



دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده برق - گروه مخابرات

درس کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل دوره کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مخابرات

عنوان

پروپوزال پروژه ی درس کنترل مبتنی بر پیش بینی
مدل (MPC)

نگارش

علیرضا امیری

آبان ۱۴۰۳

فصل ۱

مقدمه

در این فصل، ابتدا مقدمه‌ای درباره‌ی ساختارهای موتورهای صفحه‌ای مبتنی بر شناوری مغناطیسی معرفی شده و با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این فناوری، کاربردهای آن در سایر صنایع نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱.۱ مقدمه‌ای بر موتورهای صفحه‌ای مبتنی بر شناوری مغناطیسی

شناوری مغناطیسی به معنای اعمال نیروهای مغناطیسی به اجسام به گونه‌ای است که این نیروها بتوانند بر نیروی جاذبه غلبه کرده و جسم را بدون تماس فیزیکی و به صورت پایدار در هوا معلق نگه دارند. این نیرو می‌تواند به دو شکل جاذبه یا دافعه اعمال شود. در حالت جاذبه، نیروی مغناطیسی از بالا به جسم وارد شده و نیروی گرانش زمین را خنثی می‌کند، در حالی که در حالت دافعه، نیرو از پایین به جسم وارد شده و آن را به سمت بالا دفع می‌کند. در صورتی که جسم فقط دارای خاصیت رسانایی باشد، تنها امکان جذب شدن وجود دارد، اما اگر جسم از مواد مغناطیسی مانند آهنرباهای دائمی یا الکتریکی ساخته شود، می‌تواند هم جذب و هم دفع شود. کنترل نیروهای مغناطیسی معمولاً با استفاده از آهنرباهای الکتریکی انجام می‌شود، به طوری که عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچ‌ها میدان مغناطیسی ایجاد کرده و تنظیم این جریان‌ها باعث تغییر در شدت میدان و نیروی وارده به جسم می‌شود. از این طریق، می‌توان با کنترل دقیق جریان، جسم را به طور پایدار در حالت معلق نگه داشت.

در کاربردهای صنعتی، به دلیل نیاز به بازدهی بالاتر در تبدیل انرژی مغناطیسی به نیرو، از آرایه‌های خاصی از

آهنرباهای دائمی به نام آرایه هالباخ^۱ استفاده می‌شود. این آرایه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که میدان مغناطیسی را به طور متمرکز در یک سمت تقویت کنند و در نتیجه، نیروی مغناطیسی بیشتری به جسم وارد شود. ساختارهای آرایه هالباخ یک بعدی و دوبعدی در تحقیقات پیشین به طور گسترده بررسی و استفاده شده‌اند. برای پیاده‌سازی موفق یک سیستم شناوری مغناطیسی، عوامل متعددی باید در نظر گرفته شوند که شامل طراحی و بهینه‌سازی ساختار مکانیکی سیستم، پیاده‌سازی کنترلرهای دقیق برای تنظیم نیروهای مغناطیسی، و همچنین مدل‌سازی دینامیکی یا شناسایی رفتار سیستم برای کنترل بهتر آن است. این عوامل به طور مستقیم بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند و باید به دقت مورد بررسی و تنظیم قرار گیرند.

¹Halbach array

فصل ۲

مروری بر مطالعات انجام شده

۱.۲ مقدمه

در این فصل، پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی موتورهای صفحه‌ای مبتنی بر شناوری مغناطیسی (MLPM) با تمرکز بر ویژگی‌های اساسی آنان که به طور کلی در بخش‌های زیر دسته‌بندی شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. **طراحی کنترلر:** معرفی روش‌های کنترل کلاسیک و مدرن برای این سیستم‌ها و چگونگی بهبود پایداری و دقت حرکت.

