

به نام خدا



دانشکده مهندسی برق و رباتیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد برق - گرایش کنترل

# کنترل فازی امیدانس دست دو انگشتی ربات برای گرفتن اجسام سفت

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی فاتح

دانشجو:

مزدک تیمورتاش لو

تابستان ۸۴



تقدیم به پدر و مادر مهربانم

و تقدیم به آنانکه

مرا آموختند و هستی بخشیدند

که هر چه از خویش می بینم کلمه است

## تشکر و قدر دانی

اگر هستی مبدا معرفت است من مجموع کلمات برخواسته از سینه بابهایم  
هر کلمه ای که بر لبانم جاری می شود عطر لطف آموزگاری و دبیری و استادی را  
در فضای ذهنم می پراکند و موج سپاسم را نثار نام او می سازد و چه مقدس  
است برایم آن نام و خداوندش چه باری بر دوش او نهاده.  
گاه با خویش می گویم یک استاد با چند جان زنده است و چه جاویدان است،  
روحی است عزیز در چند کالبد،

که باب هم اوست و هموست

بیش از این مرا یارای حمد او نیست و او از ستایشم فراست بار الهی عزیز ترش  
بدار.

## چکیده:

در این پایان نامه، روش های کنترل ضریب سختی مشتمل بر کنترل ضریب سختی به روش اکتیو ( فعال ) و کنترل ضریب سختی به روش پسیو ( غیر فعال ) بیان می گردد و نحوه طراحی کنترل کننده ضریب سختی به روش پسیو نشان داده می شود و فواید و معایب این دو روش کنترل ضریب سختی مشخص می شوند. پس از آن، مفهوم امیدانس از دید مکانیکی و تفاوت آن با ضریب سختی را به خوبی آشکار ساخته، سپس به مفهوم کنترل امیدانس پرداخته و نحوه به دست آوردن آن و فواید و معایب آن را بیان می کند. در ادامه انواع روشهای رایج کنترل امیدانس را که همگی بر مبنای مدل هستند، تشریح و با هم مقایسه می کند و نکاتی در مورد تعیین ضرایب در کنترل امیدانس و نتیجه آن بیان می گردد. سپس تفاوت دو مدل معمول کنترل امیدانس که شامل فیدبک نیرو و بدون فیدبک نیرو است با یک آزمایش نمایش داده می شود و با استفاده از معادلات، علت این تفاوت برای خواننده روشن می گردد.

با هدف بررسی کنترل امیدانس؛ به طراحی یک مجری نهایی ربات شامل یک موتور  $DC$  مغناطیس دائم و چرخ دنده های حلزونی و موازی پرداخته و معادلات حاکم بر آن بدست می آید و کنترل امیدانس مبتنی بر کنترل موقعیت روی آن پیاده می گردد. کنترل کننده فازی و کنترل کننده  $PID$  مناسب برای قانون امیدانس را طراحی نموده و کل سیستم با کنترل کننده های فازی و  $PID$  شبیه سازی می گردد. این دو کنترل کننده با یکدیگر مقایسه می شوند و نشان داده می شود کنترل امیدانس به همراه کنترل کننده فازی جوابی به مراتب بهتر می دهد.

در این شبیه سازی، اثر ضرایب قانون امیدانس بررسی می شود و نشان می دهیم که کنترل امیدانس با روش فازی به تغییر نوع جسم حساس نمی باشد. سپس توانایی قانون کنترل امیدانس در کنترل موقعیت نشان داده می شود و در پایان به موضوع کنترل امیدانس به همراه کنترل نیرو می پردازیم.

**کلمات کلیدی:** کنترل امیدانس، کنترل فازی، مجری نهایی، کنترل سختی اکتیو، کنترل سختی پسیو

## فهرست

صفحه	عنوان
الف	تقدیم .....
ب	تشکر و قدرانی .....
ت	چکیده .....
ث	فهرست .....
۱	فصل اول مقدمه
۱	( ۱) مقدمه .....
۷	فصل دوم سختی
۷	( ۲) سختی .....
۱۱	فصل سوم کنترل ضریب سختی به روش غیر فعال
۱۱	( ۳) کنترل ضریب سختی به روش غیر فعال .....
۱۳	فصل چهارم کنترل ضریب سختی به روش فعال
۱۳	( ۴) کنترل ضریب سختی به روش فعال .....
۱۹	فصل پنجم کنترل امیدانس
۱۹	(۵) کنترل امیدانس .....

۳۱	..... کاربرد کنترل امیدانس (۱-۵)
۳۳	..... فصل ششم مدل سازی سیستم کنترل
۳۳	..... (۶) مدل سازی سیستم
۳۴	..... (۱-۶) مجری نهایی
۳۸	..... (۲-۶) موتور
۴۰	..... (۳-۶) قانون کنترل امیدانس
۴۱	..... (۴-۶) مدل کردن جسم و دینامیک ربات
۴۴	..... (۵-۶) مدل کلی سیستم
۴۷	..... (۶-۶) طراحی کنترل کننده
۴۷	..... (۱-۶-۶) کنترل کننده PID
۴۸	..... (۲-۶-۶) کنترل کننده فازی
۵۱	..... (۷-۶) حسگرها
۵۲	..... فصل هفتم عملکرد سیستم و نتایج
۵۲	..... (۱-۷) انتخاب قانون امیدانس
۵۵	..... (۲-۷) تاثیر قانون امیدانس بر اجسام مختلف
۵۹	..... (۳-۷) مقایسه دو کنترل کننده

۶۵	..... ( ۴-۷ ) کنترل موقعیت به کمک کنترل امیدانس
۶۷	..... ( ۵-۷ ) کنترل نیرو به همراه کنترل امیدانس
۷۱	فصل هشتم نتیجه گیری و پیشنهاد
۷۱	..... ( ۸ ) نتیجه گیری و پیشنهاد
۷۳	..... ( ۹ ) ضمیمه الف
۷۶	..... ( ۱۰ ) ضمیمه ب
۷۶	..... ب-۱ سیستم فازی
۷۶	..... ب-۲ تاریخچه
۷۷	..... ب-۳ انواع سیستم های فازی
۸۱	..... ( ۱۱ ) مراجع



# فصل اول

## مقدمه

بازوی ماهر در بسیاری از کار بردهای صنعتی با محیط پیرامون خود تماس دارد. از آنجمله می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ردگیری مسیر مشخص در وضعیت حمل جسم.

- فشار دادن یک جسم.

- سنباده کاری.

- آسیاب کردن (میزان فشاریه سطح).

- مونتاژ کاری.

ربات در اجرای همه این کارها در حال ردگیری مسیری مشخص و اعمال نیرو به نحوی می باشد که بر مقاومت محیط غلبه نماید. به منظور کنترل نیرو بر اساس روشهای کنترل موقعیت نیاز به مدلی دقیق از مکانیزمها و شناخت کاملی از موقعیت و ضریب سختی محیط می باشیم و ربات های دقیق تنها در اندازه ها و ابعاد بزرگ و وزن زیاد ساخته می شود.

کنترل نیروی وارد بر محیط توسط مجری نهایی می تواند دقت موثر را افزایش دهد. الگوریتمهای کنترل نیرو را می توان به روش زیر تقسیم بندی نمود :

۱- روش هایی که مستلزم ارتباط بین موقعیت و نیروی اعمالی می باشد مثل کنترل ضریب سختی به روش فعال و کنترل ضریب سختی به روش غیر فعال [۲۳].

۲- روش هایی که بر اساس ارتباط بین سرعت و نیروی اعمالی مطرح می شود مثل کنترل امپدانس و کنترل سازگار با محیط.

۳- روشهایی که بسخوری موقعیت ونیرو را بکار می برند مثل کنترل ترکیبی موقعیت نیرو به صورت موازی و کنترل ترکیبی خارجی [۲۴].

۴- روشهایی که تنها بسخوری نیرو را به کار می برند.

۵- روشهایی که بر اساس پسیو بودن بنا نهاده شده اند [۱].

قوانین کنترلی را می توان به دو دسته کلی فعال و غیر فعال تقسیم بندی کرد [۲۵]، [۲۶].

چون کنترل ضریب سختی به عنوان زیر شاخه ای از کنترل امپدانس می باشد به بررسی روشهای اول و دوم مطرح شده در بالا می پردازیم و حرکت انعطاف پذیر و هدف از کنترل امپدانس را بیان می کنیم.

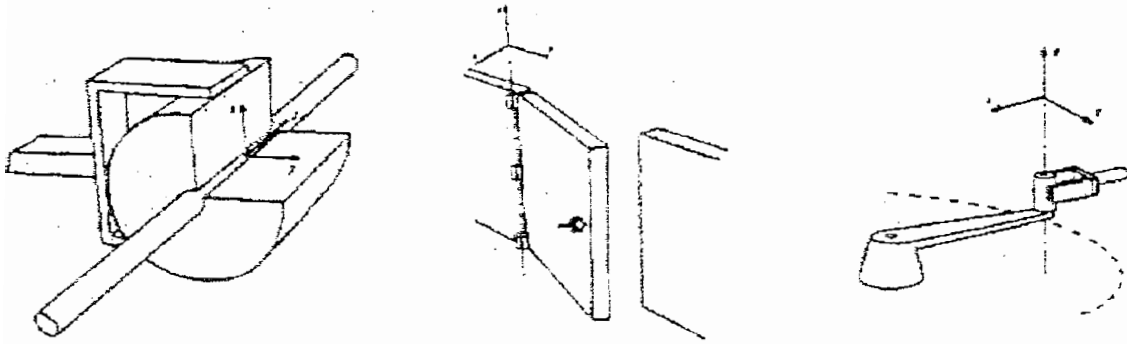
در اعمال انحصاری کنترل موقعیت، پس از مشخص نمودن نقطه نهایی و مبدا ربات در یک فضای کاملا آزاد حرکت می کند تا به نقطه نهایی خود برسد. در ردگیری مسیر مشخص نیز می توان مسیر را به اندازه های کوچک تقسیم نمود و همین عمل صورت گیرد. در صورت فقدان هر گونه مانع نیازی به کنترل نیرو نمی باشد. از طرف دیگر در اعمال انحصاری کنترل نیرو، نقطه نهایی بازوی ماهر در تمام جهات بایستی با محیط اطراف درگیر شود و اکیدا حرکتی وجود نخواهد داشت.

بالاخره در فضای آزاد نیز در انتهای حرکت ممکن است به یک سطح محدود کننده برسیم. فضای کاری با سطوح مقید موسوم به سطوح C در مرزهای بین فضای آزاد و فضای کاملا مقید قرار می-گیرد [۳۶].

در این حالت حرکت فقط در حالت مماس بر سطوح مقید امکان پذیر است در حالیکه نیرو می تواند به حالت طبیعی خود در همان جهت به کار رود. با توجه به اینکه کنترل موقعیت و کنترل نیرو هر دو در یک جهت و یک زمان امکان پذیر نیست. در نتیجه فضای کار انعطاف پذیر کنترل موقعیت در بعضی جهات و کنترل نیرو در جهات دیگر تعریف می شود [۱].

در بعضی مواقع هدف از کنترل موقعیت و نیرو این است که جسم در یک مسیر مشخص در حداقل زمان با توجه به محدودیت های سخت افزاری طی مسیر کند. در این مواقع که تماس وجود ندارد کنترل موقعیت به خوبی پاسخگو می باشد، از این موارد می توان به جوشکاری الکتریکی و نقاشی با اسپری اشاره کرد [۷]، [۲۲] ولی در بعضی کاربردها مثل سنباده کاری علاوه بر کنترل موقعیت، کنترل نیرو نیز لازم می باشد.

معمولا کار انعطاف پذیر را در یک دستگاه مختصات تعریف می کنیم، که بدان دستگاه مختصات انعطاف پذیر می گوییم و آن شش درجه آزادی، در امتداد و حول محورهای ایجاد می کند و ما برای هر درجه آزادی مشخص می کنیم که آیا کنترل موقعیت یا کنترل نیرو بکار رود و مطابق با فضای کار این دستگاه مختصات می تواند به نقطه نهایی یا محیط یا بازوی ماهر بچسبد [۱].



