١٠٨
٧

٩٩٠٩٧

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی برق–کنترل

طراحی کنترل‌کننده‌های معکوس تطبیقی و مقاوم برای سیستم حرکت از راه دور از طریق اینترنت

مختار شاصادقی

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا مومنی

۱۳۸۷ ۱۵/۲۵

استاد مشاور:

دکتر رامین امیری‌فر

دکتر سهیل گنجه‌فر

مهر ۱۳۸۶

۹۹۰۲۷

۱۴۰۸۵

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله‌دکتری

آقای مختار شا صادقی رساله ۲۴ واحدی خود را **با عنوان طراحی کنترل کننده معکوس تطبیقی سیستم عملیات از راه دور از طریق اینترنت** در تاریخ ۱۳۸۶/۷/۲۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی برق - کنترل پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر حمیدرضا مومنی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر رامین امیری فر	استادیار	
استاد مشاور	دکتر سهیل گنجه فر	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمدتقی حمیدی بهشتی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر وحید جوهری مجد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی خاکی صدیق	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا جاهد مطلق	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر وحید جوهری مجد	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی مختار شامامی

امضاء

تقدیم به

مادر مهربان و عموی بزرگوارم

که سال‌ها سهم خود را از زندگی رنج و تلاش برگزیدند تا رفاه و آسایش را به من ارزانی دارند. امیدوارم بتوانم فرزندی صالح برای آن‌ها باشم.

و تقدیم به

خواهران و برادران عزیزم

که رهنمودها و حمایت‌های دلسوزانه آنها همیشه مایه دلگرمی و امیدواری من است.

تشکر و قدردانی

من لم یشکر المخلوق، لم یشکر الخالق

اکنون که به لطف پروردگار یکتا این پژوهش سامان یافته است، بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر حمیدرضا مومنی تشکر و قدردانی کنم. ایشان با راهنمایی‌های سودمند و بی‌دریغ خود پدید آمدن این رساله را موجب شدند. متانت و سعه صدر منحصر بفرد ایشان در طول دوره انجام رساله محیطی آرام برای اینجانب فراهم آورده بود.

همچنین، از استاد ارجمند و فرزانه جناب آقای دکتر رامین امیری‌فر که مشاوره رساله را بر عهده داشتند صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم. گرچه زبان و قلم از قدردانی لطف و محبت ایشان ناتوان است، ولی به رسم قدرشناسی از ایشان به خاطر راهنمایی‌های ارزنده علمی، تلاش، دقت نظر و دلسوزی تشکر می‌کنم. آشنایی و دوستی با ایشان را از بزرگترین الطاف خداوند در حق خود می‌دانم.

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر سهیل گنجه‌فر نیز که مشاوره رساله را بر عهده داشتند و نکات سودمندی را در جهت بهتر سامان یافتن این پژوهش یادآور شدند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین، از دیگر اساتید فرهیخته و بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد تقی حمیدی بهشتی و جناب آقای دکتر وحید جوهری مجد که در طول دوره تحصیلات تکمیلی از نظر علمی و اخلاقی از آن‌ها بسیار آموخته‌ام، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم.

از آقای دکتر گریگوری پلت که مقالات ایشان نقطه شروع رساله بود و همواره سوالات علمی مرا با حوصله پاسخ گفتند، تشکر می‌کنم.

در طول دوره دکتری و انجام رساله، دوستان زیادی هر یک به نحوی یاور بنده بودند. از همگی این عزیزان قدردانی و سپاسگزاری می‌کنم: دکتر علیرضا کرمی، دکتر مصطفی خواجه، دکتر حسینی ثانی، دکتر حمیدرضا کریمی، علی اشرف مدرس، فضل‌الله براقی، جواد بهشتیان، محسن حافظ تربتی، هادی حسینی، داریوش خواجوی، خسرو خلیفه، خانم مهندس جعفرنژاد و برادر محترمشان، محمد کاظم سوری، حسن فاتحی مرج، احسان کامرانی، رضا محمدی، علی معرفیان‌پور، رسول ناصری،...

در پایان تشکری ویژه از دوستان صمیمی و بزرگوارم آقایان دکتر مجتبی خلیفه، مهدی سجودی و سیدرضا حبیبی رشت‌آبادی دارم.