در بخش‌های بعد، پژوهش‌های انجام‌شده بر اساس این ویژگی‌ها ارزیابی شده و مزایا و معایب هر روش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲.۲ معماری دستگاه‌های MLPM

سیستم‌های شناوری مغناطیسی به دلیل ماهیت ناپایدارشان بدون استفاده از حلقه‌های کنترلی نمی‌توانند پایداری لازم را فراهم کنند. به همین دلیل، در تمامی ساختارهای پیشنهادی، از سیم‌پیچ‌های الکتریکی برای تولید میدان مغناطیسی با شدت کنترل شده استفاده می‌شود. این سیم‌پیچ‌ها وظیفه دارند تا موقعیت جسم معلق را پایدار کرده و آن را در حالت مطلوب نگه دارند.

در طراحی موتورهای صفحه‌ای، که از دو بخش ثابت^۱ و متحرک^۲ تشکیل شده‌اند، امکان تغییر در طراحی و محل قرارگیری آهنرباهای الکتریکی و دائمی وجود دارد. نیروی مغناطیسی وارد بر بخش متحرک می‌تواند به‌صورت جاذبه‌ای از بالا یا دافعه‌ای از پایین اعمال شود. با این حال، در موتورهای صفحه‌ای به دلیل لزوم کم بودن فاصله میان سیم‌پیچ‌ها و اجسام معلق، اعمال نیروی جاذبه‌ای از بالا امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، در تمامی طراحی‌ها، نیروی مغناطیسی دافعه‌ای از سمت پایین به بخش متحرک وارد می‌شود که امکان جابه‌جایی اجسامی که بر روی آنها قرار می‌گیرند را فراهم می‌کند.

با توجه به این موارد، طراحی‌های متفاوتی برای ساخت دستگاه‌های MLPM ارائه می‌شود که در ادامه بررسی یک مورد از آنان خواهیم پرداخت.

۱.۲.۲ آهنرباهای متحرک و سیم‌پیچ‌های ثابت

معماری که برای طراحی دستگاه‌های MLPM ارائه شده است، شامل قرار دادن سیم‌پیچ‌ها در بخش استاتور و استفاده از آهنرباهای دائمی در بخش متحرک می‌باشد. این ساختار نوین که در بسیاری از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته، مشکلات معماری‌های پیشین مانند محدودیت جابه‌جایی متحرک ناشی از اتصالات فیزیکی و چالش‌های خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها را برطرف کرده و منجر به بهبود عملکرد کلی سیستم شده است.

در پژوهش [۵] استاتوری با چینش سیم‌پیچ‌ها مطابق با الگوی شاه‌ماهی^۳ طراحی و پیاده‌سازی شده است. این طراحی امکان اعمال نیروی مغناطیسی به دو آهنربای دیسکی تعبیه‌شده در بخش متحرک را فراهم کرده است که دقتی در حدود ۱ درجه در زوایای حرکت و ۱ میلی‌متر در موقعیت متحرک به دست آورده است [۵]. در ادامه این پژوهش، ساختاری جدید برای بخش متحرک ارائه شده که شامل ۶ آهنربای دیسکی با چینش کروی و فواصل ثابت می‌باشد. این طراحی توانسته است چرخش آزادانه متحرک را حول سه محور ممکن سازد [۶]. همچنین در پژوهش [۷] نیز از این چینش سیم‌پیچ‌ها استفاده شده و مطابق با شبیه‌سازی‌های ارائه شده، مزیت آنان در ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت‌تر در نواحی کناری سیم‌پیچ‌ها نمایش داده شده است.

