



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 الغفران

## 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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

---

<sup>1</sup>Game Theory

<sup>2</sup>Nash Equilibrium

# فهرست مطالب

۱-۰-۰ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ-یاو	۵
---	---

## فهرست شکل‌ها

۱	مقایسه وضعیت کانال رول موتور خاموش در شبیه‌سازی و واقعیت	۲
۲	مقایسه وضعیت کانال رول در شبیه‌سازی و واقعیت	۲
۳	مقایسه وضعیت کانال پیچ در شبیه‌سازی و واقعیت	۳
۴	مقایسه وضعیت کانال پیچ در شبیه‌سازی و واقعیت	۳
۵	مقایسه وضعیت کانال یاو در شبیه‌سازی و واقعیت	۴
۶	مقایسه وضعیت کانال رول-پیچ در شبیه‌سازی و واقعیت	۴
۷	مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال	
۵	رول-پیچ-یاو	

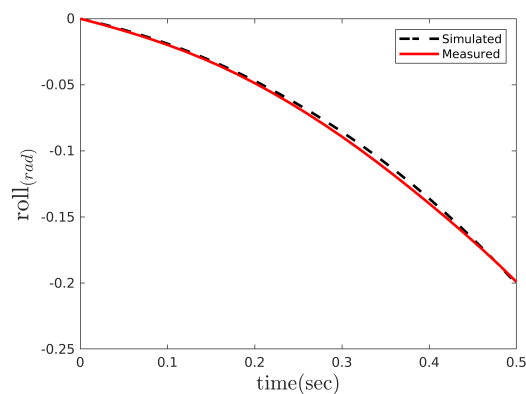
## فهرست جدول‌ها

۱	مقایسه پارامترهای کانال رول موتور خاموش قبل و بعد از اصلاح	۲
۲	مقایسه پارامترهای کانال رول قبل و بعد از اصلاح	۲
۳	مقایسه پارامترهای کانال پیچ قبل و بعد از اصلاح	۳
۴	مقایسه پارامترهای کانال پیچ قبل و بعد از اصلاح	۳
۵	مقایسه پارامترهای کانال یو قبل و بعد از اصلاح	۴
۶	پارامترهای شبیه‌سازی استند چهارپره	۴

به علت زیاد بودن پارامترهای شبیه‌سازی چهارپره ابتدا پارامترهای هر کانال به صورت جداگانه (بدون در نظر گرفتن تاثیر متقابل دیگر کانال‌ها) اصلاح شدند. سپس، پارامترهای کانال رول-پیچ و در نهایت کانال رول-پیچ-یو (با در نظر گرفتن تاثیر متقابل دیگر کانال‌ها) اصلاح شدند. برای افزایش دقت پارامترها، برای کانال‌های رول و پیچ، ابتدا پارامترها به صورت موتور خاموش اصلاح شدند و سپس، پارامترهای مربوط به موتور اصلاح شدند. در فرایند اصلاح پارامتر، بعد از هر مرحله اصلاح پارامتر گفته شده در بالا، پارامترهای اصلاح شده‌ی مرحله قبلی ثابت فرض می‌شدند و سایر پارامترها به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده می‌شدند. برای اصلاح پارامتر هر مرحله چندین آزمایش با سناریوهای مختلف انجام شده است و خروجی اصلاح پارامتر بر اساس تمام آزمایش‌های معتبر است، اما در گزارش از آوردن تمامی آزمایش‌ها پرهیز شده است و تنها خروجی یک آزمایش آورده شده است.

برای اصلاح پارامترها چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترها اصلاح شدند. برای انجام آزمایش استند از شرایط اولیه مختلف و با ورودی‌های مختلف رها شد و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های

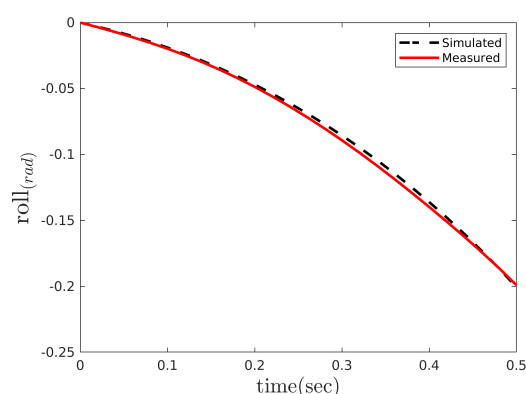
ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده‌شد. وضعیت استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای مختلف در ادامه مقایسه شده‌است.



