بسمه تعالی

آموزنده کنترل پاندول معکوس (IP-101)

مشخصات سازه آموزنده پاندول معکوس

سازه این آموزنده در دو بخش مکانیکی و الکتریکی طراحی شده است. بخش مکانیکی آن شامل ۱) ریل و واگن ۲) سیستم انتقال نیرو ۳) پاندول می شود و بخش الکتریکی آن شامل موتور و انکودردورانی می باشد.

بخش مکانیکی

ریل و واگن

به جهت بخش ریل و واگن از شفت های پایه دار از جنس کروم استفاده شده است که از استحکام بالایی برخوردار می باشند. به جهت واگن یا همان بخش محرک سیستم نیز از بلبرینگ های خطی شیاردار که در حرکت خطی از اصطکاک بسیار پایینی برخوردار هستند استفاده شده است. از این بلبرینگ ها در ساخت پرینتر های سه بعدی، دستگاه های CNC و همچنین سیستم های ابزاردقیق استفاده می شود.

شکل ۱: تصویر ریل و واگن تشکیل شده از شفت پایه دار کروم و بلبرینگ خطی شیاردار

سیستم انتقال نیرو

در ساخت آموزنده پاندول معکوس از سیستم انتقال نیرو تسمه و پولی استفاده شده است. سیستم انتقال حرکتی تسمه و پولی همانطور که از نام آن مشخص است از یک تسمه انعطاف پذیر به همراه پولی برای انتقال نیرو استفاده می کند. در شکل زیر یک نمونه از پولی و تسمه را مشاهده می کنید.

