



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی هوافضا

پروژه کارشناسی
مهندسی کنترل

عنوان:

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

نگارش:

علی بنی اسد

استاد راهنما:

دکتر نوبهاری

۱۴۰۱ تیر

اللهُ أَكْبَرُ

سپاس

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

چکیده

در این پژوهش از یک روش مبتنی بر تئوری بازی^۱ استفاده شده است. در این روش سیستم و اغتشاش دو بازیکن اصلی در نظر گرفته شده است. هر یک از دو بازیکن سعی می کنند امتیاز خود را با کمترین هزینه افزایش دهند که در اینجا، وضعیت استند امتیاز بازیکن ها در نظر گرفته شده است. در این روش انتخاب حرکت با استفاده از تعادل نش^۲ که هدف آن کم کردن تابع هزینه با فرض بدترین حرکت دیگر بازیکن است، انجام می شود. این روش نسبت به اغتشاش ورودی مقاوم است. همچنین نسبت به عدم قطعیت مدلسازی مقاومت مناسبی دارد. از روش ارائه شده برای کنترل یک استند سه درجه آزادی چهارپره که به نوعی یک آونگ معکوس نیز هست، استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد این روش ابتدا شبیه سازی هایی در محیط سیمولینک انجام شده است و سپس، با پیاده سازی آن صحت عملکرد آن تایید شده است.

کلیدواژه‌ها: چهارپره، بازی دیفرانسیلی، تئوری بازی، تعادل نش، استند سه درجه آزادی، مدل مبنا، تنظیم کننده مربعی خطی

¹Game Theory

²Nash Equilibrium

فهرست مطالب

۱	شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در حضور کنترل‌کننده	۲
۱-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند سه درجه آزادی در حضور کنترل‌کننده LQR	۲
۲-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG	۳
۳-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG	۴
۴-۱	شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG	۵
۵-۱	شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG	۷
۱-۵-۱	شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کanal تک ورودی	۷
۲-۵-۱	شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی	۱۰
۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر رویه استند سه درجه آزادی	۱۲
۱-۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQR بر رویه کanal پیچ استند	۱۲
۲-۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQDG بر رویه کanal پیچ	۱۳
۳-۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه کanal پیچ	۱۴
۴-۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQDG بر رویه کanal رول-پیچ	۱۵
۵-۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه استند سه درجه آزادی	۱۷
۱-۵-۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کanal تک ورودی	۱۷
۲-۵-۲	پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی	۲۰

فهرست شکل‌ها

۱-۱	عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۳
۲-۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۳
۳-۱	عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۴
۴-۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۴
۵-۱	عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۵
۶-۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)	۵
۷-۱	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۶
۸-۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۶
۹-۱	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۸
۱۰-۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۹
۱۱-۱	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۱۰
۱۲-۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۱۱
۱-۲	عملکرد LQR در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۱۳
۲-۲	فرمان کنترلی موتورهای دو چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۱۳
۳-۲	عملکرد LQDG در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۱۴
۴-۲	فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۱۴

۱۵	۵-۲ عملکرد LQIDG در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۱۵	۶-۲ فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۱۶	۷-۲ عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۱۶	۸-۲ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۱۸	۹-۲ عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۱۹	۱۰-۲ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)
۲۰	۱۱-۲ عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)
۲۱	۱۲-۲ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

فهرست جداول‌ها

فصل ۱

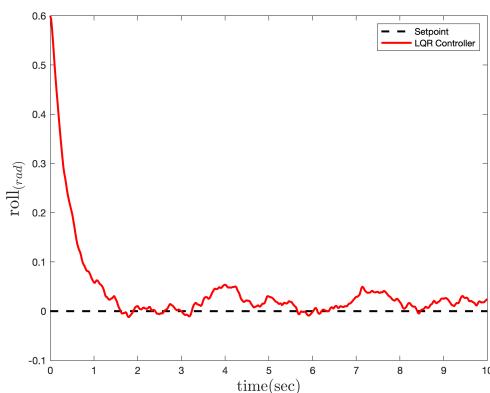
شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در حضور کنترل کننده

در بخش‌های ۱-۱ و ۲-۱ کنترل کننده خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی LQIDG و LQDG معرفی شد. در بخش‌های ۳-۱، ۴-۱ و ۵-۱ کانال رول چهارپره در حضور کنترل کننده‌های LQDG و LQR شبیه‌سازی می‌شود. سپس، در بخش‌های ۱-۱، ۲-۱ و ۳-۱ به ترتیب شبیه‌سازی یک درجه آزادی، دو درجه آزادی و سه درجه آزادی در حضور کنترل کننده LQIDG انجام می‌شود.

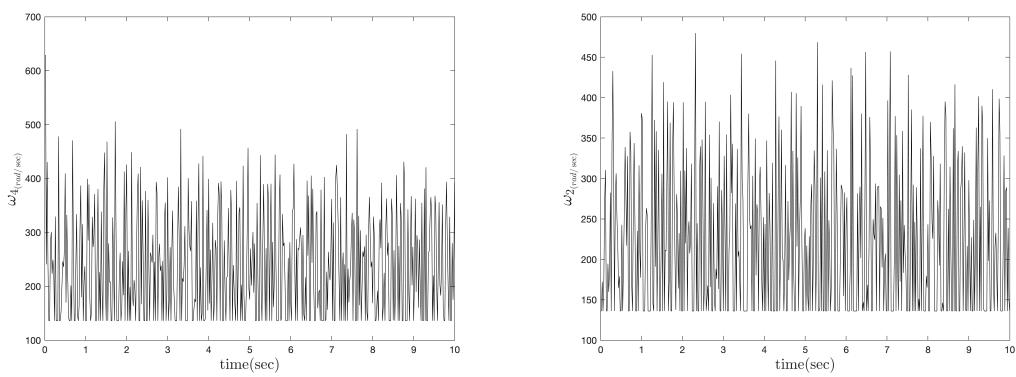
۱-۱ شبیه‌سازی کانال رول استند سه درجه آزادی در حضور کنترل کننده

LQR

در بخش ۱-۱ 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 LQR از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.



