



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-	۱۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول
۱	۱-۱-	۱۰ تعقیب مقدار مطلوب خروجی
۶	۲-۱-	۰ برسی عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز اندازه‌گیری
۹	۲-	۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول-پیچ
۱۲	۳-	۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول-پیچ-یاو
۱۳	۱-۳-	۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی
۱۶	۲-۳-	۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی
۱۹	۴-	۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول-پیچ-یاو
۱۹	۱-۴-	۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی
۲۱	۲-۴-	۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی

فهرست شکل‌ها

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

۱۵	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۱۸
۱۸	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر) . . .	۱۹
۱۹	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۲۰
۲۰	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر) . . .	۲۱
۲۱	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۲۲
۲۲	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر) . . .	۲۳
۲۳	فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)	۲۴

فهرست جدول‌ها

۱-۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول

در بخش ۱-۰ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی چهارپره انجام شد. در این بخش به کنترل زاویه رول با فرض مقیدبودن زاویه پیچ و یاو پرداخته خواهد شد. به این منظور، در بخش ۱-۱ نتایج شبیه‌سازی برای تعقیب مقدار مطلوب خروجی زاویه رول ارائه می‌شود. سپس، در بخش ۱-۲ عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز اندازه‌گیری بررسی می‌شود.

۱-۱-۰ تعقیب مقدار مطلوب خروجی

در این بخش به ارائه مختصراً از کنترل‌کننده LQR پرداخته شده است. سپس، به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR پرداخته می‌شود. برای یک سامانه خطی پیوسته با معادلات حالت:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

فرمان کنترلی بهینه LQR به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$u_i(t) = -K_{LQR}x(t) \quad (2)$$

که در رابطه فوق، ماتریس K_{LQR} بیانگر بھر بازخورد بھینه است. این بھر بھگونهای محاسبه می‌شود که تابع هزینه مربعی زیر کمینه شود:

$$J_i(u_1, u_2) = \int_0^T (\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)) dt \quad (3)$$

در رابطه فوق، ماتریس‌های Q و R به ترتیب بیانگر میزان اهمیت انحراف متغیرهای حالت از مقادیر مطلوب و میزان تلاش کنترلی هستند. برای کمینه‌کردن رابطه (3)، از رابطه زیر حاصل می‌شود:

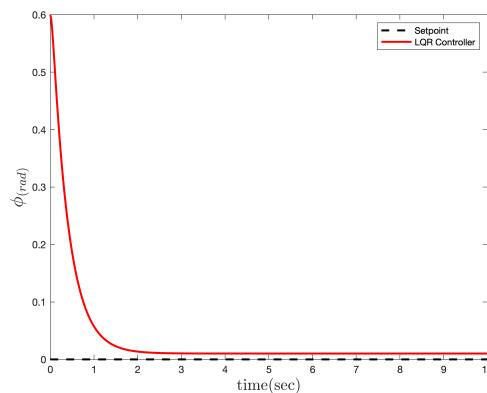
$$\mathbf{K}_{LQR} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (4)$$

در رابطه فوق، ماتریس \mathbf{P} بیانگر پاسخ معادله ریکاتی زیر است:

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{A}^T \mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t) \mathbf{A} - \mathbf{P}(t) \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) + \mathbf{Q} \quad (5)$$

در شبیه‌سازی برای بھینه‌سازی ضرایب وزنی LQR از روش بھینه‌سازی TCACS³⁴ استفاده شده است. تابع هزینه TCACS به صورت ITSE⁴ در نظر گرفته شده است. ضرایب وزنی خروجی بھینه‌سازی در پایین آورده شده است.

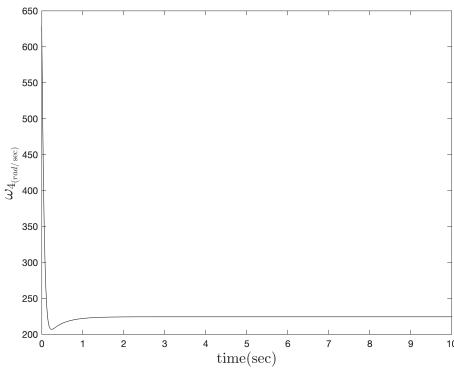
$$\mathbf{Q}_{LQR} = \begin{bmatrix} 0.5215 & 0 \\ 0 & 0.0745 \end{bmatrix}, \quad R_{LQR} = 0.0001 \quad (6)$$



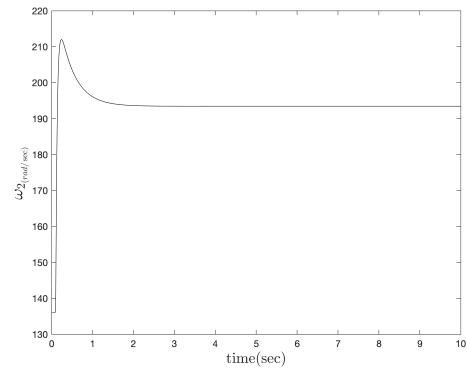
شکل ۱: عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

³Tabu Continuous Ant Colony System

⁴Integral Time Square Error



(ب) موتور شماره چهار



(\tilde{l}) 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. در بخش ؟؟ شبیه‌سازی کanal رول استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش ؟؟ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQDG از روش بهینه‌سازی [۴] استفاده شده است. تابع هزینه TCACS به صورت ITSE در نظر گرفته شده است. ضرایب وزنی خروجی بهینه‌سازی در پایین آورده شده است.

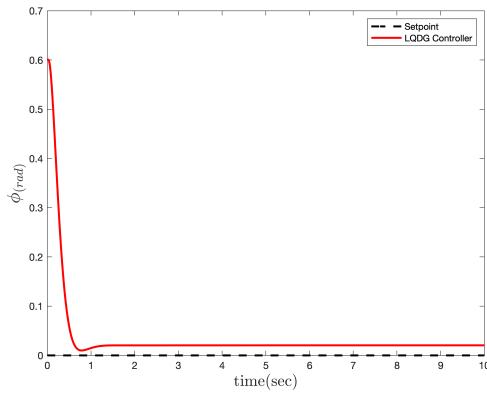
$$Q_{LQDG} = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0.078 \end{bmatrix}, \quad R_{1_{LQDG}} = 1, \quad R_{2_{LQDG}} = 99.96 \quad (7)$$

در گام بعد، با حل معادله (؟؟) (برای سادگی ماتریس‌های وزنی \dot{Q}_1 و \dot{Q}_2 مساوی در نظر گرفته شده است) ماتریس \dot{K}_1 به صورت زیر به دست می‌آید.

