

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

دانشکده مهندسی برق  
گروه کنترل و سیستم

## کنترل مقاوم

نیمسال دوم ۰۴-۰۳

عنوان پروژه: رام کردن کوادروتور



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
مدرس: حمیدرضا تقی راد

سلام مهندس! 🙋

در این پروژه، شما به عنوان یک مهندس کنترل وظیفه دارید کنترل کننده‌ای مقاوم برای پایداری زوایای Roll و Pitch یک کوادروتور طراحی کنید. خوش بختانه، نیازی به سروکله زدن با داده‌های تجربی و شناسایی سیستم نیست! ما مدل خطی نامی و پروفایل نامعینی آن را (بر اساس مقاله مرجع) در اختیار شما قرار می‌دهیم. مأموریت شما طراحی، تحلیل و مقایسه کنترل کننده‌های  $H_\infty$  و  $\mu$  برای تضمین پایداری و عملکرد مطلوب کوادروتور، حتی با وجود عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات وارده بر سیستم است. ابزار شما برای این کار، دانش کنترل مقاوم، استفاده از نرم‌افزار متلب (Robust Control Toolbox) و خلاقیت مهندسی خودتان است.

🔗 وظیفه ۱: شناخت میدان نبرد و آماده‌سازی (۱۵ امتیاز)

قبل از طراحی، باید سیستم و چالش‌هایش را بشناسیم:

۱. معرفی سیستم:

- هدف ما، کنترل زوایای Roll ( $\phi$ ) و Pitch ( $\theta$ ) یک کوادروتور است که مدل‌های نامی خطی  $G_0$  برای هر زاویه به صورت زیر داده شده است:

$$G_{\theta,0}(s) = \frac{1547.4}{(s^2 + 10.12s + 390.4)(s + 5.373)}$$

$$G_{\phi,0}(s) = \frac{2049.5}{(s^2 + 19.03s + 426.2)(s + 6.764)}$$

- نامعینی سیستم به صورت ضربی ورودی بصورت زیر مدل می‌شوند:

$$W_\theta(s) = \frac{1659.6(s^2 + 2.868s + 60.44)}{(s + 9.678)(s + 24770)}$$

$$W_\phi(s) = \frac{1.9017(s^2 + 3.813s + 91.61)}{s^2 + 43.53s + 545.3}$$

- روش تعیین مدل نامی و کران نامعینی را در مقاله مورد بازبینی دقیق قرارداد و ویژگی‌های آن را گزارش کنید.

۲. مدل‌سازی در متلب:

- با استفاده از دستورات tf, ultidyn و uss سیستم نامعین را برای هر دو کانال Roll و Pitch در متلب تعریف کنید.

۳. تجسم نامعینی:

- تعداد کافی نمونه تصادفی از سیستم نامعین تولید کنید.
- نمودارهای بودی (Bode) سیستم نامی را در کنار پاسخ فرکانسی نمونه‌های تصادفی رسم کنید تا محدوده تغییرات رفتار سیستم را ببینید.

- نمودار پاسخ فرکانسی نامی را به همراه «مرزهای نامعینی» که توسط  $|W(j\omega)|$  تعریف می‌شود، رسم کنید.

#### ۴. اهداف و پیش‌نیازها:

- اهداف عملکردی کلیدی: زمان نشست حدود  $0.3/0$  ثانیه، فراجش بسیار کم (نزدیک صفر)، خطای ماندگار صفر برای ورودی پله مرجع.
- محدودیت‌ها: سیگنال کنترلی باید در محدوده مجاز عملگرها باقی بماند (این را در طراحی وزن  $W_u$  لحاظ خواهید کرد).
- آماده‌سازی برای طراحی: ساختار استاندارد کنترل مقاوم را در متلب بسازید. این ساختار باید شامل پلنت نامعین، ورودی‌های مرجع/اغتتاش/نویز و خروجی‌های خطا/کنترلی، به همراه محلهایی برای توابع وزن عملکرد  $(W_s, W_u)$  باشد که در وظیفه بعدی طراحی خواهید کرد. (راهنمایی: از sysic یا ساخت دستی استفاده کنید).

#### 🔦 وظیفه ۲: کنترل‌کننده $H_\infty$ وارد می‌شود! (۴۰ امتیاز)

حالا زمان طراحی است! می‌خواهیم با استفاده از روش حساسیت مخلوط  $(H_\infty)$ ، کنترل‌کننده‌ای طراحی کنیم که سیستم نامی را کنترل کند و در برابر نامعینی‌ها مقاوم باشد.