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



(ب) موتور شماره چهار

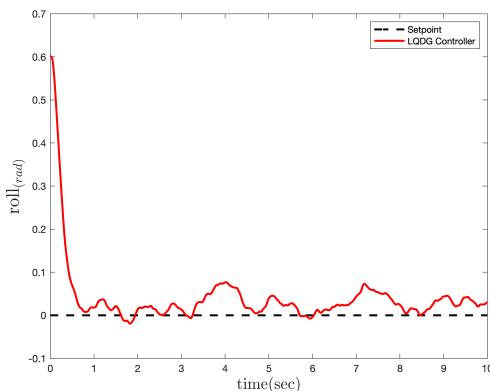
(ا) موتور شماره دو

شکل ۲-۱: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

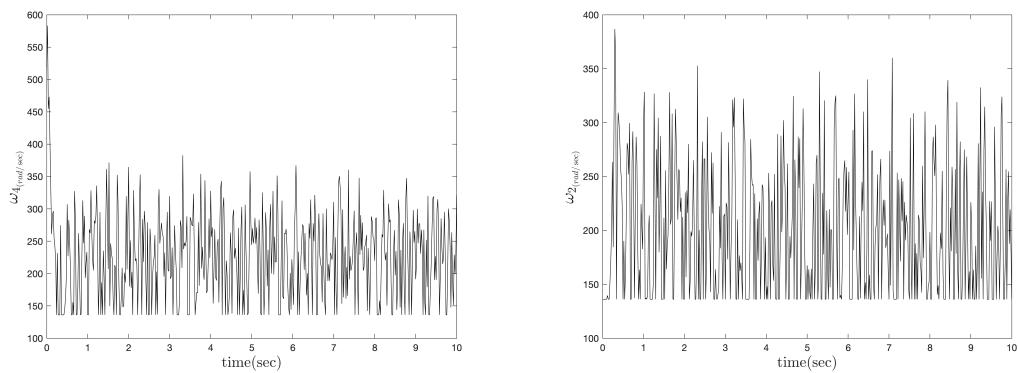
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۱)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQR در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است.

۲-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG

در بخش ۲-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش ۲-۱ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱-۳: عملکرد LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره چهار

(ا) موتور شماره دو

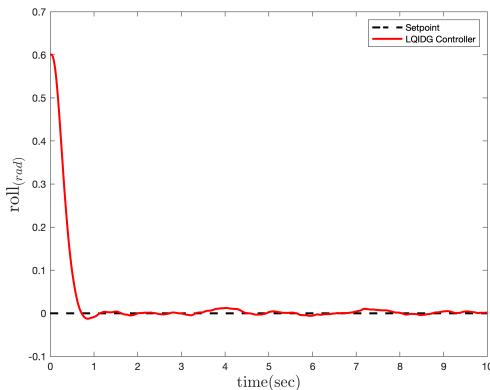
شکل ۱-۴: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۳)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQDG در کمتر از پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای مانگار است ولی خطای مانگار آن نسبت به کنترل‌کننده LQR بخش ۱-۱ کمتر است. به دلیل خطای مانگار، در بخش ۱-۳ انتگرال‌گیر به کنترل‌کننده اضافه می‌شود تا خطای مانگار استند را کم کند.

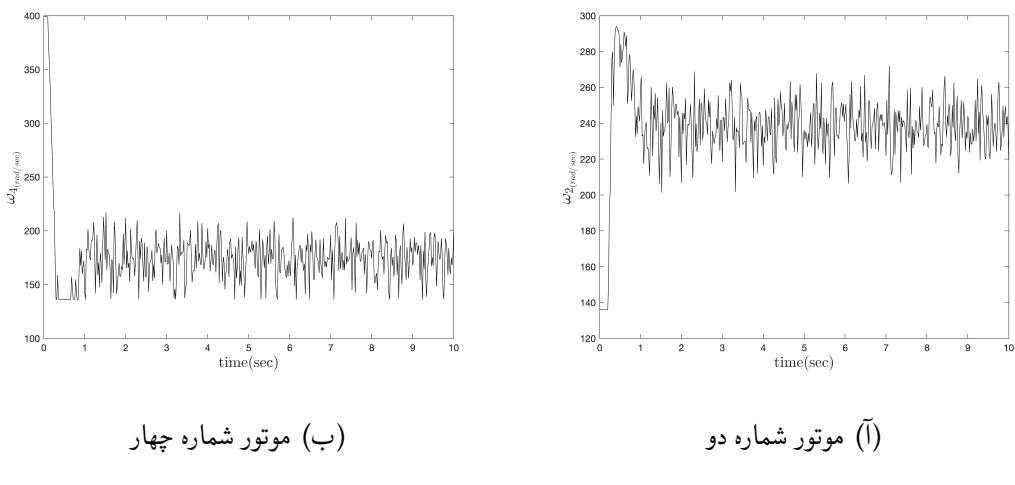
۱-۳ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۱-۳ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ۱-۳ بررسی شده است. در

شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.



شکل ۱-۵: عملکرد LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

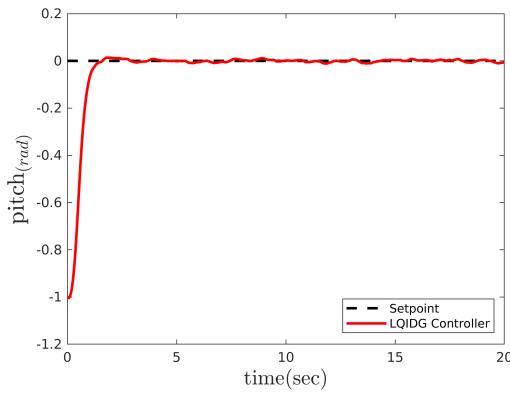


شکل ۱-۶: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

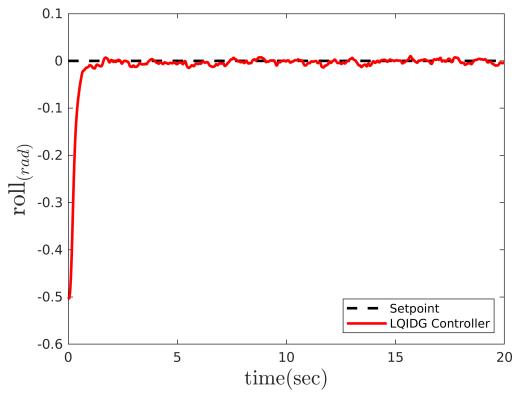
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۵)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن به دلیل وجود انگرال‌گیر در حدود صفر است.

۴-۱ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۴-۲ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ۴-۲ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.

