

((یادداشت مهندسی))

## مدل سازی و کنترل یک ربات ردیاب هدف مجهز به بینایی با قابلیت کنترل فعال نیرو

محمدحسین سنگدانی<sup>۱</sup> و علیرضا توکل پور صالح<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

دانشگاه صنعتی شیراز

(تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۷)

### چکیده

این مقاله به مدل سازی، شبیه سازی و کنترل یک ربات ردیاب هدف مجهز به بینایی ماشین با قابلیت کنترل فعال نیرو اختصاص دارد. ابتدا سینماتیک مستقیم و معکوس ربات ردیاب هدف بررسی شده و سپس معادلات دینامیکی حاکم با استفاده از روش اولر- لاگرانژ استخراج می گردند. در ادامه مدل ریاضی ربات شبیه سازی شده است و عملکرد سه روش کنترلی مختلف شامل کنترل تناسبی- انتگرالی- مشتقی، کنترل گشتاور محاسبه شده و کنترل فعال نیرو در کنترل ربات بررسی می گردد. با فرض حرکت هدف بر روی مسیر دایره ای از دید دوربین، مسیر دایره ای شکل به عنوان مسیر مرجع برای ربات ردیاب هدف در نظر گرفته شده است. یکی از چالش های مهم در این ربات ها وجود اغتشاش در شرایط نظامی است. به طور مثال در ربات های مجهز به تیربار، در هنگام شلیک یک اغتشاش متناوب بر ربات وارد شده که عملکرد و دقت سامانه هدف گیری را مختل می نماید. در این تحقیق روش کنترل فعال نیرو به عنوان روشی کارآمد در حذف اغتشاش و افزایش دقت این ربات ها پیشنهاد شده و عملکرد آن در شرایط وجود اغتشاش سینوسی شبیه سازی می گردد. همچنین، عملکرد روش کنترل فعال نیرو در مقایسه با روش های متداول کنترل ربات شامل روش کنترل تناسبی- انتگرالی- مشتقی و روش کنترل گشتاور محاسبه شده بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق بیانگر برتری روش کنترل فعال نیرو نسبت به روش های رایج در کنترل ربات در شرایط پر اغتشاش می باشد.

**واژه های کلیدی:** ربات ردیاب هدف، کنترل فعال نیرو، بینایی ماشین

## Modeling and Control of a Vision-Based Target Tracker Robot with Active Force Control Capability

M.H. Sangdani and A.R. Tavakolpour-Saleh

Department of Mechanical and Aerospace Engineering

Shiraz University of Technology

(Received: June 1, 2015; Accepted: April 26, 2016)

### ABSTRACT

This paper focuses on modeling, simulation, and control of a vision-based target-tracker robot with active force control (AFC) capability. The direct and inverse kinematics of the target-tracker robot is first investigated and then, dynamic equations governing the robot system are extracted using Euler-Lagrange approach. Afterward, the robot control system is simulated by three controllers namely proportional-integral-derivative control, computed torque control, and active force control. Assuming a circle-like path for the movement of the target in camera coordinates, a circle trajectory is chosen as the reference input to the robot control system. One of the main challenging problems in such robotic systems is the existence of unwanted disturbance in military conditions, which results in deteriorating the performance of the control system. For instance, there is often a cyclic disturbance affecting the machine gun that reduces accuracy of the target tracking control system. In this work, the active force control method as an efficient disturbance rejection technique is proposed to remove the disturbance affecting the robot system and its performance is evaluated under a sinusoidal disturbance. Furthermore, the performance of the AFC method is compared to the rest of the controllers. The obtained results clearly demonstrate the priority of the AFC approach in comparison with PID and computer torque control methods when the robot system is under disturbance.

**Keywords:** Target Tracker Robot, Active Force Control, Machine Vision

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: m.sangdani@sutech.ac.ir

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): tavakolpour@sutech.ac.ir

## فهرست علائم و اختصارات

$b_{\theta}$	میرایی اصطکاکی پایه
$b_a$	میرایی اصطکاکی لوله
$g$	گرانش زمین ( $ms^{-2}$ )
$J_{\theta}$	ممان اینرسی پایه ( $kgm^2$ )
$J_a$	ممان اینرسی لوله ( $kgm^2$ )
$l$	طول لوله (m)
$m$	وزن لوله (kg)
$R$	فاصله محل اتصال لوله به پایه تا محور پایه (m)
علائم یونانی	
$\theta$	زاویه چرخش پایه (rad)
$\alpha$	زاویه چرخش لوله (rad)

## ۱- مقدمه

امروزه باتوجه به پیشرفت علوم و رشد سریع جوامع احتیاج به ربات‌ها برای بیش‌تر شدن سرعت و دقت احساس می‌شود. به همین خاطر ربات‌ها روزبه‌روز پیشرفته‌تر و هوشمندتر می‌شوند. برای این‌که دخالت انسان در کارها کم‌تر شود، ربات می‌بایست قابلیت تشخیص هدف را داشته باشد. یکی از روش‌های تشخیص اهداف استفاده از سامانه‌های بینایی می‌باشد. مزایای فراوان ربات‌هایی که به سامانه بینایی ماشین مجهز هستند موجب شده است تا جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کنند. یکی از کاربردهای این نوع ربات‌ها در خط کنترل کیفیت کارخانه‌ها می‌باشد. از مزایای استفاده از این ربات به جای انسان می‌توان از دقت، سرعت و ساعات طولانی‌تر کار نسبت به انسان نام برد و همچنین استفاده در مکان‌هایی که انسان قادر به کار کردن در آن‌ها نیست. چند نمونه از کاربردهای بینایی رباتیک در صنعت به شرح زیر می‌باشد.

