



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^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 شبیه‌سازی 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
۵	۱-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال رول موتور خاموش
۶	۲-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال رول
۷	۳-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال پیچ موتور خاموش
۷	۴-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال پیچ
۸	۵-۳-۱ تخمین پارامتر کانال یاو
۹	۶-۳-۱ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ
۹	۷-۳-۱ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ-یاو

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
- ۶-۱ مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول موتور خاموش ۶
- ۷-۱ مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول ۶
- ۸-۱ مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال پیچ موتور خاموش ۷
- ۹-۱ مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال پیچ ۸
- ۱۰-۱ مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال یاو ۸
- ۱۱-۱ مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول-پیچ ۹
- ۱۲-۱ مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول-پیچ-یاو ۱۰

فهرست جدول‌ها

فصل ۱

شبیه‌سازی در محیط سیمولینک

سیمولینک^۱ یک ابزار شبیه‌سازی همراه با نرم‌افزار متلب^۲ است. با استفاده از سیمولینک می‌توان رفتار یک سامانه دینامیکی را شبیه‌سازی کرد. بنابراین، به کمک این نرم‌افزار می‌توان رفتار سامانه‌های دینامیکی 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 شده است که شبیه‌سازی در محیط آن به صورت دیاگرام‌های بلوکی انجام 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^۳ بررسی شده و اشکالات اولیه موجود برطرف می‌شود. در گام بعد، به منظور بررسی اثر نامعینی‌ها، ساده‌سازی‌ها و اشتباهات مدل‌سازی بر عملکرد کنترل‌کننده، شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه پلنت^۴ انجام می‌شود. پس از تایید عملکرد کنترل‌کننده به صورت نرم‌افزاری، کد آن به کمک ابزار تولید خودکار کد نرم‌افزار سیمولینک تولید و روی آردوینو^۵ پیاده‌سازی می‌شود.

^۱Simulink

^۲MATLAB

^۳MIL (Model In the Loop)

^۴RCP (Rapid Control Prototyping)

^۵Arduino

در مرحله نهایی، برد آردوینو به سامانه حقیقی (استند سه درجه آزادی) وصل شده، به صورت زمان حقیقی^۶ خروجی حسگر را دریافت و فرمان کنترلی را به سامانه اعمال می‌کند. در بخش‌های ۲-۱ و ۳-۱ به بررسی شبیه‌سازی و اصلاح پارامتر استند سه درجه آزادی چهارپره پرداخته می‌شود.

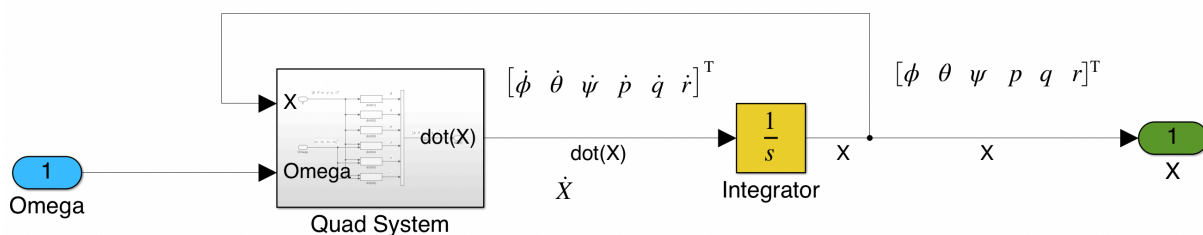
۲-۱ شبیه‌سازی استند سه درجه آزادی در محیط سیمولینک

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 (ϕ)، پیچ (θ)، یاو (ψ) 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.