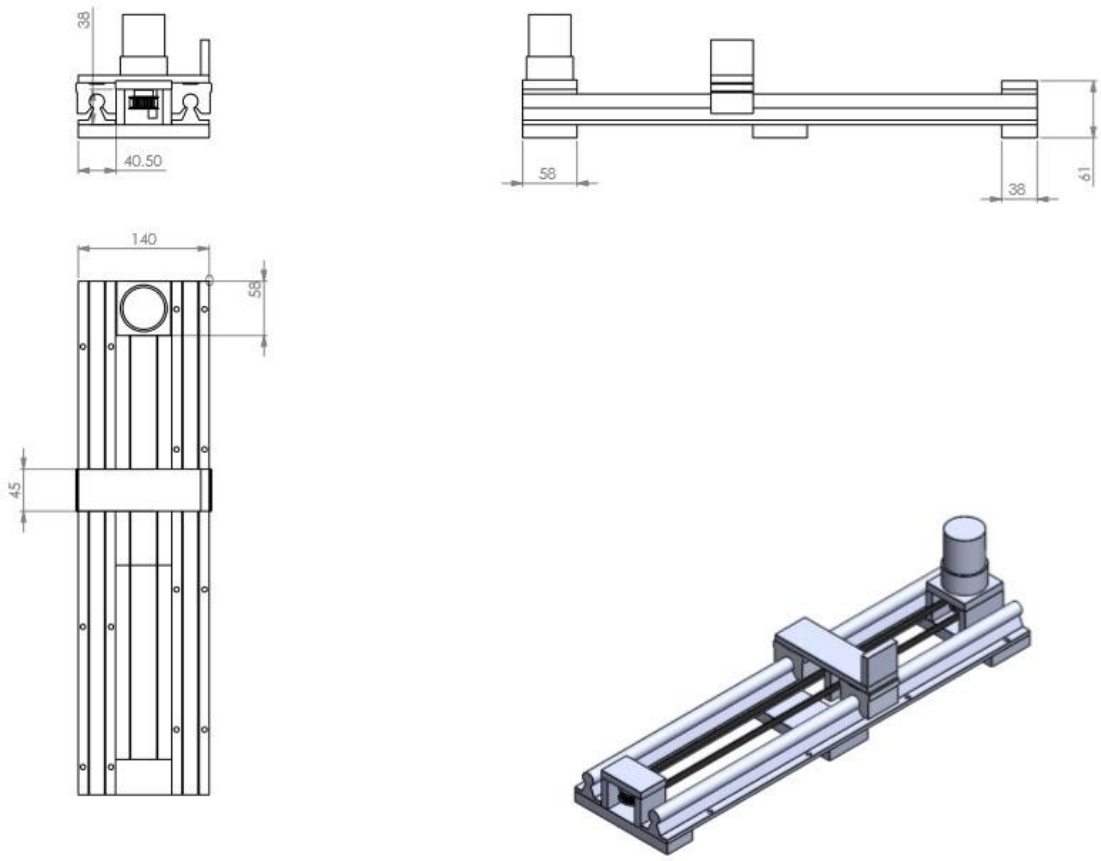
شکل ۲: سیستم انتقال نیرو تسمه و پولی

این مکانیزم به جهت سرعت بالای انتقال نیرو برای آموزنده پاندول معکوس استفاده شده است. بایستی دقت شود استفاده از این مکانیزم ها و بهره وری بالا از آن مشابه با هر سیستم انتقال نیروی دیگری مستلزم نگهداری مناسب و بازدید های دوره ای منظم می باشد.

پاندول

بخش سوم این سازه پاندول یا همان بخش هدف این سازه می باشد. از این جهت این قسمت از سازه را بخش هدف می نامیم که هدف در ساخت این سازه پایداری پاندول در زاویه قائم (نقطه تعادل ناپایدار) می باشد. پاندول از دو بخش میله و وزنه تشکیل شده است که در این سازه دو پاندول یکی با میله آلومینیومی (جرم میله خیلی کمتر از وزنه است) و دیگری با میله آهنی (جرم میله نزدیک به وزن وزنه است) ساخته شده است.

سازه آموزنده پاندول معکوس ساخته شده با ویژگی های بیان شده در بالا به جهت بهره وری از یک سیستم سریع و دقیق طراحی شده است. در ساخت این مجموعه سعی شده تا تمامی ویژگی های مورد انتظار بیان شده در کتب و مقالات علمی معتبر رعایت شود. در زیر تصویر سازه طراحی شده با جزئیات دقیق ابعاد قطعات آورده شده است.



شکل ۳: تصویر سازه طراحی شده با جزئیات دقیق قطعات

بخش الکتریکی

موتور

موتور در این سازه به عنوان محرکه اصلی نقش بسیار مهمی را در کارکرد هرچه بهتر آموزنده پاندول معکوس دارا می باشد. دقت در انتخاب نوع موتور می تواند بسیاری از مشکلات پیش رو در کار با این سیستم را مرتفع سازد. در انتخاب نوع موتور برای این سیستم ملاحضاتی چون سرعت بالا، قدرت کافی، عملکرد مناسب در تغییر وضعیت ها (چپگرد و راستگرد) و همچنین ایجاد نویز محیطی و الکتریکی بسیار پایین مد نظر قرار گرفته شده است. به جهت تحقق این اهداف و همچنین ایجاد چالش در کنترل سیستم، در این مجموعه از سروو موتور DC انکودردار در مقابل استپرموتور استفاده شده است. در زیر مشخصات موتور انتخابی برای این آموزنده نشان داده شده است.

DCM50207D-1000

DC servo motor 120W

DCM50207D-1000 is a permanent magnet DC brushed motor with attached incremental encoder which provides position feedback to the controller.

The incremental encoder has differential outputs and resolution of 1000 PPR, i.e. 4000 PPR with x4 encoder resolution multiplication.

Applications: CNC, measurement devices, inkjet printers.

