



عیب یابی روبات موازی 3-پی‌اس‌پی با استفاده از روش آنالیز مولفه‌های اصلی

امیر رضائی¹، علیرضا اکبرزاده^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 * مشهد، صندوق پستی 9177948974، ali_akbarzadeh@um.ac.ir

چکیده

در این مقاله، از روش آنالیز مولفه‌های اصلی موسوم به روش پی‌اس‌پی برای تعیین حالت معیوب ربات موازی 3-پی‌اس‌پی استفاده شده است. این روش یک روش آماری محسوب می‌شود که در آن تعدادی متغیر همبسته به مجموعه‌ای کوچک‌تر از متغیرهای ناهمبسته منتقل می‌شود. از یک مدل پی‌اس‌پی می‌توان برای تعیین حد آستانه آماری و همچنین مربع خطاهای پیش‌بینی مشاهدات جدید، به‌منظور بررسی وجود عیب در ربات استفاده کرد. برای بررسی کارایی این روش به‌منظور عیب‌یابی ربات، یک کنترلر غیرخطی با استفاده از مدل غیرخطی دینامیکی سیستم برای ربات طراحی شده است. این روش موسوم به روش کنترل گشتاور محاسبه شده می‌باشد. در این روش، از مدل دینامیک معکوس ربات در حلقه بازخورد کنترلی برای خطی‌سازی و خنثی‌سازی دینامیک سیستم استفاده شده و همچنین از مدل دینامیک مستقیم بجای مدل واقعی ربات در حلقه کنترلی استفاده می‌شود. در این مقاله، دو عیب به‌صورت مصنوعی به مدل شبیه‌سازی شده‌ی ربات اعمال گردیده و اثرات ناشی از این عیوب بر روی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. این عیوب شامل عیب در ولتاژ ورودی سروو موتورها یا سروو درایوها و عیب در سنسورهای مکان یا عیوب مربوط به لقی اتصالات می‌باشند. با اعمال این دو عیب به مدل کنترلی ربات در طی یک مسیر حرکتی، خروجی‌های سیستم برای حالت‌های بدون عیب و معیوب با هم مقایسه شده و عیب‌یابی برای ربات با استفاده از روش پی‌اس‌پی انجام شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 12 دی 1393
 پذیرش: 04 بهمن 1393
 ارائه در سایت: 25 بهمن 1393
 کلید واژگان:
 عیب یابی
 آنالیز مولفه‌های اصلی
 ربات موازی
 مربع خطای پیش‌بینی
 کنترل گشتاور محاسبه شده

Fault detection of the 3-PSP parallel robot using the principal components analysis method

Amir Rezaei, Alireza Akbarzadeh*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
 * P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran, ali_akbarzadeh@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 02 January 2015
 Accepted 24 January 2015
 Available Online 14 February 2015

Keywords:

Fault detection
 Principle component analysis
 Parallel robot
 Square prediction error
 Computed torque control

ABSTRACT

In this paper, a multivariate statistical method called Principal Components Analysis, PCA, is utilized for detection faults in a 3-PSP parallel manipulator. This statistical method transfers original correlated variables into a new set of uncorrelated variables. PCA method can be used to determine the thresholds of statistics and calculate square prediction errors of new observations for checking the system when a fault occurs in the robot. To investigate the ability of the PCA method for fault detection of the robot, a nonlinear model-based controller called Computed Torque Control, CTC, is designed. In this control scheme, rigid-body inverse dynamics model of the robot is utilized to linearize and cancel the nonlinearity in the controlled system. Also, instead of using the robot prototype model, direct dynamics of the robot is used in the robot-control system. In this paper, two faults are artificially applied to the robot-control system. These two faults consist of faults in servo drive or servo motors and faults in joints clearances or position sensors. Finally, these faults are applied on the robot throughout a desired end-effector trajectory and the resultant outputs are obtained for both with and without faults in the manipulator. Consequently, the desired and faulty outputs are compared and fault detection using PCA method for the robot is performed.

1- مقدمه

معمولاً ربات‌ها به منظور انجام کارهای پرخطر و یا برای کار در مکان‌های غیرقابل دسترسی طراحی و استفاده می‌شوند تا باعث صرفه‌جویی در زمان، کاهش ریسک و هزینه‌های انجام کار گردند. ربات‌ها به دلیل فرآیند پیچیده‌ی به کار رفته در ساخت و تولیدشان، مستعد به‌وجود آمدن عیوبی در ساختار و یا عملکردشان می‌باشند. این عیوب در سیستم نرم‌افزار یا سخت‌افزار ربات‌ها می‌توانند بروز یابند. بنابراین، یافتن عیوب و بررسی تاثیر هر عیب در عملکرد

ربات، نقش اساسی و مهمی را در نحوه‌ی عملکرد آن بازی می‌کند. در سالیان اخیر، با رشد روزافزون کاربرد ربات‌ها در صنایع مختلف و همچنین نیاز به دست‌یافتن به دقت‌های بالا برای انجام امور گوناگون، بحث عیب‌یابی در سیستم‌های رباتیکی موضع بسیاری از تحقیقات در دنیا قرار گرفته است [1-3]. در یک سیستم رباتیکی، منابع زیادی برای ایجاد خطا وجود دارد، از قبیل خطاهای مکانیکی، الکترونیکی، الکتریکی و سیستم‌های کنترلی آن‌ها. در سیستم‌های رباتیک، معمولاً مرزی برای دقت در ربات‌ها نظر گرفته می‌شود.

Please cite this article using:

A. Rezaei, A. Akbarzadeh, Fault detection of the 3-PSP parallel robot using the principal components analysis method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 419-430, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Rezaei, A. Akbarzadeh, Fault detection of the 3-PSP parallel robot using the principal components analysis method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 419-430, 2015 (In Persian)

این حرکتی اعمال گردیده و خروجی‌های سیستم برای حالت‌های بدون عیب و معیوب با هم مقایسه و عیب‌یابی برای ربات انجام شده است.

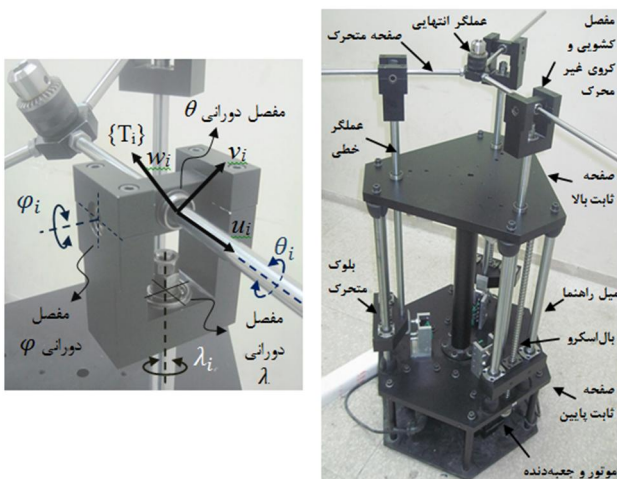
2- توصیف ساختار ربات موازی 3-پی‌اس‌پی

در شکل 1، مدل واقعی ربات موازی 3-پی‌اس‌پی نمایش داده شده است. این مکانیزم، یک ربات موازی کامل بوده که صفحه متحرک⁹ آن سه درجه آزادی در فضا داشته و به شکل یک ستاره سه پر متقارن¹⁰ موسوم به ستاره متحرک¹¹ و دو صفحه ثابت¹² می‌باشد. هر پره ستاره متحرک با پره دیگر زاویه 120 درجه می‌سازد. دو صفحه ثابت بالایی و پایینی، توسط دو میل راهنما و یک بال‌اسکرو¹³ برای هر بازو، به یکدیگر متصل بوده و نسبت به هم ثابت می‌باشند. همچنین موتورها به صفحه پایینی متصل بوده و صفحه ثابت بالایی نقش راهنمای عملگرهای خطی را ایفا می‌کند. ستاره متحرک و صفحات ثابت بوسیله سه بازوی همسان موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. هر کدام از این بازوها به ترتیب شامل یک مفصل کشویی محرک¹⁴، یک مفصل کروی¹⁵ و یک مفصل کشویی غیرمحرک¹⁶ می‌باشند (شکل 1 را نگاه کنید). بنابراین ستاره متحرک توسط سه بازوی همسان با ساختار پی‌اس‌پی به صفحات ثابت متصل بوده که در مجموع این مکانیزم شامل سه حلقه سینماتیکی موازی بوده که ربات موازی 3-پی‌اس‌پی را تشکیل می‌دهند. برای این ربات، سه سیستم انتقال قدرت که مستقل نسبت به هم عمل می‌کنند در نظر گرفته شده که هر مجموعه به صورت موتور و گیربکس، بال اسکرو و یک بلوک متحرک¹⁷ که توسط بال اسکرو به حرکت واداشته می‌شود، طراحی شده است [17-19]. از کاربردهای این ربات می‌توان به استفاده آن در سیستم جهت‌دهی آنتن‌های ماهواره، شبیه‌ساز حرکت در فضا و اسپیندل یک ماشین فرز کنترل عددی نام برد. در مرجع [18] کاربردهای مختلف و مدهای حرکتی این ربات به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 2، بردارهای مکان، مختصه‌های حرکتی و دستگاه‌های مختصات اصلی و محلی برای ربات 3-پی‌اس‌پی را نمایش می‌دهد. برای این منظور،

این مرز می‌تواند توسط طراح یا کاربر نهایی¹ تعیین شود. به عبارت دیگر، کاربر می‌تواند برای آستانه خطای مجاز در ربات مرزی را در نظر بگیرد. هر چند این کار مشکلی بوده و اشتباه در تعیین مرز خطا می‌تواند سیستم را دچار آسیب دیدگی کرده و عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار دهد [5,4].

سیستم‌های رباتیکی، سیستم‌هایی با تعداد بالایی متغیر محسوب می‌شوند. وقتی از یک روش کنترل فرآیند آماری کلاسیک² یک متغیره³ برای کنترل یک سیستم چند متغیره⁴ استفاده می‌شود، معمولاً به دلیل همبسته شدن متغیرهای فرآیند، نتایج دقیقی حاصل نمی‌شود [6]. به منظور رفع این مشکل، می‌توان از کنترل فرآیند آماری چندمتغیره⁵ استفاده کرد. با استفاده از این روش، می‌توان روابط بین متغیرهای سیستم را با توجه به پایگاه داده‌های تاریخی سیستم شناسایی و روند کلی سیستم را محاسبه کرد. حال وقتی عیب یا مشکلی در سیستم ایجاد شود، ساختار هم‌پراکنش⁶ سیستم دچار تغییرات می‌شود. با این روش می‌توان عیوب بوجود آمده در سیستم را شناسایی نمود. کنترل فرآیند آماری چندمتغیره و به طور خاص آنالیز مولفه‌های اصلی یا به اختصار پی‌اس‌پی⁷ به منظور پیدا کردن عیوب سیستم استفاده می‌شوند. با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی، می‌توان تعداد زیادی متغیر مستقل همبسته را با تعداد محدودی متغیر مستقل جدید که مولفه‌های اصلی نامیده می‌شوند و ناهمبسته‌اند، جایگزین نمود. به این ترتیب، نه تنها بعد مساله تقلیل می‌یابد، بلکه مساله چند هم‌خطی پیش نمی‌آید. یکی از مزایای این روش، این است که می‌توان تمام متغیرهای سیستم را به صورت ورودی برای مدل عیب‌یابی پی‌اس‌پی تعریف کرد. جکسون در [7] آنالیز مولفه‌های اصلی را به عنوان ابزار کنترل فرآیند آماری چند متغیره مورد مطالعه قرار داد. این روش، برای تبدیل یک فضای اندازه‌گیری چند بعدی به یک فضا با ابعاد به مراتب کمتر استفاده می‌شود [8,6]. بنابراین، پی‌اس‌پی برای دو منظور کنترل فرآیند آماری چندمتغیره و همچنین عیب‌یابی مورد مطالعه قرار گرفته است [10,9]. با توجه به قابلیت‌ها و برتری‌های روش پی‌اس‌پی، این روش می‌تواند بعنوان یک روش رایج در عیب‌یابی سیستم‌های مختلف از قبیل سیستم‌های تهویه مطبوع، چیلرها و پمپ‌ها، سیستم تصفیه فاضلاب و سیستم‌های دینامیکی غیرخطی استفاده گردد [11-16].

