



## طراحی و ساخت یک ربات متحرک خود کار مجهز به لیزرهای رنگی و کنترل مسیر آن براساس بینایی ماشین

سعید خدائی<sup>1</sup>، اکبر اللهوردی زاده<sup>2\*</sup>، بهنام داداشزاده<sup>2</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تیریز، کدپستی 5166616471، allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 اسفند 1395

پذیرش: 01 خرداد 1396

ارائه در سایت: 25 خرداد 1396

کلید واژگان:

ربات متحرک

بینایی ماشین

پردازش تصویر

اجتناب از موانع

### چکیده

این مقاله یک روش جدید براساس بینایی ماشین برای تشخیص موانع و جلوگیری از برخورد ربات متحرک با آن‌ها در محیط‌های هموار ناشناخته ارائه می‌کند. یکی از چالش‌های کنترل مسیر ربات‌های متحرک در محیط‌های ناشناخته این است که سیستم اجتناب از موانع آن طوری طراحی شود که نسبت به جنس و شکل موانع مقاوم باشد. در این پژوهش یک ربات متحرک طراحی و ساخته می‌شود که به یک دوربین مجهز است. همچنین برای انجام پردازش تصویر به منظور تشخیص موانع موجود در محیط و کنترل مسیر حرکت الگوریتمی پیشنهاد شده و روی ربات پیاده سازی می‌شود. سه لیزر رنگی بر روی ربات تعبیه شده است که با زوایای مشخص در طول مسیر حرکت ربات نور می‌تابانند. تصویر دریافتی ربات حاوی نقاط این نورهای رنگی می‌باشند که با انجام پردازش تصویر و تعیین مختصات آن‌ها، موقعیت مانع در صورت وجود تشخیص و دستور تغییر مسیر و اجتناب از موانع به ربات داده می‌شود. این موانع می‌توانند ساکن و یا پویا باشند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانایی تشخیص و جلوگیری از برخورد با موانع با هر نوع شکل و جنس را با قابلیت اطمینان بالا دارا می‌باشد در حالی که سایر روش‌های موجود دارای محدودیت‌هایی در این زمینه می‌باشند.

## Design and fabrication of an autonomous mobile robot equipped with color lasers and its trajectory control based on machine vision

Saeed Khodaei<sup>1</sup>, Akbar Allahverdizadeh<sup>2\*</sup>, Behnam Dadashzadeh<sup>2</sup>

1- Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 03 March 2017

Accepted 22 May 2017

Available Online 15 June 2017

#### Keywords:

Mobile Robot

Machine Vision

Image Processing

Obstacle Avoidance

### ABSTRACT

This paper presents a new method based on machine vision for mobile robots to detect and avoid obstacles in unknown environments. One of the challenges of mobile robots trajectory control in unknown environments is that their obstacle avoidance system should be designed robust to material and the shape of the obstacle. In this research a mobile robot equipped with a camera is designed and fabricated. Also, an algorithm is proposed and implemented on the robot in order to detect obstacles by image processing and to control the robot trajectory. Three color laser pointers are mounted on the robot with certain angles that emit beams to the ground in front of the robot. The received images from camera contain these colored points whose coordinates are determined by image processing. Then the position of any possible obstacle is detected using the proposed algorithm and the robot is commanded to avoid obstacles by changing its path. These obstacles can be static or dynamic. Our experimental results show that the proposed method, with a high reliability, has the ability to detect and avoid obstacles of any shape and material whereas other similar methods were restricted in this regard.

### 1- مقدمه

و ساختارهای مکانیکی مختلفی دارند. نحوه پیکره‌بندی و هندسه قرارگیری چرخ‌ها در این ربات‌ها متفاوت بوده و به دلیل درجه آزادی کمی که بدنه آن‌ها دارد؛ کنترل آن‌ها آسان است. بخش مهمی از کارایی یک ربات برای حرکت و مانورپذیری را مکانیک ربات به عهده دارد. در این مقاله به جای ربات چهار چرخه [1-3] از ربات سه چرخه با سیستم حرکتی تحریک تفاضلی استفاده می‌شود که ساخت آن ساده‌تر و به لحاظ عملکرد و هزینه مالی نیز مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. در پژوهش‌های قبلی از سنسور

ربات‌های متحرک<sup>1</sup> یکی از زمینه‌های تحقیقاتی پرکاربرد در رشته رباتیک می‌باشند که مورد توجه سایر رشته‌های مهندسی همچون برق، مکانیک، کامپیوتر قرار گرفته‌اند. الگوریتم کنترلی این مقاله روی یک ربات متحرک چرخ دار با دو چرخ تحریک تفاضلی و یک چرخ هرزگرد پیاده‌سازی می‌شود. ربات‌های چرخ دار معمولاً در سطوح هموار و یا نیمه هموار استفاده می‌شوند

<sup>1</sup> Mobile robots

Please cite this article using:

S. Khodaei, A. Allahverdizadeh, B. Dadashzadeh, Design and fabrication of an autonomous mobile robot equipped with color lasers and its trajectory control based on machine vision, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 213-220, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

چروبینی و همکاری روشی را بررسی کردند که ناوبری ربات و اجتناب از برخورد با موانع، هر دو بطور همزمان توسط دوربین انجم و خطر برخورد با موانع توسط یک میدان برداری پتانسیل تخمین زده می‌شد. این چهارچوب ممکن بود که با موانع اجتناب‌ناپذیر هم در تعامل باشد و باعث کاهش سرعت حرکت ربات و در نهایت توقف آن شود [13]. در سال 2012 کیم و همکاری روشی بر روی ربات پیاده کردند که نیازمند محاسبات و پردازش‌های سنگین بر روی تصاویر بود. این روش تصویر به‌دست آمده از دوربین را به بلوک‌های کوچک تقسیم کرده و سپس با مقایسه دو عکس متوالی، بلوکی را جستجو می‌کرد که در آن حرکت و تغییری صورت گرفته است. اگر حرکت بین بلوک‌ها خیلی بزرگ بود، آن را به‌عنوان بلوکی در نظر می‌گرفت که اجسام متحرک در آن وجود دارد که این اعمال باعث کند شدن سرعت عکس‌العمل ربات می‌شد [14]. در همان سال، لیو و همکاریانش، در مورد ربات متحرکی که قادر بود در محیط خانگی با استفاده از اطلاعات استخراج شده از بینایی حرکت کند؛ به مطالعه پرداختند و سیستمی مبتنی بر بینایی طراحی نمودند. سیستم متشکل از یک نوع ماشین بود که از یک دوربین تمام جهته<sup>3</sup> به عنوان تنها سنسور برای هدایت خانگی و یک سیستم بینایی استریو<sup>4</sup> جهت شناسایی موانع بهره می‌برد [15]. توسط لیو و همکاران روشی معرفی شد که ربات از طریق استخراج ویژگی‌های محیط از قبیل رنگ و هندسه موانع، قرار بر پیمایش محیط داشت اما چون روش پیشنهادی مبتنی بر احتمالات بود؛ امکان بروز خطا وجود داشت [16].

