



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 هادی 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. همچنین، از دوست عزیزم جناب آقای مهندس رضا پرداال 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 بی‌دriegش، 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 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	۱-۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای سه درجه آزادی	۱
۱	۱-۱-۰ تعقیب مقدار مطلوب خروجی	۱
۸	۲-۱-۰ بررسی عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز اندازه‌گیری	۸
۱۲	۲-۰ پیاده‌سازی کنترل‌کننده برای کنترل وضعیت	۱۲
۱۳	۱-۲-۰ پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی	۱۳
۱۴	۲-۲-۰ پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی	۱۴
۱۶	۳-۰ نتیجه‌گیری	۱۶
۱۷	۱ نتیجه‌گیری	۱
۱۸	۱-۱ نوآوری‌های پایان‌نامه	۱۸
۱۸	۲-۱ پیشنهادها برای ادامه کار	۱۸

فهرست شکل‌ها

۱	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۳
۲	فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۴
۳	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۷
۴	فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۸
۵	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۹
۶	فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۱۰
۷	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت با حضور نویز اندازه‌گیری	۱۱
۸	فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت با حضور نویز اندازه‌گیری	۱۲
۹	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۱۳
۱۰	فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۱۴
۱۱	عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۱۵
۱۲	فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)	۱۶

فهرست جدول‌ها

۱-۰ طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای سه درجه آزادی

در این بخش به کنترل وضعیت پرداخته شده است. به این منظور، در بخش ۱-۱-۰ نتایج شبیه‌سازی برای تعقیب مقدار مطلوب خروجی زاویه رول ارائه می‌شود. سپس، در بخش ۲-۱-۰ عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز اندازه‌گیری بررسی می‌شود.

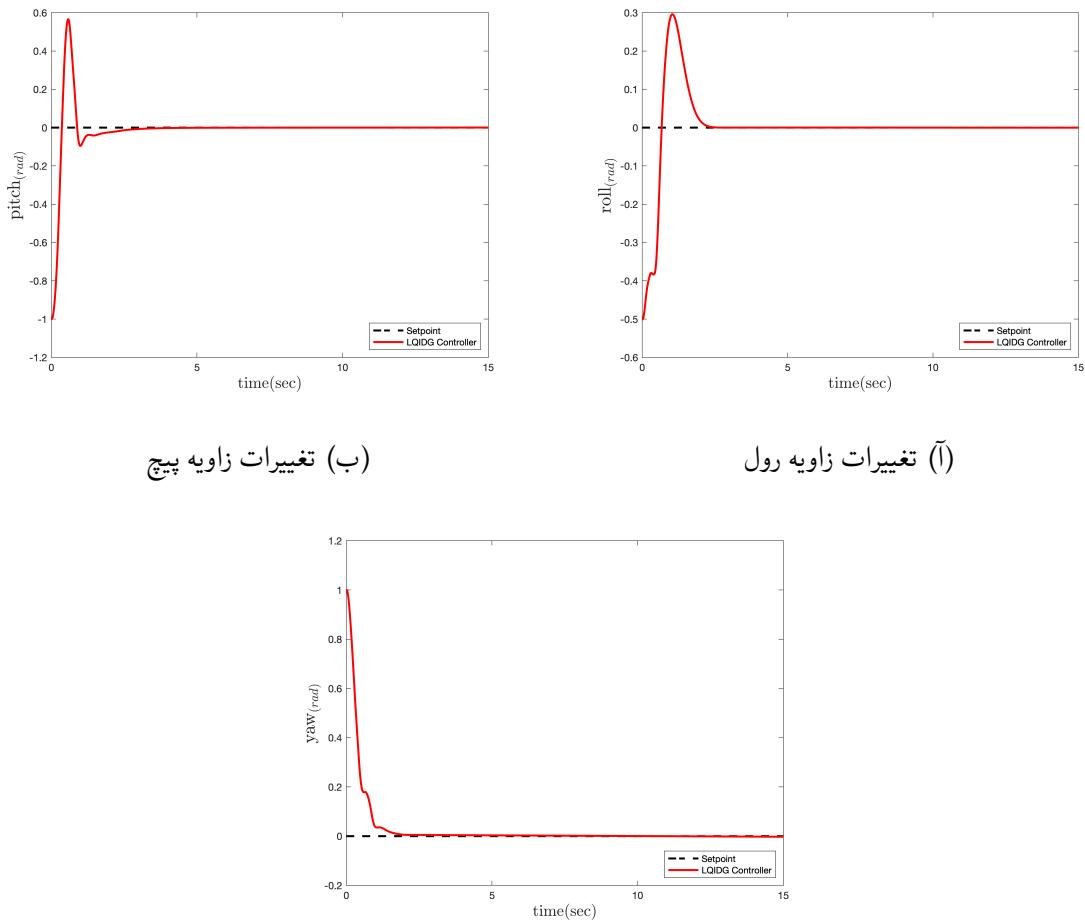
۱-۱-۰ تعقیب مقدار مطلوب خروجی

در بخش‌های ?? و ?? خطی‌سازی فضای حالت چهارپره و کانال‌های مختلف چهارپره انجام شده است. در این بخش ابتدا طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای چند ورودی و چند خروجی و در ادامه طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده برای سه کانال تک ورودی انجام شده است.

