



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکترونیک

کنترل غیر خطی بهینه‌ی جرثقیل‌های حامل کانتینر با استفاده از معادلات ریگاتی وابسته به

حالت (SDRE)

توسط:

ماهان ماهروئیان

استاد راهنما:

دکتر حمید خالوزاده

نابستان 1390

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

هدف اصلی از انجام این پروژه، طراحی یک کنترل‌کننده‌ی غیرخطی بهینه به منظور حذف تاب خوردن جرثقیل‌های حامل کانتینر می‌باشد. معمولاً کنترل‌کننده‌ها برای این دسته از سیستم‌ها طوری طراحی می‌شوند که بار را با بیشترین سرعت و کم‌ترین تاب خوردن از مبدا به مقصد بتوان حمل نمود. به طوریکه به هنگام رسیدن به مقصد، این تاب خوردن کاملاً از بین رفته باشد. در این پروژه، کنترل‌کننده را، با ایجاد درجات آزادی اضافی به سیستم مکانیکی، جدا از ارابه طراحی می‌کنیم. با این کار کنترل‌کننده در حمل بار تداخلی ایجاد نکرده و در نتیجه سرعت حمل و نقل افزایش می‌یابد. به منظور وفاداری به غیرخطی بودن سیستم، از کنترل‌کننده‌ی بهینه‌ی غیرخطی استفاده می‌کنیم. این کنترل‌کننده‌ها، توسعه‌یافته‌ی کنترل‌کننده بهینه‌ی خطی می‌باشند. به طوری که در آن‌ها معادلات ریکاتی وابسته به حالت خواهند شد. در این پروژه هر دو مدل دو و سه بعدی جرثقیل‌های حامل کانتینر استخراج و کنترل می‌شوند. مشاهده می‌شود که ما حتی قادر به حذف هر دو حرکت پیچشی و تاب خوردن جرثقیل، با شتاب حرکتی قابل قبول ارابه خواهیم بود.

کلید واژه: جرثقیل حامل کانتینر، کنترل غیرخطی، کنترل بهینه، مدل سازی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
1	فصل 1-1 مقدمه
1	1-1-1 پیشگفتار
3	2-1 ضرورت طراحی کنترل کننده
3	3-1 تاریخچه
7	4-1 رویکرد به مساله
9	5-1 ساختار پایان نامه
10	فصل 2- کنترل کننده ی SDRE
10	1-2 مقدمه
12	2-2 خطی سازی توسعه یافته
15	3-2 تنظیم کننده های بهینه ی غیر خطی
20	4-2 روشهای حل معادله ی ریکاتی وابسته به حالت (SDRE)
21	5-2 کنترل کننده و رویتنگر SDRE
26	6-2 طراحی کنترل کننده در صورت عدم فراهم شدن شرایط لازم برای کنترل
27	1-6-2 دینامیک مشتق ناپذیر
28	2-6-2 وجود عوامل تاثیر گذاری که به حالات سیستم وابسته نیستند
29	2-6-3 وجود عامل وابسته به حالتی که شرط دوم را نقض می کند
30	4-6-2 متغیرهای حالت ناپایدار و کنترل ناپذیر و در عین حال کراندار
30	5-6-2 غیرخطی گری در ورودی
31	6-6-2 محدودیت حالت ها
35	7-2 جمع بندی
36	فصل 3- کنترل تاب خوردن مدل دو بعدی جرثقیل های حامل کانتینر
36	1-3 مقدمه
36	2-3 مدل سازی سیستم های مکانیکی
37	3-3 مدل سازی دو بعدی جرثقیل های حامل کانتینر
42	4-3 شبیه سازی مدل دو بعدی جرثقیل
44	5-3 خطی کردن مدل و طراحی کنترل کننده ی خطی برای جرثقیل دو بعدی
46	6-3 طراحی کنترل کننده ی SDRE برای جرثقیل دو بعدی حامل کانتینر
53	7-3 جمع بندی
55	فصل 4- کنترل تاب خوردن و حرکت پیچشی مدل سه بعدی جرثقیل های حامل کانتینر
55	1-4 مقدمه

55.....	2-4- مدل سه بعدی جرثقیل حامل کانتینر.....
62.....	3-4- کنترل SDRE جرثقیل سه بعدی.....
70.....	4-4- جمع بندی.....
72.....	فصل 5- نتایج و پیشنهادات.....
72.....	1-5- نتایج.....
73.....	2-5- پیشنهادات.....
74.....	ضمیمه أ - به دست آوردن معادلات ریاضی مدل دو بعدی جرثقیل توسط روش لاگرانژ.....
75.....	ضمیمه ب - به دست آوردن مدل افاین جرثقیل دو بعدی حامل کانتینر.....
76.....	ضمیمه ج - به دست آوردن معادلات ریاضی مدل سه بعدی جرثقیل توسط روش لاگرانژ.....
80.....	مراجع -

