



پیاده‌سازی عملی کنترلر مشتقگیر-تناسبی مدل مرجع تطبیقی برای سکوی پایدارساز دوربین دو درجه آزادی

مهدی حاج محمدی حسین آبادی¹، حامد شهبازی^{2*}، حسین کریم‌پور²، کمال جمشیدی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

3- دانشیار، مهندسی کامپیوتر، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 8164833664، shahbazi@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 فروردین 1396

پذیرش: 09 خرداد 1396

ارائه در سایت: 06 مرداد 1396

کلید واژگان:

پایدارساز گیمبال

پیاده‌سازی عملی

کنترلر تطبیقی مدل مرجع

تثبیت کننده

چکیده

در این مقاله، روش کنترل تطبیقی مدل مرجع جهت تنظیم خودکار پارامترهای کنترلر یک پایدارساز دوربین ارائه می‌شود، بنحوی که پاسخ سیستم تحت شرایط اینرسی مختلف از پاسخ مدل مرجع واحدی پیروی نماید. پایدارساز دوربین یا گیمبال مشتمل بر یک پایه متحرک است که با اتصال فعال یا غیرفعال به دوربین، قابلیت هموارسازی حرکت و تثبیت تصاویر در مقابل چرخش‌ها و لرزش‌های سکو را دارد. یکی از مشکلات گیمبال‌های تجاری موجود در بازار این است که فقط قادر به حمل دوربین‌های مخصوص به خود می‌باشند و اگر دوربین دیگری بر روی این گیمبال‌ها بسته شود، نمی‌توانند عملکرد مناسب اولیه خود را حفظ کنند. این مشکل به دلیل تفاوت اینرسی و محل مرکز جرم دوربین‌های مختلف با یکدیگر است. در این مقاله، در راستای حل این مشکل، روش کنترلری بلادرنگی به کمک برد آردوینو بر روی سیستم واقعی پیاده‌سازی عملی شده است. در ابتدا طراحی و ساخت گیمبال دو درجه آزادی انجام گردیده و سپس پیاده‌سازی عملی کنترلر PID-تطبیقی مدل مرجع بر روی آن صورت پذیرفته است. در انتهای مقاله، تحلیل عددی برای بررسی عملکرد عملی کنترلر تطبیقی مدل مرجع در مقاوم بودن نسبت به اغتشاش‌های وارده به سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

Practical implementation of a PID - Model Reference Adaptive Controller for a 2-DOF Camera Gimbal

Mahdi Haj Mohammadi Hossein Abadi¹, Hamed Shahbazi^{1*}, Hossein Karimpour¹, Kamal Jamshidi²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2- Department of Software Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

* P.O.B. 8164833664, Isfahan, Iran, shahbazi@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 26 March 2017

Accepted 30 May 2017

Available Online 28 July 2017

Keywords:

Gimbal

Practical implementation

Model Reference Adaptive Control

Stabilizer

ABSTRACT

In this paper, a two-degrees of freedom gimbal has been designed and constructed. A camera stabilizer or gimbal consists of a movable stand for camera that enables a smooth picture capture. One of the inconveniences of the commercial gimbals is that they carry a specific camera. If a new camera is installed on them, the gimbal cannot maintain its primary function properly. This problem occurs because of the different mass, inertia and centroid position of cameras. One of the important aspects in this particular application is the real-time implementation of control laws developed on software environments such as MATLAB on the real system. A PID- Model Reference Adaptive Control is implemented on the gimbal. Using model reference adaptive control, we search for automatic setting of controller parameters such that the system response under different inertial conditions follows a single reference model. Finally, the efficiency and robustness of this model reference adaptive controller was investigated both numerically and practically.

1- مقدمه

مختلف را جبران می‌نماید. دستگاه سعی بر موازی نگاهداشتن خودکار دوربین با راستای افق و حذف لرزش‌های موجود در فریم دارد. به همین دلیل در سال‌های اخیر مطالعه زیادی در این راستا صورت گرفته است. در یکی از مطالعات انجام شده بر روی سیستم گیمبال از کنترلر دینامیک معکوس مقاوم و کنترل تطبیقی برای پایداری و کنترل سیستم گیمبال استفاده شده است. این سیستم دارای یک گیمبال دو درجه آزادی است که به یک وسیله

با گسترش روزافزون تصویربرداری در حال حرکت، از جمله فیلم‌برداری و نقشه‌برداری‌های هوایی، نیاز به وسیله‌ای احساس گردید که بتواند تصویری بدون لرزش و نویز را به بیننده تحویل دهد. یکی از وسایل به‌کار گرفته شده به این منظور، وسیله‌ای است به نام گیمبال یا تثبیت کننده است که در جایگاه نصب دوربین قرار می‌گیرد و چرخش‌های اضافی دوربین به جهات

Please cite this article using:

M. Haj Mohammadi Hossein Abadi, H. Shahbazi, H. Karimpour, K. Jamshidi, Practical implementation of a PID - Model Reference Adaptive Controller for a 2-DOF Camera Gimbal, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 325-332, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شده است [9-1].

2- مدل‌سازی گیمبال 2-درجه آزادی

بررسی دینامیک گیمبال به شناخت بیشتر سیستم و درجات آزادی موردنظر کمک می‌کند. برای طراحی و مدل‌سازی گیمبال 2- درجه آزادی از نرم‌افزار کتیا استفاده شده است. گیمبال مدنظر به گونه‌ای طراحی شده است که دارای دو درجه رول و پیچ است و از دو موتور DC گیربکسی جهت کنترل این دو درجه استفاده شده است. "شکل 1"، مدل طراحی شده سیستم است که مشخصات فیزیکی از جمله محل قرارگیری سنسور IMU، موتورها و سیستم کنترل روی آن مشخص گردیده است.

برای به‌دست آوردن دینامیک سیستم محوره‌های مختصات و درجات آزادی مطابق "شکل 2"، تعیین گردید که θ_1 درجه آزادی در راستای محور رول موتور (1) را نشان می‌دهد و θ_2 درجه آزادی در راستای محور پیچ موتور (2) را نشان می‌دهد و ابعاد و اندازه‌های لینک‌ها و محوره‌های مختصات در نظر گرفته شده در این شکل نشان داده شده است.