#### ۱. طراحی هوشمندانه وزن‌ها:

- توابع وزنی عملکرد  $(W_s, W_u)$  را طراحی و توجیه کنید.
- (a)  $W_s$ : برای شکل‌دهی به تابع حساسیت  $S = (I + GK)^{-1}$  و دستیابی به اهداف ردیابی (پهنای باند، زمان نشست، خطای ماندگار). می‌توانید از ایده مقاله برای تعریف  $T_{ideal}$  و سپس  $W_s \approx \frac{1}{S_{ideal}}$  الهام بگیرید.
- (b)  $W_u$ : برای محدود کردن انرژی یا دامنه سیگنال کنترلی  $U = K(I + GK)^{-1}$ ، مقداری را برای  $W_u$  پیشنهاد دهید. (مقاله مرجع از مقدار  $W_u = 0.05$  استفاده کرده، شما می‌توانید این مقدار را تغییر دهید و توجیه کنید).

#### ۲. سنتز کنترل‌کننده $H_\infty$ :

- با استفاده از mixsyn یا hinsyn و وزن‌های طراحی‌شده، کنترل‌کننده  $K_{H_\infty}(s)$  را محاسبه کنید. مقدار  $\gamma$  به‌دست‌آمده را گزارش دهید. آیا  $\gamma < 1$  است؟ این مقدار چه معنایی دارد؟

#### ۳. تحلیل عملکرد نامی:

- عملکرد کنترل‌کننده  $K_{H_\infty}(s)$  را روی سیستم نامی  $(G_0)$  به دقت بررسی کنید:
  - (a) پاسخ پله حلقه‌بسته (آیا به اهداف عملکردی نزدیک است؟).
  - (b) سیگنال کنترلی متناظر (آیا منطقی به نظر می‌رسد؟).
  - (c) نمودارهای مقادیر تکین  $S, U, T$  و مقایسه آن‌ها با  $\frac{1}{W}, \frac{1}{W_u}, \frac{1}{W_s}$ .

#### ۴. چرخه بهبود:

- این قسمت، قلب مهندسی کنترل است! اگر عملکرد کاملاً مطلوب نیست یا سیگنال کنترلی بیش از حد بزرگ است، به مرحله ۱ برگردید، وزن‌ها را **هوشمندانه تنظیم کنید** و کنترل‌کننده را دوباره طراحی کنید. این چرخه را تا رسیدن به یک توازن قابل قبول بین عملکرد ردیابی، محدودیت سیگنال کنترلی و الزامات اولیه نامعینی تکرار کنید. **فرآیند تنظیم و دلایل تغییر وزن‌ها را مستند کنید.**

۵. آزمون روی سیستم نامعین:

- بهترین کنترل‌کننده  $K_{H_\infty}(s)$  که به دست آوردید را روی مجموعه سیستم‌های نامعین (سیستم نامی + نمونه‌های تصادفی) شبیه‌سازی کنید (مثلاً با usim).
- نمودارهای پاسخ پله و سیگنال کنترلی را برای این مجموعه رسم کنید. آیا سیستم برای همه نمونه‌ها پایدار می‌ماند؟ عملکرد چقدر تغییر می‌کند؟

۶. برخورد با واقعیت: اشباع!

- اثر اشباع عملکرد (مثلاً محدودیت ولتاژ یا نیروی موتور) را به صورت یک بلوک saturation در شبیه‌سازی (برای سیستم نامی و چند نمونه نامعین) مدل کنید. حد اشباع را منطقی (یا بر اساس اطلاعات مسئله) تعیین کنید.
- آیا اشباع باعث ناپایداری یا افت شدید عملکرد می‌شود؟ نتایج را تحلیل کنید.

🏆 وظیفه ۳: چالش  $\mu$ : تضمین عملکرد در طوفان عدم قطعیت! (۳۵ امتیاز)

کنترل‌کننده  $H_\infty$  شما احتمالاً خوب کار می‌کند، اما آیا عملکرد مطلوب را برای تمام سیستم‌های ممکن در محدوده نامعینی تضمین می‌کند؟ اینجا  $\mu$  وارد می‌شود!

