



Design and Implementation of a Low-Cost Pneumatic Position Control System Using a Laser Distance Sensor

Mohammad Mahdi Tahmasbi ^a, Ali Jabbari ^{b*}, Mehdi Modabberifar ^c

^a Mechatronics Engineering Department, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. tahmasbi.mohammadmahdi@gmail.com

^b Department of Manufacturing and Production Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. a-jabbari@araku.ac.ir


^c Department of Manufacturing and Production Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. m-modabberifar@araku.ac.ir

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Tahmasbi M M, Jabbari A, Modabberifar M. Design and Implementation of a Low-Cost Pneumatic Position Control System Using a Laser Distance Sensor. *Industrial Innovations*. 2026; 4(2):1-21.

 <https://doi.org/10.66224/jii.4.2.1>

KEYWORDS

Pneumatic Control;
Switching Control;
Industrial Implementation;
Cost-Effective Automation.

ABSTRACT

Despite theoretical advancements in pneumatic control algorithms, industrial implementation of these systems faces significant limitations due to high hardware costs and execution complexities. This paper introduces a practical and cost-effective approach for a pneumatic position control system utilizing the Arduino Uno microcontroller and the VL53L0X laser distance sensor. The proposed system has successfully achieved its control objectives, demonstrating high accuracy (less than 1% error) in positioning and exhibiting short response times, including a rise time of 1 second and a settling time of 7 seconds. Alongside the evaluation of performance metrics, this research specifically addresses key practical implementation challenges, such as managing electrical noise, real-time processing constraints on low-cost hardware platforms, and sensor calibration procedures. The obtained results suggest that with meticulous and intelligent design, an acceptable level of industrial performance can be attained at a substantially lower cost, thereby opening new avenues for automation development in small and medium-sized enterprises (SMEs) and educational institutions.

Extended Abstract

1. Introduction

Industrial automation and pneumatic systems play a key role in enhancing productivity. However, precise position control in these systems requires expensive equipment such as PLCs, encoders, and proportional valves, which pose a significant cost barrier for small and medium-sized enterprises (SMEs) and educational projects. With the emergence of low-cost and accessible platforms like Arduino and sensors such as the VL53L0X, the democratization of control technology has become feasible. Nevertheless, a significant gap remains between complex control theories (e.g., PID and SMC), which are primarily studied on expensive laboratory platforms, and practical, cost-effective solutions for resource-constrained environments. Practical challenges such as electrical noise, processing limitations, and sensor calibration are often overlooked in academic research.

This paper aims to bridge this gap by presenting a complete, low-cost pneumatic position control system that focuses on cost-effective hardware selection, addressing practical implementation challenges, and conducting cost analysis. The proposed system employs a smart hybrid switching controller combining PID and SMC, which dynamically switches between these two strategies based on operating conditions. The system is specifically designed to be implemented on low-cost processing platforms (e.g., Arduino) with minimal sensors (only one position sensor) and estimates parameters such as load without requiring additional sensors. With an application in controlling the inlet valve of a plastic granulator, the ultimate goal is to

* Corresponding author.

E-mail address: a-jabbari@araku.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.66224/jii.4.2.1>

Received: April 12, 2026; Received in revised form: May 6, 2026; Accepted: May 12, 2026.

Article type: Research Paper



achieve a practical, economical, and reliable solution with high accuracy (error < 1%), fast response (recovery time < 4 seconds), and easy deployability in real industrial environments.

2. Materials and Methods

The control system in this research is designed around an Arduino Uno board as the central processing unit. A VL53L0X/1X laser sensor is used for position measurement, MOSFETs are used for the power driver stage, and optocouplers are used for isolation. The pneumatic system includes a double-acting actuator with a 500 mm stroke and two 3/2-way solenoid valves with a response time of 15 ms. To demonstrate cost-effectiveness, the hardware cost of the proposed control system (approximately \$7.4) was compared with two other architectures: a system based on a more powerful ARM controller (approximately \$31.8) and an industrial system based on a Delta PLC and linear encoder (approximately \$310), clearly showing the significant economic advantage of the proposed system.

Implementation faced challenges such as the limited memory of the Arduino (32 KB Flash), which was overcome through code optimization. Electromagnetic noise was reduced using shielded cables and flyback diodes for the solenoid valves. To enhance sensor accuracy, a zero-point calibration process was performed by averaging 50 raw samples at the reference position and subtracting this offset from subsequent readings. Subsequently, a median filter with an 11-sample window, implemented using a bubble sort algorithm, was applied to eliminate impulse noise. Additionally, a simple capacitive filter consisting of parallel 10 μF and 100 nF capacitors was used to reduce power line noise.

A smart switching controller was designed for this system, dynamically switching between PID and Sliding Mode Control (SMC) strategies based on real-time conditions. This mechanism monitors parameters such as load force and automatically switches from PID to SMC upon detecting abnormal conditions, returning to PID once normal conditions are restored. A hysteresis band is employed to prevent chattering. The continuous control signal generated by this algorithm is applied to the solenoid valve drivers using Pulse Width Modulation (PWM) technique and the Arduino's hardware timers.

3. Experimental Results

Evaluation of the VL53L0X sensor's performance under four lighting conditions (dark, normal, bright, and fluorescent) at five different distances (100 to 500 mm), with 4000 data points collected, demonstrated that sensor accuracy is highly dependent on environmental conditions. Application of the proposed median filter led to significant improvements in measurement accuracy and stability. Figure 1 presents a comprehensive analysis of the median filter's performance across all experimental conditions. Overall, the Mean Absolute Error (MAE) decreased from 1.010 mm to 0.506 mm, achieving average improvements of 49.9% in accuracy and 37.8% in stability (standard deviation reduction). The best filter performance was observed under normal lighting conditions (61.7% improvement), while the weakest performance was under fluorescent lighting (33.2% improvement). The results indicated that the filtered output maintained accuracy better than 2-3 mm even under the worst conditions, which is acceptable for the target industrial applications.

Comprehensive Filter Improvement Analysis

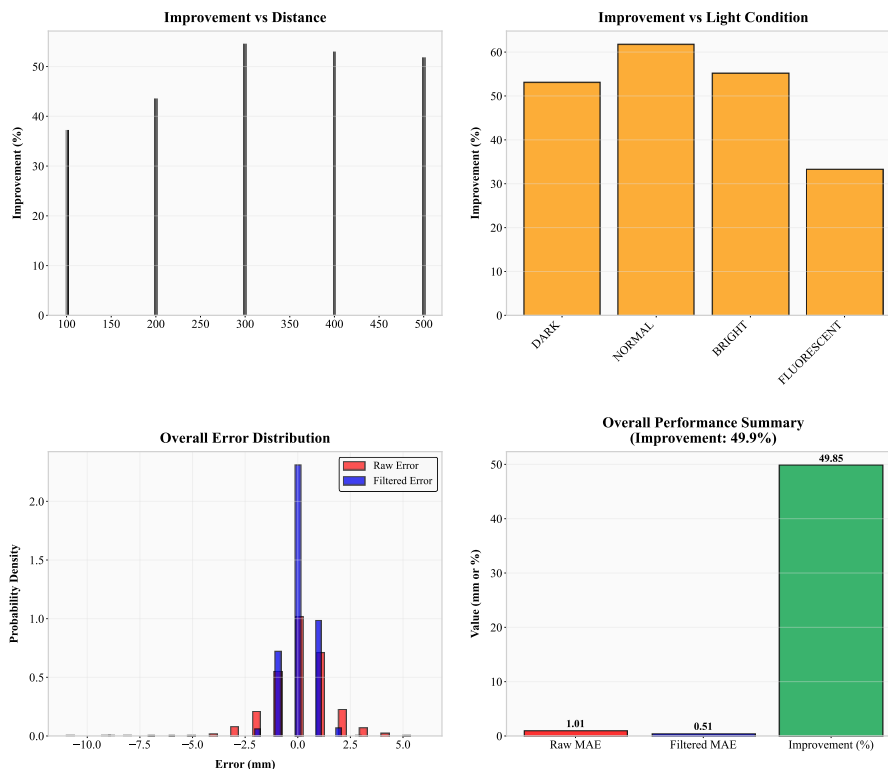


Figure 1 Performance improvement of the median filter under different lighting conditions and distances

Following sensor calibration, the designed switching controller was implemented on the pneumatic system. Figure 2 shows the system's response to a step input and load disturbance, demonstrating satisfactory controller performance. A rise time of 0.93 s, settling time of 7.2 s, and disturbance recovery time of 3.61 s were measured. Overshoot was approximately 3%, and steady-state error was negligible, which is suitable for industrial applications. Integral error metrics, including Integral Absolute Error (IAE) of 320.084 mm.s and Integral Squared Error (ISE) of 67,524.417 mm².s, were calculated, indicating the system's ability to rapidly reduce error and stabilize it around zero.

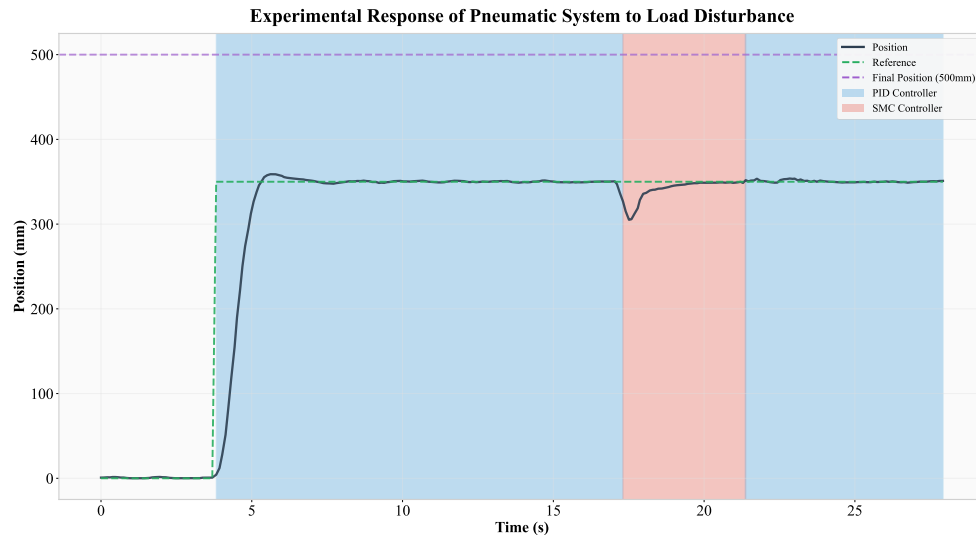


Figure 2 Experimental pneumatic system response under a load disturbance

The close agreement between simulation and experimental results confirms the accuracy of the dynamic system modeling and the effectiveness of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm in tuning controller parameters. The switching controller implemented on Arduino hardware demonstrated high stability and robustness in a real-world environment. By intelligently combining the advantages of the PID controller (smooth and stable response under normal conditions) and the Sliding Mode Controller (SMC) (fast recovery and disturbance rejection), this controller eliminated the steady-state error present in a standalone PID controller.

4. Conclusion

In this research, a low-cost and reliable pneumatic position control system was designed and implemented using an intelligent switching controller based on the combination of a PID controller and a Sliding Mode Controller (SMC). Evaluation of the VL53L0X laser position sensor's performance under various lighting conditions showed that applying a suitable median filter reduced the mean measurement error to 0.506 mm and improved stability by 37.8%, providing the necessary accuracy for the control loop even under challenging conditions such as fluorescent light. The switching controller, after parameter optimization using the PSO algorithm, demonstrated stable and robust performance in a practical environment. Step response characteristics, including a rise time of 0.93 s, a settling time of 7.2 s, an overshoot of 3%, and a recovery time of 3.6 s after a load disturbance, along with low integral error metrics (IAE and ISE), confirm the controller's efficacy in achieving millimeter-level accuracy and rejecting disturbances.

This system, relying on low-cost hardware (Arduino) and a non-contact sensor, presents a practical and cost-effective approach for controlling pneumatic actuator position. The intelligent combination of PID and SMC controllers provides the benefits of both, ensuring a smooth response under normal conditions and high robustness against disturbances. Although limitations such as sampling rate, sensor working range, and sensitivity to extreme lighting conditions exist, this solution is highly suitable for applications such as engineering education, small workshop automation, and rapid prototyping of control ideas. Ultimately, this research demonstrates that through optimal component selection and algorithm design tailored to resource constraints, precise and cost-effective control of pneumatic systems can be achieved.



طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم کنترل موقعیت پنوماتیک کم‌هزینه با استفاده حسگر فاصله‌سنج لیزری

محمد مهدی طهماسبی الف، علی جباری ب*، مهدی مدبری فرج

الف گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. tahmasbi.mohammadmahdi@gmail.com

ب گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. a-jabbari@araku.ac.ir

ج گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. m-modabberifar@araku.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>با وجود پیشرفت‌های نظری در حوزه الگوریتم‌های کنترلی پنوماتیک، پیاده‌سازی صنعتی این سیستم‌ها به دلیل هزینه‌های بالای سخت‌افزاری و پیچیدگی‌های اجرایی با محدودیت‌های قابل توجهی مواجه است. این مقاله، رویکردی عملیاتی و مقرون‌به‌صرفه را برای دستیابی به سیستم کنترل موقعیت پنوماتیک با استفاده از میکروکنترلر آردوینو یونو (Arduino Uno) و سنسور فاصله‌سنج لیزری VL53L0X معرفی می‌کند. سیستم پیشنهادی توانسته است به اهداف کنترلی دست یابد؛ به‌این‌ترتیب که دقت بالایی (خطای کمتر از ۱ درصد) را در موقعیت‌یابی نشان داده و زمان پاسخگویی کوتاهی شامل زمان خیز ۱ ثانیه و زمان نشست ۷ ثانیه را به ثبت رسانده است. در کنار ارزیابی معیارهای عملکردی، این تحقیق به چالش‌های کلیدی در پیاده‌سازی عملی، از جمله مدیریت نویزهای الکتریکی، محدودیت‌های پردازش بلادرنگ در پلتفرم‌های سخت‌افزاری کم‌هزینه و فرآیندهای کالیبراسیون سنسور، به‌طور ویژه پرداخته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با طراحی دقیق و هوشمندانه، می‌توان به سطحی از عملکرد که برای کاربردهای صنعتی قابل قبول است، با هزینه‌ای به‌مراتب کمتر دست یافت. این امر، افق‌های جدیدی را برای توسعه اتوماسیون در بنگاه‌های کوچک و متوسط (SMEs) و همچنین مراکز آموزشی فراهم می‌آورد.</p>	<p>کنترل پنوماتیک؛ کنترل سوئیچینگ؛ پیاده‌سازی صنعتی؛ اتوماسیون کم‌هزینه.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲</p>

۱- مقدمه

اتوماسیون صنعتی نقشی انکارناپذیر در افزایش بهره‌وری و کیفیت تولید ایفا می‌کند. سیستم‌های پنوماتیک به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و نسبت توان به وزن بالا، در صنایع تولیدی کاربرد گسترده‌ای دارند. با این حال، کنترل دقیق موقعیت عملگرهای پنوماتیک به‌طور سنتی به اجزای گران‌قیمتی مانند کنترلرهای صنعتی (PLC)، انکودرهای خطی و شیرهای پروپورشنال نیاز دارد. این هزینه بالا، ورودی، مانع مهمی برای بنگاه‌های کوچک و متوسط، استارت‌آپ‌ها، مؤسسات آموزشی و پروژه‌های اتوماسیون شخصی محسوب می‌شود.

در سال‌های اخیر، ظهور پلتفرم‌های سخت‌افزار آزاد مانند آردوینو و رزبری پای، همراه با حسگرهای ارزان‌قیمت اما با عملکرد مناسب، فرصت‌های جدیدی را برای دموکراتیک‌سازی فناوری اتوماسیون فراهم کرده است. آردوینو با جامعه کاربری گسترده، کتابخانه‌های فراوان و هزینه کم، جایگزینی قابل‌دسترس برای PLC های صنعتی محسوب می‌شود. به‌طور مشابه، سنسور

* نویسنده مسئول؛

فاصله سنج لیزری VL53L0X با فناوری Time-of-Flight، دقتی در حد میلی‌متر با هزینه کم ارائه می‌دهد، در حالی که انکودرهای صنعتی هزینه بالایی دارند.

پژوهش‌های متعددی بر سیستم‌های پنوماتیک کم‌هزینه با آردوینو تمرکز کرده‌اند. برای مثال، کیت عملگر الکتروپنوماتیک چندکاناله با هزینه ۴۵ دلار طراحی شد که با ولتاژ ۱۲ ولت، فشار مثبت ۹۰ کیلوپاسکال و خلأ منفی ۴۰ کیلوپاسکال تولید می‌کند و برای آموزش و پژوهش مناسب است [۱]. همچنین، نشان داده شد آردوینو با هزینه یک‌دهم PLC، مدارهای پنوماتیک پیچیده با چندین سیلندر را از طریق برنامه‌نویسی مدیریت می‌کند و به سنسورها، نمایشگرها و IoT متصل می‌شود [۲]. مجموعه پنوماتیکی کم‌هزینه برای تخمین عمر خستگی با ثبت داده آردوینو و LabVIEW توسعه یافت [۳]. واسط‌سازی سیستم پنوماتیک با Simulink از طریق میکروکنترلر آردوینو بدون برنامه‌نویسی پیچیده پیشنهاد شد [۴]. پلتفرم آموزشی چندرشته‌ای با ربات متحرک و بازوی رباتیک ارائه گردید [۵]. آزمایش آموزشی دنبال کردن خط با ربات آردوینویی برای دانشجویان طراحی شد [۶]. پژوهشی دیگر یاتاقان رانشی هواایستای فعال کم‌هزینه، کارآمد و نوآورانه را ارائه می‌دهد که از طریق ترکیبی از برد آردوینو، مبدل‌های بازخورد و شیرهای پرسرعت کنترل گردید [۷]. درایور PneuSoRD برای ربات‌های نرم پنوماتیک با ۲۶ شیر روشن/خاموش ساخته شد [۸]. ربات نرم با محرک‌های پنوماتیک و آردوینو Mega توسعه یافت [۹]. در کنار پیشرفت‌های صورت گرفته در بسترهای کنترلی کم‌هزینه، انتخاب حسگر مناسب و مقرون‌به‌صرفه برای اندازه‌گیری موقعیت نیز از ارکان اصلی یک سیستم کنترل موفق به شمار می‌رود. در همین راستا، حسگر فاصله‌سنج لیزری VL53L0X به‌عنوان گزینه‌ای بالقوه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

در زمینه سنسور VL53L0X، عملکرد آن با ۲۵ سنسور بررسی شد و نشان داده شد نوسانات ذاتی تا ۹۰ میلی‌متر (انحراف معیار ۷/۳)، حساسیت به نور شدید (کد خطای ۸۱۹۰) و توزیع نرمال داده‌ها وجود دارد. میانگین‌گیری ۲۵ سنسور نوسان را ۱۲ برابر (به ۷ میلی‌متر) کاهش داد، اما ترکیب چند سنسور برای کاربردهای تک‌عملگر مقرون‌به‌صرفه نیست [۱۰]. کاربردهای VL53L0X شامل اندازه‌گیری ابعاد جعبه‌ها روی تسمه‌نقاله با شبکه عصبی مصنوعی [۱۱]، نوابری ربات انبارداری با الگوریتم مبتنی بر SLAM، A* و Pure Pursuit (دقت ± 5 میلی‌متر تا ۱/۵ متر) [۱۲]، موقعیت‌یابی ربات هوایی برای بازرسی لوله با آرایه سنسورهای VL53L0X و PID (خطای کمتر از ۱ سانتی‌متر پس از کالیبراسیون) [۱۳]، حسگر مجاورت همه‌جهته با ۳۰ سنسور و معماری master-slave برای پهپاد (نرخ ۲۶ هرتز) [۱۴]، و طراحی یک سیستم مانع راه‌آهن با دقت ۱۰۰ درصد [۱۵] است. نزدیک‌ترین کار، ماژول انتقالی پنوماتیک هیبریدی با VL53L0X، کنترل PID دو حلقه‌ای و خطای ۰/۳۱ میلی‌متر را گزارش کرد، اما بر عملگر استاندارد صنعتی تمرکز نداشت [۱۶]. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگرچه حسگر VL53L0X در کاربردهای متنوعی به کار رفته، اما استفاده از آن در حلقه کنترل موقعیت یک عملگر پنوماتیک صنعتی همچنان نیازمند مطالعه و اثبات تجربی است. افزون بر این، چالش اصلی در کنترل سیستم‌های پنوماتیک تنها به حسگر محدود نمی‌شود، بلکه طراحی الگوریتم کنترلی مناسب برای غلبه بر رفتار غیرخطی این سیستم‌ها نیز اهمیتی هم‌سنگ دارد. با وجود این پیشرفت‌ها، شکاف تحقیقاتی قابل توجهی وجود دارد: فقدان کاربرد VL53L0X در کنترل موقعیت حلقه‌بسته عملگر پنوماتیک استاندارد صنعتی (برخلاف [۱۶])، عدم تحلیل هزینه کمی جامع (کاهش نسبت به صنعتی) فراتر از اشاره‌های کلی (برخلاف [۱])، نادیده گرفتن چالش‌های عملی مانند نویز الکتریکی شیرهای سلونوئیدی، محدودیت‌های زمان حقیقی آردوینو ۸-بیتی، کالیبراسیون سنسور در محیط صنعتی، تأثیر نور و نویز ذاتی VL53L0X بدون راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه (مانند ترکیب سنسورها).

در ادامه، برای تکمیل تصویر تحقیقاتی و ایجاد پلی میان پیشرفت‌های سخت‌افزاری و توسعه الگوریتم‌های کنترلی، مرور مهم‌ترین دستاوردهای حوزه کنترل سیستم‌های پنوماتیک ضروری است. سیستم‌های پنوماتیک به دلیل مزایای فراوان، همواره در کانون توجه تحقیقات حوزه کنترل قرار داشته‌اند. چالش اصلی، غلبه بر غیرخطی بودن ذاتی ناشی از تراکم‌پذیری هوا و اصطکاک است. یکی از پژوهش‌های پایه‌ای، الگوریتم PWM نوآورانه با دو شیر ۳/۲ برای کنترل دقیق ارائه داد. از منظر پیاده‌سازی سخت‌افزاری، آرایش سیستم و نحوه اتصال شیرها به سیلندر نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد ایفا می‌کند. در این پژوهش از دو شیر ۳/۲ استفاده شد که این امکان را فراهم می‌کرد تا هر شیر به‌تنهایی مسئولیت کنترل یک محفظه را بر عهده داشته باشند

[۱۷]. با گذشت زمان، تمرکز تحقیقات از روش‌های مبتنی بر PWM صرف، به سمت استراتژی‌های کنترل مستقیم سوئیچینگ برای کاهش نرخ سایش شیرها تغییر کرد. کنترلر SMC با حالت صرفه‌جویی انرژی، نرخ سوئیچینگ را کاهش داد [۱۸]. گسترش SMC به ۷ حالت با چهار شیر ۲/۲، دقت ردیابی را افزایش داد [۱۹]. ترکیب PWM-SMC دقت فشار را برای سیگنال‌های تا ۲ هرتز بهبود بخشید [۲۰].

مسئله تغییرات بار خارجی به‌عنوان یک چالش مهم همیشه مطرح بوده است. برای حل این مشکل، یک شبکه عصبی به‌عنوان یک ناظر هوشمند به کار گرفته شد. این شبکه عصبی بار خارجی را طبقه‌بندی می‌کرد تا پارامترهای کنترلر به‌صورت تطبیقی و بهینه انتخاب شوند. برای کنترل عملگر در این پژوهش از هشت شیر ۲/۲ استفاده شد، برای هر محفظه عملگر دو شیر برای تغذیه و دو شیر برای تخلیه قرار داده شد تا دامنه کنترل جریان هوا بیشتر افزایش یابد [۲۱]. تخمین موقعیت بدون سنسور خارجی با خطای ۱ میلی‌متر پیشنهاد گردید [۲۲]. در رباتیک پزشکی، دستگاه IBIS IV تخمین نیرو با حساسیت ۱ نیوتن را ممکن ساخت [۲۳].

در ادامه، با افزودن عملکرد انتگرال به کنترلرهای SMC، کنترلرهای جدیدی پیشنهاد شد که دقت را افزایش می‌دادند [۲۴]. از جنبه دیگری، یک تحلیل مقایسه‌ای سیستماتیک بین دو کنترلر مختلف انجام شد که نتایج تجربی آن معیارهای عملکردی دقیقی را برای مقایسه پژوهش‌های آینده فراهم کرد [۲۵].