چکیده

در این رساله، روش‌هایی برای کنترل سیستم‌های حرکت از راه دور ارائه می‌شوند. در روش اول، با استفاده از ایده پیش‌بین اسمیت، یک کنترل‌کننده امپدانس برای ربات فرمانده و یک کنترل‌کننده معکوس تطبیقی برای ربات فرمانبر به گونه‌ای طراحی می‌شوند که تاثیر حاصل از تاخیر زمانی کانال‌های مخابراتی بر روی پایداری و کارآیی سیستم حلقه بسته حذف شود. همچنین، شرایطی به منظور حصول پایداری عملی سیستم بر اساس نظریه کنترل مقاوم بدست آورده می‌شوند. ویژگی‌های مطلوب در پاسخ گذرای سیستم نیز با استفاده از روش چندجمله‌ای‌های مشخصه استاندارد در طراحی گنجانده می‌شوند. از مزیت‌های روش پیشنهادی اول می‌توان به تعدیل نمودن محدودیت‌های حاکم بر پیش‌بین اسمیت، عدم ضرورت اطلاع دقیق از مدل سیستم فرمانده و حصول کارآیی سیستم حلقه بسته در تعقیب موقعیت اشاره کرد. همچنین، این روش پیشنهادی با روش غیرخطی مود لغزشی مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از بازدهی خوبی برخوردار است. در روش دوم، یک ساختار حلقه‌بسته برای کنترل ربات فرمانده و یک ساختار حلقه باز برای کنترل ربات فرمانبر در نظر گرفته می‌شود. یک کنترل‌کننده امپدانس برای سیستم فرمانده استفاده شده و برای طراحی کنترل‌کننده فرمانبر، مساله طراحی در قالب یک سیستم کنترل فیدبک استاندارد بیان شده و به کمک نامساوی‌های ماتریسی خطی یک کنترل‌کننده مقاوم H_∞ و یک کنترل‌کننده L_1 برای سمت فرمانبر به طور جداگانه طراحی می‌شوند. در این طراحی تاخیر زمانی مسیرهای رفت و برگشت متفاوت، متغیر با زمان، کراندار و با مشتق کراندار در نظر گرفته می‌شود. برای طراحی کنترل‌کننده سمت فرمانبر، سیستم کنترل به گونه‌ای فرمول‌بندی می‌شود تا یک کنترل‌کننده فیدبک خروجی دینامیکی برای سیستم فرمانبر طراحی گردد. یک تابعی لیاپانوف-کرازوفسکی برای تحلیل پایداری سیستم حلقه بسته تعریف شده و نتایج حاصل برای تحلیل پایداری و طراحی کنترل‌کننده به صورت شرایط کافی وابسته به تاخیر زمانی بیان می‌شوند. این شرایط و معیارها به صورت دستگاهی از نامساوی‌های ماتریسی بیان شده که می‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای عددی استاندارد آزمایش و حل کرد. همچنین، برای حذف اغتشاش در سمت فرمانبر یک روش بهینه پیشنهاد می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که سیستم کنترل پیشنهادی از کارآیی مناسب در تعقیب موقعیت با حذف رانش با وجود تاخیر زمانی متغیر با زمان برخوردار است.

کلید واژه: تاخیر زمانی، سیستم‌های حرکت از راه دور، کنترل امپدانس، کنترل معکوس تطبیقی، نامساوی‌های ماتریسی خطی.

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فصل ۱- پیشگفتار ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- تاریخچه‌ای مختصر از تحولات در سیستم‌های حرکت از راه دور ۴

۱-۲-۱- روش‌های اولیه ۴

۱-۲-۱-۱- آزمایش‌های آغازین ۴

۱-۲-۱-۲- کنترل نظارتی ۵

۱-۲-۱-۳- سیستم حرکت از راه دور مبتنی بر نرم‌افزار ۵

۱-۲-۱-۴- نرم‌افزار مادولار ۵

۱-۳- کاربردها ۶

۱-۳-۱- کار با مواد خطرناک ۶

۱-۳-۲- جراحی از راه دور ۷

۱-۳-۳- کاوشگرهای زیردریایی ۷

۱-۳-۴- ربات‌های فضایی ۷

۱-۳-۵- ربات‌های قابل حرکت ۷

۱-۴- ضرورت و اهمیت انجام تحقیق ۸

۱-۵- بررسی اجمالی کارهای گذشته و بیان جنبه‌های نوآوری رساله ۹

۱-۵-۱- طراحی کنترل معکوس تطبیقی ۱۱

۱-۵-۲- کنترل مقاوم با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی ۱۱

۱-۶- ساختار نوشتاری رساله ۱۲

فصل ۲- روش‌های مدل‌سازی و کنترل سیستم حرکت از راه دور ۱۳

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- سیستم حرکت از راه دور دو طرفه ۱۳