یکی دیگر از روش‌های هدایت و ناوبری ربات در محیط‌های پویا (دارای موانع) روش میدان پتانسیل است که در آن محیط ربات را یک میدان پتانسیل فرض می‌کنند و ربات به‌وسیله هدف جذب و به‌وسیله موانع دفع می‌شود. در هر موقعیت، ربات مکانی را می‌یابد که نیروی دفع سراسری حداقل را دارد و به آن نقطه حرکت می‌کند. یکی از مشکلات این روش زمانی رخ می‌داد که هدف نزدیک مانع و غیرقابل دسترس بود. به همین منظور روشی مناسب برای ناوبری ربات در محیط دینامیک هنگامی که هدف و موانع هر دو حرکت می‌کردند ارائه شد [17,18].

در دهه اخیر استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم [19] مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها که شامل منطق فازی، شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک هستند سعی در کاهش پیچیدگی محاسبات مسیر، مدل‌سازی موانع و یادگیری دارند. از این رو در مواجهه با محیط‌های پویا که موانع در حال حرکت هستند و ربات باید بدون برخورد با موانع در زمان کوتاه مسیرهای جایگزین پیدا کند، لزوم استفاده از محاسبات نرم احساس می‌شود [20].

در این مقاله، یک روش مبتنی بر بینایی ماشین<sup>5</sup> برای طراحی، ساخت و کنترل مسیر حرکت ربات ارائه می‌شود که تا حد امکان محدودیت‌ها، مشکلات موجود و محاسبات پیچیده در روش‌های ذکر شده را نداشته و نتایج قابل قبولی داشته باشد. نوآوری روش حاضر در این است که قابلیت تشخیص موانع ساکن و متحرک با هر شکل، جنس و رنگ را دارد و نسبت به روش‌های پردازش تصویر مبتنی بر استخراج ویژگی به محاسبات به مراتب کمتری نیاز دارد. همچنین نوآوری این روش نسبت به روش مرجع [11] این است که محدود به محیط داخل نیست، به جای تابش یک نور لیزر عمودی از سه نقطه لیزر تابیده شده به زمین در فاصله معلوم از ربات استفاده می‌کند که به توان کمتری نیاز داشته، قابلیت اطمینان بیشتری دارد و نیز اغتشاش کمتری

اولتراسونیک برای اجتناب از برخورد با موانع متحرک [1]، سنسور سرعت، قطب نما و Gps برای مکانیابی ربات [2,3]، از دوربین وایرلس<sup>1</sup> برای دریافت تصاویر و انجام پردازش بر روی آن‌ها به‌صورت آنلاین [4] و سنسورهای صوتی سونار<sup>2</sup> برای تشخیص موانع [5] به‌کار برده شده است. در این پژوهش سنسور استفاده شده بر روی ربات یک دوربین وبکم می‌باشد که پس از دریافت تصویر توسط آن، عمل پردازش تصویر و تولید دستور اجتناب از موانع توسط میکروکنترلر با استفاده از فیدبک همین سنسور انجام می‌گیرد که این مورد می‌تواند یکی از مزایای ربات مورد نظر محسوب شود.

روش‌های فاصله‌یابی فعال برای تشخیص موانع شامل سنسورهای اولتراسونیک، لیزر و دوربین می‌باشند. سنسورهای اولتراسونیک دارای محدودیت در دقت و قابلیت اطمینان برای کشف اشیاء سه بعدی و پیچیده هستند. حسگرهای لیزر مبتنی بر اختلاف فاز علی‌رغم دقت بالا دارای محدودیت در دامنه اندازه‌گیری می‌باشند. یک روش دیگر تعیین فاصله با استفاده از لیزر، تشکیل مثلث با استفاده از پرتوهای تابیده شده و بازتابی و استفاده از تشابه مثلث‌ها می‌باشد [6]. ابزار عمده تعیین فاصله با استفاده از بینایی نیز دوربین استریو می‌باشد که نیازمند انجام پردازش تصویر با حجم محاسبات بالا است.

لوریگو و همکاران یک سیستم مبتنی بر بینایی برای اجتناب از موانع معرفی کرده اند. این سیستم متشکل از سه ماژول بینایی جهت تشخیص مانع است که از نظر محاسباتی ساده بوده و معیارهای مختلفی برای تشخیص اشیاء دارد [7]. لی و همکاران در سال 2001، الگوریتمی معرفی کردند که شامل مرحله تشخیص مانع و مرحله تولید مسیر می‌شد که به‌صورت دو مرحله‌ای ربات را کنترل می‌کند. مرحله اول شامل کنترل زاویه‌ای (حرکت چرخشی) ربات و مرحله دوم شامل کنترل خطی (حرکت انتقالی) ربات می‌باشد. به این صورت که ربات در یک خط مستقیم حرکت می‌کرد و با شناسایی مانع کنترل خطی متوقف و کنترل زاویه‌ای جایگزین می‌شد [8]. در سال 2003، لنسر و ولوسو جهت جلوگیری از برخورد ربات با موانع ناشناخته از دوربین تعبیه شده بر روی ربات متحرک استفاده کردند. این دوربین موانع شناخته شده و ناشناخته را تشخیص داده و برای اشیاء ناشناخته رنگ‌های خصوصی در نظر می‌گرفت. در این روش درجه و زاویه قرار گرفتن اشیاء محاسبه شده و برای ایجاد یک مدل شعاعی در نزدیکی ربات از آن مقادیر استفاده شده است. این قسمت از مدل‌سازی، مسیرهای حرکتی ربات را از اشیائی که در محدوده دید ربات نبودند؛ عاری نگه داشته و به ربات اجازه دوری از آن‌ها را می‌داد [9]. بگوم و همکاران رباتی را مورد بررسی قرار دادند که تنها قادر به دنبال کردن مخروط‌های رنگی نشانه‌گذاری شده در محیط، بدون در نظر گرفتن موانع موجود در مسیر بود که منجر می‌شد ربات در محیط‌های دارای موانع با مشکل مواجه شود [10]. سوماره و همکاران [11] برای تشخیص آنلاین موانع در محیط بیرون با استفاده از بینایی روشی ارائه کرده‌اند که در آن از اسکن کردن یک نور عمودی نور لیزر تابیده شده به محیط از طریق یک دوربین جفت شده با آن استفاده شده است.

