



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

تیر ۱۴۰۱

سلام افلا

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^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، مدل مبنا، تنظیم‌کننده مربعی خطی

¹Game Theory

²Nash Equilibrium

فهرست مطالب

۱-۰	طراحی و شبیه سازی کنترل کننده برای کانال رول-پیچ	۱
۲-۰	طراحی و شبیه سازی کنترل کننده برای کانال رول-پیچ-یاو	۳
۱-۲-۰	شبیه سازی کنترل کننده به صورت سه کانال تک ورودی	۴
۲-۲-۰	شبیه سازی کنترل کننده به صورت چهار ورودی	۷

فهرست شکل‌ها

۱	عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۲
۲	فرمان کنترلی موتورهای در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)	۳
۳	عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)	۵
۴	فرمان کنترلی موتورهای در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)	۶
۵	عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)	۹
۶	فرمان کنترلی موتورهای در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)	۱۰

فهرست جدول‌ها

۱-۰ 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 [۱۶] 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.

$$Q_{aLQIDG_{roll}} = \begin{bmatrix} 585.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 31.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 83.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, Q_{aLQIDG_{pitch}} = \begin{bmatrix} 546.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 311.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.22 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_{1LQDG} = 1, \quad R_{2LQDG} = 7.7422$$

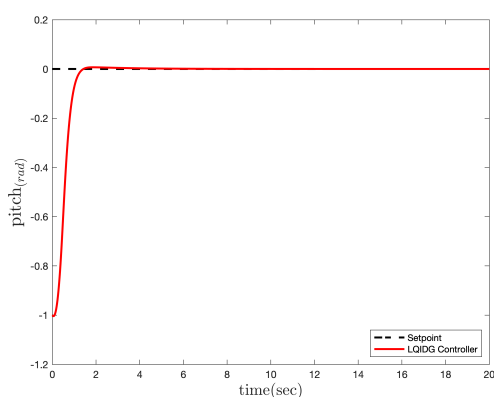
در گام بعد، با حل معادله (؟؟) (برای سادگی ماتریس‌های وزنی \dot{Q}_{a_1} و \dot{Q}_{a_2} مساوی در نظر گرفته

شده‌است) ماتریس \dot{K}_1 به صورت زیر به دست می‌آید.

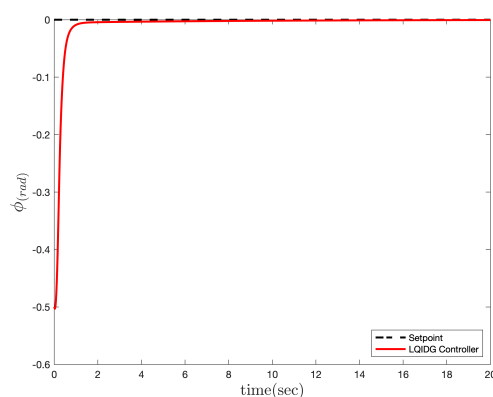
$$(۲) \quad K_{a_{1roll}} = \begin{bmatrix} 1720.86 & 80.29 & 187.71 & -8.57 \\ 80.29 & 20.44 & 8.11 & 0.53 \\ 187.77 & 8.11 & 686.56 & -0.02 \\ -8.57 & 0.53 & -0.02 & 9.93 \end{bmatrix}, K_{a_{1pitch}} = \begin{bmatrix} 243.90 & 25.01 & 80.29 & -9.50 \\ 25.01 & 7.41 & 7.33 & 0 \\ 80.29 & 7.33 & 239.14 & 0 \\ -9.50 & 0 & 0 & 9.50 \end{bmatrix}$$

در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (۳) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$(۳) \quad \begin{aligned} u_{1roll} &= - \begin{bmatrix} 79.7522 & 20.4432 & 8.1058 & 0.5344 \end{bmatrix} x_{a_{roll}} \\ u_{1pitch} &= - \begin{bmatrix} 25.0112 & 7.40730 & 7.3280 & 0.0010 \end{bmatrix} x_{a_{pitch}} \end{aligned}$$

