پروپوزال ساخت نمونه آزمایشگاهی (پروتوتایپ) جرثقیل سقفی

پیاده‌سازی کنترل‌کننده NMPC بر روی سیستم گهواره-پاندول (طول کابل ثابت)

مستندات طراحی مهندسی و برآورد هزینه

۲۸ مرداد ۱۴۰۵

۱ چکیده و ساختار کلی سیستم

بر اساس معماری تعیین‌شده جهت اعتبارسنجی عملی الگوریتم‌های کنترلی، این پروپوزال به تشریح فاز ساخت نمونه آزمایشگاهی (Hardware-in-the-Loop) یک جرثقیل سقفی با درجات آزادی کاهش‌یافته می‌پردازد. در این فاز، متغیر کنترل‌شونده طول کابل (Reel Rate) به منظور تمرکز بر روی دینامیک پایه و کاهش پیچیدگی‌های ساختاری فاز اول حذف گردیده و سیستم به صورت یک مکانیزم استاندارد گهواره-پاندول (Cart-Pendulum) با طول بازوی نوسانی ثابت ($l = l_0$) طراحی شده است. سیستم محرکه از یک استپر موتور حلقه بسته و انتقال قدرت تسمه-پولی بهره می‌برد.

۲ اهداف دقیق و خروجی‌های مورد انتظار پروتوتایپ

مطابق با الزامات مهندسی سیستم، دستگاه ساخته‌شده باید به طور دقیق قادر به اجرای سناریوها و تولید خروجی‌های زیر باشد:

۱. **ردیابی موقعیت با دقت میلی‌متری (Positioning):** کالسکه باید قادر باشد به هر موقعیت مرجع x_{ref} در طول ریل (با کورس حرکتی مفید حدود ۱ متر) با خطای حالت ماندگار کمتر از ۱ میلی‌متر منتقل شده و متوقف گردد.

۲. **میرایی فعال نوسانات پاندول (Active Anti-Sway):** سیستم باید بتواند با اعمال شتاب/ترمزهای دینامیکی دقیق به کالسکه، زاویه نوسان پاندول (θ) را در حین حرکت در محدوده مجاز (مانند $\pm 10^\circ$) نگه داشته و ارتعاشات پسماند را در کمتر از ۳ ثانیه پس از رسیدن به مقصد به طور کامل خنثی کند ($\theta \to 0$).

۳. **استخراج لحظه‌ای حالات سیستم (State Estimation):** دستگاه باید موقعیت خطی ارابه (x) و زاویه پاندول (θ) را از طریق انکودرهای تعبیه‌شده با نرخ نمونه‌برداری حداقل ۱۰۰ هرتز استخراج کرده و به کامپیوتر مرکزی ارسال نماید.

۴. **اجرای بلادرنگ کنترل‌کننده پیش‌بین (Real-time NMPC):** سیستم سخت‌افزاری باید به عنوان یک پلنت فیزیکی در حلقه کنترل قرار گیرد؛ به طوری که سالور بهینه‌سازی در MATLAB فرمان‌های حرکتی (u) را محاسبه و به درایور موتور تزریق کند.

۳ طراحی مکانیکی

طراحی مکانیکی سیستم با رویکرد صلبیت بالا و کمترین اصطکاک لغزشی صورت گرفته است. نمای سه‌بعدی طراحی‌شده در نرم‌افزار SolidWorks در شکل (۱) ارائه شده است.

شکل ۱: مدل سه‌بعدی پروتوتایپ جرثقیل سقفی با طول بازوی ثابت (محیط SolidWorks)

شاسی اصلی از پروفیل‌های آلومینیوم شیاردار ۳۰ در ۳۰ سنگین تشکیل شده است. حرکت خطی کالسکه بر روی یک ریل مینیاتوری دقیق مدل MGNR15 به همراه واگن خطی بدون لقی (Backlash-free) صورت می‌پذیرد تا دینامیک غیرخطی اصطکاک استاتیک به حداقل برسد. بازوی پاندول از جنس آلومینیوم یا فیبر کربن بوده و در انتهای آن جرم متمرکز ۱ کیلوگرمی قرار دارد.