بونییامین و همکاران در سال 2011، الگوریتم نقطه باگ را مطرح کردند که قادر به تشخیص نزدیک‌ترین موانع بوده و از حاشیه آن‌ها جهت رسیدن به نقطه هدف استفاده می‌کرد. اما نکته مهم این‌جا بود که اگر حاشیه و لبه‌های اجسام قابل مشاهده نبودند؛ ربات چه عکس‌العملی باید از خود نشان می‌داد، لذا محدوده کاری ربات باید تحت شرایط خاصی می‌بود [12]. در همان سال،

<sup>3</sup> Omnidirectional<sup>4</sup> Stereo<sup>5</sup> Machine vision<sup>1</sup> Wireless<sup>2</sup> Sonar

در محیط ایجاد می‌کند.

## 2- طراحی و ساخت ربات

### 1-1- مدل سازی سینماتیکی ربات

فرض می‌شود که ربات یک جسم صلب باشد که روی چرخ‌ها قرار گرفته و بر روی یک صفحه حرکت می‌کند، وضعیت ربات را می‌توان با دو متغیر  $x$  و  $y$  در صفحه و یک متغیر  $\theta$  برای نشان دادن جهت آن مشخص نمود.

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

برای این کار از دو دستگاه مختصات استفاده می‌شود: یکی دستگاه مختصات مرجع و دیگری دستگاه محلی که بر روی ربات قرار دارد؛ دستگاه مرجع و دستگاه ربات به صورت "شکل 1" نشان داده می‌شوند.

برای بررسی حرکت ربات می‌بایست حرکت برحسب دستگاه مرجع به حرکت در دستگاه مختصات ربات نگاشت شود. برای این کار از ماتریس دوران زیر استفاده می‌شود.

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\xi_R = R(\theta)\xi_I \quad (3)$$

فرض می‌کنیم اختلاف زاویه بین دستگاه مختصات ربات و دستگاه مختصات مرجع برابر با  $\theta$  بوده و مبدا دستگاه مختصات ربات ( $P$ ) در نقطه  $x, y$  نسبت به دستگاه مختصات مرجع قرار داشته باشد. ربات دارای دو چرخ با شعاع  $r$  و به فاصله  $c$  بوده نقطه  $P$  در وسط بین دو چرخ قرار دارد. سرعت زاویه‌ای چرخ‌ها برابر با  $\dot{\phi}_1$  و  $\dot{\phi}_2$  می‌باشد. می‌توان موقعیت ربات در دستگاه مختصات مرجع را با استفاده از موقعیت ربات در دستگاه مختصات محلی و بکار بردن رابطه زیر محاسبه نمود [6].

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1}\dot{\xi}_R \quad (4)$$

سرعت پیشروی نقطه  $P$  ربات در دستگاه مختصات مرجع به صوت میانگین سرعت ناشی از چرخ‌ها نوشته می‌شود.

$$\dot{x}_R = \frac{r(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{2} \quad (5)$$

سرعت زاویه‌ای بدنه ربات نیز که بیانگر آهنگ تغییر جهت ربات می‌باشد از تفاضل سرعت چرخ‌ها ناشی می‌شود.

$$\dot{\theta} = \frac{r(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)}{2} \quad (6)$$

با ترکیب این روابط و جایگذاری آن‌ها در رابطه (4) مدل سینماتیکی مستقیم ربات به صورت رابطه (7) خواهد بود که در آن مولفه سرعت ربات در جهت  $Y_R$  صفر می‌باشد، زیرا ربات در راستای محور طولی  $X_R$  حرکت می‌کند.

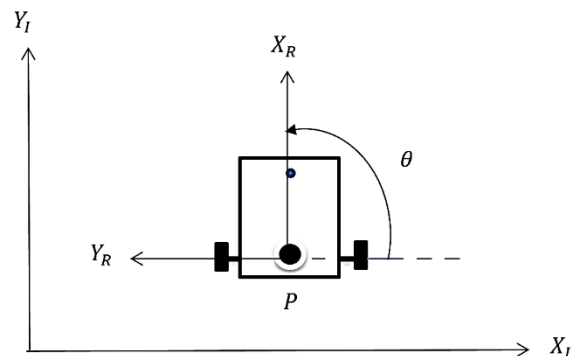


Fig. 1 Inertial and local coordinates of the robot

شکل 1 مختصات مرجع و مختصات محلی ربات

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)}{2} \\ 0 \\ \frac{r(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)}{c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

مدل سینماتیکی معکوس نیز با استفاده از معکوس روابط (5) و (6) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\dot{\phi}_1 = \frac{\dot{x}_R}{r} + \frac{c\dot{\theta}}{2r} \quad (8)$$

$$\dot{\phi}_2 = \frac{\dot{x}_R}{r} - \frac{c\dot{\theta}}{2r} \quad (9)$$

### 2-2- اسکلت و ساختمان ربات

اسکلت و ساختمان ربات یکی از مهمترین فاکتورها در طراحی ربات به حساب می‌آید که کارایی ربات را در برابر شرایط گوناگون مشخص می‌کند. برای حرکت این گونه ربات‌ها سیستم حرکتی دو چرخ، سه چرخ و چهار چرخ بررسی می‌شود که براساس نیاز یکی از این سیستم‌های حرکتی انتخاب می‌شود. در این جا از سیستم حرکتی دو چرخ به همراه یک چرخ هرزگرد برای حفظ تعادل ربات استفاده شده است. ربات از چند طبقه تشکیل می‌شود. طبقه اول شاسی ربات است که چرخ‌ها و مدار الکترونیکی مربوط به راه اندازی ربات بر روی آن سوار می‌شود. طبقه دوم شاسی مربوط به راه اندازی قسمت چرخان ربات (استپر موتور<sup>1</sup>) می‌باشد و طبقه سوم شاسی یا دیسک چرخان است که دوربین و لیزرها بر روی آن تعبیه می‌شوند. لازم به ذکر است که جنس اسکلت ربات از پلکسی با ضخامت 3 میلی‌متر بوده و ابعاد شاسی‌ها به ترتیب 20 در 20 سانتی‌متر، 12 در 12 سانتی‌متر و قطر دیسک چرخان 15 سانتی‌متر می‌باشد. ارتفاع کلی ربات 25 سانتی‌متر است. اسکلت و ساختمان ربات در "شکل 2" نمایش داده شده است.

