و گشتاور مربوط به هر چرخ به دست‌آید. همانطور که از شکل ۱۶ مشخص است ربات از نقطه (۰،۰) شروع به حرکت کرده و به سمت هدف که در موقعیت (۷،۸) قرار دارد می‌رود و در حین حرکت همواره جهت گیری آن به سمت نقطه متحرک[1] می‌باشد. پارامترهای ربات در شبیه سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

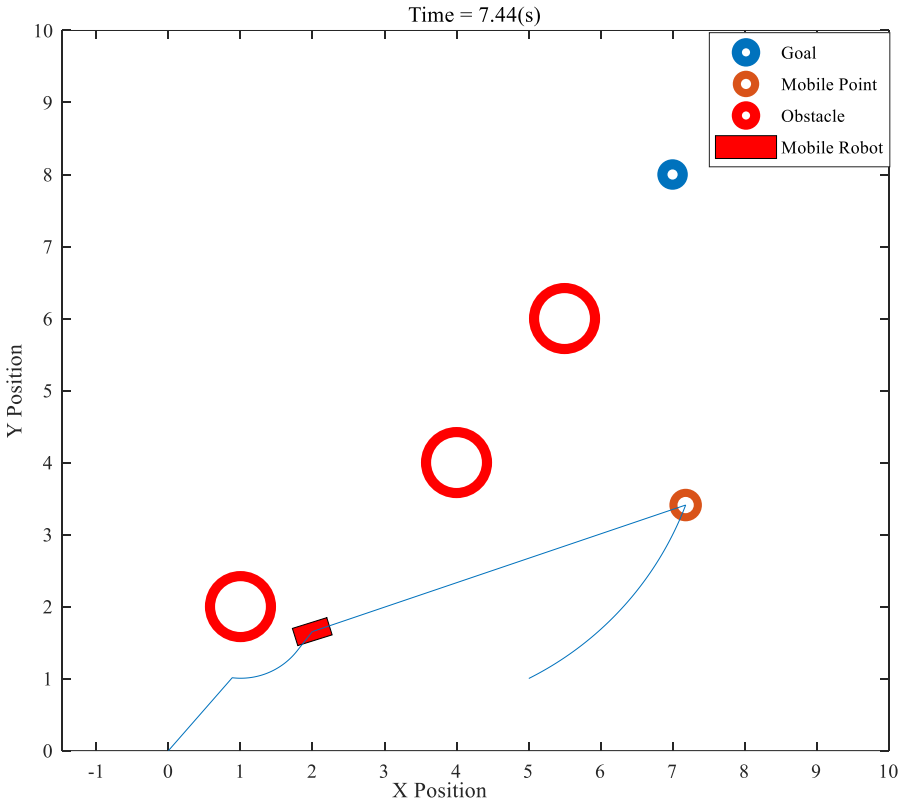
برای محاسبه سرعت واقعی چرخ‌های ربات نیاز به مدل موتور چرخ‌ها می‌باشد. در اینجا از مرجع [۱۳] برای مدلسازی ربات استفاده شده است. برای مدلسازی از یک موتور جریان[2] مستقیم استفاده شده که در شکل ۱۷ مدل موتور ترسیم شده است.

در این مدل موتور رابطه (۴۴) برقرار است:

$$T_m = K_m i_a(t) \tag{۴۴}$$

1 Mobile point

2 Direct Current (DC) Motor



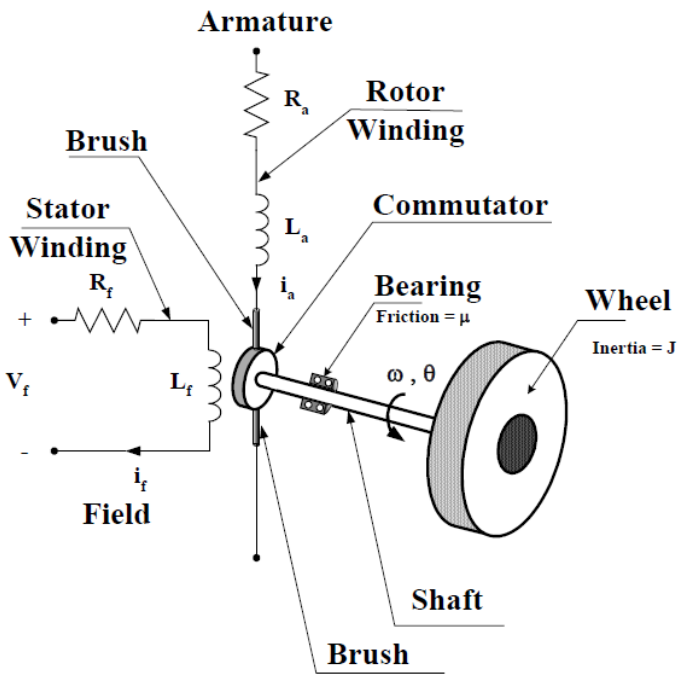
شکل ۱۶. مسیر حرکت ربات به سمت هدف و جهت گیری آن به سمت نقطه متحرک

Fig. 16. The path of the robot towards the target and its orientation towards the moving point

جدول ۲. پارامترهای درنظرگرفته شده برای ربات

Table 2. Parameters intended for the robot

پارامتر ربات	علامت	واحد	مقدار پارامتر
جرم ربات	m_p	kg	۳
جرم چرخ‌ها	m_k	kg	۰/۳۵
ممان اینرسی ربات	I_p	kg.m^{۲}	۰/۰۳۲
ممان اینرسی چرخ‌های ربات	I_k	kg.m^{۲}	۰/۶۲۵ × ۱۰$^{-۴}$
شعاع چرخ‌ها	R	m	۰/۰۵
اندازه طول ربات	$۲I_x$	m	۰/۳
اندازه عرض ربات	$۲I_y$	m	۰/۳



شکل ۱۷. مدل موتور جریان مستقیم [۱۳]

Fig. 17. Direct current motor model [13]

که در این رابطه T_m گشتاور اعمالی موتور، K_m ثابت موتور و i_a جریان آرمیچر موتور می‌باشد. همچنین رابطه ولتاژ اعمال شده با جریان آرمیچر در رابطه (۴۵) بیان شده است:

$$V_a = (R_a + L_a s) I_a(s) + V_b(s)$$
$$, V_b(t) = K_b \omega(t) \qquad (۴۵)$$

که در رابطه فوق، V_aولتاژ آرمیچر، V_b ولتاژ نیروی محرکه الکتریکی معکوس[1] بوده که این ولتاژ طبق رابطه متناظر با سرعت چرخ است، R_a، L_a و I_a به ترتیب مقاومت، اندوکتانس و جریان آرمیچر می‌باشد. گشتاور اعمال شده بر چرخ برابر است با:

$$T_R(s) = \left(\frac{1}{Js + \mu}\right)\omega(s) \qquad (۴۶)$$

که در این رابطه، Jاینرسی روتور و چرخ موتور، μ اصطکاک بین محور روتور و یاتاقان‌های موتور است.

