



Implementation of PID Control Algorithm with Variable Setpoint on Arduino Board to Control the Polishing Force



ARTICLE INFO

Authors

Paranideh A.¹,
Moetakef-Imani B.^{1*}

¹ Mechanical Engineering Department,
Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

* Correspondence

Address: Ferdowsi University of
Mashhad, Azadi Square, Mashhad,
Khorasan Razavi province, Iran.
Postal Code: 9177948944
imani@um.ac.ir

How to cite this article

Paranideh A, Moetakef-Imani B.
Implementation of PID Control
Algorithm with Variable Setpoint on
Arduino Board to Control the Polishing
Force. Modares Mechanical
Engineering. Proceedings of 2nd Iranian
National Conference on Advanced
Machining and Machine Tools
(CAMMT). 2022;22(10):81-89.

ABSTRACT

In the polishing process, one of the factors affecting material removal is the contact force between the tool and the workpiece. The contact force parameter is important in the sense that in this process, the amount of this force is lower than other machining processes, as a result, the force contact is one of the important issues to be controlled. In this research, a force control system based on the implementation of proportional-integral-derivative (PID) control algorithm with regulatory strategy in Arduino board is presented. It is possible to apply command signals to the actuator by the Pulse Width Modulation (PWM) unit of the Arduino board. The polishing setup in this research includes solenoid, dynamometer, direct current (DC) motor and belt sander. PID control coefficients were estimated by system identification method and using MATLAB software tools. The results show that the control system designed on the Arduino board provides the desired stability to control the polishing force with an acceptable error. Among other advantages of the developed system, the need for additional equipment is reduced compared to other commercial systems and it is more economical.

Keywords Force Control, PID Control, Variable Setpoint, Arduino Board, Polishing Process

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژهنامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته.
مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۸۱-۸۷.



پایه‌سازی الگوریتم کنترل PID با نقطه تنظیم متغیر بر روی برد آردوینو برای کنترل نیروی پولیش کاری



چکیده

در فرآیند پولیش کاری، یکی از عوامل تأثیرگذار بر حذف مواد، نیروی تماسی بین ابزار و قطعه کار می‌باشد. پارامتر نیروی تماسی به این لحاظ حائز اهمیت است که در این فرآیند مقدار این نیرو نسبت به سایر فرآیندهای ماشین‌کاری کمتر است، در نتیجه نیروی تماسی یکی از موضوعات مهم است که باید کنترل شود. در این پژوهش یک سیستم کنترل نیرو مبتنی بر پایه‌سازی الگوریتم کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) با قابلیت تنظیم در برد آردوینو ارائه می‌گردد. اعمال سیگنال‌های فرمان به عملکرد، توسط واحد مدولاسیون عرض پالس (PWM) برد آردوینو امکان‌پذیر است. بستر آزمایشگاهی پولیش کاری در این پژوهش شامل سلونوئید، نیروسنج، موتور جریان مستقیم (DC) و سنباده نواری می‌باشد. ضرایب کنترل PID توسط روش شناسایی سیستم و با استفاده از ابزارهای نرم‌افزار متلب تخمین زده شدند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم کنترلی طراحی شده بر روی برد آردوینو، پایداری موردنظر برای کنترل نیروی پولیش کاری را با خطای قابل قبول قبول ارائه می‌دهد. از دیگر مزایای سیستم توسعه یافته، نیاز به تجهیزات اضافی نسبت به سایر سیستم‌های تجاری کاهش یافته و صرفه اقتصادی بیشتر است.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

احمد پرانیده^۱

بهنام معتف ایمانی^{۱*}

^۱ دانشگاه فردوسی، مشهد

* نویسنده مسئول

آدرس: استان خراسان رضوی، مشهد،

میدان آزادی، دانشگاه فردوسی.

imani@um.ac.ir

کلیدواژه‌ها کنترل نیرو، کنترل PID، نقطه تنظیم متغیر، برد آردوینو، فرآیند پولیش کاری