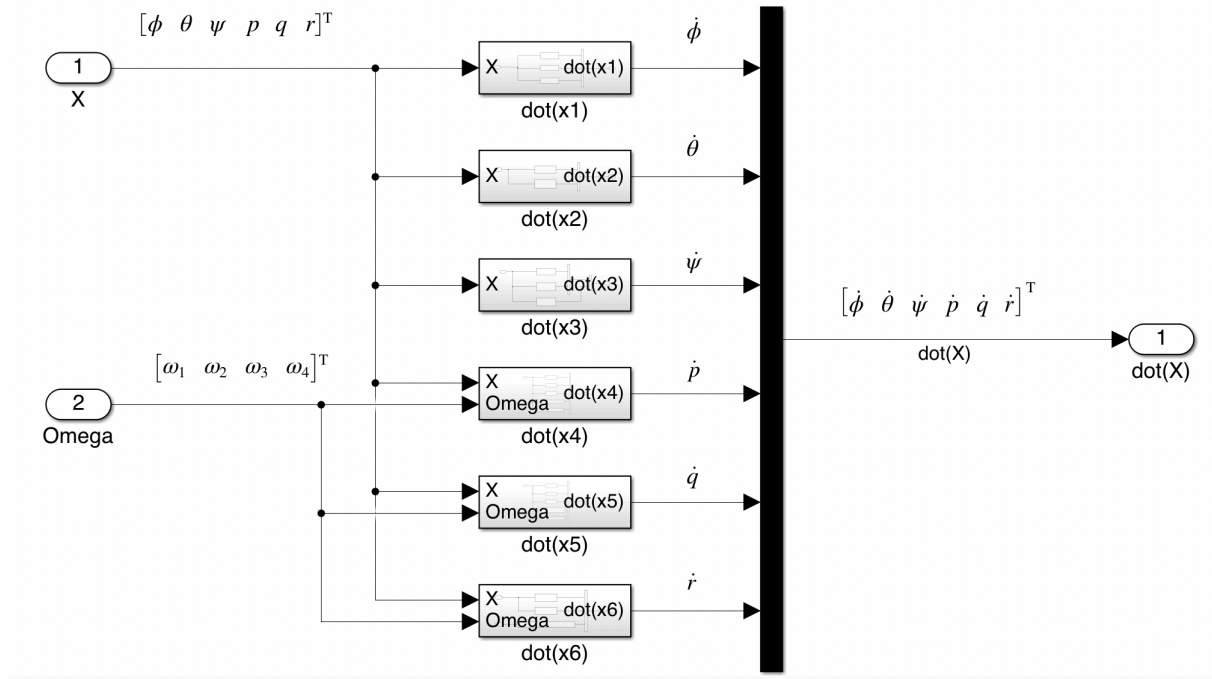
شکل ۲-۱: مدل استند چهارپره شبیه‌سازی شده در سیمولینک و نمایش ورودی و خروجی‌های مدل

خروجی بلوک Quad System، \dot{X} است. با استفاده از بلوک انتگرال‌گیر (بلوک زرد رنگ در شکل ۲-۱) از خروجی بلوک بر اساس شرایط اولیه استند انتگرال گرفته می‌شود و وضعیت استند (زاویه‌های رول

^۶Real-Time

(ϕ) ، پیچ (θ) ، یاو (ψ) و سرعت‌های زاویه‌ای p, q, r را خروجی می‌دهد.

در داخل بلوک Quad System، شش بلوک دیگر قرار دارد که تعدادی از آن‌ها دارای ورودی X و تعدادی دیگر دارای ورودی X و ω 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 ۱-۳ آورده شده‌است.



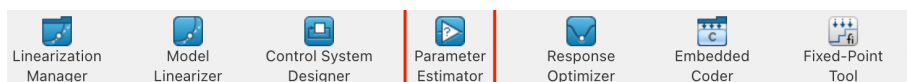
شکل ۱-۳: نمایی از داخل بلوک Quad System

۳-۱ اصلاح پارامترهای استند چهارپره

در بخش؟؟ فرم فضای حالت استند چهارپره استخراج شد و در بخش ۱-۲ 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.