در بسیاری از سروموتورهای جریان مستقیم از یک سنسور سرعت مانند تاکومتر[2] استفاده شده است. که تاکومتر سرعت خروجی را متناسب با ولتاژ خروجی اندازه گیری می‌کند. در این قسمت یک تاکومتر را مدلسازی کرده و مدل موتور سروو جریان مستقیم تکمیل شده است.

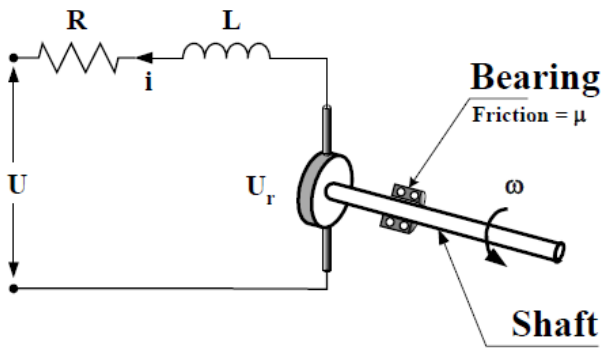
شکل ۱۸ یک دیاگرام مربوط به تاکومتر سنسور سرعت را نشان می‌دهد. در این شکل از یک روتور که مستقیماً به محور موتور وصل شده است و یک سیم پیچ استاتور استفاده شده است. ولتاژ داخلی تولید شده در تاکومتر برابر است با:

$$U_r = K\omega \qquad (۴۷)$$

که در اینجا، U_r ولتاژ ورودی تاکومتر برحسب ولت است که معادل نیروی محرکه الکتریکی معکوس در موتور جریان مستقیم می‌باشد. K ثابت

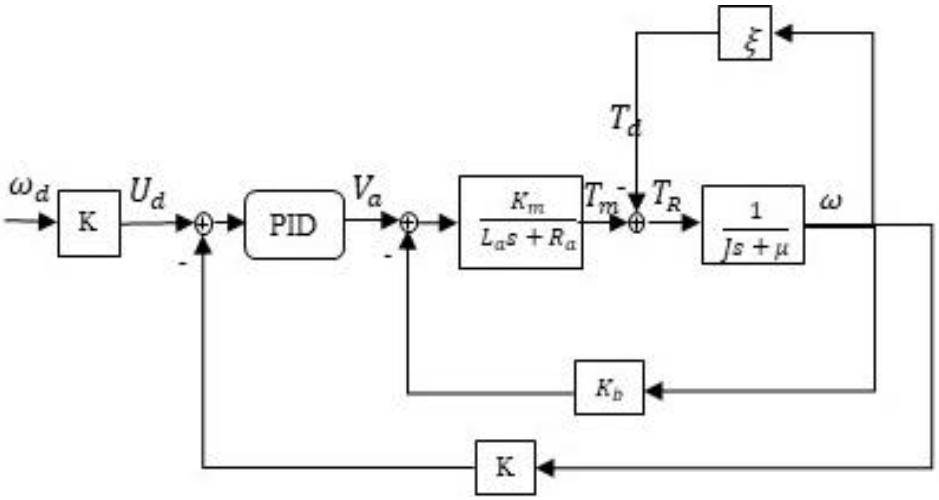
1 Back electromotive force (back-emf)

2 -tachometer



شکل ۱۸. دیاگرام مربوط به مدلسازی تاکومتر [۱۳]

Fig. 18. Tachometer modeling diagram [13]



شکل ۱۹. حلقه کنترلی برای محاسبه سرعت دورانی واقعی موتور

Fig. 19. Control loop to calculate the actual rotational speed of the motor

تناسبی بر حسب (رادیان/ ثانیه ×ولتاژ) و ω سرعت زاویه‌ای ورودی برحسب رادیان می‌باشد. با اعمال روابط کرشهف برای روتور تاکومتر نتیجه می‌شود:

$$U_r = L\frac{di}{dt} + Ri + U \qquad (۴۸)$$

که در این رابطه، U ولتاژ پایه خروجی، L ضریب اندوکتانس، R مقاومت سیم پیچ روتور ژنراتور می‌باشد [۱۳]

همچنین با در نظر گرفتن اصطکاک بین چرخ و زمین رابطه گشتاور اغتشاشی وارد شده به هرچرخ برابر است با:

$$T_d = \xi\omega \qquad (۴۹)$$

که در این رابطه، T_d گشتاور اغتشاشی وارد بر هرچرخ، ξ ضریب اصطکاک غلتشی ویسکوز بین چرخ و زمین ω سرعت دورانی چرخ می‌باشد.