انجام آزمایش روی یک ربات با تغییر پارامترهای آن و اندازه‌گیری معیارهای عملکرد ربات، کاری سخت، زمان‌بر و پرهزینه تلقی می‌شود. برای کاهش این مشکلات، می‌توان از مدل سیستم بهره گرفته و با استفاده از شبیه‌سازی، به انجام آزمایش‌های مختلف روی ربات پردازیم. در این مقاله، از روش آنالیز مولفه‌های اصلی برای تعیین حالت معیوب ربات موازی 3-پی‌اس‌پی استفاده شده و فرآیند عیب‌یابی به کمک این روش توضیح داده شده است. برای این منظور، ابتدا ساختار ربات موازی 3-پی‌اس‌پی معرفی و دینامیک ربات با استفاده از روش متعامد تکمیلی طبیعی مدل گردیده است. همچنین با استفاده از مدل دینامیک ربات و روش کنترل گشتاور محاسبه شده، یک مدل کنترلر غیرخطی برای ربات طراحی شده که از آن به عنوان بستری برای مدل‌سازی عیوب متداول سیستم و عیب‌یابی ربات با استفاده از روش آنالیز مولفه‌های اصلی استفاده گردیده است. سپس، دو عیب متداول در سیستم‌های رباتیکی، به مدل شبیه‌سازی شده ربات در طی یک مسیر



شکل 1 مدل واقعی و مفصل کروی-کشویی غیرمحرک ربات موازی 3-پی‌اس‌پی

- 9- Moving platform
- 10- Tripetalous star
- 11- Moving Star (MS)
- 12- Fixed base
- 13- Ball screw
- 14- Active prismatic joint
- 15- Spherical joint
- 16- Passive prismatic joint
- 17- Moving block (Nut)

- 1- End-user
- 2- Classical Statistical Process Control (CSPC)
- 3- Univariate control charts
- 4- Multivariate system
- 5- Multivariate Statistical Process Control (MSPC)
- 6- Covariance
- 7- Principal Component Analysis (PCA)
- 8- The 3-PSP parallel robot

روابط تمامی مختصه‌های حرکتی مربوط به اتصالات عملگر یا مستقل و همچنین اتصالات غیرعملگر یا وابسته ظاهر خواهند شد. این مختصه‌های حرکتی در رابطه (1) تعریف شده‌اند. با توجه به شکل 2، می‌توان ماتریس‌های انتقال و دوران برای هر عضو را بدست آورد. سپس با استفاده از این ماتریس‌ها، ماتریس عمومی انتقال برای زنجیره‌های سینماتیکی ربات را محاسبه کرد. ماتریس عمومی انتقال برای زنجیره‌های سینماتیکی اول، دوم و سوم که دستگاه مختصات {P} را به دستگاه مختصات {B} منتقل می‌کند، و حاصل-ضرب ماتریس‌های انتقال و دوران اعضای این زنجیره‌ها می‌باشند را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد

$${}^{B_i}P_T \text{Branch} \# i = {}^{B_i}T \quad {}^{B_i}T \quad {}^{B_i}T \quad {}^{T_i}T \quad {}^{T_i}T \quad {}^{T_i}T \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

و در آن

$${}^{B_i}P_T \text{Branch} \# i = \begin{bmatrix} R_i & B_i t_i \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

می‌توان از دستگاه مختصات {B} توسط هر کدام از سه ماتریس عمومی انتقال تعریف شده در رابطه (2) به دستگاه مختصات {P} رسید. بنابراین، باید مقادیر بردار انتقال و دوران از هر سه ماتریس عمومی انتقال با هم برابر باشند. با برابر قرار دادن پارامترهای انتقال و دوران این سه ماتریس عمومی انتقال، می‌توان به یک سری قید موقعیتی³ و قید جهتی⁴ رسید. همانگونه که می‌دانیم، با برابر قرار دادن دو ماتریس عمومی انتقال، می‌توان به شش معادله رسید. از آنجایی که برای ربات سه ماتریس عمومی انتقال وجود داشته و ربات دارای دو حلقه سینماتیکی مستقل است، بنابراین می‌توان دو رابطه ماتریسی برای تساوی این سه ماتریس به صورت دو به دو نوشت. با این کار، 12 معادله قید مستقل از هم بدست خواهد آمد. معادلات مربوط به قیدهای سینماتیکی ربات بر اساس مختصه‌های سینماتیکی تعریف شده برای ربات بیان می‌شوند [20]. این معادلات، یک دستگاه معادلات جبری غیرخطی شامل 12 معادله و 12 مجهول را تشکیل می‌دهند که می‌توان آنها را به صورت زیر نوشت

$$\varphi(q)_{12 \times 1} = 0 \quad (4)$$

4- تحلیل دینامیک در فضای اتصالات برای ربات 3-پی‌اس‌پی

روش‌های متفاوتی از جمله روش نیوتن-اولبر، روش لاگرانژ و روش کارمجازی برای تحلیل دینامیک ربات‌ها معرفی شده است. در این مقاله، برای تحلیل دینامیک ربات موازی 3-پی‌اس‌پی از روش متعامد تکمیلی طبیعی⁵ یا به اختصار آن -آسی⁶ استفاده شده است [20, 21]. این روش توسط ما⁷ و انجلس در سال 1991 معرفی شد [22]. با استفاده از این روش، موقعیت، سرعت و شتاب تمامی مفاصل بدست آمده و با ترکیب آن با روش لاگرانژ، معادلات دینامیکی ربات برحسب مختصات مفصل‌های محرک و غیرمحرک بیان می‌شود. در حقیقت هدف از حل دینامیک یک ربات بدست آوردن معادلات دیفرانسیل حرکت ربات بوده که به صورت زیر بیان می‌شوند

$$F^{ac} = M(q)\ddot{q}^{ac} + C(q, \dot{q})\dot{q}^{ac} + G(q) \quad (5)$$

که در آن، F^{ac} بردار نیروی عملگرها و \dot{q}^{ac} و $\ddot{q}^{ac} = [\dot{q}_1^{ac}, \dot{q}_2^{ac}, \dot{q}_3^{ac}]^T$ بردارهایی شامل مقادیر سرعت و شتاب تمامی عملگرهای خطی ربات هستند. ماتریس‌های معرفی شده در معادله (5) بصورت زیر بدست آورده می‌شوند

$$M(q) = T^T M_{total} T \quad (6)$$

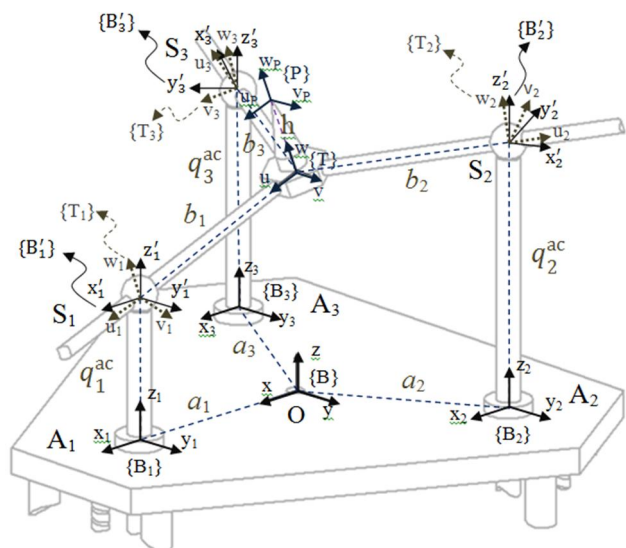
دستگاه مختصات ثابت {B} متصل به نقطه 0 و در وسط صفحه ثابت بالایی تعریف شده است. همچنین دستگاه متحرک {T} نیز متصل به نقطه T و در وسط ستاره متحرک قرار داده شده است. سه بردار مکان q_i^{ac} بیانگر طول هر کدام از عملگرهای خطی می‌باشند. همچنین مکان عملگر نهایی ربات 1، نقطه T، و مکان نوک ابزار 2، نقطه P، در دستگاه مختصات {B} به ترتیب با دو بردار $B^t p$ و $B^t p$ بیان می‌شوند. سه بردار مکان a_i نیز مرکز دستگاه {B} را به مکان عملگر خطی i ام در گوشه صفحه مثلث شکل ثابت بالایی، متصل می‌کند. بعلاوه، بردار مکان h نیز نقاط T و P را به یکدیگر متصل کرده و اندازه آن، h ، نیز بیانگر طول ابزار است. سه بردار مکان b_i نیز نقطه T را به i امین مفصل کروی متصل کرده و اندازه آن بیانگر طول هر کدام از شاخه‌های ستاره متحرک، b_i ، است. دستگاه‌های مختصات محلی $\{B_i\}$ ، $\{T_i\}$ و $\{B_i\}$ نیز به ترتیب در نقاط A_i و S_i تعریف می‌شوند که $\{T_i\}$ یک دستگاه مختصات متحرک و متصل به اتصال کروی S_i می‌باشد.