3- مبانی نظری

با توجه به نیاز استفاده از دوربین‌های مختلف جهت تثبیت تصاویر و قابلیت دنبال کردن هدف، گیمبالی طراحی و ساخته شد که بتواند قدرت حمل چندین دوربین با جرم‌ها و اینرسی‌های مختلف را داشته باشد. در این راستا کنترل تطبیقی مدنظر قرار گرفت، این کنترل قادر است، عدم قطعیت در پارامترهای سیستم از جمله جرم و اینرسی که با تعویض دوربین تغییر می‌کند را با یک مکانیزم تطبیق بدون نیاز به طراحی مجدد کنترلر جبران

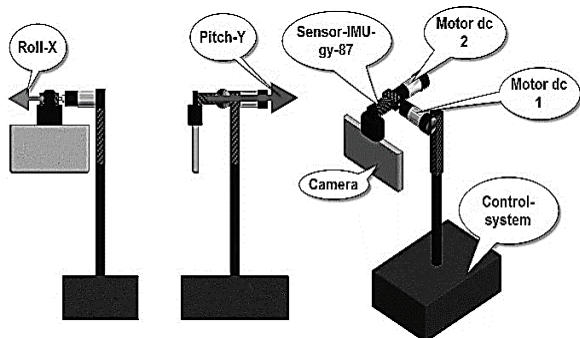


Fig. 1 models designed and physical properties

شکل 1 مدل طراحی شده و مشخصات فیزیکی

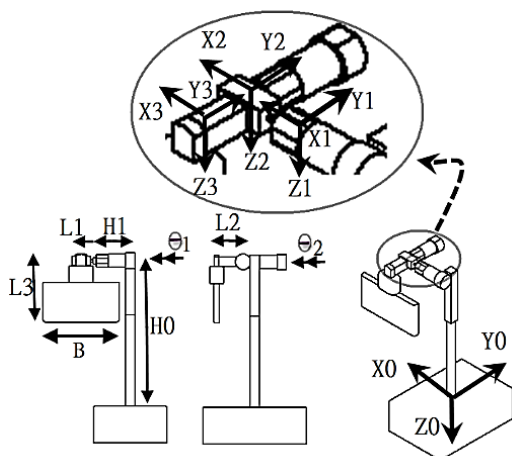


Fig. 2 Dimensions and coordinate axes

شکل 2 مشخصات ابعادی و محوره‌های مختصات

نقلیه هوایی متصل شده است. با توجه به امکان اشتباه در مدل‌سازی دینامیک، اصطکاک و اغتشاش ناشی از محیط، ردیابی دقیق این سیستم در هوا به شدت چالش‌آور است که مستلزم یک کنترل‌کننده‌ی پیشرفته است. کنترل دینامیک معکوس مقاوم و کنترل تطبیقی در حلقه داخلی یا گیمبال سرو-سیستم¹ برای کنترل حرکت گیمبال استفاده می‌شود. تثبیت‌کننده‌ها برای اندازه‌گیری میزان چرخش گیمبال از حالت مرجع از سنسورهای نصب شده اینرسیال² استفاده نموده که بتواند نرخ‌های زاویه‌ای بالا را تحمل کند. نتایج تجربی نشان داده است که کنترلر پیشنهادشده به خوبی قادر به غلبه بر آثار اغتشاش ایجاد شده بر عملکرد ردیابی می‌باشد [1].

گیمبال دوربین شامل دو بخش مهم است: 1- مکانیزم گیمبال، به گونه‌ای که دوربین و سنسور نصب شده در مرکز گیمبال قرار می‌گیرد 2- برنامه‌نویسی تصویر که منجر به تثبیت تصاویر می‌شود [5,1]. در یک نمونه، قاب و دوربین در موقعیت مرکزی توسط میدان مغناطیسی نگه‌داشته شده، به‌طوری که لرزش‌ها را میرا کند [2,1]. مدل‌های دو محوره گیمبال دوربین شامل دو مفصل است که هر دو مفصل توسط سرو موتورهای DC کنترل می‌شود تا دوربین نصب شده را پایدار نگه دارد. گیمبال 2- محوره بر پهپاد³های کوچک نصب می‌شود تا جهت تصویربرداری و نقشه‌برداری مورد استفاده قرار گیرد. سیستم کنترل به گونه‌ای است که باید: 1- کارایی سیستم میرایی و روند کاهش نیرو را اصلاح کند. 2- قادر به پایداری و تحویل اطلاعات GPS باشد. 3- در صورت نیاز اپراتور بتواند دستور موردنظر خود را به سیستم انتقال دهد [6,3]. مطالعه بر روی دینامیک گیمبالی با 8- مفصل و 4- درجه آزادی که برای نظارت و ناوبری از پهپادها استفاده می‌شود، نشان داد که مدل دینامیکی پیشنهاد شده نه تنها محدودیت مکانیکی ندارد بلکه انعطاف‌پذیری نوسانات و دوربین را نسبت به حرکت هدف جبران می‌کند. در این مطالعه حرکت‌شناسی و استخراج معادله حرکت بررسی شده است [7]. در بررسی گیمبال 3- درجه آزادی که محور چرخش هر لینک آن در راستای یکی از محوره‌های مختصات (X-Y-Z) است، ابتدا معادله دینامیکی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس کنترل PID برای آن طراحی گردید و از موتورهای گیربکسی DC برای کنترل مفاصل استفاده شده است و همچنین از سنسورهای انکودر و جاپرو برای فیدبک‌گیری از سیستم استفاده شده است و در محاسبه‌ها، اصطکاک گیربکس موتور نیز در نظر گرفته شده است [8]. در بعضی از این گیمبال‌ها از کنترلر ترکیبی با دقت بالا و جبران خطا استفاده شده است که آزمایش با این روش نشان داد قابلیت حذف اغتشاش قوی‌تر و دقیق‌تر است [9]. در مطالعه‌ای در مورد نظارت و شناسایی که با هدف توسعه یک سیستم متشکل از سنسورهای مادون قرمز و تصویری و یک سیستم ناوبری یکپارچه است، دوربین بر روی گیمبالی سوار بر پهپادی قرار داده شد. کنترل گیمبال از دو راه مختلف PID و LQ تست گردید. مشکل این سیستم سرعت پاسخ کنترلر و محدودیت در تحمل اغتشاش گزارش شده است [10]. در بررسی دینامیک و محاسبات اینرسی از نرم‌افزارهای طراحی مکانیک CAD⁴ استفاده شده است و برای تحلیل مدل از محیط‌های نرم‌افزار متلب⁵ و ادمز⁶ بهره گرفته شد [9,3,1]. در راستای کنترل سیستم از سنسورهای مختلف مانند: سنسور مادون قرمز، انکودر، GPS و وسایلی مانند: سرو موتور و گیربکس استفاده شده است. در مقاله‌ای دیگر بر روی موتور DC بدون جاروبک کنترل خود تنظیم فازی PID و کنترل تطبیقی مدل مرجع استفاده

¹ Inner loop or gimbal servo-system

² Inertial

³ UAV

⁴ Computer-Aided Design

⁵ Matlab

⁶ Adams

خواننده و به آردوینو واسط بین سخت‌افزار و نرم‌افزار انتقال می‌یابد که داده‌ای در سیمولینک متلب مطابق "شکل 7" و "شکل 9"، برای دو زاویه پیچ و رول دریافت می‌گردد. سپس بر روی داده‌های خواننده شده فرایندی مطابق "شکل 4"، بعد از بلوک آنالوگ انجام می‌گیرد تا داده‌ها کالیبره شده و خروجی سنسور یعنی (Y_p) به‌دست آید. در نهایت مطابق "شکل 8" و "شکل 10"، دو زاویه پیچ و رول به‌دست می‌آید.

