



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته مهندسی برق گرایش کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

**کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور دو طرفه با پیش‌بین**

**اسمیت بهبود یافته**

نگارنده: پریسا مجاب

استاد راهنما:

دکتر محمد حداد ظریف

استاد مشاور:

دکتر علیرضا الفی

شهریور ۱۳۹۵

تقدیم به:

مهربان فرشتگانی که

لحظات نابِ باورِ بودن،

لذت و غرورِ دانستن،

جسارتِ خواستن،

عظمتِ رسیدن،

و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگی،

مدیون حضور سبز آنهاست.

پدر و مادر عزیز و گرامی ام.

تشکر و قدردانی:

با سپاس از سه وجود مقدس،

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

## 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 قابل دستیابی است به طوری که کنترل کننده محلی فرمانبر که کنترل کننده تناسبی مشتقی است و وظیفه ردیابی موقعیت از سیستم فرمانده را به عهده دارد و کنترل کننده محلی دوم یک کنترل کننده ساده تناسبی است و علاوه بر تضمین پایداری سیستم حلقه-بسته، خاصیت تطابق را تکمیل می کند. در قلب ساختار پیشنهادی از یک پیش بین اسمیت در دو مرحله جداگانه استفاده شده است. در حالت اول که یک پیش بین اسمیت ساده است خاصیت مقاوم بودن و همچنین تضعیف اغتشاش برای سیستم های عملیات از راه دور محقق نمی شود اما با اعمال تغییرات و افزایش درجه آزادی سیستم با طراحی فیلترهایی جداسازی بین پاسخ نقطه تنظیم و پاسخ حذف اغتشاش به همراه مقاوم بودن در برابر نامعینی ها صورت می پذیرد. نتایج شبیه سازی تأثیر روش پیشنهادی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: سیستم های عملیات از راه دور ، پیش بین اسمیت ساده ، پیش بین اسمیت فیلتر شده ، نامعینی ، حذف اغتشاش ، پایداری مقاوم.



## فصل ۱

۱	مقدمه
۲	۱-۱ تعاریف کلی
۲	۲-۱ عملیات از راه دور
۴	۳-۱ کاربرد سیستم‌های عملیات از راه دور
۴	۳-۱-۱ فضا
۶	۳-۱-۲ اعماق دریا
۸	۳-۱-۳ پزشکی
۹	۳-۱-۴ انرژی هسته‌ای
۹	۴-۱ تاریخچه عملیات از راه دور و روش‌های کنترلی
۱۱	۴-۱-۱ آزمایش‌های اولیه
۱۲	۴-۱-۲ کنترل نظارتی
۱۴	۴-۱-۳ روش‌های مبتنی بر غیرفعال بودن و متغیرهای موج
۱۷	۴-۱-۳-۱ شبکه‌های دو قطبی
۱۷	۴-۱-۳-۲ ماتریس امیدانس
۱۸	۴-۱-۳-۳ کنترل مبتنی بر متغیرهای موج
۲۶	۴-۱-۴ کنترل مبتنی بر کنترل مقاوم
۲۸	۴-۱-۵ کنترل مبتنی بر کنترل تطبیقی
۳۰	۴-۱-۶ کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین
۳۲	۴-۱-۷ کنترل مبتنی بر پیش‌بین اسمیت

## فصل ۲

۳۴	کنترل پیشنهادی
۳۵	۱-۲ تعریف مسأله

۳۸	ساده سازی سیستم عملیات از راه دور جهت طراحی کنترل کننده فرمانده
۴۰	پیش بین اسمیت [۶۴]
۴۱	ویژگی های حلقه بسته پیش بین اسمیت
۴۱	ویژگی ۱: جبران زمان مرده
۴۱	ویژگی ۲: پیش بینی
۴۲	ویژگی ۳: جبران ایده آل دینامیک
۴۳	مزایا و معایب پیش بین اسمیت
۴۳	ردیابی مرجع و حذف اغتشاش
۴۴	مقاوم بودن
۴۵	فرایندهای کلی ناپایدار
۴۷	فرایندهای انتگرال گیر
۵۱	عملیات از راه دور با پیش بین اسمیت ساده
۵۵	پیش بین اسمیت فیلترشده
۵۷	فرایند تنظیم
۵۷	عملکرد نامی
۶۰	پایداری مقاوم
۶۲	حالت مدل پایدار
۶۳	حالت مدل انتگرال گیر
۶۴	حالت مدل مرتبه اول ناپایدار
۶۵	عملیات از راه دور با پیش بین اسمیت فیلترشده

### فصل ۳

۷۱	نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۲	نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۴	مراجع



## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) شمای کلی عملیات از راه دور ..... ۳
- شکل (۲-۱) اجزاء تشکیل دهنده عملیات از راه دور دوطرفه ..... ۳
- شکل (۳-۱) طراحی بوئینگ با نام خدمات دهنده پرواز با رباتیک از راه دور برای ایستگاه فضایی آمریکا ..... ۵
- شکل (۴-۱) سیستم رباتیک از راه دور معرفی شده توسط شرکت داوینچی برای لاپاروسکوپی ..... ۹
- شکل (۵-۱) طرح سیستم هایبریدی ..... ۱۳
- شکل (۶-۱) کنترل نظارتی به کار برده شده در سیستم های عملیات از راه دور ..... ۱۳
- شکل (۷-۱) ساختار هایبریدی تشریح شده ..... ۱۴
- شکل (۸-۱) شبکه دو قطبی ..... ۱۷
- شکل (۹-۱) کنترل مبتنی بر متغیرهای موج ..... ۱۹
- شکل (۱۰-۱) بلوک دیاگرام مساله  $H_{\infty}$  استاندارد ..... ۲۶
- شکل (۱-۲) سیستم عملیات از راه دور دو طرفه ..... ۳۵
- شکل (۲-۲) سیستم فرمانبر ..... ۳۷
- شکل (۳-۲) طراحی کنترل کننده فرمانبر برای تبعیت از موقعیت فرمانده ..... ۳۸
- شکل (۴-۲) طرح کنترلی ساده شده شکل (۱-۲) ..... ۳۹
- شکل (۵-۲) طرح کنترلی ساده تر شده برای سیستم های عملیات از راه دور ..... ۳۹
- شکل (۶-۲) ساختار کلی پیشبین اسمیت ..... ۴۰
- شکل (۷-۲) ساختار معادل کنترلی برای پیش بین اسمیت ..... ۴۳
- شکل (۸-۲) اعمال پیش بین اسمیت با یک درجه آزادی به دستگاه ناپایدار ..... ۴۶
- شکل (۹-۲) ورودی کنترل برای دستگاه ناپایدار ..... ۴۷
- شکل (۱۰-۲) ساختار معادل پیش بین اسمیت ..... ۴۸
- شکل (۱۱-۲) پاسخ حلقه بسته سیستم انتگرال گیر با پیش بین اسمیت ساده ..... ۵۰
- شکل (۱۲-۲) ورودی کنترل برای سیستم انتگرال گیر با پیش بین اسمیت ساده ..... ۵۰
- شکل (۱۳-۲) نمودار قطب-صفر برای تابع تبدیل نیرو ..... ۵۱

- شکل (۲-۱۴) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت ساده ..... ۵۳
- شکل (۲-۱۵) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت ساده ..... ۵۳
- شکل (۲-۱۶) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش بین اسمیت ساده ..... ۵۴
- شکل (۲-۱۷) پیش بین اسمیت فیلترشده ..... ۵۵
- شکل (۲-۱۸) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت اول ..... ۶۵
- شکل (۲-۱۹) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت اول ..... ۶۶
- شکل (۲-۲۰) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت دوم ..... ۶۶
- شکل (۲-۲۱) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت دوم ..... ۶۷
- شکل (۲-۲۲) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت دوم ..... ۶۸
- شکل (۲-۲۳) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت دوم ..... ۶۸
- شکل (۲-۲۴) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت سوم ..... ۶۹
- شکل (۲-۲۵) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت سوم ..... ۷۰
- شکل (۲-۲۶) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش بین اسمیت فیلترشده در حالت سوم ..... ۷۰

فصل ۱

مقدمه

## ۱-۱ تعاریف کلی

**عملیات از راه دور<sup>۱</sup>:** گسترش توانایی حسگری و دستکاری انسان برای مکانی دور می‌باشد. عبارت «عملیات از راه دور» معمولاً به کنترل انسانی مستقیم و پیوسته برای یک عملگر از راه دور اشاره دارد، اما به طور کلی به عملیات از راه دور، «رباتیک از راه دور» نیز اطلاق می‌شود [۱].

**حضور از راه دور<sup>۲</sup>:** عبارت است از حسگری ایده‌آل و اطلاعات کافی در مورد عملگر از راه دور و محیط عملیاتی، و انتقال آن به کاربر انسانی به شکلی کاملاً طبیعی، بطوری که کاربر احساس کند در محل حضور دارد [۱].

**عملگر از راه دور<sup>۳</sup>:** دستگاهی است که انسان را به عنوان کاربر قادر می‌سازد اشیا را در فاصله ای مشخص حرکت داده، حس کرده، و به طور مکانیکی آنها را تغییر دهد. در کلی‌ترین دیدگاه هر وسیله‌ای که گستره عملکرد مکانیکی انسان را که در دسترسش نیست افزایش دهد، عملگر از راه دور شناخته می‌شود [۲].

**رباتیک از راه دور<sup>۴</sup>:** نوعی عملیات از راه دور است که در آن کاربر انسانی به عنوان ناظر عمل کرده و متناوباً برای دستیابی به اهداف، محدودیت‌ها، طرح‌ها و ... برای کاری مشخص با یک کامپیوتر در ارتباط است و اطلاعاتی را پیرامون دستاوردها، سختی‌ها، نگرانی‌ها و داده‌های حسگری دریافت می‌کند [۱].

## ۱-۲ عملیات از راه دور

به طور کلی در سیستم‌های عملیات از راه دور انسان نیرویی را به بازوی مکانیکی فرمانده وارد می‌کند که منجر به نوعی جابجایی شده و به فرمانبر ارسال می‌شود و نهایتاً فرمانبر این عمل را عیناً انجام می‌دهد. اگر فرمانبر دارای سنسور نیرو باشد، آنگاه می‌تواند نیروهای تعاملی را از کار انجام شده به فرمانبر

---

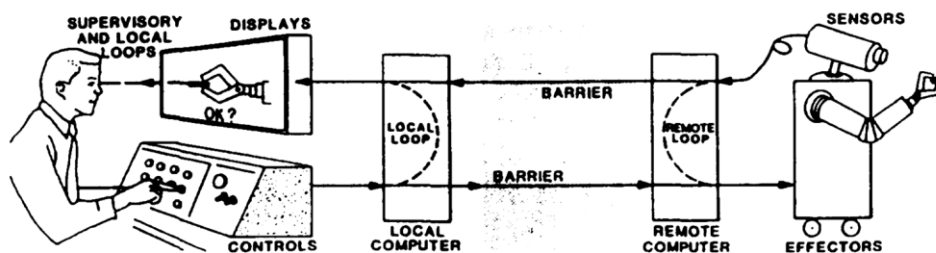
<sup>1</sup> Teleoperation

<sup>2</sup> Telepresence

<sup>3</sup> Teleoperator

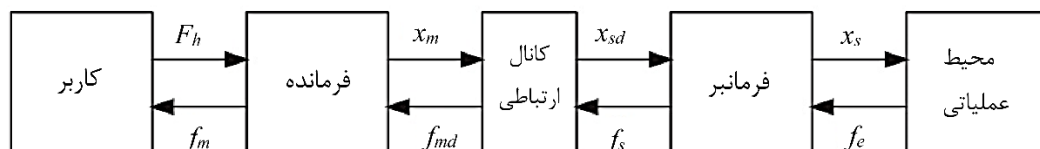
<sup>4</sup> Telerobotics

باز گرداند که در نهایت به گشتاور ورودی فرمانده وارد می شود و در این حالت گفته می شود عملیات از راه دور به طور دو طرفه کنترل شده است [۳]. شکل (۱-۱) شمای کلی اینگونه سیستمها را نشان می دهد.



شکل (۱-۱) شمای کلی عملیات از راه دور

هم اکنون به بررسی علمی تر موضوع می پردازیم. یک سیستم عملیات از راه دور دو طرفه شامل پنج زیر سیستم شامل کاربر انسانی، بازوی مکانیکی فرمانده، کانال ارتباطی، بازوی مکانیکی فرمانبر و محیط عملیاتی است. این بخشها در شکل (۲-۱) نشان داده شده اند.



شکل (۲-۱) اجزاء تشکیل دهنده عملیات از راه دور دوطرفه

در سیستم عملیات از راه دور دو طرفه کاربر نیرویی به میزان  $f_h$  به بازوی مکانیکی فرمانده وارد می کند. به موجب آن فرمانده جابجا شده ( $x_m$ ) و این کار بوسیله سیگنالی از طریق خط انتقال، منتقل می شود و بازوی مکانیکی فرمانبر به سیگنال مرجع  $x_{sd}$  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 عملیات از راه دور دوطرفه، هدف اصلی انتقال مطمئن سیگنالها (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 طور کلی عملیات از راه دور دو طرفه با چالش‌های زیر روبرو است:

۱- وجود تأخیر زمانی در مسیرهای پیشرو و فیدبک که با یک مقدار کوچک از تأخیر (حتی ۵۰ میلی ثانیه) ممکن است سیستم ناپایدار شود.

۲- وجود نامعینی در دینامیک محیط عملیاتی و زمان تأخیر.

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 سازه های فضایی یا انجام کارهای ظریف مانند ریز جراحی خواهد بود و توانش را در مکان‌های دور از دسترس، متمرکز خواهد کرد[۳].

## ۱-۳ کاربرد سیستم‌های عملیات از راه دور

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

### ۱-۳-۱ فضا

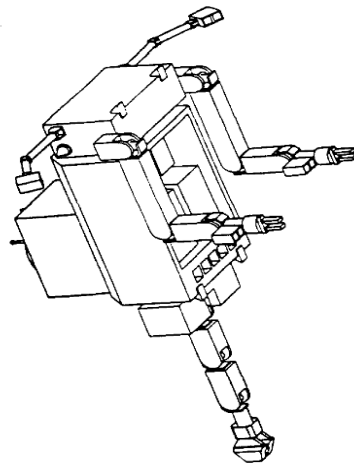
مثالی از توانمندی‌های یک عملگر از راه دور، سیستم دستکاری کننده از راه دور (RMS) به فاصله ۲۰ متر، ساخته شده توسط شرکت کانادایی SPAR است و بر روی شاتل فضایی ایالات متحده آمریکا قرار گرفته است. این سیستم دارای شش درجه آزادی است و مستقیماً توسط کاربر انسانی از طریق دریچه

---

<sup>1</sup> Transparency

یا تصویری ویدئویی و با استفاده از دو دسته سه محوره کنترل می‌شود، یکی از دسته‌ها برای انتقال‌ها و دیگری برای دوران‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به جهت آنکه سیستم قادر نیست وزن خود را در گرانش زمین تحمل کند، بازوی رباتیکی باید بسیار سبک باشد. در فضا، با حرکات کوچکی از دسته‌ها، صدها کیلوگرم با سهولت جابجا می‌شوند. برای چنین سیستم‌هایی کنترل فرمانده-فرمانبر مناسب نیست. بلکه اطلاعات از فرمانده به کامپیوتری منتقل شده و با نرخ مناسب به فرمانبر ارسال می‌شود [۱].

یکی از برنامه‌های فضایی آمریکا طراحی «خدمات‌دهنده پرواز با رباتیک از راه دور» (FTS) است که در ابتدا بر شاتل فضایی و در انتهای بازوی بلند RMS قرار می‌گیرد و به مانند یک انسان فضاورد کار می‌کند. در نهایت روی پیشرانده‌های شاتل قرار گرفته و با فرامین ساده کنترلی هدایت می‌شود. شکل (۳-۱) نمونه‌ای از این مفهوم را نشان می‌دهد [۱].



شکل (۳-۱) طراحی بوئینگ با نام خدمات‌دهنده پرواز با رباتیک از راه دور برای ایستگاه فضایی آمریکا مقوله اکتشاف و کار در فضا در مدارهای هم‌زمان با زمین، نیاز به ربات‌های دور برد را بیش از پیش اعلام می‌کند که در آن از یک سو هزینه تعمیر و نگهداری در فضا کاهش یافته و از سوی دیگر ریسک امنیت فضاوردان را کاهش می‌دهد [۲]. اکثر کاوشگرهای فضایی ربات‌های دور برد هستند، که دارای کنترل‌های نسبتاً ساده و معمولی اما قابل اعتماد هستند، این ربات‌ها برای دریافت تصاویر و دیگر داده‌های حسی دارای پهنای باند پایین بوده و دارای قابلیت برنامه‌ریزی در فضا می‌باشند [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].

نقشه بردار آمریکایی<sup>۴</sup> در سال ۱۹۶۷ که از فن آوری عملیات از راه دور بهره می برد ارائه شد. در سال ۲۰۰۴ آزمایشاتی برای بازوی رباتیکی با شش درجه آزادی با ماهواره ای تی اس هفت<sup>۵</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 [۳].

پروژه روکوئیس<sup>۶</sup> در کشور آلمان یکی دیگر از پروژه ها در این زمینه است که هدف آن انجام آزمایشاتی در فضا با بازوهای رباتیکی سبک است [۳].

جدیدترین کاربرد فضایی عملیات از راه دور ربات های سیار<sup>۷</sup> هستند. نحوه 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 کند تا اطراف ربات سیار را بررسی کند [۳].

## ۱-۳-۲ اعماق دریا

در سال ۱۹۸۰ عملگرهای راه دور زیر دریا، که عموماً به آنها «وسائط کنترل شده از راه دور»<sup>۸</sup> (ROV) می گفتند، به طور گسترده بوسیله صنایع نفت و گاز در عملیات تکمیل سر چاه نفت، نظارت بر خطوط

<sup>1</sup> DLR

<sup>2</sup> ROTEX

<sup>3</sup> NASA

<sup>4</sup> American Surveyor

<sup>5</sup> ETS-7

<sup>6</sup> ROKVISS

<sup>7</sup> Mobile Robots

<sup>8</sup> Remotely Operated Vehicles



لوله، قراردعی آنودها و بازرسی جوش‌ها در سازه‌های زیردریا و کارهای دیگر مورد استفاده قرار گرفتند. از دلایل اصلی بکارگیری این سیستم‌ها هزینه‌ای حدود ۱۰ هزار دلاری در بکارگیری غواصان برای هر ساعت کار در اعماق ۳۰۰ متری دریا و از همه مهم‌تر خطر جانی استفاده از غواصان است. بیش از ۵۰ غواص در عملیات نفتی در دریای شمال ناپدید شده‌اند. پس هر دو عامل خطر جانی و هزینه سبب شده است کفه ی کاربرد به نفع ROV ها نسبت به کاوشگران دریایی با سرنشین سنگینی کند. اگر چه بهای جهانی نفت در زمان‌هایی روند کاهشی داشته است اما پیشرفت ROV ها متوقف نشده است. عملگرهای راه دور به کار گرفته شده برای آنها معمولاً هیدرولیکی هستند تا در برابر نیروهای شدید و شرایط نامناسب مقاوم باشند. برای ROV ها و کاوشگران دریایی با سرنشین می‌توان از کنترل فرمانده-فرمانبر یا دسته کنترل بهره برد. در مورد دوم، عملگر از راه دور توسط عامل انسانی در چند متر آن طرف‌تر از طریق دریچه‌ای در کاوشگر کنترل می‌شود.

زمین‌شناسان دریایی و زیست‌شناسان دریایی هر دو به استفاده از ROV ها در پژوهش‌های خود علاقه‌مند شده‌اند. این دانشمندان بیشتر به کاوشگران با سرنشین علاقه دارند که برای آنها یک زاویه دید کامل و بدون مانع را فراهم می‌کند اما از هزینه بالا و خطر جانی چنین وسایلی ناراضی هستند. گاهی اوقات از هر دو استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای بررسی تایتانیک از یک کاوشگر با سرنشین به نام آرگو (Argo) و یک کاوشگر بدون سرنشین به نام جیسون جونیور (Jason Junior) استفاده شد. آرگو یک واسطه سنگین بود که به شکلی غیرفعال روی کابلی طویل قرار گرفته بود و دارای سونار و تجهیزات ویدئویی و عکس بود، در مقابل جیسون جونیور یک «دوربین فیلم‌برداری ضد آب» با قطر کمتر از ۰.۵ متر بود. بر خلاف صنعت نفت، زیست‌شناسان دریایی باید بسیار مراقب باشند تا به موجودات تحت مطالعه خود آسیبی نزنند. بنابراین در این حالت نیروها بسیار کمتر اما نیاز به مهارت در توانایی مانور بیشتر از عملیات نفتی است [۱].

## ۱-۳-۳ پزشکی

عملیات از راه دور خود را در کاربردهای پزشکی نظیر جراحی از راه دور پیدا کرده است. جراحی از راه دور اجازه تبادل مهارت‌های پزشکی را بدون حضور پزشک می‌دهد. این کار باعث صرفه‌جویی در هزینه، زمان و انرژی شده و اتاق عمل را از دور دست در اختیار جراح قرار می‌دهد [۳]. آزمایشاتی در مورد جراحی از راه دور بین دو کشور آمریکا و ایتالیا انجام شده است که در آن زمان تاخیر یک نگرانی مهم بوده است [۴]. در عکس برداری به شیوه سی.ای.تی<sup>۱</sup> و ام.آر.آی<sup>۲</sup> از عملیات از راه دور استفاده می‌شود. برای حرکت وسایل رباتیکی به منظور جا انداختن سر استخوان ران و دیگر ساختارهای استخوانی و جا انداختن با ثبات تر ایمپلنت‌های مفصل مصنوعی استفاده می‌شود که جایگزین سوراخ-کاری دستی مرسوم می‌شود [۲].