### 2-3- الکترونیک ربات

اکثر ربات‌ها جهت انجام یک عمل خاص می‌بایست از یک کنترل کننده فرمان بپذیرند؛ بنابراین از یک میکروکنترلر جهت انجام این امر استفاده می‌شود. از دو موتور دی سی با ولتاژ 12 ولت و گشتاور 0.46 kg.cm برای حرکت چرخ‌ها، از یک موتور پله‌ای با درجه چرخش 7.5 درجه و ولتاژ 12 ولت برای چرخاندن دوربین و لیزرهای دیسک چرخان، از دو درایور L298 برای راه اندازی موتورهای دی سی و موتور پله‌ای، از دو رگولاتور 7850 برای تثبیت کردن ولتاژ 5 ولت، از دیودهای هرزگرد برای جلوگیری از عبور جریان از سمت موتورها به داخل مدار، از مقاوت‌ها به عنوان مقسم ولتاژ، از صفحه نمایشگر 2 در 16 برای نمایش سرعت و جهت حرکت استفاده شده است. "شکل 2" نحوه قرارگیری این قطعات بر روی شاسی ربات را نمایش می‌دهد.

### 2-4- نرم افزارهای کاری

نرم افزار پروتئوس یک نرم افزار الکترونیکی قدرتمند در زمینه شبیه سازی، پیاده سازی، طراحی و آنالیز مدارهای الکترونیکی می‌باشد که برای طراحی مدار و آنالیز آن و ساخت مدار چاپی از این نرم افزار استفاده شده است. همچنین نرم افزار کدویژن یکی از نرم افزارهای مورد استفاده در زمینه برنامه نویسی میکروکنترلرها بوده و زبان برنامه نویسی مورد استفاده در آن C می‌باشد. نرم افزار اوپن سی<sup>2</sup> (بینایی ماشینی متن باز) یک کتابخانه متن باز شامل بیش از 500 الگوریتم بهینه سازی شده برای تحلیل تصویر و ویدئو

<sup>1</sup> Stepper motor

<sup>2</sup> OpenCV

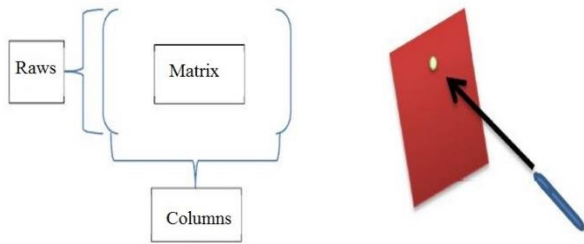


Fig.3 Laser light point on image

شکل 3 نقطه نور لیزر بر روی تصویر

نکته مهم این است که اگر مانعی در مقابل تابش نور لیزر قرار گیرد، نقطه حاصل از نور آن بر روی تصویر، دیگر پیکسل قبلی را نخواهد داشت و جابه جا خواهد شد. به همین منظور نحوه قرار گیری لیزر و دوربین بر روی ربات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دوربین و لیزر هیچوقت نباید به موازات هم قرار بگیرند، به دلیل این که اگر مانعی در مقابل لیزر قرار گیرد، نقطه حاصل از نور لیزر مطابق "شکل 4" همان پیکسل قبلی خود را حفظ می‌کند. در این صورت ربات قادر به شناسایی مانع نبوده و برخورد صورت خواهد گرفت.

حال اگر دوربین و لیزر دارای یک زاویه مناسب نسبت به یکدیگر باشند، در صورت قرار گرفتن مانع در مقابل ربات، نقطه حاصل از نور لیزر، پیکسل قبلی خود را از دست داده و یک مقدار جدید خواهد داشت و این بدین معنی است که ربات با مانع مواجه شده و باید بتواند عکس‌العمل مناسبی در قبال آن داشته باشد که در "شکل 5" نشان داده شده است.

به منظور عکس‌العمل مناسب در مواجهه با مانع، از سه عدد لیزر استفاده می‌شود که به فاصله یکسان از یکدیگر در سمت چپ، وسط و سمت راست ربات نصب می‌شوند. به محض تغییر پیکسل نقطه‌ی نور هر کدام از لیزرها در تصویر، ربات می‌بایست واکنش بخصوصی داشته باشد. اگر لیزر سمت چپ تغییر پیکسل داشته باشد، ربات به سمت راست می‌چرخد تا مختصات

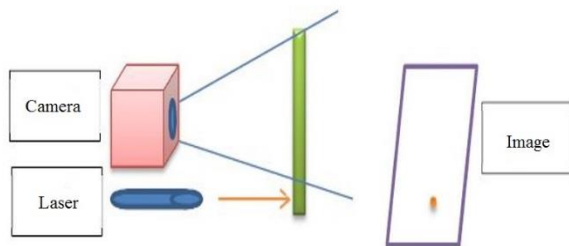


Fig. 4 Parallel arrangement of cameras and lasers and viewing the laser pixel in the image

شکل 4 قرار گیری دوربین و لیزر بصورت موازی و مشاهده پیکسل مربوط به لیزر در تصویر

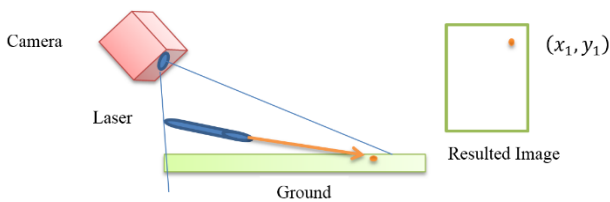


Fig. 5 Arrangement of camera and laser with an angle and viewing the laser pixel in the image (without obstacle)

شکل 5 قرار گیری دوربین و لیزر بصورت زاویه دار و مشاهده پیکسل مربوط به لیزر در تصویر (بدون حضور مانع)

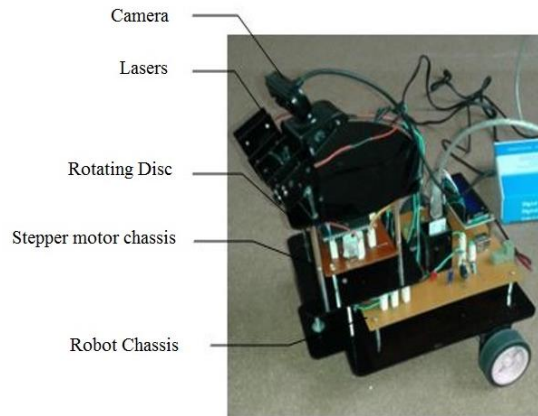


Fig. 2 Architecture of the fabricated mobile robot

شکل 2 اسکلت و ساختمان ربات متحرک ساخته شده

است. برای اجرای برنامه‌های اوپن سی وی نیاز به یک محیط توسعه مناسب می‌باشد که در این جا از پلتفرم مشهور میکروسافت، ویژوال استودیو استفاده شده است. زبان برنامه نویسی در این نرم افزار ++C است. مدار الکترونیکی طراحی شده و قطعات ذکر شده در قسمت الکترونیک ربات بر روی فیبر مسی نصب گردیده‌اند.