¹Stator ²Mover ³Herringbone pattern

۳.۲ طراحی کنترلر

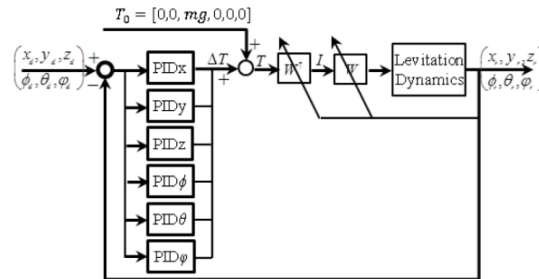
همان طور که پیش تر اشاره شد، سیستم های شناوری مغناطیسی ذاتاً ناپایدار هستند و برای دستیابی به پایداری، به کنترلی با عملکرد دقیق و خطای کم نیاز است. در پژوهش های مختلف، از کنترلرهای گوناگونی برای این سیستم ها بهره گرفته شده است؛ از جمله کنترلرهای کلاسیک نظیر، PID کنترلرهای مدرن مانند کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل (MPC) و همچنین مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی نظیر شبکه های بازگشتی. GRU در این بخش، به بررسی این کنترلرها و مقایسه عملکرد آنها خواهیم پرداخت.

۱.۳.۲ کنترلر PID

کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) به عنوان یکی از پرکاربردترین و موثرترین کنترلرهای کلاسیک در سیستم های دینامیکی، گزینه ای مناسب برای کنترل سیستم های MLPM محسوب می شود. این کنترلر به دلیل سادگی در پیاده سازی، تنظیم دقیق و توانایی تنظیم خروجی سیستم بر اساس خطاهای ورودی، به طور گسترده در سیستم های مختلف استفاده شده است. برای کنترل سیستم های MLPM به ازای هر درجه آزادی یک کنترلر PID طراحی و پیاده سازی می شود تا بتواند جریان الکتریکی سیم پیچ ها را تنظیم کرده و میدان مغناطیسی لازم برای ایجاد و حفظ موقعیت متحرک را تأمین کند.

در پژوهش های متعددی از کنترلر PID برای سیستم های MLPM بهره گرفته شده است. به عنوان مثال، در [۶، ۸] از کنترلرهای PID ساده برای کنترل جریان سیم پیچ ها استفاده شده که وظیفه تنظیم میدان مغناطیسی و در نتیجه، کنترل موقعیت جسم متحرک را بر عهده دارند. علاوه بر این، در پژوهش [۹]، از دو کنترلر PID در یک ساختار دوگانه استفاده شده است. کنترلر اول برای جابه جایی های بلند و در مسافت های طولانی به کار رفته و جریان سیم پیچ های اصلی را تنظیم می کند، در حالی که کنترلر دوم برای حرکات دقیق کوتاه برد طراحی شده و کنترل جریان سیم پیچ های ثانویه را بر عهده دارد. این روش باعث بهینه سازی کنترل دقیق و بهبود دقت در حرکات کوتاه برد و جابه جایی های سریع می شود. همچنین در سیستم، MagTable برای کنترل دقیق موقعیت آهنرباهای دائمی، از شش کنترلر PID به صورت همزمان استفاده شده است تا نیروی متوازن برای پایداری سازی موقعیت متحرک در چندین جهت فراهم شود [۱۰]. این نوع طراحی و استفاده از کنترلرهای PID نشان می دهد که علی رغم محدودیت های موجود در کنترلرهای کلاسیک، این روش همچنان در بسیاری از سیستم های مغناطیسی

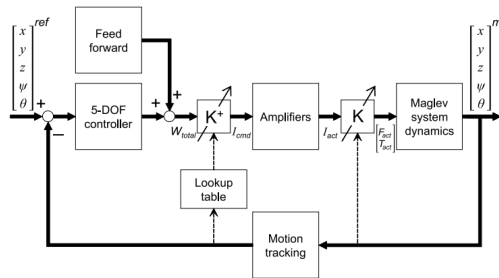
پیچیده مانند MLPM کارایی بالایی دارد.