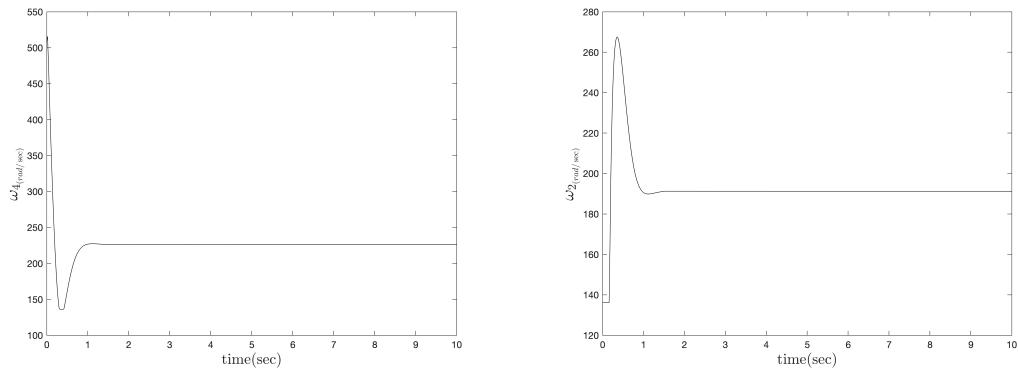
$$\dot{K}_1 = \begin{bmatrix} 286.0470 & 39.1188 \\ 39.1188 & 8.8510 \end{bmatrix} \quad (8)$$

در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (؟؟) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$u_1 = - \begin{bmatrix} 39.1188 & 8.8510 \end{bmatrix} x(t) \quad (9)$$



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



(ا) موتور شماره دو (ب) موتور شماره چهار

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

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۳)، کanal رول در حضور کنترل کننده LQDG در کمتر از پنج ثانیه به تعادل می‌رسد اما دارای خطای ماندگار است ولی خطای مانگار آن نسبت به کنترل کننده LQR بخش ۱-۰ کمتر است. به دلیل خطای ماندگار، در بخش ۲؟؟ انتگرال‌گیر به کنترل کننده اضافه می‌شود تا خطای ماندگار استند را کم کند. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل کننده LQIDG در بخش ۲؟؟ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی از روش بهینه‌سازی TCACS [۴] استفاده شده است.تابع هزینه ITSE به صورت LQIDG

نظر گرفته شده است. ضرایب وزنی خروجی بهینه سازی در پایین آورده شده است.

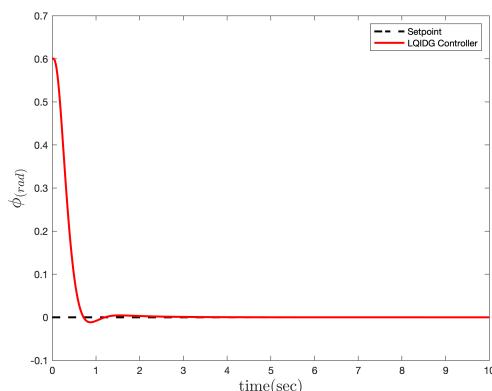
$$Q_{a_{LQIDG}} = \begin{bmatrix} 0.1707 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 837.8606 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 756.1341 \end{bmatrix}, \quad R_{1_{LQDG}} = 1, \quad R_{2_{LQDG}} = 7.7422 \quad (10)$$

در گام بعد، با حل معادله (۹۹) (برای سادگی ماتریس های وزنی \dot{Q}_{a_1} و \dot{Q}_{a_2} مساوی در نظر گرفته شده است) ماتریس K_1 به صورت زیر به دست می آید.

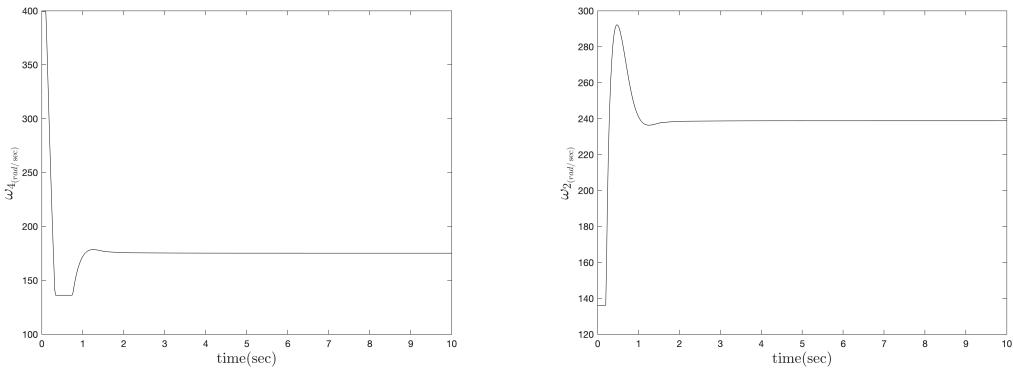
$$K_{a_1} = \begin{bmatrix} 10924.84 & 39.83 & 1014.34 & -10629.93 \\ 39.83 & 8.40 & 27.22 & 11.70 \\ 1014.34 & 27.22 & 1047.80 & -756.13 \\ -10658.93 & 11.70 & -756.13 & 10658.93 \end{bmatrix} \quad (11)$$

در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (۹۹) به صورت زیر به دست می آید.

$$u_1 = - \begin{bmatrix} 28.1410 & 8.4017 & 27.2223 & 11.6894 \end{bmatrix} x_a(t) \quad (12)$$



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



(ب) موتور شماره چهار

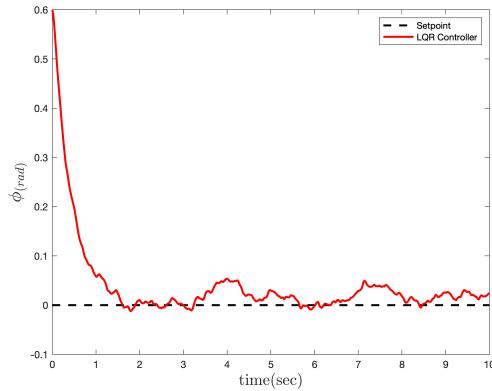
(ل) موتور شماره دو

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

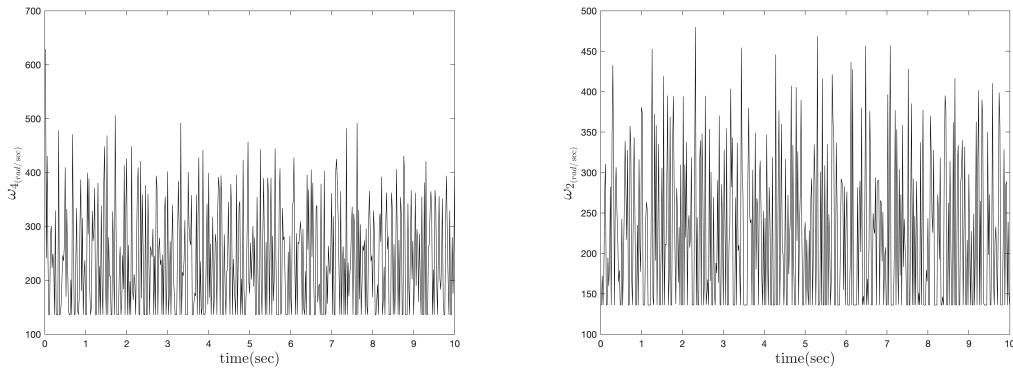
بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۵)، کanal رول در حضور کنترل‌کننده LQIDG در حدود پنج ثانیه به تعادل می‌رسد و خطای ماندگار آن به دلیل وجود انтگرال‌گیر در حدود صفر است.

۲-۱-۰ بررسی عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز اندازه‌گیری

در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQR پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQR از روش بهینه‌سازی TCACS [۴] استفاده شده است.



