



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 هادی نوبهاری

تیر ۱۴۰۱

سلام

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. همچنین از دوست عزیزم جناب آقای مهندس رضا پردال که نظرات ارزشمند او همواره راهگشای مشکلات بنده بود، تشکر می‌کنم. از پدر دلسوزم ممنونم که در انجام این پروژه مرا یاری نمود. در نهایت در کمال تواضع، با تمام وجود بر دستان مادرم بوسه می‌زنم که اگر حمایت بی‌دریغش، نگاه مهربانش و دستان گرمش نبود برگ برگ این دست نوشته و پروژه وجود نداشت.

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

۲	۱ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای استند سه درجه آزادی چهارپره
۲	۱-۱ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول
۳	۱-۱-۱ تعقیب مقدار مطلوب خروجی
۷	۲-۱-۱ بررسی عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز اندازه‌گیری

فهرست شکل‌ها

- ۱-۱ عملکرد کنترل‌کننده LQR در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) ۴
- ۲-۱ فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) ۴
- ۳-۱ عملکرد کنترل‌کننده LQDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) ۵
- ۴-۱ فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) ۵
- ۵-۱ عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) ۶
- ۶-۱ فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه رول (تعقیب ورودی صفر) ۷
- ۷-۱ عملکرد کنترل‌کننده LQR در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری ۷
- ۸-۱ فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری ۸
- ۹-۱ عملکرد کنترل‌کننده LQDG در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری ۸
- ۱۰-۱ فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری ۹
- ۱۱-۱ عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری ۹
- ۱۲-۱ فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری ۱۰

فهرست جدول‌ها

فصل ۱

طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای استند سه درجه آزادی چهارپره

در بخش‌های ؟؟ و ؟؟ کنترل‌کننده خطی مبتنی بر بازی دیفرانسیلی LQDG و LQIDG معرفی شد. در بخش ۱-۱ کانال رول چهارپره در حضور کنترل‌کننده‌های LQR، LQDG و LQIDG شبیه‌سازی شده‌است. سپس، در بخش‌های ؟؟ و ؟؟ به ترتیب شبیه‌سازی دو درجه آزادی و سه درجه آزادی در حضور کنترل‌کننده LQIDG انجام شده‌است.

۱-۱ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای کانال رول

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

۱-۱-۱ تعقیب مقدار مطلوب خروجی

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

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (۱-۱)$$

فرمان کنترلی بهینه LQR به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$u_i(t) = -K_{LQR}x(t) \quad (۲-۱)$$

که در رابطه فوق، ماتریس K_{LQR} بیانگر بهره بازخورد بهینه است. این بهره به گونه‌ای محاسبه می‌شود که تابع هزینه مربعی زیر کمینه شود:

$$J_i(u_1) = \int_0^T (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)) dt \quad (۳-۱)$$

در رابطه فوق، ماتریس‌های Q و R به ترتیب بیانگر میزان اهمیت انحراف متغیرهای حالت از مقادیر مطلوب و میزان تلاش کنترلی هستند. هره بازخورد بهینه برای کمینه‌کردن رابطه (۳-۱)، از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$K_{LQR} = R^{-1}B^T P \quad (۴-۱)$$

در رابطه فوق، ماتریس P بیانگر پاسخ معادله ریکاتی زیر است:

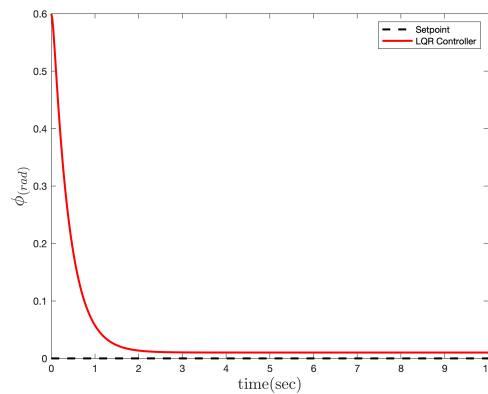
$$\dot{P}(t) = A^T P(t) + P(t)A - P(t)BR^{-1}B^T P(t) + Q \quad (۵-۱)$$

در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی LQR از روش بهینه‌سازی TCACS^۱ [۱۷] استفاده شده‌است. تابع هزینه ورودی TCACS به صورت ITSE^۲ در نظر گرفته شده‌است. ضرایب وزنی خروجی بهینه شده در پایین آورده شده‌است.