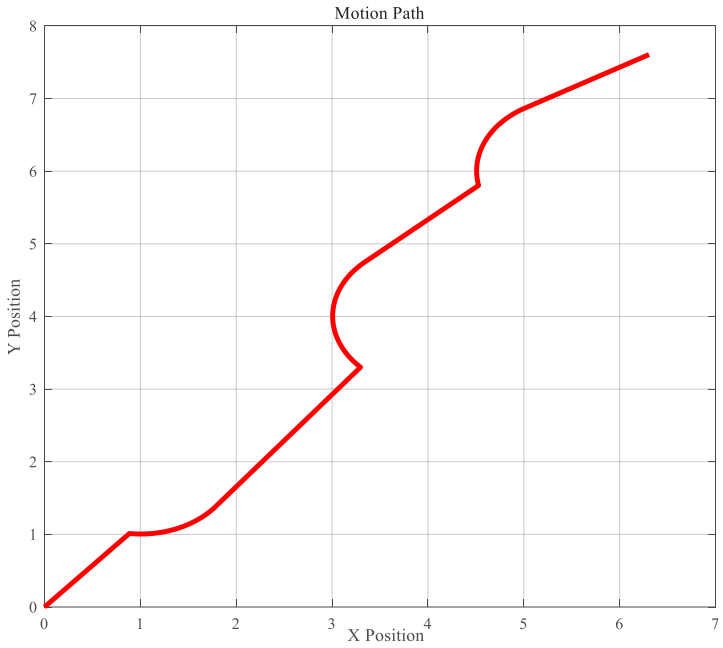
با در نظر گرفتن روابط مربوط به مدلسازی موتور جریان مستقیم، درنهایت حلقه کنترلی برای به دست آوردن سرعت دورانی واقعی چرخ‌ها در شکل ۱۹ نشان داده شده است [۱۳]

در واقع در شکل ۱۹ با مدلسازی سروموتور، میزان سرعت مطلوبی که چرخ ربات باید داشته باشد به دست می‌آید. پارامترهای که برای موتور در

جدول ۳. پارامترهای مربوط به مدلسازی موتور جریان مستقیم

Table 3. Parameters related to direct current motor modeling

پارامتر ربات	علامت	واحد	مقدار پارامتر
ثابت گشتاور موتورجریان مستقیم	K_m	kg	۴/۱ × ۱۰^-۳
ثابت نیروی محرکه الکتریکی معکوس موتور	K_b	kg	۰/۳۵
مقاومت آرمیچر	R_a	Ω	۱/۹
آندوکتانس آرمیچر	L_a	H	۱ × ۱۰^-۳
ممان اینرسی روتور وچرخ	J	kg.m^۲	۳/۸۷ × ۱۰^-۳
ضریب اصطکاک ویسکوز یاتاقان	μ	N.m.sec	۰/۱۶
ضریب اصطکاک غلتشی بین چرخ و زمین	ξ	N.m.sec	۰/۰۸
ثابت ولتاژ تاکومتر	K	V.sec/rad	۳۱ × ۱۰^-۳
مقاومت تاکومتر	R	Ω	۱۲



شکل ۲۰. مسیر حرکت ربات از نقطه شروع تا رسیدن به هدف

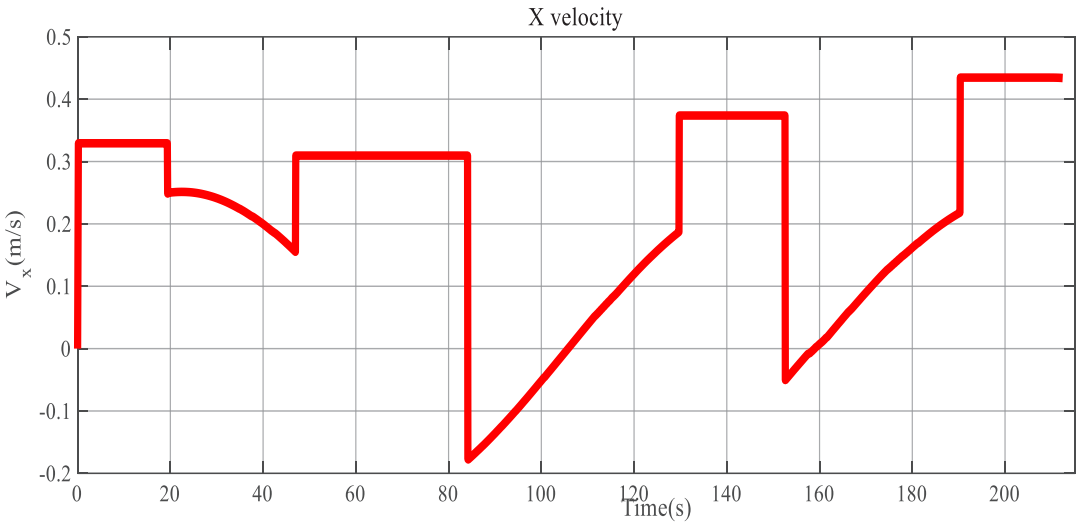
Fig. 20. The path of the robot from the starting point to reach the goal

نظر گرفته شده است در جدول ۳ ارائه شده است.

۶- نتایج و بحث

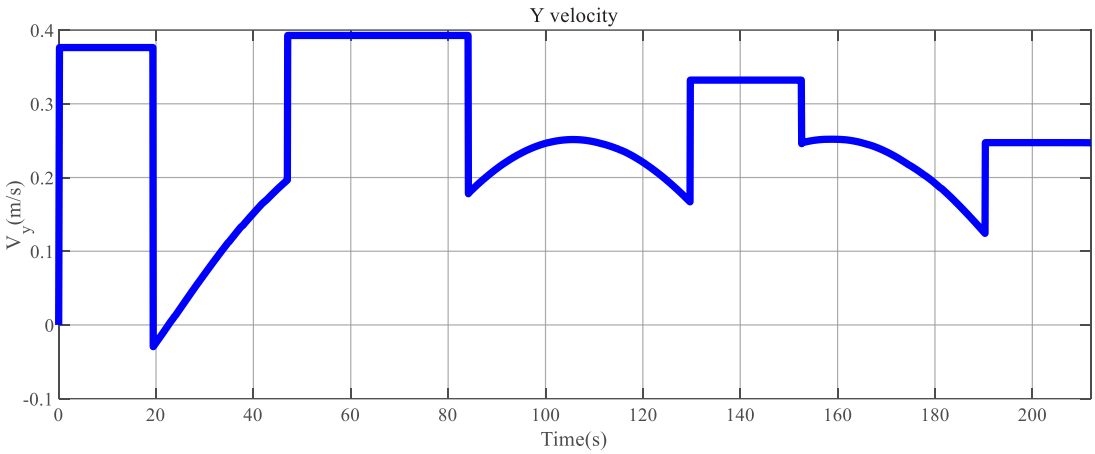
با اتمام شبیه سازی مسیر حرکت ربات در شکل ۲۰ نشان داده شده است. از آنجایی که ربات در همه جهات بدون جهت گیری می‌تواند حرکت کند، حرکت این ربات در هنگام دور زدن موانع به نحوی است که در ابتدای دور زدن برخلاف ربات‌های چهارچرخ، نرم بودن حرکت وجود ندارد و شکستگی دیده می‌شود. این امر با توجه به حرکت ربات که جهت گیری تاثیری بر حرکت ندارد توجیه می‌شود.