شکل ۷: عملکرد LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

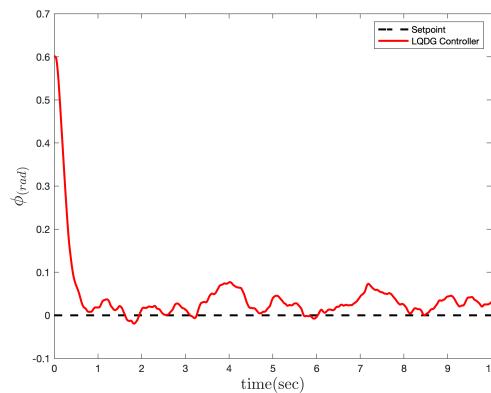


(ب) موتور شماره چهار

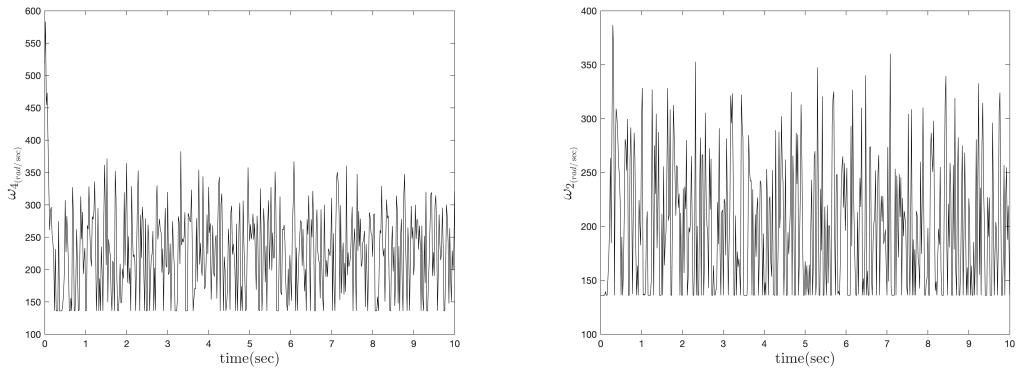
(l) موتور شماره دو

شکل ۸: 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.



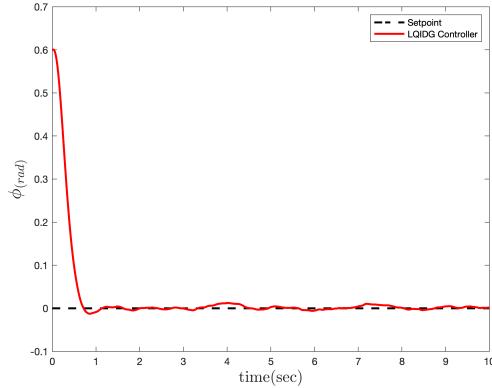
شکل ۹: عملکرد کنترل‌کننده LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



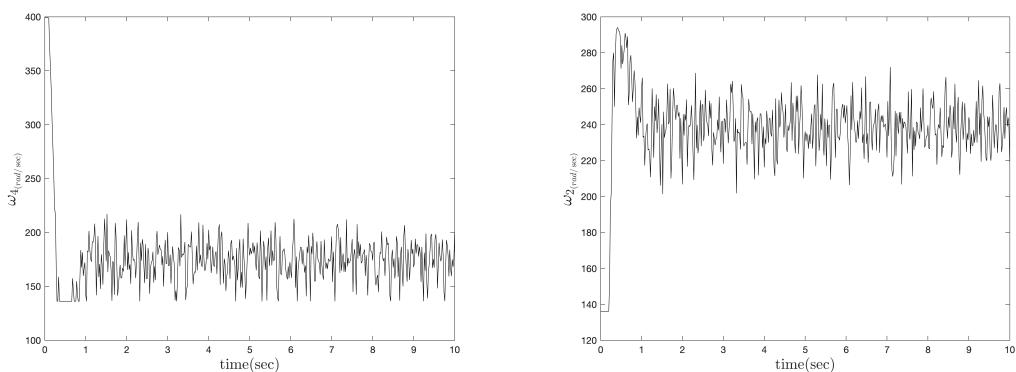
(ب) موتور شماره چهار

(l) موتور شماره دو

شکل ۱۰: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



شکل ۱۱: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره چهار

(l) موتور شماره دو

شکل ۱۲: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر)

۲-۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول-پیچ

در بخش ?? شبیه‌سازی کانال رول-پیچ استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ?? بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۴] استفاده شده است. تابع هزینه TCACS به صورت ITSE در نظر گرفته شده است. ضرایب وزنی خروجی بهینه‌سازی در پایین آورده شده است. برای طراحی کنترل‌کننده LQIDG ضرایب وزنی R_1 و R_2 برای کانال‌های مختلف یکی فرض شده است.

$$Q_{a_{LQIDG,roll}} = \begin{bmatrix} 585.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 31.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 83.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Q_{a_{LQIDG,pitch}} = \begin{bmatrix} 546.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 311.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.22 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{1_{LQDG}} = 1, \quad R_{2_{LQDG}} = 7.7422 \quad (13)$$

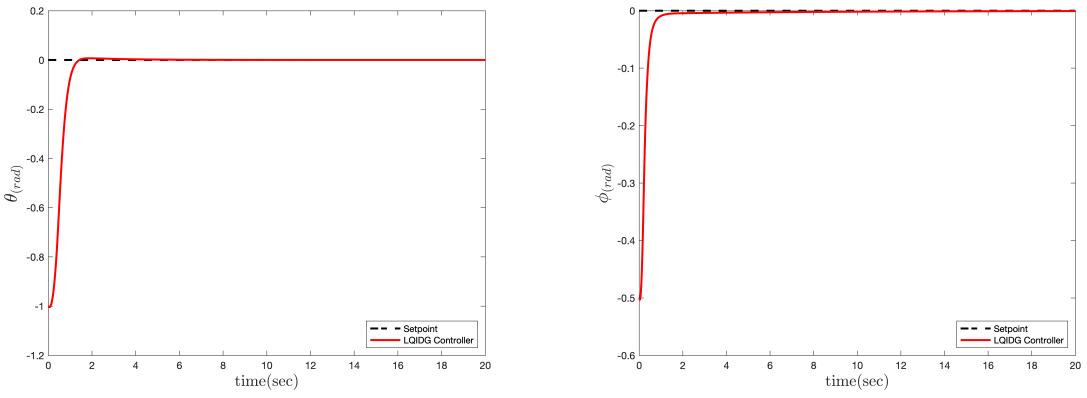
در گام بعد، با حل معادله (??) (برای سادگی ماتریس‌های وزنی \dot{Q}_{a_2} و \dot{Q}_{a_1} مساوی در نظر گرفته شده است) ماتریس \dot{K}_1 به صورت زیر به دست می‌آید.

$$K_{a_1,roll} = \begin{bmatrix} 1720.86 & 80.29 & 187.71 & -8.57 \\ 80.29 & 20.44 & 8.11 & 0.53 \\ 187.77 & 8.11 & 686.56 & -0.02 \\ -8.57 & 0.53 & -0.02 & 9.93 \end{bmatrix}, K_{a_1,pitch} = \begin{bmatrix} 243.90 & 25.01 & 80.29 & -9.50 \\ 25.01 & 7.41 & 7.33 & 0 \\ 80.29 & 7.33 & 239.14 & 0 \\ -9.50 & 0 & 0 & 9.50 \end{bmatrix} \quad (14)$$

