



دانشکده : مهندسی برق و رباتیک

گروه : کنترل

ردیابی بهینه‌ی موقعیت سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه

دانشجو : حمید شکری قلعه

استاد راهنما :

دکتر علیرضا الفی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار : بهمن ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده :

گروه :

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم

تحت عنوان:

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.
مورد ارزیابی و

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به:

کسانی که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت
خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگی،
مدیون حضور سبز آنهاست،

تقدیم به پدر، مادر و خواهر عزیزم.

تشکر و قدردانی:

سپاس پروردگاری که تنها او را می‌پرستیم و تنها از او یاری می‌جوییم. اکنون که به لطف پروردگار این پایان‌نامه سامان یافته برخود لازم می‌دارم از زحمات استاد محترم و گرانقدر جناب آقای **دکتر علیرضا الفی** که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمایی‌های بسیار سودمند و ارزنده خود و همچنین دقت نظر و صبر و بردباری خود مرا در به ثمر رساندن این اثر ارزشمند یاری نمودند نهایت تشکر و قدردانی را به جا بیاورم. و همچنین از دوستانی که در طول انجام پایان‌نامه هر یک به نحوی مرا یاری نمودند، قدردانی می‌کنم. و در نهایت از کلیه اساتید زحمتکش دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود که افتخار شاگردی ایشان را داشتیم، تشکر می‌کنم.

با احترام فراوان

حمید شکری قلعه

تعهد نامه

اینجانب حمید شکری قلعه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ردیابی بهینه‌ی موقعیت سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه تحت راهنمایی دکتر علیرضا الفی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

در این پایان‌نامه، ردیابی موقعیت سامانه‌های کارکرد از راه دور دوطرفه مطالعه می‌شود. این تحقیق در دو بخش تنظیم می‌شود. در ابتدا سامانه‌هایی با تأخیر ثابت در کانال ارتباطی در نظر گرفته می‌شود. برای این سامانه ساختار کنترلی معرفی می‌گردد که ضمن تضمین پایداری سیستم حلقه- بسته و ردیابی موقعیت در حضور نامعینی در مدل سیستم، برای حصول به ردیابی موقعیت بهینه، ضرایب بهینه برای کنترل‌کننده با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید بدست می‌آید. در بخش دوم نوع دیگری از این سامانه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد که تأخیر موجود در کانال ارتباطی دارای جمله متغیر با زمان است. در این بخش ابتدا، سامانه‌ای معرفی می‌شود که شرایط حدی پایداری به علت وجود این جمله در آن رعایت نشده و لذا سیستم ناپایدار است. برای حل این مساله، با استفاده از تبدیل موجک و مزیت آن در حذف نویز، با در نظر گرفتن ترم متغیر با زمان به صورت نویزی در تأخیر موجود در کانال ارتباطی، شرایط پایداری سیستم فراهم می‌شود. در ادامه با استفاده از روش کنترل یادگیر تکرارشونده ساختاری برای این سامانه ارائه می‌شود که علاوه بر تضمین پایداری سیستم و صفر شدن خطای ردیابی با افزایش تکرارها، با استفاده از سیگنال کنترلی سامانه پایدار شده توسط تبدیل موجک به عنوان سیگنال کنترل اولیه آن، ردیابی موقعیت با افزایش تکرارها به طور مطلوبتری نسبت به قبل محقق خواهد شد.

کلمات کلیدی: سامانه کارکرد از راه دور دوطرفه، همزمان‌سازی، کنترل تطبیقی، الگوریتم‌های

هوشمند، تبدیل موجک، کنترل یادگیر تکرارشونده

فهرست مطالب

فصل ۱	۱
مقدمه	۱
۱-۱ تاریخچه	۲
۲-۱ تعریف سامانه‌های کارکرد از راه دور	۲
۳-۱ کاربرد سامانه‌های کارکرد از راه دور	۴
۱-۳-۱ کار با مواد خطرناک شیمیایی و رادیواکتیو	۴
۲-۳-۱ کاوشگرهای زیردریایی	۴
۳-۳-۱ جراحی از راه دور	۵
۴-۳-۱ رباتهای متحرک	۵
۵-۳-۱ کنترل ربات‌های فضایی از زمین	۵
فصل ۲	۷
مروری بر فعالیت‌های گذشته	۷
۱-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر نظریه پراکندگی، غیرفعالی و متغیرهای موج	۸
۲-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل مقاوم	۱۲
۳-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل تطبیقی	۱۳
۴-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل حالت لغزشی (SMC)	۱۵
فصل ۳	۱۷
ساختار پیشنهادی برای سامانه‌های کارکرد از راه دور در حضور زمان تأخیر ثابت	۱۷
۱-۳ مقدمات	۱۸
۱-۱-۳ مدل دینامیکی سامانه‌های کارکرد از راه دور	۱۸
۲-۱-۳ فرضیات کلی	۱۹
۳-۱-۳ تعریف همزمان‌سازی در سامانه‌های کارکرد از راه دور	۱۹
۴-۱-۳ طراحی کنترل‌کننده	۱۹
۲-۳ بهینه‌سازی با الگوریتم‌های هوشمند	۲۳
۱-۲-۳ الگوریتم ژنتیک (GA)	۲۴
۲-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان (PSO)	۲۴
۳-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)	۲۵
۴-۲-۳ الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)	۲۶

۲۷	۵-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری (IC)
۲۸	۶-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی کوکو (CO)
۳۱	۷-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی کوکوی بهبود یافته (ICO)
۳۲	۸-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی کوکوی تطبیقی (ACO)
۳۴	۳-۳ شبیه‌سازی
۳۵	۱-۳-۳ حرکت در فضای آزاد
۳۹	۲-۳-۳ حرکت تماسی
۴۵	فصل ۴
۴۵	ساختار پیشنهادی برای سامانه‌های کارکرد از راه دور در حضور زمان تأخیر متغیر با زمان
۴۶	۱-۴ مقدمات
۴۶	۱-۱-۴ مدل دینامیکی سامانه کارکرد از راه دور
۴۷	۲-۱-۴ فرضیات کلی
۴۷	۳-۱-۴ ساختار کنترلی
۴۹	۲-۴ مروری بر تبدیل موجک
۴۹	۱-۲-۴ تاریخچه و آشنایی
۵۰	۲-۲-۴ کاربرد تبدیل موجک در حذف نویز
۵۲	۳-۴ مروری بر کنترل یادگیر تکرارشونده
۵۴	۴-۴ ساختارهای کنترلی پیشنهادی
۵۸	۵-۴ شبیه‌سازی
۶۰	۱-۵-۴ ساختار پیشنهادی برای کنترل‌کننده شبه تناسبی
۶۷	۲-۵-۴ ساختار پیشنهادی برای کنترل‌کننده شبه تناسبی - مشتقگیر
۷۵	فصل ۵
۷۵	نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۶	۱-۵ نتیجه‌گیری
۷۶	۲-۵ پیشنهادات
۷۹	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) نمای کلی از یک سیستم کارکرد از راه دور دوطرفه [۳]..... ۳
- شکل (۲-۱) ساختار حلقه ای سیستم کارکرد از راه دور دوطرفه..... ۴
- شکل (۱-۲) ساختار تطبیق امپدانس..... ۹
- شکل (۲-۲) بلوک دیاگرام مساله H_{∞} استاندارد..... ۱۲
- شکل (۱-۳) محدوده و روش تخم‌گذاری هر کوکو..... ۲۹
- شکل (۲-۳) نحوه حرکت کوکوها به سمت نقطه هدف..... ۳۰
- شکل (۳-۳) مقایسه نمودار همگرایی مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم..... ۳۷
- شکل (۴-۳) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_p به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف..... ۳۷
- شکل (۵-۳) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_d به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف..... ۳۸
- شکل (۶-۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر (حرکت در فضای آزاد)..... ۳۸
- شکل (۷-۳) همگرایی پارامترهای ربات‌های فرمانده و فرمانبر به مقادیر واقعی (حرکت در فضای آزاد)..... ۳۹
- شکل (۸-۳) مقایسه نمودار همگرایی مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم..... ۴۱
- شکل (۹-۳) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_p به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف (حرکت تماسی)..... ۴۱
- شکل (۱۰-۳) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_d به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف..... ۴۲
- شکل (۱۱-۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر (حرکت تماسی)..... ۴۲
- شکل (۱۲-۳) ردیابی نیروی ربات‌های فرمانده و فرمانبر (حرکت تماسی)..... ۴۳
- شکل (۱۳-۳) همگرایی پارامترهای ربات‌های فرمانده و فرمانبر به مقادیر واقعی (حرکت تماسی)..... ۴۳
- شکل (۱-۴) ساختار کنترلی شبه تناسبی..... ۴۸
- شکل (۲-۴) ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر..... ۴۹
- شکل (۳-۴) یک حلقه کنترلی ساده..... ۵۲
- شکل (۴-۴) یک حلقه کنترلی یادگیر تکرارشونده ساده..... ۵۲
- شکل (۵-۴) طرح قانون کنترل یادگیرنده برای سیستم..... ۵۳
- شکل (۶-۴) سیگنال سینوسی تولیدی توسط فرمانده بدون تأخیر زمانی (سیگنال اصلی)..... ۵۴

- شکل (۷-۴) سیگنال سینوسی فرستاده شده از فرمانده به فرمانبر دارای تاخیر زمانی ثابت $T_1(t)=0.5$ ۵۴
- شکل (۸-۴) سیگنال سینوسی فرستاده شده از فرمانده به فرمانبر دارای تاخیر متغیر با زمان $T_2(t)=0.5+0.02\sin(100t)$ ۵۵
- شکل (۹-۴) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی ۵۶
- شکل (۱۰-۴) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی - مشتقگیر با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی ۵۶
- شکل (۱۱-۴) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی و اعمال قانون کنترلی یادگیر تکرارشونده ۵۸
- شکل (۱۲-۴) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی - مشتقگیر با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی و اعمال قانون کنترلی یادگیر تکرارشونده ۵۸
- شکل (۱۳-۴) نیروی اعمال عملگر ۶۰
- شکل (۱۴-۴) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱-۴)) ۶۱
- شکل (۱۵-۴) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱-۴)) ۶۱
- شکل (۱۶-۴) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۹-۴)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترل اولیه) ۶۳
- شکل (۱۷-۴) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۹-۴)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترل اولیه) ۶۳
- شکل (۱۸-۴) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱۱-۴)) ۶۴
- شکل (۱۹-۴) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱۱-۴)) ۶۴
- شکل (۲۰-۴) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱۱-۴)) ۶۵
- شکل (۲۱-۴) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱۱-۴)) ۶۵
- شکل (۲۲-۴) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور افقی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱۱-۴)) ۶۶

شکل (۴-۲۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور عمودی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱)).... ۶۶

شکل (۴-۲۴) ردیابی گشتاورهای محیط و عملگر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در کنترل کننده شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))..... ۶۷

شکل (۴-۲۵) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی- مشتقگیر (شکل (۴-۲))..... ۶۸

شکل (۴-۲۶) سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی- مشتقگیر (شکل (۴-۲))..... ۶۸

شکل (۴-۲۷) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی- مشتقگیر (شکل (۴-۱۰)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترل اولیه)..... ۶۹

شکل (۴-۲۸) سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۰)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترل اولیه) .. ۶۹

شکل (۴-۲۹) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲)) ۷۰

شکل (۴-۳۰) سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۲)) ۷۱

شکل (۴-۳۱) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲)) ۷۱

شکل (۴-۳۲) سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۲)) ۷۲

شکل (۴-۳۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور افقی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲)) ۷۲

شکل (۴-۳۵) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور عمودی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲)) ۷۳

شکل (۴-۳۶) ردیابی گشتاورهای محیط و عملگر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲)) ۷۳

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۳) مقایسه نتایج مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم ۳۵
- جدول (۲-۳) مقایسه نتایج مربوط به K_p در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم ۳۶
- جدول (۳-۳) مقایسه نتایج مربوط به K_d در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم ۳۶
- جدول (۴-۳) مقایسه نتایج مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم ۴۰
- جدول (۵-۳) مقایسه نتایج مربوط به K_p در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم ۴۰
- جدول (۶-۳) مقایسه نتایج مربوط به K_d در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم ۴۰
- جدول (۱-۴) خانواده های حذف نویز در تبدیل موجک ۵۱

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ تاریخچه

هدف سامانه‌های کارکرد از راه دور^۱ افزایش قابلیت اجرای فرامین و کارایی انسان در یک محیط دور، غیر قابل دسترس یا خطرناک می‌باشد [۱]. نقطه آغاز ایجاد سامانه‌های کارکرد از دور، به واسطه دهه ۱۹۴۰ برمی‌گردد. زمانی که گوتس اولین سامانه کارکرد از دور را که به طور مکانیکی کنترل می‌شد، ساخت. طراحی نمونه بهبود یافته آن در سال ۱۹۵۴ توسط همین شخص گزارش شد و یک سیستم الکترومکانیکی ارائه کرد، به گونه ای که رباتهای فرمانده و فرمانبر، ارتباط مکانیکی با یکدیگر نداشتند. اوائل دهه ۱۹۶۰ تحقیقات بر روی اثر تأخیر زمانی در این سامانه‌ها متمرکز شد و آزمایشهایی برای بررسی اثر تأخیر محیط واسطه، انجام و کنترل نظارتی برای حل این مشکل ارائه شد. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ کنترل مبتنی بر غیر فعال بودن^۲، تئوری پراکندگی^۳ و متغیرهای موج^۴ به منظور کاهش اثرات تأخیر زمانی در این سامانه‌ها مطرح شدند و از آن زمان به بعد مسئله مدل‌سازی و کنترل تأخیر و به خصوص تأخیر متغیر با زمان برای آنها به طور جدی دنبال شد [۲ و ۳]. برای کنترل این سامانه‌ها، روش‌های کنترلی متفاوتی در نظر گرفته شده که اختلاف اصلی آنها در نوع اطلاعات مبادله شده بین دو سایت محلی و سایت دور است. از جمله آنها می‌توان کنترل کننده فازی- تطبیقی [۴]، کنترل کننده بر مبنای H_∞ و H_2 [۵ و ۶]، کنترل کننده حالت لغزشی [۷]، کنترل کننده تناسبی- مشتقگیر [۸] و ... را نام برد.

۱-۲ تعریف سامانه‌های کارکرد از راه دور

پیشوند tele که به عنوان پیشوند اصلی در این بحث است دارای منشا یونانی بوده و به معنی "در یک فاصله مشخص" می‌باشد و teleoperation به معنی کارکرد در فاصله مشخص است. سیستم کارکرد از راه دور، سیستمی الکترومکانیکی می‌باشد که از سه بخش کلی سایت محلی، سایت دور و کانال ارتباطی تشکیل شده است. در سایت محلی، عملگر انسانی^۵ و سیستم فرمانده^۶ قرار می‌گیرند و در سایت دور سیستم فرمانبر^۷ و محیط عملیاتی^۸ قرار دارند. کانال ارتباطی وظیفه انتقال اطلاعات بین سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر را به عهده دارد. به مجموع سیستم فرمانده، سیستم فرمانبر و کانال ارتباطی، عملگر از راه دور^۹ می‌گویند. سیستم فرمانده مستقیماً توسط عملگر انسانی فرمان داده می‌شود در حالی که سیستم فرمانبر که در سایت دور قرار گرفته است، آماده برای اجرای فرامین ارسالی از طرف عملگر انسانی است که توسط سیستم فرمانده و از طریق کانال ارتباطی به آن می‌رسد.

^۱Teleoperation System

^۲Passivity

^۳Scattering

^۴Wave Variable

^۵Human Operator

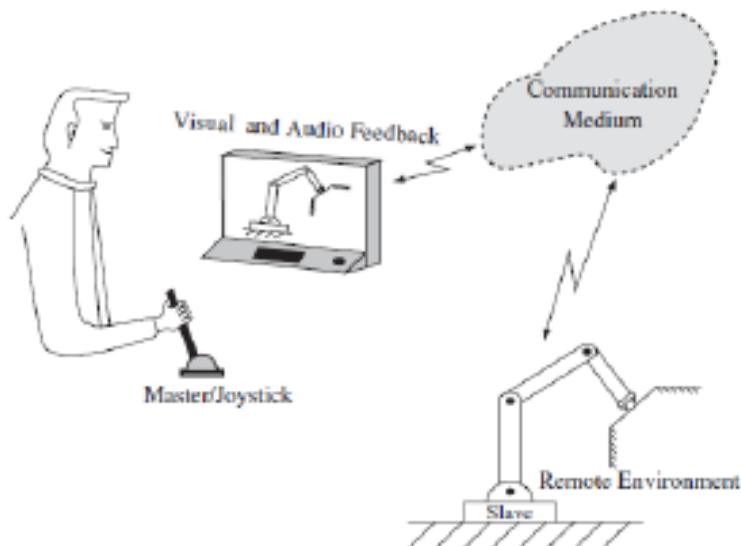
^۶Master System

^۷Slave System

^۸Task Environment

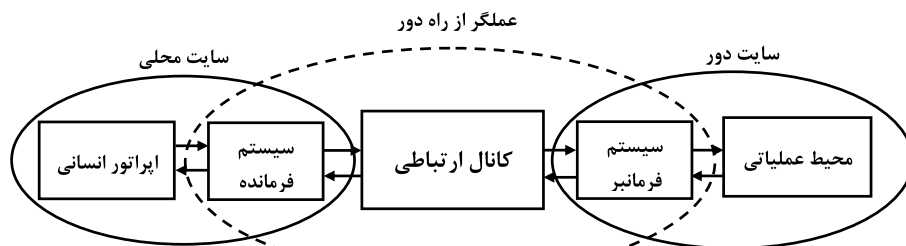
^۹Teleoperator

کانال ارتباطی، مهمترین جزء در سیستم‌های حرکتی از راه دور می‌باشد. در یک سیستم کارکرد از راه دور با توجه به فاصله بین سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر، کانال ارتباطی به دو نوع مکانیکی و الکتریکی تقسیم‌بندی می‌شود. اگر فاصله بین سیستم فرمانده و فرمانبر کم باشد، کانال ارتباطی از نوع مکانیکی بوده و اطلاعات از طریق بازوی مکانیکی منتقل می‌شوند. چنانچه فاصله بین سیستم فرمانده و فرمانبر زیاد باشد، کانال ارتباطی از نوع الکتریکی بوده و اطلاعات به صورت الکتریکی منتقل می‌شوند که با توجه به پیشرفت علم ارتباطات، امروزه از اینترنت به عنوان کانال ارتباطی برای ارسال اطلاعات در سیستم‌های کارکرد از راه دور استفاده می‌شود. با توجه به ارسال سیگنال از طرف سیستم فرمانده به سیستم فرمانبر و بالعکس، سیستم‌های کارکرد از راه دور یک‌طرفه^۱ و دوطرفه^۲ تعریف می‌گردد. در سیستم‌های کارکرد از راه دور یک‌طرفه سیگنال‌های اطلاعات (رفت) مورد نیاز فقط از سیستم فرمانده به سیستم فرمانبر ارسال می‌شود. در صورتی که در سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه علاوه بر ارسال سیگنال اطلاعات رفت از سیستم فرمانده به سیستم فرمانبر، ارسال سیگنال اطلاعات برگشتی از سیستم فرمانبر به سیستم فرمانده نیز وجود دارد. به عبارتی دیگر، در یک سیستم کارکرد از راه دور دوطرفه، سیگنال‌های اطلاعات مورد نیاز از طریق یک حلقه پسخورد به سایت محلی ارسال می‌شود. شکل (۱-۱) نمای کلی از یک سیستم کارکرد از راه دور دوطرفه و شکل (۲-۱) ساختار حلقه ای این سامانه‌ها را نشان می‌دهد. به طور کلی سیستم‌های کارکرد از راه دور دو هدف اصلی دارند: پایداری سیستم حلقه - بسته ناشی از تأخیر زمانی در کانال ارتباطی است که امروزه با پیشرفت تکنولوژی از اینترنت به عنوان کانال ارتباطی استفاده می‌شود، و ردیابی سیستم فرمانبراز سیستم فرمانده با کمترین خطا، بدین معنی که عملگر انتظار دارد فرمان مورد نظرش پس از اعمال به سیستم فرمانده با کمترین خطا توسط سیستم فرمانبر اجرا شود.



شکل (۱-۱) نمای کلی از یک سیستم کارکرد از راه دور دوطرفه [۳]

^۱Unilateral Teleoperation
^۲Bilateral Teleoperation



شکل (۱-۲) ساختار حلقه ای سیستم کارکرد از راه دور دوطرفه

عیب عمده سیستم‌های کارکرد از راه دور مبتنی بر اینترنت وجود تأخیر متغیر با زمان در کانال ارتباطی است، که در عمل، این تأخیر زمانی متغیر می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله فاصله بین سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر و تعداد کابرن باشد. بنابراین، در سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه، هنگام انتقال اطلاعات از سیستم فرمانده به سیستم فرمانبر و بالعکس همواره یک تأخیر زمانی در ارسال اطلاعات رخ خواهد داد که این زمان تأخیر در کانال ارتباطی به خصوص زمانی که فاصله بین سیستم فرمانده و فرمانبر زیاد باشد، غیرقابل صرف‌نظر کردن است. این زمان تأخیر بین فرمانده و فرمانبر علاوه بر اینکه می‌تواند موجب ناپایداری در این سامانه‌ها شود مساله ردیابی بازوی سیستم فرمانبر از بازوی سیستم فرمانده با کمترین خطا را کاهش می‌دهد و کنترل سیستم کارکرد از راه دور دوطرفه را به واسطه متغیر بودن زمان تأخیر در کانال ارتباطی بین سایت محلی و سایت دور مشکل می‌سازد [۳].

۱-۳ کاربرد سامانه‌های کارکرد از راه دور

طی دهه‌های اخیر سامانه‌های کارکرد از راه دور دوطرفه در بسیاری از زمینه‌ها به کار رفته و تاکنون پیشرفت چشمگیری داشته است. برای مثال، می‌توان به کار با مواد خطرناک شیمیایی و رادیواکتیو [۹-۱۱]. هدایت و کنترل کاوشگرهای زیردریایی بدون خدمه^۱ [۱۲-۱۴]. جراحی از راه دور [۱۵-۱۹]، مانور رباتهای متحرک^۲ [۲۰ و ۲۱] و کنترل ربات‌های فضایی از زمین [۲۲] اشاره کرد.

۱-۳-۱ کار با مواد خطرناک شیمیایی و رادیواکتیو

اولین کاربرد سامانه کارکرد از دور، کار با مواد هسته ای بود [۹]. مفاهیمی مانند مقیاس کردن حرکت، فیدبک دیداری، قیود ناشی از محیط کار و فیدبک نیرو که در حوزه سامانه‌های کارکرد از دور مطرح می‌شوند، دقیقاً در چنین کاربردی باید مورد توجه قرار گیرند [۱۰]، همچنین استفاده از سامانه کارکرد از دور در آشکارسازی نشت مواد رادیواکتیو نیز در [۱۱] گزارش شده است.

۱-۳-۲ کاوشگرهای زیردریایی

در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ یکی از مهمترین کاربردهای کارکرد از دور در کاوشگرهای زیر دریایی بدون خدمه برای کاوشهای علمی با کاربردهای نظامی بود. در این کاربردها از کنترل نظارتی

^۱Unmanned underwater vehicles

^۲Mobile robots

استفاده می شد [۱۳]. یکی از گزارشهای اولیه در کنترل کاوشگرهای زیردریایی در سال ۱۹۷۳ ارائه شد که در آن از کنترل فیدبک نیرو استفاده شده بود [۱۴].

۱-۳-۳ جراحی از راه دور^۱

کارکرد از دور در کاربردهای پزشکی مانند جراحی از راه دور جاذبه های بسیاری یافته است. جراحی از راه دور امکان تبادل نظریات تخصصی پزشکی در سراسر دنیا را، بدون نیاز به مسافرت پزشکان فراهم می کند، به طوری که با صرفه جویی در زمان، هزینه و گرفتاری های دیگر، اتاق جراحی در محیطی دوردست در مجاورت انگلستان جراح قرار میگیرد. مراجع [۱۵-۱۹] نمونه هایی از این کاربردها را بیان می کنند.

۱-۳-۴ رباتهای متحرک

یکی از حوزه های نوین در کاربردهای کارکرد از دور، رباتهای متحرک است [۱۳ و ۱۴]. هنگامی که این رباتها در حال حرکت هستند، فیدبکهای دیداری به کاربر ارسال می شود و کاربر میتواند با ارزیابی محیط اطراف ربات، فرمانهای لازم را صادر کند. با این حال، برای ارسال زمان حقیقی داده های دیداری به پهنای باند بالایی نیاز است و این در حالی است که دوربین ربات زاویه دید محدودی دارد. در نتیجه ضروری است که سیگنال فیدبک دیگری (فیدبک نیرو) به کاربر ارسال شود تا حسی واقعی از حضور در محیط دور را داشته باشد.

۱-۳-۵ کنترل رباتهای فضایی از زمین

برای کاوشهای فضایی و عملیات در ایستگاههای فضایی استفاده از فن آوری کارکرد از دور ضروری است. چرا که هزینه های ساخت، تعمیر و نگهداری در فضا را کاهش داده و از خطرات تهدید کننده ی فضانوردان می کاهد. در سال ۱۹۹۳ آژانس فضایی آلمان اولین ربات دور برد به نام روتکس را روی شاتل فضایی ناسا آزمایش کرد. این آزمایش دو چیز را نشان داد، اول توانایی کامپیوتر در کنترل ربات دور برد در فضا و دوم اینکه وجود تاخیر در این سامانه ها امری اجتناب ناپذیر است [۲۲]. در آزمایشی که با استفاده از محیط مجازی و نمایشگر روی بازوی یک ربات با ۶ درجه آزادی، نصب شده روی ماهواره ETS-VII انجام شد، تأخیری در حدود ۷ ثانیه گزارش شد [۲۳].

^۱Telesurgery

فصل ۲

مروری بر فعالیت‌های گذشته

بسیاری از محققان روش های کنترلی متنوعی را برای کنترل این سامانه ها کار گرفته اند. اکثر کارهایی که تا به حال انجام شده و کنترل کننده هایی که برای سامانه های کارکرد از راه دور طراحی شده اند بیشتر به مصالحه بین دو هدف پایداری و ردیابی موقعیت مطلوب پرداخته اند. این فصل، به طور خلاصه به مروری بر راه حل ها وساختارهایی که تاکنون برای تحقق این اهداف ارائه شده است، می پردازد.

۲-۱ روش های کنترلی مبتنی بر نظریه پراکندگی، غیرفعال و

متغیرهای موج

قبل از سال ۱۹۸۸، مشکل ناپایداری در سامانه های کارکرد از دور، ناشی از تأخیر زمانی به عنوان مانع اصلی برای پیشرفت بیشتر در این زمینه مطرح بود. اولین تحقیق انجام شده در زمینه تأخیر زمانی موجود در سامانه های کارکرد از دور در [۲۴] یافت می شود. نویسندگان این مقاله، به صورت نظری به مسئله تأخیر نگاه کرده، و با تبدیل مسئله کارکرد از دور به مسئله خط انتقال، راه حلی برای مشکل تأخیر ارائه کردند و متغیرهای پراکندگی را که در نظریه خط انتقال استفاده می شد، پیشنهاد کردند.

کنترل کننده ای که اندرسن^۱ و اسپانگ^۲ [۲۴] براساس نظریه غیرفعال و نظریه پراکندگی برای این سامانه ها طراحی کردند تضمین می کند که کانال ارتباطی مستقل از زمان تاخیر غیرفعال باقی بماند. ولی عملکرد روش پیشنهادی مزبور با افزایش زمان تأخیر در کانال ارتباطی کاهش می یابد. با گسترش مفهوم غیرفعال و نظریه پراکندگی، در ادامه کار اندرسن و اسپانگ [۲۴]، روش متغیر موج توسط نایمیر^۳ و اسلاتین^۴ [۲۷]، به منظور بررسی پایداری سیستم های حرکتی از راه دور با زمان های تأخیر نامشخص ولی ثابت پیشنهاد شد. در این روش با استفاده از تبدیل موج، متغیرهای توانی به متغیرهای موج تبدیل می شوند. آنچه در کاربرد متغیرهای موج برای سیستم های حرکتی از راه دور حائز اهمیت است یکی افزایش خطای ردیابی و زمان پاسخ سیستم با افزایش زمان تاخیر در کانال ارتباطی و دیگری عدم تطابق بین امپدانس کانال ارتباطی و امپدانس سیستم است که این امر در محل های اتصال یا ترمینال های خط انتقال رخ داده و سبب نوسان در پاسخ سیستم می گردد. این عیب با تطبیق دادن امپدانس موج با امپدانس محیط عملیاتی رفع می گردد که به روش تطبیق امپدانس^۵ معروف است. بدین منظور، مطابق شکل (۲-۲) در ترمینال سیستم فرمانده از ادیتمانس $\frac{1}{B}$ و در ترمینال سیستم فرمانبر از امپدانس B استفاده می شود.

^۱Anderson

^۲Sponge

^۳Niemeyer

^۴Slotine

^۵Impedance Adaption

در کانال ارتباطی، کمتر تنزل یابد. در این روش، از تخمین زمانی استفاده شده که این امر سبب پیچیدگی روش مطرح شده می‌گردد. در روش ارائه شده، خطای شکل موج اندازه‌گیری شده محاسبه شده و سپس توسط بهره فیدبک به شکل موج جاری پسخورد می‌گردد. در [۳۲]، یوکوکوهجی و همکاران روش مانیتورینگ انرژی را به منظور تضمین غیرفعالی برای زمان‌های تاخیر متغیر در کانال ارتباطی معرفی کردند. در سال ۲۰۰۰، لی^۱ و همکارش [۳۳]، روشی را با استفاده از ذخیره انرژی مجازی به منظور تضمین غیرفعالی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه ارائه کردند.

در [۳۴]، مُنیر^۲ و بوک^۳ با ترکیب فیلتر کالمن و پیش‌بینی‌کننده اسمیث، عملکرد سیستم‌های حرکتی از راه دور مبتنی بر روش کنترلی متغیرهای موج در حضور زمان تاخیر متغیر را بهبود دادند. در این روش، از یک تنظیم‌کننده انرژی^۴ نیز به منظور تضمین شرط غیرفعالی بلوک پیش‌بینی‌کننده استفاده گردیده است. در واقع، تنظیم‌کننده انرژی نوعی فیلتر است که از افزایش انرژی برگشتی جلوگیری می‌کند. روش مطرح شده به دلیل وجود تاخیر متغیر در کانال ارتباطی دارای خطای ردیابی موقعیت می‌باشد. در [۳۵]، مُنیر و بوک در ادامه کار خود و به منظور رفع خطای ردیابی موقعیت به دلیل تاخیر متغیر در کانال ارتباطی، روشی جدید ارائه کردند. در این روش، از جمله‌ای در موج سمت راست به منظور صفر کردن خطای حالت ماندگار ردیابی موقعیت استفاده شده است. در این روش نمی‌توان از فیلتر بازسازی که نایمیر و اسلاتین [۲۹] پیشنهاد کرده بودند (به واسطه ماهیت غیرخطی آن) استفاده کرد. همچنین در این روش، زمان تاخیر رفت و برگشت در کانال ارتباطی یکسان فرض شده است. در [۳۶]، لی و همکارش در ادامه کار خود، به ارائه روشی برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور غیرخطی پرداختند.

در [۳۷]، لیرافان^۵ و منی‌وارن^۶ یک کنترل‌کننده تطبیقی بر مبنای نظریه غیرفعالی پیشنهاد کردند که این کنترل‌کننده قادر به سازگار نمودن مشخصه امیدانس با زمان به منظور تطبیق امیدانس موج با امیدانس محیط عملیاتی می‌باشد. مزیت این روش این است که می‌توان از دو مقدار متفاوت جهت تطبیق امیدانس با در نظر گرفتن این واقعیت که زمان تاخیر در کانال ارتباطی رفت با کانال ارتباطی برگشت برابر نباشد، استفاده کرد.