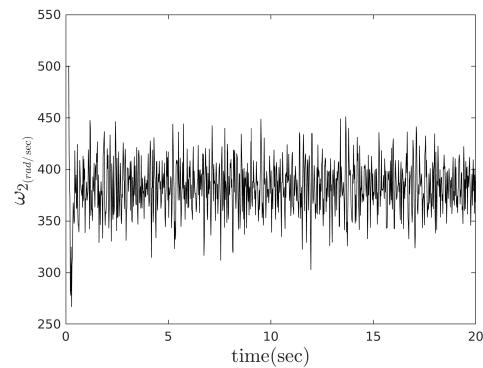


(ب) تغییرات زاویه پیچ

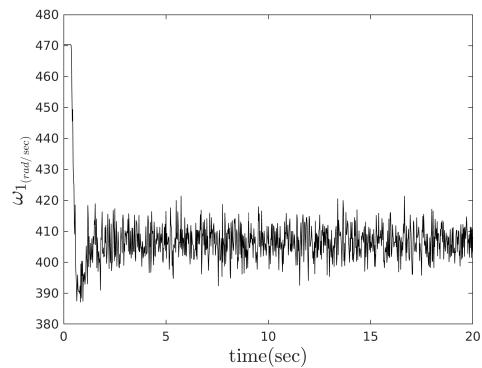


(ا) تغییرات زاویه رول

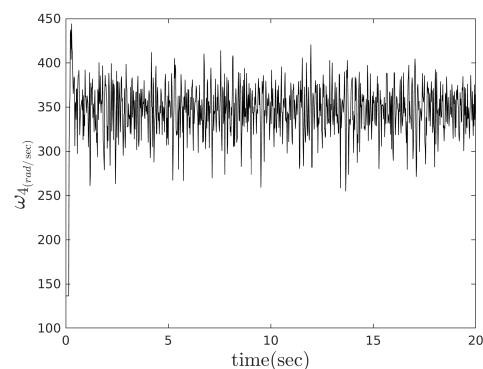
شکل ۱-۷: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



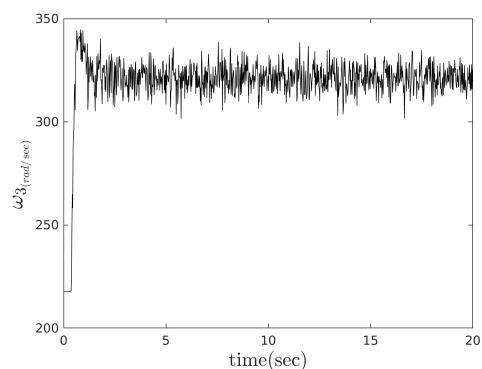
(ب) موتور شماره دو



(ا) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

شکل ۱-۸: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

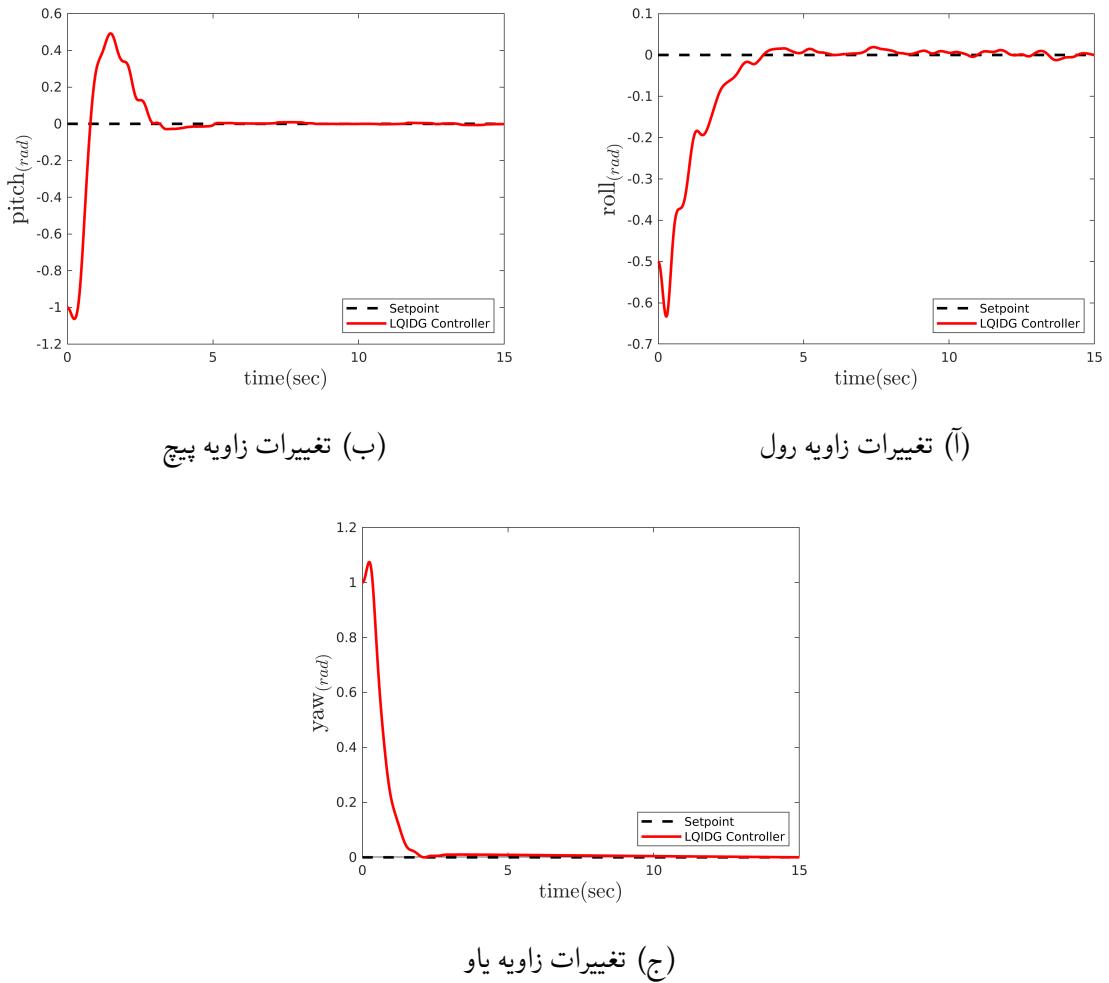
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱-۷)، کانال رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه و کانال پیچ در حدود هشت ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