(شکل ۱-۱) انتخاب دستگاه مختصات انعطاف پذیر بر اساس محیط کار

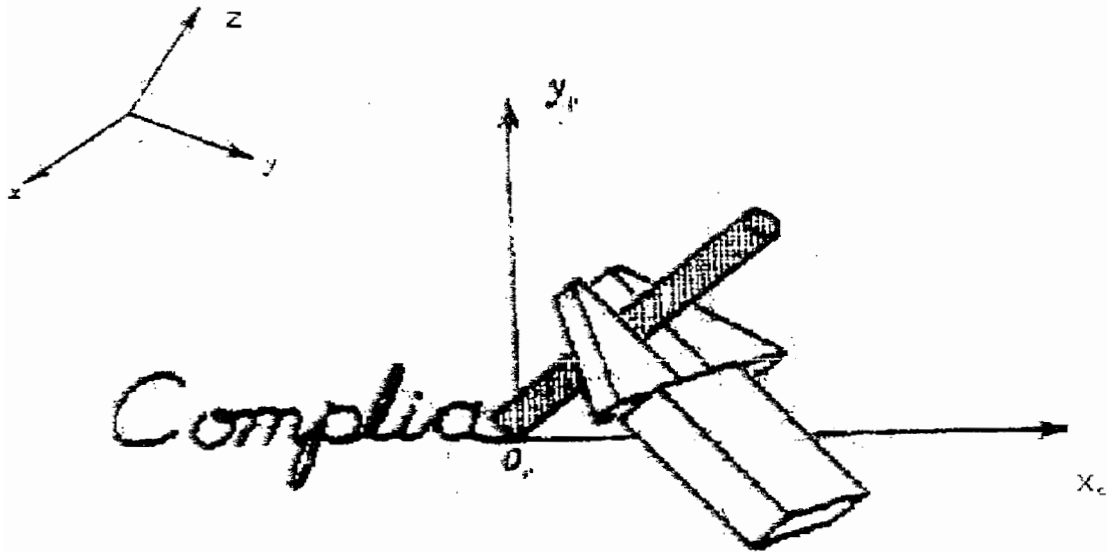
در همین راستا به تعریف دیگر می پردازیم که به آن نیاز داریم، در ادامه نحوه ساخت آن نیز توضیح داده می شود.

مرکز انعطاف پذیر نقطه ای است که در آن نقطه، نیروی خالص به کار رفته سبب یک انتقال خالص می شود و یک گشتاور خالص بکار رفته در آن نقطه باعث یک دوران خالص حول آن نقطه می شود. وقتی مرکز انعطاف پذیر وجود دارد (یا به طور مصنوعی ایجاد می شود) یک انتخاب طبیعی برای مبدا سیستم مختصات انعطاف پذیر در دستگاه مختصات انعطاف پذیر وجود دارد [۲].

برای مثال و تشریح تعاریف بالا به یک مثال می پردازیم و بیشتر درباره آن توضیح می دهیم. نوشتن *COMPLIANT* روی تخته سیاه را در نظر بگیرید کنترل خالص مسیر برای این مورد توصیه نمی شود زیرا خطای جزئی در امتداد مسیر قائم بر روی تخته ممکن است منجر به عدم تماس با صفحه تخته شود یا بر عکس باعث شکستن گچ گردد.

مادام که کنترل مسیر در طی صفحه تخته مورد نیاز است تا جمله مورد نظر قابل خواندن باشد انواع کنترل در جهت عمود بر تخته مورد نیاز است تا اینکه تماس کافی را بین گچ و تخته حفظ کند.

همانطور که در شکل ( ۱ - ۲ ) نشان داده شده است می توانیم یک سیستم مختصات انعطاف پذیر ( یا محدوده کاری ) که قرار است انجام شود و به آسانی توصیف می شود، تعریف کنیم:



شکل ( ۲ - ۱ ) نوشتن COMPLIANT روی تخته سیاه

یک سیستم انعطاف پذیر یک سیستم مختصات عمودی متغیر با زمان است به طوری که در هر لحظه و در امتداد هر محور، کار را می توان به صورت یک مسئله کنترل خالص مسیر یا نیرو ( گشتاور) بیان کرد. البته کلمه ( یا ) منحصر به فرد است زیرا که شخص نمی تواند یک درجه آزادی تنها را هم برای موقعیت و هم برای نیرو کنترل کند. همانطوری که نمی توان هم ولتاژ و هم جریان را در یک مقاومت مشخص نمود. در مثال عملی ( نوشتن  $Z_c$  ) نقطه انتهایی بازوی مکانیکی در ابتدا با شش درجه آزادی در موقعیت - جهت به سوی تخته سیاه حرکت می کند و هیچ آزادی در ارتباط با نیرو گشتاور ندارد، زیرا هیچ نوع منبعی برای ایجاد نیروی عکس العمل وجود ندارد در این لحظه وقتی که گچ به تخته رسید یک درجه آزادی، موقعیت حذف می شود و نیرو آن یک درجه آزادی در نیرو در امتداد محور  $Z_c$  به دست می آید. اگر گچ به تخته چسبید دیگر هیچ درجه آزادی در موقعیت - جهت نخواهیم داشت اما شش درجه آزادی در نیرو گشتاور داریم و بر عکس وقتی که تخته سیاه با یک سطح نرم عوض می شود، شخص می تواند به جای کنترل در امتداد محور  $Z_c$  کنترل موقعیت را برگزیند.

ارتباط دو گانه بين موقعيت و نيرو را مي توان بر اساس قيود طبيعي و قيود مصنوعي بيان کرد. قيود طبيعي در موقعيت يا نيرو به وسيله هندسه کاري که قرار است انجام شود مشخص مي شود. براي نمونه در مثال نوشتن  $L$  حضور تخته سياه یک قيد طبيعي در امتداد جهت  $Z_C$  را بيان مي کند علاوه بر آن اگر اتصال بين گچ و تخته سياه بدون اصطکاک فرض شود، از آنجايي که نيروي مماسي بايد صفر شود دو قيد طبيعي نيرو در امتداد جهات  $X_C$  و  $Y_C$  وجود خواهد داشت و سه قيد طبيعي اضافي نيز بيانگر اين واقعيت است که هيچ گشتاور عکس العملي در  $O_C$  وجود نخواهد داشت بطوريکه گشتاور هاي حول محور هاي  $X_C$  و  $Y_C$  و  $Z_C$  در سيستمهاي مختصات انعطاف پذير بايد صفر شود. در مثال نوشتن  $L$  مبدا سيستم مختصات انعطاف پذير،  $O_C$ ، در نقطه تماس بين گچ و تخته سياه انتخاب مي شود سپس عمل مورد نظر را مي توان به صورت يافتن یک نيروي مماسي مطلوب ( پينه نيروهاي مماسي قابل قبول ) در جهت  $Z_C$  توصيف کرد مادامي که مختصات  $X_C$  و  $Y_C$  در صفر نگه داشته شود. به عبارت ديگر مسير مورد نظر (در اینجا یک متن ) با مشخص کردن حرکت مبدا سيستم انعطاف پذير،  $O_C$ ، توصيف مي شود. در حالت عمومي تر انتخاب سيستم انعطاف پذير بستگي به کار معيني که قرار است انجام شود دارد [۲].

روش ترکيبي موقعيت- نيرو، موقعيت و نيرو را با هم کنترل مي نمايد، اما براي یک درجه آزادي در یک زمان اين کار امکان پذير نيست. بنابراين اين کار توسط دو حلقه کنترلي يکي مربوط به نيرو و ديگري مربوط به موقعيت انجام مي گيرد و با یک کلید عمل کنترل از یک حلقه کنترلي به حلقه کنترلي ديگر منتقل مي گردد و يا اينکه يکي از حلقه ها داخل ديگري قرار مي گيرد [۳]، [۲۷]. البته اين روش کنترلي ممکن است باعث ناپايداري هنگام کلید زدن شود [۲۸].

پايداري يکي از مسائل مهمي است که در هنگامي که ربات جسم را مي گيرد بايد مورد توجه قرار گيرد، زيرا ممکن است هنگامي که جسم توسط ربات گرفته شد به خاطر عکس العمل ناشي از فعل و انفعال بين بازوي ماهر و جسم. کل سيستم ناپايدار شود. اين مشکل به شکل قابل توجهي با استفاده از روش کنترل امپدانس حل مي شود زيرا در کنترل امپدانس رابطه بين نيرو و امپدانس از پيش تعيين مي گردد، به هر حال براي درک بهتر اين فعل و انفعال به تشریح آن مي پردازيم:

مسئله مهمی که در کنترل موقعیت بدن توجه نشده است فعل و انفعال هنگام گرفتن جسم می باشد، این بدن معنی است که هنگامی که بازوی ماهر جسم را می گیرد عکس العمل جسم نسبت به آن چگونه است. وقتی یک جسم گرفته می شود و بازوی ماهر بدن فشار می آورد جسم نیز به طور متقابل بدن فشار می آورد و این فعل و انفعال دینامیکی بین جسم و بازوی ماهر باعث می شود جسم به عنوان یک قسمت از بازوی ماهر از نظر سیستم کنترلی در آید. و در نتیجه پاسخ بازوی ماهر به سیگنالهای ارسال شده توسط کنترل کننده تغییر کند. این تاثیر گاهی بسیار شدید است و ممکن است باعث یک رفتار غیر مترقبه شود و حتی کل سیستم ناپایدار گردد.

اگر قطعه کار، حرکتی به طرف خارج به علت یک نیروی به سمت داخل ایجاد کند چون جسم و بازوی ماهر با هم در تماس هستند سیستم کنترلی باید بتواند رفتاری عکس ایجاد کند و باید حرکت به سمت داخل را بپذیرد و یک نیروی به سمت خارج را تولید کند. مانند آنچه در فنر و شوک گیر ماشین رخ می دهد و مانند یک امیدانس مکانیکی عمل می کنند. در واقع موضوع این است که چه موقع ربات باید رفتاری به سمت داخل و چه موقع رفتاری به سمت خارج داشته باشد و این بیانگر آن است که ربات از نظر فیزیکی چه کارهایی لازم است انجام دهد [۴].

کنترل امیدانس که در ادامه مورد بحث قرار می گیرد موقعیت ها یا نیروهای مورد نظر را مشخص نمی کند. اما به طور نسبتا مطلوبی روابط دینامیکی بین نیرو و موقعیت و یا به عبارت دیگر سختی های مکانیکی با امیدانس ها را معین می کند. از ویژگیهای این سیستم کنترل می توان به ساده بودن و مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت پارامتری اشاره کرد. اما معمولا تاکید بر حرکات تقریبا آرام دارد [۲].

در ابتدا به کنترل ضریب سختی به عنوان زیر مجموعه ای از کنترل امیدانس می پردازیم. و سپس به سراغ کنترل امیدانس می رویم. توجه به این نکته ضروری است که سختی ناشی از دو مجموعه است: یکی سختی خود ربات و دیگری ناشی از جسم ناشناس. پر واضح است که سختی جسم ناشناس مشخص نمی باشد ولی برای سختی خود ربات می توان تا حدودی آن را مشخص کرد و آن را افزایش داد. در زیر به تشریح سختی ربات به عنوان پیش زمینه ای برای کنترل سختی می پردازیم.

## فصل دوم

### سختی

سختی یک بازوی مکانیکی را در این قسمت تجزیه و تحلیل می کنیم، وقتی که نیرویی بر نقطه انتهایی یک بازوی مکانیکی وارد می شود نقطه انتهایی به اندازه ای که بستگی به سختی بازو و نیروی اعمالی دارد تغییر شکل می دهد سختی نقطه انتهایی بازو، مقاومت بازوی مکانیکی و از همه مهمتر دقت تعیین موقعیت در برابر بارها و نیروهای گسترده را تعیین می کند. همچنین همانطور که در ادامه به جزئیات آن پرداخته می شود سختی، یک متغیر کنترلی مهم است که اجازه می دهد ربات کارهای پیچیده را انجام دهد. ربات با سختی مناسب می تواند نیروهای نقطه انتهایی را با جابجایی های قابل قبول تضییق دهد. در این قسمت ما مفاهیم اصولی و خواص سختی یک بازوی مکانیکی را معرفی می کنیم.

چندین عامل باعث تغییر شکل در بازوی مکانیکی ماهر می شوند. برای مثال رابطهای بازو در هنگامی که یک نیروی بزرگ اعمال می شود ممکن است تغییر شکل بدهد. در حالت خاص هنگامی که طول بازوی مکانیکی بیشتر می شود مثل عملگرهای واقع در شاتل فضایی که در آن تغییر شکل منتهی در رابط اصلی، یک عامل در تغییر مکان نقطه انتهایی است. اما در اکثر ربات های صنعتی امروزی، عامل تغییر شکل در انتقال دهنده ها، کاهنده ها و سیستمهای محرکه، توزیع می شود.