بررسی کنترل سرعت در سیستم‌های انتقال قدرت پنوماتیک با شیرهای ON/OFF و PWM نشان داد که با تنظیم فرکانس و سیکل وظیفه PWM می‌توان به کنترل مؤثر سرعت سیلندرهای بدون میله^۱ دست یافت و منحنی‌های مشخصه عملکرد سیستم را در شرایط مختلف به دست آورد [۲۶]. ارائه یک مدل MISO غیرخطی برای سیلندرهای مینیاتوری و طراحی کنترلر Backstepping، پایداری سیستم را حتی با وجود خطای مدل‌سازی اصطکاک و شیرها تضمین کرد و به دقت ردیابی بسیار بالایی منجر شد [۲۷].

بررسی دقت و تکرارپذیری موقعیت‌یابی یک سیلندر پنوماتیک با شیرهای کنترل یکطرفه پایلوت‌دار نشان داد در فشارهای کاری بالاتر (۰/۴ تا ۰/۶ مگاپاسکال)، دقت موقعیت‌یابی تقریباً با سرعت حرکت و بار اعمالی رابطه مستقیم دارد و اهمیت انتخاب پارامترهای کاری بهینه را نشان داد [۲۸]. توسعه یک کنترلر جبران‌گر مبتنی بر مشاهده‌گر اغتشاش با سیلندر پنوماتیک خطی استاندارد، نشان داد که با ترکیب کنترلر PD و جبران غیرخطی می‌توان بر محدودیت‌های ذاتی سیستم غلبه کرد [۲۹]. ارائه استراتژی موقعیت‌یابی مبتنی بر تنظیم پارامتر و کنترل بهینه، با بهینه‌سازی خودکار پارامترها منجر به کاهش زمان تنظیم، بهبود عملکرد موقعیت‌یابی و جلوگیری از بالازدگی شد [۳۰]. با وجود این پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه تئوری کنترل، شکاف قابل توجهی میان الگوریتم‌های توسعه‌یافته در محیط‌های آزمایشگاهی و قابلیت اجرای آن‌ها بر روی سخت‌افزارهای کم‌هزینه و در دسترس وجود دارد.

اگرچه الگوریتم‌های کنترلی پیچیده (PID، SMC، کنترل تطبیقی) به‌طور گسترده در محیط‌های آکادمیک مطالعه شده‌اند، بیشتر تحقیقات روی پلتفرم‌های آزمایشگاهی گران‌قیمت (dSPACE، NI PXI، PLC‌های پیشرفته) انجام می‌شود. در نتیجه، شکاف قابل توجهی بین تئوری کنترل آکادمیک و راه‌حل‌های عملی قابل‌استقرار در محیط‌های با منابع محدود وجود دارد. چالش‌های کلیدی که اغلب در مقالات آکادمیک نادیده گرفته می‌شوند عبارتند از: نویز الکتریکی ناشی از شیرهای سلونوئیدی و تأثیر آن بر سنسورهای کم‌هزینه، محدودیت‌های زمان حقیقی در میکروکنترلرهای ۸-بیتی، کالیبراسیون و فیلترگذاری سنسور در محیط‌های صنعتی، و تحلیل هزینه-فایده برای کاربردهای واقعی.

با بررسی پیشینه تحقیق مشاهده می‌شود که اگرچه گام‌های مؤثری در راستای دستیابی به کنترل دقیق و مقرون‌به‌صرفه سیستم‌های پنوماتیک برداشته شده، اما شکاف‌های مشخصی همچنان پابرجاست: کاربرد حسگر VL53L0X در کنترل موقعیت حلقه‌بسته یک عملگر پنوماتیک استاندارد صنعتی به‌صورت نظام‌مند ارزیابی نشده است؛ تحلیل هزینه کمی جامع در مقایسه با

^۱ Rodless

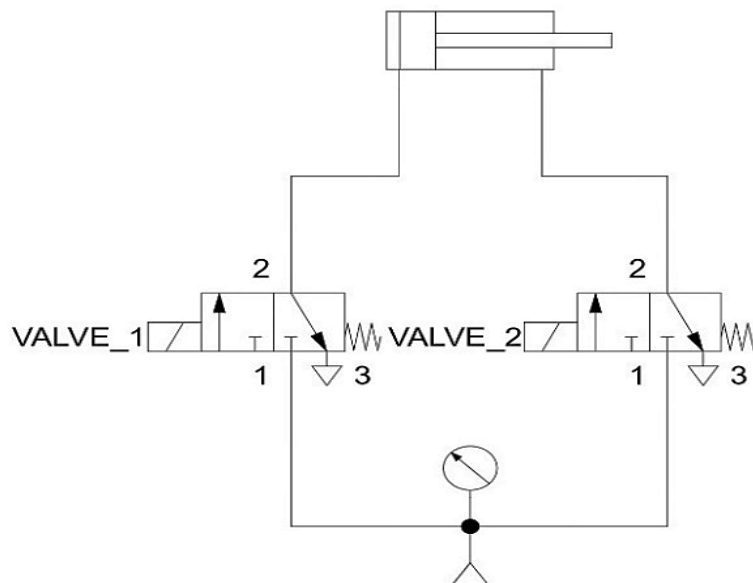
راه‌حل‌های صنعتی ارائه نشده است؛ و چالش‌های عملی پیاده‌سازی از قبیل نویز الکترومغناطیسی شیرهای سولنوئیدی، محدودیت‌های پردازش بلادرنگ در میکروکنترلرهای ۸-بیتی، کالیبراسیون سنسور در محیط صنعتی و تأثیر شرایط نوری، کمتر مورد توجه پژوهش‌ها بوده است.

این پژوهش با هدف پرکردن شکاف‌های فوق، نخست یک سیستم کنترل موقعیت پنوماتیک کم‌هزینه و کامل با استفاده از قطعات در دسترس (آردوینو و حسگر VL53L0X) ارائه می‌دهد و در گام بعدی، یک کنترلر سوئیچینگ هوشمند مبتنی بر ترکیب PID و SMC را برای آن طراحی و پیاده‌سازی می‌کند. سیستم پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده که با حداقل سنسور (تنها یک حسگر موقعیت) قابل اجرا باشد و با بهره‌گیری از تخمین مبتنی بر مدل، پارامترهای کلیدی بدون نیاز به سنسور اضافی برآورد شوند. با توجه به کاربرد این پژوهش در کنترل دریچه ورودی دستگاه آسیاب پلاستیک، معیارهای طراحی شامل دقت موقعیت‌یابی بالا، پاسخ سریع، استفاده از سخت‌افزارهای مقرون‌به‌صرفه و قابلیت اطمینان در محیط صنعتی در نظر گرفته شده است. در نهایت، هدف نهایی این تحقیق، ارائه یک راهکار عملی، اقتصادی و قابل اعتماد است که بتواند به‌سادگی در محیط‌های صنعتی واقعی مستقر شده و پایداری و دقت مطلوب را با خطای کمتر از ۱ درصد و زمان بازیابی زیر ۴ ثانیه فراهم آورد.

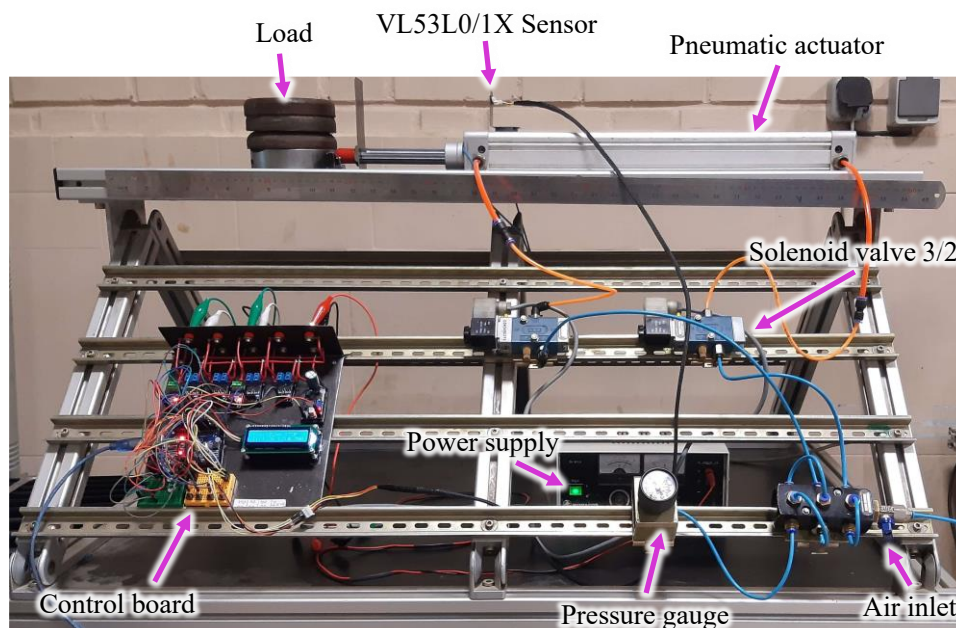
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی سیستم آزمایشگاهی

سیستم کنترلی این پژوهش مبتنی بر یک برد آردوینو Uno به‌عنوان هسته مرکزی طراحی شده است. برای اندازه‌گیری موقعیت از سنسور لیزری VL53L0/1X استفاده شده و برای قسمت درایو قدرت از ماسفت و برای ایزولاسیون از اپتوکوپلر استفاده شده است. سیستم پنوماتیک با استفاده از یک عملگر پنوماتیک دوطرفه LMC طراحی شده است. پیستون با قطر ۷۰ میلی‌متر و میله پیستون کروم‌کاری شده با قطر ۲۰ میلی‌متر، اصطکاک را کاهش داده و طول عمر دستگاه را افزایش می‌دهد. کورس حرکتی ۵۰۰ میلی‌متری امکان جابجایی در محدوده وسیعی را فراهم می‌کند. طراحی دوطرفه با دو پورت هوا، اعمال نیرو در هر دو جهت را ممکن می‌سازد. برای کنترل جریان هوا از دو شیر سولنوئیدی ۳/۲ (Rexroth) با زمان پاسخگویی ۱۵ میلی‌ثانیه استفاده شده است. فشار کاری سیستم بر اساس نیازهای کاربردی دستگاه و با توجه به محدودیت‌ها، روی ۴ بار (۰/۴ مگاپاسکال) تنظیم گردید. این مقدار فشار، تعادل مناسبی بین سرعت پاسخ‌دهی، نیروی تولیدی و مصرف انرژی فراهم می‌آورد. شماتیک سیستم پنوماتیک در شکل ۱ و نمای کلی میز آزمایش در شکل ۲ نمایش داده شده است.



