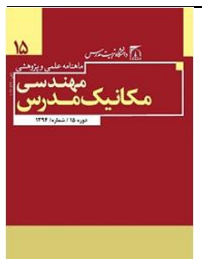
مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دوره 15، شماره 12، ص‌ص 63-74

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



مقایسه بازده عملی کنترلرهای جانمایی‌قطب و مودلغزشی برای کنترل موقعیت ربات موازی کابلی صفحه‌ای با پردازش تصویر

حسن بیانی[1]، مهدی طالع ماسوله[2*]، احمد کلهر[2]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی مکاترونیک، آزمایشگاه تعامل انسان و ربات، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
2- استادیار، آزمایشگاه تعامل انسان و ربات، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
*تهران، صندوق‌پستی 14395-1561، m.t.masouleh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 شهریور 1394
پذیرش: 18 شهریور 1394
ارائه در سایت: 20 آبان 1394

کلید واژگان:
ربات موازی کابلی صفحه‌ای
سینماتیک
کنترل بر مبنای پردازش تصویر
کنترل

چکیده

در این مقاله مدل‌سازی و کنترل ربات موازی کابلی صفحه‌ای براساس بازخورد پردازش تصویر ارائه شده و نوآوری‌های اصلی مقاله در سه زمینه است. نخست روشی براساس استفاده از سینماتیک مکانیزم‌های چهارمیله‌ای برای شبیه‌سازی ربات موازی کابلی صفحه‌ای استفاده شده است. این مدل با توجه به کاهش دادن تعداد مجهولات، زمان محاسبات را بسیار پایین آورده و آن را برای استفاده در کاربردهای برخط مطلوب ساخته است. به عنوان دومین نوآوری، برای گرفتن بازخورد از مکان عملگر نهایی، روش پردازش تصویر با سرعت بالا مورد استفاده واقع شده است، استفاده از پردازش تصویر در مقایسه با سایر روش‌های گرفتن بازخورد مکان بسیار سریع‌تر است و اغتشاشات کمتر بر آن تأثیر می‌گذارند. نحوه پیاده‌سازی فرآیند پردازش تصویر برای ربات موازی کابلی به صورت کامل در مقاله ارائه شده است. نوآوری سوم مقاله نیز به کارگیری دو روش کنترلی کلاسیک و مدرن برای مقایسه و همچنین به‌دست آوردن مناسب‌ترین کنترلر است. کنترلر جانمایی قطب به عنوان یک کنترلر کلاسیک پیاده‌سازی شده است، که نتایج خوبی را ارائه می‌دهد، هرچند در موردی نامعینی‌های سیستم دچار مشکل می‌شود؛ بنابراین به عنوان جایگزین این کنترلر برای تخمین نامعینی‌ها، کنترلر براساس مود لغزشی پیاده‌سازی می‌گردد. این کنترلر هرچند دچار پدیده نوسانات در مبدا می‌شود، اما بازدهی بسیار عالی در پیاده‌سازی و تعقیب مسیر دلخواه دارد. موفقیت این دو کنترلر بیانگر تطبیق مدل پیشنهادی با ربات موازی کابلی بوده و همچنین هرکدام از آن‌ها به عنوان روشی برای کنترل ربات پیشنهاد می‌شوند.

Practical performance comparison of pole placement and sliding mode controller for position control of cable-driven parallel robots using visual servoing

Hassan Bayani, Mehdi Tale Masouleh [*], Ahmad Kalhor

- Human and Robot Interaction Lab., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 14395-1561, Tehran, Iran, m.t.masouleh@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 August 2015
Accepted 07 September 2015
Available Online 11 November 2015

Keywords:
Cable-driven Parallel Robots
Kinematic
Visual servoing
Control

ABSTRACT

This paper presents implementation of position control for planar cable-driven parallel robots using Visual servoing. The main contribution of this paper contains three objectives. First, a method is used toward kinematic modeling of the robot using four-bar linkage kinematic concept, which could be used in online control approaches for real-time purposes due to decreasing of the unknown parameters and computation time. Second, in order to track the position of End-Effector, an online image processing procedure is developed and implemented. Finally, as the third contribution, two different controllers in classic and modern approaches are applied in order to validate the model with plant and obtain the most promising controller. As classic controller, pole placement approach is suggested and results demonstrate weaknesses in modeling the uncertainties although they represent acceptable performance. Due to the latter incapability, sliding mode controller is utilized and experimental tests represent effectiveness of this method. Result of the latter procedure is an inimitable operation on the desired task, however, it suffers from chattering effect. Moreover, results of these controllers confirm accommodation between the model and robot. The whole procedure imposed could be applied for any kind of cable-driven parallel robot.

1- مقدمه

ربات‌های موازی کابلی اخیرا توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند و کاربردهای فراوانی در بسیاری از زمینه‌های صنعتی پیدا کرده‌اند. آن‌ها زیرمجموعه‌ای از ربات‌های موازی حساب می‌شوند با این تفاوت که عملگر نهایی به جای رابط‌های صلب، توسط کابل‌ها نگاه داشته شده است. این تغییر در ساختار توانایی‌های بسیار زیادی را به این نوع ربات داده است که از جمله آن‌ها می‌توان به قابلیت انتقال بارهای سنگین به نسبت وزن کل ربات در مسافت‌های بزرگ [1] و انتقالات سریع در آن فضا اشاره کرد [3,2]. هزینه

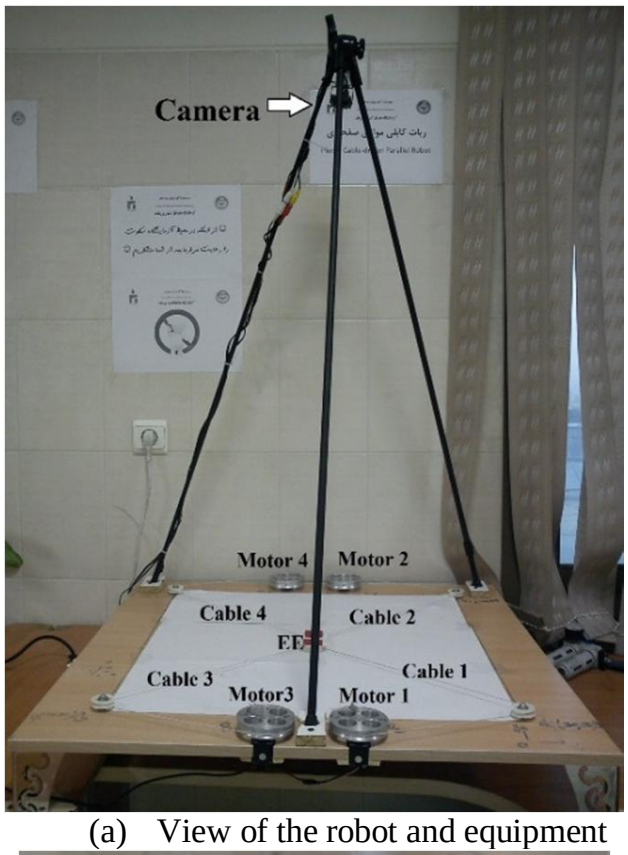
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

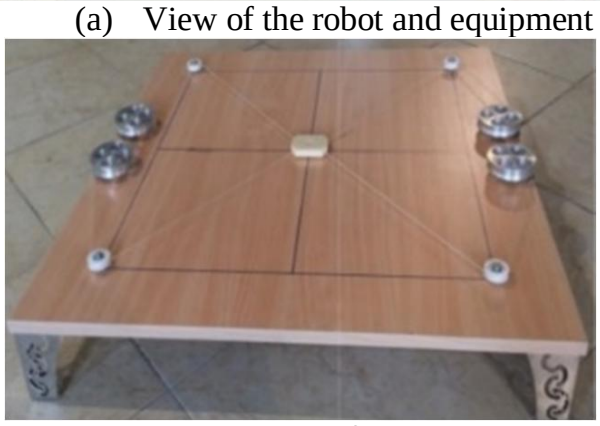
H. Bayani, M. Tale Masouleh, A. Kalhor, Practical performance comparison of pole placement and sliding mode controller for position control of cable-driven parallel robots using visual servoing, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 12, pp. 63-74, 2015 (in Persian)

تولید بسیار پایینی نسبت به ربات‌های با لینک صلب معمول دارند [4]. با وجود تمامی این مزایا، کشیده نگاه داشتن کابل‌ها در هنگام عملکرد، مهم‌ترین چالش و البته نقطه ضعف این ربات‌ها محسوب می‌شود. بدین معنا که کابل‌ها تحمل فشار را ندارند و همواره باید در کشش باشند و در صورتی که بار غیرکشش بر آن‌ها وارد شود، پدیده شکم دادن[1] در کابل رخ خواهد داد و یکی از درجات کنترلی ربات کاسته خواهد شد [5]. این شرایط به عنوان یکی از مهم‌ترین موارد در مسئله مدل‌سازی سینماتیکی و کنترل ربات موازی کابلی است؛ بنابراین مدل‌سازی دقیق و ساده برای این ربات‌ها بسیار حائز اهمیت است [6]. تلاش‌های فراوانی برای مدل‌سازی و کنترل ربات موازی کابلی برای رسیدن به روش‌های کنترل برخط[2] ارائه شده است [8,7]. برای تمامی مدل‌های سینماتیکی، تعادل استاتیکی نیروهای کشش کابل‌ها و بار خارجی باید برقرار باشد؛ بنابراین فضای کاری این ربات براساس معادلات سینماتیک و استاتیک به‌دست می‌آید [9] و به بیان دیگر حل مسئله سینماتیکی ربات‌های موازی کابلی توام با استاتیک آن است که به آن کینتواستاتیک گفته می‌شود. تحقیقات بسیاری در زمینه مدل‌سازی استاتیکی و همچنین تحلیل هندسی برای مثبت باقی ماندن علامت نیروهای کابل‌ها انجام شده است [10-13]. برای نمونه مدل‌سازی یک جرثقیل کابلی براساس بردارهای نیروهای کابل‌ها در [14] مورد مطالعه واقع شده است و از نتایج آن ارائه معادلات دینامیک مربوط به ربات‌های موازی کابلی آویزان است، که در حقیقت زیرمجموعه‌ای از ربات‌های موازی کابلی هستند و در آن‌ها با جاذبه زمین نیروهای کشش کابل‌ها مثبت نگاه داشته می‌شود. طراحی و محاسبه فضای کاری یک ربات موازی کابلی فضایی شش درجه آزادی در [15] منجر به ارائه روش تولید مسیر برای ربات‌های موازی کابلی شده است. از سوی دیگر، شبیه‌سازی و تعقیب مسیر، مسیریابی و ایجاد مسیر در حضور موانع برای ربات موازی کابلی در مقالات بسیاری مورد مطالعه واقع شده‌اند [16-19]، همچنین کاربردهای لامسه‌ای [20] برای ربات موازی کابلی و استفاده از آن برای افزایش توانایی و بازیابی توانایی انسان [21] بیانگر اهمیت بسیار بالای دقت کنترل این ربات‌هاست. با فرض کابل‌های بدون جرم و صلب، که تقریب خوبی برای ربات‌های موازی کابلی است، بسیاری از روش‌های کنترلی معمول می‌تواند برای ربات‌های موازی کابلی نیز مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان کنترلر کلاسیک، یک کنترلر تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر در مقاله [22] که بازدهی مطلوبی را نشان می‌دهد. شبیه به همین مورد یک کنترلر تناسبی مشتق‌گیر تطبیقی برای یک ربات موازی کابلی آویزان در مقاله [23] به همراه نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. بررسی دقیق رفتار ربات با وجود کابل‌های کشسان در مقاله [24] صورت پذیرفته که با استفاده از روش اغتشاش[3] مدل‌سازی بسیار دقیق از رفتار دینامیکی کابل و همچنین کنترل براساس مدل به‌دست آمده ارائه شده است. به عنوان روش‌های کنترل مدرن، کنترل براساس شناسایی با روش فازی عنوان اصلی مقاله [25] است. در تمامی این مقالات تلاش برای دستیابی به معادلات سینماتیکی و دینامیک ربات موازی کابلی است که در عین ساده بودن بتواند به درستی تابع تبدیل مدل ربات را به دست بدهد و همچنین بتوان از آن در کابردهای برخط استفاده کرد.

نوآوری اصلی این مقاله در مقایسه به مقالات مشابه، که از روابط سینماتیک استفاده می‌کند، ارائه مدل سینماتیک ساده‌تر، دارای پارامترهای مجهول کمتر و همچنین قابلیت استفاده برخط است. این روش قابلیت بسط به ربات‌های فضایی را نیز دارد، همچنین یک روش بسیار ساده پردازش تصویر نیز پیاده‌سازی گردیده است و در نهایت دو الگوریتم کنترلی پیشنهاد شده با دقت بسیار خوبی مسیرهای تعریف شده را دنبال کردند. با توجه به آن‌چه آورده شد، ادامه این مقاله بدین شرح خواهد بود که در قسمت دوم، معادلات سینماتیک، استاتیک ربات با صرف نظر از انعطاف‌پذیری کابل‌ها به‌دست آمده است، همچنین، تمامی اجزای ربات موازی کابلی طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران که در شکل 1 قابل ملاحظه است [26]، به‌دست می‌دهد. برخی اطلاعات مربوط به ربات و نحوه فرمان‌پذیری موتورها نیز در جدول 1 آورده شده است.

