



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه کنترل

## کنترل پیش‌بین سیستم‌های حرکتی از راه دور

دانشجو: سید وحید قوشخانه ای

استاد راهنما:

دکتر علی‌رضا الفی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل

آذر ۱۳۹۱

تقدیم به:

پیشگاه مقدس امام هشتم حضرت علی ابن موسی الرضا (ع)، پدر و

مادر عزیزم و تمامی پویندگان راه علم.

## تشکر و قدردانی:

با تشکر ویژه از استاد عزیز و ارجمند جناب آقای دکتر علیرضا الفی به جهت راهنمایی های موثر و ارزنده در پیشبرد این پایان نامه و همچنین صبر و بردباری ایشان در طول مدت انجام پایان نامه، و با تشکر از دوست عزیز جناب آقای حمید شگری بابت راهنمایی های ارزنده خود. تشکر نهایی را از تمامی اساتید زحمت کش دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود دارم به ویژه اساتید گرامی آقایان دکتر علی اکبرزاده کلات و دکتر محمد علی صدرنیا.

## چکیده:

در این پایان نامه، پایداری سیستم حلقه- بسته و خاصیت تطابق با طراحی دو کنترل کننده محلی جداگانه برای سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر در حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی و نامعینی در محیط عملیاتی قابل دستیابی است به طوری که کنترل کننده محلی فرمانبر وظیفه ردیابی موقعیت سیستم فرمانبر از سیستم فرمانده را به عهده دارد و کنترل کننده محلی دوم علاوه بر تضمین پایداری سیستم حلقه-بسته، خاصیت تطابق را تکمیل می کند. بدین منظور از استراتژی کنترل پیش بین برای جبران تاخیر مسیر رفت استفاده شده است که از خصوصیات بارز این کنترل کننده توانایی کار با سیستم های تاخیری، نامینیمم فاز و سیستم های دارای پاسخ برگشتی است. علاوه بر این از یک پیش بین اسمیت تغییر یافته برای جبران تاخیر مسیر برگشت و از یک پیش فیلتر برای حذف فراجش های زیاد سیستم استفاده می شود. یک فیلتر پایین گذر نیز به گونه ای طراحی شده است که در صورت وجود عدم قطعیت در تاخیر کانال برگشتی و عدم قطعیت در محیط عملیاتی همچنان سیستم پایدار بماند. شبیه سازی ها عملکرد مناسب ساختار کنترلی پیشنهادی را نشان می دهند.

**کلمات کلیدی:** سیستم های حرکتی از راه دور ، کنترل پیش بین ، پیش بین اسمیت ، فیلتر پایین گذر ، پیش فیلتر ، عدم قطعیت.

## فهرست مطالب

فصل ۱	۱
مقدمه	۱
۱-۱ تاریخچه	۲
۱-۲ تعریف سیستم‌های حرکتی از راه دور	۳
۱-۳ کاربرد سیستم‌های حرکتی از راه دور	۷
۱-۳-۱ کاربرد در فضا	۸
۱-۳-۲ کاربرد در آب	۹
۱-۳-۳ کاربرد در پزشکی	۱۰
۱-۳-۴ کاربرد در کار با مواد خطرناک	۱۱
فصل ۲	۱۲
مروری بر کارهای گذشته	۱۲
۲-۱ روش‌های اولیه	۱۳
۲-۱-۱ آزمایش‌های اولیه	۱۳
۲-۱-۲ کنترل نظارتی	۱۴
۲-۱-۳ حرکت از راه دور مبتنی بر نرم افزار	۱۷
۲-۱-۳-۱ نرم افزار مدولار	۱۷
۲-۲ روش‌های مبتنی بر پسیویتی و متغیرهای موج	۱۸
۲-۲-۱ شبکه‌های دو قطبی	۲۰
۲-۲-۲ ماتریس امیدانس	۲۱
۲-۲-۳ کنترل مبتنی بر متغیرهای موج	۲۱
۲-۳ کنترل مبتنی بر کنترل مقاوم	۲۹
۲-۴ کنترل مبتنی بر کنترل تطبیقی	۳۱

۳۴..... ۵-۲- کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین

۳۶..... فصل ۳

۳۶..... ساختار کنترلی پیشنهادی و شبیه‌سازی

۳۷..... ۱-۳ مقدمه ای بر اجزاء سیستم حرکتی از دیدگاه بلوکی

۳۹..... ۲-۳ ساده‌سازی سیستم حرکتی جهت طراحی کنترل‌کننده فرمانده

۴۱..... ۳-۳ روش کنترل پیش‌بین

۴۱..... ۱-۳-۳ مقدمه

۴۵..... ۲-۳-۳ پیش‌بین اسمیت

۴۷..... ۴-۳ فرایند طراحی کنترل‌کننده فرمانده با استفاده از روش پیشنهادی

۵۲..... ۵-۳ تحلیل مقاوم بودن سیستم مورد نظر

۵۴..... ۶-۳ شبیه‌سازی سیستم کنترلی

۵۶..... ۱-۵-۳ حالت (الف): بدون تاخیر در مسیرهای رفت و برگشت و بدون عدم‌قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر

۲-۵-۳ حالت (ب): با تاخیرهای نابرابر و کوچک در مسیر رفت و برگشت و بدون عدم‌قطعیت در محیط عملیاتی و

۵۹..... زمان تاخیر

۳-۵-۳ حالت (ج): با تاخیرهای نابرابر و کوچک و عدم‌قطعیت به میزان ۲ درصد در محیط عملیاتی و عدم‌قطعیت در

۶۰..... کانال رفت و برگشت

۴-۵-۳ حالت (د): با تاخیرهای برابر و بزرگ و بدون عدم‌قطعیت در محیط عملیاتی و بدون عدم‌قطعیت در کانال رفت

۶۱..... و برگشت

۵-۵-۳ حالت (ه): با تاخیرهای برابر و بزرگ و عدم‌قطعیت به میزان ۲ درصد در محیط عملیاتی و عدم‌قطعیت در

۶۲..... کانال رفت و برگشت

۶۳..... فصل ۴

۶۳..... نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶۴..... ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶۶..... مراجع

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱: سیستم حرکتی از راه دور دو طرفه ..... ۳
- شکل ۲-۱: جریان اطلاعات در یک سیستم حرکتی از راه دور ..... ۴
- شکل ۳-۱: سیستم کنترل حرکتی از راه دور دو طرفه ..... ۶
- شکل ۴-۱: محرک از راه دور روی مازول آزمایش ژاپن ..... ۸
- شکل ۵-۱: وسیله ی زیر دریایی جیسون ..... ۱۰
- شکل ۱-۲: کنترل نظارتی به کار برده شده در سیستم های حرکتی از راه دور ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: طرح سیستم های پیریدی استیور ..... ۱۵
- شکل ۳-۲: ساختار حرکت از راه دور های پیریدی ..... ۱۶
- شکل ۴-۲: شبکه دو قطبی ..... ۲۰
- شکل ۵-۲: کنترل مبتنی بر متغیرهای موج ..... ۲۳
- شکل ۶-۲: بلوک دیاگرام مساله  $H_{\infty}$  استاندارد ..... ۲۹
- شکل ۱-۳: سیستم حرکتی از راه دور دو طرفه ..... ۳۷
- شکل ۲-۳: سیستم فرمانبر ..... ۳۹
- شکل ۳-۳: طرح کنترلی ساده شده شکل ۱-۳ ..... ۴۰
- شکل ۴-۳: طرح کنترلی ساده تر شده برای سیستم های حرکتی از راه دور ..... ۴۰
- شکل ۵-۳: راهکار کنترل پیش بین ..... ۴۲
- شکل ۶-۳: طرح کلی کنترل پیش بین مدل ..... ۴۳
- شکل ۶-۳: ساختار جبران کننده ی اسمیت ..... ۴۵
- شکل ۷-۳: ساختار جبران کننده ی اسمیت بدون خطای مدلسازی ..... ۴۴
- شکل ۸-۳: بلوک دیاگرام پیش بین اسمیت با در نظر گرفتن فیلتر  $T$  ..... ۴۶
- شکل ۹-۳: کلی ترین شکل سیستم مورد مطالعه ..... ۵۰
- شکل ۱۰-۳: بلوک دیاگرام سیستم مورد مطالعه ..... ۵۱
- شکل ۱۱-۳: ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله با ۵ گام پیش بینی ..... ۵۶
- شکل ۱۲-۳: ردیابی نیرو به ورودی پله با ۵ گام پیش بینی ..... ۵۶



- شکل ۳-۱۳ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله با ۱۰ گام پیش‌بینی ..... ۵۷
- شکل ۳-۱۴ : ردیابی نیرو به ورودی پله با ۱۰ گام پیش‌بینی ..... ۵۷
- شکل ۳-۱۵ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله با ۴۰ گام پیش‌بینی ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۶ : ردیابی نیرو به ورودی پله با ۴۰ گام پیش‌بینی ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۷ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (ب) ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۸ : ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (ب) ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۹ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (ج) ..... ۶۰
- شکل ۳-۲۰ : ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (ج) ..... ۶۰
- شکل ۳-۲۱ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (د) ..... ۶۱
- شکل ۳-۲۲ : ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (د) ..... ۵۵
- شکل ۳-۲۳ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (ه) ..... ۶۲
- شکل ۳-۲۴ : ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (ه) ..... ۵۶

# فصل ۱

## مقدمه

## ۱-۱ تاریخچه

در طول ۶۵ سال اخیر تحقیقات و گزارش های متعددی در مورد کنترل سیستم های حرکتی از راه دور و سیستم های حرکتی از راه دور صورت پذیرفته است [۱]. سیستم های حرکتی از راه دور یا به طور عام حرکت از راه دور دارای تاریخچه بسیار غنی بوده و دارای کاربرد های زیادی است. و همواره به تعامل بین محیط و کاربر از راه دور پرداخته است [۲].

تاریخچه ی حرکت از راه دور به دهه ی ۱۹۴۰ بر می گردد، که در آن دوره گوارتز<sup>۱</sup> اولین محرک از راه دور مکانیکی را ساخت. سپس نمونه اصلاح شده را همین شخص در ۱۹۵۴ بهره برداری کرد. و برای جداسازی مکانیکی فرمانده<sup>۲</sup> از فرمانبر<sup>۳</sup> در همان سال یک سرومکانیزم الکتریکی مکان جهت انتقال نیرو به بهره برداری رسید. در اوایل دهه ی ۱۹۶۰ علاقه ی بیش از حد به این موضوع منجر به آزمایشاتی برای درک اثرات زمان تاخیر در حرکت از راه دور شد، که در آن فرل<sup>۴</sup> به آزمایش واپس زدگی نیرو تحت اثرات تاخیر در شبکه انتقال پرداخت. فرل و شریدان<sup>۵</sup> در سال ۱۹۶۷ از کنترل نظارتی برای مشکل تاخیر استفاده کردند که این موضوع منجر به تحقیقات گسترده ای در زمینه ی طراحی زبان های برنامه نویسی و توسعه ی برنامه های تصویری شد که ارتباطات بین فرمانده و فرمانبر را به حداقل می رساند. در ابتدای دهه ی ۱۹۸۰ روش های کنترلی پیشرفته تری مانند تحلیل لیاپانوفی و مدل مجازی داخلی بوجود آمدند. در اواخر دهه ی ۱۹۸۰ و اوایل دهه ی ۱۹۹۰ نظریه ی شبکه از طریق نمایش امیدانسی و هایبریدی، نظریه ی پراکندگی و کنترل بر اساس پسیو بودن پا به عرصه گذاشت. روش مبتنی بر پسیو بودن راه را برای حرکت از راه دور تاخیری و پایدار هموار نمود. در سال ۱۹۹۴ یوکوکوجی<sup>۶</sup> و یوشیکاوا<sup>۷</sup> به تاکید بر انتقال دو طرفه ی نیرو و سرعت پرداختند. در

---

<sup>1</sup> Goertz

<sup>2</sup> Master

<sup>3</sup> Slave

<sup>4</sup> Ferrel

<sup>5</sup> Sheridan

<sup>6</sup> Yokokohji

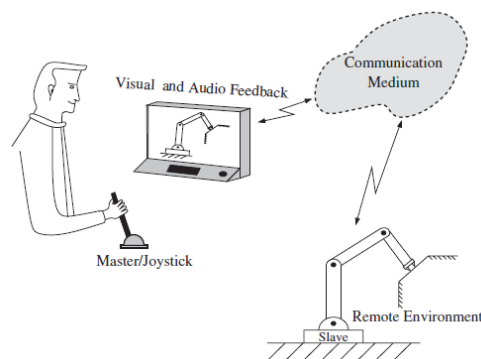
<sup>7</sup> Yoshikawa

اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰ نتایج زیادی با کنترل  $H_{\infty}$  حاصل شدند و در همین دوران از اینترنت برای ارتباطات بهره گرفته شد. در ابتدا ارسال داده در قالب بسته با مشکلاتی نظیر تاخیرهای تصادفی متغیر، تبادل داده‌ی گسسته و همچنین از دست رفتن داده مواجه بود. بنابراین در سال‌های بعد این موضوع مورد توجه قرار گرفت [۱].

روش‌هایی که در بالا به آنها پرداختیم در کاربرد های مختلفی نظیر کار با مواد رادیو اکتیو، کنترل تجهیزات دریایی بدون سر نشین، رباتیک فضایی، جراحی از راه دور و همچنین موضوع جدید روبات های کوچک به کار برده شدند [۱].

## ۲-۱ تعریف سیستم‌های حرکتی از راه دور

در این بخش به ارائه‌ی مفاهیمی مرتبط با حرکت از راه دور و همچنین بلوک های معادل آنها می‌پردازیم. پیشوند tele که به عنوان پیشوند اصلی در این بحث است دارای منشا یونانی بوده و به معنی "در یک فاصله‌ی مشخص" می‌باشد و teleoperation به معنی حرکت یا عمل در فاصله‌ی مشخص است. بنابراین عملیات یا حرکت از راه دور انسان‌ها را قادر می‌سازد با ایجاد شرایطی کاملاً مشابه با محیط به تحریک اشیا بپردازد (شکل ۱-۱). این کار با نصب یک محرک یا دسته به نام فرمانده که در سمتی است که انسان کار می‌کند انجام می‌شود و دستورات حرکتی را برای فرمانبر که عمل اصلی را انجام می‌دهد، ارسال می‌کند [۱].



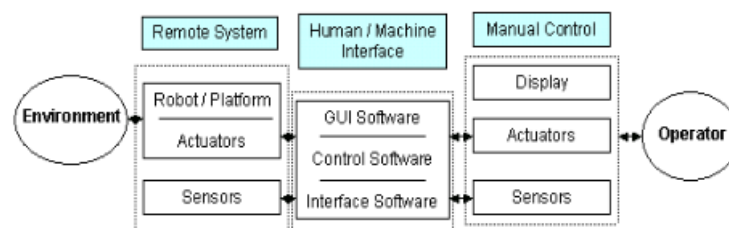
شکل ۱-۱: سیستم حرکتی از راه دور دو طرفه

حال قبل از توضیح و مقدمات بیشتر به تعریف مفاهیمی می پردازیم که در سیستم‌های حرکتی از راه دور نقش اساسی ایفا می کنند:

محرک از راه دور<sup>۱</sup> دستگاهی است که انسان را به عنوان کاربر قادر می سازد اشیا را در فاصله ای مشخص حرکت داده، حس کرده، و به طور مکانیکی آنها را تغییر دهد. در کلی ترین دیدگاه هر وسیله ای که گستره ی عملکرد مکانیکی انسان را که در دسترسش نیست افزایش دهد، محرک از راه دور شناخته می شود [۲].

ربات دور برد<sup>۲</sup> در زیر بخشی از سیستم‌های حرکتی از راه دور قرار دارد. این نوع ربات دستورات را از کاربری انسانی و در فاصله ای مشخص پذیرفته و با استفاده از سنسور و دیگر مکانیزم ها کارهایی انجام می دهد. این نوع ربات از اجزایی مانند سنسور، محرک برای تحرک و حرکت بازوی مکانیکی تشکیل شده است و از واسطی برای ارتباط انسان با این سنسور ها و محرک ها بهره می برد [۲].

حرکت از راه دور<sup>۳</sup> وسیله ای است جهت راه اندازی ربات با استفاده از هوش انسان که به رابطی بین دستگاه و انسان نیازمند است. یک سیستم حرکتی از راه دور معمولاً از دو بازوی مکانیکی ربات تشکیل شده است به گونه‌ای که انسان یکی از آنها را کنترل می کند، و به آن بازوی فرمانده می گویند.



شکل ۱-۲: جریان اطلاعات در یک سیستم حرکتی از راه دور

<sup>1</sup> Teleoperator

<sup>2</sup> Telerobot

<sup>3</sup> Teleoperation

کار این بازو ارسال دستوراتی به عملگر دور است که به آن بازوی فرمانبر می گویند. شکل زیر جریان اطلاعات را در یک سیستم حرکتی از راه دور نشان می دهد [۲].

هدف اصلی در یک سیستم حرکتی از راه دور کمک به کاربر جهت انجام کارهایی پیچیده و سخت به خصوص در محیط های خطرناک مانند فضا، نیروگاه های اتمی، میدان جنگ، دیدبانی و عملیات زیر آبی می باشد [۲].

دستکاری دور برد<sup>۱</sup> طرحی است که در آن بازوی مکانیکی فرمانبر که معمولا در محیطی دور از فرمانده قرار دارد، حرکت بازوی مکانیکی فرمانده را دنبال می کند. در حالت کلی، دستکاری دور برد به دو فرایند با تزویج شدید تقسیم می شوند: تعامل بین کاربر و دستگاه فرمانده، و تعامل بین دستگاه فرمانبر و محیط [۲].

حضور از راه دور<sup>۲</sup>: شریدان در سال ۱۹۸۷ حضور از راه دور را چنین توصیف کرد: ایده ی حس اطلاعات، ومخابره ی آن به انسان به گونه ای که احساس کند در آنجا حضور دارد. او همچنین حضور از راه دور را ((وهم اجباری)) و ((حس باطنی)) نامید. در حوزه ی علم رباتیک، حضور از راه دور به سیستم های کنترل شده از راه دوری اطلاق می شود که از بینایی کامپیوتری، گرافیک کامپیوتری و واقعیت مجازی بهره می برند. سیستم های حضور از راه دور دارای سه بخش هستند: یک سیستم دریافت جهت ضبط و نمایش اطلاعات از راه دور، یک سیستم انتقال شبکه و یک نمایشگر برای این منظور که کاربر محلی احساس کند در همان مکان مشغول کار است [۲].

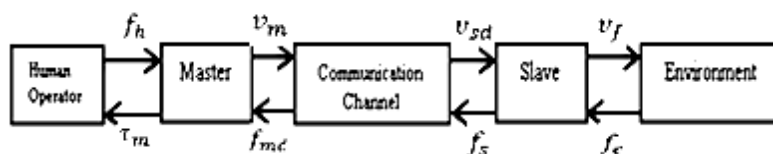
حال به بررسی چگونگی کار در حالت کلی می پردازیم. در حالت کلی انسان نیرویی را به بازوی مکانیکی فرمانده وارد می کند که منجر به نوعی جابجایی شده و به فرمانبر ارسال می شود و نهایتا فرمانبر این عمل را عینا انجام می دهد. اگر فرمانبر دارای سنسور نیرو باشد، آنگاه می تواند نیروهای

---

<sup>1</sup> Telem Manipulation

<sup>2</sup> Telepresence

تعاملی را از کار انجام شده به فرمانبر باز گرداند که در نهایت به گشتاور ورودی فرمانده وارد می شود و در این حالت گفته می شود حرکت از راه دور به طور دو طرفه کنترل شده است [۱]. هم اکنون به بررسی علمی تر موضوع می پردازیم. یک سیستم حرکت از راه دور دو طرفه شامل پنج زیر سیستم شامل کاربر انسانی، بازوی مکانیکی فرمانده، شبکه ی انتقال، بازوی مکانیکی فرمانبر و محیط. این بخش ها در شکل 1-3 نشان داده شده اند.



