



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. 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<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

۲	۱ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی چهارپره در محیط سیمولینک
۲	۱-۱ طراحی مدل مبنا . . . . .
۳	۲-۱ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در محیط سیمولینک . . . . .
۴	۳-۱ اصلاح پارامترهای استند چهارپره . . . . .

## فهرست شکل‌ها

- ۱-۱ مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل . ۳
- ۲-۱ مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل . ۳
- ۳-۱ نمایی از داخل بلوک Quad System . . . . . ۴
- ۴-۱ نماد جعبه‌ابزار Parameter Estimator در سیمولینک . . . . . ۵
- ۵-۱ جعبه‌ابزار Parameter Estimator . . . . . ۵

## فهرست جدول‌ها

# فصل ۱

## شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی چهارپره در محیط سیمولینک

سیمولینک<sup>۱</sup> یک ابزار شبیه‌سازی همراه با نرم‌افزار متلب<sup>۲</sup> است. با استفاده از سیمولینک می‌توان یک سامانه دینامیکی را شبیه‌سازی کرد. بنابراین، به کمک این نرم‌افزار می‌توان رفتار سامانه‌های دینامیکی را بدون ساخت آن‌ها تحلیل کرد. علاوه بر این، به کمک شبیه‌سازی می‌توان رفتار سامانه را در شرایط مختلف مطالعه کرد؛ شرایطی که فراهم کردن آن در دنیای واقعی ممکن است هزینه‌بر و یا دشوار باشد. سیمولینک به صورت یک افزونه در نرم‌افزار متلب عرضه شده‌است که شبیه‌سازی در محیط آن به صورت دیاگرام‌های بلوکی انجام می‌شود. در بخش ۱-۱ مراحل طراحی مدل مبنا و سپس، در بخش‌های ۱-۲ و ۱-۳ به بررسی شبیه‌سازی و اصلاح پارامتر استند سه درجه آزادی چهارپره پرداخته می‌شود.

### ۱-۱ طراحی مدل مبنا

در طراحی مدل مبنا، ابتدا سامانه دینامیکی در محیط نرم‌افزاری مدل‌سازی و کنترل‌کننده طراحی می‌شود. سپس، عملکرد کنترل‌کننده با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری<sup>۳</sup> بررسی شده و اشکالات اولیه موجود برطرف می‌شود. در گام بعد، به منظور بررسی اثر نامعینی‌ها، ساده‌سازی‌ها و اشتباهات مدل‌سازی بر عملکرد

---

<sup>۱</sup>Simulink

<sup>۲</sup>MATLAB

<sup>۳</sup>MIL (Model In the Loop)



کنترل‌کننده، شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه سامانه<sup>۴</sup> انجام می‌شود. پس از تایید عملکرد کنترل‌کننده به صورت نرم‌افزاری، کد آن به کمک ابزار تولید خودکار کد نرم‌افزار سیمولینک تولید و روی آردوینو<sup>۵</sup> پیاده‌سازی می‌شود. در مرحله نهایی، برد آردوینو به سامانه حقیقی (استند سه درجه آزادی) وصل شده، به صورت زمان حقیقی<sup>۶</sup> خروجی حسگر را دریافت و فرمان کنترلی را به سامانه اعمال می‌کند.

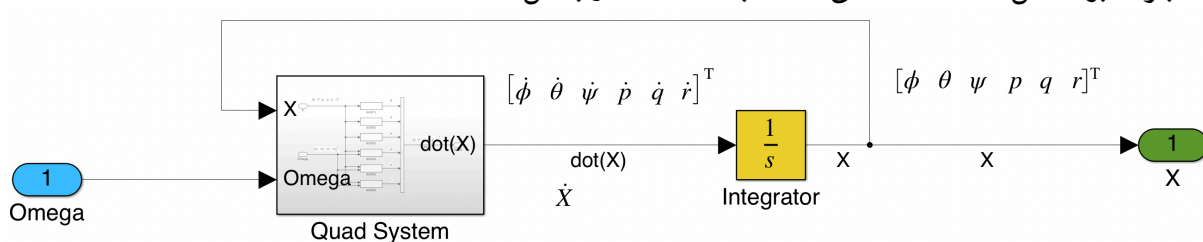
## ۲-۱ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در محیط سیمولینک