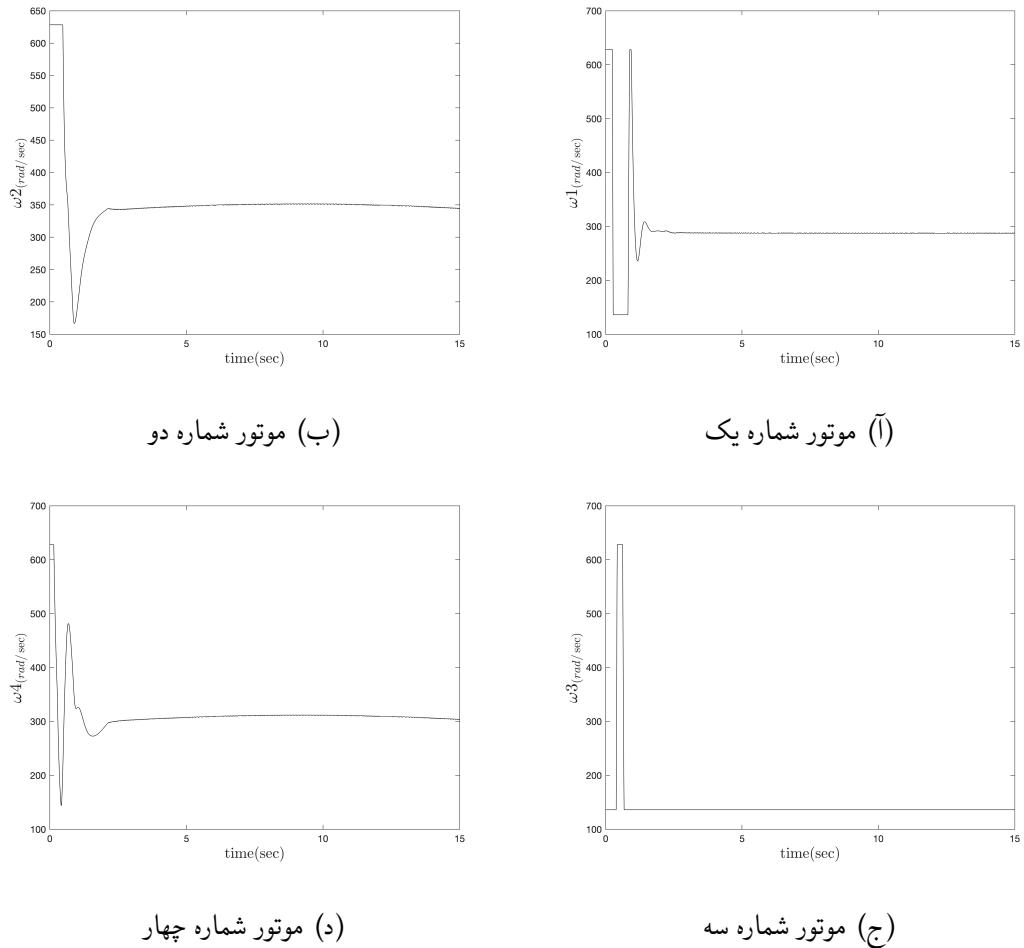
شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی

$$\begin{aligned}
 Q_{a_1roll} &= \begin{bmatrix} 258228.43 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 33152686.22 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 160.15 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 7541.49 \end{bmatrix} \\
 Q_{a_1pitch} &= \begin{bmatrix} 382.64 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 20246.38 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 2472592.13 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 60676037.12 \end{bmatrix} \quad (1) \\
 Q_{a_1yaw} &= \begin{bmatrix} 3390219.36 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 45.04 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 41049.01 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 881966.56 \end{bmatrix} \\
 Q_{a_{LQIDG}} &= \begin{bmatrix} K_{a_1roll} & 0 & 0 \\ 0 & K_{a_1pitch} & 0 \\ 0 & 0 & K_{a_1yaw} \end{bmatrix}, \quad R_{1_{LQDG}} = 1, R_{2_{LQDG}} = 15.1793 \quad (2)
 \end{aligned}$$

در گام بعد، با حل معادله (۱) (برای سادگی ماتریس‌های وزنی Q_{a_2} و Q_{a_1} مساوی در نظر گرفته شده است) ماتریس K_1 به دست می‌آید. در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (۱) به دست می‌آید.



شکل ۱: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)



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

شبیه‌سازی کنترل کننده به صورت سه کانال تک ورودی

در شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی ضرایب وزنی مانند قسمت قبل عمل شده است. ضرایب وزنی خروجی بهینه‌سازی در پایین آورده شده است. برای طراحی کنترل کننده LQIDG ضرایب وزنی R_1 و R_2 برای کانال‌های مختلف یکی فرض شده است.

$$\begin{aligned}
 Q_{a_{LQIDG_{roll}}} &= \begin{bmatrix} 631.85 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 214.28 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 7.91 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.01 \end{bmatrix} \\
 Q_{a_{LQIDG_{pitch}}} &= \begin{bmatrix} 0.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 873.93 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 9853.09 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.12 \end{bmatrix} \\
 Q_{a_{LQIDG_{yaw}}} &= \begin{bmatrix} 0.03 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.17 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.81 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 33333.45 \end{bmatrix} \times 10^{-4}
 \end{aligned} \tag{۳}$$