۴ معماری الکترونیکی و ابزار دقیق

برای دستیابی به اهداف فوق، سیستم به تجهیزات الکترونیکی زیر مجهز شده است:

- **عملگر حرکتی:** یک استپر موتور انکودردار (حلقه بسته) نما ۲۳ با گشتاور 20 kg.cm به همراه درایور HBS57 که تضمین‌کننده اجرای دقیق پروفایل‌های سرعت/شتاب بدون از دست دادن پله (Step Loss) است.
- **سنسور زاویه پاندول:** یک انکودر افزایشی با رزولوشن ۱۰۲۴ پالس بر دور متصل به مفصل پاندول که زاویه را با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری می‌کند.
- **واحد جمع‌آوری داده و واسط (DAQ):** یک برد Arduino Mega 2560 وظیفه خواندن پالس‌های انکودر پاندول، خواندن لیمیت‌سوئیچ‌های ایمنی، و برقراری ارتباط سریال با نرم‌افزار MATLAB/Simulink جهت دریافت فرمان‌های کنترلی را بر عهده دارد.

۵ لیست قطعات و برآورد هزینه ساخت

جدول زیر بر اساس استعلام دقیق بازار و تطابق کامل با قطعات مورد نیاز جهت مونتاژ مدل سه‌بعدی تدوین شده است. هزینه نهایی ساخت نمونه بدون احتساب دستمزد ماشین‌کاری قطعات واسط در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: لیست دقیق قطعات و تجهیزات پروتوتایپ جرثقیل سقفی

ردیف	نام قطعه و مشخصات دقیق	تعداد	قیمت واحد (تومان)	قیمت کل (تومان)
۱	پروفیل آلومینیوم شیاردار ۳۰ در ۳۰ سنگین (محور X - طول ۱۴۳ سانت)	۱ شاخه	۱،۱۷۰،۰۰۰	۱،۶۷۳،۱۰۰
۲	پروفیل آلومینیوم شیاردار ۳۰ در ۳۰ سنگین (پایه‌ها - طول ۶۰ سانت)	۲ شاخه	۱،۱۷۰،۰۰۰	۱،۴۰۴،۰۰۰
۳	پروفیل آلومینیوم شیاردار ۳۰ در ۳۰ سنگین (پایه‌های T - طول ۴۰ سانت)	۲ شاخه	۱،۱۷۰،۰۰۰	۹۳۶،۰۰۰
۴	براکت زاویه‌دار ۹۰ درجه (مخصوص پروفیل ۳۰۳۰)	۸ عدد	۸۱،۰۰۰	۶۴۸،۰۰۰
۵	ریل مینیاتوری عرض ۱۵ میلیمتر (MGNR15 برند HQM)	۱ عدد	۹۸،۵۰۰ (cm)	۱۰،۵۳۹،۵۰۰
۶	واگن خطی بدون لبه مینیاتوری عرض ۱۵ میلیمتر (MGN15)	۱ عدد	۱،۳۸۹،۰۰۰	۱،۳۸۹،۰۰۰
۷	تسمه تایم مدار باز مدل GT2 (عرض ۶ میل، طول ۳ متر)	۱ عدد	۱۱۳،۰۰۰	۳۳۹،۰۰۰
۸	استپر موتور انکودردار نما ۲۳ (مدل 57PHH20، گشتاور 20kg.cm)	۱ عدد	۹،۲۴۰،۰۰۰	۹،۲۴۰،۰۰۰
۹	درایور سروو موتور هیبریدی (HBS57)	۱ عدد	۵،۶۹۰،۰۰۰	۵،۶۹۰،۰۰۰
۱۰	انکودر مفصل پاندول (۱۰۲۴ پالس، ولتاژ ۵ تا ۲۴ ولت ABZA’B’Z’)	۱ عدد	۱۱،۸۷۰،۰۰۰	۱۱،۸۷۰،۰۰۰
۱۱	پولی تایم موتور و پولی هرزگرد GT2	۱ ست	۲۷۰،۰۰۰	۲۷۰،۰۰۰
۱۲	برد کنترلی Arduino Mega R3	۱ عدد	۲،۳۹۵،۰۰۰	۲،۳۹۵،۰۰۰
۱۳	منبع تغذیه سوئیچینگ ۲۴ ولت ۱۵ آمپر	۱ عدد	۱،۷۸۰،۰۰۰	۱،۷۸۰،۰۰۰
۱۴	میله پاندول (آلومینیوم یا فیبر کربن) و سیلندر توپر فلزی (۱ کیلوگرم)	۱ ست	۵۰۰،۰۰۰	۵۰۰،۰۰۰
۱۵	اتصالات، پیچ و مهره (T-Nut)، شفت، بلبرینگ، میکرویسوئیچ و کابل	۱ ست	۲،۴۵۹،۳۰۰	۲،۴۵۹،۳۰۰
۱۶	قطعات واسط و پایه نگهدارنده (پرینت سه‌بعدی PLA/PETG)	۱ ست	۱،۰۰۰،۰۰۰	۱،۰۰۰،۰۰۰
مجموع هزینه‌های سخت‌افزاری:				**۵۲،۱۳۲،۹۰۰**