6- پیاده‌سازی کنترلر PID

برای پیاده‌سازی کنترلر PID مطابق روش دوم زیگلر نیکولز برای بدست آوردن زمان تناوب بحرانی P_{cr} ، بهره بحرانی K_{cr} را به حدی افزایش می‌دهیم که سیستم به نوسان برسد. بر این اساس با توجه به "شکل 11"، K_{cr} را برای درجه آزادی پیچ آنقدر افزایش داده می‌شود تا به حالت نوسانی دائمی برسد که مطابق "شکل 12"، P_{cr} بدست آید. به همین ترتیب مطابق "شکل 13"، K_{cr} را برای درجه آزادی رول آنقدر افزایش داده می‌شود که به حالت نوسانی دائمی برسد که مطابق "شکل 14"، P_{cr} به‌دست می‌آید. نتایج مطابق جدول 1، حاصل آمده است.

برای طراحی کنترلر PID مطابق جدول 2 پارامترهای مدنظر به‌دست می‌آید.

برای گرفتن خروجی (V) براساس فرمول و داده‌های موردنیاز برای قسمت بلوک PID سیمولینک متلب با توجه به معادله (20) اعداد P, I, D, N مطابق جدول 3، به سیستم داده شد. "شکل 15"، حالتی از کنترلر درجه رول را نشان می‌دهد که جرم (دوربین) بر روی سیستم قرار ندارد و "شکل 16"، حالتی از کنترلر درجه رول را نشان می‌دهد که جرم بر روی سیستم قرار گرفته است. و به همین ترتیب برای درجه آزادی پیچ مطابق اعداد I, P, D, N مطابق جدول 4، به سیستم داده شد. "شکل 17"، حالتی از کنترلر درجه پیچ را نشان می‌دهد که جرم (دوربین) بر روی سیستم قرار ندارد و "شکل 18"، حالتی از کنترلر درجه پیچ را نشان می‌دهد که جرم بر روی سیستم قرار گرفته است. شماره‌های در نظر گرفته‌شده در جدول 3، مطابق "شکل 15" و "شکل 16" است و شماره‌های در نظر گرفته‌شده در جدول 4، مطابق "شکل 17" و "شکل 18" است.

$$V = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (1)$$

با توجه به "شکل 15" تا "شکل 18" برای تست عملکرد گیمبال به سیستم اغتشاش‌هایی وارد شد که محدوده آن‌ها با خطوط نقطه خط بیضی

جدول 1 زمان تناوب بحرانی P_{cr} ، بهره بحرانی K_{cr} برای درجه آزادی رول و پیچ
Table 1 Critical period P_{cr} , Critical gain K_{cr} for Roll and Pitch-DOF

P_{cr}	K_{cr}	
0.6	3.2	رول
0.6	4	پیچ

جدول 2 قواعد تنظیم زیگلر- نیکولس براساس بهره بحرانی K_{cr} و زمان تناوب بحرانی P_{cr} [12]

Table 2 Ziegler Nichols tuning rules according to Critical gain K_{cr} , Critical period P_{cr} [12]

T_d	T_i	K_p	نوع کنترل کننده
0	∞	$0.5K_{cr}$	P
0	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	$0.45K_{cr}$	PI
$0.125P_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.6K_{cr}$	PID

کند. کنترلر تطبیقی مدل مرجع به گونه‌ای طراحی می‌شود که پاسخ سیستم را با پاسخ مدل مرجع یکسان کند و به هدف خود یعنی همگرایی خطای ردیابی به سمت صفر برسد. "شکل 3"، مدل کلی طرح کنترلر تطبیقی مدل مرجع را نشان می‌دهد.

"شکل 4"، سیمولینک مورد استفاده برای پیاده‌سازی کنترلر تطبیقی مدل مرجع-PID و نحوه پسخوراند از سنسور و موتور را نشان می‌دهد. خروجی U برای کنترلر موتور مشخص شده است. به‌دلیل این‌که کنترلر موتور سیستم براساس ولتاژ کنترل می‌شود، باید اعداد کنترلی در محدوده در 0-255 برای کنترلر موتور فرستاده شود، که 0 نشان‌دهنده کمترین و 255 نشان‌دهنده بیشترین ولتاژ استفاده شده برای کنترلر موتور است (به‌دلیل این‌که کمتر از 0 همان تأثیر عدد 0 را در ولتاژ دارد و بیشتر از 255 نیز همان تأثیر عدد 255 را در ولتاژ دارد). برای کنترلر موتور DC توسط ولتاژ باید موتور در دو جهت چپ‌گرد و راست‌گرد کنترل شود، به‌دلیل این‌که خروجی U در جهت چرخش چپ‌گرد موتور اعداد زیر صفر را می‌دهد، در عدد (-1) ضرب شده است، تا در رنج مثبت قرار بگیرد. برای فیدبک‌گیری از سنسور از بلوک آنالوگ سیمولینک استفاده شده است و برای بهینه شدن اعداد سنسور و استفاده در کنترلر از بلوک‌هایی مشخص شده در "شکل 4" استفاده شده است، تا خروجی مطلوب (Y_p) به‌دست آید.

4- ساخت و کنترلر سیستم

"شکل 5"، نمونه ساخته شده گیمبال 2-درجه آزادی است که لینک‌های آن با فیبر کربن ساخته شده است و از موتور DC گیربکسی و سنسور (IMU) gy-87 استفاده شده است.

برای پیاده‌سازی کنترلرهای مختلف از جمله کنترلر PID - تطبیقی مدل مرجع بر روی سیستم ساخته شده از واسط سخت‌افزار-نرم‌افزار آردوینو¹ مطابق "شکل 6"، استفاده شده است. که مطابق شکل مراحل زیر صورت می‌گیرد.