۲-۳- مدل‌سازی سیستم‌های حرکت از راه دور ۱۵

۲-۳-۱- مدل کلی یک سیستم حرکت از راه دور دو طرفه ۱۵

۲-۳-۲- مدل‌سازی محیط واسط سیستم حرکت از راه دور با شبکه پتری ۱۶

۲-۳-۳- نمایش شبکه‌ای دینامیک سیستم حرکت از راه دور ۱۷

۲-۳-۴- مدل چهار کاناله سیستم حرکت از راه دور ۱۸

۲-۳-۵- مدل تک‌حلقه سیستم حرکت از راه دور ۱۹

۲-۳-۶- مدل‌سازی دینامیک‌های تاخیر در اینترنت ۲۰

۲-۴- الگوریتم‌های کنترلی ۲۱

۲-۴-۱- سیستم‌های حرکت از راه دور مبتنی بر پسیویتی ۲۱
۲-۴-۱-۱- شبکه‌های دوقطبی ۲۲
۲-۴-۱-۲- ماتریس امپدانس ۲۳
۲-۴-۱-۳- ماتریس هایبرید ۲۳
۲-۴-۱-۴- روش پراکندگی ۲۳
۲-۴-۱-۵- متغیرهای موج ۲۵
۲-۴-۱-۶- حرکت از راه دور از طریق اینترنت ۲۶
۲-۴-۲- سایر روش‌های کنترلی ۲۸
۲-۴-۲-۱- شفافیت و ساختار چهار کاناله ۲۸
۲-۴-۲-۲- کنترل مود لغزشی ۳۰
۲-۴-۲-۳- کنترل‌کننده‌های مقاوم ۳۱
۲-۴-۲-۴- تحلیل پایداری حوزه فرکانس ۳۱
۲-۴-۲-۵- کنترل پیشبین مدل ۳۲
۲-۴-۳- کنترل تطبیقی حرکت/نیرو ۳۳
۲-۴-۴- کنترل‌کننده‌های مبتنی بر حادثه ۳۳

فصل ۳- طراحی کنترل‌کننده معکوس تطبیقی برای سیستم‌های حرکت از راه دور ۳۴

۳-۱- مقدمه ۳۴
۳-۲- طراحی سیستم کنترل امپدانس و معکوس تطبیقی برای سیستم حرکت از راه دور ۳۵
۳-۲-۱- کنترل‌کننده سمت فرمانده ۳۵
۳-۲-۲- کنترل‌کننده سمت فرمانبر ۳۶
۳-۲-۳- عملکرد حذف اغتشاش ۴۰
۳-۲-۴- آنالیز پایداری ۴۱
۳-۲-۴-۱- پایداری مطلق سیستم‌های حرکت از راه دور ۴۱
۳-۲-۴-۲- آنالیز پایداری برای طرح پیشنهادی شماره یک ۴۲
۳-۲-۵- نتایج شبیه‌سازی ۴۳
۳-۲-۵-۱- تاخیر زمانی ثابت ۴۵
۳-۲-۵-۲- تاخیر زمانی متغیر با زمان ۴۶
۳-۲-۶- جمع‌بندی طرح شماره یک ۴۷
۳-۳- طراحی کنترل‌کننده معکوس تطبیقی با استفاده از ایدهٔ پیش‌بین اسمیت ۴۷
۳-۳-۱- کنترل‌کننده سمت فرمانبر ۴۸
۳-۳-۲- اعمال ایده پیش‌بین اسمیت ۴۹
۳-۳-۳- تحلیل پایداری ۵۱
۳-۳-۴- طراحی بهینه سیستم کنترل ۵۵
۳-۳-۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۵۷
۳-۳-۵-۱- سیستم کنترل بدون فیلتر وزنی ۵۷
۳-۳-۵-۲- سیستم کنترل با فیلتر وزنی ۵۹
۳-۳-۵-۳- مقایسه کنترل معکوس تطبیقی با کنترل غیرخطی مود لغزشی ۶۱

۳-۳-۶- جمع‌بندی طرح شماره دو ۶۲

فصل ۴- طراحی کنترل‌کنندهٔ مقاوم برای سیستم‌های حرکت از راه دور با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی ۶۴