فهرست اشکال

- شکل 1-1: جرثقیل‌های حامل کانتینر 2
- شکل 2-1: طرح پیشنهادی برای کنترل حرکات پیچشی توسط دو واگن 5
- شکل 3-1: مدل دو بعدی پیشنهادی توسط کیم برای کنترل تاب خوردن 6
- شکل 4-1: تحقق صفحه‌ی لغزنده در مدل دو بعدی 7
- شکل 1-2: پاسخ سیستم بدون ورودی کنترلی 25
- شکل 2-2: پاسخ سیستم و ورودی کنترلی پس از تکرار اول الگوریتم 25
- شکل 3-2: پاسخ سیستم و ورودی کنترلی پس از تکرار پنجم الگوریتم 26
- شکل 1-3: مدل دو بعدی جرثقیل حامل کانتینر 38
- شکل 2-3: پاسخ سیستم حلقه باز جرثقیل دو بعدی پس از 7 ثانیه و با شتاب اراهه‌ی صفر 43
- شکل 3-3: پاسخ سیستم حلقه باز جرثقیل دو بعدی با شتاب داده شده‌ی $\frac{m}{s^2}$ به اراهه 44
- شکل 4-3: مقایسه‌ی پاسخ جرثقیل دو بعدی با اراهه‌ی بدون شتاب 48
- شکل 5-3: مقایسه‌ی ورودی‌های کنترلی جرثقیل دو بعدی در حالت اراهه‌ی بدون شتاب 49
- شکل 6-3: مقایسه‌ی تابعی حاصل از دو ورودی به جرثقیل دو بعدی دارای اراهه‌ی بدون شتاب 49
- شکل 7-3: مقایسه‌ی پاسخ جرثقیل دو بعدی با اراهه‌ی با شتاب $\frac{m}{s^2}$ با اعمال ورودی‌های گوناگون 49
- شکل 8-3: مقایسه‌ی ورودی‌های کنترلی جرثقیل دو بعدی در حالت اراهه‌ی با شتاب $\frac{m}{s^2}$ 50
- شکل 9-3: مقایسه‌ی تابعی حاصل از ورودی‌های گوناگون به جرثقیل دارای اراهه‌ی با شتاب $\frac{m}{s^2}$ 51
- شکل 10-3: حذف تاب خوردن‌های جرثقیل با استفاده از کنترل کننده‌ی SDRE در یک مسیر 52
- شکل 11-3: کنترل کننده‌ی SDRE اعمال شده به جرثقیل در یک مسیر 52
- شکل 12-3: تابعی حاصل از کنترل کننده‌ی SDRE اعمال شده به جرثقیل در یک مسیر 53
- شکل 1-4: مدل سه بعدی جرثقیل حامل کانتینر 56
- شکل 2-4: پاسخ جرثقیل سه بعدی با اراهه‌ی بدون شتاب 64
- شکل 3-4: پاسخ جرثقیل سه بعدی دارای اراهه‌ی با شتاب $\frac{m}{s^2}$ 64
- شکل 4-4: پاسخ حلقه بسته جرثقیل سه بعدی با اراهه‌ی بدون شتاب 66
- شکل 5-4: ورودی‌های کنترلی جرثقیل سه بعدی در حالت اراهه‌ی بدون شتاب 66
- شکل 6-4: نیروی زوج واگن مورد نیاز برای کنترل پیچش جرثقیل دارای اراهه‌ی بدون شتاب 67
- شکل 7-4: تابعی حاصل از اعمال کنترل کننده‌ی SDRE بر جرثقیل با اراهه‌ی بدون شتاب 68
- شکل 8-4: پاسخ حلقه بسته‌ی جرثقیل سه بعدی دارای اراهه‌ی با شتاب $\frac{m}{s^2}$ 68
- شکل 9-4: ورودی‌های کنترلی جرثقیل سه بعدی دارای اراهه‌ی با شتاب $\frac{m}{s^2}$ 69

شکل 4-10 نیروی زوج واگن مورد نیاز برای کنترل پیچش جرثقیل دارای ارباهی با شتاب $2\frac{m}{s^2}$ 69

شکل 4-11 تابعی حاصل از اعمال کنترل کننده ی SDRE بر جرثقیل با ارباهی با شتاب $2\frac{m}{s^2}$ 70

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
موقعیت ارابه نسبت به مبدا مختصات در راستای محور $e_x^{\mathbf{I}}$	x [m]
موقعیت ارابه نسبت به مبدا مختصات در راستای محور $e_y^{\mathbf{I}}$	y [m]
طول کابل‌ها	l [m]
فاصله‌ی بین مرکز جرم کانتینر (G_c) و سکوی آن (G_s) در راستای محور x	x_c [m]
فاصله‌ی بین مرکز جرم کانتینر (G_c) و سکوی آن (G_s) در راستای محور y	y_c [m]
زاویه‌ی بین کابل و خط عمود بر راستای e_x	f [rad]
زاویه‌ی بین کابل و خط عمود بر راستای e_y	y [rad]
زاویه‌ی توصیف‌کننده‌ی چرخش سکوی کانتینر در مختصات مرجع	J [rad]
فاصله‌ی بین مرکز جرم ارابه (G_r) و سکوی کانتینر (G_s) در راستای محور x	c [m]
فاصله‌ی بین مرکز جرم ارابه (G_r) و سکوی کانتینر (G_s) در راستای محور y	d [m]
جرم ارابه	m_t [kg]
جرم سکوی کانتینر	m_s [kg]
جرم کانتینر که شامل جرم لغزنده نیز می‌شود	m_c [kg]
بردار موقعیت مرکز جرم ارابه (G_t)	$r_t^{\mathbf{I}}$ [m]
بردار موقعیت مرکز جرم سکوی کانتینر (G_s)	$r_s^{\mathbf{I}}$ [m]
بردار موقعیت مرکز جرم کانتینر (G_c)	$r_c^{\mathbf{I}}$ [m]
ارتفاع ارابه	u [m]
ارتفاع سکوی کانتینر	a [m]
ارتفاع سکوی لغزنده تولید‌کننده‌ی درجه‌ی آزادی مکانیکی y_c	s_1 [m]
ارتفاع سکوی لغزنده تولید‌کننده‌ی درجه‌ی آزادی مکانیکی x_c	s_2 [m]
فاصله‌ی بین بالای کانتینر تا مرکز جرم (G_c) آن	h [m]
طول کانتینر	L [m]