- داده از سنسور جاپرو به برد آردوینو (UNO) ارسال می‌شود.
- از طریق خروجی دیجیتال به ورودی آنالوگ برد آردوینو (2560) انتقال داده می‌شود.
- داده‌ها از برد آردوینو (2560) به صورت سریال به متلب انتقال داده می‌شود و پس از انجام محاسبات کنترلی داده‌ها به صورت سریال به برد آردوینو بر می‌گردد.
- کنترلر موتور با استفاده از مازول راه انداز موتور صورت می‌گیرد.

5- داده‌گیری از سنسور

در راستای پیاده‌سازی کنترلر ابتدا داده‌های سنسور را از طریق برد آردوینو

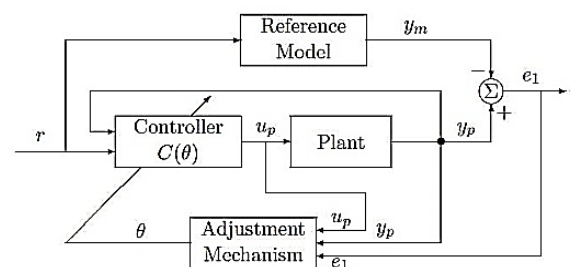


Fig. 3 General model (Model Reference Adaptive Control) [11]

شکل 3 مدل کلی (کنترلر تطبیقی مدل مرجع) [11]

¹ Arduino

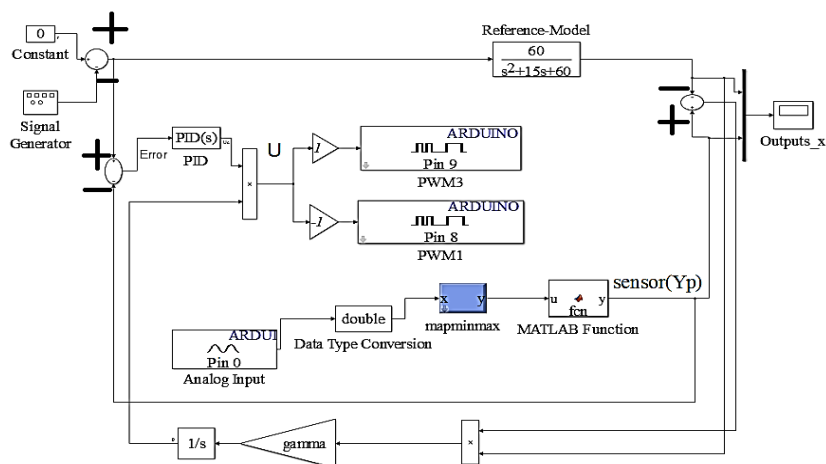


Fig. 4 Simulink used for the implement (Model Reference Adaptive Control-PID)

شکل 4 سیمولینک مورد استفاده برای پیاده‌سازی کنترل تطبیقی مدل مرجع-PID

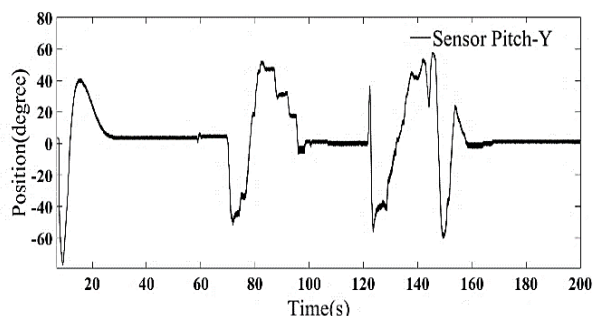


Fig. 8 Pitch angle data sensor in MATLAB after calibration (Yp)

شکل 8 داده‌های خوانده شده زاویه پیچ سنسور در متلب پس از کالیبره شدن (Yp)

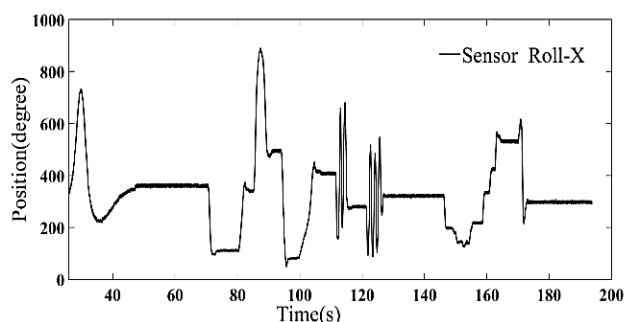


Fig. 9 Roll angle data sensor in MATLAB after analog blocks

شکل 9 داده‌های خوانده شده زاویه رول سنسور در متلب بعد از بلوک آنالوگ

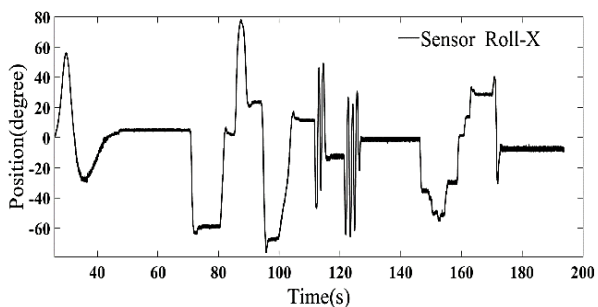


Fig. 10 Roll angle data sensor in MATLAB after calibration (Yp)

شکل 10 داده‌های خوانده شده زاویه رول سنسور در متلب پس از کالیبره شدن (Yp)



Fig. 5 The prototyped gimbal with 2-DOF

شکل 5 نمونه ساخته شده گیمبال 2-درجه آزادی

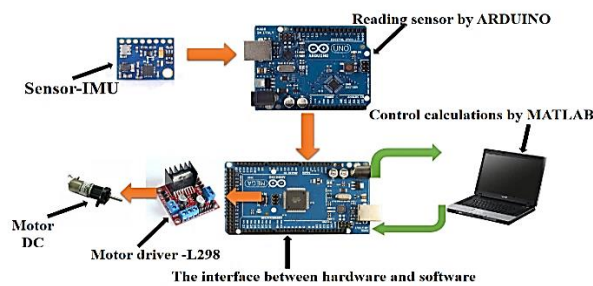


Fig. 6 The connection between sensor, software Matlab and motor

شکل 6 ارتباط بین سنسور، نرم‌افزار متلب و موتور

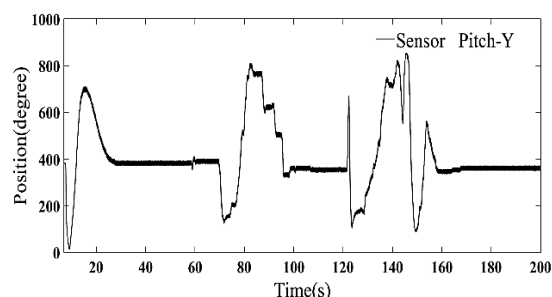


Fig. 7 Pitch angle data sensor in MATLAB after analog blocks

شکل 7 داده‌های خوانده شده زاویه پیچ سنسور در متلب بعد از بلوک آنالوگ

همچنین عملکرد ردیابی سیستم نسبت به اعمال زوایای مختلف تست شده است.