Features: smooth operation, super-low noise, high precision and high reliability.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Parameter	Unit	Value
Continuous torque (max)	Nm	0.35
Peak torque (stall)	Nm	2.90
No load speed	RPM	3600 ± 10%
Rated speed	RPM	2900
Rotor inertia	kgm^2	$4.73x10^{-5}$
Winding temperature (max)	°C	155
Thermal impedance	°C/W	4.98
Weight	kg	1.34
Rated voltage	V	30.3
Rated current	A	3.94
Rated power	W	120
Torque constant	Nm/A	$80x10^{-3}$
Resistance	Ω	0.90
No load current	A	0.45
Peak current (stall)	A	32.6
Resolution of incremental encoder	PPR	1000

ENCODER WIRING

Color	Description
Black	A+
Blue	A-
Yellow	B+
Green	B-
Red	+5V
White	GND

شکل ۴: تصویر و مشخصات سروو موتور انتخابی

انکودر دورانی

همانطور که می دانیم در این آموزنده هدف اصلی کنترل زاویه پاندول در زاویه قائم می باشد. به همین منظور نیاز به قراردادن انکودر دورانی به جهت اطلاع از زاویه پاندول در هر لحظه وجود خواهد داشت. در این مجموعه از انکودر دورانی مطلق استفاده شده است. تصویر و ویژگی های این انکودر در زیر آورده شده است.

MAGNETIC ROTARY ENCODERS

MRV 50A

انکودر مطلق

50 mm قطر بدنه

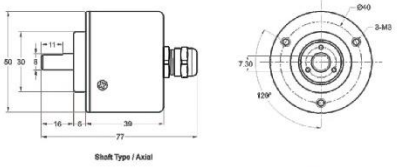
خروجی ولتاژ

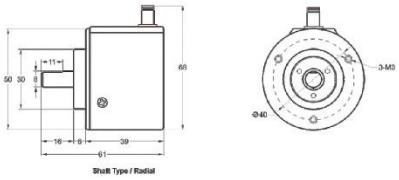
رزولوشن انتخابی 5V/45°,90°,180°,10bit (انتخابی) 5V/360° (استاندارد)

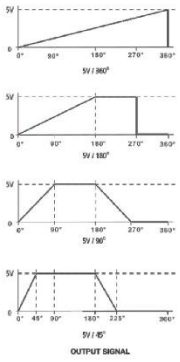
درجه حفاظت IP54

می‌توان به‌عنوان ولوم دوار استفاده کرد

مشخصات فنی	
نوع اندازه گیری	مگنتیک مطلق
رزولوشن	5V/360° (استاندارد) 5V/45°,90°,180°,10bit
سیگنال خروجی	آنالوگ
نوع خروجی	خروجی ولتاژ 0-5V DC
ولتاژ تغذیه	8-24V DC (Standard) or 5V DC (Optional)
مصرف برق(بدون بار)	<40 mA (24 VDC)
اتصال الکتریکی	2.5 m cable (Standard)
حداکثر سرعت	1000 RPM.
درجه حفاظت	IP54
قطر شافت	Ø8 mm
جنس شافت	فولاد ضد زنگ
قطر بدنه	Ø50 mm
جنس بدنه	آلومینیوم/استیل
دمای کارکرد	-20°C...+80°C
دمای نگهداری	-30°C...+90°C







کابل خروجی

+V	قهوه‌ای
0V	سفید
Vout	زرد
GND	شیلد

مدل	قطر بدنه	رزولوشن	ولتاژ تغذیه	کانکتور/کابل	کابل خروجی
نمونه MRV	50A	5V/360°	V2	2M5	R
MRV	50A: Standard case 50AW: Water proof	5V/360° 5V/180° 5V/90° 5V/45° 10 bit	V1: 5V DC V2: 8-24V DC	2M5: 2,5 meter cable 5M: 5 meter cable 8M: 8 meter cable 10M: 10 meter cable	R.Radial شعاعی A.Axial محوری

13

شکل ۵: تصویر و مشخصات انکودر دورانی مطلق انتخابی

ماژول های آموزنده پاندول معکوس

ماژولار بودن این مجموعه این قابلیت را به کاربر می دهد تا سیستم را به صورت دیجیتال، آنالوک و یا ترکیبی از کنترل کننده های آنالوگ و دیجیتال مورد آزمایش قرار دهد. در ادامه به بیان ویژگی ها و نحوه کار با ماژول های این آموزنده پرداخته شده است.