### 3- کنترل مسیر حرکت ربات

#### 3-1- روش پیشنهادی

فرض می‌شود؛ ربات قرار است در یک محیط ساختار نیافته (ناشناخته) و یا نیمه شناخته شده بدون هیچ‌گونه تصادفی کاوش کند. برای این منظور طرحی ارائه شده است که بتواند با استفاده از یک دوربین، سه لیزر و الگوریتم‌های پردازش تصویر در زمینه بینایی ماشین، مسیر را برای ربات هموار سازد. روند کلی حرکت ربات بدین صورت خواهد بود که از نقطه شروع، حرکت را آغاز کرده و قرار است بدون برخورد با موانع، محیط را بپیماید. در رابطه با وجود و حضور موانع هیچ گونه اطلاعاتی در دست نیست و ربات می‌بایست به محض مواجهه با موانع عکس‌العمل مناسب را انجام داده و بدون هیچ برخوردی به مسیر خود ادامه دهد.

در روش ارائه شده از دوربین به‌عنوان سنسور و از سه لیزر نوری جهت تشخیص و اجتناب از موانع استفاده می‌شود. با توجه به خاصیت نقطه‌ای و رنگی بودن نور لیزر به راحتی می‌توان از طریق الگوریتم‌های پردازش تصویر و بینایی ماشین، مرکز، شعاع و رنگ آن را تشخیص داد. در این روش، دوربین و لیزرها با یک زاویه خاصی نسبت به هم بر روی قسمت چرخان ربات که دوران 60 درجه ای حول محور خود داشته، نصب می‌شوند؛ به طوری که نور تابیده شده از لیزرها در محدوده دید دوربین بوده و ربات قادر به تشخیص آن‌ها باشد. به این صورت که نور لیزرها بر روی زمین تابیده شده و دوربین آن‌ها را تشخیص داده و پردازش‌های لازم را انجام می‌دهد. با توجه به این که یک تصویر ماتریسی است که درایه‌های آن پیکسل‌ها بوده و اندازه آن بصورت (سطر × ستون) مشخص می‌شود و همچنین برای مشخص کردن یک پیکسل خاص، کافیسست سطر و ستون آن را تعیین کنیم؛ لذا تصویری که از دوربین به‌دست می‌آید دارای یک اندازه خاص و ثابت می‌باشد. لذا نور لیزرها که به‌صورت نقطه بر روی تصویر مشخص می‌شوند؛ یک پیکسل خاص را به خود اختصاص می‌دهند که همیشه ثابت بوده و در دستگاه‌ها و تصاویر متوالی گرفته شده از دوربین تغییر نخواهند کرد. "شکل 3" بیانگر این موضوع است.

دوران ربات نسبت به دستگاه ثابت مطابق رابطه (7) محاسبه می‌شود. همچنین با انتگرال گیری از سرعت ربات در راستای  $\theta$  در طول زمان مسیر طی شده آن تخمین زده می‌شود. "شکل 7" فلوجارت الگوریتم اجتناب از مانع را نشان می‌دهد.

### 3-2- الگوریتم‌های پردازش تصویر پیاده سازی شده

یکی از الگوریتم‌های پردازش تصویر مورد استفاده در این روش، الگوریتم تشخیص رنگ می‌باشد. پس از دریافت تصویر توسط دوربین، نوبت به پردازش رنگ اشیاء موجود در آن می‌رسد. با توجه به این‌که تعداد عکس و فیلم گرفته شده توسط دوربین زیاد بوده و پارامترهای  $R, G$  و  $B$  به شدت تحت تاثیر نور محیط هستند و بازه آن‌ها با تغییر نور یا جابه‌جایی دوربین کاملاً تغییر خواهد کرد؛ لذا از هیستوگرام اچ اس وی<sup>1</sup> برای انجام پردازش رنگ استفاده شده است؛ چرا که پارامترهای  $S, H, V$  پایداری رنگ بیشتری دارند. بنابراین جهت تشخیص بهتر رنگ، تصویر از فضای رنگی<sup>2</sup> به فضای هیستوگرام انتقال داده می‌شود. هیستوگرام اچ اس وی بیانگر اشباع، شدت و مقدار رنگ موردنظر می‌باشد. تصویر هیستوگرام به‌عنوان ورودی دریافت شده و با تعیین کمترین و بیشترین حد آستانه برای هر کدام از پارامترها (اشباع، شدت و مقدار رنگ) رنگ موردنظر تشخیص داده می‌شود.

الگوریتم دیگری که استفاده شده است الگوریتم تشخیص دایره می‌باشد که در آن از تبدیل هاف در برنامه اوپن سی وی بهره گرفته شده است. تبدیل هاف از یک انبارکننده<sup>3</sup> برای شمارش تعداد دفعاتی که یک دایره در تصویر شناسایی شده استفاده می‌کند. این الگوریتم شامل دو مرحله است. روش جستجو در این الگوریتم به‌صورت سطر به سطر در تصویر باینری می‌باشد. در مرحله اول با استفاده از یک انبار کننده دوبعدی موقعیت (مرکز) دایره‌های نامزد تشخیص داده می‌شود. از آن‌جایی که گرادیان نقاط روی محیط دایره باید به سمت شعاع دایره باشند؛ به ازای هر نقطه تنها مقادیر درایه‌هایی از انبارکننده که در جهت گرادیان آن نقطه باشند (براساس حداقل و حداکثر شعاع تعریف شده)؛ افزایش خواهد یافت. زمانی که یک دایره تشخیص داده