۱-۵ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

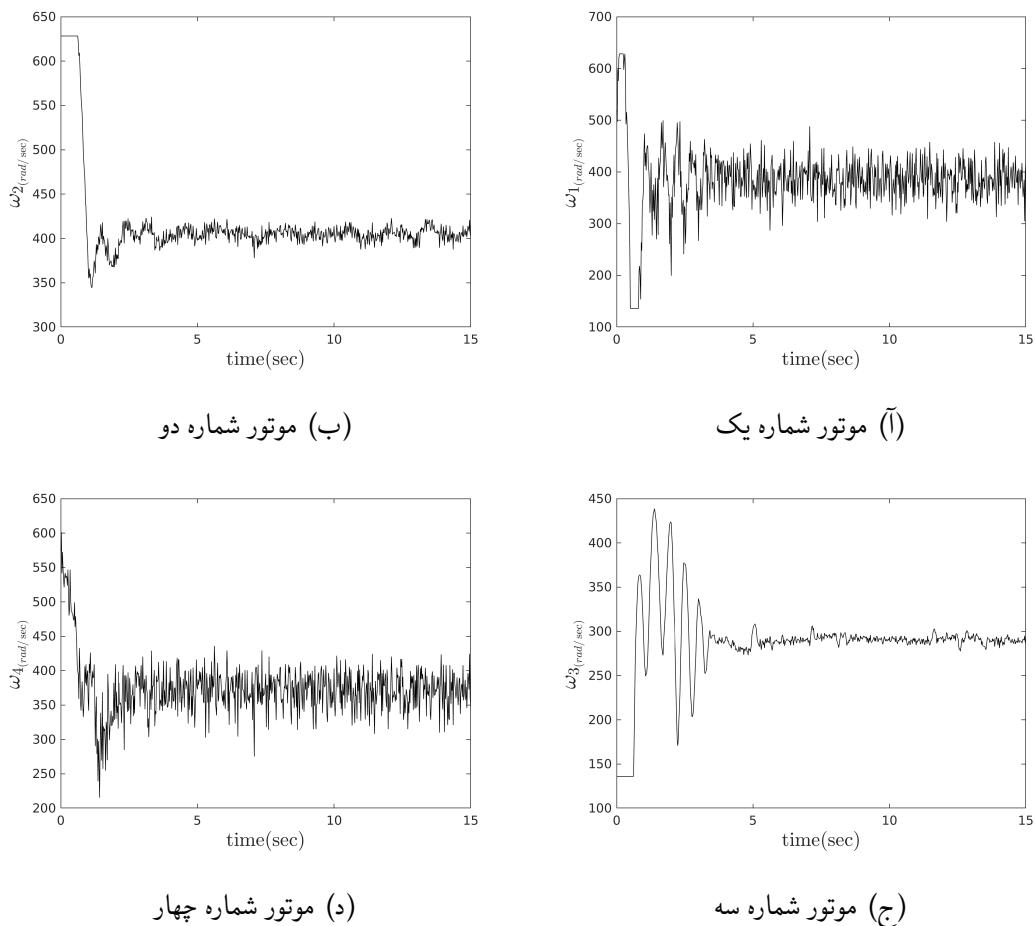
در بخش ؟؟ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش‌های ؟؟

۱-۵-۱ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی

بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.

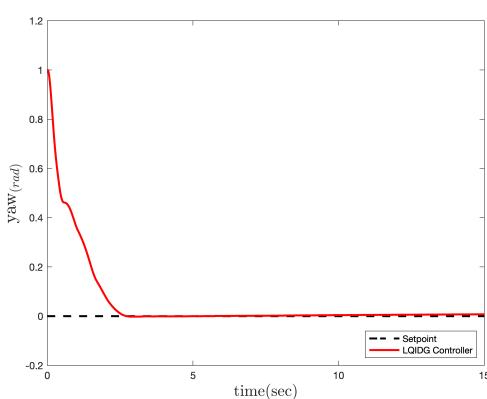
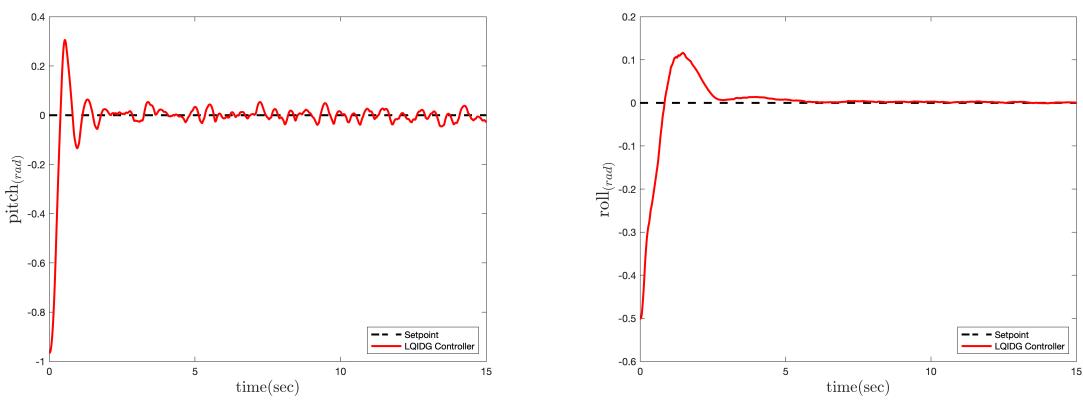


شکل ۱-۹: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)

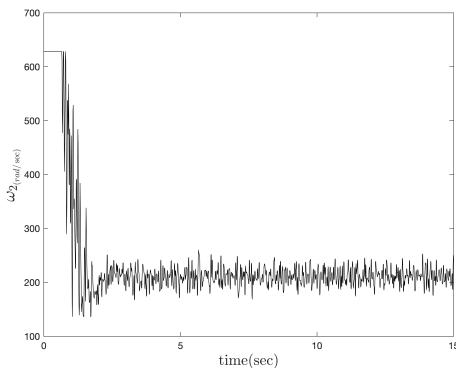


شکل ۱۰-۱: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

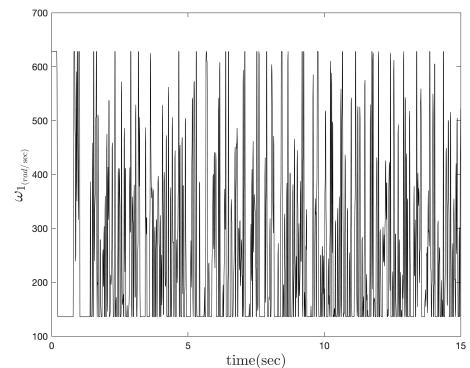
۲-۵-۱ شبیه‌سازی کنترل کننده به صورت چهار ورودی



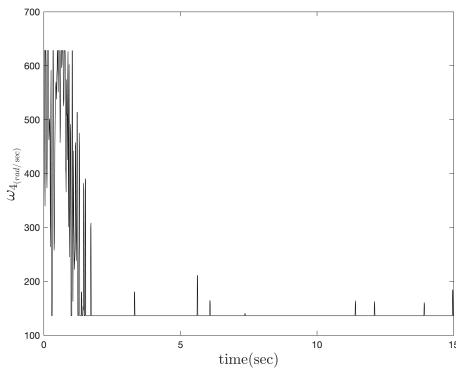
شکل ۱۱-۱: عملکرد کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