هاسمن و مییر<sup>۱</sup> [۱] در فرایند تولید حلقه‌های فلزی که در دمای بسیار بالا انجام شده و انسان قادر به اندازه‌گیری شعاع حلقه‌ها نمی‌باشد، از پردازش تصویر و بینایی ماشین استفاده نمودند. کاربرد دیگر بینایی رباتیک در بررسی سلامت پل‌ها می‌باشد. برای این‌که از سالم و مستحکم بودن پل‌های ساخته‌شده اطمینان حاصل شود، باید پل‌ها را مورد بازرسی قرار داد تا ترک‌ها، پیدا و ترمیم شوند. معمولاً این کار به صورت دستی و توسط کارگرها با چشم غیرمسلح انجام می‌گیرد. به این‌صورت که تعداد ترک‌ها، اندازه و عمق آن‌ها اندازه‌گیری

شده و از آن‌ها عکس گرفته می‌شود که درست انجام‌شدن این کار به تجربه و دقت کارگرها بستگی دارد. همچنین پیدا کردن ترک‌ها به این‌صورت بسیار کند بوده و نتایج غیرقطعی هستند. اوه<sup>۲</sup> و همکاران [۲] رباتی را ارائه کردند که با استفاده از بینایی ماشین پل را بررسی کرده و نتیجه را اعلام می‌کند و در نتیجه دقت کار بیش‌تر می‌شود. یو<sup>۳</sup> و همکاران [۳] ربات مشابهی را برای بررسی سلامت یک تونل بتنی طراحی و ساخته‌اند. ربات‌های ردیاب هدف در زمینه‌های مختلف انرژی نیز به کار گرفته می‌شوند تا راندمان سامانه‌های انرژی را افزایش دهند. ابو-مالوه<sup>۴</sup> و همکاران [۴] یک اجاق خورشیدی ساخته‌اند که در آن از ربات ردیاب هدف به منظور افزایش بازده استفاده شده است. پاندی و آگراوال<sup>۵</sup> [۵] نیز یک سامانه خودکار ردیاب خورشید ارائه نمودند که به‌طور خودکار مسیر حرکت خورشید در آسمان در طول روز را دنبال می‌نماید. حامد و ال-مقنی<sup>۶</sup> [۶] با استفاده از کنترلر فازی یک سامانه ردیاب خورشید را کنترل کرده‌اند. امروزه بحث مکانیزه‌شدن کارها اهمیت زیادی پیدا کرده است و ربات‌هایی ساخته شده‌اند که در کارهای مختلف مانند کار در خانه، رستوران، بیمارستان و ... به انسان کمک می‌کنند. به همین خاطر این ربات‌ها باید از سامانه‌های بینایی استفاده کنند. سولیگوچ<sup>۷</sup> و همکاران [۷] یک روش برای دنبال کردن اجسام توسط یک ربات چندکاره ارائه داده‌اند. ربات‌هایی که به‌عنوان مستخدم به کار گرفته می‌شوند دائماً در حال حرکت هستند. این ربات‌ها باید موانع را تشخیص دهند و آن‌ها را پشت سر بگذارند. به همین دلیل، چن<sup>۸</sup> و همکاران [۸] رباتی را طراحی و ساخته‌اند که قادر است یک جسم متحرک را دنبال کند و موانع پیش‌رو را پشت سر بگذارد. از این ربات‌ها می‌توان به‌عنوان کارگر در باغ‌ها نیز استفاده کرد. جی<sup>۹</sup> و همکاران [۹] یک ربات ساخته‌اند که در باغ حرکت می‌کند و سیب‌هایی که رسیده‌اند را براساس رنگ و اندازه تشخیص می‌دهد و آن‌ها را می‌چیند. ربات‌های مجهز به بینایی در فرایند جوشکاری [۱۰] نیز به کار گرفته می‌شوند.

2- Oh

3- Yu

4- Abu-Malouh

5- Pandey and Agrawal

6- Hamed and El-Moghany

7- Suligoj

8- Chen

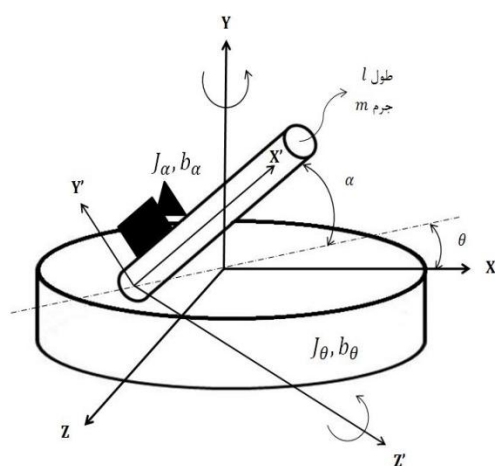
9- Ji

1- Husmann and Meier

## ۲- سینماتیک و دینامیک ربات ردیاب هدف

ربات ردیاب هدف یک ربات دو درجه آزادی است که از دو حرکت چرخشی تشکیل شده است. مطابق شکل ۱ این ربات شامل یک پایه و یک لوله می باشد. پایه حول محور خود و لوله حول نقطه اتصال به پایه می چرخد.

این ربات مجهز به بینایی ماشین است که برای این منظور از یک دوربین استفاده شده است. دوربین روی لوله قرار می گیرد تا همواره راستای لوله و دوربین یکی باشد. محل قرارگیری هدف توسط دوربین در مختصات دید دوربین به دست می آید و به عنوان مرجع در قسمت کنترلر از آن استفاده می شود.



شکل (۱): ساختار کلی ربات ردیاب هدف.

## ۲-۱- سینماتیک ربات

برای دنبال کردن هدف می بایست رابطه بین زاویه چرخش پایه و زاویه چرخش لوله، با مختصات هدف در صفحه دید دوربین را به دست آورد. با توجه به هندسه ربات که در شکل ۲ نشان داده شده است این روابط برای پایه بر طبق معادله (۱) و برای لوله بر طبق معادله (۲) به دست می آیند.

$$x = 2l \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

$$y = 2l \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

برای انتقال متغیرها از فضای کارترین به فضای مفاصل به سینماتیک معکوس ربات مطابق روابط (۸-۳) نیز احتیاج است:

$$\theta = 2 \sin^{-1} \frac{x}{2l} \quad (3)$$

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \frac{y}{2l} \quad (4)$$

روش های کنترل در ربات های ردیاب هدف از اهمیت بسیار برخوردار می باشند. برای کنترل ربات هایی که غیرخطی زیادی دارند می توان از روش گشتاور محاسبه شده استفاده نمود. این روش را می توان برای کنترل تطبیقی [۱۱] و کنترل مقاوم [۱۲] سامانه ها به کار برد. همچنین این روش را می توان با روش فازی [۱۳] نیز ترکیب کرد. روش گشتاور محاسبه شده نسبت به اغتشاشات وارد به سامانه حساس می باشد. یکی از روش های موثر دفع اغتشاشات که در کنترل ربات ها بسیار موثر است، روش کنترل فعال نیرو می باشد. نوشادی و همکاران [۱۴] جهت کنترل نوعی ربات موازی از کنترل فعال نیرو بهره برده اند و در این کار از منطق فازی نیز استفاده کرده اند. توکل پور صالح و مایلا<sup>۱</sup> [۱۵] از روش کنترل فعال نیرو برای کنترل یک ورق انعطاف پذیر استفاده کرده اند. این روش را هم می توان با منطق فازی [۱۶] ترکیب کرد.