در [۳۸]، میرفرخایی و پناهنده به ادامه کار یوکوکوهجی و همکاران [۳۱] پرداختند. اگرچه یوکوکوهجی و همکاران به اهمیت بهره فیدبک و این که مقدار بهره فیدبک باید به صورتی انتخاب شود که عملکرد سیستم مناسب بوده و نسبت به اغتشاش مقاوم باشد اشاره کرده بودند ولی روشی را برای تعیین و تنظیم بهره فیدبک ارائه نکرده‌اند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که مقدار بهره فیدبک باید به گونه‌ای باشد که کمترین تغییر در خطای ردیابی با تغییر در دامنه تاخیر زمانی ایجاد شود. به بیانی دیگر، خطای ردیابی سرعت (نیرو) با انتخاب مناسب بهره فیدبک مینیمم گردد. آنها در روش پیشنهادی

^۱Lee

^۲Munir

^۳Book

^۴Regulator

^۵Leeraphan

^۶Maneewarn

خود از روش «مدل خودبرگشتی»^۱ به منظور پیش‌بینی زمان تاخیر در کانال ارتباطی استفاده کرده‌اند. در این روش، به منظور تعیین تعداد ضرایب پیش‌بینی‌کننده، مقدار زمان تاخیر در کانال ارتباطی برای ۶ زمان ۴ ساعته در طول یک شبانه‌روز اندازه‌گیری و این کار به مدت دو هفته تکرار شد. در [۳۹]، گنج‌فر و همکاران روشی را با ترکیب پیش‌بینی‌کننده اسمیث و متغیرهای موج به منظور بالا بردن کارایی سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه با تاخیر زمانی بزرگ و متغیر با زمان در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در این روش، علاوه بر نگاهت سیگنال‌ها به روش متغیرهای موج، این سیگنال‌ها قبل از تاخیر موجود در کانال ارتباطی، توسط پیش‌بینی‌کننده اسمیث تخمین زده می‌شوند.

در [۴۳]، الیز^۲ و همکاران روش متغیرهای موج را برای سیستم‌های کارکرد از راه دور با چند درجه آزادی در حضور زمان تاخیر پیشنهاد کردند. در این روش، مدل مورد استفاده، خطی و زمان تاخیر در کانال ارتباطی ثابت فرض شده است. در [۴۴]، الیز و همکاران تحقیقاتشان را به صورت عملی نیز نشان دادند. در [۴۵]، هو^۳ و همکاران روش کنترلی جدیدی را برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه بر مبنای قضیه غیرفعالی ارائه کردند که در آن نیازی به دانستن مدل محیط عملیاتی و سیستم فرمانده و فرمانبر نمی‌باشد. این روش، پایداری سیستم را برای هر زمان تاخیر ثابت نامعین در کانال ارتباطی تضمین می‌کند. در [۴۶]، کیم^۴ و همکاران روش جدیدی را برای پایداری سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه با تلفیق متغیرهای موج و قضیه غیرفعالی در حضور زمان‌های تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در [۴۷]، لیو و همکاران از پیش‌بینی متغیرهای موج به منظور مقابله با آثار تخریبی زمان تاخیر در کانال ارتباطی بر روی عملکرد سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه استفاده کردند. در [۴۸]، کریو^۵ و همکاران روش تطبیق امیدانس و کنترل‌کننده شبه‌خطی مینیمال را به منظور دستیابی همزمان به ردیابی موقعیت و پایداری سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در [۴۹]، تانر^۶ و نایمیر روش متغیرهای موج را با استفاده از فیدبک شتاب فرکانس بالا بهبود دادند. در [۵۰]، بوخنیفر^۷ و فریرا کنترل‌کننده بر مبنای متغیرهای موج برای سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه کوچک^۸ پیشنهاد کردند. در این روش، از قضیه غیرفعالی به منظور دستیابی به پایداری و تطابق استفاده شده است. در [۵۲]، پولوشین^۹ و همکاران الگوریتم جدیدی برای سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه به منظور بهبود تطابق با استفاده از روش بازتاب نیرو پیشنهاد کردند. این روش پایداری، سیستم کارکرد از راه دور را در حضور زمان‌های تاخیر متغیر در کانال ارتباطی تضمین می‌کند.

^۱Autoregressive Model

^۲Alise

^۳Hou

^۴Kim

^۵Keerio

^۶Tanner

^۷Boukhniifer

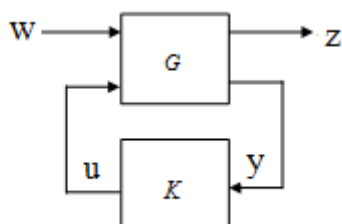
^۸Micro-Teleoperation System

^۹Polushin

۲-۲ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل مقاوم

مبنای طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم، نظریه بهینه‌سازی H_∞ به فرم استاندارد آن شکل (۳-۲) می‌باشد.

در شکل (۳-۲)، G و K به ترتیب نشان‌دهنده سیستم و کنترل‌کننده، بردار W نشان‌دهنده ورودی خارجی اعمالی به سیستم، بردار u نشان‌دهنده سیگنال کنترلی، بردار y نشان‌دهنده مقدار اندازه‌گیری شده و بردار z نشان‌دهنده سیگنال خروجی مطلوب است.



شکل (۲-۲) بلوک دیاگرام مساله H_∞ استاندارد

بلوک‌های G و K سره^۱ فرض شده و شامل توابع تبدیل حقیقی می‌باشند. حالت‌های قابل انتخاب برای بردار z می‌توانند خطای ردیابی نیرو برای محدوده‌ای از فرکانس‌های موردنظر (فرکانس‌های پایین)، خطای ردیابی موقعیت (سرعت) باشند و شرایط پایداری مقاوم به‌منظور دستیابی به عملکرد مطلوب در نظر گرفته شوند.

در [۵۳]، کازرونی^۲ و همکاران به طراحی کنترل‌کننده مقاوم براساس نظریه H_∞ پرداختند که در آن فقط اطلاعات مربوط به سیگنال نیرو ارسال می‌شود و نیازی به ارسال اطلاعات مربوط به سیگنال موقعیت یا سرعت نیست. در [۵۴]، لئونگ^۳ و همکاران طراحی سیستم‌های حرکتی از راه دور با حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی با استفاده از سنتز μ را پیشنهاد کردند. در [۵۵]، هو^۴ و همکاران کنترل‌کننده مقاومی را برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور با داشتن پایداری مقاوم و کارایی مطلوب پیشنهاد کردند. در این روش، با فرض این‌که عملگر انسانی و محیط عملیاتی غیرفعال باشند، از شرط $\sup\{\mu(S_T(j\omega))\} \leq 1$ به‌عنوان شرط پایداری مقاوم استفاده کردند که در آن S_T ماتریس پراکندگی است. شرط بکار برده شده در این روش، نسبت به شرط غیرفعالی از محافظه‌کاری کمتری برخوردار است. در روش پیشنهادی، به‌منظور سادگی در طراحی، علاوه‌براین که امیدانس دست عملگر انسانی ثابت فرض شده است، خطای مدلسازی سیستم فرمانبر و سیستم فرمانده و تاخیر زمانی در نظر گرفته نشده است. تحت این شرایط، سیستم حرکتی از راه دور می‌تواند به‌عنوان یک شبکه تک‌قطبی خطی و مستقل از زمان با ادمیتانس $Y_T(j\omega)$ که با امیدانس محیط عملیاتی z_e کوپل

^۱Proper
^۲Kazerooni
^۳Leung
^۴Hu

شده است، در نظر گرفته شود. در این روش، محیط عملیاتی غیرفعال فرض می‌شود. شرط لازم و کافی برای پایداری تک‌قطبی خطی مستقل از زمان این است که $\text{Re}[Y_T(j\omega)] \geq 0, \forall \omega \in \mathbb{R}$. کارهای مذکور، بر مبنای ردیابی نیرو و ردیابی موقعیت برای پاسخ سیستم‌های حرکتی از راه دور ایده‌آل می‌باشد. آنچه در کارهای فوق قابل توجه می‌باشد این است که یک روش کلی که بتواند اهداف طراحی مختلف را دربرگیرد ارائه داده نشده است.

در [۵۶]، سانو^۱ و همکاران طراحی کنترل‌کننده H_∞ برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور را ارائه کردند. آنها در روش پیشنهادی خود، از دو سنسور نیرو و دو سنسور سرعت به منظور اندازه‌گیری سیگنال‌های نیرو و سرعت استفاده کردند در حالی که در سایر مقالات از یک سنسور نیرو و یک سنسور موقعیت استفاده می‌شود. علاوه بر این، در این روش نیاز به محاسبه زمان رفت و برگشت^۲ به صورت برخط می‌باشد. در [۵۷]، سیروس‌پور و شهدی کنترل‌کننده گوسی مربعی خطی (LQG)^۳ گسسته را به منظور پایداری سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند.

۲-۳ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل تطبیقی

یکی از راهکارهای ارائه شده برای اصلاح عملکرد سیستم در حضور نامعینی‌ها، استفاده از کنترل تطبیقی است. از محدودیت‌های روش مبتنی بر کنترل تطبیقی می‌توان به محدود بودن معادلات دینامیکی برای سیستم اشاره کرد. علاوه بر این، عدم قطعیت در سیستم بایستی به تعداد معدودی پارامتر نامعلوم محدود گردد. در حالت کلی، بدست آوردن مدل دینامیکی دقیق برای سیستم‌های حرکتی از راه دور بسیار مشکل است. بنابراین، کاربرد روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل تطبیقی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با درجات بالا به واسطه پیچیدگی ساختار دینامیکی سیستم، بسیار مشکل می‌باشد.

در [۵۸]، هشترودی‌زاد^۴ و سالکادین^۵ کنترل‌کننده تطبیقی غیرمستقیم را پیشنهاد کردند که در آن نیازی به اندازه‌گیری نیرو نمی‌باشد. بدین منظور در این روش، علاوه بر موقعیت و سرعت، شتاب سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر نیز باید اندازه‌گیری شود. در این روش، پارامترهای کنترل‌کننده استفاده شده در طرف سیستم فرمانده به صورت تطبیقی محاسبه نمی‌شوند. پارامترهای کنترل‌کننده در طرف سیستم فرمانبر به صورت تطبیقی و در طرف سیستم فرمانده به دلیل این که سیگنال نیرو اندازه‌گیری نمی‌شود، براساس تطابق محاسبه می‌شوند. در [۵۹]، لی و همکاران کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با محیط عملیاتی نامعین و یا متغیر را ارائه کردند. در این روش، بر مبنای ساختار موقعیت-نیرو علاوه بر تضمین پایداری سیستم حرکتی از راه دور، تطابق نیز قابل دستیابی است.

^۱Sano

^۲Round Trip Time

^۳Linear Quadratic Gaussian

^۴Hashtrudi-Zaad

^۵Salcudean

در [۶۰]، زو^۱ و سالکادین کنترل‌کننده تطبیقی سرعت/نیرو را پیشنهاد کردند. این روش پیشنهادی برای کنترل موقعیت و سرعت با مقیاس‌دهی دلخواه برای سرعت و نیرو قابل استفاده است. در این روش نامعینی در پارامترهای سیستم فرمانده و فرمانبر به‌صورت تطبیقی اصلاح می‌شوند. در روش پیشنهادی، کنترل‌کننده تطبیقی برای دینامیک غیرخطی سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر قابل استفاده است. در [۶۱]، زو و سالکادین در ادامه کار تحقیقاتی خود که در [۶۰] ارائه کرده بودند، بحث کنترل تطبیقی را برای سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر مستقل از یکدیگر، مطرح کردند. در این روش، آنها در مدل‌سازی سیستم حرکتی از راه دور، مدل محیط عملیاتی را در دینامیک سیستم فرمانبر و مدل عملگر انسانی را در دینامیک سیستم فرمانده در نظر گرفته و برای هر کدام کنترل‌کننده‌ای مستقل از هم طراحی کرده که پارامترهای مربوط به هر کدام به‌صورت جداگانه به روز می‌شوند. در این روش پیشنهادی، امکان دستیابی به ردیابی سرعت و ردیابی نیرو با خطای حالت دائمی وجود دارد.

در [۶۲]، لاو^۲ و بوکروش جدیدی را برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور با انعکاس نیرو با استفاده از کنترل تطبیقی امپدانس ارائه کردند. روش پیشنهادی جدید، کاهش انرژی مورد نیاز برای عملگر انسانی را بدون این که خللی در پایداری سیستم ایجاد کند، در پی دارد. شناسایی سیستم توسط الگوریتم RLS^۳ صورت می‌گیرد. توسط این الگوریتم، امپدانس سایت دور که شامل محیط عملیاتی نیز می‌شود، به‌صورت بی‌درنگ شناسایی می‌شود. در روش پیشنهادی مذکور، با توجه به این که دینامیک سایت دور وابسته به موقعیت و متغیر با زمان می‌باشد، امپدانس سیستم فرمانده به‌روز می‌شود. در [۶۳]، لی^۴ و همکاران کنترل تطبیقی غیرخطی را برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با زمان تاخیر بزرگ در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در این روش، به‌منظور تضمین پایداری سیستم حرکتی از راه دور از دو کنترل‌کننده مجزا جابه‌جایی/نیرو برای سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر استفاده می‌شود. روش پیشنهادی برای محیط‌های عملیاتی نامعلوم قابل استفاده است. علاوه بر آن، در این روش نیازی به اندازه‌گیری سرعت نمی‌باشد. در [۶۴]، حسینی‌ثانی و همکاران کنترل‌کننده تطبیقی نیرو-جابه‌جایی را به‌منظور تضمین پایداری سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه پیشنهاد کردند. در این روش، دو کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع با فیدبک خروجی به‌طور مجزا در سایت محلی و سایت دور طراحی می‌شوند. وظیفه کنترل‌کننده سایت دور، بهبود ردیابی موقعیت (سرعت) به‌همراه پایداری است. در حالی که کنترل‌کننده سایت محلی، بهبود ردیابی نیرو را به‌عهده دارد. در [۶۵]، شاصادقی و همکاران ساختار جدیدی را برای سیستم‌های کارکرد از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر متغیر در کانال ارتباطی با استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی معکوس پیشنهاد کردند. علاوه بر این، به‌منظور اثبات مقاوم بودن ساختار پیشنهادی به‌همراه تطابق، روش بازتاب نیرو نیز در این ساختار مورد استفاده قرار گرفته است.

^۱Zhu

^۲Love

^۳Recursive Least Square

^۴Li

۲-۴ روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل حالت لغزشی (SMC)

این روش در برابر نامعینی‌ها مقاوم بوده و میتوان برای مقابله با مشکلات ناشی از تأخیر زمانی نیز از آن استفاده کرد. کنترل مود لغزشی روی یک سیستم کارکرد از دور با یک درجه آزادی، ابتدا در سال ۲۰۰۶ [۶۵] به کار گرفته شد. در [۶۷] برای کنترل هر دو ربات فرمانده و فرمانبر و در حضور تأخیر متغیر با زمان، از این کنترل‌کننده استفاده شده است. ایده اصلی این روش تعریف یک سطح لغزش شامل اختلاف بین موقعیت‌ها و سرعت رباتهای فرمانده و فرمانبر است، یعنی:

$$s = \dot{\tilde{x}} + \lambda \tilde{x} \quad (1-2)$$

که $\tilde{x} = x_s - k_x x_m$ و k_x ضریب مقیاس موقعیت می‌باشند. روش‌های استاندارد برای محاسبه قوانین کنترلی که پایداری به سطح S را تضمین می‌کنند، در دسترس هستند. با این حال، این روش‌ها به تخمین نیروهای عملگر f_n و نیروی محیط f_e وابسته می‌باشند. در صورت دور بودن تخمین‌ها از مقادیر واقعی به بهره‌های بزرگ نیاز است تا شرط رسیدن $\dot{s} \leq -\eta \|s\| < 0$ برقرار شود.

فصل ۳

ساختار پیشنهادی برای سامانه‌های کارکرد از راه دور در حضور زمان تأخیر ثابت

در فصول قبل تاریخچه، مفاهیم و روش های کنترلی مختلف برای سامانه های کارکرد از راه دور بیان شد. در این فصل نوعی از این سامانه ها مطرح می شود که در آن تأخیر موجود در کانال ارتباطی ثابت در نظر گرفته شده است، و برای این سامانه ساختاری معرفی می شود که ضمن تضمین پایداری سیستم حلقه- بسته و ردیابی موقعیت سیستم در حضور نامعینی در مدل سیستم، با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی هوشمند جدید معرفی شده ضرایبی برای کنترل کننده بدست می آید که ردیابی موقعیت را به صورت بهینه فراهم می آورد. دید گاه ها و اهداف در این فصل به صورت زیر ارائه می شود:

۱- مقدمات (مدل کردن سامانه های کارکرد از راه دور و اهداف کنترلی)

۲- مروری بر مفاهیم بهینه سازی با الگوریتم های هوشمند و معرفی الگوریتم های بکار رفته و الگوریتم جدید

۳- شبیه سازی

۳-۱ مقدمات

۳-۱-۱ مدل دینامیکی سامانه های کارکرد از راه دور

در سامانه های کارکرد از راه دور مدل های دینامیکی ربات های فرمانده و فرمانبر طبق معادلات زیر فرمول بندی می شوند:

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m) + g_m(q_m) = F_h + \tau_m \quad (۱-۳)$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s) + g_s(q_s) = \tau_s - F_e$$

که در آن اندیس های $\mathbf{i} = \{\mathbf{m}, \mathbf{s}\}$ به ترتیب نشان دهنده ربات های فرمانده و فرمانبر، و

$q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i \in R^n$ به ترتیب موقعیت، سرعت و شتاب مفاصل را مشخص می کند. $M_i(q_i) \in R^{n \times n}$ ماتریس های اینرسی، $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in R^{n \times n}$ ماتریس های اثر نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز، $g_i(q_i) \in R^n$ بردار نیروهای گرانشی، $\tau_i \in R^n$ سیگنال های کنترلی و در نهایت $F_h, F_e \in R^n$ به ترتیب نیروی وارده از محیط و نیروی وارده از شخص به ربات ها هستند.

این ماتریس ها دارای خواص زیر می باشند:

۱- ماتریس اینرسی $M(q)$ ماتریسی مثبت معین متقارن و دارای حدود بالا و پایین به شکل

زیر هست:

$$\lambda_d I_{n \times n} \leq M_i(q_i) \leq \lambda_D I_{n \times n} \quad (۲-۳)$$

که λ_d و λ_D به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر مقادیر ویژه ماتریس M را نشان می دهند.

۲- با یک تعریف مناسب از ماتریس $C(q, \dot{q})$ ماتریس $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ پادمتقارن^۱ خواهد

بود.

^۱Skew-symmetric

۳- دینامیک لاگرانژ قابلیت خطی سازی دارد. بنابر این:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i) = Y_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)\theta_i \quad (۳-۳)$$

که $\theta_i \in R^l$ بردار پارامترهای نامعلوم و $Y_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i) \in R^{n \times l}$ ماتریس رگرورها هست.

۳-۱-۲ فرضیات کلی

طرح کنترلی ارائه شده در این فصل بر مبنای فرضیات زیر استوار است:

۱- عملگر انسانی و محیط عملیاتی غیرفعالند.

۲- زمان تأخیر کانال ارتباطی ثابت و برای رفت و برگشت یکسان است.

۳-۱-۳ تعریف همزمان سازی در سامانه های کارکرد از راه دور

مطابق [۸۲] با در نظر گرفتن تعاریف زیر

$$e_m(t) = q_s(t-T) - q_m(t) \quad (۴-۳)$$

$$e_s(t) = q_m(t-T) - q_s(t) \quad (۵-۳)$$

که $e_m(t)$ و $e_s(t)$ به ترتیب خطای ردیابی ربات فرمانده و ربات فرمانبر می نامیم. همچنین با فرض

$$e_{m\dot{}}(t) = \dot{e}_m(t) + \alpha e_m(t) \quad (۶-۳)$$

$$e_{s\dot{}}(t) = \dot{e}_s(t) + \alpha e_s(t) \quad (۷-۳)$$

به طوری که α ماتریس مثبت معین است. می گوئیم سامانه عملکرد از راه دور همزمان شده است اگر :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_m(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} e_{s\dot{}}(t) = 0 \quad (۸-۳)$$

در این صورت $e_{rs}(t)$ و $e_{m\dot{}}(t)$ را خطاهای همزمان سازی می نامیم. اگر در یک سامانه کارکرد از راه دور با در نظر گرفتن خواص ۱ تا ۳ (بخش ۳-۱-۱) و فرضیات ۱ و ۲ (بخش ۳-۱-۲)، مسئله همزمان سازی محقق گردد، سامانه به طور مجانبی پایدار خواهد بود و خطاهای ردیابی به صفر میل خواهد کرد.

۳-۱-۴ طراحی کنترل کننده

در این بخش مسئله کنترل کننده فرموله می شود. به منظور دستیابی به هدف کنترلی (همزمان سازی) برای سیستم دارای عدم قطعیت در مدل، سیگنال های کنترلی را مطابق زیر در نظر می گیریم:

$$\tau_m = -\hat{M}_m(q_m)\lambda\dot{q}_m - \hat{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\lambda q_m + \hat{g}_m(q_m) + F_m \quad (۹-۳)$$

$$\tau_s = -\hat{M}_s(q_s)\lambda\dot{q}_s - \hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\lambda q_s + \hat{g}_s(q_s) + F_s \quad (۱۰-۳)$$

به طوری که F_i ($i = m, s$) ورودی های کنترل اضافی هستند، که ساختار استفاده شده برای

آنها از نوع کنترل کننده های تناسبی- مشتقگیر به شکل زیر است:

$$F_m = K_P e_m(t) + K_D \dot{e}_m(t) \quad (۱۱-۳)$$

$$F_s = K_P e_s(t) + K_D \dot{e}_s(t) \quad (۱۲-۳)$$

در رابطه اخیر $\hat{M}_i, \hat{C}_i, \hat{g}_i (i = m, s)$ پارامترهای تخمین زده شده به منظور در نظر گرفتن نامعینی در مدل ربات‌های فرمانده و فرمانبر، $K_P, K_D \in R^{n \times n}$ ماتریس‌های قطری مثبت معین و $\lambda \in R^{n \times n}$ برابر است با:

$$\lambda = K_D^{-1} K_P \quad (13-3)$$

با قرار دادن روابط (9-3) و (10-3) در معادلات دینامیکی سامانه کارکرد از راه دور (رابطه 3-1) داریم:

$$M_m(q_m)(\ddot{q}_m + \lambda \dot{q}_m) + C_m(q_m, \dot{q}_m)(\dot{q}_m + \lambda q_m) = \tilde{M}_m(q_m)\lambda \dot{q}_m + \tilde{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\lambda q_m - \tilde{g}_m(q_m) + F_m + F_h \quad (14-3)$$

$$M_s(q_s)(\ddot{q}_s + \lambda \dot{q}_s) + C_s(q_s, \dot{q}_s)(\dot{q}_s + \lambda q_s) = \tilde{M}_s(q_s)\lambda \dot{q}_s + \tilde{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\lambda q_s - \tilde{g}_s(q_s) + F_s - F_e \quad (15-3)$$

به طوری که $\tilde{M}_i, \tilde{C}_i, \tilde{g}_i (i = m, s)$ خطای تخمین پارامترها هستند و به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\tilde{M}_i = M_i - \hat{M}_i \quad (16-3)$$

$$\tilde{C}_i = C_i - \hat{C}_i \quad (17-3)$$

$$\tilde{g}_i = g_i - \hat{g}_i \quad (18-3)$$

بر طبق خاصیت 3 (بخش 3-1-1) و روابط (3-12) و (3-13) می‌توانیم روابط را به شکل زیر بازنویسی کنیم:

$$M_m(q_m)\dot{r}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)r_m = Y_m(q_m, \dot{q}_m)\tilde{\theta}_m + F_m + F_h \quad (19-3)$$

$$M_s(q_s)\dot{r}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)r_s = Y_s(q_s, \dot{q}_s)\tilde{\theta}_s + F_s - F_e \quad (20-3)$$

به طوری که $\tilde{\theta}_m, \tilde{\theta}_s \in R^l$ بردار خطای تخمین پارامترهایی هستند که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\tilde{\theta}_m = \theta_m - \hat{\theta}_m \quad (21-3)$$

$$\tilde{\theta}_s = \theta_s - \hat{\theta}_s \quad (22-3)$$

و علاوه بر این r_m و r_s متغیرهای جدیدی هستند که:

$$r_m = \dot{q}_m + \lambda q_m \quad (23-3)$$

$$r_s = \dot{q}_s + \lambda q_s \quad (24-3)$$

و به منظور تخمین پارامترهای عدم قطعیت در مدل قوانین تطبیق زیر را انتخاب می‌کنیم:

$$\dot{\tilde{\theta}}_m = \Gamma Y_m^T r_m \quad (25-3)$$

$$\dot{\tilde{\theta}}_s = \Lambda Y_s^T r_s \quad (26-3)$$

به طوری که $\Gamma, \Lambda \in R^{n \times n}$ ماتریس مثبت معین ثابت هستند.

قضیه: سامانه کارکرد از راه دور دوطرفه در روابط (3-19) و (3-20) با استفاده از قوانین تطبیق داده شده در روابط (3-25) و (3-26) و ورودی‌های کنترل اضافه به صورت روابط (3-11) و

(۱۲-۳) به طور مجانبی پایدار بوده و خطای تخمین پارامترها و خطای همزمان‌سازی به صفر میل می‌کند.

اثبات:

مطابق روابط (۱۱-۳) و (۱۳-۳) داریم:

$$F_m = K_D \dot{e}_m(t) + K_P e_m(t) = K_D(\dot{e}_m + K_D^{-1} K_P e_m) = K_D(\dot{e}_m + \lambda e_m) \quad (۲۷)$$

حال با استفاده از روابط (۲۳-۳) و (۲۴-۳) داریم:

$$\begin{aligned} F_m &= K_D(\dot{e}_m + \lambda e_m) = K_D[\dot{q}_s(t-T) - \dot{q}_m(t) + \lambda(q_s(t-T) - q_m(t))] \\ &= K_D[r_s(t-T) - r_m(t)] \\ &= K_D e_m \end{aligned} \quad (۲۸)$$

به طور مشابه از روابط (۱۲-۳)، (۱۳-۳)، (۲۳-۳) و (۲۴-۳) داریم:

$$\begin{aligned} F_s &= K_D[r_m(t-T) - r_s(t)] \\ &= K_D e_{rs} \end{aligned} \quad (۲۹-۳)$$

علاوه بر این مطابق با فرضیه ۱ (بخش ۳-۱-۲) خواهیم داشت:

$$\int_0^t (F_e^T r_s - F_h^T r_m) dt \geq 0 \quad (۳۰-۳)$$

حال تابع لیپانوف زیر را در نظر می‌گیریم:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (۳۱-۳)$$

که در آن

$$V_1 = r_m^T M_m r_m + r_s^T M_s r_s + 2 \int_0^t (F_e^T r_s - F_h^T r_m) dt \quad (۳۲-۳)$$

$$V_2 = K_D \int_{t-T}^t (r_m^T r_m + r_s^T r_s) dt \quad (۳۳-۳)$$

$$V_3 = \tilde{\theta}_m^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}_m + \tilde{\theta}_s^T \Lambda^{-1} \tilde{\theta}_s \quad (۳۴-۳)$$

با مشتق‌گیری از هر کدام از توابع فوق داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= 2r_m^T M_m \dot{r}_m + 2r_s^T M_s \dot{r}_s + r_m^T \dot{M}_m r_m + r_s^T \dot{M}_s r_s + 2F_e^T r_s - 2F_h^T r_m \\ &= 2r_m^T (-C_m r_m + F_h + Y_m \tilde{\theta}_m + F_m) + 2r_s^T (-C_s r_s - F_e + Y_s \tilde{\theta}_s + F_s) \end{aligned} \quad (۳)$$

$$+ r_m^T \dot{M}_m r_m + r_s^T \dot{M}_s r_s + F_e^T r_s - F_h^T r_m \quad (۳۵)$$

$$= 2r_m^T F_m + 2r_s^T F_s + 2r_m^T Y_m \tilde{\theta}_m + 2r_s^T Y_s \tilde{\theta}_s$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= K_D[r_m^T r_m + r_s^T r_s - r_m^T(t-T)r_m(t-T) - r_s^T(t-T)r_s(t-T)] \\ &= K_D[r_m - r_s(t-T)]^T [r_m + r_s(t-T)] + K_D[r_s - r_m(t-T)]^T [r_s + r_m(t-T)] \\ &= K_D[r_m - r_s(t-T)]^T [2r_m - r_m + r_s(t-T)] \\ &\quad + K_D[r_s - r_m(t-T)]^T [2r_s - r_s + r_m(t-T)]\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}&= 2r_m^T K_D[r_m - r_s(t-T)]^T - K_D[r_m - r_s(t-T)]^T [r_m - r_s(t-T)] \\ &\quad + 2r_s^T K_D[r_s - r_m(t-T)]^T - K_D[r_s - r_m(t-T)]^T [r_s - r_m(t-T)]\end{aligned}\quad (36)$$

$$\begin{aligned}&= -2r_m^T K_D[r_s(t-T) - r_m]^T - K_D[r_s(t-T) - r_m]^T [r_s(t-T) - r_m] \\ &\quad - 2r_s^T K_D[r_m(t-T) - r_s]^T - K_D[r_m(t-T) - r_s]^T [r_m(t-T) - r_s]\end{aligned}$$

$$= -2r_m^T F_m - 2r_s^T F_s - K_D e_{rm}^T e_{rm} - K_D e_{rs}^T e_{rs}$$

$$\dot{V}_3 = 2\tilde{\theta}_m^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m + 2\tilde{\theta}_s^T \Lambda^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\theta}_m^T \dot{\Gamma}^{-1} \tilde{\theta}_m + \tilde{\theta}_s^T \dot{\Lambda}^{-1} \tilde{\theta}_s \quad (3)$$

$$= -2\tilde{\theta}_m^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m - 2\tilde{\theta}_s^T \Lambda^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s \quad (37)$$

از قوانین تطبیق در روابط (۳-۲۵) و (۳-۲۶) و رابطه (۳-۳۷) داریم:

$$\begin{aligned}\dot{V}_3 &= -2\tilde{\theta}_m^T \Gamma^{-1} \Gamma Y_m^T r_m + -2\tilde{\theta}_s^T \Lambda^{-1} \Lambda Y_s^T r_s \\ &= -2\tilde{\theta}_m^T Y_m^T r_m - 2\tilde{\theta}_s^T Y_s^T r_s\end{aligned}\quad (38-3)$$

با جمع روابط (۳-۳۵)، (۳-۳۶) و (۳-۳۸) داریم:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 \\ &= (2r_m^T F_m + 2r_s^T F_s + 2r_m^T Y_m^T \tilde{\theta}_m + 2r_s^T Y_s^T \tilde{\theta}_s) + (-2r_m^T F_m - 2r_s^T F_s - K_D e_{rm}^T e_{rm} - K_D e_{rs}^T e_{rs}) \\ &\quad + (-2\tilde{\theta}_m^T Y_m^T r_m - 2\tilde{\theta}_s^T Y_s^T r_s) \\ &= -K_D e_{rm}^T e_{rm} - K_D e_{rs}^T e_{rs}\end{aligned}\quad (39)$$

بنابراین $\tilde{\theta}_m, \tilde{\theta}_s$ و e_{rm}, e_{rs} به صفر میل کرده و مسئله همزمان سازی محقق می گردد. و با

استفاده از لم باربالات می توان نتیجه گرفت که سیستم به طور مجانبی پایدار خواهد بود.

حال بدون از دست دادن کلیات مسئله فرض کنید $K_p = k_p I_{n \times n}$ و $K_d = k_d I_{n \times n}$ که

$k_p, k_d \in R$ و $I_{n \times n} \in R^{n \times n}$ ماتریس یک واحد هست. همانطور که گفته شد مقادیر K_p و K_d ماتریس های مثبت معینی هستند که به دلخواه انتخاب می شوند. ولی انتخاب درست آنها در عملکرد سیستم که مورد نظر طراح است، اهمیت دارد. به طور مثال طراح در نظر دارد که با در نظر گرفتن مقادیری برای K_p و K_d انتگرال مجموع مربعات خطای موقعیت در سیستم کم باشد. یک روش این است که در ابتدا مقادیر دلخواهی برای K_p و K_d انتخاب گردد (مثلا $K_p = 3$ و $K_d = 1.5$)، سپس عملکرد سیستم مشاهده و انتگرال مجموع مربعات خطای موقعیت ثبت شود. مجددا مقادیر دلخواه دیگری برای K_p و K_d انتخاب شده و (مثلا $K_p = 8$ و $K_d = 4$) و این بار هم عملکرد سیستم و انتگرال مجموع مربعات خطای موقعیت ثبت گردد. این روند چندین بار تکرار شده و هر بار نتایج حاصل با نتایج قبلی مقایسه گردد. بدین ترتیب پس از چندین بار سعی و خطا مناسب ترین مقادیر برای K_p و K_d بدست می آید به گونه ای که معیار مورد نظر بهتر از بقیه برآورده شود (یعنی کمتر

بودن انتگرال مجموع مربعات خطای موقعیت). حال طراح می‌تواند به جای سعی و خطا برای یافتن مقادیر K_p و K_d که اهداف عملکردی مورد نظر را برآورده کند، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرده و مقادیر K_p و K_d را به صورت بهینه بدست آورد. بدین صورت در هر بار اجرا و راه‌اندازی دستگاه طراح مطمئن است که کمترین انتگرال مجموع مربعات خطای موقعیت را خواهد داشت. در ادامه علاوه بر مروری بر مفاهیم بهینه‌سازی، الگوریتم‌های بکار رفته در این تحقیق معرفی خواهند شد. سپس یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید معرفی شده و عملکرد این الگوریتم‌ها با هم مقایسه می‌گردد.