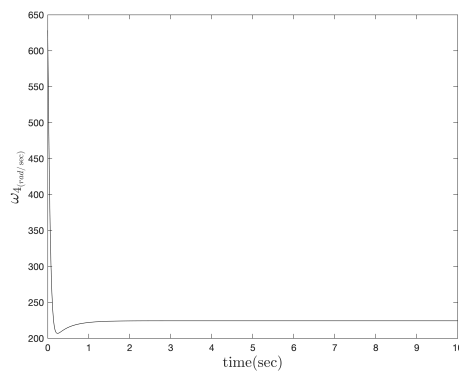
$$Q_{LQR} = \begin{bmatrix} 0.5215 & 0 \\ 0 & 0.0745 \end{bmatrix}, \quad R_{LQR} = 0.0001 \quad (۶-۱)$$

^۱Tabu Continuous Ant Colony System

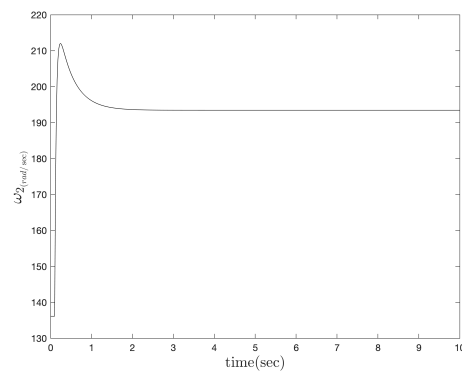
^۲Integral Time Square Error



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



(ب) موتور شماره چهار



(آ) موتور شماره دو

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

همانطور که از شکل ۱-۱ مشخص است، زمان نشست در حدود دو ثانیه است. خطای ماندگار دارد. در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQDG در بخش؟؟ بررسی شده‌است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی مانند قسمت قبل عمل شده‌است.

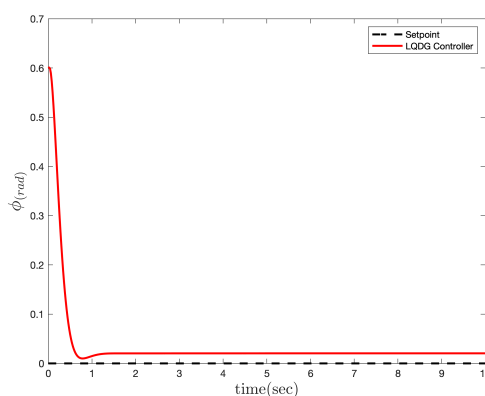
$$Q_{LQDG} = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0.078 \end{bmatrix}, \quad R_{1LQDG} = 1, \quad R_{2LQDG} = 99.96 \quad (۷-۱)$$

در گام بعد، با حل معادله (؟؟) (برای سادگی ماتریس‌های وزنی Q_1 و Q_2 مساوی در نظر گرفته شده‌است) ماتریس K_1 به صورت زیر به دست می‌آید.

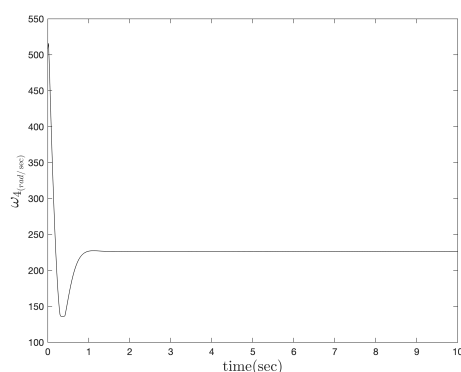
$$K_1 = \begin{bmatrix} 286.0470 & 39.1188 \\ 39.1188 & 8.8510 \end{bmatrix} \quad (۸-۱)$$

در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (۹-۱) به صورت زیر به دست می‌آید.

