



با اسمه تعالی

سیستم‌های کنترل پیشرفته (مدرس)

پروژه: سیستم گوی و میله

۱۴۰۲-۱۴۰۳-۱



تاریخ تحويل فاز ۱: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵

تاریخ تحويل فاز ۲: ۱۴۰۲/۱۰/۲۲

دستیار آموزشی مسئول: سیدفربد موسوی (farbodmoosavi@ut.ac.ir)

۱. مقدمه

سیستمی که قرار است در این پروژه مورد بررسی قرار بگیرد، سیستم گوی و میله است. این سیستم یکی از سیستم‌های کلاسیک در تئوری کنترل است. این سیستم به دلیل خواصی مانند غیرخطی بودن و ناپایداری ذاتی که ناشی از جاذبه زمین و اغتشاش‌های خارجی مانند لغزش مکانیکی می‌باشد، سیستم مناسبی جهت تحلیل و طراحی می‌تواند باشد. در این سیستم که یک نمونه از آن در شکل ۱ قابل مشاهده است، یک گوی بر روی یک میله قرار داده شده است. گوی مجاز است با یک درجه آزادی روی میله حرکت کند. یک سر میله توسط یک اهرم به یک سرو موتور متصل است که توسط سرو موتور ارتفاع و زاویه چرخش میله را تعیین می‌کنیم. زمانی که برای مثال چرخ دنده سرو موتور با زاویه α می‌چرخد، زاویه میله را به اندازه θ تغییر می‌دهد. با تغییر زاویه میله به نسبت حالت افقی، گرانش باعث می‌شود که گوی در امتداد میله بلغزد و در نتیجه آن می‌توان موقعیت گوی را توسط سرو موتور و اهرم متصل به آن جا به جا کرد. هدف نهایی این سیستم این است که بتوانیم سیستم را طوری کنترل کنیم که گوی در نقطه دلخواه بر روی میله بماند و اغتشاش‌های بیرونی نیز تاثیری بر روی موقعیت آن نداشته باشند.



شکل ۱: نمونه‌ای از سیستم گوی و میله

در شکل ۲ نمونه‌ای از دستگاه واقعی گوی و میله را مشاهده می‌کنید.

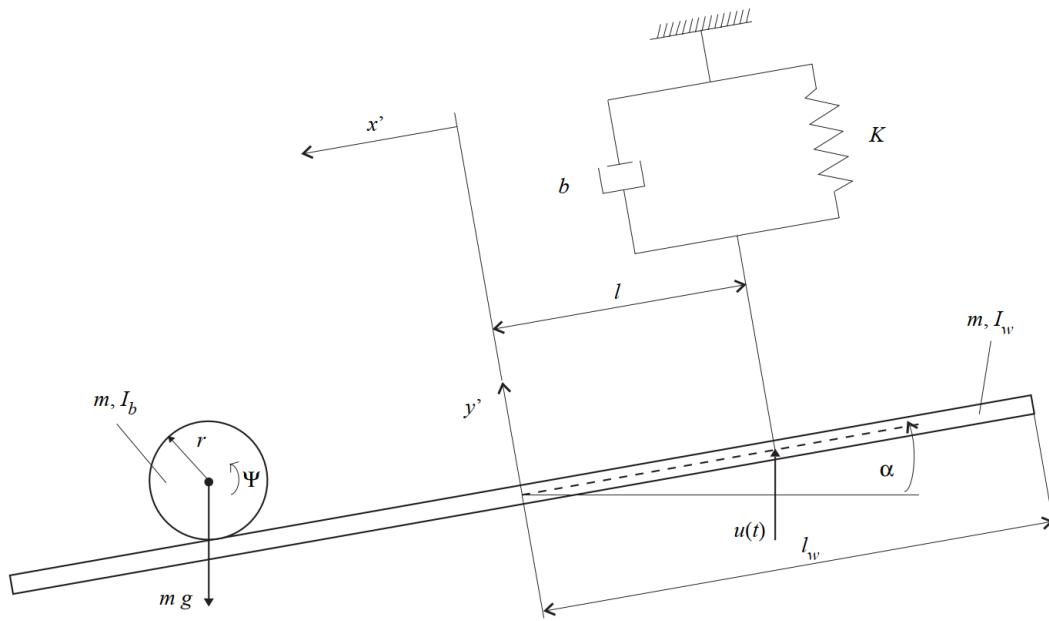


شکل ۲: سیستم گوی و میله آزمایشگاه

۲. مدل سازی

۱.۲. مدل حرکتی سیستم گوی و میله

برای مدل سازی سیستم گوی و میله، می توان آن را براساس شکل ۳ در نظر گرفت و با استفاده از مدل سازی به روش لانگرانژ، مدل حرکت سیستم را بدست آورد.