در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (??) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$u_{1,roll} = - \begin{bmatrix} 79.7522 & 20.4432 & 8.1058 & 0.5344 \end{bmatrix} x_{a,roll} \quad (15)$$

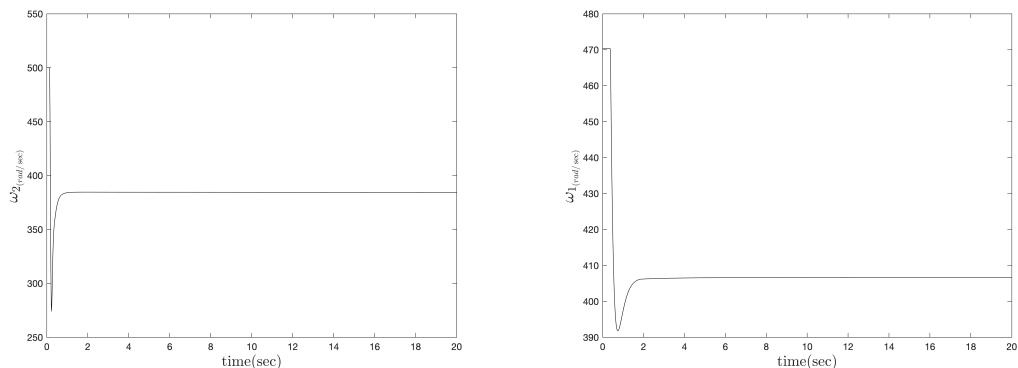
$$u_{1,pitch} = - \begin{bmatrix} 25.0112 & 7.40730 & 7.3280 & 0.0010 \end{bmatrix} x_{a,pitch}$$



(ب) تغییرات زاویه پیچ

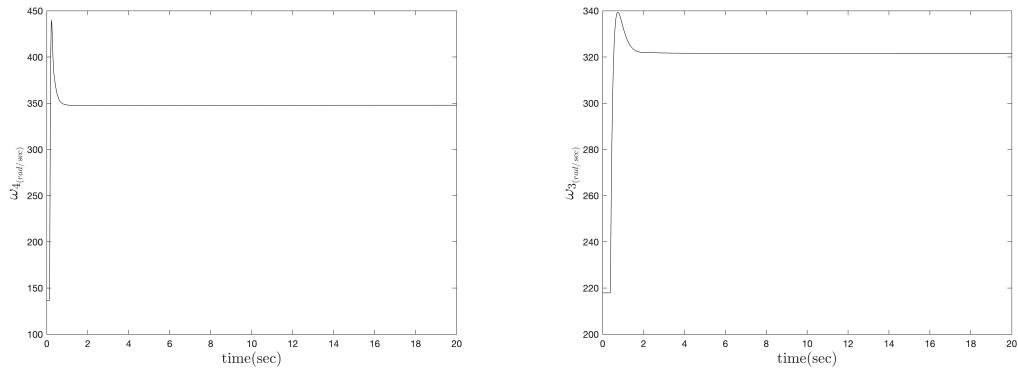
(ا) تغییرات زاویه رول

شکل ۱۳: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



(ب) موتور شماره دو

(ا) موتور شماره یک



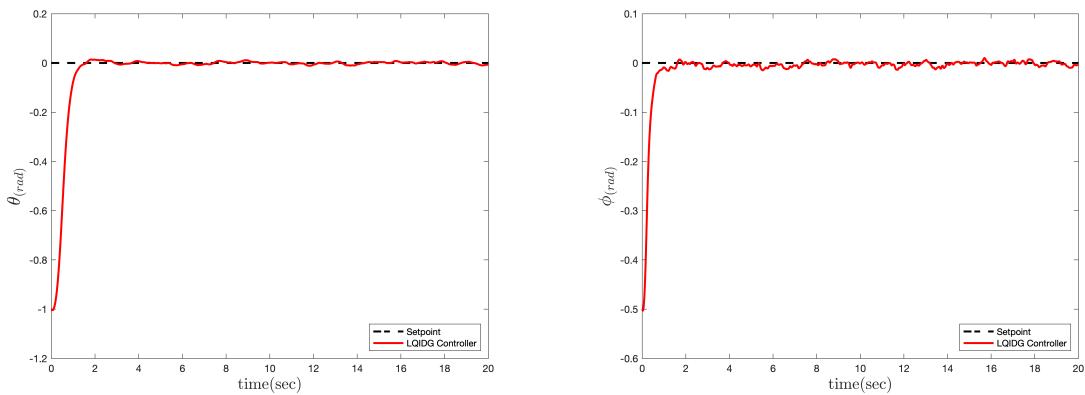
(د) موتور شماره چهار

(ج) موتور شماره سه

شکل ۱۴: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱۳)، 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.

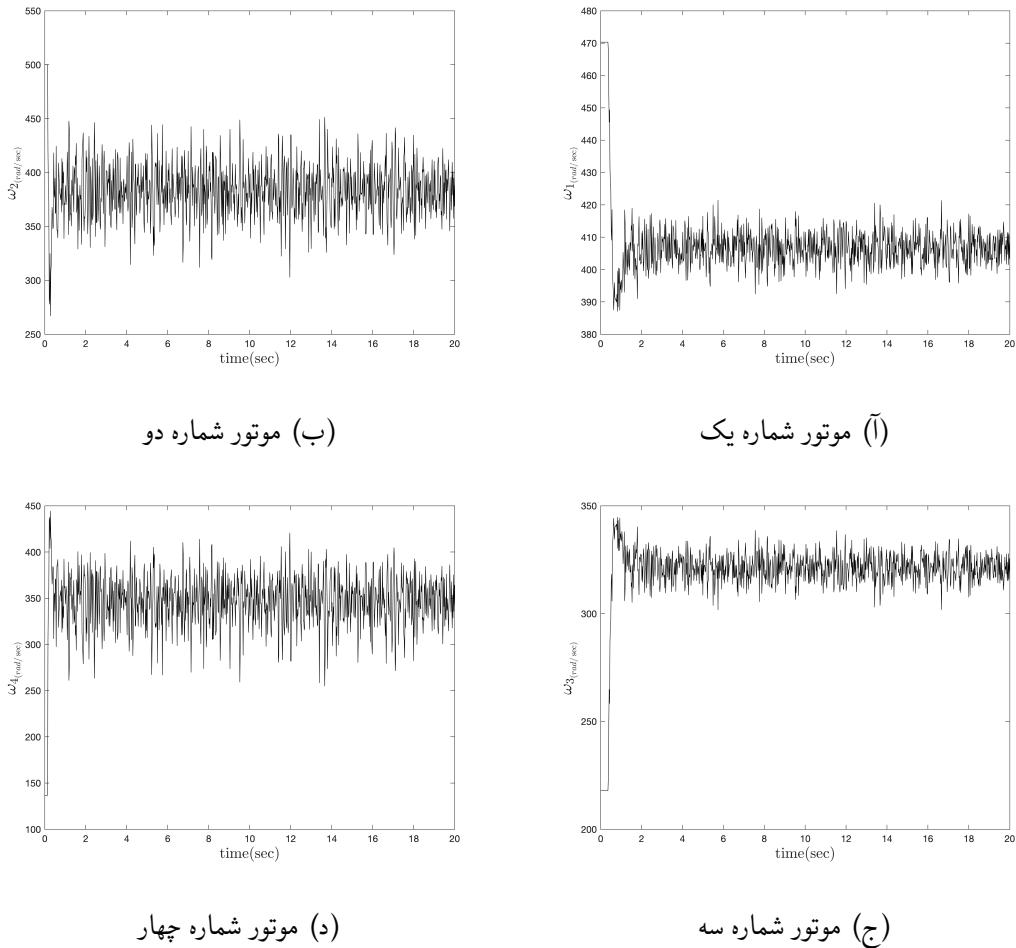
در بخش ؟؟ شبیه‌سازی کanal رول-پیچ استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ؟؟ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۴] استفاده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ

(ا) تغییرات زاویه رول

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



شکل ۱۶: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱۳)، 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.

۳-۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کanal رول-پیچ-یا و

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 ؟؟ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۴] استفاده شده است. تابع هزینه TCACS به صورت ITSE در نظر گرفته شده است. ضرایب وزنی خروجی بهینه‌سازی در پایین

آورده شده است. برای طراحی کنترل‌کننده LQIDG ضرایب وزنی R_1 و R_2 برای کانال‌های مختلف یکی فرض شده است.

۱-۳-۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی

$$Q_{a_{LQIDG_{roll}}} = \begin{bmatrix} 631.85 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 214.28 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 7.91 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 \end{bmatrix}, Q_{a_{LQIDG_{pitch}}} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 873.93 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 9853.09 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.12 \end{bmatrix}$$

$$Q_{a_{LQIDG_{yaw}}} = \begin{bmatrix} 0.03 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.17 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.81 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 33333.45 \end{bmatrix} \times 10^{-4}, R_{1_{LQDG}} = 1, R_{2_{LQDG}} = 1.2577$$

در گام بعد، با حل معادله (۲۲) (برای سادگی ماتریس‌های وزنی \dot{Q}_{a_2} و \dot{Q}_{a_1} مساوی در نظر گرفته شده است) ماتریس \dot{K}_1 به صورت زیر به دست می‌آید.

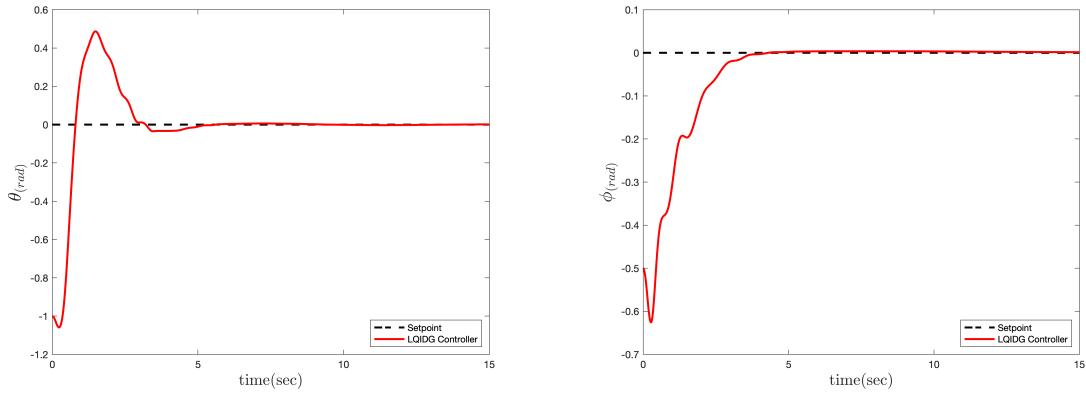
$$K_{a_1_{roll}} = \begin{bmatrix} 435.89 & 20.54 & 42.44 & -9.98 \\ 20.54 & 11.93 & 1.98 & -0.00 \\ 42.44 & 1.98 & 71.49 & -0.08 \\ -9.98 & -0.00 & -0.08 & 9.93 \end{bmatrix}, K_{a_1_{pitch}} = \begin{bmatrix} 2430.43 & 59.59 & 3128.26 & -11.75 \\ 59.59 & 23.52 & 74.08 & 0.00 \\ 3128.26 & 74.08 & 7851.78 & -0.12 \\ -11.75 & 0.00 & -0.12 & 11.75 \end{bmatrix}$$

$$K_{a_1_{yaw}} = \begin{bmatrix} 57.75 & 1.46 & 3.56 & -54.52 \\ 1.46 & 1.27 & 0.10 & -0.00 \\ 3.56 & 0.10 & 0.24 & -3.34 \\ -54.52 & -0.00 & -3.34 & 54.51 \end{bmatrix}$$

(۱۶)

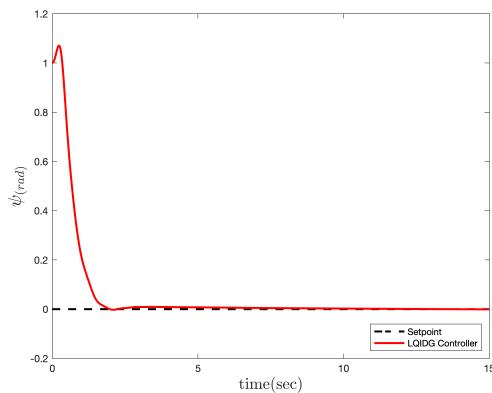
در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (۲۲) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} u_{1_{roll}} &= - \begin{bmatrix} 20.5410 & 11.9267 & 1.9771 & 0.0021 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{a_{roll}} \\ u_{1_{pitch}} &= - \begin{bmatrix} 59.5923 & 23.5197 & 74.0822 & 0.000 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{a_{pitch}} \\ u_{1_{yaw}} &= - \begin{bmatrix} 1.45710 & 1.27300 & 0.0999 & 0.0041 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{a_{yaw}} \end{aligned} \quad (۱۷)$$



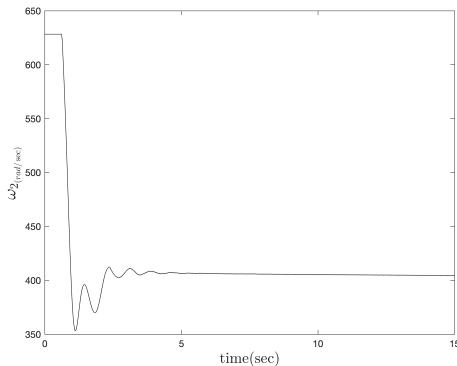
(ب) تغییرات زاویه پیچ

(ا) تغییرات زاویه رول

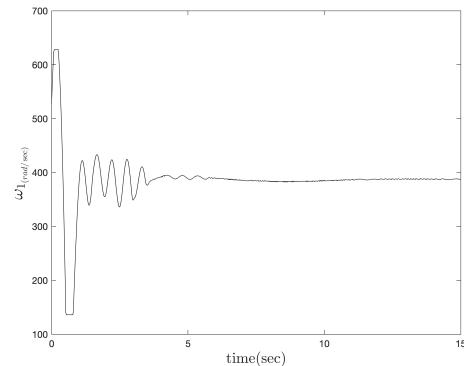


(ج) تغییرات زاویه یاو

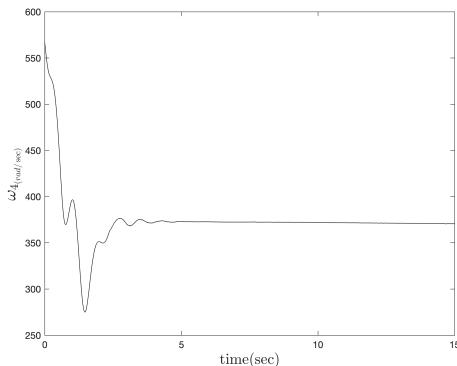
شکل ۱۷: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