باتوجه به این که اغتشاش وارد به ربات های ردیاب هدف باعث بروز خطا در عملکرد ربات ها می شود باید تلاش شود که این اغتشاش تأثیری ناچیز روی سامانه داشته باشد. به طور مثال یکی از سلاح هایی که در جنگ استفاده می شود تیربارها می باشند که تحت تأثیر اغتشاش فراوان در هنگام شلیک می باشند. همچنین به دلیل استرس، ترس و خطای دید سرباز، کنترل دستی این تیربارها دشوار است. یکی از گزینه های افزایش دقت و عملکرد این سلاح استفاده از ربات های ردیاب هدف می باشد تا هم دقت بالاتر رود و هم تلفات انسانی کم تر شود. در این تیربارها بحث اغتشاش موضوع مهمی است زیرا بعد از هر شلیک یک نیرو به تیربار وارد شده و باعث می شود تیربار به خوبی کار نکند. برای این منظور باید از کنترلر هایی استفاده کرد که علاوه بر تعقیب هدف بتوانند اغتشاش را نیز حذف کنند. در این مقاله برای حذف اغتشاشات روی ربات ردیاب هدف از روش کنترل فعال نیرو<sup>۲</sup> استفاده شده است و برای نشان دادن این موضوع نتایج با کنترلر های تناسبی-انترگالی-مشتقی<sup>۳</sup> و روش گشتاور محاسبه<sup>۴</sup> شده مقایسه شده است و نشان داده می شود که این روش علاوه بر کنترل ربات توانایی بسیار بالایی در حذف اغتشاشات دارد.

1- Mailah

2- Active Force Control

3- PID

4- Computed Torque Control

$$E_p = \int gr \sin \alpha \, dm = \rho g \sin \alpha \int_0^l r \, dr$$

$$= \rho g \sin \alpha \frac{r^2}{2} \Big|_0^l \quad (11)$$

$$= \rho g \sin \alpha \frac{l^2}{2}$$

$$= mg \frac{l}{2} \sin \alpha$$

$$E_K = E_{K,Base} + E_{K,Barrel} \quad (12)$$

$$E_{K,Base} = \frac{1}{2} J_\theta \dot{\theta}^2 \quad (13)$$

$$E_{K,Barrel} = \frac{1}{2} \int v^2 \, dm$$

$$= \frac{1}{2} \int [(-R + r \cos \alpha)^2 \dot{\theta}^2 + r^2 \dot{\alpha}^2] \, dm$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^l [(R^2 - 2rR \cos \alpha + r^2 \cos^2 \alpha) \dot{\theta}^2 + r^2 \dot{\alpha}^2] \rho \, dr$$

$$= \frac{1}{2} \left[ mR^2 - mlR \cos \alpha + \frac{1}{3} ml^2 \cos^2 \alpha \right] \dot{\theta}^2 \quad (14)$$

$$+ \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{3} ml^2 \right] \dot{\alpha}^2$$

$$E_K = \frac{1}{2} J_\theta \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} mR^2 \dot{\theta}^2 - \frac{1}{2} mlR \dot{\theta}^2 \cos \alpha \quad (15)$$

$$+ \frac{1}{2} J_\alpha \dot{\alpha}^2 \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} J_\alpha \dot{\alpha}^2$$

با جایگذاری روابط (۱۱ و ۱۵) در رابطه (۹)، رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$L = E_K - E_p$$

$$= \frac{1}{2} J_\theta \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} mR^2 \dot{\theta}^2 - \frac{1}{2} mlR \dot{\theta}^2 \cos \alpha \quad (16)$$

$$+ \frac{1}{2} J_\alpha \dot{\alpha}^2 \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} J_\alpha \dot{\alpha}^2$$

$$- mg \frac{l}{2} \sin \alpha$$

برای به دست آوردن معادلات دینامیکی، روابط (۱۷-۲۲) در رابطه (۱۰) جایگذاری می‌شوند:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}$$

$$= J_\theta \dot{\theta} + mR^2 \dot{\theta} - mlR \dot{\theta} \cos \alpha \quad (18)$$

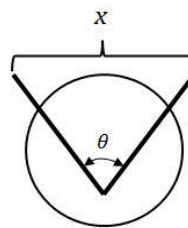
$$+ J_\alpha \dot{\alpha} \cos^2 \alpha$$

$$\dot{\theta} = \frac{2\dot{x}}{\sqrt{4l^2 - x^2}} \quad (5)$$

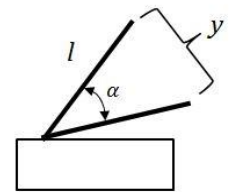
$$\dot{\alpha} = \frac{2\dot{y}}{\sqrt{4l^2 - y^2}} \quad (6)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{2\ddot{x}(4l^2 - x^2) + 2x\dot{x}^2}{(4l^2 - x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{2\ddot{y}(4l^2 - y^2) + 2y\dot{y}^2}{(4l^2 - y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$



(آ)



(ب)

شکل (۲): نمای ربات (آ) از بالا (ب) از پهلو.