۱- مقدمه

فرآیند پولیش کاری (Polishing Process) معمولاً به عنوان آخرین فرآیند تولید (پرداخت سطوح) جهت حصول اطمینان از کیفیت مناسب سطح قطعات در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند مذکور سرعت حذف مواد عمدتاً به پارامترهایی نظیر جنس ذرات سنباده، جنس قطعه کار، سرعت و نیروی فشاری بین ابزار و سطح قطعه کار وابسته است. یکی از مهمترین پارامترهای این فرآیند نیرو می‌باشد، که در اکثر شرکت‌های تجاری تولیدکننده‌ی دستگاه‌های پولیش کاری برای کنترل این پارامتر تلاش‌های فراوانی صورت گرفته است. بنابراین کنترل نیروی بین ابزار و قطعه کار در حین فرآیند از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت سطح قطعات می‌باشد.

۱-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

کنترل نیروی پولیش کاری باید توسط یک سیستم کنترلی حلقه بسته صورت پذیرد. محققان سیستم‌های مختلفی نظیر سیستم‌های پنوماتیک (Pneumatic)، سیستم‌های سروو یا ربات‌های صنعتی را برای کنترل نیروی پولیش کاری استفاده کرده‌اند. سیستم‌های ذکر شده به دلیل بالا بودن هزینه یا بعضاً سرعت پاسخ آهسته، نمی‌توانند پاسخگوی مناسبی برای تحقق این امر باشند. برای تولید سیگنال‌های فرمان به عملگرها، روش‌هایی نظیر روش کنترل منطق فازی، روش کنترل شبکه عصبی و روش کنترل PID کاربرد گسترده‌ای دارند. در بین این روش‌ها الگوریتم کنترل PID به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، کاربرد در موقعیت‌های مختلف و درک آسان‌تر بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد^[1].

ژینلانگ دانگ و همکاران به منظور کنترل نیروی فرآیند پولیش کاری، یک سیستم کنترل نیروی پنوماتیک مبتنی بر یک شیر روشن/خاموش سرعت بالا را پیشنهاد کردند. ایشان شیر را توسط یک کنترل‌کننده منطقی PID که در PLC قابل برنامه‌ریزی هستند، به وسیله سیگنال‌های PWM بر روی یک ربات پیوندی با ۵ درجه آزادی کنترل کردند^[1]. ژیانگ گنو و همکاران به منظور کنترل نیروی پولیش کاری میکرو-اپتیک (micro-optic)، یک سیستم کنترل برخط طراحی کردند. در تحقیق ایشان از یک حسگر نیروسنج برای اندازه‌گیری نیرو و یک حسگر پیزو (piezo) جهت تنظیم نیرو استفاده شده است. ایشان الگوریتم کنترل PID را جهت رسیدن به پایداری نیرو در طی فرآیند، بر روی یک موتور پله‌ای پیاده‌سازی کردند^[2]. فنجی تیام و همکاران به منظور بهبود کیفیت سطوح منحنی توسط ربات پولیش کاری، اقدام به طراحی یک سیستم کنترل نیرو در طی فرآیند کردند. توسط ایشان اهمیت نیروی فرآیند تحلیل و مدل کنترل فشار طراحی شده است. سیستم پیشنهادی ایشان، یک سیستم نیرو-موقعیت-وضعیت مجزا بوده که این سیستم کنترلی باعث بهبود کیفیت سطوح

منحنی گردیده است^[3]. فاساأمی ناگاتا و همکاران برای بهبود کیفیت سطح و کنترل نیروی فرآیند پولیش کاری قالب‌ها، یک سیستم کنترل موقعیت-نیرو مبتنی بر طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر (CAD/CAM)، بر روی یک ربات پولیش کاری قالب ارائه دادند^[4]. کندالاس و همکاران چند پروژه آموزشی نظیر کنترل دمای چاپگر سه بعدی، خودکارسازی ربات، برنامه‌نویسی ربات انسان‌نما و برنامه‌نویسی ربات دنبال‌کننده را توسط بردهای آردوینو (Arduino) انجام دادند. این پروژه‌ها توسط تیم‌هایی از دانشجویان دانشگاه آلیکانته (Alicante) انجام شده است. ایشان با توجه به نظرسنجی از دانشجویان بعد از اتمام پروژه‌ها، نتیجه گرفتند که این بردهای ارزان قیمت در زمینه کنترل می‌توانند بسیار مفید و مؤثر واقع شوند^[5].