در این بخش به بررسی و شبیه‌سازی مدل دینامیکی استند سه درجه آزادی پرداخته شده است. در بخش؟؟ فرم فضای حالت استند چهارپره استخراج شد. در شبیه‌سازی نیز از همین روابط استخراج شده، استفاده شده است. مدل شبیه‌سازی شده از استند (شکل ۱-۱) دارای چهار ورودی سرعت دورانی موتورهای و دارای سه خروجی زوایای رول ( $\phi$ )، پیچ ( $\theta$ )، یاو ( $\psi$ ) و سه سرعت زاویه‌ای  $p$ ،  $q$  و  $r$  است.



شکل ۱-۱: مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل

نمایی از داخل بلوک Quadcopter 3DOF Nonlinear System در شکل ۲-۱ آورده شده‌است. این بلوک بر اساس معادلات فضای حالت بدست آمده در بخش؟؟ ساخته شده‌است.



شکل ۲-۱: مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل

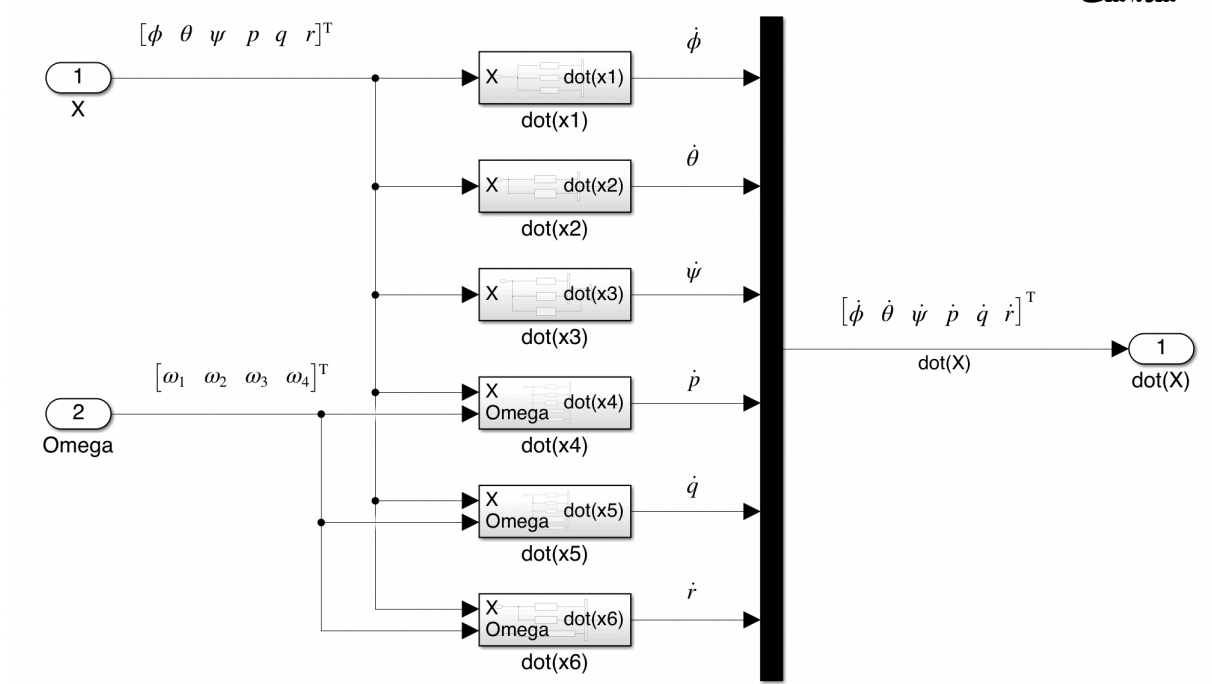
<sup>۴</sup>RCP (Rapid Control Prototyping)

<sup>۵</sup>Arduino

<sup>۶</sup>Real-Time

خروجی بلوک Quad System، مشتق متغیرهای حالت  $\dot{X}$  است. بردار حالت سیستم با استفاده از بلوک انتگرال‌گیر (بلوک زرد رنگ در شکل ۲-۱) (زاویه‌های رول  $(\phi)$ ، پیچ  $(\theta)$ ، یاو  $(\psi)$  و سرعت‌های زاویه‌ای  $p, q, r$ ) به دست می‌آید.