همچنین یک موتور محرک به تنهایی دارای سختی محدودی است که توسط سیستم کنترل پسخور آن که گشتاور محرک مورد نظر را بر اساس اختلاف بین موقعیت مرجع و موقعیت اندازه گیری شده عملی تولید می کند، به دست می آید. پس سختی یک سیستم محرک بستگی به بهره مدار

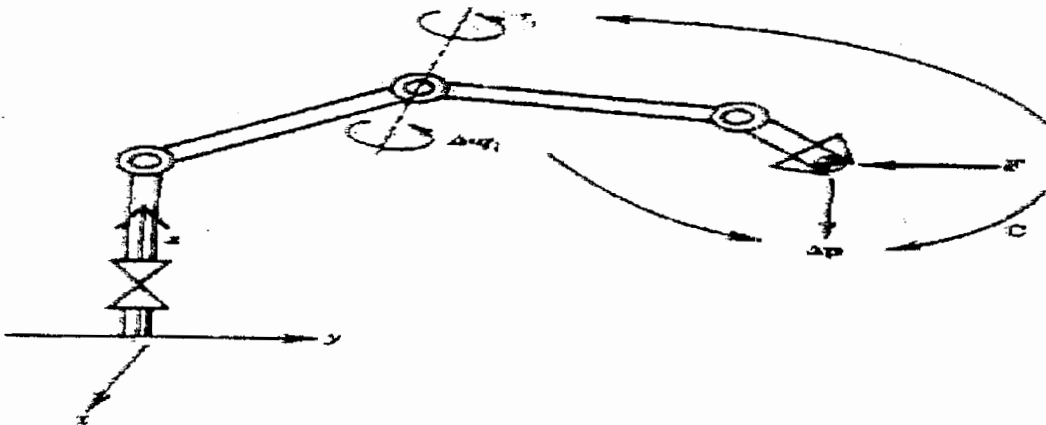
سیستم بسخوری آن دارد. ما سختی یک سیستم محرکه را که با سختی کاهشده ها و سختی انتقال دهندده ها ترکیب شده است، با ثابت فنر  $K_f$  که معرف جابجای مفصل به ازای نیرو - گشتاور منتقله است مدل می کنیم. یعنی:

$$T_f = K_f \Delta q_f \quad (۱-۲)$$

که  $T_f$  گشتاور مفصل و  $\Delta q_f$  جابجای محور مفصل است. در تجزیه و تحلیل بعدی فرض می شود که رابطهای بازو صلب بوده و سختی نقطه انتهایی را بر اساس مدلی که سختی آن توسط رابطه بالا داده شده بررسی می کنیم.

این سوال مطرح است که، چگونه سختی نقطه انتهایی را از طریق سختی های هر مفصل جداگانه به دست آوریم؟

همانطور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، نیرو و ممان نقطه انتهایی را با بردار  $M$  بعدی  $F$  و جابجایی حاصل را به وسیله  $\Delta P$  که هر دوی آنها با توجه به مختصات پایه تعریف شده اند مشخص می کنیم.



شکل (۱-۲) شماتیک ربات



اگر از جاذبه و اصطکاک در مفاصل چشم پوشی کنیم، نیروی نقطه انتهایی را می توان به گشتاورهای معادل مفاصل تبدیل کرد یعنی:

$$T = J^T F \quad (2-2)$$

که  $J^T$  ترانپاده ماتریس ژاکوبین بازوی مکانیکی  $M \cdot N$  است. در مفاصل جداگانه گشتاورهای مفصل،  $T$ ، به وسیله سختی های جداگانه به قسمی که در زیر بیان شده به جابجاییهای مفصل  $\Delta q$  ارتباط داده می شود. برای راحتی معادله:

$$T_i = K_i \Delta q_i \quad (3-2)$$

را به شکل برداری آن بازنویسی می کنیم.

$$T = K \Delta q \quad (4-2)$$

که  $K$  ماتریس قطری  $N \cdot N$  است و به شکل زیر داده می شود:

$$K = \text{diag}(K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (5-2)$$

قبلا دیدیم که جابجاییهای مفاصل جداگانه  $\Delta q$  جابجایی را در نقطه انتهایی  $\Delta P$  بر طبق رابطه زیر تولید می کنند:

$$\Delta P = J \Delta q \quad (6-2)$$

وقتی که سیستمهای جداگانه محرک مفاصل، فعالند و سختی ها نیز غیر صفرند ماتریس  $K$  معکوس پذیر است. با استفاده از معادلات بالا داریم:

$$\Delta P = C F \quad (7-2)$$

که:

$$C = J K^{-1} J^T \quad (8-2)$$

در نتیجه جابجایی نقطه انتهایی  $\Delta P$  به وسیله یک ماتریس  $C(M \cdot M)$  به نقطه انتهایی ارتباط داده می شود. ماتریس  $C$  به نام ماتریس انعطاف پذیری نقطه انتهایی بازو خوانده می شود.

اگر ژاکوبین بازوی مکانیکی یک ماتریس مربعی با ردیف های کامل باشد، ماتریس انعطاف پذیری معکوس پذیر است:

$$F = C^{-1} \Delta P$$

(۹-۲)

معکوس ماتریس انعطاف پذیری به نام ماتریس سختی نقطه انتزاعی بازو نامیده می شود. و وقتی ژاکوبین در یک جهت ناقص باشد ( بعضی از عناصر صفر باشند ) سختی حداقل در یک جهت بی نهایت می شود [۲].

با توجه به توضیحاتی که در مورد سختی داده شد و اینکه سختی جسم نیز باید در نظر گرفته شود به بحث در مورد کنترل ضریب سختی می پردازیم.

برای کنترل ضریب سختی دو روش وجود دارد:

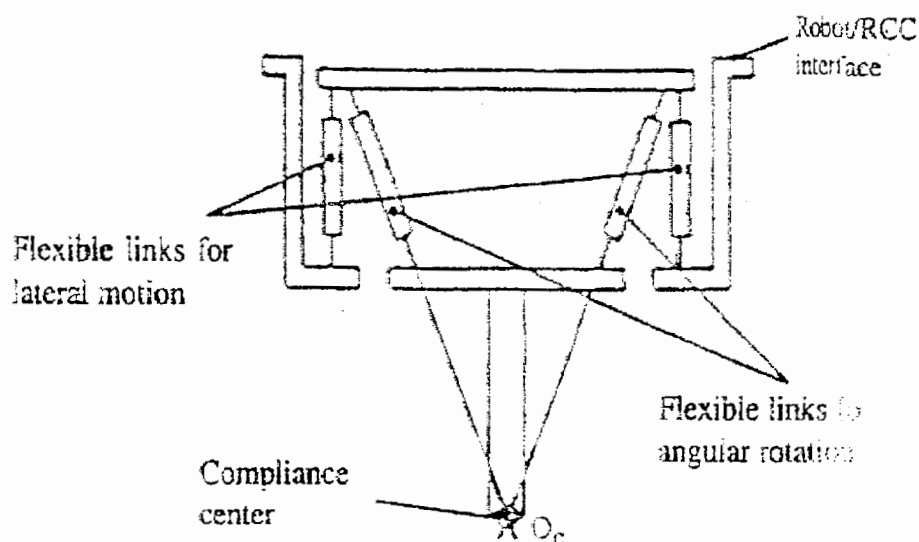
- کنترل ضریب سختی به روش فعال
- کنترل ضریب سختی به روش غیر فعال

که به تفصیل در ادامه توضیح داده می شود.

## فصل سوم

### کنترل ضریب سختی به روش غیر فعال (پسیو)

کنترل ضریب سختی به روش غیر فعال یا انعطاف پذیر پسیو یک راه حل ساده برای کاهش نیروی تماس بین ربات و محیط است و شامل یک ابزار مکانیکی در بازوی ماهر ربات است که قابلیت تغییر شکل تحت تاثیر نیروی تماس را دارد و این نتیجه قطعه اضافی نصب شده که قابلیت انعطاف دارد و الاستیکی می باشد، است و برای جبران خطای موقعیت به کار می رود [۳۴]، [۳۵].



شکل (۳-۳) اصول یک ابزار RCC [۳۷]

شکل ( ۳ - ۱ ) اصول این ابزار را نشان می دهد که RCC ( مرکز انعطاف پذیر کنترل شونده ) نامیده می شود. این نوع کنترل معمولاً در بازوی مکانیکی ماهر که کار ( میله و سوراخ ) را انجام می دهد به کار می رود ( کارهای مونتاژ کاری).

فرمول اصلی انعطاف پذیر پسیو از رابطه یک فنر خطی پیروی می کند که به صورت زیر می باشد:

$$dX = C F \quad (۱-۳)$$

که در آن ماتریس  $C$  انعطاف پذیری  $۶ \times ۶$  است و

$$F = [f^T, M^T]^T \quad (۲-۳)$$

نمایش ترکیبی از نیروی  $f$  و گشتاور  $M$  است. و بردار جابجایی

$$dX = [dP^T \quad \delta^T]^T \quad (۳-۳)$$

نمایشگر ترکیبی از انتقال  $dP$  و بردار چرخشی حول مبدأ  $\delta$  است. ماتریس انعطاف پذیری  $C$  قطری است. با توجه به دستگاه مختصات انعطاف پذیر، مرکز را مرکز انعطاف پذیر گوییم و در عمل، نیروی وارد شده در یک جهت به  $O_C$ ، باعث یک حرکت در همان جهت می شود و گشتاور وارد شده در یک جهت، باعث چرخش در همان جهت می گردد.

از جمله مزایا انعطاف پذیری پسیو سرعت زیاد، ارزان بودن و دقت کافی بدون نیاز به استراتژی پیچیده (معمولاً کمتر از ۰.۲ ثانیه برای یک مورد ۰.۱ میلی متری) می باشد.

این ویژگیها موفقیت را برای کارهایی مثل مونتاژ کاری فراهم می سازد (مثل وارد کردن یک میله داخل سوراخ). و محدودیت آن این است که، هر ابزار انعطاف پذیر برای یک کار خاص و یک قطعه مشخص استفاده می شود [۱].

مثلاً بین هایی با طول معین و جهت مشخص را داخل سوراخ قرار می دهد. اما اگر از کنترل نوع اکتیو استفاده شود اجازه انجام اعمال مختلف بر قطعات مختلف به ما داده می شود.

## فصل چهارم

### کنترل ضریب سختی به روش فعال (اکتیو)

در روش کنترل اکتیو می توان ضریب سختی نقطه نهایی ربات را کنترل نمود و کنترل موقعیت و نیرو را به طور همزمان امکان پذیر ساخت و کاربر می تواند سه پارامتر ضریب سختی انتقال و سه پارامتر ضریب سختی چرخشی طراحی شده را برای دستگاه مختصات انعطاف پذیر طراحی کند و ضریب سختی تحت یک برنامه کنترلی مشخص با توجه به مقادیر مختلف مورد نیاز تغییر کند [۲۳].

در این روش کنترلی، به ضریب سختی اندازه بزرگی در جهتی که کنترل موقعیت اعمال می شود نسبت داده می شود و بالعکس اندازه کوچکی به آن در جهتی که کنترل نیرو اعمال می شود نسبت داده می شود [۱].

مفهوم این عمل آن است که، در هنگام کنترل موقعیت یک ضریب سختی بزرگ وجود داشته باشد تا از هرگونه تغییر مسیر نقطه نهایی جلوگیری شود. این ضریب سختی بزرگ برای تمام درجات آزادی مورد نیاز در نظر گرفته می شود تا دقیقاً همان مسیر طراحی شده طی شود. برای واضحتر شدن مطلب فرض کنید می خواهیم یک خط بلند با خودکار روی کاغذ بکشیم. اگر ضریب سختی در کنترل موقعیت زیاد نباشد، چنانچه فشار خودکار بر روی کاغذ کم شود اثر خودکار باقی نمی ماند و اگر اثر فشار زیاد شود کاغذ پاره می گردد. در حقیقت موقعیت تعیین شده داخل کاغذ یا بیرون کاغذ قرار می گیرد و روی آن قرار نمی گیرد. همینطور خط کشیده شده در جهت مورد نظر راست در نمی آید و ممکن است انحراف به سمت بالا، پایین، چپ و یا راست پیدا کند که با زیاد کردن ضریب سختی در کنترل حرکت این مشکل حل می شود. اعمال ضریب سختی کم در کنترل نیرو باعث می

شود که تغییر کم در موقعیت باعث زیاد شدن بیش از حد نیرو نگردد که موجب خورد شدن خودکار یا پاره شدن کاغذ شود. این مطالب را از روی فرمول ضریب سختی نیز می توان استنباط کرد:

$$F_X = K_X \Delta X \quad (۱-۴)$$

که در آن  $\Delta X$  بردار جابجایی در جهت محور  $X$ ،  $K_X$  ضریب سختی طولی در جهت محور  $X$  و  $F_X$  مولفه بردار نیروی وارد بر مجری نهایی در جهت محور  $X$  است. اگر  $K_X$  بزرگ باشد تغییر کم  $\Delta X$  باعث تغییر زیاد  $F_X$  می شود. و از:

$$\Delta X = \frac{1}{K_X} F_X \quad (۲-۴)$$

نتیجه می شود که اگر  $K_X$  کوچک باشد یک تغییر کم در نیرو باعث تغییر زیاد  $\Delta X$  می شود، پس  $K_X$  باید بتواند گاهی کم و گاهی زیاد شود.

