



Control Analysis of an Auxiliary Mechanism for Trajectory Tracking of Planar Seams in Robotic Welding

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Naseriasl Z.¹ BSc,
Fesharakifard R.^{*2} PhD,
Ghafariarad H.¹ PhD

How to cite this article

Naseriasl Z, Fesharakifard R, Ghafariarad H. Control Analysis of an Auxiliary Mechanism for Trajectory Tracking of Planar Seams in Robotic Welding. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(4):1021-1028.

ABSTRACT

Nowadays, the need of welding industry's to improve weld quality has led to the consideration of robotic welding. The use of articulated industrial robots for welding has many challenges. Because some robots do not have the capability of online error compensating of the seam track. Therefore, in order to remove the welding seam tracking error, the use of an auxiliary mechanism is proposed in this article. This mechanism is a table with 1-degree of freedom (dof), which produces a continuous motion in workpiece under the welding torch. The rotational motion of the motor is transformed into a translational motion of the workpiece by a ball-screw system, where this linear motion compensates the tracking error. Since in the welding process, relative motion accuracy of the workpiece and the welding torch is crucial, proper control of the interface table ensures the weld quality. In this paper, two different methods for controlling the table with 1-dof are studied. In the first method, due to the complexity of friction model of the ball-screw mechanism and the presence of nonlinear terms, this part of the model is considered as an external disturbance, and, then, a PID controller for the linear part is designed. In the second method, known as feedback linearization, a control law is designed for that the tracking error tends to zero by passing time. Through a comparison between the simulation results, the second control method demonstrates better precision relating the first controller. While the error of PID controller equals to 3 mm and the second controller's error does not go beyond 0.5 mm. At last, the experimental cell used for the robotic welding is introduced to evaluate the mentioned results.

Keywords Robotic Welding; Planar Seams; Auxiliary Mechanism; Trajectory Tracking Error; Feedback Linearization

¹Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran

²New Technologies Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran

*Correspondence

Address: New Technologies Research Center, No.28, Alborz Alley, Hafez Avenue, Tehran, Iran Postal Code: 1591633311
Phone: +98 (21) 64545579
Fax: +98 (21) 66402044
fesharaki@aut.ac.ir

Article History

Received: March 21, 2018
Accepted: November 26, 2018
ePublished: April 06, 2019

CITATION LINKS

[1] Welding Hand Book [2] The Seam Tracking System for Submerged Arc Welding [3] A robust butt welding seam finding technique for intelligent robotic welding system using active laser vision [4] Online Estimation and Compensation of Friction in Industrial Cable Robot Manipulation [5] Comparative study of three fault diagnostic methods for three phase inverter with induction motor [6] Numerical control of machine tools [7] Feedback control of dynamic systems [8] A visual seam tracking system for robotic arc welding [9] Nonlinear control of the reaction wheel pendulum [10] Real-time seam tracking control system based on line laser visions [11] Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker [12] A seam tracking system based on a laser vision sensor [13] A comparative study of fault detection and health assessment techniques for motion control mechanism [14] Friction models and friction compensation [15] A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction [16] Modern control engineering

تحلیل کنترلی یک مکانیزم کمکی برای ردیابی مسیر درزهای صفحه‌ای در جوشکاری ریاتیکی

زهرا ناصری اصل BSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

رسول فشارکی فرد PhD

پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

حامد غفاری راد PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

امروزه نیاز صنعت جوشکاری، به ارتقای کیفیت جوش سبب شده است تا جوشکاری ریاتیکی مورد توجه قرار گیرد. به‌کارگیری ریات‌های صنعتی مفصلی برای جوشکاری، چالش‌های فراوانی را به‌همراه دارد، چرا که برخی از ریات‌ها قابلیت جبران خطای ردیابی مسیر درز را به‌صورت برخط ندارند. بنابراین برای اصلاح خطای پیمایش درز جوشکاری، در این مقاله استفاده از یک مکانیزم کمکی پیشنهاد می‌شود. این مکانیزم یک میز یک‌درجه آزادی است که می‌تواند حرکت پیوسته‌ای در قطعه کار زیر مشعل جوشکاری ایجاد نماید. حرکت دورانی موتور مکانیزم به‌وسیله یک سیستم بال‌اسکرو به یک حرکت انتقالی قطعه کار تبدیل می‌شود که این حرکت خطای ردیابی را جبران می‌کند. از آنجایی که در فرآیند جوشکاری دقت حرکت نسبی قطعه کار و مشعل جوشکاری اهمیت زیادی دارد، کنترل مناسب میز واسط کیفیت جوش حاصل را تضمین می‌کند. در این مقاله، دو روش مختلف برای کنترل میز یک‌درجه آزادی بررسی می‌شود. در روش اول، با توجه به پیچیدگی مدل اصطکاک مکانیزم بال‌اسکرو و حضور ترم‌های غیرخطی، این بخش از مدل به‌عنوان اغتشاش خارجی در نظر گرفته می‌شود و سپس یک کنترل‌کننده PID برای قسمت خطی آن طراحی می‌شود. در روش دوم، موسوم به خطی‌سازی پس‌خورد، یک قانون کنترل به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که خطای ردیابی مسیر، با گذر زمان به صفر میل کند. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نشان‌دهنده برتری نسبی دقت روش دوم کنترلی نسبت به روش اول بوده، در حالی که خطای کنترل‌کننده PID 3 میلی‌متر و خطای کنترل‌کننده دوم 0.5 میلی‌متر است. در انتها مجموعه عملی مورد استفاده در جوشکاری ریاتیکی برای ارزیابی نتایج معرفی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: جوشکاری ریاتیکی، درزهای صفحه‌ای، مکانیزم کمکی، خطای ردیابی مسیر، خطی‌سازی پس‌خورد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵

*نویسنده مسئول: fesharaki@aut.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیندهای جوشکاری، ایجاد جوش‌های باکیفیت و یکنواخت، تقریباً غیرممکن بوده و کسب مهارت در جوشکاری، نیازمند تجربه و تمرین بسیار زیادی است. از طرفی، فرآیند جوشکاری با ایجاد شعله و تولید نور و حرارت شدیدی همراه است که برای سلامت سیستم بینایی و دستگاه تنفس، خطرات جدی و گاهاً جبران‌ناپذیری به حساب می‌آیند. مجموعه این عوامل، منجر به روی آوردن صنعت به جوشکاری خودکار، از طریق به‌کارگیری ریات جوشکار به‌همراه مکانیزم واسط شد. به‌دلیل عدم امکان دسترسی به کنترلر بسیاری از ریات‌های صنعتی، شناسایی یک مسیر نامشخص و ردیابی آن، تنها به‌صورت غیردقیق و نقطه‌به‌نقطه میسر است. بنابراین از ترکیب حرکت ریات و یک سرومکانیزم، امکان تعقیب بهتر خطای مسیر وجود دارد. برای این منظور از یک مکانیزم بال‌اسکرو استفاده می‌شود که قطعه کار روی آن حرکت می‌کند.