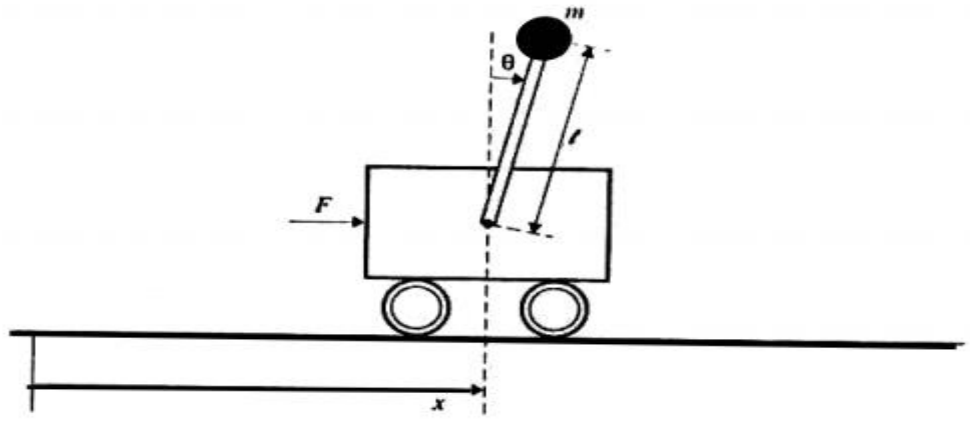
ردیف	نام ماژول	ویژگی ماژول	تصویر ماژول
۱	Embedded Microcontroller	این ماژول تشکیل شده از یک پردازنده LPC1788 و مدارات واسط که این امکان را به کاربر می دهد تا از ورودی و خروجی های آنالوگ و دیجیتال با سطح ولتاژ های 0-3.3V برای دیجیتال و 10+~10- برای آنالوگ استفاده کند.	
۲	Interface Unit	این ماژول به جهت در دسترس قراردادن سیگنال های مربوط به انکودر زاویه و موقعیت و همچنین پورت های کنترلی درایور سروموتور DC طراحی و ساخته شده است.	
۳	Data Acquisition Unit	این ماژول با نام واحد ارتباط داده تشکیل شده از یک کارت Advantech usb4704، با هدف ایجاد قابلیت ثبت و نمایش سیگنال ها توسط رایانه طراحی و ساخته شده است.	

معرفی سیستم پاندول معکوس

پاندول معکوس بر روی گاری مثالی کلاسیک از سیستم‌های کم عملگر مکانیکی است. کم عملگر به این معنا که تعداد خروجی‌های سیستم بیشتر از تعداد عملگرهای آن است. از منظر کنترل پذیری سیستم‌هایی که تعداد خروجی آنها از تعداد ورودی‌هایشان بیشتر است اگرچه ممکن است کنترل پذیر خروجی باشند ولی این سیستم‌ها کنترل‌پذیر عملکردی نیستند.

سیستم پاندول معکوس دارای دو نقطه تعادل است که یکی پایدار ($\theta = \pi$) و دیگری نقطه تعادل ناپایدار ($\theta = 0$) است. هدف پایدارسازی سیستم حول نقطه تعادل ناپایدار آن است.

مطابق شکل زیر یک پاندول معکوس به جرم m و به طول l را درنظر بگیرید که بر روی گاری به جرم M که حرکت افقی دارد نصب شده است. نیروی کنترل F باعث حرکت M و متعاقباً تعادل پاندول معکوس می گردد. فرض کنید میلهٔ پاندول دارای جرم قابل صرفنظر بوده و هیچگونه اصطکاکی در سیستم وجود نداشته باشد. ورودی سیستم نیروی F و خروجیهای آن زاویهٔ پاندول θ و میزان جابجائی گاری x می باشد.