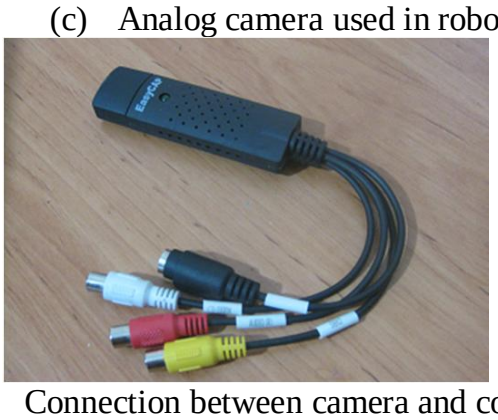


(a) View of the robot and equipment



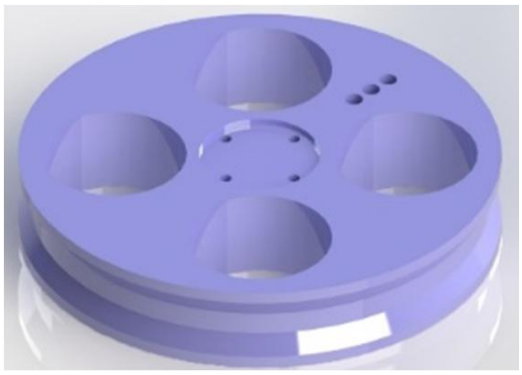
(b) View of the robot

(c) Analog camera used in robot

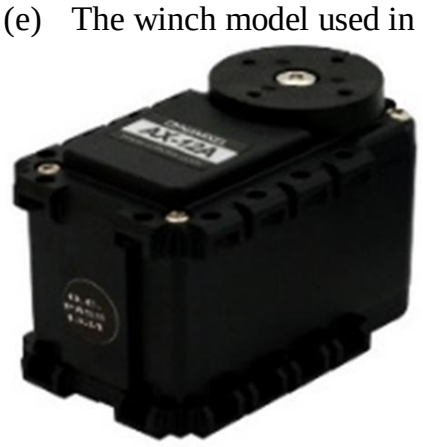


(d) Connection between camera and computer

1- Sag phenomena
2- online
3- Perturbation



(e) The winch model used in robot



(f) Dynamixel AX-12 motor used in robot

Fig. 1 The planar Cable-driven Parallel Robot developed in University of Tehran

شکل 1 ربات موازی کابلی صفحه‌ای ساخته شده به همراه درایو و موتور و دوربین مورد استفاده در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

جدول 1 مشخصات ربات به همراه دوربین، موتورها و نحوه اتصالات

Table 1 Characteristics of the equipment used in the cable-driven parallel robot.

پارامتر	مقدار	واحد
ساختار ربات و ابعاد		
ابعاد صفحه ربات	0.06×0.06	متر
ابعاد عملگر نهایی	0.07×0.05	متر
قطر قرقره	0.08	متر
طول آزاد هر کابل	0.34	متر
مشخصات موتور(موتورDC + درایور)		
گشتاور نهایی موتور	16.5	کیلوگرم سانتی‌متر
دقت	0.35	درجه
سرعت نهایی	80	دور بر دقیقه
اتصال درایور	از طریق رابط یواس‌بی[1] به داینامیکسل[2]	
باد ریت درایور	9600	پالس در دقیقه
ولتاژ و جریان درایور	12 ولت و 3 آمپر	-
پروتکل درایور	دوبایتی TTL	-
مشخصات دوربین و نحوه اتصال		
سرعت تصویربرداری	30	فریم بر ثانیه
عمق مؤثر	3	متر
ابعاد تصویربرداری	480×720	پیکسل
نحوه اتصال به رایانه	از طریق رابط یواس‌بی به پورت آرجی‌بی[3]	

در این ربات اتصال دوربین و موتورهای دارای انکودر از طریق پورت سریال یواس‌بی صورت می‌گیرد. لازم به یاد است که شیوه انجام شبیه‌سازی‌ها با انتقال خروجی نرم‌افزار متلب به پورت سریال یواس‌بی و سپس موتورها و در نهایت تغیر مکان عملگر نهایی ربات است، همچنین موتورهای داینامکیسل دارای درایور داخلی است و کدهای کتابخانه‌ای موتورها در نرم‌افزار متلب اضافه شده و ارتباط با آن‌ها برقرار می‌شود. زمان شبیه‌سازی برای کل مسیر در حدود 200 ثانیه است. بازخورد موتورها از دقت بالایی برخوردار نیستند [27] و بازخورد اصلی از مکان عملگر نهایی با پردازش تصویر است.

الگوریتم پردازش تصویر پیاده‌سازی شده براساس تشخیص رنگ قرمز به‌دست آمده است که در بخش سوم توضیحات بیشتری در مورد آن ارائه خواهد شد. در قسمت چهارم دو الگوریتم اصلی برای کنترل مدل به‌دست‌آمده پیاده‌سازی شده است.

کنترلر جانمایی قطب[4] برای ارزیابی مدل به‌دست آمده و همچنین استفاده از قوانین کنترلی ساده، پیاده‌سازی شده است. این کنترلر عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد، ولی با توجه به آن‌که نمی‌تواند نامعینی[5]های سیستم را مدل کند، کنترلر براساس مود لغزشی[6] پیشنهاد دوم برای طراحی کنترلر است. این کنترلر با دقت بالاتر و همچنین تخمین موارد نامعینی به خوبی مسیر از پیش تعریف شده را تعقیب می‌کند. عملکرد خوب این دو کنترلر بیانگر دقت بالای مدل به‌دست آمده است و همچنین مقایسه آن‌ها بیانگر کارایی بهتر روش مود لغزشی است. در نهایت مقاله با نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات جمع‌بندی می‌شود.

2- مدل‌سازی ربات موازی کابلی صفحه‌ای

در این بخش معادلات مربوط به سینماتیک و استاتیک ربات موازی کابلی صفحه‌ای به‌صورت کلی به‌دست آورده می‌شود. مدل‌سازی سینماتیک با بهره‌گیری از سینماتیک مکانیزم چهارمیله‌ای صورت گرفته و مدل استاتیک بر مبنای تحلیل فضای کاری ربات برای تعادل استاتیکی است.

2-1- معادلات سینماتیک

شکل 2 نمایشگر یک ربات کابلی موازی صفحه‌ای با سه درجه آزادی به‌صورت کلی است. در این شکل θ_i مقدار مطلق زاویه دوران را برای قرقره موتور در ربات تعیین می‌کند، i بیانگر شماره کابل است و پارامتر α_i مقدار زاویه هر کابل با محور x را تعیین می‌کند. r شعاع قرقره است، j_i اینرسی هر قرقره حول محور z است، f_i هم کشش i امین کابل است، τ_i مقدار گشتاور موتور است و m مشخص کننده وزن عملگر نهایی است. در این مدل‌سازی از تأثیر وزن صرف نظر شده است چرا که عملگر نهایی در صفحه موازات زمین حرکت می‌نماید. دستگاه مختصات xy به عملگر نهایی متصل است و سیستم XY روی زمین قرار دارد. طول کابل با مقدار A_i به‌صورت رابطه (1) محاسبه می‌شود [10].

$$A_i = \sqrt{(x - a_{p_{i_x}} - b_{p_{i_x}})^2 + (y - a_{p_{i_y}} - b_{p_{i_y}})^2} = r\theta_i + r_{0_i} \quad (1)$$

در آن r_{0_i} طول کابل را در مکان اولیه عملگر نهایی نشان می‌دهد.

پارامترهای $a_{p_{i_x}}$ و $a_{p_{i_y}}$ به ترتیب اجزای بردار هر کابل در راستاهای x و yهستند. این قید مکان برای طول کابل‌ها به صورت رابطه (2) نگارش می‌شود.

$$a_{p_{i_x}} = R\sin(\varphi_{0_i} + \varphi), a_{p_{i_y}} = R\cos(\varphi_{0_i} + \varphi) \quad (2)$$

که درآن R فاصله اتصال هر کابل به عملگر نهایی تا مرکز آن است، φ_{0_i} زاویه میان خط حاصل از نقطه اتصال و مرکز با محور x هست و φ مقدار

1- Universal Serial Bus port
2- Dynamixel
3- RGB port

4- Pole placement
5- Uncertainty
6- Sliding Mode Control (SMC)

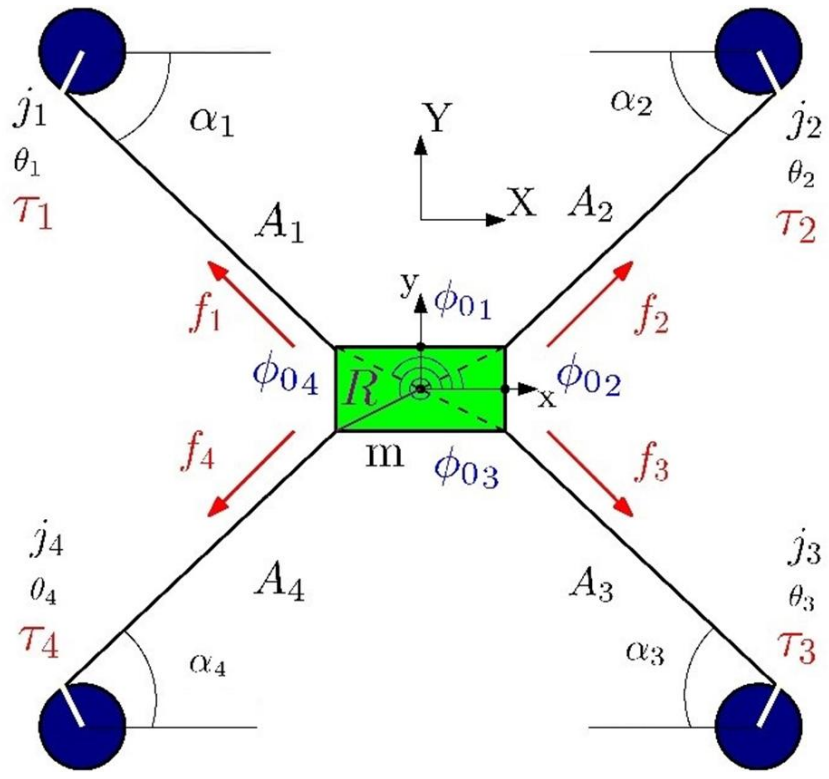


Fig. 2 Schematic view of a planar CDPR with four cables

شکل 2 مدل سینماتیکی از ربات موازی کابلی صفحه‌ای با چهار کابل

چرخش عملگر نهایی است. همچنین با توجه به مشخصات ربات که در قسمت پیشین بیان شد، ثابت‌های b_{p_i} به صورتی که در رابطه (3) می‌آید، هستند.

$$\begin{aligned} b_{p_{1_x}} &= 30, & b_{p_{1_y}} &= -30 \\ b_{p_{2_x}} &= 30, & b_{p_{2_y}} &= 30 \\ b_{p_{3_x}} &= -30, & b_{p_{3_y}} &= 30 \\ b_{p_{4_x}} &= -30, & b_{p_{4_y}} &= -30 \end{aligned} \quad (3)$$

زوایای هر کابل با محور افقی به صورت رابطه (4) تعیین می‌شود[10].

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{x - a_{P_{i_x}} - b_{P_{i_x}}}{y - a_{P_{i_y}} - b_{P_{i_y}}}\right) \quad (4)$$

برای محاسبه مکان عملگر نهایی با استفاده از طول کابل‌ها و معادلات (1) و (4) رابطه (5) به‌دست می‌آید.

$$x = (r\theta_i + r_0)\sin\alpha_i, y = (r\theta_i + r_0)\cos\alpha_i \quad (5)$$

برای به‌دست آوردن ماتریس ژاکوبین[1] باید از روابط (2) و (5) مشتق گرفته شود، که نتیجه را می‌توان به صورت رابطه (6) نوشت[10].