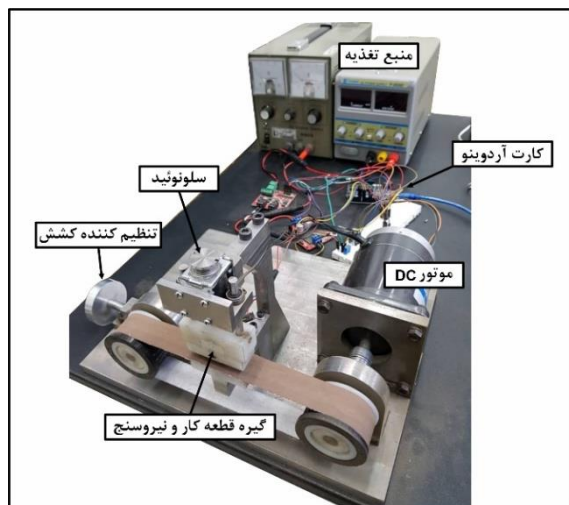
۱-۲- شرح مسئله

با توجه به تحقیقات صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت، که بردهای آردوینو می‌توانند به عنوان یک کنترلگر مورد استفاده قرار گیرند. همچنین این کارت‌های مذکور می‌توانند به صورت همزمان از حسگرها داده‌برداری کنند. این ویژگی‌ها باعث می‌گردد نیاز به تجهیزات اضافی کاهش یابد. همچنین با توجه به تحقیقات صورت گرفته، کنترلگر حلقه بسته PID برای کنترل نیروی فرآیند نسبت به سایر کنترلگرها کاربرد بیشتری دارد.

با توجه به نتایج فوق، این پژوهش یک سیستم کنترل نیروی پولیش کاری که از یک عملگر سلونوئید (Solenoid) در آن استفاده شده است را پیشنهاد می‌کند، که این سلونوئید توسط سیگنال‌های PWM کنترل می‌شود. در این پژوهش از الگوریتم کنترل PID با نقطه تنظیم متغیر برای کنترل نیروی فرآیند پولیش کاری در حین فرآیند استفاده می‌شود. به منظور پیاده‌سازی این کنترلگر از برد آردوینو سری AVR-ATMEGA328P مدل UNO بهره گرفته شده است. کارت مذکور به واسطه واحد PWM خود این امکان را فراهم می‌سازد، که بتوان سیگنال خروجی دیجیتال را به رفتار آنالوگ تبدیل کرد. برای کاهش زمان در امر برنامه‌نویسی از کتابخانه‌های موجود کنترل PID برای برد آردوینو استفاده شده است. ضرایب PID توسط روش شناسایی سیستم تخمین زده شده‌اند. برای شناسایی سیستم، سیگنال روشن/خاموش زمان تصادفی به عملگر اعمال شده است. در نرم‌افزار متلب از ابزار شناسایی سیستم با فرض سیستم مرتبه دو، تابع تبدیل سیستم محاسبه و با استفاده از ابزار تنظیم کنترل PID، ضرایب کنترلگر تخمین زده شده است.

بستر آزمایشگاهی جهت انجام فرآیند پولیش کاری در آزمایشگاه طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده است. با توجه به نیاز صنعت در زمینه کیفیت سطح، سیستم پیشنهادی این پژوهش را به دلیل داشتن قابلیت توسعه و بهبود می‌توان در فرآیندهای مختلف پولیش کاری پیاده‌سازی نمود.

شده است. اطلاعات قطعات الکترونیکی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.



