



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا

پروژه کارشناسی  
مهندسی کنترل

عنوان:

# کنترل وضعیت سه درجه آزادی استند چهارپره به روش کنترل‌کننده مربعی خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی

نگارش:

علی بنی اسد

استاد راهنما:

دکتر نوبهاری

شهریور ۱۴۰۰

صلى الله عليه وسلم

## سپاس

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر نوبهاری که با کمک‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغشان، بنده را در انجام این پروژه یاری داده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

## چکیده

در این پژوهش از یک روش مبتنی بر تئوری بازی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این روش سیستم و اغتشاش دو بازیکن اصلی در نظر گرفته شده است. هر یک از دو بازیکن سعی می‌کنند امتیاز خود را با کمترین هزینه افزایش دهند که در اینجا، وضعیت استند امتیاز بازیکن‌ها در نظر گرفته شده است. در این روش انتخاب حرکت با استفاده از تعادل نش<sup>۲</sup> که هدف آن کم کردن تابع هزینه با فرض بدترین حرکت دیگر بازیکن است، انجام می‌شود. این روش نسبت به اغتشاش خارجی و نویز سنسور مقاوم است. همچنین نسبت به عدم قطعیت مدل‌سازی نیز از مقاومت مناسبی برخوردار است. از روش ارائه شده برای کنترل یک استند سه درجه آزادی چهارپره که به نوعی یک آونگ معکوس نیز هست، استفاده شده است. عملکرد این روش با اجرای شبیه‌سازی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. همچنین، عملکرد آن در حضور نویز و اغتشاش و عدم قطعیت مدل از طریق شبیه‌سازی ارزیابی خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** چهارپره، بازی دیفرانسیلی، تئوری بازی، تعادل نش، استند سه درجه آزادی، شبیه‌سازی، تابع هزینه

---

<sup>1</sup>Game Theory

<sup>2</sup>Nash Equilibrium

## فهرست مطالب

۱-۰-۰	شبيه‌سازى كانال رول استند در حضور كنترل‌كننده LQR	۲
۲-۰-۰	شبيه‌سازى كانال رول استند در حضور كنترل‌كننده LQDG	۳
۳-۰-۰	شبيه‌سازى كانال رول استند در حضور كنترل‌كننده LQIDG	۴
۴-۰-۰	شبيه‌سازى كانال رول-پيچ استند در حضور كنترل‌كننده LQIDG	۵
۵-۰-۰	شبيه‌سازى سه درجه آزادى استند در حضور كنترل‌كننده LQIDG	۹
۱-۰	پياده‌سازى كنترل‌كننده بر رويه استند سه درجه آزادى	۱۴
۱-۱-۰	پياده‌سازى كنترل‌كننده LQR بر رويه كانال پيچ	۱۵
۲-۱-۰	شبيه‌سازى كانال رول استند در حضور كنترل‌كننده LQDG	۱۷

## فهرست شکل‌ها

۱	عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۲
۲	عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۳
۳	عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۴
۴	تغییرات زاویه رول . . . . .	۶
۵	تغییرات زاویه پیچ . . . . .	۶
۶	عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۶
۷	موتور شماره یک . . . . .	۷
۸	موتور شماره دو . . . . .	۷
۹	فرمان کنترل‌کننده موتور یک و دو در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۷
۱۰	موتور شماره سه . . . . .	۸
۱۱	موتور شماره چهار . . . . .	۸
۱۲	فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۸
۱۸	عملکرد LQIDG در کنترل زاویه یاو (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۹
۱۳	تغییرات زاویه رول . . . . .	۱۰
۱۴	تغییرات زاویه پیچ . . . . .	۱۰
۱۵	عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاد (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۱۰
۱۶	تغییرات زاویه یاو . . . . .	۱۱

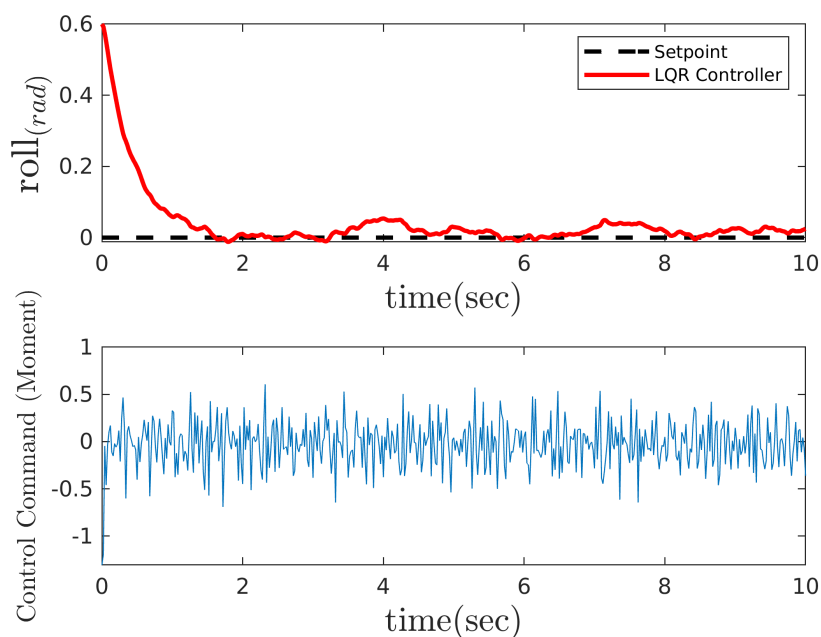
۱۷	عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاد (تعقیب ورودی صفر) . .	۱۱
۱۹	موتور شماره یک . . . . .	۱۲
۲۰	موتور شماره دو . . . . .	۱۲
۲۱	فرمان کنترل‌کننده موتور یک و دو در کنترل زاویه رول، پیچ و یاد (تعقیب ورودی صفر)	۱۲
۲۲	موتور شماره سه . . . . .	۱۳
۲۳	موتور شماره چهار . . . . .	۱۳
۲۴	فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول، پیچ و یاد (تعقیب ورودی صفر)	۱۳
۲۵	عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۱۵
۲۶	موتور شماره یک . . . . .	۱۶
۲۷	موتور شماره سه . . . . .	۱۶
۲۸	فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) . .	۱۶
۲۹	عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) . . . . .	۱۷
۳۰	موتور شماره یک . . . . .	۱۷
۳۱	موتور شماره سه . . . . .	۱۷
۳۲	فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) . .	۱۷

## فهرست جدول‌ها



## ۱-۰-۰ شبیه‌سازی کانال رول استند در حضور کنترل‌کننده LQR

در بخش ؟؟ شبیه‌سازی کانال رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱] استفاده شده است.