در مقالات و پژوهش‌های کنترل حرکت مشعل جوشکاری، مساله اصلی، ردیابی درز جوشکاری و کنترل سرعت حرکت آن روی درز

است. در این پژوهش‌ها، نحوه شناسایی درز با استفاده از سنسورهای مختلف مانند بینایی ماشین و پردازش تصویر، استفاده از دوربین‌های حرارتی، اسکن‌کردن درز با استفاده از پرتوی لیزر، روش‌های مکانیکی شناسایی درز یا استفاده از تغییرات جریان و ولتاژ جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند^[1]. در شناسایی درز به‌کمک پردازش تصویر، بعد از شناسایی درز، خطای ردیابی درز به‌کمک ریات اصلاح می‌شود. در این روش، دقت‌های زیر یک‌میلی‌متر در ردیابی درز قابل دستیابی است^[2, 3]. در این پژوهش، برای جبران خطای ردیابی، از یک میز بال‌اسکرو استفاده شده است. در مدل‌سازی میز، دقت مورد نیاز و همچنین حداکثر فرکانس مسیر ورودی باید مورد توجه قرار گیرد. اصطکاک در سیستم‌های بال‌اسکرو ماهیت غیرخطی و پیچیده و تاحدودی ناشناخته دارد. از این رو، مدل‌سازی اصطکاک می‌تواند ساده یا پیچیده باشد. تاکنون مدل‌های متنوعی برای اصطکاک پیشنهاد شده است^[4]. برای جلوگیری از شکست زود هنگام سیستم بال‌اسکرو، جلوگیری از بروز هر گونه ارتعاشات در سیستم ضروری است^[5]. همچنین برای عملکرد پایدار سیستم، پهنای باند حلقه بسته سیستم، با توجه به فرکانس طبیعی آن، باید مناسب باشد^[6]. به‌طور کلی، با توجه به عملکرد مورد نیاز سیستم، کنترلر مورد استفاده می‌تواند متنوع باشد.

کنترل‌کننده PID، از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرآیندهای کنترلی کاربرد دارد. این کنترل‌کننده، مقدار خطا، بین خروجی فرآیند و مقدار ورودی مطلوب را محاسبه می‌کند. هدف کنترل‌کننده، به‌حداقل‌رساندن خطا با تنظیم ورودی‌های کنترل فرآیند است^[7]. PID از سه قسمت مجزا به‌نام‌های تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر تشکیل شده است. مزیت این کنترل‌کننده‌ها در قابلیت عمومی آنها به اکثر سیستم‌های کنترل است. برای تنظیم ضرایب کنترلی از قواعد زیگلر-نیکولز استفاده می‌شود. زیگلر و نیکولز، قواعدی برای تعیین بهره تناسبی، زمان انتگرال و زمان مشتق براساس مشخصات پاسخ گذرای دستگاه تحت کنترل پیشنهاد کرده‌اند. این روش باید با انجام آزمایش روی دستگاه انجام شود.

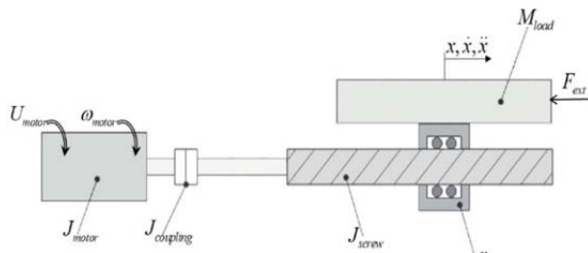
خطی‌سازی پس‌خورد نیز یکی از بهترین روش‌هایی است که با هدف حذف اثر غیرخطی، یک کنترل‌کننده خطی برای پایدارسازی پیشنهاد می‌دهد. این کنترل‌کننده در محدوده وسیعی می‌تواند عمل کند و همچنین دقت بسیار بالایی دارد. بنابراین با فرض این که سیستم بینایی، اطلاعات دقیقی از موقعیت‌های نقاط مربوط به درز در اختیار می‌گذارد، در این مقاله، با استفاده از سیگنال کنترلی طراحی شده، اختلاف بین مسیر حرکت عملگر نهایی ریات و مسیر صحیح، به‌صورت هم‌زمان و غیرهم‌مرکز، توسط بال‌اسکرو تصحیح می‌شود.

روش‌های بسیاری برای شناسایی مسیر جوشکاری وجود دارد و بینایی ماشین که در این مقاله استفاده شده، تنها یکی از آنها است. بینایی ماشین را می‌توان به دو بخش روش‌های مبتنی بر بینایی فعال و روش‌های مبتنی بر بینایی غیرفعال تقسیم کرد. مهم‌ترین روش بینایی فعال، استفاده از نور لیزر است. در این روش، باریکه لیزر به محل درز تابیده و بازتاب نور به‌وسیله یک دوربین ضبط می‌شود^[8]. از مهم‌ترین مزایای این روش، امکان تصحیح تغییر محل درز جوش به‌دلیل اعوجاج‌ها و کرنش‌های حرارتی ناشی از حرارت جوشکاری است. همچنین این روش به‌دلیل میدان دید کوچک‌تر، دقت بیشتری دارد، اما به‌دلیل محدودبودن وسعت دید دوربین، درزهای با دامنه تغییرات زیاد قابل مشاهده نیست

واسط صورت می‌گیرد. سپس در بخش‌های ۳ و ۴ به ترتیب طراحی کنترلر بر مبنای مدل خطی و مدل غیرخطی صورت می‌گیرد و نتایج شبیه‌سازی ارایه و مقایسه می‌شود. در نهایت، روی یک ساختار عملی از مجموعه جوشکاری، کنترلرهای طراحی شده پیاده‌سازی و نتایج عملی نشان داده می‌شوند. بخش ۶ به جمع‌بندی و بحث در مورد نتایج می‌پردازد.