شکل (۱) بستر آزمایشگاهی

جدول (۱) اطلاعات قطعات الکترونیکی

مشخصات	قطعات الکترونیکی
مدل UNO - پردازنده ATMEGA328P ۱۴ ورودی/خروجی دیجیتال (۶ خروجی PWM) ۶ ورودی آنالوگ - ساعت ۱۶ مگاهرتز حافظه ۳۲ کیلوبایت	کارت آردوینو
مدل SH-1040S ولتاژ نامی ۱۵ ولت - جریان نامی ۱/۵ آمپر	سلونوئید
سری DC - مدل 08GAF توان نامی ۴۰ وات - ولتاژ نامی ۲۴ ولت جریان نامی ۲/۲ آمپر - دور نامی ۱۸۰۰ دور	موتور
مدل Monster Moto Shield بیشینه ولتاژ ۱۶ ولت - بیشینه جریان لحظه‌ای ۳۰ آمپر جریان‌دهی پیوسته عملی ۱۴ آمپر بیشینه بسامد PWM ۲۰ کیلوهرتز قابلیت راه‌اندازی دو موتور - قابلیت سنجش جریان	راه‌انداز سلونوئید
مدل XY-160D بیشینه ولتاژ ۳۶ ولت - جریان‌دهی پیوسته عملی ۷ آمپر بیشینه بسامد PWM ۲۰ کیلوهرتز - قابلیت راه‌اندازی دو موتور	راه‌انداز موتور
سری فشار مقاومتی - مدل FSR-402 سنسور آنالوگ - حساسیت ۰/۱ نیوتون محدوده حساسیت نیرو ۱۰-۰ نیوتون - تکرارپذیری $\pm 2\%$ درصد مقاومت غیرفعال ۱۰ مگا اهم محدوده ضخامت ۰/۲-۱/۲۵ میلی‌متر پسماند ۱۰ درصد - زمان نمونه‌برداری ۳ میکروثانیه	حسگر نیرو
سری شمارنده نوری - مدل FC-03 خروجی دیجیتال - ولتاژ کاری ۳/۳/۵ ولت عرض شیار ۵ میلی‌متر - نشانگر وضعیت خروجی تعداد حفره دیسک ۱۰ حفره	حسگر دور موتور

سیگنال‌های PWM سیگنال‌هایی از جنس دیجیتال هستند که یک سیگنال آنالوگ را شبیه‌سازی می‌کنند. چرخه‌کاری سیگنال‌های PWM توسط معادله (۱) تعریف می‌شوند^[۱]:

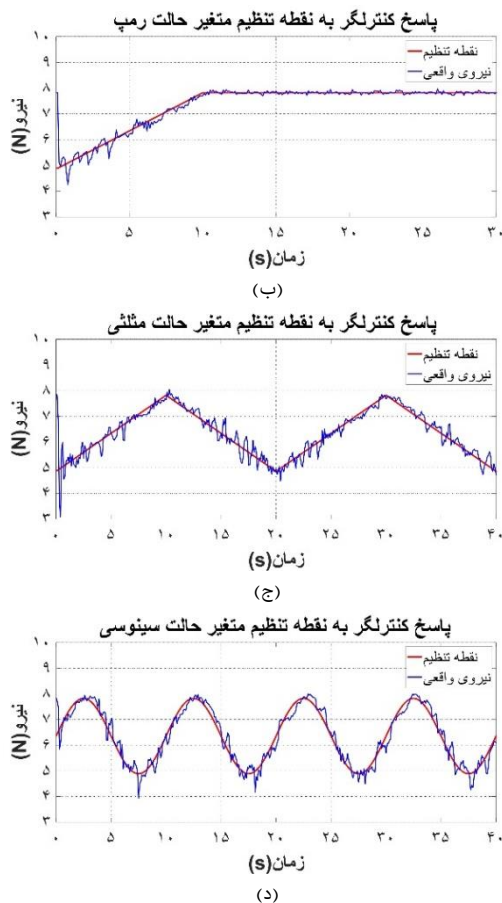
۲- روش حل

در شکل ۱ بستر آزمایشگاهی پولیش‌کاری قابل مشاهده است. فرآیند پولیش‌کاری توسط سنباده نواری از جنس اکسید آلومینیوم انجام می‌پذیرد، که میزان کشش نوار سنباده مذکور توسط دو پولی از جنس پلی‌اورتان قابل تنظیم می‌باشد. موتور DC که توسط کوپلینگ آلومینیومی انعطاف‌پذیر به پولی ثابت متصل است، نیروی لازم جهت دوران سنباده را تأمین می‌نماید. برای تنظیم سرعت دورانی موتور مذکور از مقاومت متغیر و به‌منظور اندازه‌گیری آن از یک حسگر شمارنده نوری FC-03 استفاده شده است. قطعه کار توسط گیره متصل به سلونوئید، بر روی نوار سنباده قرار می‌گیرد. این گیره دو قسمتی می‌باشد که بخش زیرین محل قرارگیری قطعه کار و بخش فوقانی محل قرارگیری حسگر نیروسنج است. محور سلونوئید در راستای عمود بر سطح نوار سنباده قابلیت جابجایی دارد. به‌منظور اندازه‌گیری نیرو در حین فرآیند از حسگر مقاومت فشاری FSR-402 استفاده شده است. وجود تکیه‌گاه در زیر محل قرارگیری قطعه بر روی نوار سنباده، مانع از ایجاد قوس برداشتن یا کروی شدن سطح قطعه کار می‌گردد. نیروی اندازه‌گیری شده توسط حسگر نیروسنج، ورودی سیستم کنترلی حلقه بسته PID می‌باشد که کنترلرگ مبتنی بر آن، سیگنال‌های فرمان PWM مناسب را به سلونوئید اعمال می‌کند.

امروزه کارت‌های آردوینو بسیار متنوعی با پردازنده‌ها، تعداد خروجی/ورودی مختلف و ویژگی‌های ارتباطی متفاوت در دسترس هستند، که تهیه آن‌ها با هزینه بسیار پایین امکان‌پذیر می‌باشد. برای برنامه‌نویسی پردازنده‌ی تمامی کارت‌های آردوینو نرم‌افزار کاملاً رایگان Arduino IDE استفاده می‌شود که نصب آن برای تمام سیستم عامل‌های موجود در بازار امکان‌پذیر است. زبان برنامه‌نویسی این سخت‌افزارها، زبان Arduino C می‌باشد. در حال حاضر کتابخانه‌های آماده زیادی برای سهولت در امر برنامه‌نویسی برای این بردها وجود دارد. تمام این ویژگی‌ها باعث می‌شود که آردوینو به‌طور چشم‌گیری در زمینه آموزش، کنترل و رباتیک محبوب شود^[۵].

همزمان با اجرای سیستم کنترلی، کارت فوق قابلیت داده‌برداری به‌طور همزمان را نیز دارا می‌باشد، که باعث عدم نیاز به تجهیزات داده‌برداری مجزا می‌شود. برنامه‌نویسی بر پایه بستر خود ریزپردازنده‌ی کارت طراحی شده است، که همچنین باعث عدم نیاز به تجهیزاتی نظیر رایانه در کنار دستگاه می‌شود. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگر نیروسنج، توسط بخش آنالوگ (Analog) کارت قرائت می‌شوند. کنترلرگ PID توسط مقایسه نیروهای اندازه‌گیری شده واقعی و مقدار نقطه تنظیم در هر لحظه، سیگنال‌های مناسب PWM را تولید و به صورت فرمان به سلونوئید ارسال می‌کند. سطح ولتاژ و سطح جریان کارت آردوینو نمی‌تواند توان مورد نیاز جهت جابجایی محور سلونوئید را تأمین کند. از این رو به‌منظور تقویت این توان، از درایور موتور Monster Moto Shield استفاده

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته



شکل ۲) پاسخ کنترلر PID به (الف) نقطه تنظیم ثابت (ب) نقطه تنظیم متغیر حالت رمپ (ج) نقطه تنظیم متغیر حالت مثلثی (د) نقطه تنظیم متغیر حالت سینوسی

