



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 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^۲ که هدف آن کم کردن تابع هزینه با فرض بدترین حرکت دیگر بازیکن است، انجام می‌شود. 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 شبیه‌سازی‌هایی در محیط سیمولینک انجام شده است و سپس، با پیاده‌سازی آن صحت عملکرد آن تایید شده است.

کلیدواژه‌ها: چهارپره، بازی دیفرانسیلی، تئوری بازی، تعادل نش، استند سه درجه آزادی، مدل‌بنا، تنظیم‌کننده مربعی خطی

¹Game Theory

²Nash Equilibrium

فهرست مطالب

۱	۱-۰-۰	استخراج معادله نهایی دینامیک دورانی
۳	۱-۰	شبیه‌سازی کanal رول استند سه درجه آزادی در حضور کنترل کننده LQR
۴	۲-۰	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده LQDG
۵	۳-۰	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده LQIDG
۶	۴-۰	شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل کننده LQIDG
۸	۵-۰	شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل کننده LQIDG
۱۰	۱	پیاده‌سازی کنترل کننده بر رویه استند سه درجه آزادی
۱۰	۱-۱	پیاده‌سازی کنترل کننده LQR بر رویه کanal پیچ استند
۱۱	۲-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده LQDG
۱۲	۳-۱	شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل کننده LQIDG
۱۳	۴-۱	شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل کننده LQIDG
۱۵	۵-۱	شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند در حضور کنترل کننده LQIDG

فهرست شکل‌ها

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

- ۷-۱ عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) ۱۴
- ۸-۱ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) ۱۴
- ۹-۱ عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر) ۱۵
- ۱۰-۱ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر) ۱۶

فهرست جدول‌ها

۱-۰-۰ استخراج معادله نهایی دینامیک دورانی

با جایگذاری گشتاورهای خارجی چهارپره و تکانه زاویه‌ای کلی پردها در معادله دیفرانسیل اویلر، شکل نهایی معادله دیفرانسیل استند چهارپره حاصل می‌شود. به این منظور، با جایگذاری مقدار گشتاورهای اعمالی به چهارپره از معادله (۲) در معادله (۳) رابطه موردنیاز برای مدل‌سازی دینامیک دورانی استند به صورت معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \left[\frac{d\omega^{BI}}{dt} \right]^B = & \left([\mathbf{J}]^B \right)^{-1} \left(- [\boldsymbol{\Omega}^{BI}] \times \left([\mathbf{J}]^B [\boldsymbol{\omega}^{BI}]^B + [\mathbf{I}_R]^B \right) + \right. \\ & [\mathbf{m}_A]^B + [\mathbf{m}_{cg}]^B + [\mathbf{s}_{DC}]^B \left(- [\mathbf{G}]^B - [\mathbf{T}]^B + \right. \\ & \left. \left. m_{tot} \left\{ 2 [\boldsymbol{\Omega}^{BI}]^B [\boldsymbol{\Omega}^{BI}]^B [\mathbf{s}_{cd}]^B + \left[\frac{d\boldsymbol{\Omega}^{BI}}{dt} \right]^B [\mathbf{s}_{cd}]^B \right\} \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، عبارت $\left[\frac{d\boldsymbol{\Omega}^{BI}}{dt} \right]^B$ بیانگر ماتریس پادمتریارن بردار مشتق سرعت زاویه‌ای بدنه (۳) است. جمله آخر در معادله فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$m_{tot} [\mathbf{s}_{DC}]^R \left[\frac{d\boldsymbol{\Omega}^{BI}}{dt} \right]^B [\mathbf{s}_{CD}]^R = m_{tot} [\mathbf{s}_{DC}]^R [\mathbf{s}_{DC}]^R [\dot{\boldsymbol{\omega}}^{BI}]^B \quad (2)$$

با جایگذاری معادله (۱) در معادله (۲) معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \left[\frac{d\omega^{BI}}{dt} \right]^B & \left(I - m_{tot} \left([\mathbf{J}]^B \right)^{-1} [\mathbf{s}_{DC}]^B [\mathbf{s}_{DC}]^B \right) = \\ \left([\mathbf{J}]^B \right)^{-1} & \left(- [\boldsymbol{\Omega}^{BI}] \times \left([\mathbf{J}]^B [\boldsymbol{\omega}^{BI}]^B + [\mathbf{I}_R]^B \right) + \right. \\ & [\mathbf{m}_A]^B + [\mathbf{m}_{cg}]^B + [\mathbf{s}_{DC}]^B \left(- [\mathbf{F}_g]^B - [\mathbf{F}_T]^B + \right. \\ & \left. \left. m_{tot} \left\{ 2 [\boldsymbol{\Omega}^{BI}]^B [\boldsymbol{\Omega}^{BI}]^B [\mathbf{s}_{cd}]^B + \left[\frac{d\boldsymbol{\Omega}^{BI}}{dt} \right]^B [\mathbf{s}_{cd}]^B \right\} \right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