پارامتر	مقدار پارامتر	مقدار پارامتر بعد از اصلاح
$A_1$	7.312	4.152
$A_5$	0.0087	0.0190
$A_6$	0.51	0.65

جدول ۱: مقایسه پارامترهای کانال رول موتور خاموش شکل ۱: مقایسه وضعیت کانال رول موتور خاموش در شبیه‌سازی و واقعیت قبل و بعد از اصلاح

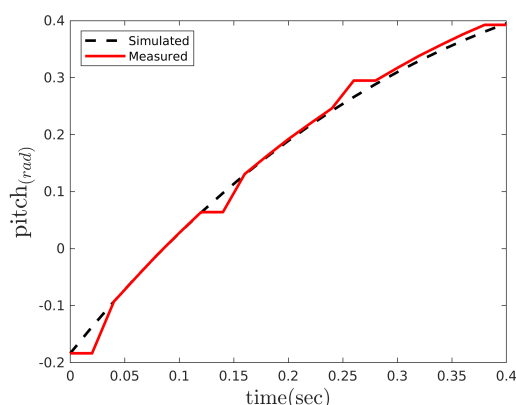
در ادامه اصلاح پارامترهای موتور کانال رول چهارپره آورده شده‌است.



پارامتر	مقدار پارامتر	مقدار پارامتر بعد از اصلاح
$A_3$	$1.1 \times 10^{-4}$	$5.47 \times 10^{-5}$

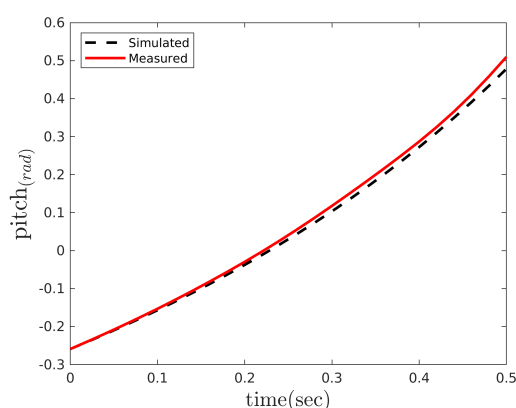
جدول ۲: مقایسه پارامترهای کانال رول قبل و بعد از شکل ۲: مقایسه وضعیت کانال رول در شبیه‌سازی و اصلاح واقعیت در ابتدا خروجی اصلاح پارامترهای کانال پیچ حالت موتور خاموش و سپس حالت کلی آورده شده‌است.





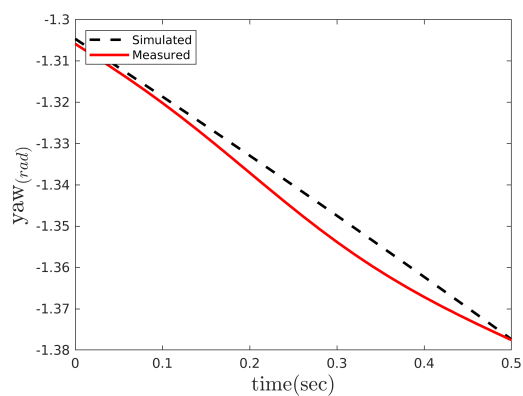
پارامتر	مقدار پارامتر	مقدار پارامتر بعد از اصلاح
$B_1$	4.53	4.36
$B_5$	0.007	0.012
$B_6$	4.13	4.428

جدول ۳: مقایسه پارامترهای کانال پیچ قبل و بعد از شکل ۳: مقایسه وضعیت کانال پیچ در شبیه‌سازی و واقعیت اصلاح  
برای اصلاح سایر پارامترهای کانال رول، پارامترهای اصلاح شده در بخش بالا ثابت در نظر گرفته شده‌است.



پارامتر	مقدار پارامتر	مقدار پارامتر بعد از اصلاح
$B_3$	$1.1 \times 10^{-4}$	$7.13 \times 10^{-5}$

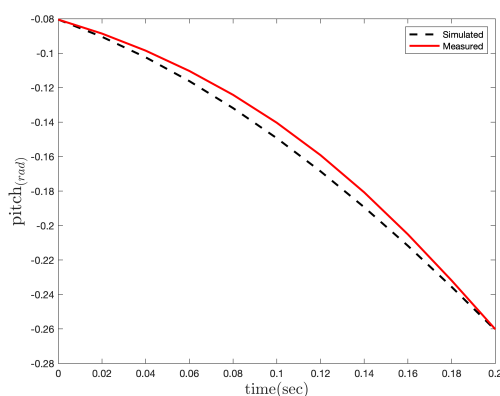
جدول ۴: مقایسه پارامترهای کانال پیچ قبل و بعد از شکل ۴: مقایسه وضعیت کانال پیچ در شبیه‌سازی و واقعیت اصلاح  
مقایسه وضعیت شبیه‌سازی و واقعیت چهارپره در کانال یاو و پارامترهای اصلاح شده آورده شده‌است.