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \frac{(x - a_{p_{1_x}} - b_{p_{1_x}})}{A_1} & \frac{(y - a_{p_{1_y}} - b_{p_{1_y}})}{A_1} \\ \frac{(x - a_{p_{2_x}} - b_{p_{2_x}})}{A_2} & \frac{(y - a_{p_{2_y}} - b_{p_{2_y}})}{A_2} \\ \frac{(x - a_{p_{3_x}} - b_{p_{3_x}})}{A_3} & \frac{(y - a_{p_{3_y}} - b_{p_{3_y}})}{A_3} \\ \frac{(x - a_{p_{4_x}} - b_{p_{4_x}})}{A_4} & \frac{(y - a_{p_{4_y}} - b_{p_{4_y}})}{A_4} \end{bmatrix} \dot{p} \quad (6)$$

که $\dot{\theta}$ بردار $[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4]^T$ است و به عنوان تغییرات فضای مفصلی در نظر گرفته می‌شود. معادله (6) پارامترهای مکان (به جز زاویه دوران) عملگر نهایی را از فضای مفصلی[2] به فضای عملکرد[3] منتقل می‌کند. برای رسیدن به مدل کنترلی نیاز است که ماتریس کنترل به صورت دقیق تعریف شود؛ بنابراین بردار $[x, y, \phi]^T$ براساس ماتریس‌های دیگر تعریف می‌شود که منتج به رابطه (7) می‌گردد.

$$\dot{p} = \frac{1}{AB - C^2}\begin{bmatrix} B\frac{\left(x - a_{p_{1_x}} - b_{p_{1_x}}\right)}{A_1} - C\frac{\left(y - a_{p_{1_y}} - b_{p_{1_y}}\right)}{A_1} & \dots \\ -C\frac{\left(x - a_{p_{1_x}} - b_{p_{1_x}}\right)}{A_1} + A\frac{\left(y - a_{p_{1_y}} - b_{p_{1_y}}\right)}{A_1} & \dots \\ B\frac{\left(x - a_{p_{4_x}} - b_{p_{4_x}}\right)}{A_4} - C\frac{\left(y - a_{p_{4_y}} - b_{p_{4_y}}\right)}{A_4} & \\ -C\frac{\left(x - a_{p_{4_x}} - b_{p_{4_x}}\right)}{A_4} + A\frac{\left(y - a_{p_{4_y}} - b_{p_{4_y}}\right)}{A_4} & \end{bmatrix}\dot{\theta} \quad (7)$$

که در آن رابطه (8) را به صورت زیر خواهیم داشت.

$$A = \sum_{i=1}^{4}\left[\frac{x - a_{p_{i_x}} - b_{p_{i_x}}}{A_i}\right]^2, B = \sum_{i=1}^{4}\left[\frac{y - a_{p_{i_y}} - b_{p_{i_y}}}{A_i}\right]^2,$$
$$C = \sum_{i=1}^{4}\frac{(x - a_{p_{i_x}} - b_{p_{i_x}})(y - a_{p_{i_y}} - b_{p_{i_y}})}{{A_i}^2} \quad (8)$$

در حقیقت، معادله (7) مکان عملگر نهایی را تنها با توجه به مقدار مطلق قرقره‌ها تعیین می‌کند. برای محاسبه زاویه دوران عملگر نهایی با استفاده از همین پارامترها، هر سمت ربات کابلی به صورت یک مکانیزم چهارمیله‌ای در نظر گرفته می‌شود. این ساده‌سازی را می‌توان انجام داد تا زمانی که شرط شل نشدن کابل‌ها برقرار باشد. همچنین باید توجه داشت که حرکت این مکانیزم‌های چهارمیله‌ای مقید به یکدیگر است. شکل 3 حالت کلی یک مکانیزم چهارمیله‌ای را نشان می‌دهد. با درنظر گرفتن حلقه بسته سینماتیکی[4] شکل 3 می‌توان رابطه (9) را به‌دست آورد [28].

$$r_2 + r_3 = r_1 + r_4 \quad (9)$$

اگر معادله (9) با استفاده از اعداد مختلط نگارش شود، می‌توان رابطه (10) را به‌دست آورد.

$$r_2 e^{j\alpha_1} + r_3 e^{j\phi_{12}} = r_1 + r_4 e^{j\alpha_2} \quad (10)$$

که درآن r_1 ، r_2 ، r_3 و r_4 طول هر لینک در مکانیزم چهارمیله‌ای است.

نقاط P و P' متصل به عملگر نهایی هستند و بردار r_m این نقاط را به یکدیگر متصل می‌کند. پارامتر ϕ_{12} برای نگارش زاویه چرخش عملگر نهایی

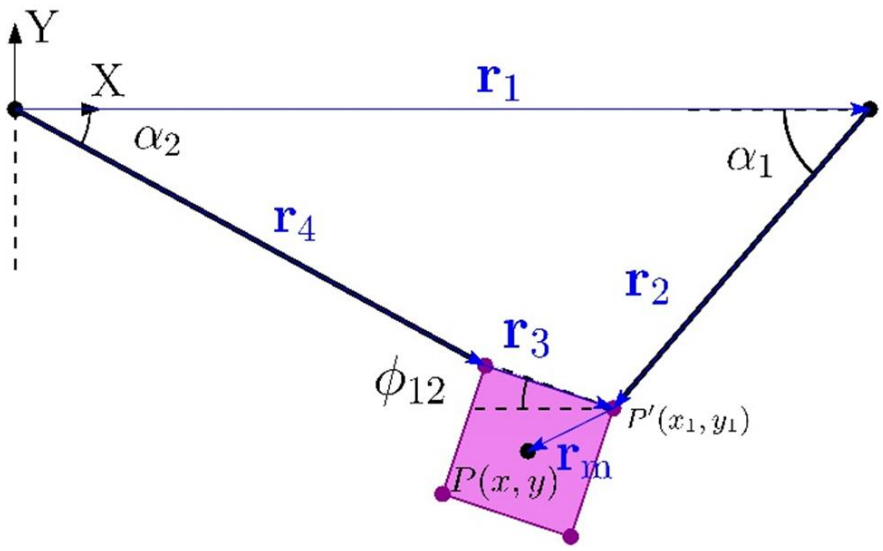


Fig. 3 One side of the CDPR which is assumed as a four-bar linkage

شکل 3 یک سمت از ربات موازی کابلی صفحه‌ای که به صورت مکانیزم چهارمیله‌ای در نظر گرفته شده است

1- Jacobian
2- Joint space
3- Task space
4- Kinematic loop closure

با توجه به طول لینک‌های 1 و 2 (کابل‌ها در ربات موازی کابلی) استفاده شده است. لازم به یاد است که در حالت سینماتیک معکوس مکان نقطه P مشخص است و همچنین $\mathrm{j} = \sqrt{-1}$ است. بازنویسی معادله (10) رابطه (11) را می‌دهد.

$$r_3 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_{12}} - r_4 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha_2} = r_1 - r_2 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_1} \quad (11)$$

معادله (11) را می‌توان به‌صورت رابطه (12) نگاشت تا دربرگیرنده پارامترهای نامشخص کمتری باشد.

$$r_3 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_{12}} - r_4 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha_2} = P + \mathrm{r_m} \quad (12)$$

زاویه چرخش عملگر نهایی ϕ_{12} از پارامترهای مشخص P , $\mathrm{r_1}$, $\mathrm{r_2}$, $\mathrm{r_3}$, $\mathrm{r_4}$ و α_1 به‌دست می‌آید. با توجه به شکل 3 می‌توان رابطه (13) را نوشت.

$$\cos\phi_{12} = \frac{x_P - r_4\cos\alpha_4}{r_3},$$
$$\sin\phi_{12} = \frac{y_P - r_4\cos\alpha_4}{r_3} \quad (13)$$

در نهایت رابطه (14) برای دوران عملگر نهایی به‌دست می‌آید.

$$\phi_{12} = \arctan(x_P, y_P) + \arccos\left(\frac{{x_P}^2 + {y_P}^2 + {r_2}^2 - {r_3}^2}{2r_4\sqrt{{x_P}^2 + {y_P}^2}}\right) \quad (14)$$

معادله (14) می‌تواند تا چهار جواب داشته باشد؛ بنابراین با تعریف ϕ_{34}، ϕ_{23} و ϕ_{41}برای سه مکانیزم چهارمیله‌ای دیگر، سه قید دیگر حاصل می‌شود. این چهار معادله همواره یک جواب مشترک دارند، که به عنوان ϕ یا زاویه چرخش عملگر نهایی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این نتیجه و معادله (7)، رابطه (15) حاصل می‌شود.

$$\mathrm{t} = \mathrm{A}\dot{\theta} \quad (15)$$

که t بردار $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}]^{\mathrm{T}}$ است و بردار پیچ را نشان می‌دهد. ماتریس A به صورت $[a_{ij}]$نوشته می‌شود که در آن $i = \{1, \dots, 3\}$ و $j = \{1, \dots, 4\}$ است و درایه‌های آن به صورت رابطه (16) است.

$$a_{1j} = \frac{1}{AB - C^2}\left(B\frac{\left(x - a_{p_{j_x}} - b_{p_{j_x}}\right)}{A_j} - C\frac{\left(y - a_{p_{j_y}} - b_{p_{j_y}}\right)}{A_j}\right)$$
$$a_{2j} = \frac{1}{AB - C^2}\left(-C\frac{\left(x - a_{p_{j_x}} - b_{p_{j_x}}\right)}{A_j} + A\frac{\left(y - a_{p_{j_y}} - b_{p_{j_y}}\right)}{A_j}\right)$$
$$a_{3j} = \frac{1}{(M^2 + N^2)(AB - C^2)}\left(\left(B\frac{\left(x - a_{p_{j_x}} - b_{p_{j_x}}\right)x(\theta_1 - \theta_2)}{A_j} - \mathrm{C}\frac{\left(y - a_{p_{j_y}} - b_{p_{j_y}}\right)y(\theta_1 - \theta_3)}{A_j}\right) - \left(-C\frac{\left(x - a_{p_{j_x}} - b_{p_{j_x}}\right)x(\theta_1 - \theta_2)}{A_j} + A\frac{\left(y - a_{p_{j_y}} - b_{p_{j_y}}\right)y(\theta_4 - \theta_3)}{A_j}\right)\right) \quad (16)$$

در معادلات بالا پارامترهای M و N به صورت ساده شده، شکل رابطه (17) را دارند.

$$M = x(\theta_1 - \theta_2) - y(\theta_1 - \theta_3)$$
$$N = y(\theta_4 - \theta_3) - x(\theta_4 - \theta_2) \quad (17)$$

معادله (15) بیانگر رابطه سینماتیک مستقیم است و تعداد معادلات آن از تعداد مجهولات آن کمتر است و بیانگر این است که مسئله بی‌نهایت پاسخ دارد، بنابراین نیاز به یک قید مستقل خطی دیگر به عنوان معادله کمکی وجود دارد تا بتوان این معادلات را حل کرد. با توجه به این مسئله و با استفاده از روابط اقلیدسی در هر کابلی می‌توان رابطه (18) نگارشت.

$$\sum_{i=1}^{4}(-1)^i(r\theta_i + r_{0_i})^2 = 0 \quad (18)$$

با گرفتن نخستین مشتق از رابطه (18) ، رابطه (19) که پارامترهای θ_i و $i = \{1, \dots, 4\}$ را به هم مرتبط می‌سازد به‌دست می‌آید.

$$\sum_{i=1}^{4}(-1)^i\theta_i\,\dot{\theta}_i = 0 \quad (19)$$

بدون کاهش کلیت روش حل، از میان چهار پارامتر $\dot{\theta}_i$ و $i = \{1, \dots, 4\}$ پارامتر $\dot{\theta}_4$انتخاب می‌شود تا از رابطه (19) حساب شود؛ بنابراین با بازنویسی معادله (19) برای پارامتر $\dot{\theta}_4$ با توجه به پارامترهای دیگر، می‌توان رابطه (20) را نوشت.

$$\dot{\theta}_4 = -\frac{\sum_{i=1}^{3}(-1)^i\theta_i\,\dot{\theta}_i}{\theta_4} \quad (20)$$

با جای‌گذاری$\dot{\theta}_4$از رابطه (20) در رابطه (15)، ماتریس مدل کنترلی سیستم را به‌صورت رابطه (21) را می‌توان نوشت.

$$\mathrm{t} = \mathrm{B}[\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^{\mathrm{T}} \quad (21)$$

که درآن $\mathrm{B} = [b_{ij}]$ و $i,j = \{1, \dots, 3\}$ است. درایه‌های این ماتریس به صورت رابطه (22) تعریف می‌شود.

$$b_{ij} = a_{ij} + a_{i4}\frac{\theta_i}{\theta_4} \quad (22)$$

معادله (21) ماتریس مدل کنترلی سیستم است و با معادله (20) مقدار $\dot{\theta}_4$ با توجه به سایر $\dot{\theta}_i$ تعیین می‌شود. با توجه به این ساده‌سازی، ماتریس کنترلی به حالت مربعی تعریف شد که مقدار محاسبات را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در ادامه شرایط تعادل استاتیکی برای ربات موازی کابلی در نظر گرفته می‌شود.