با توجه به این‌که می‌توان یک مفصل کروی را با سه مفصل دورانی ساده معادل گرفت، بنابراین در مجموع، ربات موازی 3-پی‌اس‌پی شامل 15 مفصل یک درجه آزادی خواهد بود که برای هر کدام از این مفاصل یک مختصه حرکتی می‌توان تعریف نمود. با توجه به شکل‌های 1 و 2 می‌توان مختصه‌های عمومی مربوط به تمامی مفاصل ربات را به صورت زیر نوشت

$$q_{15 \times 1} = [q_{3 \times 1}^{ac} \quad q_{12 \times 1}^{un-ac}] = [q_1^{ac}, q_2^{ac}, q_3^{ac}, \theta_1, \varphi_1, \lambda_1, \theta_2, \varphi_2, \lambda_2, \theta_3, \varphi_3, \lambda_3, b_1, b_2, b_3]^T \quad (1)$$

3- تحلیل سینماتیک ربات موازی 3-پی‌اس‌پی

همان‌گونه که گفته شد، این ربات دارای 15 مختصه حرکتی می‌باشد. نظر به اینکه این ربات دارای 3 درجه آزادی بوده (تعداد مختصه‌های مستقل ربات)، بنابراین برای حل سینماتیک ربات نیاز به 12 معادله قید است (به تعداد مختصه‌های وابسته ربات). یکی از روش‌های بدست آوردن این معادلات قید، نوشتن ماتریس عمومی انتقال از دستگاه {B} به دستگاه {P} است. در این



شکل 2 مختصه‌های حرکتی، بردارهای مکان برای یکی از زنجیره‌های سینماتیکی و تعریف دستگاه‌های مختصات اصلی و محلی ربات موازی 3-پی‌اس‌پی

3- Position constraints
4- Orientation constraints
5- Natural Orthogonal Complement (NOC)
6- NOC
7- Ma

1- End-effector
2- Tool tip

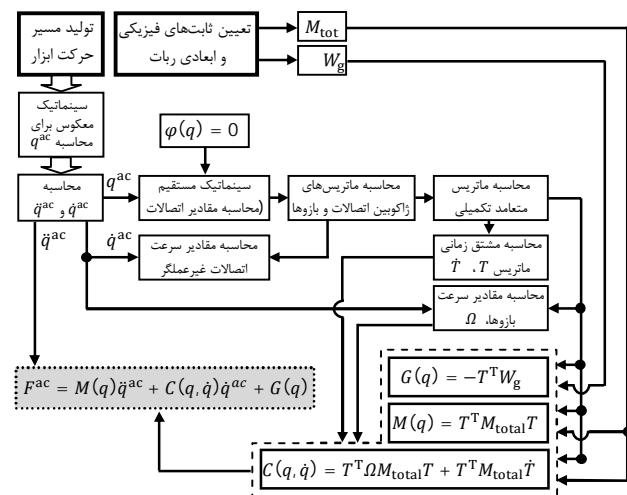
\ddot{q}^{ac} است را برای مرحله بعدی، مرحله 1، بدست آورد. با داشتن مقادیر \ddot{q}^{ac} در مرحله 1 و با انتگرال‌گیری عددی، می‌توان مقادیر مکان و سرعت عملگرهای خطی در مرحله 1 را بدست آورد. انتگرال‌گیری عددی به روش ODE45 در جعبه ابزار سیمولینک³ نرم‌افزار متلب⁴ انجام گردیده است. الگوریتم حل دینامیک مستقیم ربات در شکل 5 نمایش داده شده است.

5- کنترل ربات موازی 3-پی‌اس‌پی

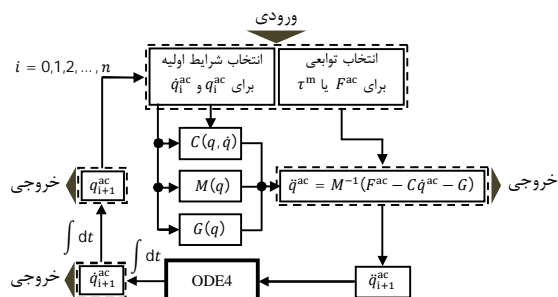
روش‌های کنترل ربات را می‌توان با توجه به نوع طراحی به دو دسته اصلی تقسیم کرد: کنترل برپایه مدل⁵ و کنترل غیرمبتنی بر مدل⁶. به روش‌های کنترلی که به مدل دینامیکی ربات نیازمندند، کنترل برپایه مدل گفته

جدول 1 مقادیر تعیین شده برای پارامترهای ابعادی و فیزیکی ربات

اندازه بردار OA_i	m	0/181
طول ابزار	m	0/080
جرم بلوک‌های متحرک	kg	9
جرم مفاصل کروی	kg	0/01
جرم ستاره متحرک	kg	4
اینرسی بلوک‌های متحرک	kgm ²	diag(0/003, 0/39, 0/3294)
اینرسی مفاصل کروی	kgm ²	diag(0/01, 0/01, 0/12) × 10 ⁻³
اینرسی ستاره متحرک	kgm ²	diag(0/6451, 1/290, 0/6451)



شکل 4 الگوریتم حل دینامیک معکوس ربات 3-پی‌اس‌پی به روش این-آسی



شکل 5 الگوریتم حل دینامیک مستقیم ربات 3-پی‌اس‌پی

$$C(q, \dot{q}) = T^T \Omega M_{total} T + T^T M_{total} \dot{T}$$

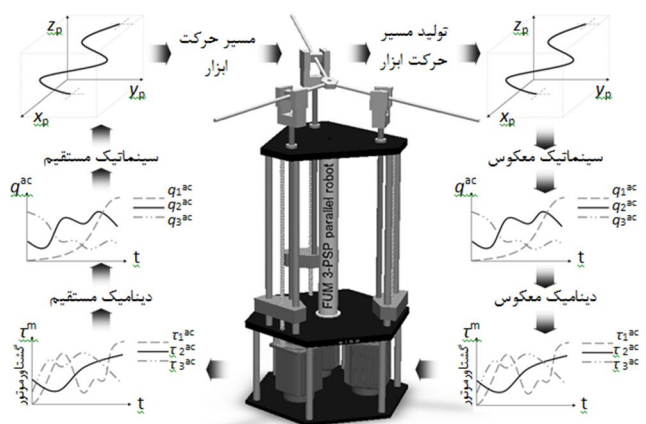
$$G(q) = -T^T W_g$$

که در آن $M(q)$ ماتریس معین مثبت اینرسی و ماتریس M_{total} شامل پارامترهای مربوط به جرم و اینرسی هر کدام از لینک‌های ربات است. ماتریس $G(q)$ ترم مربوط به جاذبه بوده که در آن بردار W_g شامل وزن‌های هر کدام از لینک‌ها است. ماتریس $C(q, \dot{q})$ شامل نیروهای کوریولیس و جانب مرکزی می‌باشد که در آن ماتریس Ω شامل سرعت زاویه‌ای لینک‌ها و نیز ماتریس‌های T و \dot{T} به ترتیب ماتریس‌های این-آسی و مشتق آن نسبت به زمان هستند که ماتریس T شامل ابعاد و معادلات قید مربوط به ربات است. اکنون بسته به اینکه ورودی‌های مسئله چه خواهد بود، معادلات دینامیک ربات، معادله (5)، به دو صورت قابل حل است. اگر ورودی‌ها، مسیر حرکت ابزار ربات و خروجی‌ها نیروی عملگرها باشند، مسئله دینامیک معکوس¹ و اگر ورودی‌ها نیروی عملگرها یا گشتاور موتورها، τ^m ، و خروجی‌ها مسیر حرکت ابزار باشند، مسئله دینامیک مستقیم² است. در شکل 3، پروسه حل دینامیک معکوس و مستقیم نشان داده شده است.

با حل سینماتیک معکوس و بدست آوردن ماتریس‌های ژاکوبین ربات، و سپس محاسبه سرعت و شتاب عملگرها بر اساس مسیر حرکت مطلوب ابزار، و همچنین با مشخص کردن ابعاد و جرم لینک‌های ربات، تمام مقادیر سمت راست معادله (5) که معادل با گشتاور موتورها است را می‌توان بدست آورد. در شکل 4، مراحل حل و الگوریتم دینامیک معکوس ربات 3-پی‌اس‌پی به روش این-آسی به تفصیل نشان داده شده است. این مراحل قابل تعمیم برای تمامی ربات‌های موازی و سری نیز می‌باشد [23]. در جدول 1، مقادیر ابعادی، اندازه جرم و اینرسی‌های مربوط به اعضای ربات آورده شده است. همچنین برای حل دینامیک مستقیم، با مشخص کردن گشتاورهای اعمالی به موتورها، می‌توان مسیر حرکت ربات را با حل معادله دیفرانسیل (5) مشخص کرد. برای این منظور، می‌توان معادله (5) را به صورت زیر بیان نمود

$$\ddot{q}^{ac} = M^{-1}(F^{ac} - C\dot{q}^{ac} - G) \quad (7)$$

برای گام نخست حل معادله دیفرانسیل بالا، ابتدا شرایط اولیه برای مکان و سرعت، q_0^{ac} و \dot{q}_0^{ac} ، در مرحله صفر را تعیین نموده و با توجه به این امر می‌توان مقادیر ماتریس‌های M ، M^{-1} ، C و G را در مرحله صفر محاسبه نمود. حال با داشتن مقادیر گشتاور موتورها به عنوان ورودی مسئله دینامیک مستقیم، می‌توان طرف چپ معادله (7) را که شامل شتاب عملگرهای خطی،



شکل 3 چرخه حل دینامیک ربات موازی 3-پی‌اس‌پی

3- Simulink
4- Matlab
5- Model base
6- Model free

1- Inverse dynamics
2- Direct dynamics

$$\begin{cases} \alpha = J_t \\ \beta = C_t \dot{\theta}_m + G_t + \tau_f \end{cases} \quad (10)$$

ب) بخش خود تنظیم

$$\tau' = \ddot{\theta}_m^{\text{desired}} + k_v \dot{e} + k_p e \quad (11)$$

که در آن، بردار شتاب دورانی مطلوب موتورها بوده که توسط کاربر تعیین می‌شود. همچنین، k_p و k_v ماتریس‌های 3×3 قطری و به ترتیب شامل مقادیر بهره‌های⁹ مشتقی و تناسبی می‌باشند. مقادیر بهره‌ها با استفاده از روش‌های مختلفی که کارایی مطلوب سیستم را شناسایی می‌نمایند، بدست آورده می‌شوند. این ماتریس‌ها را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود

$$k_v = \text{diag}(k_{v1}, k_{v2}, k_{v3}), \quad k_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}) \quad (12)$$

که در آن، k_{vi} و k_{pi} به ترتیب بهره مشتقی و تناسبی مربوط به موتور i ام ربات می‌باشند. بردارهای e و \dot{e} نیز به ترتیب بردارهای سه‌بعدی شامل مقادیر خطای مکان دورانی موتورها و مشتق این مقادیر بوده و بصورت زیر تعریف می‌شوند

$$e = \theta_m^{\text{desired}} - \theta_m, \quad \dot{e} = \dot{\theta}_m^{\text{desired}} - \dot{\theta}_m \quad (13)$$

اگر ربات دقیق مدل شده باشد، در آن صورت روش گشتاور محاسبه شده می‌تواند تمامی اتصالات را با استفاده از فیدبک خطی دکوپله کند و نتیجه، رهگیری دقیق میسر خواهد بود. برای این منظور، با استفاده از روابط (8) تا (11) و ساده‌سازی آن‌ها، می‌توان رابطه‌ای دکوپله بر حسب خطاها بصورت زیر بدست آورد

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = 0_{3 \times 1} \quad (14)$$

این رابطه، یک دستگاه معادلات دیفرانسیل خطی مرتبه 2 همگن است. برای موتور i ام ربات می‌توان نوشت

$$\ddot{e}_i + k_{vi} \dot{e}_i + k_{pi} e_i = 0 \quad (15)$$

بنابراین روش سی‌تی‌سی این امکان را می‌دهد که خطای دینامیکی به صورت یک معادله‌ی مرتبه 2 خطی با ضرایب ثابت بیان گردد. از آنجا که ماتریس‌های k_p و k_v ماتریس‌های متقارن معین مثبت می‌باشند، پاسخ مقدار e یا همان خطا، به صورت نمایی به صفر نزدیک می‌شود. شکل 6، دیاگرام سیستم کنترل ربات را به روش سی‌تی‌سی نمایش می‌دهد. یکی از بزرگترین معایب روش کنترل گشتاور محاسبه شده، زمان بر بودن محاسبات به دلیل محاسبه ماتریس‌های دینامیکی در فرآیند حل است.