۳-۲ بهینه‌سازی با الگوریتم‌های هوشمند

بهینه‌سازی اهمیت زیادی در بسیاری از علوم و مسائل مهندسی دارد. از موضوعات اصلی در مبحث بهینه‌سازی، بهینه محلی و بهینه فراگیر یا عام است. مسائل پیچیده بسیاری وجود دارد که دسترسی به بهینه فراگیر یا عام اهمیت بسیاری دارد [۶۸]. یافتن راه حل‌های ممکن مسائل با توجه به ماهیت مختلفشان نیازمند روش‌های مختلفی می‌باشد. بنابراین روش‌های گوناگون و متنوعی در دهه‌های اخیر ارائه شده است، که الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت از این دسته‌اند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان الگوریتم ژنتیک^۱ [۶۹ و ۷۰]، ازدحام ذرات^۲ [۷۱-۷۳]، اجتماع زنبورها^۳ [۷۴-۷۶]، ککو^۴ [۷۷ و ۷۸]، جغرافیای زیستی^۵ [۷۹]، رقابت استعماری^۶ [۸۰] و... را نام برد.

مسائل بهینه‌سازی به دو دسته عمده طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- مسائل بدون محدودیت (بدون قید): مسائلی هستند که در آنها فقط کمینه‌سازی تابع هدف، در محدوده تغییرات متغیرها اهمیت دارد.

$$\min f(x), \quad x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \quad (40-3)$$

$$L(i) \leq x(i) \leq U(i), \quad 1 \leq i \leq n$$

که $L(i)$ حدود پایین متغیرها و $U(i)$ حدود بالای متغیرها هستند [۷۵].

۲- مسائل با محدودیت (با قید): مسائلی هستند که در آنها علاوه بر کمینه‌سازی تابع هدف در محدوده تغییرات متغیرها، رعایت برخی قیود خطی یا غیر خطی و مساوی و نامساوی نیز اهمیت دارد.

$$\min f(x), \quad x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \quad (41-3)$$

$$L(i) \leq x(i) \leq U(i), \quad 1 \leq i \leq n$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad \text{for } j=1, \dots, q$$

$$h_j(x) = 0, \quad \text{for } j=q+1, \dots, m$$

که m تعداد کل قیود است [۷۵].

^۱ Genetic algorithm

^۲ Particle swarm

^۳ Bee colony

^۴ Cuckoo

^۵ Biogeography

^۶ Imperialist competitive

در بحث بهینه‌سازی با الگوریتم های هوشمند برای در نظر گرفتن قیود می‌توان از روش جریمه قیود برای تابع هدف استفاده کرد. به عبارت دیگر، به جای کمینه سازی تابع هدف، تابع زیر را کمینه می‌کنیم که در آن قیود مورد نظر با ضریبی به تابع هدف اضافه می‌شوند [۸۳].

$$J = f(x) + \sum_{i=1}^n R_j \phi_j(x) \quad (۴۲-۳)$$

که در آن R_j یک ضریب جریمه برای قید j ام (ϕ_j) است. در ادامه به توضیح الگوریتم های استفاده شده در این تحقیق می‌پردازیم.

۳-۲-۱ الگوریتم ژنتیک (GA)^۱

الگوریتم ژنتیک توسط جان هالند^۲ در سال ۱۹۶۷ ابداع شده است [۶۹]. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتمهای تکامل است که از تکنیکهای زیست‌شناسی استفاده می‌کند. در الگوریتم ژنتیک توسط عملگرهایی که روی کروموزومها انجام می‌شود می‌توان به جواب بهینه رسید.

شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

- ۱- ایجاد جمعیت احتمال اولیه.
- ۲- ارزیابی شایستگی اشخاص در جمعیت اولیه.
- ۳- انتخاب یک جمعیت جدید با استفاده از قوانینی بر مبنای شایستگی اشخاص.
- ۴- ایجاد جمعیت جدید با استفاده از عملگرهای ژنتیکی آمیزش^۳ و جهش^۴.
- ۵- ارزیابی شایستگی افراد جدید.
- ۷- اگر شرایط توقف ارضا نشد، رفتن به مرحله ۳.

۳-۲-۲ الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان (PSO)^۵

الگوریتم PSO اولین بار توسط کندی^۶ [۷۱] معرفی شد. این الگوریتم یک روش هوش گروهی برای حل مسأله های بهینه سازی است. در PSO هر نامزد راه حل، موقعیت خود را در فضای جستجو با توجه به تجربیات خود و تجربیات کل گروه راه حل های نامزد، تغییر می دهد. PSO شامل اجزایی است که به طور مرتب دانش خود را از فضای جستجو اصلاح می کنند. در ابتدا PSO توسط یک گروه از اجزا که بطور تصادفی تولید شده اند مقدار دهی می شود و جستجو برای پیدا کردن پاسخ بهینه آغاز میشود. در هر تکرار از الگوریتم، هر جزء موقعیت بعدی خود در فضای جستجو را با توجه به دو مقدار تغییر می دهد؛ یکی بهترین موقعیتی است که تاکنون داشته است و دیگری بهترین موقعیتی که تاکنون توسط کل اجزای گروه به وجود آمده است.

شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

^۱ Genetic algorithm

^۲ John holland

^۳ Crossover

^۴ Mutation

^۵ Particle swarm optimization

^۶ Kennedy

۱- ایجاد یک سری جمعیت اولیه تصادفی.

۲- ارزیابی تمامی راه حل های انتخابی.

۳- تعیین بهترین موقعیتی که ذره تاکنون داشته است و دیگری بهترین موقعیتی که تاکنون

توسط کل

اجزای گروه به وجود آمده است.

۴- به روز رسانی سرعت و موقعیت

۵- اگر شرایط توقف ارضا نشد، رفتن به مرحله ۳.

۳-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)^۱

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی، ارائه شده توسط سیمون^۲ [۷۹]، یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید بر پایه نظریه زیست جغرافیا است، که به مطالعه توزیع جغرافیایی جانوران می‌پردازد. مدل‌های ریاضی زیست جغرافی، چگونگی مهاجرت گونه‌ها از یک منطقه به منطقه دیگر، چگونگی ظهور یک گونه جدید، و نحوه انقراض یک گونه را تشریح می‌کند. مناطق جغرافیایی که مکان مناسبی برای سکونت گونه‌های زیستی هستند، دارای شاخص شایستگی^۳ (HSI) بالا هستند. خصوصیات که با HSI ارتباط دارند: میزان بارندگی، تراکم پوشش گیاهی، مناطق خشک، و دماست. متغیرهایی که این شایستگی را شکل می‌دهند، متغیرهای شاخص شایستگی^۴ (SIV) خوانده می‌شوند. فرض کنید که یک مسئله با چندین راه‌حل نامزد داریم. مسئله می‌تواند در هر زمینه ای (مهندسی، اقتصاد، داروسازی، تجارت، طراحی شهری، ورزش و ...) باشد و یک معیار قابل اندازه‌گیری برای شایستگی یک راه‌حل داریم. یک راه‌حل خوب شبیه یک منطقه با HSI بالاست و یک راه‌حل ضعیف یک منطقه با HSI پایین را نشان می‌دهد. به اشتراک گذاشتن اطلاعات در این روش با عملگر مهاجرت صورت می‌پذیرد. راه‌حل‌های با HSI بالا تمایل بیشتری برای به اشتراک گذاشتن خصوصیات با راه‌حل‌ها با HSI ضعیف دارند. راه‌حل‌های ضعیف، مقدار زیادی خصوصیات جدید از راه‌حل‌های خوب دریافت می‌کنند. اضافه شدن این خصوصیات جدید، کیفیت این راه‌حل‌ها را بالا می‌برد. همچنین در این الگوریتم نرخ مهاجرت از^۵ یک منطقه را با μ و نرخ مهاجرت به^۶ یک منطقه را با λ نشان می‌دهیم. و رابطه بین آنها به صورت زیر است:

$$\lambda = 1 - \mu \quad (۴۳-۳)$$

یک منطقه با شاخص شایستگی بالا دارای μ بالاتر و λ پایین تر هست. به همین ترتیب یک منطقه با شاخص شایستگی پایین دارای μ پایین تر و λ بالاتر هست. همچنین یک عملگر جهش روی متغیرها به منظور جلوگیری از افتادن در مینیمم محلی تعریف می‌شود، که همانند عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک است. شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

^۱Biogeography-Based Optimization

^۲Simon

^۳Habitat Suitability Index

^۴Suitability Index Variability

^۵Emigration

^۶Immigration

- ۱- مقداردهی پارامترهای اولیه در الگوریتم.
- ۲- تولید مجموعه ای از محل سکونت های اولیه.
- ۳- تعیین μ و λ برای هر منطقه سکونت.
- ۴- انجام مهاجرت از محل سکونت های اولیه به مناطق جدید بر اساس مرحله قبل.
- ۵- انجام جهش روی بعضی از متغیرهای شاخص شایستگی.
- ۶- محاسبه شایستگی در مناطق جدید.
- ۷- اگر شرایط توقف ارضا نشد، رفتن به مرحله ۳.

۳-۲-۴ الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)^۱

الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی توسط کارابوگا^۲ [81] برای بهینه‌سازی پارامترها ارائه شد. در یک کلونی زنبور عسل واقعی، وظایفی وجود دارد که توسط زنبورهای متخصص انجام می‌شود. این زنبورها تلاش می‌کنند تا میزان شهد ذخیره شده در کندو را با انجام تقسیم کار و خودسازماندهی موثر حداکثر کنند. جستجوی غذا توسط گروه های هوشمند زنبور در یک کلونی زنبور عسل، که الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی اتخاذ کرده است، شامل سه نوع زنبور است: زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر، و زنبورهای پیشاهنگ (یا دیده‌ور).

نصف کلونی شامل زنبورهای کارگر و نصف دیگر آن شامل زنبورهای ناظر است. زنبورهای کارگر علاوه بر مسئولیت بهره‌برداری از منابع شهدی که قبلاً کشف شده اند، وظیفه در اختیار قرار دادن اطلاعات به زنبورهای ناظر در کندو درباره کیفیت مکان مواد غذایی که در حال استخراج آن هستند را به عهده دارند. زنبورهای ناظر، در کندو می‌مانند و مطابق با اطلاعاتی که زنبورهای کارگر به اشتراک گذاشته‌اند، درباره یک منبع غذایی برای بهره‌برداری شدن تصمیم‌گیری می‌کنند. پیشاهنگ‌ها به صورت تصادفی محیط را برای یافتن یک منبع غذایی جدید براساس یک انگیزش درونی، جستجو می‌کنند. در مرحله اول الگوریتم، $(i=1,2,3, \dots, SN)$ X_i راه حل‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شوند که در آن SN تعداد منابع غذایی است. در مرحله دوم الگوریتم، برای هر زنبور کارگر، که تعداد کل آنها برابر با نصف تعداد منابع غذایی است، یک منبع جدید به‌وسیله رابطه زیر تولید می‌شود:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{kj} - x_{ij}) \quad (44-3)$$

ϕ_{ij} یک عدد تصادفی به‌طور یکنواخت توزیع شده در بازه $[-1, 1]$ است که تولید موقعیت منابع غذایی همسایه را در اطراف x_{ij} کنترل می‌کند. در مرحله سوم الگوریتم، یک زنبور ناظر یک منبع غذایی را با احتمال زیر انتخاب می‌کند.

$$P = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (45-3)$$

^۱Artificial bee colony
^۲Karaboga

به طوری که fit_i میزان شایستگی راه حل x_i است.

بعد از انتخاب، منابع مورد بررسی قرار می گیرند که آیا باید ترک شوند یا خیر. اگر تعداد چرخه هایی که یک منبع نمی تواند بهبود یابد بزرگتر از محدوده از قبل تعیین شده باشد، آن منبع به عنوان منبع ترک شده در نظر گرفته می شود و یک راه حل تصادفی به جای آن قرار می گیرد. شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

۱- مقداردهی اولیه به موقعیت های منابع غذایی.

۲- هر زنبور کارگر یک منبع غذایی جدید در مکان منبع غذایی خود تولید می کند.

۳- هر زنبور ناظر یک منبع را وابسته به کیفیت راه حلش انتخاب می کند منبع بهتر را استخراج می کند.

۴- تعیین منبعی که باید برای زنبورهای پیشاهنگ ترک شود و جایگزینی آن با یک منبع تصادفی.

۵- بخاطر سپردن بهترین منبع غذایی پیدا شده تا کنون.

۶- تکرار مرحله های ۲ - ۵ تا زمانی که معیار توقف مقتضی شود.

۳-۲-۵ الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری (IC)^۱

این الگوریتم اولین بار توسط آتشیپز و لوکاس^۲ [۸۰] معرفی شد. در الگوریتم IC تعدادی کشور، متناظر افراد در الگوریتم ژنتیک وجود دارد. در واقع این مجموعه از کشورها، نقاطی تصادفی درون فضای جستجو می باشند. سپس، چند کشور قویتر (دارای برزندگی بیشتر) به عنوان استعمارگر انتخاب می شوند (در الگوریتم IC به جای اصطلاح هزینه، از اصطلاح قدرت استفاده می شود). به این ترتیب کشورهای قدرتمند به عنوان استعمارگر و کشورهای ضعیف به عنوان مستعمره تعریف می شوند. در ابتدای اجرای الگوریتم، کشورها به صورت تصادفی تولید و چند کشور قدرتمند به عنوان استعمارگر انتخاب می شوند. سپس سایر کشورها به صورت تصادفی به یکی از استعمارگران منتسب می شوند. تعداد مستعمرات هر استعمارگر، متناسب با قدرتش می باشد. بنابراین استعمارگران قویتر مستعمرات بیشتری به خود اختصاص می دهند.

با در نظر گرفتن شیوه نمایش یک کشور در حل مسئله بهینه سازی، در حقیقت این حکومت مرکزی با اعمال سیاست جذب سعی دارد تا کشور مستعمره را در راستای ابعاد مختلف اجتماعی سیاسی به خود نزدیک کند. این بخش از فرایند استعمار در الگوریتم بهینه سازی، به صورت حرکت مستعمرات به سمت کشور امپریالیست، مدل شده است. در این مدل سازی کشورهای مستعمره به اندازه X واحد به سمت استعمارگرها حرکت می کنند. در این حرکت θ و X اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت هستند، به طوری که:

$$x \sim U(0, \beta \times l)$$

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma)$$

(۴۶-۳)

^۱Imperialist competitive
^۲Atashpaz and Lucas

l فاصله بین مستعمره و استعمارگر است. β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به ۲ می‌باشد. یک انتخاب مناسب می‌تواند $\beta=2$ باشد. γ پارامتری دلخواه می‌باشد که افزایش آن باعث افزایش جستجوی اطراف امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث می‌شود تا مستعمرات تا حد ممکن، به بردار واصل مستعمره به استعمارگر، نزدیک حرکت کنند. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای θ ، عددی نزدیک به $\pi/4$ ، در اکثر پیاده‌سازی‌ها، انتخاب مناسبی بوده است. شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

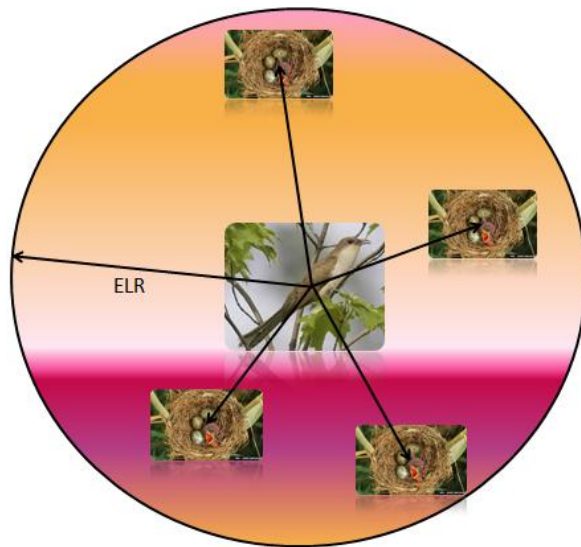
- ۱- چند نقطه تصادفی روی تابع انتخاب کرده و تشکیل امپراطوری‌های اولیه.
- ۲- حرکت مستعمرات، به سمت کشور امپریالیست (سیاست همسان‌سازی).
- ۳- اگر مستعمره‌ای در یک امپراطوری، وجود داشته باشد که هزینه‌ای کمتر از امپریالیست داشته باشد،
تعویض جای مستعمره و امپریالیست.
- ۴- محاسبه هزینه کل یک امپراطوری (با در نظر گرفتن هزینه‌ی امپریالیست و مستعمراتشان).
- ۵- انتخاب یک مستعمره از ضعیف‌ترین امپراطوری و انتقال آن به امپراطوری‌ای که بیشترین احتمال تصاحب را دارد.
- ۶- حذف امپراطوری‌های ضعیف.
- ۷- اگر تنها یک امپراطوری باقی مانده باشد، توقف کن و گرنه به ۲ برو.

۳-۲-۶ الگوریتم بهینه‌سازی کوکو (CO)^۱

الگوریتم بهینه‌سازی کوکو در سال ۲۰۱۱ توسط رجبیون^۲ ارائه گردید [۷۸]. این الگوریتم یک روش جستجوی سراسری است که از زندگی پرنده‌ی کوکو الهام گرفته شده است. همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی این الگوریتم هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می‌کند. جمعیتی که متشکل از کوکوها است. این جمعیت از کوکوها تعدادی تخم دارند که آن‌ها را در لانه تعدادی پرنده میزبان خواهند گذاشت. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخمهای پرنده میزبان دارند شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به کوکوی بالغ خواهند داشت. سایر تخمها توسط پرنده میزبان شناسایی شده و از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهند. هرچه تخمهای بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست باشند و نجات یابند، به همان اندازه هزینه بیشتری به آن منطقه اختصاص می‌یابد. کوکوها برای پیشینه کردن نجات تخم‌های خود دنبال بهترین منطقه میگردند و بهترین منطقه جایی خواهد بود که بیشترین هزینه را

^۱Cuckoo optimization
^۲Rajabioun

دارد. هر کوکو مطابق شکل (۱-۳) به صورت تصادفی تخم‌هایی را در لانه پرندگان میزبان که در محدوده تخم‌گذاری ELR^۱ خود قرار دارد می‌گذارد.



شکل (۱-۳) محدوده و روش تخم‌گذاری هر کوکو

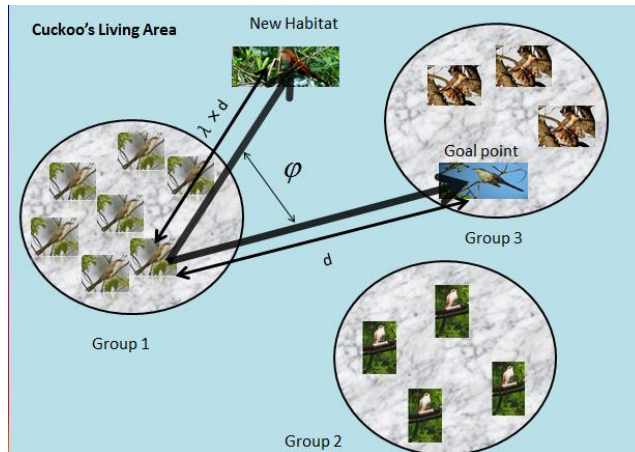
رابطه ELR برای هر کوکو به شکل زیر تعیین می‌شود.

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{Number of current cuckoo's eggs}}{\text{Total number of eggs}} \times (\text{var}_i - \text{var}_j) \quad (۴۷-۳)$$

که در رابطه فوق var_i و var_j به ترتیب حد بالا و پایین متغیرها هستند. وقتی تمام کوکوها تخم‌های خود را گذاشتند برخی از تخمها که کمتر شبیه تخم‌های پرنده میزبان هستند، شناسایی شده و از لانه بیرون انداخته می‌شوند. بنابراین بعد از هر تخم‌گذاری P% از تمام تخم‌ها (معمولا 10%) که مقدار تابع هزینه آن‌ها کمتر است، نابود می‌شوند. بقیه جوجه‌ها در لانه‌های میزبان تغذیه شده و رشد می‌کنند. نکته جالب دیگر در مورد جوجه کوکوها این است که فقط یک تخم در هر لانه امکان رشد دارد. چرا که وقتی جوجه‌های کوکو از تخم در می‌آیند، تخم‌های خود پرنده میزبان را از لانه بیرون پرت می‌کنند و اگر جوجه‌های پرنده میزبان زودتر از تخم خارج شده باشند، جوجه کوکو بیشترین مقدار غذا را که پرنده میزبان می‌آورد خورده و پس از چند روز جوجه‌های خود پرنده میزبان از گرسنگی می‌میرند و فقط جوجه کوکو زنده می‌ماند. وقتی جوجه کوکوها رشد کردند و بالغ شدند مدتی در محیط‌ها و گروه‌های خودشان زندگی می‌کنند ولی به هنگام نزدیک شدن زمان تخم‌گذاری، جوجه کوکوها به محل‌های سکونت^۲ بهتر که در آنجا شانس زنده ماندن تخمها بیشتر است، مهاجرت می‌کنند. پس از تشکیل گروه‌های کوکو در مناطق مختلف، زیست کلی (فضای جستجوی مسئله) گروه با بهترین موقعیت به عنوان نقطه هدف برای سایر کوکوها جهت مهاجرت انتخاب می‌شود. سپس گروهی که دارای بیشترین مقدار متوسط هزینه (بهینگی) می‌باشد، به عنوان گروه هدف انتخاب شده و گروه‌های دیگر به سمت آن مهاجرت می‌کنند. هنگام مهاجرت به سمت نقطه هدف، کوکوها تمام

^۱Egg Laying Radius
^۲Habitat

مسیر را به سمت محل هدف طی نمی کنند. آن ها فقط قسمتی از مسیر را طی کرده و در آن مسیر هم انحرافی دارند. این نحوه حرکت در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۲-۳) معلوم است هر کوکو فقط $\lambda\%$ از کل مسیر را به سمت هدف ایده آل فعلی طی می کند و یک انحراف ϕ رادیان نیز دارد. این دو پارامتر به کوکوها کمک می کند تا محیط بیشتری را جستجو کنند. λ عددی تصادفی بین $[0,1]$ و ϕ عددی بین $[-\pi/6, \pi/6]$ می باشد.



شکل (۲-۳) نحوه حرکت کوکوها به سمت نقطه هدف

وقتی تمام کوکوها به سمت نقطه هدف مهاجرت کردند و نقاط سکونت جدید هر کدام مشخص شد، هر کوکو صاحب تعدادی تخم می شود. با توجه به تعداد تخم هر کوکو یک ELR برای آن مشخص می شود سپس تخم گذاری شروع می گردد. با توجه به این واقعیت که همیشه تعادلی بین جمعیت پرندگان در طبیعت وجود دارد، عددی مثل N_p حداکثر تعداد کوکوهایی را که می توانند در یک محیط زندگی کنند، کنترل و محدود می کند. این تعادل به دلیل محدودیتهای غذایی، شکار شدن توسط شکارچیان و نیز عدم امکان پیدا کردن لالانه های مناسب برای تخمها وجود دارد. پس از چند تکرار، تمام جمعیت کوکوها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخمها به تخمهای پرندگان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می رسند. این محل بیشترین هزینه کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخمها از بین خواهند رفت. همگرایی بیش از ۹۵٪ تمام کوکوها به سمت یک نقطه، الگوریتم بهینه سازی کوکو را به انتهای خود می رساند. فرمول عملگر مهاجرت در الگوریتم بهینه سازی کوکو به شکل زیر است:

$$X_{\text{NextHabitat}} = X_{\text{CurrentHabitat}} + F(X_{\text{GoalPoint}} - X_{\text{CurrentHabitat}}) \quad (۴۸-۳)$$

که در آن F پارامتری است که باعث انحراف می شود.

شبهه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

- ۱- مکان های سکونت فعلی کوکوها را به صورت تصادفی انتخاب و آن ها را ارزیابی می کنیم.
- ۲- با توجه به مقادیر ارزیابی تعدادی تخم (جواب احتمالی جدید) به صورت تصادفی با توجه

به هر

کوکو اختصاص می دهیم.

- ۳- شعاع تخم گذاری هر کوکو را با توجه به رابطه (۴۷-۳) مشخص می گردد.

۴- کوکو ها در لانه های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آنها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند.

۵- تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند.

۶- تخم کوکو هایی که شناسایی نشده اند پرورش می‌یابند. (جواب‌هایی که فاصله کمی با هم دارند،

ولی نامناسب‌تر هستند).

۷- محل سکونت کوکو های جدید را ارزیابی نمایید.

۸- ماکزیمم تعداد کوکو هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آنهایی

که در

مکان های نامناسب هستند را از بین ببرید.

۹- کوکو ها را خوشه بندی و بهترین گروه کوکو را به عنوان مکان سکونت هدف مشخص

نمایید.

۱۰- جمعیت جدید کوکو ها به سمت مکان هدف مطابق رابطه (۳-۴۸) حرکت می‌کنند.

۱۱- اگر شرط توقف برقرار گردیده توقف، در غیر اینصورت به گام ۲ بروید.

۳-۲-۷ الگوریتم بهینه‌سازی کوکوی بهبود یافته (ICO)^۱

این الگوریتم، الگوریتم جدیدی است که در این تحقیق معرفی گردیده است. در الگوریتم بهینه‌سازی کوکو شعاع تخم‌گذاری توسط رابطه (۳-۴۷) مشخص می‌شود، که در آن α مقداری ثابت و برابر ۱ است. برای بهبود کارایی الگوریتم کوکو معمولاً بهتر است این شعاع در ابتدا بزرگ بوده و در طول اجرای برنامه رفته رفته کاهش یابد تا هنگام نزدیک شدن به جواب بهینه تخم‌ها در فضای کمتری قرار داده شوند و نقطه بهینه کلی به صورت دقیقتری حاصل شود. بدین منظور ضریب آلفا را به شکل زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$\alpha = \alpha_{\min} + \frac{iter_{\max} - t}{iter_{\max}} \times (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \quad (۳-۴۹)$$

به طوری که α_{\min} و α_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار آلفا هستند. با در نظر گرفتن مقادیر حداکثر و حداقل آلفا می‌توان شعاع تخم‌گذاری را کنترل کرد. که با توجه به خصوصیات هر مسئله انتخاب می‌شود. در اینصورت می‌توان یک جستجوی کلی را در کنار یک جستجوی محلی داشت.

شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

۱- مکان های سکونت فعلی کوکوها را به صورت تصادفی انتخاب و آن ها را ارزیابی می‌کنیم.

۲- با توجه به مقادیر ارزیابی تعدادی تخم (جواب احتمالی جدید) به صورت تصادفی با توجه

به هر

^۱Improved cuckoo optimization

کوکو اختصاص می‌دهیم.

۳- شعاع تخم‌گذاری هر کوکو را با توجه به رابطه (۳-۴۷) و (۳-۴۹) مشخص می‌گردد.

۴- کوکو ها در لانه های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آنها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند.

۵- تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند.

۶- تخم کوکو هایی که شناسایی نشده اند پرورش می‌یابند. (جواب‌هایی که فاصله کمی با هم دارند،

ولی نامناسب‌تر هستند).

۷- محل سکونت کوکو های جدید را ارزیابی نمایید.

۸- ماکزیمم تعداد کوکو هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آنهایی که در

مکان های نامناسب هستند را از بین ببرید.

۹- کوکو ها را خوشه بندی و بهترین گروه کوکو را به عنوان مکان سکونت هدف مشخص نمایید.

۱۰- جمعیت جدید کوکو ها به سمت مکان هدف مطابق رابطه (۳-۴۸) حرکت می‌کنند.

۱۱- اگر شرط توقف برقرار گردیده توقف، در غیر اینصورت به گام ۲ بروید.

۳-۲-۸ الگوریتم بهینه‌سازی کوکو ی تطبیقی (ACO)^۱

این الگوریتم، الگوریتم جدید دیگری است که در این تحقیق معرفی گردیده است. در الگوریتم بهینه‌سازی کوکو شعاع تخم‌گذاری توسط رابطه (۳-۴۷) مشخص می‌شود، که در آن α مقداری ثابت و برابر ۱ است. برای بهبود کارایی الگوریتم کوکو معمولاً بهتر است این شعاع در ابتدا بزرگ بوده و در طول اجرای برنامه رفته رفته کاهش یابد تا هنگام نزدیک شدن به جواب بهینه تخم‌ها در فضای کمتری قرار داده شوند و نقطه بهینه کلی به‌صورت دقیقتری حاصل شود. بدین منظور ضریب آلفا را به شکل زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$\alpha = \alpha_{\min} + \frac{2}{1 + \beta^{iter}} \times (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \quad (۳-۵۰)$$

به طوری که α_{\min} و α_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار آلفا هستند. با در نظر گرفتن مقادیر حداکثر و حداقل آلفا می‌توان شعاع تخم‌گذاری را کنترل کرد. β پارامتری است که سرعت تغییرات آلفا را از حداکثر تا حداقل مقدار آن تعیین می‌کند. در این تحقیق پارامتر β را 1.075 در نظر می‌گیریم. با انتخاب مناسب سه پارامتر بالا می‌توان یک جستجوی کلی را در کنار یک جستجوی محلی داشت. انتخاب بزرگ برای حداکثر مقدار آلفا کمک بزرگی درگیر نیفتادن الگوریتم در کمینه محلی می‌کند، زیرا باعث یک جستجوی کلی در فضای مسئله خواهد شد. همچنین، در الگوریتم

^۱Adaptive cuckoo optimization

بهینه‌سازی کوکو تعداد تخم‌های اختصاص یافته به هر کوکوی مادر عددی رندوم در بازه ۲ تا حداکثر تعداد مشخص شده توسط کاربر تعیین می‌شود. در این روش، این احتمال وجود دارد که کوکوی خوب فعلی تعداد تخمی کمتر از کوکوی نامناسب تولید کند. برای جلوگیری از این احتمال و تخصیص هوشمندانه‌تر تعداد تخم‌ها، رابطه زیر برای تعیین تعداد تخم‌های مناسب برای هر کوکو پیشنهاد می‌شود.

$$\text{EggNum}_i = \text{MinEggNum} + \left[(\text{fitness}_i - \text{fitness}_{\min}) \times \frac{\text{MaxEggNum} - \text{MinEggNum}}{\text{fitness}_{\max} - \text{fitness}_{\min}} \right] \quad (51)$$

که در آن fitness_{\max} و fitness_{\min} به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار هزینه در جمعیت کنونی در جمعیت کنونی، fitness_i مقدار هزینه کوکوی جاری و [.] نماد جزء صحیح می‌باشد.

علاوه بر این، از آنجایی که در برخی مسائل ممکن است مقادیر بردار حد بالا و یا مقادیر بردار حد پایین یکسان نباشند و با توجه به رابطه (۳-۵۰) شعاع تخم‌گذاری در هر تکرار به روز می‌شود و کاهش می‌یابد، برای داشتن یک جستجوی کلی در تمام فضای جستجوی مسئله برای مسائل با حدود متغیر، ELR مطابق با رابطه (۳-۵۲) پیشنهاد می‌شود. در این صورت در تکرارهای اول یک جستجوی کلی اولیه در فضای مسئله حاصل شده و با پیشرفت الگوریتم (افزایش تکرارها) به دلیل کاهش آلفا (رابطه (۳-۵۰)) می‌توان به یک جستجوی محلی مناسب دست یافت. لذا با در نظر گرفتن حداکثر مقادیر متغیرهای حدود بالا و حداقل مقادیر حدود پایین، با پیشرفت الگوریتم یک جستجوی کلی در ابتدا و یک جستجوی محلی در انتها حاصل می‌شود. بدین ترتیب از جستجو در کل فضای مسئله اطمینان حاصل می‌شود.

$$\text{ELR} = \alpha \times \frac{\text{Number of current cuckoo's eggs}}{\text{Total number of eggs}} \times (\max(\text{var}_i) - \min(\text{var}_i)) \quad (52-3)$$

شبه کد این الگوریتم به صورت زیر است:

- ۱- مکان های سکونت فعلی کوکوها را به صورت تصادفی انتخاب و آن ها را ارزیابی می‌کنیم.
- ۲- با توجه به مقادیر ارزیابی تعدادی تخم (جواب احتمالی جدید) طبق رابطه (۳-۵۱) به هر کوکو

اختصاص می‌دهیم.