۴-۱- مقدمه ۶۴

۴-۲- نامساوی‌های ماتریسی در نظریه سیستم‌ها و کنترل ۶۵

۴-۲-۱- پسیویتی ۶۶

۴-۲-۲- سیستم‌های پسیو خطی با نرخ‌های تامین مربعی ۶۷

۴-۲-۳- کارایی H_∞ ۶۸

۴-۲-۴- کارایی L_1 ..... ۶۸

۴-۳- سیستم‌های تاخیر زمانی ۶۹

۴-۳-۱- تحلیل پایداری سیستم‌های تاخیر زمانی ۶۹

۴-۴- فرمول‌بندی مسأله ۷۰

۴-۵- تحلیل پایداری مقاوم ۷۴

۴-۶- طراحی کنترل‌کننده‌های سمت فرمانبر ۷۶

۴-۶-۱- طراحی کنترل‌کننده H_∞ ۷۶

۴-۶-۲- طراحی تضعیف‌کننده اغتشاش سیستم فرمانبر ۷۸

۴-۶-۲-۱- شبیه‌سازی کنترل‌کننده H_∞ ۸۰

۴-۶-۳- طراحی کنترل‌کننده L_1 ..... ۸۱

۴-۶-۳-۱- شبیه‌سازی کنترل‌کننده L_1 ..... ۸۲

۴-۷- جمع‌بندی ۸۲

فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۴

۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۴

۵-۲- پیشنهادها ۸۶

۵-۲-۱- چشم اندازهای آینده ۸۷

فهرست مراجع ۸۹

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۹۶

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۹۹

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
نیروی اعمالی اپراتور به سیستم فرمانده	f_h
نیروی اعمالی محیط دور به سیستم فرمانبر	f_e
نیروی اعمالی کنترل‌کننده فرمانبر به سیستم فرمانبر	f_s
بهره فیلتر	k_s
تعداد وزن‌های فیلتر FIR برای مدل‌سازی سیستم فرمانبر	m
تعداد وزن‌های فیلتر FIR برای مدل‌سازی معکوس سیستم فرمانبر	n
اغتشاش وارد شونده به سیستم	n_k
(شبه) چندجمله‌ایی	$p(s)$
قطب فیلتر	p
سطح لغزش	$s_d(t)$
تابع اشباع	sat(.)
زیرنویس نشان‌دهنده سیستم فرمانده	subscript *'m'*
زیرنویس نشان‌دهنده سیستم فرمانبر	subscript *'s'*
سیگنال تاخیریافته از طریق کانال مخابراتی	Sub/superscript "*d*"
گشتاور	u
سرعت	v
شتاب	$\ddot{x}_m$
ضریب میرایی (چسبندگی)	B
کنترل‌کننده تطبیقی	C
کنترل‌کننده معکوس تطبیقی سیستم فرمانبر	C_s
کنترل‌کننده معکوس تطبیقی در فرایند خارج از خط	$\hat{C}_k$
نسخه کپی‌شده کنترل‌کننده معکوس تطبیقی سیستم فرمانبر	$\hat{C}_{kc}$
کنترل‌کننده افزوده شده سیستم فرمانبر با فیلتر وزنی	C_{sa}
تابع تبدیل سیستم حلقه بسته	G_{cl}
ضریب سختی دینامیک مطلوب سیستم فرمانده	K
بهره غیرخطی	K_{gain}
جرم	M or m
فراجهش چندجمله‌ایی استاندارد بسل	M_p
مدل مرجع سیستم فرمانبر	M_s
سیستم	P

مدل سیستم	$\hat{P}$
تابع تبدیل دینامیک کلی سیستم فرمانده	$P_m(s)$, P_m
مدل سیستم فرمانبر	$\hat{P}_s$
دینامیک سیستم فرمانبر	P_s
مدل کپی‌شده سیستم فرمانبر	$\hat{P}_{kc}$
فیلتر تطبیقی حذف‌کننده اغتشاش	Q
تابع تبدیل ایده‌آل سیستم حلقه بسته بدون دینامیک سیستم فرمانبر	$Q(s)$
زمان نمونه‌برداری	T_s
تابع تبدیل سیستم فرمانده	$V_m(s)$
فیلتر وزنی	W_s
کنترل‌کننده سیستم فرمانبر	K_s
تاخیر زمانی مسیر رفت کانال مخابراتی	τ_1 , d_1
تاخیر زمانی مسیر برگشت کانال مخابراتی	τ_2 , d_2
تاخیر زمانی کلی مسیر رفت و برگشت کانال مخابراتی	τ
تخمینی از تاخیر زمانی کلی مسیر رفت و برگشت کانال مخابراتی	τ_M
خطای تخمین تاخیر زمانی کلی مسیر رفت و برگشت کانال مخابراتی	$\Delta\tau$
فرکانس	ω
زمان نشست نرمالیزه چندجمله‌ایی استاندارد بسل	$\omega_n t_s$
ضخامت لایه مرزی	Φ

فهرست جدول‌ها

عنوان | صفحه

جدول ۳-۱: مقادیر پارامترهای معادلات دینامیکی ربات‌های فرمانده و فرمانبر ۴۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: سیستم حرکت از راه دور ۲
شکل ۱-۲: نمودار بلوکی سیستم حرکت از راه دور ۲
شکل ۲-۱: ساختار کلی یک سیستم حرکتی از راه دور دو طرفه ۱۲
شکل ۲-۲: سیستم حرکت از راه دور دوطرفه ۱۶
شکل ۲-۳: انتقال سیگنال‌ها با تبدیل موج ۱۶
شکل ۲-۴: مدل پتری سیستم حرکت از راه دور ۱۷
شکل ۲-۵: نمایش شبکه‌ای سیستم حرکت از راه دور ۱۸
شکل ۲-۶: نمایش چهار کاناله سیستم حرکت از راه دور ۱۹
شکل ۲-۷: سیستم حرکت از راه دور ۲۰
شکل ۲-۸: نمایس تک‌حلقه سیستم معادل با نمایش شبکه ۲۰
شکل ۲-۹: شبکه دو قطبی ۲۳
شکل ۲-۱۰: سیستم حرکت از راه دور ۲۴
شکل ۲-۱۱: انطباق امپدانس ۲۶
شکل ۲-۱۲: ساختار چهار کاناله ۲۹
شکل ۳-۱: سیستم کنترل پیشنهادی شماره یک ۳۷
شکل ۳-۲: نمایش گرافیکی طراحی مفهومی کنترل‌کننده ربات فرمانبر: الف) نمایش ساده شده سیستم، ب) جابجایی بلوک تاخیر، ج) تشکیل سیستم غیر کمینه‌فاز معادل ۳۸
شکل ۳-۳: مدل دو-قطبی سیستم حرکت از راه دور ۴۲
شکل ۳-۴: نمایش هایبریدی سیستم کنترل پیشنهادی شماره یک ۴۳
شکل ۳-۵: الف) پاسخ ضربه سیستم فرمانبر، ب) پاسخ ضربه معکوس سیستم تاخیریافته، ج) کانولوشن پاسخ ضربه سیستم فرمانبر واقعی و معکوس سیستم تاخیریافته (برای $\Delta_M = 3$) ۴۴
شکل ۳-۶: تعقیب موقعیت در حالت حرکت آزاد: x_m (-)؛ x_{s1} (-.) با تاخیر واحد، x_{s2} (--) با تاخیر برابر با سه، x_{s3} (..) با تاخیر برابر با پنج ۴۵
شکل ۳-۷: تاخیر زمانی کانال مخابراتی: الف) مسیر رفت، ب) مسیر برگشت ۴۶
شکل ۳-۸: تعقیب موقعیت در حالت حرکت آزاد ۴۶
شکل ۳-۹: ساختار ساده شده سیستم کنترل حرکت از راه دور (کنترل امپدانس و معکوس تطبیقی) ۴۹
شکل ۳-۱۰: ساختار سیستم کنترل پیشنهادی شماره دو ۵۰
شکل ۳-۱۱: الف)پاسخ ضربه سیستم واقعی فرمانبر، ب) پاسخ ضربه مدل سیستم فرمانبر، ج) پاسخ ضربه مدل معکوس سیستم فرمانبر، د) کانولوشن پاسخ ضربه سیستم واقعی فرمانبر و مدل معکوس ۵۸