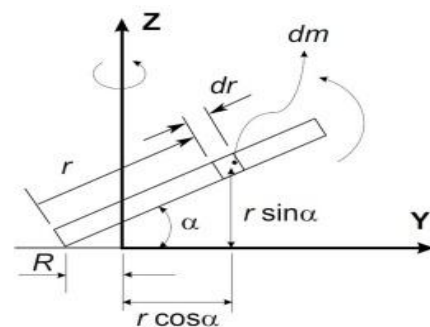
## ۲-۲- دینامیک ربات

برای به دست آوردن دینامیک ربات از روش اولیبر- لاگرانژ استفاده شده است. به این صورت که ابتدا انرژی جنبشی و پتانسیل پایه و لوله به دست آورده شده و سپس با استفاده از روابط (۹ و ۱۰) (روش اولیبر- لاگرانژ) معادلات دینامیکی ربات استخراج می‌گردند.

$$L = E_K - E_p \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \sum T_{\text{external}} \quad (10)$$

انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی پایه و لوله براساس شکل ۳ به صورت روابط (۱۱ و ۱۵) به دست می‌آیند.



شکل (۳): مختصات کلی ربات.

کنترلر است برای اصلاح خطا به سامانه فرستاده می شود. معادله استاندارد این کنترلر به فرم رابطه (۲۵) می باشد:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (25)$$

### ۳-۲- روش کنترل گشتاور محاسبه شده

یک روش کنترل بر پایه مدل است، زیرا از دینامیک ربات در حلقه فیدبک برای خطی سازی و خنثی سازی دینامیک غیرخطی سامانه استفاده می شود. اگر ربات دقیق مدل شده باشد در آن صورت روش گشتاور محاسبه شده می تواند تمامی اتصالات را با استفاده از فیزیک خطی دکوپله کند، در نتیجه رهگیری دقیق مسیر امکان پذیر خواهد بود. روش گشتاور محاسبه شده یک کاربرد خاص از خطی سازی فیدبک سامانه های غیرخطی است که در آن سامانه غیرخطی در طول یک مسیر کنترل می شود. شکل ۴ نمودار بلوکی روش گشتاور محاسبه شده را نشان می دهد.

اگر معادلات دینامیکی یک ربات چندلینکی به فرم ماتریسی مطابق رابطه (۲۶) در نظر گرفته شود:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u \quad (26)$$

باتوجه به روش گشتاور محاسبه شده یک قانون کنترل بازخورد غیرخطی به دست می آید:

$$u = f(q, \dot{q}, t) \quad (27)$$

هنگامی که در معادله (۲۶) جایگذاری شود، یک سامانه حلقه بسته خطی به دست آید. با در نظر گرفتن معادله (۲۶) اگر سیگنال کنترل  $u$  باتوجه به معادله (۲۸) انتخاب شود:

$$u = M(q)a_q + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (28)$$

همچنین، اگر ماتریس اینرسی  $M$  معکوس پذیر باشد، سامانه تشکیل شده از معادله های (۲۸-۲۶) مطابق رابطه (۲۹) کاهش می یابد.

$$\ddot{q} = a_q \quad (29)$$

ترم  $a_q$  یک ورودی جدید را معرفی می کند که باید انتخاب شود. برای این که  $a_q$  بتواند یک سامانه با مرتبه دوم را کنترل کند، یک انتخاب بدیهی این است که به صورت رابطه (۳۰) انتخاب شود:

$$a_q = \ddot{q}^d(t) + K_0\ddot{q} + K_1\dot{\ddot{q}} \quad (30)$$

که در آن:

$$\ddot{q} = \ddot{q}^d - \ddot{q} \quad (31)$$

$$\dot{\ddot{q}} = \dot{\ddot{q}}^d - \dot{\ddot{q}} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) \\ & = (mlR\dot{\alpha} \sin \alpha - 2J_\alpha \dot{\alpha} \cos \alpha \sin \alpha) \dot{\theta} \\ & + (J_\theta + mR^2 - mlR \cos \alpha \\ & + J_\alpha \cos^2 \alpha) \ddot{\theta} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial L}{\partial \alpha} \\ & = \left( \frac{1}{2} mlR \sin \alpha - J_\alpha \cos \alpha \sin \alpha \right) \dot{\theta}^2 \\ & - mg \frac{l}{2} \cos \alpha \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} = J_\alpha \dot{\alpha} \quad (21)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) = J_\alpha \ddot{\alpha} \quad (22)$$

معادلات دینامیکی حاکم بر ربات به صورت روابط (۲۳ و ۲۴) به دست می آیند:

$$\begin{aligned} T_{Base} & = (J_\theta + mR^2 - mlR \cos \alpha + J_\alpha \cos^2 \alpha) \ddot{\theta} \\ & + (mlR\dot{\alpha} \sin \alpha - 2J_\alpha \dot{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha + b_\theta) \dot{\theta} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} T_{Barrel} & = J_\alpha \ddot{\alpha} \\ & - \left( \frac{1}{2} mlR \sin \alpha - J_\alpha \sin \alpha \cos \alpha \right) \dot{\theta}^2 + b_\alpha \dot{\alpha} \\ & + mg \frac{l}{2} \cos \alpha \end{aligned} \quad (24)$$

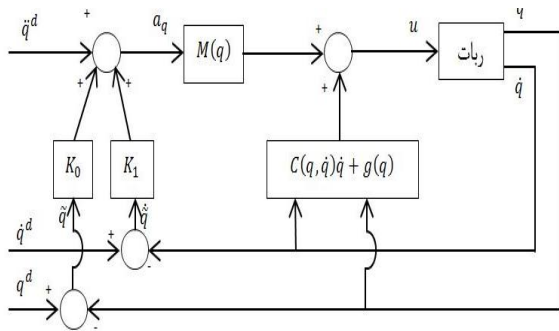
### ۳- کنترل ربات ردیاب هدف

برای کنترل این ربات از ۳ نوع کنترلر به ترتیب زیر استفاده شده و عملکرد هر کدام در ردیابی هدف در شرایط اغتشاش و بدون اغتشاش با هم مقایسه شده اند.