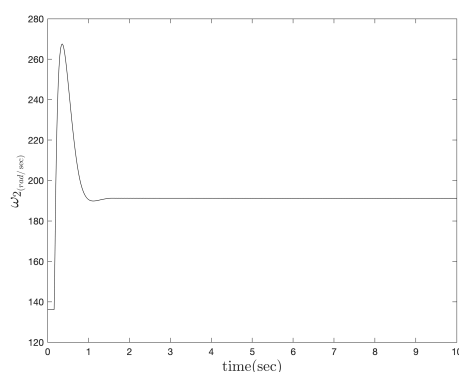
$$u_1 = - \begin{bmatrix} 39.1188 & 8.8510 \end{bmatrix} x(t) \quad (9-1)$$



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



(ب) موتور شماره چهار



(آ) موتور شماره دو

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

همانطور که از شکل ۳-۱ مشخص است، زمان نشست در حدود دو ثانیه است. خطای ماندگار دارد.

در این بخش به بررسی عملکرد چهارپره در حضور کنترل‌کننده LQIDG پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده LQIDG در بخش ۹-۱ بررسی شده است. در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی مانند قسمت قبل

عمل شده است.

(۱۰-۱)

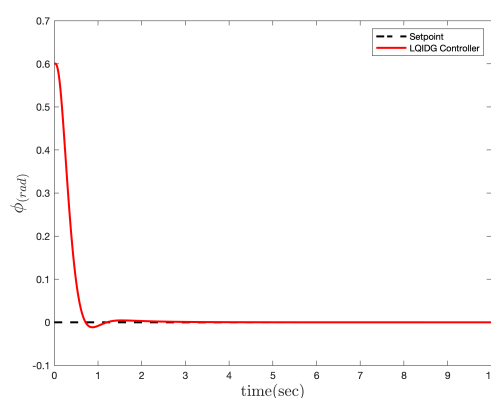
$$Q_{aLQIDG} = \begin{bmatrix} 0.1707 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 837.8606 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 756.1341 \end{bmatrix}, \quad R_{1LQDG} = 1, \quad R_{2LQDG} = 7.7422$$

در گام بعد، با حل معادله (؟؟) (برای سادگی ماتریس های وزنی Q_{a1} و Q_{a2} مساوی در نظر گرفته شده است) ماتریس K_1 به صورت زیر به دست می آید.

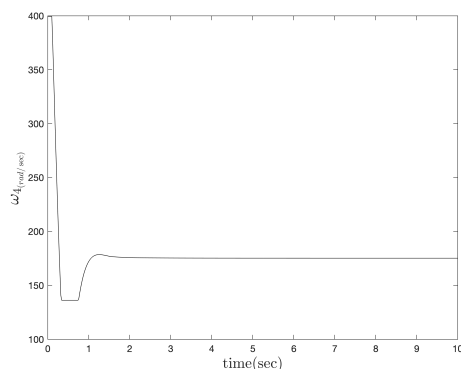
$$K_{a1} = \begin{bmatrix} 10924.84 & 39.83 & 1014.34 & -10629.93 \\ 39.83 & 8.40 & 27.22 & 11.70 \\ 1014.34 & 27.22 & 1047.80 & -756.13 \\ -10658.93 & 11.70 & -756.13 & 10658.93 \end{bmatrix} \quad (۱۱-۱)$$

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

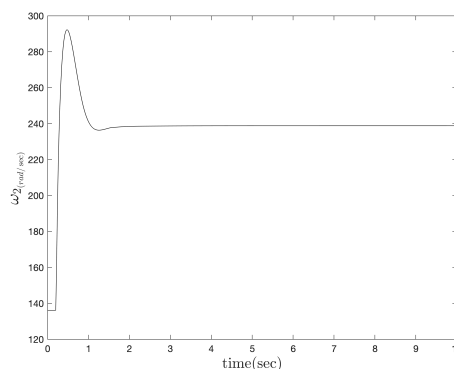
$$u_1 = - \begin{bmatrix} 28.1410 & 8.4017 & 27.2223 & 11.6894 \end{bmatrix} x_a(t) \quad (۱۲-۱)$$