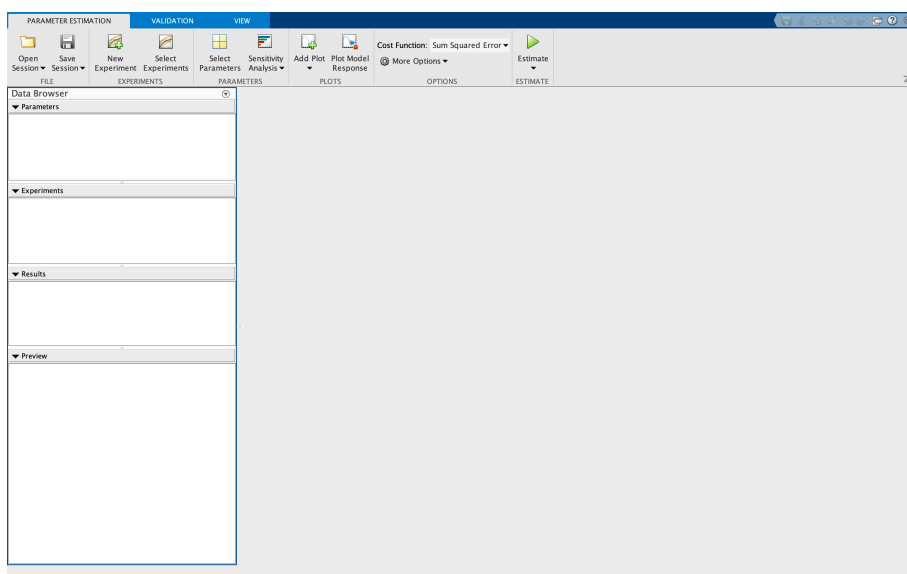
برای اصلاح پارامترهای استند چهارپره از جعبه‌ابزار Parameter Estimator موجود در محیط سیمولینک استفاده شده‌است. این جعبه‌ابزار با استفاده از داده‌های وضعیت استند در واقعیت و داده‌های وضعیت استند در شبیه‌سازی سیمولینک، اقدام به اصلاح پارامترهای موجود در شبیه‌سازی می‌کند، به‌صورتی که وضعیت

استند در شبیه‌سازی تا حد ممکن به وضعیت استند در واقعیت نزدیک کند.



شکل ۱-۴: نماد جعبه‌ابزار Parameter Estimator در سیمولینک

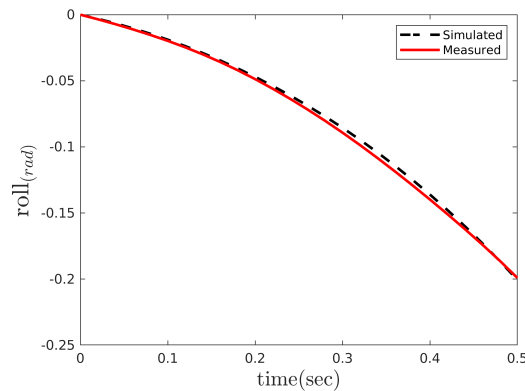
در شکل ۱-۵ نمایی از این جعبه‌ابزار آورده شده‌است.



شکل ۱-۵: جعبه‌ابزار Parameter Estimator

۱-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال رول موتور خاموش

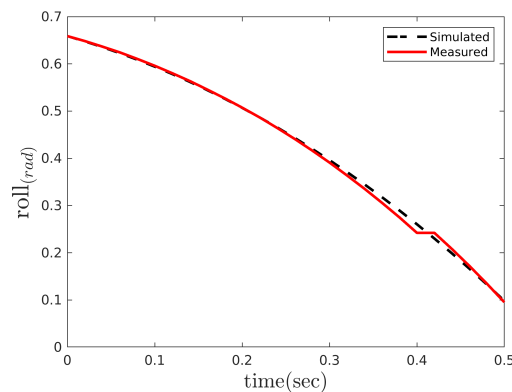
برای اصلاح پارامترهای رول چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال رول و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کانال رول اصلاح شدند. برای انجام آزمایش استند از شرایط اولیه مختلف با موتور خاموش رها شد و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند در کانال رول) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده‌شد. وضعیت کانال رول استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کانال رول در شکل‌های ??، ??، ?? و ?? مقایسه شده‌است.



شکل ۱-۶: مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول موتور خاموش

۲-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال رول

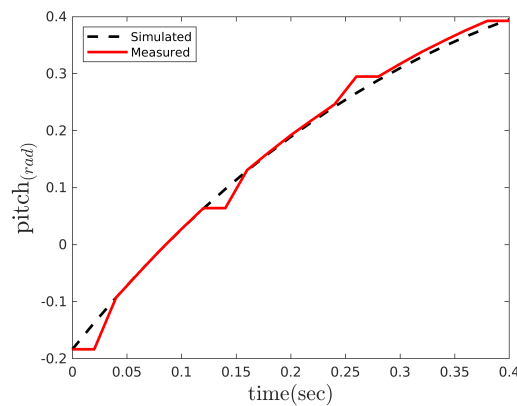
برای اصلاح پارامترهای رول چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال رول و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کانال رول اصلاح شدند. برای انجام آزمایش هر یک از موتورهای دو و چهار با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند در کانال رول) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کانال رول استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کانال رول در شکل‌های ۱-۷، ۱-۸، ۱-۹ و ۱-۱۰ مقایسه شده است.