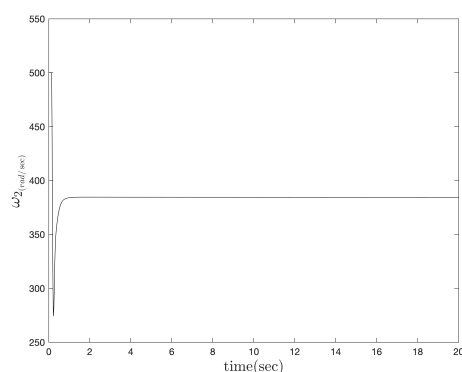


(ب) تغییرات زاویه پیچ

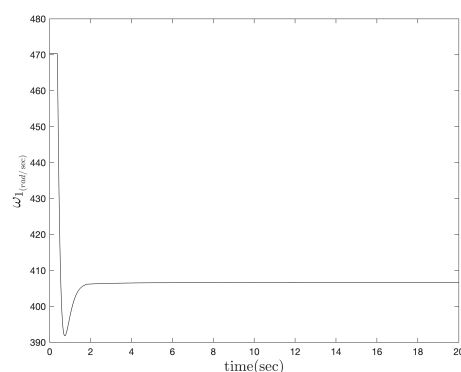


(آ) تغییرات زاویه رول

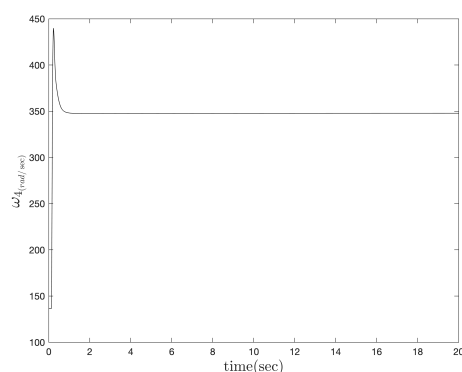
شکل ۱: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول و پیچ (تعقیب ورودی صفر)



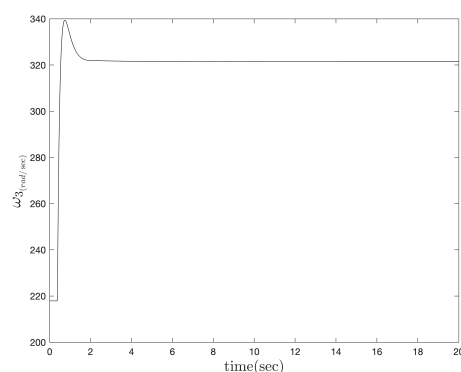
(ب) موتور شماره دو



(آ) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

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

بر اساس خروجی شبیه‌سازی (شکل ۱)، 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.

۲-۵ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول-پیچ-یاء

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 [۱۶] استفاده شده است. تابع هزینه TCACS به صورت ITSE در نظر گرفته شده است. ضرایب وزنی خروجی بهینه‌سازی در پایین

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

۱-۲-۰ شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی

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

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

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

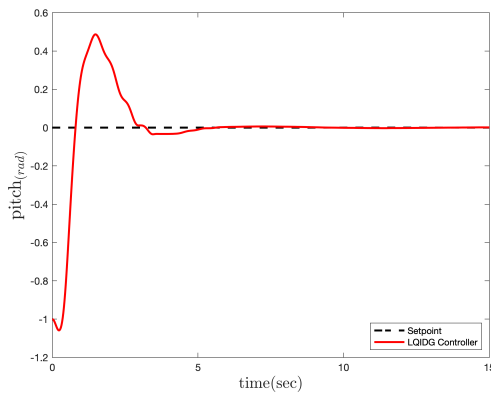
$$K_{a_{1_{roll}}} = \begin{bmatrix} 435.89 & 20.54 & 42.44 & -9.98 \\ 20.54 & 11.93 & 1.98 & -0.00 \\ 42.44 & 1.98 & 71.49 & -0.08 \\ -9.98 & -0.00 & -0.08 & 9.93 \end{bmatrix}, K_{a_{1_{pitch}}} = \begin{bmatrix} 2430.43 & 59.59 & 3128.26 & -11.75 \\ 59.59 & 23.52 & 74.08 & 0.00 \\ 3128.26 & 74.08 & 7851.78 & -0.12 \\ -11.75 & 0.00 & -0.12 & 11.75 \end{bmatrix}$$