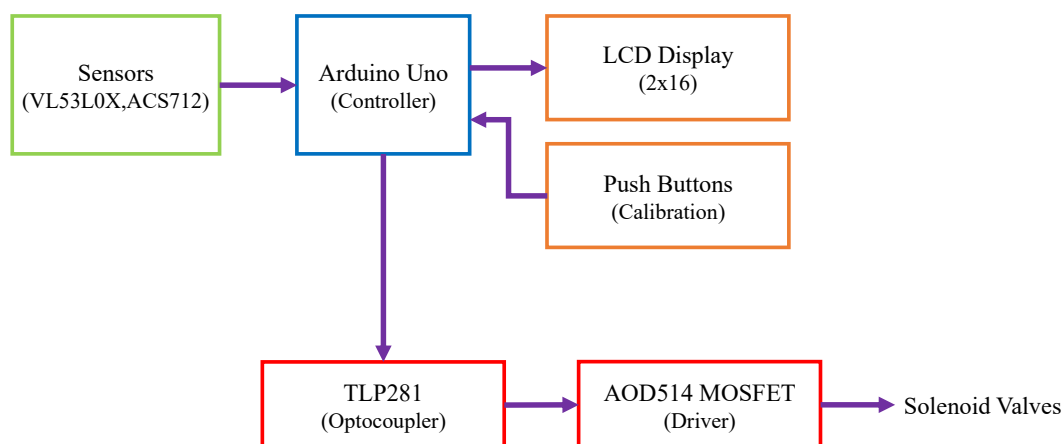
شکل ۱ شماتیک سیستم پنوماتیک پژوهش



شکل ۲ تصویر کلی سیستم آزمایشگاهی پژوهش

۲-۲- معماری سخت‌افزار و تحلیل هزینه

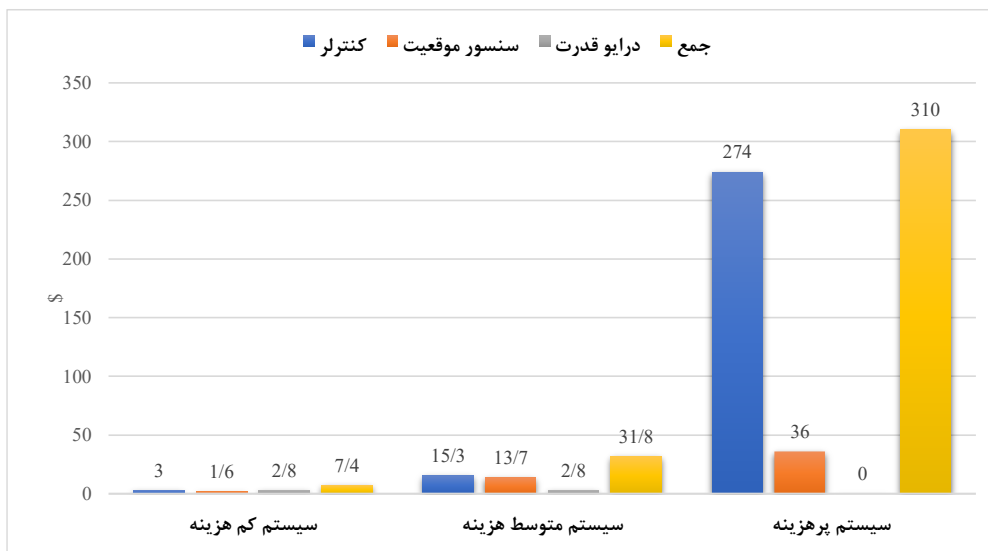
طراحی سخت‌افزار کنترل بر پایه برد آردوینو Uno و سنسور لیزری VL53L0X انجام شده است. درایو قدرت با استفاده از ماژول ماسفت AOD514 طراحی و ایزوله‌سازی نوری توسط اپتوکوپلر TLP281 انجام شده است. ساختار بلوکی سخت‌افزار در شکل ۳ نشان داده شده است. برای مقایسه مقرون‌به‌صرفه بودن، هزینه سیستم پیشنهادی (صرفاً سخت‌افزار کنترلی سیستم) طبق جدول ۱ و نمودار مقایسه‌ای در شکل ۴ با دو معماری دیگر ارزیابی شد: یکی بر پایه کنترلر ARM و سنسور موقعیت TL53L1 (قوی‌تر از سیستم پیشنهادی با درایو مشابه) و دیگری بر پایه PLC دلتا DVP28SV، انکودر خطی (خط‌کش اهمی) ۵۰ سانتی‌متری. در مورد مقایسه با PLC، لازم به ذکر است که از PLC دلتا DVP28SV به دلیل داشتن چهار خروجی سریع که برای این پروژه مورد نیاز است، استفاده شد. این نسخه، ارزان‌ترین گزینه در میان PLC هایی است که این شرایط را برآورده می‌کنند؛ به‌عنوان مثال، نسخه‌های مشابه از شرکت زیمنس قیمت بالاتری دارند. بررسی نمودارهای هزینه، برتری اقتصادی سیستم پیشنهادی را تأیید می‌کند، مشروط به غلبه بر چالش‌هایی مانند حافظه محدود آردوینو از طریق برنامه‌نویسی ساختارمند و فیلترهای افزایش دقت سنسور، که دقت را به سطح سیستم‌های پنوماتیک صنعتی می‌رساند.



شکل ۳ ساختار بلوکی سخت‌افزار سیستم کنترل

جدول ۱ هزینه سخت افزار کنترل در معماری های مختلف

سیستم کم هزینه	سیستم متوسط هزینه	سیستم پرهزینه	
3 \$ Arduino UNO CH340G	15/3 \$ Arduino DUE R3	274 \$ Delta PLC DVP28SV11T2	کنترلر
1/6 \$ VL5310/1X	13/7 \$ TD53L1	36 \$ انکودر خطی ۵۰ سانتی متر	سنسور موقعیت
2/8 \$ Mosfet × 4 + Optocoplper	2/8 \$ Mosfet × 4 + Optocoplper	- روی PLC	درايو قدرت
7/4 \$	31/8 \$	310 \$	جمع



شکل ۴ نمودار هزینه سخت افزار کنترل در معماری های مختلف

۳-۲- چالش های پیاده سازی و راه حل ها

پیاده سازی سیستم با چالش هایی مانند حافظه محدود آردوینو (۳۲ کیلوبایت فلش) مواجه بود که با بهینه سازی کد (استفاده از آرایه های کوچک، حلقه های کارآمد و حذف توابع غیر ضروری) بر آن غلبه شد. چالش نویز الکترومغناطیسی روی سیم ها نیز با استفاده از کابل های شیلددار با کیفیت بالا و افزودن شیلد اضافه روی کابل کاهش یافت. جهت کنترل نیروی محرکه ضد القایی سولنوئید شیرها هم از دیود هرزگرد استفاده شد. همچنین، نویز سنسور VL53L0X با کالیبراسیون نقطه صفر و فیلتر میانه مدیریت شد، که جزئیات آن در ادامه بیان می شود.

۴-۲- کالیبراسیون و فیلتر سنسور

این بخش به تشریح فرآیندهای کالیبراسیون نقطه صفر و فیلترینگ داده های دریافتی از سنسور فاصله سنج VL53L0X با هدف افزایش دقت و حذف نویز می پردازد.

به منظور حذف خطای آفست^۱ ناشی از عوامل محیطی یا مشخصات ذاتی سنسور VL53L0X، فرآیند کالیبراسیون نقطه صفر پیاده سازی شده است. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

۱. قرار دادن سنسور در موقعیت مرجع: سنسور در فاصله صفر میلی متر از سطح مرجع قرار داده می شود.
۲. تعیین آفست: با ارسال فرمان کالیبراسیون نقطه صفر به سنسور، میانگین ۵۰ نمونه خروجی خام سنسور (d_{TAW}) محاسبه می گردد. این مقدار به عنوان آفست سیستم در نظر گرفته می شود. فرمول ریاضی این مرحله به صورت رابطه ۱ است.

^۱ Bias

$$\text{offset} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} d_{\text{raw}}[i] \quad (1)$$

که در آن، $d_{\text{raw}}[i]$ نشان‌دهنده مقدار خام سنسور در نمونه i ام است.

۳. اعمال آفست: مقادیر خام سنسور با کسر مقدار آفست محاسبه شده، تصحیح می‌شوند تا مقادیر کالیبره شده (d_{cal}) به دست آید. این تصحیح با استفاده از رابطه ۲ انجام می‌پذیرد:

$$d_{\text{cal}}[n] = d_{\text{raw}}[n] - \text{offset} \quad (2)$$

در این رابطه، $d_{\text{cal}}[n]$ خروجی کالیبره شده در نمونه n ام و $d_{\text{raw}}[n]$ مقدار خام سنسور در همان نمونه است.

به‌منظور حذف نویزهای ضربه‌ای^۱ و نقاط پرت^۲ که می‌توانند دقت اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار دهند، از فیلتر میانه^۳ با پنجره ۱۱ نمونه‌ای استفاده شده است. الگوریتم فیلتر به شرح زیر عمل می‌کند:

۱. داده کالیبره شده جدید ($d_{\text{cal}}[n]$) به یک بافر (آرایه) شامل ۱۰ نمونه قبلی اضافه می‌شود.

۲. مجموعه داده‌های موجود در بافر (شامل ۱۱ نمونه) با استفاده از الگوریتم مرتب‌سازی حبابی^۴ مرتب می‌گردد.

۳. مقدار میانه^۵ داده‌های مرتب‌شده به‌عنوان خروجی فیلتر ($y[n]$) انتخاب و ارسال می‌شود (رابطه ۳).

$$y[n] = \text{median}\{d_{\text{cal}}[n], d_{\text{cal}}[n-1], \dots, d_{\text{cal}}[n-10]\} \quad (3)$$

که در آن، $y[n]$ خروجی فیلتر در نمونه n ام و d_{cal} مقادیر کالیبره شده سنسور هستند.

پیاده‌سازی فیلتر میانه با پنجره ۱۱ نمونه‌ای و استفاده از مرتب‌سازی حبابی، با توجه به محدودیت‌های محاسباتی میکروکنترلرهای مبتنی بر آردوینو، بهینه تلقی می‌شود. این روش پیچیدگی محاسباتی معقولی (حدود ۱۰۰ عملیات) دارد و قادر به حذف مؤثر نویزهای ناخواسته است.

نویز موجود در خط تغذیه می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر عملکرد سنسورها و دقت سیستم‌های اندازه‌گیری داشته باشد. برای کاهش این نویز، از یک فیلتر خازنی ساده متشکل از یک خازن ۱۰ میکروفاراد موازی با یک خازن ۱۰۰ نانوفاراد در مسیر تغذیه سنسور استفاده شده است. این آرایش به سرکوب نویزهای فرکانس بالا و تثبیت ولتاژ تغذیه کمک کرده و به‌طور قابل توجهی به افزایش دقت کلی سیستم منجر می‌شود، بدون آنکه بار محاسباتی اضافی به میکروکنترلر تحمیل کند.

۲-۵- الگوریتم کنترل

مدل‌سازی دینامیکی سیستم پنوماتیک بر پایه اصول ترمودینامیک و مکانیک انجام گرفته است. معادلات حاکم برای سیلندر دوطرفه و شیرهای سولونوئیدی روشن/خاموش (از جمله مدل‌سازی شیرها، معادلات فشار، و تخمین سرعت و شتاب) استخراج شده‌اند. یک مدل کامل ترمودینامیکی از سیستم شامل دینامیک فشار در محفظه‌ها و معادلات جریان جرمی توسعه داده شده است. با این حال، به دلیل طولانی بودن فرآیند مدل‌سازی و با توجه به اینکه تمرکز اصلی این مقاله بر پیاده‌سازی عملی و چالش‌های سخت‌افزاری است، در اینجا تنها معادله اصلی حرکت پیستون ارائه می‌شود.

با اعمال قانون دوم نیوتن بر روی مجموعه پیستون، معادله دیفرانسیل حرکت به‌صورت رابطه ۴ به دست می‌آید [۳۱].

$$M\ddot{y} = P_A A_A - P_B A_B - b\dot{y} - F_{\text{load}} \quad (4)$$

که در آن M جرم متحرک، y موقعیت پیستون، P_A و P_B فشار در محفظه‌های A و B ، A_A و A_B سطح مقطع مؤثر پیستون، b ضریب اصطکاک ویسکوز و F_{load} نیروی بار خارجی است. پارامترهای این مدل با استفاده از داده‌های تجربی و مشخصات فنی

¹ Impulsive Noise

² Outliers

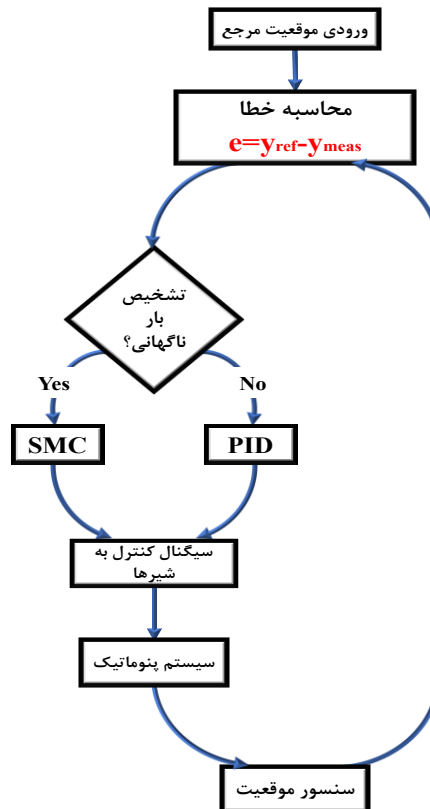
³ Median Filter

⁴ Bubble Sort

⁵ Median

قطعات سیستم شناسایی و تعیین شده‌اند.