شکل ۱-۷: مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول

۳-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال پیچ موتور خاموش

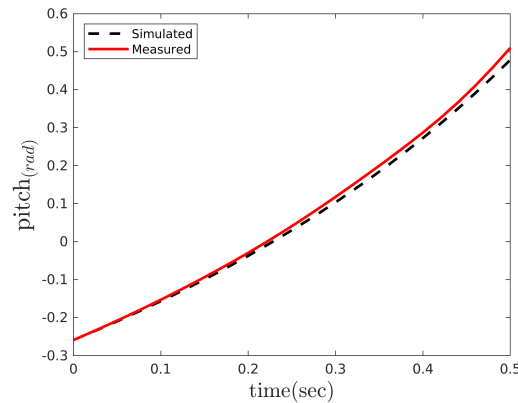
برای اصلاح پارامترهای پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کانال پیچ اصلاح شدند. برای انجام آزمایش استند از شرایط اولیه مختلف با موتور خاموش رها شد و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شدهی سنسور (وضعیت استند در کانال پیچ) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده‌شد. وضعیت کانال پیچ استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کانال پیچ در شکل‌های ۸-۱، ۹-۱، ۹-۲ و ۹-۳ مقایسه شده است.



شکل ۸-۱: مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال پیچ موتور خاموش

۴-۳-۱ تخمین پارامترهای کانال پیچ

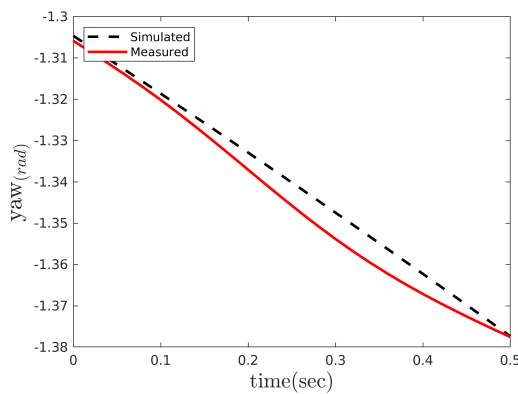
برای اصلاح پارامترهای پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator، پارامترهای کانال پیچ اصلاح شدند. برای انجام آزمایش هر یک از موتورهای دو و چهار با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شدهی سنسور (وضعیت استند در کانال پیچ) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده‌شد. وضعیت کانال پیچ استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کانال پیچ در شکل‌های ۹-۱، ۹-۲، ۹-۳ و ۹-۴ مقایسه شده است.



شکل ۱-۹: مقایسه وضعیت استند در آزمایش اول و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال پیچ

۵-۳-۱ تخمین پارامتر کانال یاو

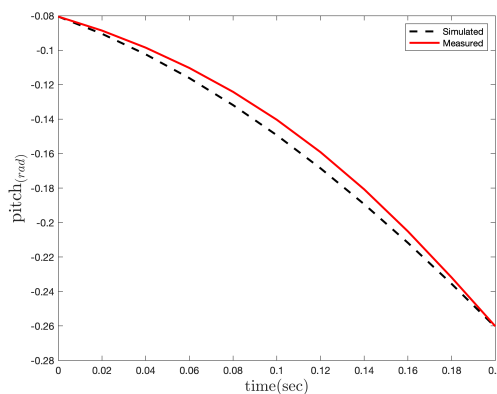
برای اصلاح پارامترهای یاو چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator پارامترها اصلاح شدند. برای آزمایش یاو همه‌ی موتورها با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و پارامترهای داده‌های ثبت شده‌ی سنسور (وضعیت استند در کانال یاو) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. نتایج آزمایش‌های کانال یاو بعد از اصلاح پارامترها در شکل ۱-۱۰ و ۱-۱۰ آورده شده است.



