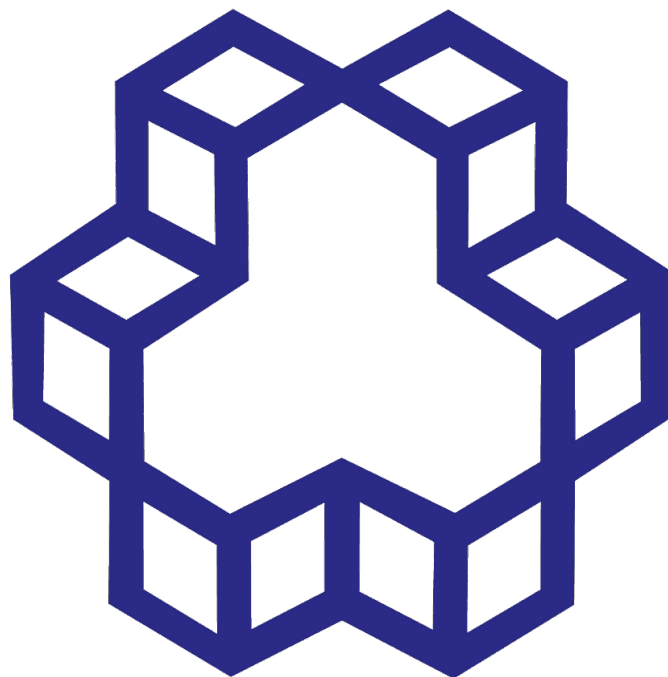


به نام خدای رنگین کمان



1928

**K. N. Toosi University  
of Technology**

سجاد فودازی - 40007903

صبا عساریان - 40007313

Group BGR

Project No. 21

Ball & Beam

Dr. TaghiRad

## معرفی سیستم:

سیستم کنترل توپ و میله (Ball and Beam System) یک سیستم الکترومکانیکی ساده است که از یک میله افقی و یک توپ تشکیل شده است. توپ می‌تواند در امتداد میله حرکت کند و هدف سیستم کنترل، حفظ موقعیت توپ در نقطه دلخواه روی میله است.

نحوه عملکرد:

کنترلر موقعیت توپ را با استفاده از سنسور اندازه‌گیری می‌کند. سپس، با توجه به موقعیت فعلی توپ و موقعیت مطلوب، کنترلر به سرو موتور فرمان می‌دهد تا میله را در جهت مناسب حرکت دهد. با حرکت میله، توپ نیز به سمت موقعیت مطلوب حرکت می‌کند.

## اجزای کلیدی سیستم کنترل توپ و میله:

1. میله:

- جنس میله می‌تواند از فلز، پلاستیک یا چوب باشد.
- طول و قطر میله به پارامترهای سیستم مانند جرم توپ و اصطکاک بستگی دارد.

2. توپ:

- جنس توپ می‌تواند از فلز، پلاستیک یا لاستیک باشد.
- جرم توپ به پارامترهای سیستم مانند پایداری و سرعت پاسخ بستگی دارد.

3. سنسور:

- برای اندازه‌گیری موقعیت توپ استفاده می‌شود.
- انواع مختلفی از سنسورها مانند سنسورهای اپتیک، القایی و پتانسیومتری وجود دارد.
- دقت سنسور باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند موقعیت توپ را با دقت مورد نیاز اندازه‌گیری کند.

4. کنترلر:

- با استفاده از اطلاعات سنسور، به سرو موتور فرمان می‌دهد تا موقعیت توپ را کنترل کند.
- انواع مختلفی از کنترلرها مانند LQR، PID و روش‌های پیشرفته تر وجود دارد.
- انتخاب کنترلر مناسب به عوامل مختلفی مانند دقت مورد نیاز، سرعت پاسخ و هزینه بستگی دارد.

5. سرو موتور:

- برای حرکت میله استفاده می‌شود.
- گشتاور و سرعت سرو موتور باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند توپ را به موقعیت مطلوب هدایت کند.

6. منبع تغذیه:

- برای تأمین برق سیستم استفاده می‌شود.
- ولتاژ و جریان منبع تغذیه باید با نیازهای سیستم مطابقت داشته باشد.