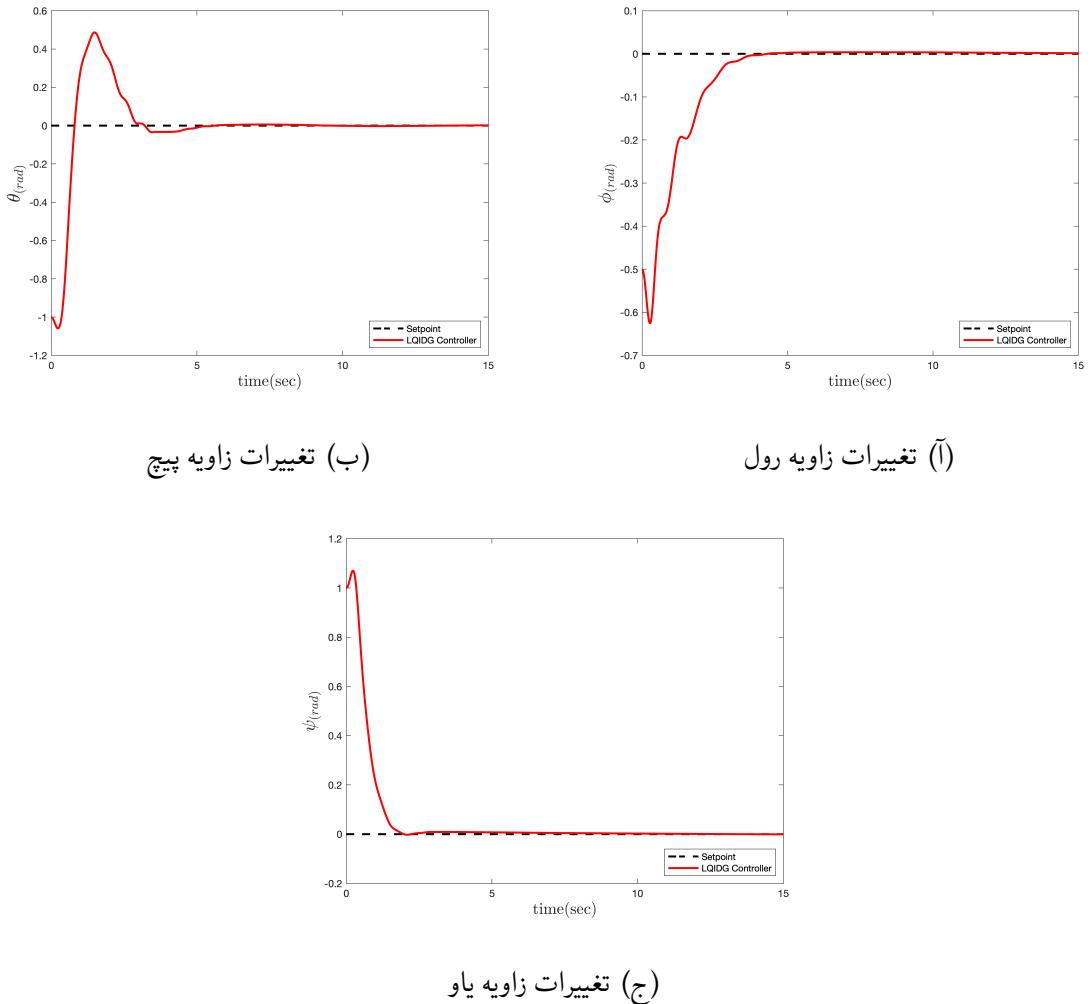
$$R_{1_{LQDG}} = 1, \quad R_{2_{LQDG}} = 1.2577$$

در گام بعد، با حل معادله (۴) (برای سادگی ماتریس‌های وزنی Q_{a_1} و Q_{a_2} مساوی در نظر گرفته شده است) ماتریس K_1 به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} K_{a_1roll} &= \begin{bmatrix} 435.89 & 20.54 & 42.44 & -9.98 \\ 20.54 & 11.93 & 1.98 & -0.00 \\ 42.44 & 1.98 & 71.49 & -0.08 \\ -9.98 & -0.00 & -0.08 & 9.93 \end{bmatrix} \\ K_{a_1pitch} &= \begin{bmatrix} 2430.43 & 59.59 & 3128.26 & -11.75 \\ 59.59 & 23.52 & 74.08 & 0.00 \\ 3128.26 & 74.08 & 7851.78 & -0.12 \\ -11.75 & 0.00 & -0.12 & 11.75 \end{bmatrix} \\ K_{a_1yaw} &= \begin{bmatrix} 57.75 & 1.46 & 3.56 & -54.52 \\ 1.46 & 1.27 & 0.10 & -0.00 \\ 3.56 & 0.10 & 0.24 & -3.34 \\ -54.52 & -0.00 & -3.34 & 54.51 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