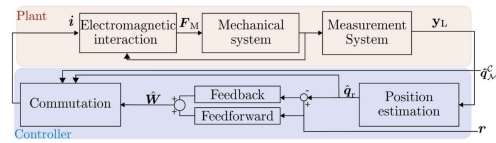
شکل ۱.۲: کنترلر PID با ۶ درجه آزادی [۱۰]

۲.۳.۲ کنترلر مبتنی بر پیش‌بینی مدل MPC

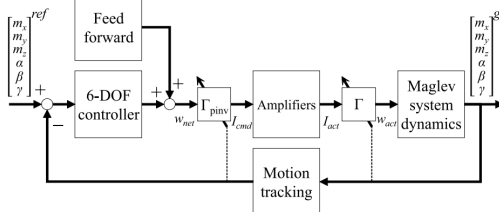
برای کنترل سیستم‌های MLPM اگر مدل سیستم به روش‌های تحلیلی و یا عددی به دست آمده و تخمین زده شده باشد، می‌توان از این مدل‌ها برای طراحی کنترلرهای پیشرفته‌تر با هدف پیش‌بینی رفتار سیستم و استفاده از آن به صورت پیش‌خور در حلقه‌ی کنترلی استفاده کرد. روش‌های تخمین مدل این سیستم‌ها در بخش‌های بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش، کنترلرهای ارائه شده در پژوهش‌های دیگر ارائه می‌شود. به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم و استفاده از آنها در پیش‌بینی روشی تحلیلی است که در [۱۵] استفاده شده است و مدل کنترلی متشکل از بلوک‌های پس‌خور و پیش‌خور برای کنترل موقعیت آهنربا طراحی شده است. همچنین در [۷] از یک جدول جستجو برای تعیین رفتار سیستم در نقاط مختلف فضا استفاده شده است که این جدول به عنوان پیش‌خور به مدل کنترلی داده می‌شود. در ادامه‌ی این پژوهش، با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم، مدلی تقریبی برای رفتار سیستم در نظر گرفته شده است و با استفاده از این مدل برای پیش‌بینی رفتار سیستم مدل MPC پیاده‌سازی شده است. پژوهش [۱۱] با تمرکز بر ارائه‌ی یک مدل پیش‌بین، با استفاده از معادلات دینامیکی سیستم و همچنین روش پیش‌بینی حالت بی‌تاخیر، رفتار آینده‌ی سیستم را محاسبه می‌کند.



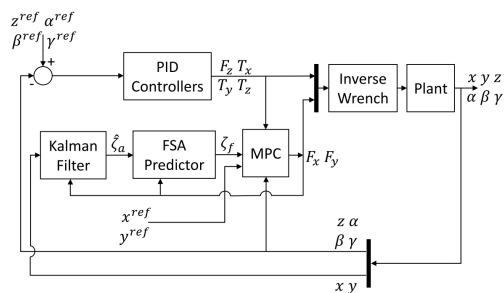
[۷] (ب)



[۱۵] (آ)



[۱۷] (د)



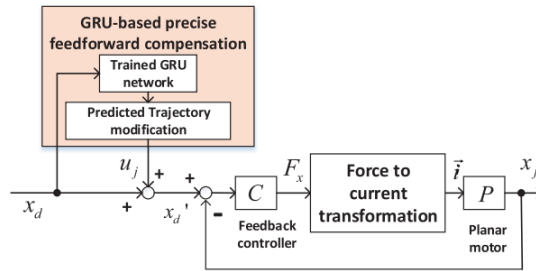
[۱۷] (ج)

شکل ۲.۲: کنترلر MPC

۳.۳.۲ کنترلر مبتنی بر هوش مصنوعی

یکی از روش‌های نوین برای پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده مانند، MLPM استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی به‌ویژه شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) است. این مدل‌ها با یادگیری دینامیک سیستم و ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها، می‌توانند به‌طور مؤثری رفتار سیستم را در شرایط مختلف پیش‌بینی کنند. در این راستا، پژوهش [۱۷] از یک مدل بازگشتی GRU^۱ استفاده کرده است. این مدل بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از عملکرد دستگاه MLPM آموزش دیده و توانسته است با دقت بالا تغییرات دینامیکی سیستم و پاسخ آن به ورودی‌های گوناگون را پیش‌بینی کند. استفاده از GRU به دلیل توانایی آن در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی و در نظر گرفتن اطلاعات قبلی برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، رویکردی مناسب در این پژوهش بوده است. (شکل ۳.۲)