7- کنترل تطبیقی مدل مرجع¹

برای پیاده‌سازی کنترل تطبیقی ضرایب انتخاب شده برای کنترل تطبیقی

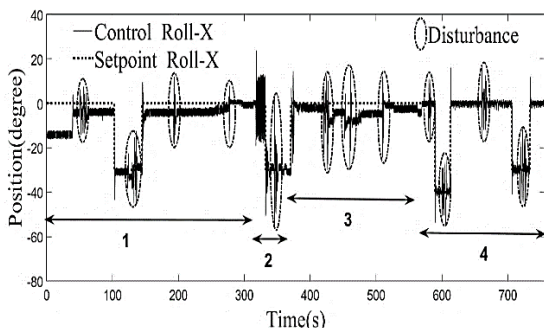


Fig. 15 PID control before adding mass (camera) in the roll axis

شکل 15 کنترل PID قبل از اضافه شدن جرم (دوربین) در راستای محور رول

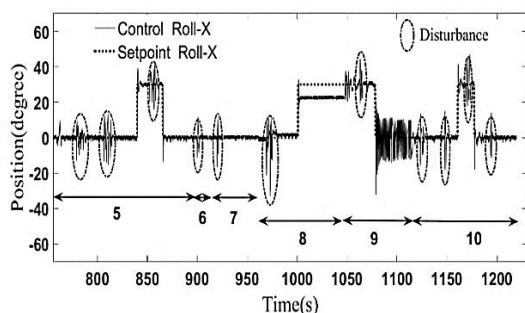


Fig. 16 PID control after adding of mass (camera) in the roll axis

شکل 16 کنترل PID بعد از اضافه شدن جرم (دوربین) در راستای محور رول

جدول 3 ضرایب استفاده شده برای کنترل PID در راستای درجه آزادی رول

Table 3 Coefficients used to control PID in the roll-DOF

N	D	I	P	Roll-X
100	0	0	1.6	1
100	0	2.88	1.44	2
100	0	0	1.44	3
100	0.144	6.4	1.92	4
100	0.144	6.4	1.92	5
100	0.144	1	1.92	6
100	0.144	0	1.92	7
1	0.144	0	1.92	8
1	0.144	6.4	1.92	9
50	0.144	6.4	1.92	10

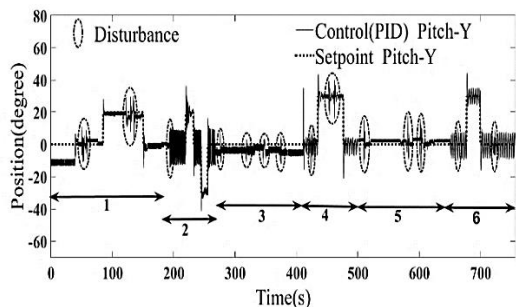


Fig. 17 PID control before adding mass (camera) in the roll axis

شکل 17 کنترل PID قبل از اضافه شدن جرم (دوربین) در راستای محور پیچ

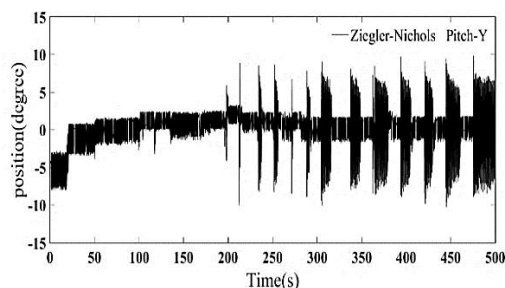


Fig. 11 Formation history based on the second method Ziegler Nichols for pitch angle

شکل 11 روند شکل‌گیری نوسان نامیرا براساس روش دوم زیگلر نیکولز در راستای زاویه پیچ

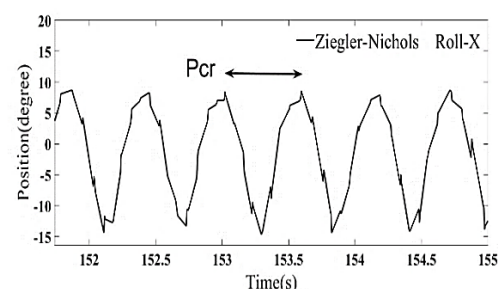


Fig. 12 The marginally stable oscillation with period P_{cr} based on the second method of Ziegler Nichols for the roll angle

شکل 12 نوسان نامیرا با زمان تناوب P_{cr} براساس روش دوم زیگلر نیکولز در راستای زاویه رول

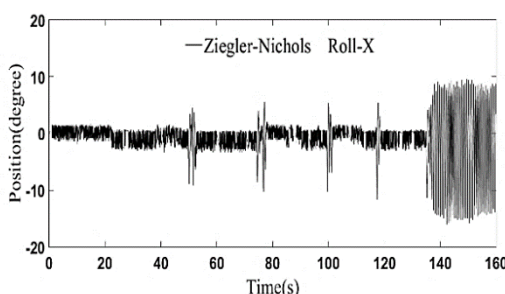


Fig. 13 Formation history based on the second method Ziegler Nichols immortal oscillation for roll angle

شکل 13 روند شکل‌گیری نوسان نامیرا براساس روش دوم زیگلر نیکولز در راستای زاویه رول

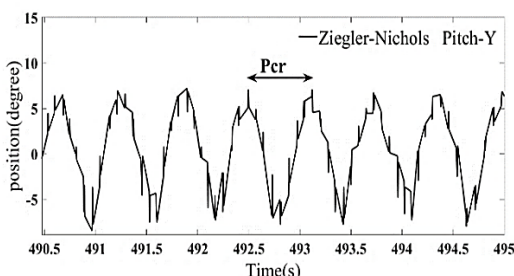


Fig. 14 The marginally stable oscillation with period P_{cr} based on the second method Ziegler Nichols for the pitch angle

شکل 14 نوسان نامیرا با زمان تناوب P_{cr} براساس روش دوم زیگلر نیکولز در راستای زاویه پیچ

شکل نشان داده شده است و بر روی نمودار شکل‌ها مشخص گردیده است.