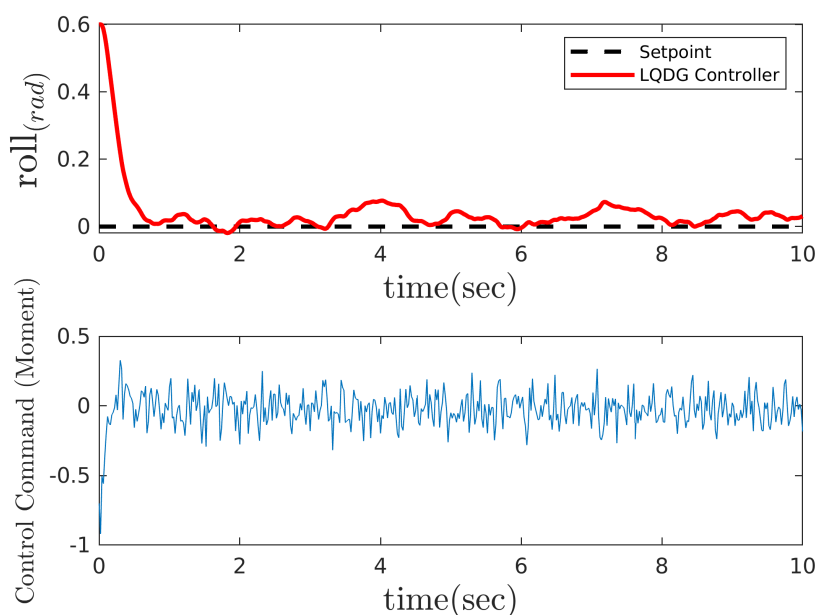


شکل ۱: عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۰-۱)، کانال رول در حضور کنترل‌کننده LQR در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است.

## ۲-۰-۰ شبیه‌سازی کانال رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG

در بخش ۱-۰-۰ شبیه‌سازی کانال رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش‌های ۱-۰-۱ و ۱-۰-۲ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱] استفاده شده است.

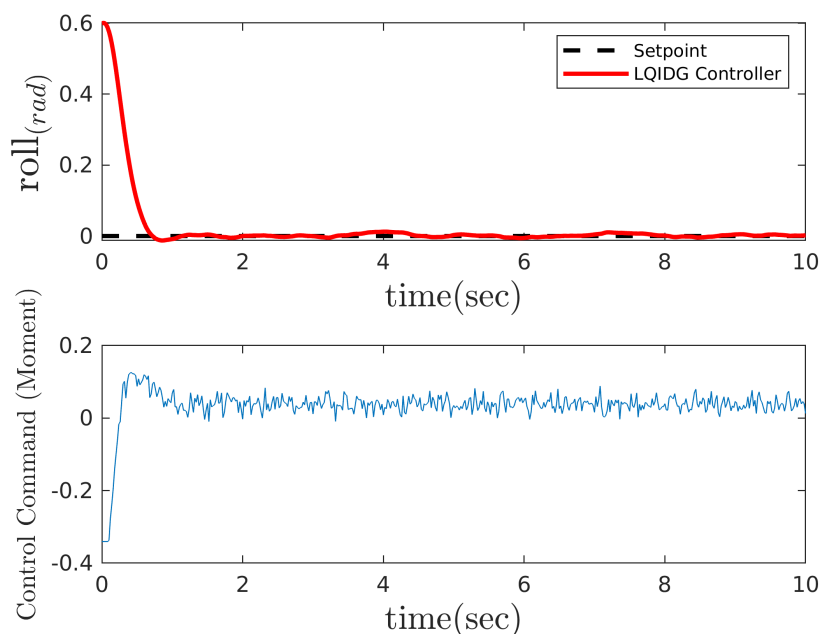


شکل ۲: عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۲-۰-۰)، کانال رول در حضور کنترل‌کننده LQDG در کمتر از پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است ولی خطای مانگار آن نسبت به کنترل‌کننده بخش ۱-۰-۰ کمتر است. به دلیل خطای ماندگار، در بخش انتگرال‌گیر به کنترل‌کننده اضافه می‌شود تا خطای مانگار استند را کم کند.

### ۳-۰-۰ شبیه‌سازی کانال رول استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۲-۰-۰ شبیه‌سازی کانال رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش‌های ۲-۰-۰ و ۲-۰-۱ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱] استفاده شده است.



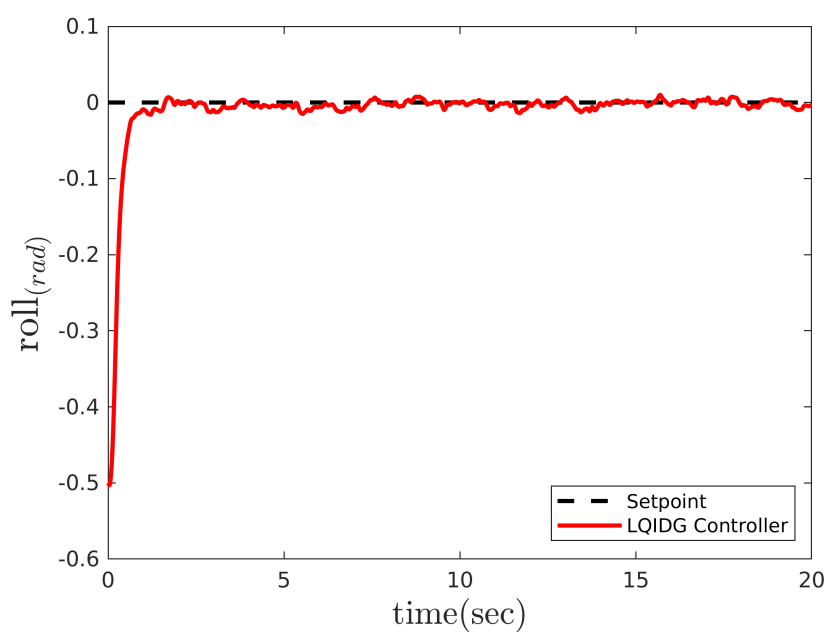
شکل ۳: عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۳-۰-۰)، کانال رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