شکل ۱-۳: سیستم حرکتی از راه دور دو طرفه

در سیستم حرکت از راه دور دو طرفه کاربر نیرویی به میزان  $f_h$  به بازوی مکانیکی فرمانده وارد می کند. به موجب آن فرمانده با سرعت  $v_m$  حرکت کرده و این کار بوسیله ی سیگنالی از طریق خط انتقال، منتقل می شود و بازوی مکانیکی فرمانبر به سیگنال مرجع  $v_{sd}$  پاسخ می دهد. از سوی دیگر، نیروی اتصال و یا منابع خارجی دیگر به نام  $f_e$  حس شده و از طریق فرمانبر به نام  $f_s$  به خط داده می شود و پس از عبور از خط به سمت فرمانده به نام  $f_{md}$  منتقل می شود. در طراحی های سیستم حرکت از راه دور دوطرفه، هدف اصلی انتقال مطمئن سیگنال ها (جابجایی، سرعت، نیرو و غیره) بین بازوهای فرمانده و فرمانبر است به گونه ای که کاربر و عمل دور دست تا حد امکان به یکدیگر متصل شوند. به عنوان مثال علاقه مندیم در هر زمان  $t$ ،  $v_s(t) = v_m(t)$  و  $\tau_m(t) = f_s(t)$ . با این حال به دلیل تاخیر انتقال در شبکه ی مخابراتی بهترین پاسخ به صورت  $v_s(t) = v_m(t - \tau_1)$  و  $\tau_m(t) = f_s(t - \tau_2)$  که در آن تاخیر زمانی در مسیر پیشرو و  $\tau_2$  تاخیر زمانی در مسیر فیدبک است. از آنجایی که یک تاخیر کوچک ممکن است به راحتی موجب ناپایداری شود، کنترل کننده باید به گونه ای طراحی شود که پایداری سیستم را تضمین کند [۳]. لذا مشکل مهمی

که در اینجا وجود دارد این است که در صورت وجود تاخیر زمانی در شبکه انتقال، امکان ناپایداری سیستم محتمل است که این مساله مشکل انتقال دو طرفه است. از دیدگاه کنترلی اهداف اصلی کنترل از راه دور دو چیز است :

**پایداری :** نگه داشتن پایداری سیستم حلقه‌بسته بدون توجه به رفتار کاربر یا محیط.

**حضور از راه دور :** برای کاربر حس حضور از راه دور را فراهم کند که به آن شفافیت<sup>۱</sup> (تطابق) بین محیط و کاربر می‌گویند.

این دو در حالت کلی با یکدیگر در تضاد هستند. اما اگر این نیازها برآورده شوند انسان قادر به جابجایی اشیاء بزرگ مانند سازه‌های فضایی یا انجام کارهای ظریف مانند ریز جراحی خواهد بود و توانش را در مکان‌های دور از دسترس متمرکز خواهد کرد [۱].

همانگونه که در مقدمه‌ی این پایان‌نامه دیده می‌شود کار با سیستم‌های حرکتی از راه دور در حالت کلی از درجه پیچیدگی بالایی برخوردار است. و این از آن جهت است که در سیستم دو نوع تاخیر وجود دارد و هر کدام به صورت جداگانه بر سیستم اثر می‌گذارند.

### **۱-۳ کاربرد سیستم‌های حرکتی از راه دور**

سیستم‌های حرکتی از راه دور دو طرفه در طی ۶۵ سال اخیر جای خود را در زمینه‌ها و کاربردهای مختلف باز کرده است این کاربرد ها از محیط‌های صنعتی ساده گرفته تا محیط‌های خطرناک، فضا، آب و دیگر کاربرد ها می‌باشد. حال به هر یک از کاربرد ها به طور جداگانه می‌پردازیم.

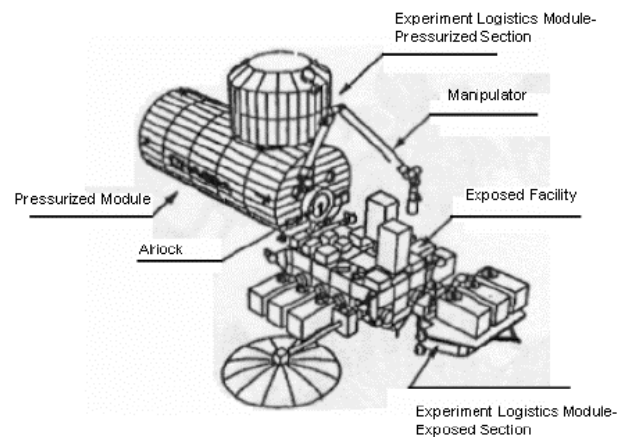
---

<sup>1</sup> Transparency



## ۱-۳-۱ کاربرد در فضا

از حرکت از راه دور مکررا در کاربرد های فضایی استفاده شده است [۲]. مقوله ی اکتشاف و کار در فضا در مدارهای هم زمان با زمین، نیاز به ربات های دور برد را بیش از پیش اعلام می کند که در آن از یک سو هزینه ی تعمیر و نگه داری در فضا کاهش یافته و از سوی دیگر ریسک امنیت فضانوردان را کاهش می دهد [۱]. اکثر کاوشگرهای فضایی ربات های دور برد هستند، که دارای کنترل های نسبتا ساده و معمولی اما قابل اعتماد هستند، این رباتها برای دریافت تصاویر و دیگر داده های حسی دارای پهنای باند پایین بوده و دارای قابلیت برنامه ریزی در فضا می باشند [۲]. در سال ۱۹۹۳ آژانس فضایی آلمان<sup>۱</sup> اولین ربات دور برد را به نام روتکس<sup>۲</sup> روی شاتل فضایی ناسا<sup>۳</sup> آزمایش کرد. این آزمایش دو چیز را نشان داد، اول توانایی کامپیوتر در کنترل ربات دور برد در فضا و دوم اینکه دستکاری دور برد در فضا از زمین با تاخیر زمانی همراه است [۲].



شکل ۱-۴: محرک از راه دور روی ماژول آزمایش ژاپن

<sup>1</sup> DLR  
<sup>2</sup> ROTEX  
<sup>3</sup> NASA

کشور ژاپن پیشرفت چشمگیری در زمینه ی حرکت از راه دور داشته است. ماژول آزمایش ژاپن<sup>۱</sup> به عنوان بخشی مهم در آزادی ایستگاه فضایی به شمار می رود. این ماژول دارای محرک از راه دور بزرگی است. شکل ۱-۴ این محرک از راه دور را نمایش می دهد [۲]. کاربرد فضایی دیگر ربات های دور برد بر سطح سیاره ها است که از موفقیت نسبی برخوردار بوده است.

نقشه بردار آمریکایی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۷ انجام شد که از تکنولوژی حرکت از راه دور بهره می برد. اخیراً آزمایشاتی برای بازوی رباتیکی با شش درجه آزادی با ماهواره ای تی اس هفت<sup>۳</sup> در فضا انجام شده است که دارای ۷ ثانیه تاخیر است و این کار با طرح محیط مجازی و نمایش پیش بین انجام می شود [۱].

جدید ترین کاربرد فضایی حرکت از راه دور ربات های سیار هستند. نحوه ی کار آنها به این صورت است که سیگنالی تصویری را به کاربر فیدبک کرده تا او اطراف ربات را بررسی کرده و دستور اصلاحی را صادر کند. اما این کار نیاز به پهنای باند زیادی برای ارسال داده دارد و همچنین دور بین به کار برده شده دارای زاویه دید کوچکی است. پس نیاز است سیگنال فیدبک نیروی دیگری به کاربر ارسال شود تا اطراف ربات سیار را بررسی کند [۱].

## ۱-۳-۲ کاربرد در آب

در طول دهه ی ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ یکی از کاربردهای اصلی حرکت از راه دور برای اکتشافات علمی و کاربردهای نظامی در تجهیزات زیرآبی بدون سرنشین بود. استفاده از تور برای کنترل چنین تجهیزاتی عملی نیست زیرا ریسمان پیچ و تاب خورده و به موانع گیر میکند. از سوی دیگر ارسال سیگنالهای فیدبک و کنترل تاخیر بزرگی را ایجاد کرده که عملکرد و پایداری سیستم را دستخوش تغییر می کند.

---

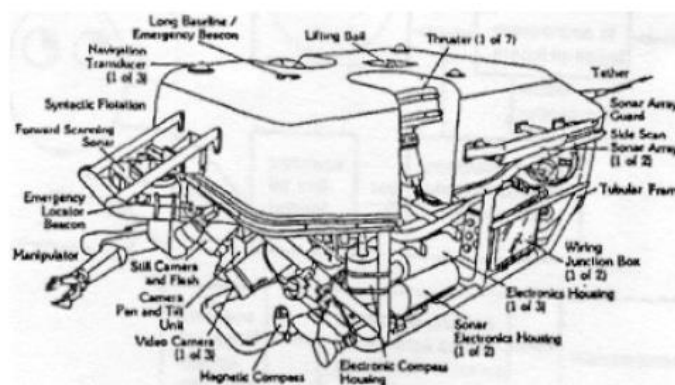
<sup>1</sup> JEM

<sup>2</sup> American Surveyor

<sup>3</sup> ETS-7

در آن زمان روش کنترلی مورد استفاده برای سیستم‌های حرکتی از راه دور کنترل نظارتی بود که به موجب آن تاخیر زمانی حذف می شد [۱].

در کاربردهای زیر دریایی به طور خاص می‌توان به اکتشاف نفت، جستجو و نگهداری سر درل، سکوها و خطوط لوله نفتی، نقشه‌های زمینی و کارهای طبقه بندی شده ی ناوبری اشاره کرد. از جمله پیشروان این زمینه می‌توان به آمریکایی ها، بریتانیایی ها و ژاپنی ها اشاره کرد. شکل زیر یک وسیله ی زیر دریایی به نام جیسون<sup>۱</sup> را نشان می دهد که برای مکان یابی تایتانیک از کنترل دوربرد استفاده می کند [۲].



شکل ۱-۵: وسیله ی زیر دریایی جیسون

### ۱-۳-۳ کاربرد در پزشکی

حرکت از راه دور خود را در کاربردهای پزشکی نظیر جراحی از راه دور پیدا کرده است. جراحی از راه دور اجازه ی تبادل مهارت های پزشکی را بدون حضور پزشک می دهد. این کار باعث صرفه جویی در هزینه، زمان و انرژی شده و اتاق عمل را از دور دست در اختیار جراح می دهد. اخیراً آزمایشاتی در مورد جراحی از راه دور بین دو کشور آمریکا و آلمان انجام شده است که در آن زمان

<sup>1</sup> Jason

تاخیر یک نگرانی مهم بوده است [1]. در عکس برداری به شیوه ی سی.ای.تی<sup>۱</sup> و ام.آر.آی<sup>۲</sup> از حرکت از راه دور برای حرکت وسایل رباتیکی به منظور ماشینی سازی سر استخوان ران و دیگر ساختارهای استخوانی و جا انداختن با ثبات تر ایمپلنت های مفصل پروستاتی استفاده می شود که در قدیم با استفاده از سوراخکاری با مته انجام می گرفت [۲].

### ۱-۳-۴ کاربرد در کار با مواد خطرناک

اولین کاربرد بازوهای مکانیکی حرکت از راه دور برای جابه جایی مواد هسته ای بود [۱]. در پاکسازی زباله های سمی، حرکت از راه دور نقش بسیار مهمی دارد به ویژه در نیروگاههای هسته ای. وجود مواد رادیو اکتیو و نشتی محیط را برای انسان ها خطرناک کرده و بدین جهت تمام کارها به حرکت از راه دور سپرده می شود. مفهوم اصلی در کنترل از راه دور و حرکت از راه دور به مانند قدیم است اما اندازه سیستم به دلیل اندازه کاری که باید انجام شود، افزایش می یابد. سیستم‌هایی که در این محیط ها کنترل می‌شوند ممکن است از غلتک های لوله ای گرفته تا کامیون‌هایی با بازوهای مکانیکی که با نیروی هیدرولیکی کار کرده است باشند و می‌توانند چندین هزار تن بار مفید را حمل کنند [۲]. از مفاهیم مهمی که در این محیط ها با آنها سر و کار داریم می‌توان به مقیاس بندی حرکت، فیدبک تصویری، محدودیت های کاری و فیدبک نیرو اشاره کرد. در سال ۲۰۰۴ وانگ و یان کاری را در مورد شناسایی نشتی مواد رادیو اکتیو مهر و موم شده ارائه دادند [۱].

---

<sup>1</sup> CAT

<sup>2</sup> MRI

## فصل ۲

### مروری بر کارهای گذشته

## ۲-۱ روش‌های اولیه

در بخش گذشته در مورد مقدمات و کاربرد های سیستم‌های حرکتی از راه دور صحبت کردیم، در این بخش به ارائه روش‌های کنترلی قدیم و جدید در حوزه سیستم‌های حرکتی از راه دور خواهیم پرداخت و معایب و مزایای هر کدام را ارائه خواهیم داد. در طول پنج دهه‌ی اخیر پس از ارائه اولین سیستم‌های حرکت از راه دور در آزمایشگاه ملی آرگون<sup>۱</sup> بسیاری از روش‌ها جهت کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور ایجاد شدند. بر اساس روش‌ها و مفاهیم مختلف، کنترل‌کننده های متفاوتی نیز جهت حصول به پاسخ مورد علاقه طراحی شدند. حال بر اساس سیستم در دسترس و نیازهای کاری ممکن است از یک (یا چند) کنترل‌کننده خاص استفاده شود. در نتیجه تمام روش‌ها و کنترل‌کننده های موجود دارای پاسخ یکسانی نیستند و مهندس کنترل باید ساده ترین کنترلر در دسترس را برای حصول به پاسخ مد نظر انتخاب کند [۲]-[۹] و [۱۰].

## ۲-۱-۱ آزمایش‌های اولیه

در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ شریدان و فرل با انجام آزمایشاتی ساده به بررسی اثرات زمان تاخیر در عملکرد کاربران انسانی در بازوهای مکانیکی از راه دور پرداختند. هدف بدست آوردن زمان کل برای انجام یک کار مشخص بود. نحوه ی کار بدین صورت بود که هر گاه تاخیر وارد حلقه انتقال می شد کاربر برای اینکه مطمئن شود کار انجام شده است، با استفاده از یک استراتژی به نام **حرکت و توقف** پاسخ می داد. این استراتژی با یک حرکت کنترلی آغاز شده و منتظر می مانیم پاسخ رباتی که در دور دست واقع است را ببینیم آنگاه با یک حرکت تصحیح کننده مجددا منتظر می مانیم تا پاسخ را مشاهده کنیم و این فرایند تا جایی ادامه می یابد که کار به طور کامل انجام شود.

---

<sup>1</sup> Argon National Laboratory

$N(I)$  را تعداد حرکت های انفرادی اولیه بر اساس استراتژی حرکت و توقف می گویند. عدد  $N(I)$  فقط به درجه سختی کار وابسته است و از مقدار تاخیر مستقل است. در نتیجه زمان کامل شدن یک فرایند  $t(I)$  بر اساس مقدار  $N(I)$  به صورت زیر قابل محاسبه است :

$$t(I) = t_r + \sum_{i=1}^{N(I)} (t_{mi} + t_{wi}) + (t_r + t_d)N(I) + t_g + t_d \quad (1-2)$$

که در آن  $t_r$  زمان عکس العمل انسان  $t_{mi}$  مدت زمان حرکت  $t_{wi}$  مدت زمان توقف پس از هر حرکت،  $t_g$  زمان اخذ،  $t_d$  زمان تاخیر موجود در شبکه ی مخابراتی است. از آزمایشات بالا دو نتیجه حاصل می شود یکی اینکه زمان نهایی نسبت به تاخیر موجود خطی است و دوم اینکه کاربر به طور «پایدار» فرامینی را صادر می کند.

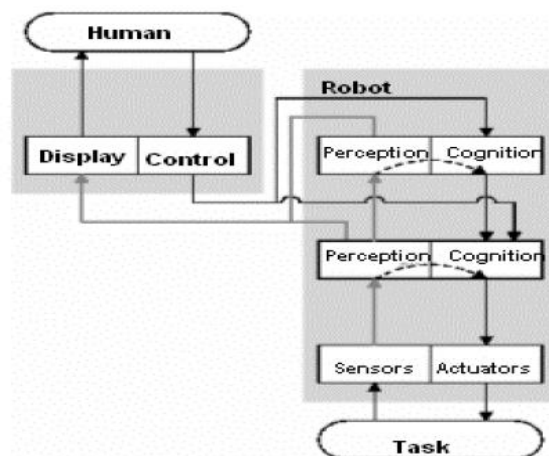
## ۲-۱-۲ کنترل نظارتی

مطابق با معادله (۱-۲)، زمان کامل شدن یا همان زمان خاتمه برای یک کار مشخص با عامل تاخیر در یک حلقه ی کنترلی رابطه ی خطی دارد؛ بنابراین هر چه تاخیر بیشتر باشد، زمان خاتمه بیشتر است. یک راه حل عملی برای از بین بردن این مشکل آن است که دستورات ارسالی توسط کاربر به فرم نظارتی اعمال شود. بر اساس سختی کار و آزادی عملی که کنترل کننده ی دور دارد، کار نظارت می تواند به فرم قیاسی یا نمادین باشد؛ مورد اول یعنی نظارت قیاسی ارتباط مستقیم بین دستورات ناظر و دستورات بازوی محیط دور را برقرار می کند در حالی که دومی یعنی نظارت نمادین دستورات زبانی سطح بالا را صادر می کند که در اینجا بازوی محیط آنها را به عنوان کارهای طبقه بندی شده (زیر فعالیت) قلمداد می کند. به طور طبیعی در این حالت بازوی دور برای انجام آزادانه ی زیر فعالیت ها از "هوش" بیشتری برخوردار است. ویتنی<sup>۱</sup> در زبان برنامه نویسی نظارتی از معادلات فضای حالت گسسته و ایده ی بهینه سازی بر اساس روش های جستجو برای بدست آوردن عملکرد بهینه استفاده

<sup>1</sup> Whitney

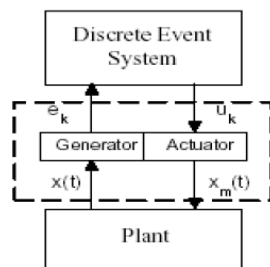
کرد. این روش دینامیک های بازوی مکانیکی را در نظر نگرفته و به ویژگی هندسی مساله یعنی موقعیت بازو، شیء جابه جا شده و موانع ممکن می پردازد [۱] و [۸].

محققان آرژانتینی به نام های گارسیا<sup>۱</sup>، پستیگو<sup>۲</sup> و سوریا<sup>۳</sup> روش کنترل نظارتی را بنیان نهادند. این روش یک روش کنترل هایبریدی است. در کنترل هایبریدی سیگنال ها پیوسته اما رخدادها گسسته هستند. در سیستم های هایبریدی برای سیگنال های پیوسته سیستم باید با معادلات دیفرانسیل و برای رخدادهای گسسته با یک معادلات دیفرنس مدل شود. مدل حرکت از راه دور به این سبک در شکل ۱-۲ نشان داده شده است :



شکل ۱-۲: کنترل نظارتی به کار برده شده در سیستم های حرکتی از راه دور

در سال ۱۹۹۲، استیور<sup>۴</sup> و آنتاسکلیس<sup>۵</sup> سیستمی هایبریدی به شکل ۲-۲ ارائه دادند.