^۱Gated Recurrent Unit



شکل ۳.۲: کنترلر پیش‌خور GRU [۱۷]

۴.۲ پروژه پیشنهادی

با بررسی موارد ذکر شده در قسمت های پیشین، در این پژوهش تلاش می شود تا برای سیستم شناوری مغناطیسی ذکر شده در [۱۱] یک کنترلر مبتنی بر پیش بینی مدل طراحی و اجرا شود. مدل این سیستم در بخش بعد ذکر می شود. همچنین، حلقه ی کنترلی مورد استفاده برای این سیستم در ۲.۲ د آورده شده است.

۱.۴.۲ مدل سیستم

سیستم مورد نظر در این پیشنهاد شامل یک محرک بدون اصطکاک و شناور در صفحه $X_g Y_g$ است. در این مدل، مقاومت هوا در تمام جهات نادیده گرفته شده و استراتژی کنترل در جهت های X_g و Y_g پیاده سازی شده است. معادلات حرکت محرک به صورت زیر بیان می شود:

$$F_x = ma_{g_x}, \quad F_y = ma_{g_y}, \quad (۱.۲)$$

که در آن m جرم محرک، و a_{g_x} و a_{g_y} شتاب های آن در صفحه $X_g Y_g$ هستند. از این معادلات، نمایه ی حالت گسسته سیستم به شکل زیر استخراج می شود:

$$\zeta(k+1) = A\zeta(k) + Bu(k), \quad (2.2)$$

$$\rho(k) = C\zeta(k), \quad (3.2)$$

که در آن، بردار حالت برابر است با $\zeta = \begin{bmatrix} ma_{gx} & v_{gx} & ma_{gy} & v_{gy} \end{bmatrix}^T$ ، ورودی نیرو برابر است با $u = \begin{bmatrix} F_x & F_y \end{bmatrix}^T$ ، و خروجی برابر است با $\rho = \begin{bmatrix} ma_{gx} & ma_{gy} \end{bmatrix}^T$. در اینجا، ΔT نشان‌دهنده‌ی دوره نمونه‌برداری و k نشان‌دهنده‌ی گام زمانی گسسته است. مقادیر v_{gx} و v_{gy} سرعت‌ها در سیستم مختصات جهانی هستند. ماتریس‌های نمایه حالت A ، ورودی B و خروجی C به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T^2}{2m} & 0 \\ \frac{\Delta T}{m} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta T^2}{2m} \\ 0 & \frac{\Delta T}{m} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

نیروی کنترلی و گشتاور در هر دوره‌ی نمونه‌برداری به جریان سیم‌پیچ تبدیل شده و از هم جدا می‌شوند. با حرکت محرک در مناطق مختلف، مجموعه‌های مختلفی از سیم‌پیچ‌ها برای ایجاد نیروی شناوری فعال می‌شوند. هر سیم‌پیچی که در داخل مرز مربعی به ابعاد ۱۶ اینچ در ۱۶ اینچ قرار گیرد که مرکز و زاویه آن با محرک هم‌راستا است، فعال می‌شود، زیرا سیم‌پیچ‌های خارج از این منطقه به سختی قادر به تولید نیرو و گشتاور هستند. این مرز با لبه‌ی سیم‌پیچ که لبه‌ی آرایه‌ی مغناطیسی را لمس می‌کند، مطابقت دارد. در هر دوره‌ی نمونه‌برداری، مختصات سیم‌پیچ‌ها در سیستم مختصات جهانی به مختصات محرک تبدیل می‌شوند. اگر مرکز سیم‌پیچ در این مرز قرار گیرد، این سیم‌پیچ برای فعال‌سازی انتخاب می‌شود. یک تصویر نمونه از انتخاب سیم‌پیچ در شکل ۸.۶ نشان داده شده است که در آن سیم‌پیچ‌های فعال با رنگ سبز مشخص شده‌اند. برای محرک و سیم‌پیچ‌های این فصل، ۲۵ تا ۳۶ سیم‌پیچ به طور همزمان فعال خواهند شد.