2-2- مدل‌سازی استاتیکی

همان‌طورکه بیان شد، کشش کابل‌ها باید همواره مثبت بوده از مقدار مشخصی نباید کمتر باشد، همچنین نباید از آستانه تحمل کابل نیز بیشتر باشند. این دو قید به صورت رابطه (23) نگارش می‌شود.

$$f_{\min} \le f_i \le f_{\max} \quad (23)$$

که در آن f_i نیروی کشش در هر کابل است. برای تعادل استاتیک مقدار نیروی وارد بر عملگر نهایی باید برابر با کشش کابل‌ها باشد. با توجه به آن‌که در این مدل‌سازی نیروی خارجی وارد بر عملگر نهایی صفر است، می‌توان معادلات تعادل را به صورت رابطه (24) نوشت [28].

$$\mathrm{Sf} = 0 \quad (24)$$

که در آن $\mathrm{f} = [f_1\ f_2\ f_3\ f_4]^{\mathrm{T}}$ بردار کشش کابل‌ها و ماتریس S به صورت رابطه (25) تعریف می‌شود.

$$\mathrm{S} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha_1 & -\cos\alpha_2 & \cos\alpha_3 & \cos\alpha_4 \\ \sin\alpha_1 & -\sin\alpha_2 & \sin\alpha_3 & -\sin\alpha_4 \\ a_{p_1} & a_{p_2} & a_{p_3} & a_{p_4} \end{bmatrix} \quad (25)$$

با توجه به معادله (25) و ماتریس ژاکوبین به‌دست‌آمده از معادله (21)، می‌توان یک معادله برای مقید نمودن کشش کابل‌ها به‌دست آورد. همان‌طور که مشخص است تعداد معادلات از تعداد مجهولات در معادله (25) کمتر است. برای رفع این مشکل معادله (26) است [29].

$$f = (I_{4\times4} S^{\dagger} S)z \quad (26)$$

که $I_{4\times4}$ ماتریس واحد را نشان می‌دهد، z یک بردار دلخواه با ابعاد n را نشان می‌دهد. ماتریس $S^{\dagger}$ به صورت رابطه (27) تعریف می‌شود.

$$S^{\dagger} = S^{T}(SS^{T})^{-1} \quad (27)$$

در حقیقت معادله (27) یک شبه معکوس[1] از ماتریس S است. این ماتریس یک حل همسان[2] است که Z را به فضای تهی[3] ماتریس S منتقل می‌کند. براساس [29] و با توجه به این‌که ربات موازی کابلی صفحه‌ای سه درجه آزادی دارد، معادله (6) به‌صورت رابطه (28) بازنویسی می‌شود.

$$f = an \quad (28)$$

که درآن $n = [n_1\ n_2\ n_3\ n_4]^{T}$ است. برای تضمین آن‌که حداقل یک جواب مثبت از کشش کابل‌ها برای تعادل استاتیکی وجود دارد، لازم و کافی است که نشان داده شود که اجزای بردار n_i و $i = \{1,2,3,4\}$ علامت‌های یکسان دارند. یعنی برای تمامی نقاط داخل تعادل استاتیک همه درایه‌های n هم‌زمان علامت مثبت یا منفی داشته باشند. اگر این شرط برقرار باشد، بدون آن‌که جواب خاصی مورد نظر باشد، یک پارامتر مانند a در معادله (28) وجود دارد، به گونه‌ایی که تضمین می‌کند که کشش در تمامی کابل‌ها مثبت هستند. با محاسبه بردار هسته[4] f رابطه (29) n به دست می‌آید.

$$n = \begin{bmatrix} -a_{p_2}\sin(\alpha_3+\alpha_4) + a_{p_3}\sin(\alpha_4-\alpha_2) + a_{p_4}\sin(\alpha_2-\alpha_3) \\ a_{p_1}\sin(\alpha_4-\alpha_3) + a_{p_3}\sin(\alpha_4+\alpha_1) + a_{p_4}\sin(\alpha_3-\alpha_1) \\ a_{p_1}\sin(\alpha_4+\alpha_2) + a_{p_2}\sin(\alpha_4+\alpha_1) - a_{p_4}\sin(\alpha_2+\alpha_1) \\ a_{p_1}\sin(\alpha_2-\alpha_3) + a_{p_2}\sin(\alpha_3-\alpha_1) + a_{p_3}\sin(\alpha_2-\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (29)$$

از معادله (29) و محدودیت‌های α_i، می‌توان نتیجه گرفت که تمامی فضای کاری سینماتیکی، فضای کاری استاتیکی نیز است [30,29]؛ بنابراین فضای کاری ربات‌های کابلی یک فضای کاری بدون تکینگی[5] است. این مشخصه در تمامی تعاریف از فضای کاری ربات‌های کابلی وجود دارد [32,31,5]؛ بنابراین می‌توان با توجه به قید نیروهای استاتیکی کشش در کابل‌ها را همواره مثبت نگاه داشت. قید به‌دست آمده کشش درکابل‌ها را همواره مثبت نگاه خواهد داشت و این قید به صورت دایمی بر کشش کابل ایجاد می‌شود. برای ایجاد حلقه بسته کنترل[6] بر مبنای بازخورد از مکان، در قسمت بعدی الگوریتم پردازش تصویر جهت مکانیابی عملگر نهایی ارائه می‌شود.

3- پردازش تصویر جهت مکان‌یابی عملگر نهایی

پردازش تصویر از روش‌های متداول برای شناسایی مکان اجسام است. با توجه به دقت بالای دوربین‌ها استفاده از این روش بسیار متداول شده است. در مقابل روش بازخورد از صدا[7] و روش استفاده از لیزر[8] این روش به دلیل اشباع نشدن سنسورها و همچنین دقت بسیار بالاتر انتقال اطلاعات سریع‌تر بسیار توانمندتر عمل می‌کند. در مقایسه با روش پیشرفته موقعیت یاب[9] به دلیل عدم نصب گیرنده بر عملگر نهایی بسیار و همچنین احتمال اشباع شدن سنسورها بسیار عملکرد بهتری دارد [33]. هدف استفاده از پردازش تصویر در این مقاله، پیدا کردن مکان عملگر نهایی ربات است. رنگ قرمز خالص با وجود نویزهای بالا از جمله منابع نور مصنوعی، فیلتر و جدا می‌شود. تصاویر به‌دست آمده از دوربین، به شرح رابطه (30)، تبدیل به یک ماتریس سه بعدی که ابعاد آن به سه ماتریس قرمز، سبز و آبی تقسیم می‌شوند.

$$\begin{aligned} R_{\{(i,j)\}} &= M_{\{(i,j,1)\}} \\ G_{\{(i,j)\}} &= M_{\{(i,j,2)\}} \\ B_{\{(i,j)\}} &= M_{\{(i,j,3)\}} \end{aligned} \quad (30)$$

در رابطه (30) ماتریس R رنگ قرمز، ماتریس G رنگ سبز و ماتریس B رنگ آبی در صفحه تصویر را نشان می‌دهند. درایه‌های این ماتریس‌ها عددی بین 0-255 را نشان می‌دهند. این اعداد شدت رنگ‌های اصلی را نشان می‌دهند. عدد 0 به معنای عدم وجود رنگ مورد نظر و عدد 255 نشان دهنده وجود خالص رنگ است.

همچنین ابعاد این ماتریس‌ها، وضوح[10] تصویر است. برای نمونه دوربین استفاد شده برای این ربات، تصویر با کیفیت 480 در 720 پیکسل[11] تهیه می‌کند و در نتیجه، ماتریس‌های حاصل از پردازش تصویر دارای ابعاد 480x720 خواهند بود. برای تعیین مکان و زاویه چرخش عملگر نهایی دو برچسب قرمز رنگ با فاصل بر عملگر نهایی زده شده است؛ بنابراین با شناسایی این رنگ‌های قرمز می‌توان مشخصات مکانی عملگر نهایی را به‌دست آورد. پس ابتدا باید نواحی قرمز را مشخص کرد و برای این کار ابتدا باید معیاری برای رنگ قرمز تعیین کرد. سپس براساس این معیار، تصاویر حاصل از ربات را می‌توان پردازش کرد و به نتیجه مطلوب رسید. تصویر از دوربین آنالوگ[12] گرفته می‌شود و از طریق رابط به یارانه انتقال می‌یابد. با توجه به آن‌که سرعت تصویربرداری سی فریم بر ثانیه است دقت بازخورد تا حدود 34 میلی‌ثانیه است که برای استفاده در روش‌های کنترل برخط مناسب است. با توجه به آن‌که دو برچسب قرمز رنگ با ابعاد مشخص بر عملگر نهایی نصب شده است، فرآیند تشخیص رنگ قرمز برای تعیین مکان انجام می‌گیرد. شکل 4 خروجی حاصل از پردازش تصویر را نشان می‌دهد که براساس آن دو مستطیل قرمز رنگ حول این ناحیه قرمز ترسیم می‌شود و مراکز آن‌ها به‌دست می‌آید.

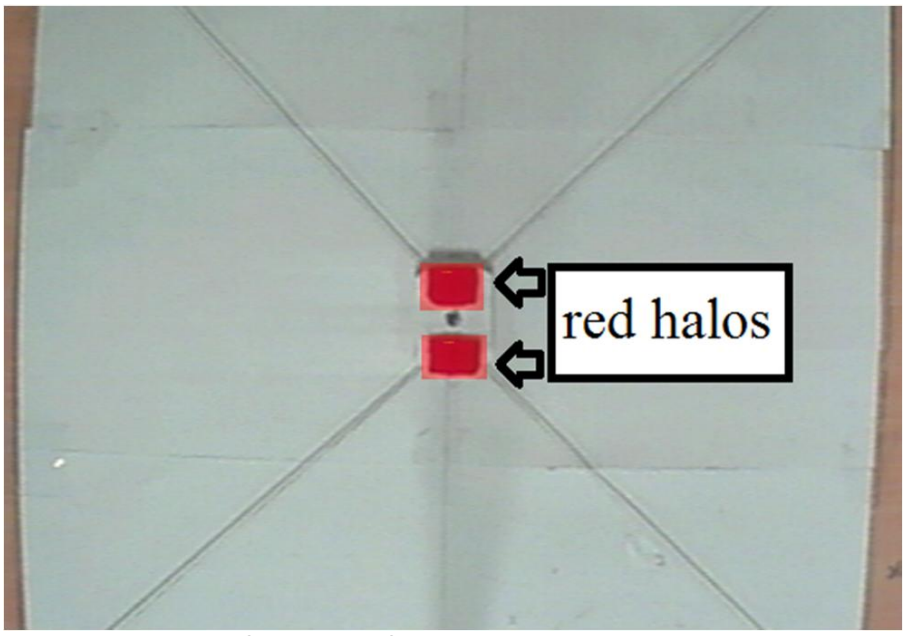


Fig. 4 Frame of camera after locating red regions

شکل 4 تصویر نهایی پردازش شده

1- Pseudo inverse
2- Homogenous
3- Null space
4- Kernel vector
5- Singularity free workspace
6- Close loop control
7- Ultrasonic
8- Laser scanner
9- Global Positioning System(GPS)
10- Resolution
11- Pixel
12- Analog

1. Require: Red Object Defining Threshold, Device properties, s_{cx}, s_{cy}, O_x, O_y, n
2. Output: x, y, ϕ
3. vidDevice = imaq.VideoDevice
4. For i=1 to n
5. rgbFrame = (step(vidDevice))
6. diffFrame = imsubtract(rgbFrame, rgb2gray(rgbFrame))
7. diffFrame = medfilt (diffFrame)
8. binFrame = im2bw(diffFrame,Threshold)
9. C= step(hblob, binFrame)
10. If size(C)=[0,2]
11. $(x, y, \phi)(n) = (x, y, \phi)(n-1)$
12. Else
13. obtain $(x, y, \phi)(n)$
14. End If
15. End For

Algorithm 1 Vision procedure for tracking position using red marker on end effector.

الگوریتم 1 مراحل پردازش تصویر با ردیابی نواحی قرمز بر روی عملگر نهایی.

فرآیند پیدا کردن نواحی قرمز در یک تصویر براساس تفاضل تصویر از تصویر با حالت خاکستری به‌دست می‌آید [34]. با توجه به شکل 4، رابطه (31) را برای مکان عملگر نهایی EE (x, y, ϕ) براساس مرکز دو ناحیه قرمز رنگ می‌توان نوشت.

$$x = \frac{\frac{x_1+x_2}{2} - O_x}{s_{cx}}$$
$$y = \frac{\frac{y_1+y_2}{2} - O_y}{s_{cy}}$$
$$\phi = \arctan\left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}\right) \quad (31)$$

که در آن $c_1(x_1, y_1)$ و $c_2(x_2, y_2)$ مراکز دو ناحیه قرمز رنگ O_y و O_x مکان دستگاه مختصات متصل به ربات است. این پارامترها همواره با گرفتن نخستین عکس پیش از آغاز کار ربات تنظیم می‌شود تا دستگاه مختصات ربات با توجه به مکان اولیه عملگر نهایی تعیین شود.

سپس سایر نقاط نسبت به مشخصات این نقطه سنجیده می‌شوند. با این کار در حقیقت ربات در هر بار اجرای کار نسبت به مکان نخستین[1] تنظیم می‌شود. برای تعبیر تعداد پیکسل‌ها به مقدار واقعی تغییر مکان با توجه به دانستن ابعاد مشخص از ربات نسبتی[2] میان آن‌ها در هر دو راستا تعیین می‌گردد؛ بنابراین مقادیر s_{cx} و s_{cy} نسبت میان تعداد پیکسل به ابعاد واقعی در راستای x و y هستند که به‌صورت رابطه (32) نگارش می‌شود.

$$s_{cx} = \frac{n_{px}}{r_{ux}}, \qquad s_{cy} = \frac{n_{py}}{r_{uy}} \quad (32)$$

که n_{px} و n_{py} به ترتیب تعداد پیکسل تصویر در راستاهای x و y هستند و $r_u(r_{ux}, r_{uy})$ بیانگر بردار ابعاد واقعی $n_p(n_{px}, n_{py})$ است. این مقادیر نیز در مرحله عملکرد ربات به‌روز می‌گردند تا از خطاهای ناشی از پردازش تصویر جلوگیری شود. برای فهم بهتر فرآیند پردازش تصویر الگوریتم 1 ارائه شده است. در گام نخست این الگوریتم بازه تعیین رنگ قرمز تعیین می‌شود و بدین معنا که کد نسبت به چه رنگ قرمز حساس است. دومین ورودی کد مشخصات دوربین که برای تعریف در نرم‌افزار است. پارامترهای تناسب ابعاد (s_{cx}, s_{cy}) در هر دو راستای اصلی تعیین می‌شود و (O_x, O_y) به عنوان مرکز مختصات محاسبه شده و به عنوان ورودی به کد داده می‌شود. پارامتر n مدت زمان تصویربرداری را مشخص می‌کند.