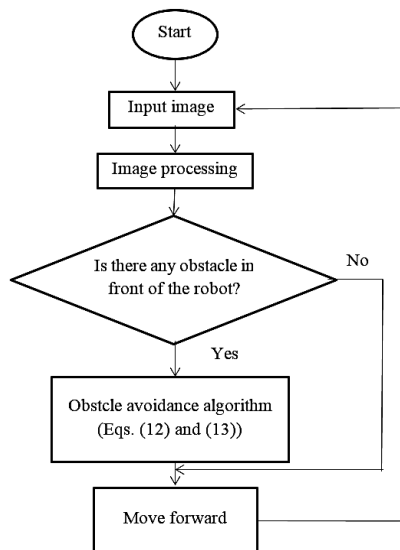


Fig. 7 Flowchart of the proposed obstacle avoidance algorithm

شکل 7 فلوجارت الگوریتم پیشنهاد شده برای اجتناب از موانع

پیکسل به حالت قبل (پیکسل در حالت بدون مانع) برگردد. برای سایر لیزرها هم عکس‌العمل بخصوصی تعریف می‌شود. این مجموعه بر روی صفحه دایروی (دیسک مانند) که بر روی استیر موتور سوار شده و قابل چرخش بوده؛ قرار می‌گیرد. این امر باعث می‌شود تا ربات، اجسامی را که دارای سایز کوچکتری هستند و ممکن است ما بین نور دو لیزر قرار بگیرند، شناسایی کند. زاویه قرارگیری دوربین نسبت به سطح 32 درجه بوده و از تانژانت نسبت ارتفاع ربات (25 cm) به فاصله مستقیم نقطه لیزر تا ربات (40 cm) به‌دست می‌آید.

نکته مهم انتخاب سرعت حرکت ربات و نحوه محاسبه میزان انحراف ربات از مسیر خود می‌باشد. سرعت حرکت ربات وابسته به میزان سرعت دوران موتورهای متصل به چرخ‌ها است. میزان زاویه انحراف ربات را مطابق شکل 6 و با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه می‌کنیم:

$$d = a + b + \frac{c}{2} \quad (10)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{d}{h} \quad (11)$$

در روابط فوق،  $a$  فاصله امتداد مرکز ربات از انتهایی ترین نقطه از مانع می‌باشد که می‌توان از طریق پردازش تصویر بدست آورد؛  $b$  فاصله امنیتی ربات از مانع،  $c$  فاصله عرضی ربات (فاصله بین چرخ‌ها) و فاکتور  $h$  بیانگر فاصله مستقیم ربات تا مانع می‌باشد.

به منظور پیوستگی در حرکت ربات کنترلر دستور می‌دهد سرعت پیشروی آن ثابت باشد و سرعت دوران بدنه ربات طبق رابطه زیر تغییر کند [6].

$$\dot{x}_R = V_0 \quad (12)$$

$$\dot{\theta} = \text{sign}(\alpha) K_\theta \alpha \quad (13)$$

که در آن  $V_0$  سرعت ثابت پیشروی ربات،  $K_\theta$  ضریب تناسبی،  $\theta$  زاویه بدنه ربات و  $\alpha$  زاویه محاسبه شده برای مانع تشخیص داده شده فعلی می‌باشد. در صورتی که لبه کوچکتر مانع در سمت راست ربات باشد  $\text{sign}(\alpha)$  منفی است و در صورتی که در سمت چپ آن باشد مثبت است. با انتخاب مناسب ضریب  $K_\theta$  و فاصله ایمنی  $b$  می‌توان عمل اجتناب از مانع را برای ربات تضمین نمود.

دستورات کنترلی فوق با استفاده از مدل سینماتیک معکوس ربات از روابط (8) و (9) به سرعت ایده‌آل چرخ‌های ربات تبدیل می‌شود و به آن‌ها فرمان داده می‌شود. سپس با داشتن سرعت چرخ‌های ربات سرعت پیشروی و

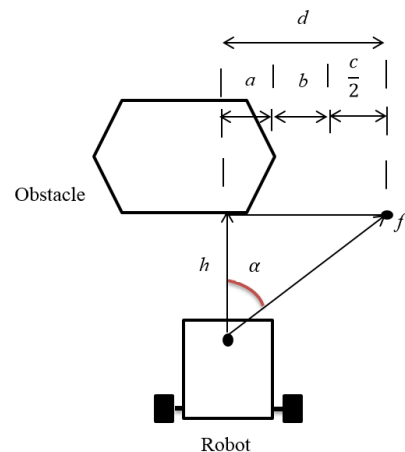


Fig. 6 Parameters of robot path deviation across an obstacle

شکل 6 پارامترهای انحراف مسیر ربات در مقابل یک مانع

<sup>1</sup> HSV

<sup>2</sup> RGB

<sup>3</sup> Accumulator

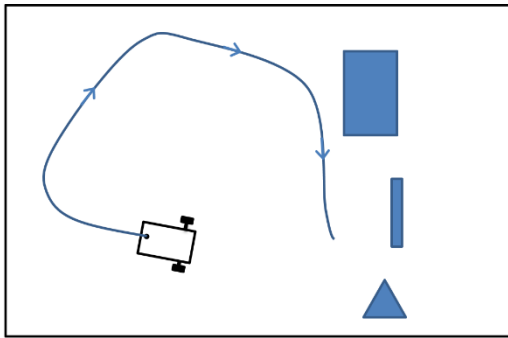


Fig. 10 The path of the robot in the presence of obstacles

شکل 10 مسیر حرکت ربات در حضور مانع

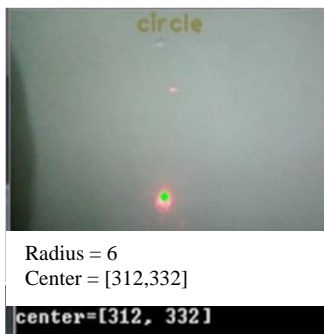


Fig. 11 Recognition of color, coordinates and radius of the laser light without obstacle

شکل 11 تشخیص رنگ، مختصات و شعاع نور لیزر بدون حضور مانع



Fig. 12 Recognition of color, coordinates and radius of the laser light in the presence of obstacle

شکل 12 تشخیص رنگ، مختصات و شعاع نور لیزر در حضور مانع

که مانعی در مقابل آن قرار ندارد؛ دارای شعاع 6 می‌باشد (6 به معنی، 6 پیکسل از تصویر) و مختصات مرکز آن (312, 332) است. اما در حالتی که مانع در مقابل لیزر قرار می‌گیرد؛ شعاع آن برابر با 8 و مختصات مرکز آن (274, 308) می‌باشد. لذا میزان تغییر پیکسل نور لیزر به وضوح قابل مشاهده و محاسبه است. با توجه به رنگ نور لیزرها (قرمز رنگ) و شدت روشنایی آن‌ها، اجسام با هر نوع رنگ و جنسی قابل تشخیص خواهند بود. شاید سوال پیش بیاید که اگر رنگ خود جسم نیز قرمز باشد، ربات چه عکس‌العملی نشان خواهد داد. پاسخ این سوال به اچ اس وی رنگ نور لیزرها برمی‌گردد. یعنی نور لیزر، نوع رنگ (H)، شدت رنگ (S) و مقدار رنگ (V) مخصوص بخود را دارد که توسط کاربر از طریق برنامه پردازش تصویر تعیین خواهد شد. همچنین عدم وابستگی به نوع سطح مانع از دیگر ویژگی‌های این رویکرد

می‌شود در مرحله دوم یک هیستوگرام<sup>1</sup> از شعاع‌های ممکن برای آن دایره ایجاد می‌شود. بیشینه مقدار این هیستوگرام، مشخص کننده شعاع این دایره است.