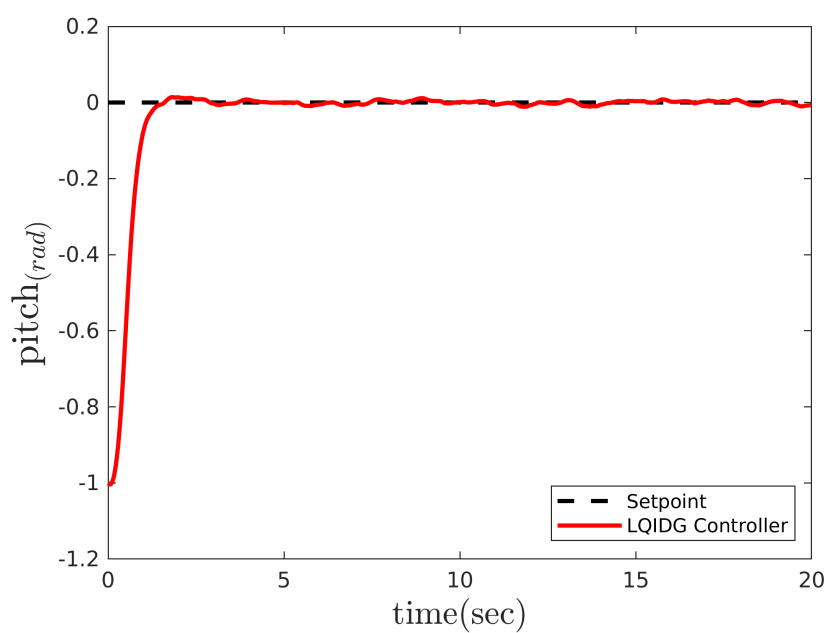
## ۴-۰-۰ شبیه‌سازی کانال رول-پیچ استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ؟؟ شبیه‌سازی کانال رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش‌های ؟؟ و ؟؟ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱] استفاده شده است.

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۳-۰-۰)، کانال رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه و کانال پیچ در حدود هشت ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

