قسمت سوم

چهار کنترل‌گر، یک سطح: قوانین کنترل

مجموعه:	گزارش پیشرفت مشاور — بررسی عمیق
مدت:	۱۰ تا ۱۲ دقیقه
راوی:	مجری تنها
منابع:	بخش ۲.۲ گزارش مشاور

افتتاحیه: یک سطح، چهار فلسفه

در قسمت قبل، سطح لغزشی سیگما را طراحی کردیم. هر کنترل‌گر در این پروژه همان سطح را مشترک دارد. آنچه تفاوت دارد قانون کنترل است — تابعی که سیگما را به عنوان ورودی می‌گیرد و یک نیرو برای اعمال به چرخ‌دستی خروجی می‌دهد.

سیگما را مانند کیلومترشمار یک خودرو در نظر بگیرید. کیلومترشمار در هر خودرویی یکسان است. آنچه تفاوت دارد موتور و گیربکس است — مکانیزمی که به آنچه کیلومترشمار نشان می‌دهد واکنش نشان می‌دهد. ما چهار موتور مختلف داریم، هر کدام با مشخصات و مبادلات متفاوت.

بگذارید یک به یک از آن‌ها عبور کنیم.

کنترل‌گر اول: کنترل مُد لغزشی کلاسیک

کنترل مُد لغزشی کلاسیک خط پایه است. از زمان کار اوتکین در ۱۹۷۷ استاندارد این حوزه بوده، و معیاری که هر چیز دیگری در برابر آن سنجیده می‌شود.

قانون کنترل سه جمله دارد: یک مؤلفه کنترل معادل، یک مؤلفه سوئیچینگ، و یک مؤلفه میرایی مشتق.

u = u-equivalent + K * sat(sigma/epsilon) - k-d * sigma-dot

کنترل معادل

از شرط لغزشی ایده‌آل مشتق می‌شود: اگر مدل کامل بود، چه نیرویی برای نگه داشتن سیگما در دقیقاً صفر نیاز بود؟ سیگما-دات را صفر بگذارید، معادلات حرکت را جایگزین کنید، و برای u حل کنید. نتیجه: u-eq مساوی است با منفی L ضربدر معکوس M ضربدر F، تقسیم بر L ضربدر معکوس M ضربدر B، که F همه جملات نیروی غیرخطی را جمع می‌کند — کوریولیس، گرانش، و اصطکاک — و L بردار گرادیان سطح است. در کد، این دو ضرب ماتریسی و یک تقسیم اسکالر است.

جمله سوئیچینگ

به جای تابع علامت خالص از تابع اشباع استفاده می‌کند. اشباع تکه‌تکه است: داخل لایه مرزی که قدرمطلق سیگما کمتر از اپسیلون است، مساوی سیگما تقسیم بر اپسیلون است — یک شیب خطی. بیرون از لایه مرزی، مساوی علامت سیگماست — سوئیچینگ سخت. این لرزش را که سوئیچینگ تابع علامت خالص ایجاد می‌کند حذف می‌کند. عرض لایه مرزی اپسیلون در استفاده عملیاتی ۳.۰ است.

جمله مشتق

منفی کا-دی ضربدر سیگما-دات میرایی اضافی فراهم می‌کند. با سرعت تغییر سیگما متناسب است، که نوسانات را با نزدیک شدن مسیر به سطح میرا می‌کند.

بهینه‌سازی شش پارامتر برای این کنترل‌گر تنظیم می‌کند: کا-یک، کا-دو، لامبدا-یک، لامبدا-دو، کا بهره سوئیچینگ، و کا-دی بهره مشتق.

کنترل‌گر دوم: الگوریتم ابر-پیچشی

الگوریتم ابر-پیچشی یا STA-SMC یک کنترل‌گر مُد لغزشی مرتبه دوم است. تفاوت کلیدی از کنترل کلاسیک: عمل سوئیچینگ یک سطح عمیق‌تر به درون ساختار کنترل رانده می‌شود تا نیروی خروجی u پیوسته باشد. این مستقیماً لرزش را کاهش می‌دهد.

قانون کنترل به دو مؤلفه تقسیم می‌شود که با هم جمع می‌شوند:

u = u-one + u-two

u-one مساوی است با منفی K-one ضربدر قدرمطلق سیگما به توان ۵.۰ ضربدر علامت سیگما. این جمله همه‌جا پیوسته است — با نزدیک شدن سیگما به صفر، u-one به جای پریدن به آرامی به صفر نزدیک می‌شود. نزدیک صفر یک کف‌گذاری کوچک با دلتا مساوی ده به توان منفی ده اعمال می‌شود تا از تکینگی عددی جلوگیری شود.

u-two مساوی است با منفی K-two ضربدر انتگرال علامت سیگما از صفر تا t. این جمله انتگرالی خطای ماندگار را حل می‌کند — تجمع می‌کند تا سیگما صفر شود. بدون آن، u-one به تنهایی یک خطای باقیمانده به جا می‌گذاشت.

قید بحرانی: K-one باید از K-two بزرگ‌تر باشد، هر دو از صفر بزرگ‌تر باشند. شرایط مورنو-اوسوریو این را برای همگرایی زمان محدود لازم دارند.

یک مسئله باز شناخته‌شده در گزارش وجود دارد. بهینه‌سازی استحکام بهره‌های STA با K-one مساوی ۰۲.۲ و K-two مساوی ۶۷.۶ تولید کرد. این نقض K-one بزرگ‌تر از K-two است. گزارش این را به صراحت به عنوان یک مسئله یکپارچگی مستند می‌کند که قبل از انتشار نیاز به رفع دارد.