۲- معرفی ساختار سیستم

شما تیک مدل سه‌بُعدی مکانیزم بال‌اسکرو مطابق با شکل ۱ است. مکانیزم مورد مطالعه، شامل اجزای مختلفی از قبیل قطعه متحرک، ریل‌های راهنما، موتور و کوپلینگ است.



شکل ۱ مدل سه‌بُعدی یک مکانیزم بال‌اسکرو

در مدل دینامیک بال‌اسکرو، ممان اینرسی مجموع برابر با مجموع اینرسی قطبی شفت موتور، پیچ و کوپلینگ است. در این مدل از اینرسی ساچمه‌ها صرف نظر شده است. ممان اینرسی مجموع را می‌توان از طریق معادلات ۱-۳ محاسبه کرد.

$$U_{motor} = \left(\frac{J_{total}}{r} + r M_{load} \right) \ddot{x} \quad (1)$$

$$J_{total} = J_{motor} + J_{coupling} + J_{screw} \quad (2)$$

$$r = \frac{p}{2\pi} \quad (3)$$

در ساختار مکانیزم بال‌اسکرو، علاوه بر جرم و اینرسی اجزای مختلف، اصطکاک نیز وجود دارد. مدل اصطکاک مناسب می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر خطای ردیابی و افزایش دقت فرآیند جوشکاری شود. تاکنون مدل‌های اصطکاک متفاوتی برای مکانیزم بال‌اسکرو پیشنهاد شده است [13]. مهم‌ترین پارامترهای اصطکاک در ساختار این مکانیزم، اصطکاک کولمب و اصطکاک ویسکوز هستند. اصطکاک کولمب یا اصطکاک خشک، مستقل از سطح تماس و بزرگی سرعت نسبی است. به علاوه، این نیروی اصطکاک، با نیروی عمودی سطح متناسب است و مطابق با معادله ۴ تعریف می‌شود.

$$F = F_c \operatorname{sgn}(v) \quad (4)$$

در شکل ۲ [14]، نمودار مربوط به مدل اصطکاک کولمب دیده می‌شود.

اصطکاک ویسکوز، متناسب با سرعت جسم است و به وسیله لزجت روان‌کار تولید می‌شود. رابطه ریاضی این اصطکاک، مطابق با معادله ۵ بیان می‌شود.

$$F = k_v v \quad (5)$$

مدل اصطکاک ویسکوز به همراه اصطکاک کولمب در شکل ۳ قابل مشاهده است.

(ممکن است ادامه درز در محدوده دید دوربین نباشد).

همچنین سایر درزهای موجود، به عنوان مثال درز بین قطعه کار و نگهدارنده قطعه، ممکن است به صورت اشتباه به عنوان درز شناسایی شود. همچنین چنانچه اسکن قبل از جوشکاری انجام شود، فرآیند جوشکاری بهره‌وری مناسبی نخواهد داشت و چنانچه اسکن درز همراه با جوشکاری صورت پذیرد، دود، تشعشعات نوری و همچنین پاشش مذاب می‌تواند مشکل‌آفرین باشد.

سنسور لیزری بینایی قابلیت ردیابی مقاوم درز جوشکاری را دارد. نقاط شاخص به کمک روش مورفولوژی معمولی استخراج و درز، پیش از جوشکاری تشخیص داده می‌شود و موقعیت جوشکاری به این ترتیب معین می‌شود. در پژوهش‌های پیشین، پردازش تصویر مورفولوژیک به همراه یک الگوریتم ردیابی و اصول اندازه‌گیری یک سیستم صنعتی پیشنهاد شده است [9, 10]. برای رفع مشکل دقت پایین تشخیص و ردیابی درز در روش‌های رایج، یک روش ابتکاری با عملکرد ایده‌آل برای یک ربات جوشکار با ۶ درجه آزادی پیشنهاد شده است [11, 12]. در این پژوهش‌ها تشخیص نقاط مسیر جوشکاری و الگوریتم کنترلی تطبیقی- فازی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین یک سنسور بینایی لیزری به کار رفته و اصول اندازه‌گیری با آن تحلیل شده است. با وجود این که استفاده از لیزر برای شناسایی و ردیابی برخط درز جوشکاری، یک راه‌حل صنعتی اثبات شده است، تنها می‌توان به این صورت یک محدوده محلی را جست‌وجو کرد و اطلاعات کلی در مورد مکان درز جوشکاری نمی‌دهد.

در روش بینایی غیرفعال، تشخیص درز با استفاده از یک دوربین بیرونی صورت می‌پذیرد. دوربین در محلی ثابت و ترجیحاً عمود بر قطعه کار نصب می‌شود و قبل از شروع عملیات جوشکاری، از قطعه کار تصویر می‌گیرد. با پردازش تصویر گرفته شده، محل درز مشخص می‌شود. در این روش، تصویربرداری و پردازش تصویر، قبل از جوشکاری صورت گرفته و در نتیجه بار محاسباتی حین جوشکاری صفر است. همچنین کل درز جوشکاری به صورت یک‌جا معلوم شده و مشتقات مسیر نیز قابل دستیابی است. از دیگر مزایای این روش، وجود دید کلی از قطعه کار و نگهدارنده‌ها است که امکان برخورد نیز می‌تواند بررسی شود. همچنین از دوربین استفاده شده می‌توان برای ردیابی خود ربات نیز استفاده کرد. دود و تشعشعات ناشی از جوشکاری در تشخیص درز مشکلی ایجاد نمی‌کند. در این روش، تغییرات محل درز جوشکاری به دلیل اعوجاج‌های ناشی از جوشکاری قابل تصحیح نیست. همچنین در این روش، درز جوشکاری باید با استفاده از یک الگوریتم مناسب یا به صورت دستی از سایر خطوط موجود در تصویر جدا شود.