شکل ۳-۱۲: الف) اندازه تابع $|Q(j\omega)|$ برای مقادیر مختلف $M=1$ (-)، $M=2$ (-.) و $M=3$ (--)، ب) x_m (-) و x_s (- .) برای $M=1$، ج) x_m (-) و x_s (- .) برای $M=2$ ، د) x_m (-) و x_s (- .) برای $M=3$ ۵۹
شکل ۳-۱۳: الف) اندازه تابع $|Q(j\omega)|$ با تابع وزنی W_s برای $M=1$ (-)، $M=2$ (-.) و $M=3$ (--)، ب) x_m (-) و x_s (- .) برای $M=1$، ج) x_m (-) و x_s (- .) برای $M=2$ ، د) x_m (-) و x_s (- .) برای $M=3$ ۶۰
شکل ۳-۱۴: x_m (-) و x_s (- .) با فیلتر $W_s=1/(s+1.05)$ ۶۰
شکل ۳-۱۵: پاسخ تابع تبدیل بهینه معیار بسل (--)، x_m (-) و x_s (- .) ۶۱
شکل ۳-۱۶: پاسخ سیستم به سیگنال فرمان متغیر با زمان: معیار بسل (..)، x_m (-.) و x_s (--) ۶۱
شکل ۳-۱۷: کارآیی سیستم کنترل پیشنهادی الف) سرعت، ب) موقعیت، ج) سیگنال کنترل نیرو ۶۲
شکل ۳-۱۸: کارآیی کنترل غیرخطی مود لغزشی الف) سرعت، ب) موقعیت، ج) سیگنال کنترل نیرو ... ۶۲
شکل ۴-۱: پیکربندی سیستم کنترل حرکت از راه دور ۷۰
شکل ۴-۲: نمایش پیکربندی سیستم کنترل حرکت از راه دور به صورت معادل با نمایش استاندارد یک سیستم کنترل فیدبک مقاوم ۷۲
شکل ۴-۳: طرح پیشنهادی برای حذف اغتشاش ۷۸
شکل ۴-۴: پاسخ پله سیستم: تعقیب x_m (-) توسط x_s (--). ۸۰
شکل ۴-۵: پاسخ پالسی سیستم: تعقیب x_m (-) توسط x_s (--). ۸۰
شکل ۴-۶: پاسخ پله سیستم: تعقیب x_m (-) توسط x_s (--). ۸۲
شکل ۵-۱: سیستم حرکت از راه دور یک‌فرمانده - چندفرمانبر ۸۸