W [m]	عرض کانتینر
g [ms^{-2}]	شتاب جاذبه
Q_{x_c} [N]	نیروی عمومی که به کانتینر توسط موتور در راستای x_c وارد می شود
Q_{y_c} [N]	نیروی عمومی که به کانتینر توسط موتور در راستای y_c وارد می شود
Q_J [N.m]	گشتاور حاصل از جفت نیروی دو واگن واقع در ارابه در راستای پیچش J
I_{zz}^s [kgm^2]	ممان اینرسی سکوی کانتینر در راستای \hat{e}_z
I_{zz}^c [kgm^2]	ممان اینرسی کانتینر در راستای \hat{e}_z

فصل 1 - مقدمه

1-1 - پیشگفتار

در محیط ما ضرورت جابه‌جایی لوازم و بار از یک مکان به مکانی دیگر دیده می‌شود. امروزه از جرثقیل‌ها به منظور حمل بارهای خطرآفرین به کارخانه‌ها، بنادر، تاسیسات هسته‌ای و سازه‌های مرتفع استفاده می‌کنند.

جرثقیل‌ها را بر اساس ساختاری به دو نوع چرخشی¹ و ستون‌دار² تقسیم‌بندی می‌کنند. جرثقیل‌های حامل کانتینر از نوع جرثقیل‌های ستون‌دار می‌باشند. دو نوع جرثقیل حامل کانتینر وجود دارند. این دو عبارتند از: جرثقیل‌های سوار بر ریل مجاور بندر³ و جرثقیل لاستیک پلاستیکی ستون‌دار⁴

این دسته از جرثقیل‌ها، شامل یک ارابه⁵ می‌شوند که به صورت افقی حرکت می‌کند. بار توسط یک کابل به ارابه وصل شده است. طول این کابل به هنگام فرآیند بالا کشیدن⁶ بار تغییر می‌کند. عموماً این دسته از جرثقیل‌ها را به صورت یک پاندول ساده⁷ مدل می‌کنند. این جرثقیل‌ها انواع مختلفی دارند که جرثقیل‌های حامل کانتینر یکی از آنها می‌باشد. این جرثقیل‌ها در حمل کانتینرها از کشتی به اسکله و بالعکس استفاده می‌شوند. (شکل 1-1) در این کار به کنترل و مدل‌سازی این دسته از جرثقیل‌های ستون‌دار خواهیم پرداخت.

از اقسام دیگر جرثقیل‌های ستون‌دار، جرثقیل‌های ستون‌دار محل کار⁸ و جرثقیل‌های ستون‌دار سوار بر ریل⁹، که به ترتیب در حمل اجناس کوچک در کارخانه‌ها و اجناس سنگین در کارخانه‌های اتومبیل‌سازی، کاغذسازی و نورد فولاد استفاده می‌شوند، می‌باشند. معمولاً کنترل این دسته از جرثقیل‌ها بر

¹ Rotatory

² Gantry

³ Rail-mounted quayside crane(RMQC)

⁴ Rubber-tired gantry crane(RTGC)

⁵ Trolley

⁶ Hoisting

⁷ Simple pendulum

⁸ Work station gantry cranes

⁹ Rail mounted gantry cranes

اساس سه عملکرد گذشتن¹ ارا به (انتقال بار از کشتی به بندر و بالعکس)، بالا کشیدن بار و پایین آوردن آن؛ جداگانه مورد بررسی قرار می گیرند. ما در این کار، روی کنترل فرآیند گذشتن ارا به تمرکز می کنیم. جرثقیل های حامل کانتینر نوع اول، مورد نظر ما در این کار می باشند. این نوع از جرثقیل ها تفاوت مهمی با سایر جرثقیل های ستون دار دارند. این تفاوت در داشتن چهار طناب برای عمل بالا کشیدن است؛ به طوریکه این چهار طناب به چهار گوشه ی یک تخته ی پخش کننده²، که بر روی کانتینر قرار گرفته است، وصل می شوند. به این تخته ی پخش کننده در جرثقیل های حامل کانتینر، سکوی کانتینر³ نیز می گویند. طبیعتاً این تفاوت مدل و دینامیک این جرثقیل ها را نسبت به سایر جرثقیل های ستون دار متفاوت می کند. بنابراین دیگر مدل این جرثقیل ها به صورت یک پاندول ساده نخواهد بود.