با استفاده از این ورودی‌ها در خط اول و دوم کد مشخصات دوربین تعیین می‌شود. در خط سوم دوربین آماده‌سازی می‌شود. در خط پنجم یک فریم[3] گرفته می‌شود. در خط ششم تفاضل عکس و حالت خاکستری[4] حساب می‌شود، همچنین علاوه‌بر فیلتر گوسین[5] استفاده شده از فیلتر مدیان[6] نیز برای بهبود عکس در خط هفتم استفاده می‌شود. این فیلتر یک سیستم دیجیتال[7] غیرخطی فیلتر است که بیشتر موارد برای بهبود و تخمین پیکسل‌های حذف‌شده استفاده می‌شود. این فیلتر در اغلب کاربردهای پردازش تصویر پیش از آغاز پردازش استفاده می‌شود [33]. در خط هشتم نواحی قرمز با توجه حد مرزی تعیین رنگ قرمز[8] و در خط نهم مراکز این نواحی تعیین می‌شود. با توجه به آن‌که دو ناحیه در تصویر وجود دارد، دو مرکز ایجاد می‌شود. مقادیر این دو ناحیه در ماتریس **C** قرار داده می‌شود. خطوط نه تا سیزده نیز برای محاسبه خروجی‌ها استفاده می‌شود.

انتهای کد برای بروز رخدادی غیرقابل پیش‌بینی مانند عکس نگرفتن دوربین و مخل شدن عملکرد انتقال داده اضافه شده است. در این صورت بردار مکان عملگر نهایی تا به رسیدن اطلاعات پسین مقادیر پیشین موجود استفاده می‌کند.

4- کنترل ربات موازی کابلی صفحه‌ای

دراین قسمت دو کنترلر متفاوت بر مدل حاصل از بخش دوم پیاده‌سازی می‌شود و خروجی آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نحوه ارتباط کنترلر با سایر قسمت‌ها را می‌توان در شکل 5 مشاهده کرد. کنترل ربات براساس بازخورد مکان عملگر نهایی است. در گام نخستین کنترلر جانمایی قطب روی مدل پیاده می‌شود. این کنترلر کلاسیک در شرایط عدم وجود نامعینی به خوبی عمل می‌کند، اما با وجود نامعینی عملکرد آن پایین می‌آید. در ادامه با پیاده‌سازی کنترلر مود لغزشی خروجی‌های بهتری برای کنترل ربات حاصل می‌گردد. البته این کنترلر در مقابل پدیده نوسانات نخستین از خود ضعف نشان می‌دهد، اما به خوبی پارامترهای نامعین مدل را تخمین می‌زند. جهت مقایسه ساختار این دو کنترلر، بلوک دیاگرامی از هر دو روش ارائه می‌شود.

1. Require (CDPR design properties,t,P_r,n Θ, τ, P_c)
2. A=Define CDPR
3. B= Jac(A)
4. While (t > 0)
5. P_c(n)=FeedPos(camera)
6. $\Theta(n)$=CalKin($P_r(n)$,B)
7. Err = $P_r(n)$-$P_c(n)$
8. CC=Control(Err, B, $\Theta(n)$)
9. Command(CC)
10. $t_e(n) = elapsed\ time$
11. $t = t - t_e(n)$
12. EndWhile

Algorithm 2 Procedure of creating model, taking camera feedback and controlling Cable-driven Parallel Robot.

الگوریتم 2 فرآیند تشکیل مدل، گرفتن بازخورد دوربین و کنترل ربات موازی کابلی

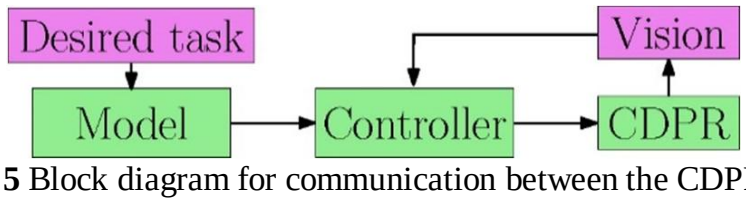


Fig. 5 Block diagram for communication between the CDPR, camera and controller

شکل 5 نحوه انتقال اطلاعات بین دوربین، کنترلر و مدل

1- Home position
2- scale
3- Frame
4- Gray
5- Gaussian filter
6- Median filter
7- Digital
8- Red Threshold

4-1- طراحی کنترلر

الگوریتم 2 جایگاه کنترلر و مدل‌سازی را در فرآیند تشکیل ماتریس‌های کنترلی و استفاده از آن‌ها نشان می‌دهد. این کد در ابتدا مشخصات هندسی و ابعادی ربات را به عنوان ورودی می‌گیرد. از سایر ورودی‌های آن معادله مسیر دلخواه، تعداد گام تهیه بازخورد پردازش تصویر و کل مدت زمان کنترل است. زمان با t نشان داده شده است که شامل کل مدت زمان حرکت ربات و مرحله محاسبات هست. در خطوط اول و دوم این کد ماتریس ژاکوبین B براساس طراحی ربات شکل می‌گیرد. در خطوط سوم و چهارم معادلات سینماتیک سیستم با توجه به فیدبک مکان از دوربین تحلیل می‌شود. خطای کنترلر در رسیدن به مکان مطلوب در خط هفتم حساب می‌شود. در خط هشتم کنترلرهایی که در ادامه خواهند آمد، مقادیر به روز شده مکان را براساس خطای سیستم محاسبه می‌کنند. خط نهم مکان‌های جدید را به موتورها دستور می‌دهد. در خطوط ده و یازده کل زمان طی شده جهت محاسبات کنترلی گزارش می‌شود. برای نگارش قانون کنترلر، ورودی‌ها به صورت رابطه (33) تعیین می‌شود.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \tag{33}$$

همچنین بردار ورودی بلوک کنترلر u به صورت $[u_1 \ u_2 \ u_3]^{\mathrm{T}}$ است و مقدار u_4 که همان $\dot{\theta}_4$ است از معادله (20) به‌دست می‌آید. ورودی کمکی کنترلر نیز به صورت $\mathrm{v} = [v_1 \ v_2 \ v_3]^{\mathrm{T}}$ است و رابطه (34) برای محاسبه v با توجه به معادلات (31,15,14) نگارش می‌شود.

$$\mathrm{v} = \mathrm{Bu} \tag{34}$$

همان‌طور که بیان شد ربات موازی کابلی در فضای کاری‌اش تکینگی ندارد و بنابراین B دارای رتبه کامل[1] و کنترل‌پذیر[2] است.

مقادیر مرجع در کنترلر[3] با $\mathrm{p_r} = [x_r, y_r, \phi_r]^{\mathrm{T}}$ نمایش داده می‌شوند. مدل در هر مرحله با توجه به بازخوردها و مقادیر مرجع به‌روز می‌گردد. کنترلر حتما باید بتواند محاسبات را به صورت برخط انجام دهد و پایداری[4] و صفر کردن خطا از شروط نخستین طراحی کنترلر است [26]. در قسمت پسین کنترلر کلاسیک جانمایی قطب طراحی می‌گردد.

4-2- طراحی کنترلرجانمایی قطب

کنترلر بازخورد کامل حالت[5] یا همان کنترلر جانمایی قطب براساس جانمایی قطب‌های اصلی سیستم به مکان مورد نظر کار می‌کند. مکان قطب‌ها ارتباط مستقیم با مقادیر ویژه[6] سیستم دارد که در حقیقت رفتار و پاسخ سیستم را تنظیم می‌نماید [35]. برای پیاده‌سازی این روش باید در نظر گرفته شود که سیستم پایدار است, متغیرها قابل اندازه‌گیری هستند و قیدی روی ورودی سیستم وجود ندارد. با توجه به این موارد قطب‌های سیستم باید در $\lambda_x < 0, \lambda_y < 0$ و $\lambda_\phi < 0$ قرار گیرد که در حقیقت برای رفتار مطلوب سیستم هستند. با استفاده از معادلات (21،34) رابطه (35) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + b_{13}u_3 = \dot{x}_r + \lambda_x e_x \\ \dot{y} &= b_{21}u_1 + b_{22}u_2 + b_{23}u_3 = \dot{y}_r + \lambda_y e_y \\ \dot{\phi} &= b_{31}u_1 + b_{32}u_2 + b_{33}u_3 = \dot{\phi}_r + \lambda_\phi e_\phi \end{aligned} \tag{35}$$

1- Full rank
2- Controllable
3- Reference values
4- Stability
5- Full State Feedback (FSF)
6- Eigen values

برای ایجاد حلقه بسته خطا به‌صورت $\mathrm{e} = \mathrm{p} - \mathrm{p_r}$ تعریف می‌شود و بردار خطا $\mathrm{e} = [e_x, e_y, e_\phi]^{\mathrm{T}}$ به‌صورت رابطه (36) نگارش می‌شود.

$$\begin{aligned} e_x &= x - x_r \\ e_y &= y - y_r \\ e_\phi &= \phi - \phi_r \end{aligned} \tag{36}$$

برای به‌دست آوردن قانون کنترلر روابط (36,35) ترکیب می‌شوند و رابطه (37) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{x} - \dot{x}_r - \lambda_x e_x &= \dot{e}_x + \lambda_x e_x = 0 \\ \dot{y} - \dot{y}_r - \lambda_y e_y &= \dot{e}_y + \lambda_y e_y = 0 \\ \dot{\phi} - \dot{\phi}_r - \lambda_\phi e_\phi &= \dot{e}_\phi + \lambda_\phi e_\phi = 0 \end{aligned} \tag{37}$$

مراحل محاسبات بالا برای این کنترلر در بلوک دیاگرام شکل 6 ارائه شده است. در این دیاگرام تفاضل مقادیر مرجع و بازخورد پردازش تصویر ترم خطا را برای هر ورودی سیستم می‌سازد. در قسمت بعدی ورودی‌های کمکی ساخته می‌شوند و قطب‌ها جانمایی می‌شود. رابطه (38) محاسبات مربوط به آخرین بلوک در این شکل را نشان می‌دهد که براساس آن خروجی‌ها حساب می‌شوند. برای کنترلر جانمایی قطب در این مقاله از روش خطی سازی بازخورد[7] به جهت استفاده برای مدل غیرخطی حاضر استفاده شده است. برای امتحان قانون کنترلر مسیر پیچشی رابطه (39) برای ربات به عنوان مرجع تعیین می‌شود.

$R_s = \frac{t}{100}$ شعاع مسیر پیچشی است. شکل 7 نمایشگر مسیر دلخواه و مسیر اجرا شده توسط ربات است. با توجه به آن‌چه یاد شد، نامعینی در کنترلر جانمایی قطب مدل نمی‌شود و در قوانین آن در نظر گرفته نمی‌شود.

مسیر اجراشده توسط ربات، عملکرد مطلوب را ندارد و این موضوع در شکل 7 قابل مشاهده است. تغییرات جذرمیانگین خطا[8] برای مسیر اجرا شده در شکل 8 آورده شده است و میانگین این خطا حدود درصد12 است. تغییرات زاویه دورانی عملگر نهایی ϕ در زمان اجرای مسیر در شکل 9 ارائه شده است. بازه تغییرات زیاد ϕ در این شکل نشان‌دهنده اثرات مخرب نامعینی‌ها بر عملکرد صفر کردن خطا است.

تغییر مکان قطب‌ها از نزدیکی مرکز مختصات به منفی بی‌نهایت تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد آن ندارد و تنها در زمینه پایداری کنترلر نقش ایفا می‌کند. با توجه به ضعف عملکردی این کنترلر در ادامه به طراحی کنترلر براساس مود لغزشی پرداخته خواهد شد.