با کمی دقت درمی‌یابیم که آندوسکوپی خود یک عملیات از راه دور است. آندوسکوپ دسته‌ای از فیبرهای نوری به همراه لوله‌هایی برای حمل مایع به نقاطی دور و سیم‌هایی برای تغییر شکل است تا بتواند به راحتی در گوشه‌ها مانور دهد. تجهیزاتی مشابه با آندوسکوپ نیز وجود دارد که به داخل مفاصل استخوانی می‌رود (مانند زانو، شانه و ...) که بدین وسیله استخوان یا بافت‌های دیگر می‌توانند بریده یا برداشته شوند یا دیگر کارهای ترمیمی بدون باز کردن بافت داخلی میسر می‌شود. بسیاری از اعمال جراحی مانند لاپاروسکوپی<sup>۳</sup> بر پایه مفاهیم عملیات از راه دور صورت می‌گیرند. شکل (۱-۴) ربات طراحی شده توسط شرکت داوینچی<sup>۴</sup> را برای انجام عمل لاپاروسکوپی نشان می‌دهد [۱].

---

<sup>1</sup> CAT

<sup>2</sup> MRI

<sup>3</sup> Laparoscopy

<sup>4</sup> Da'Vinci



شکل (۴-۱) سیستم رباتیک از راه دور معرفی شده توسط شرکت داوینچی برای لاپاروسکوپی

### ۴-۳-۱ انرژی هسته‌ای

اولین کاربرد بازوهای مکانیکی عملیات از راه دور برای جابه‌جایی مواد هسته‌ای بود [۳]. در پاکسازی زباله‌های سمی، عملیات از راه دور نقش بسیار مهمی دارد به ویژه در نیروگاه‌های هسته‌ای. وجود مواد رادیواکتیو و ناشتی محیط را برای انسان‌ها خطرناک کرده و بدین جهت تمام کارها به عملیات از راه دور سپرده می‌شود. مفهوم اصلی در کنترل از راه دور و عملیات از راه دور به مانند قدیم است اما اندازه سیستم به دلیل اندازه کاری که باید انجام شود، افزایش می‌یابد. سیستم‌هایی که در این محیط‌ها کنترل می‌شوند ممکن است از غلتک‌های لوله‌ای 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 محیط‌ها با آنها سر و کار داریم می‌توان به مقیاس‌بندی حرکت، فیدبک تصویری، محدودیت‌های کاری و فیدبک نیرو اشاره کرد.

### ۴-۱ تاریخچه عملیات از راه دور و روش‌های کنترلی

در طول ۶۰ سال اخیر پژوهش‌ها و گزارش‌های متعددی در مورد سیستم‌های عملیات از راه دور و کنترل آنها صورت پذیرفته است [۳]. سیستم‌های عملیات از راه دور یا به طور عام عملیات از راه دور

دارای تاریخچه بسیار غنی بوده و دارای کاربردهای زیادی است. و همواره به تعامل بین محیط و کاربر از راه دور پرداخته است [۲].

تاریخچه عملیات از راه دور به دهه‌ی ۱۹۴۰ بر می‌گردد، 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 بهره‌برداری 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 بهره‌برداری رسید. در اوایل دهه ۱۹۶۰ علاقه بیش از حد به این موضوع منجر به آزمایشاتی برای درک اثرات زمان تاخیر در عملیات 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 گسترده‌ای در زمینه طراحی زبان های برنامه نویسی و توسعه برنامه های تصویری شد که ارتباطات بین فرمانده و فرمانبر را به حداقل می‌رساند. در ابتدای دهه ۱۹۸۰ روش‌های کنترلی پیشرفته‌تری مانند تحلیل لیاپانوفی و مدل مجازی داخلی بوجود آمدند. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ نظریه شبکه از طریق نمایش امیدانسی و هایبریدی، نظریه پراکندگی و کنترل بر اساس غیرفعال بودن پا به عرصه گذاشت. روش مبتنی بر غیرفعال بودن راه را برای عملیات از راه دور تاخیری و پایدار هموار نمود. در سال ۱۹۹۴ یوکوکوهجی<sup>۶</sup> و یوشیکاوا<sup>۷</sup> به تاکید بر انتقال دو طرفه نیرو و سرعت پرداختند. در اواسط دهه 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 داده گسسته و همچنین از دست رفتن داده مواجه بود. بنابراین در سال های بعد این موضوع مورد توجه قرار گرفت. روش‌هایی که در بالا به آنها

---

<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

پرداختیم در کاربردهای مختلفی نظیر کار با مواد رادیواکتیو، کنترل تجهیزات دریایی بدون سرنشین، رباتیک فضایی، جراحی از راه دور و همچنین موضوع جدید ربات‌های سیار به کار برده شده‌اند [۳].

## ۱-۴-۱ آزمایش‌های اولیه

در اوایل دهه 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 کار بدین صورت بود که هر گاه تاخیر وارد حلقه انتقال می‌شد کاربر برای اینکه مطمئن شود کار انجام شده است، با استفاده از یک استراتژی به نام **حرکت و توقف** پاسخ می‌داد. این استراتژی با یک حرکت کنترلی آغاز شده و منتظر می‌مانیم پاسخ رباتی که در دور دست واقع است را ببینیم آنگاه با یک حرکت تصحیح کننده مجدداً منتظر می‌مانیم تا پاسخ را مشاهده کنیم و این فرایند تا جایی ادامه می‌یابد که کار به طور کامل انجام شود.

$N(I)$  را تعداد حرکت‌های انفرادی اولیه بر اساس استراتژی حرکت و توقف می‌گویند. 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:

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

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 مخابراتی است. از آزمایشات بالا دو نتیجه حاصل می‌شود یکی اینکه زمان نهایی نسبت به تاخیر موجود خطی است و دوم اینکه کاربر به طور «پایدار» فرامینی را صادر می‌کند.

## ۱-۴-۲ کنترل نظارتی

مطابق با معادله (۱-۱)، زمان کامل شدن یا همان زمان خاتمه برای یک کار مشخص با عامل تاخیر در یک حلقه کنترلی رابطه 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 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 زیر فعالیتها از "هوش" بیشتری برخوردار است. ویتنی<sup>۱</sup> در زبان برنامه نویسی نظارتی از معادلات فضای حالت گسسته و ایده بهینه سازی بر اساس روش های جستجو برای بدست آوردن عملکرد بهینه استفاده 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 [۳] و [۷].

محققان آرژانتینی به نام های گارسیا<sup>۲</sup>، پستیگو<sup>۳</sup> و سوریا<sup>۴</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 معادلات گسسته مدل شود. مدل عملیات از راه دور به این سبک در شکل (۱-۵) نشان داده شده است:

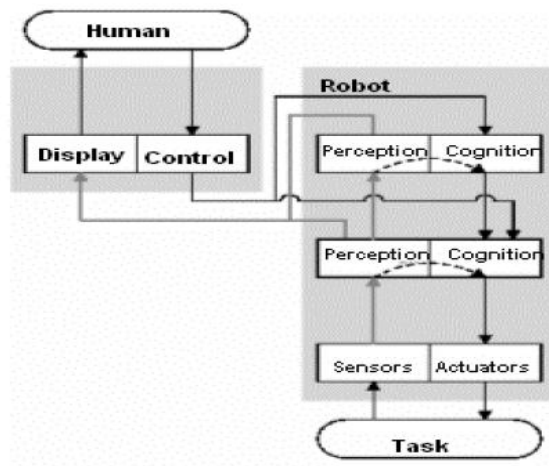
---

<sup>1</sup> Whitney

<sup>2</sup> Garcia

<sup>3</sup> Postigo

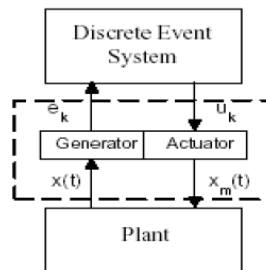
<sup>4</sup> Soria



شکل (۵-۱) طرح سیستم هایبریدی

در سال ۱۹۹۲، استیور<sup>۱</sup> و آنتاسکلیس<sup>۲</sup> سیستمی هایبریدی به شکل (۶-۱) ارائه دادند. 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.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (۲-۱)$$



شکل (۶-۱) کنترل نظارتی به کار برده شده در سیستم‌های عملیات از راه دور

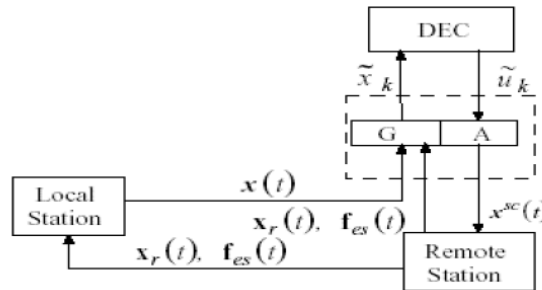
کنترل کننده سیستمی گسسته است و با یک معادله مشخصه مدل می شود. این معادله با پنج تایی زیر مشخص می شود:

$$A = \{W, X_d, \tilde{U}, \delta, \phi\} \quad (۳-۱)$$

<sup>1</sup> Stiver

<sup>2</sup> Antasklis

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 (۷-۱) نشان داده شده است.



شکل (۷-۱) ساختار هایبریدی تشریح شده

رخدادهایی که در این سیستم عملیات 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 عملیات از راه دور در نظر گرفته می شوند مرتبط با سیگنال موقعیت و حالت شبکه مخابراتی است. بنابراین رخدادها زمانی تولید می شوند که آستانه 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 می دهد، نقش انسان کنترل بصری فرایند است. وقتی که آستانه موقعیت و نیرو تمام شده باشند و یا ارتباط در سیستم عملیات از راه دور مختل شده باشد کنترل کننده 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].

### ۱-۴-۳ روش های مبتنی بر غیرفعال بودن و متغیرهای موج

از دیدگاه ریاضی یک سیستم عملیات 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 می‌دهد. مدل خطی یک سیستم فرمانده- فرمانبر به صورت زیر است :

$$\begin{cases} M_m \ddot{x}_m + B_m \dot{x}_m = f_m + f_h, \\ M_s \ddot{x}_s + B_s \dot{x}_s = f_s - f_e \end{cases} \quad (4-1)$$

که در آن  $x_* \in \mathbb{R}^n$  ( $*$  =  $m$  یا  $s$ ) مختصات تعمیم‌یافته،  $f_* \in \mathbb{R}^n$  نیروهای ورودی (تعمیم‌یافته) ،  $M_*$  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 :

$$\begin{cases} M_m(x_m) \ddot{x}_m + C_m(x_m, \dot{x}_m) \dot{x}_m = f_m + f_h \\ M_s(x_s) \ddot{x}_s + C_s(x_s, \dot{x}_s) \dot{x}_s = f_s - f_e \end{cases} \quad (5-1)$$

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

$$(PD): M_* = M_*^T \quad \text{مثبت معین است} \quad (6-1)$$

$$(SS): \dot{M}_* - 2C_* \quad \text{متقارن است} \quad (7-1)$$

نظریه ی پسیویتی ویژگی ورودی-خروجی سیستم‌های دینامیکی است و در نظریه 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

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \end{cases}$$

$$y = h(x, u) \quad (۸-۱)$$

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

$$\dot{V} \leq u^T y \left( \equiv \int_0^t u^T(\eta) y(\eta) d\eta \geq V(t) - V(0) \right) \quad (۹-۱)$$

و همچنین سیستم بی اتلاف است اگر :

$$\dot{V} = u^T y \left( \equiv \int_0^t u^T(\eta) y(\eta) d\eta = V(t) - V(0) \right) \quad (۱۰-۱)$$

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

$$\int_0^t [f_h^T(\eta) \dot{x}_m(\eta) - f_e^T(\eta) \dot{x}_s(\eta)] d\eta \geq 0 \quad (۱۱-۱)$$

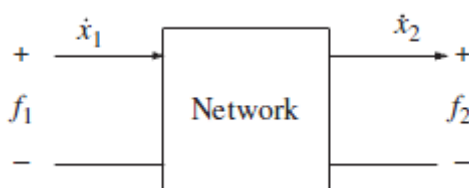
آنگاه سیستم غیر خطی با ورودی  $[f_s^T, f_m^T]^T$  و خروجی  $[\dot{x}_m^T, \dot{x}_s^T]$  نسبت به تابع انرژی زیر غیرفعال است:

$$V = \frac{1}{2} [\dot{x}_m]^T \begin{bmatrix} M_m & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} \quad (۱۲-۱)$$

بنابراین می‌توان این سیستم را بی‌اتلاف 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 عملیات 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 غیرفعال بودن محیط و کاربر اگر سیستم عملیات از راه دور غیرفعال باشد، آنگاه کل سیستم غیرفعال است. حال با این مقدمه به بررسی روش‌های مبتنی بر غیرفعال بودن می‌پردازیم [۳].

## ۱-۳-۴-۱ شبکه های دو قطبی

در اواخر دهه ۱۹۸۰، مشاهده شد که یک سیستم عملیات از راه دور متشکل از فرمانده و فرمانبر با کنترل کننده ها و اجزای بین آنها می تواند به صورت یک شبکه دو قطبی مدل شود که برای آنها ابزار تحلیل موجود هستند. شبکه دو قطبی نشان داده شده در شکل (۸-۱) را در نظر می گیریم که سیگنال های خارجی بترتیب ولتاژ و جریان در مدارات الکتریکی و نیرو و سرعت در سیستم های مکانیکی هستند.



شکل (۸-۱) شبکه دو قطبی

رفتار چنین شبکه ای با نمایش های ماتریسی متفاوتی قابل نمایش است. مثلاً ماتریس امپدانس یا همان  $Z(s)$  که نیروها را به سرعت ها مرتبط می سازد، ماتریس هایپرید 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 [۳].

## ۱-۳-۴-۲ ماتریس امپدانس

با فرض وجود شارش<sup>۱</sup> به عنوان ورودی در دو طرف شبکه 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:

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} z_m(s) - c_{11}(s) & -c_{12}(s) \\ -c_{21}(s) & z_s(s) - c_{22}(s) \end{pmatrix}}_{Z_{cl}(s)} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} \quad (۱۳-۱)$$

<sup>۱</sup> Flow

<sup>۲</sup> Proportional Derivative

که در آن  $Z_*$  امپدانس‌های مشخصه فرمانده و فرمانبر هستند. نکته مهم این است که کنترل‌کننده  $(c_{ij}, i, j = 1, 2)$  تمام بخش‌های 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 [۳].

### ۱-۴-۳ کنترل مبتنی بر متغیرهای موج

ناپایداری در سیستم‌های عملیات از راه دور با زمان تاخیر در کانال ارتباطی به واسطه ساختار فعال کانال ارتباطی است. اساس ساختار روش‌های کنترلی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن، ایجاد غیرفعال بودن برای کانال ارتباطی است. مطابق آنچه که قبلاً بیان گردید یادآوری می‌شود که روش کنترلی مبتنی بر نظریه غیرفعال بودن اگرچه پایداری سیستم عملیات از راه دور برای تمام زمان‌های تاخیر را تضمین می‌کند ولی در عمل به واسطه نامعینی در سیستم‌های عملیات از راه دور 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> [۸]، به طراحی کنترل‌کننده‌ای براساس نظریه پسیویتی و نظریه پراکندگی برای سیستم‌های عملیات 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> [۹] در ادامه کار اندرسن و اسپانگ [۸]، متغیرهای موج را به منظور بررسی پایداری سیستم‌های عملیات از راه دور با زمان‌های تاخیر نامشخص ولی ثابت پیشنهاد کردند. آنها در مقاله خود به پیش‌بینی متغیرهای موج به منظور بالا بردن عملکرد سیستم‌های عملیات از راه دور نیز اشاره کرده‌اند.

---

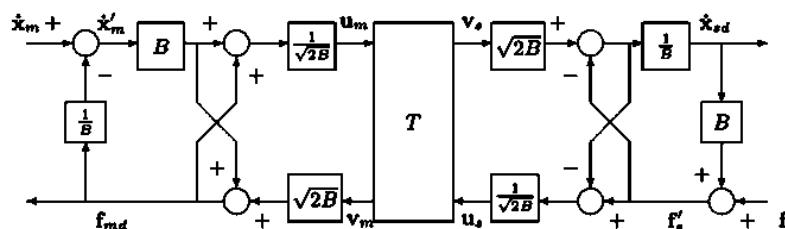
<sup>1</sup> Anderson

<sup>2</sup> Spong

<sup>3</sup> Niemeyer

<sup>4</sup> Slotine

آنچه در کاربرد متغیرهای موج برای سیستم‌های عملیات 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 تطبیق دادن امپدانس موج با امپدانس محیط عملیاتی رفع می‌گردد که به روش تطبیق امپدانس<sup>۱</sup> معروف است. بدین منظور، در ترمینال سیستم فرمانده از ادمیتانس  $\frac{1}{B}$  و در ترمینال سیستم فرمانبر از امپدانس  $B$  استفاده می‌شود (شکل ۹-۱).



شکل (۹-۱) کنترل مبتنی بر متغیرهای موج

در سال ۱۹۹۳، لورنس [۱۰]، روش ۴ کاناله برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه با حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی را پیشنهاد کرد. در این روش، با استفاده از نظریه پسیویته، فیلترها طوری طراحی می‌شوند که پایداری سیستم عملیات از راه دور در حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی تضمین شود.

در سال ۱۹۹۶، یوشیکاوا<sup>۲</sup> و یودا<sup>۳</sup> [۱۱] به ارزیابی پایداری ساختار ۴ کاناله با استفاده از نظریه پراکندگی نسبت به زمان تاخیر پرداختند. بر این اساس، روشی کنترلی پیشنهاد گردید که قادر به پایداری سازی ساختار از نوع نیرو-نیروی تاخیر یافته می‌باشد.

<sup>1</sup> Impedance Adaptation

<sup>2</sup> Yoshikawa

<sup>3</sup> Ueda

در سال ۱۹۹۷، کسوغو<sup>۱</sup> و مرویاما<sup>۲</sup> [۱۲] 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 [۱۳] در ادامه کار خود و رفع عیب خطای ردیابی موقعیت<sup>۳</sup> استفاده از فیلتر را در متغیرهای موج پیشنهاد کردند. فیلتر کردن متغیرهای موج ضمن حفظ پایداری، سبب حذف نویز و حرکت هموار می‌گردد.

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 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 [۱۴] 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 عملیات از راه دور به جز کانال تاخیر، استفاده شده است. هدف آنها، تضمین پسیوبودن سیستم عملیات 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.

---

<sup>1</sup> Kosuge

<sup>2</sup> Murayama

<sup>3</sup> Position Drift

در سال ۱۹۹۹، یوکوکوهجی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵]، در راستای کار نایمیر و اسلاتین 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 عملیات 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 [۱۶]، 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 [۱۷] روشی را با استفاده از ذخیره انرژی مجازی به منظور تضمین پسیویتی برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه ارائه کردند.

در سال ۲۰۰۱، مُنیر<sup>۳</sup> و بوک<sup>۴</sup> [۱۸] با ترکیب فیلتر کالمن و پیش‌بینی‌کننده اسمیت، عملکرد سیستم‌های عملیات 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>۵</sup> نیز به منظور تضمین شرط پسیویتی بلوک پیش‌بینی‌کننده استفاده گردیده است. در واقع، تنظیم‌کننده انرژی نوعی فیلتر است که از افزایش انرژی برگشتی جلوگیری می‌کند. روش مطرح شده به دلیل وجود تاخیر متغیر در کانال ارتباطی دارای خطای ردیابی موقعیت می‌باشد.

در سال ۲۰۰۲، مُنیر و بوک [۱۹] در ادامه کار خود و به منظور رفع خطای ردیابی موقعیت به دلیل تاخیر متغیر در کانال ارتباطی، روشی جدید ارائه کردند. در این روش، از جمله‌ای در موج سمت راست به منظور

---

<sup>1</sup> Yokokohji

<sup>2</sup> Lee

<sup>3</sup> Munir

<sup>4</sup> Book

<sup>5</sup> Regulator

صفر کردن خطای حالت ماندگار ردیابی موقعیت استفاده شده است. در این روش نمی‌توان از فیلتر بازسازی که نایمیر و اسلاتین [۱۳] 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 [۲۰] در ادامه کار خود، به ارائه روشی برای کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور غیرخطی پرداختند.