شکل 1-1: جرثقیل حامل کانتینر

¹ Traverse
² Spreader bar
³ Container platform

1-2 - ضرورت طراحی کنترل کننده

همه‌ی ما از دستاوردهای اقتصادی افزایش سرعت حمل و نقل بار آگاه هستیم. یکی از راه کارها برای افزایش سرعت جابه‌جایی بار استفاده از کانتینرها به منظور جابه‌جایی بار توسط کشتی‌ها می‌باشد. از طرفی دیگر، در حمل و نقل دریایی زمان بسیاری به هنگام تخلیه‌ی بار و یا انتقال آن در کشتی به هدر می‌رود. این عمل توسط جرثقیل‌های حامل کانتینر انجام می‌شود. بارهای کانتینری در هنگام جابه‌جایی تاب خواهند خورد. این تاب خوردن‌ها ناشی از عنصر اینرسی¹، که همان بار می‌باشد، است؛ هم‌چنین این تاب خوردن‌ها با عواملی چون افزایش سرعت و شتاب ارابه‌ی این جرثقیل‌ها و اغتشاشاتی مانند باد تشدید می‌شوند. تجاوز این تاب خوردن‌ها از حد قابل مجازشان منجر به خطرات سهمگینی خواهد شد. علاوه بر این، در نقطه‌ی مقصد نیز باید این تاب خوردن‌ها کاملاً حذف بشوند. در نتیجه معمولاً رانندگان ماهر جرثقیل با کم نمودن به موقع حرکت ارابه از بروز چنین حوادثی جلوگیری می‌کنند. ایراد این مساله در این است که اولاً نیاز به استخدام رانندگانی بسیار ماهر در این زمینه خواهد بود؛ که این به نوبه‌ی خود هزینه خواهد داشت. دوماً، هر چه قدر هم که این رانندگان ماهر باشند؛ باز هم خطر بروز حوادثی ناشی از بی‌دقتی یا حال نا مساعد راننده وجود خواهد داشت. در آخر راننده‌های بسیار ماهر هم قادر به حمل بار با بیشترین سرعت ممکن و در عین حال کاهش تاب خوردن‌ها به کم‌ترین مقدار ممکن نیستند. در واقع انسان هیچ‌گاه قادر به حرکت در بهینه‌ترین مسیر در چنین مسایلی نخواهد بود. بنابراین نیاز به طراحی یک کنترل‌کننده‌ی بهینه به منظور کاهش این تاب خوردن‌ها دیده می‌شود.

1-3 - تاریخچه

در کارهایی که تا به حال دیده شده است، نیروی کنترلی را با نیروی تولیدکننده‌ی حرکت خطی ارابه معادل می‌گیرند. بنابراین کنترل‌کننده در حرکت ارابه و در نتیجه سرعت جابه‌جایی بار تاثیر منفی خواهد گذاشت. هم‌چنین اکثر این کنترل‌کننده‌ها حلقه باز² بوده و در نتیجه در مقابل نامعینی و اغتشاش حساس می‌باشند. در بسیاری از موارد در آن‌ها از شکل‌دهی ورودی³ استفاده شده است که یک کنترل‌کننده‌ی حلقه باز می‌باشد. نکته‌ی آخر در طراحی چنین کنترل‌کننده‌هایی ضرورت انجام

¹ Inertial element

² Open loop

³ Input shaping

طراحی مسیر می‌باشد. در [1]، یک کنترل‌کننده‌ی نیروی فعال¹ را برای مدل دو بعدی خطی جرثقیل-های ستون‌دار طراحی کرده‌اند. این کنترل‌کننده دقیقاً روی نیروی حرکت‌دهنده‌ی ارابه پیاده شده است. با این حال، در [1] ادعا شده است که کنترل‌کننده در مقابل اغتشاشات عملکرد مقاومی² از خود نشان می‌دهد. در [2]، برای مدل دوبعدی خطی جرثقیل‌های حامل کانتینر یک کنترل‌کننده‌ی بهینه‌ی خطی ساخته شده است. همچنین این کنترل‌کننده را عملاً با کمک حس‌گرهای³ مناسب پیاده‌سازی نموده‌اند. برای تشخیص جابه‌جایی تخته‌ی پخش‌کننده از پردازش تصویر⁴ با کمک دوربینی تعبیه شده در قسمت تحتانی ارابه و نشان‌گرهایی بالای تخته‌ی پخش‌کننده استفاده شده است. برای تشخیص مکان و سرعت ارابه هم به ترتیب از کدکننده⁵ و تولیدکننده‌ی تاکو⁶ استفاده شده است. طبیعتاً خطی بودن مدل و کنترل‌کننده‌ی بهینه خواص غیرخطی سیستم را حفظ نمی‌کند؛ همچنین در این کار، راه حلی برای جدا کردن کنترل‌کننده از ارابه ارابه نشده است. در [3]، یک مدل غیرخطی دوبعدی را به کمک شبکه‌های عصبی⁷ کنترل بهینه نموده‌اند. با این حال طراحی چنین کنترل‌کننده‌ی غیرخطی بهینه‌ای پیچیدگی‌های بسیاری دارد. در [4]، یک کنترل‌کننده‌ی غیرخطی بر مبنای خطی‌سازی پس-خورد⁸ برای مدل دوبعدی جرثقیل‌های حامل کانتینر طراحی شده است. به علاوه در این کار عمل بالا کشیدن نیز منظور شده است. با این حال مدل‌سازی در آن هم‌چنان دو بعدی بوده است. یکی از مشکلات عمده‌ی استفاده از مدل‌های دو بعدی، عدم توانایی آن‌ها در بیان حرکت پیچشی⁹ بار می‌باشد. این حرکت پیچشی بر اثر بار به مقدار کمی بوجود می‌آیند. علاوه بر این، بنا به دلایلی چون عدم برابری طول جفت کابل‌های چپ و راست، باد و عدم تعادل در بار موجود در کانتینر تشدید می‌شوند. بنابراین، علاوه بر کنترل تاب خوردن‌ها باید این پیچش‌ها را نیز کنترل نمود. در واقع، ضرورت استفاده از مدل‌های سه بعدی در کنترل این حرکات پیچشی می‌باشد. در [5]، دو راه برای کنترل این گونه از پیچش‌ها پیشنهاد شده است:

¹ Active force controller

² Robust

³ Sensor

⁴ Image processing

⁵ Encoder

⁶ Tachogenerator

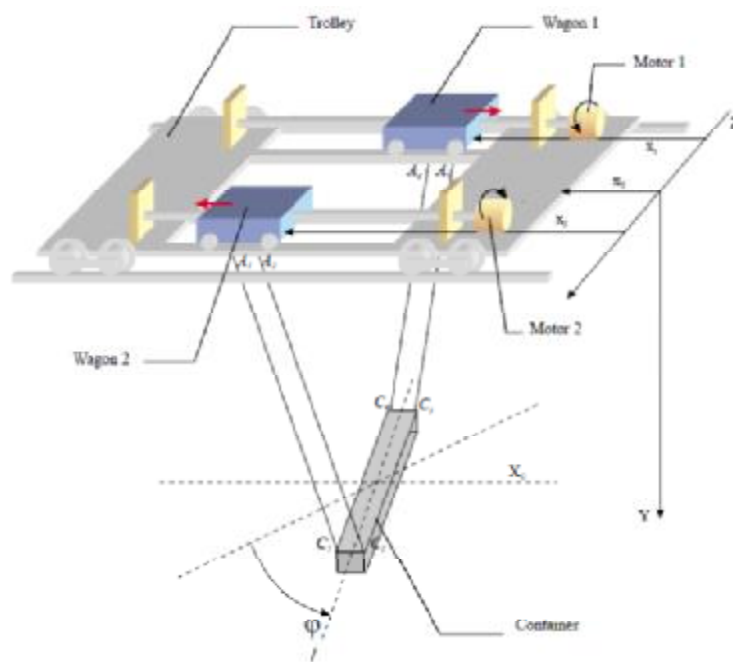
⁷ Neural networks

⁸ Feedback linearization

⁹ Skew

1- کنترل مستقل جفت طناب‌های چپ و راست با بالا کشیدن و پایین آوردن هر یک از آن‌ها که اگر چه حرکت پیچشی را کنترل می‌کند، خود می‌تواند در تشدید تاب‌خوردن‌ها تاثیر منفی بگذارد.

2- حرکت هر یک از دو جفت کابل، توسط دو واگن تعبیه شده در ارابه، در جهت مخالف یکدیگر روی محور x با نیرویی برابر و مخالف یکدیگر بطوریکه منجر به تولید یک گشتاور بشود. این گشتاور همان کنترل‌کننده‌ی حرکات پیچشی خواهد بود. نحوه‌ی پیاده‌سازی چنین کنترل‌کننده‌ای در شکل 1-2 آورده شده است.



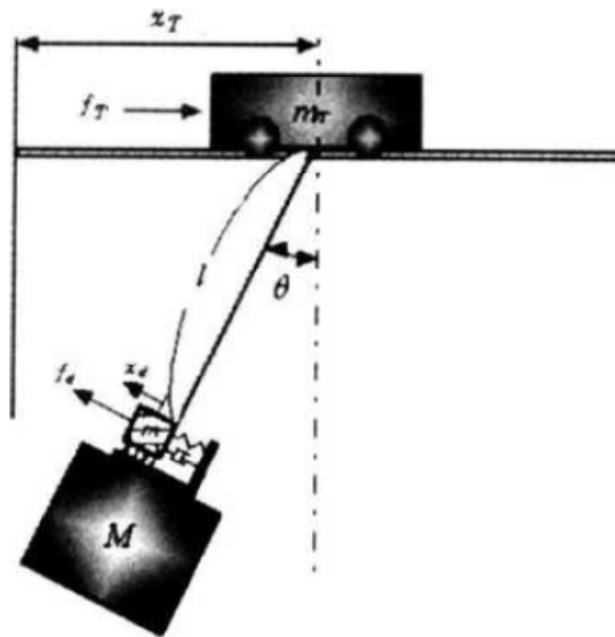
شکل 1-2: طرح پیشنهادی در [5] برای کنترل حرکات پیچشی توسط دو واگن

به منظور رفع مشکل تاثیر کنترل‌کننده بر روی حرکت ارابه می‌توان از عملکرد بالا کشیدن به عنوان کنترل‌کننده استفاده کرد [6]. بدین شکل که با تغییر طول طناب یک نیروی کجی¹ تولید می‌شود. بدین ترتیب تاب خوردن را می‌توان با آن نیروی کج کنترل نمود. مشکلات این کار در پیچیدگی و دشواری مدل‌سازی می‌باشد. علاوه بر این مسولیت تغییر طول کابل با راننده‌ی جرثقیل خواهد بود. بنابراین از زمان فرمان تغییر طول کابل توسط راننده تا شکل‌گیری این تغییر طول زمانی طول خواهد کشید. در نتیجه، نیاز به طراحی کنترل‌کننده‌ی با پس‌خورد تاخیردار² می‌باشد. این کنترل‌کننده‌ها به