- ۳- شعاع تخم‌گذاری هر کوکو را با توجه به معادلات (۳-۵۰) و (۳-۵۲) مشخص می‌گردد.
- ۴- کوکو ها در لانه های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آنها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند.

- ۵- تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند.
- ۶- تخم کوکو هایی که شناسایی نشده اند پرورش می‌یابند. (جواب‌هایی که فاصله کمی با هم دارند،

ولی نامناسب‌تر هستند.)

- ۷- محل سکونت کوکو های جدید را ارزیابی نمایید.

- ۸- ماکزیمم تعداد کوکو هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند را مشخص نمایید و آنهایی که در مکان های نامناسب هستند را از بین ببرید.
- ۹- کوکو ها را خوشه بندی و بهترین گروه کوکو را به عنوان مکان سکونت هدف مشخص نمایید.
- ۱۰- جمعیت جدید کوکو ها به سمت مکان هدف مطابق رابطه (۳-۴۸) حرکت می کنند.
- ۱۱- اگر شرط توقف برقرار گردیده توقف، در غیر اینصورت به گام ۲ بروید.

۳-۳ شبیه سازی

در این قسمت به منظور نشان دادن اثر طرح پیشنهادی نتایج حاصل از مباحث تئوری در نرم افزار مطلب 7.11.2010b شبیه سازی می شود. برای دستیابی به پایداری سیستم حلقه - بسته و همزمان سازی یا ردیابی موقعیت سیستم در حضور نامعینی در مدل سیستم، کنترل کننده معرفی شده در بخش (۳-۱) را استفاده می کنیم. دینامیک مورد نظر برای رباتهای فرمانده و فرمانبر را ربات با یک درجه آزادی، و به شکل معادلات زیر در نظر می گیریم:

$$\begin{aligned} M_m(q_m)\ddot{q}_m &= F_h + \tau_m \\ M_s(q_s)\ddot{q}_s &= \tau_s - F_e \end{aligned} \quad (۵۳-۳)$$

به طوری که

$$\tau_m = -\hat{M}_m(q_m)\lambda\dot{q}_m + F_m \quad (۵۴-۳)$$

$$\tau_s = -\hat{M}_s(q_s)\lambda\dot{q}_s + F_s \quad (۵۵-۳)$$

از خاصیت ۳ و روابط (۳-۵۲) تا (۳-۵۴)، (۳-۲۲) و (۳-۲۴) سیستم را به شکل زیر می نویسیم:

$$M_m(q_m)\dot{r}_m = Y_m(q_m, \dot{q}_m)\tilde{\theta}_m + F_m + F_h \quad (۵۶-۳)$$

$$M_s(q_s)\dot{r}_s = Y_s(q_s, \dot{q}_s)\tilde{\theta}_s + F_s - F_e \quad (۵۷-۳)$$

به طوری که $\tilde{\theta}_i = \tilde{M}_i = M_i - \hat{M}_i$ و $Y_i(\dot{q}_i) = \lambda\dot{q}_i$ ($i = m, s$) و F_m, F_s طبق روابط (۳-۱۱) و (۳-۱۲) تعریف می شوند. نیروهای عملگر و محیط عبارتند از [۸۴]:

$$F_h = K(1 - q_m) \quad (۵۸-۳)$$

$$F_e = \begin{cases} 0 & , \text{ if } q_s < d_e \\ -B_e\dot{q}_s - K_e(q_s - d_e) & , \text{ if } q_s \geq d_e \end{cases} \quad (۵۹-۳)$$

که B_e ضریب میرایی و K_e, K ضرایب سختی هستند.

پارامترهای استفاده شده برای شبیه سازی ربات ها را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$\lambda = 2, \quad d_e = 1, \quad M_m = M_s = 4,$$

$$K_e = 3000, \quad K = 10, \quad \Gamma = \Lambda = 0.5, \quad B_e = 100, \quad q_s(0) = 0.4, \quad q_m(0) = 0.8, \quad T = 0.5 \text{ s}$$

همچنین مطابق آنچه بیان شد، با استفاده از الگوریتمهای هوشمند، ضرایب K_p و K_d ای (روابط (۳-۱۱) و (۳-۱۲)) در نظر گرفته می شود که معیار (۳-۶۰) را کمینه کند و در نتیجه

همزمان‌سازی یا ردیابی موقعیت بهینه فراهم گردد. در کلیه الگوریتم‌ها سایز جمعیت ۲۰، تعداد تکرار ۳۰ و تعداد اجرا ۱۲ بار و نتایج آنها در ترم‌های بدترین، میانگین، بهترین و انحراف معیار با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

$$J = \int_0^{\infty} \{e_m^2(t) + e_s^2(t)\} dt + 100 \left(\frac{K_p}{K_d} - \lambda \right)^2 \quad (۶۰-۳)$$

به طوری که $100 \left(\frac{K_p}{K_d} - \lambda \right)^2$ به عنوان جریمه‌ای برای قید موجود در نظر گرفته شده است.

نتایج شبیه‌سازی در دو قسمت آورده شده است:

۱- ربات فرمانبر با محیط برخوردی ندارد (حرکت در فضای آزاد).

۲- ربات فرمانبر با محیط برخورد دارد (حرکت تماسی).

۳-۳-۱ حرکت در فضای آزاد

مقایسه نتایج مربوط به کمینه کردن تابع هزینه رابطه (۳-۵۹) در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم در جدول (۳-۱) و همچنین مقایسه نمودار همگرایی الگوریتم‌ها در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. همانطور که از جدول (۳-۱) و شکل (۳-۳) مشاهده می‌شود، الگوریتم کوکوی تطبیقی توانسته نسبت به الگوریتم‌های دیگر کمترین مقدار را برای تابع معیار مورد نظر طراح پیشنهاد دهد. همچنین از شکل (۳-۳) مشاهده می‌شود که الگوریتم کوکوی تطبیقی سریعتر از بقیه الگوریتم‌ها به نتیجه نهایی دست پیدا کرده است.

مقایسه نتایج مربوط به K_p و K_d بدست آمده توسط هر الگوریتم در طی ۱۲ اجرا به ترتیب در جداول (۳-۲) و (۳-۳) آورده شده است. همچنین روند همگرایی این پارامترها به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف به ترتیب در شکل‌های (۳-۴) و (۳-۵) نشان داده شده است. همانطوری که از این جداول و شکل‌ها مشاهده می‌گردد، الگوریتم کوکوی تطبیقی در داده‌های آماری موجود (بدترین، میانگین، بهترین و انحراف معیار) و سرعت همگرایی بهتر از بقیه الگوریتم‌ها عمل کرده است.

حال با استفاده از جداول (۳-۲) و (۳-۳) مقادیر بدست آمده از کوکوی تطبیقی را به دلیل آنکه توانسته کمترین مقدار را برای تابع هزینه پیشنهاد دهد، به عنوان ضرایب کنترل‌کننده در نظر می‌گیریم. همانطور که از شکل (۳-۶) مشاهده می‌شود، مطابق آنچه انتظار می‌رفت، موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر یکدیگر را دنبال می‌کنند و همزمان‌سازی محقق شده است. همچنین نمودار همگرایی پارامترهای ربات‌های فرمانده و فرمانبر به مقادیر واقعی در شکل (۳-۷) نشان داده شده است.

جدول (۱-۳) مقایسه نتایج مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم (حرکت در فضای آزاد)

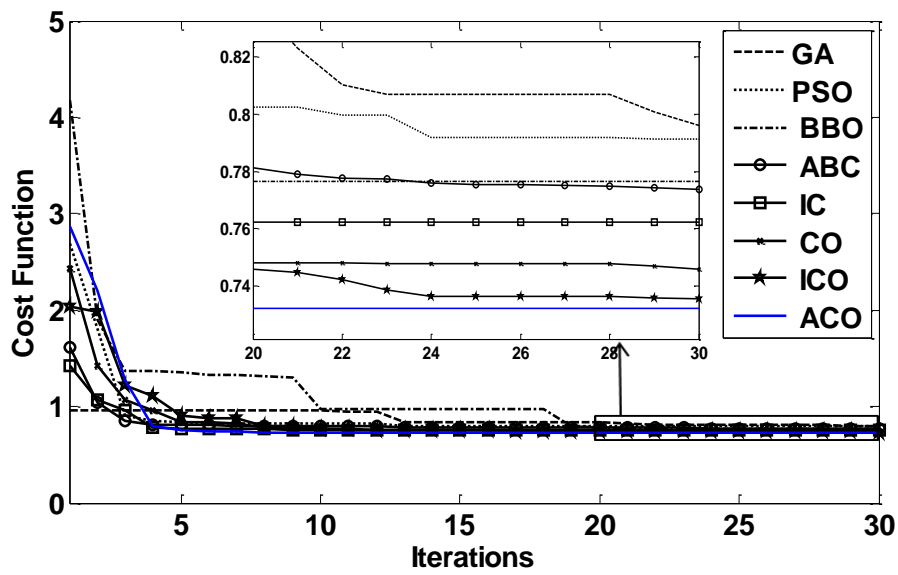
Algorithm	Worst	Mean	Best	SD
GA	0.92477866654	0.79642364416	0.75133083417	0.02624569222
PSO	0.91722334622	0.79365213342	0.74211687645	0.02568776533
BBO	0.70236413999	0.77821431587	0.74761962374	0.01364002127
ABC	0.80379671612	0.77719774598	0.73846029403	0.02451246343
IC	0.79769625831	0.75591474299	0.73215090299	0.02123853162
CO	0.77822174332	0.74532113467	0.73212864444	0.01272334156
ICO	0.75723371516	0.73563129390	0.73213548448	0.00813655674
ACO	0.73216286317	0.73213919106	0.73213548195	7.93709127829E-06

جدول (۲-۳) مقایسه نتایج مربوط به K_p در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم (حرکت در فضای آزاد)

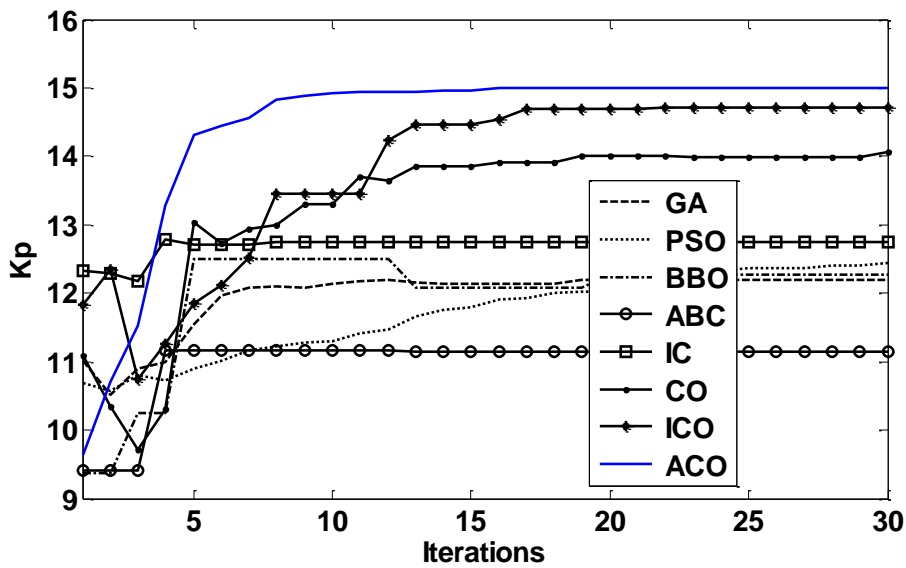
Algorithm	Worst	Mean	Best	SD
GA	9.091998655182	11.20222312812	14.115096173982	1.52532884519
PSO	9.470771333359	12.43598126632	14.253315177332	1.98274402346
BBO	11.83210922518	12.68032570286	13.45327100821	2.52180022173
ABC	11.14822101603	14.05792698672	15	1.42011426448
IC	10.23876738598	12.35109717423	14.41260244005	1.59068883841
CO	12.90127660402	14.01051860726	15	0.69346414970
ICO	14.42544564312	14.74544533365	15	0.034433245
ACO	15	15	15	0

جدول (۳-۳) مقایسه نتایج مربوط به K_d در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم (حرکت در فضای آزاد)

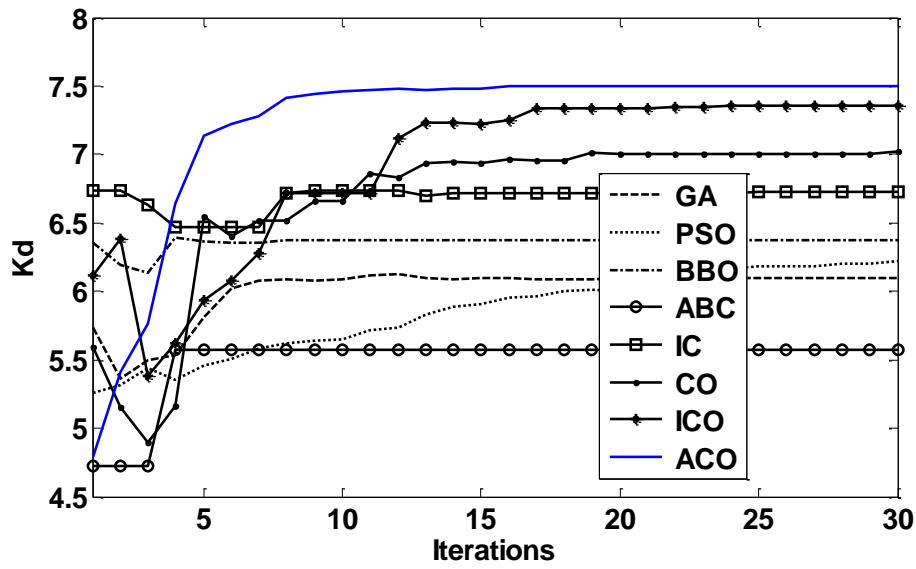
Algorithm	Worst	Mean	Best	SD
GA	4.55287464512	5.519495433313	7.062972185544	0.75160976855
PSO	4.72980844977	6.217929198754	7.130208566832	0.99296570622
BBO	5.91523511539	6.344056355269	6.324814094324	1.54284629500
ABC	5.54419096634	7.024489162298	7.498933710964	0.71241087103
IC	5.11971040347	6.376495700562	7.205531189424	0.79527609874
CO	6.45211349475	7.355015119737	7.500426396824	0.34573515808
ICO	7.45757889190	7.359176633846	7.500421193655	0.82851112399
ACO	7.49844434525	7.500205466915	7.500397795222	7.245251084E-04



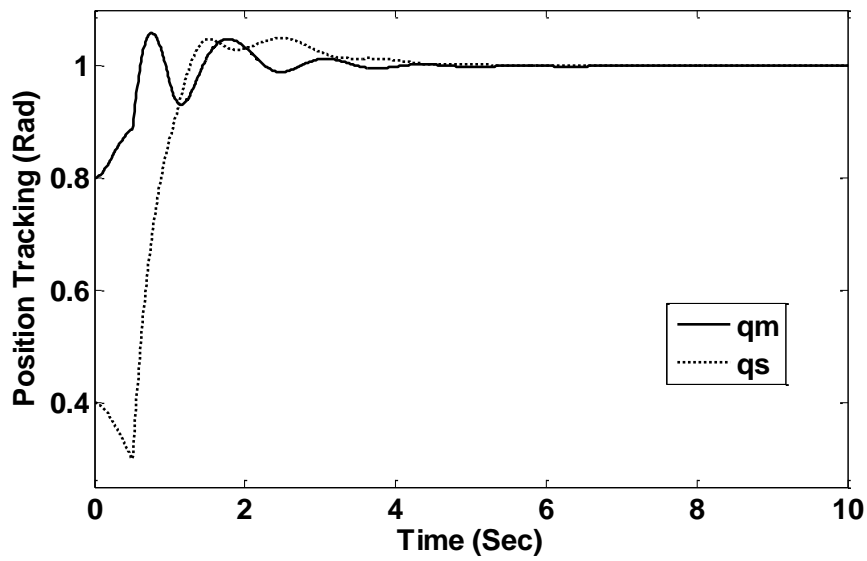
شکل (۳-۳) مقایسه نمودار همگرایی مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم (حرکت در فضای آزاد)



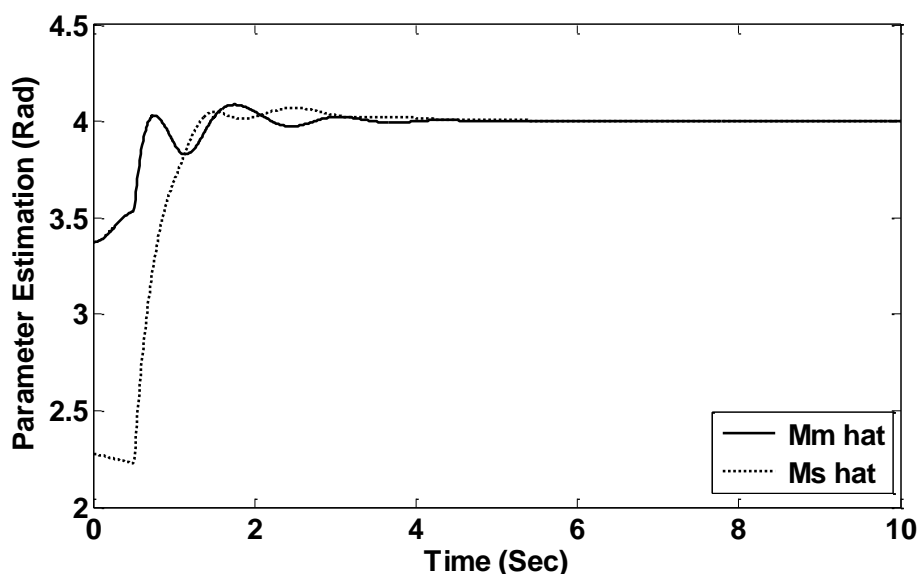
شکل (۴-۳) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_p به مقادیر نهایی در تکرار های مختلف (حرکت در فضای آزاد)



شکل (۵-۳) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_d به مقادیر نهایی در تکرار های مختلف (حرکت در فضای آزاد)



شکل (۶-۳) ردیابی موقعیت ربات های فرمانده و فرمانبر (حرکت در فضای آزاد)



شکل (۷-۳) همگرایی پارامترهای ربات‌های فرمانده و فرمانبر به مقادیر واقعی (حرکت در فضای آزاد)

۳-۳-۲ حرکت تماسی

مقایسه نتایج مربوط به کمینه کردن تابع هزینه رابطه (۳-۵۹) در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم در جدول (۳-۴) و همچنین مقایسه نمودار همگرایی الگوریتم‌ها در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. همانطور که از جدول (۳-۴) و شکل (۳-۸) مشاهده می‌شود، الگوریتم کوکوی تطبیقی توانسته نسبت به الگوریتم‌های دیگر کمترین مقدار را برای تابع معیار مورد نظر طراح پیشنهاد دهد و همچنین از شکل (۳-۸) مشاهده می‌شود که الگوریتم کوکوی تطبیقی سریعتر از بقیه الگوریتم‌ها به نتیجه نهایی دست پیدا کرده است.

مقایسه نتایج مربوط به K_p و K_d بدست آمده توسط هر الگوریتم در طی ۱۲ اجرا به ترتیب در جداول (۳-۵) و (۳-۶) آورده شده است. همچنین روند همگرایی این پارامترها به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف به ترتیب در شکل‌های (۳-۹) و (۳-۱۰) نشان داده شده است. همانطوری که از این جداول و شکل‌ها مشاهده می‌گردد، الگوریتم کوکوی تطبیقی در داده‌های آماری موجود (بدترین، میانگین، بهترین و انحراف معیار) و سرعت همگرایی بهتر از بقیه الگوریتم‌ها عمل کرده است.

حال با استفاده از جداول (۳-۵) و (۳-۶) مقادیر بدست آمده از کوکوی تطبیقی را به دلیل آنکه توانسته کمترین مقدار را برای تابع هزینه پیشنهاد دهد، به عنوان ضرایب کنترل‌کننده در نظر می‌گیریم. مطابق آنچه انتظار می‌رفت، همانطور که از شکل (۳-۱۱) مشاهده می‌شود، موقعیت ربات فرمانبر از فرمانده پیروی کرده و همزمان‌سازی محقق شده است. همچنین شکل (۳-۱۲) ردیابی نیرو را در حرکت تماسی نشان می‌دهد. نمودار همگرایی پارامترهای ربات‌های فرمانده و فرمانبر به مقادیر واقعی در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است.

جدول (۳-۴) مقایسه نتایج مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم (حرکت تماسی)

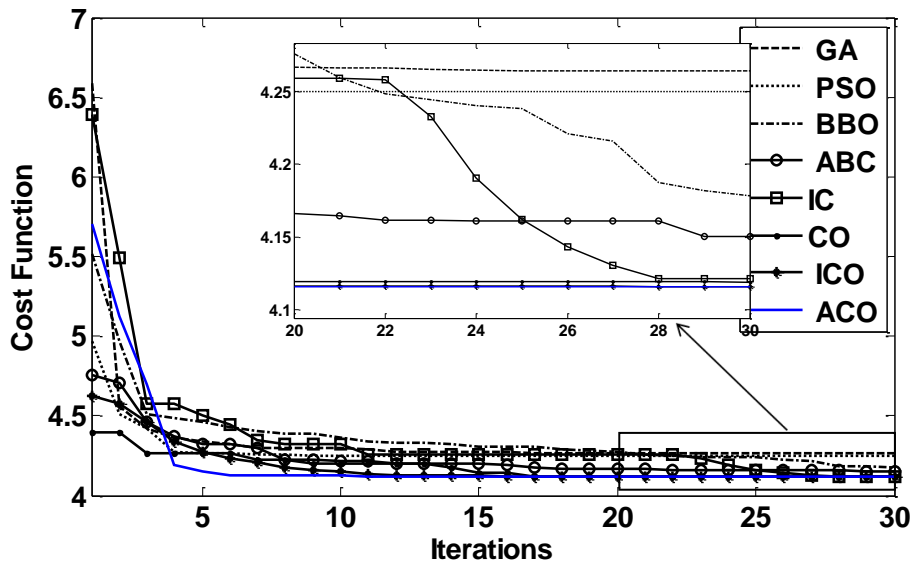
Algorithm	Worst	Mean	Best	SD
GA	4.44385254437	4.26433275538	4.16870915567	0.011521066643
PSO	4.26646823351	4.25841617542	4.14867785654	0.041844543322
BBO	4.47609611736	4.17043892895	4.12886423220	0.112669497311
ABC	4.38918394387	4.16119459131	4.12602643361	0.012783780028
IC	4.21468235892	4.15027073781	4.11585645165	0.030526217178
CO	4.11685190779	4.11585899413	4.11573298985	3.25341820614E-04
ICO	4.11626155652	4.11575126659	4.11573272318	2.63329730518E-05
ACO	4.11573768043	4.11573399157	4.11573298977	1.48421885777E-06

جدول (۳-۵) مقایسه نتایج مربوط به K_p در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم (حرکت تماسی)

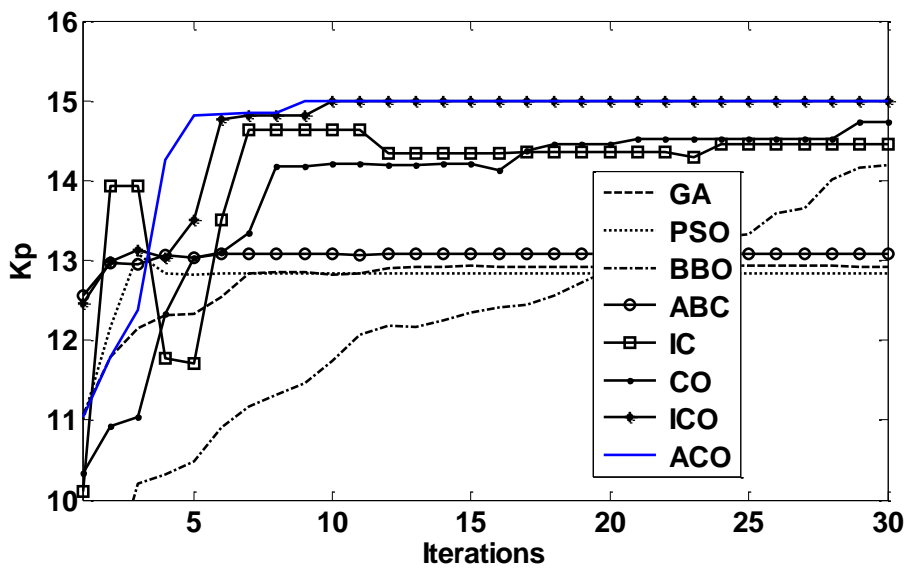
Algorithm	Worst	Mean	Best	SD
GA	10.44677043323	12.82480723753	12.299810327535	1.611864435491
PSO	13.03157413335	12.97806324456	12.563441246763	0.571265433744
BBO	14.04215675001	13.19090766164	13.498321042164	0.013172964121
ABC	9.984867648555	14.17747583429	14.808630313258	1.570205685578
IC	13.65265948358	14.33025202006	15	0.465191358961
CO	13.28645400911	14.51565498722	15.734786445671	0.003246761175
ICO	15	15	15	0
ACO	15	15	15	0

جدول (۳-۶) مقایسه نتایج مربوط به K_d در طی ۱۲ بار اجرای هر الگوریتم (حرکت تماسی)

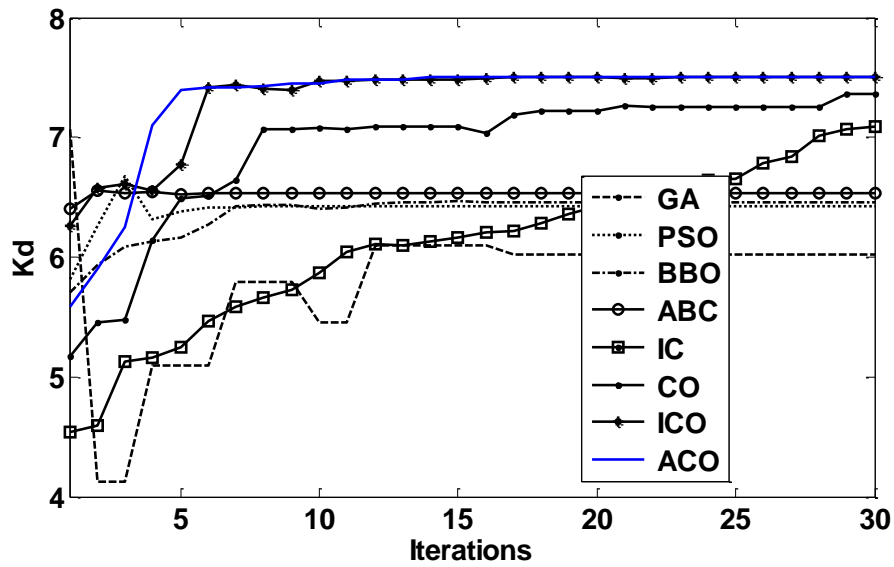
Algorithm	Worst	Mean	Best	SD
GA	5.22216933418	6.15990517541	7.13770086509	0.80324687333
PSO	6.47946612865	6.58724535668	7.28718524468	0.29145607434
BBO	7.02391593242	6.49189604076	7.24592231839	0.12443714683
ABC	4.99459479530	6.53431878116	7.41137195305	0.78398435712
IC	6.79693507477	7.16450348631	7.49528174890	0.25606607537
CO	7.48225733589	7.31964411615	7.49995548154	0.00332551395
ICO	7.50628865508	7.50075434156	7.49166784457	0.00534245469
ACO	7.50003046974	7.50006888534	7.50007438690	4.35181205967E-04



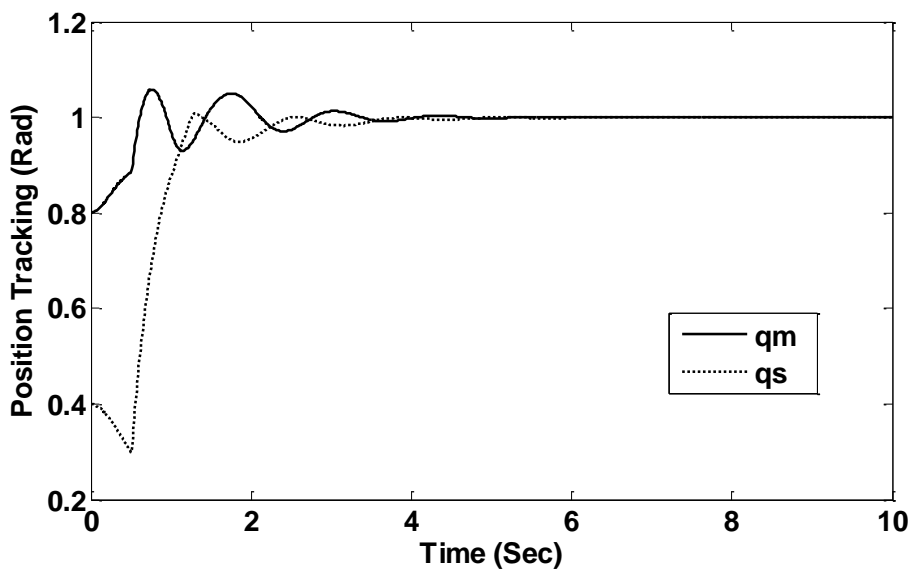
شکل (۳-۸) مقایسه نمودار همگرایی مربوط به کمینه کردن تابع هزینه در ۱۲ طی بار اجرای هر الگوریتم (حرکت تماسی)



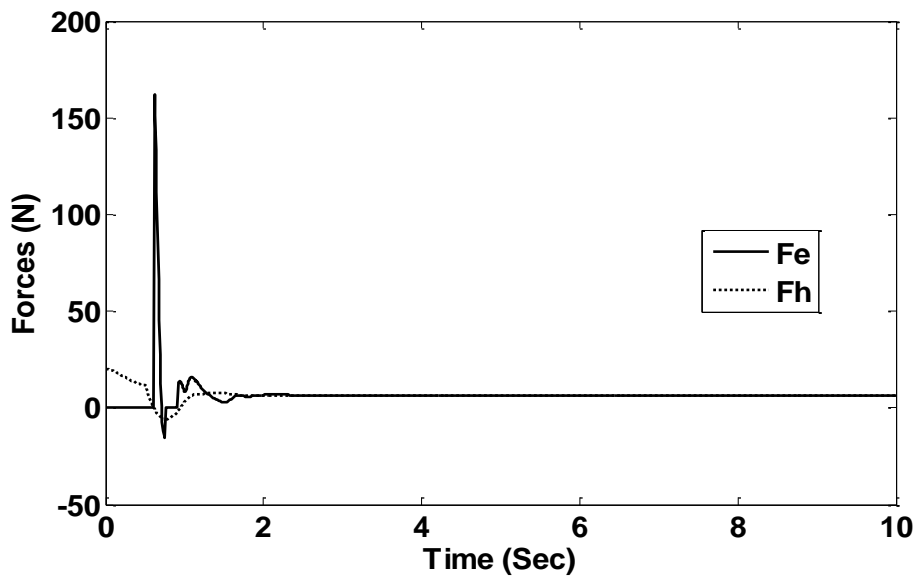
شکل (۳-۹) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_p به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف (حرکت تماسی)



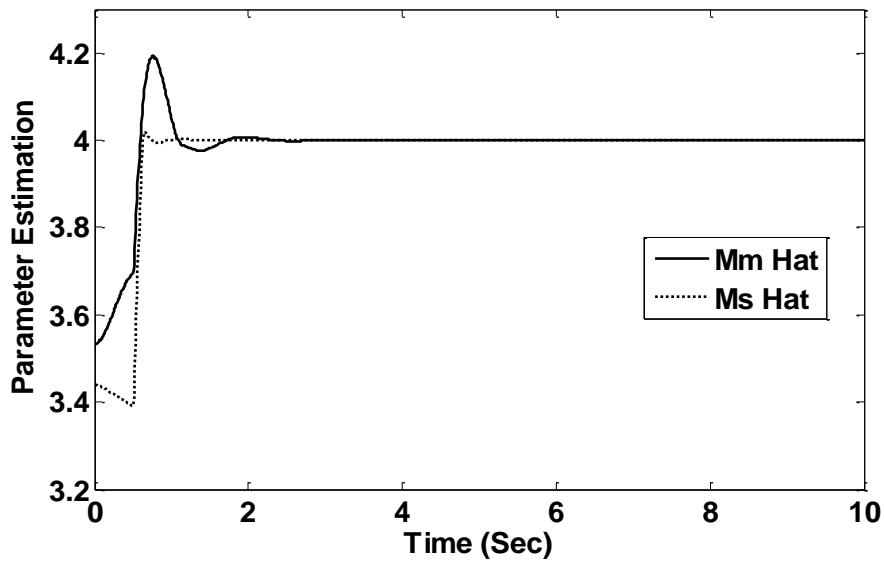
شکل (۱۰-۳) مقایسه روند همگرایی پارامتر K_d به مقادیر نهایی در تکرارهای مختلف



شکل (۱۱-۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر (حرکت تماسی)



شکل (۱۲-۳) ردیابی نیروی ربات‌های فرمانده و فرمانبر (حرکت تماسی)



شکل (۱۳-۳) همگرایی پارامترهای ربات‌های فرمانده و فرمانبر به مقادیر واقعی (حرکت تماسی)

فصل ۴

ساختار پیشنهادی برای سامانه‌های کارکرد از راه دور در حضور زمان تأخیر متغیر با زمان

در این فصل نوع دیگری از این سامانه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد که تأخیر موجود در کانال ارتباطی متغیر با زمان است. در این سامانه با استفاده از تبدیل موجک و مزیت آن در حذف نویز، با ترم متغیر با زمان به صورت نویزی در تأخیر موجود در کانال ارتباطی برخورد می‌شود، و سیستمی معرفی می‌شود که علی‌رغم وجود ترم متغیر با زمان پایدار است. همچنین با استفاده از روش کنترل یادگیر تکرارشونده^۱ ساختاری برای این سامانه در نظر گرفته می‌شود که علاوه بر تضمین پایداری سیستم و صفر شدن خطای ردیابی با افزایش تکرارها، با در نظر گرفتن سیگنال کنترلی سامانه پایدار شده توسط تبدیل موجک به عنوان سیگنال کنترل اولیه‌ی آن، ردیابی موقعیت با افزایش تکرارها به طور مطلوبتری نسبت به قبل محقق خواهد شد. دیدگاه‌ها و اهداف در این فصل به صورت زیر ارائه می‌شود:

۱- مقدمات (مدل کردن سامانه‌ی کارکرد از راه دور و اهداف کنترلی)

۲- مروری بر تبدیل موجک

۳- مروری بر کنترل یادگیر تکرارشونده

۴- ساختارهای کنترلی پیشنهادی

۵- شبیه‌سازی

۴-۱ مقدمات

در سراسر این فصل تعریف زیر را بکار می‌بریم:

$$\mathbb{R} := (-\infty, \infty)$$

$$\mathbb{R}^+ := (0, \infty)$$

$$\mathbb{R}_0^+ := [0, \infty)$$

۱. نشاندهنده نرم اقلیدسی و $\|\cdot\|_2$ نرم L_2 را نشان می‌دهد. به منظور ساده سازی در نوشتار، آرگومان کلیه سیگنال‌های وابسته به آن آرگومان حذف می‌شود (مثلاً $\dot{q} \equiv \dot{q}(t)$) به غیر از سیگنال‌هایی که تاخیر زمانی را نشان می‌دهند (مثلاً $\dot{q}(t-T)$ سیگنال دارای تاخیر زمانی ثابت را نشان می‌دهد و $\dot{q}(t-T(t))$ سیگنال با تاخیر زمانی متغیر با زمان را نشان می‌دهد). و به دلیل مشابه آرگومان سیگنال‌های داخل انتگرال نیز حذف می‌شود و فرض می‌شود که این آرگومان همان آرگومان انتگرال‌گیری است مگر اینکه خلاف آن ذکر شود (مثلاً $\int_0^t X d\sigma \equiv \int_0^t X(\sigma) d\sigma$).