با در نظر گرفتن متغیرهای حالت به فرم $\begin{bmatrix} x & \theta & \dot{x} & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T$، معادلات حالت به فرم معادلات زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1(\theta,\dot{\theta}) \\ f_2(\theta,\dot{\theta}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_3(\theta,\dot{\theta}) \\ f_4(\theta,\dot{\theta}) \end{bmatrix} F$$

$$f_1(\theta,\dot{\theta}) = \frac{ml\dot{\theta}^2 \sin\theta - mg\sin\theta\cos\theta}{M + m\left(1-\cos^2\theta\right)} \qquad f_2(\theta,\dot{\theta}) = \frac{-ml\dot{\theta}^2 \sin\theta\cos\theta + (M+m)g\sin\theta}{l\left[M + m\left(1-\cos^2\theta\right)\right]}$$

$$f_3(\theta,\dot{\theta}) = \frac{1}{M + m\left(1-\cos^2\theta\right)} \qquad f_4(\theta,\dot{\theta}) = \frac{-\cos\theta}{l\left[M + m\left(1-\cos^2\theta\right)\right]}$$

طراحی کنترل کننده

همانطور که در بخش قبل گفته شـده هدف در کنترل سـیسـتم پاندول معکوس پایداری سـیسـتم حول نقطه تعادل ناپایدار ($\theta = 0$) می با شد. در آموزنده پاندول معکوس طراحی شده یک قید به این پایداری ا ضافه شده که آن پایداری سیستم در زاویه گفته شده در کورس محدود حرکت گاری می با شد. کنترل کننده طراحی شده باید ستی این قابلیت را دا شته با شد تا علاوه بر $\theta = 0$ ، $x = 0$ را نیز در پایداری سیستم در نظر بگیرد.

طراحی کنترل کننده برای سـیسـتم پاندول معکوس به جهت پایداری آن حول نقطه تعادل ناپایدار به دو روش امکان پذیر اسـت، روش اول روش سـعی و خطا می باشـد. در این روش با جهت اعمال نیرو به گاری و همچنین مشـاهده نتایج در هر بار تست می توان با تغییر پارامترهای کنترل کننده متناسب با رفتار سیستم سعی در پایداری سیستم حلقه بسته نمود. این روش نیازمند تجربه کافی و تلاش بسیار می باشد.

روش دیگر ا ستفاده از چندین روش طراحی کنترل کننده یاد شده در کتب مهند سی کنترل می با شد روش هایی چون زیگلر نیکولز، روش IMC و ... که نیازمند کسب اطلاعاتی از سیستم می با شد. در طراحی کنترل کننده به روش های مر سوم شما نیاز دارید تا دینامیک سیستم را در اختیار دا شته با شید. این اطلاعات نیازمند شنا سایی سیستم حلقه باز یا حلقه بسته می باشد. همانطور که در معادلات بخش قبل نشان داده شده است بدست آوردن ضرایب θ و $\dot{\theta}$ در توابع $f1$ تا $f4$ به روش های مختلف شناسایی سیستم می تواند کمک بسیاری به طراحی کنترل کننده پایدارساز برای سیستم پاندول معکوس داشته باشد.

آموزنده پاندول معکوس طراحی شـده این امکان را به کاربر می دهد تا سـیسـتم را به صـورت حلقه باز و یا حلقه بسـته مورد آزمایش قرار داده تا بتواند تخمین در ستی از پارامترهای سیستم دا شته با شد. همچنین این امکان برای کاربر ایجاد شده تا بتواند کنترل کننده های کلاسیک و هوشمند را به صورت آنالوگ و دیجیتال بر روی این سیستم پیاده سازی نماید.