در سال ۲۰۰۲، لیرافان<sup>۱</sup> و منی‌وارن<sup>۲</sup> [۲۱]، یک کنترل‌کننده تطبیقی برمبنای نظریه پسیویتی پیشنهاد کردند که این کنترل‌کننده قادر به سازگار نمودن مشخصه امیدانس با زمان به‌منظور تطبیق امیدانس موج با امیدانس محیط عملیاتی می‌باشد. مزیت این روش این است که می‌توان از دو مقدار متفاوت جهت تطبیق امیدانس با در نظر گرفتن این واقعیت که زمان تاخیر در کانال ارتباطی رفت با کانال ارتباطی برگشت برابر نباشد، استفاده کرد. در سال ۲۰۰۲، ریو<sup>۳</sup> و همکاران [۲۵]، روشی جدید برمبنای انرژی برای کنش لامسه‌ای پایدار پیشنهاد کردند و آن را به نظریه شبکه دوقطبی برای سیستم‌های عملیات از راه دور بسط دادند. آنها به‌منظور این که سیستم پسیو باقی بماند از دو کنترل‌کننده پسیو سری<sup>۴</sup> استفاده کرده‌اند. یک کنترل‌کننده پسیو در سمت سیستم فرمانده و کنترل‌کننده پسیو دیگر در سمت سیستم فرمانبر قرار داده شده است که وظیفه آنها جذب انرژی خروجی است. به عبارتی دیگر، وظیفه کنترل‌کننده‌های پسیو سری این است که سبب شوند میزان جذب انرژی، بیشتر از میزان تولید آن باشد. این وظیفه در صورتی امکان‌پذیر خواهد بود که با مانیتورینگ زوج سیگنال، هر درگاه از دوقطبی را بتوان به‌صورت 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 کنترل‌کننده و کانال ارتباطی صورت می‌گیرد. این بدان معنی است که به‌منظور

---

<sup>1</sup> Leeraphan

<sup>2</sup> Maneewarn

<sup>3</sup> Ryo

<sup>4</sup> Series Passive Controller



تضمین پسیویتی برای همه زمان‌ها کافی است که از پسیوبودن کنترل‌کننده و کانال ارتباطی مطمئن شویم. بنابراین، سیستم‌های فرمانبر و فرمانده پسیو فرض می‌شوند. ورودی کنترل‌کننده‌ها 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 کنترل‌کننده‌ها 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 پاینده [۲۲] به ادامه کار یوکوکوهجی و همکاران [۱۵] پرداختند. اگرچه یوکوکوهجی و همکاران به اهمیت بهره فیدبک و این که مقدار بهره فیدبک باید به صورتی انتخاب شود که عملکرد سیستم مناسب بوده و نسبت به اغتشاش مقاوم باشد اشاره کرده بودند ولی روشی را برای تعیین و تنظیم بهره فیدبک ارائه نکرده‌اند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که مقدار بهره فیدبک باید به گونه‌ای باشد که کمترین تغییر در خطای ردیابی با تغییر در دامنه تاخیر زمانی ایجاد شود. به بیانی دیگر، خطای ردیابی سرعت (نیرو) با انتخاب مناسب بهره فیدبک مینیمم گردد. آنها در روش پیشنهادی 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 [۲۳]، روشی را با ترکیب پیش‌بینی‌کننده اسمیت و متغیرهای موج به منظور بالا بردن کارایی سیستم‌های عملیات 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 اسمیت تخمین زده می‌شوند.

---

<sup>1</sup> Autoregressive Model

در سال ۲۰۰۳، فِلمر<sup>۱</sup> و ویکاندر<sup>۲</sup> [۲۴]، براساس خواص سیستم‌های حقیقی مثبت به طراحی کنترل‌کننده‌ای برای سیستم‌های عملیات از راه دور مربوط به جراحی<sup>۳</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 [۲۵] 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 مینا<sup>۴</sup> به‌منظور تضمین شرط پسیویتی بکار برده شد که در سال ۲۰۰۵، ریو<sup>۵</sup> و کیم [۲۶]، این روش را به‌صورت عملی بکاربردند. نتایج آزمایش‌های عملی نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی می‌باشد.

در سال ۲۰۰۵، الایز<sup>۶</sup> و همکاران [۲۷]، روش متغیرهای موج را برای سیستم‌های عملیات از راه دور با چند درجه آزادی در حضور زمان تاخیر پیشنهاد کردند. در این روش، مدل مورد استفاده، خطی و زمان تاخیر در کانال ارتباطی ثابت فرض شده است. در سال ۲۰۰۶، الایز و همکاران تحقیقاتشان را به‌صورت عملی نیز نشان دادند [۲۸].

در سال ۲۰۰۵، هو<sup>۷</sup> و همکاران [۲۹]، روش کنترلی جدیدی را برای سیستم‌های عملیات 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>۸</sup> و همکاران [۳۰]، روش جدیدی را برای پایداری سیستم‌های عملیات از راه

---

<sup>1</sup> Felemmer

<sup>2</sup> Wikander

<sup>3</sup> Surgical Telooperator System

<sup>4</sup> Reference Energy Following

<sup>5</sup> Ryo

<sup>6</sup> Alise

<sup>7</sup> Hou

<sup>8</sup> Kim

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 [۳۱]، از پیش‌بینی متغیرهای موج به‌منظور مقابله با آثار تخریبی زمان تاخیر در کانال ارتباطی بر روی عملکرد سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه استفاده کردند. در سال ۲۰۰۶، کریو<sup>۱</sup> و همکاران [۳۲]، روش تطبیق امپدانس و کنترل‌کننده شبه‌خطی مینیمال را به‌منظور دستیابی همزمان به ردیابی موقعیت و پایداری سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۰۶، تانر<sup>۲</sup> و نایمیر [۳۳]، روش متغیرهای موج را با استفاده از فیدبک شتاب فرکانس بالا بهبود دادند. در سال ۲۰۰۶، بوخنیفر<sup>۳</sup> و فریرا [۳۴]، کنترل‌کننده بر مبنای متغیرهای موج برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه کوچک<sup>۴</sup> پیشنهاد کردند. در این روش، از قضیه پسیویتی به‌منظور دستیابی به پایداری و تطابق استفاده شده است. در سال ۲۰۰۷، عظیمی‌نژاد و همکاران [۳۵]، به بررسی جبران آثار زمان تاخیر برای سیستم‌های عملیات از راه دور پرداختند. در این مقاله، دو ساختار مختلف ۲ کاناله و ۴ کاناله بهبودیافته بر مبنای متغیرهای موج مقایسه شده است. در سال ۲۰۰۷، پلوشین<sup>۵</sup> و همکاران [۳۶]، الگوریتم جدیدی برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه به‌منظور بهبود تطابق با استفاده از روش بازتاب نیرو پیشنهاد کردند. این روش پایداری، سیستم عملیات از راه دور را در حضور زمان‌های تاخیر متغیر در کانال ارتباطی تضمین می‌کند. در سال ۲۰۰۹، بیت<sup>۶</sup> و همکاران [۳۷]، روشی برای کاهش بازتاب موجی عملگر از راه دور در محیط‌های غیرخطی و نامعین پیشنهاد کرده‌اند که نه تنها پایداری را تضمین می‌کند بلکه با کاهش بازتاب موج سبب بهبود ردیابی سیگنال سرعت و بهبود ردیابی فیدبک نیرو می‌شوند. در سال ۲۰۱۴، لی و کاواشیما [۳۸]، بر مبنای تطبیق امپدانس که عاملی برای ردیابی مناسب است، درک کاربر را از محیط عملیاتی با بکارگیری متغیرهای موج افزوده بالا می‌برند.

---

<sup>1</sup> Keerio

<sup>2</sup> Tanner

<sup>3</sup> Boukhniifer

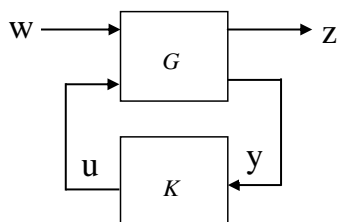
<sup>4</sup> Micro-Teleoperation System

<sup>5</sup> Polushin

<sup>6</sup> Bate

## ۱-۴-۴ کنترل مبتنی بر کنترل مقاوم

مبنای طراحی کنترل کننده‌های مقاوم، نظریه بهینه‌سازی  $H_\infty$  به فرم استاندارد آن (شکل ۱-۱۰) می‌باشد.



شکل (۱-۱۰) بلوک دیاگرام مساله  $H_\infty$  استاندارد

در شکل (۱-۱۰)،  $G$  و  $K$  به ترتیب نشان‌دهنده سیستم و کنترل کننده، 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>۱</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 به‌منظور دستیابی به عملکرد مطلوب در نظر گرفته شوند.

در سال ۱۹۹۳، کازرونی<sup>۲</sup> و همکاران [۳۹]، به طراحی کنترل کننده 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>۳</sup> و همکاران [۴۰]، طراحی سیستم‌های عملیات از راه دور با حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی با استفاده از سنتز  $\mu$  را پیشنهاد کردند. در سال ۱۹۹۵، هو<sup>۴</sup> و همکاران [۴۱]

<sup>1</sup> Proper

<sup>2</sup> Kazerooni

<sup>3</sup> Leung

<sup>4</sup> Hu

کنترل‌کننده مقاومی را برای کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور با داشتن پایداری مقاوم و کارایی مطلوب با استفاده از ساختار ۴ کاناله پیشنهاد کردند. در این روش، با فرض این که اپراتور انسانی و محیط عملیاتی پسیو باشند، از شرط  $\sup\{\mu(\mathbf{S}_T(j\omega))\} \leq 1$  به عنوان شرط پایداری مقاوم استفاده کردند که در آن  $\mathbf{S}_T$  ماتریس پراکندگی است. شرط بکار برده شده در این روش، نسبت به شرط پسیویتی از محافظه‌کاری کمتری برخوردار است. در روش پیشنهادی، به منظور سادگی در طراحی، علاوه بر این 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 عملیات از راه دور می‌تواند به عنوان یک شبکه تک قطبی 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 پسیو فرض می‌شود. شرط لازم و کافی برای پایداری تک قطبی 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 عملیات از راه دور ایده‌آل می‌باشد. آنچه در کارهای فوق قابل توجه می‌باشد این است که یک روش کلی که بتواند اهداف طراحی مختلف را دربرگیرد ارائه داده نشده است.

در سال ۲۰۰۰، سانو<sup>۱</sup> و همکاران [۴۲]، طراحی کنترل‌کننده  $H_\infty$  برای کنترل سیستم‌های عملیات 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.

<sup>1</sup> Sano

<sup>2</sup> Round Trip Time

در سال ۲۰۰۵، سیروس‌پور و شهدی [۴۳]، استفاده از کنترل‌کننده گوسی مربعی خطی (LQG)<sup>۱</sup> گسسته را به‌منظور پایدارسازی سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر ثابت در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند.

در سال ۲۰۱۰، شهبازی و همکاران [۴۴]، به طراحی کنترل‌کننده مقاوم بر مبنای سنتر  $\mu$  برای سیستم‌های عملیات از راه دور دو کاربره پرداختند که بر اثرات نامطلوب تاخیر کانال ارتباطی سیستم‌های دو کاربره فائق می‌آید.

در سال ۲۰۱۴، امینی و همکاران [۴۵]، طرحی کنترلی ارائه کردند که از سیگنال‌های نیروی محیط و کاربر بهره می‌برد. برای حذف اندازه‌گیری نیرو به طور مستقیم، از یک رویکرد تخمین نیرو بر مبنای رویتگرهای اغتشاش استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی تخمین مجانبی نیروهای ثابت را تضمین می‌کند و خطای تخمین برای نیروهای خارجی متغیر با زمان کراندار است.

## ۱-۴-۵ کنترل مبتنی بر کنترل تطبیقی

از محدودیت‌های روش مبتنی بر کنترل تطبیقی می‌توان به محدود بودن معادلات دینامیکی برای سیستم اشاره کرد. علاوه‌براین، عدم قطعیت در سیستم بایستی به تعداد معدودی پارامتر نامعلوم محدود گردد. در حالت کلی، بدست آوردن مدل دینامیکی دقیق برای سیستم‌های عملیات از راه دور بسیار مشکل است. بنابراین، کاربرد روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل تطبیقی برای سیستم‌های عملیات از راه دور با درجات بالا به واسطه پیچیدگی ساختار دینامیکی سیستم، بسیار مشکل می‌باشد.

در سال ۱۹۹۶، هشرودی‌زاد<sup>۲</sup> و سالکادین<sup>۳</sup> [۴۶]، کنترل‌کننده تطبیقی غیرمستقیم را پیشنهاد کردند که در آن نیازی به اندازه‌گیری نیرو نمی‌باشد. بدین منظور در این روش، علاوه‌بر موقعیت و سرعت، شتاب سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر نیز باید اندازه‌گیری شود. در روش پیشنهادی مزبور، از ساختار ۴ کاناله

<sup>1</sup> Linear Quadratic Gaussian

<sup>2</sup> Hashtrudi-Zaad

<sup>3</sup> Salcudean

استفاده شده است. در این روش، پارامترهای کنترل کننده استفاده شده در طرف سیستم فرمانده به صورت تطبیقی محاسبه نمی شوند. پارامترهای کنترل کننده در طرف سیستم فرمانبر به صورت تطبیقی و در طرف سیستم فرمانده به دلیل این که سیگنال نیرو اندازه گیری نمی شود، براساس تطابق محاسبه می شوند.

در سال ۱۹۹۷، لی و همکاران [۴۷]، کنترل کننده تطبیقی برای سیستم های عملیات از راه دور با محیط عملیاتی نامعین و یا متغیر را ارائه کردند. در این روش، با استفاده از ساختار ۴ کاناله و بر مبنای ساختار موقعیت-نیرو علاوه بر تضمین پایداری سیستم عملیات از راه دور، تطابق نیز قابل دستیابی است.

در سال ۱۹۹۹، زو<sup>۱</sup> و سالکادین [۴۸]، کنترل کننده تطبیقی سرعت/نیرو را پیشنهاد کردند. این روش پیشنهادی برای کنترل موقعیت و سرعت با مقیاس دهی 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 می شوند. در روش پیشنهادی، کنترل کننده تطبیقی برای دینامیک غیرخطی سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر قابل استفاده است.

در سال ۲۰۰۰، زو و سالکادین [۴۹] 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 مدل سازی سیستم عملیات 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 کنترل کننده ای مستقل از هم طراحی کرده که پارامترهای مربوط به هر کدام به صورت جداگانه به روز می شوند. 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 [۵۰]، روش جدیدی را برای کنترل سیستم های عملیات 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

---

<sup>1</sup> Zhu

<sup>2</sup> Love

الگوریتم RLS<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. توسط این الگوریتم، امپدانس سایت دور که شامل محیط عملیاتی نیز می‌شود، به صورت 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>۲</sup> و همکاران [۲۰]، کنترل تطبیقی غیرخطی را برای سیستم‌های عملیات از راه دور با زمان تاخیر بزرگ در کانال ارتباطی پیشنهاد کردند. در این روش، به‌منظور تضمین پایداری سیستم عملیات از راه دور از دو کنترل‌کننده مجزا جابه‌جایی/نیرو برای سیستم فرمانده و سیستم فرمانبر استفاده می‌شود. روش پیشنهادی برای محیط‌های عملیاتی نامعلوم قابل استفاده است. علاوه بر آن، در این روش نیازی به اندازه‌گیری سرعت نمی‌باشد. در سال ۲۰۰۵، حسینی‌ثانی و همکاران [۵۱]، کنترل‌کننده تطبیقی نیرو-جابه‌جایی را به منظور تضمین پایداری سیستم‌های عملیات 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 [۵۲]، ساختار جدیدی را برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه در حضور زمان تاخیر متغیر در کانال ارتباطی با استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی معکوس پیشنهاد کردند. علاوه بر این، به منظور اثبات مقاوم بودن ساختار پیشنهادی به‌همراه تطابق، روش بازتاب نیرو نیز در این ساختار مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۱-۴-۶ کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین

در سال ۲۰۰۴ شنگ و اسپانگ [۵۳] به ارائه مقاله ای برای کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور دو طرفه پرداختند. در طرح کنترلی خود از کنترل پیش‌بین مدل تغییر یافته استفاده کردند. روش آنها

---

<sup>1</sup> Recursive Least Square

<sup>2</sup> Li



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 [۵۴] 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 می توان 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 می گیرد و در واقع ردیابی موقعیت/سرعت در این سیستم نداریم. به عبارتی دیگر تطابق کامل حاصل نمی شود. در سال ۲۰۰۶ سیروس پور و شهدی [۵۵] روشی بنیادی مبتنی بر کنترل پیش‌بین سیستم‌های عملیات 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 می توان به درجه پیچیدگی آن اشاره کرد. اسلما<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۵۶] طرحی از کنترل پیش‌بین مقاوم ارائه کردند که در آن کاملاً فرمانبر موقعیت فرمانده را دنبال می کند اما این ردیابی با خطا همراه است.

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 [۵۷] 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.

در سال ۵۷، شهدی و سیروس پور [۵۸]، کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدلی را ارائه می دهند که شفافیت بالایی داشته و قادر به حفظ پایداری در شرایط تاخیر ثابت و متغیر با زمان است. این هدف با

---

<sup>1</sup> Slama

بکارگیری اطلاعات در دسترس بر روی مدل سیستم و تاخیر زمانی با یک چارچوب کنترل پیش‌بین تطبیقی کار می‌کند.

## ۱-۴-۷ کنترل مبتنی بر پیش‌بین اسمیت

از شیوه‌های موثر جهت جبران زمان تاخیر در سیستم‌های کنترل می‌توان به پیش‌بین اسمیت اشاره کرد. در ابتدا باید اذعان داشت که پیش‌بین اسمیت به خودی خود یک روش کنترلی مستقل نیست و همواره به صورت ترکیبی با روش‌های کنترلی دیگر به کار گرفته می‌شود. نحوه عملکرد پیش‌بین اسمیت از دیدگاه علمی و روش پیشنهادی در فصل آینده ارائه خواهد شد. در این قسمت ما فقط به مرور پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌پردازیم.

در سال ۲۰۰۲، مونیر و بوک [۱۹]، برای پیاده‌سازی پیش‌بین اسمیت از فیلتر کالمن برای تخمین موقعیت فرمانبر و از متغیرهای موج برای انتقال اطلاعات در کانال ارتباطی بهره بردند. این سیستم‌ها دارای پایداری مقاوم مناسبی در برابر تاخیرهای بزرگ و متغییر با زمان هستند. اما این ساختار به اطلاعات دقیق از دینامیک سیستم نیاز دارد.

در سال ۲۰۰۲، گنجه‌فر و همکاران [۲۳]، روشی را با ترکیب پیش‌بینی‌کننده اسمیت و متغیرهای موج به منظور بالا بردن کارایی سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه با تاخیر زمانی بزرگ و متغییر 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 اسمیت تخمین زده می‌شوند.

در سال ۲۰۰۳، هانگ و لوویس [۵۹]، استفاده از شبکه‌های عصبی را برای کنترل‌کننده فرمانبر معرفی کردند تا اثرات دینامیک غیرخطی فرمانبر و محیط را از بین ببرند، بدین ترتیب دینامیک‌های خطی باقی‌مانده با ساختار پیش‌بین اسمیت به دقت قابل تخمین است. با این حال، اگرچه این پژوهش به جبران تاخیر می‌پردازد و این کار را برای دینامیک‌های غیرخطی فرمانبر و محیط اجرا می‌کند، در مطابقت دینامیک‌های نامعین و متغییر ناتوان است.

در سال ۲۰۰۶، اسمیت و هشرودی‌زاد [۶۰]، در پژوهش خود با تخمین برخط دینامیک‌های فرمانبر و محیط عملیاتی، نیروی تماسی محیط را در سمت فرمانده با استفاده از شبکه‌ای محلی منعکس می‌کنند. آزمایشات آنها بر روی یک میز متشکل از دو تجهیزات لامسه‌ای صفحه‌ای دو پانتوگرافی انجام شده است. نتایج با نیم ثانیه تاخیر بهبود بزرگی را در پایداری و عملکرد نشان می‌دهند.

در سال ۲۰۰۸، الفی و فرخی [۶۱]، با طراحی دو کنترل‌کننده محلی برای فرمانده و فرمانبر شرایط پایداری مقاوم را در سیستم عملیات از راه دور مورد بررسی قرار می‌دهند. در ساختار مورد ارائه آنها از یک پیش‌بین اسمیت برای جبران تاخیر مسیرهای رفت و برگشت استفاده شده است.

در سال ۲۰۱۳، قوشخانه‌ای و الفی [۶۲]، بر اساس اصول کنترل پیش‌بین به طراحی کنترل‌کننده فرمانده و طراحی کنترل‌کننده تناسبی مشتقی برای فرمانبر به کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور پرداخته‌اند. در قلب ساختار پیشنهادی از یک پیش‌بین اسمیت بهبودیافته استفاده شده است. این سیستم قادر است به مشخصه‌های مناسب عملکرد و پایداری در شرایط وجود عدم قطعیت دست یابد.

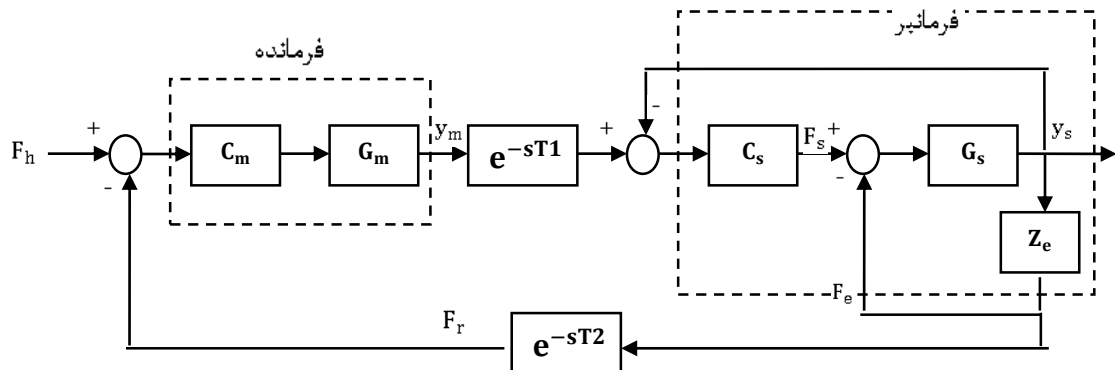
در سال ۲۰۱۵، گیو و همکاران [۶۳]، از متغیرهای موج بهبود یافته استفاده شده است و برای حفظ غیرفعال بودن سیستم از تکنیک منبع انرژی برای جلوگیری از تزریق انرژی استفاده شده است.