$$K_{a_{1_{yaw}}} = \begin{bmatrix} 57.75 & 1.46 & 3.56 & -54.52 \\ 1.46 & 1.27 & 0.10 & -0.00 \\ 3.56 & 0.10 & 0.24 & -3.34 \\ -54.52 & -0.00 & -3.34 & 54.51 \end{bmatrix}$$

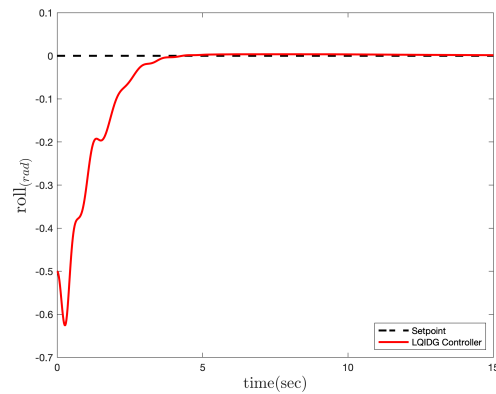
(۴)

در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (۵) به صورت زیر به دست می‌آید.

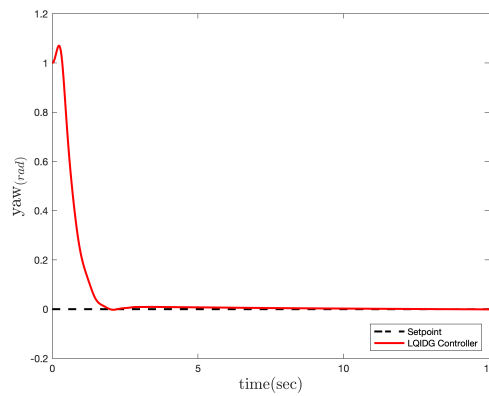
$$\begin{aligned} u_{1_{roll}} &= - \begin{bmatrix} 20.5410 & 11.9267 & 1.9771 & 0.0021 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{a_{roll}} \\ u_{1_{pitch}} &= - \begin{bmatrix} 59.5923 & 23.5197 & 74.0822 & 0.000 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{a_{pitch}} \\ u_{1_{yaw}} &= - \begin{bmatrix} 1.45710 & 1.27300 & 0.0999 & 0.0041 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{a_{yaw}} \end{aligned} \quad (5)$$