با ساده‌سازی رابطه (۳)، بردار سرعت زاویه‌ای استنده به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \left[\frac{d\omega^{BI}}{dt} \right]^B &= a^{-1} b \\ a &= I - m_{tot} \left([\mathbf{J}]^B \right)^{-1} [\mathbf{s}_{DC}]^B [\mathbf{s}_{DC}]^B \\ b &= \left([\mathbf{J}]^B \right)^{-1} \left(- [\boldsymbol{\Omega}^{BI}] \times \left([\mathbf{J}]^B [\boldsymbol{\omega}^{BI}]^B + [\mathbf{I}_R]^B \right) + \right. \\ & [\mathbf{m}_A]^B + [\mathbf{m}_{cg}]^B + [\mathbf{s}_{DC}]^B \left(- [\mathbf{F}_g]^B - [\mathbf{F}_T]^B + \right. \\ & \left. \left. m_{tot} \left\{ 2 [\boldsymbol{\Omega}^{BI}]^B [\boldsymbol{\Omega}^{BI}]^B [\mathbf{s}_{cd}]^B + \left[\frac{d\boldsymbol{\Omega}^{BI}}{dt} \right]^B [\mathbf{s}_{cd}]^B \right\} \right) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

با جایگذاری معادلات (۴۴)، (۴۵) و (۴۶) معادله مربوط به تکانه کلی پردها، معادله (۴۷) مربوط به برآمده و معادله (۴۸) در معادله (۴) مؤلفه‌های بردار مشتق سرعت زاویه‌ای چهارپره به صورت زیر حاصل

می‌شود:

$$\dot{p} = \frac{h_{cg} g m_{dot} \cos(\theta) \sin(\phi) + (J_{22} - J_{33} + 2m_{tot} h_{ch}^2) qr}{m_{tot} h_{cg}^2 + J_{11}} + \frac{bd_{cg} (\omega_2^2 - \omega_4^2) + q J_R (\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) - \frac{p}{|p|} P_1 \mu r_x}{m_{tot} h_{cg}^2 + J_{11}} \quad (5)$$

$$\dot{q} = \frac{h_{cg} g m_{dot} \sin(\theta) + (J_{33} - J_{11} + 2m_{tot} h_{ch}^2) pr}{m_{tot} h_{cg}^2 + J_{11}} + \frac{bd_{cg} (\omega_1^2 - \omega_3^2) - p J_R (\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) - \frac{q}{|q|} P_2 \mu r_y}{m_{tot} h_{cg}^2 + J_{11}} \quad (6)$$

$$\dot{r} = \frac{pq(J_{11} - J_{22}) + d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) - \frac{r}{|r|} P_3 \mu r_z}{J_{33}} \quad (7)$$

به منظور انتشار وضعیت دورانی چهارپره، از روش انتشار اویلر استفاده می‌شود. در این صورت [۱۱] :

$$\dot{\phi} = p + q \sin(\phi) \cos(\theta) + r \cos(\phi) \tan(\theta) \quad (8)$$

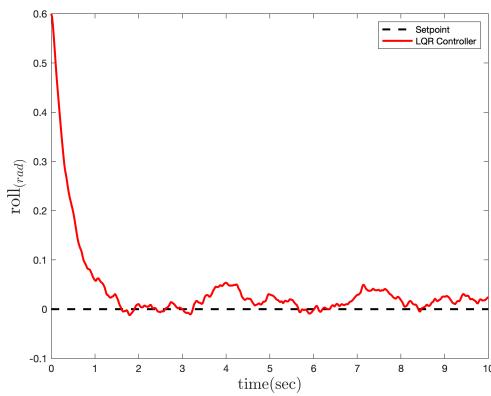
$$\dot{\theta} = q \cos(\phi) - r \sin(\phi) \quad (9)$$

$$\dot{\psi} = (q \sin(phi)) + r \cos(\phi) \sec(\theta) \quad (10)$$

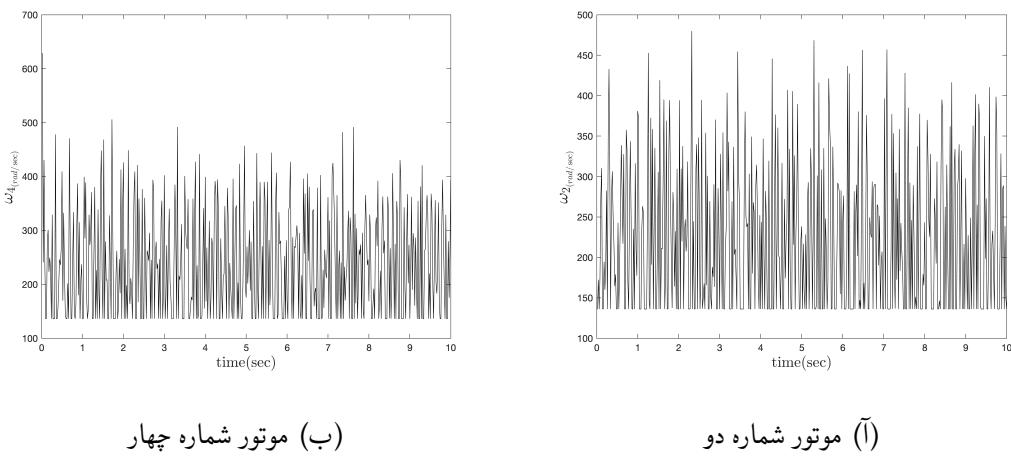
۱-۰ شبیه‌سازی کanal رول استند سه درجه آزادی در حضور کنترل کننده

LQR

در بخش ؟؟ شبیه‌سازی کanal 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: عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره چهار