# فصل ۲

## کنترل پیشهادی

## ۱-۲ تعریف مسأله

همانگونه که در فصل ۱ بیان شد یک سیستم عملیات از راه دور شامل قسمتهای ۵ گانه مشتمل بر کاربر انسانی، سیستم فرمانده، خط انتقال، سیستم فرمانبر و محیط عملیاتی است که این قسمت‌ها با یکدیگر در حال تبادل سیگنال‌های نیرو، جابجایی و یا سرعت هستند. روال کلی همیشه به این صورت است که در ابتدای کار فرمانده سیگنالی را برای فرمانبر ارسال می‌کند یا اصطلاحاً دستور کار از سمت فرمانده ارسال می‌شود. تا به اینجا به سیستم مذکور سیستم عملیات از راه دور یک‌طرفه گفته می‌شود، اما اگر بازوی فرمانبر دارای حسگر نیرو باشد و نیرو را به سمت فرمانده برگرداند تا تصحیح خطای احتمالی صورت بگیرد، در این صورت سیستم عملیات به صورت دو طرفه کنترل شده است. آنچه در این پایان نامه اهمیت دارد کنترل دو طرفه سیستم عملیات از راه دور می‌باشد. شمای کلی سیستم عملیات از راه دور در شکل (۱-۲) نشان داده شده است [۶۱].



شکل (۱-۲) سیستم عملیات از راه دور دو طرفه

در این سیستم دو تأخیر در مسیر رفت و مسیر برگشت مشاهده می‌شود که ناشی از تأخیر موجود در شبکه انتقال سیگنال می‌باشد.  $G_m$  و  $G_s$  به ترتیب توابع تبدیل سیستم‌های فرمانده و فرمانبر می‌باشند که به صورت دو بازوی مصنوعی با معادلات زیر توصیف می‌شوند [۶۱]:

$$(M_m s^2 + B_m s) y_m = F_m + F_h \quad (1-2)$$

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

که در آن B ضریب اصطکاک ویسکوز و M جرم بازوها می‌باشد. y موقعیت 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. مقادیر پارامترها در سیستم به قرار زیر هستند [۶۱]:

جدول ۱: پارامترهای سیستم‌های فرمانده و فرمانبر

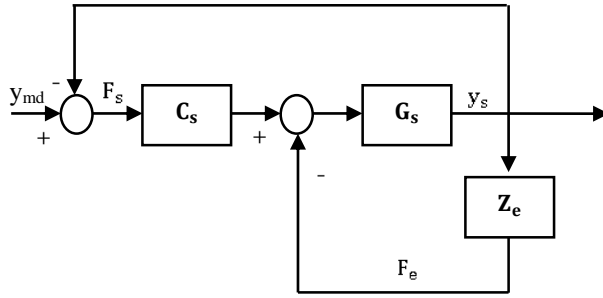
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$M_m$	0.4 kg	$M_s$	1 kg
$B_m$	3 N/m	$B_s$	0.2 N/m

شفافیت به عنوان یک معیار اساسی برای سیستم‌های عملیات از راه دور در حضور زمان تاخیر در کانال ارتباطی بیان می‌شود. اگر سیستم فرمانبر دقیقاً فرمان‌های سیستم فرمانده را انجام دهد 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 عملیات از راه دور نامیده می‌شود. به عبارت دیگر شرایط زیر تضمین می‌شوند.

۱- ردیابی موقعیت (سرعت): 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 کاربر تبعیت نماید.

بنابراین جهت طراحی کنترل‌کننده فرمانبر ابتدا بخش مربوطه را به صورت شکل زیر جدا می‌کنیم:



شکل (۲-۲) سیستم فرمانبر

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

$$C_s(s) = k_p + k_d s \quad (۳-۲)$$

تابع تبدیل موقعیت بصورت زیر است:

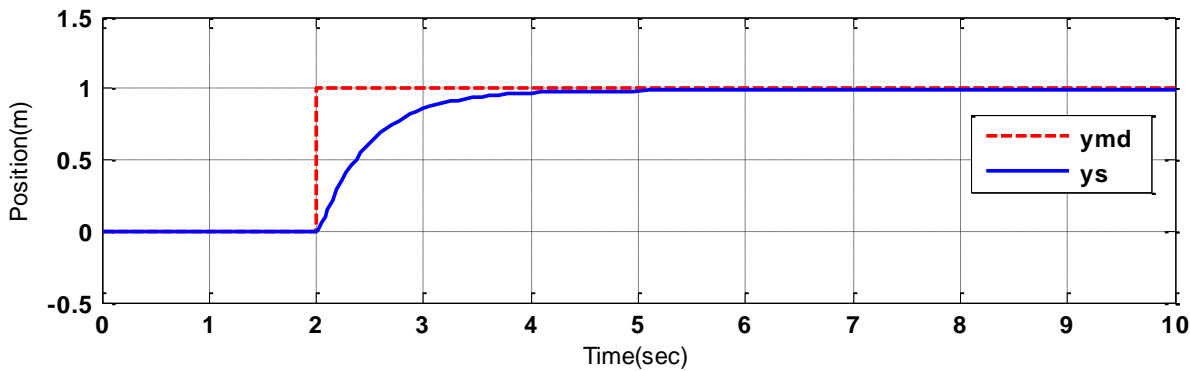
$$\frac{y_s}{y_{md}} = \frac{C_s G_s}{1 + C_s G_s + G_s Z_e} \quad (۴-۲)$$

که در آن  $z_e = 1 + 0.1s$

حال باید ضرائب کنترل کننده فرمانبر را به گونه‌ای انتخاب کنیم که خروجی فرمانبر  $y_s$  خروجی تاخیر یافته فرمانده  $(y_{md})$  را دنبال کند. باید دقت شود که در انتخاب ضرائب کنترل کننده تناسبی مشتقی مقادیری را انتخاب کنیم که خروجی سیستم فرمانبر ضمن پایداری، بدون فراجهش یا دارای فراجهش کم و دارای پاسخ سریع باشد. بنابراین مقادیر زیر انتخاب می‌شوند:

$$k_p = 70 \text{ و } k_d = 34.8$$

پاسخ پله سیستم فرمانبر با اعمال دستور پله‌ای توسط فرمانده در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) طراحی کنترل کننده فرمانبر برای تبعیت از موقعیت فرمانده

## ۲-۲ ساده سازی سیستم عملیات از راه دور جهت طراحی

### کنترل کننده فرمانده

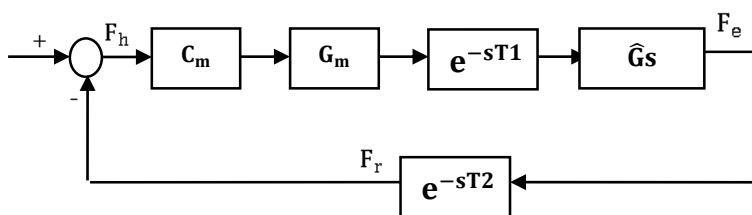
در بخش قبلی، روند کلی طراحی کنترل کننده فرمانبر آورده شد. در این بخش سعی داریم سیستم عملیات از راه دور را به گونه ای ساده نماییم که بتوان کنترل کننده فرمانده را بر اساس آن طراحی نمود. دلیل این ساده سازی از آن جهت است که کنترل کننده فرمانده نقش ردیابی نیرو و پایداری حلقه بسته را بر عهده دارد [۶۱] و مناسب است که سیستم بر حسب سیگنال های نیرو باشد، همچنین همانطور که خواهیم دید در قلب ساختار پیشنهادی مدل مورد استفاده در پیش بین اسمیت باید بر حسب نیرو باشد. لذا در اینجا سیستم عملیات از راه دور را به گونه ای ساده می کنیم که ردیابی نیرو نیز صورت پذیرد.

با توجه به شکل (۱-۲) تابع تبدیل زیر را تعریف می کنیم:

$$\hat{G}_s(s) = \frac{Z_e(s)C_s(s)G_s(s)}{1 + Z_e(s)G_s(s) + C_s(s)G_s(s)} \quad (۵-۲)$$

که این تابع تبدیل در واقع تابع تبدیلی برای معادل سازی سیستم فرمانبر است. در این صورت طرح کنترلی شکل (۱-۲) به شکل (۲-۴) ساده خواهد شد :

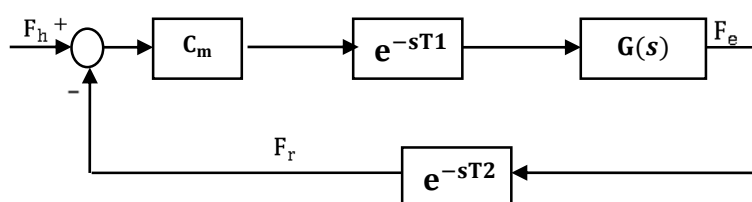




شکل (۴-۲) طرح کنترلی ساده شده شکل (۱-۲)

با توجه به شکل (۴-۲) می‌توان سیستم را با تعریف متغیر زیر به حالت کلی‌تر شکل ۵-۲ در آورد:

$$G(s) = \hat{G}_s(s) \cdot G_m(s) \quad (۶-۲)$$



شکل (۵-۲) طرح کنترلی ساده تر شده برای سیستم‌های عملیات از راه دور

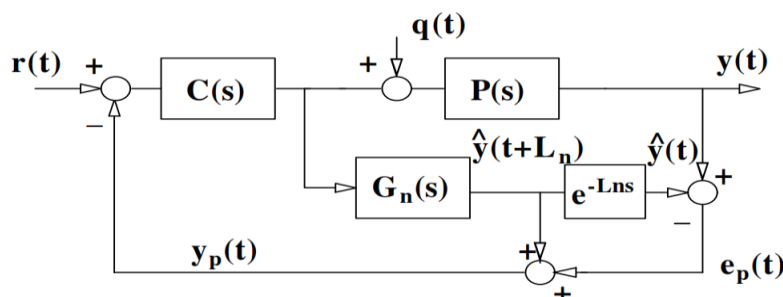
بنابراین تابع تبدیل سیستم حلقه بسته کلی به صورت زیر خواهد بود :

$$M(s) = \frac{F_e}{F_h} = \frac{C_m(s)G(s) \cdot e^{-sT1}}{1 + C_m(s)G(s) \cdot e^{-s(T1+T2)}} \quad (۷-۲)$$

از رابطه (۷-۲) مشاهده می‌شود که تاخیر در مخرج تابع تبدیل حلقه بسته نیز وجود دارد. این مسئله می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد کل سیستم را تضعیف کرده یا حتی تأخیر کوچکی سبب ناپایداری شود. لذا نمی‌توان فقط با استفاده از روش‌های کنترل کلاسیک سیستم را کنترل نمود. بنابراین صورت مسئله جدید، حذف آثار مخرب تاخیر زمانی به شیوه‌ای مناسب است. لازم به ذکر است که از این به بعد آنچه به عنوان تابع تبدیل در طراحی کنترل کننده فرمانده مورد استفاده قرار می‌گیرد  $G(s)$  است.

## ۲-۳ پیش‌بین اسمیت [۶۴]

پیش‌بین اسمیت همواره به عنوان ابزاری جهت کار با سیستم‌های تأخیردار یا سیستم‌های دارای زمان مرده<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. ساختار پیش‌بین اسمیت در شکل (۶-۲) نشان داده شده است و به دو بخش قابل تقسیم است: کنترل‌کننده اصلی  $C(s)$  و ساختار پیش‌بینی کننده. کنترل‌کننده  $C(s)$  عموماً یک کنترل‌کننده PID است اما می‌تواند یک کنترل‌کننده مرتبه بالاتر نیز باشد. پیش‌بینی کننده متشکل است از مدل دستگاه بدون زمان مرده ( $G_n(s)$ )، که به آن مدل سریع گفته می‌شود، و مدلی از زمان مرده بصورت  $e^{-Lns}$ . بنابراین مدل کامل فرایند عبارت است از  $P_n(s) = G_n(s)e^{-Lns}$ .



شکل (۶-۲) ساختار کلی پیش‌بین اسمیت

از مدل سریع  $G_n(s)$  برای محاسبه پیش‌بینی حلقه باز استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۶-۲) دیده می‌شود، برای خطاهای مدل‌سازی، تفاوت بین خروجی فرایند و خروجی مدل به همراه زمان مرده به پیش‌بینی حلقه باز افزوده می‌شود. اگر هیچ خطای مدل‌سازی یا اغتشاشی وجود نداشته باشد، خطای بین خروجی فعلی فرایند و خروجی مدل صفر است و سیگنال خروجی پیش‌بینی کننده  $y_p(t)$  به عنوان خروجی بدون زمان مرده برای دستگاه محسوب می‌شود. تحت این شرایط، حداقل در حالت نامی که دستگاه تأخیر ندارد،  $C(s)$  قابل تنظیم است.

<sup>1</sup> Dead-time

## ۲-۳-۱ ویژگی‌های حلقه بسته پیش‌بین اسمیت

ساختار پیش‌بین اسمیت برای حالت نامی  $(P(s) = P_n(s), G(s) = G_n(s), L = L_n)$  دارای سه ویژگی به صورت زیر است:

### ویژگی ۱: جبران زمان مرده

زمان مرده از معادله مشخصه حلقه بسته حذف می‌شود. از شکل (۶-۲) به آسانی می‌توان مشاهده نمود که اگر  $q(t) = 0$  باشد و  $G(s)e^{-Ls} = G_n(s)e^{-L_n(s)}$ ، سیگنال خطای  $e_p(t)$  صفر خواهد بود. تحت این شرط  $y_p(t) = \hat{y}(t + L_n)$  و معادله مشخصه برابر است با

$$1 + C(s)G_n(s) = 0 \quad (۸-۲)$$

### ویژگی ۲: پیش‌بینی

سیگنال فیدبک  $y_p(t)$  که در شکل (۶-۲) توسط پیش‌بین ایجاد می‌شود خروجی سیستم را برای تغییرات در نقطه تنظیم پیش‌بینی می‌کند، هر چند که برای اغتشاشات اینگونه نیست. ابتدا فرض کنید  $q = 0$  است و مرجع  $r$  است، آنگاه:

$$Y_p(s) = G_n(s)U(s) = e^{L_n(s)}P_n(s)U(s) = e^{L_n(s)}Y(s) \quad (۹-۲)$$

$$y_p(t) = \hat{y}(t + L_n) \quad (۱۰-۲)$$

توجه کنید که هر گاه  $r(t)$  و  $q(t)$  صفر باشند داریم:

$$\begin{aligned} Y_p(s) &= P(s)U(s) + P(s)Q(s) + G_n(s)U(s) - P_n(s)U(s) \\ &= G_n(s)U(s) + P_n(s)Q(s) \end{aligned} \quad (۱۱-۲)$$

با افزودن و کم کردن  $G_n(s)Q(s)$  خواهیم داشت:

$$Y_p(s) = G_n(s)[U(s) + Q(s)] - G_n(s)Q(s) + P_n(s)Q(s) \quad (۱۲-۲)$$

$$\begin{aligned} Y_p(s) &= e^{L_n(s)}Y(s) - P_n(s)e^{L_n(s)}Q(s) + P_n(s)Q(s) \\ &= e^{L_n(s)}Y(s) + P_n(s)[Q(s) - e^{L_n(s)}Q(s)] \end{aligned} \quad (۱۳-۲)$$

که با معادله زیر برابر است:

$$y_p(t) = \hat{y}(t + L_n) + P_n(s)[q(t) - q(t + L_n)] \quad (۱۴-۲)$$

که در آن  $P_n(s)[q(t) - q(t + L_n)]$  بیانگر تبدیل لاپلاس معکوس عبارت زیر است:

$$P_n(s)[Q(s) - Q(s)e^{L_n(s)}] \quad (۱۵-۲)$$

### ویژگی ۳: جبران ایده‌آل دینامیک

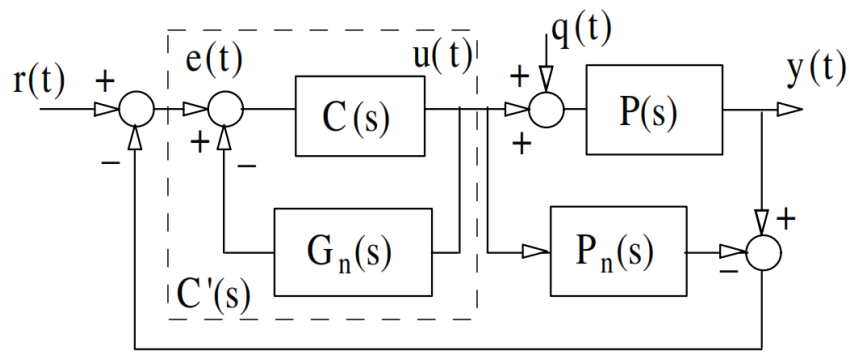
ساختار پیش‌بین اسمیت به طور غیر صریح دستگاه را به دو بخش تقسیم می‌کند:  $G_n(s)$ ، که در بعضی حالات می‌تواند معکوس‌پذیر باشد و  $e^{-L_n(s)}$ ، که بدلیل زمان مرده معکوس‌ناپذیر است. با استفاده از این ایده و با فرض اعمال کنترل‌کننده «ایده‌آل»، طبق شکل (۷-۲) خواهیم داشت:

$$C'(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)} = (G_n(s))^{-1} \quad (۱۶-۲)$$

با فرض  $P(s) = P_n(s)$ ، خروجی «ایده‌آل» زیر بدست می‌آید

$$\begin{aligned} y(t) &= r(t - L_n) + P_n(s)[q(t) - q(t - L_n)] \\ &= r(t - L_n) + [P_n(s) - e^{-L_n s}P_n(s)]q(t) \end{aligned} \quad (۱۷-۲)$$

توجه کنید که تابع تبدیل «ایده‌آل» بین مرجع و خروجی یک تأخیر ساده است. اگرچه استفاده از این کنترل‌کننده ایده‌آل عملی نیست، نشان‌دهنده آن است که با پیش‌بین اسمیت چه کاری می‌توان انجام داد و کران بالایی از عملکرد را به دست می‌دهد.



شکل (۷-۲) ساختار معادل کنترلی برای پیش‌بین اسمیت

## ۲-۳-۲ مزایا و معایب پیش‌بین اسمیت

در این قسمت موضوعات زیر را در مورد پیش‌بین اسمیت مورد مطالعه قرار می‌دهیم:

- ردیابی مرجع و پاسخ‌های حذف اغتشاش
- مقاوم بودن
- حالت فرایندهای ناپایدار کلی
- حالت خاص فرایندهای انتگرالی

## ۱-۲-۳-۲ ردیابی مرجع و حذف اغتشاش

برای درک اینکه چگونه پیش‌بین اسمیت در نقطه تنظیم و حذف اغتشاش عمل می‌کند، توابع تبدیل حلقه بسته برای ساختار شکل (۶-۲) در حالت نامی ( $P(s) = P_n(s)$ ) به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (۱۸-۲)$$

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{Q(s)} &= P_n(s) \left[ 1 - \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \right] \\ &= P_n(s) \left[ \frac{1 + C(s)(G_n(s) - P_n(s))}{1 + C(s)G_n(s)} \right] \end{aligned} \quad (19-2)$$

نکات زیر حائز اهمیت هستند:

- اگر  $C(s)$  به منظور حذف اغتشاش طراحی شده باشد، دسترسی به پاسخ نقطه تنظیم مطلوب امکان پذیر نیست. این یک مشکل عمومی در تمام ساختارهای با یک درجه آزادی است و فقط عیب پیش بین اسمیت نیست. توجه داریم که چون  $C(s)$  تنها درجه آزادی است، نمی توان  $\frac{Y(s)}{R(s)}$  و  $\frac{Y(s)}{Q(s)}$  را به دلخواه تعریف کرد.
  - قطب های  $P(s)$  بجز در حالتی که قطب در  $s = 0$  باشد قابل حذف از تابع تبدیل حذف اغتشاش نیستند. معادله (2-17) بوضوح این موضوع را نشان می دهد، حتی در حالت ایده آل  $(C(s) \rightarrow \infty)$ ،  $P_n(s)$  در عبارت  $y(t)$  ظاهر می شود، اما اگر  $P_n(s)$  قطبی در  $s = 0$  داشته باشد،  $P_n(s)[1 - e^{-Lns}]$  ظاهر نمی شود زیرا  $1 - e^{-Lns}$  در  $s = 0$  صفر است، بنابراین ریشه صورت ریشه مخرج را حذف می کند.
- توجه داریم که در حالت نامی  $P_n(s)$  عاملی در معادله (2-18) است و حتی اگر  $C(s)$  قطب-های دستگاه را حذف کند، مخرج آن در مخرج  $\frac{Y(s)}{Q(s)}$  ظاهر می شود.