شکل ۲-۲: طرح سیستم هایبریدی

<sup>1</sup> Garcia  
<sup>2</sup> Postigo  
<sup>3</sup> Soria  
<sup>4</sup> Stiver  
<sup>5</sup> Antasklis



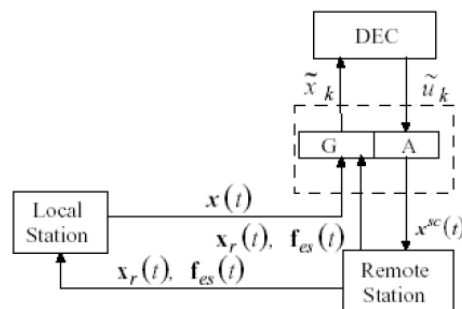
سیستم پیوسته که از آن معمولاً به نام دستگاه یاد می شود دارای فضای حالت پیوسته بوده و با معادلات دیفرانسیل به صورت زیر مدل می شود.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (2-2)$$

کنترل کننده سیستمی گسسته است و با یک معادله مشخصه مدل می شود. این معادله با پنج تایی زیر مشخص می شود :

$$A = \{W, X_d, \tilde{U}, \delta, \phi\} \quad (3-2)$$

امکان اینکه کنترل کننده و دستگاه به طور مستقیم به یکدیگر متصل شوند وجود ندارد زیرا نوع سیگنال ها در آنها متفاوت است. این دو از طریق مولد و عملگر به یکدیگر متصل می شوند. استراتژی نظارتی بیان شده در شکل 2-3 نشان داده شده است.



شکل 2-3: ساختار حرکت از راه دور هایبریدی

رخدادهایی که در این سیستم حرکتی از راه دور در نظر گرفته می شوند به صورت زیر است:

حداکثر نیرو، ارتباط با خطا مواجه شده است، بازگشت ارتباط، و اتمام زمان بازگشت ارتباط. رخدادهایی که در سیستم حرکتی از راه دور در نظر گرفته می شوند مرتبط با سیگنال موقعیت و حالت شبکه ی مخابراتی است. بنابراین رخداد ها زمانی تولید می شوند که آستانه ی موقعیت تمام شده باشد. با کنترل نظارتی، انسان مساله را به مجموعه ای از کارها تقسیم کرده و ربات هر یک را انجام می دهد. وقتی کاربر دستوری را به ربات میدهد، نقش انسان کنترل بصری فرایند است. وقتی که آستانه ی موقعیت و نیرو تمام شده باشند و یا ارتباط در سیستم حرکتی از راه دور مختل شده

باشد کنترل کننده ی نظارتی مراجعی را که از ایستگاه محلی ارسال می شوند، تغییر می دهد. نقش ناظر هماهنگی و اعمال کارهای کنترلی است تا عملکرد سیستم افزایش یابد به خصوص وقتی که در سیستم تاخیر وجود دارد و یا سیستم در معرض پیشرفت غیر طبیعی است [۲].

## ۲-۱-۳ حرکت از راه دور مبتنی بر نرم افزار

پیشرفت در طراحی میکروپروسور در طی دهه ی ۱۹۷۰ تا ابتدای دهه ی ۱۹۹۰ سبب شد زمینه ی تحقیقاتی حرکت از راه دور به توان محاسباتی در نظارت با سطح بالاتری پردازد و کاربر انسانی دستورات سطح بالاتری را به بازوی دور اعمال کند. یک زبان برنامه نویسی خاص که از شیوه ی کنترل نظارتی بهره می برد و فیدبک نیرو و تصویر از محیط و بازوی دور بدست می دهد، در دسترس قرار گرفت. برنامه نوشته شده به دو بخش تقسیم می شود. بخش اول دستورات ابتدایی است که نیاز به هیچ گونه ورودی از کاربر ندارد مانند بستن عملگر نهایی و بخش دوم دستورات متغیری است که نیاز به ورودی از سوی کاربر دارد یا داشتن جزئیات کامل از مسیر مانند حرکت از نقطه ی A به نقطه ی B.

## ۲-۱-۳-۱ نرم افزار مدولار

برای آزمایش رفتار محرک های دور برد تحت شرایط مختلف، نیاز به ساخت یک ساختار مدولار ضروری به نظر می رسد. با چنین ساختاری تعامل بین کاربر و ماشین، تحقق فیدبک نیرو، و ارتقاء نمایش تصویری با توجه به تغییر آنلاین تنظیمات حاصل می شود. جنبه ی دید تحت مطالعه قرار گرفت و تبدیلات کارتیزین بسیاری بین فریم های مرجع نمایش، کنترل کننده، بازوی مکانیکی و دوربین ها انجام شد.

در این بین سیستمی نرم افزاری و سخت افزاری نیز معرفی شد که به کاربر اجازه می داد بین روش های کنترلی مختلف یکی را انتخاب کند و همچنین مدلی مجازی از بازوی مکانیکی برای تست

مجموعه فراهم می کرد. کاربر می تواند از دستورات سرعت یا موقعیت استفاده کند یا می تواند سیستم فرمانده - فرمانبر را تحت شرایط یک دوطرفه یا دو طرفه قرار دهد یا از کنترل نظارتی سطح بالا استفاده کند. همچنین می توان از مدل مجازی تاخیر دار برای تست سیستم استفاده کرد زیرا ممکن است تحت سیستم واقعی و تاخیر دار سیستم ناپایدار شود. تاخیر موجود در حلقه ی کنترلی ایده ی نمایش پیش بینی کننده را بوجود آورد که کاربر اجازه می دهد پاسخ سیستم را قبل از اینکه واقعا رخ دهد مشاهده کند و از این طریق احتمال حوادث ممکن را کاهش دهد [۱].

## ۲-۲ روش های مبتنی بر پسیویتی و متغیرهای موج

از دیدگاه ریاضی یک سیستم حرکتی از راه دور از دو بخش فرمانده و فرمانبر تشکیل شده است که با یکدیگر در حال تبادل سیگنالهایی از قبیل موقعیت، سرعت و یا نیرو می باشند که در آن فرمانبر در تلاش است کار فرمانده را دقیقاً انجام دهد و فرمانده نیز در عوض گشتاورهای ورودی از فرمانبر را مد نظر قرار می دهد. مدل خطی یک سیستم فرمانده- فرمانبر به صورت زیر است :

$$\begin{cases} M_m \ddot{x}_m + B_m \dot{x}_m = f_m + f_h \\ M_s \ddot{x}_s + B_s \dot{x}_s = f_s - f_e \end{cases} \quad (۴-۲)$$

که در آن  $x_* \in \mathbb{R}^n$  (\* = m یا s) مختصات تعمیم یافته،  $f_* \in \mathbb{R}^n$  نیروهای ورودی (تعمیم یافته) ،  $M_*$  یک ماتریس اینرسی مثبت،  $B_*$  ماتریس میرایی و  $f_e, f_h$  بترتیب نیروهای خارجی اعمال شده توسط کاربر و محیط هستند.

یک مدل غیرخطی جزئی تر با استفاده از معادله لاگرانژ به صورت زیر است :

$$\begin{cases} M_m(x_m) \ddot{x}_m + C_m(x_m, \dot{x}_m) \dot{x}_m = f_m + f_h \\ M_s(x_s) \ddot{x}_s + C_s(x_s, \dot{x}_s) \dot{x}_s = f_s - f_e \end{cases} \quad (۵-۲)$$

شامل بخش های کوریولیزی و گریز از  $C(x_*, \dot{x}_*)$  ماتریس اینرسی، و ماتریس  $M_*$  که در آن

مرکزی است. معادلات غیر خطی حرکت دارای چند ویژگی ساختاری هستند. داریم :

$$(PD): M_* = M_*^T \text{ مثبت معین است} \quad (6-2)$$

$$(SS): \dot{M}_* - 2C_* \text{ متقارن است} \quad (7-2)$$

نظریه ی پسیویتی ویژگی ورودی-خروجی سیستم‌های دینامیکی است و در نظریه ی شبکه موضوعی اساسی است و به طور کلی با تبادل انرژی بین سیستم‌های متصل به هم مرتبط است.

تعریف ۱. یک سیستم دینامیکی با معادلات

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x, u) \end{cases} \quad (8-2)$$

پسیو است اگر تابعی اسکالر، مشتق پذیر و نیمه معین مانند  $V(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  موجود باشد به گونه‌ای که :

$$\dot{V} \leq u^T y \quad (\equiv \int_0^t u^T(\eta) y(\eta) d\eta \geq V(t) - V(0)) \quad (9-2)$$

و همچنین سیستم بی اتلاف است اگر :

$$\dot{V} = u^T y \quad (\equiv \int_0^t u^T(\eta) y(\eta) d\eta = V(t) - V(0)) \quad (10-2)$$

پیشنهاد ۲. با ویژگی مثبت معین بودن برای  $M_*$  و متقارن بودن  $\dot{M}_* - 2C_*$  و با فرض اینکه انسان و محیط پسیو باشند یعنی :

$$\int_0^t [f_h^T(\eta) \dot{x}_m(\eta) - f_e^T(\eta) \dot{x}_s(\eta)] d\eta \geq 0 \quad (11-2)$$

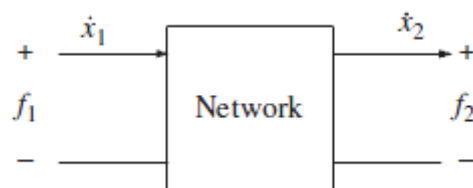
آنگاه سیستم غیر خطی با ورودی  $[f_s^T, f_m^T]^T$  و خروجی  $[\dot{x}_m^T, \dot{x}_s^T]$  نسبت به تابع انرژی زیر پسیو است:

$$V = \frac{1}{2} [\dot{x}_m]^T \begin{bmatrix} M_m & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} \quad (12-2)$$

بنابراین می‌توان این سیستم را بی اتلاف در نظر گرفت که در آن نیروها در حکم ورودی و سرعت‌ها در حکم خروجی هستند و می‌توان تبادل انرژی را در (۱): داخل سیستم حرکتی از راه دور و (۲) در دنیای خارج یعنی بین انسان و محیط دوردست مورد مطالعه قرار داد. این کار بسیار مفید است زیرا می‌دانیم که ترکیب سری دوقطبی‌های پسیو، پسیو است و ترکیب سری یک دوقطبی با یک قطبی نیز پسیو است. همچنین می‌دانیم که پسیویتی منجر به تحلیل پایداری کل سیستم خواهد شد. بنابراین با فرض پسیو بودن محیط و کاربر اگر سیستم حرکتی از راه دور پسیو باشد، آنگاه کل سیستم پسیو است. حال با این مقدمه به بررسی روش‌های مبتنی بر پسیویتی می‌پردازیم [۱].

## ۲-۲-۱ شبکه‌های دو قطبی

در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰، مشاهده شد که یک سیستم حرکتی از راه دور متشکل از فرمانده و فرمانبر با کنترل‌کننده‌ها و اجزای بین آنها می‌تواند به صورت یک شبکه‌ی دو قطبی مدل شود که برای آنها ابزار تحلیل موجود هستند. شبکه‌ی دو قطبی نشان داده شده در شکل (۲-۴) را در نظر می‌گیریم که سیگنال‌های خارجی بترتیب ولتاژ و جریان در مدارات الکتریکی و نیرو و سرعت در سیستم‌های مکانیکی هستند.



شکل ۲-۴: شبکه دو قطبی

رفتار چنین شبکه‌ای با نمایش‌های ماتریسی متفاوتی قابل نمایش است. مثلاً ماتریس امپدانس یا همان  $Z(s)$  که نیروها را به سرعت‌ها مرتبط می‌سازد، ماتریس هایبرید یا همان  $H(s)$  که بردارهای

ترکیبی نیرو - سرعت را به بردارهای ترکیبی نیرو - سرعت مرتبط می سازد. کاربرد این دو نمایش بسته به نوع سیگنال های حس شده و ورودی های کنترلی هستند [۱].

## ۲-۲-۲ ماتریس امپدانس

با فرض وجود شارش<sup>۱</sup> به عنوان ورودی در دو طرف شبکه ی دو قطبی نمایشی امپدانس از یک شبکه فرمانده- فرمانبر کنترل شده با کنترل کننده تناسبی-مشتقی<sup>۲</sup> می توان بدست آورد که سرعت ها را به نیروها از طریق ماتریس امپدانس زیر مرتبط می سازد :

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_m(s) - c_{11}(s) & -c_{12}(s) \\ -c_{21}(s) & z_s(s) - c_{22}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} \quad (۱۳-۲)$$

$Z_{cl}$

که در آن  $Z_*$  امپدانس های مشخصه ی فرمانده و فرمانبر هستند. نکته ی مهم این است که کنترل کننده  $(c_{ij}, i, j = 1, 2)$  تمام بخش های ماتریس امپدانس کنترل شده  $Z_{cl}(s)$  را تحت تاثیر قرار میدهد. و در اینجا  $Z_{cl}(s)$  یک ماتریس تابع تبدیل حقیقی مثبت است [۱].

## ۳-۲-۲ کنترل مبتنی بر متغیرهای موج

به دلیل اهمیت، ابتدا به بررسی روش های کنترلی مبتنی بر نظریه پسیویتی و متغیرهای موج پرداخته می شود. ناپایداری در سیستم های حرکتی از راه دور با زمان تاخیر در کانال ارتباطی به واسطه ساختار غیرپسیو کانال ارتباطی است. اساس ساختار روش های کنترلی مبتنی بر نظریه پسیویتی، ایجاد پسیویتی برای کانال ارتباطی است. مطابق آنچه که قبلاً بیان گردید یادآوری می شود که روش کنترلی مبتنی بر نظریه پسیویتی اگرچه پایداری سیستم حرکتی از راه دور برای تمام زمان های تاخیر را تضمین می کند ولی در عمل به واسطه نامعینی در سیستم های حرکتی از راه دور

<sup>1</sup> Flow

<sup>2</sup> Proportional Derivative

تحقق‌پذیر نیست. مزیت روش‌های کنترلی مبتنی بر نظریه پسیویتی، کاربرد آن برای سیستم‌های خطی و غیرخطی بدون این که اطلاعات دقیقی از مدل سیستم در دست باشد، است. در سال ۱۹۸۹، اندرسن<sup>۱</sup> و اسپانگ<sup>۲</sup> [۱۲]، به طراحی کنترل‌کننده‌ای براساس نظریه پسیویتی و نظریه پراکندگی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور در حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی پرداختند. در این روش، کنترل‌کننده طراحی شده تضمین می‌کند که کانال ارتباطی مستقل از زمان تاخیر پسیو باقی بماند. عملکرد روش پیشنهادی مزبور با افزایش زمان تاخیر در کانال ارتباطی کاهش می‌یابد. در سال ۱۹۹۱، نایمیر<sup>۳</sup> و اسلاتین<sup>۴</sup> [۱۴] در ادامه کار اندرسن و اسپانگ [۱۲]، متغیرهای موج را به‌منظور بررسی پایداری سیستم‌های حرکتی از راه دور با زمان‌های تاخیر نامشخص ولی ثابت پیشنهاد کردند. آنها در مقاله خود به پیش‌بینی متغیرهای موج به‌منظور بالا بردن عملکرد سیستم‌های حرکتی از راه دور نیز اشاره کرده‌اند.

آنچه در کاربرد متغیرهای موج برای سیستم‌های 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 محل‌های اتصال یا ترمینال‌های خط انتقال رخ داده و سبب نوسان در پاسخ سیستم می‌گردد. این عیب با تطبیق‌دادن امپدانس موج با امپدانس محیط عملیاتی رفع می‌گردد که به روش تطبیق امپدانس<sup>۵</sup> معروف است. بدین منظور، در ترمینال سیستم فرمانده از ادیمیتانس  $\frac{1}{B}$  و در ترمینال سیستم فرمانبر از امپدانس  $B$  استفاده می‌شود (شکل ۲-۵).

در سال ۱۹۹۳، لورنس [۱۷]، روش ۴ کاناله برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی را پیشنهاد کرد. در این روش، با استفاده از نظریه پسیویتی، فیلترها

---

<sup>1</sup> Anderson

<sup>2</sup> Spong

<sup>3</sup> Niemeyer

<sup>4</sup> Slotine

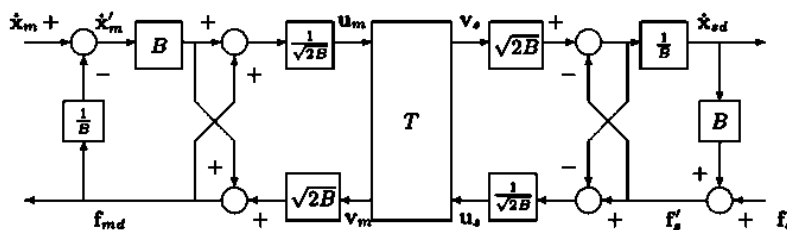
<sup>5</sup> Impedance Adaptation

طوری طراحی می‌شوند که پایداری سیستم حرکتی از راه دور در حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی تضمین شود.

در سال ۱۹۹۶، یوشیکاوا<sup>۱</sup> و یودا<sup>۲</sup> [۱۸] به ارزیابی پایداری ساختار ۴ کاناله با استفاده از نظریه پراکنندگی نسبت به زمان تاخیر پرداختند. بر این اساس، روشی کنترلی پیشنهاد گردید که قادر به پایدارسازی ساختار از نوع نیرو-نیروی تاخیر یافته می‌باشد.

در سال ۱۹۹۷، کسوگو<sup>۳</sup> و مرویاما<sup>۴</sup> [۱۹] با در نظر گرفتن این که تحت تبدیل دوخطی  $s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)}$  شرط

پسیویتی تغییر نمی‌کند، معادلات مربوط به سیستم فرمانده و فرمانبر را به فرم گسسته تبدیل کردند. مزیت عمده روش مذکور در این است که تاخیر در کانال‌های ارتباطی رفت و برگشت را می‌توان برابر در نظر نگرفت. در سال ۱۹۹۷، نایمیر و اسلاتین [۲۰] در ادامه کار خود و رفع عیب خطای ردیابی موقعیت<sup>۵</sup> استفاده از فیلتر را در متغیرهای موج پیشنهاد کردند. فیلتر کردن متغیرهای موج ضمن حفظ پایداری، سبب حذف نویز و حرکت هموار می‌گردد.



شکل ۲-۵: کنترل مبتنی بر متغیرهای موج

در این روش، به دلیل این که اطلاعات مربوط به موقعیت در انتگرال سیگنال موج قرار دارد، وجود تاخیر زمانی در کانال ارتباطی و عدم ثابت ماندن انتگرال موج بعد از عبور از کانال ارتباطی سبب ایجاد خطا در ردیابی موقعیت سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر می‌شود. برای رفع این عیب، آنها

<sup>1</sup> Yoshikawa

<sup>2</sup> Ueda

<sup>3</sup> Kosuge

<sup>4</sup> Murayama

<sup>5</sup> Position Drift



انتگرال موج را از کانال ارتباطی عبور داده و سپس در سمت گیرنده با قرار دادن یک فیلتر (که به فیلتر بازسازی مشهور است و دارای دینامیک غیرخطی است) سیگنال اولیه را بازسازی کرده‌اند. در سال ۱۹۹۸، نایمیر و اسلاتین [۲۱] در ادامه کار خود به بررسی زمان‌های تاخیر متغیر در کانال ارتباطی پرداختند. در این بررسی، از فرض پسیوبودن کلیه بلوک‌های بکار رفته در سیستم‌های حرکتی از راه دور به جز کانال تاخیر، استفاده شده است. هدف آنها، تضمین پسیوبودن سیستم حرکتی از راه دور با ایجاد پسیویتی برای کانال تاخیر است. آنها نشان دادند که تغییرات زمانی سبب ایجاد تاخیر و خراب شدن سیگنال موج می‌شود. این واقعیت، با گذشت زمان، سبب ایجاد خطای ردیابی زیاد بین سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر می‌گردد. آنها به منظور رفع عیب فوق، به جای انتقال سیگنال و سپس انتگرال‌گیری در سمت گیرنده، ابتدا انتگرال موج و انتگرال انرژی را محاسبه کرده و سپس آنها را به همراه متغیرهای موج ارسال می‌کنند.

در سال ۱۹۹۹، یوکوکوهجی<sup>۱</sup> و همکاران [۲۲]، در راستای کار نایمیر و اسلاتین [۶۰] به منظور رفع محدودیت‌های محافظه‌کارانه آن (کاهش آثار ناشی از تغییرات زمان تاخیر در کانال ارتباطی) روشی را ارائه کردند که براساس آن عملکرد مطلوب سیستم حرکتی از راه دور به واسطه تغییرات تاخیر زمانی 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 سال ۲۰۰۰، یوکوکوهجی و همکاران [۲۳]، روش مانیتورینگ انرژی را به منظور تضمین پسیویتی برای زمان‌های تاخیر متغیر در کانال ارتباطی معرفی کردند. در سال ۲۰۰۰، لی<sup>۲</sup> و همکارش [۲۴] روشی را با استفاده از ذخیره انرژی مجازی به منظور تضمین پسیویتی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه ارائه کردند.