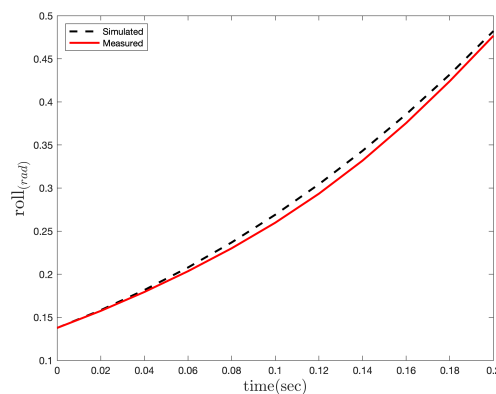
شکل ۱-۱۰: مقایسه وضعیت استند در آزمایش دوم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال یاو

۱-۳-۶ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ

برای اصلاح پارامترها رول-پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال رول-پیچ و جعبه‌ابزار Parameter Estimator پارامترهای کانال رول-پیچ 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) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کانال رول-پیچ استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کانال رول-پیچ بعد در شکل‌های (۱-۱۱، ۱-۱۲، ۱-۱۳، ۱-۱۴) آورده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ

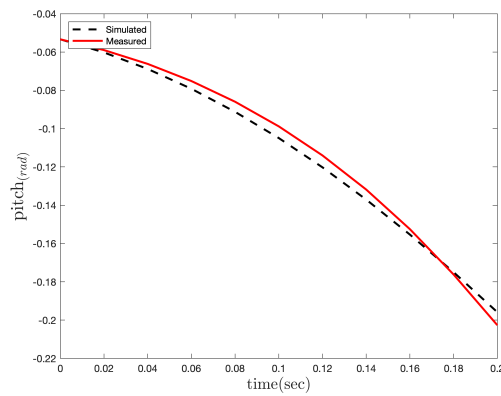


(آ) تغییرات زاویه رول

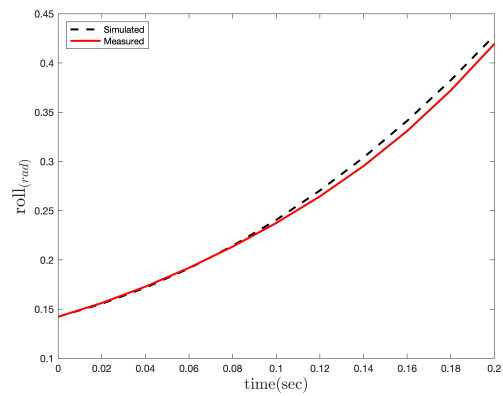
شکل ۱-۱۱: مقایسه وضعیت استند در آزمایش چهارم و شبیه‌سازی، پس از تخمین پارامترهای کانال رول-پیچ

۱-۳-۷ تخمین پارامتر کانال‌های رول-پیچ-یاء

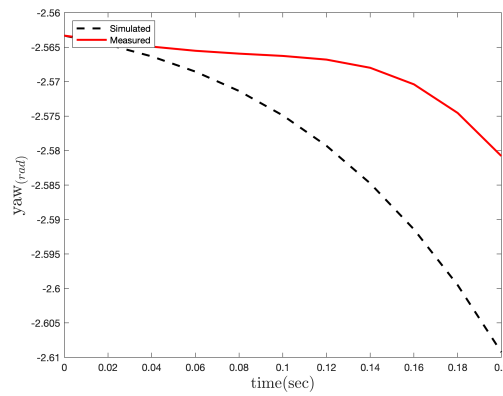
برای اصلاح پارامترها رول-پیچ چندین آزمایش انجام شد و با استفاده از داده‌های ثبت شده از وضعیت استند در کانال رول-پیچ-یاء و جعبه‌ابزار Parameter Estimator پارامترهای کانال رول-پیچ-یاء اصلاح شدند. برای آزمایش تمامی موتورها با دور مختلف شروع به حرکت کردند و از خروجی سنسور داده برداری شد. سپس، مدل و داده‌های ثبت شده سنسور (وضعیت استند در کانال رول-پیچ-یاء) به جعبه‌ابزار Parameter Estimator داده شد. وضعیت کانال رول-پیچ-یاء استند در شبیه‌سازی و واقعیت بعد از اصلاح پارامترهای کانال رول-پیچ-یاء بعد در شکل‌های (۱-۱۲، ۱-۱۳، ۱-۱۴، ۱-۱۵، ۱-۱۶) آورده شده است.



(ب) تغییرات زاویه پیچ



(آ) تغییرات زاویه رول



(ج) تغییرات زاویه یاو

شکل ۱-۱۲: 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 Controller for 3DOF Quadcopter Stand

By:

Ali BaniAsad

Supervisor:

Dr. Nobahari

July 2022