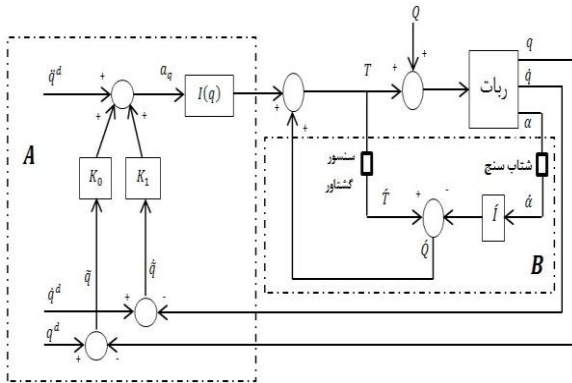
#### ۳-۱- کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی

از رایج ترین نمونه های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور، کنترل فشار، کنترل دما و ... کاربرد دارد. هدف از به کار بردن این الگوریتم در کنترل حلقه بسته، کنترل دقیق و سریع خروجی سامانه تحت شرایط متفاوت و بدون دانستن دقیق رفتار سامانه در پاسخ به ورودی است. این کنترلر از سه قسمت مجزا به نام های تناسبی، انتگرالی و مشتقی تشکیل شده است که هر کدام از آن ها سیگنال خطا را به عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام می دهد و در نهایت خروجی شان با هم جمع می شود. خروجی این مجموعه که همان خروجی

فعال نیرو ( $B$ ) استفاده شده است. در این روش کنترل تلفیقی شتاب و حرکت وظیفه رهگیری هدف و کنترل فعال نیرو وظیفه حذف اغتشاشات و غیرخطی‌های سامانه را به عهده دارد.



شکل (۴): کنترل کننده گشتاور محاسبه شده.



شکل (۵): کنترل فعال نیرو.

#### ۴- بینایی ماشین

از بینایی ماشین در این ربات به منظور تعیین ورودی مرجع برای سامانه کنترل استفاده شده است. ابتدا دوربین مختصات هدف را در صفحه دید خود مشخص کرده و سپس مختصات هدف را نسبت به نقطه مرجع محاسبه می‌کند. سپس مختصات محاسبه شده را به عنوان سیگنال مرجع به سامانه کنترل ارسال می‌نماید. هدف شناسایی شده به صورت یک لکه رنگ بر روی پس زمینه با رنگی ثابت در نظر گرفته می‌شود. لکه رنگ نیز بر اساس الگوریتم تشخیص لکه و پردازش تصویر از پس زمینه جدا می‌شود. شکل ۶ نحوه تشخیص لکه توسط دوربین را نشان می‌دهد. به این صورت که ابتدا مرکز دوربین روی نقطه (۰،۰) مختصات کلی است. سپس مختصات لکه رنگ به دست می‌آید و دوربین به کمک ربات به سمت لکه رنگ حرکت می‌کند تا به لکه برسد و سپس مسیر حرکت هدف را دنبال می‌نماید.

$K_0$  و  $K_1$  هم ماتریس‌های متقارن مثبت معین می‌باشند که رابطه (۳۳) بین آن‌ها برقرار است [۱۷]:

$$K_1 = 2\sqrt{K_0} \quad (33)$$

#### ۳-۳- روش کنترل فعال نیرو

در این روش نشان داده می‌شود که سامانه‌ای که در معرض اغتشاش قرار می‌گیرد می‌تواند پایدار بماند. به بیان دیگر کنترل فعال نیرو یک روش سریع و موثر در حذف اغتشاشات ناخواسته می‌باشد. همچنین، کلیه غیرخطی‌های سامانه نیز به صورت اغتشاش در نظر گرفته شده و از دینامیک ربات حذف می‌شوند. براساس قانون دوم نیوتن برای یک جسم در حال دوران، مجموع همه‌ی گشتاورهایی که به جسم اعمال می‌شود برابر با ضرب ممان اینرسی جسم در شتاب زاویه‌ای جسم در جهت اعمال گشتاور مطابق رابطه (۳۴) می‌باشد.

$$\sum T = I\alpha \quad (34)$$

برای یک سامانه رباتیک رابطه (۳۵) برقرار است:

$$T + Q = I(\theta)\alpha \quad (35)$$

که،  $T$  گشتاور اعمالی به ربات،  $Q$  گشتاورهای اغتشاشی،  $I(\theta)$  ممان اینرسی ربات و  $\alpha$  شتاب زاویه‌ای ربات است. شکل ۵، نمودار بلوکی روش کنترل فعال نیرو را نشان می‌دهد.

این روش کنترل براساس تقریب اغتشاش استوار است. به این منظور از رابطه (۳۶) استفاده می‌شود:

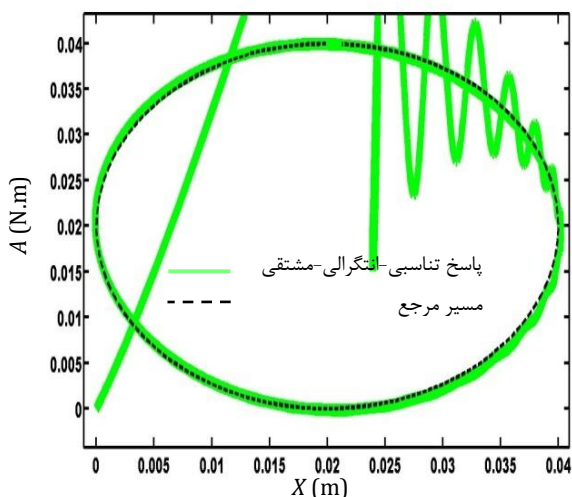
$$\dot{Q} = \dot{I}\dot{\alpha} - \dot{T} \quad (36)$$

که در آن،  $\dot{Q}$  گشتاور اغتشاشی تخمین زده شده و  $\dot{I}$  ممان اینرسی تقریب زده شده ربات است که هرچه بهتر تقریب زده شود کنترلر بهتر عمل می‌کند. برای تقریب زدن ماتریس اینرسی می‌توان از روش‌هایی مانند منطق فازی و یا شبکه‌های عصبی استفاده کرد.  $\dot{\alpha}$  شتاب زاویه‌ای ربات است که توسط شتاب‌سنج به دست می‌آید و  $\dot{T}$  گشتاور اعمال شده به ربات می‌باشد. گشتاور اغتشاشی تخمین زده شده از طریق دینامیک معکوس عملگر با سیگنال ورودی عملگر جمع شده تا اثر اغتشاش حذف شود. سیگنال ورودی خود می‌تواند از یک کنترلر دیگر مثل کنترلر تناسبی- انتگرالی- مشتقی یا کنترل تلفیقی شتاب و حرکت<sup>۱</sup> باشد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود از کنترل تلفیقی شتاب و حرکت ( $A$ ) همراه با کنترل