فرمول اصلی ضریب سختی بدین شکل می باشد:

$$F = K \Delta X \quad (۳-۴)$$

که  $K$  ماتریس قطری  $6 \times 6$  ضریب سختی می باشد و بردار جابجایی  $\Delta X$  در دستگاه مختصات مرجع قرار دارد و  $F$  بردار نیرو وارد بر مجری نهایی است. با نگاه به رابطه بالا می توان به سادگی به ارتباط  $F$  و  $\Delta X$  پی برد. فرض کنید که نیروی اصطکاک و نیروی دینامیکی جبران می شود یا به قدر کافی کوچک هستند که از آن صرفنظر کنیم. رابطه بین گشتاور و نیرو به صورت زیر می باشد:

$$T = J^T F \quad (۴-۴)$$

با توجه به:

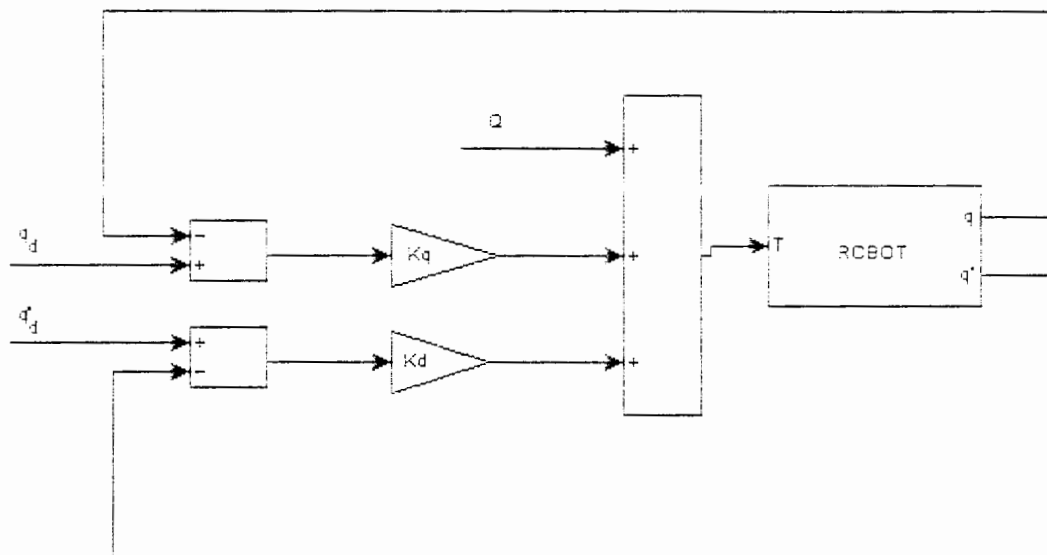
$$\Delta X = J \Delta q \quad (۵-۴)$$

که  $J$  ماتریس ژاکوبین است و  $\Delta q$  بردار متغیرهای مفصلی می باشد. به این نکته توجه داشته باشید که ژاکوبین برای هر موقعیت مفصلی جداگانه، در دستگاه مختصات نقطه نهایی محاسبه می شود.

از ترکیب معادلات بالا داریم:

$$T = J^T K J \Delta q = K_q \Delta q \quad (۶-۴)$$

ماتریس  $K_r$  ماتریس ضریب سختی مفصل نامیده می شود و یک ماتریس قطری نیست ولی متقارن می باشد و اعضای آن متناسب با ثابت های حلقه های کنترلی در فضای مفصلی است. و با بررسی این ماتریس می توان موقعیت های تکین را در ماتریس ژاکوبین نشان داد. این بدان معنا است که در این حالت ما نمی توانیم ضریب سختی مورد نظر را در راستا یا حول تمام درجات آزادی دستگاه مختصات انعطاف پذیر طراحی کنیم اصول شماتیک این کنترل در شکل (۴-۱) نشان داده شده است:



شکل (۴-۱) اصول شماتیک کنترل اکتیو

بردار گشتاور مفاصل توسط تابع زیر داده شده است:

$$T = K_p (q_d - q) + K_d (\dot{q}_d - \dot{q}) + Q \quad (4-7)$$

که  $Q$  برای جبران گشتاور گرانشی مدل شده است، و  $K_p$  ماتریس میرا کننده است [۱].

کنترل سختی را این چنین نیز می توان تعریف کرد:

بعنوان یک مثال ساده از استراتژی کنترل فعال برای تنظیم سختی نقطه انتهایی به سیستم با یک درجه آزادی شکل (۴-۲) توجه نمایید. ما فرض می کنیم که بازوی ماهر در تماس با محیط در موقعیت  $X_r$  مطابق با شکل (۴-۲) قرار دارد.

اگر موقعیت بازوی ماهر  $X_r > X$  باشد آنگاه نیروی وارد بر محیط توسط این رابطه بدست می آید.

$$F_e = K_e (X - X_e) \quad (8-4)$$

که در آن  $K_e$  سختی محیط است. توجه نمایید که در واقع تغییر شکل  $X - X_e$  شامل تغییر شکل بازوی ماهر، سازه پشتیبانی کننده، ابزار و غیره می‌شود. همچنین تغییر شکل سطح تماس را نیز شامل می‌شود. کل سیستم توسط معادله (8-4) اداره می‌شود.

$$F = K_e (X - X_e) + M \ddot{X} \quad (9-4)$$

که در آن  $F$  نیروی ورودی است. حالا باز  $X$  مطابق شکل، بسادگی می‌توان نشان داد که در قانون کنترل PD فرمول (9-4) هرگاه ضرایب مثبت باشند آنگاه یک سیستم پایدار را نتیجه می‌دهد.

$$F = K_p (X_d - X) - K_v \dot{X} \quad (10-4)$$

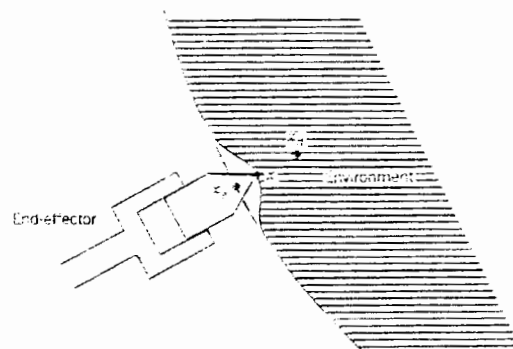
نیروی حالت ماندگار وارد به محیط چنین است.

$$F_e = \frac{K_p K_e}{K_p + K_e} (X_d - X_e) \quad (11-4)$$

هرگاه ضریب سختی محیط  $K_e$  بزرگ باشد آنگاه نیروی بدست آمده از بالا تقریباً چنین خواهد بود.

$$F_e = K_p (X_d - X_e) \quad (12-4)$$

این پیشنهاد می‌دهد که برای وارد کردن نیروی  $F_e$  روی یک جسم می‌توانیم یک موقعیت مطلوب را که اندکی داخل جسم است را بعنوان فرمان موقعیت مطلوب بدهیم و طرح کنترل موقعیت را بکار ببریم. قانون کنترل بالا برای حذف خطای موقعیت، باعث ایجاد نیروی وارد بر جسم  $F_e$  در حالت ماندگار می‌شود. حالا ضریب موقعیت  $K_p$  بعنوان سختی مطلوب بازوی ماهر تفسیر می‌شود.



شکل (4-2)

کنترل سختی



در حالت یک بازوی ماهر، ب  $\nu$  درجه آزادی یک صرح آنترن سختی می‌تواند بشرح پایین اجرا شود. تصور نمایید که یک سختی مطلوب در امتداد هر درجه آزادی در یک دستگاه مختصات انعطاف معین  $O_C, X_C, Y_C, Z_C$  انتخاب شود که می‌تواند با یک ماتریس قطری  $6 \times 6$  با نام  $K_X$  نشان داده شود. اعضای قطر آن ثابتهای سختی طولی و پیچشی نسبت به  $O_C, X_C, Y_C, Z_C$  هستند. برای مثال، در کار نوشتن، می‌خواهیم که سختی کوچکی در جهت  $Z_C$  و سختی خیلی بزرگی در امتداد جهات  $X_C$  و  $Y_C$  همچنین سختی پیچشی بزرگی حول هر کدام از محورهای مختصات داشته باشیم. به ازای  $K_X$  معین، نیروی مطلوب  $F$  در پاسخ به تغییر مکان مجازی  $\delta X$  چنین می‌شود.

$$F = K_X \delta X \quad (4-11)$$

چنانچه  $\delta X$  تغییر مکان منتهی مفضل باشد آنگاه برای تغییر مکانهای کوچک داریم،

$$\delta X = J(q) \delta q \quad (4-12)$$

که در آن  $J(q)$  ژاکوبی بازوی ماهر است. بطور مشابه

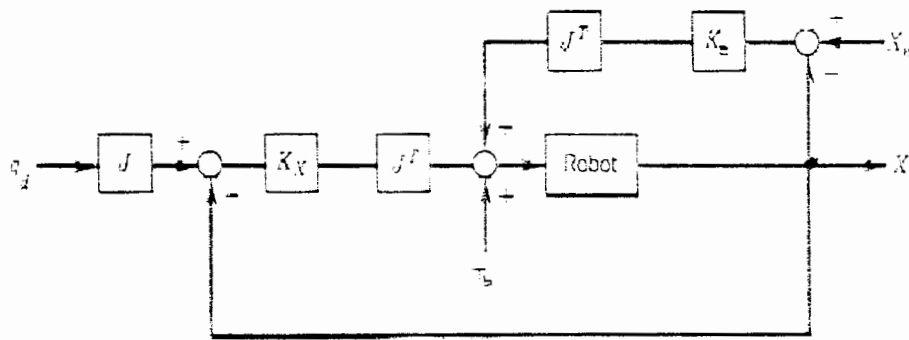
$$T = J(q)^T F \quad (4-13)$$

ترکیب معادلات بالا نتیجه می‌دهد.

$$T = J^T K_X J \delta q = K_q(q) \delta q \quad (4-14)$$

ماتریس وابسته به پیکربندی  $K_q(q)$  ماتریس سختی مفصل نامیده می‌شود. ماتریس سختی مفصل، سختی نقطه انتهایی را نسبت به دستگاه مختصات انعطاف، برحسب گشتاورهای مفاصل بیان می‌کند. این سختی می‌تواند بوسیله کنترل تقریبی گشتاورهای مفاصل بدست آید. شکل (۴ - ۳) معماری کنترل یک مفصل را نشان می‌دهد که می‌خواهد به یک سختی مطلوب برسد. قانون کنترلی که اجرا می‌شود چنین است.

$$T = J^T K_X J (q_d - q) + T_b \quad (4-15)$$



شکل (۴ - ۳) بلوک دیاگرام کنترل سختی

جمله اضافه شده  $T_b$  می تواند برای اضافه نمودن میرایی برای پایداری بکار رود یا مثلاً برای جبران گشتاورهای اصطکاک و جاذبه استفاده شود. در حالت ماندگار با فرض پایداری نیروی وارد بر محیط برابر است با:

$$F = K_V \delta X \quad (۴ - ۱۶)$$

که مطلوب است.

تحلیل بالا هنگامی که پاسخ حالت ماندگار سیستمهای پایدار را بیان می کنیم کافی نیست و کنترل پاسخ گذرا در بر نمی گیرد. یعنی کنترلی روی نیروهای گذرا ناشی از رفتار دینامیکی سیستم وجود ندارد [۳].

بعضی فواید کنترل ضریب سختی به روش اکتیو آن است که:

- نسبتاً آسان قابل اجرا است
- ماتریس ضریب سختی می تواند در هنگام انجام کار برای دقت بیشتر در رفتار ربات برای قیود کارهای مختلف تغییر کند [۱].

مثلاً فرض کنید روی یک نوار نقاله اشیا مختلف در حال حرکت است. برای اینکه ربات بتواند این اشیا را بردارد بدون اینکه یک شی شکننده خورد شود یا یک جسم سنگین لغزنده بیفتد، احتیاج به ماتریس های سختی مختلف دارد و این کار را می توان به روش کنترل ضریب سختی اکتیو انجام داد.