پس از شناسایی مجموعه‌ی سیم‌پیچ‌های فعال، روش گشتاور مستقیم برای جداسازی نیروی مطلوب و گشتاور ن‌کنترل اعمال می‌شود. نیروی و گشتاور فردی اعمال شده بر روی محرک با $w_{gn} = [F_{g_x,n}, F_{g_y,n}, F_{g_z,n}, T_{g_x,n}, T_{g_y,n}, T_{g_z,n}]^T$ نشان داده می‌شود، زمانی که جریان سیم‌پیچ برابر با ۱ آمپر است. شاخص سیم‌پیچ n است و محدوده‌ی n بر اساس تعداد سیم‌پیچ‌های فعال به صورت پویا تغییر می‌کند. نیروی خالص و گشتاور مطلوب بر روی محرک با $w_{gnet} = [F_{g_x,net}, F_{g_y,net}, F_{g_z,net}, T_{g_x,net}, T_{g_y,net}, T_{g_z,net}]^T$ نشان داده می‌شود. سپس نیروی مطلوب و گشتاور به مختصات محرک با استفاده از رابطه‌ی زیر تبدیل می‌شود:

$$w_{mnet} = R_g^m w_{gnet} \quad (۴.۲)$$

ارتباط بین نیروی و گشتاور مطلوب محرک و بردار جریان کنترل سیم‌پیچ‌ها به شکل زیر است:

$$w_{mnet} = [w_{m1}, w_{m2}, \dots, w_{mn}] [I_1, I_2, \dots, I_n]^T = \Gamma(\vec{c}_m) I, \quad (۵.۲)$$

که در آن $\Gamma(\vec{c}_m)$ شامل تمام عناصر نیرو و گشتاور از هر سیم‌پیچ در ورودی جریان ۱ آمپر است. حرکت شش درجه‌ی آزادی (DOF) همیشه به طور بیش از حد فعال می‌شود. جریان کنترلی به سیم‌پیچ‌ها با استفاده از وارون مورس-پنروز محاسبه می‌شود تا مصرف انرژی به حداقل برسد. معادله‌ی جریان کنترلی به صورت زیر است:

$$I = \Gamma^T (\Gamma \Gamma^T)^{-1} w_{mnet}. \quad (۶.۲)$$

دامنه‌ی حرکت محرک به راحتی با افزایش آرایه‌ی سیم‌پیچ قابل افزایش است که از طریق استفاده از استراتژی پیشنهادی انتخاب سیم‌پیچ فعال و روش جداسازی جریان تحقق می‌یابد. در هنگام ساخت ماتریس نیرو و گشتاور Γ ، مختصات اندازه‌گیری شده‌ی سیم‌پیچ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. خطای موقعیت سیم‌پیچ از ساختار نصب می‌تواند در این فرآیند لحاظ شود.