با توجه به هدف این مقاله که جبران اختلاف میان درز و مشعل جوشکاری توسط میز یک‌درجه آزادی است، تنها با یک دوربین می‌توان مختصات درز را به دست آورد. یک دوربین بالای قطعه کار قرار می‌گیرد که از قطعه کار و ربات، تصویر تهیه می‌کند. سپس به کمک الگوریتم پردازش تصویر، مختصات پیکسلی نقاط به دست آمده از درز جوشکاری به مختصات میلی‌متری تبدیل می‌شود. این مختصات میلی‌متری از طریق برازش منحنی بی‌اسپایلین، به یک مسیر نرم و مشتق‌پذیر برای استفاده برای اهداف کنترلی تبدیل می‌شود. ربات، یک مسیر مستقیم را طی می‌کند و اختلاف میان درز و مشعل جوشکاری در هر لحظه توسط میز یک‌درجه آزادی انجام می‌شود. کنترل این میز، به کمک برنامه لب‌ویو و یک کارت داده‌برداری انجام می‌شود. در بخش بعدی مقاله، سیستم جوشکاری رباتیک معرفی می‌شود و مدل‌سازی میز

و منفی شدن مولفه کولمب در کنترلر می شود و با ایجاد نویز می تواند سبب لرزش، فعالیت کنترلی زیاد و استهلاک مکانیزم شود. برای حل این مشکل می توان از تابع اشباع به همراه یک ضریب بزرگ استفاده نمود. در تابع اشباع، حد بالا و پایین تابع برای سازگاری با تابع علامت، به ترتیب ۱ و -۱ در نظر گرفته شده است. چنانچه از تابع آرک تانژانت اشباع شده به جای تابع علامت برای بیان مولفه کولمب استفاده شود، بنابراین برای استخراج معادله دینامیک سیستم کافی است مدل صلب بدون اصطکاک به مدل اصطکاک سیستم اضافه شود. بنابراین مدل دینامیک سیستم طبق معادله ۸ است.

$$u = a\ddot{x} + b\dot{x} + F_c(2/\pi)Arctan(10^6\dot{x}) + (F_s - F_c)e^{-(\dot{x}/v_s)^2} \quad (8)$$

۳- طراحی کنترلر خطی

بنا بر آنچه قبلاً ذکر شد، در این مقاله فرض بر این است که با استفاده از یک دوربین معمولی، از درز جوش عکسبرداری می شود و سپس تصویر گرفته شده برای پردازش تصویر به کامپیوتر منتقل می شود. بنابراین، داده های تهیه شده توسط سیستم پردازش تصویر، به عنوان پسخورد در کنترل موقعیت استفاده می شوند. با توجه به غیرخطی بودن مدلی که در بخش قبل ارائه شد، کنترلر مکانیزم به دو روش انجام می شود که در ادامه هر یک از این روش ها مورد بررسی قرار می گیرند.

۳-۱- کنترلر PID

کنترل کننده PID، متداول ترین نوع کنترل کننده صنعتی است که با وجود سادگی، اهداف کنترلی را به خوبی تامین می کند. قبل از اقدام به طراحی کنترل کننده، لازم است ابتدا، با تعریف آن در حوزه زمان و سپس اعمال تبدیل لاپلاس، پارامترهای مورد نظر برای طراحی مشخص شوند. لذا مراحل زیر به ترتیب طی می شوند:

- ۱- تعریف در دامنه زمان: طبق معادله ۹، در این روش، ابتدا قانون کنترل در حوزه زمان تعریف می شود.

$$u(t) = k_c[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (9)$$

- ۲- گرفتن تبدیل لاپلاس: در این مرحله باید با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادله ۹، قانون کنترل را به حوزه فرکانس برد. بنابراین معادله ۱۰ حاصل می شود.

$$u(s) = k_c[e(s) + \frac{1}{\tau_I s} e(s) + \tau_D s e(s)] \quad (10)$$

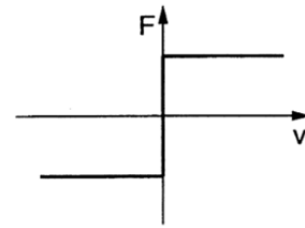
- ۳- نوشتن به فرم تابع انتقال: برای آن که بتوان پارامترهای مربوط به ضرایب کنترلی را به صورت مجزا به دست آورد، باید ابتدا رابطه به دست آمده در معادله ۱۰ را به شکل تابع انتقال تبدیل نمود. آنچه حاصل می شود، مطابق با رابطه ۱۱ است.

$$G_c(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = k_c[1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s] \quad (11)$$

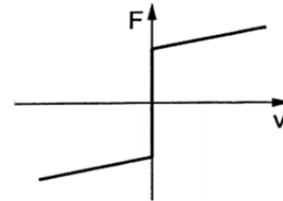
بر اساس رابطه ۱۱، آنچه از روش زیگلر- نیکولز باید محاسبه شود، پارامترهای k_c ، τ_I و τ_D هستند که در ادامه شرح داده می شود.

۳-۲- تنظیم ضرایب به روش زیگلر- نیکولز

روش زیگلر- نیکولز یک روش تجربی برای به دست آوردن ضرایب PID است. مطابق با نمودار بلوکی شکل ۵، اختلاف پسخورد از موقعیت مرجع به عنوان ورودی به کنترلر مورد نظر داده می شود و سپس مجموع گشتاور خروجی از کنترلر با اغتشاشات خارجی حاصل از عوامل غیرخطی، گشتاور ورودی مورد نیاز به سیستم را



شکل ۲) مدل اصطکاک کولمب [14]



شکل ۳) مدل اصطکاک کولمب- ویسکوز [14]

۲-۱- مدل سیستم به همراه اثر استرایبک

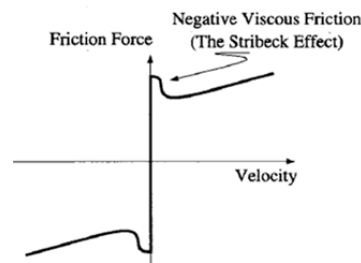
در اکثر شرایط معمول کاری در حالت پایدار ملاحظه می شود که در حالت پایدار سرعت سیستم با افزایش سرعت تا حد مشخصی از سرعت، نیروی اصطکاک کاهش می یابد. آزمایش های تجربی متفاوتی برای پیدا کردن رابطه تحلیلی این اثر با سرعت صورت گرفته و در نهایت با توجه به شرایط مختلف، رابطه تحلیلی ۶ برای چنین رفتاری پیشنهاد شده است [15].

$$F(\dot{x}) = b\dot{x} + F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + (F_s - F_c)e^{-(\dot{x}/v_s)^\delta} \quad (6)$$

پارامتر δ با توجه به محدوده سرعت جسم تعیین می شود. برای محدوده سرعت معمول حرکت قطعه کار روی بال اسکرو می توان $\delta = 2$ در نظر گرفت. بنابراین مدل نهایی اصطکاک در نظر گرفته شده در مقابل حرکت قطعه کار روی بال اسکرو به صورت رابطه ۷ خواهد بود.