#### 4- نتایج آزمایش

با توجه به الگوریتم کاری ربات که در قسمت‌های قبل اشاره شد، نحوه تولید مسیر و چگونگی اجتناب از موانع، به صورت آزمایش پیاده‌سازی می‌شود. در این آزمایش ربات متحرک در یک محیط بسته قرار می‌گیرد. مطابق "شکل 8" در مرحله اول، محیط عاری از هرگونه مانعی بوده و در مرحله دوم چندین مانع که محل، جنس و اندازه آن‌ها مشخص نیست؛ در محیط قرار دارد تا عکس‌العمل ربات در مواجهه با آن‌ها مشخص شود که تصاویر فریم به فریم آن در "شکل 9" و مسیر طی شده آن در "شکل 10" نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها ربات ابتدا به دیوار چپ، سپس به دیوار روبه‌رو و بعد به مانع مستطیلی نزدیک می‌شود که در هرکدام از آن‌ها با تشخیص مانع از طریق پردازش تصویر و محاسبه زاویه چرخش مناسب مطابق رابطه (11) دستور تغییر مسیر (13) به ربات داده می‌شود و ربات به سمت انتهای کوچکتر مانع دوران کرده و به حرکت ادامه می‌دهد.

"شکل‌های 11 و 12" نشان دهنده نتایج الگوریتم‌های تشخیص دایره و تشخیص رنگ هستند که برای پردازش نور لیزر پیاده‌سازی شده بودند. همان‌طور که در "شکل‌های 11 و 12" مشاهده می‌شود؛ نور لیزر در حالتی

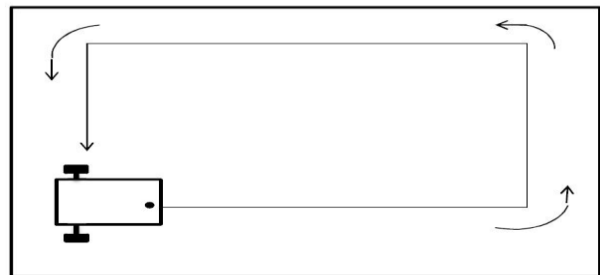


Fig. 8 The path of the robot without obstacles

شکل 8 مسیر حرکت ربات بدون حضور مانع

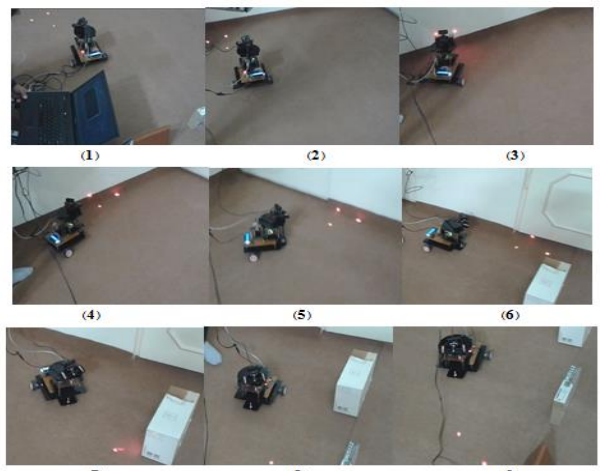


Fig. 9 Frame by frame animation of the robot in presence of obstacles

شکل 9 حرکت فریم به فریم ربات در حضور مانع

<sup>1</sup> histogram

جدول 1 مقایسه رویکرد پیشنهادی با سایر روش‌های انجام شده

مزایا و معایب	سنسور های استفاده شده	مرجع
عدم تشخیص موانع پویا و ساکن	دوربین تمام جهته	[10]
عدم تشخیص اجسام در محیط های مختلف - وابستگی به هندسه اجسام موجود در محیط	دوربین	[12]
انجام محاسبات زیاد و پردازش های زمانبر	دوربین	[14]
توانایی تشخیص خصوصیات رنگ و اطلاعات- هندسی (به دلیل استفاده از توصیف گر تطبیقی)	دوربین تمام جهته و توصیفگر منطقی	[16]
مدل پیشنهادی مبتنی بر احتمالات شرطی بوده و امکان خطا وجود دارد.		
حفظ فاصله ربات با موانع عدم برخورد با موانع ساکن عدم برخورد با موانع پویا	دوربین وبکم	روش پیشنهادی
تشخیص رنگ بهتر و تاثیر اندک روشنایی محیط بر روی آن ( به دلیل شدت نور لیزر) عدم وابستگی به نوع سطح مانع ( سطوحی که بازتاب نور دارند)		
عدم وابستگی به نوع شکل موانع ( مربع، مستطیل، مخروط و غیره)		

تاثیر اندکی بر روی آن دارد. همچنین این روش به نوع سطح (از نظر بازتاب نور) مانع و شکل موانع وابستگی ندارد.