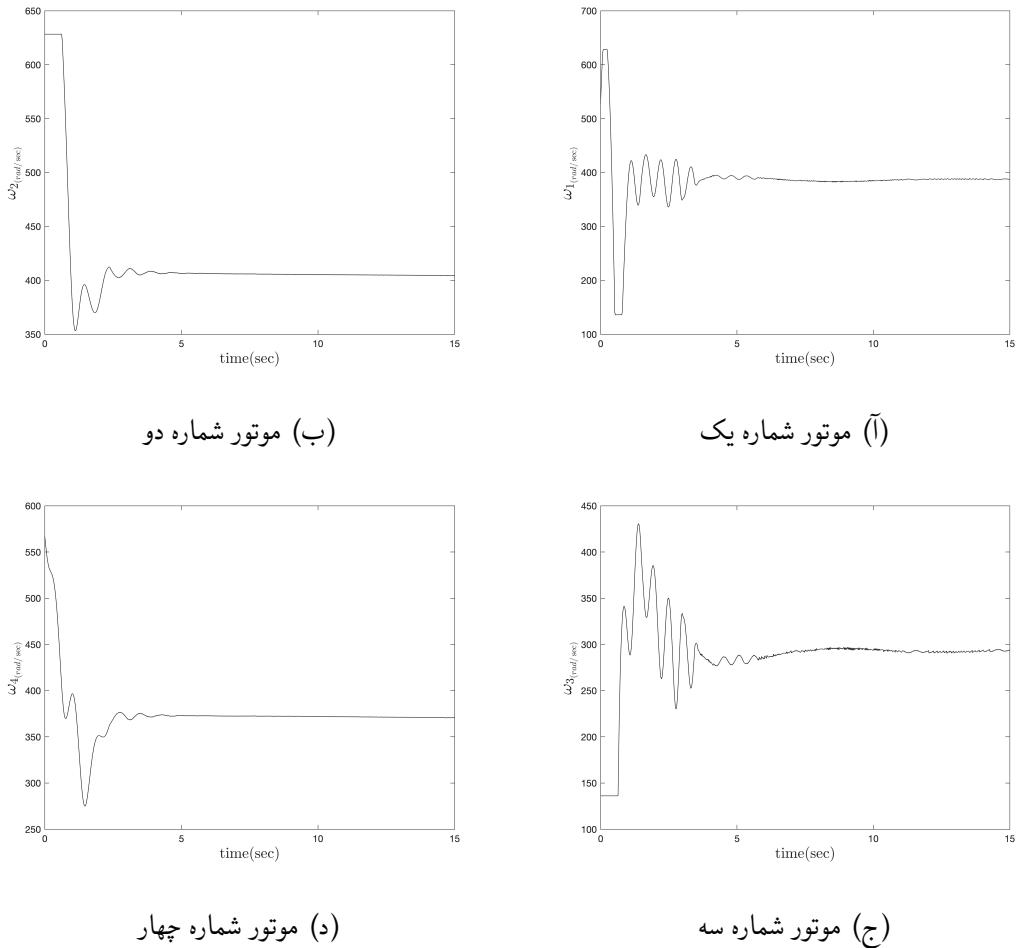
در نهایت فرمان کنترلی بهینه بازیکن اول از رابطه (۴) به صورت زیر به دست می‌آید.

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



شکل ۳: عملکرد کنترل کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)

همانطور که از شکل ۳ مشخص است، زمان نشست برای کانال‌های مختلف حداقل هشت پنج ثانیه است. خطای مانگار ندارد. در ادامه فرمان کنترلی موتورها آورده شده است.

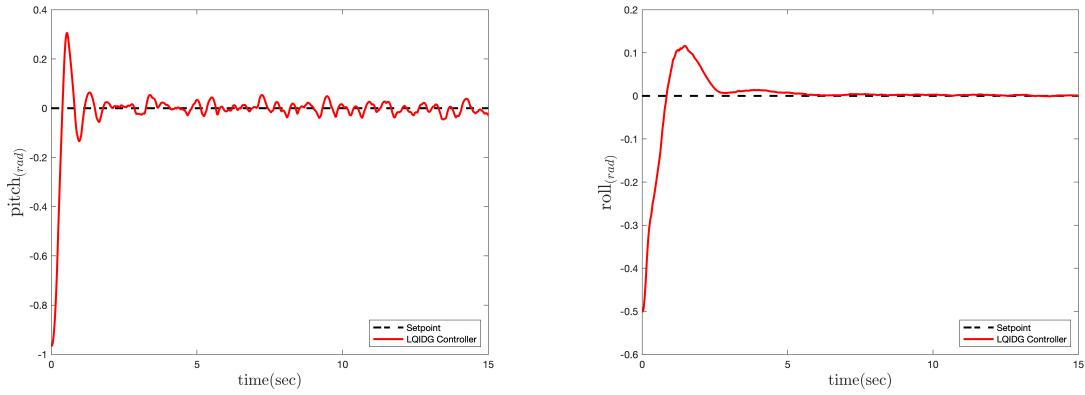


شکل ۴: فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)

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

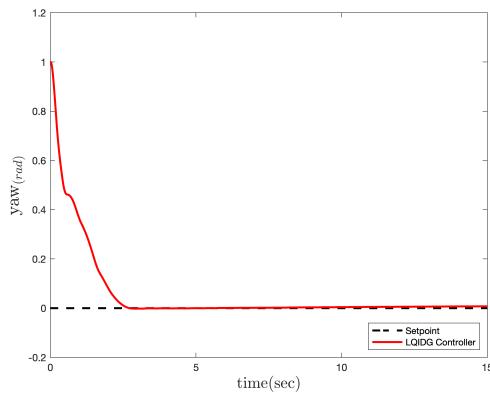
در این بخش عملکرد کنترل‌کننده در حضور نویز (نویز تصادفی حول نقطه صفر و با انحراف معیار دو صدم) وارد بر تمامی مقدار اندازه‌گیری شده‌ی سنسور، مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرکانس تولید نویز در شبیه‌سازی ۵۰ هرتز در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی



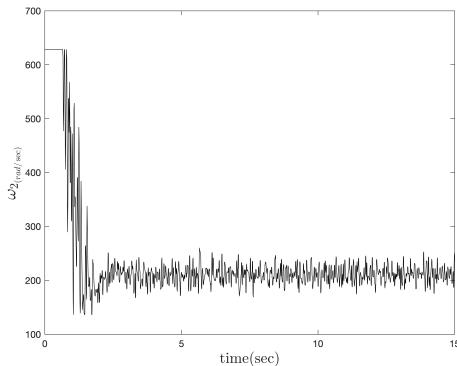
(ب) تغییرات زاویه پیچ

(ا) تغییرات زاویه رول

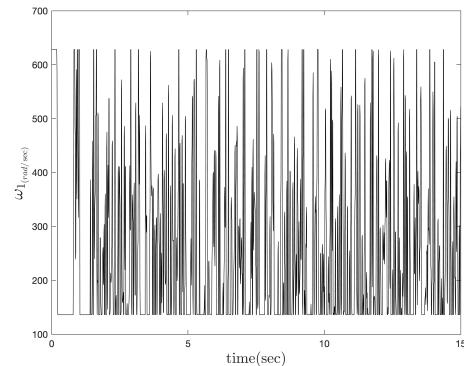


(ج) تغییرات زاویه یاو

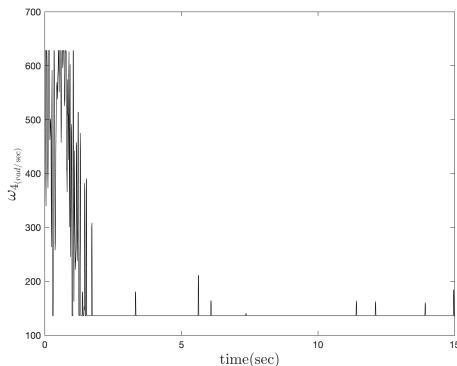
شکل ۵: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)