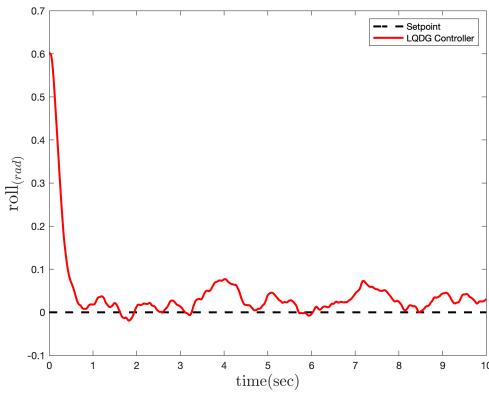
(آ) موتور شماره دو

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

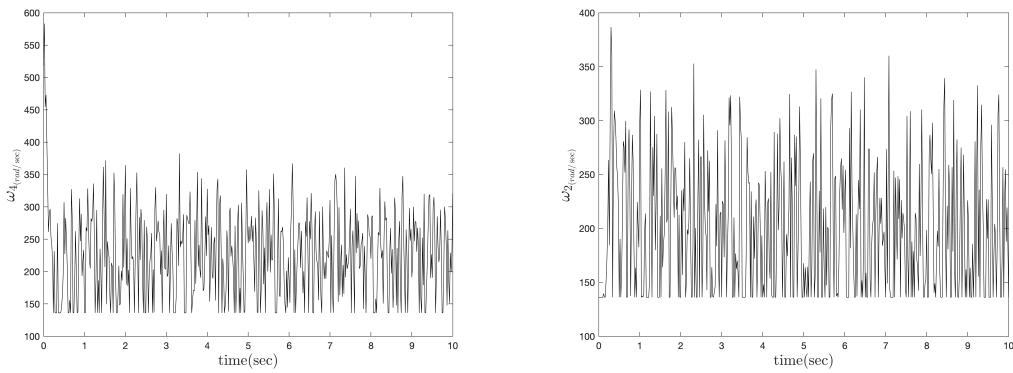
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQR در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است.

۲-۰ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG

در بخش ۲-۰ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش ۲-۰ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.



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



(ب) موتور شماره چهار

(آ) موتور شماره دو

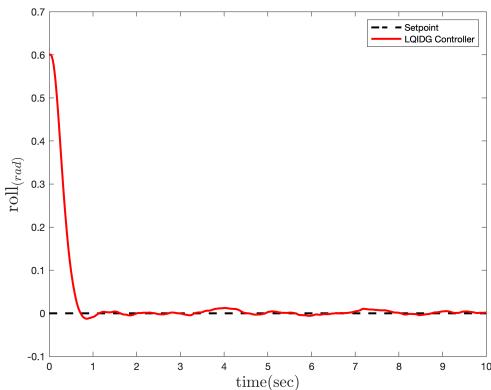
شکل ۴: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۳)، کanal 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 LQR بخش ۱۰-۳-۰ انتگرال‌گیر به کنترل‌کننده اضافه می‌شود تا خطای ماندگار استند را کم کند.

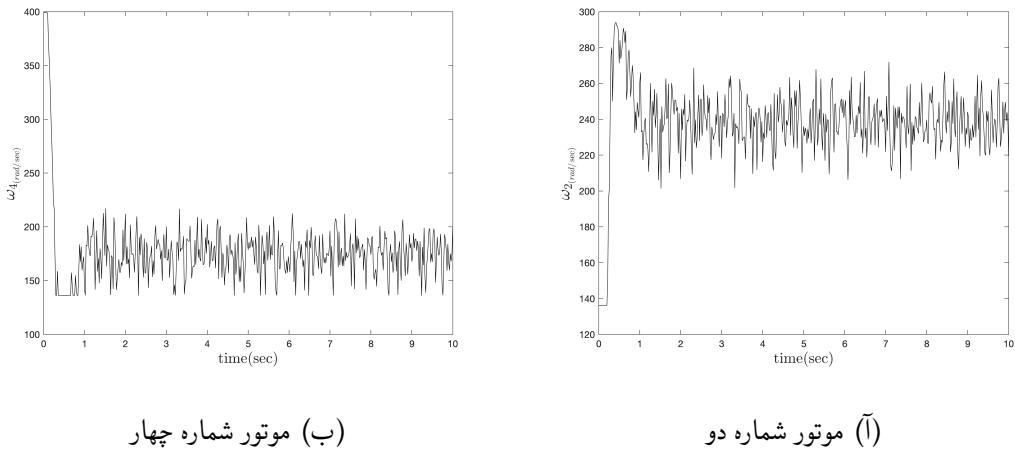
۳-۰ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۳-۰ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ۳-۰ بررسی شده است. در