در داخل بلوک Quad System، شش بلوک دیگر قرار دارد که تعدادی از آن‌ها دارای ورودی  $X$  و تعدادی دیگر دارای ورودی  $\omega$  هستند. مجموع خروجی این شش بلوک  $\dot{X}$  است که در توضیحات بلوک Quad System، نیز به آن اشاره شد. نمایی از داخل بلوک Quad System در شکل ۳-۱ آورده شده‌است.



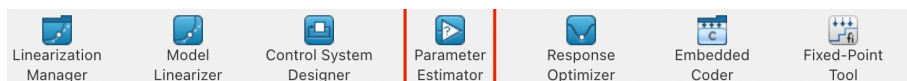
شکل ۳-۱: نمایی از داخل بلوک Quad System

## ۳-۱ اصلاح پارامترهای استند چهارپره

در بخش؟؟ فرم فضای حالت استند چهارپره استخراج شد و در بخش ۲-۱ شبیه‌سازی استند چهارپره انجام شد. در این بخش، با استفاده از شبیه‌سازی کانال‌های مختلف چهارپره در محیط سیمولینک و داده‌های خروجی از استند چهارپره، پارامترهای استند چهارپره اصلاح می‌شوند.

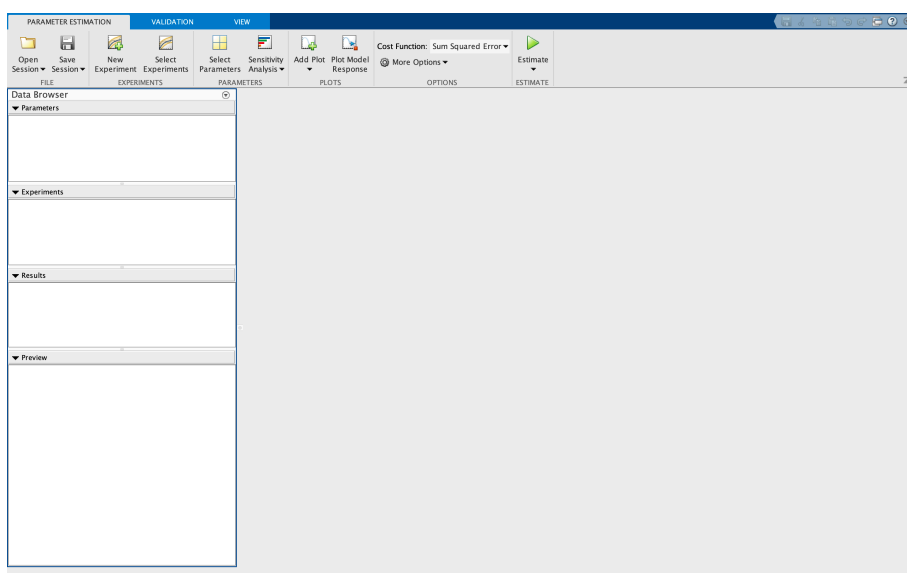
برای اصلاح پارامترهای استند چهارپره از جعبه‌ابزار Parameter Estimator موجود در محیط سیمولینک

استفاده شده‌است. این جعبه ابزار با استفاده از داده‌های وضعیت استند در واقعیت و داده‌های وضعیت استند در شبیه‌سازی سیمولینک، اقدام به اصلاح پارامترهای موجود در شبیه‌سازی می‌کند، به‌صورتی که وضعیت استند در شبیه‌سازی تا حد ممکن به وضعیت استند در واقعیت نزدیک کند.



شکل ۱-۴: نماد جعبه‌ابزار Parameter Estimator در سیمولینک

در شکل ۱-۵ نمایی از این جعبه‌ابزار آورده شده‌است.



شکل ۱-۵: جعبه‌ابزار Parameter Estimator

## 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. Nobahari**

July 2022