---

<sup>1</sup> Yokokohji

<sup>2</sup> Lee

در سال ۲۰۰۱، مُنیر<sup>۱</sup> و بوک<sup>۲</sup> [۲۵] 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<sup>۳</sup> نیز به‌منظور تضمین شرط پسیویتی بلوک پیش‌بینی‌کننده استفاده گردیده است. در واقع، تنظیم‌کننده انرژی نوعی فیلتر است که از افزایش انرژی برگشتی جلوگیری می‌کند. روش مطرح‌شده به‌دلیل وجود تاخیر متغیر در کانال ارتباطی دارای خطای ردیابی موقعیت می‌باشد.

در سال ۲۰۰۲، مُنیر و بوک [۲۶] در ادامه کار خود و به‌منظور رفع خطای ردیابی موقعیت به‌دلیل تاخیر متغیر در کانال ارتباطی، روشی جدید ارائه کردند. در این روش، از جمله‌ای در موج سمت راست به‌منظور صفر کردن خطای حالت ماندگار ردیابی موقعیت استفاده شده است. در این روش نمی‌توان از فیلتر بازسازی که نایمیر و اسلاتین [۲۰] 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 سال ۲۰۰۲، لی و همکارش [۲۷] در ادامه کار خود، به ارائه روشی برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور غیرخطی پرداختند.

در سال ۲۰۰۲، لیرافان<sup>۴</sup> و منی‌وارن<sup>۵</sup> [۲۸]، یک کنترل‌کننده تطبیقی برمبنای نظریه پسیویتی پیشنهاد کردند که این کنترل‌کننده قادر به سازگار نمودن مشخصه امپدانس با زمان به‌منظور تطبیق امپدانس موج با امپدانس محیط عملیاتی می‌باشد. مزیت این روش این است که می‌توان از دو مقدار متفاوت جهت تطبیق امپدانس با در نظر گرفتن این واقعیت که زمان تاخیر در کانال ارتباطی رفت با کانال ارتباطی برگشت برابر نباشد، استفاده کرد. در سال ۲۰۰۲، ریو<sup>۶</sup> و همکاران [۲۸]، روشی جدید برمبنای انرژی برای کنش لامسه‌ای پایدار پیشنهاد کردند و آن را به نظریه شبکه دوقطبی برای سیستم‌های حرکتی از

---

<sup>1</sup> Munir

<sup>2</sup> Book

<sup>3</sup> Regulator

<sup>4</sup> Leeraphan

<sup>5</sup> Maneewarn

<sup>6</sup> Ryo

راه دور بسط دادند. آنها به منظور این که سیستم پسیو باقی بماند از دو کنترل کننده پسیو سری<sup>۱</sup> استفاده کرده‌اند. یک کنترل کننده در سمت سیستم فرمانده و کنترل کننده پسیو دیگر در سمت سیستم فرمانبر قرار داده شده است که وظیفه آنها جذب انرژی خروجی است. به عبارتی دیگر، وظیفه کنترل کننده‌های پسیو سری این است که سبب شوند میزان جذب انرژی، بیشتر از میزان تولید آن باشد. این وظیفه در صورتی امکان پذیر خواهد بود که با مانیتورینگ زوج سیگنال، هر درگاه از دوقطبی را بتوان به صورت بی‌درنگ بررسی کرد. جذب انرژی به معنای این است که حاصل ضرب زوج سیگنال هر درگاه مثبت باشد و تولید انرژی به معنای این است که حاصل ضرب زوج سیگنال هر پورت منفی باشد. آنچه در این بین حائز اهمیت می‌باشد این است که کنترل بر روی بخش کنترل کننده و کانال ارتباطی صورت می‌گیرد. این بدان معنی است که به منظور تضمین پسیویتی برای همه زمان‌ها کافی است که از پسیو بودن کنترل کننده و کانال ارتباطی مطمئن شویم. بنابراین، سیستم‌های فرمانبر و فرمانده پسیو فرض می‌شوند. ورودی کنترل کننده‌ها با توجه به این که در سمت سیستم فرمانده و سمت فرمانبر قرار گرفته باشند، به ترتیب سرعت سیستم فرمانده و سرعت سیستم فرمانبر و خروجی کنترل کننده‌ها با توجه به این که در سمت سیستم فرمانده و سمت فرمانبر قرار گرفته باشند، به ترتیب نیروی سیستم فرمانده و سرعت سیستم فرمانبر می‌باشند. مشکل این روش، رویت سیگنال‌ها به صورت بی‌درنگ برای نرم‌افزار به هنگام تاخیر در کانال ارتباطی است. در سال ۲۰۰۲، میرفخرایی و پناهنده [۲۹] به ادامه کار یوکوکوهجی و همکاران [۲۲] 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

---

<sup>1</sup> Series Passive Controller

در روش پیشنهادی خود از روش «مدل خودبرگشتی»<sup>۱</sup> 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 سال ۲۰۰۲، گنجه‌فر و همکاران [۴۹]، روشی را با ترکیب پیش‌بینی‌کننده اسمیث و متغیرهای موج به منظور بالا بردن کارایی سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با تاخیر زمانی بزرگ و متغیر با زمان در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در این روش، علاوه بر نگاشت سیگنال‌ها به روش متغیرهای موج، این سیگنال‌ها قبل از تاخیر موجود در کانال ارتباطی، توسط پیش‌بینی‌کننده اسمیث تخمین زده می‌شوند.

در سال ۲۰۰۳، فِلمر<sup>۲</sup> و ویکاندر<sup>۳</sup> [۳۰]، براساس خواص سیستم‌های حقیقی مثبت به طراحی کنترل‌کننده‌ای برای سیستم‌های حرکتی از راه دور مربوط به جراحی<sup>۴</sup> پرداختند. در این روش، از این خاصیت که عقب‌افتادگی فاز برای بهره حلقه یک سیستم خطی پسیو نمی‌تواند بیشتر از ۱۸۰ درجه باشد، استفاده شده است. در سال ۲۰۰۳، ریو و همکاران [۳۱] در ادامه کارشان به رفع محدودیت روش پیشنهادی خود پرداختند. در روش پیشنهادی مذکور، نیروی کنشی بین سیستم فرمانبر و محیط عملیاتی این امکان را می‌دهد که رویت‌گر پسیو در حوزه زمان در برگیرنده میزان انرژی نشر سیستم فرمانبر به انرژی مانیتور شده باشد. با این رویت‌گر پسیو تصحیح شده، نظریه تعقیب انرژی مبنای<sup>۵</sup> به منظور تضمین شرط پسیویته بکار برده شد که در سال ۲۰۰۵، ریو<sup>۶</sup> و کیم [۳۲]، این روش را به صورت عملی بکاربردند.

نتایج آزمایش‌های عملی نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی می‌باشد.

در سال ۲۰۰۵، الایز<sup>۷</sup> و همکاران [۱۶]، روش متغیرهای موج را برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با چند درجه آزادی در حضور زمان تاخیر پیشنهاد کردند. در این روش، مدل مورد استفاده، خطی و

---

<sup>1</sup> Autoregressive Model

<sup>2</sup> Felemmer

<sup>3</sup> Wikander

<sup>4</sup> Surgical Telooperator System

<sup>5</sup> Reference Energy Following

<sup>6</sup> Ryo

<sup>7</sup> Alise

زمان تاخیر در کانال ارتباطی ثابت فرض شده است. در سال ۲۰۰۶، الیز و همکاران تحقیقاتشان را به صورت عملی نیز نشان دادند [۳۳].

در سال ۲۰۰۵، هو<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳]، روش کنترلی جدیدی را برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه بر مبنای قضیه پسیویتی 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 سال ۲۰۰۵، کیم<sup>۲</sup> و همکاران [۱۱]، روش جدیدی را برای پایداری سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با تلفیق متغیرهای موج و قضیه پسیویتی در حضور زمان‌های تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۰۵، لیو و همکاران [۳۴]، از پیش‌بینی متغیرهای موج به منظور مقابله با آثار تخریبی زمان تاخیر در کانال ارتباطی بر روی عملکرد سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه استفاده کردند.

در سال ۲۰۰۶، کریو<sup>۳</sup> و همکاران [۳۵]، روش تطبیق امپدانس و کنترل‌کننده شبه‌خطی مینیمال را به منظور دستیابی همزمان به ردیابی موقعیت و پایداری سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۰۶، تانر<sup>۴</sup> و نایمیر [۳۶]، روش متغیرهای موج را با استفاده از فیدبک شتاب فرکانس بالا بهبود دادند. در سال ۲۰۰۶، بوخنیفر<sup>۵</sup> و فریرا [۳۷]، کنترل‌کننده بر مبنای متغیرهای موج برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه کوچک<sup>۶</sup> پیشنهاد کردند. در این روش، از قضیه پسیویتی به منظور دستیابی به پایداری و تطابق استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۷، عزیمی‌نژاد و همکاران [۳۸]، به بررسی جبران آثار زمان تاخیر برای سیستم‌های حرکتی از راه دور پرداختند. در این مقاله، دو ساختار مختلف ۲ کاناله و ۴ کاناله بهبودیافته بر مبنای

---

<sup>1</sup> Hou

<sup>2</sup> Kim

<sup>3</sup> Keerio

<sup>4</sup> Tanner

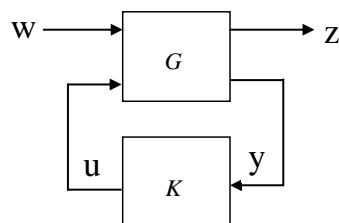
<sup>5</sup> Boukhniifer

<sup>6</sup> Micro-Teleoperation System

متغیرهای موج مقایسه شده است. در سال ۲۰۰۷، پلوشین<sup>۱</sup> و همکاران [۳۹]، الگوریتم جدیدی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه به منظور بهبود تطابق با استفاده از روش بازتاب نیرو پیشنهاد کردند. این روش پایداری، سیستم حرکتی از راه دور را در حضور زمان‌های تاخیر متغیر در کانال ارتباطی تضمین می‌کند.

## ۲-۳ کنترل مبتنی بر کنترل مقاوم

مبنای طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم، نظریه بهینه‌سازی  $H_\infty$  به فرم استاندارد آن (شکل ۲-۶) می‌باشد.



شکل ۲-۶: بلوک دیاگرام مساله  $H_\infty$  استاندارد

در شکل ۲-۶،  $G$  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.

بلوک‌های  $G$  و  $K$  سره<sup>۲</sup> 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 به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب در نظر گرفته شوند.

<sup>1</sup> Polushin

<sup>2</sup> Proper

در سال ۱۹۹۳، کازرونی<sup>۱</sup> و همکاران [۴۰]، به طراحی کنترل‌کننده مقاوم براساس نظریه  $H_\infty$  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 سال ۱۹۹۵، لئونگ<sup>۲</sup> و همکاران [۴۱]، طراحی سیستم‌های حرکتی از راه دور با حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی با استفاده از سنتز  $\mu$  را پیشنهاد کردند. در سال ۱۹۹۵، هو<sup>۳</sup> و همکاران [۴۲] کنترل‌کننده مقاومی را برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور با داشتن پایداری مقاوم و کارایی مطلوب با استفاده از ساختار ۴ کاناله پیشنهاد کردند. در این روش، با فرض این‌که اپراتور انسانی و محیط عملیاتی پسو باشند، از شرط  $\sup\{\mu(\mathbf{S}_T(j\omega))\} \leq 1$  به‌عنوان شرط پایداری مقاوم استفاده کردند که در آن ماتریس پراکندگی است. شرط بکار برده شده در این روش، نسبت به شرط پسوییتی از محافظه‌کاری کمتری برخوردار است. در روش پیشنهادی، به‌منظور سادگی در طراحی، علاوه‌براین که امیدانس دست اپراتور 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 شده است، در نظر گرفته شود. در این روش، محیط عملیاتی پسو فرض می‌شود. شرط لازم و کافی برای پایداری تک‌قطبی خطی مستقل از زمان این است که

$$\text{Re}[Y_T(j\omega)] \geq 0, \quad \forall \omega \in \mathbb{R}$$

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.

<sup>1</sup> Kazerooni

<sup>2</sup> Leung

<sup>3</sup> Hu

در سال ۲۰۰۰، سانو<sup>۱</sup> و همکاران [۴۳]، طراحی کنترل کننده  $H_\infty$  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<sup>۲</sup> به صورت برخط می‌باشد.

در سال ۲۰۰۵، سیروس‌پور و شهدی [۴۴]، استفاده از کنترل کننده گوسی مربعی خطی (LQG)<sup>۳</sup> گسسته را به منظور پایدارسازی سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند.

## ۲-۴ - کنترل مبتنی بر کنترل تطبیقی

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 سال ۱۹۹۶، هشترودی‌زاد<sup>۴</sup> و سالکادین<sup>۵</sup> [۴۵]، کنترل کننده 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 روش پیشنهادی مزبور، از ساختار 4 کاناله استفاده شده است. در این روش، پارامترهای کنترل کننده استفاده شده در طرف سیستم فرمانده به صورت

---

<sup>1</sup> Sano

<sup>2</sup> Round Trip Time

<sup>3</sup> Linear Quadratic Gaussian

<sup>4</sup> Hashtrudi-Zaad

<sup>5</sup> Salcudean



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 سال ۱۹۹۷، لی و همکاران [۴۶]، کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور با محیط عملیاتی نامعین و یا متغیر را ارائه کردند. در این روش، با استفاده از ساختار ۴ کاناله و برمبنای ساختار موقعیت-نیرو علاوه بر تضمین پایداری سیستم حرکتی از راه دور، تطابق نیز قابل دستیابی است.

در سال ۱۹۹۹، زو<sup>۱</sup> و سالکادین [۴۷]، 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 از ساختار ۴ کاناله استفاده شده است و نامعینی در پارامترهای سیستم فرمانده و فرمانبر به صورت تطبیقی اصلاح می‌شوند. در روش پیشنهادی، کنترل‌کننده تطبیقی برای دینامیک غیرخطی سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر قابل استفاده است.

در سال ۲۰۰۰، زو و سالکادین [۱۵] در ادامه کار تحقیقاتی خود که در سال ۱۹۹۹ 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 اپراتور 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 به صورت جداگانه به روز می‌شوند. در این روش پیشنهادی، امکان دستیابی به ردیابی سرعت و ردیابی نیرو با خطای حالت دائمی وجود دارد.

در سال ۲۰۰۴، لاو<sup>۲</sup> و بوک [۴۸]، روش جدیدی را برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور با انعکاس نیرو با استفاده از کنترل تطبیقی امیدانس ارائه کردند. روش پیشنهادی جدید، کاهش انرژی مورد نیاز برای اپراتور انسانی را بدون این که خللی در پایداری سیستم ایجاد کند، در پی دارد. شناسایی سیستم توسط الگوریتم RLS<sup>۳</sup> صورت می‌گیرد. توسط این الگوریتم، امیدانس سایت دور که شامل محیط عملیاتی

---

<sup>1</sup> Zhu

<sup>2</sup> Love

<sup>3</sup> Recursive Least Square

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 سال ۲۰۰۵، لی<sup>۱</sup> و همکاران [۲۷]، 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. علاوه‌برآن، در این روش نیازی به اندازه‌گیری سرعت نمی‌باشد. در سال ۲۰۰۵، حسینی‌ثانی و همکاران [۵۰]، کنترل‌کننده تطبیقی نیرو- جابه‌جایی را به‌منظور تضمین پایداری سیستم‌های حرکتی 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 سال ۲۰۰۶، شاصادقی و همکاران [۵۱]، ساختار جدیدی را برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر متغیر در کانال ارتباطی با استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی معکوس پیشنهاد کردند. علاوه‌براین، به‌منظور اثبات مقاوم بودن ساختار پیشنهادی به‌همراه تطابق، روش بازتاب نیرو نیز در این ساختار مورد استفاده قرار گرفته است.

---

<sup>1</sup> Li

## ۲-۵- کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین

در سال ۲۰۰۴ شنگ و اسپانگ [۳] به ارائه مقاله ای برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور دو طرفه پرداختند. در طرح کنترلی خود از کنترل پیش‌بین مدل تغییر یافته استفاده کردند. روش آنها زمانی که تاخیرهای مسیر رفت و برگشت مشخص هستند مقاوم است. اما طرح کنترلی آنها نسبت به عدم قطعیت در زمان تاخیر و همچنین عدم قطعیت پارامتری در محیط عملیاتی مقاوم نبوده و به راحتی منجر به یک سیستم ناپایدار می شود. در همان سال پن و همکاران [۵۲] به طرح یک استراتژی پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر تاخیر زمانی متغیر پرداختند. در این روش کنترلی دو پیش‌بین با ساختار یکسان در بخش فرمانده و فرمانبر قرار گرفته اند. کنترل‌کننده به جای اینکه فقط از سیگنال های تاخیر یافته استفاده کند از سیگنال های ارسالی در زمان فعلی نیز بهره می برد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به مقاوم بودنش نسبت به عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر اشاره کرد. اما مهمترین عیب این روش آن است که فقط ردیابی نیرو صورت می‌گیرد و در واقع ردیابی موقعیت/سرعت در این سیستم نداریم. به عبارتی دیگر تطابق کامل حاصل نمی‌شود. در سال ۲۰۰۶ سیروس پور و شهدی [۵۳] روشی بنیادی مبتنی بر کنترل پیش‌بین سیستم‌های حرکتی از راه دور ارائه کردند. آنها در کار خود از یک پیش‌بین چند مدله برای جبران زمان تاخیر ثابت و مقابله با عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر استفاده کردند. همچنین از مفاهیم کنترل‌کننده LQG در این مقاله استفاده شده است. از معایب این روش کنترلی می‌توان به درجه پیچیدگی آن اشاره کرد. اسلاما<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۵۴] طرحی از کنترل پیش‌بین مقاوم ارائه کردند که در آن کاملاً فرمانبر موقعیت فرمانده را دنبال می‌کند اما این ردیابی با خطا همراه است.

---

<sup>1</sup> Slama

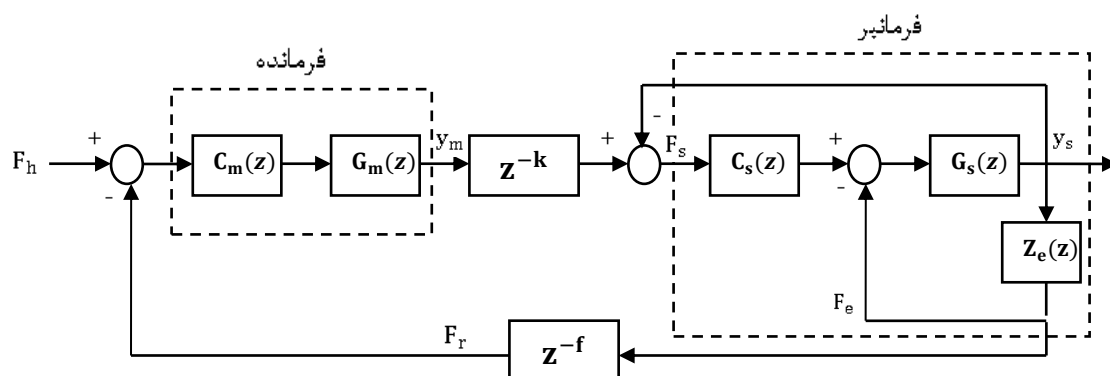
برای ردیابی نیرو نیز شرایط به همین طریق است و مقدار نهایی نیرو نسبت به ورودی مرجع با خطا همراه است. در سال ۲۰۱۱ قاضی و همکاران [۵۵] با استفاده از روش الگوریتم های هوشمند به بهینه‌سازی این روش دست زدند که علی‌رغم نتایج خوب منجر به پیچیدگی بیش از حد آن شد.