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



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



(ب) موتور شماره چهار

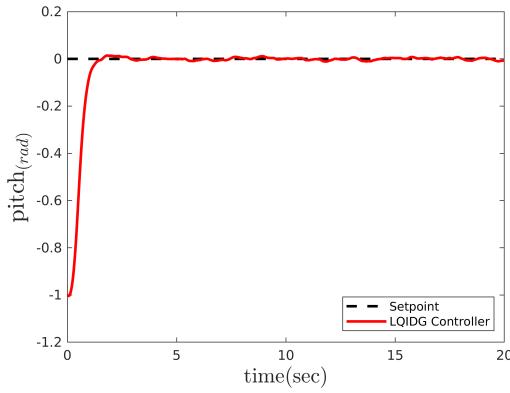
(آ) موتور شماره دو

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

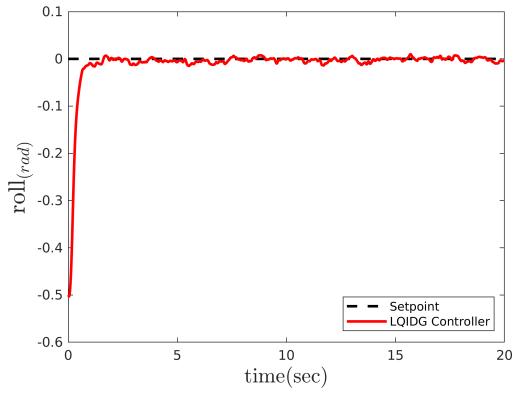
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۵)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن به دلیل وجود انگرال‌گیر در حدود صفر است.

۴-۰ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۴-۰ 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 ۴-۰ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.

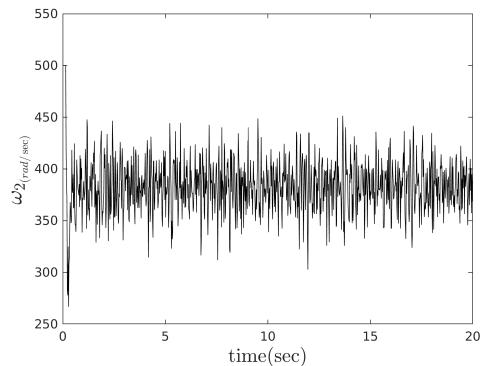


(ب) تغییرات زاویه پیچ

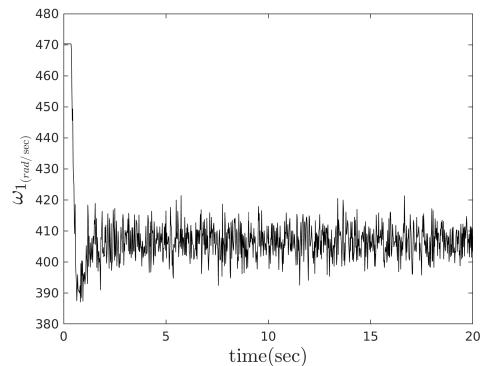


(ا) تغییرات زاویه رول

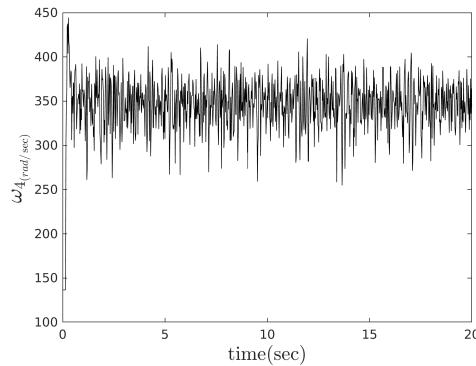
شکل ۷: عملکرد کنترلکننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



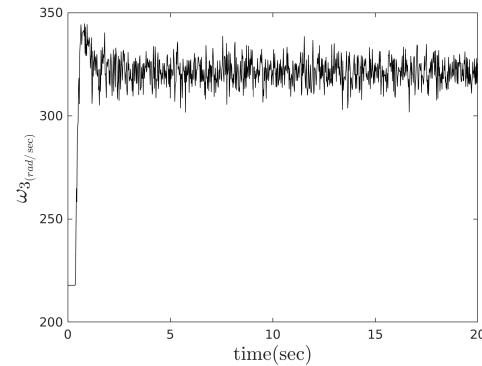
(ب) موتور شماره دو



(ا) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



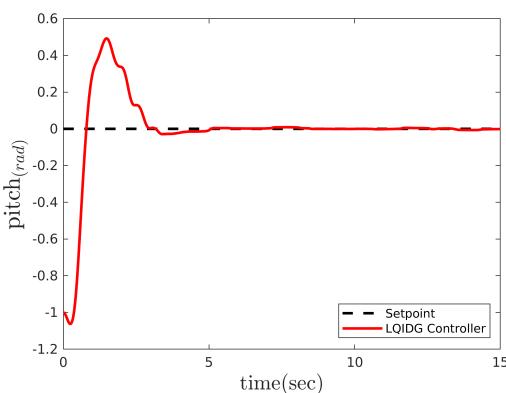
(ج) موتور شماره سه

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

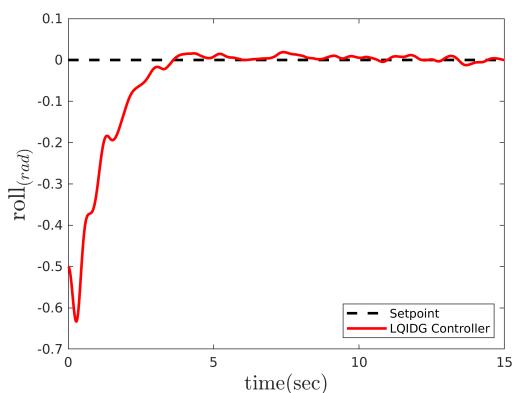
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۷)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه و کanal پیچ در حدود هشت ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن در حدود صفر است.