روی سیستم طراحی شده، الگوریتم‌های متنوعی مانند PID (با کتابخانه داخلی آردوینو) یا کنترلرهای پیشرفته مانند مد لغزشی، مشروط به سازگاری با حافظه محدود قابل پیاده‌سازی است. در این پژوهش برای تست سیستم، یک کنترلر سوئیچینگ هوشمند برای کنترل موقعیت عملگر پنوماتیک طراحی شده است که به صورت پویا و بر اساس شرایط لحظه‌ای سیستم بین دو استراتژی کنترلی PID و مد لغزشی (SMC) سوئیچ می‌کند. این معماری کنترل ترکیبی، مزایای هر دو روش را ادغام نموده و عملکردی مقاوم و کارا در شرایط عملیاتی مختلف ارائه می‌دهد. سیگنال کنترلی تولیدشده توسط الگوریتم، که یک مقدار پیوسته است، از طریق تکنیک مدولاسیون عرض پالس (PWM) و با استفاده از تایمرهای سخت‌افزاری آردوینو، به درایور شیرهای سولنوئیدی اعمال می‌گردد. ساختار کلی این کنترلر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ فلوجارت سیستم کنترلر سوئیچینگ پژوهش

اگرچه بررسی کامل الگوریتم کنترل خارج از حوصله این مقاله است، اما مکانیزم سوئیچینگ به منظور انتقال خودکار بین کنترلر PID و SMC به صورت رابطه ۵ طراحی شده است. این مکانیزم با نظارت مداوم بر نیروی بار و دیگر پارامترهای سیستم، در صورت تشخیص شرایط غیرعادی (مانند تغییرات ناگهانی بار) به طور خودکار از کنترلر PID به کنترلر SMC سوئیچ می‌کند. پس از بازگشت سیستم به شرایط عادی، کنترلر مجدداً به PID انتقال می‌یابد. برای جلوگیری از نوسانات مکرر در حین سوئیچینگ، از یک بازه هیستریزس استفاده می‌شود. این مکانیزم اطمینان حاصل می‌کند که سیستم در تمامی شرایط، عملکردی پایدار و بهینه دارد. برای پیاده‌سازی عملی این مکانیزم و به منظور حذف سنسور نیروی خارجی و حفظ رویکرد کم‌هزینه، نیروی بار خارجی (F_{load}) مورد نیاز در رابطه سوئیچینگ، از طریق بازآرایی معادله حرکت پیستون (رابطه ۴) تخمین زده می‌شود.

$$u_{mode}(t) = \begin{cases} SMC & \text{if } (|F_{load} - F_{nom}| \geq \Delta F_{th}) \vee (|\dot{y}(t)| \geq \dot{y}_{th}) \\ PID & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

۳- نتایج تجربی

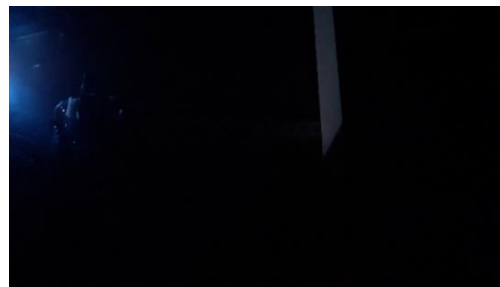
برای ارزیابی سنسور VL53L0X، آزمایش‌ها در چهار شرط نوری (تاریک، عادی، پرنور، فلورسنت) و پنج فاصله (۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ میلی‌متر) با ۲۰۰ نمونه در هر حالت (کل ۴۰۰۰ داده) و نرخ نمونه‌برداری ۲۰ هرتز ($T_s = 50 \text{ ms}$) انجام شد. سپس، کنترلر سوئیچینگ روی سیستم پنوماتیک پیاده و نتایج بررسی گردید.

۳-۱- نتایج کالیبراسیون و فیلتر سنسور

به دلیل محدودیت در ایجاد شرایط نوری کاملاً کنترل‌شده در محیط کارگاهی، سکوی اندازه‌گیری ثابتی شامل سنسور و خط‌کش دقیق ساخته شد تا چهار وضعیت نوری قابل تکرار ایجاد شود: حالت تاریک (صرفاً LED آردوینو و نمایشگر LCD فعال)، حالت عادی (لامپ LED با توان ۴۰ وات در فاصله ۱/۵ متری)، حالت پرنور (لامپ LED با توان ۶۰ وات در فاصله ۵۰ سانتی‌متری) و حالت فلورسنت (مهتابی ۴۰ وات در فاصله ۱/۵ متری). تصاویر این حالات در شکل ۶ (الف: تاریک، ب: عادی، ج: پرنور، د: فلورسنت) نمایش داده شده است.



(ب) عادی



(الف) تاریک



(د) فلورسنت

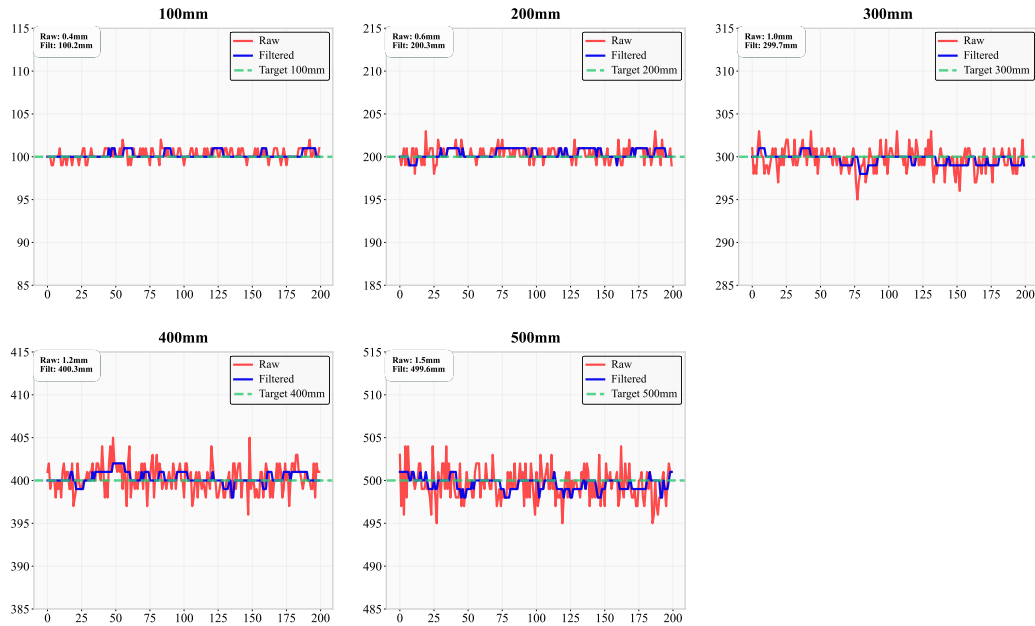


(ج) پرنور

شکل ۶ سنسور نصب‌شده روی میز و چهار حالت نوری

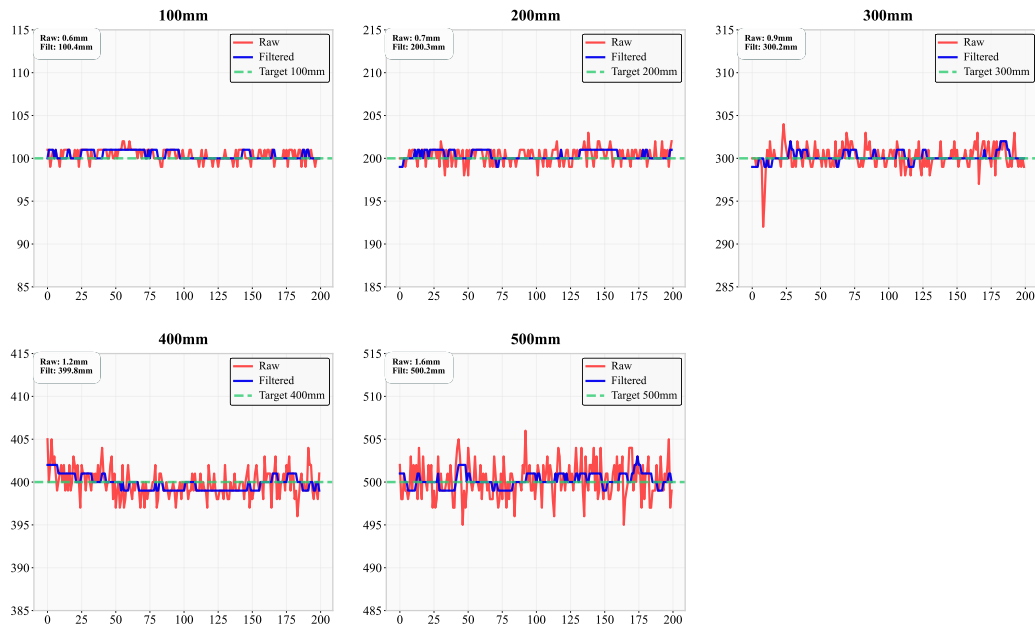
عملکرد سنسور در شرایط پرنور در شکل ۷ نمایش داده شده است، که در آن سیگنال خام کالیبره‌شده (منحنی قرمز) و سیگنال فیلترشده (منحنی آبی) حول مقدار هدف (خط سبز) نوسان می‌کنند. در این شرایط، MAE خام از ۰/۴۲ میلی‌متر در فاصله ۱۰۰ میلی‌متر به ۱/۵۱ میلی‌متر در فاصله ۵۰۰ میلی‌متر افزایش‌یافته و فیلتر این مقدار را به محدوده ۰/۱۹ تا ۰/۶۰ میلی‌متر کاهش داده است (بهبود ۵۵/۳ درصد تا ۵۹/۹ درصد). شرایط تاریک که دشوارترین حالت برای حسگر به شمار می‌رود، در شکل ۸ نمایش داده شده است؛ در این حالت MAE خام بین ۰/۵۷ تا ۱/۶۲ میلی‌متر بوده که پس از فیلتر به ۰/۳۸ تا ۰/۶۰ میلی‌متر کاهش یافته و بهبود ۳۳/۳ درصد تا ۶۲/۸ درصد حاصل شده است. این نتایج نشان می‌دهد که فیلتر پیشنهادی در کم‌نور نیز عملکرد مناسبی دارد.

VL53L0X Performance: BRIGHT Lighting Condition



شکل ۷ مقایسه عملکرد خام و فیلترشده سنسور VL53L0X در شرایط پر نور برای فواصل ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی متر

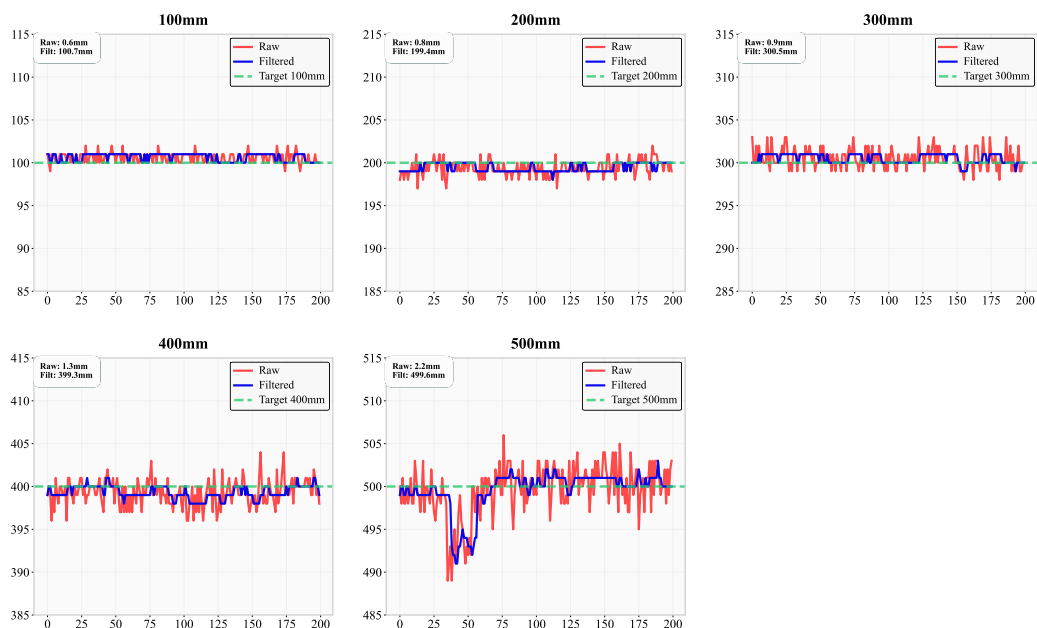
VL53L0X Performance: DARK Lighting Condition



شکل ۸ مقایسه عملکرد خام و فیلترشده سنسور VL53L0X در شرایط تاریک برای فواصل ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی متر