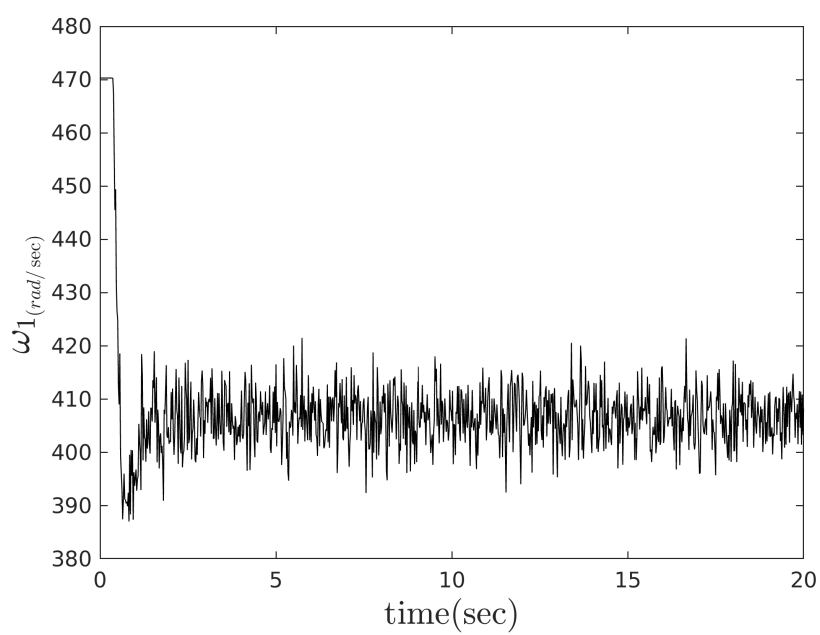


شکل ۴: تغییرات زاویه رول

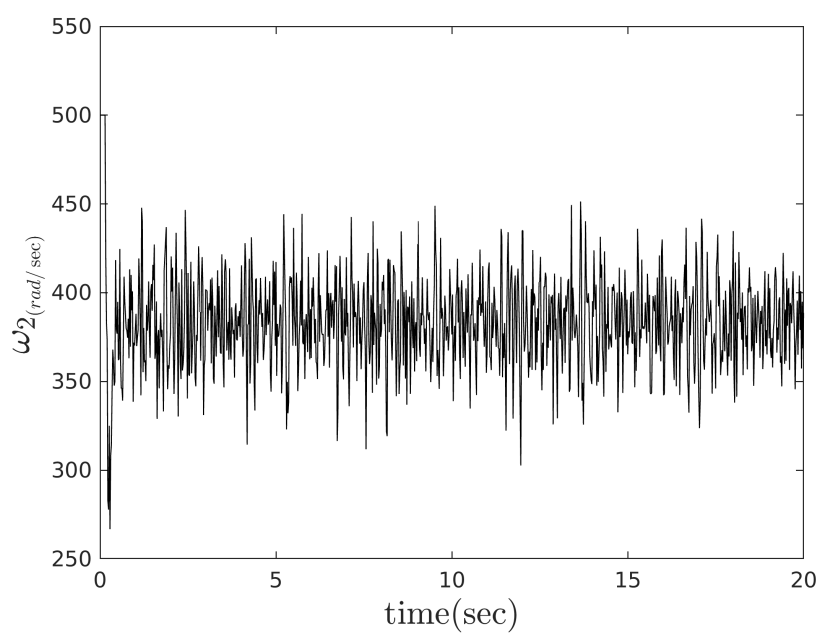


شکل ۵: تغییرات زاویه پیچ

شکل ۶: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

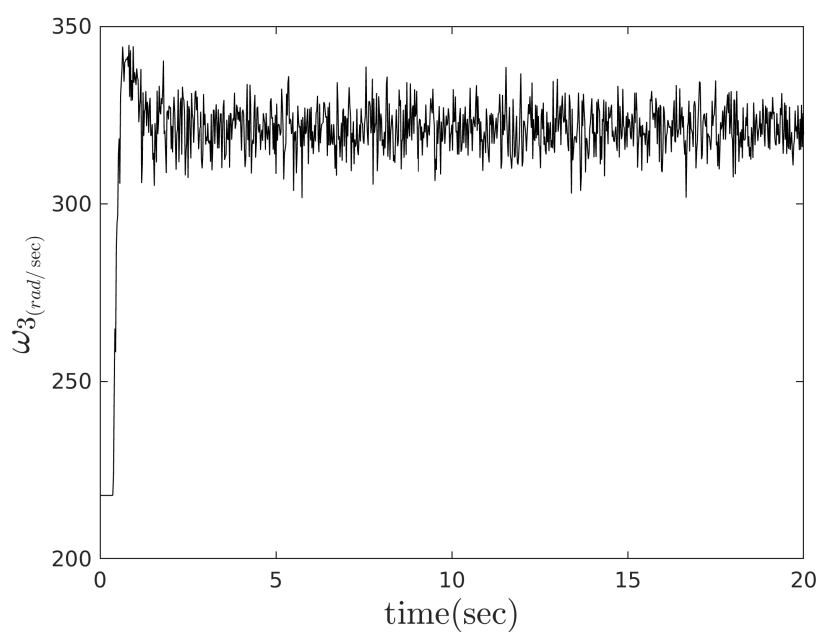


شکل ۷: موتور شماره یک

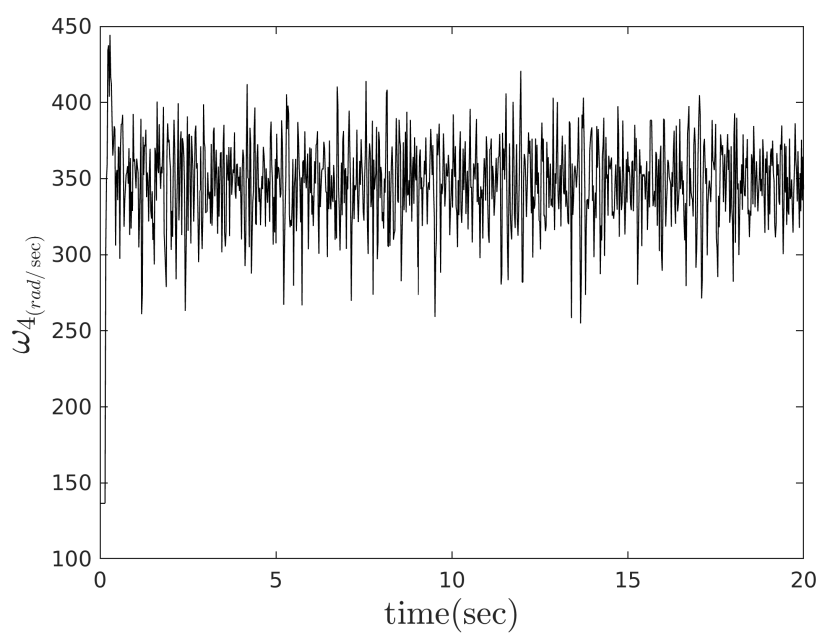


شکل ۸: موتور شماره دو

شکل ۹: فرمان کنترل‌کننده موتور یک و دو در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