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

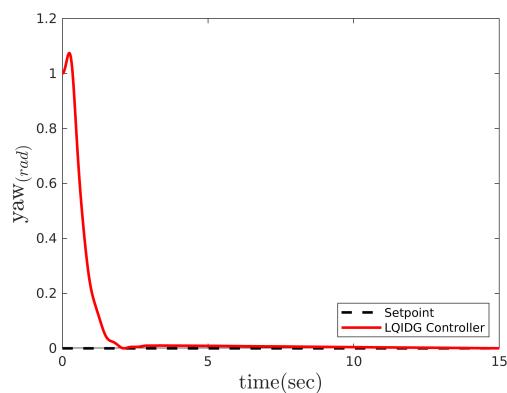
در بخش ۵-۰ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش‌های ۵-۰ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۱۶] استفاده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ

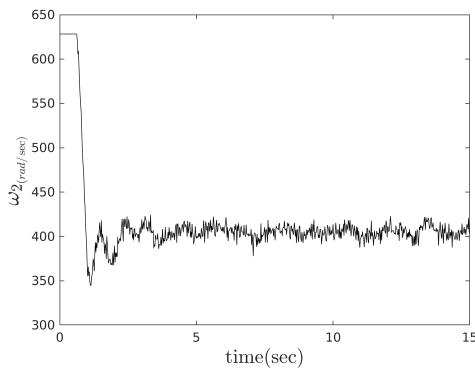


(ا) تغییرات زاویه رول

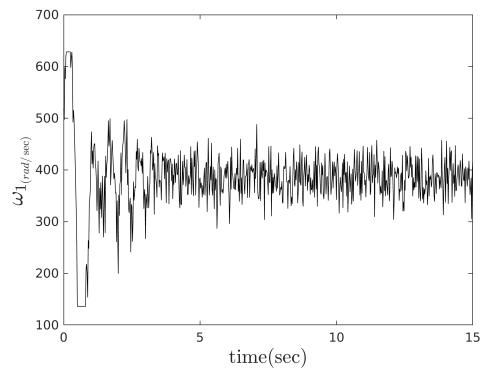


(ج) تغییرات زاویه یاو

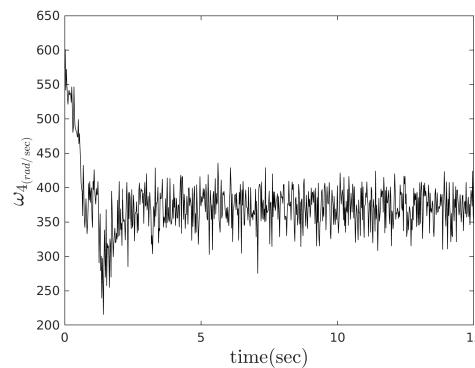
شکل ۹: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



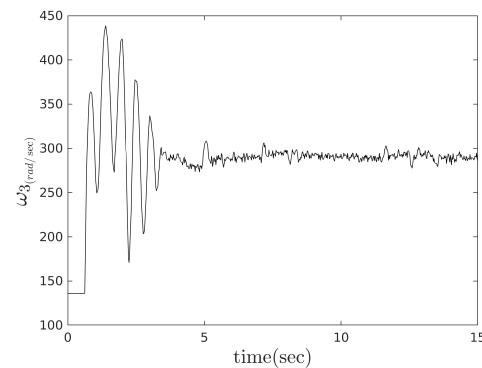
(ب) موتور شماره دو



(ا) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

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

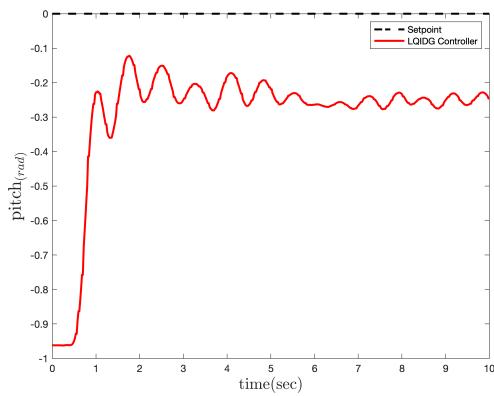
فصل ۱

پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر رویه استند سه درجه آزادی

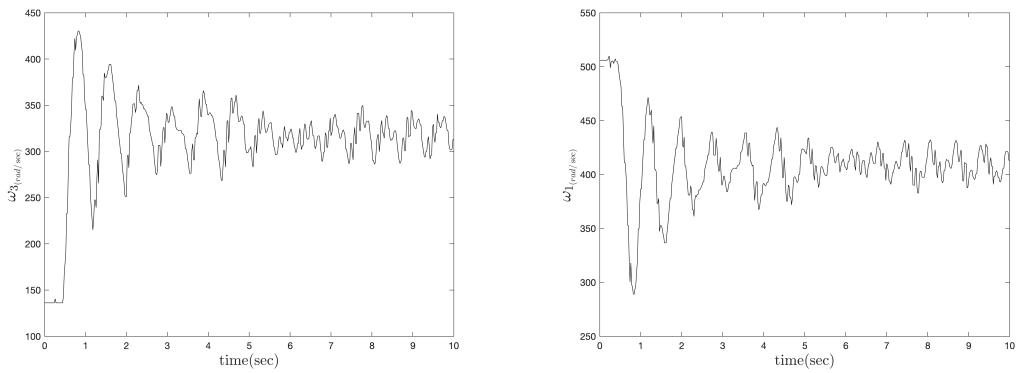
و ؟؟ کنترل‌کننده خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی در حالت حلقه‌باز و حلقه‌بسته معرفی شد. در بخش ۴-۱، ۳-۱ و ۵-۰ ابتدا کنترل‌کننده LQR و سپس کنترل‌کننده‌های LQDG و LQIDG در بخش‌های ؟؟ و ؟؟ شبیه‌سازی شدند. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQR و سپس کنترل‌کننده‌های LQDG و LQIDG پرداخته خواهد شد.