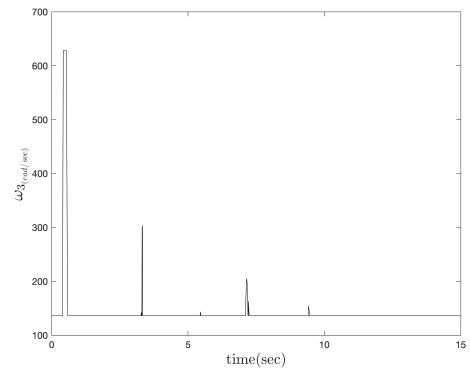
(ب) موتور شماره دو



(ا) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

شکل ۱۰-۱: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

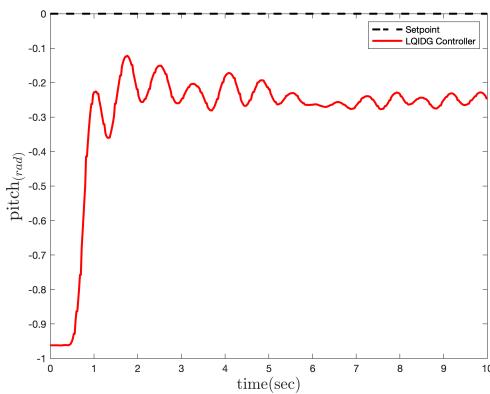
فصل ۲

پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر رویه استند سه درجه آزادی

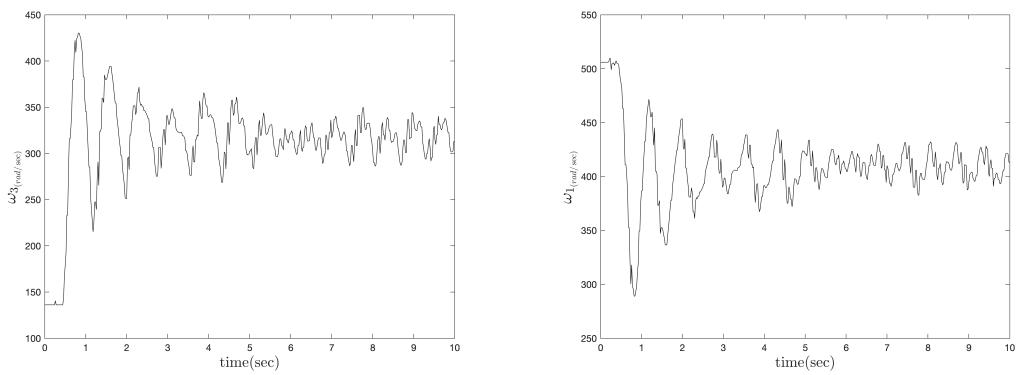
در بخش ۱-۱ ابتدا استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR و سپس در حضور کنترل‌کننده‌های LQDG و LQIDG در بخش‌های ۲-۱، ۳-۱، ۴-۱ و ۵-۱ شبیه‌سازی شد. در این فصل به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQR در بخش ۱-۲ و سپس کنترل‌کننده‌های LQDG و LQIDG در بخش‌های ۲-۲، ۳-۲، ۴-۲ و ۵-۲ بر رویه استند چهارپره سه درجه آزادی پرداخته خواهد شد.

۱-۲ پیاده‌سازی کنترل کننده LQR بر رویه کanal پیچ استند

در بخش ۱-۱ شبیه‌سازی تک کانال استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQR بر رویه کانال پیچ استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.



شکل ۱-۲: عملکرد LQR در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)



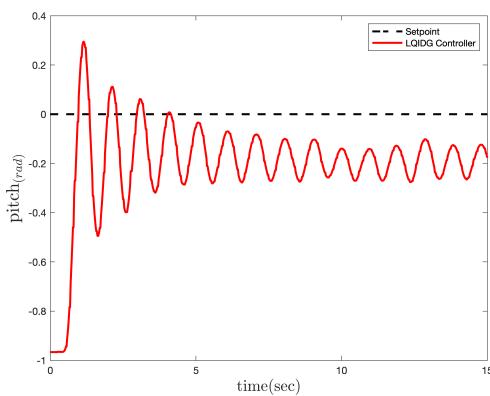
(ب) موتور شماره سه

(I) موتور شماره یک

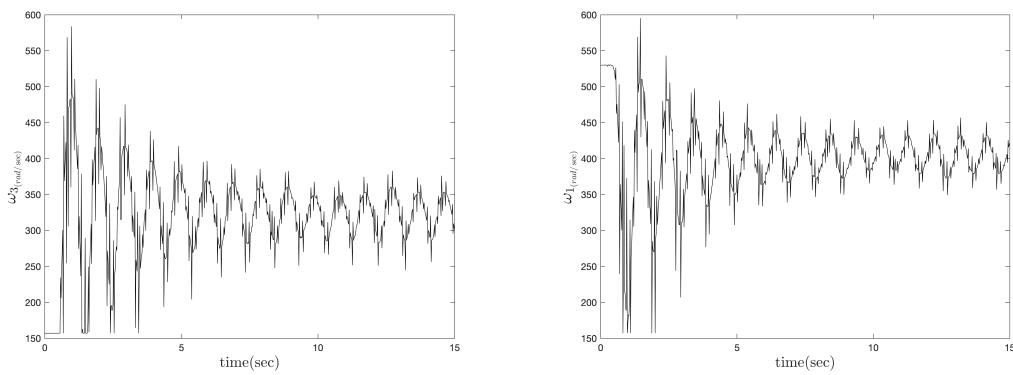
شکل ۲-۲: فرمان کنترلی موتورهای دو چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

۲-۲ پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQDG بر رویه کanal پیچ

در بخش ۲-۱ شبیه‌سازی تک کانال استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQDG بر رویه کانال پیچ استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.



شکل ۲-۳: عملکرد LQDG در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)



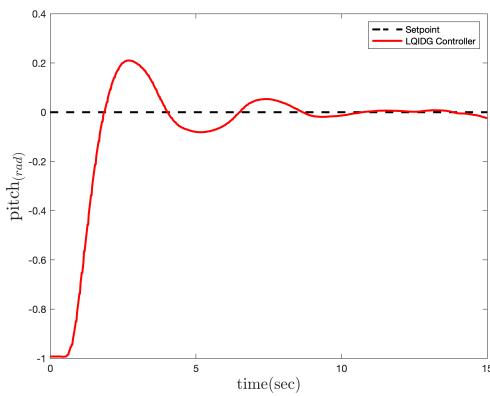
(ب) موتور شماره سه

(آ) موتور شماره یک

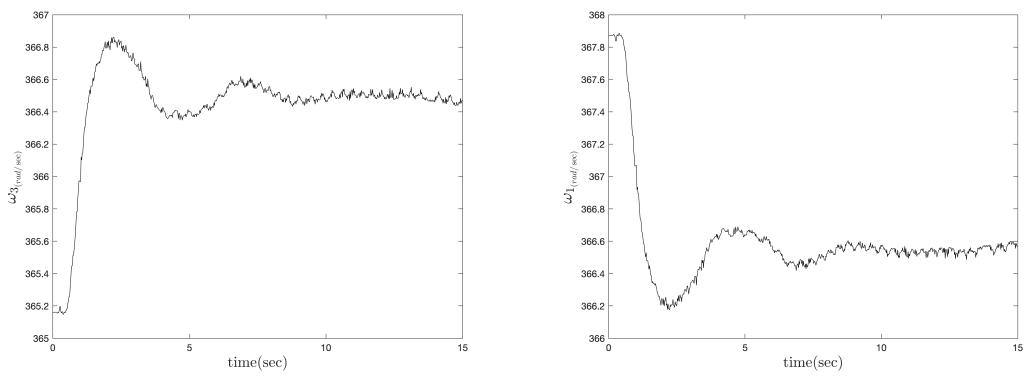
شکل ۲-۴: فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

۳-۲ پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه کانال پیچ

در بخش ۲-۱ شبیه‌سازی تک کانال استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه کانال پیچ استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.