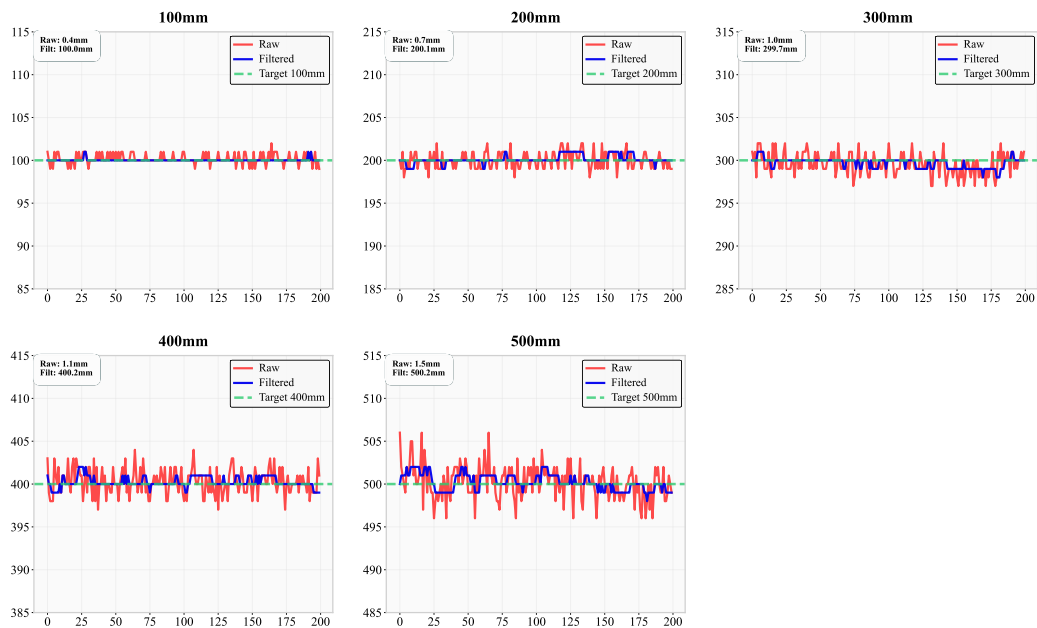
در شرایط فلورسنت که تأثیر فلیکر ۱۰۰ هرتز لامپ مهتابی موجب ایجاد نوسانات دوره‌ای می‌شود، نتایج در شکل ۹ قابل مشاهده است. در فاصله ۱۰۰ میلی متر MAE خام برابر ۰/۶۲ میلی متر بوده که پس از فیلتر به ۰/۶۵ میلی متر افزایش یافته است (کاهش منفی ۴/۸ درصد)، اما در فواصل ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی متر بهبود ۲۹ درصد تا ۴۲ درصد ثبت شده است. بهترین عملکرد سنسور مربوط به شرایط نوری عادی است که در شکل ۱۰ آمده است؛ در این حالت MAE فیلترشده در فاصله ۱۰۰ میلی متر به ۰/۰۲ میلی متر رسیده (۹۴/۴ درصد بهبود) و میانگین بهبود کل محدوده ۶۱/۷ درصد است.

VL53L0X Performance: FLUORESCENT Lighting Condition



شکل ۹ مقایسه عملکرد خام و فیلترشده سنسور VL53L0X در شرایط نور فلورسنت برای فواصل ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر

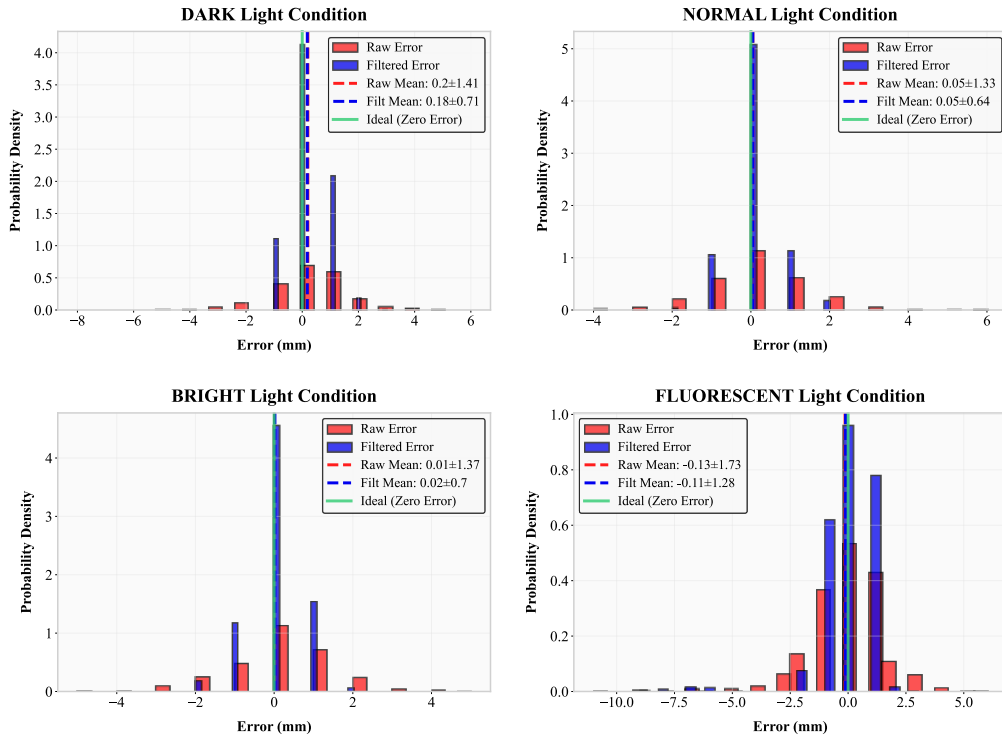
VL53L0X Performance: NORMAL Lighting Condition



شکل ۱۰ مقایسه عملکرد خام و فیلترشده سنسور VL53L0X در شرایط نور عادی برای فواصل ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر

توزیع خطای اندازه‌گیری در چهار شرایط نوری مختلف در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. نتایج هیستوگرام‌ها نشان می‌دهد که فیلتر علاوه بر کاهش خطای میانگین، پراکندگی داده‌ها را نیز به مقدار قابل توجهی کم کرده است؛ به گونه‌ای که انحراف استاندارد در حالت عادی از ۱/۳۳ به ۰/۶۴ میلی‌متر (کاهش ۵۲ درصد)، در حالت پرنور از ۱/۳۷ به ۰/۷۰ میلی‌متر (۴۹ درصد)، در حالت تاریک از ۱/۴۱ به ۰/۷۱ میلی‌متر (۵۰ درصد) و در حالت فلورسنت از ۱/۷۳ به ۱/۲۸ میلی‌متر (۲۶ درصد) کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که خروجی فیلترشده تمرکز بیشتری حول مقدار واقعی دارد.

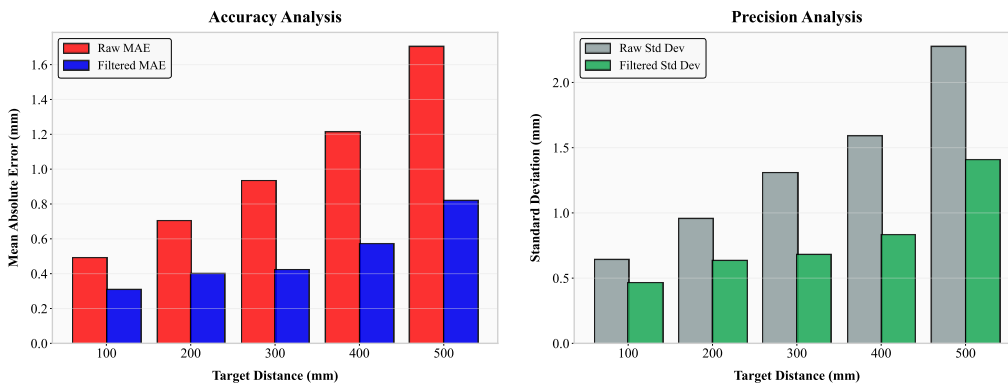
Error Distribution Analysis Across Lighting Conditions



شکل ۱۱ توزیع خطای اندازه‌گیری سنسور VL53L0X در شرایط نوری مختلف (هیستوگرام)

وابستگی خطاها به فاصله در شکل ۱۲ بررسی شده است. خطای MAE خام از 0.49 میلی‌متر در فاصله 100 میلی‌متر به 1.70 میلی‌متر در فاصله 500 میلی‌متر افزایش یافته، درحالی‌که مقدار فیلترشده از 0.31 به 0.82 میلی‌متر رسیده است. همچنین انحراف استاندارد خام از 0.64 به 2.27 میلی‌متر افزایش یافته و نسخه فیلترشده آن از 0.46 به 1.41 میلی‌متر رسیده است که معادل 38 درصد بهبود پایداری است. این روند، وابستگی تقریباً خطی خطا به فاصله را تأیید می‌کند.

Performance Across Measurement Range

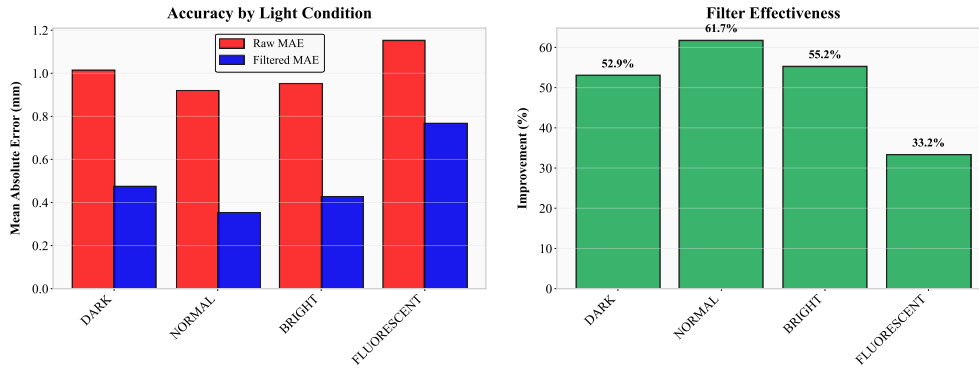


شکل ۱۲ تحلیل دقت (MAE) و پایداری (Std) سنسور در مقابل فاصله هدف

تأثیر چهار شرایط نوری مختلف در شکل ۱۳ رتبه‌بندی شده است. بیشترین بهبود مربوط به نور عادی با $61/7$ درصد است و پس از آن حالت پر نور ($55/2$ درصد)، تاریک ($52/9$ درصد) و فلورسنت ($33/2$ درصد) قرار می‌گیرند. تحلیل عمیق‌تر پدیده فلیکر فلورسنت در شکل ۱۴ ارائه شده است. این تحلیل چهار نما (باکس‌پلات، سری زمانی، هیستوگرام و مقایسه MAE) را شامل

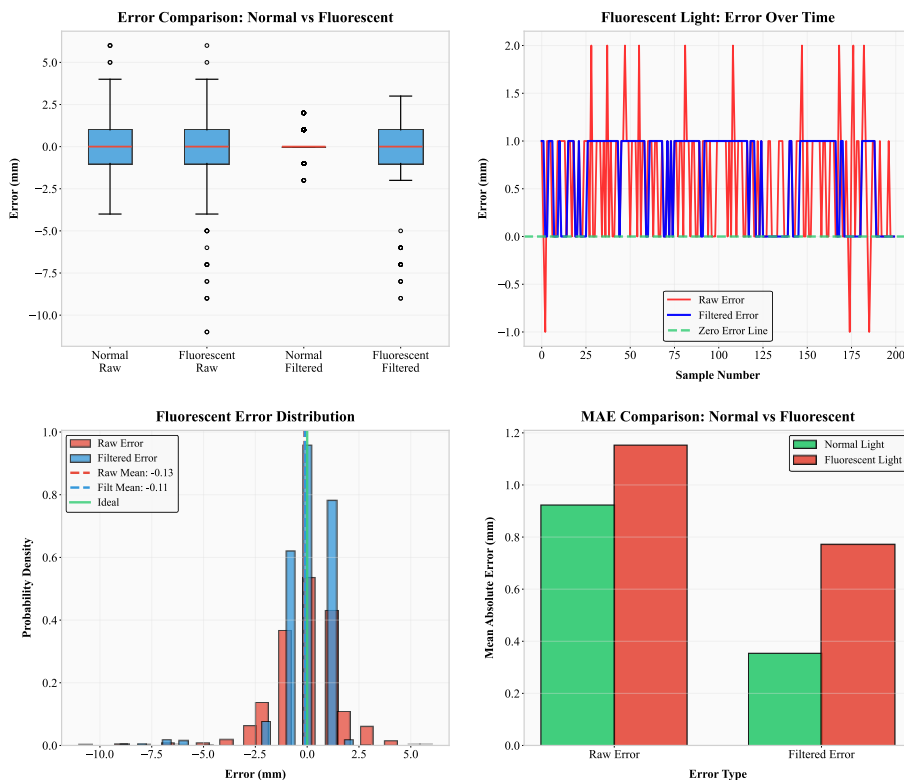
می‌شود و نشان می‌دهد که فلیکر سبب افزایش نوسانات شده و MAE خام در این حالت ۱/۴ برابر شرایط عادی است که فیلتر آن را به ۱/۲ کاهش داده است.