۴-۱-۱ مدل دینامیکی سامانه کارکرد از راه دور

ربات‌های فرمانده و فرمانبر طبق معادلات زیر فرمول بندی می‌شوند.

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + g_m(q_m) = \tau_m^* - \tau_h \quad (1-4)$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + g_s(q_s) = \tau_e - \tau_s^* \quad (2-4)$$

که در آن اندیس‌های $\mathbf{i} = \{m, s\}$ به ترتیب نشان‌دهنده ربات‌های فرمانده و فرمانبر، و

$$M_i(q_i) \in \mathbb{R}^{n \times n} \text{ به ترتیب موقعیت، سرعت و شتاب مفاصل را مشخص می‌کنند. } q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i \in \mathbb{R}^n$$

^۱Iterative learning control

ماتریس‌های اینرسی، $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس‌های اثر نیروهای کوریولیسی و گریز از مرکز، $g_i(q_i) \in \mathbb{R}^n$ بردار نیروهای گرانشی، $\tau_i \in \mathbb{R}^n$ سیگنال‌های کنترلی و در نهایت $\tau_h, \tau_e \in \mathbb{R}^n$ به ترتیب نیروی وارده از محیط و نیروی وارده از شخص به ربات‌ها هستند.

این ماتریس‌ها دارای خواص زیر می‌باشند:

۱- ماتریس اینرسی $M_i(q_i)$ ماتریسی مثبت معین متقارن که شرایط زیر را دارا است:

$$\lambda_d I_{n \times n} \leq M_i(q_i) \leq \lambda_D I_{n \times n} \quad (3-4)$$

λ_d و λ_D به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر مقادیر ویژه ماتریس M را نشان می‌دهند.

۲- با یک تعریف مناسب از ماتریس $C(q, \dot{q})$ ماتریس $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ پادمتقارن خواهد بود.

۲-۱-۴ فرضیات کلی

طرح کنترلی ارائه شده در این فصل بر مبنای فرضیات زیر استوار است:

۱- عملگر انسانی و محیط عملیاتی غیرفعالند.

۲- $k_{m,s} \in \mathbb{R}_0^+$ وجود دارد به طوری که:

$$\int_0^t \dot{q}_m^T \tau_h d\sigma \geq -k_m \quad (4-4)$$

$$-\int_0^t \dot{q}_s^T \tau_e d\sigma \geq -k_s \quad (5-4)$$

۳- به منظور ساده سازی روی هدف اصلی این فصل، نیروهای گرانشی توسط سیگنال‌های

کنترلی به

شکل زیر جبران می‌شوند:

$$\tau_m^* = \tau_m + g_m(q_m) \quad (6-4)$$

$$\tau_s^* = \tau_s - g_s(q_s) \quad (7-4)$$

بنابر این مدل دینامیکی این سامانه به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m = \tau_m - \tau_h \quad (8-4)$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s = \tau_e - \tau_s \quad (9-4)$$

۴- زمان تاخیر متغیر با زمان دارای حد بالا و پایین مشخص به شکل زیر است:

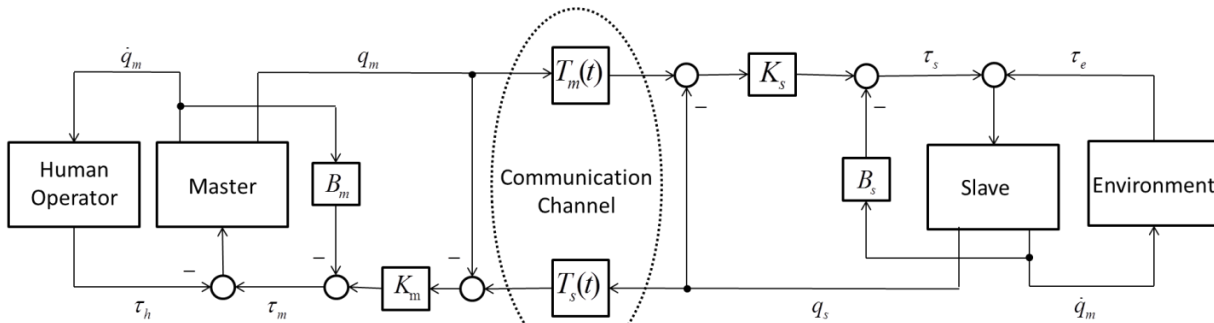
$$0 \leq T_i(t) \leq T_i^* < \infty \quad (10-4)$$

۳-۱-۴ ساختار کنترلی

در [۸۵] اسپانگ برای کنترل این سامانه‌ها طرح‌های کنترلی زیر را پیشنهاد کرده است:

۱- کنترل‌کننده شبه تناسبی: در این کنترل‌کننده، نیروی کنترلی اعمالی در دو طرف

فرمانده و فرمانبر متناسب هستند با خطای ردیابی به علاوه ضریب تزریقی میرایی:



شکل (۱-۴) ساختار کنترلی شبه تناسبی

$$\tau_m = K_m [q_s(t - T_s(t)) - q_m] - B_m \dot{q}_m \quad (11-4)$$

$$\tau_s = K_s [q_s - q_m(t - T_m(t))] + B_s \dot{q}_s \quad (12-4)$$

به گونه ای که $\{K_i, B_i\} \in R^+$ و بهره‌های کنترلی باید در رابطه زیر صدق کند:

$$4B_m B_s > (T_m^{*2} + T_s^{*2}) K_m K_s \quad (13-4)$$

که در آن T_m^* و T_s^* به ترتیب حداکثر زمان تاخیر (با وجود ترم متغیر با زمان) موجود در کانال ارتباطی می باشند.

در این صورت خطای موقعیت محدود و سیستم پایدار خواهد بود.

$$|q_m - q_s(t - T_s(t))| \in L_\infty \quad (14-4)$$

در صورتی که نیروهای عملگر و محیط صفر باشند، ردیابی موقعیت محقق می شود و سیستم به طور مجانبی پایدار خواهد بود، یعنی

$$|q_m - q_s(t - T_s(t))| \rightarrow 0, \quad t \rightarrow \infty \quad (15-4)$$

ساختار کنترلی به شکل (۱-۴) خواهد بود.

۲- کنترل کننده شبه تناسبی - مشتقگیر: اگر سیگنال کنترلی شامل عبارتی از مشتق

خطای سامانه نیز باشد، در این صورت به آن کنترل کننده شبه تناسبی - مشتقگیر گویند. در این صورت نیروهای کنترلی اعمالی در دو طرف فرمانده و فرمانبر به شکل زیر هستند:

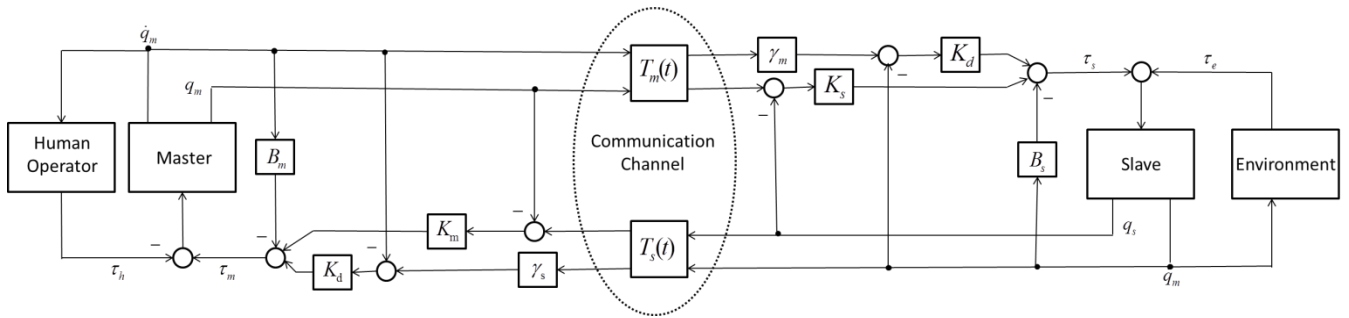
$$\tau_m = K_d [\gamma_s \dot{q}_s(t - T_s(t)) - \dot{q}_m] + K_m [q_s(t - T_s(t)) - q_m] - B_m \dot{q}_m \quad (16-4)$$

$$\tau_s = K_d [\dot{q}_s - \gamma_m \dot{q}_m(t - T_m(t))] + K_s [q_s - q_m(t - T_m(t))] + B_s \dot{q}_s \quad (17-4)$$

که $B_s \geq B_m$ ، $K_s \geq K_m$ ، $\gamma_i^2 = 1 - \dot{T}_i(t)$ ، $\{K_i, K_d, B_i\} \in R^+$

همچنین باید بهره‌های کنترلی در رابطه (۱۳-۴) صدق کنند. علاوه بر این

$$|\dot{T}_i(t)| < 1 \quad (18-4)$$



شکل (۲-۴) ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر

در اینصورت مانند کنترل کننده شبه تناسبی خطای موقعیت محدود و سیستم پایدار بوده و رابطه (۴-۱۴) برقرار خواهد بود. و در صورتی که نیروهای عملگر و محیط صفر باشند، ردیابی موقعیت محقق می شود و سیستم به طور مجانبی پایدار خواهد بود، و رابطه (۴-۱۵) محقق می شود. ساختار کنترلی به شکل (۲-۴) خواهد بود.

۲-۴ مروری بر تبدیل موجک^۱

۱-۲-۴ تاریخچه و آشنایی

در واقع برای آنکه یک تابع $F(x)$ به شیوه ای ساده و فشرده نمایش داده شود فوریه اساسا ثابت کرد که می توان تابع را به کمک مجموعه ای نامتناهی از توابع متعامد ساخت. به عبارت دیگر فوریه نشان داد که یک تابع $F(x)$ را می توان به وسیله حاصل جمع بی نهایت تابع سینوسی و کسینوسی به شکل $\sin(ax)$ و $\cos(ax)$ نمایش داد. پایه های فوریه به صورت ابزار هایی اساسی، با کاربردهای فوق العاده متواتر در علوم، در آمده اند، زیرا برای نمایش انواع متعددی از توابع فیزیکی فراوان بکار می روند. با گذشت زمان ضعف پایه های فوریه نمایان شد مثلا دانشمندان پی بردند پایه های فوریه و نمایش توابع سینوس وار در مورد سیگنال های پیچیده نظیر تصاویر، نه تنها ایده آل نیستند بلکه از شرایط مطلوب دورند، بعنوان مثال به شکل کارآمدی قادر به نمایش ساختارهای گذرا نظیر مرزهای موجود در تصاویر نیستند. همچنین آنها متوجه شدند تبدیل فوریه فقط برای توابع پایه مورد استفاده قرار می گیرد و برای توابع غیر پایه کار آمد نیست. (البته در سال ۱۹۴۶ با استفاده از توابع پنجره ای، که منجر به تبدیل فوریه ی پنجره ای شداین مشکل حل شد).

در سال ۱۹۰۹ هار^۲ اولین کسی بود که به موجک ها اشاره کرد. در سال های ۱۹۳۰ ریاضیدانان به فکر اصلاح پایه های فوریه افتادند. و بعد از آن در سال ۱۹۷۰ یک ژئوفیزیکدان فرانسوی به نام ژان مورله متوجه شد که پایه های فوریه بهترین ابزار ممکن در اکتشافات زیر زمین نیستند. در سال ۱۹۸۰ ایومیر ریاضیدان فرانسوی، نخستین پایه های موجکی متعامد را کشف کرد. در همین سال ها مورله مفهوم موجک و تبدیل موجک را بعنوان یک ابزار برای آنالیز سیگنال زمین لزره وارد کرد و گراسمن فیزیکدان نظری فرانسه نیز فرمول وارونی را برای تبدیل موجک بدست آورد.

^۱Wavelet transfer
^۲Haar

در سال ۱۹۷۶ میرو و مالت از پایه های موجک متعامد توانستند آنالیز چند تفکیکی را بسازند و تجزیه موجک ها و الگوریتم های بازسازی را با بکار بردن آنالیز چند تفکیکی بوجود آورد. در سال ۱۹۹۰ مورنزی همراه با آنتوان موجک ها را به دو بعد و سپس به فضاهایی با ابعاد دیگر گسترش دادند و بدین ترتیب بود که آنالیز موجکی پایه گذاری گردید.

آنالیز موجک^۱ یکی از دستاوردهای نسبتاً جدید و هیجان انگیز ریاضیات محض که مبتنی بر چندین دهه پژوهش است، امروزه کاربردهای مهمی در بسیاری از رشته های علوم و مهندسی یافته و امکانات جدیدی برای درک جنبه های ریاضی آن و نیز افزایش کاربردهایش فراهم شده است. در آنالیز موجک هم مانند آنالیز فوریه با بسط تابع ها سروکار داریم ولی این بسط برحسب «موجک ها» انجام می شود. موجک تابع مشخص مفروضی با میانگین صفر است و بسط برحسب انتقالهای این تابع انجام می گیرد. هر کاربردی را که مبتنی بر تبدیل سریع فوریه است می توان با استفاده از موجک ها فومول بندی کرد و اطلاعات فضایی (یا زمانی) موضعی بیشتری بدست آورد. بطور کلی، این موضوع بر پردازش سیگنال و تصویر و الگوریتم های عددی سریع برای محاسبه ی عملگرهای انتگرالی اثر می گذارد. آنالیز موجک حاصل ۵۰ سال کار ریاضی (نظریه ی لیتلود - پیلی و کالدرون - زیگموند) است که طی آن، با توجه به مشکلاتی که در پاسخ دادن به ساده ترین پرسش های مربوط به تبدیل فوریه وجود داشت، جانشینهای انعطاف پذیر ساده تری ارائه شدند [۸۶ و ۸۷].

۴-۲-۲ کاربرد تبدیل موجک در حذف نویز

امروزه تبدیل موجک به یکی از مهم ترین ابزارها در زمینه تحلیل های عددی و پردازش سیگنال و تصویر تبدیل شده است. با توجه به خواص تبدیل موجک، کارآیی این تبدیل در حذف نویز نیز به اثبات رسیده است [۸۸]. هدف اصلی در حذف نویز این است که سیگنال بازسازی شده تا حد امکان به سیگنال اصلی نزدیک بوده و در عین حال خواص اصلی سیگنال چون میزان همواری آن نیز حفظ شود. اولین گامهای مؤثر در زمینه حذف نویز در حوزه موجک توسط دونوهو^۲ و جانستون^۳ با معرفی روش کاهش اندازه ضرایب موجک^۴ برداشته شد [۸۹ و ۹۰]. در این روش ابتدا آستانه ای سراسری^۵ - که برای تمام ضرایب موجک در زیرباندهای تبدیل مقداری واحد در نظر گرفته می شود - محاسبه شده، سپس بر روی ضرایب تفصیل^۶ تبدیل موجک، عمل آستانه گذاری انجام می شود. بدین معنی که ضرایب کوچک تر از آستانه، صفر شده و ضرایب بزرگ تر نیز طبق قانون آستانه گذاری تغییر می کند. قانون آستانه گذاری در روش پیشنهادی دونوهو می تواند آستانه گذار سخت یا نرم باشد. در آستانه گذار سخت، ضرایب با اندازه بزرگ تر از آستانه بدون تغییر باقی می ماند ولی در آستانه گذار نرم، از اندازه ضرایب بزرگ تر از آستانه، به مقدار آستانه کاسته می شود.

^۱Wavelet analysis

^۲Donoho

^۳Johnstone

^۴Wavelet shrinkage

^۵Universal threshold

^۶Details

زمینه دوم توسعه روش‌های حذف نویز با استفاده از موجک، شامل بررسی اثر آستانه‌گذاری های مختلف است. هر کدام از آستانه گذارهای سخت و نرم که در روش پیشنهادی دونهو استفاده شدند، دارای مزایا و معایبی هستند. به عنوان مثال تخمین آستانه گذار نرم دارای بایاس بزرگ تری نسبت به آستانه گذار سخت است، زیرا این آستانه گذار اندازه ضرایب بزرگ تر از آستانه را به مقدار آستانه کاهش می دهد. از سوی دیگر، با توجه به ناپیوستگی موجود در آستانه گذار سخت، تخمین این آستانه گذار واریانس بزرگ تری داشته و می تواند ناپایدار گردد، پس نسبت به تغییرات جزئی در داده‌ها حساس است. برای رفع این مشکلات آستانه‌گذاری‌هایی چون semi-soft نام برد که مصالحه ای بین توابع سخت و نرم می باشد [۹۱-۹۶].

حذف نویز مبتنی بر تبدیل موجک براساس خواص اولیه‌ی این تبدیل استوار است. یکی از این خواص، خاصیت فشرده سازی انرژی سیگنال است. خاصیت فشرده سازی بیان می کند که عمده انرژی سیگنال تنها در چند ضریب از ضرایب موجک متمرکز بوده و بقیه ضرایب عمدتاً دارای مقدار ناچیزی هستند. این در حالی است که انرژی نویز بین تمام ضرایب در حوزه موجک گسترده می شود. لذا با انتخاب آستانه مناسب می توان مقدار زیادی از نویز را حذف کرد، در حالی که ویژگی های مهم سیگنال باقی بماند.

بطور کلی روشهای مبتنی بر موجک برای حذف نویز از سه مرحله تشکیل شده است:
 ۱- تجزیه^۱: انتخاب تابع موجک و تجزیه به J سطح. دو خانواده اصلی موجک یعنی دابچیز^۲ (db) و

سیملت^۳ (sym) برای حذف نویز و بازسازی سیگنال وجود دارد.
 ۲- حذف نویز^۴: در ضرایب فرکانس بالای موجک. به اینصورت که برای هر سطح تجزیه، سطح آستانه

انتخاب شده و ضرایب فرکانس بالا اعمال می شود.
 ۳- بازسازی^۵: محاسبه بازسازی بر اساس ضرایب تقریبی اصلی از سطح J با تغییر ضرایب فرکانس بالا از ۱ تا سطح J .

به عبارتی برای حذف نویز باید انتخاب تابع موجک و سطح تجزیه، برآورد و تخمین سطح آستانه مورد بررسی قرار گیرند [۹۲-۹۴].

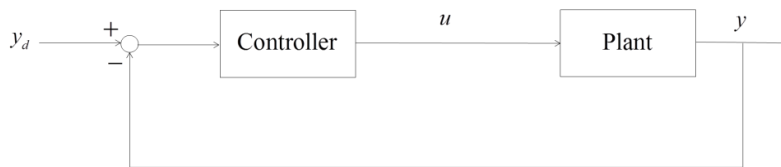
جدول (۱-۴) خانواده های حذف نویز در تبدیل موجک

Wavelet family	Wavelet function with order
Daubechies	db2, db4, db5, db6, db7, db8, db9, db10
Symlets	sym3, sym4, sym5, sym6, sym8

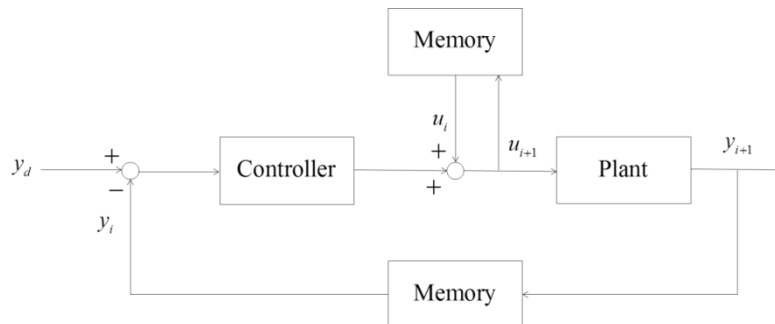
^۱ Decomposition
^۲ Daubechies
^۳ Symlets
^۴ Denoising
^۵ Discreate wavelet transform

۳-۴ مروری بر کنترل یادگیر تکرارشونده

یادگیری یکی از قابلیت های موجودات زنده به خصوص انسان می باشد. بشر تلاش می کند تا قدرت یادگیری را به سیستم های مهندسی نیز بسط دهد. کنترل یادگیر تکرار شونده یک رویکرد مؤثر در کنترل فرآیندها و سیستم هایی می باشد که به صورت تکراری وظایفی را انجام می دهند [۹۵ و ۹۶]. هدف از کنترل اینگونه فرآیندها و سیستم ها اصلاح و ترمیم ورودی آنها از یک تکرار به تکرار بعدی به منظور کاهش و از بین بردن فاصله بین خروجی آنها از مسیر مطلوب داده شده است [۹۷ و ۹۸]. ضابطه ای که طبق آن ورودی سیستم از یک تکرار به تکرار بعدی اصلاح می گردد، قانون کنترل یادگیر تکرارشونده نامیده می شود [۹۹]. شرح کاملی از قانون های کنترل یادگیر تکرارشونده مرسوم خطی و غیر خطی در [۹۷] وجود دارد. شرایط همگرایی یک قانون یادگیر تکرارشونده تطبیقی در [۱۰۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۰۱] روشی بر مبنای نظریه سیستم های دو بعدی برای طراحی کنترل یادگیر تکرار شونده ارائه شده است. در [۱۰۲] یک رویکرد جبری برای طراحی سیستم های کنترل یادگیر تکرار شونده پیشنهاد گردیده است. در [۱۰۳] یک قانون کنترل یادگیر تکرارشونده خود تنظیم^۱ برای کنترل سیستم های متغیر با زمان ارائه شده است. اساس سیستم های کنترل یادگیر تکرارشونده بدین صورت است که در آنها در حین اجرای الگوریتم کنترل، در تکرار i ام، برخی اطلاعات نظیر خطای بین خروجی کنترل فرآیند تحت کنترل و خروجی ایده آل در حافظه سیستم ذخیره می شود. از این اطلاعات ذخیره شده به منظور کاهش خطا و بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته برای تعیین ورودی فرآیند طبق قانونی که الگوریتم یادگیری نامیده می شود، در تکرار $i+1$ استفاده می گردد. در نهایت بعد از چند تکرار ورودی مناسب فرآیند به طوری که منجر به ایجاد خروجی مطلوب می گردد بدست می آید. شکل (۳-۴) و شکل (۴-۴) به ترتیب یک حلقه کنترلی ساده و یک حلقه کنترلی یادگیر تکرارشونده ساده را نشان می دهند.



شکل (۳-۴) یک حلقه کنترلی ساده



شکل (۴-۴) یک حلقه کنترلی یادگیر تکرارشونده ساده

^۱self-tuning

قضیه ۱: سیستم دینامیکی با معادلات حالت و خروجی زیر را در نظر بگیرید [۹۵ و ۱۰۲-]

: [۱۰۵]

$$\dot{X} = f(X, t) + Bu \quad (۱۹-۴)$$

$$Y = CX \quad (۲۰-۴)$$

که در آن B و C به ترتیب ماتریس های ورودی و خروجی، X بردار متغیرهای حالت سیستم و $f(X, t): \mathbb{R}^n \times [0, t_f] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ماتریس غیرخطی از بردار متغیرهای حالت و زمان است. تعریف می کنیم:

$$\dot{e}_i(t) = \dot{Y}_d(t) - \dot{Y}_i(t) \quad (۲۱-۴)$$

قانون کنترلی یادگیر تکرارشونده (۲۲-۴) (قانون کنترل یادگیر تکرارشونده نوع D) را در نظر می گیریم که به سیستم اعمال شده است.

$$u_{i+1}(t) = u_i(t) + \beta \dot{e}_i(t), \quad \forall t \in [0, t_f] \quad (۲۲-۴)$$

که در آن $u_i(t)$ ورودی کنترل اولیه است که می تواند دلخواه (حتی صفر) یا نزدیک به سیگنال کنترلی مطلوب، برای سیستم باشد. برای سیستم توصیف شده با روابط (۱۹-۴) و (۲۰-۴) و قانون کنترل یادگیر تکرارشونده بر طبق رابطه (۲۲-۴) و با در نظر گرفتن شرایط

$$\rho < 1 \text{ for } \forall t \in [0, t_f] \quad (۲۳-۴)$$

که در آن

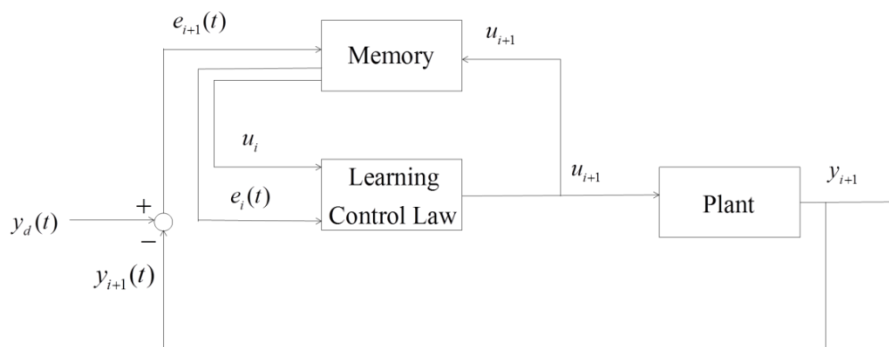
$$\rho = \|I_m - CB\beta\|_\infty \quad (۲۴-۴)$$

آنگاه خواهیم داشت:

$$\|e_{i+1}\|_\lambda \leq \rho \|e_i\|_\lambda \quad (۲۵-۴)$$

که $\|e_{i+1}\|_\lambda$ نرم λ ی خطای ردیابی در تکرار $i+1$ و $\|e_i\|_\lambda$ نرم λ ی خطای ردیابی در تکرار i است.

علاوه بر این، خطای ردیابی برای مقادیر به اندازه کافی بزرگ λ وقتی $i \rightarrow \infty$ ، به صفر میل خواهد کرد. بنابراین اگر بهره یادگیری (β) طوری تعریف شود که $\rho < 1$ ، هنگامی که $i \rightarrow \infty$ خطای ردیابی در تکرار i ام از خطای ردیابی در تکرار $i+1$ کمتر خواهد بود. شکل (۵-۴) طرح این قانون یادگیر تکرارشونده را روی یک سیستم نمونه نشان می دهد.