فصل ۱

پیشگفتار

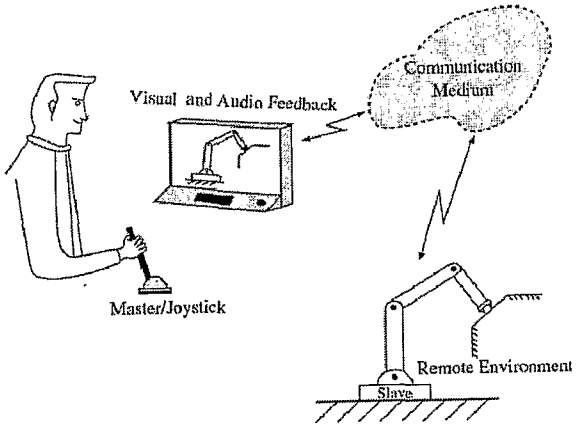
۱-۱- مقدمه

فرآیند کنترل یک وسیله یا یک ماشین از فاصله‌ای دور و از طریق یک محیط واسطه، حرکت از راه دور[1] نامیده می‌شود. سیستم حرکت از راه دور تعمیمی از حواس انسان و توانایی انجام کارها با بازوی مکانیکی در یک موقعیت دور می‌باشد. در پنجاه سال گذشته، پژوهش‌های بسیاری در زمینه سیستم‌های حرکت از راه دور دو طرفه انجام شده و مسائل و مشکلات آنها شناخته و راه‌کارهایی برای غلبه بر این مشکلات ارائه شده است. از اواسط دهه ۴۰ که اولین سیستم حرکت از راه دور فرمانده-فرمانبر توسط گوتس[2] ساخته شد [۱]، تاکنون این حوزه پژوهشی مراحل تکاملی مختلفی را طی نموده است و می‌توان به درک و شناخت صحیح از تعامل انسان و ربات‌ها تا بکارگیری ایده‌های تئوری کنترل در این زمینه اشاره کرد. در این نوشتار، سیستم حرکت از راه دور از دیدگاه مهندسی کنترل بررسی شده و همچنین، پیامدهای استفاده از اینترنت به عنوان محیط واسط مخابراتی در این حوزه که از اواسط دهه ۹۰ آغاز شد و مسائل و موضوعات جدیدی را بدنبال داشت مورد بررسی قرار می‌گیرند.

پیشوند tele ریشه یونانی داشته و به معنای "از راه دور"[3] است. بنابراین، حرکت از راه دور بیانگر انجام عملیات و حرکت از راه دور است. به عبارتی، حرکت از راه دور توانایی انسان برای انجام عملیات، بکارگیری اشیاء و صدور فرمان را از راه دور فراهم کرده و شرایطی مشابه با محیط دور برای اپراتور مهیا می‌کند (شکل ۱-۱). برای این منظور، یک بازوی مشابه در سمت اپراتور بکار گرفته می‌شود تا فرمان‌های حرکتی را برای فرمانبر که وظیفه و کار اصلی را انجام می‌دهد تدارک ببیند. به طور کلی می‌توان گفت که اپراتور، فرمانی را به بازوی فرمانده اعمال می‌کند که بدنبال آن یک جابجایی به سمت فرمانبر انتقال می‌یابد و فرمانبر باید این حرکت را پیروی کند[4]. اگر فرمانبر حسگرهای نیرو داشته باشد، سیگنال‌های نیرو به سمت فرمانده منتقل و بازتاب می‌یابند تا عکس‌العمل ناشی از فرمان فرمانده و وظیفه‌ای که در

---

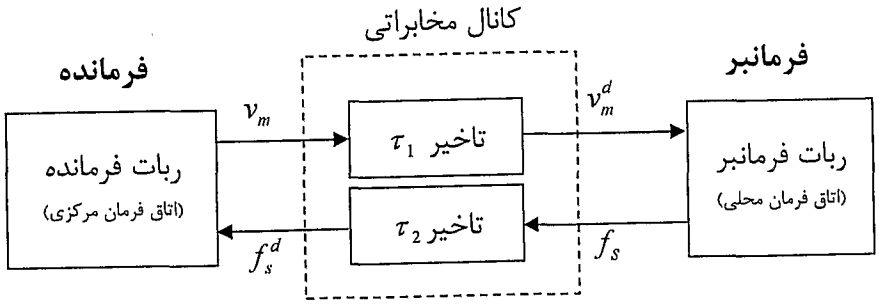
[1] Teleoperation
[2] Goetz
[3] At a distance
[4] Mimic



شکل ۱-۱: سیستم حرکت از راه دور.

حال انجام است به فرمانده بازتاب یابد. اگرچه بازتاب نیرو به اپراتور موجب می‌شود که اپراتور به حواس لامسه و بینایی خود نیز تکیه کند، اما وجود تاخیر در محیط واسط مخابراتی موجب ناپایداری سیستم می‌شود. ناپایداری ناشی از تاخیر در سیستم‌های حرکت از راه دور بازتاب نیرو یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی بوده که پژوهشگران با آن رو برو بوده‌اند.

در حالت کلی یک سیستم استاندارد حرکت از راه دور از سه بخش سیستم فرمانده[1] ، کانال ارتباطی[2] و سیستم فرمانبر[3] تشکیل می‌شود (شکل ۱-۲). در این سیستم اپراتور از طریق یک بازوی مکانیکی در سیستم فرمانده با اعمال یک نیرو فرمان خود را صادر می‌نماید. با اعمال این نیرو، بازوی مکانیکی با



شکل ۱-۲: نمودار بلوکی سیستم حرکت از راه دور.