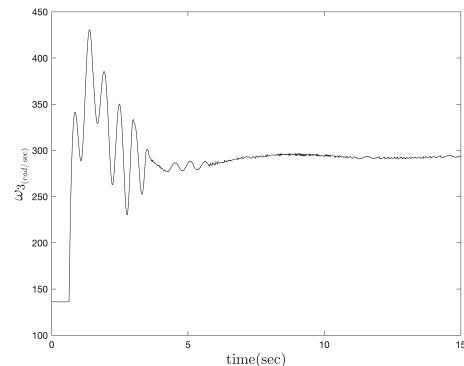
(ب) موتور شماره دو



(i) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

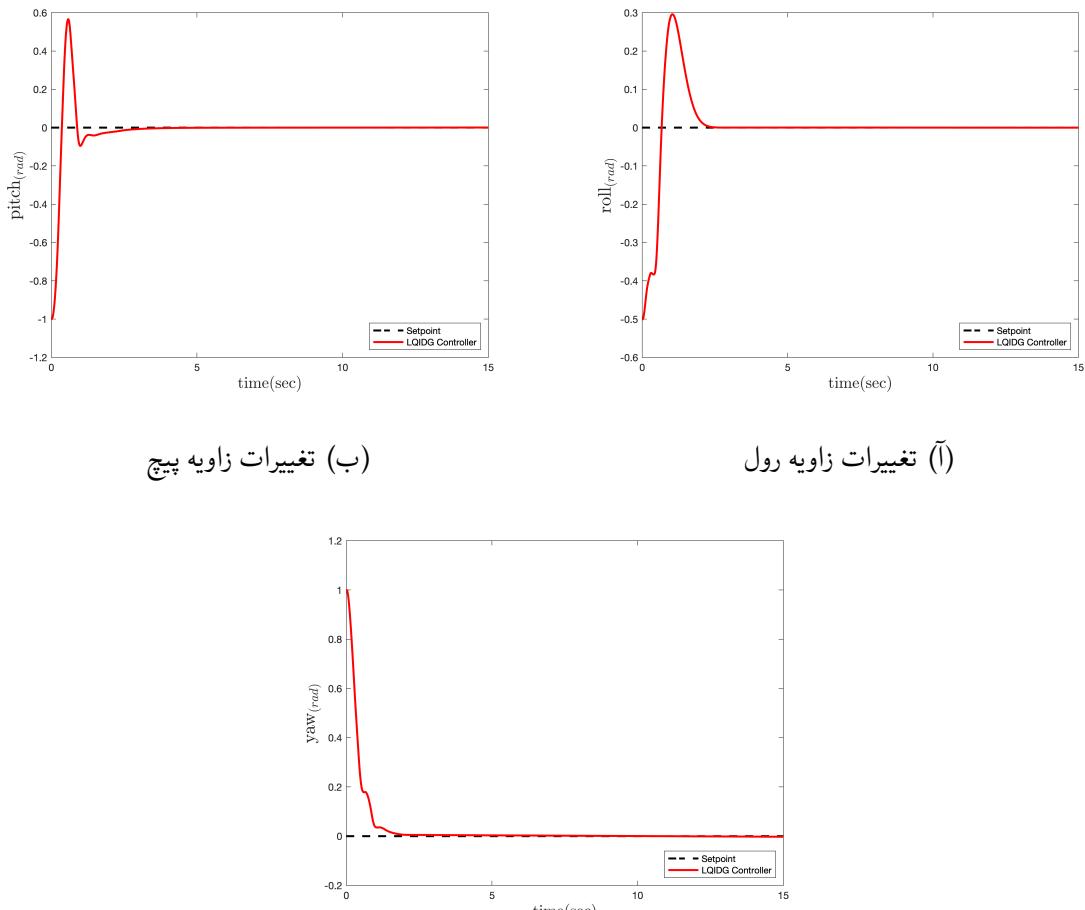
شکل ۱۸: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