## ۲-۲-۳-۲ مقاوم بودن

در واقعیت خطاهای مدل سازی وجود دارد، بنابراین  $P_n(s) \neq P(s)$ . مجموعه ای از دستگاه ها را به صورت زیر در نظر بگیرید.

$$P(s) = P_n(s)[1 + \delta P(s)] = P_n(s) + \Delta P(s) \quad (20-2)$$

$$|\delta P(j\omega)| \leq \overline{\delta P}(\omega) \quad \forall \omega > 0 \quad (21-2)$$

معادله مشخصه به صورت زیر خواهد بود:

$$1 + C(s)[G_n(s) + P(s) - P_n(s)] = 1 + C(s)[G_n(s) + \Delta P(s)] \quad (22-2)$$

اگر  $C(s)$ ،  $G_n(s)$  را پایدار سازد، شرط مقاوم بودن حلقه بسته برای پیش‌بین اسمیت در تمام فرکانس‌ها و برای تمام دستگاه‌ها این است که فاصله بین  $C(j\omega)G_n(j\omega)$  و نقطه  $-1$  در دیاگرام نایکوئیست  $|1 + C(j\omega)G_n(j\omega)|$  بزرگتر از  $|C(j\omega)\Delta P(j\omega)|$  باشد. خواهیم داشت:

$$\overline{\delta P}(\omega) < dP(\omega) = \frac{|1 + C(j\omega)G_n(j\omega)|}{|C(j\omega)G_n(j\omega)|} \quad \forall \omega > 0 \quad (23-2)$$

تابع  $dP(\omega)$  کران بالای خطای ضربی مدلسازی دستگاه جهت تضمین پایداری بوده و می‌تواند به عنوان ابزاری برای مقاوم بودن کنترل‌کننده باشد. باید به این نکته توجه داشت که هر گاه تابع تبدیل حلقه بسته  $\frac{Y(s)}{R(s)}$  تعریف شود،  $dP(\omega)$  نیز ثابت است. بنابراین اگر طراحی کنترل‌کننده به منظور دستیابی به عملکرد عالی باشد، مقاوم بودن ضعیف خواهد بود. پس اگر  $C(s)$  به طور مناسب انتخاب نشود، نامعینی‌های کوچک هم می‌توانند منجر به ناپایداری سیستم شوند.

واضح است که قطب‌های حلقه بسته  $\frac{Y(s)}{R(s)}$  نمی‌توانند دلخواه باشند و باید از شرط مقاوم بودن برای اعمال کرانی بالا بر عملکرد حلقه بسته استفاده کرد. باید توجه داشت که سه نوع نامعینی در سیستم‌ها متصور است که عبارتند از: دینامیک‌های مدل نشده، خطاهای تخمین بهره و خطاهای تخمین زمان مرده.

## ۳-۲-۳-۲ فرایندهای کلی ناپایدار

همانطور که قبلاً گفته شد، قطب‌های  $P(s)$  نمی‌تواند از تابع تبدیل حذف اغتشاش، خارج شود بجز در حالتی که قطب در  $s = 0$  باشد. این بدان معنی است که هر گاه  $Re(s) > 0$  باشد نمی‌توان از پیش‌بین

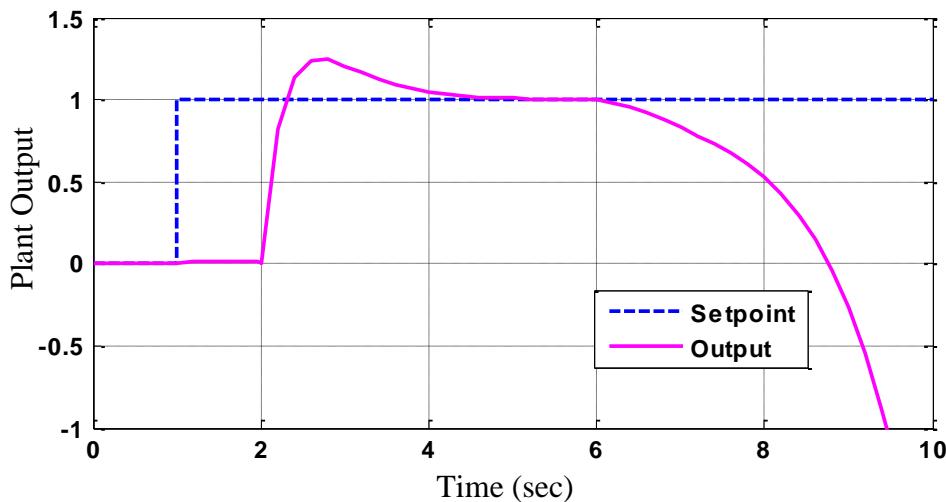
اسمیت برای حذف اغتشاش استفاده کرد، اما حتی در حالت ناپایدار در صورتی که  $C(s)$  بتواند  $G_n(s)$  را پایدار سازد، ردیابی مرجع برقرار است. با این حال، تابع تبدیل  $\frac{Y(s)}{Q(s)}$  همیشه دارای قطب‌هایی ناپایدار است. با این حال این مشکل همانطور که بعداً خواهیم دید با لحاظ کردن تغییراتی در ساختار پیش‌بین اسمیت مرتفع خواهد شد. به عنوان نمونه فرایندی ناپایدار را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$P(s) = \frac{e^{-s}}{s-1}, P_n(s) = \frac{e^{-s}}{s-1}$$

کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

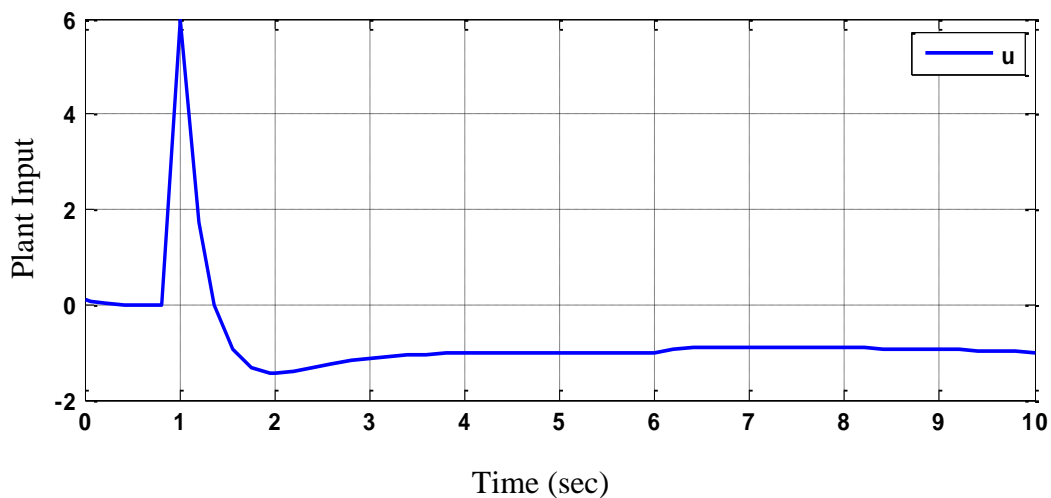
$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

که در آن  $K_c = 6$  و  $T_i = 1$  در نظر گرفته شده است. شکل (۸-۲) پاسخ سیستم را به ورودی مرجع نشان می‌دهد. در لحظه  $t = 5$  اغتشاشی با دامنه  $-0.1$ ، سیستم را به سمت ناپایداری می‌برد در حالی که ورودی کنترل طبق شکل ۸-۲، از  $t = 7$  به بعد ثابت می‌ماند.



شکل (۸-۲) اعمال پیش‌بین اسمیت با یک درجه آزادی به دستگاه ناپایدار





شکل (۲-۹) ورودی کنترل برای دستگاه ناپایدار

### ۲-۳-۲-۴ فرایندهای انتگرال گیر

فرایندهای انتگرال گیر حالت خاصی از دستگاه‌های ناپایدار هستند. در این حالت، اگر کنترل کننده به درستی اعمال شود سیستم حلقه بسته پایدار خواهد بود. فرض کنید  $C(s)$  پایدارکننده  $G_n(s)$  است و داری بهره واحد حلقه بسته است؛ بنابراین:

$$\frac{C(s)G_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} = \frac{N_e(s)}{D_e(s)} \quad (2-24)$$

که در آن  $D_e(s)$  تمام ریشه‌هایش دارای بخش حقیقی منفی هستند و  $N_e(0) = D_e(0)$ . آنگاه تابع تبدیل خروجی به اغتشاش برابر خواهد بود با:

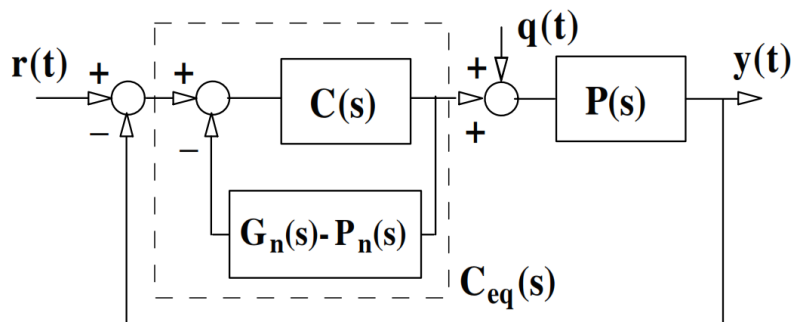
$$\frac{Y(s)}{Q(s)} = P_n(s) \left[ 1 - \frac{N_e(s)}{D_e(s)} e^{-L_n s} \right] \quad (2-25)$$

که دارای ریشه‌ای در  $s = 0$  در صورت و مخرج است. توجه داریم که  $P_n(s)$  دارای قطبی در  $s = 0$  است و

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left[ 1 - \frac{N_e(s)}{D_e(s)} e^{-L_n s} \right] = 0 \quad (26-2)$$

بدین ترتیب قطب موجود در  $s = 0$  حذف و از ناپایداری حلقه بسته جلوگیری می‌شود.

حال فرض کنید اغتشاشی پله‌ای داشته باشیم و  $P_n(s) = \frac{P_e(s)}{s}$ ، که در آن پایدار است و  $P_n(s) = G_e(s) \frac{e^{-L_n s}}{s}$  برای حذف اغتشاش، بهره  $\frac{Y(s)}{Q(s)}$  باید صفر باشد. این بهره به طور مستقیم قابل محاسبه نیست زیرا با حذف صفر و قطب تحلیل سخت است. بنابراین، تحلیل با استفاده از ساختار شکل (۱۰-۲) صورت می‌پذیرد. بر اساس اصل مدل داخلی برای حذف پله اغتشاشی، کنترل‌کننده سری معادل،  $G_{eq}(s)$ ، در شکل (۱۰-۲) باید عاملی انتگرالی داشته باشد (قطبی در  $s = 0$ ) و سیستم حلقه بسته باید پایدار باشد.



شکل (۱۰-۲) ساختار معادل پیش‌بین اسمیت

در این حالت  $G_{eq}(s)$  برابر است با:

$$G_{eq}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)(G_n(s) - P_n(s))} \quad (27-2)$$

یعنی کنترل‌کننده اصلی دارای بلوک فیدبکی به صورت  $H(s) = G_n(s) - P_n(s)$  است. با محاسبه بهره استاتیک برای پیش‌بین اسمیت خواهیم داشت:

$$\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = \lim_{s \rightarrow 0} G_e(s) \left[ \frac{1 - e^{-Lns}}{s} \right] = L_n G_e(0) \neq 0 \quad (28-2)$$

یعنی حتی اگر  $C(s)$  عاملی انتگرالی داشته باشد، کنترل کننده معادل  $C_{eq}(s)$  به طور مطلوب دارای قطبی در  $s = 0$  نخواهد بود، در نتیجه اغتشاشات پله‌ای حذف نخواهد شد. توجه داریم که  $C(s)$  دارای عاملی انتگرالی است و

$$\lim_{s \rightarrow 0} C(s) = \frac{K_c}{s} \quad (29-2)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} C_{eq}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{\frac{K_c}{s}}{1 + H(0) \frac{K_c}{s}} \right] = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{K_c}{s + K_c H(0)} \right] = \frac{1}{H(0)} \quad (30-2)$$

یعنی در حالت مانا  $C_{eq}(s)$  به صورت یک کنترل کننده تناسبی عمل می‌کند. همچنین، بهره  $C_{eq}(s)$  به مقدار  $L_n$  بستگی دارد و مقدار حالت مانا برای خروجی تابعی از زمان مرده خواهد بود.

به مثالی به صورت زیر توجه داریم:

$$P(s) = \frac{2e^{-5s}}{s(1 + 0.1s)},$$

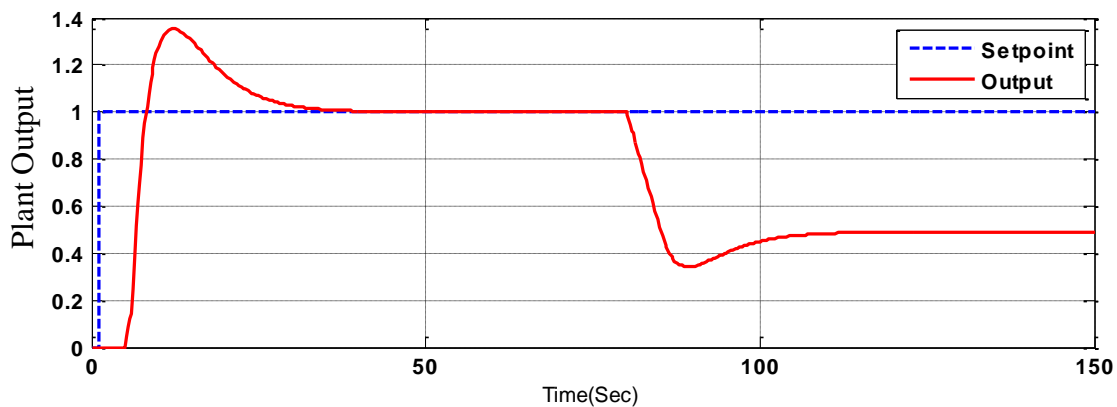
$$P_n(s) = \frac{2e^{-5.1s}}{s}$$

$$G_n(s) = \frac{2}{s}$$

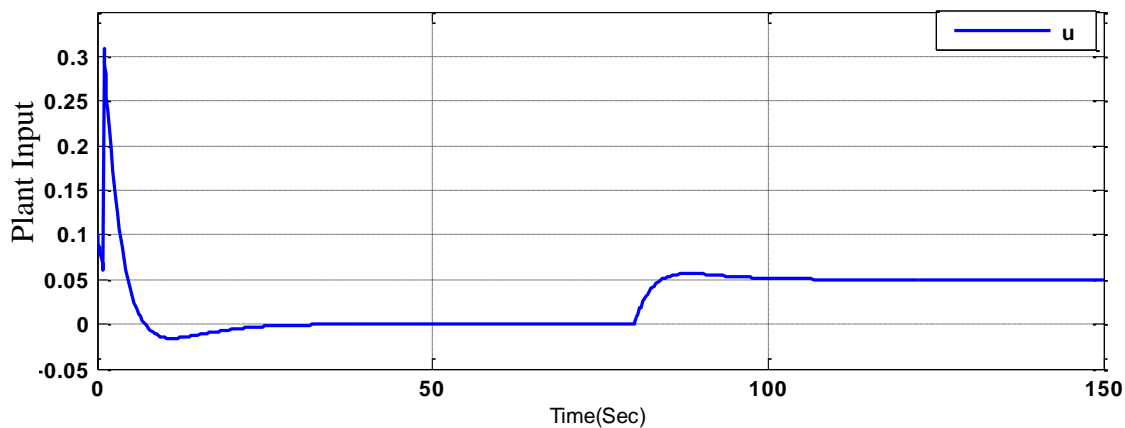
$$C(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) = 0.25 \left( 1 + \frac{1}{8s} \right)$$

$P(s)$  فرایندی انتگرال گیر است و در اندازه‌گیری زمان تأخیر هم 0.1 خطا وجود دارد. در لحظه  $t = 75$  نیز اغتشاشی با دامنه 0.05- اعمال می‌شود. شکل (2-11) و (2-12) نتیجه شبیه‌سازی این سیستم

را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود قابلیت حذف اغتشاش وجود ندارد. همچنین با دقت در پاسخ مشاهده می‌شود که سیستم بسیار کند عمل می‌کند. در واقع پیش‌بین اسمیت معرفی شده تا اینجا یک پیش‌بین اسمیت ساده با یک درجه آزادی است. در بخش‌های بعدی با افزایش درجات آزادی سعی در دستیابی به مشخصه‌های ایده‌آل‌تری از دیدگاه عملکرد داریم. اما پیش از بررسی این حالات به توانایی همین پیش‌بین در کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور می‌پردازیم.



شکل (۱۱-۲) پاسخ حلقه بسته سیستم انتگرال‌گیر با پیش‌بین اسمیت ساده



شکل (۱۲-۲) ورودی کنترل برای سیستم انتگرال‌گیر با پیش‌بین اسمیت ساده

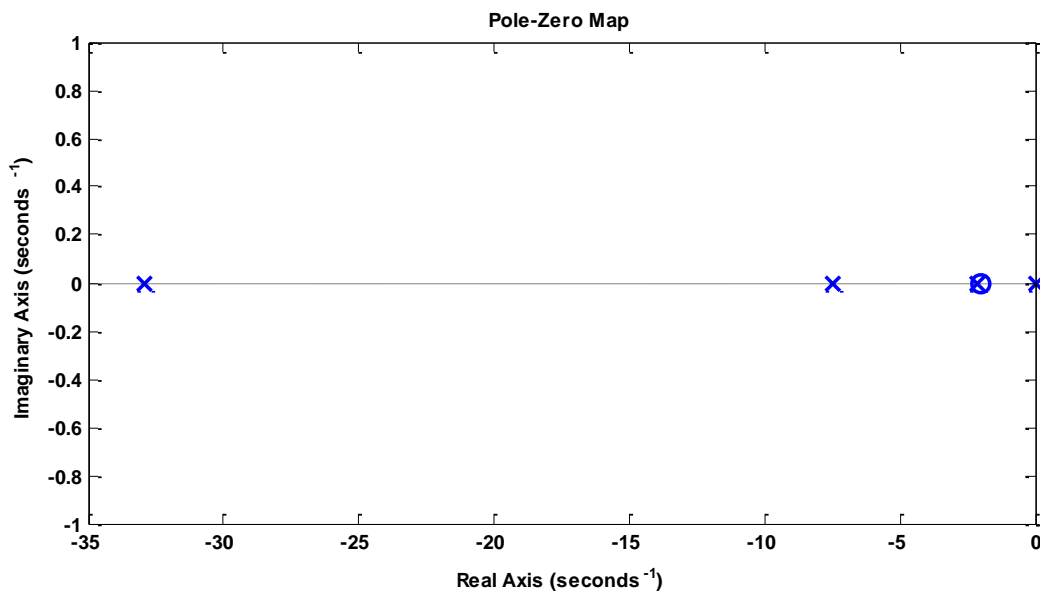
## ۴-۲ عملیات از راه دور با پیش‌بین اسمیت ساده

حال ایده مطرح شده درباره پیش‌بین اسمیت ساده را به سیستم‌های عملیات از راه دور اعمال می‌کنیم. در بخش ۱-۲ روند انجام کار در طراحی زیرسیستم فرمانبر آورده شد. طبق مطالب گفته شده با طراحی کنترل‌کننده فرمانده به دنبال دستیابی به ردیابی نیرو در محیط عملیاتی و پایداری مقاوم با شرایط تاخیر در مسیرهای رفت و برگشت هستیم. طبق رابطه (۶-۲)،  $G$  (تابع تبدیل نسبت نیروی اعمالی در محیط عملیاتی به نیروی کاربر انسانی) برابر است با:

$$G(s) = \frac{Z_e(s)C_s(s)G_s(s)G_m(s)}{1 + Z_e(s)G_s(s) + C_s(s)G_s(s)}$$

$$= \frac{70 + 34.8s}{s(0.4s^3 + 17.04s^2 + 133.7s + 213)} \quad (۳۱-۲)$$

نمودار قطب-صفر این سیستم بصورت زیر است:



شکل (۳۱-۲) نمودار قطب-صفر برای تابع تبدیل نیرو

قطب‌های سیستم حاضر در  $s = -۳۲,۹$  و  $-۷,۵$  و  $-۲,۱۶$  و  $s = ۰$  قرار دارد و تنها صفر سیستم در  $s = -۲,۱۶$  قرار دارد. طبق مطالب قسمت پیش واضح است و که تابع تبدیل نیرو یک فرایند انتگرال‌گیر است. این

سیستم قابل ساده‌سازی است. همانطور که در شکل (۲-۱۳) مشاهده می‌شود در مقادیر ۲,۰۱- و ۲,۱۶- صفر و قطبی قرار دارد که می‌توان اثر آنها را حذفی در نظر گرفت. همچنین دو قطب دیگر سیستم در ۷,۵- و ۳۲,۹- قابل صرف‌نظر در دستگاه نامی هستند. بنابراین دستگاه نامی به صورت زیر مد نظر قرار می‌گیرد.

$$P_n(s) = \frac{k_v e^{-T_n s}}{s} \quad (2-32)$$

در فرایندهای انتگرال‌گیر، دستگاه نامی به صورت (۲-۳۲)، جزء ساده‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌ها است [۶۵]. کنترل‌کننده مورد استفاده برای فرمانده یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی است. عمومی‌ترین هدف طراحی در کنترل فرایند دستیابی به سیستم حلقه بسته میرای بحرانی با سریعترین پاسخ است. بنابراین نیاز داریم برای طراحی کنترل‌کننده یک جفت قطب در  $s = -1/T_0$  داشته باشیم. بدین منظور باید کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی به صورت زیر باشد [۶۶]:

$$T_i = 2T_0 + T_n, \quad k_c = \frac{2T_0 + T_n}{k_v(T_0 + T_n)^2} \quad (2-33)$$