Lighting Condition Impact Analysis



شکل ۱۳ تأثیر شرایط نوری مختلف بر دقت و کارایی فیلتر میانه

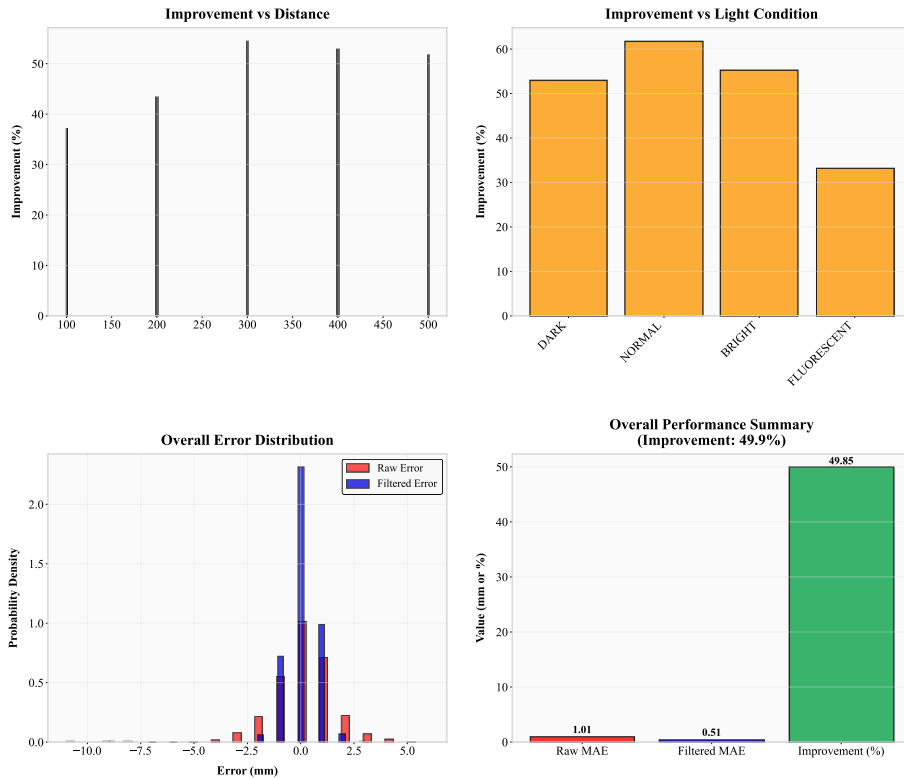
Fluorescent Flicker Analysis - 4 View Comparison



شکل ۱۴ تحلیل ویژه اثرات فلیکر فلورسنت بر عملکرد سنسور (۴ نما)

جمع‌بندی کلی عملکرد فیلتر در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در مقایسه با فاصله، میانگین بهبود تقریباً ثابت و نزدیک به ۵۰ درصد است، در مقایسه با شرایط نوری بهترین حالت عادی و ضعیف‌ترین فلورسنت (۳۳/۲ درصد) است. در مجموع، خطای میانگین سنسور از ۱/۰۱۰ به ۰/۵۰۶ میلی‌متر کاهش یافته و پایداری آن نیز به میزان ۳۷/۸ درصد بهبود یافته است؛ بنابراین عملکرد فیلتر میانه حتی در بدترین شرایط (فلورسنت) نیز قابل قبول بوده و دقت نهایی کمتر از محدوده ۲-۳ میلی‌متر مورد نیاز کاربردهای صنعتی است.

Comprehensive Filter Improvement Analysis



شکل ۱۵ تحلیل جامع بهبود عملکرد فیلتر میانه در تمام شرایط آزمایشی

خلاصه کامل ۲۰ آزمایش انجام شده (۴۰۰۰ نمونه) در جدول ۲ ارائه شده و نتایج آماری دقیق سنسور VL53L0X قبل و بعد از اعمال فیلتر در جدول ۲ آمده است. این داده‌ها تأیید می‌کنند که فیلتر میانه بهبود میانگین ۴۹/۹ درصد در دقت و ۳۷/۸ درصد در پایداری ایجاد کرده است.

جدول ۲ خلاصه آماری نتایج سنسور VL53L0X

فاصله (mm)	نور	N	MAE خام (mm)	MAE فیلتر (mm)	Std خام (mm)	Std فیلتر (mm)	بهبود (درصد)
۱۰۰	پرنور	۲۰۰	۰/۴۲۵	۰/۱۹	۰/۶۳	۰/۳۹۳	۵۵/۳
۱۰۰	تاریک	۲۰۰	۰/۵۷	۰/۳۸	۰/۶۷۱	۰/۴۸۷	۳۳/۳
۱۰۰	فلورسنت	۲۰۰	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۶۱۱	۰/۴۷۸	۴/۸-
۱۰۰	عادی	۲۰۰	۰/۳۵۵	۰/۰۲	۰/۵۸۳	۰/۱۴۰	۹۴/۴
۲۰۰	پرنور	۲۰۰	۰/۶۴۵	۰/۴۱۵	۰/۸۳۶	۰/۵۴۵	۳۵/۷
۲۰۰	تاریک	۲۰۰	۰/۷۱۵	۰/۳۸	۰/۸۷۹	۰/۵۲۲	۴۶/۹
۲۰۰	فلورسنت	۲۰۰	۰/۸۱	۰/۵۷۵	۰/۸۸۴	۰/۵۰۶	۲۹/۰
۲۰۰	عادی	۲۰۰	۰/۶۵۵	۰/۲۳	۰/۹۰۵	۰/۴۶۸	۶۴/۹
۳۰۰	پرنور	۲۰۰	۰/۹۶۵	۰/۴۵۵	۱/۳۳۲	۰/۶۳۶	۵۲/۹
۳۰۰	تاریک	۲۰۰	۰/۹	۰/۳۲	۱/۳۳۵	۰/۵۹۷	۶۴/۴
۳۰۰	فلورسنت	۲۰۰	۰/۸۹۵	۰/۵۳	۱/۱۱۲	۰/۵۵۷	۴۰/۸
۳۰۰	عادی	۲۰۰	۰/۹۸	۰/۴	۱/۲۱۶	۰/۵۷۷	۵۹/۲
۴۰۰	پرنور	۲۰۰	۱/۲۲	۰/۴۷	۱/۵۹۷	۰/۷۰۲	۶۱/۵
۴۰۰	تاریک	۲۰۰	۱/۲۴۵	۰/۶۹۵	۱/۶۰۲	۰/۸۶۳	۴۴/۲
۴۰۰	فلورسنت	۲۰۰	۱/۲۶	۰/۷۴	۱/۴۹۶	۰/۷۴۴	۴۱/۳
۴۰۰	عادی	۲۰۰	۱/۱۳	۰/۳۹	۱/۴۷۶	۰/۶۲۰	۶۵/۵

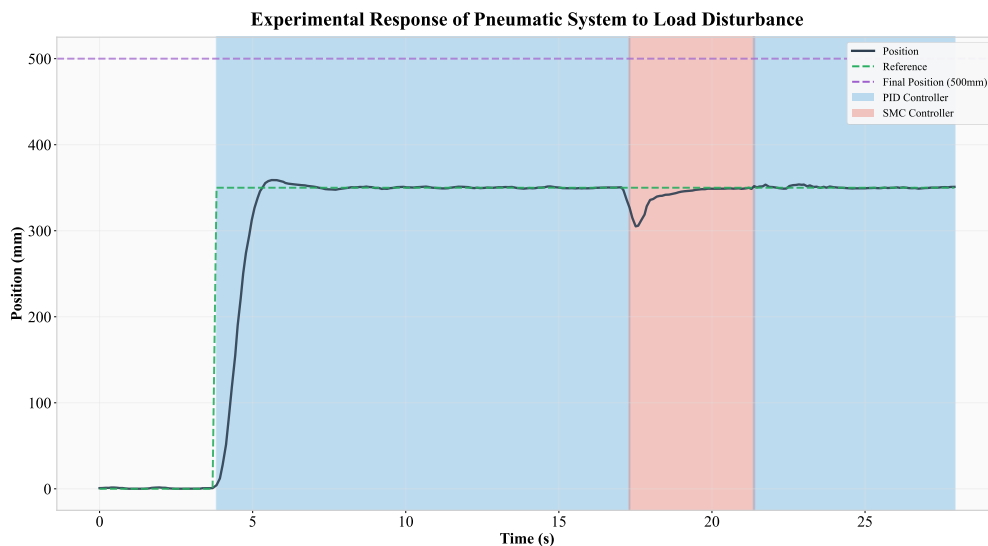
فاصله (mm)	نور	N	MAE خام (mm)	MAE فیلتر (mm)	Std خام (mm)	Std فیلتر (mm)	بهبود (درصد)
۵۰۰	پرنور	۲۰۰	۱/۵۱	۰/۶۰۵	۱/۸۵۱	۰/۷۷۷	۶۰/۰
۵۰۰	تاریک	۲۰۰	۱/۶۲۵	۰/۶۰۵	۲/۰۶۳	۰/۸۲۹	۶۲/۸
۵۰۰	فلورسنت	۲۰۰	۲/۱۷۵	۱/۳۵	۲/۹۶۱	۲/۳۱۳	۳۷/۹
۵۰۰	عادی	۲۰۰	۱/۴۹	۰/۷۲۵	۱/۹۴۷	۰/۹۴۵	۵۱/۳
کل	همه	۴۰۰۰	۱/۰۱۰	۰/۵۰۶	۱/۵۱	۰/۸۵	۴۹/۹

۳-۲- پاسخ به ورودی پله تحت اثر اغتشاش بار

پس از طراحی کنترلر و انجام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب و تعیین پارامترهای کنترلرها با استفاده از الگوریتم PSO، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنترلر عملکرد مطلوبی داشته و امکان پیاده‌سازی عملی آن وجود دارد. پس از اجرای سیستم بر روی سخت‌افزار، داده‌های موقعیت از طریق سنسور جمع‌آوری و پاسخ سیستم به ورودی پله و اغتشاش بار در پایتون ترسیم شد (شکل ۱۶). با توجه به ماهیت گسسته حسگر موقعیت و وجود تأخیرهای ذاتی در اندازه‌گیری، داده‌های ثبت‌شده به صورت گسسته بودند.

پاسخ سیستم از دقت و پایداری مناسب، خطای کم و عملکرد مطلوب در برابر اغتشاشات برخوردار بود. زمان خیز حدود ۰/۹۳ ثانیه و زمان نشست ۷/۲ ثانیه اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده کیفیت بالای پاسخ دینامیکی است. همچنین سیستم پس از اعمال اغتشاش بار (در خلاف جهت حرکت عملگر)، تنها طی ۳/۶۱ ثانیه به حالت پایدار بازگشت. مقدار بالازدگی نیز حدود ۳ درصد ثبت شد که برای کاربردهای صنعتی کاملاً قابل قبول است.

برای ارزیابی کمی عملکرد سیستم، معیارهای خطای انتگرالی محاسبه شد. خطای انتگرال مقدار مطلق (IAE) برابر با ۳۲۰/۰۸۴ میلی‌متر-ثانیه و خطای انتگرال مربعات (ISE) برابر با ۶۷۵۲۴/۴۱۷ میلی‌متر مربع-ثانیه به دست آمد. این مقادیر نشان می‌دهند که سیستم توانسته است خطاهای ناشی از اغتشاش را به سرعت کاهش داده و خطا را حول مقدار صفر تثبیت کند؛ امری که پایداری و کارایی بالای کنترلر سوئیچینگ را تأیید می‌کند.



شکل ۱۶ پاسخ سیستم پنوماتیک عملی تحت اثر اغتشاش بار

با توجه به نتایج به دست آمده، کنترلر سوئیچینگ پیشنهادی در هر دو محیط شبیه‌سازی و آزمایش عملی، پایداری مطلوبی نشان داده است. پاسخ سیستم به ورودی پله دارای نوسانات کم و زمان نشست مناسب بوده و در برابر اغتشاش بار نیز (با وجود تغییرات ناگهانی اعمال شده) تنها طی حدود ۳/۶ ثانیه به حالت پایدار بازگشته است. این رفتار، عملکرد مقاوم کنترلر را کاملاً اثبات می‌کند.