شیوه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی ۲-۳-۰

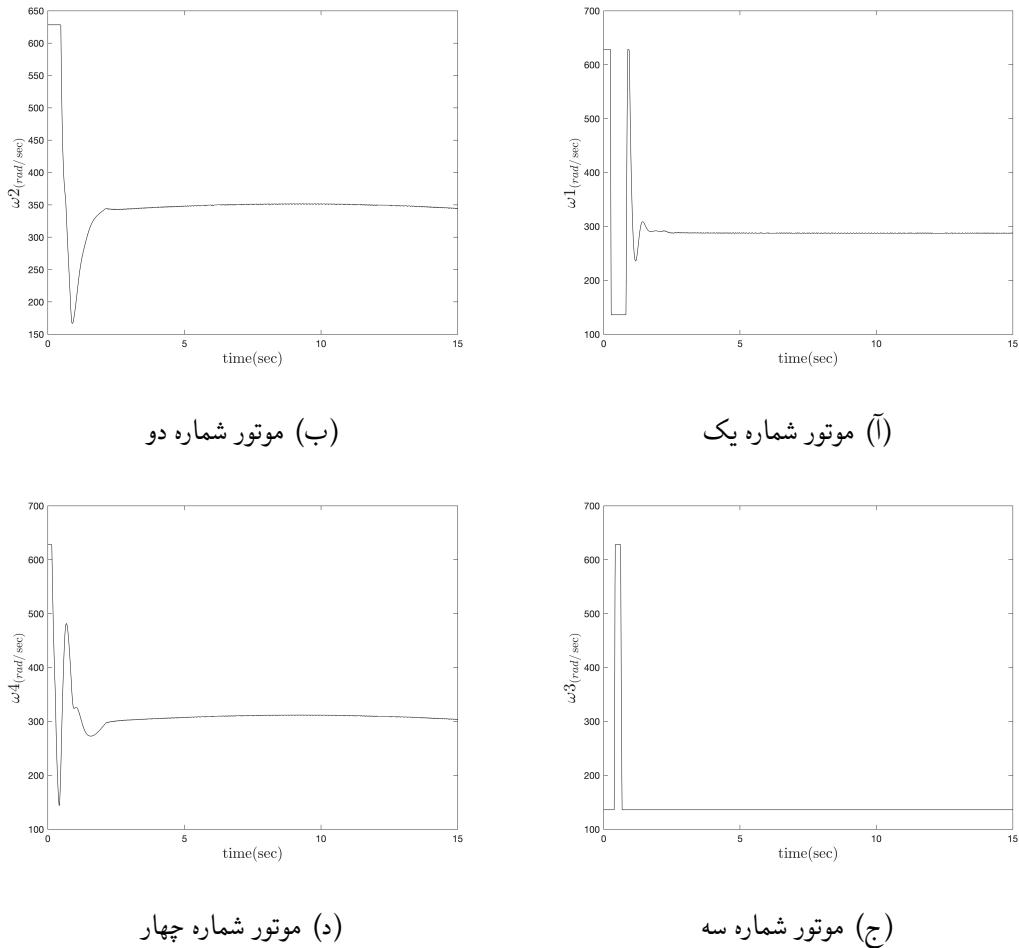
$$Q_{a_{LQIDG}} = \begin{bmatrix} 631.85 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 214.28 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 7.91 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 873.93 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 9853.09 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.12 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 3.33 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -0.00 & 101.23 & 5.33 & -0.00 & 48.29 & 45.40 & 0.00 & 0.07 & 0.34 & -0.00 & -0.00 & 0.15 \\ 241.81 & -0.00 & -5.33 & 86.14 & -0.00 & -45.40 & 57.31 & 0.00 & -0.34 & 0.00 & -0.00 & -0.15 \\ -0.00 & -101.23 & 5.33 & -0.00 & -48.29 & 45.40 & 0.00 & -0.07 & 0.34 & -0.00 & 0.00 & 0.15 \\ -241.81 & -0.00 & -5.33 & -86.14 & -0.00 & -45.40 & -57.31 & 0.00 & -0.34 & -0.00 & -0.00 & -0.15 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{K}_{a_1} = \begin{bmatrix} 34004 & -0 & -0 & 11130 & -0 & -0 & 14810 & 0 & -0 & -9 & -0 & -0 \\ -0 & 7396 & 0 & -0 & 3498 & 0 & 0 & 11 & 0 & -0 & -10 & 0 \\ -0 & 0 & 1504 & -0 & 0 & 10019 & 0 & -0 & 95 & -0 & 0 & -27 \\ 11129 & -0 & -0 & 3965 & -0 & -0 & 2638 & 0 & -0 & 0 & -0 & -0 \\ -0 & 3498 & 0 & -0 & 1669 & 0 & 0 & 3 & 0 & -0 & -0 & 0 \\ -0 & 0 & 10019 & -0 & 0 & 85406 & 0 & -0 & 630 & -0 & 0 & 277 \\ 14810 & 0 & 0 & 2638 & 0 & 0 & 24372 & -0 & 0 & -0 & 0 & 0 \\ 0 & 11 & -0 & 0 & 3 & -0 & -0 & 11 & -0 & 0 & -0 & -0 \\ -0 & 0 & 95 & -0 & 0 & 630 & 0 & -0 & 7 & -0 & 0 & -2 \\ -10 & -0 & -0 & -0 & -0 & -0 & -0 & 0 & -0 & 10 & -0 & -0 \\ -0 & -10 & 0 & -0 & -0 & 0 & 0 & -0 & 0 & -0 & 9 & 0 \\ -0 & 0 & -27 & -0 & 0 & 277 & 0 & -0 & -2 & -0 & 0 & 59 \end{bmatrix}$$



شکل ۱۹: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



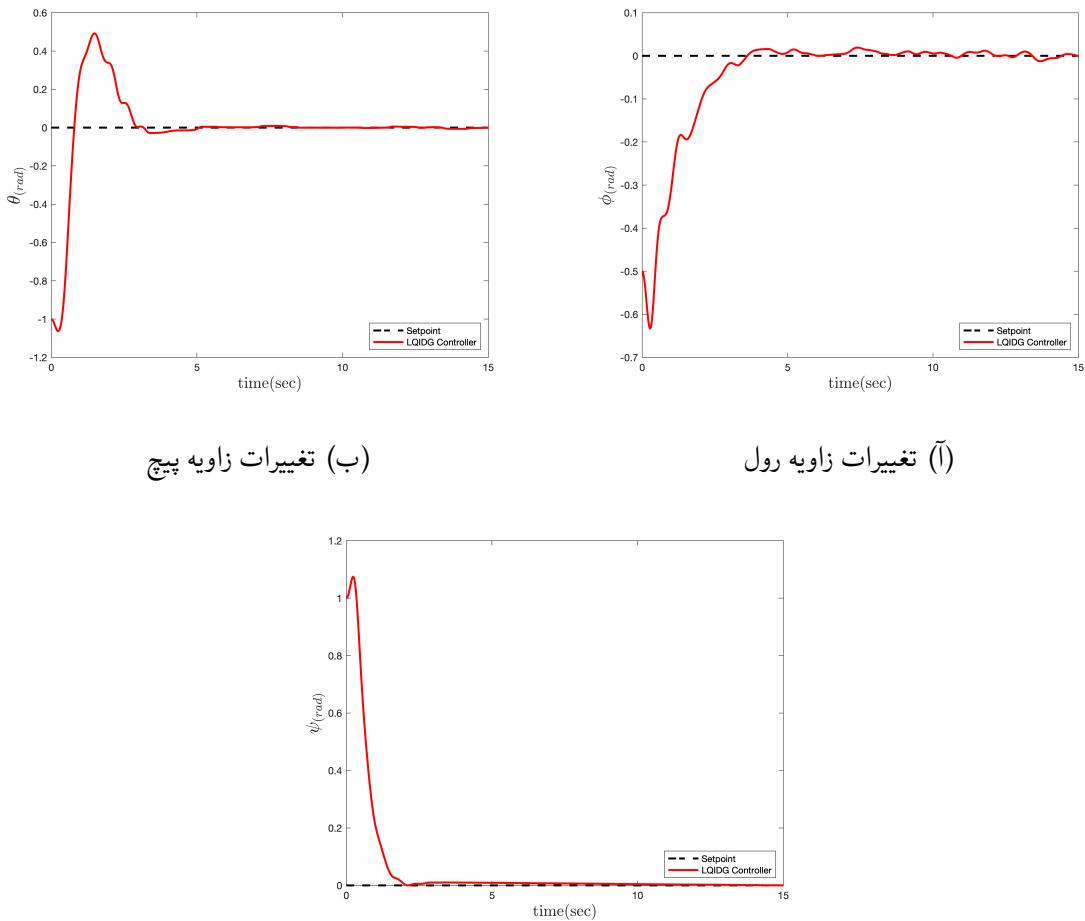
شکل ۲۰: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

۴-۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول-پیچ-یا و

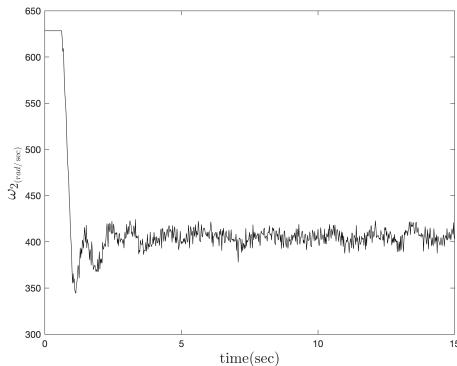
در بخش ؟؟ شبیه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره انجام شد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش‌های ؟؟

۱-۴-۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی

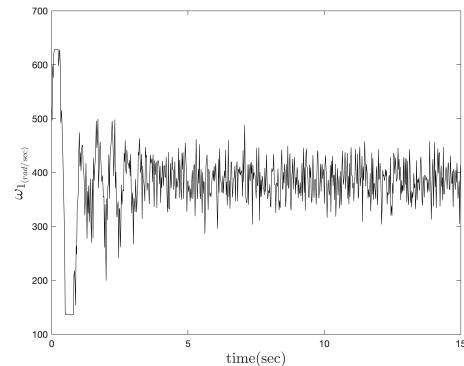
بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQIDG از روش بهینه‌سازی TCACS [۴] استفاده شده است.