شکل ۱۰: موتور شماره سه

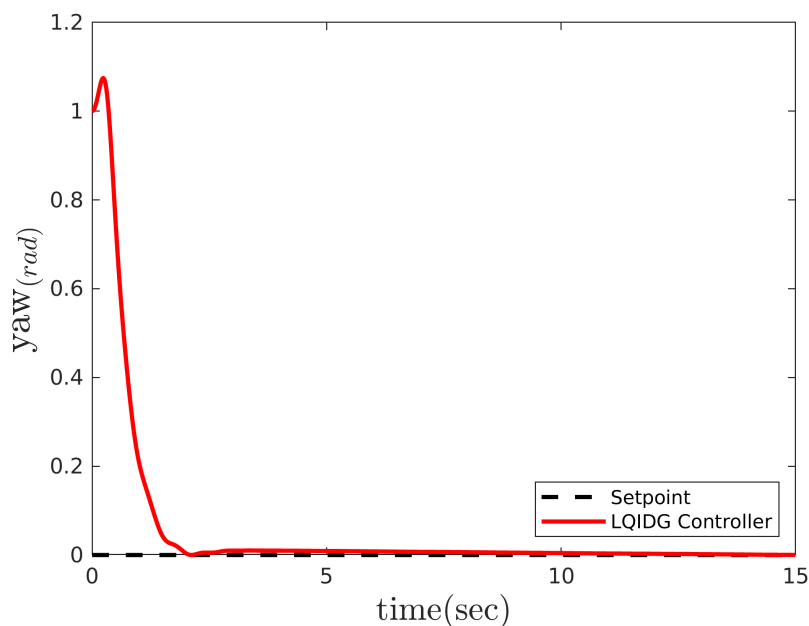


شکل ۱۱: موتور شماره چهار

شکل ۱۲: فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

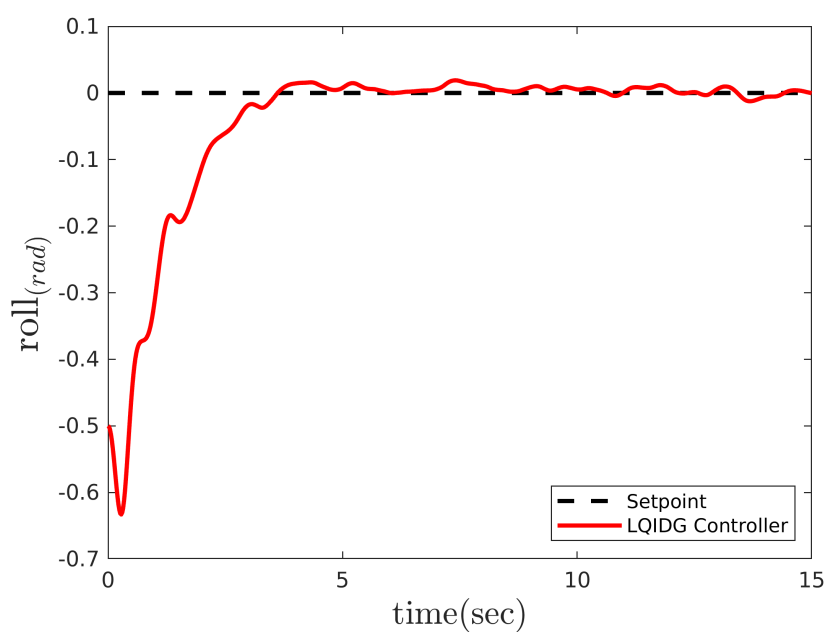
## ۵-۰-۰ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ؟؟ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش‌های ؟؟ و ؟؟ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱] استفاده شده است.

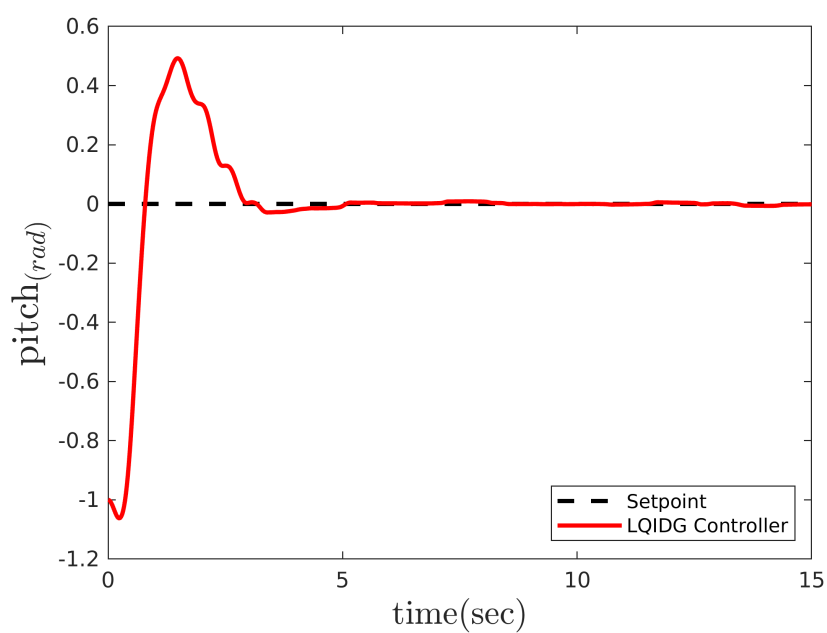


شکل ۱۸: عملکرد LQIDG در کنترل زاویه یاو (تعقیب ورودی صفر)



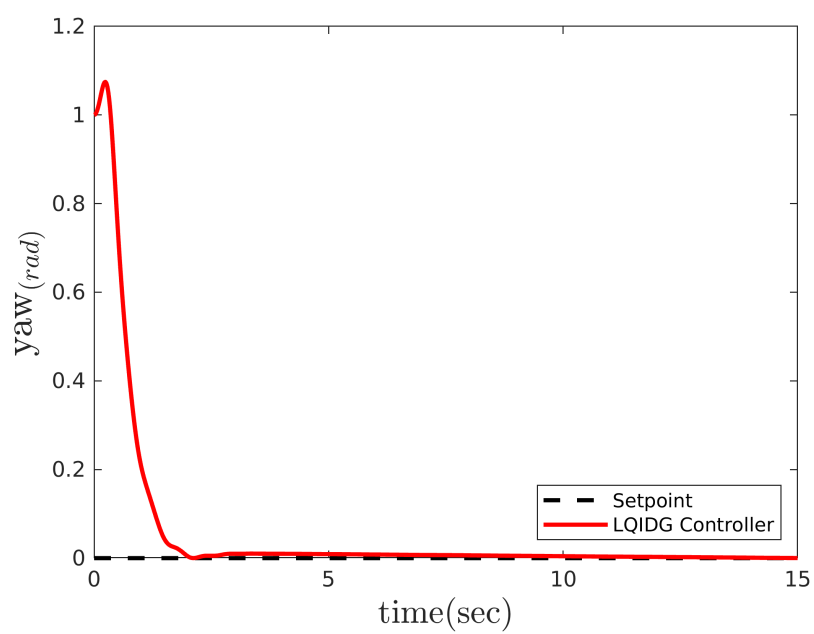


شکل ۱۳: تغییرات زاویه رول



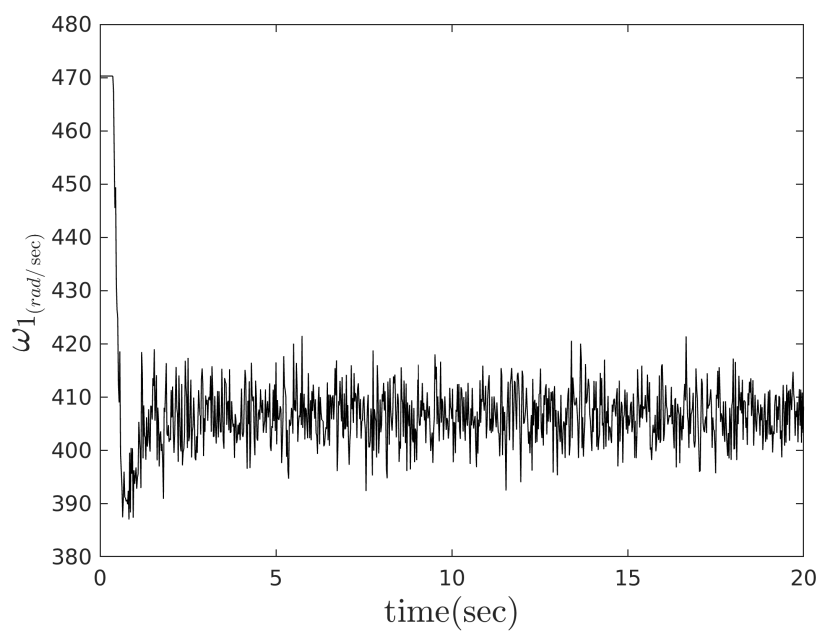
شکل ۱۴: تغییرات زاویه پیچ

شکل ۱۵: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاد (تعقیب ورودی صفر)