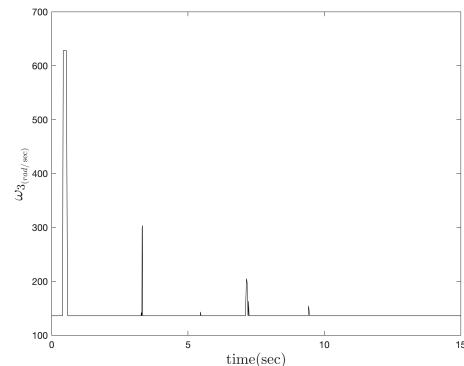
(ب) موتور شماره دو



(ـ) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار

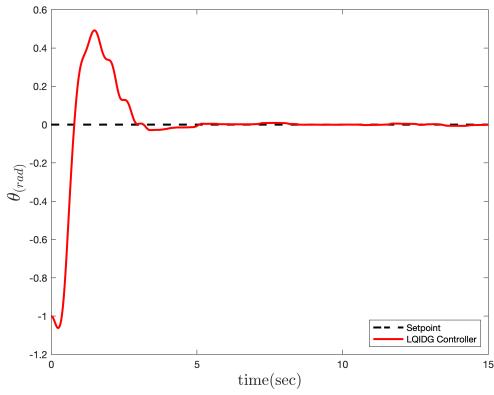


(ج) موتور شماره سه

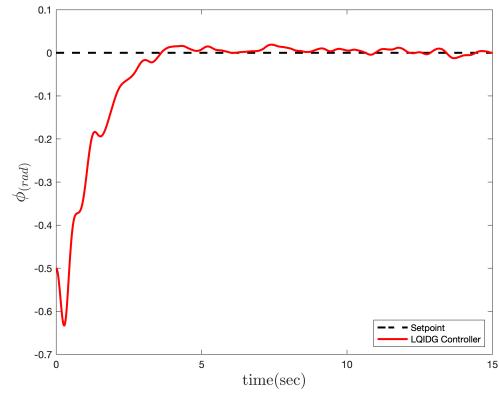
شکل ۶: فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)

همانطور که از شکل ۵ مشخص است، عملکرد کنترل کننده LQDG در برابر نویز اندازه‌گیری خوب است و خروجی نوسان و ندارد.

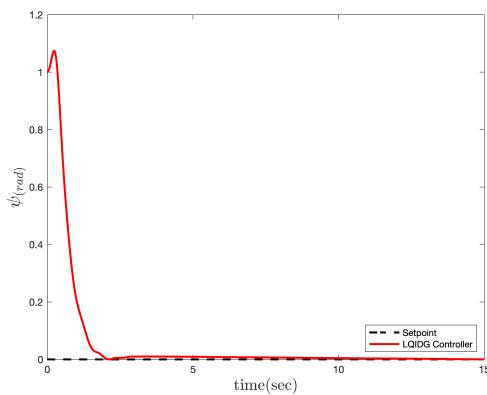
شبیه‌سازی کنترل‌کننده به صورت سه کانال تک ورودی