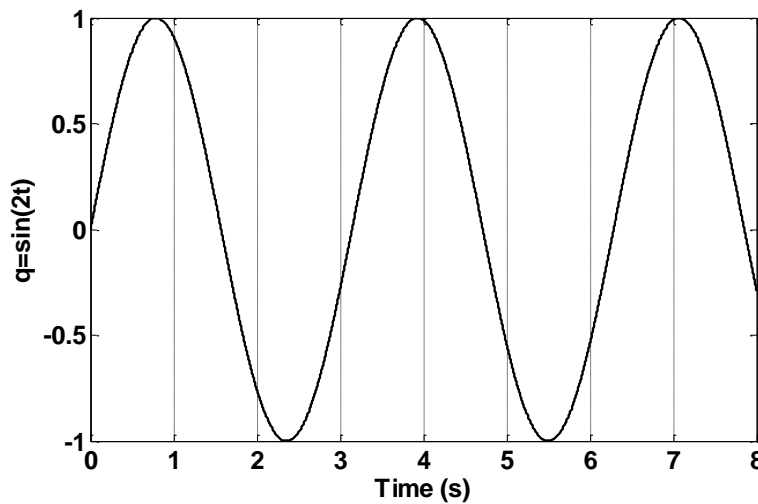
شکل (۵-۴) طرح قانون کنترل یادگیرنده برای سیستم

۴-۴ ساختارهای کنترلی پیشنهادی

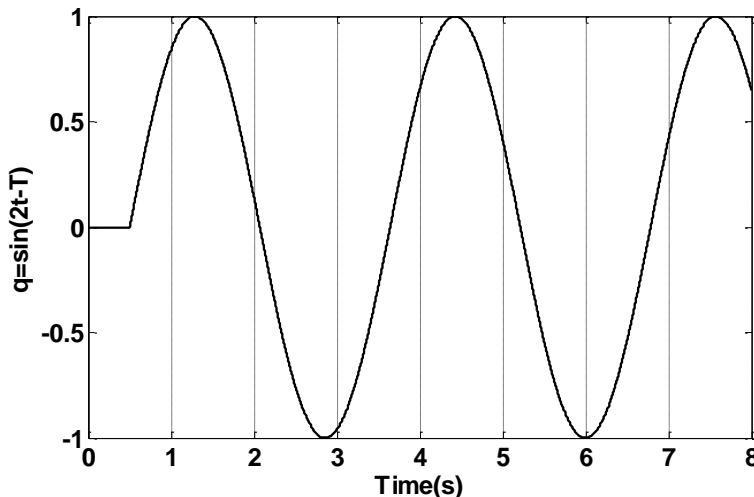
در سیستم‌های کارکرد از راه دور سیگنالی که از فرمانده به فرمانبر و یا بالعکس می‌رسد به دلیل وجود کانال ارتباطی دارای تأخیر بوده که این تأخیر زمانی می‌تواند ثابت یا متغیر با زمان باشد که وجود تأخیر متغیر با زمان، سیستم را پیچیده‌تر می‌کند. برای مثال شکل (۴-۶) یک سیگنال سینوسی بدون تأخیر زمانی، و شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) به ترتیب، یک سیگنال سینوسی دارای تأخیر زمانی ثابت $T_1(t)$ و یک سیگنال سینوسی دارای تأخیر متغیر با زمان $T_2(t)$ فرستاده شده از سمت فرمانده به فرمانبر را نشان می‌دهند.

$$T_1(t)=0.5 \quad (۴-۲۶)$$

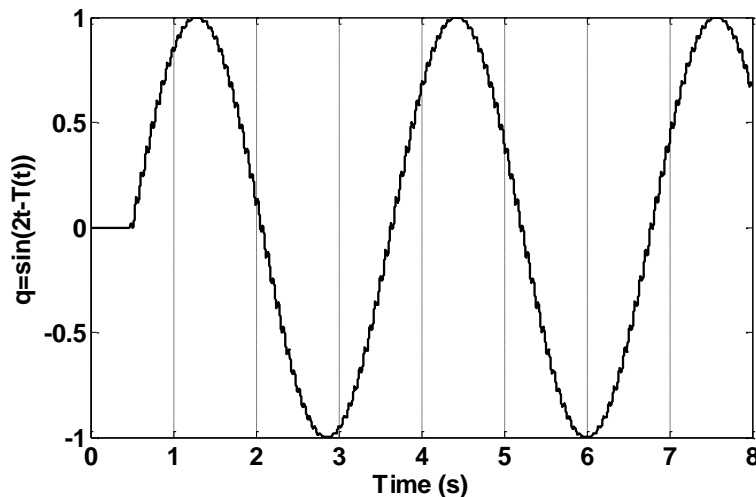
$$T_2(t)=0.5+0.02\sin(100t) \quad (۴-۲۷)$$



شکل (۴-۶) سیگنال سینوسی تولیدی توسط فرمانده بدون تأخیر زمانی (سیگنال اصلی)



شکل (۴-۷) سیگنال سینوسی فرستاده شده از فرمانده به فرمانبر دارای تأخیر زمانی ثابت $T_1(t)=0.5$



شکل (۸-۴) سیگنال سینوسی فرستاده شده از فرمانده به فرمانبر دارای تاخیر متغیر با زمان

$$T_2(t) = 0.5 + 0.02 \sin(100t)$$

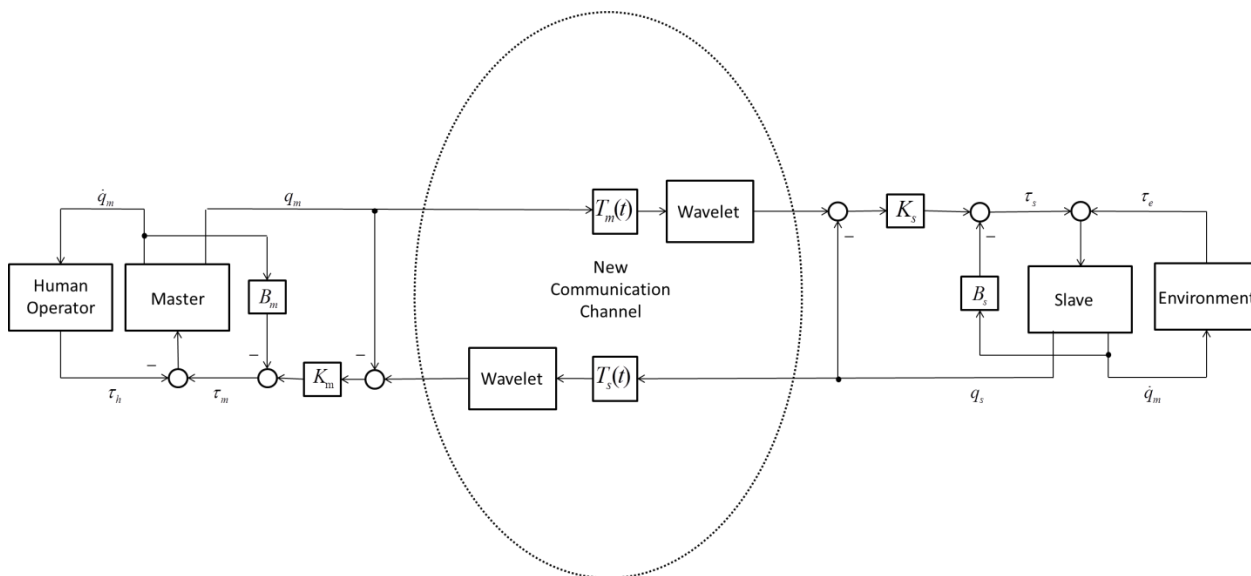
در این حالت می‌توان زمان تاخیر متغیر با زمان را به عنوان نویز یا اعوجاجی در نظر گرفت که بر روی سیگنال اصلی سوار شده است. با استفاده از کاربرد تبدیل موجک در حذف نویز، می‌توان این نویز را کاهش و یا به طور کلی حذف کرد و سیگنال شکل (۸-۴) را به سیگنال شکل (۷-۴) نزدیک کرد.

همانطور که در بخش (۳-۱-۴) بیان شد، در ساختارهای کنترلی ارائه شده در [۸۵] برای کنترل‌کننده‌های شبه تناسبی و شبه تناسبی- مشتقگیر، برای ردیابی موقعیت و پایداری سیستم، رابطه (۱۳-۴) به طور مشترک در نظر گرفته شده است. فرض کنید سیستم موجود به علت رعایت نشدن رابطه (۱۳-۴) به واسطه ترم متغیر با زمان در شرایط ناپایداری قرار گرفته است. طبق مطالب قبلی می‌توان ترم متغیر با زمان را که موجب ناپایداری سیستم شده را به عنوان نویز در نظر گرفته و با اعمال تبدیل موجک بعد از کانال ارتباطی این ترم نامطلوب را کاهش داد و یا کلاً از بین برد تا رابطه (۱۳-۴) رعایت شود و سیستم پایدار گردد. بدین ترتیب می‌توان به جای ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۱-۴)) ساختار شکل (۹-۴) و به جای ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۲)) ساختار شکل (۱۰-۴) را در نظر گرفت.

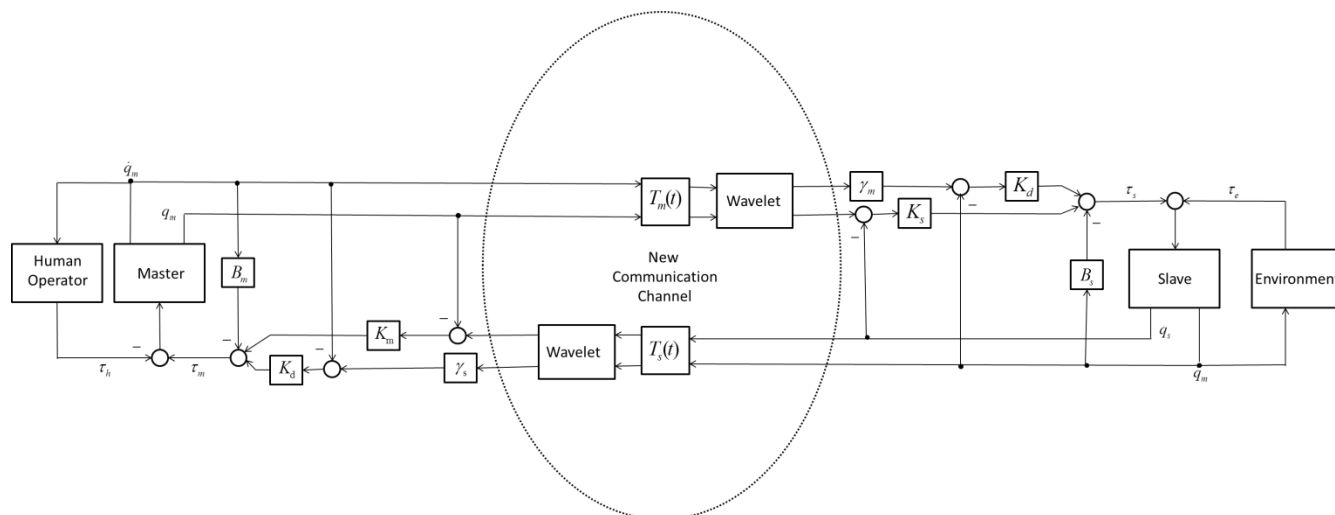
قضیه ۲: ساختارهای کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی و شبه تناسبی - مشتقگیر در شکل‌های (۱۱-۴) و (۱۲-۴) را در نظر بگیرید. با استفاده از قانون کنترلی یادگیر تکرارشونده (رابطه (۲۲-۴)) و ورودی‌های کنترل اولیه به صورت روابط (۱۱-۴) و (۱۲-۴) برای کنترل‌کننده شبه تناسبی و روابط (۱۶-۴) و (۱۷-۴) برای کنترل‌کننده شبه تناسبی - مشتقگیر و در نظر گرفتن خروجی مطلوب به صورت زیر

$$\dot{Y}_d = (\dot{q}_s(t - T_s(t)), \dot{q}_m(t - T_m(t))) \quad (۲۸-۴)$$

خطای ردیابی به صفر میل خواهد کرد.



شکل (۹-۴) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی



شکل (۱۰-۴) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی - مشتقگیر با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی

اثبات: با توجه به روابط (۸-۴) و (۹-۴) داریم:

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + \tau_h = \tau_m \quad (۲۹-۴)$$

$$-M_s(q_s)\ddot{q}_s - C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + \tau_e = \tau_s \quad (۳۰-۴)$$

حال روابط فوق را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$D_m(q_m)\ddot{q}_m + V_m(q_m, \dot{q}_m) = \tau_m \quad (۳۱-۴)$$

$$D_s(q_s)\ddot{q}_s + V_s(q_s, \dot{q}_s) = \tau_s \quad (۳۲-۴)$$

به طوریکه:

$$D_m(q_m) = M_m(q_m) \quad (۳۳-۴)$$

$$V_m(q_m, \dot{q}_m) = C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + \tau_h \quad (34-4)$$

$$D_s(q_s) = -M_s(q_s) \quad (35-4)$$

$$V_s(q_s, \dot{q}_s) = -C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + \tau_e \quad (36-4)$$

از روابط (31-4) و (32-4) داریم:

$$\ddot{q}_m = D_m^{-1}(q_m)(-V_m(q_m, \dot{q}_m) + \tau_m) \quad (37-4)$$

$$\ddot{q}_s = D_s^{-1}(q_s)(-V_s(q_s, \dot{q}_s) + \tau_s) \quad (38-4)$$

بردار متغیرهای حالت را به شکل زیر تعریف می‌کنیم.

$$X = (q_m, q_s, \dot{q}_m, \dot{q}_s)^T \quad (39-4)$$

پس:

$$x_1 = q_m, x_2 = q_s, x_3 = \dot{q}_m, x_4 = \dot{q}_s \quad (40-4)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{q}_m, \dot{x}_2 = \dot{q}_s, \dot{x}_3 = \ddot{q}_m, \dot{x}_4 = \ddot{q}_s$$

در نتیجه:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} [0_{2n \times 2n} \quad I_{2n \times 2n}] X \\ D_m^{-1}(X)(-V_m(X)) \\ D_s^{-1}(X)(-V_s(X)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ D_m^{-1}(X) & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & D_s^{-1}(X) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_m \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (41-4)$$

و با در نظر گرفتن خروجی به شکل $Y = (\dot{q}_m, \dot{q}_s)$ داریم:

$$Y = [0_{2n \times 2n} \quad I_{2n \times 2n}] X \quad (42-4)$$

با مقایسه روابط (19-4) و (20-4) با روابط (41-4) و (42-4) داریم:

$$f(X) = \begin{bmatrix} [0_{2n \times 2n} \quad I_{2n \times 2n}] X \\ D_m^{-1}(X)(-V_m(X)) \\ D_s^{-1}(X)(-V_s(X)) \end{bmatrix} \quad (43-4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ D_m^{-1}(X) & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & D_s^{-1}(X) \end{bmatrix} \quad (44-4)$$

$$u = [\tau_m, \tau_s]^T \quad (45-4)$$

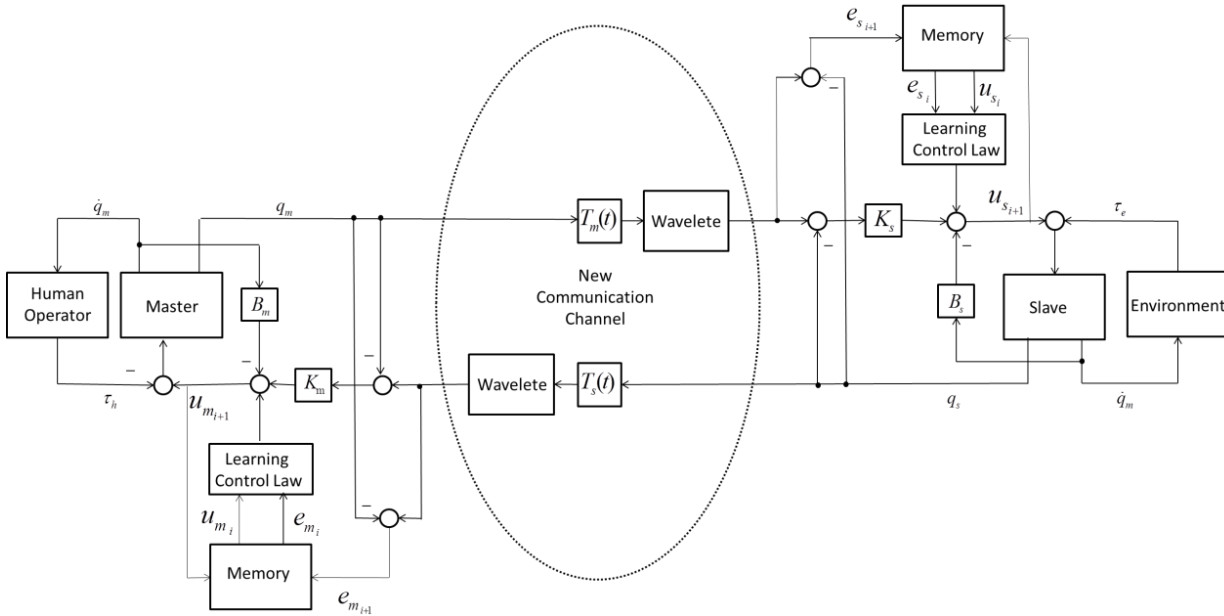
$$B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ D_m^{-1}(X) & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & D_s^{-1}(X) \end{bmatrix} \quad (46-4)$$

$$C = [0_{2n \times 2n} \quad I_{2n \times 2n}] \quad (47-4)$$

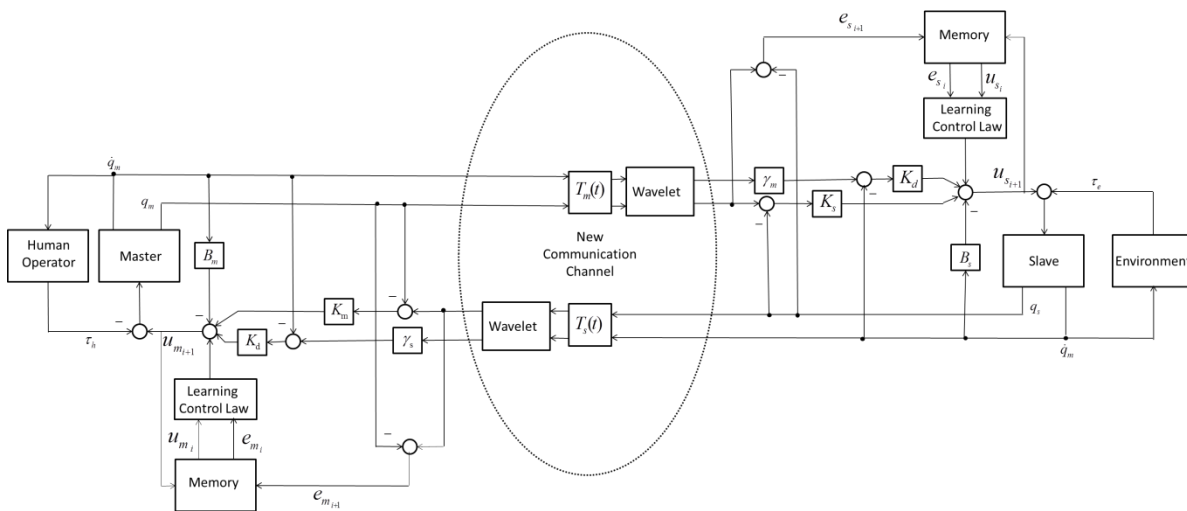
در نتیجه بنابر قضیه ۱ در بخش (3-4) و در نظر گرفتن قانون کنترلی یادگیر تکرارشونده

(رابطه (22-4)) و استفاده از ورودی‌های کنترل اولیه به شکل روابط (11-4) و (12-4) برای

کنترل کننده شبه تناسبی و روابط (۱۶-۴) و (۱۷-۴) برای کنترل کننده شبه تناسبی - مشتقگیر و در نظر گرفتن خروجی مطلوب به صورت رابطه (۲۸-۴) خطای ردیابی به صفر میل خواهد کرد.



شکل (۴-۱۱) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی و اعمال قانون کنترلی یادگیر تکرارشونده



شکل (۴-۱۲) ساختار کنترلی پیشنهادی شبه تناسبی - مشتقگیر با وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی

و اعمال قانون کنترلی یادگیر تکرارشونده

۴-۵ شبیه سازی

در قسمت های قبل برای سامانه کارکرد از راه دور با زمان کنترل کننده ای با روش کنترل یادگیر تکرارشونده طراحی شد و همچنین کاربرد موجک به منظور جلوگیری از ناپایداری ناشی از

وجود ترم متغیر با زمان در کانال ارتباطی بیان شد. حال در این قسمت به منظور نشان دادن اثر روش های پیشنهادی نتایج حاصل از مباحث نظری در نرم افزار مطلب شبیه سازی می شود. در شبیه سازی، ربات هایی با دو درجه آزادی را برای فرمانده و فرمانبر به صورت زیر در نظر می گیریم [۸۵]:

$$M_i(q_i) = \begin{bmatrix} \alpha_i + 2\beta_i \cos(q_{2_i}) & \delta_i + \beta_i \cos(q_{2_i}) \\ \delta_i + \beta_i \cos(q_{2_i}) & \delta_i \end{bmatrix} \quad (۴۸-۴)$$

$$C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i = \begin{bmatrix} -\beta_i \sin(q_{2_i}) \dot{q}_{2_i}^2 - \beta_i \sin(q_{2_i}) \dot{q}_{1_i} \dot{q}_{2_i} \\ \beta_i \sin(q_{2_i}) \dot{q}_{1_i}^2 \end{bmatrix} \quad (۴۹-۴)$$

$$g_i(q_i) = \begin{bmatrix} \frac{1}{l_{2_i}} g \delta_i \cos(q_{1_i} + q_{2_i}) + \frac{1}{l_{1_i}} (\alpha_i - \delta_i) \cos(q_{1_i}) \\ \frac{1}{l_{2_i}} g \delta_i \cos(q_{1_i} + q_{2_i}) \end{bmatrix} \quad (۵۰-۴)$$

همچنین در این سامانه، عملگر نیرویی را بر سر ربات فرمانده وارد می کند و نیروی عکس العمل ربات فرمانبر با محیط نیز در سر آن قابل اندازه گیری است. در شبیه سازی نیروهایی که از طرف محیط و یا کاربر وارد می شوند باید توسط ماتریس ژاکوبی به گشتاور تبدیل شوند:

$$\tau_h = J_m^T(q_m) f_h \quad (۵۱-۴)$$

$$\tau_e = J_s^T(q_s) f_e \quad (۵۲-۴)$$

$$J_i(q_i) = \begin{bmatrix} -l_{1_i} \sin(q_{1_i}) - l_{2_i} \sin(q_{1_i} + q_{2_i}) & -l_{2_i} \sin(q_{1_i} + q_{2_i}) \\ l_{1_i} \cos(q_{1_i}) + l_{2_i} \cos(q_{1_i} + q_{2_i}) & l_{2_i} \cos(q_{1_i} + q_{2_i}) \end{bmatrix} \quad (۵۳-۴)$$

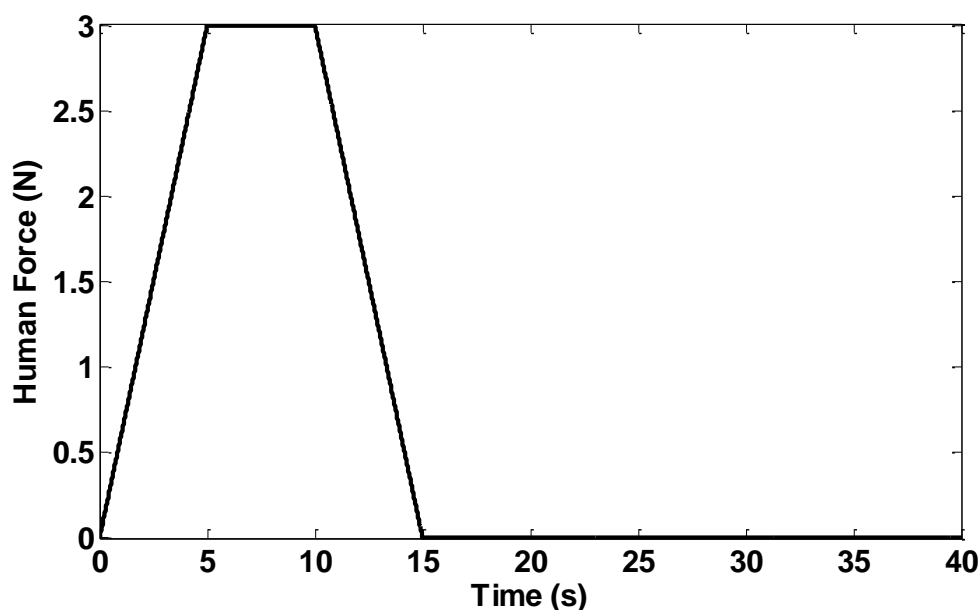
که در آن q_{k_i} و $k \in \{1, 2\}$ موقعیت مفصلی هر لینک، $\alpha_i = l_{2_i}^2 m_{2_i} + l_{1_i}^2 (m_{1_i} + m_{2_i})$ ، $\delta_i = l_{2_i}^2 m_{2_i}$ و $\beta_i = l_{1_i} l_{2_i} m_{2_i}$

طول هر دو لینک l_{1_i} و l_{2_i} در هر ربات مساوی و برابر 0.38 m و جرم های لینک های هر

ربات صورت به

$m_{1_m} = 3.9473 \text{ kg}$, $m_{2_m} = 0.6232 \text{ kg}$, $m_{1_s} = 3.2409 \text{ kg}$, $m_{2_s} = 0.3185 \text{ kg}$ انتخاب

می شوند [۸۵]. همچنین مطابق [۱۰۶] فرض می شود نیرویی به شکل (۴-۱۳) به فرمانده وارد شود.



شکل (۴-۱۳) نیروی اعمال عملگر

همچنین در سمت ربات فرمانبر یک مانع سخت به ضریب سختی 10000 N/m در فاصله 70 cm از محور افقی وجود دارد. موقعیت اولیه ربات فرمانده و فرمانبر با هم متفاوت و به شکل زیر است:

$$q_m(0) = [0, 0]^T, \quad q_s(0) = [-1/9\pi, -1/8\pi]$$

سرعت‌ها و شتاب‌های اولیه هم صفر در نظر گرفته می‌شوند. برای موجک نیز از تابع دایبچز 10 (db10) با سطح تجزیه 5 و روش آستانه‌گذاری *heursure* و از نوع نرم (*soft*) استفاده می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در دو قسمت آورده شده است:

۱- ساختار پیشنهادی برای کنترل‌کننده شبه تناسبی.

۲- ساختار پیشنهادی برای کنترل‌کننده شبه تناسبی - مشتقگیر.

۴-۵-۱ ساختار پیشنهادی برای کنترل‌کننده شبه تناسبی

برای نشان دادن اثر موجک، ضرایب بهره‌ها به صورت زیر انتخاب می‌شوند.

$$K_m = 1, B_m = 0.9, K_s = 2.8, B_s = 1.5$$

همچنین فرض می‌کنیم تاخیر متغیر با زمان در سیگنال‌های رفت و برگشت به ترتیب مطابق

روابط (۴-۵۴) و (۴-۵۵) خواهد بود:

$$T_m(t) = 0.95 + 0.1 \sin(20t) \quad (۴-۵۴)$$

$$T_s(t) = 0.85 + 0.15 \sin(15t) \quad (۴-۵۵)$$

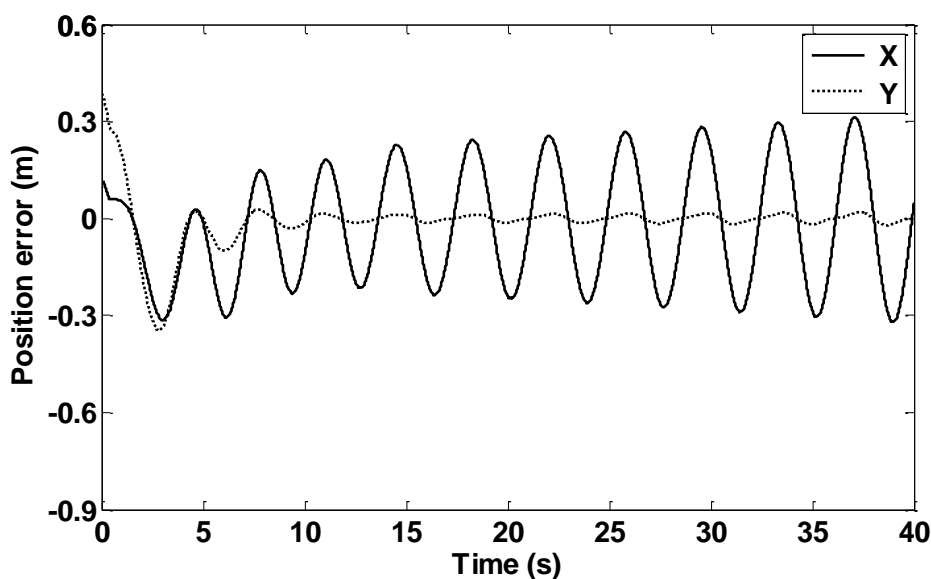
داریم:

$$T_m^* = (0.95 + 0.1)^2 = 1.1025 \quad (۴-۵۶)$$

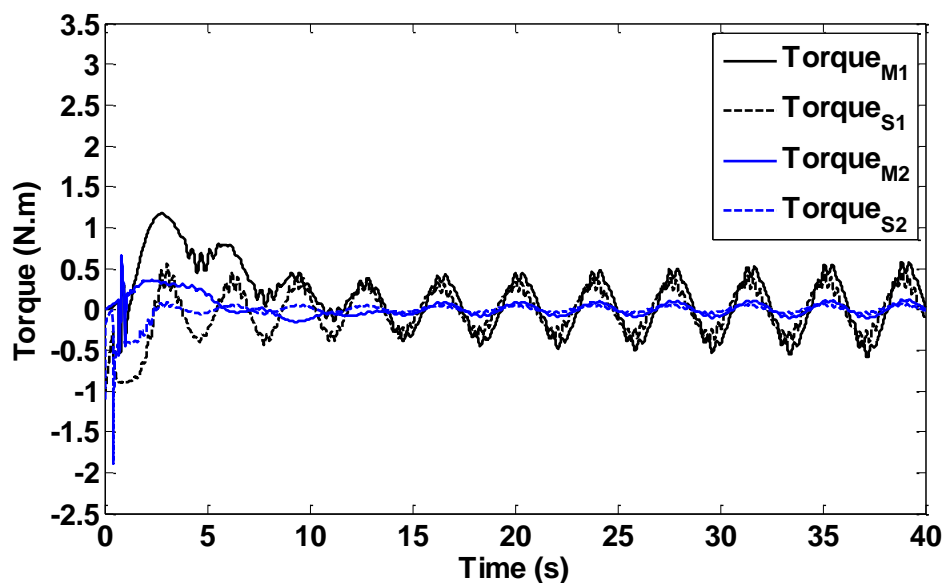
$$T_s^* = (0.85 + 0.15)^2 = 1 \quad (۴-۵۷)$$

لذا با توجه به رابطه (۴-۱۳) مشاهده می‌شود که شرط پایداری برای چنین سیستمی برقرار نیست.

با اعمال چنین زمان تأخیری به سیستم و شبیه‌سازی، خطای موقعیت و سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر به ترتیب مطابق شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) خواهد بود. همانطور که از شکل (۴-۱۴) مشاهده می‌شود خطای موقعیت با گذشت زمان افزایش می‌یابد و سیستم ناپایدار است. همچنین از شکل (۴-۱۵) مشاهده می‌شود سیگنالهای کنترلی دارای اعوجاج زیادی هستند.



شکل (۴-۱۴) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱))



شکل (۴-۱۵) سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱))

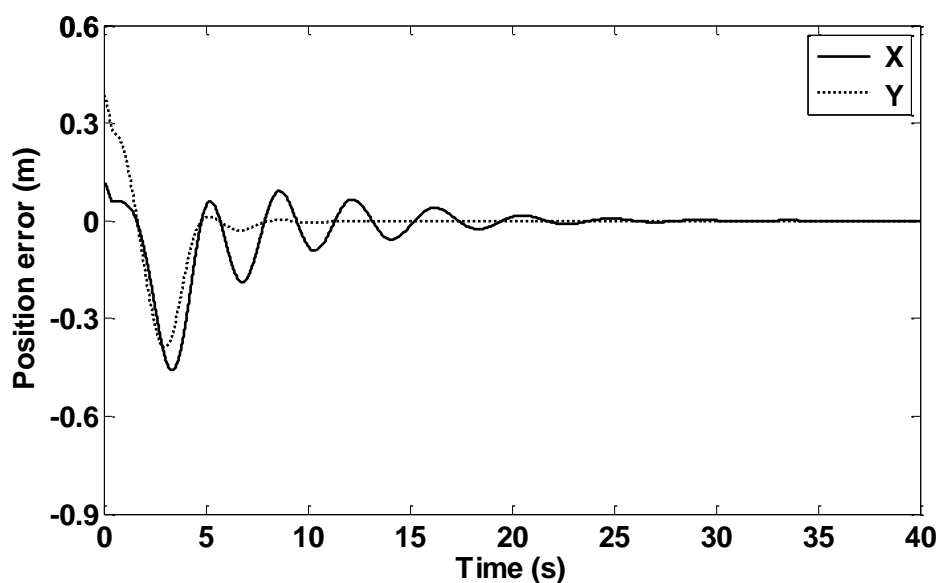
همانطور که بیان شد با اعمال تبدیل موجک به سیگنال‌هایی با این نوع زمان تاخیر مدل شده (روابط (۴-۵۴) و (۴-۵۵))، ترم متغیر با زمان به کلی از سیگنال حذف شده و سیگنال‌های عبوری از کانال ارتباطی به سیگنالی که فقط ترم تاخیر ثابت را دارند نزدیک خواهند شد. به عبارتی داریم:

$$T_m^* = 0.95^2 = 0.9025 \quad (۴-۵۸)$$

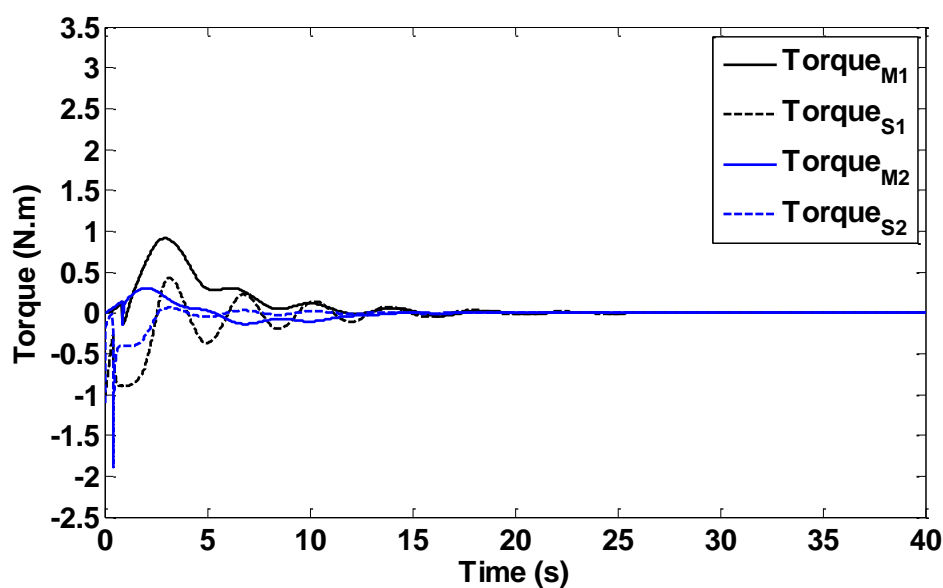
$$T_s^* = 0.85^2 = 0.7225 \quad (۴-۵۹)$$

لذا طبق روابط (۴-۵۸) و (۴-۵۹) شرط رابطه (۴-۱۳) برقرار بوده و لذا سیستم پایدار است. در ادامه ساختار کنترل‌کننده شبه تناسبی مطابق با شکل (۴-۹) را شبیه‌سازی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۴-۱۶) مشخص است به دلیل برقرار شدن رابطه (۴-۱۳) سیستم پایدار بوده و خطای موقعیت به سمت صفر رفته است. به عبارتی دیگر، ردیابی موقعیت سیستم‌های فرمانده و فرمانبر محقق شده است. همچنین از شکل (۴-۱۷) مشاهده می‌شود که سیگنال‌های کنترلی اعمالی به دلیل وجود تبدیل موجک اعوجاج خود را نیز از دست داده‌اند.