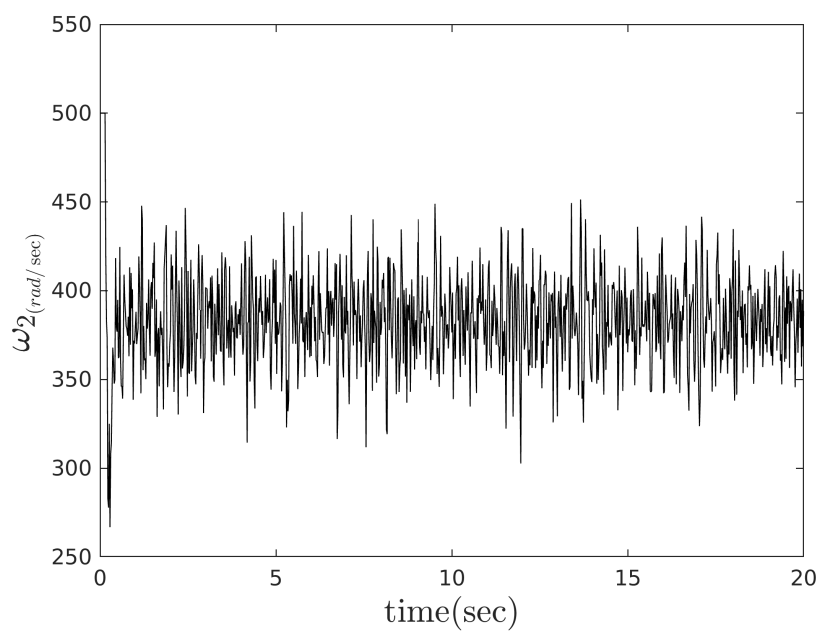


شکل ۱۶: تغییرات زاویه یاو

شکل ۱۷: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاد (تعقیب ورودی صفر)

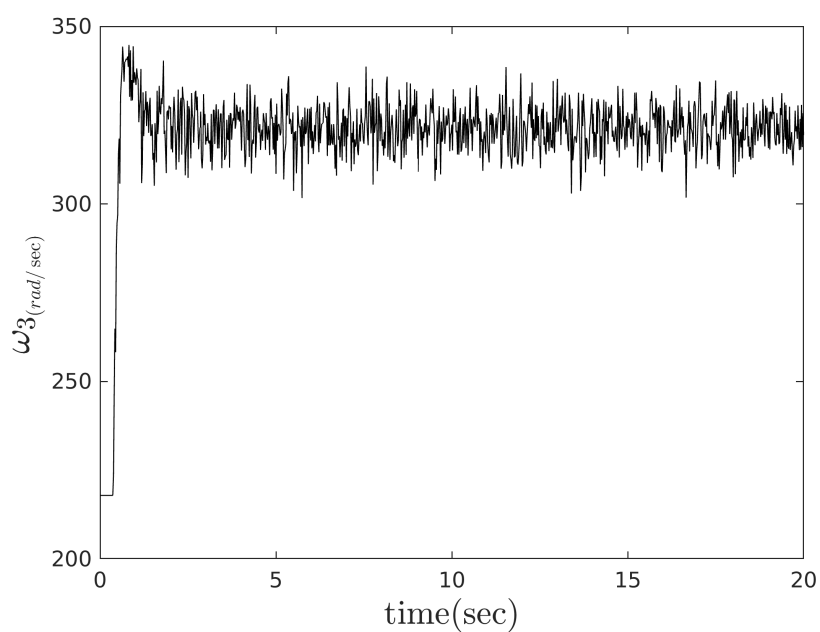


شکل ۱۹: موتور شماره یک

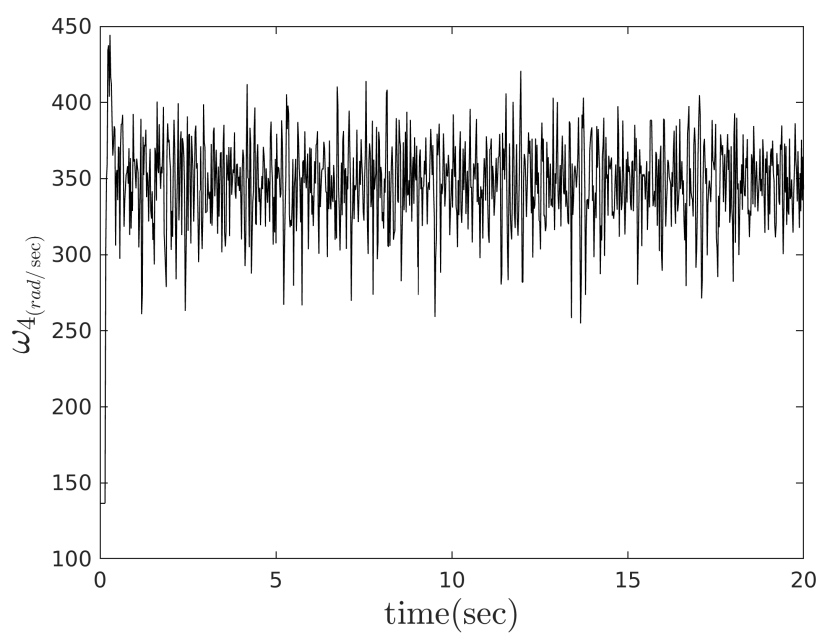


شکل ۲۰: موتور شماره دو

شکل ۲۱: فرمان کنترل‌کننده موتور یک و دو در کنترل زاویه رول، پیچ و یاد (تعقیب ورودی صفر)