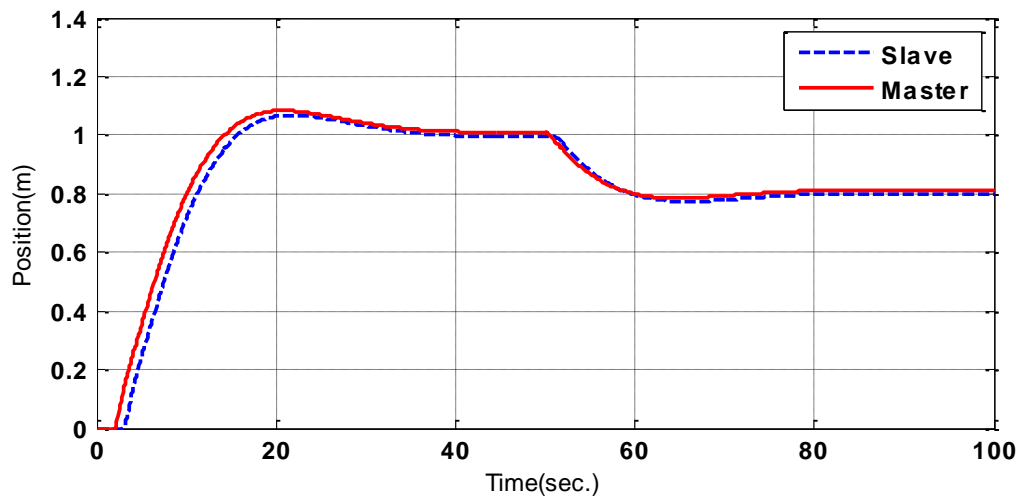
برای شبیه‌سازی سیستم تاخیر در مسیر رفت و برگشت را به طور مساوی 0.5 ثانیه در نظر می‌گیریم. بنابراین تاخیر مدلسازی یا همان  $T_n$  برابر با 1 ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در این حالت فرض شده است خطای مدلسازی در زمان تاخیر وجود ندارد. اثر خطای مدلسازی در ادامه آورده خواهد شد. طراحی کنترل‌کننده را برای داشتن زوج قطب در  $s = -2$  ادامه می‌دهیم. بنابراین خواهیم داشت:

$$T_i = 2, \quad k_c = 0.88$$

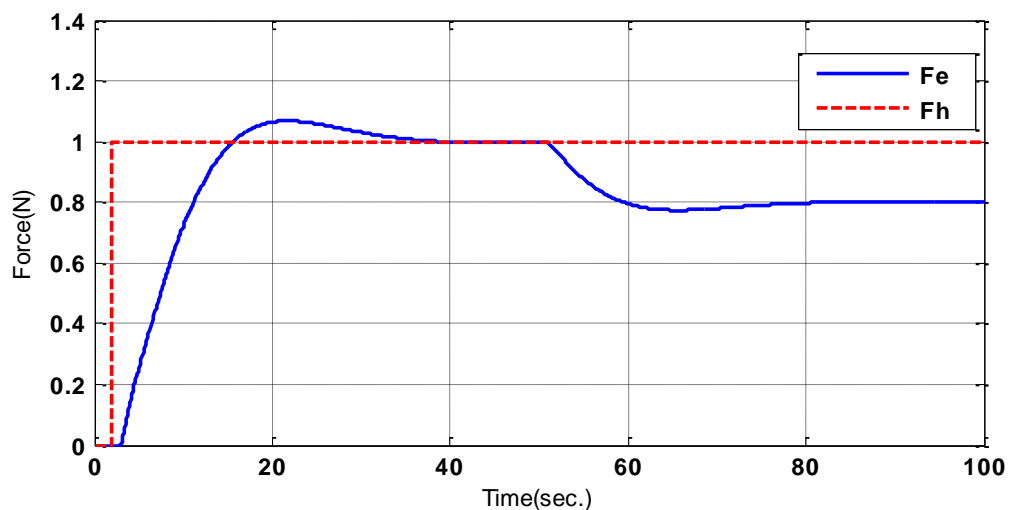
که در آن  $k_p = 1$  لحاظ شده است.

پاسخ‌های موقعیت فرمانده-فرمانبر و همچنین نیرو در شکل‌های (۲-۱۴) و (۲-۱۵) آورده شده است. با دقت در این اشکال متوجه می‌شویم که اگر در لحظه  $t=50$  اغتشاشی با دامنه 0.1- به سیستم وارد

شود، قابلیت حذف اغتشاش وجود ندارد که با بحث صورت گرفته در بخش ۲-۲-۲-۴ مطابقت دارد. اما قابلیت ردیابی نیروی کابر در محیط عملیاتی و همچنین ردیابی موقعیت فرمانده توسط فرمانبر برقرار است. در پاسخها وجود فراجهدش کاربرد سیستمهای عملیات از راه دور را محدود می کند.



شکل (۲-۱۴) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت ساده

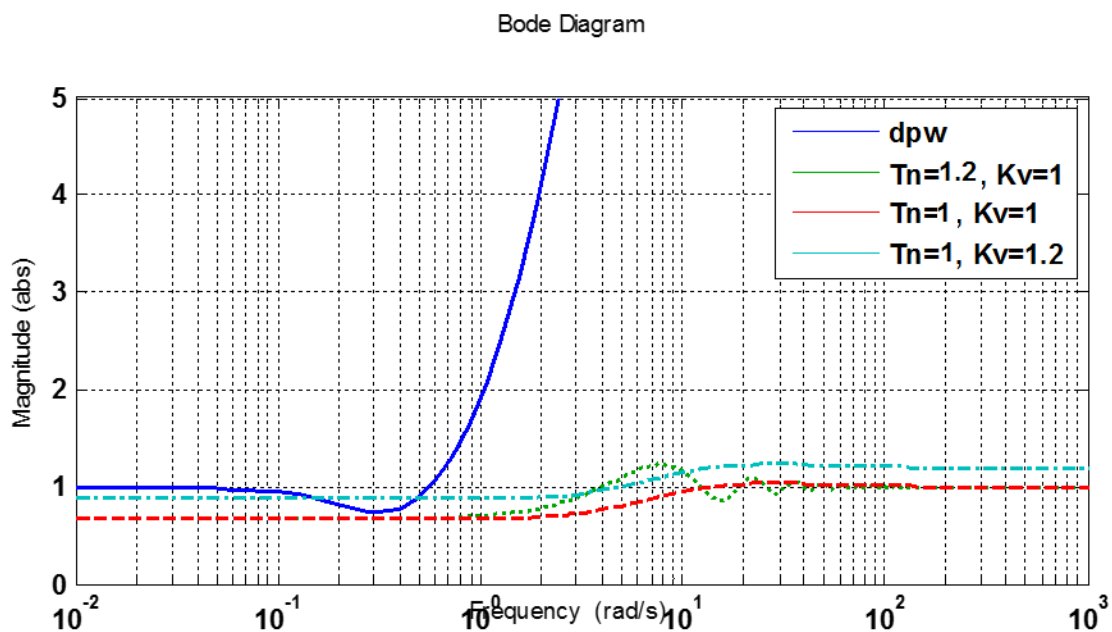


شکل (۲-۱۵) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش بین اسمیت ساده

همانطور که در بخش ۲-۲ بحث کردیم یکی از ویژگی‌های پیش‌بین اسمیت به طور کلی مقاوم بودن می‌باشد. حال باید دید آیا ساختار کنونی سیستم قادر به برآورده کردن شرط پایداری مقاوم می‌باشد یا خیر. بار دیگر شرط پایداری مقاوم را جهت یادآوری متذکر می‌شویم:

$$\overline{\delta P}(\omega) < dP(\omega) = \frac{|1 + C(j\omega)G_n(j\omega)|}{|C(j\omega)G_n(j\omega)|} \quad \forall \omega > 0 \quad (۳۴-۲)$$

خطای مدل‌سازی را به صورت نامعینی ضربی در زمان تأخیر و بهره تابع تبدیل مدل در نظر می‌گیریم. برای شبیه‌سازی نمودار دامنه بر حسب فرکانس را برای  $dP(\omega)$  و چند حالت از نامعینی رسم می‌کنیم. در حالت اول نامعینی در زمان تأخیر در نظر گرفته می‌شود. در حالت دوم سیستم به صورت نامی است و در حالت سوم نامعینی در بهره تابع تبدیل مدل در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی به صورت زیر است:



شکل (۲-۱۶) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش‌بین اسمیت ساده

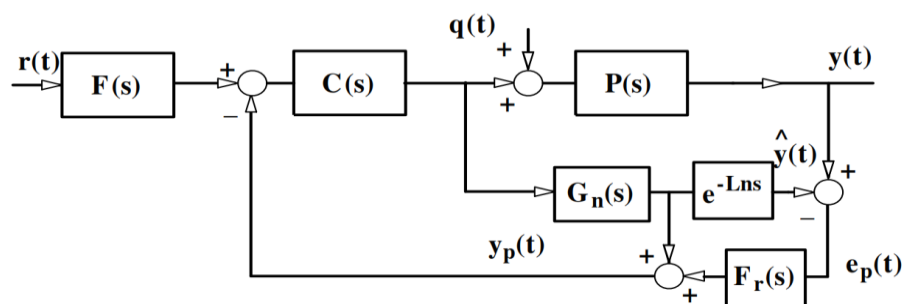
همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در حالتی که بهره تابع تبدیل مدل ثابت است شرط پایداری مقاوم برآورده می‌شود اما با خطایی به میزان 0.2 این شرط دیگر برقرار نیست. از دلایل عمده این عدم



برقراری، طراحی با یک درجه آزادی یا همان کنترل کننده فرمانده است. همواره بین عملکرد و مقاوم بودن تناقض‌هایی برقرار است و برای مصالحه بیشتر می‌بایست درجات آزادی سیستم را افزایش داد. خواهیم دید که این افزایش بر کیفیت عملکرد نیز تأثیرگذار است.

## ۵-۲ پیش‌بین اسمیت فیلترشده<sup>۱</sup>

در قسمت‌های قبل ساختار کلی پیش‌بین اسمیت و اعمال آن به سیستم‌های عملیات از راه دور را ارائه کردیم. بوضوح مشاهده شد که قابلیت جداسازی پاسخ نقطه تنظیم و پاسخ حذف اغتشاش و همچنین مقاوم بودن در برابر نامعینی‌ها برای تمام حالات وجود ندارد. پیش‌بین اسمیت ساده بیشتر برای اعمال به سیستم‌های پایدار تأخیری مناسب است و برای دستیابی به تفکیک کامل دو پاسخ و مقاوم بودن بیشتر نیاز به اعمال دستکاری‌هایی در ساختار اسمیت پیشنهادی هستیم. در متون زیادی مبحث سیستم‌های تأخیردار یا به عبارتی سیستم‌های دارای زمان مرده مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان برای سیستم‌های انتگرال‌گیر به [۶۶] و سیستم‌های پایدار به [۶۷] اشاره کرد. در اینجا به ارائه روشی یکپارچه برای سیستم‌های تأخیردار پایدار، انتگرال‌گیر و ناپایدار می‌پردازیم [۶۵]. ساختار پیشنهادی در شکل (۲-۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۷) پیش‌بین اسمیت فیلترشده

<sup>1</sup> Filtered Smith Predictor (FSP)

همانطور که مشاهده می‌شود این ساختار مانند پیش‌بین اسمیت ساده است با این فرق که دو فیلتر به آن افزوده شده است.  $F(s)$  یک فیلتر مرجع معمولی برای بهبود پاسخ نقطه تنظیم است و  $F_r(s)$  یک فیلتر پیش‌بین برای بهبود ویژگی‌های پیش‌بینی است.

پیش‌بین اسمیت فیلترشده دارای ویژگی‌های خاصی است و از آن می‌توان کنترل‌کننده‌ای طراحی کرد که مقاوم است، با دستگاه‌های ناپایدار می‌تواند کار کند، ویژگی‌های حذف اغتشاش را بهبود می‌بخشد، و پاسخ‌های نقطه تنظیم و اغتشاش را جداسازی می‌کند. بنابراین تمام معایب پیش‌بین اسمیت در اینجا مد نظر قرار گرفته است.

در حالت نامی ( $P(s) = P_n(s)$ ) توابع تبدیل حلقه بسته به صورت زیر است:

$$H_r(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{F(s)C(s)P_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (35-2)$$

$$H_q(s) = \frac{Y(s)}{Q(s)} = P_n(s) \left[ 1 - \frac{C(s)P_n(s)F_r(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \right] \quad (36-2)$$

معادله مشخصه  $P(s)$  به صورت زیر است:

$$1 + C(s)G_n(s) + C(s)G_n(s)P_n(s)F_r(s)\delta P(s) = 0 \quad (37-2)$$

آنگاه شرط پایداری مقاوم به صورت زیر خواهد بود:

$$\overline{\delta P}(\omega) < dP(\omega) = \frac{|1 + C(j\omega)G_n(j\omega)|}{|C(j\omega)G_n(j\omega)F_r(j\omega)|} \quad \forall \omega > 0 \quad (38-2)$$

توجه داریم که فقط  $\frac{Y(s)}{Q(s)}$  و  $dP(\omega)$  با اعمال این فیلتر اصلاح می‌شوند. یعنی از فیلتر  $F_r(j\omega)$  برای بهبود مقاوم بودن یا توانایی‌های حذف اغتشاش سیستم استفاده می‌شود بدون اینکه پاسخ نقطه تنظیم نامی دست بخورد.

## ۲-۵-۱ فرایند تنظیم

تنظیم کنترل کننده در دو گام صورت می پذیرد. ابتدا مشخصه های عملکرد نامی حاصل می شوند و سپس مقاوم بودن مد نظر قرار می گیرد.

## ۲-۵-۱-۱ عملکرد نامی

تنظیم صحیح  $C(s)$ ،  $F(s)$  و  $F_r(s)$  باید سیستم حلقه بسته پایدار داخلی را به همراه داشته باشد که دارای توابع تبدیل مطلوبی بین نقطه تنظیم و خروجی  $H_{rd}(s)$  و اغتشاش و خروجی  $H_{qd}(s)$  است.

در حالت کلی داریم  $G_n(s) = \frac{N_n^+(s)N_n^-(s)}{D_n(s)}$ ، که در آن  $N_n^+(s)$  دارای ریشه های سمت راست و  $N_n^-(s)$  دارای ریشه های سمت چپ است. از آنجایی که کنترل کننده فرمانده یک کنترل کننده تناسبی انتگرالی با دو درجه آزادی است، هدف اصلی  $C_m(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)}$  تعیین مکان قطب های حلقه بسته سیستم است که همان ریشه های  $D_{cl}(s)$  است. این کار با حل معادله دیوفانتین زیر انجام می شود:

$$D_{cl}(s) = N_n^+(s)N_n^-(s)N_c(s) + D_c(s)D_n(s) \quad (۲-۳۹)$$

بدین ترتیب چند جمله ایهای  $N_c(s)$  و  $D_c(s)$  بدست می آیند. بنابراین با کنترل کننده بدست آمده، تابع تبدیل حلقه بسته عبارت است از:

$$H_r(s) = \frac{N_n^+(s)N_n^-(s)N_c(s)N_f(s)e^{-Lns}}{D_{cl}(s)D_f(s)} \quad (۲-۴۰)$$

توجه داریم که قطب های حلقه بسته  $H_r(s)$  در مکان های مطلوب هستند اما صفرهای این تابع تبدیل فقط با طراحی  $C_m(s)$  قابل جابجایی نیستند. در این شرایط فراجهد نامطلوبی در پاسخ نقطه تنظیم رخ می دهد. بنابراین، فیلتر  $F(s) = \frac{N_f(s)}{D_f(s)}$  که دارای بهره استاتیکی یک است برای جابجایی مجموعه جدیدی

از صفرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا از  $D_f(s) = N_c(s)N_n^-(s)$  برای حذف صفرهای سمت چپ کنترل‌کننده و دستگاه استفاده می‌شود. سپس،  $N_f(s)$  با صفرهای جدید انتخاب می‌شوند. توجه داریم که صفرهای سمت راست  $P(s)$  باید در  $H_r(s)$  حفظ شوند. بنابراین:

$$H_{rd}(s) = \frac{N_n^+(s)N_f(s)}{D_{cl}(s)} e^{-L_n s} \quad (41-2)$$

یک مدل کلی برای طراحی  $F(s)$  به صورت زیر است:

$$F(s) = \frac{1 + \alpha T_i s}{1 + T_i s}, \quad \alpha < 1 \quad (42-2)$$

انتخاب مناسب  $\alpha$  پاسخ نقطه تنظیم با عملکرد بالا را به همراه خواهد داشت.

پاسخ حذف اغتشاش نیز به قرار زیر خواهد بود:

$$H_{qd}(s) = P_n(s) \left[ 1 - F_r(s) \frac{N_n^+(s)N_n^-(s)N_c(s)}{D_{cl}(s)} e^{-L_n s} \right] \quad (43-2)$$

که باید جهت حذف اغتشاش‌های پله‌ای دارای بهره استاتیک صفر باشد.  $F_r(s)$  تنها پارامتر تنظیم برای این تابع تبدیل است و باید به گونه‌ای انتخاب شود که سه مشکل اصلی ساختار اصلی برطرف شود:

- ویژگی‌های حذف اغتشاش برای سیستم حلقه بسته به دلخواه قابل تعریف نیستند زیرا قطب-های حلقه باز قطب‌های حلقه بسته تابع تبدیل  $H_{qd}(s)$  نیز هستند؛
- اگر فرایند دارای قطبی با قسمت حقیقی مثبت باشد، با ساختار پیش‌بین اسمیت ساده سیستم حلقه بسته ناپایدار داخلی خواهد شد؛
- برای حالت خاص فرایندهای انتگرال‌گیر، پیش‌بین اسمیت ساده اغتشاشات پله‌ای را در ورودی فرایند حذف نمی‌کند.

حال  $F_r(s) = \frac{N_r(s)}{D_r(s)}$  پایدار را با بهره استاتیک واحد در نظر بگیرید. ابتدا، برای جداسازی پاسخ‌های

نقطه تنظیم و اغتشاش، مجموعه قطب‌های جدیدی به صورت زیر برای  $H_{qd}(s)$  تعریف می‌شود:

$$H_{qd}(s) = P_n(s) \left[ 1 - \frac{N_n^+(s)N_o(s)}{D_o(s)} e^{-L_n s} \right] \quad (44-2)$$

یعنی:

$$\frac{N_r(s)}{D_r(s)} \frac{N_n^+(s)N_n^-(s)N_c(s)}{D_{cl}(s)} = \frac{N_n^+(s)N_o(s)}{D_o(s)} \quad (45-2)$$

که در آن  $D_o(s)$  دارای قطب‌های مطلوب برای  $H_{qd}(s)$  در سمت چپ است و  $\frac{N_n^+(s)N_o(s)}{D_o(s)} = 1$

سپس برای بهبود عملکرد حذف اغتشاش،  $N_o(s)$  باید به گونه‌ای طراحی شود که قطب‌های نامطلوب حلقه باز از  $H_{qd}(s)$  حذف شود. هرگاه این قطب‌ها حذف شوند سیستم حلقه بسته پایدار داخلی خواهد بود و اغتشاش پله‌ای را در ورودی دستگاه برای هر دستگاه حلقه بازی حذف می‌کند.  $H_{qd}(s)$  را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$H_{qd}(s) = \frac{N_n(s)}{D_n^+(s)D_n^-(s)} e^{-L_n s} \left[ 1 - \frac{N_n^+(s)N_o(s)}{D_o(s)} e^{-L_n s} \right] \quad (46-2)$$

که در آن  $D_n^+(s)$  دارای  $m_s$  ریشه در سمت راست است و در ناحیه‌ای نامطلوب از صفحه  $s$  است (قطب-های کُند)، طراحی فیلتر باید موید این موضوع باشد که  $s_i, i = 1 \dots m_s$  یا همان قطب‌های نامطلوب، ریشه‌های شبه چندجمله‌ای  $[D_o(s) - N_n^+(s)N_o(s)e^{-L_n s}]$  است.

بنابراین،  $N_o(s)$  دارای  $m_s$  پارامتر آزاد است. طراحی کامل فیلتر  $\frac{N_r(s)}{D_r(s)}$  به صورت زیر است:

• گام ۱: قطب‌های کند یا ناپایدار  $P_n(s)$  را بدست آورید.  $N_o(s)$  را به صورت زیر تعریف کنید:

$$N_o(s) = 1 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots + \beta_{m_s} s^{m_s} \quad (47-2)$$

• گام ۲:  $\frac{D_{cl}(s)}{N_n^-(s)N_c(s)}$  را محاسبه کرده و درجه  $D_0(s)$  را برای داشتن  $F_r(s)$  مناسب تعریف کنید:

$$F_r(s) = \frac{N_r(s)}{D_r(s)} = \frac{D_{cl}(s)}{N_n^-(s)N_c(s)} \frac{1 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots + \beta_{m_s} s^{m_s}}{D_0(s)} \quad (48-2)$$

• گام ۳: ضرائب  $\beta_i$  را برای اینکه هر  $s_i$  ریشه شبه چندجمله‌ای زیر باشد محاسبه کنید:

$$D_0(s) - N_n^+(s)[1 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots + \beta_{m_s} s^{m_s}]e^{-Lns} \quad (49-2)$$

به طور کلی  $D_0(s)$  به صورت  $(1 + sT_0)^{n_0}$  انتخاب می‌شود که  $T_0$  مبین سرعت پاسخ است.

• گام ۴: تنظیم را با انتخاب ثابت زمانی‌های حلقه بسته پاسخ حذف اغتشاش که همان پارامترهای آزاد طراحی هستند تمام کنید.