در ادامه به بررسی سرعت ربات در جهات x و y می‌پردازیم.



شکل ۲۱. سرعت در جهت x ربات

Fig. 21. Speed in the x-direction of the robot

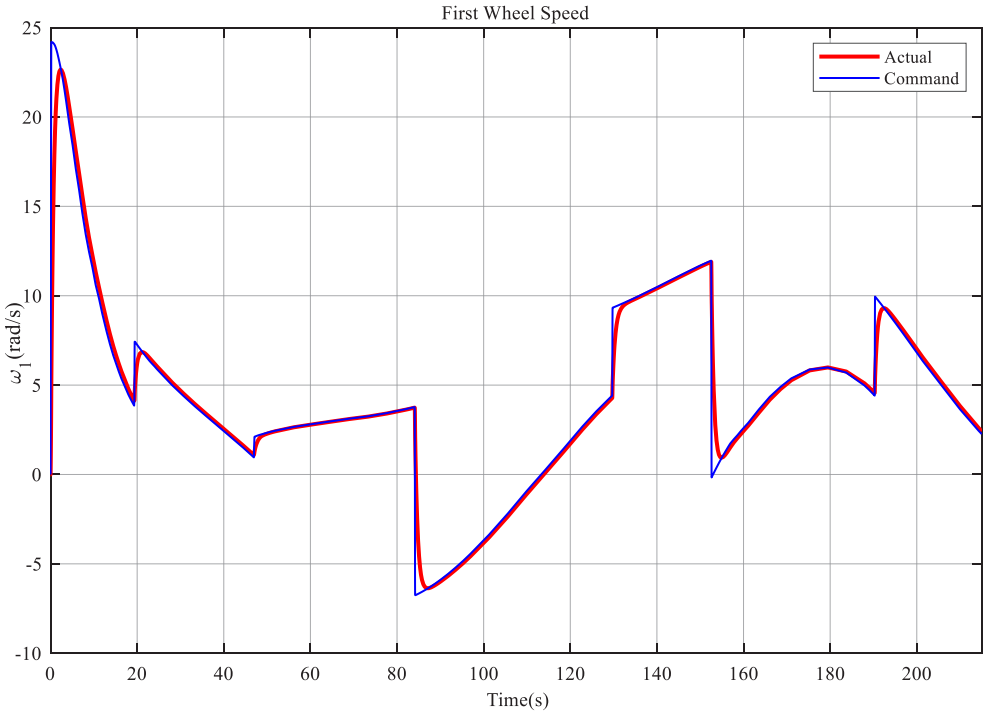


شکل ۲۲. سرعت در جهت y ربات

Fig. 22. Speed in the y-direction of the robot

همانگونه که از شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مشخص است، تغییر سرعت در این دو راستا هنگام حرکت به سمت هدف و رفتن به مانع مشهود است.

در هردو شکل ۲۱ و۲۲ الگوی خاصی در سرعت حرکت ربات دیده می‌شود. در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که سرعت درجهت x مقداری ثابت بوده و سپس به هنگام رسیدن به مانع سرعت کاهش می‌یابد. در هنگام عبور از مانع اول سرعت همچنان به صورت کاهشی بوده تا اینکه ربات به حالت حرکت به سمت هدف تغییر وضعیت می‌دهد. در این حالت نیز سرعت مقدار ثابت ۰/۳ متر بر ثانیه را دارد. در موانع بعدی از آنجا که این موانع به مسیر حرکت ربات نزدیک‌تر می‌باشند و ربات بایستی به صورت ساعتگرد موانع را دور بزند، لذا سرعت ربات بیشتر کاهش یافته و مقدار آن منفی می‌شود.



شکل ۲۳. سرعت دورانی چرخ اول

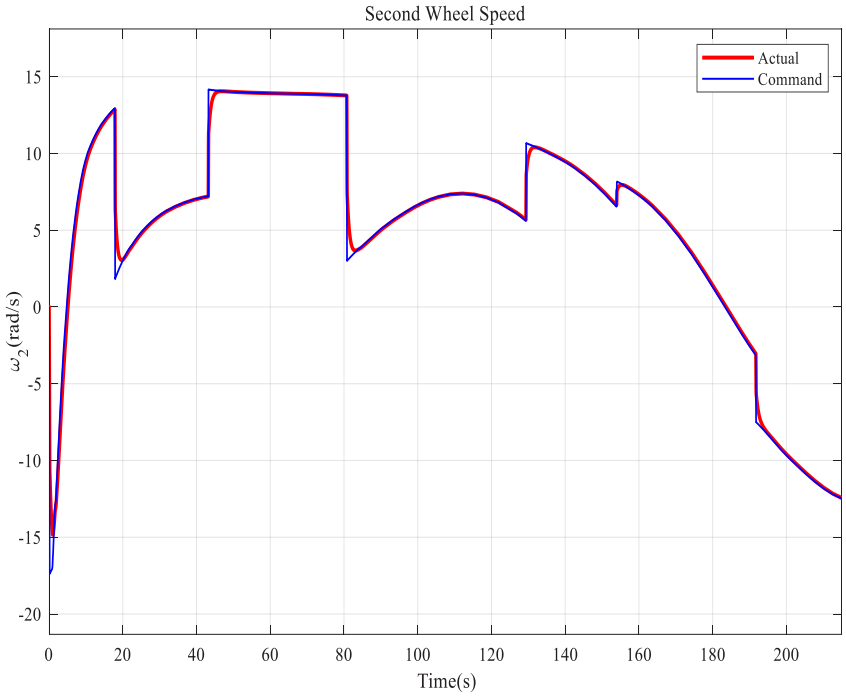
Fig. 23. The rotational speed of the first wheel