(ب) تغییرات زاویه پیچ

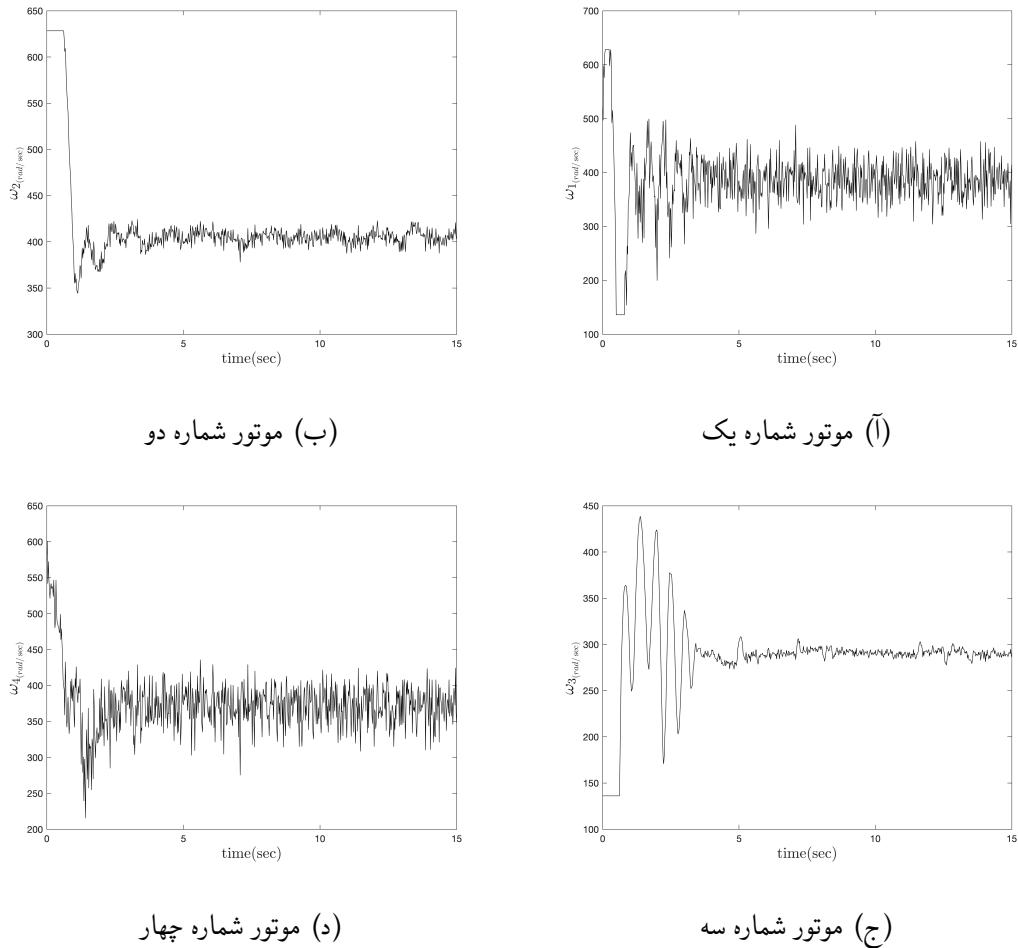


(ا) تغییرات زاویه رول



(ج) تغییرات زاویه یاو

شکل ۷: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل وضعیت با حضور نویز اندازهگیری



(د) موتور شماره چهار

(ا) موتور شماره یک

(ب) موتور شماره دو

(ج) موتور شماره سه

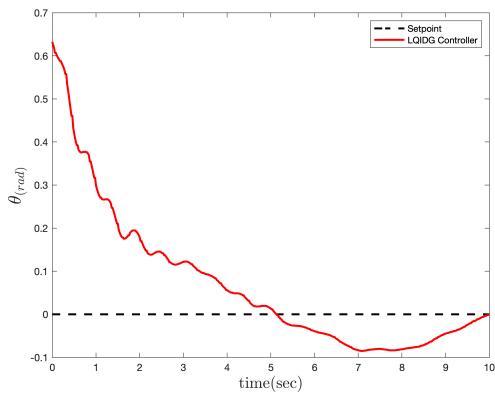
شکل ۸: فرمان کنترلی موتورها در کنترل وضعیت با حضور نویز اندازه‌گیری

همانطور که از شکل ۸ مشخص است، عملکرد کنترل کننده LQDG در برابر نویز اندازه‌گیری خوب است و خروجی نوسان ندارد.

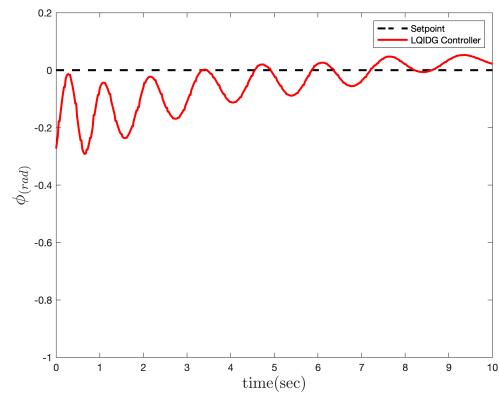
۲-۰ پیاده‌سازی کنترل کننده برای کنترل وضعیت

در بخش‌های ۱-۰ و ۲-۰، فرم خطی فضای حالت چهارپره و فرم خطی فضای حالت کانال‌های چهارپره محاسبه شده است. در بخش‌های ۱-۰ و ۲-۰ به ترتیب پیاده‌سازی به صورت چند ورودی و سه کانال تک ورودی انجام شده است.

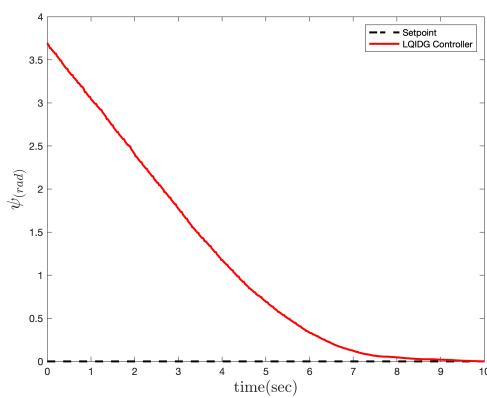
۱-۲-۰ پیاده‌سازی کنترل‌کننده به صورت چهار ورودی



(ب) تغییرات زاویه پیچ

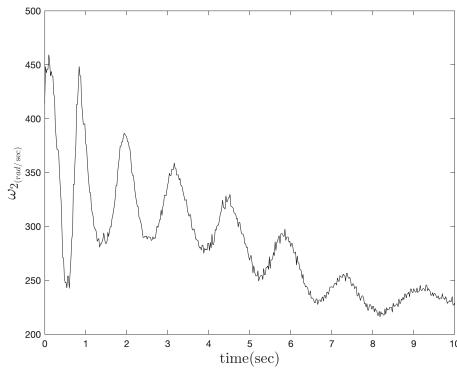


(ا) تغییرات زاویه رول

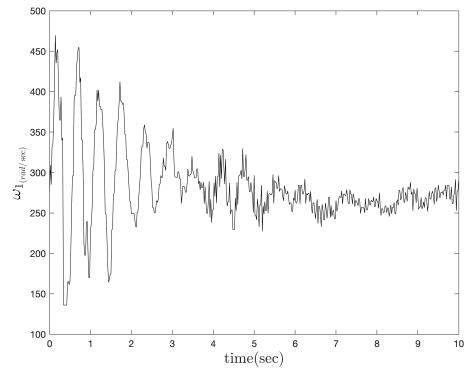


(ج) تغییرات زاویه یاو

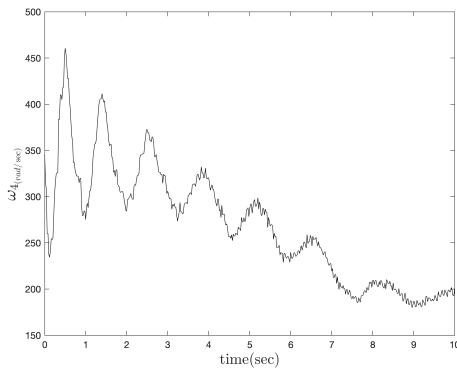
شکل ۹: عملکرد کنترل‌کننده LQIDG در کنترل وضعیت (تعقیب ورودی صفر)