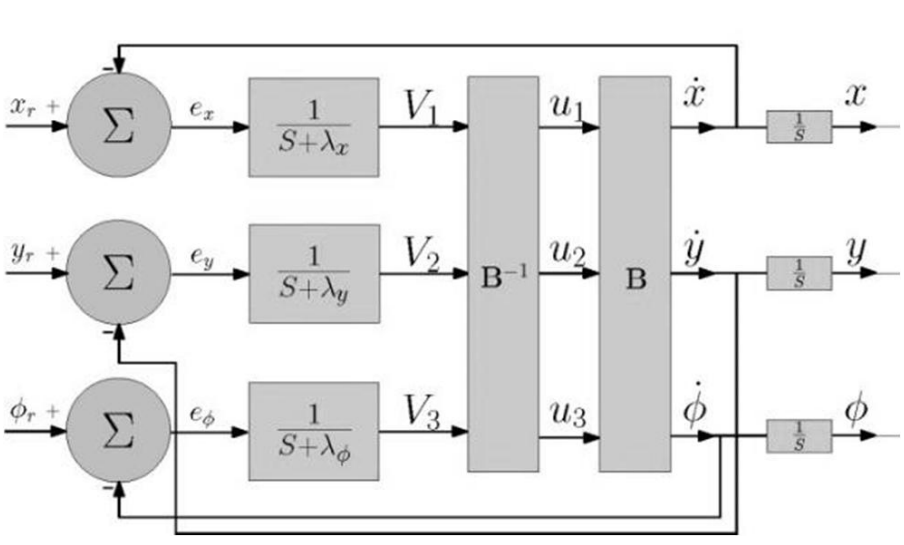


Fig. 6 Pole placement controller block diagram

شکل 6 بلوک‌دیاگرام مربوط به کنترلر جانمایی قطب

7- Feedback linearization
8- Root Mean Square Error (RMSE)

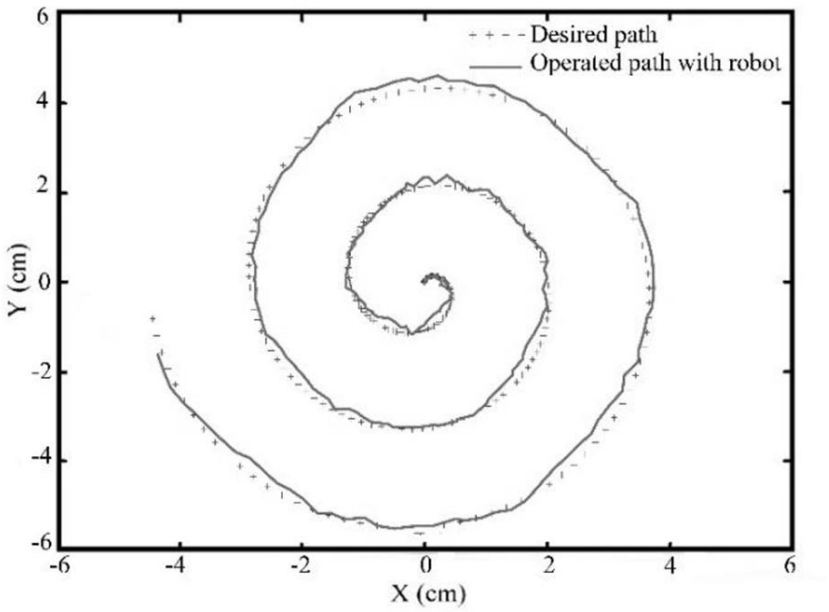


Fig. 7 Comparison of operated and desired path defined in Eq. (39) using pole placement controller

شکل 7 مقایسه میان مسیر اجرا شده توسط ربات و مسیر دلخواه تعریف شده در معادله (39) براساس کنترلر جانمایی قطب

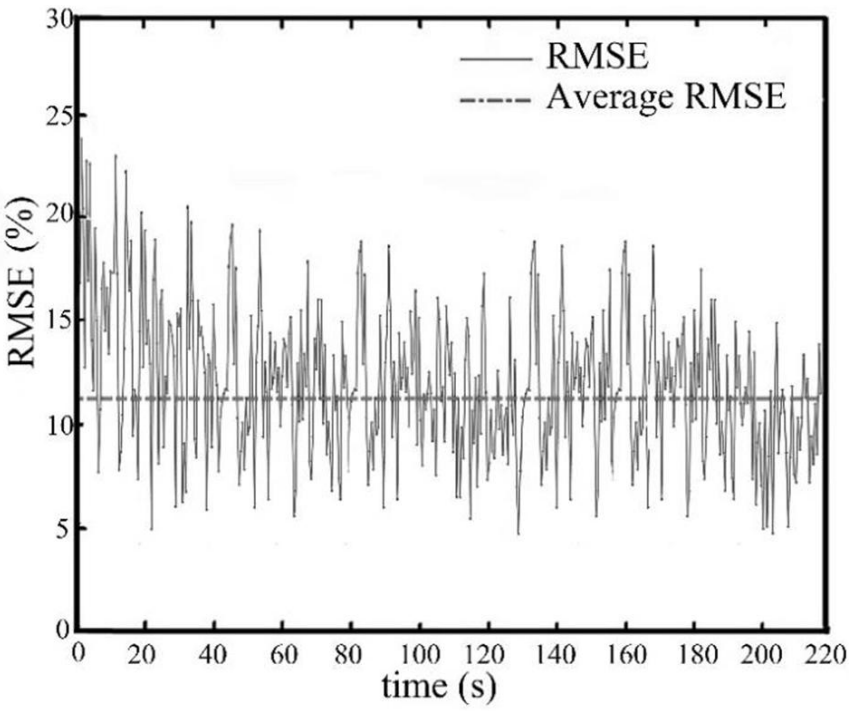


Fig. 8 Trend of Root Mean Square Error for the path presented in Fig. 7

شکل 8 مقادیر جذرمیانگین خطای محاسبه‌شده برای مسیر اجراشده در شکل 7 با کنترلر جانمایی قطب

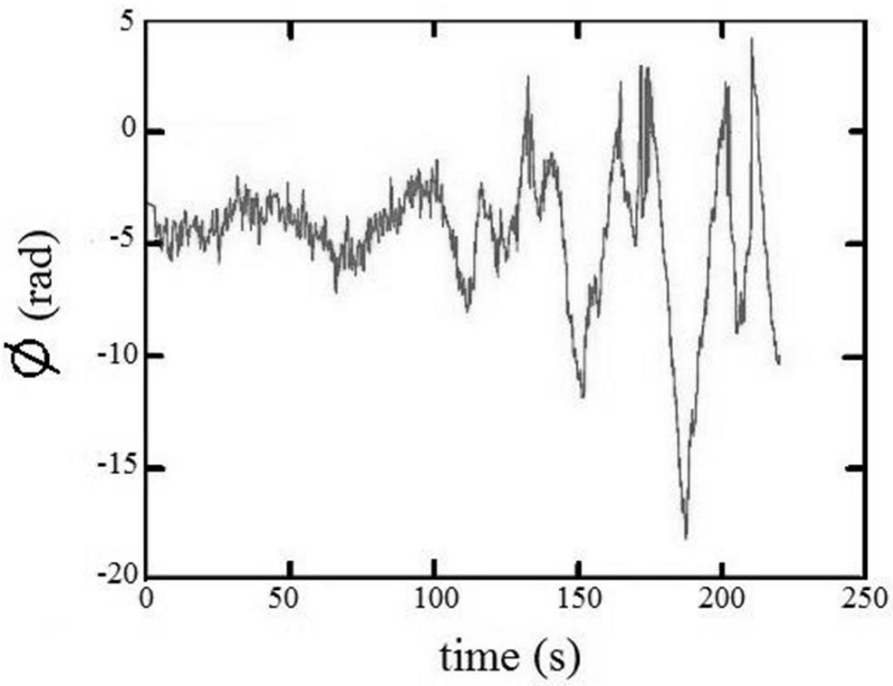


Fig. 9 Variation from $\phi_r = 0$, using pole placement controller

شکل 9 خطا نسبت به $\phi_r = 0$ در اجرای مسیر دلخواه با کنترلر جانمایی قطب

در رابطه (37) علامت قطب‌های جدید منفی است و بنابراین سیستم پایدار می‌ماند. براساس معادله (35)، رابطه بین ورودی و خروجی سیستم به‌صورت رابطه (38) تعریف می‌شود.

$$u = B^{-1}\begin{bmatrix}\dot{x}_r + \lambda_x e_x\\ \dot{y}_r + \lambda_y e_y\\ \dot{\phi}_r + \lambda_\phi e_\phi\end{bmatrix} \quad (38)$$

$$x_r = R_s \sin t$$
$$y_r = R_s \cos t$$
$$\phi_r = 0 \quad (39)$$

3-4- طراحی کنترلر براساس مود لغزشی

کنترلر مود لغزشی، یک روش شناخته‌شده در طراحی کنترلرهای مقاوم برای سیستم‌های دینامیکی غیرخطی تحت شرایط حضور نامعینی است. این ویژگی در مدل‌سازی نامعینی در قانون این کنترلر نهفته است، هرچند که این کنترلر گاها دچار پدیده نوسانات[1] در مبدأ می‌شود [36]. استفاده از این روش برای خنثی کردن تأثیرات نامعینی‌ها و اغتشاشات خارجی روی سیستم است. در این کنترلر شرایط مرجع رابطه (40) برای هر ورودی مورد نظر است.

$$x \to x_r$$
$$y \to y_r$$
$$\phi \to \phi_r \quad (40)$$

براساس رابطه (35) رابطه (41) را می‌توان برای تعریف صفحات لغزنده نوشت.

$$s_x = x - x_r$$
$$s_y = y - y_r$$
$$s_\phi = \phi - \phi_r \quad (41)$$

برای صفر شدن خطا در رابطه (41)، بردار $\hat{v}(\hat{v}_1, \hat{v}_2, \hat{v}_3)$ به‌صورت رابطه (42) تعریف می‌شود.

$$\hat{v}_1 = \dot{s}_x \to \dot{s}_x|_{v_1=\hat{v}_1} = 0$$
$$\hat{v}_2 = \dot{s}_y \to \dot{s}_y|_{v_2=\hat{v}_2} = 0$$
$$\hat{v}_3 = \dot{s}_\phi \to \dot{s}_\phi|_{v_3=\hat{v}_3} = 0 \quad (42)$$

برای مدل کردن نامعینی، ماتریس کنترل سیستم به صورت دو بخش مجزا و با رابطه $B = B_s + \Delta B$ در نظر گرفته می‌شود که ترم ΔB ماتریس نامعینی سیستم است و ترم B_s مدل دقیق را نشان می‌دهد؛ بنابراین فرض و رابطه (21)، رابطه (43) استخراج می‌شود.

$$t = (B_s + \Delta B)u \quad (43)$$

براساس معادله (43)، نامعینی‌ها به‌صورت رابطه (44) در نظر گرفته می‌شود.

$$B_s u = u$$

$$\Delta B u = \begin{bmatrix}\delta_x\\ \delta_y\\ \delta_\phi\end{bmatrix} \quad (44)$$

که در آن δ_x , δ_y و δ_ϕ مقادیری نامعین و به‌صورت محدود[2] است؛ بنابراین رابطه (45) را می‌توان نوشت.

$$\dot{x} = v_1 + \delta_x, |\delta_x(t)| \le \overline{\delta_x}$$
$$\dot{y} = v_2 + \delta_y, |\delta_y(t)| \le \overline{\delta_y}$$
$$\dot{\phi} = v_3 + \delta_\phi, |\delta_\phi(t)| \le \overline{\delta_\phi} \quad (45)$$

براساس تعریف $\hat{v}$ در معادله (42) و صفحات لغزشی[3] $\dot{s}_x$، $\dot{s}_y$ و $\dot{s}_\phi$ می‌توان رابطه (46) را که بیانگر صفر شدن ترم‌های خطاست نگارش کرد.

$$\dot{x} = \dot{s}_x \to \dot{s}_x|_{v_x=\hat{v}_x} = 0$$

1- Chattering
2- Bounded
3- Sliding surface

$$\dot{y} = \dot{s}_y \rightarrow \dot{s}_y|_{v_y=\hat{v}_y} = 0$$
$$\dot{\phi} = \dot{s}_\phi \rightarrow \dot{s}_\phi|_{v_\phi=\hat{v}_\phi} = 0 \quad (46)$$

بر این اساس، ترم‌های v_1 , v_2 و v_3 به‌صورت رابطه (47) نگارش می‌شود.

$$v_1 = \hat{v}_1 - \eta_x \text{sgn}(s_x)$$
$$v_2 = \hat{v}_2 - \eta_y \text{sgn}(s_y)$$
$$v_3 = \hat{v}_3 - \eta_\phi \text{sgn}(s_\phi) \quad (47)$$

توجه شود که η_x , η_y و η_ϕ تلاش کنترلر برای هر متغیر ورودی سیستم و $\text{sgn}(0)$ تابع علامت برای کاهش اثرات نوسانات (در مقایسه با تابع تانژانت) در مبدأ استفاده شده است. براساس فرض جمله پیشین و معادله (46)، روابط (48) برای تعریف مشتق اول از صفحات لغزشی نگارش می‌شود.

$$\dot{x} = v_1 + \delta_x = \hat{v}_1 - \eta_x \text{sgn}(s_x) + \delta_x$$
$$\dot{y} = v_2 + \delta_y = \hat{v}_2 - \eta_y \text{sgn}(s_y) + \delta_y$$
$$\dot{\phi} = v_3 + \delta_\phi = \hat{v}_3 - \eta_\phi \text{sgn}(s_\phi) + \delta_\phi \quad (48)$$

حال براساس معادلات (48,42)، رابطه (49) منتج می‌شود.

$$\dot{x} = \dot{x}_r - \eta_x \text{sgn}(s_x) + \delta_x$$
$$\dot{y} = \dot{y}_r - \eta_y \text{sgn}(s_y) + \delta_y$$
$$\dot{\phi} = \dot{\phi}_r - \eta_\phi \text{sgn}(s_\phi) + \delta_\phi \quad (49)$$