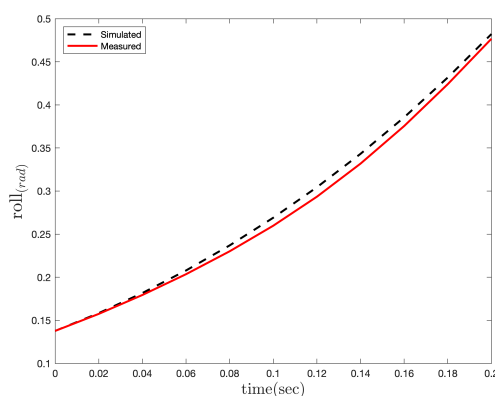
پارامتر	مقدار پارامتر	مقدار پارامتر بعد از اصلاح
$C_2$	$5.45 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$
$C_3$	0.014	0.017

جدول ۵: مقایسه پارامترهای کانال یاء قبل و بعد از شکل ۵: مقایسه وضعیت کانال یاء در شبیه‌سازی و واقعیت

در این قسمت اصلاح پارامترهای کانال رول-پیچ با اثر متقابل کانال‌ها بر یکدیگر انجام شده‌است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ



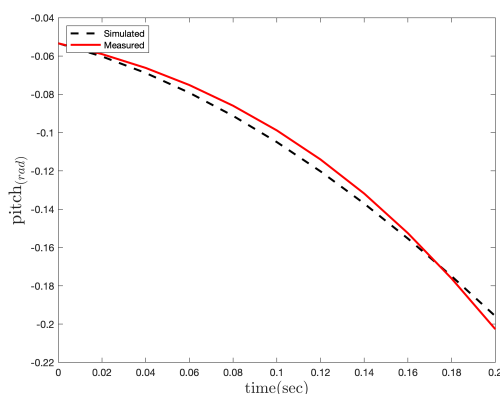
(آ) تغییرات زاویه رول

شکل ۶: مقایسه وضعیت کانال رول-پیچ در شبیه‌سازی و واقعیت

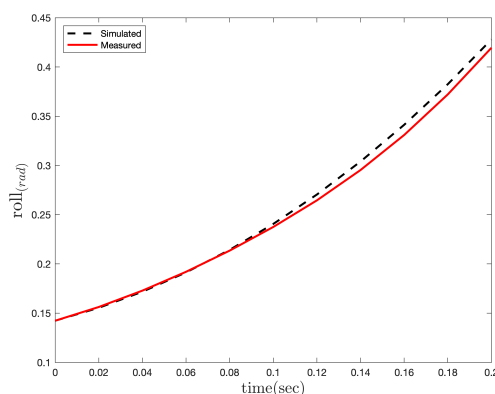
جدول ۶: پارامترهای شبیه‌سازی استند چهارپره

## ۱-۰-۰ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ-یاو

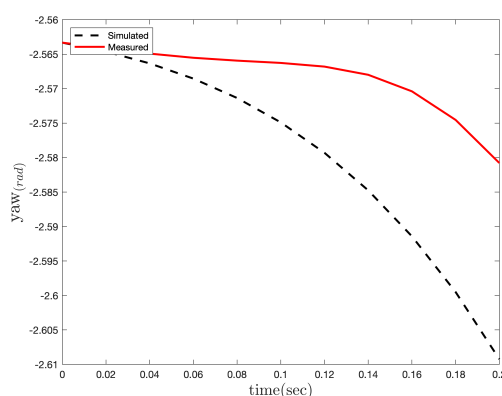
برای اصلاح پارامترها رول-پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال رول-پیچ-یاو و جعبه‌ابزار Parameter Estimator پارامترهای کانال رول-پیچ-یاو اصلاح شدند. برای آزمایش تمامی موتورها با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده سنسور (وضعیت استند در کانال رول-پیچ-یاو) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کانال رول-پیچ-یاو استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کانال رول-پیچ-یاو بعد در شکل‌های (؟؟، ؟؟، ؟؟، ؟؟، ؟؟، ؟؟، ؟؟، ؟؟، ؟؟) آورده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ



(آ) تغییرات زاویه رول



(ج) تغییرات زاویه یاو

شکل ۷: مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول-پیچ-یاو

## 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  $se(3)$ . 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 back-stepping 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 Controler for 3DOF Quadcopter Stand**

By:

**Ali BaniAsad**

Supervisor:

**Dr. Nobahari**

July 2022