## فصل ۳

# ساختار کنترلی پیشنهادی و شبیه‌سازی

### ۳-۱ مقدمه ای بر اجزاء سیستم حرکتی از دیدگاه بلوکی

همانگونه که در فصل ۱ بیان شد یک سیستم حرکتی از راه دور شامل قسمتهای ۵ گانه مشتمل بر کاربر انسانی، سیستم فرمانده، خط انتقال، سیستم فرمانبر و محیط عملیاتی است که این قسمت ها با یکدیگر در حال تبادل سیگنال های نیرو، جابجایی و سرعت هستند. روال کلی همیشه به این صورت است که همیشه در ابتدای کار فرمانده سیگنالی را برای فرمانبر ارسال می کند یا اصطلاحاً دستور کار از سمت فرمانده ارسال می شود. تا به اینجا به سیستم مذکور سیستم حرکتی از راه دور یک طرفه گفته می شود اما اگر بازوی فرمانبر دارای سنسور نیرو باشد و نیرو را به سمت فرمانده برگرداند تا تصحیح خطای احتمالی صورت بگیرد، در این صورت سیستم حرکتی به صورت دو طرفه کنترل شده است. آنچه در این پایان نامه اهمیت دارد کنترل دو طرفه سیستم حرکتی از راه دور می باشد. شمای کلی سیستم حرکتی از راه دور در شکل ۳-۱ نشان داده شده است [۶]:



شکل ۳-۱: سیستم حرکتی از راه دور دو طرفه

در این سیستم دو تاخیر در مسیر رفت و مسیر برگشت مشاهده می شود که ناشی از تاخیر موجود در شبکه ی انتقال سیگنال می باشد.  $G_s$  و  $G_m$  به ترتیب توابع تبدیل سیستم های فرمانده و فرمانبر می باشند که به صورت دو بازوی مصنوعی با معادلات زیر توصیف می شوند [۶]:

$$(M_m s^2 + B_m s)x_m = F_m + F_h \quad (۱-۳)$$

$$(M_s s^2 + B_s s) x_s = F_s - F_e \quad (2-3)$$

که در آن B ضریب اصطکاک ویسکوز و M جرم بازوها می‌باشد. x جابجایی و F نیرو است. m و s به ترتیب نمایانگر فرمانده و فرمانبر می‌باشند.  $F_h$  نیروی اعمالی به فرمانده توسط اپراتور انسانی و  $F_e$  نیروی وارده بر فرمانبر از سوی محیط عملیاتی است. در این سیستم  $C_m$  و  $C_s$  به ترتیب کنترل‌کننده های فرمانده و فرمانبر هستند.  $Z_e$  امپدانس محیط عملیاتی است که در حالت کلی دارای عدم قطعیت است.

شفافیت به عنوان یک معیار اساسی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور در حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی بیان می‌شود. اگر سیستم فرمانبر دقیقاً فرمان‌های سیستم فرمانده را مجدداً تولید کند و سیستم فرمانده به درستی نیروهای سیستم فرمانبر را احساس نماید، اپراتور انسانی احساس می‌کند که مستقیماً با محیط در تماس است، که این تطابق کامل در سیستم‌های حرکتی از راه دور نامیده می‌شود. به عبارت دیگر شرایط زیر تضمین می‌شوند.

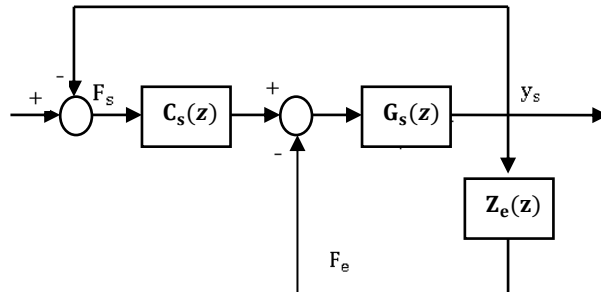
۱- ردیابی سرعت (موقعیت): خروجی سیستم فرمانبر  $y_s$  خروجی سیستم فرمانده  $y_m$  را ردیابی نماید. توجه شود که خروجی می‌تواند موقعیت یا سرعت در نظر گرفته شود.

۲- ردیابی نیرو: نیروی برگشتی از محیط از نیروی اپراتور تبعیت نماید.

تمام این اهداف باید به گونه‌ای انجام پذیرد که پایداری سیستم حرکتی از راه دور کلی حفظ شود.

از آنجایی که کنترل‌کننده فرمانده همانطور که در قسمت های بعدی مفصل بحث خواهد شد یک کنترل‌کننده پیش‌بین است و استراتژی کنترل پیش‌بین در نظر گرفته شده در این پایان نامه از نوع گسسته است نیازمند گسسته‌سازی سیستم بوده و لذا در فضای گسسته تمامی طراحی‌ها صورت می‌گیرد. در سیستم‌های گسسته انتخاب زمان نمونه برداری مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است و انتخاب نامناسب زمان نمونه برداری سبب ایجاد تغییر در پاسخ سیستم خواهد شد. فرایند طراحی برای کنترل‌کننده فرمانبر ساده است و با استفاده از یک کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی صورت می‌

پذیرد که در ادامه بیان می‌شود. بنابراین جهت طراحی کنترل‌کننده فرمانبر ابتدا سیستم را به صورت زیر ساده می‌کنیم .:



شکل ۳-۲ : سیستم فرمانبر

کنترل‌کننده فرمانبر از نوع تناسبی - مشتقی بوده و معادلات آن به صورت زیر است:

$$C_s(z) = k_p + k_d(1 - z^{-1}) \quad (3-3)$$

حال باید ضرائب کنترل‌کننده فرمانبر را به گونه‌ای انتخاب کنیم که خروجی فرمانبر  $y_s$  خروجی تاخیر یافته فرمانده ( $y_m$ ) را دنبال کند. باید دقت شود که در انتخاب ضرائب کنترل‌کننده تناسبی مشتقی مقادیری را انتخاب کنیم که خروجی سیستم فرمانبر ضمن پایداری، بدون فراجهدش یا دارای فراجهدش کم و دارای پاسخ سریع باشد.

### ۳-۲ ساده‌سازی سیستم حرکتی جهت طراحی کنترل‌کننده فرمانده

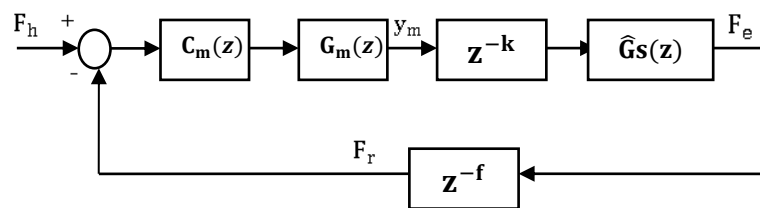
در بخش قبلی، روند کلی طراحی کنترل‌کننده فرمانبر آورده شد. در این بخش سعی داریم سیستم حرکتی را به گونه‌ای ساده نماییم که بتوان کنترل‌کننده فرمانده را بر اساس آن طراحی نمود. دلیل این ساده‌سازی از آن جهت است که کنترل‌کننده پیش‌بین به کنترل یک تابع تبدیل کلی می‌پردازد. لذا در اینجا سیستم حرکتی از راه دور را به گونه‌ای ساده می‌کنیم که ردیابی نیرو نیز صورت پذیرد.



کنترل کننده فرمانده باید پایداری سیستم حلقه بسته و ردیابی نیرو را محقق سازد [۶]. در صورتی که این شرط برآورده شود ردیابی موقعیت در فرمانده و فرمانبر نیز محقق می شود. شایان ذکر است که کنترل کننده فرمانبر فقط به جبران تاخیر در مسیر رفت می پردازد. جبران تاخیر در مسیر برگشت توسط پیش بین اسمیت<sup>۱</sup> که در ادامه در مورد آن توضیح می دهیم انجام می پذیرد. بنابراین با توجه به شکل ۱-۳ تابع تبدیل زیر را تعریف می کنیم:

$$\widehat{G}_s(z) = \frac{Z_e(z)C_s(z)G_s(z)}{1 + Z_e(z)G_s(z) + C_s(z)G_s(z)} \quad (۴-۳)$$

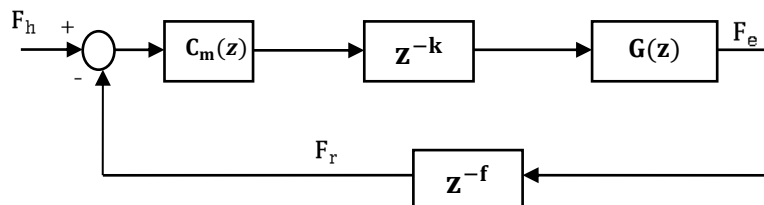
که این تابع تبدیل در واقع تابع تبدیلی برای معادل سازی سیستم فرمانبر است. در این صورت طرح کنترلی شکل ۱-۳ به شکل ۳-۳ ساده خواهد شد :



شکل ۳-۳: طرح کنترلی ساده شده شکل ۱-۳

با توجه به شکل ۳-۳ می توان سیستم را با تعریف متغیر زیر به حالت کلی تر شکل ۴-۳ در آورد:

$$G(z) = \widehat{G}_s(z) \cdot G_m(z) \quad (۵-۳)$$



شکل ۴-۳: طرح کنترلی ساده تر شده برای سیستم های حرکتی از راه دور

بنابراین تابع تبدیل سیستم حلقه بسته کلی به صورت زیر خواهد بود :

<sup>1</sup> Smith Predictor

$$M(z) = \frac{F_e}{F_h} = \frac{C_m(z)G(z).z^{-k}}{1 + C_m(z)G(z).z^{-(k+f)}} \quad (6-3)$$

توجه شود که کنترل کننده فرمانبر به گونه‌ای طراحی شده است که ردیابی موقعیت محقق شود (یعنی قطب های  $\widehat{G}_s$  درون دایره واحد قرار گیرد). از رابطه (6-3) مشاهده می شود که تاخیر در مخرج تابع تبدیل حلقه بسته نیز وجود دارد. این مسئله می تواند به طور قابل ملاحظه ای عملکرد کل سیستم را تضعیف کرده یا حتی سبب ناپایداری شود. لذا نمی توان با استفاده از روش های کنترل کلاسیک کنترل کننده فرمانده را طراحی نمود. بنابراین صورت مسئله جدید، حذف آثار مخرب تاخیر زمانی به شیوه ای مناسب است. لازم به ذکر است که از این به بعد آنچه به عنوان تابع تبدیل در طراحی کنترل کننده فرمانبر مورد استفاده قرار می گیرد  $G(z)$  است. اما قبل از پرداختن به طراحی کنترل کننده فرمانده با استفاده از استراتژی کنترل پیش بین، ابتدا مقدمه ای را درباره این روش کنترلی و همچنین پیش بین اسمیت ارائه می دهیم.

### ۳-۳ روش کنترل پیش بین

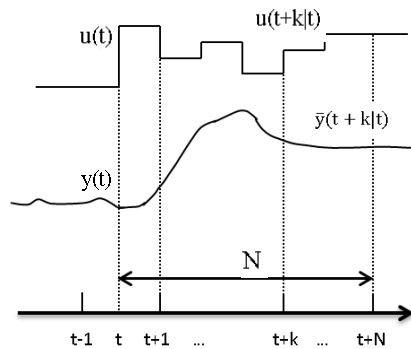
#### ۳-۳-۱ مقدمه

یکی از مهم ترین روش های کنترلی موجود در کنترل سیستم های حرکتی از راه دور کنترل پیش بین است. پس از حدود ۳ دهه از شروع این روش کنترلی، این کنترل جای خود را در بین دیگر روش ها و در صنعت باز کرده است. دهه ی اول این روش کنترلی مختص درک صنعتی این روش است که بیشتر در بخش های پتروشیمی و تصفیه به کار رفته است. دهه ی میانی یا دهه ی دوم مربوط به بدست آوردن معادلات ریاضی یا درک کنترلی این روش است و نهایتا دهه ی سوم مربوط به توسعه ی کنترل پیش بین سریع است که الگوریتم های تلفیقی از جمله مقاوم پیش بین در این دهه توسعه یافتند [۴]. در حالت کلی تعریف کنترل کننده پیش بین به صورت زیر است :

تعداد  $N$  ورودی آینده (خروجی کنترل کننده فرمانده) را به گونه‌ای تعیین کنید که  $y$  یا خروجی اندازه‌گیری شده سیستم به خروجی دلخواه نزدیک باشد یا به عبارت دیگر:

$$y_d(t) = y(t) \quad (7-3)$$

از دیدگاه علمی می‌توان راهکار کنترل پیش‌بین را بدین صورت خلاصه کرد: استفاده از یک مدل صریح از سیستم جهت پیش‌بینی خروجی آینده فرایند، مینیمم کردن یک تابع هدف مربعی جهت ایجاد سیگنال کنترل، ادامه استراتژی و بدست آوردن سیگنال کنترل بهینه در هر لحظه. شکل زیر نمایانگر طرح کلی برای کنترل پیش‌بین است:



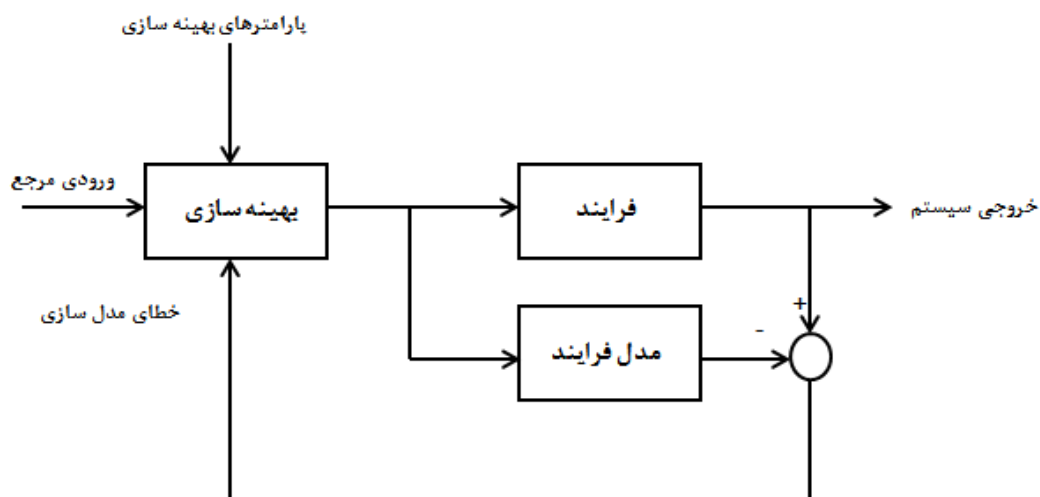
شکل ۳-۵: راهکار کنترل پیش‌بین

همانطور که از شکل پیداست با داشتن ورودی و خروجی تا لحظه  $t$  ورودی های آینده تا زمان  $t+k$  بدست آمده است. پیش‌بینی خروجی سیستم با  $\bar{y}$  نشان داده شده است. دقت شود که به عنوان نمونه  $u(t+k|t)$  به معنای پیش‌بینی ورودی تا زمان  $t+k$  در زمان  $t$  است. کنترل پیش‌بین دارای مزایا و معایبی است. از مزایای آن می‌توان به مواردی از جمله برخورد با قیود به شکلی هوشمند که در حین طراحی کنترل کننده آنها را در نظر می‌گیرد، سادگی این روش کنترلی و تعمیم ساده این روش به حالت چند متغییره بدون تغییرات زیاد اشاره کرد. علاوه بر این از مهم‌ترین مزایای این روش کار با دسته وسیعی از فرایندها مانند سیستم‌های تاخیر دار و نامینیمم فاز است. از معایب آن می‌توان به لزوم استفاده از یک مدل مناسب و صریح از فرایند، وجود محاسبات پیچیده در حل مسائل بهینه‌سازی و اثبات پایداری اشاره کرد. در ادامه دو روش خاص در حوزه‌ی کنترل پیش‌بین را بررسی

خواهیم کرد. (۱) کنترل پیش‌بین مدل<sup>۱</sup>، (۲) پیش‌بین اسمیت. کنترل پیش‌بین مدل در طول سالیان متمادی به سه نوع کلی کنترل الگوریتمی ماتریسی<sup>۲</sup>، کنترل ماتریس پویا<sup>۳</sup> و کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته<sup>۴</sup> تقسیم شده است. تفاوت در الگوریتم‌های مختلف کنترل پیش‌بین مدل از جنبه‌های زیر است:

- مدلی که جایگزین فرایند مورد نظر می‌شود.
- تابع هزینه‌ای که باید مینیمم گردد.

مدل مورد استفاده در کنترل الگوریتمی ماتریسی، پاسخ ضربه، در کنترل ماتریس پویا، پاسخ پله و در کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته تابع تبدیل است. آنچه در این پایان‌نامه از آن به کنترل پیش‌بین یاد شده است کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته با مقداری تغییرات است که روشی موثر برای کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور می‌باشد. در این پایان‌نامه از کنترل پیش‌بین مدل (تعمیم یافته) جهت جبران‌سازی تاخیر مسیر رفت و از پیش‌بین اسمیت جهت جبران‌سازی مسیر برگشت استفاده می‌کنیم. طرح کلی سیستم‌های مبتنی بر کنترل پیش‌بین به صورت زیر هستند:



شکل ۳-۶: طرح کلی کنترل پیش‌بین مدل

<sup>1</sup> Model Predictive Control (MPC)  
<sup>2</sup> Matrix Algorithmic Control (MAC)  
<sup>3</sup> Dynamic Matrix Control (DMC)  
<sup>4</sup> Generalized Predictive Control (GPC)

دو نوع مختلف کنترل پیش بین تعمیم یافته وجود دارد : ۱. پیوسته ۲. گسسته. در بیشتر مراجع به دلیل سادگی کار در حوزه گسسته، از کنترل پیش بین در حوزه تبدیل Z استفاده می کنند. از این به بعد هر جا صحبت از کنترل پیش بین می شود منظور کنترل پیش بین تعمیم یافته است که در آن مدل سیستم (فرایند) تابع تبدیل است. همانطور که از شکل ۳-۶ مشخص است در این طرح کنترلی مدل سیستم باید کاملاً مشخص باشد. یعنی یا با استفاده از روابط ورودی-خروجی ریاضی سیستم مدل شود یا با استفاده از روش های پیشرفته بهینه سازی. اگر بین فرایند و مدل آن اختلاف پیش آید به آن عدم تطابق گفته می شود و خود را به صورت خطای مدل سازی نشان خواهد داد و در صورتی که سیستم نسبت به این خطاها مقاوم نباشد به راحتی منجر به یک سیستم ناپایدار خواهد شد.

آنچه در یک سیستم کنترل پیش بین اهمیت بسزایی دارد بخش بهینه سازی است که دارای پارامترهایی است که بر اساس آن ورودی کنترلی ساخته شده و به سیستم اعمال می گردد. آنچه در ادامه خواهد آمد روابط کلی و نحوه ساخت ورودی کنترلی به سیستم است.

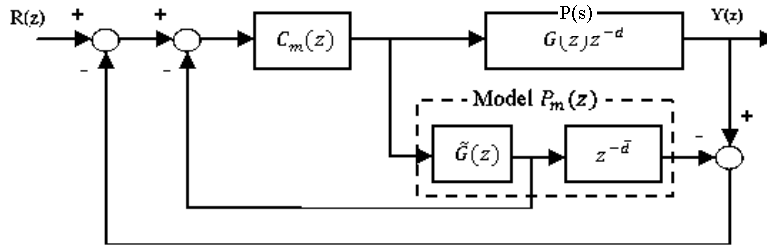
در معادلات کنترل پیش بین همانطور که در بخش های بعدی نیز خواهیم دید به یک مساله کنترل بهینه به شکل زیر بر می خوریم:

$$J = \sum_{i=1}^P (y_d(t+i) - y_p(t+i))^2 + \sum_{i=1}^M r_i \Delta u^2(t+i-1) \quad (۸-۳)$$

این معادله ورودی کنترلی U را تولید خواهد کرد. P افق پیش بینی و M افق کنترل است و  $r_i$  ضریب وزنی می باشد به این پارامترها، پارامترهای بهینه سازی (طبق شکل ۳-۶) یا پارامترهای تنظیم می گویند.  $y_d$  خروجی دلخواه و  $y_p$  خروجی پیش بینی شده است. ادامه توضیحات تکمیلی در بخش طراحی کنترل کننده فرمانده آمده است.