همخوانی نزدیک بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی، صحت مدل‌سازی دینامیکی سیستم و اثربخشی الگوریتم بهینه‌سازی PSO را تأیید می‌کند. کنترلر سوئیچینگ، که بر روی سخت‌افزار آردوینو پیاده‌سازی شده، با ترکیب مزایای کنترلر PID و کنترل‌کننده SMC، تمامی اهداف طراحی شامل پایداری، سرعت پاسخ، دقت و مقاومت در برابر اغتشاش را محقق ساخته است. به‌کارگیری این ساختار سوئیچینگ در مقایسه با استفاده جداگانه PID یا SMC، باعث بهره‌مندی سیستم از مزایای مشترک هر دو کنترلر شده است: در شرایط معمول، PID پاسخ نرم و بدون نوسان فراهم می‌کند، و در شرایط اغتشاش یا بار اضافی با سوئیچ به SMC، قابلیت بازیابی سریع و مقاوم‌بودن سیستم تضمین می‌شود. علاوه بر این، خطای حالت ماندگار حدود ۲ درصدی که در حالت استفاده صرف از PID مشاهده می‌شد، در کنترلر سوئیچینگ به‌طور کامل حذف شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه کنترل موقعیت پنوماتیک کم‌هزینه با بهره‌گیری از کنترلر سوئیچینگ مبتنی بر ترکیب کنترلر PID و کنترلر مد لغزشی (SMC) طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی گردید. هدف ارائه راهکاری هوشمند، اقتصادی و قابل‌اعتماد برای کاربردهای صنعتی بود که بتواند در شرایط کاری مختلف به‌طور خودکار میان استراتژی‌های کنترلی جابه‌جا شود و با حداقل سخت‌افزار و سنسور در محیط واقعی قابل‌استقرار باشد.

عملکرد سنسور لیزری VL53L0X در چهار شرایط نوری و پنج فاصله مورد بررسی قرار گرفت. با به‌کارگیری فیلتر میانه، میانگین خطای سنسور از ۱/۰۱۰ میلی‌متر به ۰/۵۰۶ میلی‌متر کاهش یافت که پایداری اندازه‌گیری را ۳۷/۸ درصد بهبود بخشید. حتی در شرایط پرنویز مانند نور فلورسنت، دقت در محدوده قابل‌قبول صنعتی (کمتر از ۲-۳ میلی‌متر) باقی ماند و قابلیت اتکا برای حلقه کنترل را دارا بود.

کنترلر سوئیچینگ، پس از تنظیم با الگوریتم بهینه‌سازی PSO، در محیط عملی پیاده‌سازی شد. پاسخ پله سیستم تحت اغتشاش بار، دقت بالا، نوسانات کم و پایداری مناسب کنترلر پیشنهادی را نشان داد. پارامترهای کلیدی شامل زمان خیز ۰/۹۳ ثانیه، زمان نشست ۷/۲ ثانیه، بالازدگی تنها ۳ درصد و زمان بازیابی پس از اغتشاش ۳/۶ ثانیه بود که با نیاز کاربرد صنعتی (کنترل دریچه دستگاه آسیاب پلاستیک) مطابقت داشت. مقادیر کم معیارهای IAE و ISE نیز توانایی کنترلر در کاهش سریع خطا و حفظ پایداری را تأیید کردند.

تطابق نزدیک نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی، صحت مدل ریاضی و اعتبار راهبرد کنترل را تأیید نمود. ترکیب PID و SMC، پاسخ نرم PID و مقاومت بالای SMC را در برابر بارگذاری ناگهانی فراهم آورد. در مجموع، سیستم طراحی شده یک راهکار عملی، مقرون‌به‌صرفه و قابل‌اعتماد برای کنترل موقعیت عملگرهای پنوماتیک است. استفاده از سخت‌افزار کم‌هزینه (آردوینو)، یک حسگر واحد، فیلتر مؤثر و کنترلر سوئیچینگ هوشمند، رویکردی منعطف و قابل توسعه را ارائه می‌دهد.

این سیستم با سرمایه‌گذاری اندک، موفقیت در پیاده‌سازی کنترل موقعیت پنوماتیک با دقت میلی‌متری را نشان داد. کلید موفقیت در انتخاب بهینه اجزا (VL53L0X به جای انکودر) و طراحی الگوریتم کنترل سوئیچینگ متناسب با محدودیت منابع روی آردوینو بود. مزایای اصلی آن شامل هزینه بسیار پایین، سادگی مونتاژ و برنامه‌نویسی، قابلیت توسعه و سفارشی‌سازی آسان، و نصب غیرتماسی سنسور است. همچنین، امکان استفاده از این سیستم کنترلی برای کنترل سیستم‌های پنوماتیک تناسبی^۱ نیز وجود دارد.

با این حال، محدودیت‌هایی نظیر نرخ نمونه‌برداری و سرعت پاسخ کندتر نسبت به سیستم‌های صنعتی پیشرفته، محدوده کاری سنسور (معمولاً تا ۲ متر)، حساسیت نسبی به شرایط نوری شدید و گردوغبار، و عدم امکان استفاده مستقیم در محیط‌های بسیار خشن صنعتی (بدون محافظ) وجود دارد.

کاربردهای پیشنهادی این سیستم شامل آزمایشگاه‌های کنترل و مکترونیک در آموزش مهندسی، اتوماسیون کارگاهی برای

^۱ Proportional

ماشین‌های کوچک و پروژه‌های DIY، نمونه‌سازی سریع^۱ ایده‌های اتوماسیون، و اتوماسیون فرآیندهای ساده برای بنگاه‌های کوچک و متوسط با بودجه محدود است.

برای توسعه‌های آتی، ارتقاء پردازنده با بردهایی مانند آردوینو Due یا ESP32 برای اجرای الگوریتم‌های پیچیده‌تر، افزودن قابلیت ارتباط شبکه (Wi-Fi/Ethernet) برای مانیتورینگ و کنترل از راه دور، و بررسی امکان استفاده از این معماری برای کنترل عملگرهای چرخشی (روتاری) پیشنهاد می‌شود. همچنین، توسعه کنترل تطبیقی، بهبود تخمین بار، استفاده از سنسورهای ترکیبی برای افزایش دقت، و پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی بزرگ‌تر از دیگر مسیرهای تحقیقات آینده محسوب می‌شوند.

۵- مراجع

- [1] Haider U, Mughal R, Sheikh F. Design and Development of a Low-Cost Multi-Channel Re-Programmable Electro-Pneumatic Actuator Kit. *International Journal of Engineering and Applied Physics*, 2023; 3(3): 814-822.
- [2] Rajendran VK, Chockalingam A. Development of Design of Pneumatic Circuits using Arduino Microcontroller. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 2018; 5(5): 27-29.
- [3] Kumar H, Baghel A. Estimation of fatigue life using low cost pneumatic setup and Arduino based data acquisition (DAQ). *Materials Today: Proceedings*, 2021; p. 1-7.
- [4] Parikh P, Vasani R, Sheth S, Gohil J. Actuation of Electro-Pneumatic System using MATLAB Simulink and Arduino Controller- A case of a Mechatronics systems Lab. In: *Proceedings of ICCASP/ICMMD-2016. Advances in Intelligent Systems Research*, 2017; 137: 59-64.
- [5] Soriano A, Marín L, Vallés M, Valera A, Albertos P. Low Cost Platform for Automatic Control Education Based on Open Hardware. In: *Proceedings of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control*. Cape Town, South Africa, 2014; p. 9044-9050.
- [6] Goncalves J, Costa P. Differential Mobile Robot Controller Study: A Low Cost Experiment Based on a Small Arduino Based Prototype. In: *Proceedings of the 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. Valletta, Malta, 2017; p. 945-950.
- [7] Rehman WU, Jiang G, Wang Y, Iqbal N, Rehman SU, Bibi S, Elahi H. A New Type of Aerostatic Thrust Bearing Controlled by High-speed Pneumatic Valve and a Novel Pressure Transducer. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2019; 16(4): 7430-7446.
- [8] Young TR, Xavier MS, Yong YK, Fleming AJ. A Control and Drive System for Pneumatic Soft Robots: PneuSoRD. In: *Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Las Vegas, NV, USA, 2020; p.1-8.
- [9] Miao Y, Dong W, Du Z. Design of a Soft Robot with Multiple Motion Patterns Using Soft Pneumatic Actuators. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017; 269: 012013.
- [10] Komarizadehasl S, Mobaraki B, Ma H, Lozano-Galant JA, Turmo J. Low-Cost Sensors Accuracy Study and Enhancement Strategy. *Applied Sciences*, 2022; 12: 3186.
- [11] Heo HB, Park SH. Artificial Neural Network-Based Conveying Object Measurement Automation System Using Distance Sensor. *Sensors*, 2026; 26: 455.
- [12] Sharma R, Patange AD, Padalghare R, Kale RC. Development of LiDAR operated inventory control and assistance robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022; 238(1): 192-202.
- [13] Perez M, Suarez A, Heredia G, Ollero A. Positioning System for Pipe Inspection with Aerial Robots using Time of Flight Sensors. In: *4th Iberian Robotics Conference (ROBOT 2019)*. Springer, Cham, 2019; p. 1-12.
- [14] Tsuji S, Kohama T. Development of Omni-Directional Proximity Sensor for Drone. In: *Proceedings of the 7th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2019*. The Institute of Industrial Applications Engineers, Japan, 2019; p. 311-315.
- [15] Mulyani H, Abdurahim MN, Maulana MIW, Rafsanjani A, Rohman F, Arrifda M. Application of

¹ Prototyping

- Arduino-based Control System Hydraulic Barricades to Improve Safety at Level Crossing Safety. *Research Horizon*, 2025; 5(3): 1007-1018.
- [16] Chen Y, Chung H, Chen B, Ping HY, Sun Y. Pneumatic actuation-based bidirectional modules with variable stiffness and closed-loop position control. In: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an, China: IEEE, 2021; p. 1-7.
- [17] Van Varseveld RB, Bone GM. Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1997; 2(3): 195-204.
- [18] Nguyen T, Leavitt J, Jabbari F, Bobrow JE. Accurate sliding-mode control of pneumatic systems using low-cost solenoid valves. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007; 12(2): 216-219.
- [19] Hodgson S, Le MQ, Tavakoli M, Pham MT. Improved tracking and switching performance of an electro-pneumatic positioning system. *Mechatronics*, 2012; 22: 1-12.
- [20] Hejrati B, Najafi F. Accurate pressure control of a pneumatic actuator with a novel pulse width modulation-sliding mode controller using a fast switching On/Off valve. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2012; 227(2): 230-242.
- [21] Ahn K, Yokota S. Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves. *Mechatronics*, 2005; 15: 683-702.
- [22] Qiu Z, Shimizu M, Wang Z, Kawamura S. A Position Estimation Method for Pneumatic Actuators Based on Flow and Pressure Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024; 73: 7509209.
- [23] Tadano K, Kawashima K, Kojima K, Tanaka N. Development of a Pneumatic Surgical Manipulator IBIS IV. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2010; 22(2): 179-188.
- [24] Zhang Y, Bone GM. Direct switching position control algorithms for pneumatic actuators using on/off solenoid valves. In: *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*. Toronto, ON, Canada, 2018; p. 1-8.
- [25] Bone GM, Ning S. Experimental comparison of position tracking control algorithms for pneumatic cylinder actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007; 12(5): 557-561.
- [26] Hristov H, Iliev G, Dimitrov D. Speed Control of Pneumatic Power Transmission Systems Using On-Off Valves with Pulse Width Modulation. In: *Proceedings of the University of Ruse*, 2023; 62(1.1): 128-133.
- [27] Rao Z, Bone GM. Nonlinear Modeling and Control of Servo Pneumatic Actuators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008; 16: 562-569.
- [28] Pawlowski W, Malek A, Sikorski J. Pneumatic actuator positioning with pilot controlled check valves. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2021; 25: 1-7.
- [29] Lim WC, Takaiwa M. Nanometer-Scale Positioning Control with Compensator Using Standard Type Linear Pneumatic Actuator. *International Journal of Automation Technology*, 2025; 19(4): 488-498.
- [30] Zhang B, Jiang A, Jiang J, Qi Y, Xue L, Wang Y. A New Positioning Strategy Based on Parameter Tuning and Optimal Control Technique for Pneumatic Control Valve. *Actuators*, 2022; 11: 279.
- [31] Ogata K. *System Dynamics*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.