قسمت ششم

معیارهای مونت‌کارلو: طراحی آزمایش صادقانه

مجموعه: گزارش پیشرفت مشاور — بررسی عمیق

مدت: ۸ تا ۱۰ دقیقه

راوی: مجری تنها

منابع: بخش‌های ۱.۵ تا ۵.۵ گزارش مشاور

افتتاحیه: یک اجرا هیچ چیز را ثابت نمی‌کند

یک شبیه‌سازی منفرد که کنترل‌گر شما را در حال کار نشان می‌دهد یک معیار نیست. ممکن است یک مجموعه شرایط اولیه خوش‌شانس بوده باشد. آونگ ممکن است تقریباً عمودی شروع کرده باشد. اغتشاشات ممکن است ملایم بوده باشند. یک اجرا به شما نمی‌گوید کنترل‌گر در طیف کامل شرایطی که با آن روبرو خواهد شد چگونه رفتار می‌کند.

آنالیز مونت‌کارلو این مشکل را با اجرای یک آزمایش یکسان با شرایط تصادفی‌شده چندین بار حل می‌کند. توزیع آماری نتایج — نه فقط یک نتیجه — خروجی است.

مطالعه MT-5 معیار اصلی است. ۱۰۰ اجرا به ازای هر کنترل‌گر، چهار کنترل‌گر، ۴۰۰ شبیه‌سازی کل روی مدل کامل غیرخطی.

راه‌اندازی آزمایش

هر جزئیات راه‌اندازی مونت‌کارلو در گزارش مستند شده. در عمل این‌طور است:

شرایط اولیه به صورت یکنواخت و مستقل برای هر اجرا کشیده می‌شوند:

- موقعیت چرخ‌دستی: یکنواخت بین منفی ۰۵.۰ و مثبت ۰۵.۰ متر. یعنی ۵ سانتی‌متر در هر جهت.
- زوایای آونگ تتا-یک و تتا-دو: یکنواخت بین منفی ۰۵.۰ و مثبت ۰۵.۰ رادیان. یعنی تقریباً منهای و مثبت ۹.۲ درجه از عمودی.
- سرعت چرخ‌دستی: یکنواخت بین منفی ۰۲.۰ و مثبت ۰۲.۰ متر بر ثانیه.
- سرعت‌های زاویه‌ای: یکنواخت بین منفی ۰۵.۰ و مثبت ۰۵.۰ رادیان بر ثانیه برای هر دو آونگ.

توزیع‌های یکنواخت انتخاب شدند چون هیچ دانش قبلی از اینکه کدام شرایط شروع محتمل‌ترند وجود ندارد. یکنواخت کمترین فرض‌ترین توزیع است — هر نقطه در محدوده را برابر وزن می‌دهد.

مدت شبیه‌سازی: ۱۰ ثانیه با دوره کنترل ۰۱.۰ ثانیه. یعنی ۱۰۰۰ گام کنترل در هر اجرا.

مدل: دینامیک‌های غیرخطی کامل. هر نتیجه MT-5 که در گزارش می‌یابید — هر زمان یکنواختی، هر فراجهش، هر مقدار انرژی — روی مدل کامل غیرخطی محاسبه شده، نه مدل ساده‌شده PSO.

معیار موفقیت

چطور تصمیم می‌گیرید یک اجرا موفق بوده؟ معیار: قدرمطلق هر دو زاویه آونگ باید برای حداقل یک ثانیه پیوسته در بازه ۱۰ ثانیه‌ای درون ۲ درصد زاویه تعادل بماند.

دو درصد از عمودی یعنی تقریباً ۰۲.۰ رادیان — حدود ۱.۱ درجه. نگه داشتن هر دو زاویه در این باند برای یک ثانیه کامل نشان می‌دهد کنترل‌گر سیستم را واقعاً پایدار کرده، نه فقط از تعادل عبور کرده در حالی که هنوز در حال واگرایی است.

همه چهار کنترل‌گر آزمایش‌شده نرخ موفقیت ۱۰۰ درصد به دست آوردند — هیچ واگرایی در ۱۰۰ اجرا نبود. این نتیجه مورد انتظار با توجه به بهره‌های تنظیم‌شده با PSO بود، اما باید تجربی تأیید می‌شد.