¹ MRAC: Model Reference Adaptive Control

جدول 5 ضرایب استفاده‌شده برای کنترل PID - تطبیقی مدل مرجع در راستای

درجه آزادی رول و پیچ

Table 5 Coefficients used to control Model Reference Adaptive Control -PID in the roll and pitch-DOF

gamma= γ	N	D	I	P	
0.1	100	0.000009	0.00015	0.00025	رول
0.1	100	0.0001	0.0005	0.0015	پیچ

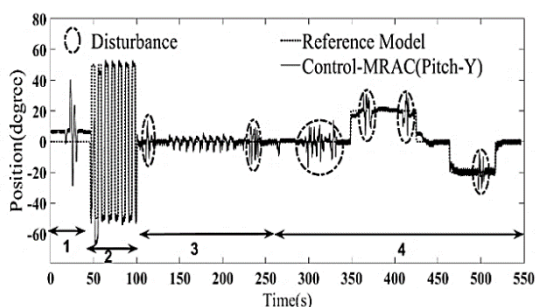


Fig. 19 Model Reference Adaptive Control -PID in the pitch axis

شکل 19 کنترل تطبیقی مدل مرجع -PID در راستای محور پیچ

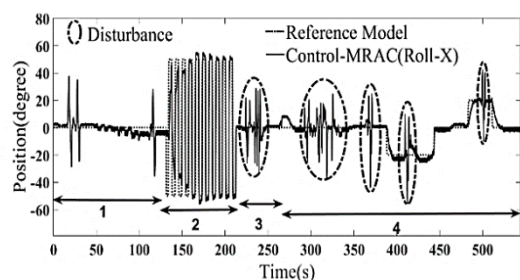


Fig. 20 Model Reference Adaptive Control -PID in the roll axis

شکل 20 کنترل تطبیقی مدل مرجع -PID در راستای محور رول

اغتشاش‌هایی همانند "شکل 20" به سیستم وارد گردید. در حالت کلی مراحل زیر انجام گرفت:

- آموزش اولیه بدون جرم به سیستم داده شد و سپس اغتشاش‌ها به سیستم وارد شد.
- دوربین به سیستم اضافه گردید و اغتشاش‌ها به سیستم وارد شد.
- با حضور دوربین آموزش دوم به سیستم داده شد و سپس اغتشاش‌ها به سیستم وارد گردید.
- دوربین برداشته شد و اغتشاش به سیستم بدون جرم وارد شد. تمامی اغتشاش وارد به گیمبال ثبت گردید و با اغتشاش‌ها وارد بر بدنه مقایسه گردید. نتایج براساس اغتشاش‌های خروجی گیمبال نسبت به اغتشاش‌های وارد بر بدنه برای چهار حالت زیر به‌صورت نمودار مشخص گردید:

- آموزش اول
- آموزش دوم
- بدون حضور دوربین
- با حضور دوربین

در این تست‌ها فرکانس طبیعی نامیرا $\omega_n = 7.74$ و نسبت میرایی $\zeta = 0.98$ برای مدل مرجع در نظر گرفته شده است و سه ضریب یادگیری برای γ در نظر گرفته شده است.

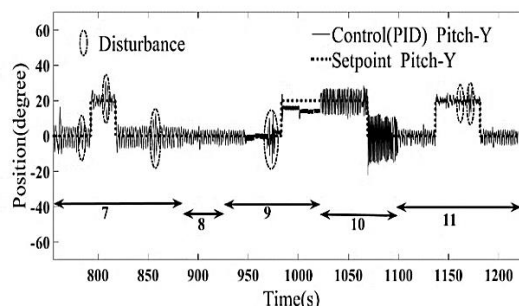


Fig. 18 PID control after adding mass (camera) in the pitch axis

شکل 18 کنترل PID بعد از اضافه شدن جرم (دوربین) در راستای محور پیچ

جدول 4 ضرایب استفاده‌شده برای کنترل PID در راستای درجه آزادی پیچ

Table 4 Coefficients used to control PID the degree of freedom in the pitch

N	D	I	P	Pitch-Y
100	0	0	2	1
100	0	3.6	1.8	2
100	0	0	1.8	3
100	0.144	6.4	1.92	4
100	0	0	1.92	5
100	0.72	8	2.4	6
100	0.72	1	2.4	7
100	0.72	0	2.4	8
1	0.72	0	2.4	9
1	0.72	8	2.4	10
50	0.72	8	2.4	11

مدل مرجع - PID مطابق جدول 5 تعیین گردید. مطابق "شکل 19"،

شماره‌های 1 تا 4 بر روی نمودار مشخص گردیده‌است، به شرح زیر است:

- بخش ابتدایی کنترل است که هنوز سیکل یادگیری بر روی سیستم انجام نگرفته است.
 - بخشی از کنترل است که به سیستم آموزش داده می‌شود، مشاهده می‌گردد سیستم در تلاش است تا خود را با مدل مرجع تطابق دهد.
 - در این قسمت نوسانات ریزی مشاهده می‌شود که به دلیل آموزش دیدن درجه رول سیستم ایجاد شده است.
 - در انتهای شماره 3 و شروع شماره 4 جرم (دوربین) به سیستم اضافه گردید.
- مطابق "شکل 20"، شماره‌های 1 تا 4 که بر روی نمودار مشخص گردیده به شرح زیر است:
- بخش ابتدایی کنترل است که هنوز سیکل یادگیری بر روی سیستم انجام نگرفته است.
 - بخشی از کنترل است که به سیستم آموزش داده می‌شود، مشاهده می‌گردد سیستم در تلاش است تا خود را با مدل مرجع تطابق دهد.
 - در انتهای شماره 3 و شروع شماره 4 جرم (دوربین) به سیستم اضافه گردید.

8- نتایج تحلیلی

برای بررسی عملکرد کنترلر تطبیقی مدل مرجع - PID در تثبیت دوربین نسبت به اغتشاش‌های وارد شده به گیمبال یک سنسور جیرو به انتهای لینک پایه ثابت (H_0) که در "شکل 2" مشخص شده به سیستم وصل شد و اغتشاش وارد شده به بدنه با عملکرد گیمبال بررسی شد.