7. سیستم کامپیوتری:

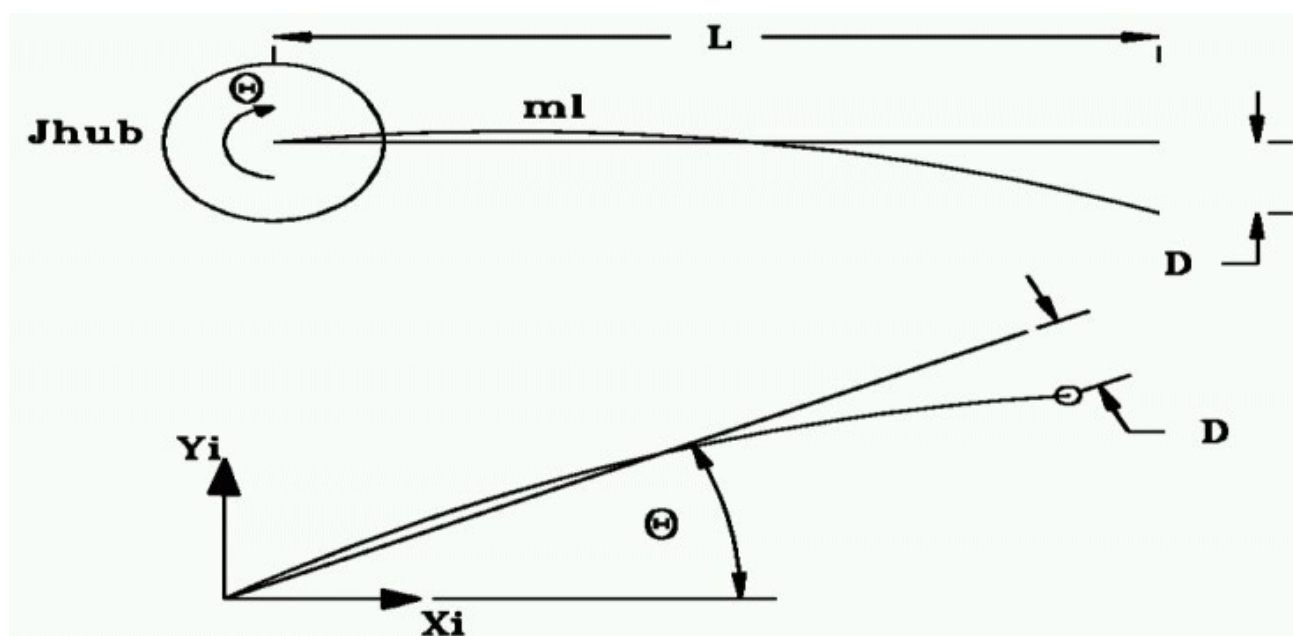
- برای اجرای الگوریتم کنترلر استفاده می‌شود.

- سرعت و حافظه سیستم کامپیوتری باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند الگوریتم کنترلر را در زمان واقعی اجرا کند. ممکن است در برخی از پیاده‌سازی‌ها، اجزای دیگری نیز به سیستم اضافه شوند.
- برای مثال، ممکن است از یک سیستم خنک کننده برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد موتور استفاده شود. یا ممکن است از یک سیستم فیلتر برای حذف نویز از سیگنال سنسور استفاده شود.

## مدلسازی سیستم:

برای ساده سازی معادله دیفرانسیل جزئی که حرکت یک لینک انعطاف پذیر را توصیف می کند، از تقریب یک درجه آزادی توده ای استفاده می شود. ما ابتدا مشتق مدل دینامیکی را با محاسبه اصطلاحات مختلف همان اینرسی چرخشی شروع می کنیم.

در این معادلات فرکانس طبیعی  $(\omega_n)$  با سختی گشتاوری  $(K_t)$  و جرم گشتاوری  $(J)$  مرتبط است. آلفا در واقع همان نسبت  $D$  به  $L$  است. تنها درجه چرخش چرخ دنده های موتور است تا توپ را به جای که نیاز است هل بدهد. یک مدل خطی برای لینک توسعه داده شده است، معادله پویای سیستم می تواند از فرمولاسیون اویلر-لاگرانژ به دست آید. ما انرژی پتانسیل و جنبشی در سیستم خود را به دست می آوریم. تنها انرژی پتانسیل در سیستم در انعطاف است. انرژی جنبشی از حرکت محور و بازوی انعطاف پذیر ناشی می شود. گشتاور خروجی از رابطه تجربی بدست آمده است. متغیرهای ما آلفا و تتا هستند.