چرا چهار کنترل‌گر، نه هفت تا؟

گزارش به صراحت دلیل حذف سه کنترل‌گر آزمایش‌نشده را مستند می‌کند.

SMC بالابر چرخشی حذف شد چون برای مدیریت آونگ‌هایی که از موقعیت آویزان شروع می‌کنند طراحی شده. شرایط اولیه MT-5 نزدیک موقعیت عمودی شروع می‌کنند. در این رژیم نزدیک عمودی، قانون کنترل مبتنی بر انرژی بالابر چرخشی درگیر نمی‌شود — گنجاندن آن نتایج گمراه‌کننده‌ای تولید می‌کرد.

MPC حذف شد چون به کتابخانه cvxpy نیاز دارد که در زمان مطالعه MT-5 در شبیه‌ساز دسته‌ای ادغام نشده بود. یک محدودیت عملی زیرساختی.

کارخانه کنترل‌گرها یک کنترل‌گر نیست — یک لایه مسیریابی است که کنترل‌گرها را ایجاد می‌کند. قابل اعمال نیست.

شکست هیبرید: مقادیر شاخص

کنترل‌گر هیبرید تطبیقی ابر-پیچشی در ۱۰۰ اجرای مونت‌کارلو شکست مداوم برگرداند. نه ۵۰. نه بعضی‌ها. هر اجرا.

حالت شکست داخلی است: بهره تطبیقی واگرا می‌شود — بدون کران رشد می‌کند. شبیه‌سازی سقوط نمی‌کند. کنترل‌گر به کار ادامه می‌دهد. اما نتایج ناجور تولید می‌کند.

برای نمایش وفادارانه این بدون سقوط آمار، گزارش مقادیر شاخص تعیین می‌کند: انرژی مساوی ده به توان ششم نیوتن مربع ثانیه، لرزش مساوی صفر. این مقادیر در جدول نتایج علامت‌گذاری و به عنوان شکست کنترل‌گر، نه داده گمشده، توضیح داده شده‌اند.

شکاف تکرارپذیری

این بخش صادقانه‌ای است. مطالعه مونت‌کارلو MT-5 دانه تصادفی را ثبت نکرد. شرایط اولیه از توزیع‌های یکنواخت با محدوده‌های بیان‌شده کشیده شده‌اند، و روش مستند شده. اما اگر سعی کنید ۱۰۰ مجموعه دقیق شرایط اولیه‌ای که استفاده شدند را بازتولید کنید، نمی‌توانید.

گزارش این را به صراحت به عنوان یک شکاف تکرارپذیری مستند می‌کند. نتایج آماری — میانگین‌ها، انحراف معیارها، فاصله‌های اطمینان — معتبر هستند. اما تکرار دقیق اجرا به اجرا بدون دانه امکان‌پذیر نیست.

آیتم اقدام ثبت شده: اجراهای آتی این معیار دانه تصادفی numpy را در شروع هر مطالعه مونت‌کارلو ثبت خواهند کرد.

> **[یادداشت صوتی:]** مطالعه MT-5 انرژی را به واحد نیوتن مربع ثانیه — انتگرال u به توان دو در طول زمان — گزارش می‌دهد. این یک معیار تلاش کنترل است، نه انرژی فیزیکی به ژول. مطالعه پیشین QW-2 انرژی را به ژول گزارش داد. اینها معیارهای متفاوتی هستند. وقتی عدد MT-5 کلاسیک ۹۸۴۳ نیوتن مربع ثانیه را می‌بینید و عدد متفاوتی به ژول از QW-2، متضاد نیستند — چیزهای متفاوتی را اندازه‌گیری می‌کنند.

نتیجه‌گیری

معیار MT-5 برای اعتبار طراحی شده: ۱۰۰ اجرا با شرایط اولیه تصادفی‌شده، مدل کامل غیرخطی، معیار موفقیت مستند، توجیه صریح حذف برای کنترل‌گرهای آزمایش‌نشده، و اعتراف صادقانه به شکاف دانه. شکست هیبرید به جای پنهان شدن یا حذف شدن با مقادیر شاخص نشان داده می‌شود.

در قسمت بعدی: اعداد از آن ۴۰۰ شبیه‌سازی در واقع چه معنایی دارند — آنالیز آماری و آزمون معنادار بودن.

منابع گزارش: بخش‌های ۱.۵ تا ۵.۵