سرعتی حرکت نموده و این سرعت از طریق کانال ارتباطی به سیستم فرمانبر که شامل یک بازوی مکانیکی است منتقل می‌گردد. بدین ترتیب بازوی مکانیکی فرمانبر به سرعت منتقل شده پاسخ داده و نیرویی در محیط کار تولید می‌نماید. این نیرو مجدداً توسط کانال انتقالی به سیستم فرمانده منتقل می‌شود. بنا به تعریف، وقتی نیروی دریافتی از محیط دور از طریق محرک فرمانده به دست اپراتور منتقل

---

[1] Master
[2] Communication channel
[3] Slave

می‌گردد، به سیستم حرکت از راه دور مربوطه، سیستم دو طرفه[1] یا بازتاب نیرو[2] گفته می‌شود، در غیر این صورت آن را یک سیستم یک طرفه[3] می‌نامند. سیستم حرکت از راه دور دوطرفه توانایی کنترل از راه دور یک تجهیز را فراهم می‌کند به‌گونه‌ایی که اطلاعات نیرو (فیدبک نیرو) در سیستم فرمانبر به فرمانده مخابره شده و به اپراتور احساسی از حضور در محیط دور[4] و در تعامل نزدیک با تجهیز فرمانبر دست بدهد.

نکته مهم در این گونه سیستم‌ها از دیدگاه طراحی کنترل که به صورت یک سیستم حلقه بسته کنترل مکان و سرعت معرفی می‌شوند، وجود تاخیر زمانی (متغیر با زمان) می‌باشد و چون در شبکه اینترنت به عنوان کانال ارتباطی پرکاربرد و در دسترس، زمان تاخیر رفت و برگشت در ارسال سیگنال از مبدا به مقصد با ارسال سیگنال از مقصد به مبدا متفاوت می‌باشد. بنابراین، در سیستم‌های حرکت از راه دور دو طرفه براساس اینترنت، دو زمان تاخیر متغیر با زمان وجود دارد. وجود چنین تاخیرهایی در سیستم، کنترل سیستم را دشوار و کارایی سیستم را کاهش می‌دهد. برای کاهش اثرات تاخیر زمانی در سیستم‌های حرکت از راه دور راه‌کارهای مختلفی ارائه شده است [۱].

از دیدگاه کنترل اهداف اصلی سیستم‌های حرکت از راه دور دو بخش عمده است:

- *پایداری*: پایداری سیستم حلقه بسته باید مستقل از رفتار اپراتور یا محیط دور حفظ شود.
- *حضور در محیط دور*: اپراتور این احساس را داشته باشد هر چند در محیط دور حضور دارد. این ویژگی شفافیت[5] بین محیط دور و اپراتور نیز نامیده می‌شود.

عموماً این دو هدف ناسازگار و متناقض هستند. با این‌حال، برآورده کردن این الزامات توانایی‌های انسان را در کاربردهایی مانند مقیاس کردن توان اعمالی به اجسام سنگین مانند سازه‌های فضایی یا انجام وظایف و کارهای حساس و ظریف مانند جراحی از راه دور افزایش می‌دهد و درنتیجه توانایی و تخصص اپراتور در مکان‌های دور دست قابل بکارگیری است.

پیچیدگی‌های چندگانه‌ای در هنگام بررسی و مطالعه سیستم‌های حرکت از راه دور پدیدار می‌شود، چرا که محیط واسط مخابراتی یکی از عوامل اصلی این پیچیدگی است و مشکلاتی مانند اعوجاج[6]، تاخیرها و تلفات[7] پایداری و کارآیی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این عوامل، انگیزه پژوهش‌های تئوری کنترل در این حوزه در چند دهه گذشته بوده است.

---

[1] Bilateral
[2] Force reflecting
[3] Unilateral
[4] Telepresence
[5] Transparency
[6] Distortion
[7] Losses

۱-۲- تاریخچه‌ای مختصر از تحولات در سیستم‌های حرکت از راه دور

نقطه آغاز سیستم‌های حرکت از راه دور به میانه دهه ۱۹۴۰ بر می‌گردد. زمانی که گوتس اولین سیستم حرکت از راه دور فرمانده-فرمانبر را که به طور مکانیکی کنترل می‌شد، ساخت. طراحی نمونه بهبود یافته آن در ۱۹۵۴توسط همین شخص گزارش شد و یک سیستم سرومکانیسم الکتریکی ارائه کرد، به گونه‌ای که سیستم فرمانده و فرمانبر ارتباط مکانیکی با یکدیگر نداشتند. اوائل دهه ۱۹۶۰ مطالعات و تحقیقات بر روی اثر تاخیر زمانی در این سیستم‌ها متمرکز شد [۱ و ۵۶] و آزمایش‌هایی برای بررسی اثر تاخیر محیط واسط در حالت بازتاب نیرو انجام و کنترل نظارتی برای حل این مشکل ارائه شد. ادامه تحقیقات متوجه طراحی نرم‌افزارهای ویژه‌ی این سیستم‌ها و همچنین ساخت نمایشگرهایی بود تا حجم اطلاعات مبادله شونده بین دو سمت شبکه مخابراتی را کمینه نماید. از میانه دهه ۱۹۸۰، روش‌های نوین نظریه کنترل در طراحی‌ها استفاده شد. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوائل دهه ۱۹۹۰ نظریه شبکه‌ها با نمایش امپدانس مولفه‌های سیستم، نمایش هایبرید سیستم، تئوری پراکندگی و کنترل مبتنی بر پسیویتی نیز مطرح شدند. روش مبتنی بر پسیویتی راه را برای ارائه سیستم‌های پایدار حرکت از راه دور در حضور تاخیر زمانی هموار کرد. پژوهش‌هایی که شفافیت را مورد بررسی قرار دادند در [۲۰-۲۱] ارائه شده‌اند به گونه‌ای که انتقال دوطرفه نیرو و سرعت را الزام می‌کردند. روش‌های H_∞ در میانه دهه ۱۹۹۰ ارائه شدند که با ورود اینترنت به عنوان کانال مخابراتی در این سیستم‌ها همزمان بود [۵۷]. شبکه‌های سوئیچینگ بسته تحلیل‌های تاخیر زمانی موجود را با اشکالاتی اساسی ناشی از رفتار متغیر با زمان و تصادفی تاخیر[1]، مبادله زمان گسسته داده و گم شدن اطلاعات[2] روبرو کرد. در پی آن، نتایج ارائه شده پیشین برای تاخیر زمانی برای شرایط جدید مطابقت داده شدند [۵۸-۶۰].