جدول ۴) نتایج آماری عملکرد کنترلر

پارامتر آماری	میانگین خطا (نیوتون)	انحراف معیار (نیوتون)	بیشینه خطا (نیوتون)
حالت نقطه تنظیم ثابت	۰/۰۵۳۹	۰/۰۷۱۸	۰/۲۳۴۶
رمپ	۰/۰۷۰۸	۰/۱۱۵۲	۰/۸۴۲۷
مثلث	۰/۱۷۷۷	۰/۲۳۲۹	۰/۹۴۶۷
سینوس	۰/۲۲۰۳	۰/۲۷۶۴	۰/۹۵۸۰

۵- نتیجه گیری

سیستم کنترلی پیشنهادی مقاله بر روی دستگاه پولیش کاری اجرا شد و می تواند پاسخ مناسبی جهت کنترل نیروی پولیش کاری ارائه دهد. پیاده سازی کنترلر PID در کارت آردوینو، علاوه بر صرفه اقتصادی و کاهش تجهیزات مورد نیاز نسبت به سیستم های تجاری، توانایی غلبه بر کاهش نیرو به دلیل براده برداری از سطح و کاهش ارتفاع قطعه کار در حین فرآیند را دارد که باعث ردیابی نقطه تنظیم متغیر در حین انجام فرآیند در زمان های طولانی تر خواهد شد. خطاهای ردیابی نقطه تنظیم متغیر توسط سیستم پیشنهادی قابل قبول است. بهترین عملکرد سیستم کنترلی، ردیابی نقطه تنظیم متغیر با حالت رمپ است. سیستم کنترلی پیشنهادی باعث

دامنه قله اوج تا قله قعر ۳۰۰ - میانگین ۶۵۰
۱۰۰ نمونه در هر تناوب

سینوس

جدول ۳) فرضیات کنترلر PID

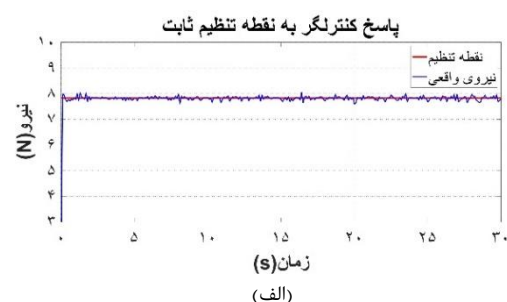
پارامتر	فرض	نتایج ابزار تنظیم ضرایب متلب
بالا زدگی (درصد)	$< 5/0000$	۴/۶۶۰۰
زمان صعود (ثانیه)	$< 0/0100$	۰/۰۰۲۰
زمان نشست (ثانیه)	$< 0/0500$	۰/۰۱۳۶
پایداری	دارد	دارد

۴- تحلیل نتایج

در شکل ۲ نتایج اعمال کنترلر PID با نقطه تنظیم متغیر برای چهار حالت پله ای، رمپ، مثلثی و سینوسی قابل مشاهده می باشد. همانطور که مشاهده می شود سیستم پیشنهادی قابلیت ردیابی نقطه تنظیم متغیر را دارد. در فرآیند پولیش کاری نیروی فشاری بین قطعه کار و ابزار نسبت به سایر روش های ماشین کاری پایین تر است و طراحی کنترلر جهت کنترل نیرو در این فرآیند منجر به پایداری و تنظیم نیروی مذکور می گردد، که اعمال آن باعث کاهش زبری و افزایش یکنواختی سطح قطعه کار خواهد شد. بنابراین می توان توسط سیستم کنترلی پیشنهادی این پژوهش کیفیت سطح قطعات مختلف را بهبود بخشید. با بررسی داده های موجود از لحاظ آماری که در جدول ۴ مشاهده می شوند، بیشینه میزان خطا برای هر کدام از حالت های نقطه تنظیم قابل قبول می باشد. از دلایل اغتشاش مشاهده شده در شکل ۲ و خطای حاصل از دیدگاه آماری در جدول ۴، محل اتصال دو لبه سنباده نواری به دلیل تغییر ضخامت می باشد. با توجه به اطلاعات جدول ۴، پاسخ سیستم کنترلی به تغییرات نقطه تنظیم به صورت رمپ بهترین عملکرد را دارا می باشد.