$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K \text{ Stiff}}{J_{eq}} & \frac{-\eta_m \eta_g k_t k_m k_g^2 + B_{eq} R_m}{J_{eq} R_m} & 0 \\ 0 & \frac{-K \text{ Stiff} (J_{eq} + J_{Arm})}{J_{eq} J_{Arm}} & \frac{\eta_m \eta_g k_t k_m k_g^2 + B_{eq} R_m}{J_{eq} R_m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\eta_m \eta_g k_t k_m k_g^2}{J_{eq} R_m} \\ \frac{-\eta_m \eta_g k_t k_m k_g^2}{J_{eq} R_m} \end{bmatrix}$$

## سرو موتور:

وظیفه: سرو موتور در سیستم کنترل توپ و میله برای حرکت میله و در نتیجه کنترل موقعیت توپ استفاده می شود. انتخاب سرو موتور: انتخاب سرو موتور مناسب به عوامل مختلفی مانند گشتاور، سرعت، دقت، ولتاژ و جریان مورد نیاز سیستم بستگی دارد.

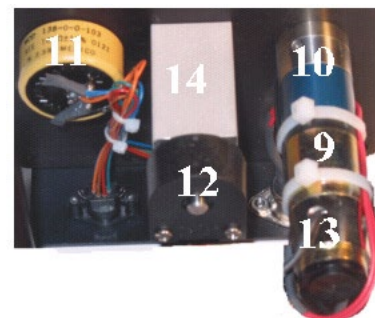
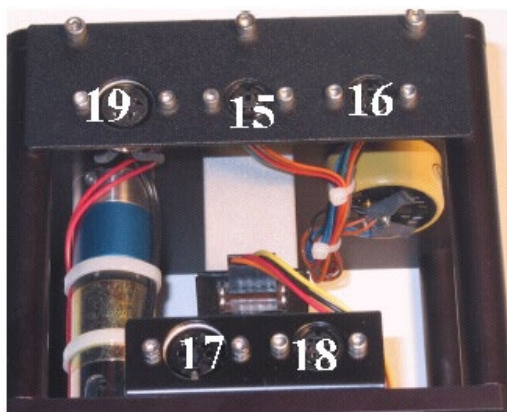
گشتاور: گشتاور سرو موتور باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند میله و توپ را به موقعیت مطلوب هدایت کند.

سرعت: سرعت سرو موتور باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند توپ را به سرعت مطلوب هدایت کند.

دقت: دقت سرو موتور باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند میله را با دقت مورد نیاز در موقعیت مطلوب قرار دهد.

ولتاژ و جریان: ولتاژ و جریان سرو موتور باید با ولتاژ و جریان منبع تغذیه سیستم مطابقت داشته باشد.

در شکل های زیر سرو موتور استفاده شده (SRVO2) و بخش های آن را میتوانید ببینید:



1- صفحه بالایی	2- صفحه پایینی	3- ستون ها	4- چرخ دنده استاندارد موتور - 72 دندانه	5- چرخ دنده خروجی	6- چرخ دنده ضد لقه پتانسیومتر	7- فنرهای ضد لقه
8- شفت خروجی / شفت بار	9- موتور	10- گیربکس	11- پتانسیومتر	12- رمزگذار	13- سرعت سنج	14- بلوک یاتاقان
15- کانکتور پتانسیومتر	16- کانکتور S2	17- کانکتور رمزگذار	18- کانکتور سرعت سنج	19- کانکتور موتور	20- چرخ دنده موتور - 24 دندانه	21- چرخ دنده بار - 120 دندانه

همچنین، توجه داشت که ممکن است در برخی از پیاده سازی ها، از موتورهای دیگری به جای سرو موتور استفاده شود. برای مثال، ممکن است از موتورهای پله ای برای حرکت میله استفاده شود. اما سرو موتورها به دلیل دقت و سرعت بالایی که دارند، برای سیستم کنترل توپ و میله مناسب تر هستند.

## سنسور:

انتخاب سنسور مناسب برای سیستم کنترل توپ و میله به عوامل مختلفی مانند دقت مورد نیاز، محدوده اندازه گیری، سرعت اندازه گیری و هزینه بستگی دارد.