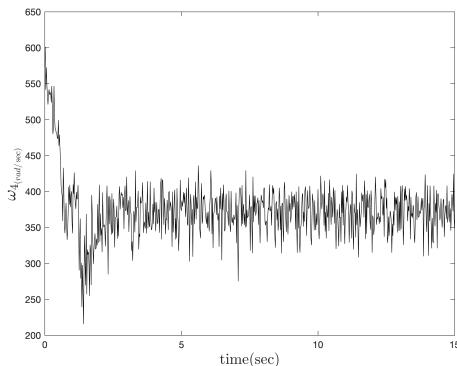
شکل ۲۱: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



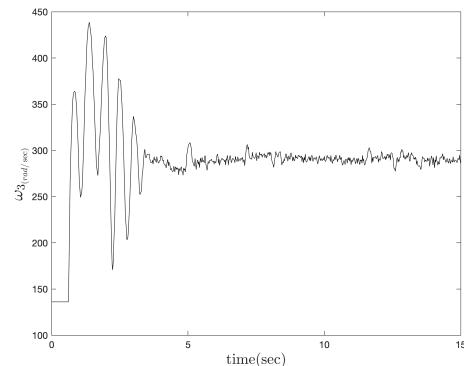
(ب) موتور شماره دو



(i) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار

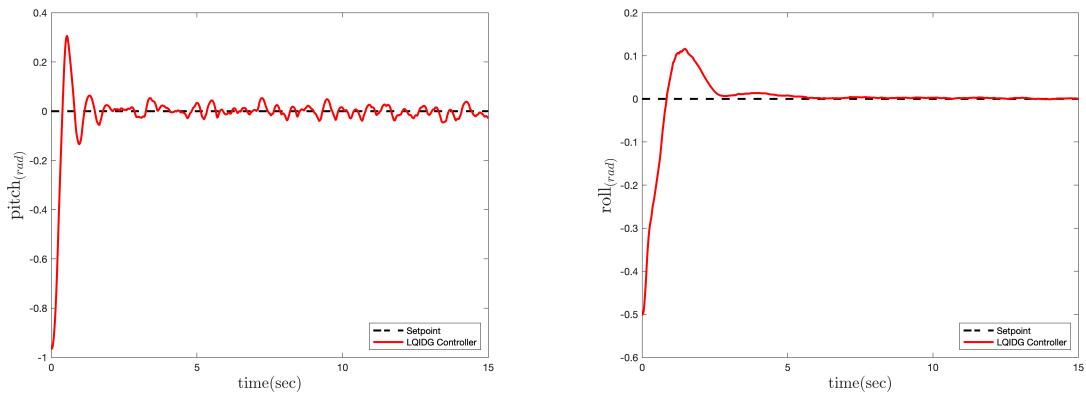


(ج) موتور شماره سه

شکل ۲۲: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

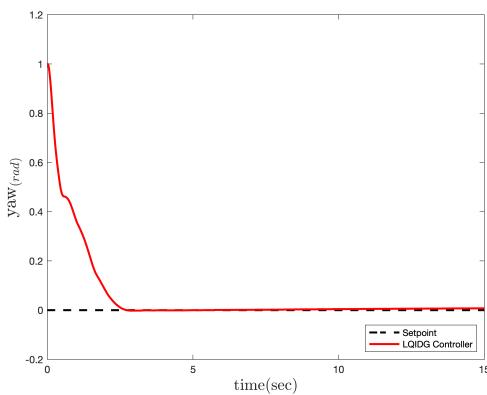
۴-۴-۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۴-۳)، 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.



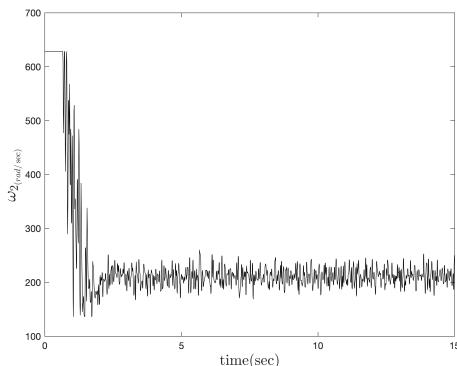
(ب) تغییرات زاویه پیچ

(ا) تغییرات زاویه رول

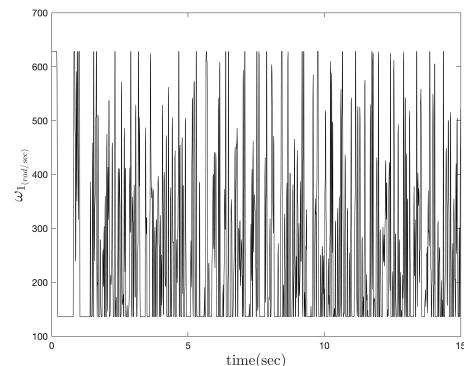


(ج) تغییرات زاویه یاو

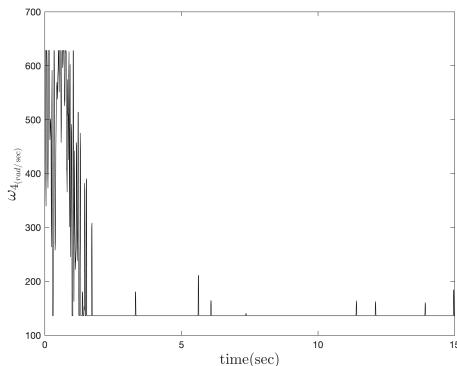
شکل ۲۳: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



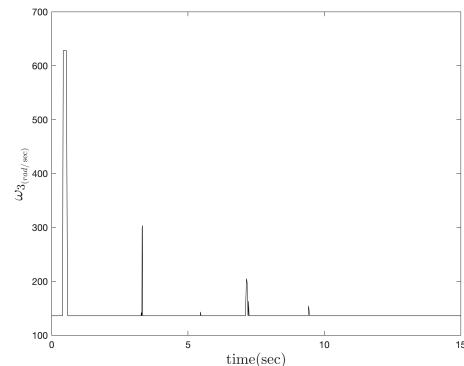
(ب) موتور شماره دو



(i) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

شکل ۲۴: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یا و (تعقیب ورودی صفر)

مراجع

- [1] B. Djehiche, A. Tcheukam, and H. Tembine. Mean-field-type games in engineering. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 1(1):18–73, 2017.
- [2] R. Pordal. Control of a single axis attitude control system using a linear quadratic integral regulator based on the differential game theory.
- [3] K. Ogata. *Modern Control Engineering*. Instrumentation and controls series. Prentice Hall, 2010.
- [4] 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