کتاب نامه

- [1] Browne, Jim J, Dubois, Didier, Rathmill, Keith, Sethi, Suresh, and Steck, Kathrin. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine*, 2(2):114–117, 1984.
- [2] Guo, Liang, Zhang, He, Galea, Michael, Li, Jing, Lu, Wenqi, and Gerada, Chris. Analysis and design of a magnetically levitated planar motor with novel multilayer windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(8):1–9, 2015.
- [3] Zhang, Shengguo, Zhu, Yu, Mu, Haihua, Yang, Kaiming, and Yin, Wensheng. Decoupling and levitation control of a six-degree-of-freedom magnetically levitated stage with moving coils based on commutation of coil array. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 226(7):875–886, 2012.
- [4] Zhang, Shengguo, Dang, Xiaoping, Wang, Kai, Huang, Jingtao, Yang, Jingxian, and Zhang, Guoheng. An analytical approach to determine coil thickness for magnetically levitated planar motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(1):572–580, 2017.
- [5] Berkelman, Peter and Dzadovsky, Michael. Magnetic levitation over large translation and rotation ranges in all directions. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1):44–52, 2013.
- [6] Miyasaka, Muneaki and Berkelman, Peter. Magnetic levitation with unlimited omnidirectional rotation range. *Mechatronics*, 24(3):252–264, 2014.
- [7] Trakarnchaiyo, Chanuphon, Wang, Yang, and Khamesee, Mir Behrad. Design of a compact planar magnetic levitation system with wrench–current decoupling enhancement. *Applied Sciences*, 13(4):2370, 2023.
- [8] Zhu, Haiyue, Pang, Chee Khiang, and Teo, Tat Joo. Analysis and control of a 6 dof maglev positioning system with characteristics of end-effects and eddy current damping. *Mechatronics*, 47:183–194, 2017.

- [9] Zhu, Haiyue, Teo, Tat Joo, and Pang, Chee Khiang. Magnetically levitated parallel actuated dual-stage (maglev-pad) system for six-axis precision positioning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24(4):1829–1838, 2019.
- [10] Zhang, Xiaodong, Trakarnchaiyo, Chanuphon, Zhang, Heng, and Khamesee, Mir Behrad. Magtable: A tabletop system for 6-dof large range and completely contactless operation using magnetic levitation. *Mechatronics*, 77, 2021.
- [11] Xu, Zhenchuan, Wang, Yang, Wang, Jie, and Khamesee, Mir Behrad. Predictor-based model predictive control for maglev planar motor with a 2d halbach array mover. *Control Engineering Practice*, 141:105731, 2023.
- [12] Xu, Zhenchuan, Trakarnchaiyo, Chanuphon, Stewart, Curtis, and Khamesee, Mir Behrad. Modular maglev: Design and implementation of a modular magnetic levitation system to levitate a 2d halbach array. *Mechatronics*, 99, 2024.
- [13] Zhu, Haiyue, Teo, Tat Joo, and Pang, Chee Khiang. Design and modeling of a six-degree-of-freedom magnetically levitated positioner using square coils and 1-d halbach arrays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1):440–450, 2016.
- [14] Xu, Zhenchuan. *Design, Implementation, and Control of a Magnetic Levitated Planar Motor*. Thesis, 2024.
- [15] Proimadis, Ioannis, Custers, Coen HHM, Tóth, Roland, Jansen, JW, Butler, Hans, Lomonova, Elena, and Van den Hof, Paul MJ. Active deformation control for a magnetically levitated planar motor mover. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(1):242–249, 2021.
- [16] Rovers, JMM, Jansen, JW, and Lomonova, EA. Design and measurements of the double layer planar motor. in *2013 International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 204–211. IEEE.
- [17] Ou, Tiansheng, Hu, Chuxiong, Zhu, Yu, Zhang, Ming, and Zhu, Limin. Intelligent feedforward compensation motion control of maglev planar motor with precise reference modification prediction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(9):7768–7777, 2020.
- [18] Wang, Yang, Chen, Fuxiang, Zheng, Zhiyi, and Zeng, Lizhan. Magnet array of planar motor using permanent magnets with different magnetisation intensity and height. *IET Electric Power Applications*, 14(14):2772–2779, 2020.
- [19] Rui, Huang and Jian, Feng. Magnetic field analysis of permanent magnet array for planar motor based on equivalent magnetic charge method. in *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 3966–3970. IEEE.