با توجه به نتایج تجربی، سیستم پیشنهادی می تواند نیروی واقعی را برای ردیابی نیروی مورد نظر در هر لحظه در طی فرآیند حفظ کند. پیاده سازی الگوریتم کنترلر PID بر روی کارت آردوینو می تواند دقت مناسب، پایداری و قابلیت اطمینان مطلوبی را برای کنترل نیروی پولیش کاری ارائه دهد.

در ادامه این پژوهش در نظر گرفته شده است عملیات پولیش کاری بر روی قطعه کارهای مختلف با جنس متفاوت انجام شود تا تأثیر سیستم کنترلی بر روی کیفیت سطح قطعه کارها، توسط اندازه گیری زبری سطح بررسی شود.



- 1- Dong J, Shi J, Liu C, Yu T. Research of Pneumatic Polishing Force Control System Based on High Speed On/Off with PWM Controlling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2021; 1:14-70.
- 2- Guo J, Suzuki H, Morita S, Yamagata Y, Higuchi T. A real-time polishing force control system for ultraprecision finishing of micro-optics. Precision Engineering. 2013; 787:792-37.
- 3- Tian F, Li Z, Lv C, Liu G. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces. Adv Manuf Technol. 2016; 1:8.
- 4- Nagata F, Hase T, Haga Z, Omoto M, Watanabe K. CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot. Mechatronics. 2007; 207:216-17.
- 5- Candelas FA, Garcia GJ, Puente S, Pomares J, Jara CA, Perez J, Mira D, Torres F. Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. IFAC-PapersOnline 48. 2015; 105:110-29.
- 6- Cameron N. Arduino Applied: Comprehensive Projects for Everyday Electronics. Edinburg, UK: Apress; 2019. 555 p

پایداری، دقت و قابلیت اطمینان مطلوب در کنترل نیروی پولیش کاری شده است. بنابراین برای رفع نیاز صنعت به کیفیت سطح مناسب قطعات، سیستم کنترلی پیشنهادی می‌تواند در فرآیندهای پولیش کاری مختلف پیاده‌سازی شود که نیروی پولیش کاری را در طی انجام فرآیند کنترل نماید و به دنبال آن کیفیت سطح مناسب برای قطعات را به همراه داشته باشد. در ادامه پژوهش بهبود عملکرد سیستم و تأثیر کنترلگر بر روی زبری و کیفیت سطح قطعه کارهایی با جنس‌های مختلف در نظر گرفته خواهد شد.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: بدین‌وسیله نویسندگان اعلام می‌کنند این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچ‌گونه تضاد منافی با اشخاص دیگر یا سازمان‌ها ندارد.

منابع مالی: این پژوهش از هیچ سازمانی حمایت مالی دریافت نکرده است.

فهرست علائم

A	مقدار خوانده شده توسط واحد آنالوگ کارت آردوینو
b_e	نرخ تغییر در خطا
d	چرخه کاری سیگنال PWM (درصد)
e	خطای فعلی
F	نیروی اندازه‌گیری شده حسگر (N)
G	تابع تبدیل
I	ورودی واقعی اندازه‌گیری شده کنترلگر
K_p	ضریب عبارت تناسبی
K_i	ضریب عبارت انتگرالی
K_d	ضریب عبارت مشتقی
O	خروجی کنترلگر
s	لاپلاس
S	نقطه تنظیم کنترلگر
T_{on}	زمان فعال سیگنال PWM (s)
T_{PWM}	زمان تناوب سیگنال PWM (s)
t	فاصله زمان بین ارزیابی‌های پی‌درپی کنترلگر و زمان لحظه‌ای (s)
علائم یونانی	
Σ	سری تجمعی
زیرنویس‌ها	
d	عبارت مشتقی
i	عبارت انتگرالی
on	روشن
p	عبارت تناسبی
PWM	مدولاسیون عرض پالس

مراجع