# فصل پنجم

## کنترل امپدانس

در این قسمت، یک روش کنترل نیرو و موقعیت بنام کنترل امپدانس مطرح می شود. هدف از کنترل امپدانس تعیین دقیق موقعیت و مسیر حرکت و تعیین دقیق نیرو نیست، بلکه تنظیم رابطه بین موقعیت و نیرو هدف است، یا به عبارت دیگر، کنترل امپدانس مکانیکی است. با استفاده از دوگانه‌های برق-مکانیک که نیرو را با ولتاژ و سرعت را با جریان متناظر می کند نسبت نیرو به سرعت (گشتاور به سرعت زاویه ای) به امپدانس مکانیکی سیستم تعبیر می شود که در حوزه فرکانس بوسیله رابطه زیر نمایش داده می شود:

$$\frac{F_v(S)}{V(S)} = Z(S) \quad (5-1)$$

که در آن  $F_v(S)$  و  $V(S)$  و  $Z(S)$  به ترتیب تبدیل لاپلاس های نیرو، سرعت، امپدانس است. ممکن است بر حسب موقعیت  $X(S)$  به صورت زیر بنویسیم:

$$\frac{F_v(S)}{X(S)} = S Z(S) \quad (5-2)$$

که یک امپدانس مطلوب در حالت خطی ممکن است چنین بدست آید:

$$S Z(S) = -(M S^2 - B S + K) \quad (5-3)$$

تابع تبدیل رابطه (5-2) با معادله دینامسیل زیر ارتباط دارد:

$$M \ddot{X} + B \dot{X} + K X = -F, \quad (4-5)$$

که پاسخ مطلوب بازوی ماهر را نشان می دهد ضرایب  $M$ ،  $B$  و  $K$  به ترتیب لختی، میرایی و سختی را نشان می دهد. کار سیستم کنترل امیدانس این است که پاسخ مطلوب سیستم را که توسط معادله (5-3) داده می شود فراهم کند. کنترل امیدانس یک مجموعه منسجم از انواع استراتژی های مختلف کنترل را نشان می دهد. استراتژی کنترل سختی که قبلاً توضیح داده شد حالت خاص از کنترل امیدانس است که فقط به رابطه حالت ماندگار نیرو تغییر مکان توجه دارد. دقت کنید که یک مجری نهایی که در فضای آزاد حرکت می کند، نیروی صفر را برای سرعت داده شده به محیط وارد می کند. پس دارای امیدانس صفر است. بر عکس اگر یک بازوی ماهر بطور صلب به دیوار بچسبد به ازای هر مقدار نیروی وارد بر دیوار بدون حرکت خواهد بود و در نتیجه دارای امیدانس بی نهایت است. بنابراین کنترل موقعیت تنباً و کنترل نیروی تنباً می تواند بعنوان حالات خاص کنترل امیدانس مورد توجه قرار گیرد که به ترتیب مربوط به امیدانس صفر و امیدانس بی نهایت می شوند [3].

ضبق نظریه هوگان ایده اصلی کنترل امیدانس واگذار کردن رفتار دینامیکی تعیین شده برای ربات در حالیکه ربات متاثر از تداخل عمل با محیط می باشد، است. عملکرد طراحی شده امیدانس با یک دینامیک عمومی که با سیستم جرم و فنر نمایش داده می شود، مشخص می شود.

$Z$ ، سرعت نقطه نهایی، و نیروهای فراهم شده برای آن وابسته به امیدانس مکانیکی ( $Z$ ) است. همانطور که دیدید در قلمرو فرکانس این رابطه به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$F(S) = S Z(S) X(S) \quad (5-5)$$

در این حالت ربات، شبیه یک سیستم مکانیکی رفتار می کند که امیدانس  $Z$  آن با فازهای مختلف کاری متغیر است در حالت عمومی ما فرض می کنیم که ربات معادل یک سیستم درجه دوم جرم و فنر و میراکننده عمل می کند که تابع تبدیلی به صورت زیر دارد:

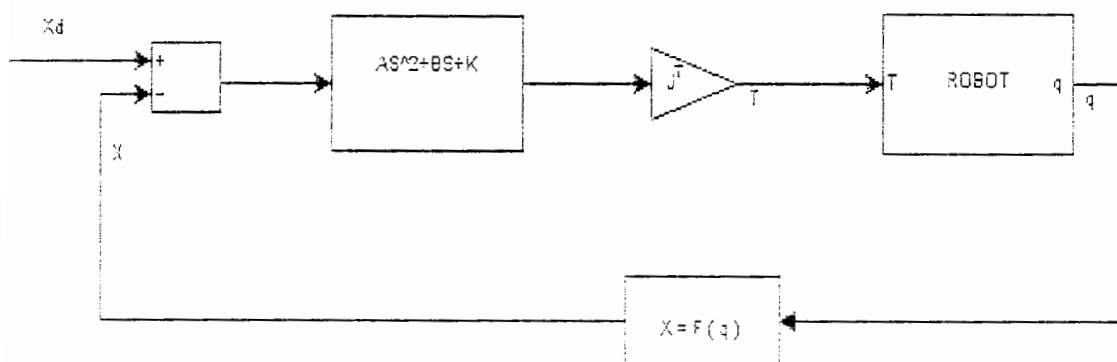
$$S Z(S) = A S^2 + B S + K \quad (6-5)$$

که  $A$ ،  $B$  و  $K$  نمایشگر ماتریس های اینرسی و میراکننده و ضریب سختی طراحی شده می باشد. مقادیر این ماتریس ها برای فراهم کردن عملکرد طراحی شده مطلوب انتخاب شده است:

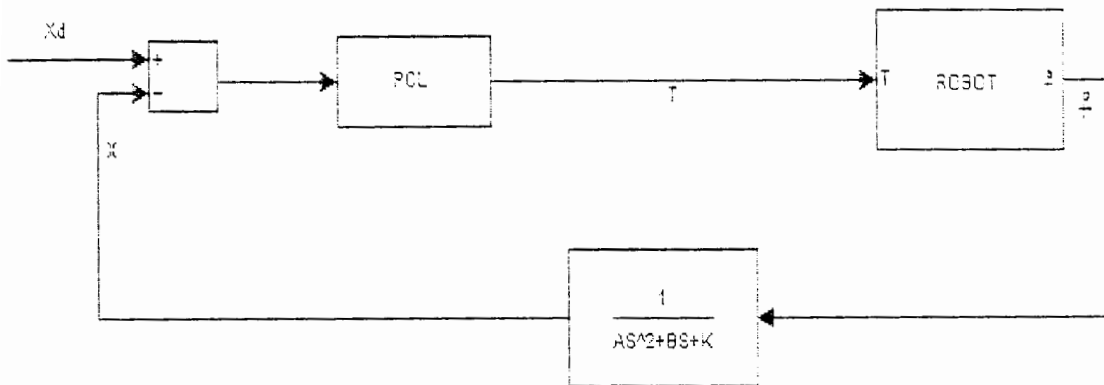
- در جهتی که محل تماس یک دینامیک محدود و کم در ربات انتظار دارد،  $A$  زیاد انتخاب می شود. این مفهوم نتیجه مستقیم اینرسی است زیرا هر چه جسم سنگین تر باشد دینامیک کمتری دارد.

- در جهاتی که نیازمند کاهش انرژی جنبشی هستیم مقدار  $B$  زیاد انتخاب می شود و بنابراین میرا نمودن بیشتر نوسانات را داریم.

- ضریب سختی روی دقت کنترل موقعیت تاثیر گذار است. در طول جهتی که کنترل نیرو داریم باید  $K$  به قدر کافی کم باشد تا نیروی تماس را محدود کند، و بر عکس در جهتی که کنترل موقعیت داریم، کاربر باید یک ضریب سختی بزرگ را برای فراهم کردن دقت در نقطه نیایی تنظیم کند. به طور کلی دو گروه کنترل امیدانس قابل اجرا است و این تفاوت ناشی از آن است که فیدبک نیرو وجود دارد یا وجود ندارد.



شکل ( ۱-۵ ) کنترل امیدانس بدون فیدبک نیرو



شکل (۲-۵) کنترل امیدانس با فیدبک نیرو - PCL: قانون کنترل موقعیت

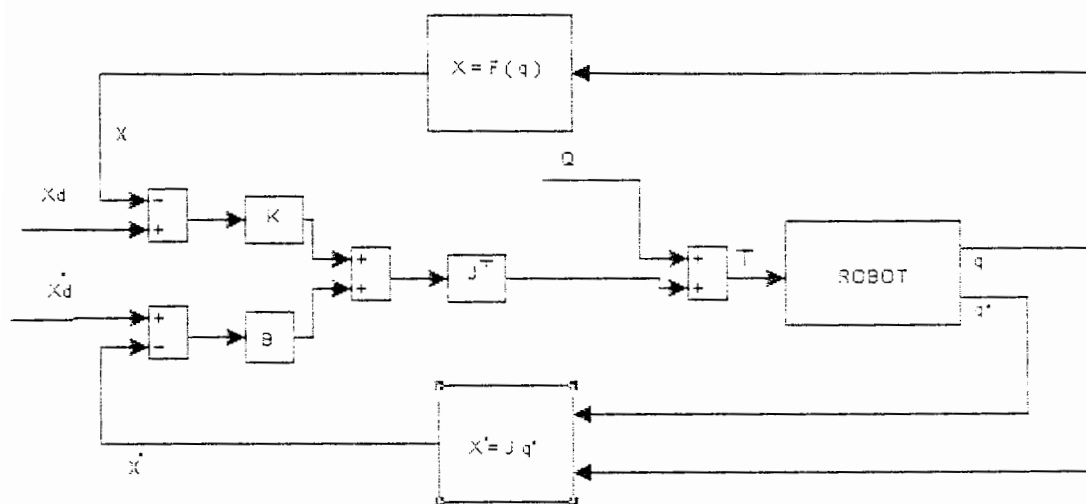
به نظر می رسد در مدل اول از دینامیک سیستم صرف نظر شده است در نتیجه:

$$F_d = F \quad (۶-۵)$$

شکل (۳-۵) یک شماتیک کنترل امیدانس نوع اول قابل اجرا را نشان می دهد. از دینامیک ربات صرف نظر شده است. قانون کنترل بوسیله رابطه زیر داده می شود:

$$T = J^T [B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X)] + Q \quad (۷-۵)$$

ماتریس  $B$  و  $K$  شامل ضرایب مشتقی و تناسبی در فضای کار می باشد که می تواند به عنوان ماتریس ضریب سختی و ماتریس میرا کنندگی ربات تفسیر بشود. به عنوان یک یادآوری، بردار  $Q$  برای جبران و نمایش گشتاور جاذبه ای به کار رفته است. این شمای کنترلی در مرکز انعطاف پذیر در نقطه  $X_d$  طراحی شده قرار می گیرد و این معادل یک کنترل PD در فضای کار می باشد.



شکل (۵-۳) شمای کنترل امپدانس بدون فیدبک سنسور نیرو

و با یک قانون کنترل PD در فضای کار.

در ادامه ما در شکل از کنترل امپدانس فرم دوم را نمایش می دهیم.

اجازه بدهید که ما مدل دینامیک ربات را به کار بگیریم که  $F$  در محیط نوشته می شود (نیروی وارد شده توسط محیط است و در دستگاه مجری نهایی نوشته می شود).

$$T = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q(q) + J^T F_e \quad (۸-۵)$$

رفتار طراحی شده یا قانون کنترل به صورت زیر تعریف می شود:

$$F_e = A(\ddot{X}_d - \ddot{X}) + B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) \quad (۹-۵)$$

که منتهی می شود به:

$$\ddot{X}(t) = \ddot{X}_d + A^{-1} [B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) - F_e] \quad (۱۰-۵)$$

برای فراهم کردن این شمای کنترل امپدانس می توانیم قانون کنترل غیر خطی دکوپله شده در فضای کار را بررسی کنیم. قانون کنترل را با جایگذاری  $\ddot{X}(t)$  در رابطه بازنویسی می کنیم، که معادله (۱۰-۵) را نتیجه می دهد. یا به عبارتی دیگر فرض کنیم معادله اصلی ربات به شکل فرمول (۵-

۱۱) است:

$$T = M(q) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + J^T F_c \quad (۱۱-۵)$$

که در آن:

$$H(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) \dot{q} + Q(q) \quad (۱۲-۵)$$

می باشد با داشتن فرمول

$$\ddot{q} = J^{-1} (\ddot{X} - \dot{J} \dot{q}) \quad (۱۳-۵)$$

که بدین شکل بدست می آید:

$$\dot{X} = J \dot{q} \quad (۱۴-۵)$$

پس با مشتق گیری داریم:

$$\ddot{X} = \dot{J} \dot{q} + J \ddot{q} \quad (۱۵-۵)$$

یا

$$J \ddot{q} = \ddot{X} - \dot{J} \dot{q} \quad (۱۶-۵)$$

یا

$$\ddot{q} = J^{-1} (\ddot{X} - \dot{J} \dot{q}) \quad (۱۷-۵)$$

که همان فرمول مورد نظر است.