جدول (۱): پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی

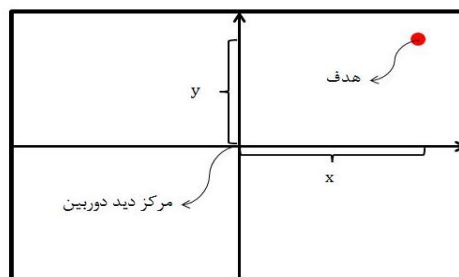
مقدار	پارامتر
۱	جرم پایه (kg)
۰/۲	جرم لوله (kg)
۰/۱	فاصله محل اتصال لوله به پایه (m)
۰/۴	قطر پایه (m)
۰/۲	طول لوله (m)
۰/۱	میرایی اصطکاکی پایه
۰/۱	میرایی اصطکاکی لوله
۱۵۰۰	ضریب تناسبی کنترل تلفیقی شتاب و حرکت
۵۶۲۵۰۰	ضریب مشتقی کنترل تلفیقی شتاب و حرکت

در ابتدا عملکرد کنترلر تناسبی- انتگرالی- مشتقی بررسی شده است. این نوع کنترلر بیشتر برای سامانه های خطی یا سامانه هایی که غیرخطی کمی داشته باشند به کار برده می شود. شکل ۹ نتیجه شبیه سازی برای کنترل تناسبی- انتگرالی- مشتقی را نشان می دهد.



شکل (۹): عملکرد کنترلر تناسبی- انتگرالی مشتقی بدون اعمال اغتشاش.

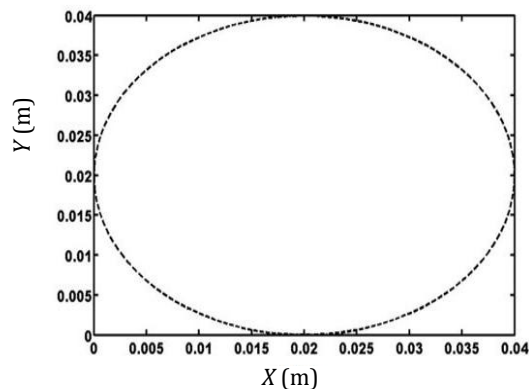
همان طور که در شکل نشان داده شده است، در آغاز کنترلر نمی تواند به خوبی مسیر داده شده را دنبال کند و نوسانات زیادی در پاسخ سامانه دیده می شود. در ادامه عملکرد این کنترلر تحت تاثیر اغتشاش مطالعه شده است. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می شود این کنترلر به اغتشاش بسیار حساس



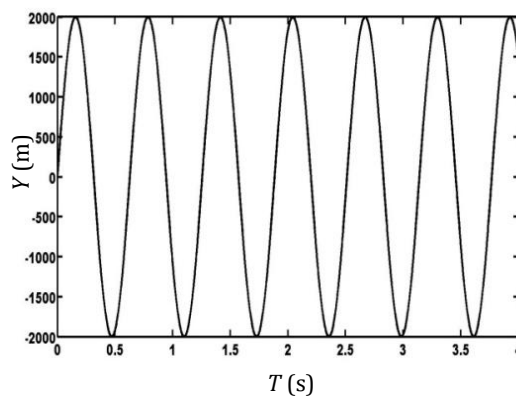
شکل (۶): نحوه تشخیص هدف توسط دوربین.

### ۵- نتایج

ربات ردیاب هدف در محیط سیمولینک در نرم افزار متلب شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه ابعاد، دیگر خواص ربات و پارامترهای کنترلر در جدول ۱ آورده شده اند. در این تحقیق یک مسیر دایره ای مانند شکل ۷ به ربات داده می شود و با استفاده از کنترلرهایی که در بخش ۴ توضیح داده شده اند عملکرد سامانه های کنترل ربات شبیه سازی می شوند. همچنین برای بررسی عملکرد کنترلرها تحت تاثیر اغتشاش یک گشتاور سینوسی مطابق شکل ۸ به ربات اعمال شده است.



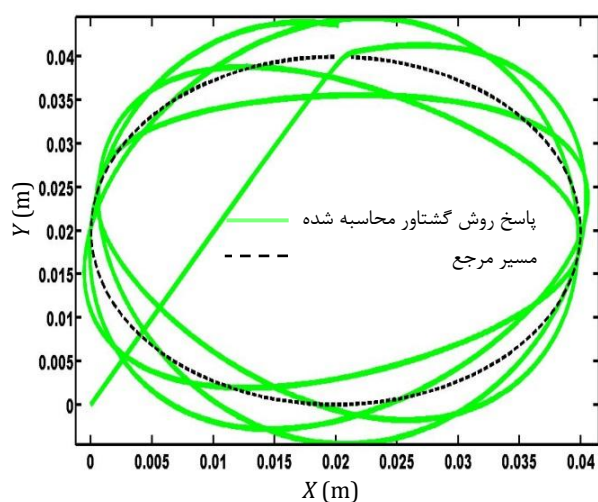
شکل (۷): مسیر مرجع.



شکل (۸): اغتشاش سینوسی  $2000 \times \sin(10 \times t)$ .