## ۲-۱-۵-۲ پایداری مقاوم

با طراحی‌های  $C_m(s)$  و  $F_r(s)$ ،  $dp(\omega)$  به صورت زیر خواهد شد:

$$dp(\omega) = \frac{|D_{cl}(j\omega)|}{|N_c(j\omega)N_n(j\omega)F_r(j\omega)|} = \frac{|D_0(j\omega)|}{|N_n^+(j\omega)N_0(j\omega)|} \quad \forall \omega > 0 \quad (50-2)$$

بنابراین، شرط پایداری مقاوم عبارت است از:

$$\overline{\delta P}(\omega) < \frac{|D_0(j\omega)|}{|N_n^+(j\omega)N_0(j\omega)|} \quad \forall \omega > 0 \quad (51-2)$$

$D_0(s) = (1 + sT_0)^{n_0}$  را در معادله (۵۱-۲) در نظر بگیرید. توجه داریم که افزایش  $T_0$  مقادیر  $dp(\omega)$  را بالا می‌برد و بدین ترتیب مقاوم بودن افزایش می‌یابد و به طور همزمان پاسخ حذف اغتشاش کندتر خواهد شد. اگر دستگاه حلقه باز پایدار باشد،  $T_0$  به نحوی دلخواه برای دستیابی به شرط پایداری مقاوم قابل افزایش است که البته ممکن است سیستم حلقه بسته را کند سازد. با این حال، در حالت

ناپایدار، مقاوم بودن به طور دلخواه قابل افزایش نیست. این نتیجه قابل انتظار است زیرا به عملیات فیدبکی خاصی برای حفظ پایداری نیاز است. یعنی برای دستگاه‌های ناپایدار می‌توان به مقاوم بودن دست یافت.

فرض کنید مدل فرایند به صورت  $G_n(s) = G_e(s) \frac{K}{Ts-1}$  است که در آن  $G_e(s)$  پایدار و با درجه نسبی ۱ است، هیچ صفر سمت راستی ندارد، بهره استاتیک واحد دارد و  $T > 0$ .  $C(s)$  به گونه‌ای انتخاب شده است که  $H_r(s)$  پایدار و با بهره استاتیک واحد است و همچنین معادله حلقه بسته مطلوب  $D_{cl}(s)$  است. با استفاده از فرایند تنظیم پیشنهادی برای  $F_r(s)$  و با  $m_s = 1$  داریم:

$$N_0(s) = 1 + \beta_1 s \quad D_0(s) = (1 + sT_0)^2 \quad (52-2)$$

که در آن  $T_0$  پارامتر تنظیم است و  $\beta_1$  باید برای حذف اثر قطب ناپایدار حلقه باز  $s = 1/T$  به صورت زیر باشد:

$$\beta_1 = T \left[ \left(1 + T_0/T\right)^2 e^{L_n/T} - 1 \right] \quad (53-2)$$

مقاوم بودن کنترل‌کننده با کران نامعینی قابل ارزیابی است.

$$dP(\omega) = \frac{|(1 + j\omega T_0)^2|}{|1 + j\omega \beta_1|} > |\delta P(j\omega)| \quad (54-2)$$

این عبارت نشان می‌دهد که مقادیر بیشتر  $T_0$  به طور کلی مقادیر بالاتری برای  $dP(\omega)$  به همراه خواهد داشت، با این حال،  $\beta_1$  با  $T_0$  افزایش می‌یابد و ممکن است زمانی که  $L_n/T \gg 1$  به مقادیر بالایی برسد؛ بنابراین،  $dP(\omega)$  به دلخواه قابل افزایش نیست. فرض کنید  $T_0/T \gg 1$ ، بنابراین  $\beta_1 \cong e^{L_n/T} \frac{T_0^2}{T}$ . از آنجایی که  $T_0$  و  $\beta_1$  مقادیر بالایی دارند خواهیم داشت.

$$dp(\omega) \cong \frac{|(j\omega T_0)^2|}{|j\omega\beta_1|} \quad (55-2)$$

یعنی اثر  $T_0$  بر مقاوم بودن کم شده و به شدت وابسته به  $L_n/T$  خواهد بود.

## ۲-۵-۲ حالت مدل پایدار

در این قسمت از جزئیات پرهیز کرده و طبق مطالب گفته شده در مورد تنظیم کلی کنترل کننده و

فیلترها، مطالبی را ارائه می‌دهیم. مدل فرایند را به صورت  $P_n(s) = \frac{K_p e^{-L_n s}}{1+sT}$  و  $C(s)$  را کنترل کننده

تناسبی انتگرالی به صورت  $T_i = T$  و  $K_c = 1/K_p$  و  $F_r(s) = \frac{1}{1+sT_0}$  و  $T_0 = L_n/2$  در نظر بگیرید.

فرایند تنظیم برای مدل مرتبه اول به همراه زمان مرده<sup>۱</sup> به صورت زیر است:

•  $C(s)$  را کنترل کننده تناسبی انتگرالی با پارامترهای  $T_i = T$ ،  $K_c = T/T_r K_p$  محاسبه کنید.

$T_r$  معرف قطب حلقه بسته است؛

• با استفاده از  $m_s = 1$ ،  $F_r(s)$  را محاسبه کنید که می‌دهد  $N_0(s) = 1 + \beta_1 s$  و  $D_0(s) =$

$(1 + sT_0)^2$ . طبق معادله (۴۹-۲)، با لحاظ کردن ریشه‌ای در  $s = -1/T$ ، پارامتر  $\beta_1$  برابر

است با:

$$\beta_1 = T \left[ 1 - \left( 1 - T_0/T \right)^2 e^{-\frac{L_n}{T}} \right] \quad (56-2)$$

بنابراین:

$$F_r(s) = \frac{(1 + sT_r)(1 + \beta_1 s)}{(1 + sT_0)^2} \quad (57-2)$$

<sup>1</sup> First Order Plus Dead Time (FOPDT)



- نامعینی‌های دستگاه را تخمین زده، و برای ایجاد بهترین مصالحه بین مقاوم بودن و عملکرد  $T_0$  را تنظیم کنید. توجه داریم که  $T_r$  و  $T_0$  تنها پارامترهای تنظیم هستند.

## ۲-۵-۳ حالت مدل انتگرال گیر

مدل‌های انتگرال گیر در عمل به طور گسترده برای نمایش فرایندهای با دینامیک کند به کار می‌روند. مدل انتگرال گیر بعلاوه زمان مرده<sup>۱</sup>،  $P_n(s) = \frac{K_v e^{-L_n s}}{s}$  ساده‌ترین و پرکاربردترین مدل است. یک کنترل کننده تناسبی هم در اینجا ما را به هدف ردیابی نقطه تنظیم خواهد رساند.

با در نظر گرفتن  $G_n(s) = \frac{K_v}{s}$  و هیچ‌گونه خطای مدلسازی خواهیم داشت:

$$H_r(s) = \frac{e^{-L_n s}}{1 + sT_r}; \quad T_r = \frac{1}{K_c K_v} \quad (58-2)$$

پاسخ حذف اغتشاش برابر است با:

$$H_q(s) = P_n(s) \left[ 1 - \frac{e^{-L_n s} F_r(s)}{1 + sT_r} \right] \quad (59-2)$$

با توجه به گام‌های ۱ و ۲ در روال طراحی  $m_s = 1$  است و

$$F_r(s) = \frac{(1 + sT_r)[1 + \beta_1 s]}{(1 + sT_0)^2} \quad (60-2)$$

از گام ۳،  $\beta_1$  برای داشتن زوج صفر در  $s = 0$  برای معادله (۲-۴۹) که برای این حالت  $1 + sT_r -$

$e^{-L_n s} F_r(s)$  است برابر خواهد بود با  $\beta_1 = 2T_0 + L_n$ . بنابراین:

$$F_r(s) = \frac{(1 + sT_r)[1 + (2T_0 + L_n)s]}{(1 + sT_0)^2} \quad (61-2)$$

<sup>1</sup> Integrative Plus Dead Time

باز هم  $T_0$  و  $T_r$  تنها پارامترهای تنظیم هستند و از  $T_0$  برای برقراری مصالحه بین مقاوم بودن و عملکرد استفاده می‌شود.

## ۲-۵-۴ حالت مدل مرتبه اول ناپایدار

از یک کنترل کننده PI به صورت  $C(s) = \frac{K_c(1+sT_i)}{T_i s}$  برای پاسخ نقطه تنظیم استفاده می‌شود. با استفاده از مدل نامی  $G_n(s) = \frac{K}{Ts-1}$  تابع تبدیل نامی حلقه بسته به صورت زیر انتخاب می‌شود:

$$H_r(s) = \frac{1 + sT_i}{(1 + sT_r)^2} e^{-L_n s} \quad (۶۲-۲)$$

که در آن  $T_r$  ثابت زمانی حلقه بسته مطلوب است. همچنین می‌توان از فیلتر مرجع  $F(s) = \frac{1+sT_r}{1+sT_i}$  برای حذف اثر صفر کنترل کننده استفاده کرد. برای حذف اغتشاش، با توجه به گام‌های ۱ تا ۳ برای  $m_s = 1$  و قطب ناپایدار  $s = 1/T$  در معادله (۲-۴۹)،  $\beta_1 = T[(1 + T_0/T)^2 e^{L_n/T} - 1]$  بنابراین

$$F_r(s) = \frac{(1 + sT_r)^2}{1 + sT_i} \frac{1 + s\beta_1}{(1 + sT_0)^2} \quad (۶۳-۲)$$

## ۲-۵-۵ عملیات از راه دور با پیش‌بین اسمیت فیلترشده

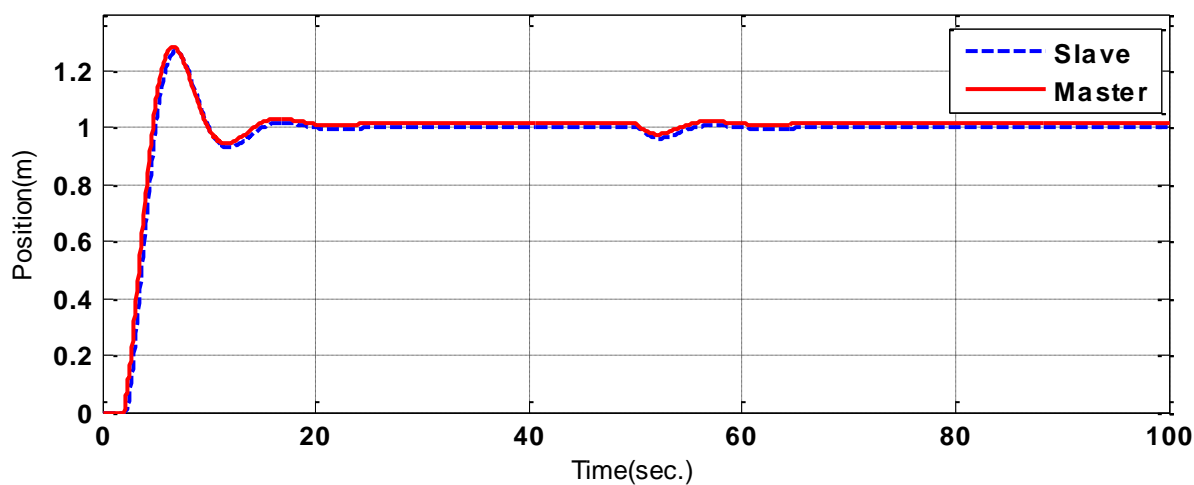
با توجه به مطالبی که قبلاً در قسمت ۲-۴ ارائه شد ملاحظه کردیم که ردیابی نیرو در سیستم عملیات از راه دور مدل را به تابع تبدیل  $P_n(s) = \frac{1}{s} e^{-T_n s}$  کاهش می‌دهد. در واقع با یک مدل انتگرال‌گیر مواجه هستیم. حال با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت ۲-۵-۳ به ارائه فیلترها و کنترل‌کننده می‌پردازیم.

حالت اول) با فرض 0.25 ثانیه تأخیر در مسیر رفت و 0.25 ثانیه تأخیر در مسیر برگشت و فرض اینکه پاسخ مطلوب حلقه بسته همان زوج قطب در  $s = -2$  باشد ( $T_0 = 0.5$ ) در حالت نامی ( $T_n = 0.25 +$ ) خواهیم داشت:

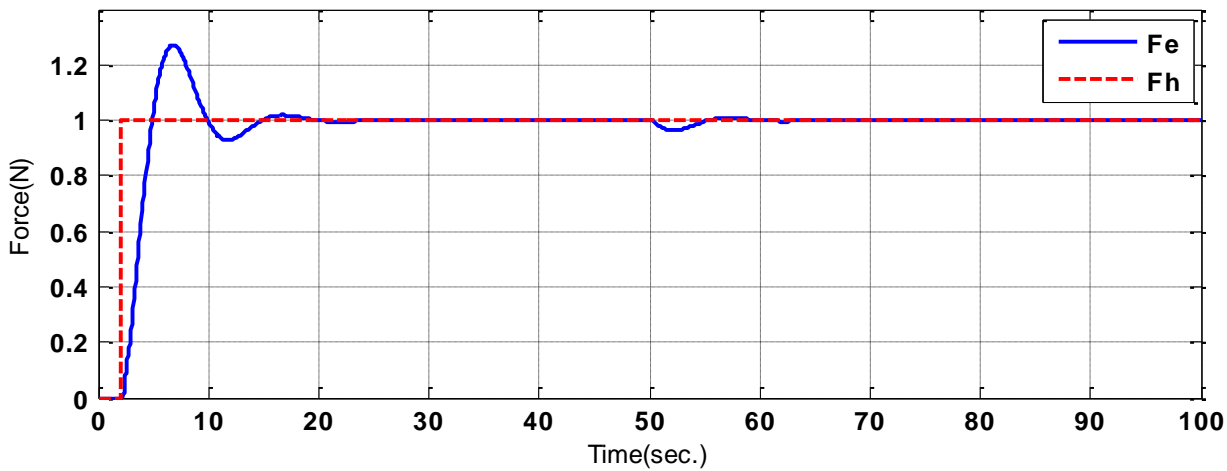
$$C_m = k_c = \frac{2T_0 + T_n}{k_v(T_0 + T_n)^2} = 1.5$$

$$T_r = \frac{1}{K_c K_v} = 0.66$$

$$F_r(s) = \frac{(1 + sT_r)[1 + (2T_0 + T_n)s]}{(1 + sT_0)^2} = \frac{(1 + 0.66s)(1 + 1.5s)}{(1 + 0.5s)^2}$$

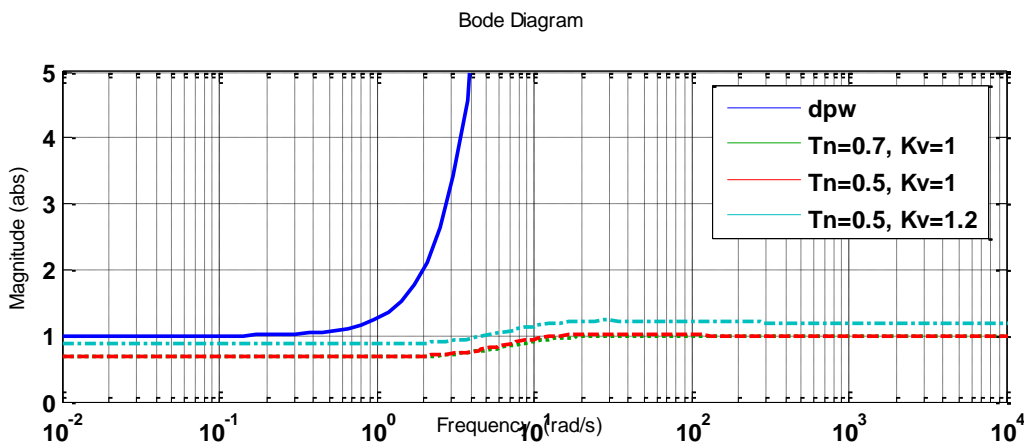


شکل (۲-۱۸) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در حالت اول



شکل (۱۹-۲) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در حالت اول

همانطور که در پاسخ‌ها مشاهده می‌شود ردیابی موقعیت و نیرو به خوبی صورت می‌پذیرد و مهمتر از همه اینکه قابلیت حذف اغتشاش و همچنین مقاوم بودن سیستم در برابر نامعینی‌های زمان تأخیر و بهره مدل وجود دارد. موید این صحبت شکل (۲۰-۲) است که در شرایط مختلف شرط (۲-۵۰) را برآورده می‌کند.



شکل (۲۰-۲) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در

حالت دوم

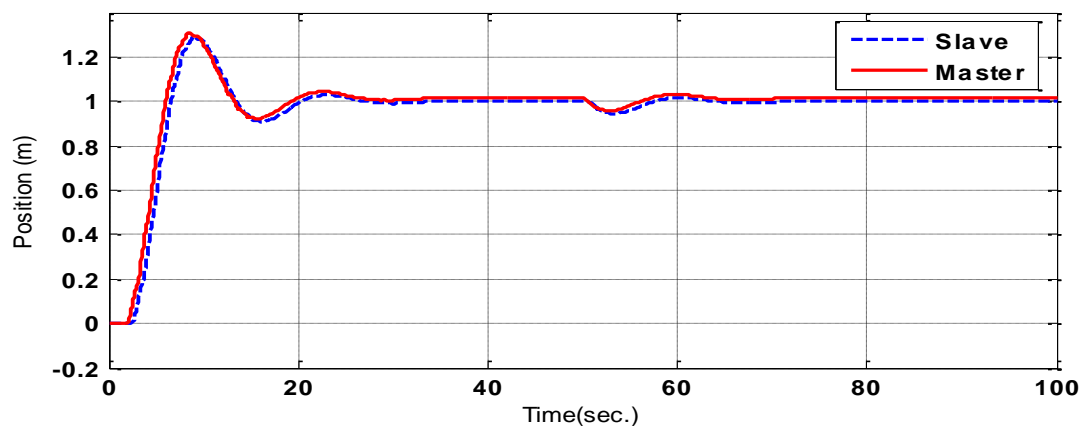
حالت دوم) با فرض 0.5 ثانیه تأخیر در مسیر رفت و 0.5 ثانیه تأخیر در مسیر برگشت و فرض اینکه پاسخ مطلوب حلقه بسته همان زوج قطب در  $s = -2$  باشد ( $T_0 = 0.5$ ) در حالت نامی ( $T_n = 0.5$ ) خواهیم داشت:

$$C_m = k_c = \frac{2T_0 + T_n}{k_v(T_0 + T_n)^2} = 0.88$$

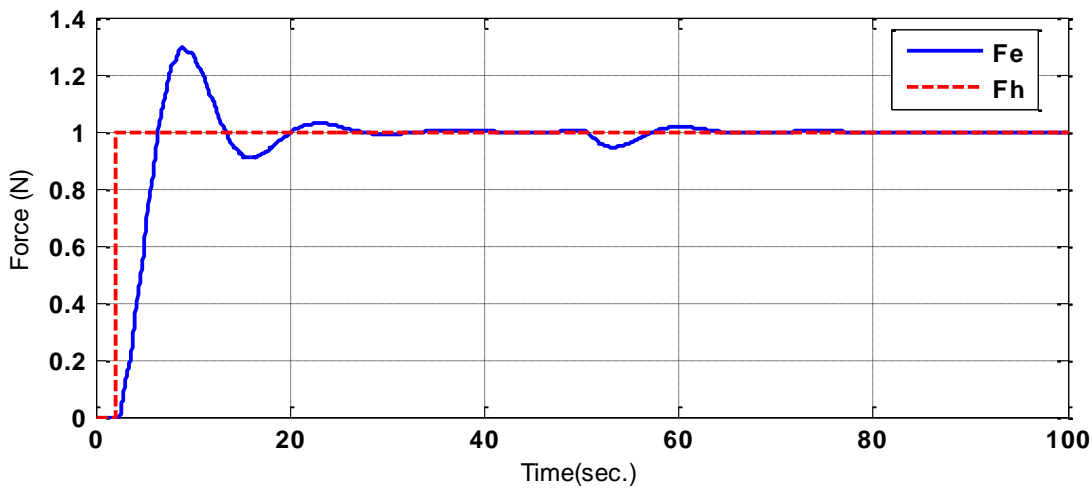
$$T_r = \frac{1}{K_c K_v} = 1.13$$

$$F_r(s) = \frac{(1 + sT_r)[1 + (2T_0 + T_n)s]}{(1 + sT_0)^2} = \frac{(1 + 1.13s)(1 + 2s)}{(1 + 0.5s)^2}$$

پاسخ‌های موقعیت و نیرو به صورت زیر خواهد بود:



شکل (۲-۲۱) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در حالت دوم

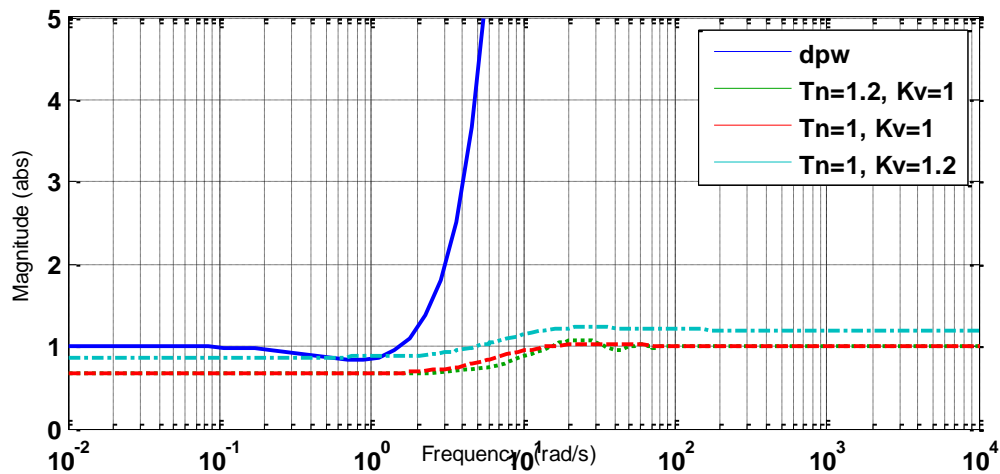


شکل (۲-۲۲) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در حالت دوم

همانطور که در پاسخ‌ها مشاهده می‌شود ردیابی موقعیت و نیرو به خوبی صورت می‌پذیرد و مهمتر از همه اینکه قابلیت حذف اغتشاش و همچنین مقاوم بودن سیستم در برابر نامعینی‌های زمان تأخیر و بهره تابع تبدیل مدل وجود دارد. مویید این صحبت شکل (۲-۲۳) است که در شرایط مختلف شرط (۲-۲)

(۵۰) را برآورده می‌کن

Bode Diagram



شکل (۲-۲۳) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در

حالت دوم

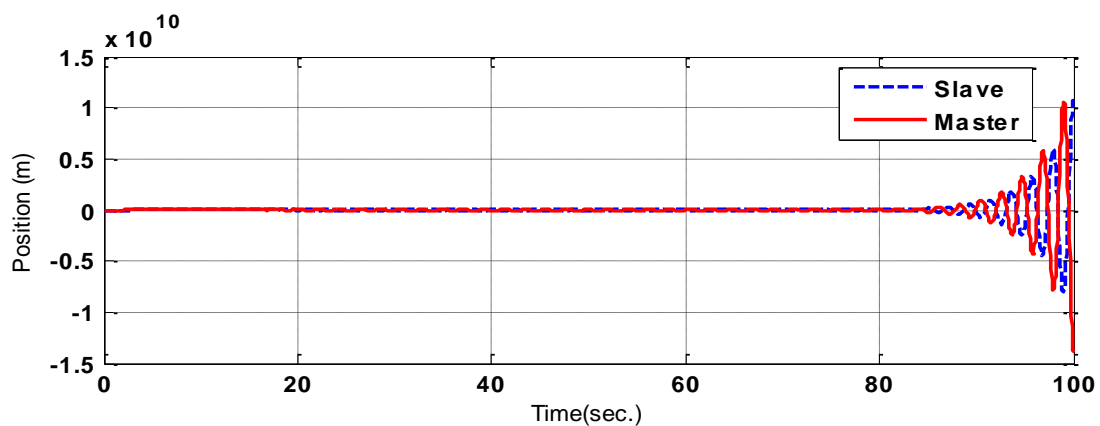
طبق شکل (۲-۲۳) شرط پایداری مقاوم نیز برآورده شده است. بنابراین مشاهده می‌کنیم که تمام عیوب پیش‌بین اسمیت ساده در این پیش‌بین و در این حالت رفع شده است.