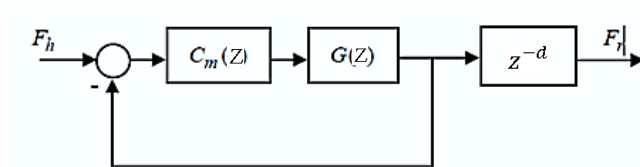
### ۲-۳-۳ پیش‌بین اسمیت

در اکثر موارد، برای جبران‌سازی تاخیر زمانی در مسیر رفت از کنترل پیش‌بین مدل استفاده می‌شود. در مسیر فیدبک نیز می‌توان کلاس مهمی از آنها را به نام پیش‌بین اسمیت استفاده کرد. شکل ۳-۶ ساختار کلی این پیش‌بین را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷: ساختار جبران‌کننده‌ی اسمیت

در شکل 3-6،  $P(z) = G(z)z^{-d}$  نشان‌دهنده‌ی مدل سیستم واقعی است که یک سیستم تک ورودی - تک خروجی شامل یک تابع تبدیل پایدار با بعد محدود  $G(z)$  و زمان تاخیر  $d$  می‌باشد،  $C_m(z)$  کنترل‌کننده،  $P_m(z) = \tilde{G}(z)z^{-\tilde{d}}$  نشان‌دهنده‌ی مدل نامی سیستم است که در آن  $\tilde{G}(z)$  مدل نامی بدون تاخیر و  $\tilde{d}$  زمان تاخیر مدل نامی است. اگر پارامترهای مدل واقعی با مدل نامی برابر باشد  $P(z) = P_m(z)$ ، یعنی  $d = \tilde{d}$  و  $G(z) = \tilde{G}(z)$ ، می‌توان ساختار جبران‌کننده‌ی اسمیت را به شکل 3-7 نشان داد.



شکل ۳-۸: ساختار جبران‌کننده اسمیت بدون خطای مدلسازی

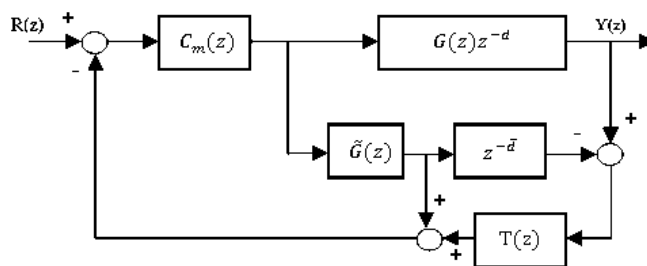
بنابراین تابع تبدیل سیستم حلقه‌بسته به صورت زیر است :

$$M(z) = \frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{C_m(z)G(z)}{1+C_m(z)G(z)} z^{-d} \quad (9-3)$$

تابع تبدیل اخیر نشان می دهد که اثر زمان تاخیر با حذف آن از معادله ی مشخصه تابع تبدیل حلقه بسته از بین رفته است. حال اگر شرط برابری پارامترهای مدل واقعی سیستم و مدل نامی برقرار نباشد، تابع تبدیل سیستم حلقه بسته به صورت زیر خواهد بود :

$$M(s) = \frac{C_m(z)G(z)z^{-d}}{1 + C_m(z)\tilde{G}(z) + C_m(z)[G(z)z^{-d} - \tilde{G}(z)z^{-\bar{d}}]} \quad (10-3)$$

از مخرج رابطه ی (۸-۳) مشاهده می شود که در این حالت اثر زمان تاخیر بر روی پایداری و عملکرد سیستم حلقه بسته از بین نمی رود. این واقعیت به محدودیت کاربرد جبران کننده ی زمان تاخیر اشاره دارد. در حالت کلی، عیب عمده ی پیش بینی کننده ی اسمیت این است که این روش کنترلی برای سیستم های تاخیر دار مبتنی بر مدل می باشد. این بدان معنی است که عملکرد آن به تغییرات پارامترهای سیستم حساس است. بنابراین علاوه بر مشخص بودن دقیق زمان تاخیر، مدل سیستم نیز باید به طور کامل مشخص باشد. همانگونه که مشاهده شد از پیش بین اسمیت برای جبران سازی تاخیر به میزان  $d$  در مسیر برگشت استفاده می شود. اگر در تاخیر زمانی مسیر برگشت عدم قطعیت وجود داشته باشد فیلتری طراحی شده است که این فیلتر باعث می شود تغییرات سریع اختلاف بین تاخیر یافته مدل و تاخیر یافته اندازه گیری شده سیستم کندتر شده و سیستم نسبت به عدم قطعیت تاخیر زمانی در مسیر برگشت مقاوم شود. معادله این فیلتر در رابطه (۱۴-۳) آورده شده است. در این صورت بلوک دیاگرام پیش بین اسمیت مورد نظر به شکل ۹-۳ در می آید.



شکل ۹-۳ : بلوک دیاگرام پیش بین اسمیت با در نظر گرفتن فیلتر  $T$

### ۳-۴ فرایند طراحی کنترل‌کننده فرمانده با استفاده از روش

#### پیشنهادی

در بخش‌های قبلی پس از ساده‌سازی، سیستمی که مورد استفاده جهت طراحی کنترل‌کننده فرمانده قرار می‌گیرد را  $G(s)$  (رابطه (۳-۴)) معرفی کردیم. برای بدست آوردن کنترل‌کننده فرمانده نیاز داریم سیستم را با انتخاب زمان نمونه برداری مناسب گسسته کنیم. پس از گسسته سازی تابع تبدیل به صورت زیر خواهد بود:

$$G(z) = \frac{B(z^{-1})z^{-1}}{A(z^{-1})} \quad (11-3)$$

که در آن چند جمله‌ای‌های  $A$  و  $B$  به صورت زیر خواهند بود

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a} \quad (12-3)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b} \quad (13-3)$$

$n_a$  و  $n_b$  بترتیب بیشترین تعداد تاخیر یافته‌ها برای خروجی و ورودی هستند. اما برای بدست آوردن ورودی کنترل، کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته از مینیمم‌سازی تابع هزینه زیر برای این منظور استفاده می‌کند [5]:

$$J(t, U(t)) = \sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t+k) - \bar{y}(t+k)]^2 + \rho \sum_{k=1}^{N_u} [\Delta u(t+k-1)]^2 \quad (14-3)$$

که در آن  $N_u$  افق کنترل،  $N_1$  حداقل افق پیش‌بینی،  $N_2$  حداکثر افق پیش‌بینی،  $\rho$  ضریب وزنی و

$\Delta = 1 - z^{-1}$  برای دستیابی به کنترل‌کننده معادله دیوفانتین زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\Delta A(z^{-1})E_k(z^{-1}) + z^{-k}F_k(z^{-1}) = 1 \quad (15-3)$$

که در آن چندجمله‌ای  $E_k$  از مرتبه  $k-1$  و  $F_k$  از مرتبه  $n_a$  است. در واقع همانطور که خواهیم دید کنترل‌کننده پیش‌بین طراحی شده کاملاً وابسته به رفتار سیستم  $G(z)$  خواهد بود. حال نحوه‌ی



پیش‌بینی خروجی را شرح می‌دهیم. هر مقدار خروجی پیش‌بینی شده در هر لحظه برابر با خروجی مدل سیستم در همان لحظه و همچنین اختلاف فیلتر شده بین سیستم واقعی و مدل سیستم است. دلیل استفاده از فیلتر به آن سبب است که تغییرات اختلاف بین سیستم واقعی و مدل سیستم در فرکانس‌های پایین سریع است و این فیلتر باعث می‌شود که این تغییرات کندتر شده و پیش‌بینی موثرتری صورت گیرد. فیلتر ارائه شده دارای ساختار کلی زیر است :

$$T(z) = \frac{1-\alpha}{1-\alpha z^{-1}} \quad (16-3)$$

$\alpha$  قطب این فیلتر می‌باشد و لذا اگر  $\alpha > 1$  انتخاب گردد سیستم ناپایدار می‌باشد. هر چه مقدار  $\alpha$  به صفر نزدیک‌تر شود پاسخ سریع‌تر شده و هر چه مقدار  $\alpha$  به یک نزدیک‌تر شود پاسخ کندتر می‌شود. بنابراین به طور کلی معادله پیش‌بینی به صورت زیر است :

$$\bar{y}(t+d) = \hat{y}(t+d) + T(z)(y(t-f) - \hat{y}(t-f)) \quad (17-3)$$

در این معادله  $d$  تاخیر خود سیستم است و نباید با تاخیرهای مسیرهای رفت و برگشت اشتباه شود. همانطور که در ادامه مشاهده خواهیم کرد در مساله مورد نظرمان برابر صفر است. اما  $f$  میزان تاخیر مسیر برگشت است.  $y$  خروجی اندازه‌گیری شده سیستم و  $\hat{y}$  خرجی مدل شده‌ی سیستم است. با استفاده از معادله دیوفانتین داده شده و پیش‌بینی بالا، پیش‌بینی برای  $k$  گام جلوتر به صورت زیر می‌باشد.

$$\hat{y}(t+d+k) = \bar{G}_k(z^{-1})\Delta u(t+k-1) + z^k[G_k(z^{-1}) - \bar{G}_k(z^{-1})]\Delta u(t-1) + F_k(z^{-1})\bar{y}(t+d) \quad (18-3)$$

که در آن  $1 \leq k \leq N_2 - d$ . در این معادله مقادیر  $G_k$  و  $\bar{G}_k$  به ترتیب عبارتند از :

$$G_k(z^{-1}) = E_k(z^{-1})B(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{k-1+n_b} z^{1-k-n_b} \quad (19-3)$$

$$\bar{G}_k(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{k-1} z^{1-k} \quad (20-3)$$

که در آن  $B$  چند جمله‌ای صفرهای سیستم است. بنابراین آرایه ورودی کنترل با معادله زیر مشخص می‌شود :

(۲۱-۳)

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} u(t|t) \\ u(t+1|t) \\ \vdots \\ u(t+N_u-1|t) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u(t-1|t-1) + \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_{N_u} \end{bmatrix} (R(t) \\ & \quad - G(z^{-1})\Delta u(t-1|t-1) - F(z^{-1})\bar{y}(t+d)) \end{aligned}$$

در این معادله  $u(t+i|t)$  پیش‌بینی کنترلی  $i$  گام جلوتر در زمان  $t$  است. در واقع همانطور که قبلاً نیز بیان گردید این آرایه پیش‌بینی همان خروجی کنترل‌کننده فرمانده جهت جبران تاخیر مسیر رفت می‌باشد که پس از عبور از خط انتقال به سیستم  $G(z)$  وارد می‌شود.  $\Delta u(t-1|t-1)$  اولین ورودی کنترل پیش‌بینی شده و ماتریس  $H$  و همچنین بقیه عناصر به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_{N_u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} (\Gamma^T \Gamma + \rho I_{N_u \times N_u})^{-1} \Gamma^T \\ & \in R^{N_u \times (N_2 - d)} \end{aligned} \quad (۲۲-۳)$$

به طور کلی در کنترل پیش‌بین مدل  $N_u \leq N_2$ . لذا بسته به این مقادیر ابعاد ماتریس بالا متفاوت خواهد بود. در شبیه‌سازی‌های بخش بعدی ما افق پیش‌بینی و افق کنترل را برابر در نظر گرفته‌ایم.

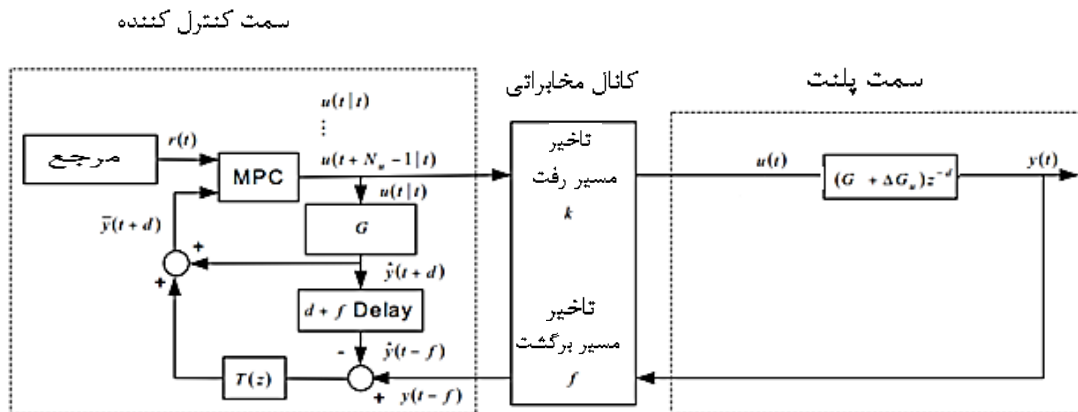
$$\Gamma = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_2-d-1} & g_{N_2-d-2} & \cdots & g_{N_2-d-N_u} \end{bmatrix}_{(N_2-d) \times N_u} \quad (۲۳-۳)$$

$$R(t) = [r(t+d+1) \ r(t+d+2) \ \dots \ r(t+N_2)] \quad (۲۴-۳)$$

$$G(z^{-1}) = \begin{bmatrix} (G_1(z^{-1}) - \bar{G}_1(z^{-1}))z \\ (G_1(z^{-1}) - \bar{G}_1(z^{-1}))z^2 \\ \vdots \\ (G_{N_2-d}(z^{-1}) - \bar{G}_{N_2-d}(z^{-1}))z^{N_2-d} \end{bmatrix} \quad (۲۵-۳)$$

$$F(z^{-1}) = [F_1(z^{-1}) F_2(z^{-1}) \dots F_{N_2-d}(z^{-1})]^T \quad (۲۶-۳)$$

از دیدگاه کلی سیستم به شکل ۳-۱۰ در می آید. این شکل در واقع کلی ترین شکل برای مدل سازی معادلات معرفی شده است. عبارت  $\Delta G_U$  نمایانگر عدم قطعیت در محیط عملیاتی است. آنچه تا اینجا حاصل شد بدست آمدن آرایه کنترلی بود که مهمترین پارامتر برای سیستم حرکتی از راه دور می باشد یا به زبان ساده تر آنچه که به عنوان آرایه کنترلی حاصل می شود در واقع خروجی کنترل کننده فرمانده است تا به وسیله آن بتوان تاخیر مسیر رفت را جبران کرد.



شکل ۳-۱۰: کلی ترین شکل سیستم مورد مطالعه

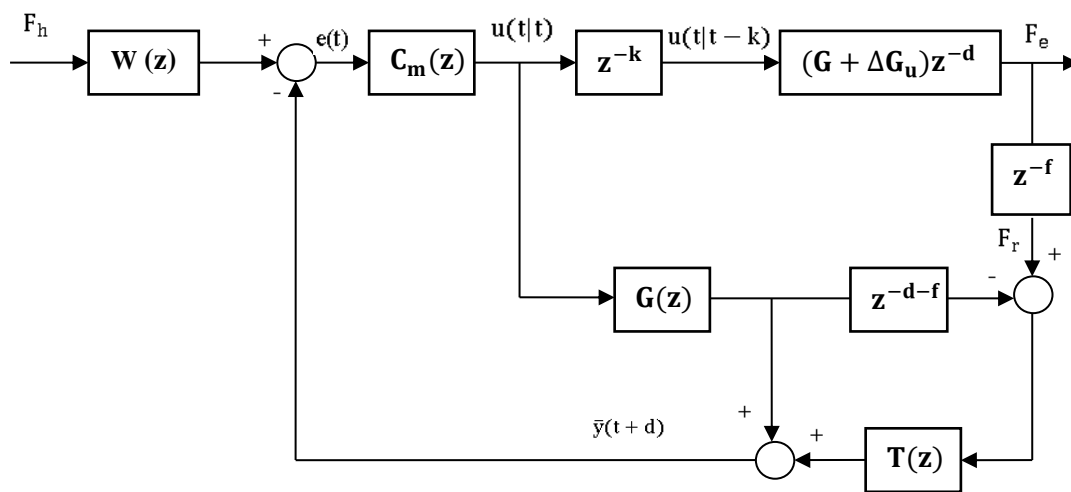
در ادامه به بررسی جزئی تر معادلات پرداخته و کنترل کننده فرمانده را به صورت یک تابع تبدیل گسسته و کل سیستم را به صورت یک بلوک دیاگرام کنترلی ساده خواهیم نمود. اما پیش از آن مراحل که تاکنون انجام شد را به صورت زیر خلاصه می کنیم:

- پارامترهای  $N_1, N_2, N_u$  و  $\rho$  را به گونه ای انتخاب می کنیم که بدون وجود تاخیر در شبکه و عدم قطعیت در محیط عملیاتی به مشخصه عملکرد مطلوب برسیم.
- با استفاده از این پارامترها، آرایه کنترلی معادله ۳-۲۱ را بر اساس ورودی های گذشته، خروجی های گذشته و مقادیر مرجع آینده بدست می آوریم.
- این آرایه پیش بینی شده را از طریق کانال انتقال به سمت سیستم ارسال می کنیم.

سیستم کنترلی نشان داده شده در شکل (۳-۴) به صورت بلوکی زیر (شکل ۳-۱۱) قابل ساده‌سازی می‌باشد.

که در آن  $C_m(z)$  همان کنترل فرمانده بوده و معادله آن به قرار زیر است:

$$C_m(z) = \frac{H_1 F(z^{-1})}{(1-z^{-1})(1+H_1 G(z^{-1})z^{-1})} \quad (۳-۲۷)$$



شکل ۳-۱۱: بلوک دیاگرام سیستم مورد مطالعه

همانطور که قبلاً گفتیم کنترل‌کننده فرمانده کاملاً وابسته به مدل سیستم خواهد بود و این مساله در رابطه (۳-۲۶) کاملاً مشهود است. در شکل (۳-۱۰) وجود یک پیش‌فیلتر به نام  $W(z)$  نشان‌دهنده قابلیت ساختار پیشنهادی است. اگر بدون این فیلتر نیروی انسانی به سیستم نیرو وارد کند در لحظات اولیه شاهد فراجهد ناگهانی و شدید در پاسخ‌ها خواهیم بود. به عنوان یک مثال ساده راه‌اندازی یک بازوی ربات از راه دور را در نظر بگیرید که کار آن جابجایی شیشه است. اگر از این فیلتر صرف‌نظر شود با اعمال ورودی در لحظات اولیه بازو نیرویی بیش از آنچه باید به شیشه وارد کرده و باعث شکستن شیشه شده و کاهش عملکرد مناسب برای سیستم‌های حرکتی از راه دور را در پی دارد. معادله این پیش‌فیلتر با استفاده از اولین آرایه کنترلی در معادله (۳-۲۰) به قرار زیر است :

$$W(z) = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} h_{1i} z^{-(i+d)}}{H_1 F(z^{-1})} \quad (28-3)$$

در بخش بعدی شبیه‌سازی سیستم حرکتی از راه دور مد نظر و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۵ تحلیل مقاوم بودن سیستم مورد نظر

برای تحلیل مقاوم، فرض کنید اغتشاش برابر با صفر باشد ( $q(t) = 0$ ). سیستم به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [5]:

$$\bar{G} = (G_n + \Delta G_u) = \frac{L}{Q} = \frac{(l_0 + l_1 z^{-1} + \dots + l_{mb} z^{-mb})}{1 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{ma} z^{-ma}} \quad (29-3)$$

که در آن  $\Delta G_u$  به عنوان عدم قطعیت در محیط عملیاتی برای یک سیستم حرکتی از راه دور در نظر گرفته می‌شود. تابع تبدیل از  $u(t|t)$  تا  $\bar{y}(t)$  به شکل زیر مشخص می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{y}(t)}{u(t|t)} &= G_n + T(z) \left\{ z^{-f} \sum_{i=0}^{mb} \frac{l_i z^{-k} z^{-i}}{Q} - G_n z^{-f} \right\} \\ &= G_n + T(z) z^{-f} \left\{ \sum_{i=0}^{mb} \frac{l_i}{Q} z^{-k-i} - G_n \right\} \end{aligned} \quad (30-3)$$

اولین بخش برای معادله بالا تابع تبدیل سیستم برای حالت نامی (بدون تاخیر و عدم قطعیت) است. بخش دوم مرتبط با عدم قطعیت‌های تاخیر زمانی رفت و برگشت و مدل است. این بخش به شکل کلی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\delta = z^{-f} \left\{ \sum_{i=0}^{mb} \frac{l_i}{Q} z^{-k-i} - G_n \right\} \quad (31-3)$$

با استفاده از قضیه بهره کوچک ، ناحیه عدم قطعیت مرز نرم برای نگه داری سیستم حلقه بسته به صورت پایدار به صورت زیر به دست می آید:

$$|T(z)\delta| \left| \frac{C(z)}{1+C(z)G_n(z)} \right| < 1, \forall \omega \in (0, \pi), z = e^{j\omega} \quad (32-3)$$

بنابراین:

$$|\delta| < \Delta P = \left| \frac{1+C(z)G_n(z)}{C(z)T(z)} \right|, \forall \omega \in (0, \pi), z = e^{j\omega} \quad (33-3)$$

می توان دید که اگر عدم قطعیت هایی که متاثر از زمان تاخیر رفت و برگشت و دینامیک های مدل نشده هستند در یک مرز نرم قرار گیرند ، سیستم پایدار است. عدم قطعیت های مدل دارای رابطه ای معکوس با عدم قطعیت های ناشی از زمان تاخیر رفت و برگشت هستند. عملکرد نامی سیستم با گذاشتن و یا تغییر T تغییری نمی کند زیرا زمانی که پلنت و مدل آن دقیقاً مانند یکدیگر باشند سیگنال خطا بین پلنت و مدلس صفر خواهد بود و T اثری بر عملکرد کنترلی سیستم حلقه بسته نخواهد داشت. اما آنچه در این حالت (نامی) باعث می شود T لحاظ شود اغتشاش است.