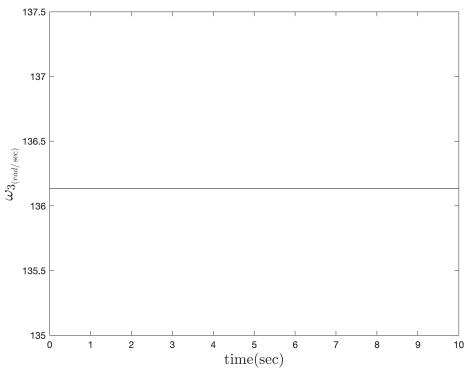
(ب) موتور شماره دو



(i) موتور شماره یک



(د) موتور شماره چهار

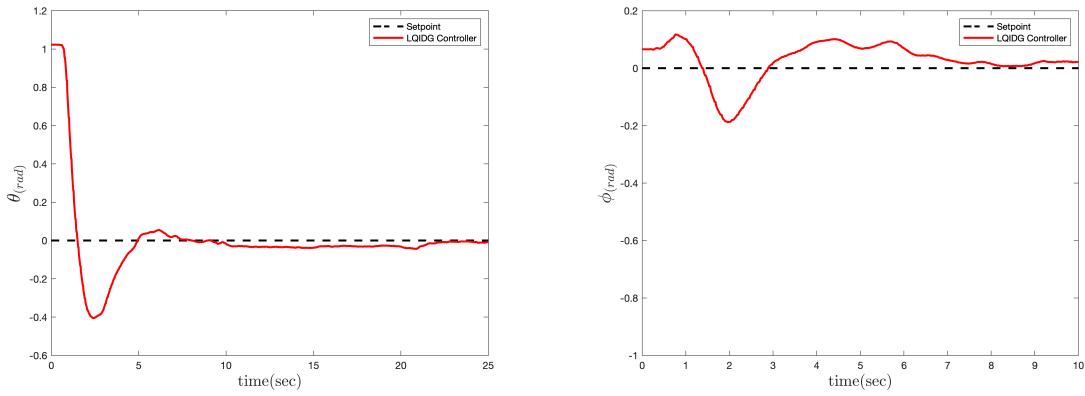


(ج) موتور شماره سه

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

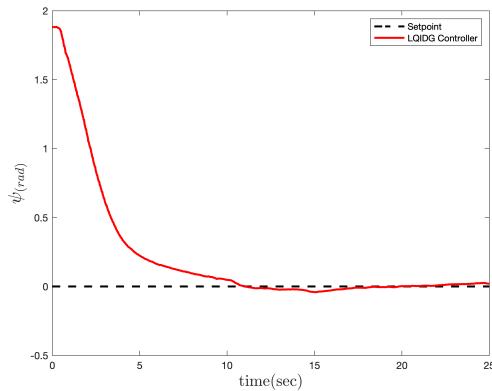
۲-۲-۰ پیاده‌سازی کنترل کننده به صورت سه کانال تک ورودی

در بخش ۱-۰ شبهه‌سازی سه درجه آزادی استند چهارپره در حضور کنترل کننده LQIDG انجام شد. در این بخش به پیاده‌سازی کنترل کننده LQIDG روی استند سه درجه آزادی پرداخته شده است. در پیاده‌سازی از ضرایب وزنی بهینه به دست آمده در قسمت شبهه‌سازی استفاده شده است.