حالت سوم) با فرض 1 ثانیه تأخیر در مسیر رفت و 1 ثانیه تأخیر در مسیر برگشت و فرض اینکه پاسخ مطلوب حلقه بسته همان زوج قطب در  $s = -2$  باشد ( $T_0 = 0.5$ ) در حالت نامی ( $T_n = 1 + 1 = 2$ ) خواهیم داشت:

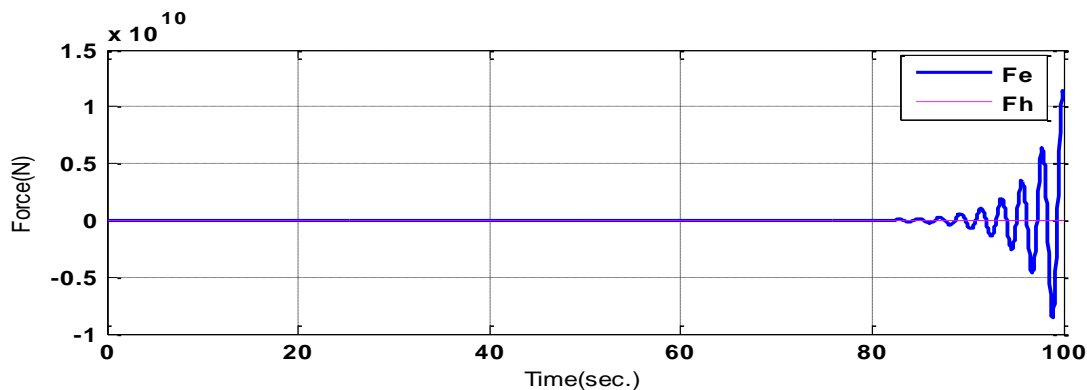
$$C_m = k_c = \frac{2T_0 + T_n}{k_v(T_0 + T_n)^2} = 0.48$$

$$T_r = \frac{1}{K_c K_v} = 2.08$$

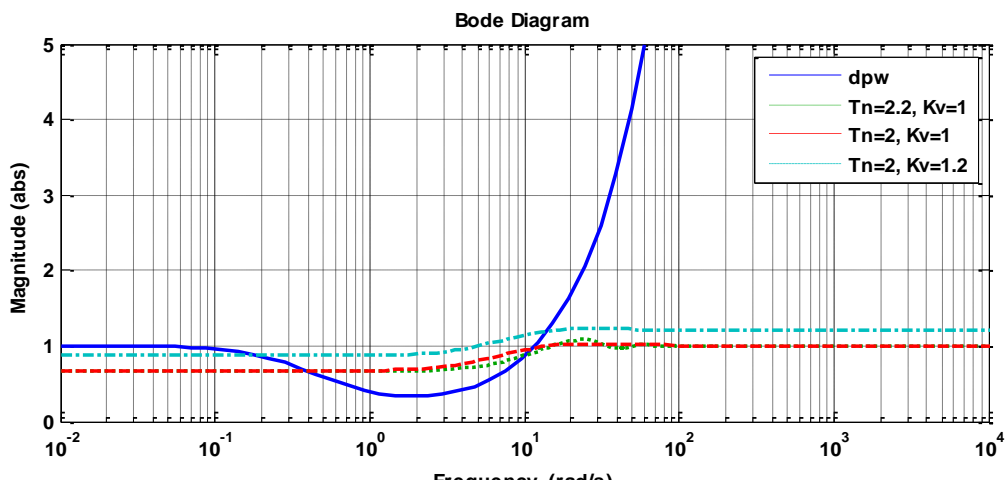
$$F_r(s) = \frac{(1 + sT_r)[1 + (2T_0 + T_n)s]}{(1 + sT_0)^2} = \frac{(1 + 2.08s)(1 + 3s)}{(1 + 0.5s)^2}$$



شکل (۲-۲۴) ردیابی موقعیت در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در حالت سوم



شکل (۲-۲۵) ردیابی نیرو در سیستم فرمانده-فرمانبر با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در حالت سوم



شکل (۲-۲۶) نشانه گرافیکی شرط پایداری مقاوم برای عملیات از راه دور با پیش‌بین اسمیت فیلترشده در

حالت سوم

مشاهده می‌کنیم که در حالت آخر ساختار پیشنهادی قابلیت ردیابی و حذف اغتشاش را ندارد، پس این

ساختار برای سیستم عملیات از راه دور با تأخیر کمتر از ۱ ثانیه در هر مسیر پاسخگو است.



# فصل ۲

## نتیجہ گیری و پیشہ اداات

### ۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

کانال ارتباطی مهمترین جزء در سیستم‌های عملیات از راه دور می‌باشد که با توجه به پیشرفت علم ارتباطات، از اینترنت به عنوان وسیله‌ای برای ارسال اطلاعات در سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه از سایت محلی به سایت دور و بالعکس استفاده می‌شود. آنچه در سیستم‌های عملیات 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 عملیات 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 کابرن (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 صرف نظر کردن است. این زمان تاخیر علاوه بر این که امکان ناپایداری سیستم عملیات از راه دور دوطرفه را افزایش می‌دهد، کارایی سیستم را کاهش داده و کنترل سیستم عملیات از راه دور دوطرفه را بین سایت محلی و سایت دور مشکل می‌سازد.

در این پایان‌نامه، یک ساختار جدید کنترلی برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه با نامعینی در زمان تاخیر کانال ارتباطی با بهره‌گیری از دو کنترل‌کننده محلی مجزا به منظور 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، علاوه بر این 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 یا سرعت اجرا شود. در ساختار پیشنهادی، از یک پیش‌بین اسمیت تغییر یافته برای جبران تاخیر مسیر رفت و برگشت و از دو فیلتر برای بهبود کیفیت پاسخ‌های ردیابی و همچنین تفکیک این پاسخ‌ها از پاسخ حذف اغتشاش استفاده شده است. یکی از ویژگی‌های بارز ساختار نهایی پیشنهادی قابلیت حفظ پایداری مقاوم است.

آنچه بایستی مد نظر قرار گیرد آن است که در بین ۶۰-۷۰ درصد از روش‌های کنترلی که به کنترل سیستم‌های عملیات 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 اولاً بسیار ساده است و تا حد تأخیرهای یک ثانیه‌ای قادر است هر دو مشخصه‌ی عملکردی را فراهم و پایداری حلقه بسته را حفظ کند. 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 عملیات 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 کنترل پیش‌بین صورت گیرد.
۳. تلاش کنیم ساختار کنونی را به گونه‌ای تغییر یا تعمیم دهیم که قادر باشیم سیستم‌های عملیات از راه دور فضایی را که غالباً دارای تاخیر زمانی بزرگی هستند کنترل کنیم.

---

<sup>1</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>2</sup> Genetic Algorithm

<sup>3</sup> Simulated Annealing

- [1] Sheridan, T. B. , (1989), "Telerobotics. Automatica," **25(4)**, 487–507.
- [2] Jianhong Cui, Sabri Tosunoglu, Rodney Roberts, Carl Moore, Daniel W. Repperger, (2003) "A Review of Teleoperation System Control," **Florida Conference on Recent Advances in Robotics**.
- [3] Peter F. Hokayem, MarkW. Spong, (2006) "Bilateral Teleoperation: A Historical Survey," **Automatica 42, Science Direct**.
- [4] Rovetta, A., Sala, R., Wen, X., & Togno, A. (1996), "*Remote control in telerobotic surgery*," **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, **26(4)**, 438–444.
- [5] R.J.Anderson and W.spong, (1989) "Bilateral Control of Teleoperation with Time Delay," **IEEE Transactions Automation and Control**, Vol.34.
- [6] W.Conklin, and S.Tosunoglu, (1996) "Conceptual Design of A Universal Bilateral Manual Controller," **Proceedings of the Florida Conference on Recent Advanced in Robotics, Boca Raton, Florida**.
- [7] C. Garcia, J. Posto, and C. Soria, (2003) "Supervisory Control for a Telerobotics System: a hybrid control approach," **Control Engineering Practice**.
- [8] J. Anderson and W. Spong, (1989) "Bilateral Control of teleoperators with time delay," **IEEE Transactions on Automatica Control**, vol. **34**, no. **5**, pp. **494-501**.
- [9] G. Niemeyer and J. E. Slotine, (1991) "Stable adaptive teleoperation," **IEEE Journal of Oceanic engineering**, vol. **26**, no. **1**, pp. **152-162**.
- [10] D. A. Lawrence, (1993) "Stability and transparency in bilateral teleoperation," **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, vol. **9**, no. **5**, pp. **625-637**.

- [11] T. Yoshikawa and J. Ueda, (1996) "Analysis and control of master-slave systems with time delay," **In Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp. 1336-1373.
- [12] K. Kosuge and H. Murayama, (1997) "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.
- [13] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, (1997) "Using wave variables for system analysis and robot control," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 1619-1625.
- [14] G. Niemeyer and J. J. Slotine, (1998) "Towards force-reflecting teleoperation over the internet," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 1909-1915.
- [15] Y. Yokokohji, T. Imaida and T. Yoshikawa, (1999) "Bilateral teleoperation under time-varying communication delay," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp. 1854-1859.
- [16] Y. Yokokohji, T. Imaida and T. Yoshikawa, (2000) "Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 2684-2689.
- [17] D. Lee and P. Li, (2000) "Passive feedforward approach to the control of bilateral teleoperated manipulators," **In Proceedings of the ASME Haptics Symposium at IMECE**, pp. 210-215.
- [18] S. Munir and W. J. Book, (2001) "Wave-based teleoperation with prediction," **In Proceedings of the American Control Conference**, vol. 7, no. 2, pp. 124-133.
- [19] S. Munir and W. J. Book, (2002) "Internet-based teleoperation using wave variables with prediction," **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, vol. 7, no. 2, pp. 124-133.

- [20] D. Lee and P. Li, (2002) "Passive coordination control for nonlinear bilateral teleoperated manipulators," **In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 3278-3283.
- [21] S. Leeraphan, T. Maneewarn and D. Laowattana, (2002) "*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.
- [22] T. Mirfakhrai and S. Payandeh, (2002) "A delay prediction approach for teleoperation over the internet," **In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 2178-2183.
- [23] S. Ganjefar, H. Momeni and F. Janabi-Sharifi, (2002) "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.
- [24] H. Flemmer and J. Wikander, (2003) "*Transparency and stability analysis of a surgical teleoperator system*," **Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, In Proceeding of the 11th Haptic Symposium**, pp. 382-389.
- [25] J. Ryu, B. Hannaford, C. Preusche and G. Hirzinger, (2003) "Time domain passivity control with reference energy behavior," **In Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp. 2932-2937.
- [26] J. H. Ryu and J. H. Kim, (2005) "Stable and high performance teleoperation with time domain passivity control: reference energy following scheme," **In proceedings of the 12th IEEE Conference of Control on Application**, pp. 782-787.
- [27] L. Li, Y. Li and G. Liu, (2005) "Nonlinear adaptive control of teleoperation systems with large time delay," **In Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications**, pp. 1522-1527.
- [28] M. Alise, R. G. Roberts and D. W. Repperger, (2006) "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.

- [29] Y. Hou and G. R. Luecke, (2005) "Time delayed teleoperation system control: A passivity-based method," **In Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Advanced Robotics**, pp. 796-802.
- [30] H. W. Kim, L. H. Suh and B. J. Yi, (2005) "A stabilizing control technique for bilateral teleoperation system with time delay," **IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts**, pp.103-108.
- [31] X. Liu, w. J. Wilson and X. Fan, (2005) "Pose reflecting teleoperation using wave variables with wave prediction," **In Proceedings of the IEEE Conference on Mechatronics and Automation**, pp. 1642-1647.
- [32] M. U. Keerio, L. Zhang, Y. Lu, A. Jafri and J. Yang, (2006) "Control Scheme for stable bilateral teleoperation with time delay," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, pp. 433-438.
- [33] N. A. Tanner and G. Niemeyer, (2006) "High-frequency acceleration feedback in wave variable telerobotics," **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, vol. 11, no. 2, pp. 119-127.
- [34] M. Boukhnifer and A. Ferreira, (2006) "Wave-based passive control for transparent micro-teleoperation system," **Journal of Robotics and Autonomous Systems**, vol. 54, pp. 601-615.
- [35] A. Aziminejad, M. Tavakoli, R. V. Patel and M. Moallem, (2007) "Wave-based time delay compensation in bilateral teleoperation: two-channel versus four-channel architecture," **In Proceedings of the American Control Conference**, pp. 1449-1454.
- [36] I. G. Polushin, X. Liu and C. H. Lung, (2007) "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.
- [37] Bate, L. H., Cook, C. D. & Li, Z. (2009), "A method for reducing wave based teleoperator reflections," **IEEE International Conference on Industrial Technology**, pp. 1-6.

- [38] Li, H., & Kawashima, K. (2014). "Achieving stable tracking in wave-variable-based teleoperation," **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 19(5), 1574-1582.
- [39] H. Kazerooni, T. I. Tsay and K. Hollerbach, (1993) "A controller design framework for telerobotic systems," **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol. 1, no. 1, pp. 50–62.
- [40] G. M. H. Leung, B. A. Francis and J. Apkarian, (1995) "Bilateral controller for teleoperators with time delay via  $\mu$ -synthesis," **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, vol. 11, no. 1, pp. 105-116.
- [41] Z. Hu, S. E. Salcudean, and P. D. Loewen, (1995) "Robust controller design for teleoperation systems," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, pp. 2127–2132.
- [42] A. Sano, H. Fujimoto and T. Takai, (2000) "Network-based force-reflecting teleoperation," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 3126–3131.
- [43] S. Siruspour and A. Shahdi, (2005) "Bilateral teleoperation under communication time delay using an LQG controller," **In Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications**, pp. 1257-1262.
- [44] Shahbazi, M., Talebi, H. A., & Towhidkhah, F. (2010), "A robust control architecture for dual user teleoperation system with time-delay," **In IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society** (pp. 1419-1423).
- [45] Amini, H., Dabbagh, V., Rezaei, S. M., Zareinejad, M., Mardi, N. A., & Sarhan, A. A. (2015), "Robust control-based linear bilateral teleoperation system without force sensor," **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 37(2), 579-587.
- [46] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean, (1996), "Adaptive transparent impedance reflecting teleoperation," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 1369-1374.



- [47] W. H. Zhu and S. E. Salcudean, (2000), "Stability guaranteed teleoperation: an adaptive motion/force control approach," **IEEE Transactions on Automatic Control**, vol. **45**, no. **11**, pp.1951-1969.
- [48] W. H. Zhu and S. E. Salcudean, (1999), "Teleoperation with adaptive motion/force control," **In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. **231-237**.
- [49] H. K. Lee, M. H. Sheen and M. J. Chung, (1997), "*Adaptive controller of master-slave systems for transparent teleoperation*," **In Proceedings of the IEEE Advanced Robotics**, pp. **1021-1026**.
- [50] L. J. Love and W. J. Book, (2004), "Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetic*, vol. **34**, no. **1**, pp. **159-165**.
- [51] K. Hosseini-Sunny, H. Momeni and F. Janabi-Sharifi, (2005), "Adaptive teleoperation systems design," **In Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications**, pp. **334-339**.
- [52] M. Sha-Sadeghi, H. Momeni, R. Amirifar and S. Ganjefar, (2006), "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**.
- [53] Jie Sheng and Mark W. Spong, (2004), "Model Predictive Control for Bilateral Teleoperation Systems with Time Delays".
- [54] Y.J.Pan, C.C.de.Wit, O.Sename, (2004), "Predictive Controller Design for Bilateral Teleoperation Systems with Time-Varying Delays," **43rd IEEE Conference on Decision and control**.
- [55] S.Sirouspour, A.Shahdi, (2006), "Model Predictive Control for Transparent Teleoperation Under Communication Time Delay," **IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS**, VOL. **22**, NO. **6**.

- [56] T.Slama, D.Aubry, R.Oboe, F.Kratz, (2007), "Robust bilateral generalized predictive control for teleoperation systems," **Mediterranean Conference on Control and Automation**.
- [57] Z.Ghazi, A.Safavi, M.Salimifard, (2011), "Improving MPC based Teleoperation Systems by Employing Intelligent Optimization Algorithms," **2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation**.
- [58] Shahdi, A., & Sirouspour, S. (2009), "Adaptive/robust control for time-delay teleoperation," **IEEE Transactions on Robotics**, 25(1), 196-205.
- [59] Huang, J.-Q. & Lewis, F. (2003), "Neural-network predictive control for nonlinear dynamic systems with time-delay," **IEEE Transactions on Neural Networks** 14(2):377–389.
- [60] Smith, A. C., & Hashtrudi-Zaad, K. (2006), "Smith predictor type control architectures for time delayed teleoperation," **The International Journal of Robotics Research**, 25(8), 797-818.
- [61] Alfi, A., & Farrokhi, M. (2008), "A simple structure for bilateral transparent teleoperation systems with time delay," **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 130(4), 044502.
- [62] Ghoushkhanehee, S. V., & Alfi, A. (2013), "Model predictive control of transparent bilateral teleoperation systems under uncertain communication time-delay," **In Control Conference (ASCC)**, 2013 9th Asian (pp. 1-6)
- [63] Guo, J., Liu, C., & Poignet, P. (2015), "Stable and enhanced position-force tracking for bilateral teleoperation with time delay," **In Control Conference (ECC)**, European (pp. 1980-1985). IEEE.
- [64] Normey-Rico, J. E. (2007), "Control of dead-time processes," **Springer Science & Business Media**.
- [65] Normey-Rico, J. E., & Camacho, E. F. (2009), "Unified approach for robust dead-time compensator design," **Journal of Process Control**, 19(1), 38-47.

[66] Normey-Rico, J. E., & Camacho, E. F. (1999), "Robust tuning of dead-time compensators for processes with an integrator and long dead-time," **IEEE Transactions on Automatic Control**, 44(8), 1597-1603.

[67] Kirtania, K., & Choudhury, M. S. (2012), "A novel dead time compensator for stable processes with long dead times," **Journal of Process Control**, 22(3), 612-625.



## **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 the former targeted at the slave system and the latter for the master system. The slave controller is a simple PD controller whose role is position tracking within the system. The master controller is a simple proportional controller that guarantees the stability of the closed loop system and has the force tracking role. Central to the proposed structure exists Smith Predictor (SP) that is implemented in two cases. In the first case a simple Smith Predictor is applied. The important property of robustness and disturbance rejection is not guaranteed. However, by some modifications and increasing the degrees of freedom by designing filters, decoupling between the setpoint response and disturbance rejection response happens. In addition, the system becomes robust to modelling uncertainties. Simulation results exhibit the effectiveness of the proposed approach.

**Keywords:** Teleoperation, Simple Smith Predictor, Filtered Smith Predictor, Uncertainty, Disturbance Rejection, Robust Stability.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical & Robotic Engineering

Msc thesis in Electrical Engineering of control

# Bilateral Teleoperation Systems Control using Modified Smith Predictor

By: Parisa Mojab

Supervisor:

Dr. Mohammad Haddad Zarif

Advisor:

Dr. Alireza Alfi

September 2016