برای بررسی اثر اغتشاش تابع تبدیل حلقه بسته بین اغتشاش q(t) و ورودی کنترلی (t-k) u(t) را

در نظر بگیرید. در حالت کلی برای داشتن عملکرد مناسب برای حذف اغتشاش  $\left| \frac{u}{q} \right|$  باید نزدیک به ۱ باشد.

$$\begin{aligned} \left| \frac{u}{q}(z) \right| &= \left| \frac{C(z)z^{-k}G_n(z)z^{-f}T(z)}{1+C(z)G_n(z)} \right| \\ &= \left| \frac{C(z)z^{-k}G_n(z)T(z)}{1+C(z)G_n(z)} \right| = 1, \forall \omega < \omega_0, z = e^{j\omega} \end{aligned} \quad (34-3)$$

در این معادله  $\omega_0$  پهنای باند مطلوب برای سیستم حلقه بسته است. درصد مرز نرم عدم قطعیت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\gamma P = \frac{\Delta P}{|G_n|} = \left| \frac{1 + C(z)G_n(z)}{C(z)G_n(z)T(z)} \right| = \left| \frac{z^{-k}}{u/q(z)} \right|, z = e^{j\omega} \quad (35-3)$$

این معادله نشان می دهد که عملکرد حذف موثر اغتشاش منجر به مقاومت پایین می شود. بنابراین نیاز است بین حذف اغتشاش و مقاومت مصالحه ای برقرار شود. در حالت کلی عدم قطعیت های غیرساختاری در فرکانس های بالا مهم هستند و بنابراین T باید به گونه ای طراحی شود که در فرکانس های بالا مقدار  $\gamma P$  را افزایش دهد و گین واحد  $u/q$  را برای فرکانس های کم تر از  $\omega_0$  حفظ کند. پس T باید در حالت dc گین واحد داشته و یک فیلتر پایین گذر باشد.

### ۳-۶ شبیه سازی سیستم کنترلی

در بخش های قبلی ضمن ارائه معادلات مربوط به سیستم حرکتی از راه دور، نحوه ی طراحی کنترل کننده فرمانده و فرمانبر بررسی گردید. طبق معادلات (۳-۱) و (۳-۲) توابع تبدیل فرمانده و فرمانبر را تعریف می کنیم. در تابع تبدیل فرمانده مقدار  $M_m = 0.4 \text{ kg}$  و  $B_m = 3 \text{ N/m}$  در نظر گرفته شده است. این تابع تبدیل به صورت زیر است:

$$G_m = \frac{1}{s(0.4s + 3)} \quad (36-3)$$

که با انتخاب زمان نمونه برداری به میزان ۰.۱ ثانیه و گسسته سازی به فرم زیر خواهد بود.

$$G_{md} = \frac{0.009883 z^{-1} + 0.007705 z^{-2}}{1 - 1.472 z^{-1} + 0.4724 z^{-2}} \quad (37-3)$$

همچنین در تابع تبدیل فرمانبر مقدار  $M_s = 1 \text{ kg}$  و  $B_s = 0.2 \text{ N/m}$  در نظر گرفته شده است. این تابع تبدیل به صورت زیر است :

$$G_s = \frac{1}{s(s+0.2)} \quad (38-3)$$

که با انتخاب زمان نمونه برداری به میزان ۰.۱ ثانیه و گسسته سازی به فرم زیر خواهد بود.

$$G_{sd} = \frac{0.004967 z^{-1} + 0.004934 z^{-2}}{1 - 1.98z^{-1} + 0.9802z^{-2}} \quad (39-3)$$

امپدانس محیط عملیاتی به صورت  $Z_e = 1 + 0.01z^{-1}$  در نظر گرفته شده است. کنترل کننده

فرمانبر تناسبی - مشتقی نیز به صورت زیر است :

$$C_{sd} = K_p + K_d(1 - z^{-1}) = 45 + 43.1(1 - z^{-1}) = 88.1 - 43.1z^{-1} \quad (40-3)$$

مقدار  $\alpha$  برای فیلتر  $T$  به میزان ۰.۹۶ انتخاب شده و لذا فیلتر  $T$  به صورت زیر است:

$$T(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} = \frac{0.04}{1 - 0.96z^{-1}} \quad (41-3)$$

دیگر اجزاء سیستم کنترل تحت بررسی بسته به افق پیش بینی و کنترل دارای توابع تبدیل متفاوتی

می باشند. در ادامه عملکرد روش کنترلی پیشنهادی (شکل ۳-۹) را در پنج حالت مختلف زیر بررسی

می کنیم:

(الف): بدون تاخیر در مسیرهای رفت و برگشت و بدون عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر

(ب): با تاخیرهای زمانی نابرابر و کوچک بدون عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر

(ج): با تاخیرهای نابرابر و کوچک و عدم قطعیت به میزان ۲ درصد در محیط عملیاتی و عدم قطعیت در

کانال رفت و برگشت

(د) : با تاخیرهای برابر و بزرگ و بدون عدم قطعیت در محیط عملیاتی و بدون عدم قطعیت در کانال

رفت و برگشت

(ه) : با تاخیرهای برابر و بزرگ و عدم قطعیت به میزان ۲ درصد در محیط عملیاتی و عدم قطعیت در

کانال رفت و برگشت



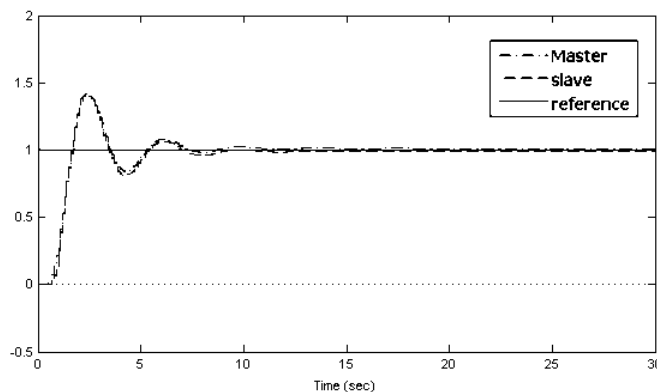
آنچه در ساختار کنترلی پیشنهادی برای سیستم حرکتی از راه دور اهمیت دارد پایداری مقاوم و شفافیت کامل (ردیابی موقعیت فرمانده-فرمانبر و ردیابی نیرو) می‌باشد.

### ۳-۵-۱ حالت (الف) : بدون تاخیر در مسیر های رفت و برگشت و

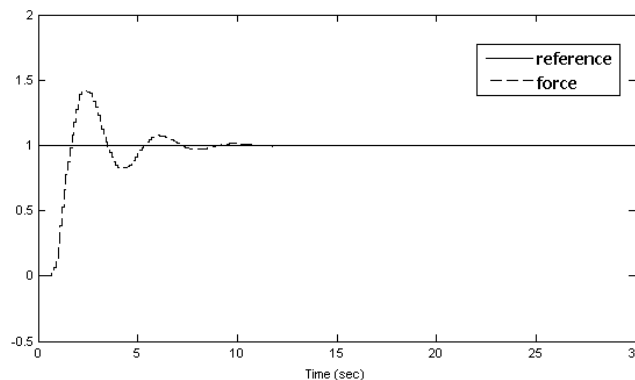
#### بدون عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر

در حالتی که هیچ‌گونه تاخیر و عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر نباشد در اصطلاح سیستم نامی گفته می‌شود. لذا با شبیه‌سازی سیستم در حالت نامی، مقادیر مناسب برای  $N_1$ ،  $N_2$ ،  $N_u$  و  $\rho$  را انتخاب می‌کنیم. از آنجایی که تاخیر خود سیستم  $G(s)$  برابر با صفر است مقدار  $N_1$  در تمام مراحل شبیه‌سازی برابر ۱ انتخاب می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی برای  $N_u = N_2 = 5$  و  $\rho = 0.2$  به صورت زیر است:



شکل ۳-۱۲: ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله با ۵ گام پیش‌بینی



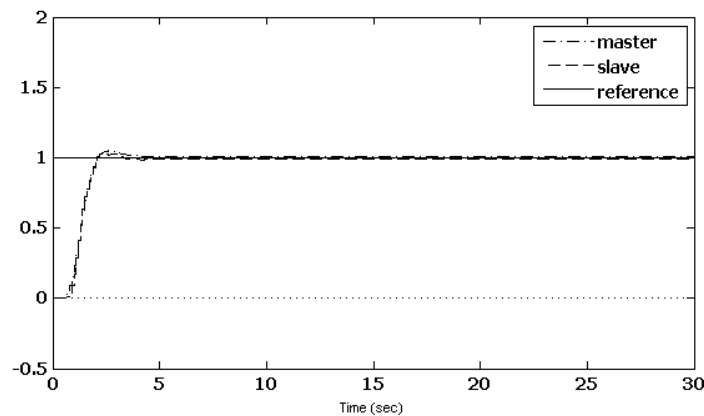
شکل ۳-۱۳: ردیابی نیرو به ورودی پله با 5 گام پیش‌بینی

همانطور که دیده می شود برای پنج گام پیش بینی و بدون هیچ تاخیر و عدم قطعیت سیستم دارای پاسخ کند و فراجاهش زیادی است. حال گام های پیش بینی را افزایش داده و برابر ۱۰ قرار می دهیم،

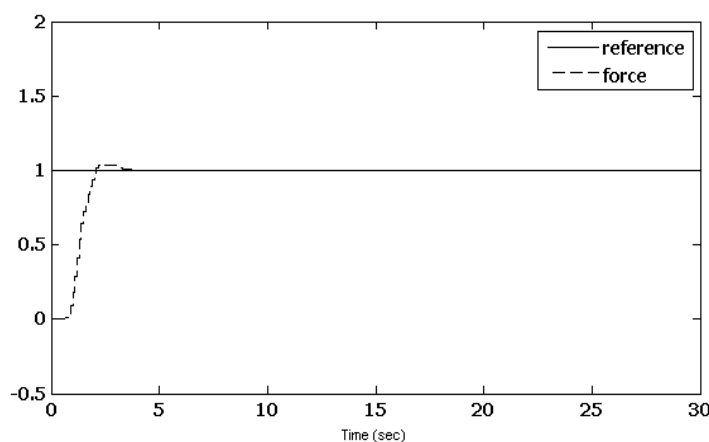
$$\rho = 0.2 \text{ و } N_u = N_2 = 10 \text{ یعنی}$$

از شکل های ۱۴-۳ و ۱۵-۳ به وضوح تاثیر افزایش گام پیش بینی قابل مشاهده است. نه تنها سرعت پاسخ سیستم تغییر یافته بلکه میزان فراجاهش نیز به میزان چشمگیری کاهش داشته است. در ادامه، گام پیش بینی و کنترل را تا حد دستیابی به بهینه ترین پاسخ افزایش می دهیم.  $N_u = N_2 = 40$  و

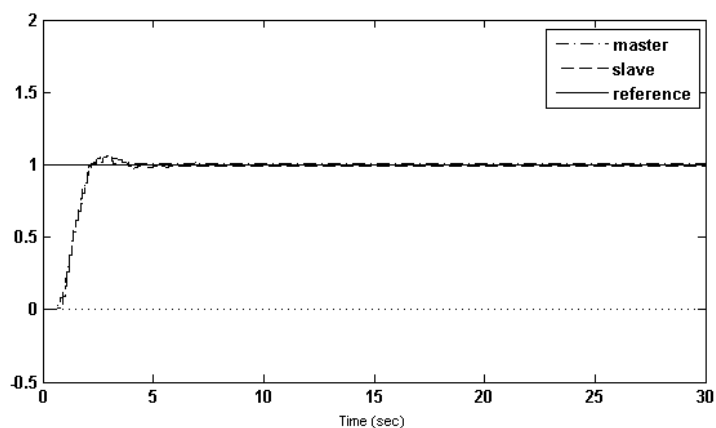
$$\rho = 0.2$$



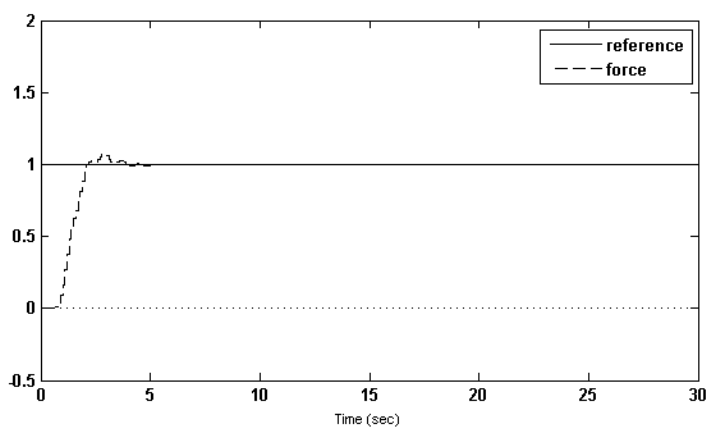
شکل ۱۴-۳: ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله با ۱۰ گام پیش بینی



شکل ۱۵-۳: ردیابی نیرو به ورودی پله با ۱۰ گام پیش بینی



شکل ۳-۱۶: ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله با ۴۰ گام پیش‌بینی



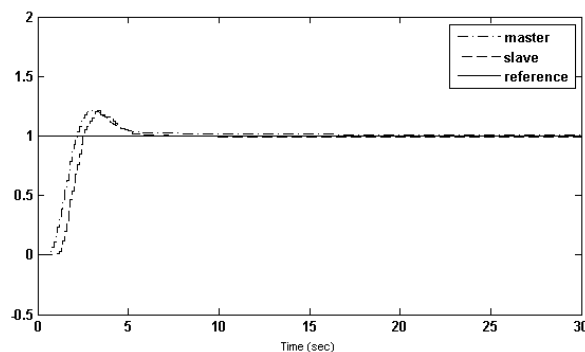
شکل ۳-۱۷: ردیابی نیرو به ورودی پله با ۴۰ گام پیش‌بینی

همانطور که مشاهده می‌شود پاسخ دارای فراجهش کمتری نسبت به حالت قبل است. اما انتخاب این مقدار بیشتر از آن جهت است که در صورت وجود عدم قطعیت در سیستم نیز بتوان به پاسخ مطلوب رسید که با انتخاب ۱۰ گام پیش‌بینی و کنترل امکان پذیر نیست.

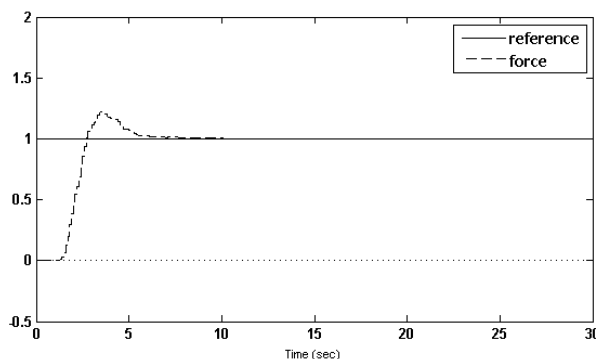
### ۳-۵-۲ حالت (ب) : با تاخیرهای نابرابر و کوچک در مسیر رفت و

#### برگشت و بدون عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر

در بخش قبل سیستم را در حالت نامی شبیه‌سازی کرده و به مشخصات عملکردی مطلوب رسیدیم که در آن افق پیش‌بینی و کنترل برابر ۴۰ و ضریب وزنی برابر با ۰.۲ انتخاب گردید. در این قسمت با همان مشخصات سیستم را شبیه‌سازی کرده با این تفاوت که در مسیرهای رفت و برگشت تاخیرهای کوچک و نابرابر در نظر گرفته می‌شود. در این حالت عدم قطعیت در محیط عملیاتی و زمان تاخیر وجود ندارد. در این حالت ۴ گام تاخیر در مسیر رفت و ۲ گام تاخیر در مسیر برگشت داریم. پاسخ‌ها در شکل‌های ۳-۱۸ و ۳-۱۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که علاوه بر پایداری سیستم، عملکرد آن نیز مناسب است.



شکل ۳-۱۸ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (ب)



شکل ۳-۱۹ : ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (ب)

۳-۵-۳ حالت (ج) : با تاخیرهای نابرابر و کوچک و عدم قطعیت به

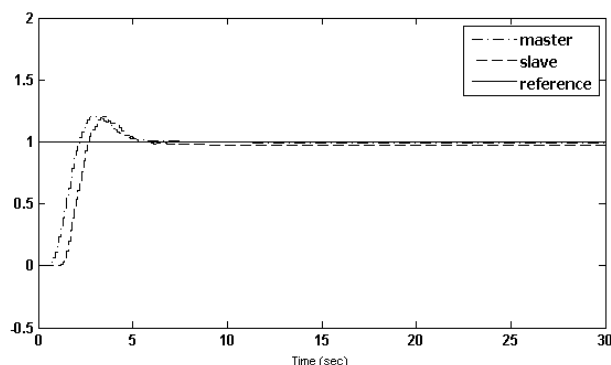
میزان ۲ درصد در محیط عملیاتی و عدم قطعیت در کانال رفت و

### برگشت

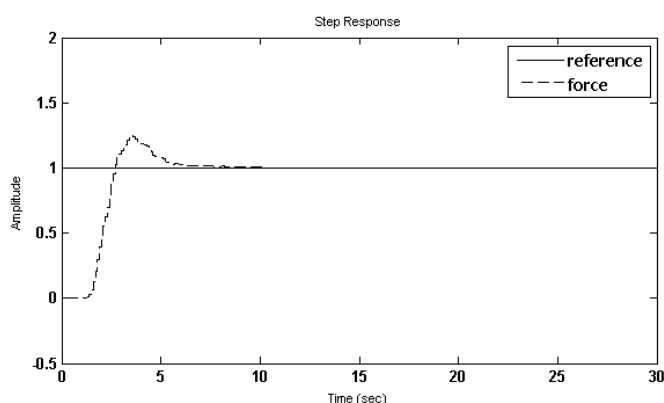
این حالت همانند حالت قبلی است با این تفاوت که علاوه بر عدم قطعیت در زمان تاخیر کانال رفت و

برگشت، در محیط عملیاتی نیز ۰.۱ درصد عدم قطعیت داریم. ۴ گام تاخیر در مسیر رفت و ۲ گام

تاخیر در مسیر برگشت به همراه عدم قطعیت در مسیر رفت ۱ گام و در مسیر برگشت ۱ گام.