همچنین در نمودار مربوط به سرعت در جهت y نیز این مراحل وجود دارد. در ابتدا که ربات به مانع می‌رسد، سرعت آن به شدت کاهش یافته و سپس رفته رفته سرعت آن در حین دور زدن مانع افزایش می‌یابد. در مانع بعدی هم سرعت ابتدا به صورت افزایشی و سپس به صورت کاهشی ظاهر می‌شود. در مانع آخر نیز سرعت کاهش یافته و کم می‌شود. از آن‌جایی که ربات حرکت دور زدن مانع را به صورت یک مسیر دایره‌ای شکل انجام می‌دهد، نمودار سرعت در هر دو شکل به این صورت ظاهر می‌شود و روند کاهشی یا افزایشی دارد.

در ادامه به بررسی سرعت زاویه‌ای چرخ‌های ربات می‌پردازیم. در شکل‌های ۲۳-۲۶، سرعت چرخ‌های ربات مشخص شده است. همانگونه که در شکل ۱۹ نمایش داده شده است، سرعت مطلوب به عنوان مرجع وارد سیستم شده در نهایت با مدلسازی موتور و تعیین پارامترها، سرعت واقعی که در هر لحظه موتور ایجاد می‌کند به دست می‌آید. در این شکل‌ها مشخص است نمودار مربوط به سرعت واقعی دارای شیب ملایم‌تر و انحنای بیشتر در شکستگی‌هاست. این امر از لحاظ فیزیکی درست تعبیر می‌شود.

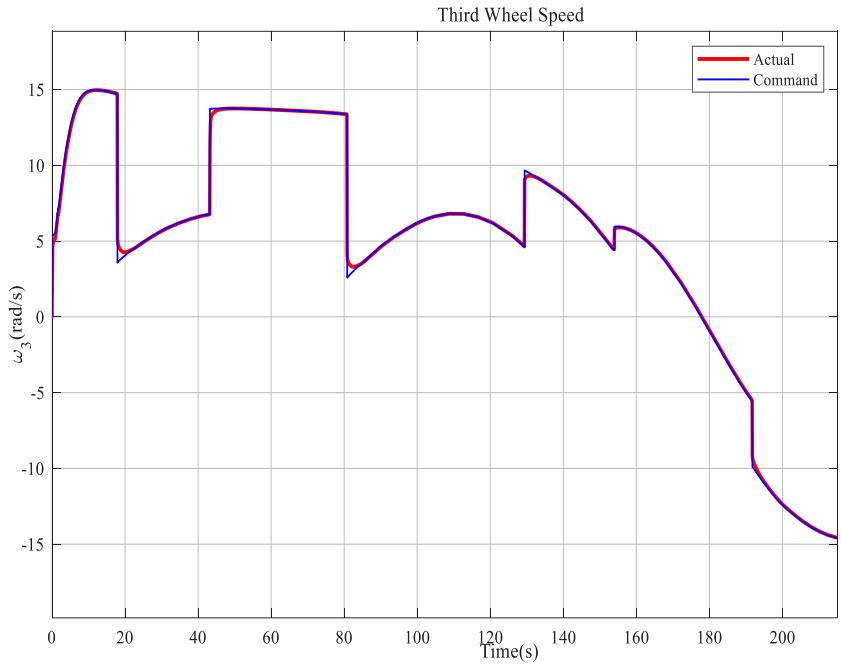
به عنوان مثال سرعت چرخ اول که در شکل ۲۳ نشان داده شده است در ثانیه ۲۰ که ربات در حین دور زدن مانع است افزایش می‌یابد این افزایش سرعت به تدریج اتفاق می‌افتد و همانگونه که نشان داده شده است تغییرات نرم‌تری را نسبت سرعت مطلوب که از شبیه سازی به دست آمده است دارد. در واقع موتور نمی‌تواند در یک لحظه بسیار کم به سرعت مطلوب برسد. بنابراین مدلسازی موتور سبب شده تغییرات سرعت به صورت نرم‌تر و از لحاظ فیزیکی واقعی تعبیر شود. این تغییرات در هر چهار چرخ دیده می‌شود. در مدلسازی موتور باید پارامترها مناسب و دقیق وارد شوند. تغییر پارامترها و انتخاب پارامترهایی که مناسب نیستند سبب می‌شود که نمودار دچار پرش شود و سرعت مطلوب را دنبال نکند. در این شکل‌ها مشخص است که میزان خطا بسیار کم است و خروجی که سرعت واقعی است سرعت مرجع را به خوبی دنبال می‌کند. همچنین محدوده تغییرات سرعت در این نمودارها در بازه مشخص و محدودی قرار گرفته است.

همچنین در مدلسازی موتور، میزان گشتاوری که از طرف موتور به چرخ داده می‌شود به دست آمده است. گشتاور هرچهار چرخ ربات در شکل‌های