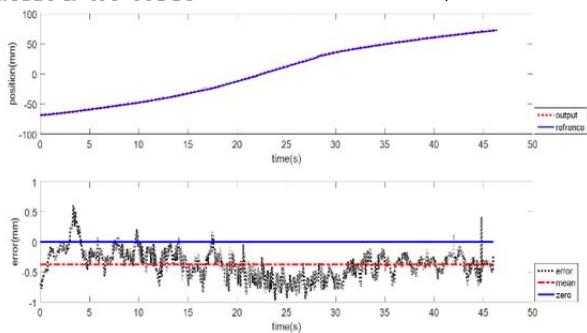
$$F(\dot{x}) = b\dot{x} + F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + (F_s - F_c)e^{-(\dot{x}/v_s)^2} \quad (7)$$

که در آن b ضریب ویسکوزیته، F_c نیروی اصطکاک کولمب، F_s نیروی اصطکاک ایستایی و v_s سرعت استرایبک است. بنابراین نمودار کلی اصطکاک بر حسب سرعت با در نظر گرفتن اثر ذکر شده در شکل ۴ مشاهده می شود.



شکل ۴) اثر استرایبک [15]

معادله ۷، رفتار نیروی اصطکاک را در سرعت های به اندازه کافی بزرگ به خوبی نشان می دهد، ولی این مدل برای سرعت های نزدیک به صفر مدل مناسبی نیست. زیرا مولفه اصطکاک کولمب در سرعت های نزدیک به صفر، تابعی ناپیوسته بوده و نرخ تغییرات نیروی اصطکاک در این نقطه بی نهایت است. این امر موجب مثبت



نمودار ۱) نتایج حاصل از آزمایش کنترلر PID و خطای ردیابی

۴- طراحی کنترلر غیرخطی

۴-۱- خطی‌سازی پس‌خورد

یکی از دلایل عمده برای استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی، محدوده وسیعی است که این کنترل‌کننده می‌تواند عمل کند و همچنین دقت بسیار بالایی است که این کنترل‌کننده دارد [16]. اگرچه دینامیک حاکم بر اکثر فرآیندهای صنعتی و سیستم‌های واقعی غیرخطی بوده، اما تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل برای حالت غیرخطی بسیار دشوار و پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های غیرخطی در بسیاری از موارد عملی و کاربردی امری غیرضروری است. در واقع، در عمل نشان داده شده است که سیستم‌های کنترل خطی، رده بسیار وسیعی از سیستم‌های واقعی و فرآیندهای پیچیده صنعتی را به خوبی کنترل می‌نمایند. از این رو، به دست آوردن مدل‌های دقیق خطی از سیستم‌های غیرخطی از نظر مهندسی بسیار مهم و اجتناب‌ناپذیر است. یک روش کاربردی و موفق در خطی‌سازی معادلات غیرخطی سیستم، خطی‌سازی پس‌خورد است. در مساله ردیابی مسیر، هدف به دست آوردن قانون کنترل u است، طوری که در هر شرایط اولیه‌ای، خطای ردیابی یعنی $x(t) - x_d(t)$ به سمت صفر میل کند و همچنین حالت‌های سیستم نیز محدود بماند. یکی از روش‌های بسیار کاربردی در طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی، روش خطی‌سازی پس‌خورد است. در این روش ابتدا سیستم با مدل دینامیک غیرخطی را به یک سیستم خطی یا گاهاً غیرخطی تبدیل و سپس توسط روش‌های استاندارد خطی کنترل می‌کند. در واقع در این روش هدف، حذف اثر غیرخطی و انتخاب یک کنترل‌کننده خطی برای پایداری است. برای این کار ابتدا حالت‌های سیستم مطابق با روابط ۱۶-۱۳ تعریف می‌شوند.

$$x_1 = x \quad (13)$$

$$x_2 = \dot{x} \quad (14)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x} \quad (15)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{a} \left[u - bx_2 - \frac{2}{\pi} F_c \arctan(\lambda x_2) - (F_s - F_c) \exp\left(-\left(\frac{x_2}{v_s}\right)^2\right) \right] \quad (16)$$

برای حذف عوامل غیرخطی می‌توان u را به صورت معادله ۱۷ تعریف کرد.

$$u = va + bx_2 + \frac{2}{\pi} F_c \arctan(\lambda x_2) + (F_s - F_c) \exp\left(-\left(\frac{x_2}{v_s}\right)^2\right) \quad (17)$$

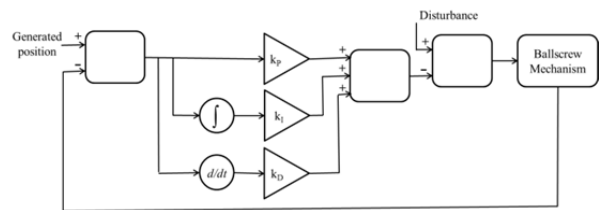
بنابراین با توجه به روابط ۱۳ و ۱۴، معادلات ۱۸ و ۱۹ حاصل می‌شوند.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (18)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x} = v \quad (19)$$

تامین می‌کنند. در واقع آنچه به‌عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده، همان پارامترهای لازم برای غلبه بر اصطکاک سیستم است. این گشتاور مجموع به سیستم اعمال می‌شود و به این ترتیب کنترل موقعیت صورت می‌گیرد. برای تنظیم ضرایب زیگلر- نیکولز، ابتدا باید بخش‌های انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر غیرفعال شود و فقط قسمت تناسبی فعال باشد.

در آغاز، یک مقدار کوچک برای K_c انتخاب می‌شود. سپس ورودی پله به‌عنوان ورودی مرجع به سیستم، اعمال و در این حالت به مقدار K_c به تدریج افزوده می‌شود تا جایی که سیستم مدار بسته دچار نوسان دایم شود. در این حالت، سیستم در مرز ناپایداری است. به این مقدار از بهره تناسبی، بهره نهایی (K_{cr}) گفته می‌شود. دوره تناوب این نوسانات نیز اندازه‌گیری و با p_{cr} نمادگذاری می‌شود. برای تنظیم ضرایب زیگلر- نیکولز براساس مقادیر اندازه‌گیری شده برای K_{cr} و p_{cr} قواعدی وجود دارد که در جدول ۱ قابل رؤیت است. پس از انجام آزمایش روی سیستم و بر مبنای قواعد ذکر شده در جدول ۱، نتایج به دست آمده مطابق با جدول ۲ است.