(ب) تغییرات زاویه پیچ

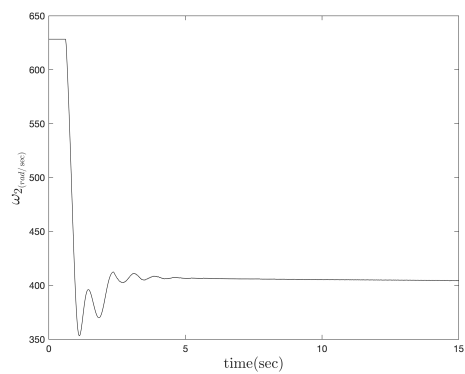


(آ) تغییرات زاویه رول

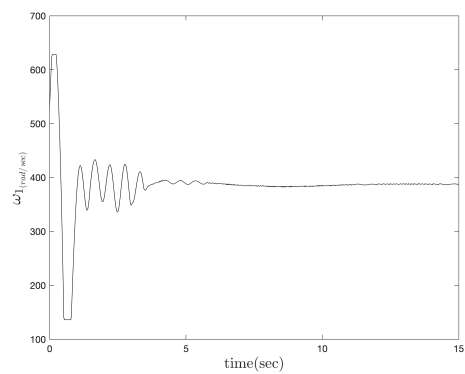


(ج) تغییرات زاویه یاء

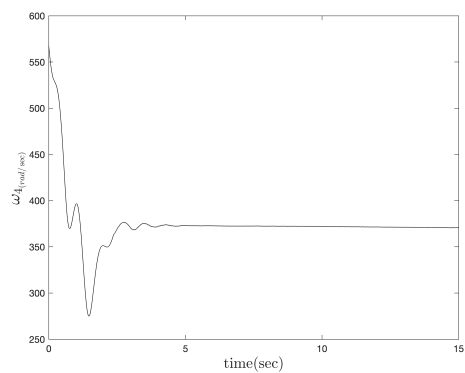
شکل ۳: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاء (تعقیب ورودی صفر)



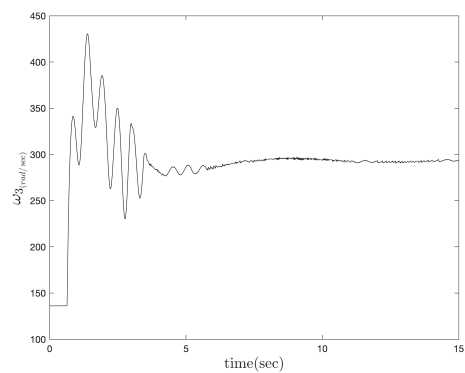
(ب) موتور شماره دو



(آ) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

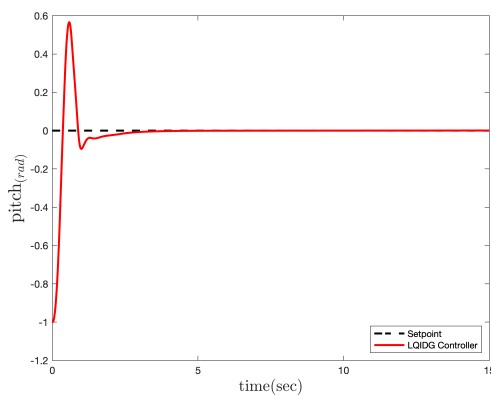
شکل ۴: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)

شبه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی ۲-۲-۰

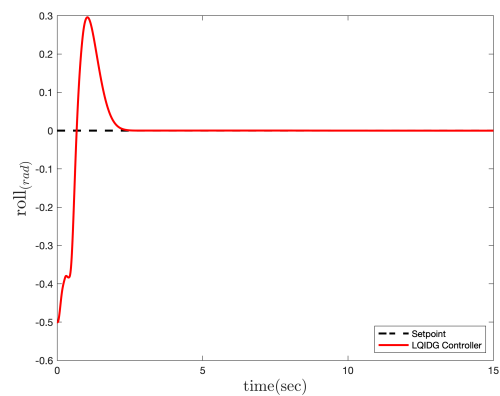
$$Q_{a_{LQIDG}} = \begin{bmatrix} 631.85 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 214.28 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 7.91 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00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

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

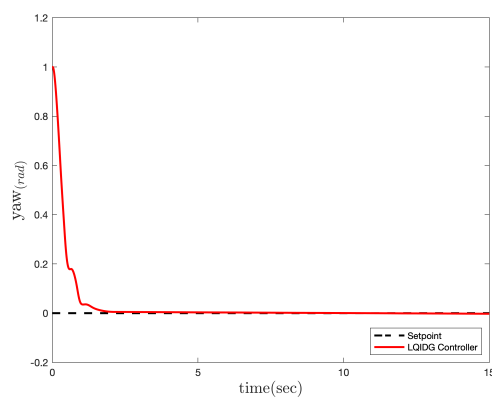
$$K_{a_1} = \begin{bmatrix} 34004 & -0 & -0 & 11130 & -0 & -0 & 14810 & 0 & -0 & -9 & -0 & -0 \\ -0 & 7396 & 0 & -0 & 3498 & 0 & 0 & 11 & 0 & -0 & -10 & 0 \\ -0 & 0 & 1504 & -0 & 0 & 10019 & 0 & -0 & 95 & -0 & 0 & -27 \\ 11129 & -0 & -0 & 3965 & -0 & -0 & 2638 & 0 & -0 & 0 & -0 & -0 \\ -0 & 3498 & 0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