شکل ۳: مدل سازی سیستم واقعی

طبق مدل سازی که در بالا می بینید برای مدل کردن اتلاف و اصطکاک موتور و نوار نقاله ای که نیرو را به میله انتقال می دهد از یک دمپر با ثابت b و برای مدل کردن تاخیر صورت گرفته از یک فنر با سختی K استفاده می کنیم. در نهایت با در نظر گرفتن شرایط توضیح داده شده، معادلات حاکم بر سیستم به صورت زیر بدست خواهد آمد:

* معادلات حرکت سیستم گوی و میله

$$\begin{cases} \left(\frac{J_b}{r^2} + m \right) \ddot{x} + (mr^2 + J_b) \frac{1}{r} \ddot{\alpha} - mx\dot{\alpha}^2 = mg \sin(\alpha) \\ (mx^2 + J_b + J_w) \ddot{\alpha} + (2m\dot{x}\dot{x} + bl^2) \dot{\alpha} + Kl^2 \alpha + (mr^2 + J_b) \frac{1}{r} \ddot{x} - mgx \cos(\alpha) = u(t)l \cos(\alpha) \end{cases}$$

۲.۲. پارامترهای سیستم

پارامترهای عددی سیستم گوی و میله مورد بررسی به صورت زیر می باشد:

m	جرم گوی	$0.27kg$
r	شعاع گوی	$0.02m$
b	اصطکاک میله	$1 \frac{Ns}{m}$
K	سختی فنر متصل به میله	$10^{-3} \frac{N}{m}$
l	فاصله اعمال نیرو	$0.49m$
J_w	ممان اینرسی میله	$14.025 \times 10^{-2} kg.m^2$
J_b	ممان اینرسی گوی	$4.32 \times 10^{-5} kg.m^2$
g	شتاب گرانش زمین	$9.81 \frac{m}{s^2}$

۲.۲. متغیرهای حالت

به منظور بررسی و کنترل سیستم کوی و میله متغیرهای حالت، ورودی و خروجی سیستم به صورت زیر تعریف می‌شوند.

* متغیرهای حالت و ورودی سیستم

سیستم مذکور ۴ حالت، ۱ ورودی کنترلی و ۲ خروجی دارد که در ادامه معرفی شده‌اند:

: موقعیت گوی، x_1

: سرعت گوی، x_2

: زاویه میله، x_3

: سرعت زاویه‌ای میله، x_4

: ولتاژ ورودی، u

خروجی سیستم: موقعیت گوی و زاویه میله

که با در نظر گرفتن این متغیرهای حالت، نقاط تعادل سیستم به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$x_{eq} = \begin{bmatrix} x_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

۳. خواسته‌ها (فاز ۱)

.۱

۱. در این مرحله با در نظر گرفتن متغیرهای حالت معرفی شده و استفاده از معادلات حرکت سیستم گوی و میله، معادلات حالت سیستم را بدست بیاورید.

۲. برای بررسی صحت معادلات حالت به دست آمده، قطعه کدی شامل معادلات دیفرانسیل مرتبه یک در نرم‌افزار مطلب^۱ پیاده‌سازی کنید و با حل این معادلات متغیرهای حالت را در بازه زمانی ۰ تا ۵ به ازای ورودی پله رسم کنید. در فایل simulink که در اختیارتان قرار گرفته نیز متغیرهای حالت را در بازه ۰ تا ۵ به ازای ورودی پله رسم کنید. در صورتی که این دو نمودار از متغیرهای حالت عیناً شبیه به هم شد، مراحل کارتان به درستی انجام شده است.

۳. معادلات فضای حالت سیستم را حول نقطه کار در مبدا خطی‌سازی کنید و معادلات حالت سیستم خطی را بدست بیاورید.

۴. پایداری نقطه تعادل سیستم را از طریق مقادیر ویژه ماتریس خطی شده معادلات حالت بررسی کنید. کنترل‌پذیری، رؤیت‌پذیری و مینیمال بودن فضای حالت بدست آمده را بررسی کنید. در صورتی که سیستم مینیمال نیست، یک تحقق مینیمال از سیستم ارائه کنید. در ادامه پرسش‌ها از تحقق مینیمال استفاده کنید.

۵. ماتریس انتقال حالت این سیستم را محاسبه کنید.