شکل ۲۲: موتور شماره سه



شکل ۲۳: موتور شماره چهار

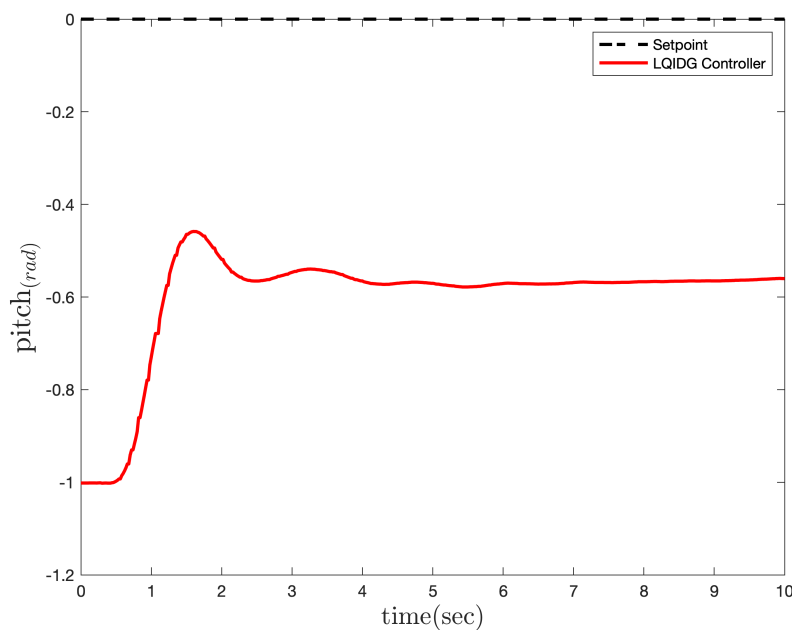
شکل ۲۴: فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)

## ۱-۰ پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر رویه استند سه درجه آزادی

؟؟ و ؟؟ کنترل‌کننده خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی در حالت حلقه‌باز و حلقه‌بسته معرفی شد. در بخش ۱-۰-۰ ابتدا کنترل‌کننده LQR و سپس کنترل‌کننده‌های LQDG و LQIDG در بخش‌های ۱-۰-۱، ۱-۰-۲، ۱-۰-۳، ۱-۰-۴ و ۱-۰-۵ شبیه‌سازی شدند. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQR و سپس کنترل‌کننده‌های LQDG و LQIDG پرداخته خواهد شد.

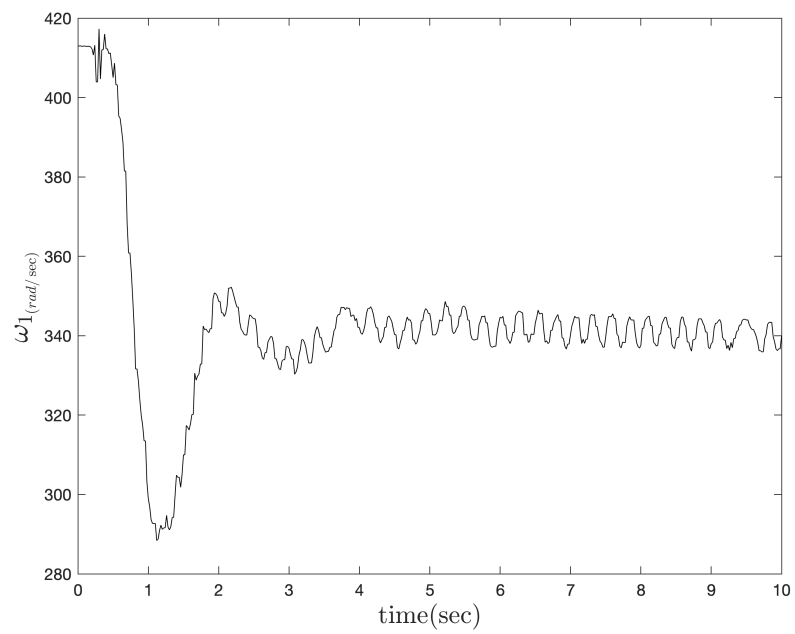
## ۱-۱-۰ پیاده‌سازی کنترل کننده LQR بر رویه کانال پیچ

در بخش ؟؟ شبیه‌سازی کانال رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل کننده LQR پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱] استفاده شده است.

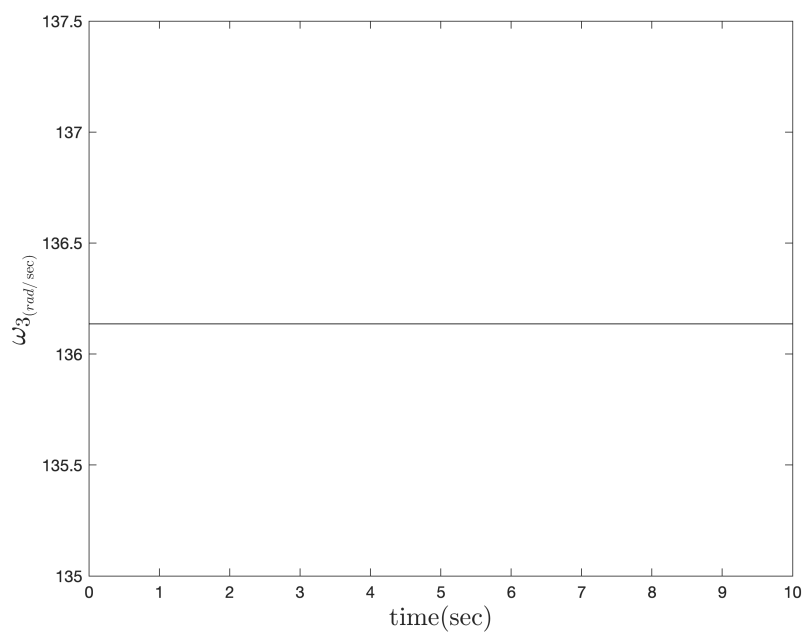


شکل ۲۵: عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۱-۰)، کانال رول در حضور کنترل کننده LQR در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است.