حال با استفاده از فرمولهای (۱۰-۵) و (۱۱-۵) و (۱۲-۵) و (۱۳-۵) داریم:

$$T = M J^{-1} \{ \ddot{X}_d + A^{-1} [B (\dot{X}_d - \dot{X}) + K (X_d - X) - F_c] - \dot{J} \dot{q} \} + H(q, \dot{q}) + J^T F_c \quad (۱۸-۵)$$

فرم دیگری از قانون کنترل می تواند از مدل دینامیک در فضای کار بدست آید [۳۸].

از ترکیب مدل سینماتیک مرتبه اول و دوم با معادله دینامیک (۱۸-۵) نتیجه می شود:

$$J^{-T} T = M_{xx}(q) \ddot{X} + C_{xx}(q, \dot{q}) \dot{X} + Q_{xx}(q) + F_c \quad (۱۹-۵)$$

که  $J^{-T}$  معکوس  $J^T$  است.

$M_{xx}(q)$  ماتریس اینرسی در فضای کار برابر است با:



$$M_X(q) = J^{-T} M(q) J \quad (20-5)$$

$C_X(q, \dot{q})$  بردار گشتاور گریز از مرکز و کوریولیوسی در فضای کار است و برابر است با:

$$C_X(q, \dot{q}) = J^{-T} C(q, \dot{q}) J^{-1} - M_X(q) \dot{J} J^{-1} \quad (21-5)$$

$Q_X(q)$  بردار گشتاور جاذبه ای است که در فضای کاریان شده و برابر است با:

$$Q_X(q) = J^{-T} Q(q) \quad (22-5)$$

ما قانون کنترل دکوپله شده را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$T = J^T [M_X(q) W(t) + C_X(q, \dot{q}) \dot{X} + Q_X(q) + F_v] \quad (23-5)$$

با جایگذاری  $W(t)$  بوسیله  $\ddot{X}(t)$  داده شده توسط معادله (20-5) منتهی می شود به:

$$T = J^T M_X(q) \{ \ddot{X}_d + A^{-1} [B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X)] \} + J^T \{ C_X(q, \dot{q}) \dot{X} + Q_X(q) + [I - M_X(q) A^{-1}] F_v \} \quad (24-5)$$

که شمای کنترلی آن در شکل (24-5) نمایش داده شده است. این شمای کنترلی برای عملی کردن آسانتر است مخصوصاً در جاهایی که قانون کنترل باید محاسبه شود. شمای کنترلی (24-5) در موارد شبه استاتیک ترجیح داده می شود یعنی مواقعی که ماتریس اینرسی و ژاکوبین می تواند ثابت فرض شود [39].

بنابراین  $C_X(q, \dot{q}) \dot{X}$  و  $J$  بررسی شده می تواند معادل صفر قرار گیرد و معادله (24-5) تبدیل شود به:

$$T = J^T M_X(q) A^{-1} [A \ddot{X}_d + B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) - F_v] + Q(q) + J^T F_v \quad (25-5)$$

برای درک بهتر نحوه بناست آوردن این فرمول یا فرمول (25-5) به ضمیمه الف مراجعه کنید. در این فرض، منظور از شبه استاتیک بودن بیشتر سخت بودن جسم است، یعنی ماتریس اینرسی تغییر شکل ندهد و در نتیجه ژاکوبین ثابت بماند. بدین ترتیب مشتق ژاکوبین معادل صفر می شود. اما در مورد نیروهای کوریولیوسی و گریز از مرکز با توجه به درگیر بودن جسم و بازو و سرعت کم جسم در این مواقع و اینکه نیرو کوریولیوسی ناشی از ضرب دو سرعت زاویه کوچک و نیروی گریز از

مکان متناسب با محدوده سرعت ادامه ای می باشد. نتیجه حاصل خیلر کدجکت شده قابل صرف نظر کردن می باشد.

توجه کنید که در رابطه (۵-۱۲) بردار  $F_r$  دو بار به چشم می خورد یکبار با عبارت  $J^T F_r$  که برای تکانه (wrench) خارجی بوسیله ربات بکار می رود و یکبار با عبارت:

$$-J^T M_X A^{-1} F_r \quad (۵-۲۶)$$

که نمایشگر فیدبک نیرو است.

به ضریب  $A^{-1} J^T M_X$  که در کنار آن قرار گرفته است توجه کنید اگر:

$$A = M_X(q) \quad (۵-۲۶)$$

شود عبارت شامل  $F_r$  ناپدید می شود که قانون کنترل دکویله شده در شکل (۵-۴) می باشد.

$$T = M(q) J^{-1} \{ \ddot{X}_d + A^{-1} [B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K[(X_d - X) - J\dot{q}]] + H(q, \dot{q}) \} \quad (۵-۲۶)$$

توجه به چند نکته زیر نیز خالی از لطف نیست:

- زمانهای خیلی قبل از فرموله شدن کنترل امیدانس بوسیله هوگان در موارد خاص این کنترل در متون شبیه آنچه بر پایه ماتریس سختی و یا ماتریس دمپینگ بود مورد توجه قرار گرفته بود که به صورت  $A=0$  و  $B=0$  در بعضی متون و در بعضی به صورت  $A=0$  و  $K=0$  بوده است [۴۰].

- کنترل ضریب سختی که توسط سالیسبوری بیان شده است یک مورد خاص از کنترل امیدانس بود که  $A=0$  و  $B=0$  بود [۸].

بله: از آنجمله می‌تواند پس از آنکه  $F_{cv}$  را حذف کنیم که نتیجه  $F_{cv}$  برای ساده‌سازی فرقی که می‌ماند:

$$F_{cv} = G(F_{cv} - F_{cv}) \quad (۲۹ - ۵)$$

حالا فرقی که می‌ماند از کنترل چندین نیرو زیر پیروی کنیم:

$$M_{cv} \ddot{X} = -F_{cv} \quad (۲۸ - ۵)$$

به شکل یک اینرسی می‌توانیم:

که همان چندین نیرو باعث حرکت  $F_{cv}$  می‌شود. و نظری که در محصله قرار گرفته می‌تواند سیستم را

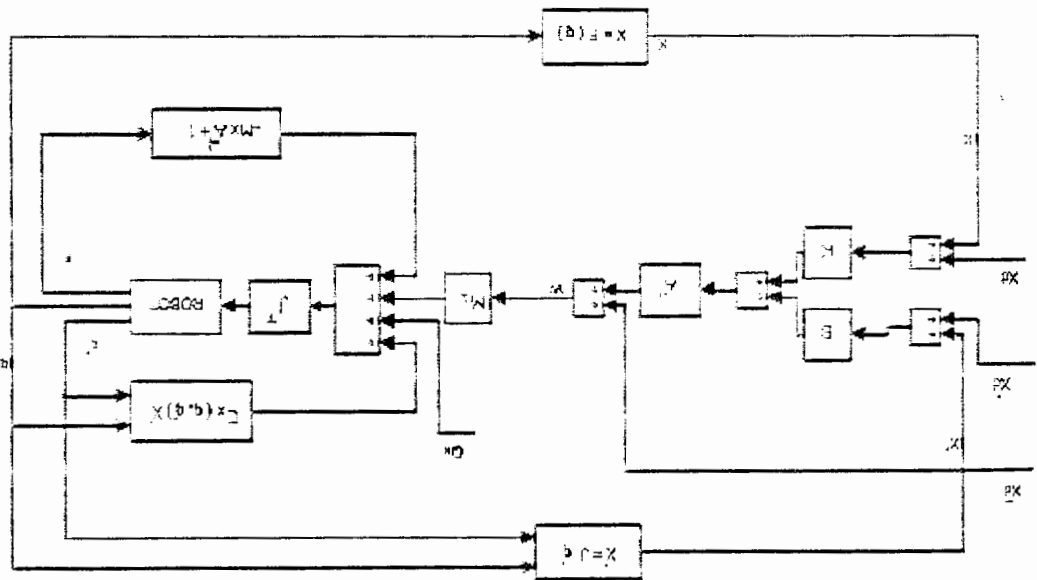
$$M_{cv} \ddot{X} = F_{cv} - F_{cv} \quad (۲۷ - ۵)$$

نویشت:

سیستم برای پیروی از یک رابطه ریاضی می‌تواند فرقی که می‌ماند را کاملاً مشاهده کنیم. یا این فرقی که می‌ماند را به یک سیستم خردم مدل ساده سازی پیروی می‌تواند ولی فرقی که می‌ماند را به یک سیستم خردم مدل ساده سازی پیروی می‌تواند ولی فرقی که می‌ماند را به یک سیستم خردم مدل ساده سازی پیروی می‌تواند ولی

در ادامه به صورت در مورد اینکه چرا در کنترل امپدانس از نیرو چندین می‌گیریم و این چه اثری

شکل (۴-۵) قانون کنترل امپدانس در یک سیستم پیروی از یک رابطه ریاضی



$$M_{sc} \ddot{X} = -(G+1)F_{ext} \quad (۳۰ - ۵)$$

با تقسیم بر  $G+1$  و تعریف:

$$M = \frac{M_{sc}}{G+1} \quad (۳۱ - ۵)$$

داریم:

$$M \ddot{X} = -F_{ext} \quad (۳۲ - ۵)$$

که مشابه معادله (۲۸ - ۵) است و از نظر شاهد خارجی این سیستم معادل سیستم اول با تغییر در دینامیک سیستم است. یعنی تغییر مقدار  $M$  که تعبیر به اینرسی شد. پس فیدبک گرفتن باعث شد اینرسی کاهش یابد و همانطور که می دانید با کاهش اینرسی راحتتر می توان به سیستم تغییر شتاب داد، یا به عبارت دیگر با نیرویی کمتر شتاب را تغییر داد. البته یادمان نرود که این کار بر چشم پوشی کردن از دینامیک محیط بنا نهاده شد. این عدم توجه به محیط باعث رد نتیجه گیری نمی شود. بلکه می توان آن را تعمیم داد. اگر فرض کنید که محیط به صورت یک فنر خطی با ضریب سختی  $K$  و با یک میراکنندگی خطی درونی که با ضریب ویسکوزیته  $B$  نمایش داده می شود که با نیرو رابطه زیر را دارد:

$$F_{ext} = B \dot{X} + K X \quad (۳۳ - ۵)$$

اگر از معادله بالا لاپلاس بگیریم و دوباره آن را مرتب کنیم داریم:

$$X = \frac{F_{ext}}{B S + K} \quad (۳۴ - ۵)$$

با ترکیب معادلات کنترلر و سیستم، تابع انتقال زیر بدست می آید:

$$\frac{F_{ext}}{F_{ref}} = \frac{(BS + K) \frac{G}{G+1}}{MS^2 + BS + K} \quad (۳۵ - ۵)$$

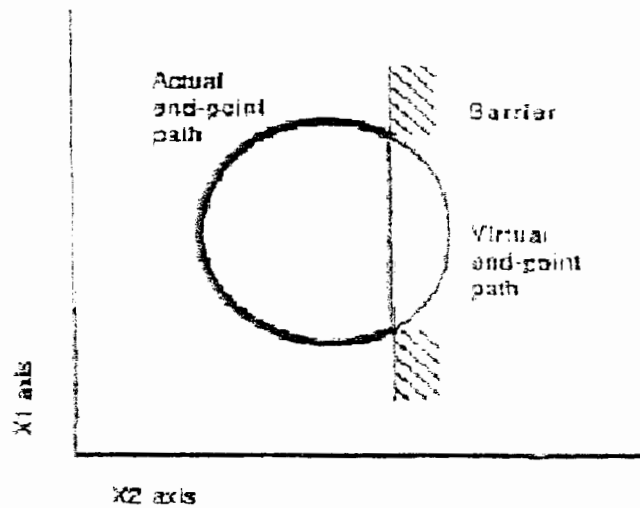
که این معادل تابع انتقال بین  $F_{ref}$  و  $F_{out}$  با تابع صفر می باشد و رابطه بین نیروی خارجی را با نیروی مرجع بیان می کند.