۱-۲-۱- روش‌های اولیه

۱-۲-۱-۱- آزمایش‌های آغازین

در اوائل دهه ۱۹۶۰ چند آزمایش ساده برای ارزیابی اثر تاخیر زمانی روی کارآیی اپراتورها در سیستم‌های حرکت از راه دور انجام شد [۵۶]. هدف این آزمایش‌ها زمان کل مورد نیاز برای انجام یک وظیفه از پیش تعیین شده بود. اپراتور از یک استراتژی حرکت-و-انتظار[3] استفاده می‌کرد تا از انجام یک وظیفه اطمینان حاصل کند. در چنین روشی اپراتور یک حرکت کنترلی را آغاز می‌کند و سپس منتظر می‌ماند و این سیکل تا تکمیل وظیفه تکرار می‌شود. این آزمایش یک نتیجه‌گیری دوگانه بدنبال داشت:

---

[1] Randomly varying delay
[2] Loss of information
[3] Move-and-wait strategy

اول اینکه زمان انجام کار[1] با تاخیر در حلقه رابطه خطی داشت و دوم اینکه اپراتور در یک چارچوب پایدار کار می‌کرد.

۱-۲-۱-۲- کنترل نظارتی

خطی بودن رابطه زمان انجام کار با تاخیر حلقه کنترل این پیامد را دارد که هر چه تاخیر بزرگتر باشد، زمان انجام کار نیز افزایش می‌یابد. یک راه‌حل پیشنهادی برای برطرف کردن این مشکل، این بود که نوع فرمان‌هایی که اپراتور ارسال می‌کند از ماهیت نظارتی برخوردار باشد [۶۱]. بسته به میزان مشکلی وظیفه و میزان خودکفایی[2] که کنترل‌کننده فرمانبر دارد، نظارت می‌تواند متفاوت باشد. طبیعتاً، در این پیکربندی بازوی فرمانبر از هوش[3] بیشتری برخوردار است تا وظیفه‌های کوچکتر را مستقلاً انجام دهد. روش نظارتی در قالب یک مسأله بهینه‌سازی نیز فرمول‌بندی شد و با روش‌های جستجوگر کارآیی بهنیه وظیفه‌ها بدست می‌آمد. این روش از دینامیک بازوها صرف‌نظر کرده و روی جنبه هندسی استاتیک مسأله تمرکز می‌کرد به گونه‌ای که موقعیت بازو، شیء واقع در محیط دور و موانع احتمالی را در بر می‌گرفت.

۱-۲-۱-۳- سیستم حرکت از راه دور مبتنی بر نرم‌افزار

با پیشرفت در زمینه ریزپردازشگرها در دهه ۱۹۷۰ تا اوائل ۱۹۹۰ تلاش شد که سطح نظارت در سیستم‌ها افزایش یافته و اپراتور فرمان‌های سطح بالا را به بازوی دور صادر نماید. زبان برنامه‌نویسی خاصی همراه با فیدبک نیرو و امکانات فیدبک دیداری[4] برای این منظور تدوین و ارائه شد.

۱-۲-۱-۴- نرم‌افزار مادولار

به منظور ارزیابی رفتار سیستم‌های حرکت از راه دور تحت شرایط مختلف به یک ساختار مادولار نیاز است. در چنین ساختاری، بر هم‌کنش‌ها بین اپراتور و ماشین، وارد کردن فیدبک نیرو و ارتقاء نمایشگرها را می‌توان با تغییرات روی خط در تنظیمات نرم‌افزاری بدست آورد. مرجع [۶۲] در یک ساختار مادولار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری امکانی فراهم آورد تا بتوان مدهای کنترلی را انتخاب و مدلی مجازی را از یک بازوی برای ارزیابی و آزمایش سیستم فراهم کند.

---

[1] Completion time
[2] Autonomy
[3] Intelligence
[4] Visual feedback