کنترل‌گر سوم: کنترل مُد لغزشی تطبیقی

کنترل مُد لغزشی تطبیقی یک مشکل عملی واقعی را حل می‌کند: اگر ندانید اغتشاشات چقدر بزرگ هستند چه می‌کنید؟ در کنترل کلاسیک، بهره سوئیچینگ K باید به قدر کافی بزرگ باشد که همه اغتشاشات را رد کند. اما اگر K را بیش از حد محافظه‌کارانه تنظیم کنید، لرزش بیش از حد می‌شود. اگر خیلی کوچک تنظیم کنید، اغتشاشات نفوذ می‌کنند.

راه‌حل کنترل مُد لغزشی تطبیقی: بگذارید K به صورت آنلاین تطبیق یابد.

قانون کنترل: u مساوی است با منفی K(t) ضربدر اشباع سیگما بر اپسیلون. همان ساختار اشباع کلاسیک، اما بهره K حالا یک تابع متغیر با زمان است.

قانون تطبیق: مشتق K مساوی است با گاما ضربدر قدرمطلق سیگما، منهای دلتا-نشت ضربدر K، با یک ناحیه مرده اعمال‌شده وقتی قدرمطلق سیگما کمتر از d-z است.

جمله گاما ضربدر قدرمطلق-سیگما K را وقتی آونگ دور از سطح است به بالا هدایت می‌کند. جمله منفی دلتا-نشت ضربدر K یک افت آرام ایجاد می‌کند — بدون آن، K فقط افزایش می‌یافت و به بی‌نهایت می‌رفت. نرخ نشت دلتا-نشت مساوی ۰۱.۰ انتخاب شد. ناحیه مرده از تطبیق جلوگیری می‌کند وقتی سیگما کوچک‌تر از d-z مساوی ۰۵.۰ است، تا از تأثیر نویز حسگر جلوگیری شود.

K بین ۱.۰ و ۱۰۰ محدود شده است. بهینه‌سازی پنج پارامتر تنظیم می‌کند: کا-یک، کا-دو، لامبدا-یک، لامبدا-دو، و گاما نرخ تطبیق.

کنترل‌گر چهارم: هیبرید تطبیقی ابر-پیچشی

کنترل‌گر هیبرید تلاش می‌کند بهترین‌های STA و تطبیقی را ترکیب کند: کنترل پیوسته نرم از STA به علاوه تطبیق بهره آنلاین از تطبیقی.

قانون کنترل: u مساوی است با منفی k-one(t) ضربدر قدرمطلق سیگما به توان ۵.۰ ضربدر علامت سیگما، منهای k-two(t) ضربدر انتگرال علامت سیگما.

هر دو بهره k-one و k-two حالا طبق قوانین تطبیق خودشان تطبیق می‌یابند، با نرخ‌های گاما-یک مساوی ۱.۰ و گاما-دو مساوی ۰۵.۰، و یک محدودکننده نرخ ۰.۵ در ثانیه برای جلوگیری از جهش‌های شدید بهره.

گزارش یک ناپایداری شناخته‌شده را مستند می‌کند: تحت اغتشاشات بزرگ و شرایط اولیه تهاجمی، کنترل‌گر هیبرید ۹.۶۶۶ درجه فراجهش و افزایش ۱۷۶ درصدی لرزش تولید می‌کند. علت ریشه‌ای: یک حلقه بازخورد. وقتی سیگما بزرگ است، k-one به بالا تطبیق می‌یابد. اما جمله STA با ریشه مربع سیگما ضربدر k-one متناسب است — پس با رشد k-one و رشد سیگما، یکدیگر را تقویت می‌کنند. این یک موضوع باز تحقیقاتی است.

در نتایج مونت‌کارلو، کنترل‌گر هیبرید مقادیر شاخص برمی‌گرداند: انرژی مساوی ده به توان ششم و لرزش مساوی صفر. این‌ها نشانه شکست داخلی کنترل‌گر هستند، نه فروپاشی شبیه‌سازی.

[یادداشت صوتی:] مسئله باز بهره‌های استحکام STA را بشناسید. این محتمل‌ترین سوال مشاور است. K-one مساوی ۰۲.۲ و K-two مساوی ۶۷.۶ در نتیجه بهینه‌سازی ۱۵ سناریویی به دست آمد و لرزش را تجربی کاهش می‌دهد. اما نقض K-one بزرگ‌تر از K-two است. اثبات تضمین همگرایی زمان محدود برای این بهره‌ها اعمال نمی‌شود. قبل از انتشار نیاز به رفع دارد.

خلاصه: تفاوت هر کنترل‌گر

کنترل مُد لغزشی کلاسیک: سوئیچینگ از طریق اشباع، کنترل معادل مدل غیرخطی را دقیقاً مدیریت می‌کند، ساده و قابل اطمینان.

الگوریتم ابر-پیچشی: جمله پیوسته u-one سوئیچینگ را به انتگرال u-two می‌راند، که لرزش فرکانس بالا را به شدت کاهش می‌دهد. کاهش ۷۴ درصدی در شاخص لرزش در برابر کلاسیک.

کنترل مُد لغزشی تطبیقی: K به صورت آنلاین تطبیق می‌یابد، بنابراین بهره سوئیچینگ به صورت خودکار کران‌های اغتشاش ناشناخته را دنبال می‌کند.

هیبرید تطبیقی ابر-پیچشی: هدفش بهترین هر دو است، اما در حال حاضر تحت خطاهای بزرگ ناپایدار است. به عنوان مسئله باز مستند شده.

منابع گزارش: بخش ۲.۲ — معادلات eq:sat, eq:classical, eq:ueq, eq:sta, eq:adaptive, eq:adaptive_law, eq:hybrid