در حالت ماندگار داریم:

$$\frac{F_{out}}{F_{ref}} = \frac{G}{G+1} \quad (5-36)$$

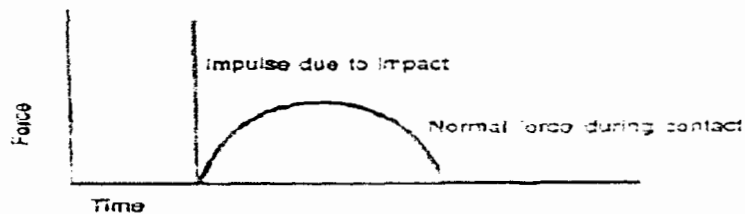
به هر حال با توجه به فرض هایی که در مورد محیط انجام دادیم ممکن است بین جواب واقعی با آنچه دیدیم تفاوت هایی بوجود بیاید. هوگان برای نمایش اثر فیدبک نیرو، آزمایشی انجام داد که نظر شما را به نتایج آن جلب می کنیم:

شکل (5-5) نمایشگر مسیری است که قرار است ربات طی کند یعنی یک دایره که قرار است توسط مجری نیایی ربات طی شود لیکن در مسیر این دایره یک مانع یا سطح مقید قرار گرفته است تا اثرات کنترل امیدانس بهتر دیده شود:



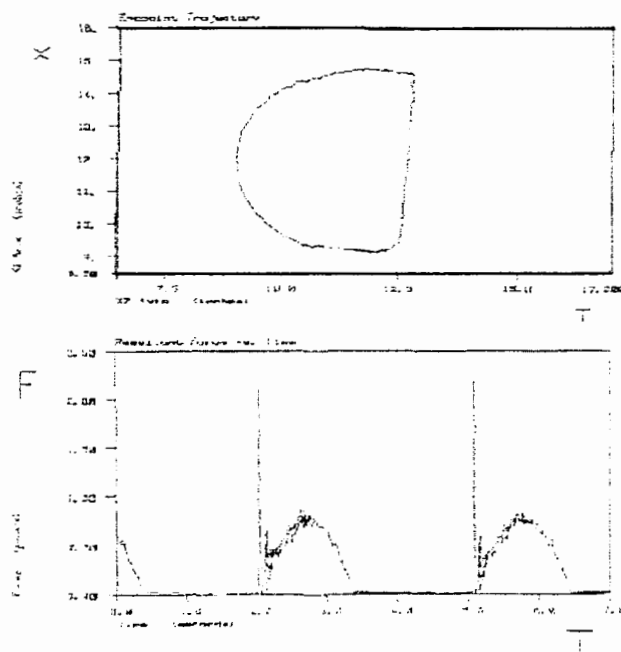
شکل (5-5) مسیری است که قرار است ربات طی کند

در شکل (5-6) رابطه بین نیرو و زمان که در حالت ایده آل باید بدست بیاید نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود هنگامی که نقطه نهایی به مانع بر می خورد یک ایمپالس نیرو وارد شده و سپس نیرو متناسب با فاصله نقطه مرجع و محل کنونی نقطه نهایی ربات، تغییر می کند.



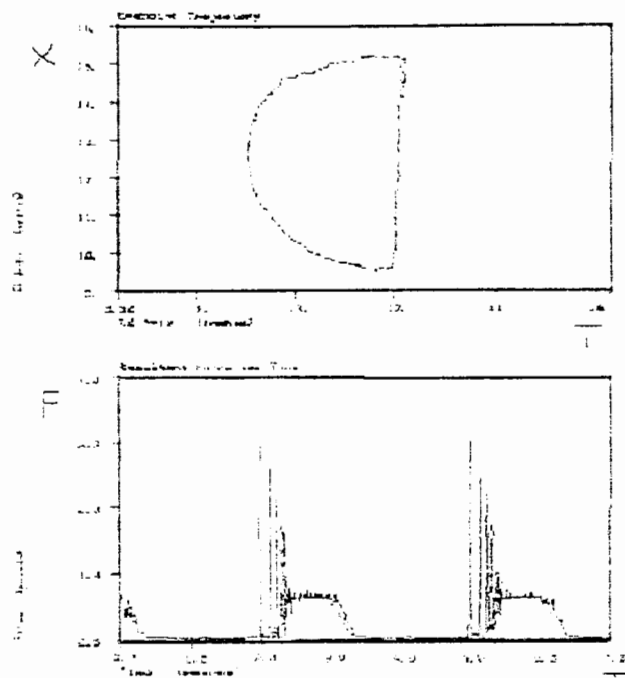
شکل (۵-۶) رابطه بین نیرو و زمان در حالت ایده آل

شکل (۵-۷) نمایش دهنده مسیر طی شده و نمایش دهنده رابطه بین نیرو و زمان در حالتی که فیدبک نیرو داریم می باشد:



شکل (۷-۷) مسیر طی شده و رابطه بین نیرو و زمان با فیدبک نیرو

شکل (۵-۸) نمایش دهنده مسیر طی شده و نمایش دهنده رابطه بین نیرو و زمان در حالتی که فیدبک نیرو نداریم می باشد:



شکل (۵-۸) مسیر طی شده و رابطه بین نیرو و زمان بدون فیدبک نیرو

همانطور که دیده می شود شکل (۵-۷) به ایده آل نزدیکتر است و این نمایشگر آن است که با فیدبک نیرو می توان نتیجه را بهتر کرد [۴].

به منظور تغییر رفتار دینامیکی مطلوب در هنگام انجام کار، در شرایطی که رفتار دینامیکی سیستم در تماس با محیط تغییر کرده است و در مهار عدم قطعیت ها استفاده از کنترل کننده فازی برای تنظیم رفتار دینامیکی مطلوب پیشنهاد می شود [۲۹]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲].

## ۱-۵ کاربردها

کنترل امپدانس تطبیقی در تراشکاری پیاده شده است [۶]، [۷]. در تراشکاری نیروی وارد شده ناشی از فعل انفعال بین ربات تراشکار و قطعه به طور مستقیم متاثر از جنس قطعه و عمق تراش می باشد و این دو با هم میزان کیفیت تراش را مشخص می کند، عدم دقت کافی منجر به از بین رفتن قطعه می شود. کنترل امپدانس در فضای دکارتی برای مفاصل دارای انعطاف برای کار پاک کردن و خشک کردن که معمولا با عدم قطعیت روبرو هستیم اجرا شده است [۸]. کنترل فعال به منظور مهار لرزش موتور هلیکوپتر استفاده شده است [۹]. پره های هلیکوپتر در شرایط کاری مختلفی قرار می گیرند و

در نتیجه نیروهای متغیری به آن وارد می شود این نیروها باعث لرزش موتور می شود. در عمل از یک فنر در انتهای پره استفاده می شود و این باعث می شود از نوسان نیروی وارد شده به موتور جلوگیری شود. سکان هواپیما با قانون کنترل امپدانس شبیه سازی شده است [۱۰]. عملکرد سکان در هواپیمای واقعی مانند یک سیستم جرم و فنر و دمپر است یعنی خلبان هر چه سکان را از موقعیت تعادل خود بیشتر منحرف کند نیروی بیشتری از طرف سکان به دست خلبان وارد می شود و اگر آن را رها کند سکان به آرامی به موقعیت تعادل خود بر می گردد. تحلیل دینامیکی ربات در یک ماهواره به منظور گرفتن اجسام صلب غیر همگن انجام شده است [۱۱]. به خاطر غیر یکنواخت بودن سطوح نیروهای متفاوتی ایجاد می گردد. برای دستکاری روی اجسام با سرعت بالا، کنترل امپدانس روی ربات موازی پیاده سازی شده است [۱۲]. کنترل امپدانس به منظور جاسازی میله در سوراخ برای کارهای مونتاژ کاری پیشنهاد شده است [۱۳]. روش کنترل مقاوم امپدانس در بریدن اجسام ارائه شده است [۱۴]. ربات آدم واره برای طراحی و ترسیم ابداع شده است [۱۵] و [۲۱]. به خاطر طبیعت کار طراحی لازم است موقعیت قلم همیشه روی کاغذ قرار بگیرد و در صورت تغییر موقعیت کاغذ و قلم، کاغذ پاره و یا اثر قلم محو نشود. کنترل امپدانس ربات آدم واره در حالت قدم زدن بررسی شده است [۱۶]. در هنگام راه رفتن ربات بر روی سطوح مختلف نیروهای متفاوتی به سطح تماس پا و زمین وارد می شود و نحوه وارد شدن این نیروها نیز قابل پیش بینی نیست. سنباده کاری با کنترل امپدانس پیاده سازی شده است [۱۷]. در این روش از قوانین پیچیده برای اجسام مختلف استفاده نمی شود. جوشکاری در کشتی ها به علت وجود قطعات غیر استاندارد در شکل ها و ابعاد مختلف، کاری پیچیده است در این نوع کار، ربات انبر جوشکاری را به موقعیت جوشکاری برده سپس حساسه نیرو و گشتاور اعمال شده توسط ربات را حس کرده و با توجه به آن به بازو دستور حرکت می دهد [۱۸]. از مهارت کارگر ماهر در انجام کار آسیاب کاری و خرد کردن استفاده می شود و پس از ضبط اطلاعات مربوط، به انجام آن توسط ربات با روش کنترل امپدانس می پردازد [۱۹]. در کار سوراخ کاری توسط ربات از راه دور، کنترل انجام شده و با تکیه بر کنترل امپدانس و حسگرهای لمسی به انجام کار پرداخته شده است [۲۰].

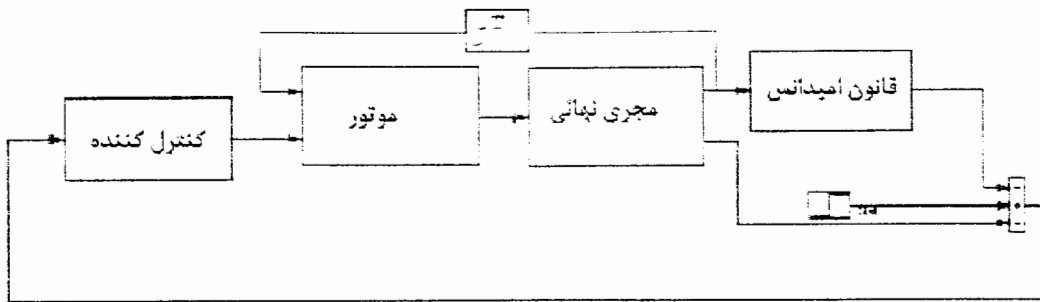


## فصل ششم

### مدل سازی سیستم کنترل

ساختار سیستم کنترل در دیاگرام شکل (۶-۱) نشان داده شده است. در پیاده سازی سیستم کنترل از استراتژی مفصل مستقل استفاده شده است و هر مفصل به طور مجزا کنترل می شود. کلیه اثرات دینامیکی محیط، جسم و اغتشاشات بصورت بار روی موتور منظور می شود. ماتریس  $T^T$  عمل انتقال از فضای کار به فضای مفصلی را انجام می دهد. پس از آنکه مجری نهایی با جسم درگیر می شود، به منظور دستیابی به رفتار مناسب، قانون کنترل امپدانس وارد عمل می شود و با توجه به نیروی وارد به مجری نهایی، تغییر موقعیت مطلوب مشخص می گردد. سپس سیستم کنترل فازی به منظور فراهم کردن تغییر موقعیت مطلوب فرمانهای لازم را براساس قوانین فازی به موتور  $DC$  مغناطیس دائم با اعمال کنترل ولتاژ خواهد داد.

در این سیستم کنترل، از دو فک موازی به عنوان مجری نهایی استفاده شده است تا قابلیت تطبیق بیشتری برای گرفتن اجسام در شکلهای و اندازه های مختلف داشته باشد. در اجرای کار، موتور از طریق چرخ دنده فک را روی یک محور به طرف دیگری حرکت می دهد. بنابراین سیستم فقط از یک درجه آزادی برخوردار است.

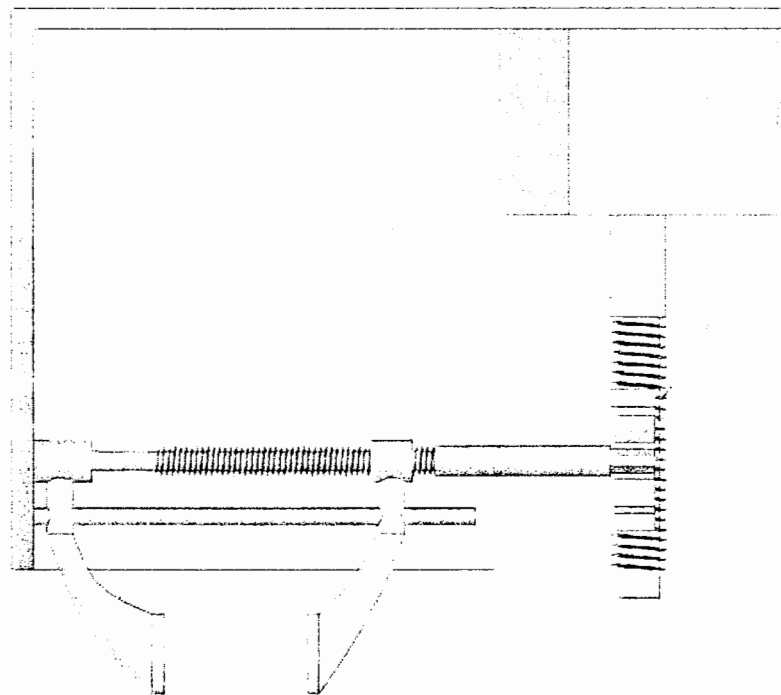


شکل ( ۶-۱ ) دیاگرام بلوکی سیستم کنترل

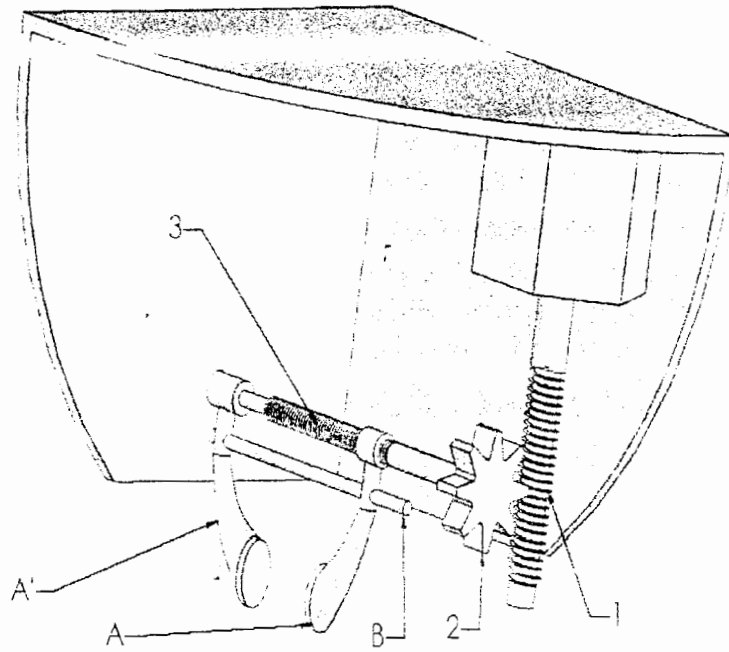
در ادامه به تفصیل در مورد بخش های مختلف سیستم صحبت می کنیم و معادلات آن را بیان می کنیم.