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

در بخش ۱-۰ شبیه‌سازی تک کanal استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQR بر رویه کanal پیچ استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.



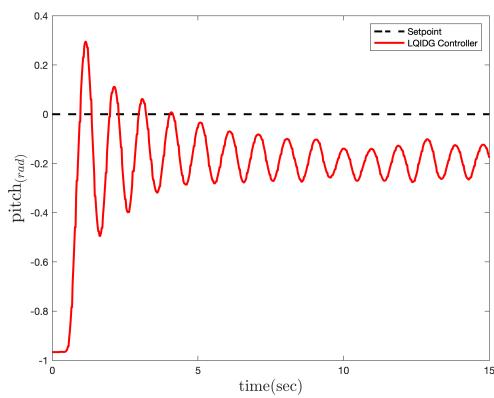
شکل ۱-۱: عملکرد LQR در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)



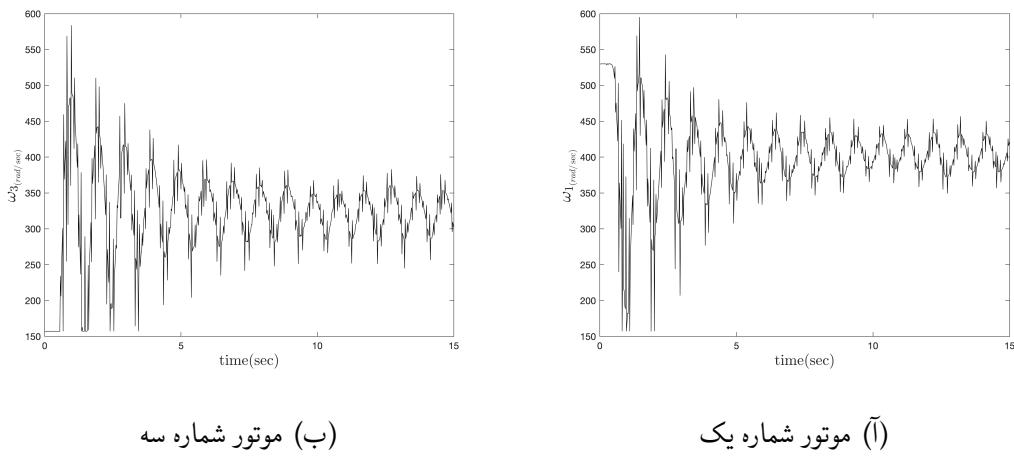
شکل ۱-۲: فرمان کنترلی موتورهای دو چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

۲-۱ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQDG

در بخش ۲-۰ 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.



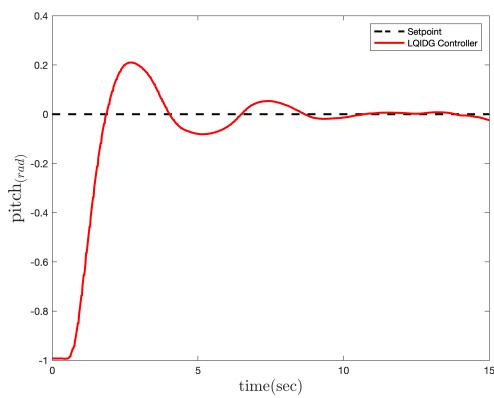
شکل ۱-۳: عملکرد LQDG در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)



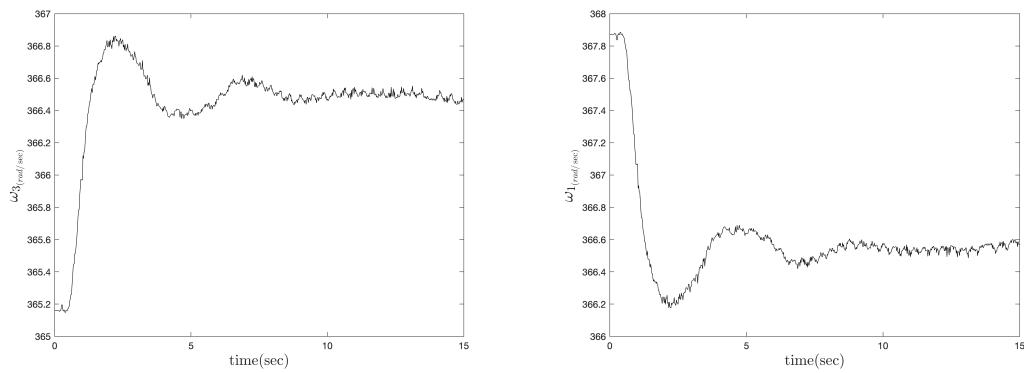
شکل ۱-۴: فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

۱-۳ شبیه‌سازی کanal رول استند در حضور کنترل‌کننده LQIDG

در بخش ۱-۳ 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 ۱-۵: عملکرد LQIDG در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)