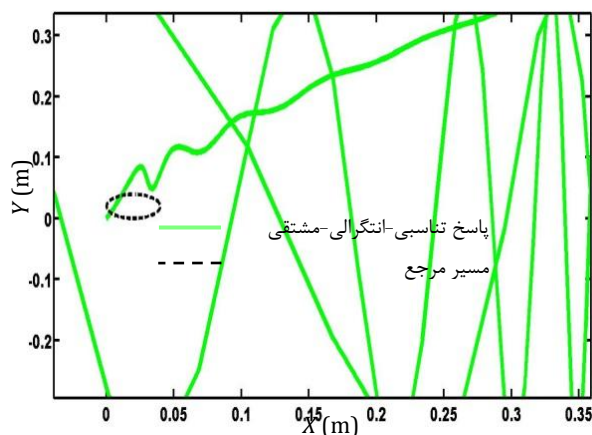
مشاهده می‌شود که ربات خیلی سریع مسیر مرجع را دنبال کرده است. در نتیجه روش گشتاور محاسبه‌شده عملکرد بسیار خوبی در محیط‌های بدون اغتشاش داشته است. ذکر این نکته ضروری است که این روش کنترل بسیار وابسته به اطلاع صحیح از دینامیک ربات بوده و در غیر این صورت عملکرد آن کاهش می‌یابد. در ادامه عملکرد روش گشتاور محاسبه شده تحت اغتشاش بررسی می‌گردد. برای این منظور اغتشاش نشان داده شده در شکل ۸ به ربات اعمال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود ربات قادر به تعقیب دقیق هدف در حضور اغتشاش نمی‌باشد. بنابراین روش گشتاور محاسبه شده نسبت به وجود اغتشاش حساس است و باتوجه به وجود اغتشاش در این ربات در محیط نظامی (در لحظه شلیک و یا در نتیجه باد و ...)، عملاً برای کنترل این ربات مناسب نمی‌باشد.

بنابراین در این تحقیق روش کنترل فعال نیرو به‌عنوان جایگزینی مناسب برای روش گشتاور محاسبه شده پیشنهاد شده است. برای بررسی این موضوع که روش کنترل فعال نیرو توانایی دفع اغتشاش را دارد ابتدا کنترل فعال نیرو را غیرفعال کرده و تنها به کمک کنترل تلفیقی شتاب و حرکت، (شکل ۵) سامانه تحت اغتشاش کنترل می‌شود. سپس کنترل فعال نیرو به سامانه اعمال شده و عملکرد سامانه کنترل تحت اغتشاش بررسی می‌گردد. نتیجه شبیه‌سازی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



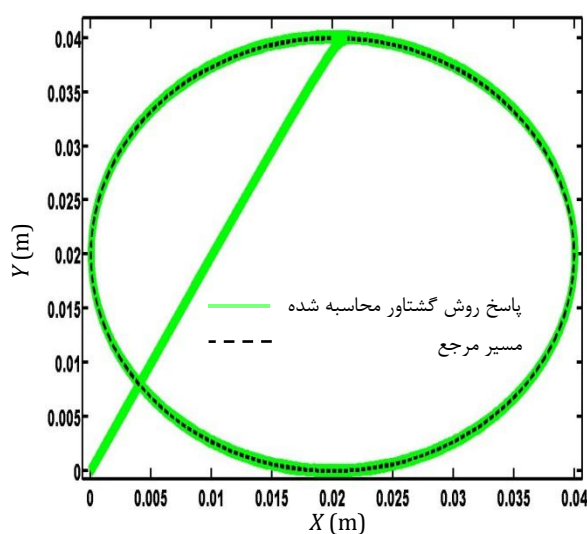
شکل (۱۲): عملکرد کنترلر گشتاور محاسبه‌شده تحت اغتشاش.

می‌باشد و اغتشاش باعث مختل شدن عمل رهگیری هدف می‌گردد. در نتیجه کنترلر تناسبی-انتهگالی-مشتقی برای کنترل این ربات تحت تاثیر اغتشاش اعمالی (شکل ۸) مناسب نمی‌باشد.



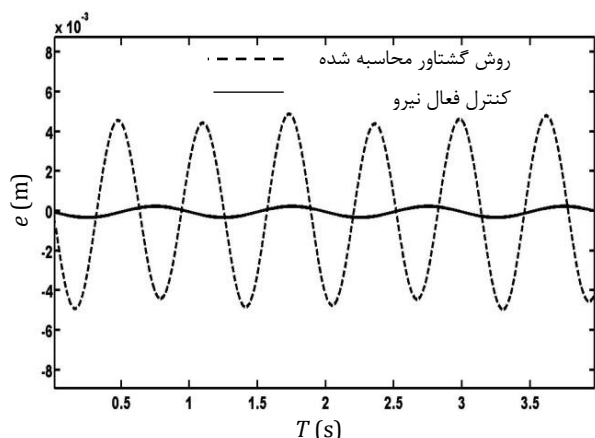
شکل (۱۰): عملکرد کنترلر تناسبی-انتهگالی-مشتقی تحت اغتشاش

کنترلر بعدی که به ربات اعمال می‌گردد کنترلر گشتاور محاسبه‌شده می‌باشد. این کنترلر نسبت به کنترلر تناسبی-انتهگالی-مشتقی برای ربات‌های غیرخطی عملکرد بهتری دارد. شکل ۱۱ عملکرد این کنترلر را در حالت بدون اغتشاش نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): عملکرد کنترلر گشتاور محاسبه‌شده بدون اغتشاش.





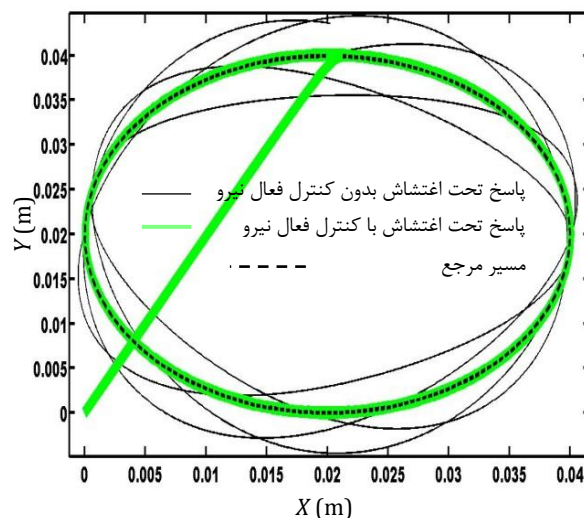
شکل (۱۵): مقایسه خطا در جهت  $Y$  برای کنترلر گشتاور محاسبه شده و کنترلر فعال نیرو.