¹ Lateral force

² Delayed feedback

دلیل پس خورد بودن در مقابل نامعینی و اغتشاشات مقاوم هستند. به منظور حفظ خواص غیرخطی سیستم، طراحی کنترل کننده های غیرخطی مطلوب می باشد که طراحی این کنترل کننده ها برای سیستم های تاخیردار در [7] نیز انجام شده است. راه کاری دیگری که برای جدا کردن کنترل کننده از ارابه در نظر گرفته شده است؛ به این صورت می باشد که در بالای تخته ی پخش کننده یک موتور به همراه دمپر و فنر قرار داده شده است [8]. این کار در مدل دو بعدی انجام شده است و به نظر می رسد که برای مدل سه بعدی که دارای چهار کابل می باشد پیاده سازی چنین کنترل کننده ای بسیار دشوار باشد. شکل 1-3 طرح ارابه شده توسط کیم¹ را برای پیاده سازی چنین کنترل کننده ای، نشان می دهد [8]. کیم در این حالت از بررسی دینامیک ارابه، که دیگر به کنترل کننده ربطی ندارد، چشم پوشی کرده است. او پیشنهاد داده است که حرکت ارابه را به چشم اغتشاش ببینید.



شکل 0-3: مدل دو بعدی پیشنهادی توسط کیم برای کنترل تاب خوردن [8]

در مورد روش های مختلف مدل سازی این دسته از جرثقیل ها، باید گفت که از روش های مختلفی بدین منظور استفاده شده است. در [9]، پیشنهاد شده است که این جرثقیل ها را به صورت ربات های موازی² مدل سازی کنند؛ تا آن آزادی عمل بیشتر در حرکت آن ها نشان داده بشود. متأسفانه در این کار تنها به شبیه سازی اکتفا شده است و وارد بحث کنترل این مدل ها نشده است.

¹ Kim

² Parallel robots

به طور کلی مدل‌سازی جرتقیل‌ها از دو طریق جرم توزیعی¹ و توده‌ای² انجام می‌شود [10]. در حالت اول، مدل سیستم به صورت معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی³ بیان می‌شود. در آندره ناول⁴ برای اولین بار چنین مدل‌سازی را بر روی جرتقیل‌ها انجام داد. به طوریکه کابل را به صورت یک جرم توزیعی، با شرایط مرزی⁵ بار و قلاب به عنوان یک جرم توده‌ای، در نظر گرفت. متأسفانه، به دلیل استفاده از معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، کنترل این دسته از مدل‌ها دشوار خواهد شد. نوع دیگری که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ بر مبنای این است که کابل هیچ‌گونه وزنی ندارد. در نتیجه معادلات دیفرانسیلی معمولی⁶ برای بیان این دسته از مدل‌ها کافی خواهد بود. مدل توده‌ای خود نیز به دو نوع کاهش یافته⁷ و توسعه یافته⁸ تقسیم بندی می‌شود. معمولاً در کارهای انجام شده تاکنون برای مدل‌سازی جرتقیل‌های حامل کانتینر از مدل‌های کاهش یافته استفاده می‌شود. عدم رعایت دینامیک ساختمان جرتقیل و در نظر گرفتن جرتقیل به عنوان ساختاری بدون انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی؛ منجر به افزایش فرکانس ارتعاشات خواهد شد. بنابراین در مدل‌های کاهش یافته بررسی کنترل‌کننده‌ی جرتقیل با مقادیر واقعی ممکن نبوده و تنها با مقادیر آزمایشگاهی می‌توان کنترل‌کننده‌های طراحی شده را بررسی نمود [11]. در صورت فرض کردن مدل به صورت یک پاندول ساده، مدل را مدل کاهش یافته و در صورت در نظر گرفتن ساختمان جرتقیل در دینامیک سیستم، مدل را مدل توسعه یافته می‌نامند. در کارهای انجام شده معمولاً از مدل کردن موتور صرف نظر شده است. در [12]، با مدل کردن موتور حرکت‌دهنده‌ی ارابه؛ مدلی الکترومکانیکی⁹ برای کنترل جرتقیل بر مبنای اعمال نیروی ورودی بر ارابه، ارائه شده است. با این حال تنها به شبیه‌سازی اکتفا شده است و در مورد طراحی کنترل‌کننده کاری انجام نشده است.

1-4 - رویکرد به مساله

تا به حال کنترل‌کننده‌های طراحی شده حرکت ارابه را کنترل می‌نمودند. حتی اگر این کنترل‌کننده‌ها بصورت کاملاً بهینه طراحی می‌شدند؛ باز هم باید در جاهایی از سرعت حرکت ارابه می

¹ Distributed mass

² Lumped mass

³ Partial Differential Equations (PDE)

⁴ D' Andrea-Novel

⁵ Boundary conditions

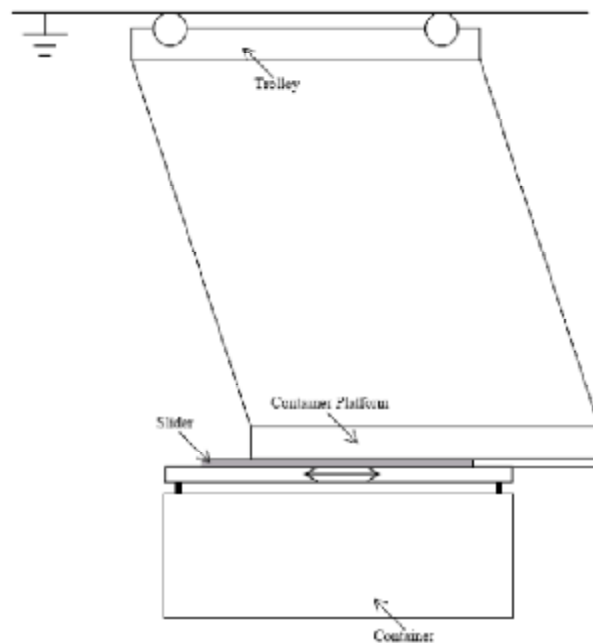
⁶ Ordinary Differential Equations (ODE)