۱. آنالیز  $\mu$ : زیر ذره‌بین بردن  $H_\infty$ :

- کنترل‌کننده  $K_{H_\infty}(s)$  نهایی خود از وظیفه ۲ را بردارید.
- با استفاده از mussv، پایداری مقاوم (RS) و عملکرد مقاوم (RP) آن را تحلیل کنید. (برای RP، باید یک بلوک نامعینی مجازی برای عملکرد تعریف کنید).
- نمودارهای  $\mu$  بر حسب فرکانس را رسم کنید. آیا  $\mu_{RS} < 1$  و  $\mu_{RP} < 1$  برای تمام فرکانس‌ها برقرار است؟
- نتایج را تفسیر کنید. آیا  $H_\infty$  واقعاً عملکرد را در بدترین حالت نامعینی تضمین می‌کند؟

۲. سنتز  $\mu$ : طراحی برای بدترین سناریو (در صورت نیاز):

- اگر  $\mu_{RP} \geq 1$  بود، یعنی عملکرد مقاوم تضمین نشده است. حالا با استفاده از سنتز  $\mu$  (تکرار  $D - K$  با دستور musyn یا dksyn)، یک کنترل‌کننده جدید  $K_\mu(s)$  طراحی کنید که هدفش  $\mu_{RP} < 1$  باشد.
- توجه: اگر  $\mu_{RP}$  اولیه خیلی بزرگ بود، شاید لازم باشد اول کمی اهداف عملکردی (وزن  $W_s$ ) را ساده‌تر کنید تا سنتز  $\mu$  موفقیت‌آمیز باشد.
- پس از طراحی  $K_\mu(s)$  مجدداً آنالیز  $\mu$  را انجام دهید تا موفقیت‌آمیز بودن آن تأیید شود.

۳. مقایسه قهرمانان:  $H_\infty$  در برابر  $\mu$ :

- کنترل کننده  $K_{H_\infty}(s)$  و  $K_\mu(s)$  (در صورت طراحی) را مقایسه کنید:

(a) مرتبه کنترل کننده: کدام پیچیده تر است؟ آیا مرتبه  $K_\mu(s)$  خیلی بالاست؟

(b) (اختیاری اما مفید): اگر مرتبه  $K_\mu(s)$  بالاست، آن را با استفاده از روش های کاهش مرتبه

(reduce, balred) ساده کنید  $K_{\mu,red}(s)$ . آیا عملکرد و پایداری مقاوم حفظ می شود؟

(c) شبیه سازی نهایی: عملکرد  $K_{H_\infty}(s)$  و  $K_\mu(s)$  (یا  $K_{\mu,red}(s)$ ) را روی سیستم نامعین در

حضور اغتشاش (مثلاً پله ورودی) و نویز سنسور (مثلاً نویز سفید با توان مشخص)

شبیه سازی و مقایسه کنید. کدام یک در عمل بهتر است (از نظر ردیابی، تضعیف اغتشاش،

سیگنال کنترلی، رفتار با اشباع)؟

- بحث: آیا پیچیدگی اضافی سنتز  $\mu$  ارزشش را داشت؟ چه زمانی به سراغ  $\mu$  می رویم؟

□ وظیفه ۴: ارائه دستاوردها و نتیجه گیری (۱۰ امتیاز)

زمان نمایش نتایج و تحلیل های شماست!

۱. گزارش مهندسی:

- یک گزارش کامل، منظم و خوانا تهیه کنید که شامل تمام مراحل وظایف ۱ تا ۳ باشد.
- بر توجیه انتخاب ها (مخصوصاً توابع وزنی)، تحلیل دقیق نمودارها و مقایسه نتایج بین روش های مختلف و در شرایط گوناگون (نامی، نامعین، با/بدون اشباع، با/بدون اغتشاش) تمرکز ویژه ای داشته باشید.

۲. نتیجه گیری و تأمل:

- خلاصه ای از یافته های کلیدی خود ارائه دهید.
  - مهم ترین چالش هایی که با آن ها روبرو شدید و نحوه غلبه بر آن ها را بیان کنید.
  - مهم ترین درس هایی که از این پروژه در مورد طراحی کنترل مقاوم آموختید چیست؟
۳. تحویل: گزارش تایپ شده به همراه تمام کدهای متلب و فایل های سیمولینک (در صورت استفاده).

موفق باشید و از این چالش مهندسی لذت ببرید! 🚀

مقاله مرجع برای رجوع و استفاده:

[1] Noormohammadi-Asl, Ali, et al. "System identification and  $H_\infty$ -based control of quadrotor attitude." *Mechanical Systems and Signal Processing* 135 (2020): 106358.