شکل ۲-۵: عملکرد LQIDG در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)



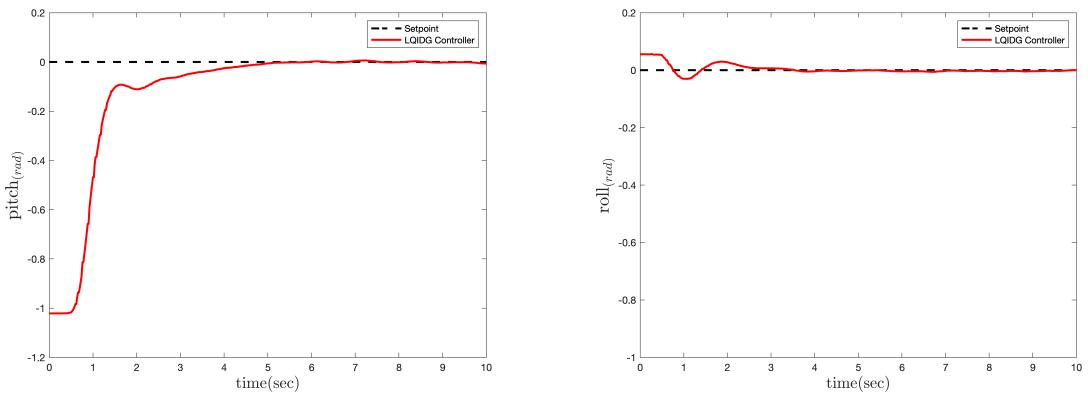
(ب) موتور شماره سه

(آ) موتور شماره یک

شکل ۲-۶: فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

۴-۲ پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQDG بر رویه کanal رول-پیچ

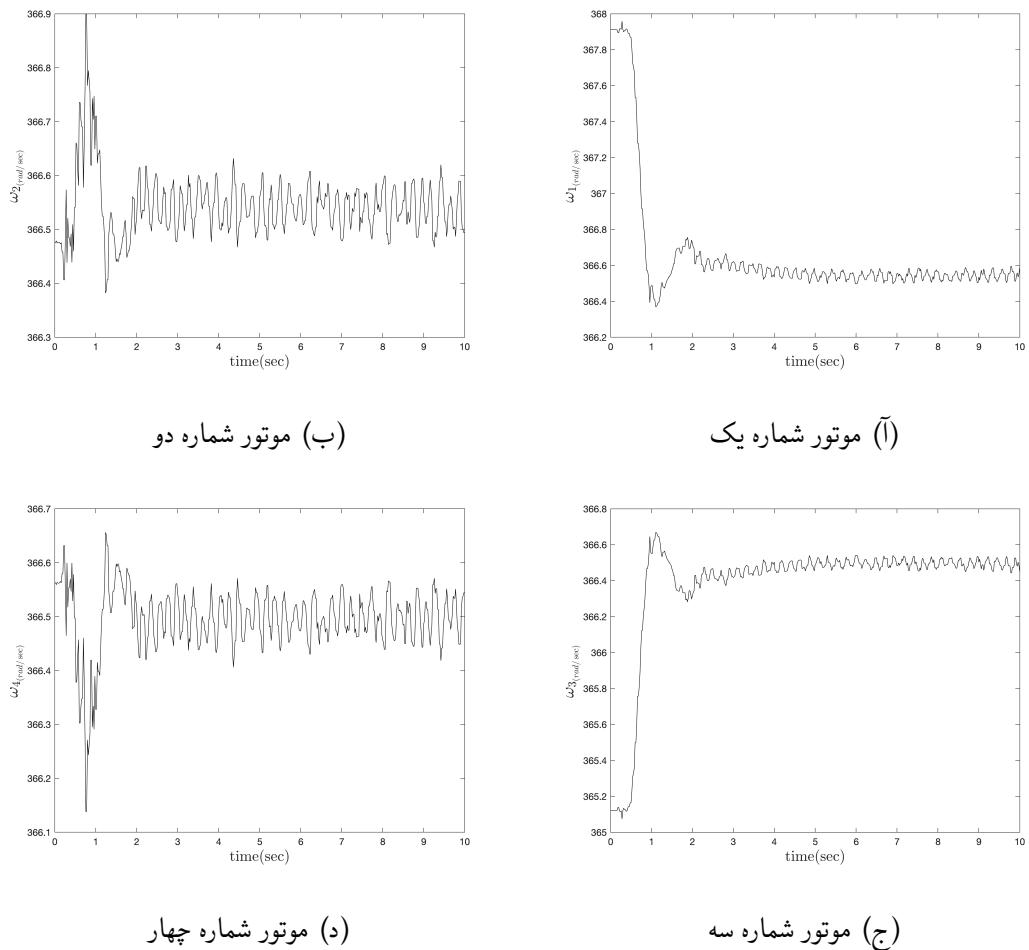
در بخش ۴-۱ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه کanal رول-پیچ استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ

(ا) تغییرات زاویه رول

شکل ۷-۲: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره دو

(ا) موتور شماره یک

(د) موتور شماره چهار

(ج) موتور شماره سه

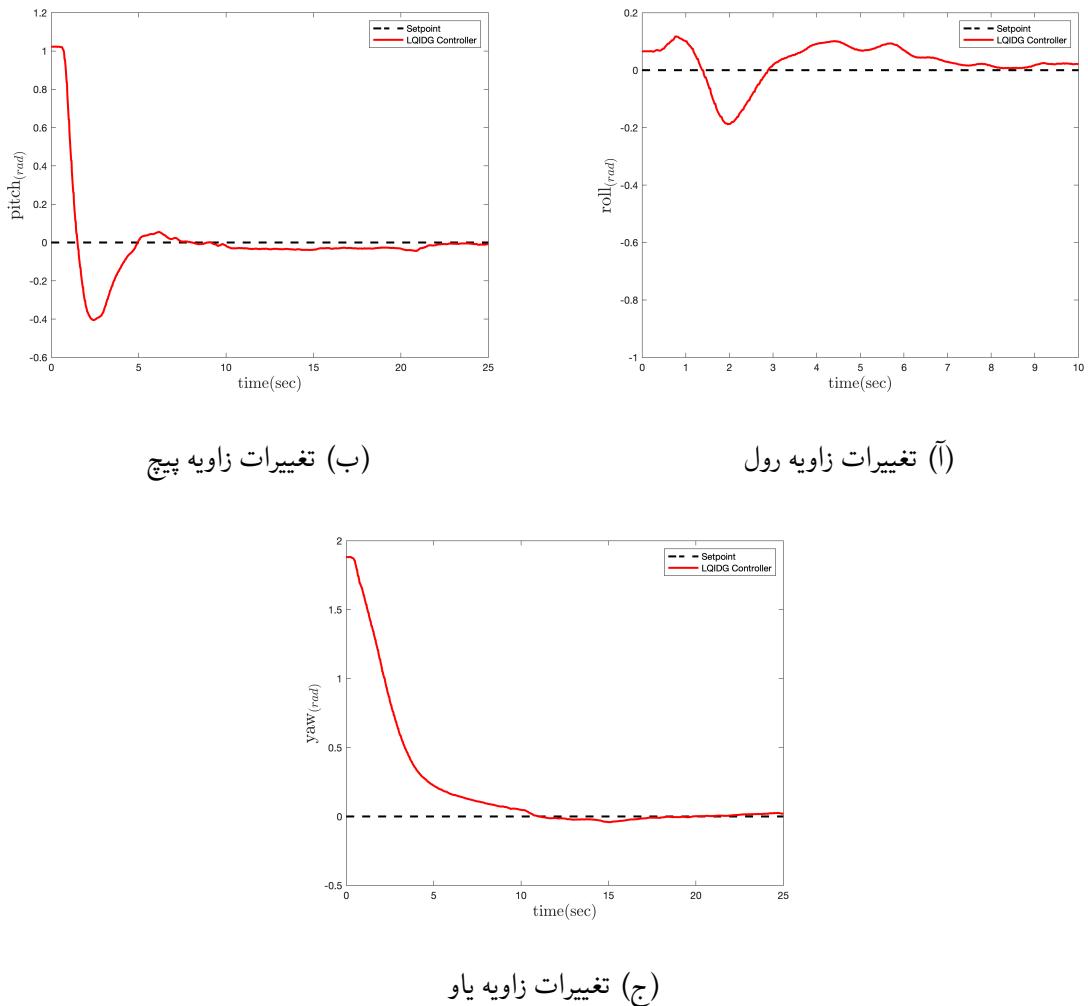
شکل ۸-۲: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

۵-۲ پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه استند سه درجه آزادی

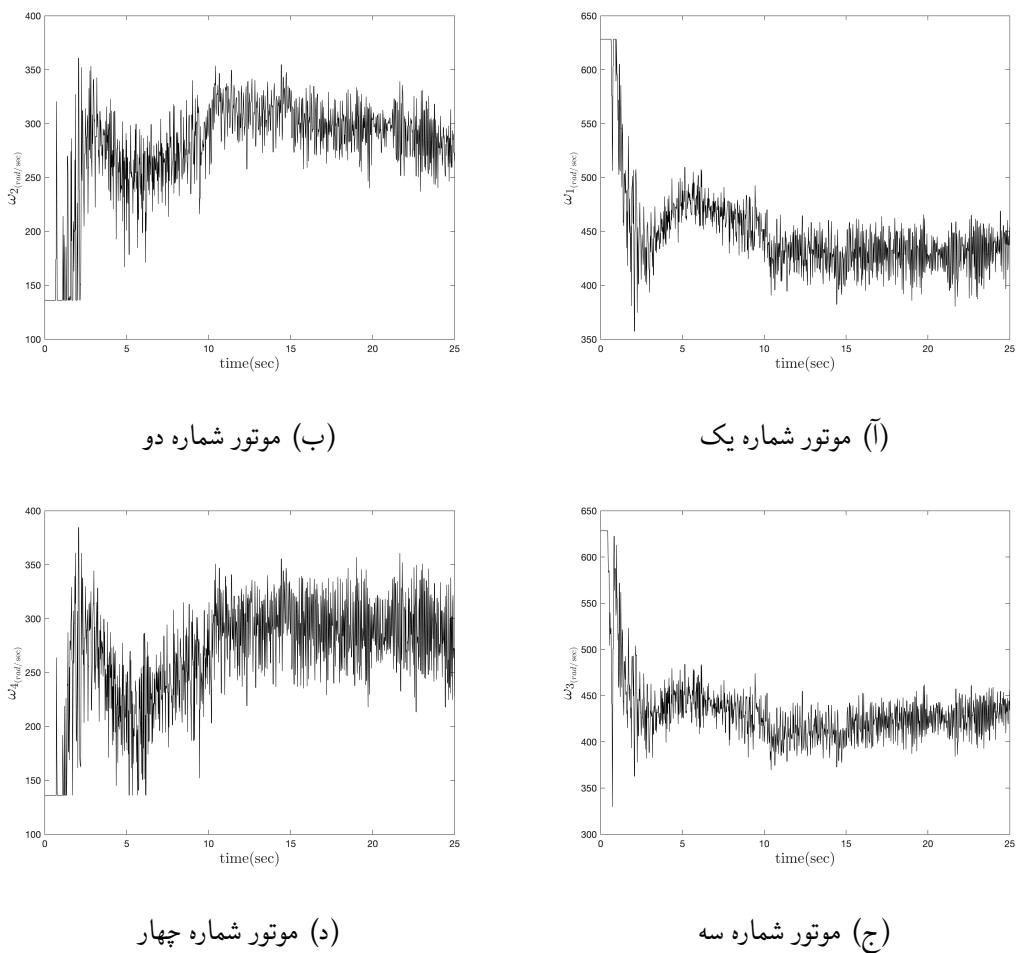
در بخش‌های ۱-۵-۲ و ۲-۵-۲، فرم خطی فضای حالت چهارپره و فرم خطی فضای حالت کانال‌های چهارپره محاسبه شده است. در بخش‌های ۱-۵-۲ و ۲-۵-۲ به ترتیب پیاده‌سازی به صورت سه کانال تک ورودی و چند ورودی انجام شده است.

۱-۵-۲ پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی

در بخش ۱-۵-۱ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.