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



(ب) موتور شماره چهار



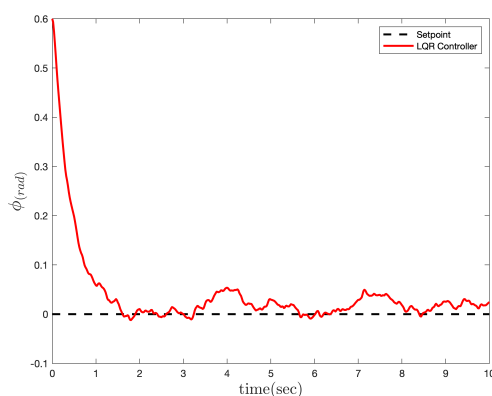
(آ) موتور شماره دو

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

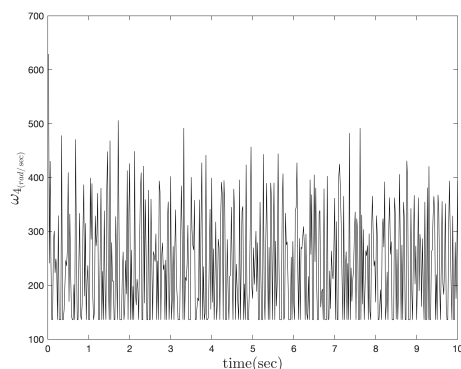
همانطور که از شکل ۱-۵ مشخص است، زمان نشست در حدود یک ثانیه است. خطای مانگار ندارد.

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

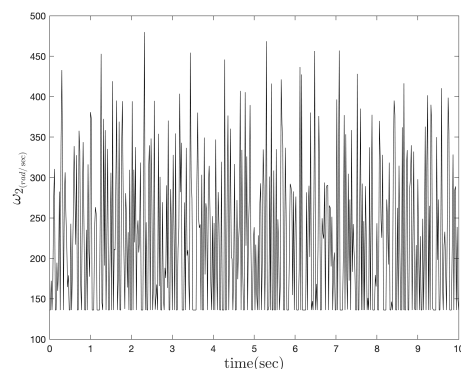
در این بخش عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز (نویز تصادفی حول نقطه صفر و با انحراف معیار دو صدم) وارد بر تمامی مقدار اندازه‌گیری‌شده‌ی سنسور، مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرکانس تولید نویز در شبیه‌سازی ۵۰ هرتز در نظر گرفته شده‌است.



شکل ۱-۷: عملکرد کنترل‌کننده LQR در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری



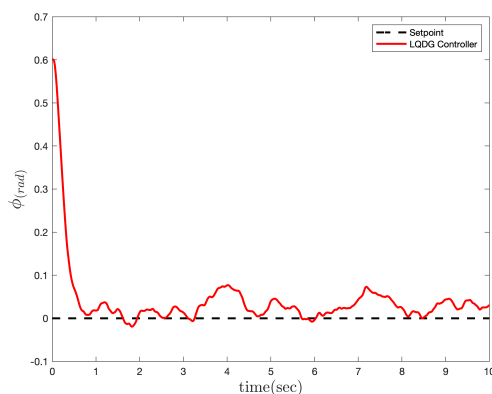
(ب) موتور شماره چهار



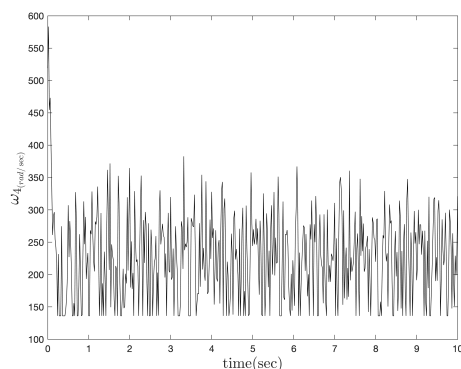
(آ) موتور شماره دو

شکل ۱-۸: فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری

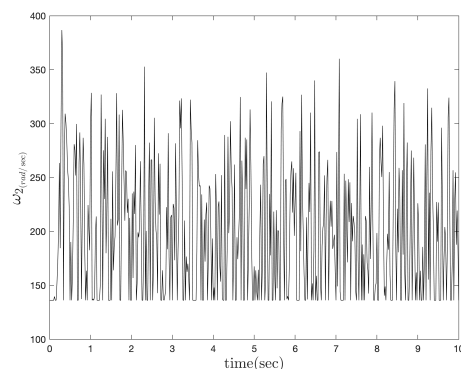
همانطور که از شکل ۱-۷ مشخص است، عملکرد کنترل‌کننده LQR در برابر نویز اندازه‌گیری ضعیف است و خروجی دارای نوسان است.



شکل ۱-۹: عملکرد کنترل‌کننده LQDG در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری



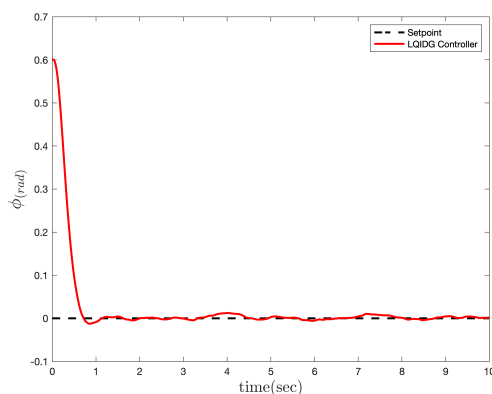
(ب) موتور شماره چهار



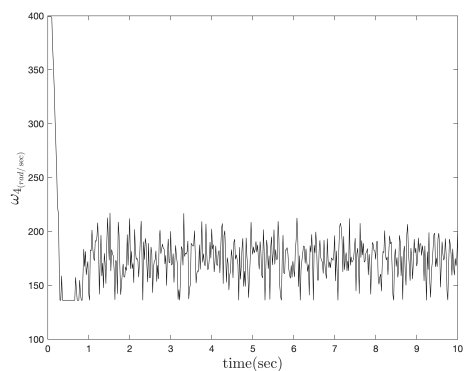
(ā) موتور شماره دو

شکل ۱-۱۰: فرمان کنترلی موتورها در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری

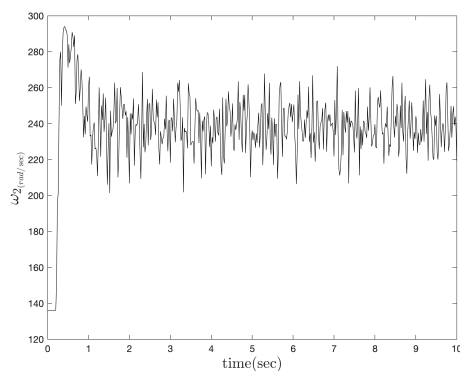
همانطور که از شکل ۱-۹ مشخص است، عملکرد کنترل‌کننده LQDG در برابر نویز اندازه‌گیری ضعیف است و خروجی دارای نوسان است.



شکل ۱-۱۱: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری



(ب) موتور شماره چهار



(آ) موتور شماره دو

شکل ۱-۱۲: فرمان کنترلی موتورهای دو و چهار در کنترل زاویه رول با حضور نویز اندازه‌گیری

همانطور که از شکل ۱-۱۱ مشخص است، عملکرد کنترل‌کننده LQDG در برابر نویز اندازه‌گیری خوب است و خروجی نوسان و ندارد.

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] K. Ogata. *Modern Control Engineering*. Instrumentation and controls series. Prentice Hall, 2010.
 - [17] 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

**Control of a Three Dimension of Freedom
Quadcopter Stand Using a Linear Quadratic
Integral Regulator Based on the Differential Game
Theory**

By:

Ali BaniAsad

Supervisor:

Dr.Hadi Nobahari

July 2022