⁷ Reduced

⁸ Extended

⁹ Electromechanical

کاهیدند. علاوه بر این، رانندگان ماهر جرثقیل‌های حامل کانتینر معمولاً این کنترل‌کننده‌ها را خاموش می‌کنند. از آن جا که کنترل‌کننده ممکن است در حرکت ارابه دخالت کند؛ بعضی مواقع بار را به نقطه ای غیر از نقطه‌ی مقصد هدایت می‌کند [13]. این تداخل در کار، باعث عدم اطمینان رانندگان ماهر به این کنترل‌کننده‌ها شده است. دکتر خواجه‌پور¹ [14] در دانشگاه واترلو² پیشنهاد داد که کنترل‌کننده را در بالای کانتینر قرار دهند. در نتیجه کنترل‌کننده کاملاً از حرکت ارابه مستقل خواهد شد. او این کار با افزودن یک درجه‌ی آزادی در مدل دو بعدی و دو درجه در مدل سه بعدی پیشنهاد داد. افزایش این درجات آزادی با قرار دادن یک صفحه‌ی لغزنده بین کانتینر و سکوی آن شکل می‌گیرد. شکل 1-4 ساختار کنترلی پیشنهادی در [14] را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، موتور تعبیه شده در صفحه‌ی لغزنده باعث جابه‌جایی آن و در نتیجه کاهش تاب‌خوردن‌های آن خواهد شد.



شکل 1-4: تحقق صفحه‌ی لغزنده در مدل دو بعدی [14]

با این کار طراحی کنترل‌کننده را نیز ساده‌تر می‌کنیم. زیرا با توجه به جدایی کنترل‌کننده از حرکت ارابه، دیگر نیازی به تولید یک مسیر بهینه³ در مساله نخواهیم داشت.

¹ Khajepour

² Waterloo

³ Optimal trajectory generation

تاکنون کنترل کننده‌های خطی برای این مدل طراحی شده‌اند. ما در این کار به طراحی یک کنترل کننده‌ی غیرخطی بهینه برای این دسته از مدل‌ها می‌پردازیم. کنترل کننده‌ی SDRE¹ در عین این که غیرخطی می‌باشد؛ طراحی بسیار ساده‌ای دارد. در این کار کنترل کننده‌ی بهینه را در دو حالت افق محدود² و نامحدود³ برای مدل طراحی می‌کنیم. کنترل مدل سه بعدی جرثقیل، که شامل ده متغیر حالت می‌باشد، نیز از دید حل مسایل پیچیده با این الگوریتم قابل توجه می‌باشد.

1-5 - ساختار پایان نامه

در فصل دوم به معرفی کنترل کننده‌های بهینه‌ی غیرخطی (SDRE) به عنوان توسعه یافته‌ی کنترل کننده‌ی خطی بهینه (LQR⁴)، به طوریکه معادلات ریکاتی⁵ در آن وابسته به حالت می‌باشند، می‌پردازیم. پس از مروری بر تاریخچه‌ی استفاده از این کنترل کننده‌ها به روش‌های مختلف طراحی این کنترل کننده‌ها، شرایط خاص و سایر نکات مربوط به آن می‌پردازیم. در فصل سوم به مدل‌سازی غیر-خطی و طراحی کنترل کننده‌ی غیرخطی SDRE برای مدل دو بعدی این دسته از جرثقیل‌ها می‌پردازیم. در فصل چهارم، به مدل‌سازی سه بعدی جرثقیل‌های حامل کانتینر و کنترل آن می‌پردازیم. مشکل اصلی در مدل‌سازی سه بعدی این دسته از جرثقیل‌ها خواهد بود. همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، اهمیت استفاده از این مدل‌ها در کنترل حرکات پیچشی می‌باشد. ما در این فصل با ورودی کنترلی جداگانه‌ای این نوع از حرکات را کنترل خواهیم کرد. اتفاقاً یکی از حسن‌های کنترل کننده‌های SDRE در سادگی طراحی یک کنترل کننده‌ی غیرخطی و چند متغیره می‌باشد. در فصل پنجم نیز به ارایه‌ی نتایج و پیشنهادات برای ادامه‌ی کار در این زمینه می‌پردازیم.