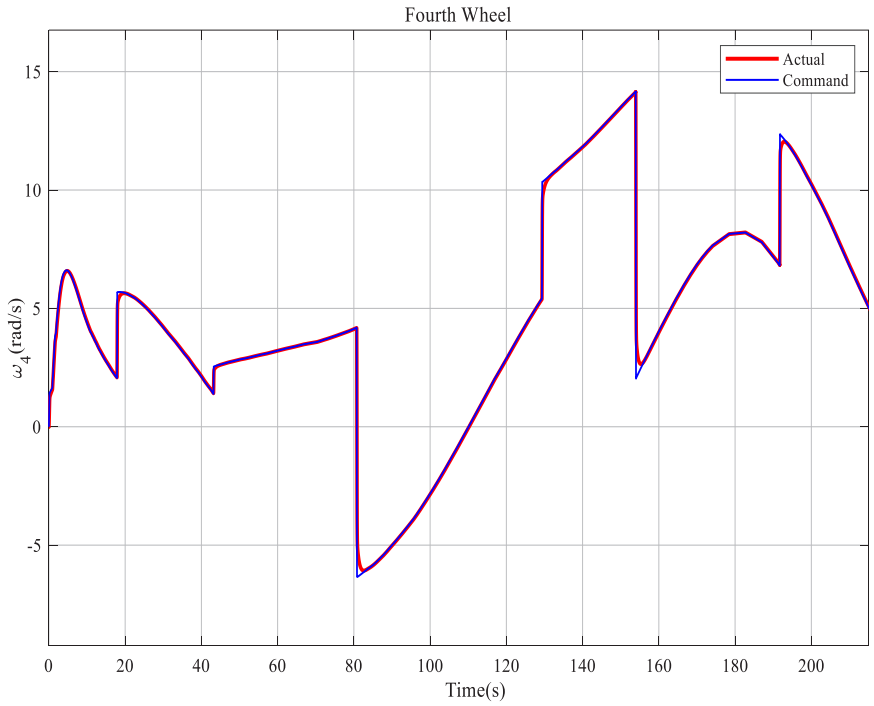
شکل ۲۴. سرعت دورانی چرخ دوم

Fig. 24. The rotational speed of the second wheel



شکل ۲۵. سرعت دورانی چرخ سوم

Fig. 25. The rotational speed of the third wheel



شکل ۲۶. سرعت دورانی چرخ چهارم

Fig. 26. The rotational speed of the fourth wheel

۲۷ تا ۳۰ نمایش داده شده است. در هر چهار نمودار در لحظه شروع حرکت افزایش میزان گشتاور مشاهده می‌شود. در لحظه شروع، ربات برای اینکه هم به سمت هدف حرکت کند و جهت گیری مطلوب را داشته باشد بایستی گشتاور نسبتاً زیادی ایجاد کند. به هنگام نزدیک شدن به موانع نیاز به تغییر سرعت در چرخ‌هاست که این امر سبب تغییر گشتاور در این لحظات می‌شود. به عنوان مثال در چرخ اول در ثانیه ۲۰ که ربات به مانع اول می‌رسد سرعت و گشتاور افزایش پیدا می‌کند. در حین دور زدن مانع گشتاور رفته رفته کاهش می‌یابد و به تبع آن سرعت نیز کاهش می‌یابد(شکل‌های ۲۷ و ۲۳). گشتاور تحویل داده شده به چرخ وابسته به اصطکاک ویسکوز، پارامترهای مربوط به مدل موتور مانند مقاومت و ضریب اندوکتانس می‌باشد. با توجه به نمودار سرعت و گشتاور، مشاهده می‌شود که نمودارها باهم مشابه‌اند.

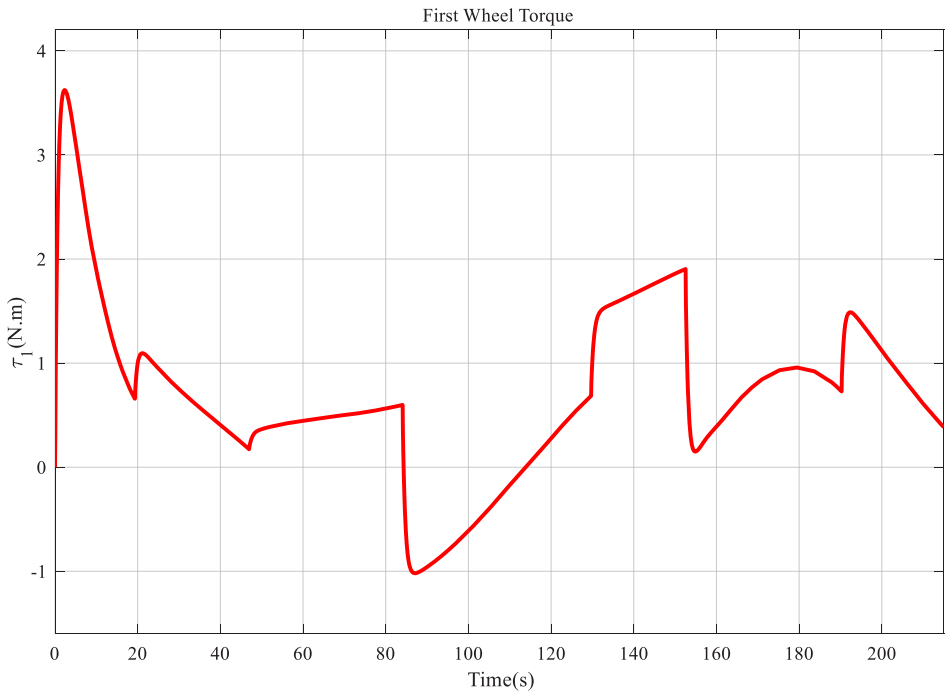
با توجه به رابطه (۴۶) گشتاور تابعی از سرعت می‌باشد و مشخص است که پارامترهای اینرسی محور موتور و ضریب اصطکاک بین محور و یاتاقان‌های موتور در این رابطه تأثیر گذار هستند. از آنجایی که اینرسی محور موتور معمولاً مقدار بسیار کمی نسبت به اصطکاک دارد عملاً در این رابطه این مقدار تأثیر چندانی ندارد. لذا در رابطه تئوری گشتاور به یک مقدار ثابت تقسیم می‌شود. بنابراین پروفیل نمودار سرعت و گشتاور همانند هم می‌باشند. چنانچه مقدار اینرسی را زیاد کنیم و ازمقدار مشخص که برای محور موتور در نظرگرفته می‌شود، بیشتر باشد خطای سرعت در نمودارها زیاد شده و اگر بخواهیم با کنترلر تناسبی- انتگرالی- مشتقی[1]، این خطارا کاهش دهیم، نمودار دچار پرش و شکستگی شده که مطلوب نیست. ضریب اصطکاک سبب افزایش و یا کاهش نمودار سرعت نسبت به نمودار گشتاور می‌شود. بنابراین با انتخاب پارامترهای دقیق، شبیه بودن نمودار سرعت و گشتاور دور از انتظار نیست.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا سینماتیک و دینامیک یک ربات همه جهته چهارچرخ مکانوم بررسی شد. ایده اصلی این مقاله، پیاده سازی روش الگوریتم جهت یابی رفتار مبنا، نیز شرح داده شد. روابط این روش برای این نوع ربات در نظر گرفته شد و با این روش کنترل ربات صورت گرفته است.