با توجه به رابطه پیش، تابع انرژی[1] به‌صورت رابطه (50) نوشته می‌شود [37].

$$v = s_x^2 + s_y^2 + s_\phi^2 \quad (50)$$

با گرفتن مشتق از تابع انرژی رابطه (51) حاصل می‌شود.

$$\dot{v} = s_x\dot{s}_x + s_y\dot{s}_y + s_\phi\dot{s}_\phi \quad (51)$$

رابطه (52) براساس جایگزینی رابطه (46) در رابطه (51) به‌دست می‌آید.

$$s_x\dot{s}_x = -\eta_x|s_x| + \delta_x|s_x| \quad (52)$$

با توجه به آن‌چه یاد شد رابطه $|\eta_x| < \overline{\eta}_x$ برای تلاش کنترلر برقرار است. با توجه به این مورد و نامساوی کوشی- شواتز[2]، رابطه (53) نگارش می‌شود.

$$\delta_x s_x \le |\delta_x||s_x| \le \overline{\delta_x}|s_x| \quad (53)$$

نتیجه ترکیب روابط (53,52)، با توجه به آن‌که $\overline{\delta}_x$ و η_x همواره مثبت و به صورت نامعادله (54) است.

$$s_x\dot{s}_x = -\eta_x|s_x| + \delta_x s_x \le -\eta_x|s_x| + \overline{\delta}_x|s_x|$$
$$\le (-\eta_x + \overline{\delta}_x)|s_x|$$
$$s_x\dot{s}_x \le -\eta_x|s_x| \quad (54)$$

بنابراین اثبات شد که تر $s_x\dot{s}_x$ همواره منفی است، زیرا ترم $\eta_x|s_x|$ همواره مثبت است. با دنبال کردن همین روش برای y و ϕ نتایج یکسانی حاصل می‌شود که در رابطه (55) آمده است [37].

$$s_y\dot{s}_y \le -\eta_y|s_y|$$
$$s_\phi\dot{s}_\phi \le -\eta_\phi|s_\phi| \quad (55)$$

با استفاده از روابط (54,52)، رابطه (56) برای مشتق نخست تابع انرژی نوشته می‌شود.

$$\dot{v} = s_x\dot{s}_x + s_y\dot{s}_y + s_\phi\dot{s}_\phi$$
$$\le -\eta_x|s_x| - \eta_y|s_y| - \eta_\phi|s_\phi|$$
$$\Rightarrow \ \forall \ s_x > 0 \text{ or } s_y > 0 \text{ or } s_\phi > 0 \rightarrow \dot{v} < 0 \quad (56)$$

بنابراین صفحه لغزشی v مثبت معین[3] و $\dot{v}$ منفی معین[4] است. با استفاده از تئوری لیاپانوف[5] و با توجه به این‌که $\dot{v}(0) = 0$ است می‌توان رابطه (57) را نتیجه گرفت.

$$V \rightarrow 0 \Rightarrow s_x^2 + s_y^2 + s_\phi^2 \rightarrow 0 \quad (57)$$

1- Energy function
2- Cauchy-Schwarz
3- Positive definite
4- Negative definite
5- Lyapunov theorem

جدول 2 مقایسه پارامترهای کنترلی برای نسبت به ورودی پله

پارامتر کنترلی	کنترلر جانمایی قطب	کنترلر مود لغزشی
خطای حالت ماندگار[6]	12.5 درصد	8 درصد
زمان خیز[7]	0.2 ثانیه	0.15 ثانیه
زمان نزول[8]	2.6 ثانیه	1.4 ثانیه
بیشینه فراجهش[9]	16 درصد	10 درصد

به دلیل این‌که جمله $s_x^2 + s_y^2 + s_\phi^2$ خارج از علامت جملات آن همواره مثبت است، باید هرکدام از جملات آن مساوی با صفر باشد تا رابطه (57) ارضا شود؛ بنابراین با توجه به لم باربالت[10] رابطه (57) نتیجه می‌شود [38].

$$\begin{bmatrix} s_x \rightarrow 0 \\ s_y \rightarrow 0 \\ s_\phi \rightarrow 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \rightarrow X_r \\ Y \rightarrow Y_r \\ \phi \rightarrow \phi_r \end{bmatrix} \quad (58)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر مرجع برای هر ورودی قابل دسترس است [38]. شکل 10 بیانگر فرآیند صورت گرفته جهت پیاده‌سازی کنترلر مود لغزشی برای ربات است.

مسیر تعریف شده در رابطه (39) با استفاده از کنترلر مود لغزشی پیاده‌سازی شد و شکل 11 نتایج را ارائه می‌دهد. هر چند پدیده نوسانات در مبدأ منجر به انحراف بسیار که از مسیر مطلوب شده است، ولی با مقایسه مقدار خطا در شکل‌های 7 و 12 می‌توان استنباط کرد که مسیر مطلوب به دقت بسیار بیشتری دنبال شده است. مقدار میانگین خطا 8درصد است که نشان‌دهنده کاهش به مقدار 4درصد در مقایسه با شکل 7 است. تغییرات ϕ در اجرای مسیر در شکل 13 نشان داده شده است، که البته می‌توان استنباط کرد که در این خروجی نیز مقدار خطا کاهش یافته است. با مدل‌سازی نامعینی‌ها در این کنترلر عملکرد بهتری در تعقیب مسیر به‌دست آمد. همچنین جدول 2 بیانگر مقایسه کلی میان عملکرد دو کنترلر برای پاسخ پله[11] با توجه به پارامترهای کنترلی است. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفته که عملکرد کنترلر مود لغزشی بسیار مطلوب‌تر از کنترلر جانمایی قطب بوده است.

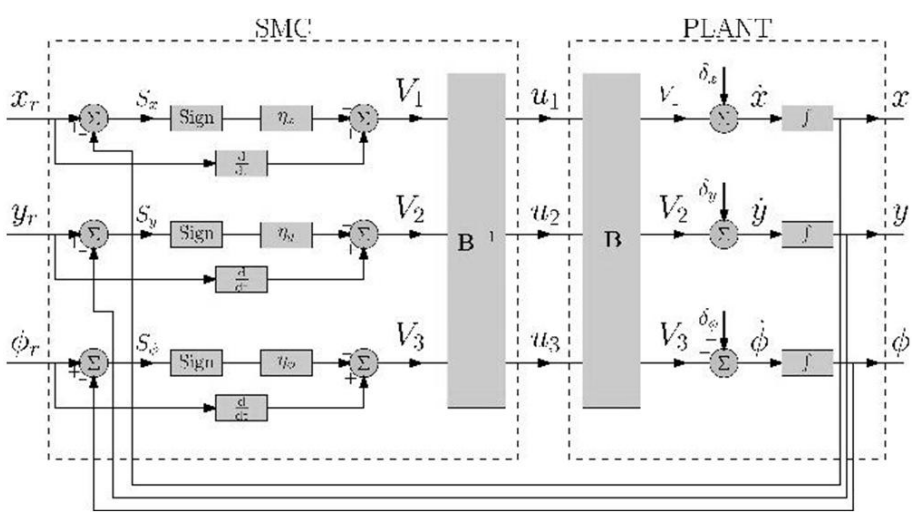


Fig. 10 Sliding mode controller block diagram.

شکل 10 بلوک دیاگرام کنترلر مود لغزشی.

6- Steady state error
7- Rise time
8- Settling time
9- Maximum over shoot
10- Barbalat's lemma
11- Step response

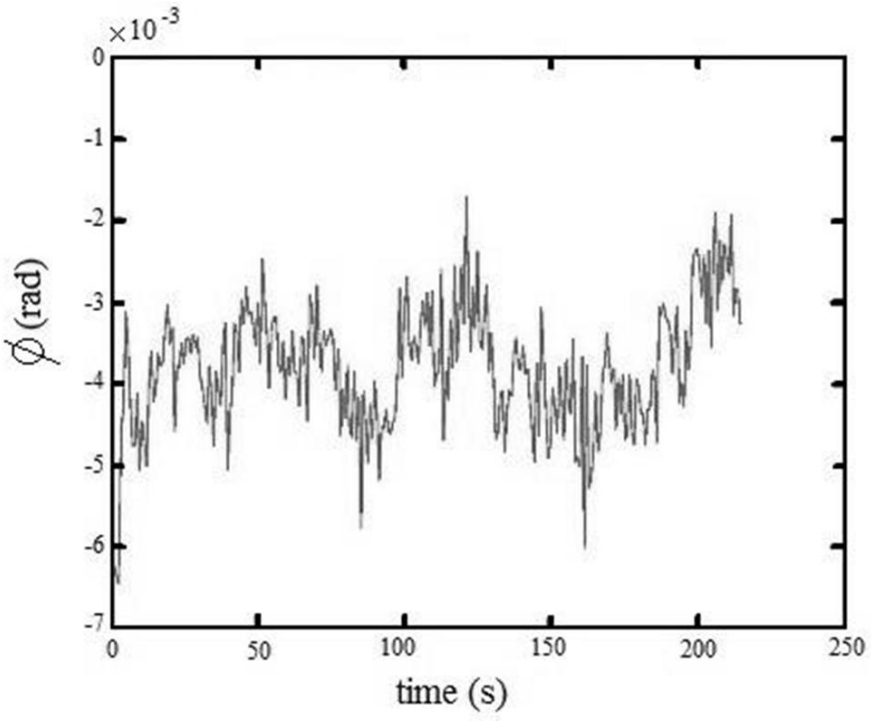


Fig. 13 Variation from $\phi_r = 0$ using adaptive sliding mode controller.

شکل 13 خطا نسبت به $\phi_r = 0$ در اجرای مسیر دلخواه با کنترلر مود لغزشی

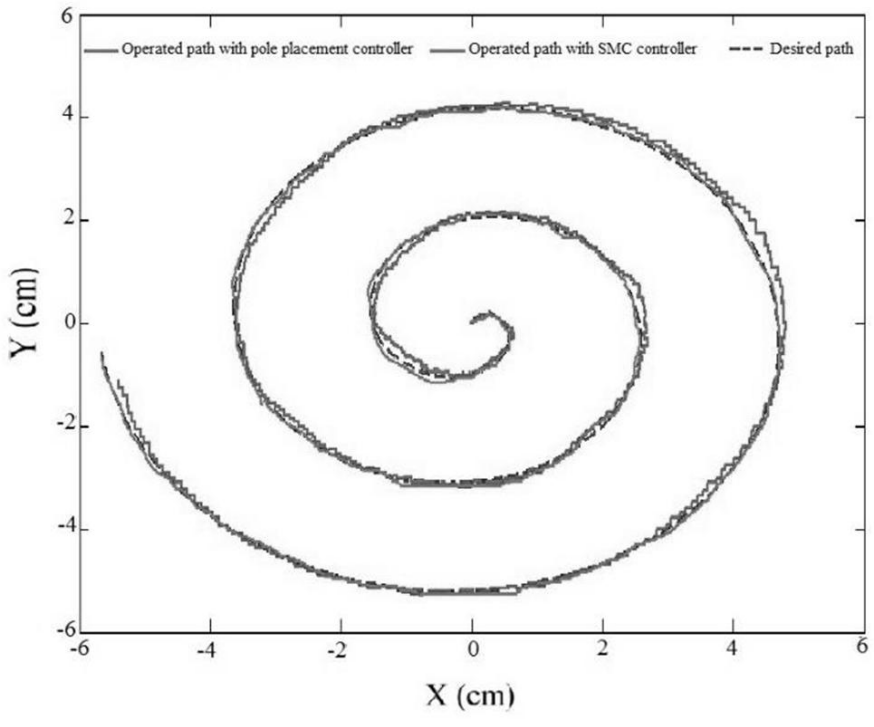


Fig. 14 Comparison between the three control methods

شکل 14 مقایسه عملکرد کنترلر جانمایی قطب و مود لغزشی برای یک مسیر مطلوب

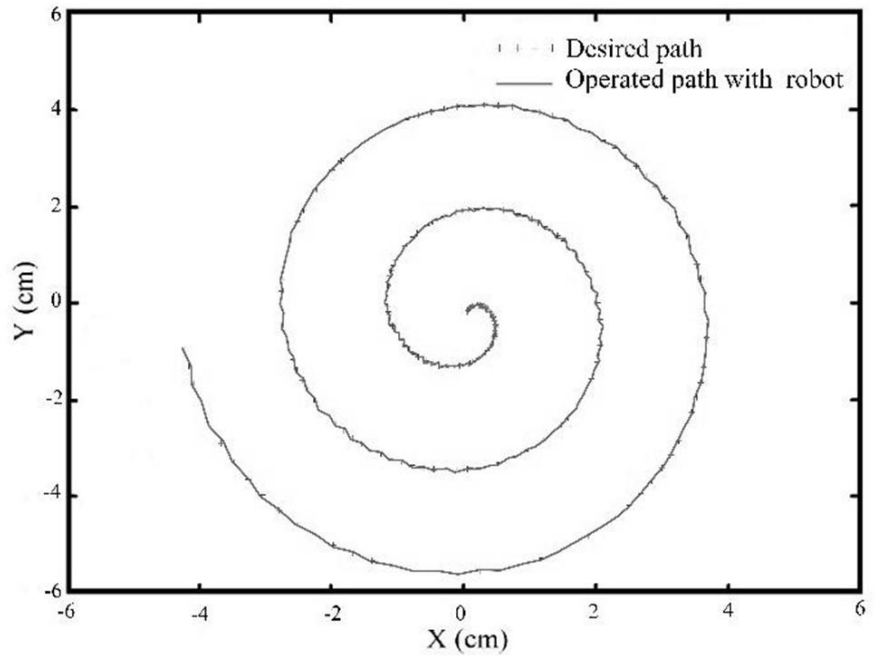


Fig. 11 Comparison of operated and desired path defined in Eq. (39) using Sliding mode controller