بنابراین، برای کنترل یک ربات واقعی با استفاده از این روش، باید ماتریس‌های

می‌شود. همچنین، به روش‌های کنترلی که پارامترهای طراحی در آن‌ها با توجه به خطای رهگیری تنظیم شده و نیازی به مدل دینامیکی ربات ندارند، همانند کنترلر پی‌آی‌دی¹ و تطبیقی، کنترلرهای فازی و هوشمند، کنترلر کاندیدهایی غیر مبتنی بر مدل نامیده می‌شوند. معمولاً این روش‌های کنترلی را برای بهبود کارایی کنترلرها می‌توان با یکدیگر ترکیب نمود. در این قسمت، به بررسی کنترل ربات موازی 3-پی‌اس‌پی پرداخته شده است. برای این منظور، یک روش کنترلی به نام کنترلر به روش گشتاور محاسبه شده یا سی‌تی‌سی² که بر پایه مدل ربات طراحی شده، معرفی گردیده است [24,20,17].

5-1- کنترل به روش گشتاور محاسبه شده، سی‌تی‌سی

در این قسمت، کنترلی غیرخطی بر پایه مدل غیرخطی دینامیکی ربات ارائه شده است. برای این منظور بطور مستقیم در هر حلقه کنترلی، باید دستگاه معادلات دیفرانسیل 3 بعدی ربات موازی 3-پی‌اس‌پی حل گردد. در روش‌های کنترلی که بر پایه مدل دینامیکی سیستم استوارند، از دینامیک ربات در حلقه بازخورد³ کنترلی برای خطی‌سازی و خنثی‌سازی دینامیک سیستم استفاده می‌شود [24]. در روش کنترل گشتاور محاسبه شده، که یک کاربرد خاص از خطی‌سازی بازخورد⁴ سیستم‌های غیرخطی می‌باشد، سیستم غیرخطی در طول یک مسیر کنترل می‌شود [24]. اگر معادله (5) بر حسب گشتاور موتورها، مکان، سرعت و شتاب زاویه‌ای موتورها و همچنین با در نظر گرفتن اثر اصطکاک اتصالات بازنویسی شود، می‌توان نوشت

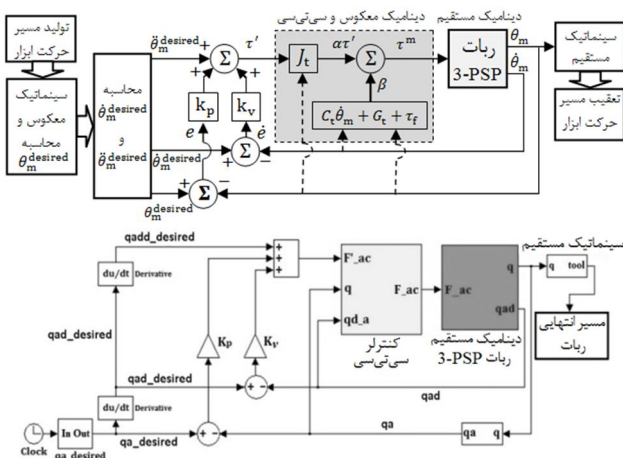
$$\tau^m = J_t \ddot{\theta}_m + C_t \dot{\theta}_m + G_t + \tau_f \quad (8)$$

که در آن، τ^m بردار مربوط به گشتاور موتورها و θ_m و $\dot{\theta}_m$ بردارهای مربوط به سرعت و شتاب زاویه‌ای موتورها است. معادله (8)، یک معادله دیفرانسیل غیرخطی می‌باشد. برای پیاده نمودن سیستم کنترل گشتاور محاسبه شده روی ربات، می‌توان سیستم کنترل را به دو قسمت خطی و غیرخطی تقسیم نمود. در حقیقت، این کنترلر را می‌توان یک قانون کنترل خطی ساز⁵ نامید. زیرا در این کنترلر، یک ترم کنترلی باعث خنثی شدن ترم غیرخطی کنترلر شده به صورتی که کل سیستم کنترلر حلقه بسته خطی می‌گردد. بنابراین، می‌توان یک قانون کنترلر جزء بندی⁶ شده برای این کنترلر تعریف کرد که شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول، که به مدل ربات یا همان سیستم ارتباطی نداشته و جزء خطی کنترلر محسوب می‌شود و به نام بخش خود تنظیم⁷ معروف است. بخش دوم، شامل جزء غیرخطی کنترلر که شامل مدل ربات می‌باشد و به نام بخش خطی‌ساز وابسته به مدل⁸ سیستم معروف است. بنابراین، بخش وابسته به مدل کنترلر نقش یک تابع خطی کننده را ایفا می‌کند [24]. برای هر سیستم دینامیکی با معادلات حرکتی به صورت رابطه (8)، برای مثال ربات موازی 3-پی‌اس‌پی، می‌توان این دو بخش از کنترلر سی‌تی‌سی را بصورت زیر نوشت:

الف) بخش خطی‌ساز وابسته به مدل ربات

$$\tau^m = \alpha \tau' + \beta \quad (9)$$

که در آن



شکل 6 دیاگرام سیستم کنترل و مدل سیمولینک کنترلر سی‌تی‌سی ربات

9- Gain

1- PID
2- Computed Torque Control (CTC)
3- Feedback
4- Feedback linearization
5- Linearizing control law
6- Partitioned control law
7- Servo-law portion
8- Linearizing model-based portion

می‌شود. با استفاده از روش پی‌سی‌ای ماتریس X را می‌توان به صورت زیر تجزیه کرد

$$\begin{aligned} X &= \hat{X} + E \\ \hat{X} &= \hat{T} \hat{P}^T \\ E &= \tilde{T} \tilde{P}^T \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن \hat{X} زیرفضای اجزاء اصلی بوده و جهت اصلی بردارهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همچنین E زیرفضای باقیمانده جهت اندازه‌گیری عیب، \hat{T} ماتریس امتیاز⁵ و \tilde{T} ماتریس بارگذاری⁶ است. بنابراین می‌توان نوشت

$$\hat{T} = X \hat{P} \cdot \tilde{P}, \quad \hat{T} \in R^{n \times l}, \quad \tilde{P} \in R^{m \times l} \quad (17)$$

که در آن l تعداد متغیرهای اصلی مدل می‌باشد. ستون‌های ماتریس \hat{P} شامل بردارهای ویژه مربوط به l تا از بزرگترین مقادیر ویژه λ_i ماتریس همبستگی⁷ می‌باشد و ستون‌های \tilde{P} شامل $m-l$ بردار ویژه باقیمانده می‌باشند. لذا ماتریس‌های $[\hat{T} \tilde{T}]$ و $[\hat{P} \tilde{P}]$ دارای خاصیت اورتوگونال⁸ هستند.

در روش پی‌سی‌ای، ابتدا بایستی ماتریس کواریانس، S ، محاسبه شود. اما ماتریس کواریانس همیشه در عمل نامعلوم می‌باشد. این ماتریس معمولاً از روی نمونه متغیرها در شرایط نرمال تخمین زده می‌شود. فرض کنید ماتریس $X \in R^{n \times m}$ شامل n نمونه (ردیف) و m متغیر (ستون) در شرایط نرمال باشد.

این ماتریس می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود

$$X = [X_1 X_2 X_3 \dots X_n]^T = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (18)$$

با توجه به اصول آماری، ماتریس S به صورت زیر تخمین زده می‌شود

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T \quad (19)$$

در محاسبه، ستون‌های ماتریس X با میانگین صفر و واریانس یک نرمالیزه می‌شوند. با این کار، میانگین مقدار x صفر می‌شود ($\bar{x} = 0$). با قرار دادن $\bar{x} = 0$ می‌توان معادله (19) را به صورت زیر بازنویسی کرد

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i)(x_i)^T = \frac{1}{n-1} X^T X \quad (20)$$

سپس، می‌توان مقادیر ویژه ماتریس کواریانس S را تجزیه کرد. این کار به منظور محاسبه m مقدار ویژه $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ و بردارهای ویژه ماتریس P انجام می‌گیرد. سپس، می‌توان تعداد l مولفه اصلی سیستم را تعیین نمود و ماتریس بارگذاری \hat{P} را براساس l تا از مولفه‌های اصلی انتخاب کرد. برای محاسبه‌ی ماتریس تصویر⁹ C و \tilde{C} با استفاده از ماتریس \hat{P} ، می‌توان از روابط زیر استفاده کرد

$$\begin{aligned} C &= \hat{P} \cdot \hat{P}^T \\ \tilde{C} &= \tilde{P} \cdot \tilde{P}^T = (I - C) \end{aligned} \quad (21)$$

لذا فضای اصلی m بعدی داده‌ها را می‌توان با l مولفه اصلی و $m-l$ باقیمانده جایگزین کرد. در نتیجه، همبستگی متغیرها از بین می‌رود. بعد از آنکه مدل پی‌سی‌ای ساخته شد، از این مدل می‌توان برای عیب‌یابی ربات استفاده کرد. با استفاده از روش پی‌سی‌ای، بردار نمونه جدید x می‌تواند بصورت زیر به دو قسمت تجزیه شود

$$x = \hat{x} + \tilde{x} \quad (22)$$

که در آن

مربوط به دینامیک ربات با روش‌های هوشمند تقریب زده شوند یا اینکه تقریب‌هایی معقول برای محاسبه دینامیک ربات در نظر گرفته شود. علاوه بر این، در صورت دقیق مدل نشدن دینامیک ربات، این روش می‌تواند ناپایدار باشد. برای مثال، اگر تقریب‌های زیادی در محاسبه دینامیک ربات اعمال شود، می‌تواند باعث بوجود آمدن ناپایداری در سیستم شود [17,20].

6- عیب‌یابی ربات موازی 3-پی‌اس‌پی

در ربات‌های صنعتی عیوب متداولی از قبیل لقی در اتصالات محرک و غیرفعال¹، رعایت نکردن تیرانس‌های ساخت، نویز در موتورها، نویز در سروو درایوها، افزایش درجه حرارت و اصطکاک را می‌توان برشمرد. در این مقاله، از روش آنالیز مولفه‌های اصلی برای تعیین حالت‌های معیوب ربات موازی 3-پی‌اس‌پی استفاده شده است. در این روش، ارتباط بین متغیرهای موجود در ربات بدست آمده و سپس با کاهش ابعاد داده‌های اندازه‌گیری شده، حالت‌های معیوب ربات شناسایی می‌شوند. برای این منظور، دو عیب به صورت مجازی به مدل کنترلر غیرخطی شبیه‌سازی شده‌ی ربات اعمال گردیده و اثرات ناشی از این عیوب بر روی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. این عیوب شامل:

الف- عیب در ولتاژ ورودی سروو موتورها یا سروو درایوها

ب- عیب در سنسورهای مکان یا لقی‌ها.