¹ State Dependant Riccati Equation

² Finite horizon

³ Infinite horizon

⁴ Linear Quadratic Regulator

⁵ Riccati equations

فصل 2- کنترل کننده‌ی SDRE

2-1- مقدمه

در طول دهه‌های 50 و 60 میلادی، کاربردهای مهندسی هوا و فضا، به منظور این که یک تابع معینی را مینیمم بکنند، بطور وسیعی به تهییج دانشمندان برای توسعه‌ی کنترل بهینه پرداختند. نتیجه‌ی حاصل از این کاربردهای بسیار مفید، به طراحی تنظیم‌کننده¹ها (که در آن یک حالت پایداری باید حفظ بشود) و استراتژی کنترل ردیاب² (که در آن یک مسیر³ از پیش تعیین شده را باید تعقیب بکند) منجر شد. مسالهی مسیر بهینه‌ی پرواز برای فضاپیماها، در میان این کاربردها، قرار دارد. به طور خاص نظریه⁴ی کنترل بهینه‌ی خطی، به شکل کاملاً گسترده‌ای مورد استناد و کاربرد قرار گرفته است. کارخانه⁵ تحت کنترل، در این نظریه خطی فرض شده است. هم چنین کنترل پس خورد در آن، با توجه به ورودی آن، به صورت خطی محدود شده است. اگر چه در سال‌های اخیر، به دلیل در دسترس بودن ریزپردازنده‌های⁶ با توان مصرفی پایین قدرتمند، به پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در نظریه و کاربردهای کنترل غیرخطی رسیده‌ایم.

امروزه در دوره‌ی رقابتی، تغییر سریع در تکنولوژی و اکتشافات فضایی، به دقتی بالا در هزینه‌های کنترل سیستم‌های غیرخطی نیاز است. این مساله باعث سرعت بخشیدن به توسعه‌ی سریع کنترل غیرخطی، به منظور کاربردهای بوجود آمده برای به مبارزه طلبیدن مسایل پیچیده‌ی دینامیکی موجود در جهان، شده است. این کاربردها، به طور خاص، اهمیت کاربری بالایی در هوا فضا، زیردریایی‌ها و صنایع دفاعی دارند. اگرچه، با وجود پیشرفت‌های اخیر بسیاری از مسایل حل نشده باقی مانده‌اند، تا حدی که اغلب متخصصین از ناکارآمدی نظریه‌های کنونی به تنگ آمده‌اند. به طور مثال اغلب روش‌های توسعه یافته دارای کاربردهای محدودی، به دلیل شرایط سختی که به سیستم تحمیل می‌شوند، می‌باشند. علاوه براین، اگر چه بسیاری از روش‌ها از دید نظری توسعه‌ی قابل قبولی داشته‌اند؛ ولی کمبود

¹ Regulator

² Tracking control

³ Trajectory

⁴ Theory

⁵ Plant

⁶ Microprocessor

یک استراتژی منحصر به فرد، که علاوه بر پایداری¹ قادر به رسیدن به کارآیی و مقاوم بودن راضی کننده‌ای در سیستم‌های گوناگون غیرخطی باشد، احساس می‌شود. طراحان سیستم‌های کنترلی به تلاش برای رسیدن به الگوریتم‌های کنترلی روش‌مند²، ساده و بهینه‌کننده‌ی کارآیی (به منظور تدارک یک تعادل³ بین تلاش کنترلی و خطای حالات) ادامه می‌دهند.

معادله‌ی ریکاتی وابسته به حالت (SDRE) در جامعه‌ی کنترل، یک استراتژی مشهور است که در دهه‌ی اخیر بسیار مقبول واقع شده است. (از این معادلات گاهی به نام معادلات ریکاتی یخ‌بسته⁴ شده نیز یاد می‌شود.) این استراتژی یک الگوریتم بسیار کارآمدی را برای ترکیب کنترل کننده‌های با پس-خورد غیرخطی به وجود آورده است. در این روش شرایط غیرخطی را در حالت سیستم، به صورت یک ماتریس سیستم وابسته به حالت وارد می‌کنیم. عملاً این ماتریس وابسته به حالت، انعطاف پذیری طراحی ما را بالا می‌برد. این روش را ابتدا پیرسون⁵ در سال 1962 ارایه داد. سپس ورنلی و کوک⁶ آن را در سال 1975 توسعه دادند. در سال 1988 مراکک و کلوتیر⁷ آن را مستقلاً مورد بررسی قرار دادند. لازم به ذکر است که فریدلند⁸ نیز در سال 1996، به آن اشاره‌ای غیر مستقیم نمود [15].

این روش در بسیاری از کاربردها بکار گرفته شده است. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به کنترل موتور هم‌زمان [16]، کنترل موقعیت و ارتفاع فضاپیما [17]، پایداری پاندول معکوس [18] و مدیریت دارو در درمان سرطان [19] اشاره نمود.

به روش شامل فاکتور گرفتن از بردار حالت پارامتری کردن می‌گویند. ماتریس ضریب حالت در این روش، وابسته به همان بردار حالت می‌باشد. در نتیجه سیستم غیرخطی ما، تبدیل به یک ساختار خطی غیریکتا خواهد شد. ماتریس حالت این ساختار جدید را، ماتریس ضریب وابسته به حالت⁹ می‌نامند. همانند کنترل بهینه‌ی خطی، باید یک تابعی¹⁰ غیرخطی درجه‌ی دو را بهینه نمود. سپس معادله‌ی ریکاتی‌ای خواهیم داشت، که با توجه به ماتریس‌های وابسته به حالت درون آن، وابسته به حالت خواهد

¹ Stability

² Systematic

³ Trade-off

⁴ Frozen Riccati Equations

⁵ Pearson

⁶ Wernli & Cook

⁷ Meracek & Cloutier

⁸ Friedland

⁹ State dependant coefficient (SDC)

¹⁰ Functional