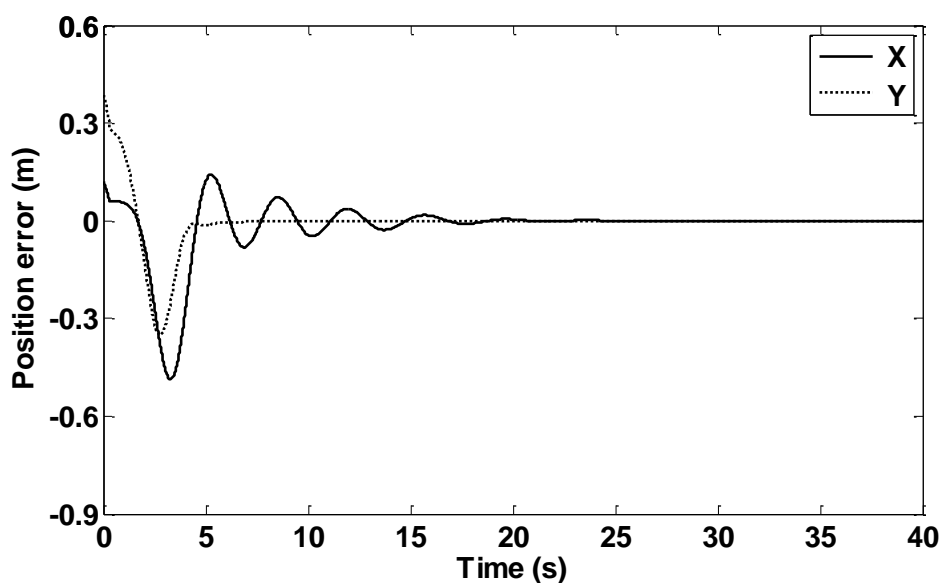
با توجه به وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی، قانون کنترل یادگیر تکرارشونده (رابطه (۴-۲۲)) را به سیستم اعمال می‌کنیم. در اعمال این قانون کنترل از سیگنال‌های کنترلی روابط (۴-۱۱) و (۴-۱۲) به عنوان ورودی‌های سیگنال کنترل اولیه استفاده می‌کنیم. به عبارتی شکل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) را می‌توان نتایج حاصل از سیگنال کنترل اولیه در نظر گرفت. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴-۱۸) تا (۴-۲۱) آمده است. همانطور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود با اعمال این قانون کنترل به سیستم با افزایش تکرارها پاسخ سیستم بهبود یافته است. به عبارتی با افزایش تکرار، خطای سیستم سریعتر به سمت صفر میل کرده و همچنین نوسانات پاسخ کمتر شده است. همچنین با مقایسه این شکل‌ها با شکل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) بهبود پاسخ مشاهده می‌شود. به بیان دیگر همانطور که گفته شد شکل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) نتایج حاصل از اعمال سیگنال کنترل اولیه به سیستم است و شکل‌های (۴-۱۸) تا (۴-۲۱) نتایج حاصل از بهبود این سیگنال و نزدیک شدن این سیگنال، به سیگنال مطلوب برای دستیابی به خروجی مطلوب است. در شکل (۴-۲۲) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر در تکرار پنجم در راستای محور افقی نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، ربات فرمانبر از ثانیه ۱ تا ثانیه ۴ به مانع سختی که در فاصله ۷۰ cm از محور افقی قرار داشته برخورد کرده و بعد از آن ردیابی محقق شده است. همچنین در شکل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴) به ترتیب ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر در راستای محور عمودی و ردیابی گشتاورهای محیط و عملگر در تکرار پنجم نشان داده شده است.



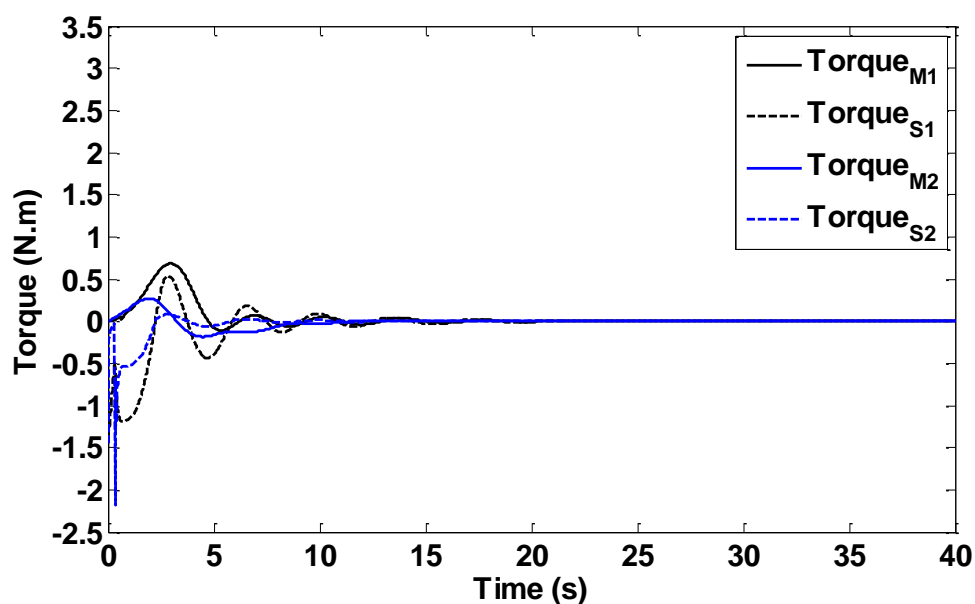
شکل (۴-۱۶) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۹)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترل اولیه)



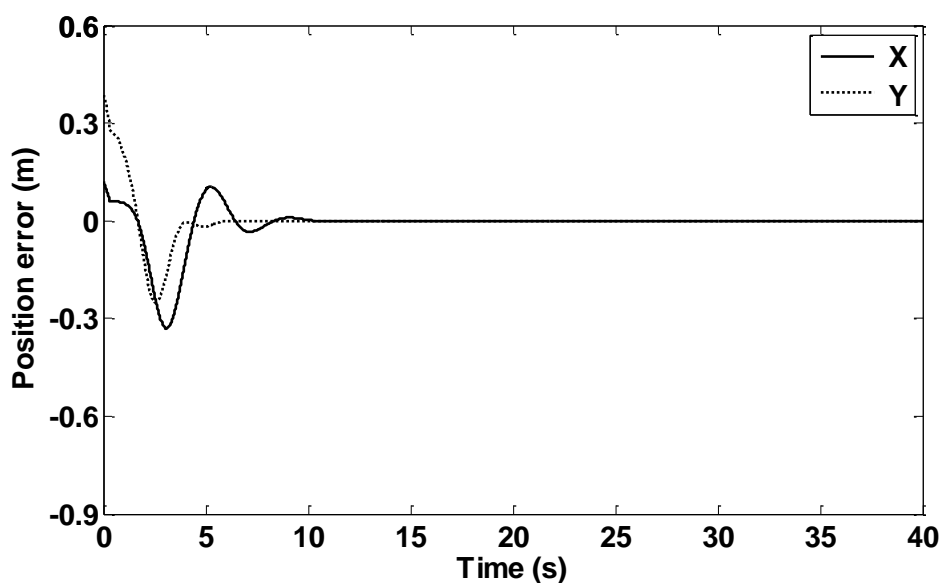
شکل (۴-۱۷) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۹)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترل اولیه)



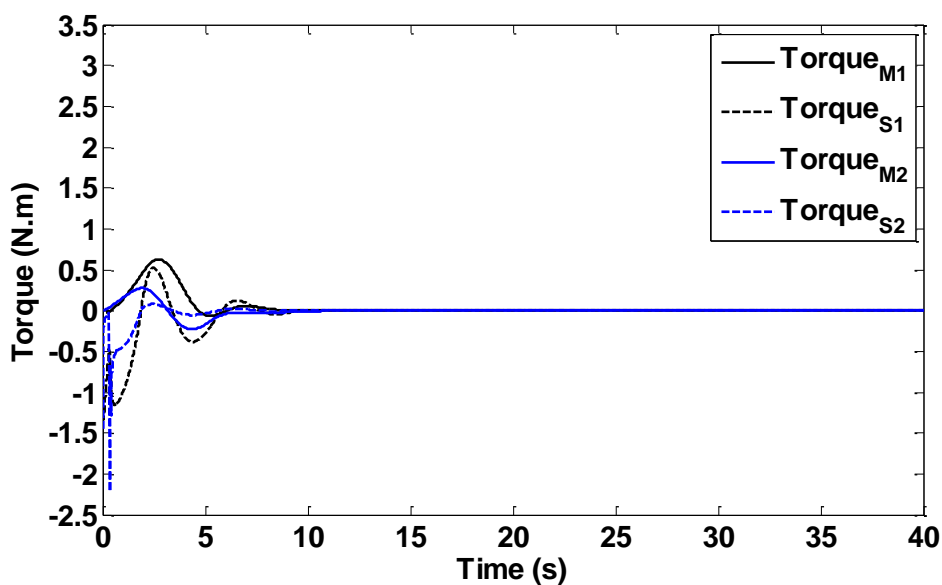
شکل (۴-۱۸) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))



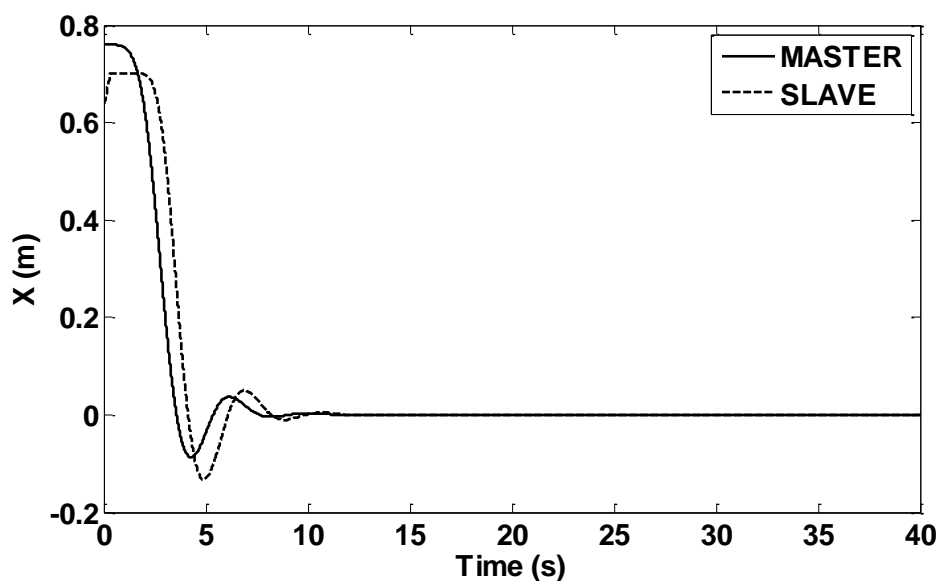
شکل (۴-۱۹) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))



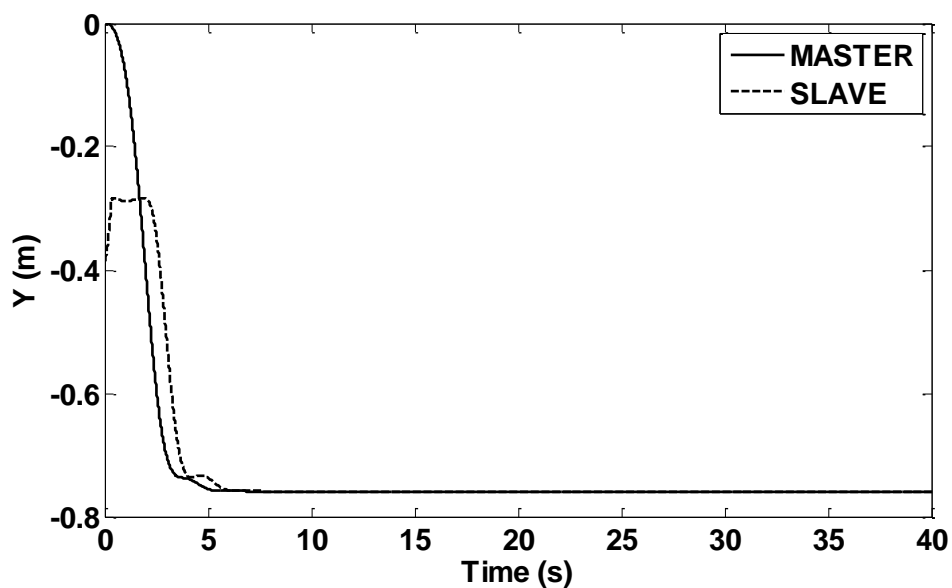
شکل (۴-۲۰) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))



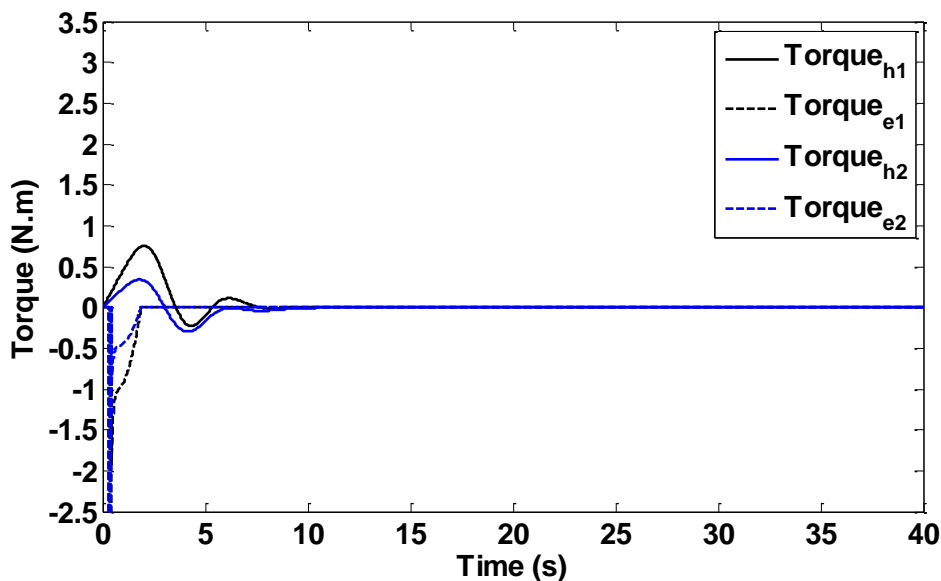
شکل (۴-۲۱) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))



شکل (۴-۲۲) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور افقی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))



شکل (۴-۲۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور عمودی در ساختار کنترلی شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))



شکل (۴-۲۴) ردیابی گشتاورهای محیط و عملگر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در کنترل کننده شبه تناسبی (شکل (۴-۱۱))

۴-۵-۲ ساختار پیشنهادی برای کنترل کننده شبه تناسبی - مشتقگیر

ضرایب بهره‌ها را برای نشان دادن اثر موجک مطابق زیر انتخاب می‌کنیم.

$$K_d = 0.3, K_m = 1, B_m = 1.1, K_s = 2.5, B_s = 1.1$$

همچنین تاخیر متغیر با زمان در سیگنال‌های رفت و برگشت به ترتیب مطابق روابط (۴-۶۰)

و (۴-۶۱) در نظر گرفته می‌شوند.

$$T_m(t) = 0.95 + 0.1\sin(9t) \quad (۴-۶۰)$$

$$T_s(t) = 0.85 + 0.15\sin(5t) \quad (۴-۶۱)$$

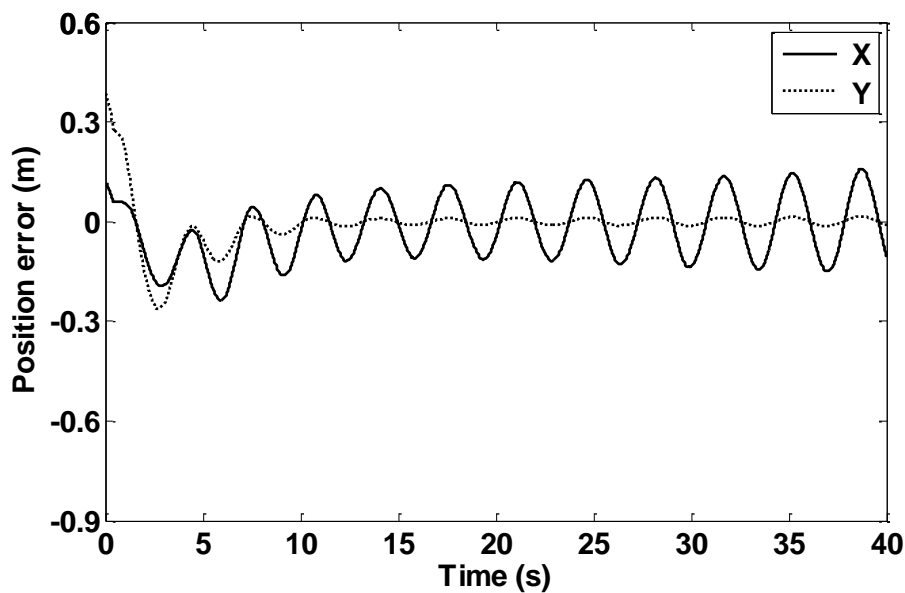
در اینجا فرکانس‌ها کمتر انتخاب شده تا شرط رابطه (۴-۱۸) برقرار شود. داریم:

$$T_m^* = (0.95 + 0.1)^2 = 1.1025 \quad (۴-۶۲)$$

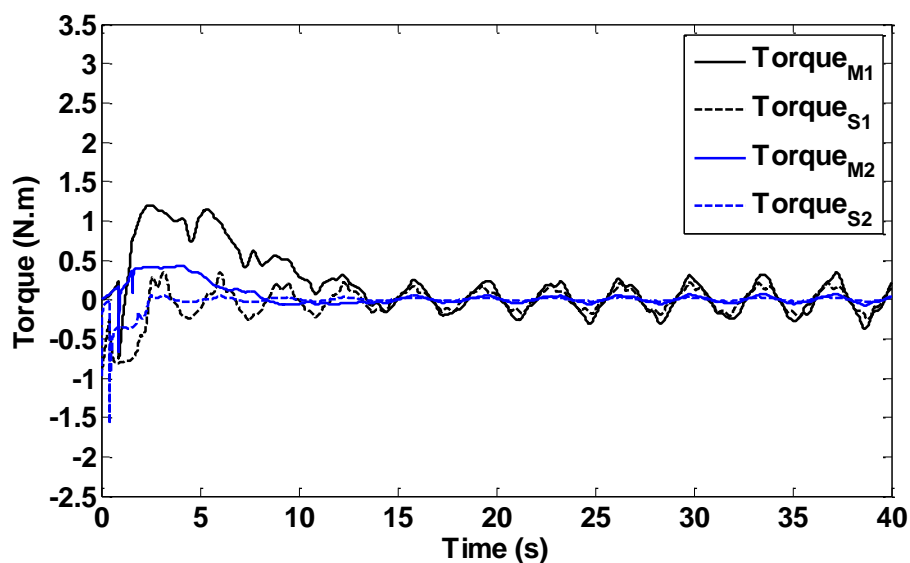
$$T_s^* = (0.85 + 0.15)^2 = 1 \quad (۴-۶۳)$$

با توجه به رابطه (۴-۱۳) شرط پایداری برای چنین سیستمی برقرار نیست.

با اعمال چنین زمان تأخیری به سیستم و شبیه‌سازی، خطای موقعیت و سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر به ترتیب مطابق شکل‌های (۴-۲۵) و (۴-۲۶) خواهد بود. همانطور که از شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود خطای موقعیت با گذشت زمان افزایش می‌یابد و سیستم ناپایدار است. همچنین از شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود سیگنال‌های کنترلی دارای اعوجاج زیادی هستند.



شکل (۴-۲۵) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۲))



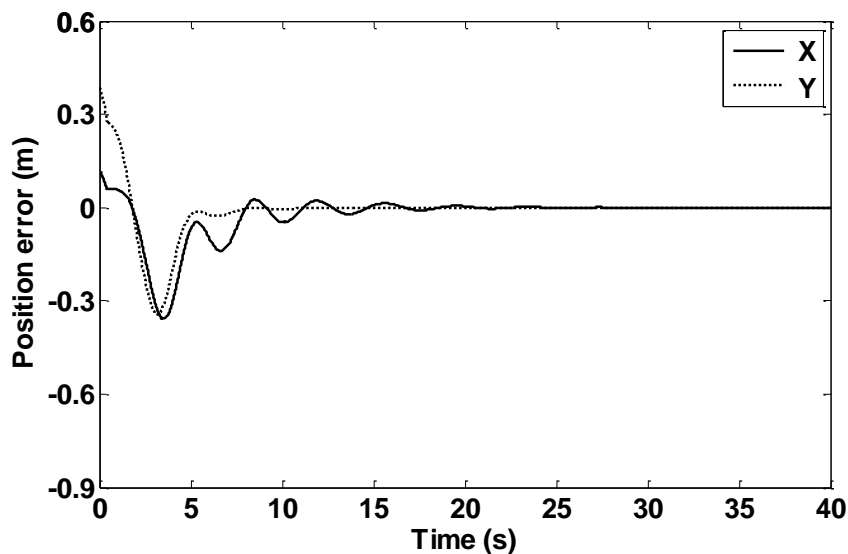
شکل (۴-۲۶) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر بدون در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۲))

با اعمال موجک به سیگنال‌های دارای این نوع زمان تاخیر مدل شده به صورت بالا (روابط (۴-۶۰) و (۴-۶۱))، ترم متغیر با زمان به کلی از سیگنال حذف شده و سیگنال‌های عبوری از کانال ارتباطی به سیگنالی که فقط ترم تاخیر ثابت را دارند نزدیک خواهد شد. به عبارتی خواهیم داشت:

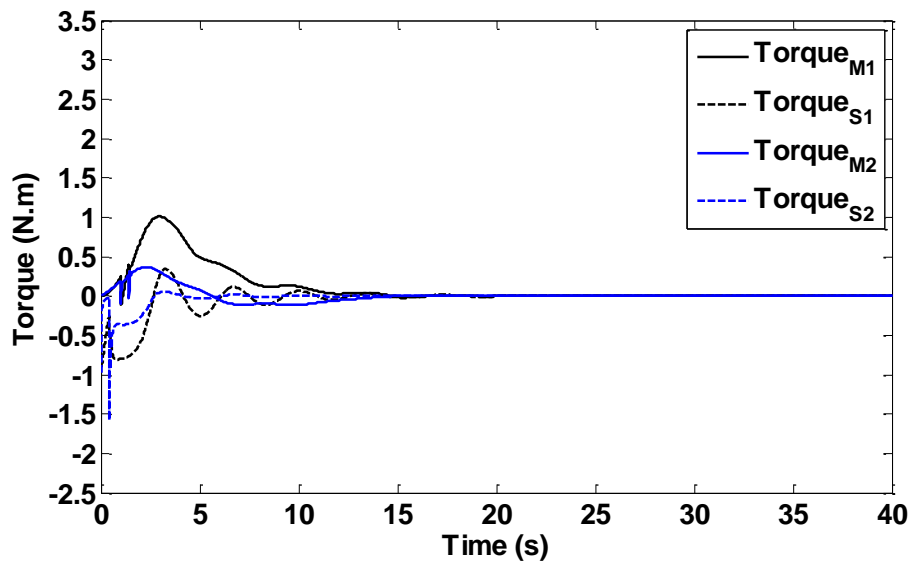
$$T_m^* = 0.95^2 = 0.9025 \quad (۴-۶۴)$$

$$T_s^* = 0.85^2 = 0.7225 \quad (۴-۶۵)$$

با توجه به روابط (۴-۶۴) و (۴-۶۵)، شرط رابطه (۴-۱۳) برقرار بوده و لذا سیستم پایدار است. حال ساختار کنترل کننده شبه تناسبی - مشتقگیر مطابق شکل (۴-۱۰) را شبیه‌سازی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۴-۲۷) مشخص است به دلیل برقرار شدن رابطه (۴-۱۳) سیستم پایدار شده و خطای موقعیت به سمت صفر رفته است. به عبارتی دیگر، ردیابی موقعیت سیستم‌های فرمانده و فرمانبر محقق شده است. همچنین از شکل (۴-۲۸) مشاهده می‌شود که سیگنال‌های کنترلی اعمالی به دلیل وجود تبدیل موجک اعوجاج خود را نیز از دست داده‌اند.

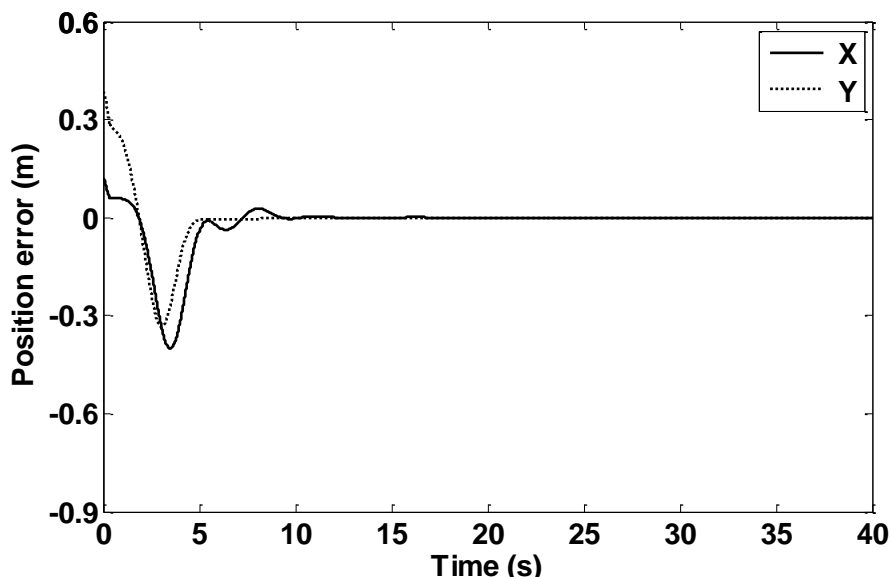


شکل (۴-۲۷) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۰)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترلی اولیه)



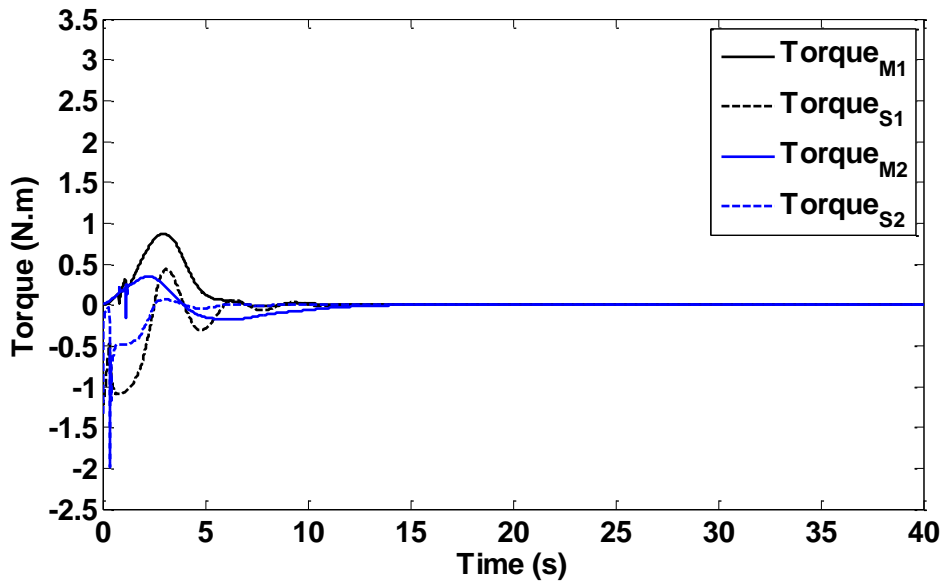
شکل (۴-۲۸) سیگنال‌های کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۰)) (نتیجه حاصل از سیگنال کنترلی اولیه)

با توجه به وجود تبدیل موجک در کانال ارتباطی، قانون کنترل یادگیر تکرارشونده (رابطه ۴-۴) را به سیستم اعمال می‌کنیم. در اعمال این قانون کنترل از سیگنال‌های کنترلی روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۷) به عنوان ورودی‌های سیگنال کنترل اولیه استفاده می‌کنیم. به عبارتی شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) را می‌توان نتایج حاصل از سیگنال کنترل اولیه در نظر گرفت. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴-۲۹) تا (۴-۳۲) آمده است. همانطور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود با اعمال این قانون کنترل به سیستم با افزایش تکرارها پاسخ سیستم بهبود یافته است. به عبارتی با افزایش تکرار، خطای سیستم سریعتر به سمت صفر میل کرده و همچنین نوسانات پاسخ کمتر شده است. همچنین با مقایسه این شکل‌ها با شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) بهبود پاسخ مشاهده می‌شود. در بیان دیگر همانطور که گفته شد شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) نتایج حاصل از اعمال سیگنال کنترل اولیه به سیستم است و شکل‌های (۴-۲۹) تا (۴-۳۲) نتایج حاصل از بهبود این سیگنال و نزدیک شدن این سیگنال، به سیگنال مطلوب برای دستیابی به خروجی مطلوب است. در شکل (۴-۳۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر در تکرار پنجم در راستای محور افقی نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، ربات فرمانبر از ثانیه ۱ تا ثانیه ۴ به مانع سختی که در فاصله ۷۰ cm از محور افقی قرار داشته برخورد کرده و بعد از آن ردیابی محقق شده است. همچنین در شکل‌های (۴-۳۴) و (۴-۳۵) به ترتیب ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر در راستای محور عمودی و ردیابی گشتاورهای محیط و عملگر در تکرار پنجم را نشان می‌دهند.