همچنین از مدل دینامیک مستقیم ربات به جای مدل واقعی ربات در حلقه کنترلی استفاده شده و عیوب مورد نظر به صورت مجازی روی مدل ربات اعمال گردیده است.

7- عیب‌یابی به روش پی‌سی‌ای

عیب‌یابی در سیستم‌ها به روش‌های متداولی از قبیل روش‌های مدل محور، روش اطلاعات محور² و روش‌های آماری انجام می‌شود. در روش‌های مدل محور، ابتدا مقادیر نرمال پارامترهای سیستم جمع‌آوری شده و سپس در صورت رخ دادن عیب، می‌توان با مقایسه بین مقادیر پارامترهای سیستم در حالت معیوب با حالت نرمال، در مورد معیوب یا سالم بودن سیستم قضاوت کرد. برای روش‌های اطلاعات محور می‌توان به سیستم‌های هوشمند، شبکه عصبی و تئوری فازی اشاره کرد [25].

هدف از عیب‌یابی به روش پی‌سی‌ای، تحلیل مولفه‌های اصلی سیستم است. این روش، یکی از انواع روش‌های تحلیل داده‌های چند متغیره بوده که هدف اصلی آن تقلیل بعد مساله مورد مطالعه است. با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی، می‌توان تعداد زیادی متغیر توضیحی (متغیر مستقل) همبسته را با تعداد محدودی متغیر توضیحی جدید که مولفه‌های اصلی نامیده می‌شوند و ناهمبسته‌اند، جایگزین نمود. به این ترتیب، نه تنها بعد مساله تقلیل می‌یابد، بلکه مساله چند هم‌خطی پیش نمی‌آید. یکی از مزایای این روش، این است که می‌توان تمام متغیرهای سیستم را به صورت ورودی برای مدل عیب‌یابی پی‌سی‌ای تعریف کرد. در این بین، روش پی‌سی‌ای یک روش آماری محسوب می‌شود که در آن تعدادی متغیر همبسته³ به مجموعه‌ای کوچکتر از متغیرهای ناهمبسته⁴ منتقل می‌شوند.

فرض کنید $x \in R^m$ برداری است که دارای m متغیر اصلی است و $X \in R^{n \times m}$ ماتریسی که n نمونه برای هر متغیر را شامل

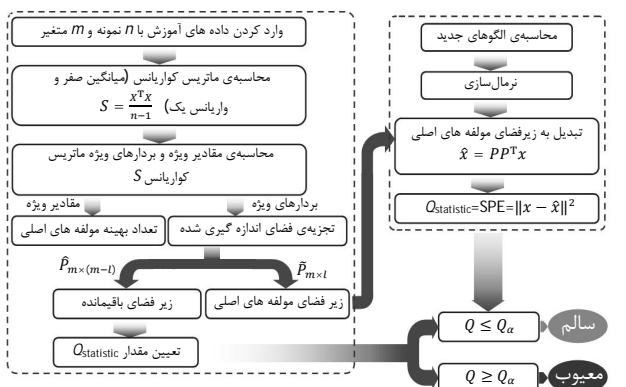
5- Score matrix
6- Loading matrix
7- Correlation matrix
8- Orthogonal
9- Projection matrix

1- Passive joints
2- Knowledge-based
3- Correlated variable
4- Uncorrelated variable

پی‌سی‌ای ذخیره می‌شود. این مقادیر، متناظر با مسیر حرکت مطلوب طراحی شده برای ربات است. مکان طراحی شده برای نوک ابزار و همچنین مقادیر متناظر با این مسیر حرکت برای اتصالات محرک و متحرک، سرعت و نیرو در عملگرها به عنوان پارامترهای ورودی مسئله در نظر گرفته می‌شوند (شکل 8). سپس به ترتیب عیوب در نظر گرفته شده به ربات اعمال گردیده و مقادیر خروجی و ورودی عیب‌دار در ماتریس ورودی برنامه پی‌سی‌ای که در شکل 8 نمایش داده شده، ذخیره می‌شود.

1-7- مسیر مطلوب برای ربات

در این قسمت، یک مسیر حرکت مطلوب بصورت یک بیضی فضایی برای مکان انتهایی ابزار در نظر گرفته شده و به ورودی مدل کنترلی سی‌تی‌سی اعمال می‌شود. سپس خروجی‌های کنترل شامل مقادیر اتصالات محرک و متحرک، سرعت عملگرها و نیز نیرو در عملگرها، که متناظر با ورودی مسیر حرکت مطلوب ربات است، در یک ماتریس به صورت شکل 8 ذخیره می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای مسیر حرکت مطلوب ربات با استفاده از روش سی‌تی-سی در شکل 9 نمایش داده شده است. برای تمامی شبیه‌سازی‌ها، بازه زمانی کنترلی 1 میلی‌ثانیه و بهره‌های مشتقی و تناسبی مربوط به کلیه موتورهای ربات به ترتیب $k_p i = 100$ و $k_v i = 10$ در نظر گرفته شده‌اند. در گام بعد، عیوب معرفی شده در قسمت قبل به ربات اعمال گردیده و ماتریس ورودی برنامه پی‌سی‌ای برای هر عیب تشکیل می‌شود. در شکل 9، مقادیر δq^{aci} ، \dot{q}^{aci} و \ddot{q}^{aci} به ترتیب بیانگر خطای عملگر، سرعت عملگر و خطا در سرعت عملگر i ام می‌باشند. همچنین مقادیر F_i^{ac} بیانگر نیرو در عملگر i ام می‌باشد.



شکل 7 فلوچارت استفاده از روش پی‌سی‌ای در عیب‌یابی

مکان ابزار

مقادیر متغیر معاف عملگر و غیر عملگر

نیروی عملگرها سرعت عملگرها

X	Y	Z	q1	q2	q3	φ1	θ1	λ1	φ2	θ2	λ2	φ3	θ3	λ3	b1	b2	b3	q1	q2	q3	F ₁ ^{ac}	F ₂ ^{ac}	F ₃ ^{ac}	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

302x24

شکل 8 پارامترهای ورودی به برنامه عیب‌یابی

$$\hat{x} = Cx \quad (23)$$

که در آن \hat{x} تصویر بردار نمونه x در فضای مولفه‌های اصلی و \hat{x} تصویر بردار نمونه x در فضای باقیمانده می‌باشند. به طور کلی و در شرایط عادی داده‌های نرمال در \hat{x} و داده‌های عیب‌دار در \hat{x} اتفاق می‌افتند. در صورت وجود عیب، تغییرات غیرعادی در \hat{x} رخ داده و در نتیجه آن تصویر در فضای باقیمانده افزایش می‌یابد. بنابراین، اندازه بزرگی تصویر یک مقدار اندازه‌گیری شده x در فضای باقیمانده، می‌تواند برای تشخیص شرایط غیرعادی در سیستم مورد استفاده قرار گیرد. تعیین تعداد مولفه‌های اصلی، یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها در ساختمان روش پی‌سی‌ای می‌باشد. از پارامتر واریانس درصد انباشتگی¹ یا به اختصار سی‌پی‌وی² برای تعیین تعداد مولفه‌های اصلی استفاده می‌شود. تعداد l را می‌توان از روی مشخصه سی‌پی‌وی تعیین کرد. به این صورت که مقدار سی‌پی‌وی تعداد l تا z بزرگترین مقادیر ویژه، به یک حد از پیش تعیین شده بر حسب درصد برسد. به عبارت دیگر

$$CPV(l) = \left(\sum_{j=1}^l \lambda_j / \sum_{j=1}^m \lambda_j \right) \times 100\% \geq CPV_{\alpha} \quad (24)$$

همچنین به منظور یافتن جمع مربعات اختلاف بین x و مولفه‌های اصلی در مدل پی‌سی‌ای، می‌توان کمیتی موسوم به اِس‌پی‌اِی³ که به اصطلاح $Q_{\text{statistic}}$ هم نامیده می‌شود را بصورت زیر تعریف نمود

$$Q_{\text{statistic}} = SPE(x) = \|\hat{x}\|^2 = \|\hat{C}x\|^2 = x^T (I - C) x \quad (25)$$

کمیت اِس‌پی‌اِی به طور مستقیم از روی مدل پی‌سی‌ای و بردار اندازه‌گیری شده x محاسبه می‌شود. کمیت Q_{α} حد آستانه و محدوده اطمینان⁴ برای پی‌اِی را نشان می‌دهد و بصورت زیر بیان می‌شود

$$Q_{\alpha}^2 = \theta_1 \left[c_{\alpha} \sqrt{2\theta_2 h_0^2} / \theta_1 + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1^2} \right]^{h_0} \quad (26)$$

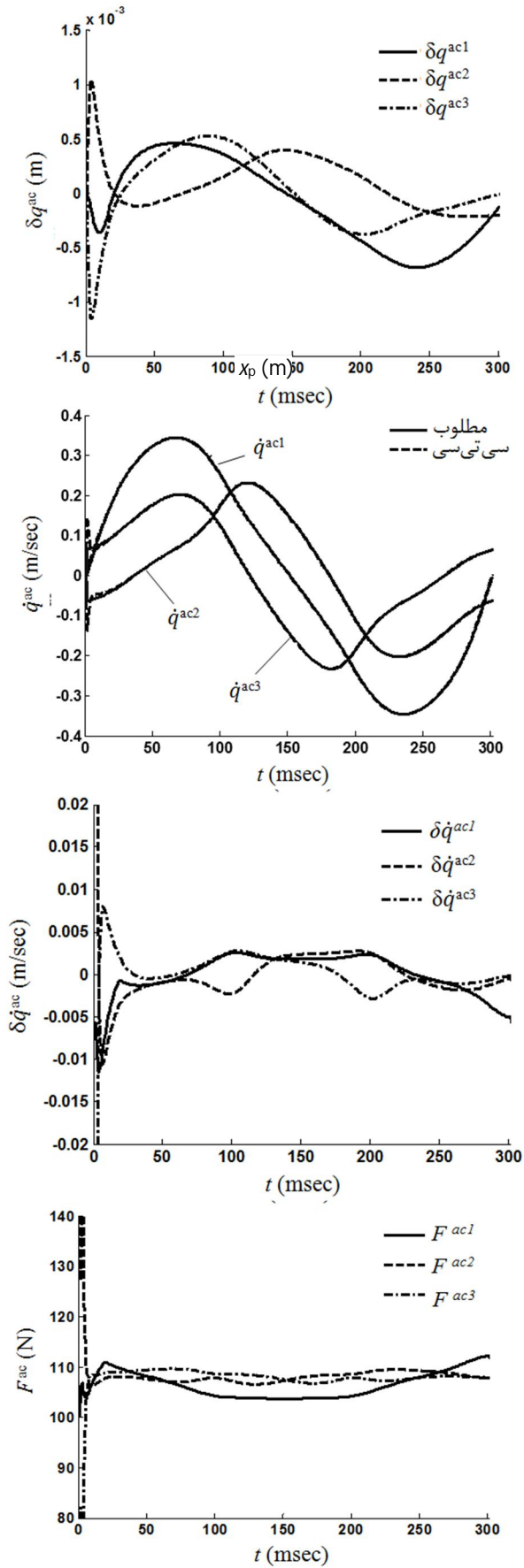
که در آن

$$\theta_1 = \sum_{j=l+1}^m \lambda_j \quad \theta_2 = \sum_{j=l+1}^m \lambda_j^2 \quad \theta_3 = \sum_{j=l+1}^m \lambda_j^3$$