انواع سنسورهای رایج:

### • سنسورهای اپتیک:

- این سنسورها از نور برای اندازه گیری موقعیت توپ استفاده می کنند.
- یک نوع رایج از سنسورهای اپتیک، سنسور انکودر است که با شمارش پالس های نوری، زاویه میله را اندازه گیری می کند.
- نوع دیگر سنسور اپتیک، سنسور لیدار است که با استفاده از پرتو لیزر، فاصله توپ تا میله را اندازه گیری می کند.

### • سنسورهای القایی:

- این سنسورها از میدان مغناطیسی برای اندازه‌گیری موقعیت توپ استفاده می‌کنند.
- یک نوع رایج از سنسورهای القایی، سنسور القایی خطی است که با اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی، موقعیت توپ را در امتداد میله اندازه‌گیری می‌کند.

#### • سنسورهای پتانسیومتر:

- این سنسورها از یک ولوم برای اندازه‌گیری موقعیت توپ استفاده می‌کنند.
- سنسورهای پتانسیومتر ارزان و ساده هستند، اما دقت آنها به اندازه سنسورهای اپتیک یا القایی بالا نیست.

#### نحوه کارکرد سنسور:

سنسور موقعیت توپ را به صورت سیگنال الکتریکی به کنترلر ارسال می‌کند. کنترلر با استفاده از این سیگنال، موقعیت فعلی توپ را نسبت به موقعیت مطلوب مقایسه می‌کند و سپس به سرو موتور فرمان می‌دهد تا میله را در جهت مناسب حرکت دهد. واحدهای پایه SRV02 با یک سنسور پتانسیومتر ارائه می‌شوند که می‌تواند برای اندازه‌گیری موقعیت زاویه ای چرخ دنده بار استفاده شود. دستگاه SRV02 همچنین می‌تواند برای به دست آوردن اندازه‌گیری موقعیت دیجیتال به یک رمزگذار مجهز شود.

#### نکات برای انتخاب سنسور:

- دقت سنسور باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند موقعیت توپ را با دقت مورد نیاز اندازه‌گیری کند.
- محدوده اندازه‌گیری سنسور باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند کل طول میله را پوشش دهد.
- سرعت اندازه‌گیری سنسور باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتواند تغییرات سریع موقعیت توپ را ردیابی کند.
- هزینه سنسور باید با بودجه پروژه مطابقت داشته باشد.

در انتخاب سنسور مناسب برای سیستم کنترل توپ و میله، باید به تمام این عوامل توجه کرد.

### راهکارهای مقابله با ناپایداری ذاتی سیستم کنترل توپ و میله:

#### 1. استفاده از کنترل کننده: LQR

LQR یک روش کنترل کلاسیک برای سیستم‌های خطی است. LQR می‌تواند با تنظیم پارامترهای کنترلر، پایداری سیستم را تضمین کند. با توجه به سورس LQR بصره ترین و بهترین انتخاب است.

#### 2. استفاده از کنترل کننده: PID

کنترل کننده PID یک روش کنترل ساده و رایج است که به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود. PID با استفاده از سه پارامتر (P)، (I) و (D) به پایداری و عملکرد مناسب سیستم کمک می‌کند. این روش نیز با توجه به تحقیق های انجام شده استفاده میشود.

#### 3. استفاده از روش های پیشرفته تر:

روش های پیشرفته تری مانند کنترل تطبیقی و کنترل مقاوم نیز برای کنترل سیستم های ناپایدار مانند سیستم کنترل توپ و میله وجود دارد. این نوع کنترل مدنظر ما برای درس کنترل مدرن نیست.

#### نکات برای انتخاب روش مناسب:

- انتخاب روش مناسب به عوامل مختلفی مانند دقت مورد نیاز، سرعت پاسخ، پیچیدگی و هزینه بستگی دارد.
- در LQR، general برای سیستم‌هایی که نیاز به دقت بالایی دارند مناسب است.
- PID برای سیستم‌هایی که نیاز به سرعت پاسخ بالایی دارند مناسب است.