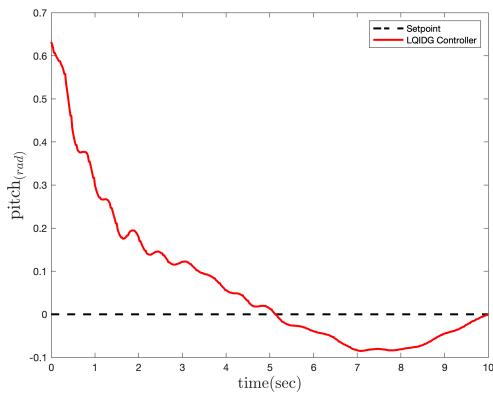


شکل ۹-۲: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

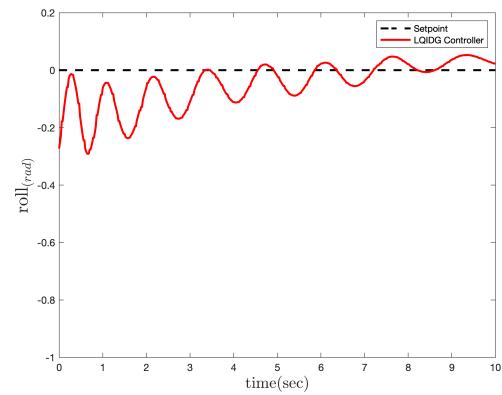


شکل ۱۰-۲: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

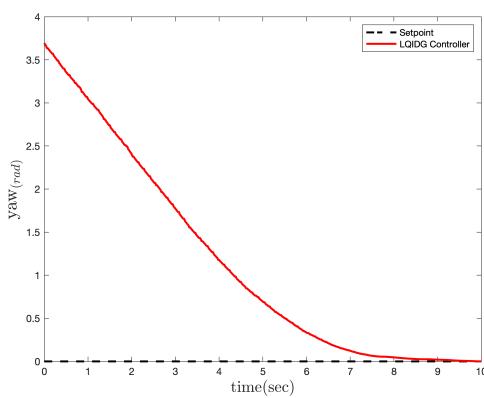
۲-۵-۲ پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی



(ب) تغییرات زاویه پیچ

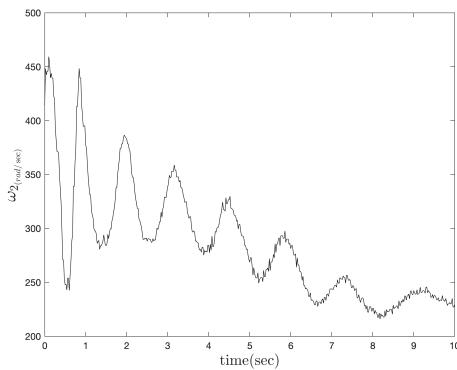


(ا) تغییرات زاویه رول

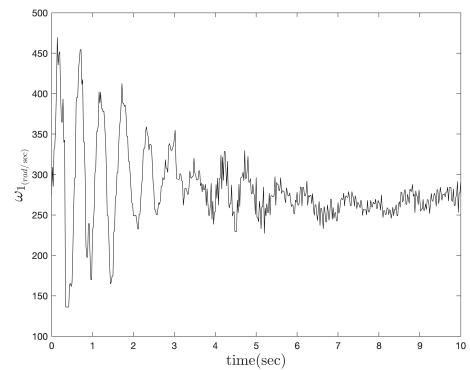


(ج) تغییرات زاویه یاو

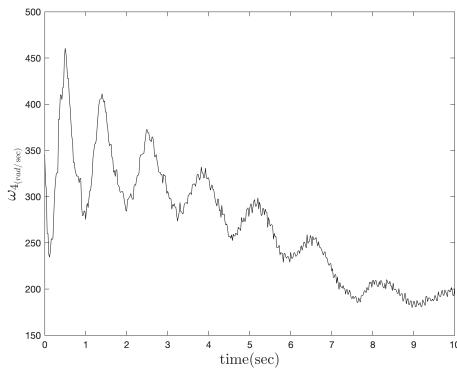
شکل ۱۱-۲: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



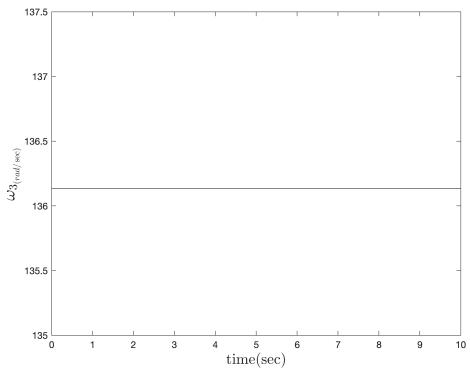
(ب) موتور شماره دو



(ـ) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

شکل ۱۲-۲: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

مراجع

- [1] L. Sprekelmeyer. *These We Honor: The International Aerospace Hall of Fame*. 2006.
- [2] M. J. Hirschberg. A perspective on the first century of vertical flight. *SAE Transactions*, 108:1113–1136, 1999.
- [3] T. Lee, M. Leok, and N. H. McClamroch. Geometric tracking control of a quadrotor uav on $\text{se}(3)$. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 5420–5425, 2010.
- [4] <http://gcrc.sharif.edu>. 3dof quadcopter, 2021. [Online; accessed November 2, 2021], Available at <https://cutt.ly/yYMvhYv>.
- [5] wired. the physics of drones, 2021. [Online; accessed June 8, 2021], Available at <https://www.wired.com/2017/05/the-physics-of-drones/>.
- [6] nobelprize.org. Jean tirole, 2021. [Online; accessed October 17, 2021], Available at <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2014/tirole/facts/>.
- [7] B. Djehiche, A. Tcheukam, and H. Tembine. Mean-field-type games in engineering. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 1(1):18–73, 2017.
- [8] W. L. Brogan. *Modern control theory*. 1974.
- [9] J. Engwerda. Linear quadratic differential games: An overview. *Advances in Dynamic Games and their Applications*, 10:37–71, 03 2009.
- [10] P. Abeshtan. Attitude control of a 3dof quadrotor stand using intelligent backstepping approach. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2016.

- [11] P. Zipfel. *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics*. AIAA education series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [12] A. Sharifi. Real-time design and implementation of a quadcopter automatic landing algorithm taking into account the ground effect. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2010.
- [13] M. A. A. Bishe. Attitude control of a 3dof quadrotor stand using a heuristic nonlinear controller. January 2018.
- [14] E. Norian. Design of status control loops of a laboratory quadcopter mechanism and its pulverizer built-in using the automatic tool code generation. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2014.
- [15] Model-based design, 2021. [Online; accessed December 16, 2021], Available at <https://www.pngegg.com/en/png-xdlhx>.
- [16] 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

LQIDG Controller for 3DOF Quadcopter Stand

By:

Ali BaniAsad

Supervisor:

Dr. Nobahari

July 2022