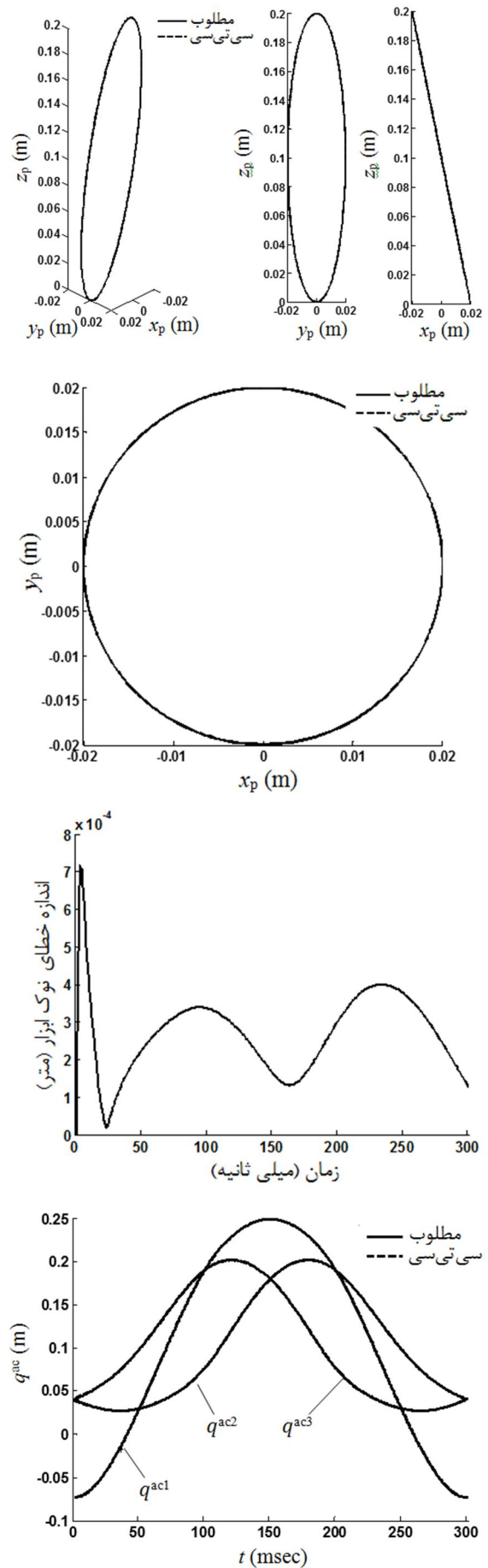
$$h_0 = 1 - (2\theta_1\theta_3 / 3\theta_2^2) \quad (27)$$

که در آن c_{α} حد اطمینان در توزیع نرمال و λ نیز مقادیر ویژه ماتریس کوارانس S است. هنگامی که $SPE(x) \leq Q_{\alpha}^2$ ، هنگامی که $SPE(x) \geq Q_{\alpha}^2$ سالم بوده و وقتی که $SPE(x) \geq Q_{\alpha}^2$ معیوب است. شکل 7 فلوچارت استفاده از روش پی‌سی‌ای در عیب‌یابی را نمایش می‌دهد. در این مقاله، حد آستانه Q_{α}^2 برای اِس‌پی‌اِی با توجه به سطح اطمینان 95% محاسبه شده است، که برابر با 0/0585 است. در روش پی‌سی‌ای می‌توان تمام متغیرها اعم از ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم را در یک ماتریس واحد به ورودی اعمال کرد. برای این منظور، برای انجام آزمایشات، 24 پارامتر که هر کدام شامل 302 نمونه هستند، در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن مقادیر ماتریس ورودی به برنامه پی‌سی‌ای، ابتدا یک مسیر حرکت مطلوب برای نوک ابزار طراحی شده و سپس به مدل کنترل سی‌تی‌سی که در شکل 6 نمایش داده شده است، وارد می‌شود. با حل سینماتیک و دینامیک ربات، مقادیر اتصالات محرک و متحرک، سرعت عملگرهای خطی و نیز نیرو در عملگرها بدست آمده و در ماتریس ورودی

- 1- Cumulative Percent Variance (CPV)
- 2- CPV
- 3- SPE
- 4- Confidence limit



شکل 9 نتایج شبیه‌سازی مسیر حرکت مطلوب ربات به روش سی‌تی‌سی



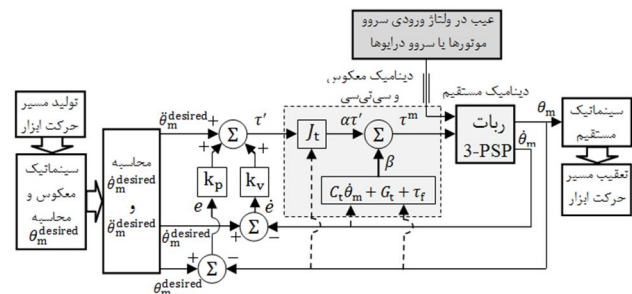
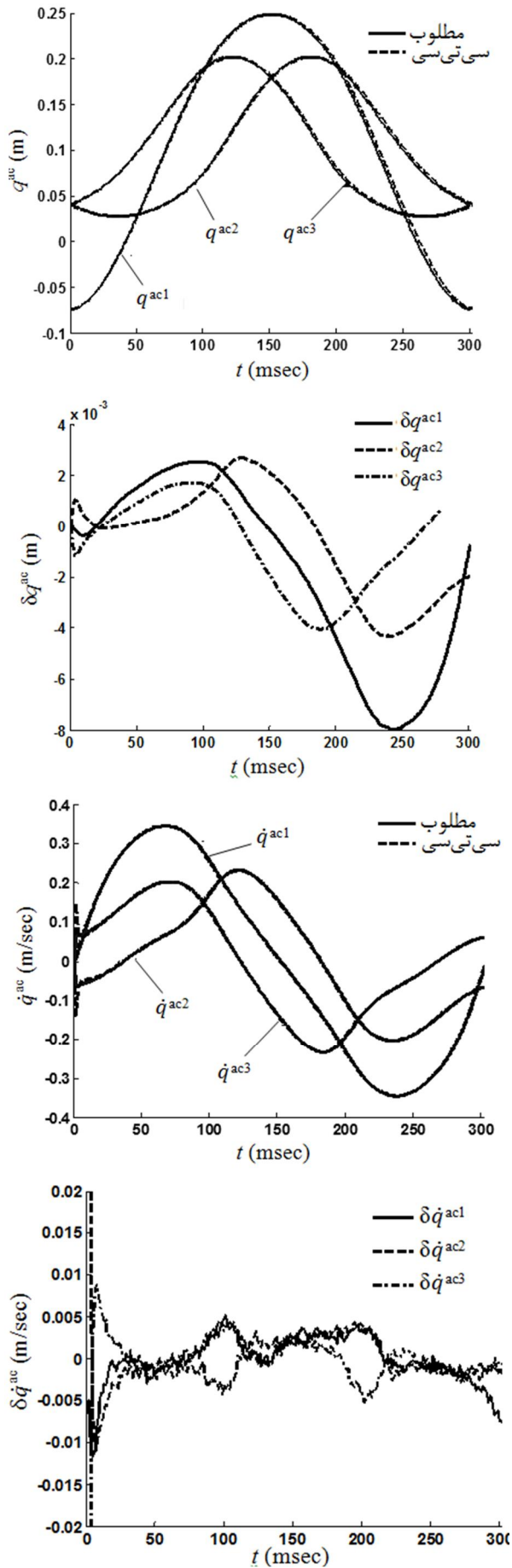
2-7- عیب 1: "عیب در ولتاژ ورودی سروو موتورها یا سروو درایوها"

در این قسمت، ولتاژ ورودی سروو موتورها یا سروو درایوها در مدل کنترلر شبیه‌سازی شدهی ربات، معیوب در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله، عیب مورد نظر به صورت یک تابع تصادفی به ورودی مدل شبیه‌سازی شدهی ربات یا همان دینامیک مستقیم ربات در حلقه‌ی کنترلی اعمال می‌شود. نحوه و مکان اعمال این عیب در شکل 10 نمایش داده شده است.

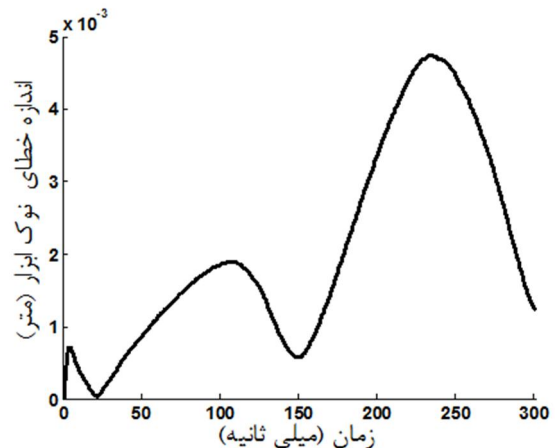
سپس مسیر حرکتی که در قسمت قبل معرفی گردید، به ورودی مدل کنترلی سی‌تی‌سی اعمال می‌شود. همان‌طور که قبل از این گفته شد، این مسیر حرکتی به صورت یک بیضی فضایی برای مکان انتهایی ابزار در نظر گرفته شده است. پس از آن، خروجی‌های کنترلر شامل مقادیر اتصالات محرک و متحرک، سرعت عملگرهای خطی و نیز نیرو در عملگرها، در یک ماتریس به صورت شکل 8 برای حالتی که ولتاژ ورودی سروو موتورها یا سروو درایوها در مدل کنترلر شبیه‌سازی شدهی ربات معیوب در نظر گرفته شده‌اند، ذخیره می‌شوند. با ذخیره‌ی مقادیر مورد نظر، ماتریس ورودی برنامه پی‌سی-ای برای این عیب تشکیل می‌شود. این مقادیر و نتایج شبیه‌سازی برای مسیر حرکت با اعمال عیب 1 روی ربات با استفاده از روش سی‌تی‌سی در شکل 11 نمایش داده شده‌اند. در شکل 11، مقادیر δq^{ac1} ، δq^{ac2} و δq^{ac3} برترتیب بیانگر خطای عملگر، سرعت عملگر و خطا در سرعت عملگر i ام بوده و مقادیر F_i^{ac} بیانگر نیرو در عملگر i ام می‌باشد.