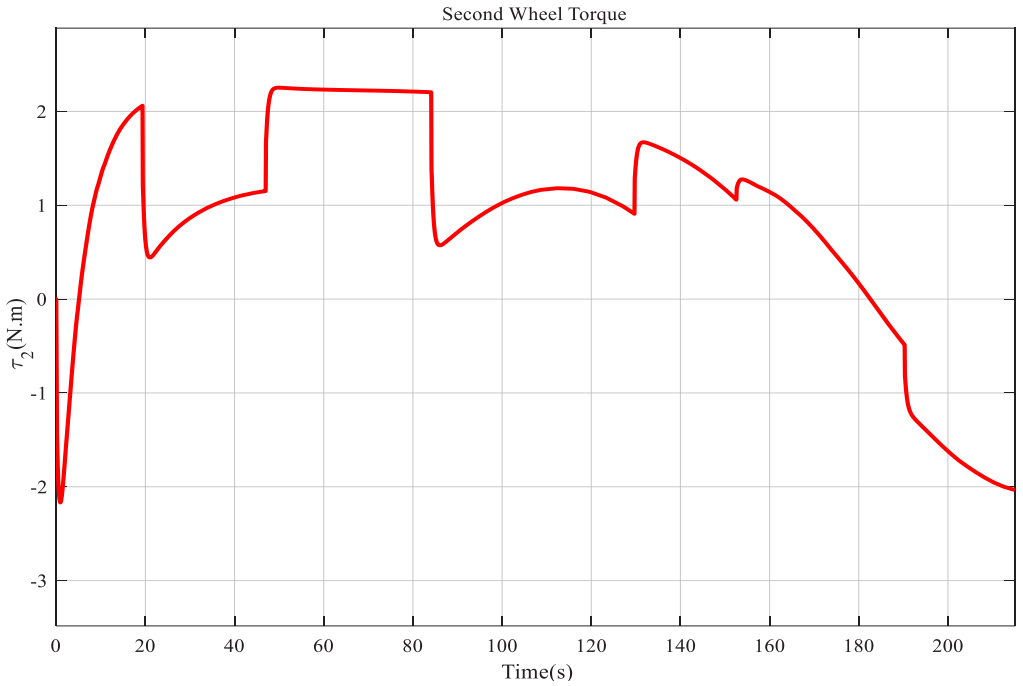
ابتدا به بررسی صحت سنجی حرکت ربات پرداخته شد و مشخص شد

1 -Proportional-Integral-Derivative (PID)