- روش های پیشرفته تر برای سیستم های که نیاز به عملکرد پیچیده تری دارند مناسب هستند.
  - علاوه بر روش های کنترلی، می توان از روش های دیگری نیز برای افزایش پایداری سیستم استفاده کرد:
  - افزایش اصطکاک :افزایش اصطکاک بین توپ و میله می تواند به پایداری سیستم کمک کند.
  - استفاده از فنر :استفاده از فنر بین توپ و میله می تواند به پایداری سیستم کمک کند.
  - کاهش جرم توپ :کاهش جرم توپ می تواند به پایداری سیستم کمک کند.
- انتخاب روش مناسب برای افزایش پایداری سیستم به عوامل مختلفی مانند دقت مورد نیاز، سرعت پاسخ و هزینه بستگی دارد.
- باتوجه به سؤرس معرفی شده ما از LQR استفاده میکنیم پس توضیحات بیشتری در مورد این نوع کنترل کننده ارائه داده میشود.

### LQR (Linear Quadratic Regulator):

LQR (Linear Quadratic Regulator) یک روش کنترل بهینه است که برای کنترل سیستم های خطی-زمان ثابت استفاده می شود.

دلایل استفاده از LQR در سیستم کنترل توپ و میله عبارتند از:

1. سادگی LQR: یک روش کنترل نسبتاً ساده است که پیاده سازی آن آسان است.
  2. قابلیت اطمینان LQR: یک روش کنترل قابل اعتماد است که به طور موثر در طیف وسیعی از سیستم ها استفاده شده است.
  3. عملکرد LQR: می تواند عملکرد مطلوبی را برای سیستم کنترل توپ و میله ارائه دهد.
  4. انعطاف پذیری LQR: می تواند برای کنترل سیستم های توپ و میله با پارامترهای مختلف استفاده شود.
  5. بهینگی LQR: یک روش کنترل بهینه است که می تواند سیگنال کنترلی را با کمترین هزینه محاسباتی تولید کند.
- LQR با استفاده از یک تابع هزینه که شامل خطای موقعیت و سرعت توپ و میله و همچنین سیگنال کنترلی است، سیگنال کنترلی را بهینه می کند.

معایب استفاده از LQR در سیستم کنترل توپ و میله عبارتند از:

- پیچیدگی: طراحی و تنظیم LQR می تواند پیچیده باشد.
  - محدودیت ها LQR: فقط برای سیستم های خطی-زمان ثابت قابل استفاده است.
- در نهایت، استفاده از LQR در سیستم کنترل توپ و میله به نیازهای خاص کاربرد مورد نظر بستگی دارد.
- مزایای استفاده از سیستم کنترل توپ و میله عبارتند از:
- سادگی: پیاده سازی این سیستم نسبتاً ساده است.
  - قابلیت اطمینان: این سیستم به طور قابل اعتمادی کار می کند.
  - دقت: این سیستم می تواند حرکت سیستم را با دقت بالایی کنترل کند.
  - انعطاف پذیری: این سیستم می تواند برای کنترل طیف وسیعی از سیستم های دینامیکی استفاده شود.
- معایب استفاده از سیستم کنترل توپ و میله عبارتند از:

- بلوک دیاگرام زیر از سورس تهیه شده است که سیستم را توصیف میکند:



1. کنترل ربات ها: سیستم کنترل توپ و میله می تواند برای کنترل حرکت بازوی رباتیک یا سایر ربات های دارای مفصل چرخشی استفاده شود. با استفاده از این سیستم می توان حرکت ربات را به طور دقیق و پایدار کنترل کرد.
2. کنترل سیستم های بالابر: سیستم کنترل توپ و میله می تواند برای کنترل سیستم های بالابر مانند جرثقیل ها و آسانسورها استفاده شود. با استفاده از این سیستم می توان بار را به طور دقیق و ایمن جابجا کرد.
3. کنترل سیستم های پرتاب: سیستم کنترل توپ و میله می تواند برای کنترل سیستم های پرتاب مانند موشک ها و توپ ها استفاده شود. با استفاده از این سیستم می توان مسیر دقیق پرتابه را کنترل کرد.
4. کنترل سیستم های نوسانی: سیستم کنترل توپ و میله می تواند برای کنترل سیستم های نوسانی مانند پاندول ها و پل ها استفاده شود. با استفاده از این سیستم می توان نوسانات سیستم را به طور موثر میرا کرد.
5. شبیه سازی سیستم های دینامیکی: سیستم کنترل توپ و میله می تواند برای شبیه سازی سیستم های دینامیکی پیچیده تر مانند هواپیماها و خودروها استفاده شود. با استفاده از این سیستم می توان رفتار سیستم را در شرایط مختلف شبه سازی کرد.