## 6- مراجع

- [1] I. Ohya, A. Kosaka, A. Kak, Vision-based navigation by a mobile robot with obstacle avoidance using single-camera vision and ultrasonic sensing, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 6, pp. 969-978, 1998.
- [2] M. Agrawal, K. Konolige, Real-time localization in outdoor environments using stereo vision and inexpensive gps, *Proceeding of IEEE*, pp. 1063-1068, 2006.
- [3] A. Georgiev, P. K. Allen, Localization methods for a mobile robot in urban environments, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 20, No. 5, pp. 851-864, 2004.
- [4] N. N. Singh, A. Chatterjee, A. Chatterjee, A. Rakshit, A two-layered subgoal based mobile robot navigation algorithm with vision system and IR sensors, *Measurement*, Vol. 44, No. 4, pp. 620-641, 2011.
- [5] S. C. Yun, V. Ganapathy, L. O. Chong, Improved genetic algorithms based optimum path planning for mobile robot, *Proceeding of IEEE*, pp. 1565-1570, 2010.
- [6] R. Siegwart, R. I. Nourbakhsh, D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd edition, pp. 234-258, MIT Press, 2011.
- [7] L. M. Lorigo, R. A. Brooks, W. Grimsou, Visually-guided obstacle avoidance in unstructured environments, *Proceeding of IEEE*, pp. 373-379, 1997.
- [8] T. Lee, H. Lam, F. F. Leung, P. K. S. Tam, A fast path planning-and-tracking control for wheeled mobile robots, *Proceeding of IEEE*, pp. 1736-1741, 2001.
- [9] S. Lenser, M. Veloso, Visual sonar: Fast obstacle avoidance using monocular vision, *Proceeding of IEEE*, pp. 886-891, 2003.
- [10] A. Begum, M. Lee, Y. J. Kim, A simple visual servoing and navigation algorithm for an omnidirectional robot, *Proceeding of IEEE*, pp. 1-5, 2010.
- [11] M. Cinietal, Real-time obstacle avoidance by an autonomous mobile robot using an active vision sensor and a vertically emitted laser slit, *Intelligent Autonomous Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 301-309, 2002.
- [12] N. Bunyamin, W. Wan Ngah, N. Sariff, Z. Mohamad, A simple local path planning algorithm for autonomous mobile robots, *International journal of systems applications, Engineering & Development*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-159, 2011.
- [13] A. Cherubini, F. Chaumette, Visual navigation with obstacle avoidance, *Proceeding of IEEE*, pp. 1593-1598, 2011.
- [14] J. Kim, Y. Do, Moving obstacle avoidance of a mobile robot using a single camera, *Procedia Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 911-916, 2012.
- [15] M. Liu, C. Pradalier, F. Pomerleau, R. Siegwart, The role of homing in visual topological navigation, *Proceeding of IEEE*, pp. 567-572, 2012.
- [16] M. Liu, R. Siegwart, Topological mapping and scene recognition with lightweight color descriptors for an omnidirectional camera, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, No. 2, pp. 310-324, 2014.

می‌باشد که در "شکل 13" نشان داده شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده اگر جسمی در مقابل ربات قرار گیرد که بازتابش نور داشته باشد، به عنوان یک مانع در نظر گرفته می‌شود. زیرا ربات فقط یک نقطه نور را در تصویر تشخیص خواهد داد و اگر این نقطه دو تا شود، قطعاً بیانگر وجود یک مانع خواهد بود.

"شکل 14" نشان می‌دهد ربات در مقابل اجسامی که بازتاب نور دارند نیز قادر به جلوگیری از برخورد به آن‌ها بوده و مسیر خود را هموار خواهد کرد، چرا که تغییر پیکسل در تصویر صورت گرفته است. در جدول 1 به مقایسه رویکرد پیشنهادی با سایر روش‌ها پرداخته شده است.

## 5- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش مبتنی بر بینایی ماشین برای تشخیص موانع و کنترل مسیر حرکت ربات متحرک ارائه شد. ابتدا طراحی و ساخت ربات و مدار الکترونیکی راه‌اندازی آن انجام و سپس الگوریتمی برای حرکت ربات طرح‌ریزی شد که بتواند در محیط، بدون برخورد با موانع، آزادانه حرکت کند. در این روش از یک دوربین وبکم و سه عدد لیزر که بر روی یک دیسک چرخان سوار شده‌اند؛ بهره‌برداری شد. از طریق پردازش تصاویر دریافتی از دوربین که حاوی نور لیزرهای رنگی هستند؛ وجود موانع در مسیر تشخیص داده .  $Center = [70,346]$  کدام از نور لیزرها، پیکسل‌های خاصی از تصویر را به خود اختصاص می‌دهند که با قرار گرفتن یک مانع در مقابل آن‌ها، پیکسل مربوط به هر کدام از لیزرها تغییر پیدا می‌کند. با به‌کارگیری این روش فاصله ربات با موانع حفظ شده و با موانع ساکن و پویا برخورد نمی‌کند. تشخیص رنگ بهتر صورت گرفته و به‌دلیل شدت نور لیزر روشنایی محیط

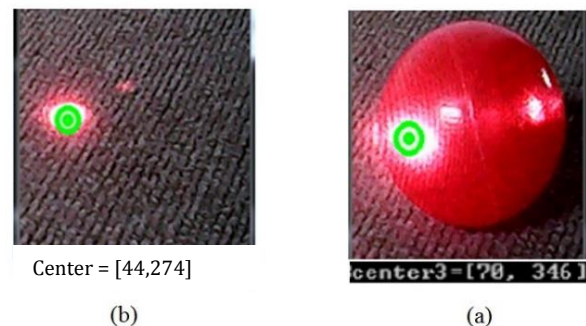


Fig. 13 a- laser light detection on a red obstacle b- laser light detection without the presence of the red obstacle

شکل 13 الف- تشخیص نور لیزر بر روی مانع قرمز رنگ ب- تشخیص نور لیزر بدون حضور مانع قرمز رنگ

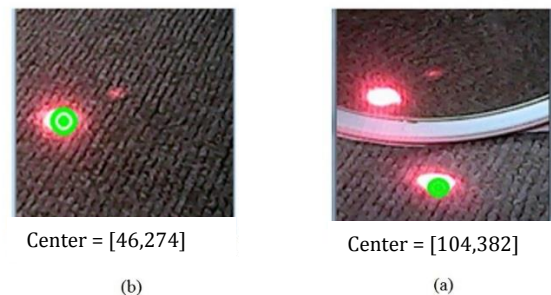


Fig. 14 a- Detection of laser light without the reflective obstacle, b - Detection of laser light on a reflective obstacle (mirror)

شکل 14 الف- تشخیص نور لیزر بر روی جسم بازتاب کننده نور (آینه) ب- تشخیص نور لیزر بدون حضور جسم بازتاب کننده نور (آینه)

- learning for the soccer robot system, *Intelligent Automation & Soft Computing*, Vol. 6, No. 1, pp. 75-87, 2000.
- [20] A. Melingui, R. Merzouki, J. B. Mbede, T. Chettibi, A novel approach to integrate artificial potential field and fuzzy logic into a common framework for robots autonomous navigation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 228, No. 10, pp. 787-801, 2014.
- [17] R. C. Arkin, Integrating behavioral, perceptual, and world knowledge in reactive navigation, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 6, No. 1-2, pp. 105-122, 1990.
- [18] Y. Bin-Qiang, Z. Ming-Fu, W. Yi, Research of path planning method for mobile robot based on artificial potential field, *Proceeding of IEEE*, pp. 3192-3195, 2011.
- [19] D. H. Kim, Y. J. Kim, K. C. Kim, J. H. Kim, P. Vadakkepat, Vector field based path planning and Petri-net based role selection mechanism with Q-