شکل ۵) نمودار بلوکی کنترلر PID

جدول ۱) قواعد تنظیم زیگلر- نیکولز براساس بهره بحرانی K_{cr} و دوره تناوب بحرانی p_{cr} [16]

k_p	k_i	k_d	P_{cr}	K_{cr}
۰/۲۷	۰/۷۵	۰/۹	۲/۴s	۱/۵

جدول ۲) نتایج آزمایش

K_c	τ_i	τ_D	زیگلر- نیکولز
$0.5 K_{cr}$	∞	\cdot	P
$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	\cdot	PI
$0.6 K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$0.125 P_{cr}$	PID

۳-۳- پیاده‌سازی کنترلر PID

برای آزمایش کنترلر به دست آمده باید آن را روی سیستم واقعی آزمایش نمود. این کار با اعمال ورودی سینوسی با فرکانس بسیار پایین به کنترلر انجام می‌شود. معادله ورودی اعمال شده مطابق با رابطه ۱۲ است.

$$r = 75 \sin 0.75t \quad (12)$$

نمودار ۱، نتیجه حاصل از دنبال کردن این مسیر سینوسی و خطای مربوط به آن را نشان می‌دهد. همان گونه که در نمودار ۱ مشخص است، بیشینه خطای ردیابی، حدود ۳ میلی‌متر است که برای هدف جوشکاری مطلوب نیست. بنابراین باید به دنبال روش دیگری بود که ورودی مرجع را با خطای کمتری دنبال کند. لذا در ادامه، روش کنترلی دیگری موسوم به خطی‌سازی پس‌خورد ارایه خواهد شد.

مستقر روی قطعه جوشکاری، تشخیص داده شده است و حرکت‌های تورچ متصل به ربات صنعتی و قطعه کار متصل به میز در دو راستای مستقل مرتبط می‌شوند. برای ایجاد مسیری هموار و مشتق‌پذیر، یک منحنی بی-اسپایلین برای تقریب مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان طور که بحث شد، برای نمونه واقعی، باید از روش خطی‌سازی پس‌خورده در مود سرعت، برای کنترل سیستم در ردیابی مسیر استفاده نمود. بر این اساس، قطعه کار شکل ۶ که انحنای درز صفحه‌ای دلخواهی دارد، برای آزمایش، انتخاب و کنترلر مذکور روی آن پیاده‌سازی شد.

بازوی رباتیک استفاده‌شده، ۶ درجه آزادی ساخت شرکت کوکا است. عملگر نهایی ربات یک مشعل جوشکاری مگ بوده و مطابق با شکل ۷، قطعه کار روی میز متحرک یک‌درجه آزادی بسته شده است. برنامه‌نویسی این ربات توسط یک پنل کنترل انجام می‌شود، به این صورت که با تعریف نقاط محدودی از مسیر درز به ربات، مشعل به‌صورت تقریبی روی درز حرکت می‌کند و دقت جوشکاری توسط میز کنترل‌شده تامین می‌شود.

در شکل ۸، اجزای مجموعه مشاهده می‌شود. در اینجا یک روش به‌دست‌آوردن برخط موقعیت درز جوشکاری به‌کمک روش نور ساخت‌یافته در حضور تشعشع و پاشش مواد مذاب طراحی و پیاده‌سازی می‌شود و با آزمایش، خطای ردیابی با تفاضل‌گیری از مقدار اندازه‌گیری می‌شود و مقدار واقعی به دست می‌آید. دوربین مجموعه ربات و قطعه کار تصویربرداری می‌کند و تصویر به‌دست‌آمده به یارانه منتقل می‌شود. با استفاده از یک منبع نور لیزر صفحه‌ای که با زاویه نسبت به دوربین قرار دارد، می‌توان مکان درز جوشکاری را در دستگاه مختصات حسگر به دست آورد. شدت نور قوس الکتریکی حدود چندصدوات است، در حالی که شدت نور لیزر حدود میلی‌وات است. این موضوع باعث می‌شود که به‌سختی بتوان نور لیزر را از نور قوس الکتریکی تفکیک کرد. اگر حسگر را با فاصله نسبت به محل جوشکاری قرار دهیم، این مشکل تا حدودی رفع می‌شود. مزیت دیگر استفاده از لیزر این است که در صورت موجودبودن فیلتر نوری مناسب می‌توان طول موجی که دلخواه ما نیست را فیلتر کرد. همچنین با کاهش زمان نوردهی دوربین، تأثیر نور قوس الکتریکی را کم کرد و مکان درز را از روی تغییر شکل در نوار لیزر به دست آورد. در اینجا از یک دوربین و یک لیزر برای این منظور استفاده می‌شود. نرخ تصویربرداری ۳۰ فریم بر ثانیه است. سپس الگوریتم پردازش تصویر در برنامه لب‌ویو اجرا می‌شود و موقعیت نقاط درز و همچنین مکان فعلی مشعل جوشکاری به‌صورت برخط به دست می‌آیند.

کنترل میز یک‌درجه آزادی توسط حلقه کنترلی براساس الگوریتم خطی‌سازی پس‌خورده در لب‌ویو انجام می‌شود. به این صورت که رایانه به درایور موتور میز از طریق پورت سریال متصل است و داده‌های مربوط به موقعیت و سرعت موتور انتقال پیدا می‌کند. قانون کنترلی در برنامه لب‌ویو براساس اطلاعات دریافتی، دستور متناسب را از طریق کارت دک به درایور اعمال می‌کند. یک کارت رابط وجود دارد که دستور شروع جوشکاری را به دستگاه جوشکاری ارسال می‌کند. همچنین این کارت برای اعمال سیگنال شروع به حرکت و هماهنگ‌کردن حرکت ربات با برنامه لب‌ویو کار می‌کند.