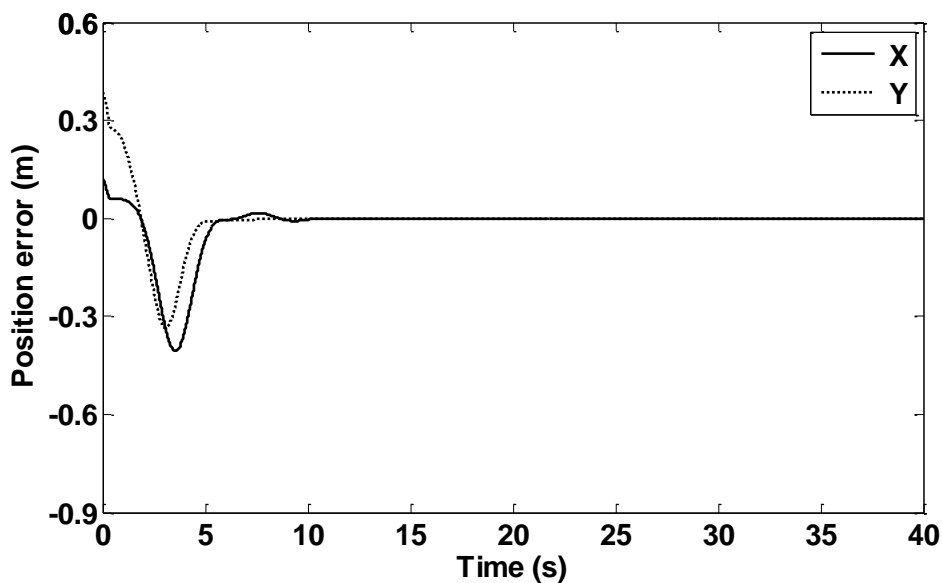


شکل (۴-۲۹) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی

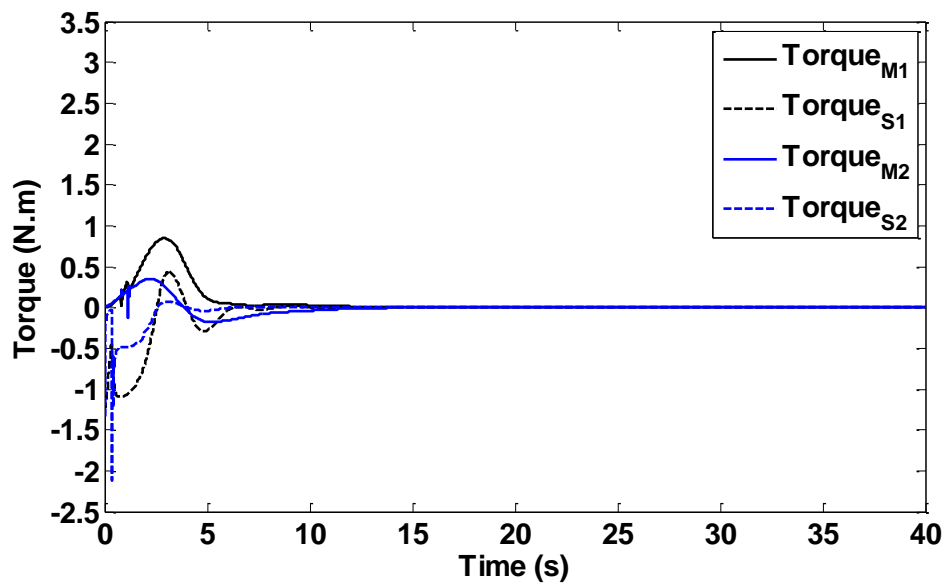
و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل ۴-۴) ((۱۲



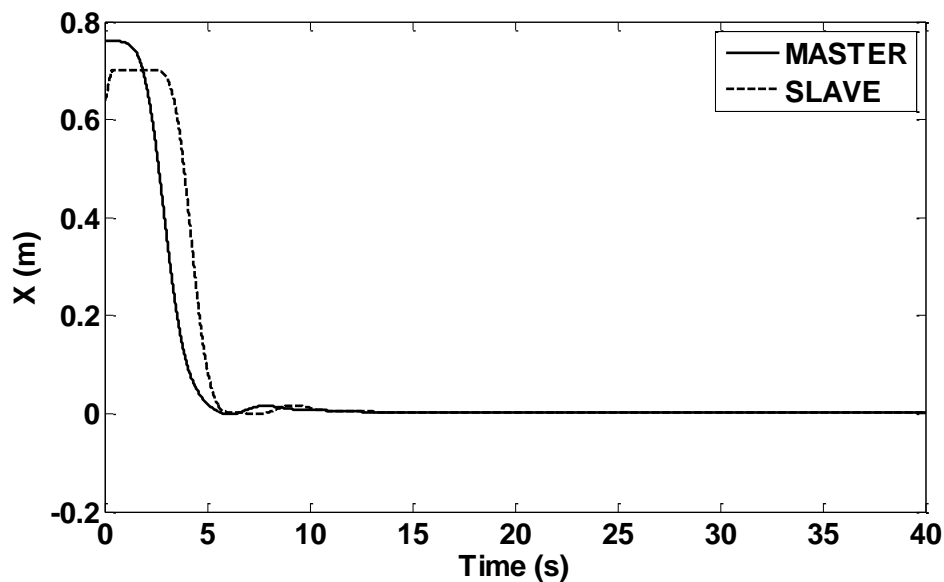
شکل (۴-۳۰) سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار اول قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی-مشتقگیر (شکل (۴-۱۲))



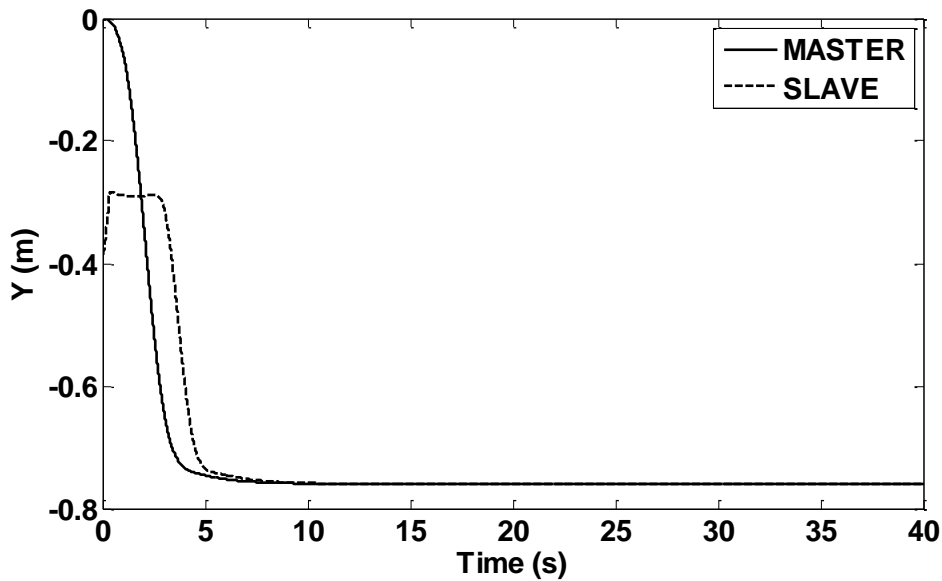
شکل (۴-۳۱) خطای موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲))



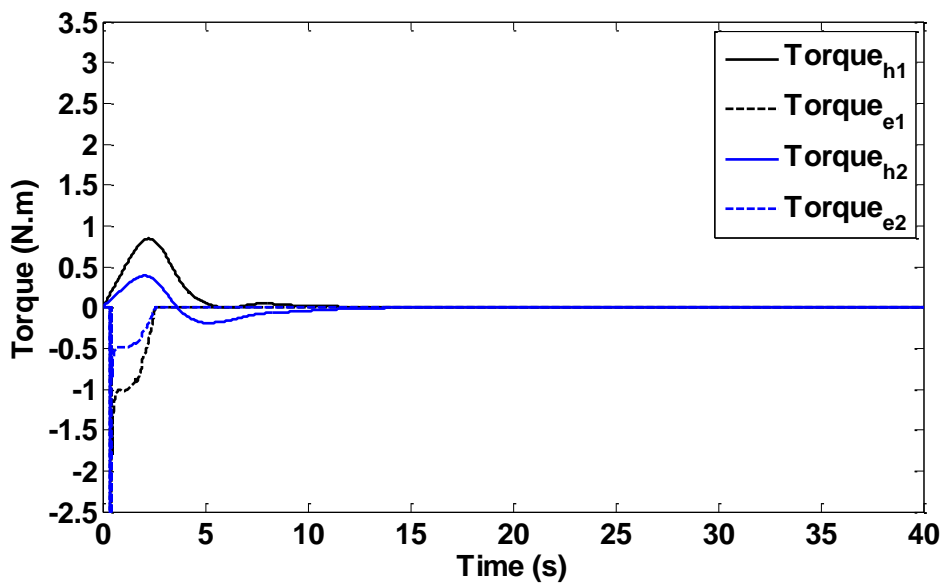
شکل (۴-۳۲) سیگنالهای کنترلی اعمالی به لینک‌های ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲))



شکل (۴-۳۳) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور افقی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲))



شکل (۴-۳۵) ردیابی موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در راستای محور عمودی در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲))



شکل (۴-۳۶) ردیابی گشتاورهای محیط و عملگر با در نظر گرفتن تبدیل موجک در کانال ارتباطی و تکرار پنجم قانون کنترل یادگیر تکرارشونده در ساختار کنترلی شبه تناسبی - مشتقگیر (شکل (۴-۱۲))

فصل ۵

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

در این تحقیق، سامانه‌های کارکرد از راه دور دوطرفه مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی سیستم‌های کارکرد از راه دور دو هدف اصلی دارند: پایداری سیستم حلقه - بسته ناشی از تأخیر زمانی در کانال ارتباطی و ردیابی سیستم فرمانبر از سیستم فرمانده با کمترین خطا. مشکل عمده سیستم‌های کارکرد از راه دور وجود تأخیر در کانال ارتباطی است زیرا به هنگام انتقال اطلاعات از سیستم فرمانده به سیستم فرمانبر و بالعکس همواره یک تأخیر زمانی در ارسال اطلاعات رخ خواهد داد. این زمان تأخیر بین فرمانده و فرمانبر ممکن است سبب ناپایداری در این سامانه‌ها گردد. همچنین، به دلیل وجود زمان تأخیر در کانال ارتباطی عملکرد سامانه‌ها (مساله‌ی ردیابی سیستم فرمانبر از سیستم فرمانده) کاهش می‌یابد. در این سامانه‌ها تأخیر موجود در کانال ارتباطی یا به صورت تأخیر ثابت و یا به شکل تأخیر متغیر با زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. اکثر کارهایی که تا به حال انجام شده و کنترل‌کننده‌هایی که برای سامانه‌های کارکرد از راه دور طراحی شده‌اند به مصالحه‌ی بین دو هدف پایداری و ردیابی موقعیت مطلوب پرداخته‌اند. در این تحقیق روش‌هایی بیان شد که علاوه بر تضمین پایداری سیستم کارکرد از راه دور، ردیابی موقعیت را نیز در این سامانه‌ها به صورت مطلوب فراهم می‌آورد.

در این تحقیق ابتدا سامانه‌ای با تأخیر ثابت مورد بررسی قرار گرفت. برای این سامانه ساختاری معرفی شد که ضمن تضمین پایداری حلقه - بسته، ردیابی موقعیت سیستم در حضور نامعینی در مدل سیستم را نیز فراهم می‌آورد. بدین منظور از یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند جدید معرفی شده برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده استفاده گردید. در ادامه تحقیق سامانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که در آن تأخیر موجود در کانال ارتباطی متغیر با زمان در نظر گرفته شد. در این سامانه با استفاده از تبدیل موجک و مزیت آن در حذف نویز، شرایطی در نظر گرفته شد که با ترم متغیر با زمان در کانال ارتباطی به صورت نویز برخورد شد و سیستم ناپایداری معرفی شد که با بکار بردن تبدیل موجک پایدار گردید. همچنین با استفاده از روش کنترل یادگیر تکرارشونده ساختاری برای این سامانه‌ها طراحی شد که با افزایش تعداد تکرارها خطای ردیابی کاهش می‌یافت و در نهایت ردیابی موقعیت محقق شد. در این روش، برای سیگنال کنترل‌کننده اولیه‌ای که برای سیستم لازم است، از سیگنال کنترلی‌ای استفاده شد که با استفاده از تبدیل موجک پایدار شده بودند. در اینصورت با افزایش تکرارها سیگنال اولیه بهبود یافته و به سیگنال کنترلی دست یافتیم که ردیابی موقعیت را سریعتر از قبل برای ما محقق می‌ساخت.

۵-۲ پیشنهادات

به منظور ادامه کار در زمینه سامانه‌های کارکرد از دور، موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- می‌توان برای سامانه‌هایی که با مدل نامی در مدل ربات‌ها کنترل‌کننده برای آنها طراحی شده، از روش کنترل تطبیقی بهره برد. همچنین برای استفاده از این سامانه‌ها در محیط‌های ناشناخته می‌توان از روش‌های شناسایی پارامترها استفاده کرد.
- در کلیه سامانه‌های کارکرد از دور می‌توان از روش کنترل یادگیر تکرارشونده بهره برد و اثر آن را در بهبود ردیابی موقعیت مورد مطالعه قرار داد. همچنین انواع مختلفی از روش‌های کنترل یادگیرنده وجود دارد که می‌توان اثر هر یک از آنها مورد مطالعه قرار گیرد.
- در طراحی کنترل‌کننده‌ها محدوده‌ای برای تغییرات تاخیر در نظر گرفته شده که طراحی بر اساس این محدوده‌ها صورت گرفته است. مخصوصاً برای سامانه‌هایی که تاخیر در کانال رفت و برگشت مساوی فرض می‌شود. ولی در واقعیت ممکن است میزات تاخیر از این محدوده تجاوز کند و یا تاخیر در کانال رفت و برگشت یکسان نباشد. بنابراین بهتر است در زمان کار سیستم از ساختاری جهت اندازه‌گیری و یا پیش‌بینی تاخیر استفاده شود و طراحی بر اساس این مقادیر جدید مجدداً انجام گیرد، و یا با روشی مثل تبدیل موجک اثرات ترم متغیر با زمان را کاهش داد.

مراجع

- [1] T. B. Sheridan, "Telerobotics," *Automatica*, vol. 25, no. 4, pp. 487–507, 1989.
- [2] E. Nuño, L. Basañez, and R. Ortega, "Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial," *Automatica*, vol. 47, no. 3, pp. 485–495, Mar. 2011.
- [3] P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2035–2057, Dec. 2006.
- [4] Z. Li, L. Ding, H. Gao, G. Duan, and C.-Y. Su, "Trilateral Teleoperation of Adaptive Fuzzy Force/Motion Control for Nonlinear Teleoperators With Communication Random Delays," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 610–624, 2013.
- [5] H. Du, "Brief paper - H_{∞} state-feedback control of bilateral teleoperation systems with asymmetric time-varying delays," *Control Theory & Applications, IET*, vol. 7, no. 4, pp. 594–605, 2013.
- [6] X. Liu, D. Constantinescu, and Y. Shi, " H_2 controller design of networked bilateral teleoperation system with Markovian time delays," *Haptics Symposium (HAPTICS), 2012 IEEE*, pp. 491–496, 2012.
- [7] R. Moreau, M. T. Pham, M. Tavakoli, M. Q. Le, and T. Redarce, "Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master–slave pneumatic servo systems," *Control Engineering Practice*, vol. 20, no. 6, pp. 584–597, Jun. 2012.
- [8] A. Forouzantabar, H. A. Talebi, and A. K. Sedigh, "Bilateral control of master–slave manipulators with constant time delay," *ISA Transactions*, vol. 51, no. 1, pp. 74–80, Jan. 2012.
- [9] A. K. Bejczy, "Teleoperators," *IEEE Industrial Electron. Soc. Newsletters*, pp. 4–12, Mar. 1996.
- [10] G. Clement, J. Vertut, R. Fournier, B. Espiau, and G. Andre, "An overview of CAT control in nuclear services," in *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on*, 1985, vol. 2, pp. 713–718.
- [11] W. Wei and Y. Kui, "Teleoperated manipulator for leak detection of sealed radioactive sources," in *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, 2004, vol. 2, pp. 1682–1687.
- [12] R. P. Kumar, C. S. Kumar, D. Sen, and A. Dasgupta, "Discrete time-delay control of an autonomous underwater vehicle: Theory and experimental results," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 74–81, Jan. 2009.
- [13] J. Funda and R. P. Paul, "A symbolic teleoperator interface for time-delayed underwater robot manipulation," in *OCEANS'91. Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's. Proceedings.*, 2009, pp. 1526–1533.

- [14] R. Uhrich, "Terminus controlled deep ocean manipulator," in *Engineering in the Ocean Environment*, Ocean 73-IEEE International Conference on, 2000, pp. 301–304.
- [15] M. J. H. Lum, J. Rosen, H. King, D. C. W. Friedman, T. S. Lendvay, A. S. Wright, M. N. Sinanan, and B. Hannaford, "Teleoperation in surgical robotics—network latency effects on surgical performance," in *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE, 2009, pp. 6860–6863.
- [16] K.Y. Kim, H.S. Song, J.W. Suh, and J.J. Lee, "A Novel Surgical Manipulator with Workspace-Conversion Ability for Telesurgery," *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on, vol. 18, no. 1. pp. 200–211, 2013.
- [17] J. G. Newman, R. B. Koppersmith, and B. W. O'Malley Jr., "Robotics and Telesurgery in Otolaryngology," *Otolaryngologic Clinics of North America*, vol. 44, no. 6, pp. 1317–1331, Dec. 2011.
- [18] A. Rovetta, R. Sala, X. Wen, and A. Togno, "Remote control in telerobotic surgery," *Syst. Man Cybern. Part A Syst. Humans*, IEEE Trans., vol. 26, no. 4, pp. 438–444, 1996.
- [19] R. H. Taylor, J. Funda, B. Eldridge, S. Gomory, K. Gruben, D. LaRose, M. Talamini, L. Kavoussi, and J. Anderson, "A telerobotic assistant for laparoscopic surgery," *Eng. Med. Biol. Mag. IEEE*, vol. 14, no. 3, pp. 279–288, 2000.
- [20] J. Lim, J. Ko, and J. Lee, "Internet-based teleoperation of a mobile robot with force-reflection," in *Control Applications*, 2003. CCA 2003. Proceedings of 2003 IEEE Conference on, 2003, vol. 1, pp. 680–685.
- [21] N. Diolaiti and C. Melchiorri, "Teleoperation of a mobile robot through haptic feedback," in *Haptic Virtual Environments and Their Applications*, IEEE International Workshop 2002 HAVE, 2002, pp. 67–72.
- [22] J. Cui, S. Tosunoglu, R. Roberts, C. Moore, and D. W. Repperger, "A review of teleoperation system control," in *Proceedings of the 2006 Florida conference recent advances in robotics (FCRAR)*, Florida Atlantic University, FL, 2003.
- [23] S. B. Skaar and C. F. Ruoff, *Teleoperation and robotics in space*, vol. 161. Aiaa, 1994.
- [24] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *Autom. Control. IEEE Trans.*, vol. 34, no. 5, pp. 494–501, 1989.
- [25] S. E. Salcudean, "Control for teleoperation and haptic interfaces," in *Control problems in robotics and automation*, Springer, 1998, pp. 51–66.
- [26] G. J. Raju, G. C. Verghese, and T. B. Sheridan, "Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Teleoperation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1317–1321.

- [27] G. Niemeyer and J.-J. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *Ocean. Eng. IEEE J.*, vol. 16, no. 1, pp. 152–162, 1991.
- [28] K. Kosuge and H. Murayama, "Bilateral feedback control of telemanipulator via computer network in discrete time domain," in *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, 1997, vol. 3, pp. 2219–2224.
- [29] G. Niemeyer and J.-J. Slotine, "Using wave variables for system analysis and robot control," *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, vol. 2. IEEE, pp. 1619–1625, 1997.
- [30] G. Niemeyer and J.-J. Slotine, "Towards force-reflecting teleoperation over the internet," *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, pp. 1909–1915, 1998.
- [31] Y. Yokokohji, T. Imaida, and T. Yoshikawa, "Bilateral teleoperation under time-varying communication delay," in *Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS'99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on*, 1999, vol. 3, pp. 1854–1859.
- [32] Y. Yokokohji, T. Imaida, and T. Yoshikawa, "Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication delay," *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, pp. 2684–2689, 2000.
- [33] P. Y. Li and D. Lee, "Passive feedforward approach to bilateral teleoperated manipulators," *International Mechanical Engineering Congress and Exposition (ASME, DS and Division, C., eds.)*, vol. 69. p. 2, 2000.
- [34] S. Munir and W. J. Book, "Wave-based teleoperation with prediction," *American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001*, vol. 6. IEEE, pp. 4605–4611, 2001.
- [35] S. Munir and W. J. Book, "Internet-based teleoperation using wave variables with prediction," *Mechatronics, IEEE/ASME Trans.*, vol. 7, no. 2, pp. 124–133, 2002.
- [36] D. Lee and P. Y. Li, "Passive coordination control of nonlinear bilateral teleoperated manipulators," *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, pp. 3278–3283, 2002.
- [37] S. Leeraphan, T. Maneewarn, and D. Laowattana, "Stable adaptive bilateral control of transparent teleoperation through time-varying delay," *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 3. IEEE, pp. 2979–2984, 2002.
- [38] T. Mirfakhrai and S. Payandeh, "A delay prediction approach for teleoperation over the internet," *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, vol. 2. IEEE, pp. 2178–2183, 2002.

- [39] S. Ganjefar, H. Momeni, and F. Janabi-Sharifi, "Teleoperation systems design using augmented wave-variables and Smith predictor method for reducing time-delay effects," *Intelligent Control*, 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on. IEEE, pp. 333–338, 2002.
- [40] H. Flemmer and J. Wikander, "Transparency and stability analysis of a surgical teleoperator system," *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings. 11th Symposium on. IEEE, pp. 382–389, 2003.
- [41] J.-H. Ryu, B. Hannaford, C. Preusche, and G. Hirzinger, "Time domain passivity control with reference energy behavior," *Intelligent Robots and Systems*, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, vol. 3. IEEE, pp. 2932–2937, 2003.
- [42] J.-H. Ryu and J.-H. Kim, "Stable and high performance teleoperation with time domain passivity control: reference energy following scheme," *Advanced Robotics*, 2005. ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on. IEEE, pp. 782–787, 2005.
- [43] L. Li, Y. Li, and G. Liu, "Nonlinear adaptive control of teleoperation systems with large time delay," *Control Applications*, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on. IEEE, pp. 1522–1527, 2005.
- [44] M. Alise, R. G. Roberts, and D. W. Repperger, "The wave variable method for multiple degree of freedom teleoperation systems with time delay," *Robotics and Automation*, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 2908–2913, 2006.
- [45] Y. Hou and G. R. Luecke, "Time delayed teleoperation system control, A Passivity-Based Method," *Advanced Robotics*, 2005. ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on. IEEE, pp. 796–802, 2005.
- [46] Y. Hou and G. R. Luecke, "Time delayed teleoperation system control, A Passivity-Based Method," *Advanced Robotics*, 2005. ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on. IEEE, pp. 796–802, 2005.
- [47] X. Liu, W. J. Wilson, and X. Fan, "Pose reflecting teleoperation using wave variables with wave prediction," *Mechatronics and Automation*, 2005 IEEE International Conference, vol. 3. IEEE, pp. 1642–1647, 2005.
- [48] M. U. Keerio, L. Zhang, Y. Lu, A. R. Jafri, and J. Yang, "Control Scheme for Stable Bilateral Teleoperation with Time Delay," *Robotics and Biomimetics*, 2006. ROBIO'06. IEEE International Conference on. IEEE, pp. 433–438, 2006.
- [49] N. A. Tanner and G. Niemeyer, "High-frequency acceleration feedback in wave variable telerobotics," *Mechatronics*, IEEE/ASME Trans., vol. 11, no. 2, pp. 119–127, 2006.

- [50] M. Boukhniifer and A. Ferreira, "Wave-based passive control for transparent micro-teleoperation system," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 54, no. 7, pp. 601–615, 2006.
- [51] A. Aziminejad, M. Tavakoli, R. V Patel, and M. Moallem, "Wave-based time delay compensation in bilateral teleoperation: two-channel versus four-channel architectures," *American Control Conference, 2007. ACC'07. IEEE*, pp. 1449–1454, 2007.
- [52] I. G. Polushin, P. X. Liu, and C.-H. Lung, "A force-reflection algorithm for improved transparency in bilateral teleoperation with communication delay," *Mechatronics, IEEE/ASME Trans.*, vol. 12, no. 3, pp. 361–374, 2007.
- [53] H. Kazerooni, T.-I. Tsay, and K. Hollerbach, "A controller design framework for telerobotic systems," *Control Syst. Technol. IEEE Trans.*, vol. 1, no. 1, pp. 50–62, 1993.
- [54] G. M. H. Leung, B. A. Francis, and J. Apkarian, "Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis," *Robot. Autom. IEEE Trans.*, vol. 11, no. 1, pp. 105–116, 1995.
- [55] Z. Hu, S. E. Salcudean, and P. D. Loewen, "Robust controller design for teleoperation systems," *Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century., IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, pp. 2127–2132, 1995.
- [56] A. Sano, H. Fujimoto, and T. Takai, "Network-based force-reflecting teleoperation," *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, vol. 4. IEEE, pp. 3126–3131, 2000.
- [57] S. Sirouspour and A. Shahdi, "Bilateral teleoperation under communication time delay using an LQG controller," *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on. IEEE*, pp. 1257–1262, 2005.
- [58] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Adaptive transparent impedance reflecting teleoperation," *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, vol. 2. IEEE, pp. 1369–1374, 1996.
- [59] H.-K. Lee, M. H. Shin, and M. J. Chung, "Adaptive controller of master-slave systems for transparent teleoperation," *Advanced Robotics, 1997. ICAR'97. Proceedings., 8th International Conference on. IEEE*, pp. 1021–1026, 1997.
- [60] W.-H. Zhu and S. E. Salcudean, "Teleoperation with adaptive motion/force control," *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, vol. 1. IEEE, pp. 231–237, 1999.
- [61] W.-H. Zhu and S. E. Salcudean, "Stability guaranteed teleoperation: an adaptive motion/force control approach," *Autom. Control. IEEE Trans.*, vol. 45, no. 11, pp. 1951–1969, 2000.

- [62] L. J. Love and W. J. Book, "Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control," *Syst. Man, Cybern. Part B Cybern. IEEE Trans.*, vol. 34, no. 1, pp. 159–165, 2004.
- [63] L. Li, Y. Li, and G. Liu, "Nonlinear adaptive control of teleoperation systems with large time delay," *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on. IEEE*, pp. 1522–1527, 2005.
- [64] K. Hosseini-Sunny, H. Momeni, and F. Janabi-Sharifi, "Adaptive teleoperation systems design," *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on. IEEE*, pp. 334–339, 2005.
- [65] M. S. Sadeghi, H. R. Momeni, R. Amirifar, and S. Ganjefar, "A new adaptive inverse control scheme for teleoperation system with varying time delay," *Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006 IEEE. IEEE*, pp. 199–204, 2006.
- [66] P. Buttolo, P. Braathen, and B. Hannaford, "Sliding control of force reflecting teleoperation: Preliminary studies", Presence, 1994.
- [67] M. Guiatni, A. Kheddar and H. Melouah, "Sliding Mode Bilateral Control and Four Channels Scheme Control of a Force Reflecting Master/Slave Teleoperator," in *Proc. Of the IEEE Int. Conf. on Mechatronics & Automation ,Niagara Falls, Canada, July 2005.*
- [68] T. Weise, *Global Optimization Algorithms: Theory and Applications*, it-weise.de (self-published), Germany, 2009
- [69] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI: Univ. of Michigan Press, 1975.
- [70] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st ed. Boston, MA: Addison–Wesley Professional, 1989.
- [71] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, Perth, Australia, 1995, pp. 1941–1948.
- [72] A. Alfi, "PSO with Adaptive Mutation and Inertia Weight and Its Application in Parameter Estimation of Dynamic Systems," *Acta Autom. Sin.*, vol. 37, no. 5, pp. 541–549, May. 2011.
- [73] A. Alfi and M.M. Fateh, "Intelligent identification and control using improved fuzzy particle swarm optimization," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 10, pp. 12312–12317, Sep. 2011.
- [74] H. Gozde and M. C. Taplamacioglu, "Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system," *J. Franklin Inst.*, vol. 348, no. 8, pp. 1927–1946, Oct. 2011.

- [75] D. Karaboga and B. Basturk, “Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems,” in *Found. Fuzzy Log. Soft Comput. SE – 77*, vol. 4529, Springer–Verlag, Berlin, pp. 789–798, 2007.
- [76] B. Akay and D. Karaboga, “Artificial bee colony algorithm for large–scale problems and engineering design optimization,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 23, no. 4, pp. 1001–1014, 2012.
- [77] P. Civicioglu and E. Besdok, “A conceptual comparison of the Cuckoo–search, particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms,” *Artif. Intell. Rev.*, vol. 39, pp. 315–346, DOI 10.1007/s10462–011–9276–0, 2013.
- [78] R. Rajabioun, “Cuckoo Optimization Algorithm,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 8, pp. 5508–5518, Dec. 2011.
- [79] D. Simon, “Biogeography-based optimization,” *Evol. Comput. IEEE Trans.*, vol. 12, no. 6, pp. 702–713, 2008.
- [80] E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, “Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition,” in *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on, 2007*, pp. 4661–4667.
- [81] D. Karaboga and B. Basturk, “A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm,” *J. Glob. Optim.*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, 2007.
- [82] B.-Y. Kim and H.-S. Ahn, “Bilateral teleoperation systems using genetic algorithms,” in *Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA), 2009 IEEE International Symposium on, 2009*, pp. 388–393.
- [83] C. A. Coello Coello, “Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems,” *Comput. Ind.*, vol. 41, no. 2, pp. 113–127, 2000.
- [84] N. Chopra and M. W. Spong, “Adaptive coordination control of bilateral teleoperators with time delay,” in *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on, 2004*, vol. 5, pp. 4540–4547.
- [85] E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega, and M. W. Spong, “Position tracking for non-linear teleoperators with variable time delay,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 28, no. 7, pp. 895–910, 2009.
- [86] C. K. Chui, *An introduction to wavelets Applications (Wavelet Analysis and Its Applications, Vol 1)*. vol. 1). Access Online via Elsevier, 1992.
- [87] C. K. Chui, *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications (Wavelet Analysis and Its Applications, Vol 2)*. Academic Press, Incorporated, 1992.
- [88] D. L. Donoho and J. M. Johnstone, “Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage,” *Biometrika*, vol. 81, no. 3, pp. 425–455, 1994.

- [89] D. L. Donoho, “De-noising by soft-thresholding,” *Inf. Theory, IEEE Trans.*, vol. 41, no. 3, pp. 613–627, 1995.
- [90] D. L. Donoho and I. M. Johnstone, “Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage,” *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 90, no. 432, pp. 1200–1224, 1995.
- [91] H.-Y. Gao and A. G. Bruce, “WaveShrink with firm shrinkage,” *Stat. Sin.*, vol. 7, no. 4, pp. 855–874, 1997.
- [92] X. Guo, P. Yang, Y. Li, and W.-L. Yan, “The SEMG analysis for the lower limb prosthesis using wavelet transformation,” in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS’04. 26th Annual International Conference of the IEEE, 2004*, vol. 1, pp. 341–344.
- [93] Z. Qingju and L. Zhizeng, “Wavelet de-noising of electromyography,” in *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on, 2006*, pp. 1553–1558.
- [94] M. C. E. Rosas-Orea, M. Hernandez-Diaz, V. Alarcon-Aquino, and L. G. Guerrero-Ojeda, “A comparative simulation study of wavelet based denoising algorithms,” in *Electronics, Communications and Computers, 2005. CONIELECOMP 2005. Proceedings. 15th International Conference on, 2005*, pp. 125–130.
- [95] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, “Bettering operation of robots by learning,” *J. Robot. Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 123–140, 1984.
- [96] Z. Bien and J.-X. Xu, *Iterative learning control: analysis, design, integration and applications*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [97] J.-X. Xu and Y. Tan, *Linear and nonlinear iterative learning control*, vol. 291. Springer Berlin, 2003.
- [98] A. Tayebi, “Adaptive iterative learning control for robot manipulators,” *Automatica*, vol. 40, no. 7, pp. 1195–1203, 2004.
- [99] J.-X. Xu, T. Heng Lee, and H.-W. Zhang, “Analysis and comparison of iterative learning control schemes,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 17, no. 6, pp. 675–686, 2004.
- [100] D. H. Owens and G. Munde, “Error convergence in an adaptive iterative learning controller,” *Int. J. Control*, vol. 73, no. 10, pp. 851–857, 2000.
- [101] M. French, E. Rogers, H. Wibowo, and D. H. Owens, “A 2D systems approach to iterative learning control based on nonlinear adaptive control techniques,” in *Circuits and Systems, 2001. ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on, 2001*, vol. 2, pp. 429–432.
- [102] J. J. Hättönen, D. H. Owens, and K. L. Moore, “An algebraic approach to iterative learning control,” *Int. J. Control*, vol. 77, no. 1, pp. 45–54, 2004.

- [103] A. Madady, "Self-Tuning Iterative Learning Control for Time Variant Systems," Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on. pp. 2445–2450, 2005.
- [104] T. Sugie and T. Ono, "An iterative learning control law for dynamical systems," Automatica, vol. 27, no. 4, pp. 729–732, 1991.
- [105] M. Arif, T. Ishihara, and H. Inooka, "Experience-based iterative learning controllers for robotic systems," J. Intell. Robot. Syst., vol. 35, no. 4, pp. 381–396, 2002.
- [106] T. Sugie and T. Ono, "An iterative learning control law for dynamical systems," Automatica, vol. 27, no. 4, pp. 729–732, 1991.
- [107] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, "Bettering operation of dynamic systems by learning: A new control theory for servomechanism or mechatronics systems," in Decision and Control, 1984. The 23rd IEEE Conference on, 1984, vol. 23, pp. 1064–1069.
- [108] C.-C. Hua and X. P. Liu, "Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays," Robot. IEEE Trans., vol. 26, 2010.

Abstract

This thesis studies the problem of position tracking of bilateral teleoperation systems. This research is set in two parts. First, a kind of these systems with constant time delay in communication channel is investigated. For this system, a control structure is proposed such that in addition to guarantee the stability of the closed-loop system and position tracking in the presence of model uncertainties, the optimal parameters of the controller are obtained to achieve optimal position tracking using a novel optimization algorithm. In the second part, another kind of bilateral teleoperation systems is considered where the time delay in communication channel is included the time varying term. In this part, a structure is firstly introduced in which due to existence of this term the stability condition is not satisfied and thus the system is unstable. To solve this problem, using the wavelet transform and its preference in noise rejection, the time varying term is considered as a noise in the time delay in communication channel, the stability condition of the system is provided. Afterward, using iterative learning control, a structure is considered in addition to ensure the stability of the system and zero tracking error by increasing iterations, by using the control signal of stabilized system via wavelet transform as its initial control signal, the position tracking are provided better than before.

Keywords:Teleoperation systems, synchronization, adaptive control, intelligent algorithms, wavelet transform, iterative learning control.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Optimal Position tracking for bilateral teleoperation systems

Hamid Shokri Ghaleh

Supervisor:

Dr. Alireza Alfi

Date: February 2014