شکل ۲۶: موتور شماره یک

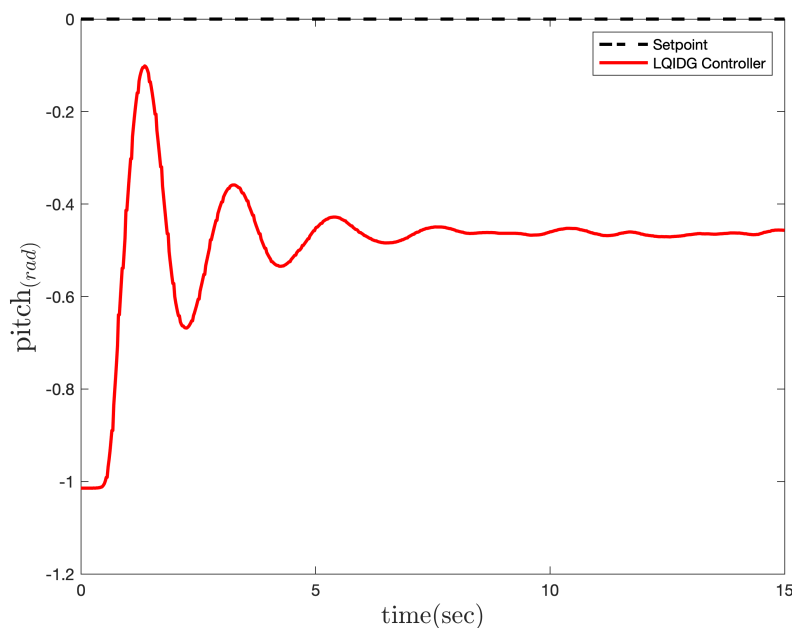


شکل ۲۷: موتور شماره سه

شکل ۲۸: فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

## ۲-۱-۰ شبیه‌سازی کانال رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG

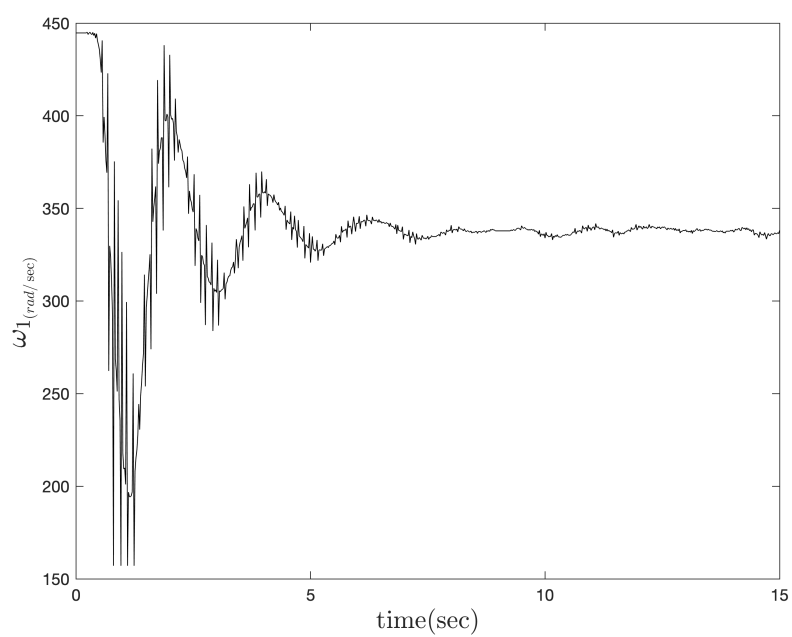
در بخش شبیه‌سازی کانال رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش‌های ?? و ?? بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش TCACS [۱] استفاده شده است.



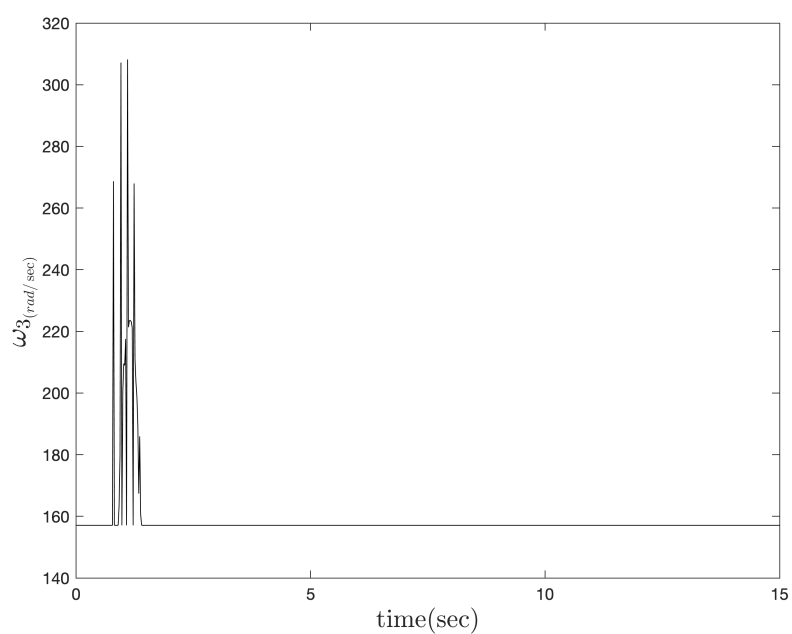
شکل ۲۹: عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۲-۰-۰)، کانال رول در حضور کنترل‌کننده LQDG در کمتر از پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است ولی خطای ماندگار آن نسبت به کنترل‌کننده بخش ۱-۰-۰ کمتر است. به دلیل خطای ماندگار، در بخش انتگرال‌گیر به کنترل‌کننده اضافه می‌شود تا خطای ماندگار استند را کم کند.





شکل ۳۰: موتور شماره یک



شکل ۳۱: موتور شماره سه

شکل ۳۲: فرمان کنترل‌کننده موتور سه و چهار در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

## مراجع

- [1] A. Karimi, H. Nobahari, and P. Siarry. Continuous ant colony system and tabu search algorithms hybridized for global minimization of continuous multi-minima functions. *Computational Optimization and Applications*, 45(3):639–661, Apr 2010.



Sharif University of Technology  
Department of Aerospace Engineering

Bachelor Thesis

# **LQDG Controller for 3DOF Quadcopter Stand**

By:

**Ali BaniAsad**

Supervisor:

**Dr. Nobahari**

August 2021