سلام مهندس! 👏

در این پروژه، شما به عنوان یک مهندس کنترل وظیفه دارید کنترل‌کننده‌ای مقاوم برای پایدارسازی زوایای Roll و Pitch یک کوادروتور طراحی کنید. خوش‌بختانه، 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 کنترل‌کننده‌های H_∞ و μ 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 (ϕ) و Pitch (θ) 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 قرارداده و ویژگی های 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 ۰٫۳ ثانیه، فراجهش 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/اغتشاش/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_∞ وارد می‌شود! **(۴۰ امتیاز)**

حالا زمان طراحی است! می‌خواهیم با استفاده از روش حساسیت مخلوط (H_∞)، 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_∞:

- با استفاده از `mixsyn` یا `hinfsyn` و وزن‌های طراحی‌شده، کنترل‌کننده $K_{H_\infty}(s)$ را محاسبه کنید. مقدار γ 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 عملگر (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 μ: تضمین عملکرد در طوفان عدم قطعیت! **(۳۵ امتیاز)**

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

۱. آنالیز μ: زیر ذره‌بین بردن H_∞:

- 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 μ 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_∞ واقعاً عملکرد را در بدترین حالت نامعینی تضمین می‌کند؟

۲. سنتز μ: طراحی برای بدترین سناریو (در صورت نیاز):

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

۳. مقایسه قهرمانان: H_∞ در برابر μ:

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

a) مرتبه کنترل‌کننده: کدام پیچیده‌تر است؟ آیا مرتبه $K_\mu(s)$ خیلی بالاست؟

b) (اختیاری اما مفید): اگر مرتبه $K_\mu(s)$ بالاست، آن را با استفاده از روش‌های کاهش مرتبه (`reduce, balred`) ساده کنید $K_{\mu,red}(s)$. آیا عملکرد و پایداری مقاوم حفظ می‌شود؟

c) شبیه‌سازی 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) شبیه‌سازی و مقایسه کنید. کدام یک در عمل بهتر است (از نظر ردیابی، تضعیف اغتشاش، سیگنال کنترلی، رفتار با اشباع)؟

- **بحث:** آیا پیچیدگی اضافی سنتز μ ارزشش را داشت؟ چه زمانی به سراغ μ می‌رویم؟

📄 وظیفه ۴: ارائه دستاوردها و نتیجه‌گیری **(۱۰ امتیاز)**

زمان نمایش نتایج و تحلیل‌های شماست!

۱. گزارش مهندسی:

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

۲. نتیجه‌گیری و تأمل:

- خلاصه‌ای از یافته‌های کلیدی خود ارائه دهید.
- مهم‌ترین چالش‌هایی که با آن‌ها روبرو شدید و نحوه غلبه بر آن‌ها را بیان کنید.
- مهم‌ترین درس‌هایی که از این پروژه در مورد طراحی کنترل مقاوم آموختید چیست؟

۳. تحویل: گزارش تایپ‌شده به همراه تمام کدهای متلب و فایل‌های 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∞-based control of quadrotor attitude." Mechanical Systems and Signal Processing 135 (2020): 106358.