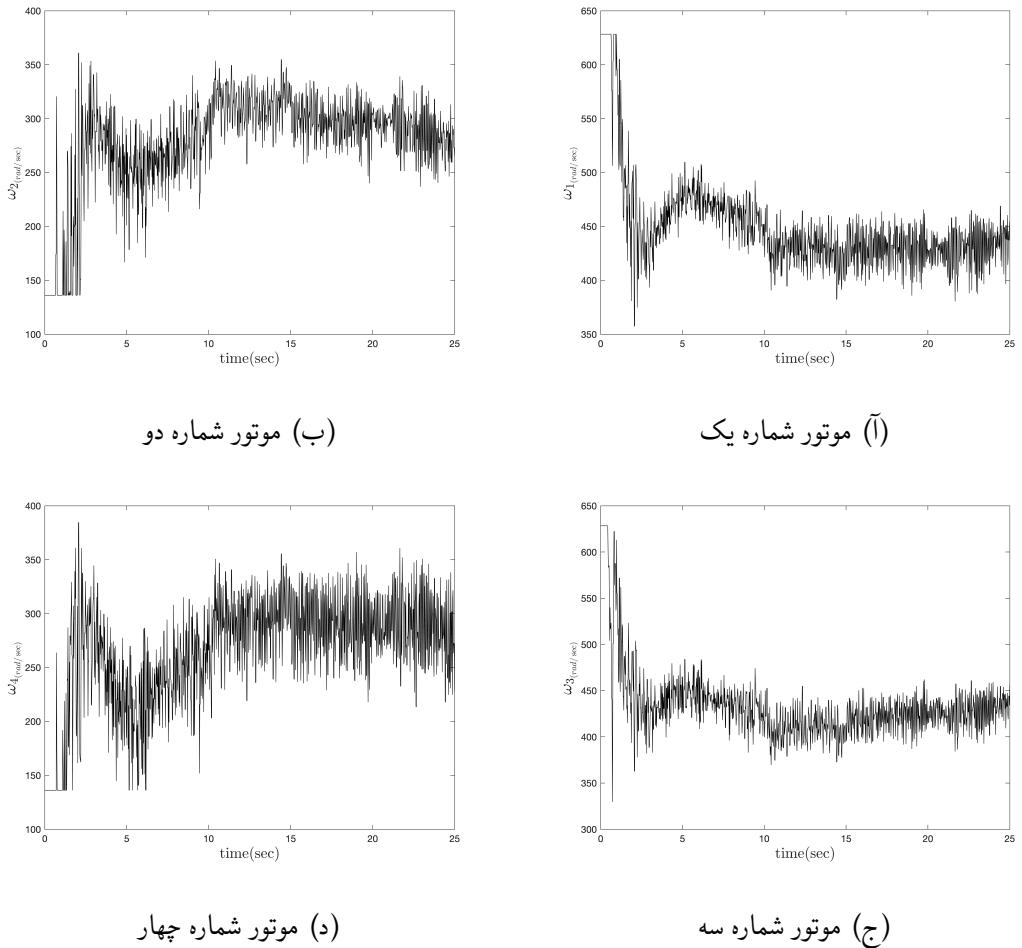
(ب) تغییرات زاویه پیچ

(ا) تغییرات زاویه رول



(ج) تغییرات زاویه یاو

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



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

۳-۰ نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش بازی دیفراسیلی بررسی شد و برای یک استند آزمایشگاهی پیاده‌سازی شد. در آخر این روش با روش معروف LQR نیز مقایسه شد. با توجه به گسترش شاخه تئوری بازی و نیازمندی زیاد به چهارپره در آینده می‌توان به این روش امیدوار بود و کاربردهای بیشتری از آن را در آینده دید.

فصل ۱

نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، یک کنترل‌کننده مبتنی بر بازی دیفرانسیلی به منظور کنترل وضعیت یک استند آزمایشگاهی سه درجه آزادی چهارپره طراحی و پیاده‌سازی شد. به این منظور، ابتدا مدل‌سازی سه درجه آزادی وضعیت وسیله با در نظر گرفتن گشتاورهای خارجی انجام شد. پس از پیاده‌سازی مدل ریاضی، اصلاح پارامتر انجام شد. سپس، صحت عملکرد شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی چهارپره با نتایج تست آزمایشگاهی ارزیابی شد. از کنترل‌کننده بهینه LQR برای کنترل آن استفاده شد. از آنجا که عملکرد سامانه در حضور اغتشاش مطلوب نبود، کنترل‌کننده‌های LQDG و سپس LQIDG طراحی، شبیه‌سازی و روی سامانه پیاده‌سازی شد. نتایج پیاده‌سازی نشان داد کنترل‌کننده LQR در حضور اغتشاش با نوسان زیادی همراه است و کنترل‌کننده LQDG در حضور اغتشاش قادر به صفر کردن خطای حالت ماندگار و نوسان نخواهد بود. بنابراین، برای حل این مشکل، کنترل‌کننده LQIDG استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این کنترل‌کننده، علاوه بر صفر کردن خطای حالت ماندگار، فراجهش کمتری نسبت به کنترل‌کننده LQR دارد. در نهایت، بهبودهای حاصل شده در عملکرد کنترل‌کننده، با پیاده‌سازی آن بر روی سامانه، تایید شد. کدهای استفاده شده در این پایان‌نامه به صورت منبع باز^۱ در دسترس است^۲.

¹Open Source

²<https://github.com/alibaniaasad1999/bachelor-thesis>

۱-۱ نوآوری‌های پایان‌نامه

نوآوری‌های این پایان‌نامه شامل موارد زیر است:

- پیاده‌سازی کنترل‌کننده LQIDG روی سامانه کنترل وضعیت سه درجه آزادی چهارپره.
- مقایسه نتایج شبیه سازی و پیاده‌سازی سه کنترل‌کننده بهینه در حضور اغتشاش مدل‌سازی سه.

۲-۱ پیشنهادها برای ادامه کار

پیشنهادهایی که برای ادامه این کار وجود دارد، شامل موارد زیر است:

- حذف تاخیر حسگر به کمک فیلتر کالمن
- بررسی عملکرد کنترل‌کننده LQIDG روی سامانه‌های دیگر و در شرایط اغتشاشی مختلف سه.

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] 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 backstepping 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.

Abstract

In this research, a method based on game theory has been used. In this method, two main players, system and disturbance, are considered. Each of the two players tries to increase their score with the lowest cost, which is considered here, the status of the player's score. In this method, the selection of the move is done using the Nash equilibrium, whose purpose is to reduce the cost function assuming the worst move of the other player. This method is resistant to input disturbance. It also has good resistance to modeling uncertainty. The presented method has been used to control a quadcopter three degree of freedom stand, which is also a kind of inverted pendulum. To evaluate the performance of this method, first simulations have been performed in the Simulink environment and then, by implementing it, the correctness of its performance has been confirmed.

Keywords: Quadcopter, Differential Game, Game Theory, Nash Equilibrium, Three Degree of Freedom Stand, Model Base Design, Linear Quadratic Regulator



Sharif University of Technology
Department of Aerospace Engineering

Bachelor Thesis

**Control of a Three Degree 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