برای بررسی عددی مقاومت کنترل تطبیقی مدل مرجع - PID به اغتشاش دو مرتبه آموزش به سیستم داده شد و پس از هر مرحله‌ای

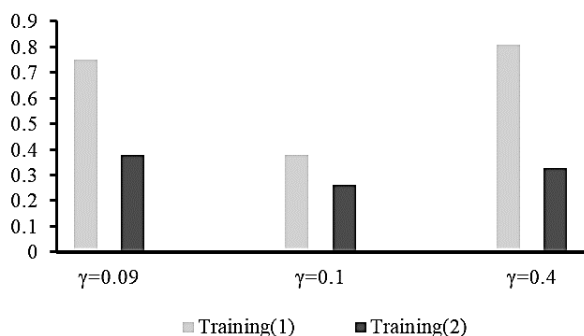


Fig. 24 Measured gimbal output relative to applied disturbance on the gimbal with three different learning coefficient and two training (1) and (2) for degree roll without the camera

شکل 24 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری شده وارد بر گیمبال با سه ضریب یادگیری متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه رول بدون دوربین

برای انتخاب بهترین حالت مدل مرجع سیستم ضرایب میرایی را به صورت سه حالت مختلف در نظر گرفتیم براساس نتایج به‌دست آمده مطابق "شکل 25" و "شکل 26" برای درجه آزادی رول $\zeta=0.98$ انتخاب گردید و مطابق "شکل 27" و "شکل 28" برای درجه آزادی پیچ $\zeta=0.98$ انتخاب شد.

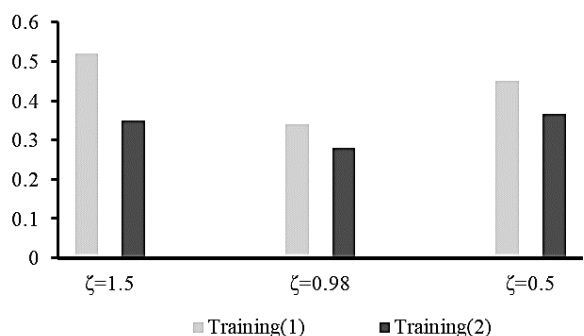


Fig. 25 Measured gimbal output relative to applied disturbance on the gimbal with three different damping coefficient and two training (1) and (2) for degree roll with the camera

شکل 25 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری شده وارد بر گیمبال با سه ضریب میرایی متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه رول با دوربین

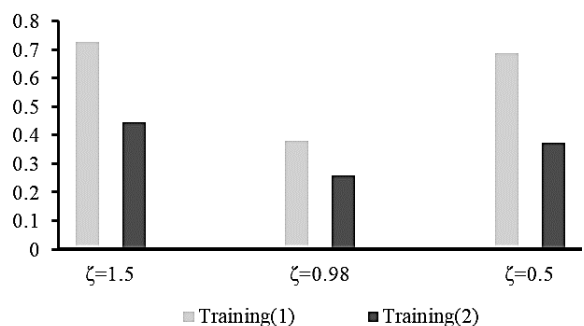


Fig. 26 Measured gimbal output relative to applied disturbance on the gimbal with three different damping coefficient and two training (1) and (2) for degree roll without the camera

شکل 26 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری شده وارد بر گیمبال با سه ضریب میرایی متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه رول بدون دوربین

براساس نتایج به‌دست آمده مطابق "شکل 21" و "شکل 22" برای درجه آزادی رول $\gamma=0.4$ انتخاب گردید و مطابق "شکل 23" و "شکل 24" برای درجه آزادی پیچ $\gamma=0.1$ انتخاب شد.

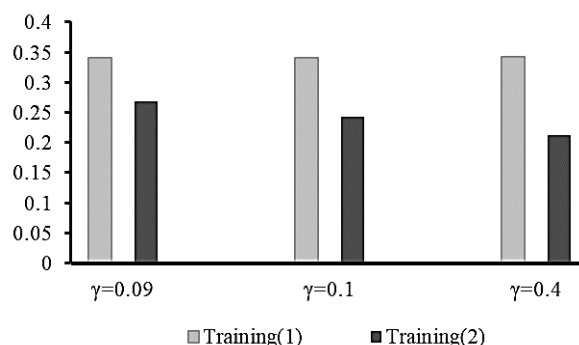


Fig. 21 Measured gimbal output relative to applied disturbance on the gimbal with three different learning coefficient and two training (1) and (2) for pitch-DOF with the camera

شکل 21 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری شده وارد بر گیمبال با سه ضریب یادگیری متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه آزادی پیچ با دوربین

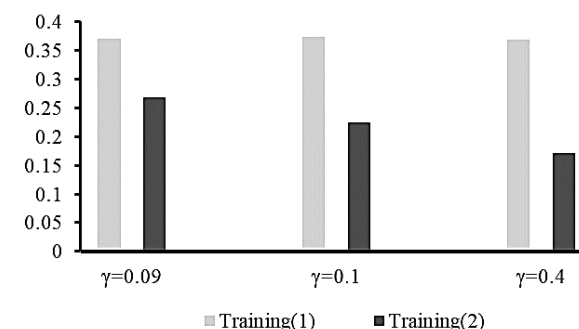


Fig. 22 Measured gimbal output relative to applied disturbance on the gimbal with three different learning coefficient and two training (1) and (2) for degree pitch without the camera

شکل 22 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری شده وارد بر گیمبال با سه ضریب یادگیری متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه پیچ بدون دوربین

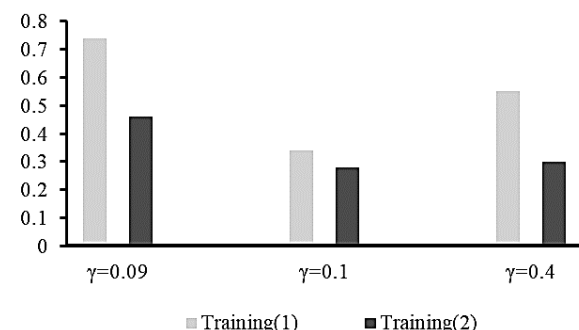


Fig. 23 Measured gimbal output relative to applied disturbance on the gimbal with three different learning coefficient and two training (1) and (2) for degree roll with the camera

شکل 23 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری شده وارد بر گیمبال با سه ضریب یادگیری متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه رول با دوربین

9- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی و ساخت گیمبال 2- درجه آزادی بررسی شد و نحوه ارتباط بین سخت‌افزار و نرم‌افزار مشخص گردید. یکی از مواردی که این مقاله سعی در مطرح کردن آن داشت پیاده‌سازی عملی به‌جای استفاده از طراحی کنترل با در نظر گرفتن دینامیک سیستم می‌باشد. در این‌جا سیستم واقعی به‌طور کامل در محیط شبیه‌سازی وارد شد و از سنسور کاملاً واقعی در راستای فیدبک‌گیری از موقعیت سیستم استفاده گردید و فرایند طراحی کنترل به‌صورت کاملاً واقعی صورت گرفت. در این راستا ابتدا مشکلات و نحوه خواندن سنسور و کالیبره کردن آن مطرح گردید سپس با استفاده از قواعد تنظیم زیگلر- نیکولس اعداد مناسب کنترل PID به‌دست آمد و پیاده‌سازی عملی کنترل صورت گرفت. در ادامه به پیاده‌سازی کنترل PID - تطبیقی مدل مرجع (MRAC) به صورت عملی بر روی سیستم واقعی پرداخته شد و نحوه آموزش به سیستم و عملکرد سیستم در تطبیق خود با مدل مرجع در عمل بررسی گردید. در نهایت برای بهینه‌سازی عملکرد کنترل تطبیقی نسبت به اغتشاش‌ها ابتدا با در نظر گرفتن مدل مرجع یکسان روند مدنظر گرفته برای انتخاب ضریب یادگیری بهینه در بخش اول نتایج تحلیلی بررسی گردید سپس با ثابت کردن قسمت تطبیق به انتخاب بهینه‌ترین ضریب یادگیری برای مدل مرجع، سه حالت برای آن در نظر گرفته شد که در بخش دوم نتایج تحلیلی بررسی گردید و بهینه‌ترین حالت انتخاب شد.

10- مراجع

- [1] P. Wongkamchang, V. Sangveraphunsiri, Control of inertial stabilization systems using robust inverse dynamics control and adaptive control, *TIJSAT*, Vol. 13, No 2, pp. 20-32, 2008.
- [2] N. J. Brake, *Control System Development For Small Uav Gimbal*, PhD Thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2012.
- [3] H. P. Lee, I. E. Yoo, Robust control design for a two-axis gimbaled stabilization system, *Aerospace Conference*, IEEE, Vol. 64, No 2, pp. 1-7, 2008.
- [4] L. HSU, P. L. S. Aquino, Adaptive visual tracking with uncertain manipulator dynamics and uncalibrated camera, *Conference on Decision & Control Phoenix*, IEEE, 7-10 Dec. 1999.
- [5] Z. K. Hurák, M. Rezac, Image-based pointing and tracking for inertially stabilized airborne camera platform, *IEEE Transactions on Control Systems*, Vol. 20, No. 5, 2012.
- [6] H. J. Chang, P. J. Kim, D. S. Song, J. Y. Choi, Optical image stabilizing system using multirate fuzzy PID controller for mobile device camera, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, IEEE, Vol. 55, No. 2, pp. 303-311, 2009.
- [7] K. Malithong, V. Sangveraphunsiri, Robust inverse dynamics and sliding mode control for inertial stabilization systems, *AJSTPME*, Vol. 2, No. 4, pp.33-45, 2010.
- [8] J. Johansson, Modelling and Control of an Advanced Camera Gimbal, *IEEE Transactions on Control Systems*, Vol. 21, No. 2, 2012.
- [9] S. Li, M. Zhong, High-precision disturbance compensation for a three-axis gyro-stabilized camera mount, *IEEE/ASME, Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 6, pp.3135- 3147, 2015.
- [10] P. Skoglar, Modelling and control of IR/EO-gimbal for UAV surveillance applications, *IEEE/ASME, Transactions on Aerospace*, Vol. 15, No. 2, pp.31-47, 2002.
- [11] P. Ioannou, J. Sun, *Robust Adaptive Control*. Second Edition, pp. 315-330, Prentice Hall, 2012.
- [12] K. Ogata, Y. Yang, *Modern control engineering*. Sixd Edition, pp. 415-430, Prentice Hall, 2005.

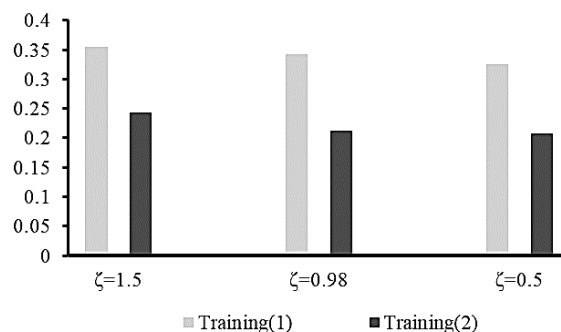


Fig. 27 Measured gimbal output relative to applied disturbance on the gimbal with three different damping coefficient and two training (1) and (2) for degree roll with the camera

شکل 27 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری‌شده وارد بر گیمبال با سه ضریب میرایی متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه پیچ با دوربین

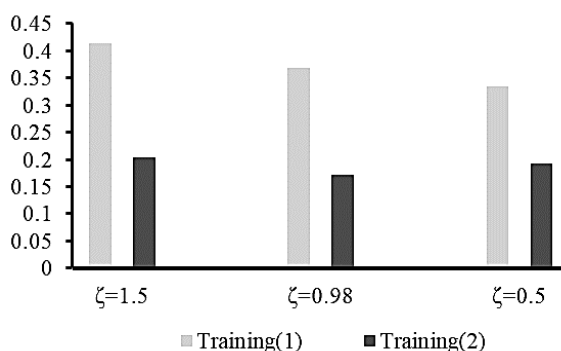


Fig. 28 Gimbal output disturbance than disturbance measured on the gimbal with three different damping coefficient and two training (1) and (2) for degree pitch without the camera

شکل 28 نسبت اغتشاش خروجی گیمبال به اغتشاش اندازه‌گیری‌شده وارد بر گیمبال با سه ضریب میرایی متفاوت و انجام دو آموزش (1) و (2) برای درجه پیچ بدون دوربین

در انتها فیلم‌هایی از پیاده‌سازی عملی مقاله ارائه می‌شود:

الف- پیاده‌سازی روش MRAC

<https://drive.google.com/file/d/0B6igBODAFzaEZGZweXAYY1BXNlk/view?usp=sharing>

ب- پیاده‌سازی روش PID

<https://drive.google.com/file/d/0B6igBODAFzaEWBTBGU3pEbFg1eWM/view?usp=sharing>

الف- پیاده‌سازی روش زیگلر- نیکولس

<https://drive.google.com/file/d/0B6igBODAFzaEQWdZSWFKMzFIdEU/view?usp=sharing>