۶.تابع تبدیل فضای حالت خطی شده سیستم را بدست آورید. قطب‌ها و صفرهای سیستم را گزارش کنید. (در این مرحله صرفا در صورت توابع تبدیل در صورت وجود اعداد کوچکتر از 10^{-4} می‌توانید آن ضریب را برابر صفر فرض کنید).

۷. سعی کنید برای کنترل موقعیت توب یک کنترلر PID طراحی کنید (برای طراحی مجاز به استفاده از ابزارهای آماده MATLAB مانند PIDtuner و sisotool هستید) و در صورت پایداری سیستم پاسخ متغیرهای حالت سیستم خطی و سیستم غیرخطی را رسم کنید. (سیگنال پله اعمالی به سیستم در هر دو حالت خطی و غیرخطی با دامنه ۰.۱ باشد).

۸. در این مرحله، قطب ناپایدار سیستم اصلی را حذف کرده و حال سعی کنید که کنترلر PID برای سیستم طراحی کنید. پاسخ متغیرهای حالت به ورودی پله برای سیستم جبران شده خطی و سیستم جبران شده غیرخطی را رسم کنید. (سیگنال پله اعمالی به سیستم در هر دو حالت خطی و غیرخطی با دامنه ۰.۱ باشد) رویت‌پذیری و کنترل‌پذیری مدهای سیستم جبران شده در خواسته ۸ را بررسی کنید.

^۱MATLAB

۴. خواسته‌ها (فاز ۲)

۱. دو دسته قطب سریع و کند برای سیستم در نظر بگیرید. برای هر دسته از قطب‌ها یک فیدبک حالت طراحی کنید.
با شبیه‌سازی پاسخ هر سیستم را بررسی و مقایسه کنید. یکی از شاخص‌های عملکرد سیستم سرعت آن است. بر اساس شبیه‌سازی نشان دهید چه هزینه‌ای برای سریع‌تر شدن قطب‌ها پرداخته شده است؟
۲. سوال قبل را در حضور اغتشاش جمع‌شونده با متغیرهای حالت تکرار کرده و نتایج خود را گزارش کنید. (از اغتشاشی با دامنه محدود و متغیر با زمان استفاده کنید).
۳. کنترل‌پذیری سیستم ردیاب با فیدبک حالت و کنترل انتگرالی را بررسی کنید. در صورت کنترل‌پذیر بودن، ردیاب با فیدبک حالت و کنترل انتگرالی را طراحی و با اعمال ورودی پله با دامنه ۰.۱ متغیرهای حالت سیستم را رسم کنید.
۴. سوال قبل را در حضور اغتشاش جمع‌شونده با متغیرهای حالت تکرار کرده و نتایج خود را گزارش کنید. (از اغتشاشی با دامنه محدود و متغیر با زمان استفاده کنید).
۵. تخمینگر لیونبرگر مرتبه کامل برای سیستم طراحی کرده و سوال ۱ را در حضور تخمینگر تکرار کنید.
۶. یک کنترلر همراه با تخمینگر کاهش مرتبه یافته برای سیستم طراحی و شبیه‌سازی کنید.
۷. به انتخاب خود یکی از کنترلر و تخمینگر سوال ۵ یا ۶ را برای سیستم غیرخطی شبیه‌سازی کنید. (به ازای ورودی پله با دامنه ۰.۱)
۸. برای سیستم خواسته ۷، مقاومت کنترلر به نسبت اغتشاش را با شبیه‌سازی بررسی کنید. برای این کار پس از رسیدن سیستم به حالت ماندگار، یک بار یک پالس با دامنه ۰.۱ و طول 0.05sec و یک بار پالس با دامنه ۰.۱ به خروجی سیستم اعمال کنید و خروجی سیستم را رسم کنید.

خواهشمند است جهت تحويل پروژه به نکات زیر توجه داشته باشید:

۱. دانشجویان می‌توانند سؤالات خود را پیرامون پروژه، با دستیاران آموزشی مسئول از طریق راههای ارتباطی در نظر گرفته شده مطرح کنند.
۲. دقت کنید که بخشی از نمره شما برای تست کنترلرهای طراحی شده بر روی سیستم واقعی موجود در آزمایشگاه کنترل می‌باشد.
۳. فایل ارسالی باید حاوی یک فایل گزارش به صورت PDF شامل پاسخ تشریحی و نحوه اجرای کدها و فایل‌های شبیه‌سازی باشد که می‌بایست به صورت یک فایل کلی با فرمت zip در قالب **MC-Project-SID1-SID2** ارسال شود. (که در آن SID شماره دانشجویی شماست).