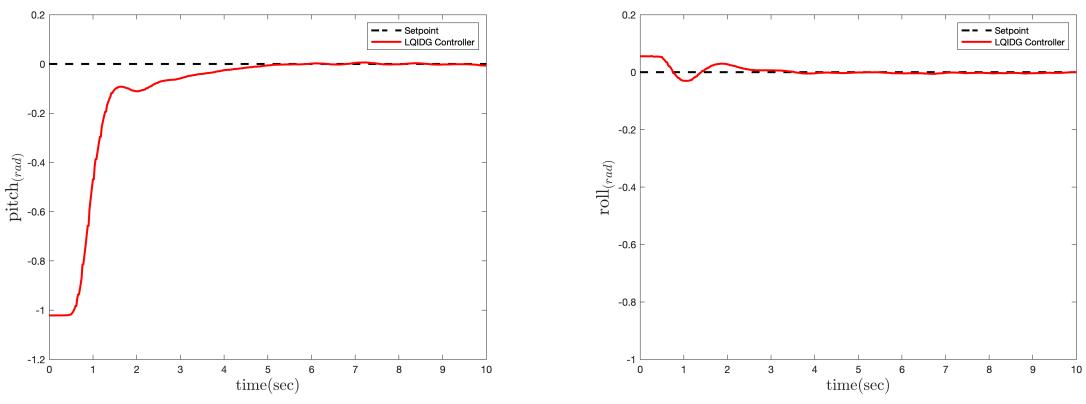
(ب) موتور شماره سه

(ا) موتور شماره یک

شکل ۱-۶: فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه پیچ (تعقیب ورودی صفر)

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

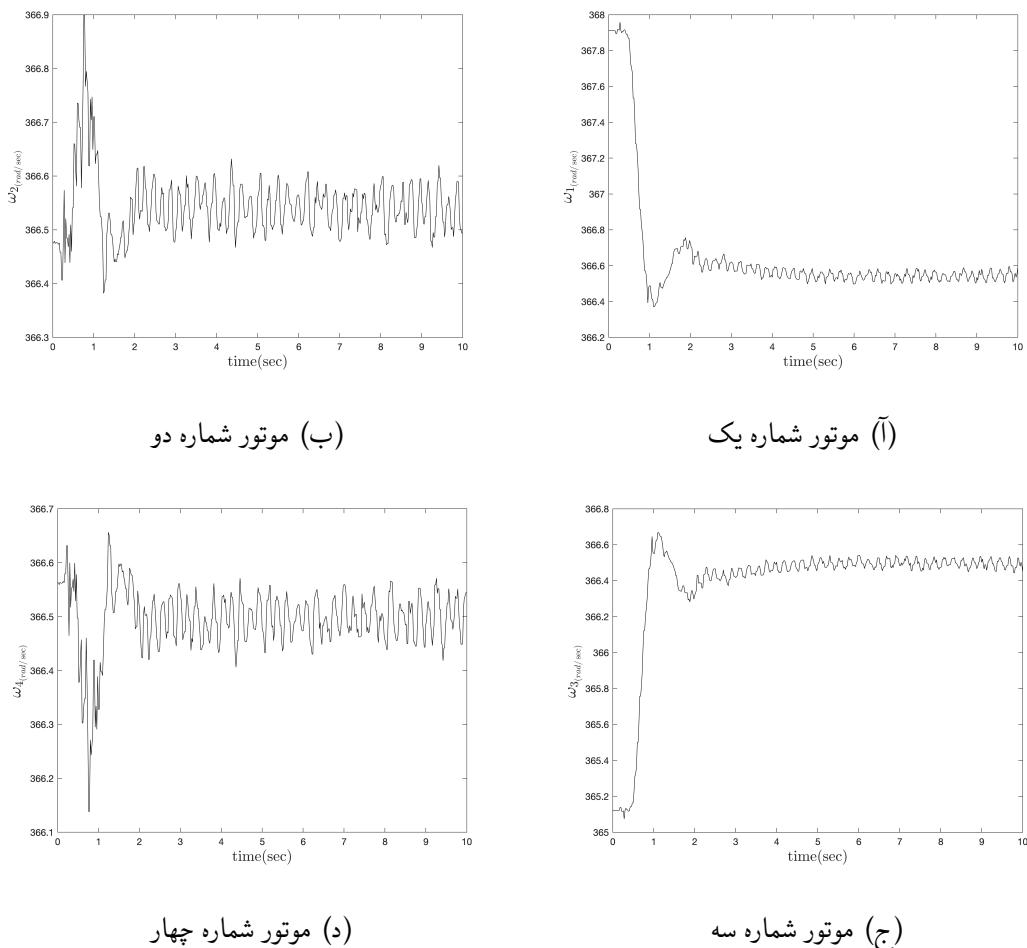
در بخش ۴-۰ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه کanal رول-پیچ استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ

(ا) تغییرات زاویه رول

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



(ب) موتور شماره دو

(ا) موتور شماره یک

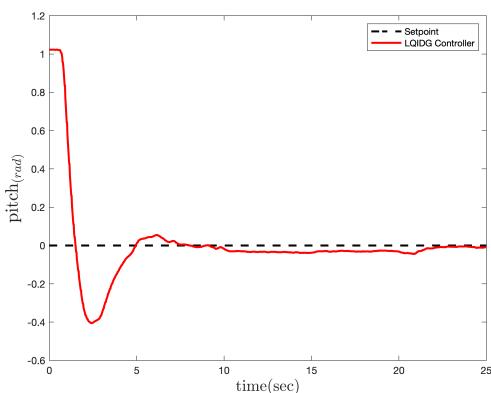
(د) موتور شماره چهار

(ج) موتور شماره سه

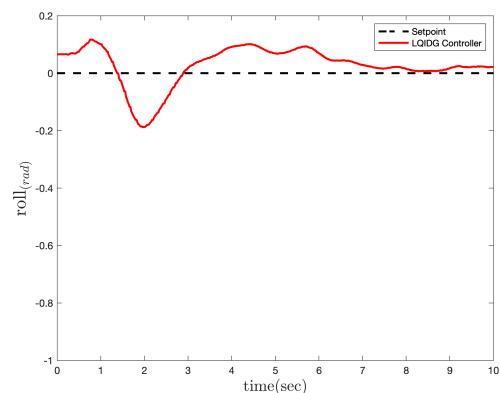
شکل ۱-۸: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

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

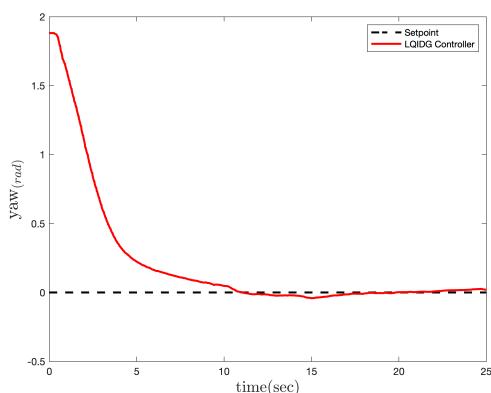
در بخش ۱-۱ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG بر رویه استند سه درجه آزادی پرداخته می‌شود. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبیه‌سازی استفاده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ

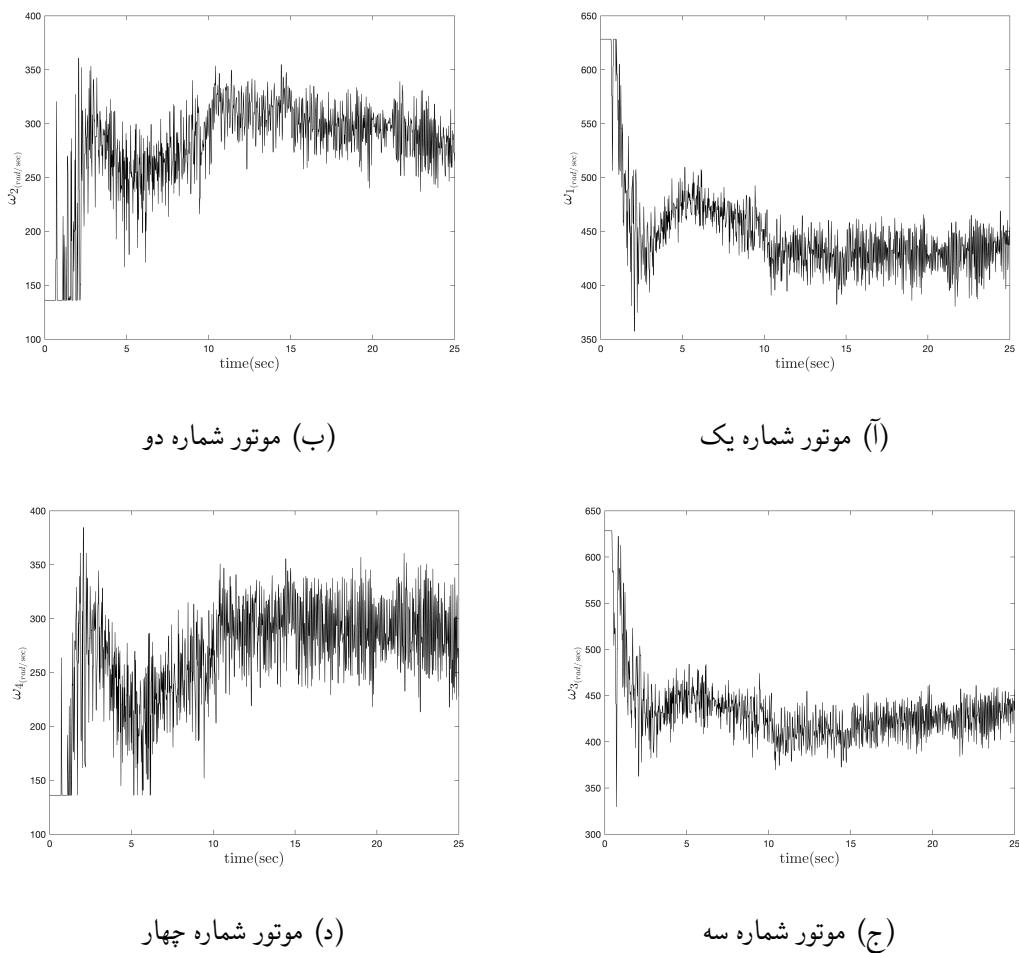


(ا) تغییرات زاویه رول



(ج) تغییرات زاویه یاو

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



شکل ۱-۱: 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