دو حلقه پردازش در برنامه لب‌ویو وجود دارد. حلقه اول مربوط به کنترل میز و حلقه دوم مربوط به استخراج برخط محل مشعل جوشکاری از روی تصویر است. هر کدام از این حلقه‌ها روی یکی از هسته‌های CPU اجرا می‌شوند. پس از انجام آزمایش، نمودار ۳

حال با فرض این که x_d مسیر مطلوب است و \dot{x}_d و \ddot{x}_d مشتقات اول و دوم آن هستند، v را باید بر حسب x ، \dot{x} ، \ddot{x} و \dot{x}_d به‌گونه‌ای طراحی نمود که معادله نهایی، یک معادله بر حسب خطای بین مسیر واقعی و مسیر مطلوب باشد که در زمان بی‌نهایت ثابت شود، خطا به سمت صفر میل می‌کند. بنابراین v به‌صورت رابطه ۲۰ تعریف می‌شود.

$$v = \dot{x}_d + k_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_p(x_d - x) \quad (20)$$

بنابراین با توجه به رابطه ۱۹، نتیجه‌ای که حاصل می‌شود، مطابق با معادله ۲۱ خواهد بود:

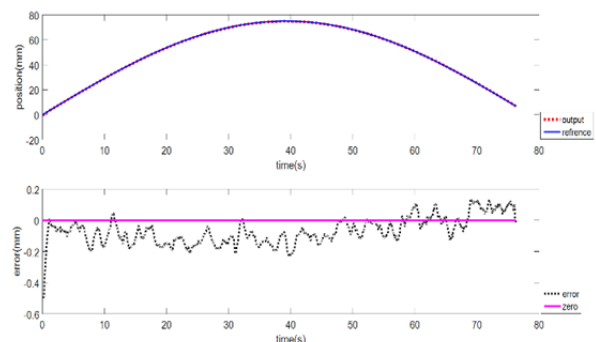
$$\ddot{x} = \ddot{x}_d + k_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_p(x_d - x) \Rightarrow \ddot{e} + k_d\dot{e} + k_p e = 0 \quad (21)$$

کافی است مقادیر مثبت برای k_p و k_d انتخاب شود تا ردیابی کامل مسیر مرجع تحقق یابد.

با توجه به رابطه ۲۱، دینامیک خطا، یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم است. از آنجایی که سمت چپ معادله، بیان‌کننده شتابی است که باید به سیستم اعمال شود، بنابراین با انتگرال‌گیری از دو طرف رابطه مذکور می‌توان به قانون کنترلی دست یافت که فرمان سرعت را صادر می‌کند. عمل انتگرال‌گیری و ارسال فرمان به کارت داده‌برداری، همان گونه که قبلاً نیز ذکر شد، از طریق برنامه‌نویسی در نرم‌افزار لب‌ویو انجام شده است و همچنین با انتخاب مقادیر کوچک برای k_p و k_d و سپس افزایش تدریجی آنها این کنترلر مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه نهایی آزمایش‌ها در بخش بعدی بررسی خواهد شد.

۴-۲- پیاده‌سازی کنترلر خطی‌سازی پس‌خورده

بار دیگر مطابق با معادله ۱۲، یک ورودی سینوسی به‌عنوان مرجع برای انجام آزمایش به کنترلر وارد می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های متعدد بهترین نتیجه‌ای که حاصل شد به‌ازای $k_p = 1$ و $k_d = 2$ بوده که در نمودار ۲ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار ۲، در این روش بیشینه خطای ردیابی حدود ۰.۵ میلی‌متر است. در نتیجه خطی‌سازی پس‌خورده، بسیار بهتر از کنترلر PID از عهده ردیابی مسیر بر آمده است. بنابراین از روش اخیر برای پیاده‌سازی روی نمونه واقعی استفاده می‌شود.



نمودار ۲) نتایج حاصل از آزمایش کنترلر خطی‌سازی پس‌خورده و خطای ردیابی

۵- نتایج عملی

بنا بر آنچه در بخش‌های قبل، در مورد روش‌های مختلف روی آن بحث شد، در این بخش به اعمال کنترلر خطی‌سازی پس‌خورده روی یک قطعه واقعی پرداخته می‌شود. درز جوشکاری در آزمایش‌های تجربی با استفاده از یک سیستم بینایی از طریق یک دوربین

۶- نتیجه‌گیری

در فرآیندهای جوشکاری رباتیک، یافتن محل درز جوشکاری و همچنین اصلاح خطای ردیابی درز از جمله چالش‌های اصلی این حوزه بوده و مطالعات زیادی صورت پذیرفته است. شناسایی درز به روش‌های بسیاری امکان‌پذیر بوده و بینایی ماشین که در این مقاله نیز استفاده شده، یکی از روش‌های موجود است. با شناسایی درز، مسیر حرکت ربات باید اصلاح شود. تاکنون از خود ربات برای این کار استفاده شده که این کار در عمل، با مشکلاتی همراه است. در بعضی از ربات‌های صنعتی، امکان دسترسی به کنترلر ربات میسر نیست. همچنین، ربات‌های مفصلی عموماً دقت پایینی دارند (حدود یک‌میلی‌متر) و در برخی کاربردهای جوشکاری، این دقت مناسب نیست. استهلاک بالای ربات در مسیر جوشکاری زیگزاگ نیز از سایر مشکلات است. در این مقاله، برای حل مشکلات یادشده، از یک مکانیزم واسط برای جبران خطای ردیابی درز در فرآیند جوشکاری رباتیک استفاده شد. مکانیزم واسط شکل‌های مختلفی می‌تواند داشته باشد. در این مقاله، با توجه به امکانات موجود، از یک میز بال‌اسکرو یک‌درجه آزادی که قطعه کار را جابه‌جا می‌کند، برای تصحیح خطا استفاده شد. محل ربات جوشکار که مسیر نزدیک به درز را می‌پیماید، به وسیله یک دوربین معمولی که در واقع یک سنسور غیرهم‌مرکز بوده، رویت شده است و نهایتاً ورودی کنترلر ایجاد شد. برای کنترل مکانیزم با دقت مطلوب، از روش خطی‌سازی پسخورد، نتایج بهتری از نظر کیفیت حاصل شد. با استفاده از این مکانیزم، دقت ۳ میلی‌متر برای کنترلر PID و ۰.۵ میلی‌متر خطی‌سازی پسخورد حاصل شد. لذا مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهند که خطای ردیابی مربوط به کنترل‌کننده نوع دوم مبتنی بر مدل غیرخطی کمتر از یک‌ششم خطای ناشی از ردیابی به کمک کنترل‌کننده نوع اول مبتنی بر مدل خطی است. به عبارت دیگر، خطای به دست آمده برای روش خطی‌سازی پسخورد، حداکثر ۱۶.۶٪ خطای کنترل‌کننده PID و در حد قابل قبولی برای فرآیند جوشکاری دقیق خواهد بود. البته با استفاده از امکانات مناسب، دستیابی به دقت‌هایی در واحد میکرومتر نیز امکان‌پذیر است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: زهرا ناصری اصل (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ رسول فشارکی فرد (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛

حامد غفاری‌راد (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

۷- پی‌نوشت

ضریب جرم و اینرسی ($N.s^2$)	a
ویسکوزیته ($N.s$)	b
نیروی اصطکاک کولمب (N)	F_c
اصطکاک ایستایی (N)	F_s
مان اینرسی کوپلینگ ($kg.m^2$)	$J_{coupling}$
مان اینرسی موتور ($kg.m^2$)	J_{motor}
مان اینرسی اسکرو ($kg.m^2$)	J_{screw}
مان اینرسی کل ($kg.m^2$)	J_{total}
بهره تناسبی	k_c
بهره بحرانی	K_{cr}
ضریب مشتق‌گیر	k_D

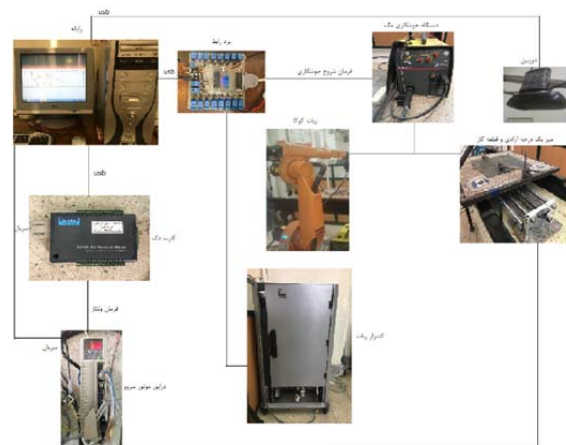
به عنوان نتایج نهایی استخراج شد. همان گونه که در نمودار مربوط به خطا دیده می‌شود، اندازه میانگین خطای به دست آمده از آزمایش روی نمونه واقعی، تقریباً ۰.۳ میلی‌متر است.



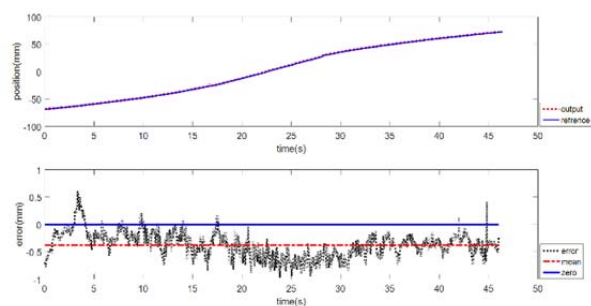
شکل ۶) قطعه کار استفاده شده برای آزمایش



شکل ۷) نصب آزمایشگاهی ربات و میز بال‌اسکرو



شکل ۸) چیدمان سیستم عملی



نمودار ۳) نتایج حاصل از آزمایش روی قطعه کار و خطای ردیابی

Estimation and Compensation of Friction in Industrial Cable Robot Manipulation. IFAC-PapersOnLine. 2015;48(3):1332-1337.

5- Asghar F, Talha M, Kim SH. Comparative study of three fault diagnostic methods for three phase inverter with induction motor. International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. 2017;17(4):245-256.

6- Kelling LUC. Numerical control of machine tools. IRE Transactions on Industrial Electronics. 1995;PGIE-2:3-8.

7- Franklin GF. Feedback control of dynamic systems. 4th Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall; 2002.

8- Xu P, Xu G, Tang X, Yao Sh. A visual seam tracking system for robotic arc welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008;37(1-2):70-75.

9- Spong MW, Corke P, Lozano R. Nonlinear control of the reaction wheel pendulum. Automatica. 2001;37(11):1845-1851.

10- Zou Y, Wang Y, Zhou W, Chen X. Real-time seam tracking control system based on line laser visions. Optics and Laser Technology. 2018;103:182-192.

11- Zou Y, Chen T. Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker. Optics and Lasers in Engineering. 2018;105:141-149.

12- Zou Y, Chen X, Gong G, Li J. A seam tracking system based on a laser vision sensor. Measurement. 2018;127:489-500.

13- Jin W. A comparative study of fault detection and health assessment techniques for motion control mechanism [Dissertation]. Cincinnati: University of Cincinnati; 2014.

14- Olsson H, Åström KJ, De Wit CC, Gäfvert M, Lischinsky P. Friction models and friction compensation. Eurpon Journal of Control. 1998;4(3):176-195.

15- Armstrong-Hélouvy B, Dupont P, De Wit CC. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. Automatica. 1994;30(7):1083-1138.

16- Ogata K. Modern control engineering. 3rd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall; 1997.

ضریب انتگرال گیر	k_I
ضریب تناسبی	k_P
ویسکوزیته (N.s)	k_v
جرم بار (kg)	M_{load}
دوره تناوب بحرانی	P_{cr}
شعاع پیچ (m)	r
سرعت مکانیزم ($m.s^{-1}$)	v
سرعت استراییک ($m.s^{-1}$)	v_s
گشتاور موتور (N.m)	U_{motor}
علایم یونانی	
زمان مشتق	τ_D
زمان انتگرال	τ_I
زیرنویسها	
مولفه اصطکاک کولمب	c
مقدار بحرانی	cr
مشتق گیر	D
انتگرال گیر	I
بار (قطعه کار)	Load
تناسبی	P
مولفه اصطکاک ایستایی	s

منابع

1- Jenney CL, O'Brien A, editors. Welding Hand Book. 9th Edition. 1st Volume. Miami: American Welding Society; 2001.

2- Zhang H, Ding X, Chen M, Da B, Zou C. The Seam Tracking System for Submerged Arc Welding. In: Tarn TJ, Chen SB, Zhou C, editors. Robotic Welding, Intelligence and Automation. Berlin: Springer Science & Business Media; 2004. pp. 144-151.

3- Muhammad J, Altun H, Abo-Serie E. A robust butt welding seam finding technique for intelligent robotic welding system using active laser vision. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;94(1-4):13-29.

4- Gungor G, Turhan MH, Jamshidifar H, Fidan B. Online