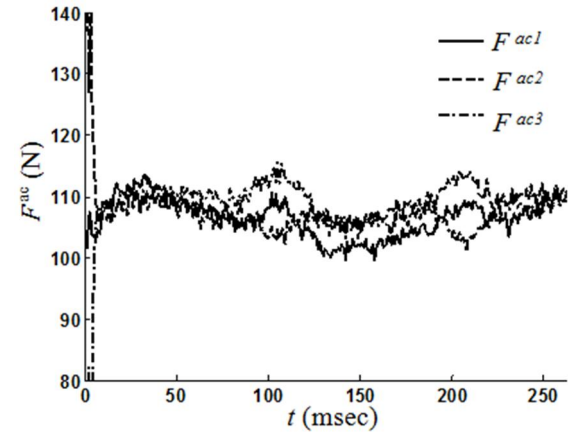
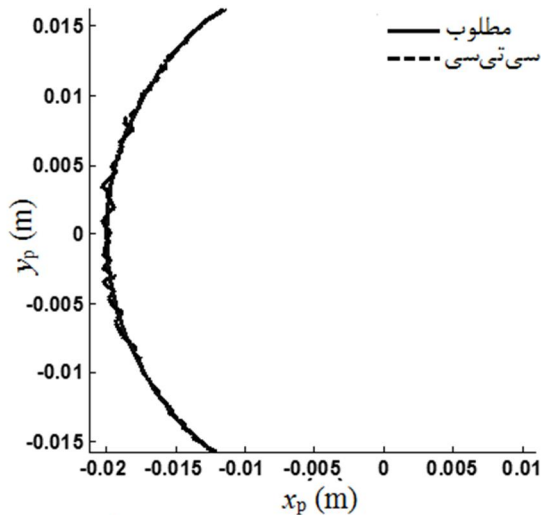
3-7- عیب 2: "عیب در سنسورهای مکان یا لقی‌ها"

در این قسمت، سنسورهای مکان ربات معیوب در نظر گرفته شده‌اند. این عیب همچنین می‌تواند به صورت اثر لقی در اتصالات مکانیکی در ربات ظاهر شود. در این مقاله، عیب مورد نظر می‌تواند به صورت یک تابع تصادفی بر حسب درصد مقادیر متناظر اتصالات در مسیر حرکت، به خروجی مدل شبیه‌سازی شدهی ربات یا همان دینامیک مستقیم ربات در حلقه‌ی کنترلی اعمال شود. نحوه و مکان اعمال این عیب در شکل 12 نمایش داده شده است.

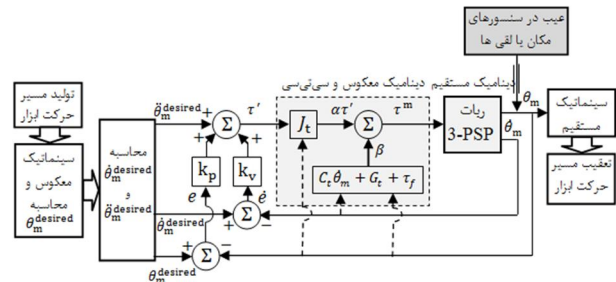
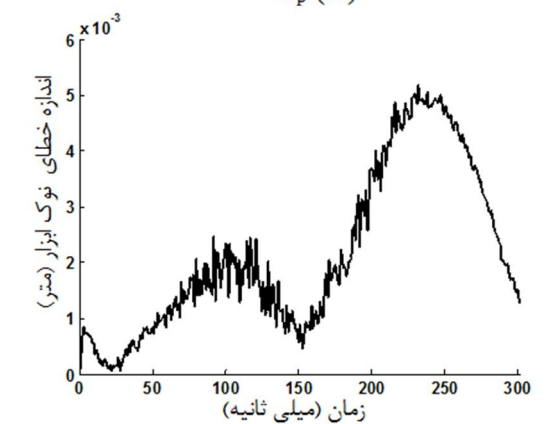


شکل 10 نحوه و مکان اعمال عیب 1 و مدل کنترلی متناظر با آن

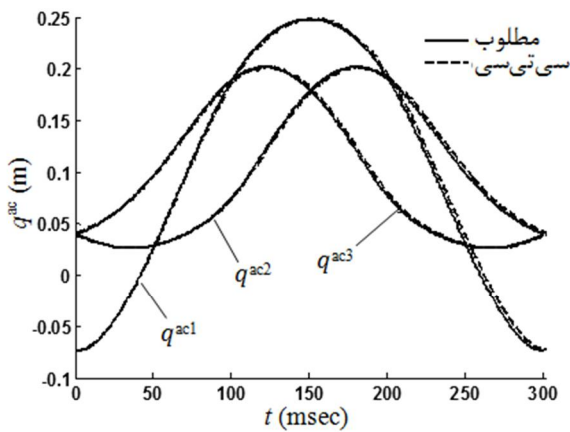




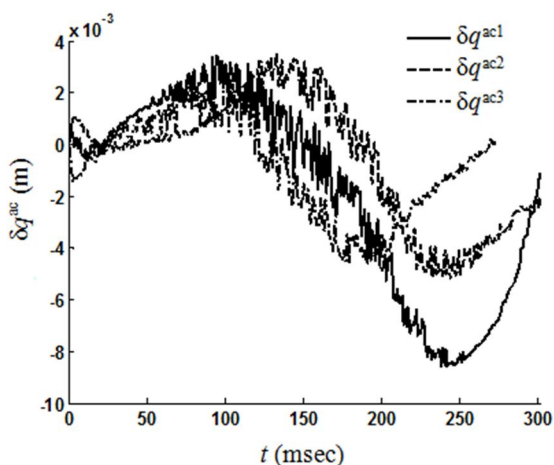
شکل 11 نتایج شبیه‌سازی مسیر حرکت ربات با اعمال عیب 1 به روش سی‌تی‌سی



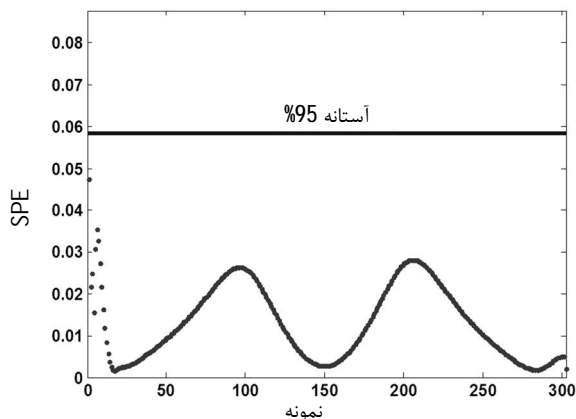
شکل 12 نحوه و مکان اعمال عیب 2 و مدل کنترلی متناظر با آن



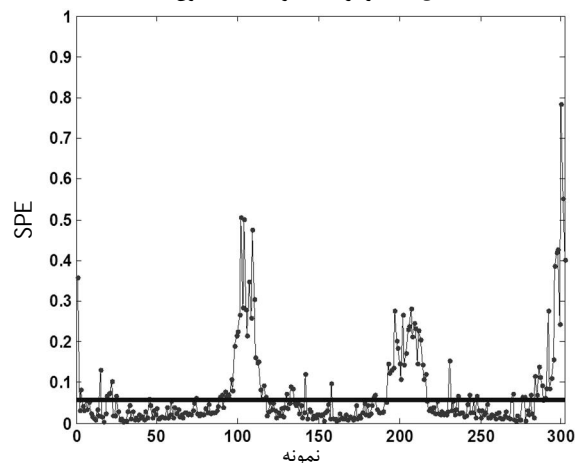
سپس مسیر حرکتی که در قسمت قبل معرفی گردید و به صورت یک بیضی فضایی برای مکان انتهایی ابزار در نظر گرفته شده بود، به ورودی مدل کنترلی سی‌تی‌سی اعمال می‌شود. پس از آن، خروجی‌های کنترلر شامل مقادیر اتصالات محرک و متحرک، سرعت عملگرهای خطی و نیز نیرو در عملگرها، در یک ماتریس به صورت شکل 8 ذخیره می‌شوند. این مقادیر برای حالتی هستند که اثر لقی در اتصال‌های مکانیکی در ربات در نظر گرفته شده و یا اینکه سنسورهای مکان ربات معیوب باشند. با ذخیره‌ی مقادیر ذکر شده، ماتریس ورودی برنامه پی‌سی‌ای برای عیب مورد نظر تشکیل می‌شود. این مقادیر و نتایج شبیه‌سازی برای مسیر حرکت با اعمال عیب 2 روی ربات با استفاده از روش سی‌تی‌سی در شکل 13 نمایش داده شده‌اند. در شکل 13، مقادیر δq^{aci} ، \dot{q}^{aci} و $\delta \dot{q}^{aci}$ برترتیب بیانگر خطای عملگر، سرعت عملگر و خطا در سرعت عملگر i ام و مقادیر F_i^{ac} بیانگر نیرو در عملگر i ام می‌باشند.



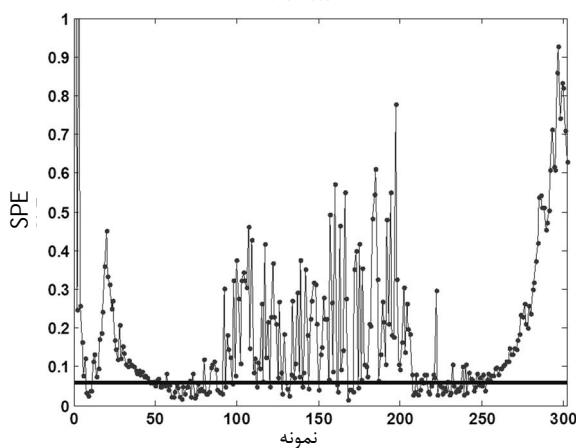
شکل‌های 14، 15 و 16 مقادیر SPE داده‌ها را به ترتیب در شرایط بدون عیب و در حالت اعمال عیب‌های 1 و 2 به ربات نشان می‌دهند. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست، مقادیر SPE برای مسیر مطلوب (بدون اعمال عیب)، از مقدار حد آستانه کمتر می‌باشند. همچنین برای حالت‌های معیوب، مقادیر SPE در برخی نقاط مسیر بیشتر از مقدار حد آستانه بوده و هر چه به مقدار خطا افزوده می‌شود، مقدار انحراف SPE از حد مجاز بیشتر خواهد بود. بطور کل می‌توان برای این دو آزمایش مشاهده کرد که اثر لقی اتصالات در خطای ایجاد شده در مسیر انتهایی ابزار بیشتر از اثر عیب در ولتاژ و یا گشتاور عملی موتورها می‌باشد. بنابراین، با طراحی بهینه‌ی اجزا و اتصالات و رعایت دقیق ترانس‌های ساخت در ربات، می‌توان از ایجاد خطاهای بوجود آمده در ربات که از اثر لقی در اتصالات ناشی می‌شوند، کاست. البته لقی در اتصالات مختلف ربات، اثرهای متفاوتی بر خطای عملگر انتهایی ربات می‌گذارد.