شکل ۳-۲۰ : ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (ج)



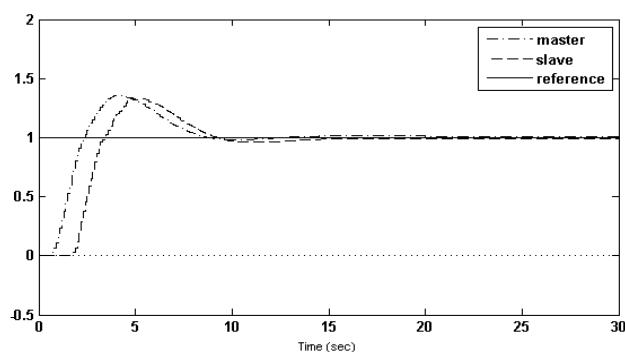
شکل ۳-۲۱ : ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (ج)

شکل‌های ۲۰-۳ و ۲۱-۳ عملکرد ساختار کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در شکل ۲۰-۳ موقعیت فرمانبر در حالت مانا مقدار ۰.۹۷ است که با توجه به این موضوع که پاسخ در بازه ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ مقدار نهایی قرار گرفته (زمان نشست) قابل قبول است.

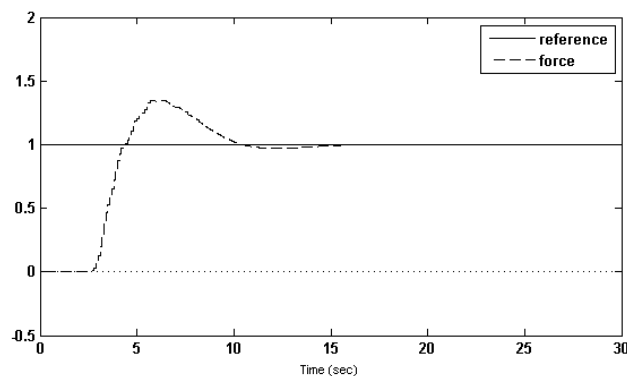
### ۳-۵-۴ حالت (د) : با تاخیرهای برابر و بزرگ و بدون عدم قطعیت در

#### محیط عملیاتی و بدون عدم قطعیت در کانال رفت و برگشت

در این حالت تاخیرهای مسیر رفت و برگشت با هم برابر و به میزان ۱۰ گام در نظر گرفته شده‌اند. اما در محیط عملیاتی و زمان تاخیر عدم قطعیت نداریم. نتایج در شکل‌های ۲۲-۳ و ۲۳-۳ آورده شده است. از شکل ۲۲-۳ به وضوح دیده می‌شود که ردیابی موقعیت به خوبی انجام می‌پذیرد. همچنین با مراجعه به شکل ۲۳-۳ عملکرد مناسب ساختار کنترلی پیشنهادی با ردیابی نیرو قابل استنتاج است.



شکل ۲۲-۳: ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (د)

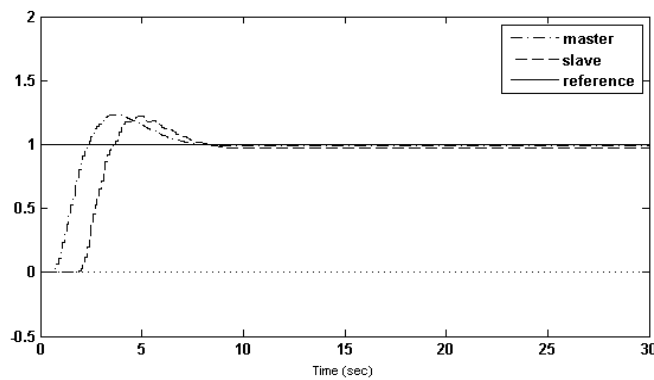


شکل ۲۳-۳: ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (د)

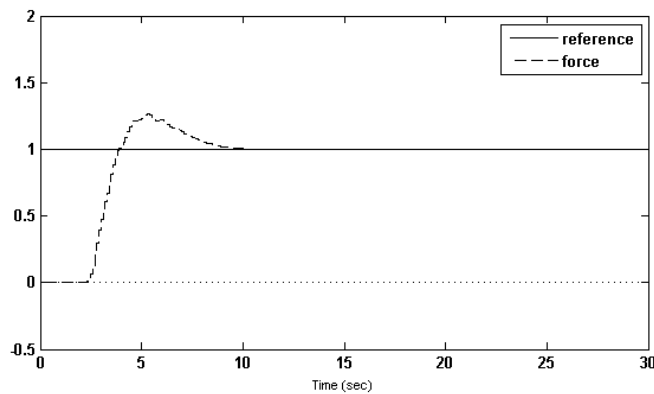
### ۳-۵-۵ حالت (ه): با تاخیرهای برابر و بزرگ و عدم قطعیت به میزان

#### ۲ درصد در محیط عملیاتی و عدم قطعیت در کانال رفت و برگشت

در این حالت تاخیرهای مسیرهای رفت و برگشت به مانند حالت قبل برابر و به میزان ۱۰ گام است. اما ۲٪ عدم قطعیت در محیط عملیاتی، ۶ گام عدم قطعیت در کانال برگشت و ۲ گام عدم قطعیت در کانال رفت لحاظ شده است. شبیه‌سازی‌ها عملکرد مناسب سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۴: ردیابی موقعیت برای فرمانده و فرمانبر به ورودی پله برای حالت (ه)



شکل ۳-۲۵: ردیابی نیرو به ورودی پله برای حالت (ه)

## فصل ۴

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات



## ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

کانال ارتباطی مهمترین جزء در سیستم‌های حرکتی از راه دور می‌باشد که با توجه به پیشرفت علم ارتباطات، از اینترنت به عنوان وسیله‌ای برای ارسال اطلاعات در سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه از سایت محلی به سایت دور و بالعکس استفاده می‌شود. آنچه در سیستم‌های حرکتی از راه دور مورد توجه است یکی بحث پایداری سیستم حلقه- بسته ناشی از تاخیر زمانی در کانال ارتباطی است و دیگری تبعیت سیستم فرمانبر از سیستم فرمانده است. بدین معنی که اپراتور انتظار دارد فرمان مورد نظرش پس از اعمال به سیستم فرمانده عیناً توسط سیستم فرمانبر اجرا شود.

عیب عمده سیستم‌های حرکتی از راه دور، زمان تاخیر نامعلوم در کانال ارتباطی و تغییر محیط عملیاتی است. در عمل، این تاخیر زمانی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله فاصله بین سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر و تعداد کابران (شلوغی خط) باشد. بنابراین به هنگام انتقال اطلاعات از سیستم فرمانده به سیستم فرمانبر و بالعکس همواره یک تاخیر زمانی در ارسال اطلاعات رخ خواهد داد که این زمان تاخیر در کانال ارتباطی به خصوص زمانی که فاصله بین سیستم فرمانده و فرمانبر زیاد باشد، غیرقابل صرف‌نظر کردن است. این زمان تاخیر علاوه‌براین که امکان ناپایداری سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه را افزایش می‌دهد، کارایی سیستم را کاهش داده و کنترل سیستم حرکتی از راه دور دوطرفه را بین سایت محلی و سایت دور مشکل می‌سازد.

در این پایان‌نامه، یک ساختار جدید کنترلی برای سیستم‌های حرکتی از راه دور دوطرفه با نامعینی در زمان تاخیر کانال ارتباطی و محیط عملیاتی با بهره‌گیری از دو کنترل‌کننده محلی مجزا به‌منظور دستیابی به تطابق کامل (ردیابی موقعیت و نیرو با هم) و تضمین پایداری سیستم حلقه- بسته کلی ارائه گردید. کنترل‌کننده محلی سیستم فرمانبر، تضمین ردیابی موقعیت را به عهده دارد و کنترل‌کننده محلی سیستم فرمانده، علاوه‌براین که وظیفه ردیابی نیرو را به عهده دارد، پایداری سیستم حلقه‌بسته کلی را نیز تضمین می‌کند.

این ساختار، اپراتور را قادر می‌سازد تا فرامین مورد نظرش پس از اعمال به سیستم فرمانده عیناً توسط سیستم فرمانبر با ضرایب نسبت‌دهی دلخواه نیرو و موقعیت/سرعت اجرا شود. در ساختار پیشنهادی، از یک پیش‌بین اسمیت تغییر یافته برای جبران تاخیر مسیر برگشت و از یک پیش‌فیلتر برای حذف فراجهدش‌های زیاد سیستم استفاده می‌شود.

آنچه بایستی مد نظر قرار گیرد آن است که در بین ۶۰-۷۰ درصد از روش‌های کنترلی که به کنترل سیستم‌های حرکتی از راه دور پرداخته اند معمولاً یکی از مشخصه‌های عملکردی یعنی ردیابی نیرو و ردیابی موقعیت حاصل نمی‌شوند. از مهمترین نتایج این پایان‌نامه این است که با استفاده از ساختار کنترلی پیشنهادی هر دو مشخصه‌ی عملکردی با حفظ پایداری سیستم کلی بدست آمد. با استفاده از این روش کنترلی قادر هستیم عدم قطعیت در محیط عملیاتی و همچنین عدم قطعیت در کانال رفت و برگشت را مدیریت کرده و به عملکرد مناسب برسیم. به عنوان کارهای آینده موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. تعمیم ساختار پیشنهادی به بازوهای مکانیکی با چند درجه آزادی.
۲. در صورت در دسترس نبودن مدل سیستم حرکتی از راه دور، پیشنهاد می‌شود که با یکی از روش‌های شناسایی سیستم و به خصوص با بکارگیری الگوریتم‌های پیشرفته و هوشمند مانند  $PSO^1$ ،  $GA^2$ ،  $SA^3$  و ... و یا تلفیقی از آنها بتوان سیستم را مدل کرده و بر اساس آنها طراحی‌های کنترلی پیش‌بین صورت گیرد.

---

<sup>1</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>2</sup> Genetic Algorithm

<sup>3</sup> Simulated Annealing

- [1] Peter F. Hokayem, MarkW. Spong, "Bilateral Teleoperation: A Historical Survey", *Automatica* 42 (2006), Science Direct
- [2] Jianhong Cui, Sabri Tosunoglu, Rodney Roberts, Carl Moore, Daniel W. Repperger, "A Review of Teleoperation System Control", Florida Conference on Recent Advances in Robotics, Florida, 2003
- [3] Jie Sheng and Mark W. Spong, "Model Predictive Control for Bilateral Teleoperation Systems with Time Delays", May 2004
- [4] Jay H.Lee "Model Predictive Control: Review of the Three Decades of Development", *International Journal of Control, Automation, and Systems* (2011)
- [5] Junxia Mu, G.P.Liu and David Rees "Design of Robust Networked Predictive Control Systems", 2005 American Control Conference
- [6] A.Alfi, M.Farrokhi "A Simple Structure for Bilateral Transparent Teleoperation Systems with Time Delay", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 130, no. 4, 2008.
- [7] S.Ganjefar, H.Momeni, F.J.Sharifi "Teleoperation Systems Design Using Augmented Wave-Variables and Smith Predictor Method for Reducing Time-Delay Effects".
- [8] C. Garcia, J. Posto, and C. Soria, "Supervisory Control for a Telerobotics System: a hybrid control approach" *Control Engineering Practice*, January 2003.
- [9] R.J.Anderson and W.spong, "Bilateral Control of Teleoperation with Time Delay," *IEEE Transactions Automation and Control*, Vol.34, May 1989.

- [10] W. Conklin, and S. Tosunoglu, "Conceptual Design of A Universal Bilateral Manual Controller," Proceedings of the Florida Conference on Recent Advanced in Robotics, Boca Raton, Florida, April 11-12, 1996.
- [11] H. W. Kim, L. H. Suh and B. J. Yi, "A stabilizing control technique for bilateral teleoperation system with time delay," IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts, pp.103-108, 2005.
- [12] J. Anderson and W. Spong, "Bilateral Control of teleoperators with time delay," IEEE Transactions on Automatica Control, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, 1989.
- [13] Y. Hou and G. R. Luecke, "Time delayed teleoperation system control: A passivity-based method," In Proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE International Conference on Advanced Robotics, pp. 796-802, 2005.
- [14] G. Niemeyer and J. E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," IEEE Journal of Oceanic engineering, vol. 26, no. 1, pp. 152-162, 1991.
- [15] H. K. Lee, M. H. Sheen and M. J. Chung, "Adaptive controller of master-slave systems for transparent teleoperation," In Proceedings of the IEEE Advanced Robotics, pp. 1021-1026, 1997.
- [16] L. Li, Y. Li and G. Liu, "Nonlinear adaptive control of teleoperation systems with large time delay," In Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, pp. 1522-1527, 2005.
- [17] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, no. 5, pp. 625-637, 1993.
- [18] T. Yoshikawa and J. Ueda, "Analysis and control of master-slave systems with time delay," In Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1336-1373, 1996.
- [19] K. Kosuge and H. Murayama, "Bilateral feedback control of telemanipulator via computer network in discrete time domain," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2219-2224, 1997.

- [20] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, "Using wave variables for system analysis and robot control," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1619-1625, 1997.
- [21] G. Niemeyer and J. J. Slotine, "Towards force-reflecting teleoperation over the internet," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1909-1915, 1998.
- [22] Y. Yokokohji, T. Imaida and T. Yoshikawa, "Bilateral teleoperation under time-varying communication delay," In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1854-1859, 1999.
- [23] Y. Yokokohji, T. Imaida and T. Yoshikawa, "Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2684-2689, 2000.
- [24] D. Lee and P. Li, "Passive feedforward approach to the control of bilateral teleoperated manipulators," In Proceedings of the ASME Haptics Symposium at IMECE, pp. 210-215, 2000.
- [25] S. Munir and W. J. Book, "Wave-based teleoperation with prediction," In Proceedings of the American Control Conference, vol. 7, no. 2, pp. 124-133, 2001.
- [26] S. Munir and W. J. Book, "Internet-based teleoperation using wave variables with prediction," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 7, no. 2, pp. 124-133, 2002.
- [27] D. Lee and P. Li, "Passive coordination control for nonlinear bilateral teleoperated manipulators," In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3278-3283, 2002.
- [28] S. Leeraphan, T. Maneewarn and D. Laowattana, "Stable adaptive bilateral control of transparent teleoperation through time-varying delay," In Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2979-2983, 2002.
- [29] T. Mirfakhrai and S. Payandeh, "A delay prediction approach for teleoperation over the internet," In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2178-2183, 2002.

- [30] H. Flemmer and J. Wikander, "Transparency and stability analysis of a surgical teleoperator system," Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, In Proceeding of the 11<sup>th</sup> Haptic Symposium, pp. 382-389, 2003.
- [31] J. Ryu, B. Hannaford, C. Preusche and G. Hirzinger, "Time domain passivity control with reference energy behavior," In Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2932-2937, 2003.
- [32] J. H. Ryu and J. H. Kim, "Stable and high performance teleoperation with time domain passivity control: reference energy following scheme," In proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE Conference of Control on Application, pp. 782-787, 2005.
- [33] M. Alise, R. G. Roberts and D. W. Repperger, "The wave variable method for multiple degree of freedom teleoperation systems with time delay," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2908-2913, 2006.
- [34] X. Liu, w. J. Wilson and X. Fan, "Pose reflecting teleoperation using wave variables with wave prediction," In Proceedings of the IEEE Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1642-1647, 2005.
- [35] M. U. Keerio, L. Zhang, Y. Lu, A. Jafri and J. Yang, "Control Scheme for stable bilateral teleoperation with time delay," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 433-438, 2006.
- [36] N. A. Tanner and G. Niemeyer, "High-frequency acceleration feedback in wave variable telerobotics," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 11, no. 2, pp. 119-127, 2006.
- [37] M. Boukhniifer and A. Ferreira, "Wave-based passive control for transparent micro-teleoperation system," Journal of Robotics and Autonomous Systems, vol. 54, pp. 601-615, 2006.
- [37] A. Aziminejad, M. Tavakoli, R. V. Patel and M. Moallem, "Wave-based time delay compensation in bilateral teleoperation: two-channel versus four-channel architecture," In Proceedings of the American Control Conference, pp. 1449-1454, 2007.
- [39] I. G. Polushin, X. Liu and C. H. Lung, "A force-reflection algorithm for improved transparency in bilateral teleoperation with communication delay," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 12, no. 3, pp. 361-374, 2007.

- [40] H. Kazerooni, T. I. Tsay and K. Hollerbach, "A controller design framework for telerobotic systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 1, no. 1, pp. 50–62, 1993.
- [41] G. M. H. Leung, B. A. Francis and J. Apkarian, "Bilateral controller for teleoperators with time delay via  $\mu$ -synthesis," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 11, no. 1, pp. 105-116, 1995.
- [42] Z. Hu, S. E. Salcudean, and P. D. Loewen, "Robust controller design for teleoperation systems," In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 2127–2132, 1995.
- [43] A. Sano, H. Fujimoto and T. Takai, "Network-based force-reflecting teleoperation," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3126–3131, 2000.
- [44] S. Siruspour and A. Shahdi, "Bilateral teleoperation under communication time delay using an LQG controller," In Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, pp. 1257-1262, 2005.
- [45] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, "Adaptive transparent impedance reflecting teleoperation," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1369-1374, 1996.
- [46] W. H. Zhu and S. E. Salcudean, "Stability guaranteed teleoperation: an adaptive motion/force control approach," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, no. 11, pp.1951-1969, 2000.
- [47] W. H. Zhu and S. E. Salcudean, "Teleoperation with adaptive motion/force control," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 231-237, 1999.
- [48] L. J. Love and W. J. Book, "Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control," IEEE Transactions on System, Man and Cybernetic, vol. 34, no. 1, pp. 159-165, 2004.
- [49] S. Ganjefar, H. Momeni and F. Janabi-Sharifi, "Teleoperation systems design using augmented wave-variables and smith predictor method for reducing time-delay effects,"

In Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 333-338, 2002.

- [50] K. Hosseini-Sunny, H. Momeni and F. Janabi-Sharifi, "Adaptive teleoperation systems design," In Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, pp. 334-339, 2005.
- [51] M. Sha-Sadeghi, H. Momeni, R. Amirifar and S. Ganjefar, "A new adaptive inverse control scheme for teleoperation system with varying time delay," In Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, pp. 199-204, 2006.
- [52] Y.J.Pan, C.C.de.Wit, O.Sename, "Predictive Controller Design for Bilateral Teleoperation Systems with Time-Varying Delays", 43<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and control, 2004.
- [53] S.Sirouspour, A.Shahdi, "Model Predictive Control for Transparent Teleoperation Under Communication Time Delay", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 22, NO. 6, DECEMBER 2006.
- [54] T.Slama, D.Aubry, R.Oboe, F.Kratz, "Robust bilateral generalized predictive control for teleoperation systems", Mediterranean Conference on Control and Automation, 2007.
- [55] Z.Ghazi, A.Safavi, M.Salimifard, "Improving MPC based Teleoperation Systems by Employing Intelligent Optimization Algorithms", 2<sup>nd</sup> International Conference on Control, Instrumentation and Automation, 2011.



## **ABSTRACT:**

In this thesis, the stability and the complete transparency of the system is provided by two local controllers in the presence of time delay and environment uncertainty, the former targeted at the slave system and the latter for the master system. For this goal, we utilize the Model Predictive Control (MPC) strategy to overcome the forward time delay, and also a modified smith predictor to compensate for the backward one. All through the design process, a unitary gain low-pass filter is considered to guarantee the stability of the overall system in the presence of uncertainty in backward time delay and environment. Also, a prefilter is designed such that it effectively reduces overshoots observed in the system. The simulations exhibit the novelty and the performance efficiency of the proposed control strategy.

**Keywords:** Teleoperation, Model Predictive Control, Smith Predictor, Low-pass Filter, Pre-filter, Uncertainty.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical & Robotic Engineering

# Model Predictive Control of Teleoperation Systems

Seyyed Vahid Ghouskhanehee

Supervisor:

Dr. Alireza Alfi

January 2013