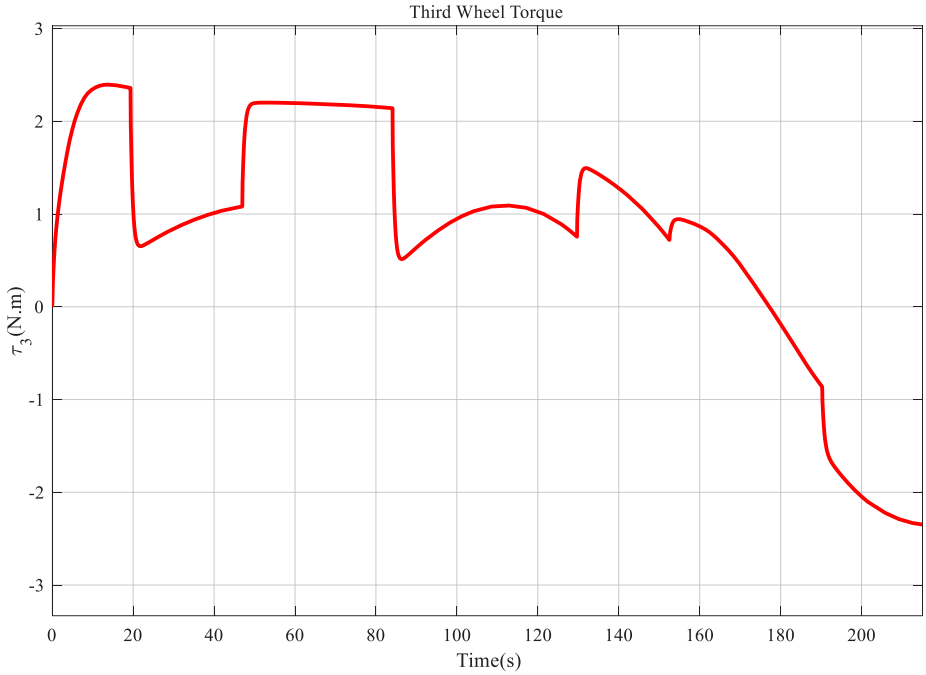
شکل ۲۷. میزان گشتاور در چرخ اول

Fig. 27. The amount of torque in the first wheel



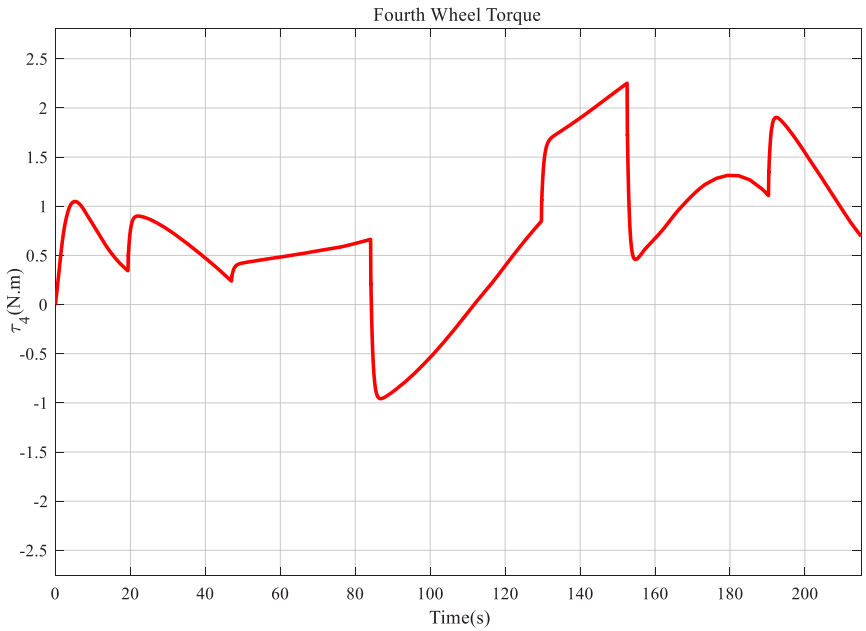
شکل ۲۸. میزان گشتاور در چرخ دوم

Fig. 28. The amount of torque in the second wheel



شکل ۲۹. میزان گشتاور در چرخ سوم

Fig. 29. The amount of torque in the third wheel



شکل ۳۰. میزان گشتاور در چرخ چهارم

Fig. 30. The amount of torque in the fourth wheel

که الگوریتم به خوبی می‌تواند حرکت ربات را با کمترین خطا شبیه سازی کند.

سپس حرکت ربات برای رسیدن به هدف در حضور چندین مانع شبیه سازی شد که دراین حرکت ربات بایستی جهت گیری متفاوتی داشته باشد و همواره جهت گیری آن یک نقطه متحرک را دنبال کند. حرکت با روش الگوریتم رفتار مبنا در محیط متلب شبیه سازی شد و با استفاده از روابط سینماتیکی ربات، سرعت ربات درجهت x y ,و همچنین سرعت چرخ‌های ربات پس از شبیه سازی به دست آمد.

مشاهده شد که نمودار سرعت ربات و سرعت چرخ‌ها تقریباً دارای یک الگوی خاصی است که ربات در حین نزدیک شدن به مانع دچار کاهش سرعت می‌شود. این روند در سرعت چرخ‌ها به خوبی دیده شد.

سپس به مدلسازی موتور جریان مستقیم پرداخته شد که از آن برای به دست آوردن سرعت واقعی چرخ‌ها استفاده می‌شود. روابط مربوط به موتور جریان مستقیم بررسی شدند.

سپس حلقه کنترلی برای محاسبه سرعت معرفی شد. در نهایت با در نظرگرفتن پارمترهای مناسب، شبیه سازی انجام و سرعت واقعی محاسبه شد.

مشاهده شد که سرعت واقعی تغییرات بهتر و نرم‌تری دارد و تغییرات آن به تدریج اتفاق می‌افتد که از لحاظ فیزیکی هم به درستی تعبیر می‌شود.

در نهایت میزان گشتاوری که از موتور به چرخ داده می‌شود محاسبه شد. مشاهده گردید که نمودار گشتاور مشابه نمودار سرعت واقعی همان چرخ است. این امر به دلیل تأثیر کم اینرسی و ضریب اصطکاک می‌باشد.

بنابراین با روش الگوریتم به کاربرده شده، درنهایت میزان گشتاور و سرعت چرخ‌ها محاسبه شد و بازه تغییرات سرعت و گشتاور در محدوده مناسب و قابل انتظاری قرار دارد. می‌توان گفت که روش به کاربرده شده دارای دقت خوبی از حرکت ربات است. خطای موجود بین سرعت واقعی و رفرنس که به عنوان فرمان وارد می‌شود در حد ناچیز، کمتر از ۱۰ درصد، می‌باشد.

منابع

[1] S. Mellah, G. Graton, E.-M. El-Adel, M. Ouladsine, A. Planchais, Trajectory tracking and time delay management of 4-mecanum wheeled mobile robots (4-MWMR), in: ACD'19: 15th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Bologne, Italy, 2019.

[2] M. Abdel-Rahman, I. Zeidis, O. Bondarev, B. Adamov, F. Becker, K. Zimmermann, A description of the dynamics of a four-wheel Mecanum mobile system as a basis for a platform concept for special purpose vehicles for disabled persons, in: 58th Ilmenau Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, 2014.

[3] V. Alakshendra, S.S. Chiddarwar, Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties, Nonlinear Dynamics, 87(4) (2017) 2147-2169.

[4] K. Watanabe, Y. Shiraishi, S.G. Tzafestas, J. Tang, T. Fukuda, Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 22(3) (1998) 315-330.

[5] M. Khazaee, M. Sadedel, A. Davarpanah, Behavior-Based Navigation of an Autonomous Hexapod Robot Using a Hybrid Automaton, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 102 (2021) 29.

[6] M. Egerstedt, Behavior based robotics using hybrid automata, in: International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control, Springer, 2000, pp. 103-116.

[7] Y. Li, S. Ge, S. Dai, L. Zhao, X. Yan, Y. Zheng, Y. Shi, Kinematic Modeling of a Combined System of Multiple Mecanum-Wheeled Robots with Velocity Compensation, Sensors, 20(1) (2020) 75.

[8] E. Maulana, M.A. Muslim, V. Hendrayawan, Inverse kinematic implementation of four-wheels mecanum drive mobile robot using stepper motors, in: 2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), IEEE, 2015, pp. 51-56.

[9] H. Taheri, B. Qiao, N. Ghaeminezhad, Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot, International journal of computer applications, 113(3) (2015) 6-9.

[10] Z. Hendzel, Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 22(1) (2017) 81-99.

[11] I. Zeidis, K. Zimmermann, Dynamics of a four-wheeled

mobile robot with Mecanum wheels, Z Angew Math Mech - Journal of Applied Mathematics and Mechanics 99(12) (2019) e201900173.

[12] V.H. Andaluz, C.P. Carvajal, O. Arteaga, J.A. Pérez, F.S. Valencia, L.A. Solís, Unified Dynamic Control of Omnidirectional Robots, in: Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems, Springer, 2017, pp. 673-685.

[13] B.M. Nouri, Modelling and control of mobile robots, ICMSAO/05, American University of Sharjah, UAE, (2005).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ghasemi, M. Sadedel, Behavior-Based Control of Mecanum Four-Wheeled Omnidirectional Robot, Amirkabir J. Mech Eng., 54(2) (2022) 309-332.

DOI: 10.22060/mej.2022.19814.7123