شکل 14 نمودار SPE برای حالت بدون عیب



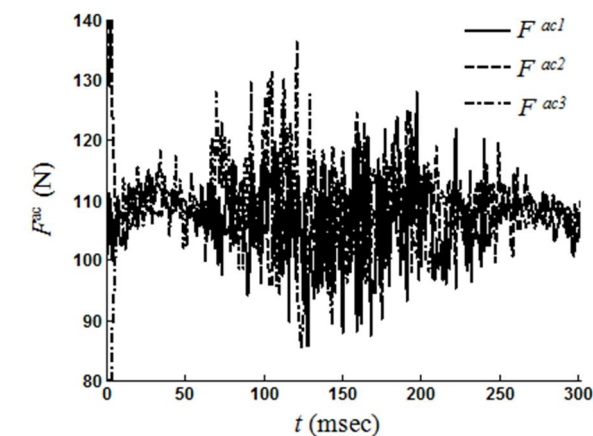
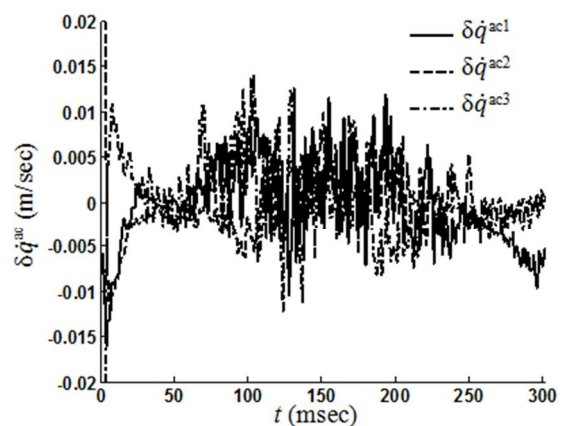
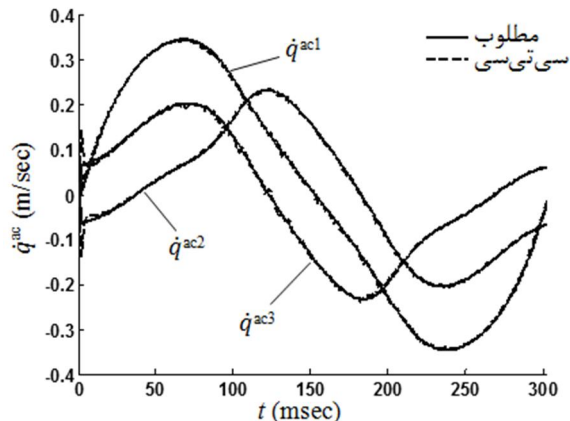
شکل 15 نمودار SPE برای شرایط بوجود آمدن عیب در ولتاژ ورودی سروو موتورها یا سروو درایوها



شکل 16 نمودار SPE برای شرایط وجود عیب در سنسورهای مکان یا لقی‌ها

مسئله مورد مطالعه است. برای بررسی کارایی این روش به منظور عیب‌یابی ربات، از یک کنترلر غیرخطی با استفاده از روش کنترل گشتاور محاسبه شده استفاده گردیده است. در مدل کنترلی ارائه شده برای ربات، از مدل دینامیک ربات بهره گرفته شده است. همچنین، دینامیک ربات با استفاده از روش متعامد تکمیلی طبیعی یا به اختصار T^{-1} مدل‌سازی گردیده است.

به منظور شبیه‌سازی عملکرد روش پی‌اس‌پی برای عیب‌یابی ربات، دو عیب به مدل کنترلی ربات اعمال شده است. این عیوب شامل، 1- عیب در ولتاژ ورودی سروو موتورها یا سروو درایوها و 2- عیب در سنسورهای مکان یا عیوب مربوط به لقی اتصالات می‌باشند. سپس، این دو عیب به مدل کنترلی



شکل 13 نتایج شبیه‌سازی مسیر حرکت ربات با اعمال عیب 2 به روش پی‌اس‌پی

به عبارتی دیگر، اثر لقی برخی اتصالات می‌تواند از اثر لقی بعضی دیگر از اتصالات ربات بر خطای عملکرد انتهایی ربات بیشتر باشد. برای این منظور باید بررسی‌های دقیق‌تری درباره میزان اثر هر عامل روی خطای ایجاد شده در عملکرد انتهایی ربات انجام شود.

8- نتیجه

نظر به اهمیت بحث دقت در ساخت و بهره‌برداری از ربات‌ها در صنایع مختلف، مقوله‌ی بررسی تاثیر عیوب مختلف در عملکرد آن‌ها، می‌تواند در طراحی و ساخت این دسته از ربات‌ها بسیار حائز اهمیت باشد. در این مقاله، از روش آنالیز مولفه‌های اصلی موسوم به روش پی‌اس‌پی برای تعیین حالت معیوب ربات موازی 3-پی‌اس‌پی استفاده شده است. این روش، یکی از انواع روش‌های تحلیل داده‌های چند متغیره بوده که هدف اصلی آن تقلیل بعد

- [8] L. Chiang, E. Russell, R. Braatz, *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*, Nueva York: Springer, 2000.
- [9] J. Jackson, *A user's guide to principal components*, Wiley, 1991.
- [10] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. Kavuri, K. Yin, A review of process fault detection and diagnosis, part iii: Process history based methods, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 27, pp. 327–346, 2003.
- [11] Y. Tharrault, G. Mourot, J. Ragot, D. Maquin, Fault Detection and Isolation with Robust Principal Component Analysis, *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 2008, Vol. 18, No. 4, 429–442.
- [12] E. Kilic, *Fault detection and Diagnosis in nonlinear Dynamical system*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for Doctor of Philosophy, The Graduate School of Natural and applied Sciences of Middle East Technical University, August 2005.
- [13] Xiao Fu, *Sensor Fault Detection and Diagnosis of Air Handling Units*, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Building Services Engineering, Hong Kong Polytechnic University, April 2004.
- [14] S. Wang, Ji. Cui, Sensor-fault detection, diagnosis and estimation for centrifugal chiller systems using principal-component analysis method, *Applied Energy* 82 (2005) 197–213.
- [15] S. Wang; Ji. Cui, A Robust Fault Detection and Diagnosis Strategy for Centrifugal Chillers HVAC&R Research; Jul 2006; 12, 3; *Career and Technical Education* pg. 407, July 2006.
- [16] Y. Chen, L. Lan, A fault detection technique for air-source heat pump water chiller/heaters, *Energy and Buildings* 41 (2009) 881–887.
- [17] A. Rezaei, *Start-up and control of the 3-PSP parallel manipulator*, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, 2011. (In Persian)
- [18] A. Rezaei, A. Akbarzadeh, P.M. Nia, M.R. Akbarzadeh-T., Position, Jacobian and Workspace Analysis of a 3-PSP Spatial Parallel Manipulator, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 29, pp. 158–173, 2013
- [19] A. Rezaei, A. Akbarzadeh, M.R. Akbarzadeh-T., An Investigation on Stiffness Analysis of a 3-PSP Spatial Parallel Mechanism with Flexible Moving Platform Using Invariant Form, *Mechanism and machine theory*, Vol. 51, pp. 195–216, 2012
- [20] H.R. Hassanzadeh, M.R. Akbarzadeh-T, A. Akbarzadeh, A. Rezaei, An interval-valued fuzzy controller for complex dynamical systems with application to a 3-PSP parallel robot, *Fuzzy Sets and Systems*, 235, 83–100, 2014.
- [21] P. Mahmoodi Nia, A. Akbarzadeh T. Inverse Dynamics modeling of 3-PSP parallel manipulator using Natural Orthogonal Complement method (NOC), *17th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering-ISME 2009*, University of Tehran, Iran, May, 2009
- [22] Ou Ma, *Mechanical Analysis of Parallel Manipulators with Simulation, Design and Control Applications*, PhD Thesis, McGill University, Montreal, 1991
- [23] P. Mahmoodi Nia, *Kinematics and dynamics analysis of the 3-PSP parallel manipulator*, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, 2009. (In Persian)
- [24] John J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Wesley Publishing Company, 1989
- [25] F. Caccavale, L. Villani, *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems*, New York: Springer Verlag, 2003.

روبات در طی یک مسیر حرکتی که به صورت یک بیضی فضایی برای مکان انتهایی ابزار در نظر گرفته شده، اعمال می‌گردد. پس از آن، برای هر دو حالت سالم و معیوب، خروجی‌های کنترلر شامل مقادیر اتصالات محرک و متحرک، سرعت عملگرهای خطی و نیز نیرو در عملگرها، که متناظر با ورودی مسیر حرکت مطلوب ربات است، در ماتریس ورودی پی‌سی‌ای ذخیره می‌شود. در این روش، ارتباط بین متغیرهای موجود در ربات بدست آمده و سپس با کاهش ابعاد داده‌های اندازه‌گیری شده، حالت‌های معیوب ربات شناسایی می‌شوند. پس از بدست آوردن ماتریس ورودی پی‌سی‌ای، مقادیر SPE داده‌ها به ترتیب برای شرایط سالم و معیوب محاسبه گردیده است. می‌توان از نتایج بدست آمده این‌گونه نتیجه گرفت که هنگامی که مقدار SPE، بالای حد آستانه قرار گیرد، در سیستم عیبی رخ داده است و در حالی که در زیر حد آستانه باشد، سیستم در حالت سالم کار می‌کند. هرچه میزان SPE بیشتر از حد مجاز باشد نشان‌گر بزرگی بیشتر خطای رخ داده در سیستم است. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که اثر لقی اتصالات در خطای ایجاد شده در مسیر انتهای ابزار بیشتر از اثر عیب در ولتاژ و یا گشتاور اعمالی موتورهای می‌باشد. بنابراین، رعایت دقیق تolerانس‌های ساخت ربات، یکی از راه‌های جلوگیری از بروز خطاهای ناخواسته و اثرگذار در سیستم می‌تواند باشد.

9- مراجع

- [1] W.E. Dixon, I.D. Walker, D.M. Dawson, J.P. Hartranft, Fault Detection for Robot Manipulators with Parametric Uncertainty: A Prediction-Error-Based Approach, *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, VOL. 16, NO. 6, 2000
- [2] M.D. Anand, T. Selvaraj, S. Kumanan, Fault detection and fault tolerance methods for industrial robot manipulator based on hybrid intelligent approach, *Advances in Production Engineering & Management* 7.4, pp. 225–236, 2012.
- [3] G. Kaplan, O. Icoçlu, A.B. Yoldemir, M. Sezgin, Real-time object detection using dynamic principal component analysis, *Ground Penetrating Radar (GPR), 2010 13th International Conference*, pp. 1–6. IEEE, 2010.
- [4] F. Zanaty, Consistency Checking Techniques for the Space Shuttle Remote Manipulator System, *SPAR Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 40–49, 1993.
- [5] M. L. McIntyre, W. E. Dixon, D. M. Dawson, I. D. Walker, Fault detection and identification for robot manipulators, *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 5. IEEE*, 2004.
- [6] D. Garcia-Alvarez, Fault detection using principal component analysis (PCA) in a wastewater treatment plant (WWTP), *Proceedings of the International Student's Scientific Conference*. 2009.
- [7] J. Jackson and G. Mudholkar, Control procedures for residuals associated with principal component analysis, *Technometrics*, vol. 21, pp. 341–349, 1979.