شکل 11 مقایسه میان مسیر اجراشده توسط ربات و مسیر دلخواه تعریف‌شده در معادله (39) براساس کنترلر مود لغزشی

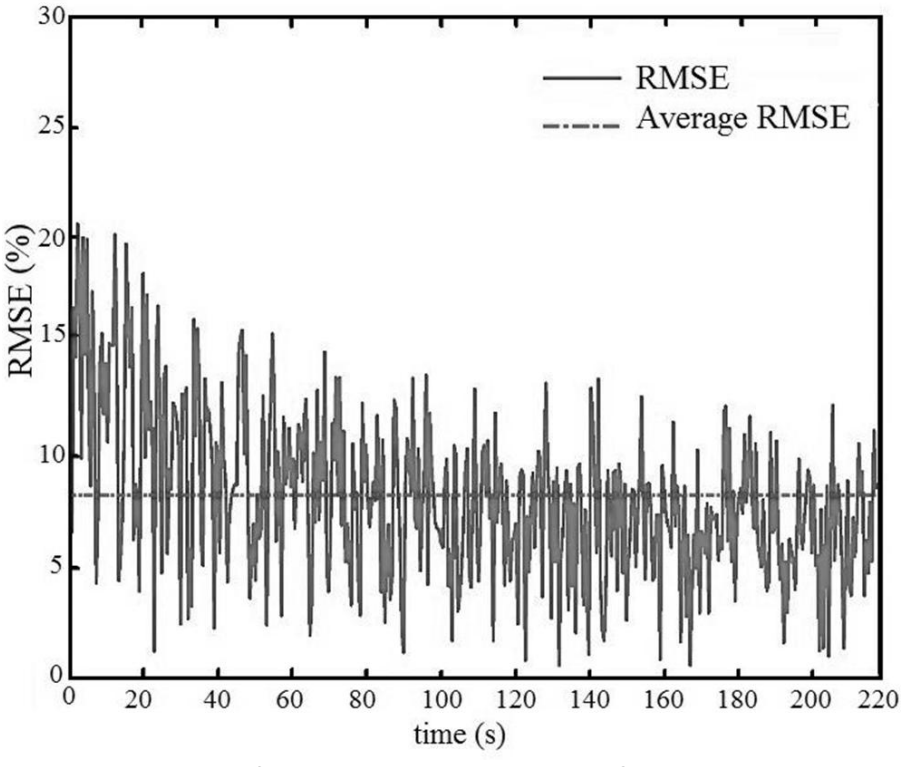


Fig. 12 Trend of Root Mean Square Error for the path presented in Fig. 11

شکل 12 مقادیر جذر میانگین خطای محاسبه‌شده برای مسیر اجراشده در شکل 11 با کنترلر مود لغزشی

5- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

دراین مقاله مدل کنترلی سینماتیکی ربات موازی کابلی صفحه‌ای با قیدهای محدودکننده به کشش کابل مثبت به‌دست آمد. قیدهای معادلات استاتیکی ربات به ایجاد کشش‌های مثبت در سراسر فرآیند کنترل نوشته شدند. برای اندازه‌گیری مکان عملگر نهایی از یک سیستم پردازش تصویر استفاده شد و الگوریتم عملکردی آن ارائه شد.

نحوه ارتباط میان ربات و سایر اجزا الگوریتم کلی کنترل براساس موقعیت عملگر نهایی توضیح داده شد، همچنین دو کنترلر متفاوت بر مدل حاصل پیاده‌سازی شد و خروجی‌ها مقایسه شدند. در گام نخست کنترلر جانمایی قطب روی مدل پیاده شدند که با توجه به وجود نامعینی به خوبی عمل نکرد. خطای تعقیب مسیر در آغاز اجرای مسیر بسیار بالا بود. در ادامه با پیاده‌سازی کنترلر مود لغزشی خروجی‌های بهتری برای کنترل ربات حاصل گشت. خطا در حدود 4درصد به‌صورت میانگین کاهش یافت. تأثیرات نامعینی‌های سیستم بسیار کمتر شدند و مقدار خطا در ابتدای پیاده‌سازی مسیر بسیار کمتر شد. البته این کنترلر در مقابل پدیده نوسانات نخستین از خود ضعف نشان داد.

در جدول 1 مقایسه میان عملکرد این دو روش برای ورودی پله ارائه شده است و همچنین می‌توان خروجی حاصل از دو کنترلر را برای یک مسیر مطلوب در شکل 14 مشاهده کرد. در ادامه این مقاله پیاده‌سازی این مدل‌های کنترلی براساس دینامیک و همچنین استفاده از کنترلر براساس مدل پیشبین پیشنهاد می‌شود.

6- مراجع

[1] P. Dewdney, M. Nahon, and B. Veidt, *"The Large Adaptive Reflector: A Giant Rradio TelescopeWith An Aero Twist"*, Canadian aeronautics and space journal, vol. 48, no. 4, pp. 239–250, 2002.

[2] P. Bosscher, A. T. Riechel, and I. Ebert-Upho_ 'The NIST Robocrane," *Journal of Robotic Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 709-724, 1993.

[3] M. Fang, S. Mielczarek, S. Verhoeven, R. Franitza, D. Hiller, Workspace, Design, Analysis and Realization of Tendon-based Parallel Manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 4, pp. 429–445, 2005.

[4] A. Kawamura, M. Sadao and S. Kino, Hitoshi and "High-speed Manipulation By Using Parallel Wire-driven Robots", *Journal of Robotica, Cambridge*, vol. 18, no. 01, pp 13-21, 2000.

[5] H. D. Taghirad; A. Khalilpour; M. Aliyari; M.T. Masouleh "Appling Evolutionary Algorithms in Multi objective Optimization of Planar Cable-driven Parallel Robots" *Modares Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 44-54, 2014. (in Persian فارسی)

[6] S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka, and S. R. Pandian. Development of an Ultrahigh Speed Robot Falcon Using Wire Drive System. In *International Conference on Robotics and Automation*, Proceedings of IEEE, vol.1, no.1, pp. 215–220, 1995.

[7] Heyden, Thomas, and Christoph Woernle. "Dynamics and Flatness-based Control of a Kinematically Undetermined Cable Suspension Manipulator." *Multibody System Dynamics*, vol.16, no.2, pp.155-177, 2006.

[8] T. Maier, C Woernle, Dynamics and Control of a Cable Suspension Manipulator, The 9th German Japanese Seminar for Nonlinear Problems in Dynamical Systems, Germany ,pp. 95-100, 2000.

[9] Roberts, Rodney G., Todd Graham, and Thomas Lippitt. "On The Inverse Kinematics, Statics, and Fault Tolerance of Cable-Suspended Robots" Journal of Robotic Systems, vol.15, no.10, pp.581-597, 1998.

[10] R. L. Williams and P. Gallina. Planar Cable-direct-driven Robots, part i: Kinematic and Statics. In Proceedings of the 2001 ASME Design Technical Conference, 27th Design Automation Conference, no.26, pp.178-186, 2001.

[11] A.Z. Loloei, and H.D. Taghirad,"Cable Driven Parallel Robots: Kinematics, Dynamics and Control", *Journal of Control*, vol.9, no.6, pp. 25-34, 2014. (in Persian فارسی)

[12] Bamdad, M., and S. Faroghi. "Stability Measure For a Paralle Cable Driven Robot." *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 65-69, 2014. (in Persian فارسی)

[13] Moharam Habibnejad Korayem, Khaled Najafi, Mehdi Bamdad "Determining Maximum Dynamic Load Carrying Capacity of Cable Robots Between Two End Points of Workspace", *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, vol.1, no.1, pp.148-159, 2009.

[14] Shiang, W. J., Cannon, D., & Gorman, J. ,Dynamic Analysis of the Cable Array Robotic Crane, *In Robotics and Automation, IEEE* ,Vol. 4, no.19, pp. 2495-2500, *1999*..

[15] Pusey, Jason, et al. Design and workspace analysis of a 6–6 cable-suspended parallel robot, *Mechanism and machine theory* Vol.39, no.7, pp. 761-778, 2004.

[16]] F. Hamid ,R. Farid, M. Khooran, Time Optimal Trajectory Tracking of Redundant Planar Cable-Suspended Robots Considering Both Tension and Velocity Constraints, *American Society of Mechanical Engineers*, vol. 133, no. 1, pp. 4–11, 2011.

[17] M. Habibnejad and H. Tourajizadeh, Maximum DLCC of Spatial Cable Robot For a Predefined Trajectory Within The Workspace Using Closed Loop Optimal Control Approach, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, springer, vol. 44, no. 7, pp. 75–99, 2011.

[18] A. Trevisani Underconstrained Planar Cable-direct-driven Robots: A Trajectory Planning Method Ensuring Positive and Bounded Cable Tensions, *Elsevier Publication*, vol. 20, no. 1, pp. 113–127, 2010.

[19] F. Hamid, R.Farid, Minimum-time Trajectory Planning of Spatial Cable-suspended Robots Along a Specified Path Considering Both Tension and Velocity Constraints, *Engineering Optimization, Taylor & Francis*, vol. 42, no. 4, pp. 387–402, 2010.

[20] C. Gosselin, "Global Planning of Dynamically Feasible Trajectories For Three-DoF Spatial Cable-suspended Parallel Robots, *Springer*, vol. 4, no. 12, pp. 47-59, 2013.

[21] Shao, Zhu-Feng and Tang, Xiaoqiang and Yi, *Wangmin* ,Optimal Design of a 3-DOF Cable-Driven Upper Arm Exoskeleton, *Advances in Mechanical Engineering, Hindawi Publishing Corporation, sage publication*, vol. 12, no. 3, pp. 12-27, 2014.

[22] M. A. Khosravi, H. D. Taghirad and R. Oftadeh, A Positive Tensions PID Controller For a Planar Cable Robot: An Experimental Study, *International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 325–330, 2013.

[23] Babaghasabha, Reza, Mohammad A. Khosravi, and Hamid D. Taghirad. "Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots." *Journal of Mechatronics*, vol. 8, no. 2, pp. 27-36, 2015.

[24] H. D. Taghirad, M. A. Khosravi ,Dynamic Modeling and Control of Parallel Robots with Elastic Cables: Singular Perturbation Approach, *In IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 3, pp. 463–474, 2014.

[25] Cheng-Dong, Li, et al, Inverse control of cable-driven parallel mechanism using type-2 fuzzy neural network, *Acta Automatica Sinica* vol. 36, no. 3, pp. 459-464, 2010.

[26] TaarLab Laboratory website, *Cable-driven Parallel Manipulators*, http://taarlab.com/en/research/cable-driven_parallel_manipulators، 4/15/2015.

[27] M. Arno, Characterization and Modeling of a Dynamixel Servo. *Msc thesis in Electrical Engineering, Control Engineering department, University of Twente*, Netherlands, 2008.

[28] Williams Ii, Robert L., and Paolo Gallina, Translational planar cable-direct-driven robots, *Journal of Intelligent and Robotic systems*, vol. 37, no. 1, pp. 69-96, 2003.

[29] Williams, Robert L., and Paolo Gallina, Planar cable-direct-driven robots: design for wrench exertion, *Journal of intelligent and robotic systems*, vol. 35, no. 2, pp. 203-219, 2002.

[30] C. Harry H and T. Dung "Web-based Interactive Analysis and Animation of Mechanisms," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 84–90, 2006.

[31] F. Lewis, A. Chaouki, T. Dawson, M. Darren, Control of Robot Manipulators, *Macmillan, New York*, vol. 236, no.1, , pp. 23-49, 1993.

[32] H. Bayani, M. T. Masouleh, A. Karimi, P. Cardou, and M. Ebrahimi "*On The Determination of The Maximal Inscribed Ellipsoid in The Wrench-Feasible Workspace of the Cable-driven Parallel Robots.*" International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), pp. 422-427, 2014.

[33] Parvin, B., Taylor, J. R., Callahan, D. E., Johnston, W. E., & Dahmen, U. "Visual Servoing For Online Facilities". *IEEE Computer Society*, vol. 30, no.7, pp. 56-62 , 1997.

[34] A. Bose, *Computer Vision and Human Activity Recognition*,

[35] G.R. Arce, "*Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach*", Wiley:New Jersey, USA, 2005.

[36] Goodwin, G. C., Graebe, S. F., & Salgado, M. E. "Control System Design" *Prentice Hall, Upper Saddle River* , vol. 240, no. 15, pp. 1241-1256, 2001.

[37] S. Eduardo, Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems. *2nd Edition, Springer publication, Netherlands*, ISBN 0-387-984895, 1998.

[38] H. K. Khalil, Nonlinear Systems, *2nd Edition, McMillan, New York*, 1998.