### ۶- نتیجه گیری

حذف اغتشاشات وارده به ربات های ردیاب هدف در تیربارها و سایر پرتابگرها در صنایع نظامی موضوع بسیار مهمی است. در این مقاله راهکاری مناسب به منظور حذف اغتشاشات ناخواسته بر روی این ربات ها ارائه گردید. این راهکار استفاده از الگوریتم کنترل فعال نیرو به عنوان کنترلر در این ربات می باشد. نتایج شبیه سازی به دست آمده در این تحقیق به روشنی برتری روش کنترل فعال نیرو را نسبت به روش کنترل گشتاور محاسبه شده و کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی در رهگیری هدف در حال حرکت بر روی مسیر دایره ای شکل در شرایط وجود اغتشاش سینوسی بر روی ربات نشان می دهد. همچنین، باتوجه به این که روش کنترل فعال نیرو وابستگی کمتری به اطلاعات در مورد دینامیک سامانه دارد به لحاظ کاربردی سریع تر و به لحاظ محاسباتی ساده تر می باشد که این موضوع از امتیازات مهم روش کنترل فعال نیرو نسبت به روش کنترل گشتاور محاسبه شده است.

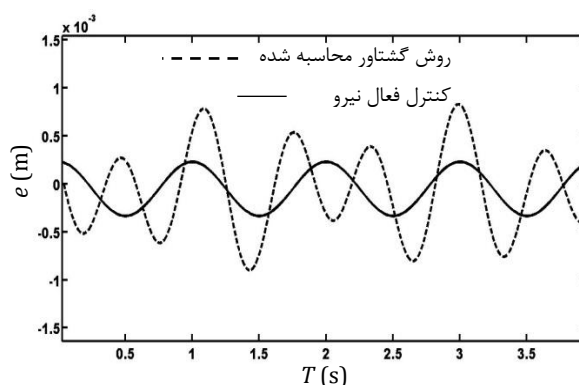
### ۷- منابع

1. Husmann, T. and Meier, H. "Use of Image Processing to Evaluate Radial-Axial Rings", *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 304-309, 2014.
2. Oh, J.-K., Jang, G., oh, S., Lee, J.H., Yi, B.-J., Moon, Y.S., Lee, J.S., and Choi, Y. "Bridge Inspection Robot System With Machine Vision", *Automation in Construction*, Vol. 18, pp. 929-941, 2009.



شکل (۱۳): عملکرد کنترلر فعال نیرو در دفع اغتشاش.

همان طور که در این شکل مشخص است روش کنترل فعال نیرو علاوه بر رهگیری دقیق هدف، به خوبی اغتشاش سینوسی اعمال شده را حذف کرده است. برای مقایسه بهتر نتایج شبیه سازی به دست آمده از روش های گشتاور محاسبه شده و کنترل فعال نیرو، مقدار خطاهای موجود در مختصات کارتیزین مرجع برای هر دو سامانه کنترل تحت تاثیر اغتشاش محاسبه شده اند. شکل ۱۴ میزان خطا در جهت  $X$  و شکل ۱۵ مقدار خطا در جهت  $Y$  را نشان می دهد.



شکل (۱۴): مقایسه خطا در جهت  $X$  برای کنترلر گشتاور محاسبه شده و کنترلر فعال نیرو.

10. Wu, C.S., Liu, D.J., and Wu, L., "An Auto-Programming System of MAG Welding Parameters for Vision-Based Robot", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 13, pp. 291-296, 1994.
11. Middleton, R.H. and Goodwin, G.C. "Adaptive Computed Torque Control for Rigid Link Manipulator", *System & Control Letters*, Vol. 10, pp. 9-16, 1988.
12. Qu, Zh., Dorsey, J.F., Zhang, X., and Dawson, D.M. "Robust Control of Robots by the Computed Torque Law", *System & Control Letters*, Vol. 16, pp. 25-32, 1991.
13. Song, Z., Yi, J., Zhao, D., and Li, X. "A Computed Torque Controller for Uncertain Robotic Manipulator Systems: Fuzzy Approach", *Fuzzy sets and Systems*, Vol. 154, pp. 208-226, 2005.
14. Noshadi, A., Mailah, M., and Zolfagharian, A., "Intelligent Active Force Control of a 3-RRR Parallel Manipulator Incorporating Fuzzy Resolved Acceleration Control", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, pp. 2370-2383, 2012.
15. Tavakolpour-Saleh, A.R. and Mailah, M. "Control of Resonance Phenomenon in Flexible Structures Via Active Support", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, pp. 3451-3465, 2012.
16. Jahanabadi, H., Mailah, M., Md Zain, M.Z., and Hooi, H.M. "Active Force with Fuzzy Logic Control of a Two-Link Arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles", *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 8, pp. 474-484, 2011.
17. Mittal, R.K. and Nagrath, I.J. "Robotics and Control", New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2003.
3. Yu, S.-N., Jang, J.-H., and Han, C.-So. "Auto Inspection System using a Mobile Robot for Detecting Concert Cracks in a Tunnel", *Automation in Construction*, Vol. 16, pp. 255-261, 2007.
4. Abu-Malouh, R., Abdallah, S., and Muslih, I.M. "Design, Construction and Operation of Spherical Solar Cooker with Automatic Sun Tracking System", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 615-620, 2011.
5. Pandey, B. and Agrawal, A. "Automatic Sun Tracking System using PSoC", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 1, pp. 66-70, 2012.
6. Hamed, B.M. and El-Moghany, M.S. "Fuzzy Controller Design using FPGA for Sun Tracking in Solar Array System", *Intelligent System and Applications*, Vol. 1, pp. 46-52, 2012.
7. Suligoj, F., Sekoranja, B., Svaco, M., and Jerbic, B., "Object Tracking with a Multiagent Robot System and a Stereo Vision Camera", *Procedia Engineering*, Vol. 69, pp. 968-973, 2014.
8. Chen, C.-H., Cheng, Ch., Page, D., Koschan, A., and Abidi, M. "A Moving Object Tracked by a Mobile Robot with Real-Time Obstacles Avoidance Capacity", *IEEE International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 3, pp. 1091-1094, 2006.
9. Ji, W., Zhao, D., Cheng, F., Xu, B., Zhang, Y., and Wang, J., "Automatic Recognition Vision System Guided for Apple Harvesting Robot", *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 38, pp. 1186-1195, 2012.