(ب) تغییرات زاویه پیچ

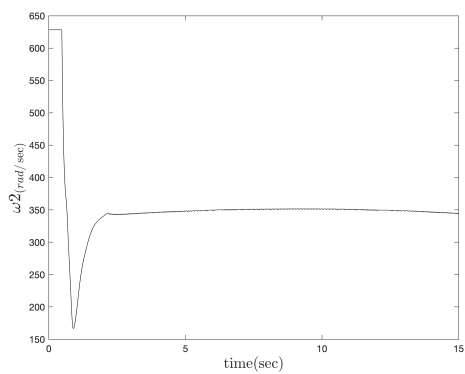


(آ) تغییرات زاویه رول

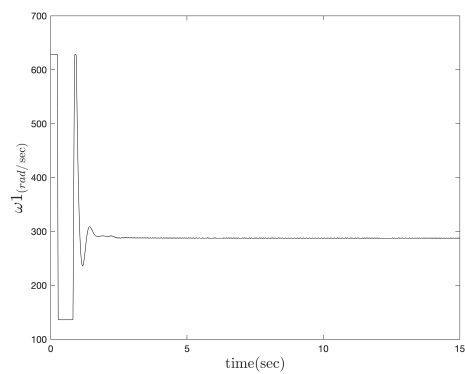


(ج) تغییرات زاویه یاو

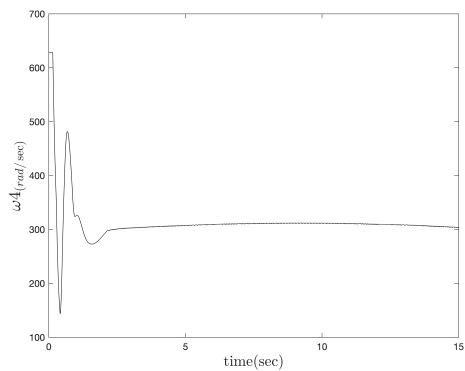
شکل ۵: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)



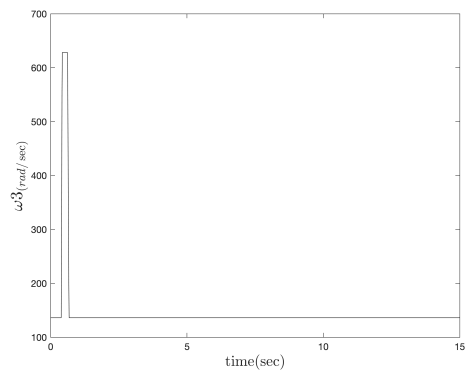
(ب) موتور شماره دو



(آ) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار



(ج) موتور شماره سه

شکل ۶: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول، پیچ و یاو (تعقیب ورودی صفر)

مراجع

- [1] L. Sprehelmeyer. *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 $se(3)$. 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] R. Pordal. Control of a single axis attitude control system using a linear quadratic integral regulator based on the differential game theory.

-
- [11] P. Abeshtan. Attitude control of a 3dof quadrotor stand using intelligent back-stepping approach. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2016.
 - [12] P. Zipfel. *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics*. AIAA education series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
 - [13] A. Sharifi. Real-time design and implementation of a quadcopter automatic landing algorithm taking into account the ground effect. *MSc Thesis (PhD Thesis)*, 2010.
 - [14] M. A. A. Bishe. Attitude control of a 3dof quadrotor stand using a heuristic nonlinear controller. January 2018.
 - [15] 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.
 - [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