### ۶-۱ مجری نهایی

برای مدل کردن این بلوک ابتدا شکل کنی آن توسط نرم افزار *solid\_work* کشیده شده است. نمای دو بعدی در شکل ( ۶-۲ ) و نمای سه بعدی در شکل ( ۶-۳ ) نشان داده شده است.



شکل ( ۶-۲ ) نمای دو بعدی مجری نهایی



شکل (۶-۳) نمای سه بعدی مجری نهایی

متغیر های مربوط به چرخ دنده حلزونی متصل به موتور با زیر نویس ۱ و متغیر های مربوط به چرخ دنده موازی با زیر نویس ۲ و متغیر های مربوط به چرخ دنده حلزونی متصل به فک با زیر نویس ۳ مشخص شده است. برای واضحتر شدن نحوه کارکرد مجری نهایی در زیر به طور مختصر آن را توضیح می دهیم:

در شکل بالا با چرخش موتور  $DC$  مغناطیس دائم که با ولتاژ ورودی، سرعت آن کنترل می شود، چرخ دنده حلزونی متصل به موتور شروع به چرخش می کند چون موتور روی بدنه نصب شده است، در نتیجه چرخ دنده حلزونی متصل به موتور نمی تواند به سمت بالا یا پایین حرکت کند پس چرخ دنده موازی شروع به چرخش می کند و باعث چرخش چرخ دنده حلزونی متصل به فک می شود به همین دلیل، فک  $A$  در امتداد میله هادی  $B$  به طرف فک  $A'$  که ثابت شده است، حرکت می کند. در نتیجه چرخش موتور پس از انتقال از طریق چرخ دنده ها باعث باز یا بسته شدن فک می گردد.

می توان معادلات حاکم بر سیستم را به صورت زیر نوشت و ژاکوبین آن را بدست آورد:

$$\theta_1 = \theta_m \quad (۶-۱)$$

$\theta_1$  زاویه چرخش چرخ دنده حلزونی متصل به موتور و  $\theta_m$  زاویه چرخش موتور می باشد.

$$a = \frac{\theta_1 \cdot L_1}{2\pi} \quad (۶ - ۲)$$

$L_1$  گام پیچ چرخ دنده حلزونی متصل به موتور و  $a$  میزان جابجایی چرخ دنده حلزونی متصل به موتور و در نتیجه میزان جابجایی چرخ دنده موازی می باشد.

از طرفی اگر قرار باشد هر شیار چرخ دنده حلزونی اول داخل شیار های چرخ دنده موازی بیافتد باید داشته باشیم:

$$L_1 = L_2 \quad (۶ - ۳)$$

$L_2$  گام پیچ چرخ دنده موازی است.

$$X = \frac{a \cdot L_3}{2\pi \cdot r_2} \quad (۶ - ۴)$$

که  $X$  میزان جابجایی چرخ دنده حلزونی متصل به فک می باشد.

از فرمول های (۶ - ۴) و (۶ - ۲) جابجایی فک به صورت زیر بدست می آید:

$$X = \frac{\theta_1 \cdot L_1 \cdot L_3}{(2\pi)^2 \cdot r_2} \quad (۶ - ۵)$$

اما می توان نشان داد که  $r_2$  خود تابعی از بقیه متغیر ها است و می توان آن را حذف کرد، این کار این گونه انجام می شود که:

محیط چرخ دنده موازی دارای  $N$  شیار است، پس طول هر گام باید از رابطه زیر بدست آید:

$$L_2 = \frac{2\pi \cdot r_2}{N} \quad (۶ - ۶)$$

از رابطه (۶ - ۶) و (۶ - ۳) داریم:

$$L_1 = \frac{2\pi \cdot r_2}{N} \quad (۶ - ۷)$$

$$r_2 = \frac{N \cdot L_1}{2\pi} \quad (۶ - ۸)$$

از رابطه (۶ - ۸) و (۶ - ۵) داریم:

$$X = \frac{L_3}{2\pi \cdot N} \cdot \theta_i \quad (۹-۶)$$

و از رابطه (۹-۶) و (۱-۶) داریم:

$$X = \frac{L_3}{2\pi \cdot N} \cdot \theta_m \quad (۱۰-۶)$$

در نتیجه:

$$J = \frac{L_3}{2 \cdot \pi \cdot N} \quad (۱۱-۶)$$

برای ژاکوبین روابط زیر را داریم:

$$\Delta X = J \Delta \theta_m \quad (۱۲-۶)$$

$$T_m = J^T \cdot F_L \quad (۱۳-۶)$$

که  $F_L$  نیروی وارد توسط فک به جسم است و  $T_m$  گشتاور ناشی از بار که به موتور وارد می شود. و  $\Delta X$  میزان جابجای فک و  $\Delta \theta_m$  میزان چرخش روتور است.

چون در این مدل فک یک بعدی است در نتیجه داریم:

$$J = J^T \quad (۱۴-۶)$$

بنابراین از دو رابطه (۱۳-۶) و (۱۴-۶) داریم:

$$T_m = J \cdot F_L \quad (۱۵-۶)$$

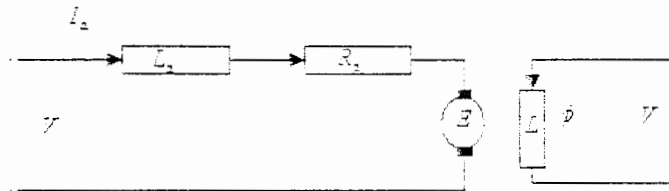
که در شبیه سازی دیاگرام بلوکی شکل (۶-۴) بدست می آید:



شکل (۶-۴) دیاگرام بلوکی ژاکوبین

## ۲-۶ موتور

در مدل کردن از یک موتور DC مغناطیسی دایم استفاده شده است. مدار معادل موتور DC مغناطیسی دائم به صورت زیر می باشد:



شکل (۶-۱) مدل موتور DC مغناطیسی دائم

که  $\phi$  یا شار مغناطیسی فاصله هوایی ثابت است. و در آن داریم:

$$V - E = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} \quad (۶-۱۶)$$

که  $V$  ولتاژ ترمینال،  $E$  ولتاژ داخلی یا قلب ماشین،  $I_a$  جریان آرمیچر،  $R_a$  مقاومت آرمیچر و  $L_a$  اندوکتانس آرمیچر می باشد.

همچنین داریم:

$$T_a = K' \cdot \phi \cdot I_a \quad (۶-۱۷)$$

$T_a$  گشتاور فاصله هوایی و  $K'$  ثابت گشتاور می باشد.

در یک موتور مغناطیسی دائم مقدار  $K'$  و  $\phi$  ثابت است. پس می توان معادله (۶-۱۷) را می توان به صورت زیر ساده کرد:

$$T_a = K \cdot I_a \quad (۶-۱۸)$$

در این موتور تلفات چرخشی به صورت 0.01 تلفات خروجی در نظر گرفته شده است. یا به عبارتی:

$$T_m = T_a - 0.01 \cdot (T_m - T_L) \quad (۶-۱۹)$$

$T_m$  گشتاور موتور و  $T_L$  گشتاور بار است.

اما خود روتور و متعلقات آن دارای اینرسی به صورت  $J_m$  و دارای ضریب اصطکاک ویسکوز  $B_m$  می باشد که ناشی از اصطکاک بین محور بلبرینگ و اصطکاک هوا و دیگر اصطکاک های ویسکوز می باشد، که به صورت معادله (۶-۲۰) می توان آن را بیان کرد:

$$T_m = J_m \cdot \ddot{\theta}_m + B_m \cdot \dot{\theta}_m + T_L \quad (۶-۲۰)$$

$\dot{\theta}_m$  سرعت زاویه ای موتور و  $\ddot{\theta}_m$  شتاب زاویه ای موتور می باشد.

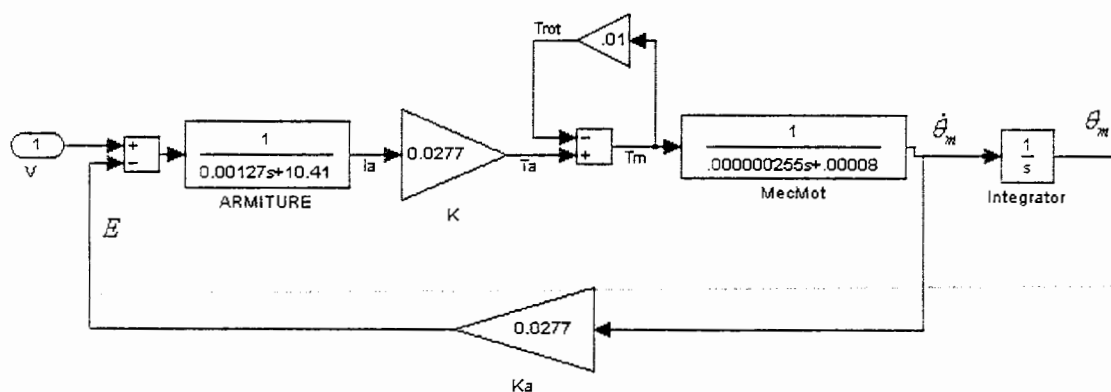
از طرف دیگر داریم:

$$E = K' \cdot \varphi \cdot \dot{\theta}_m \quad (۶-۲۱)$$

که در یک موتور مغناطیس دائم مقدار  $K$  و  $\varphi$  ثابت است. پس می توان معادله (۶-۲۱) را به صورت زیر ساده کرد:

$$E = K_a \cdot \dot{\theta}_m \quad (۶-۲۲)$$

و در شبیه سازی برای یافتن  $\theta_m$  می توان از انتگرال  $\dot{\theta}_m$  استفاده کرد. پس داریم:



شکل (۶-۶) دیاگرام بلوکی موتور

$\theta_m$  زاویه چرخش موتور می باشد.

$J_m = 0.000000255$	$L_a = 0.00127$	$R_a = 10.41$
$K_a = K' \cdot \Phi = 0.0277$	$K = K' \cdot \Phi = 0.0277$	$B_m = 0.00008$

جدول (۶-۱) مقادیر پارامترهای موتور

### ۳-۶- قانون کنترل امپدانس

رابطه قانون کنترل امپدانس در فصل ۵ بررسی شد. در اینجا فقط به چند یاد آوری بسنده می کنیم. رابطه بین نیرو و جابجایی توسط قانون کنترل امپدانس به صورت زیر ارائه می شود:

$$F_e(s) = (Ms^2 + Bs + K)(X_d(s) - X_i(s)) \quad (۶-۲۳)$$

که در آن  $X_d$  موقعیت مرجع،  $X_i$  موقعیت مطلوب قانون امپدانس و  $F_e$  بردار نیروی مجری نهایی وارد بر سطح تماس در حوزه فرکانس مختلط  $S$  است.  $M$  جرم مجازی،  $B$  ضریب میرایی مجازی و  $K$  ضریب سختی مجازی می باشد. برای تعیین رفتار مطلوب ملاحظات زیر در تعیین ضرایب قانون کنترل امپدانس منظور می شود:

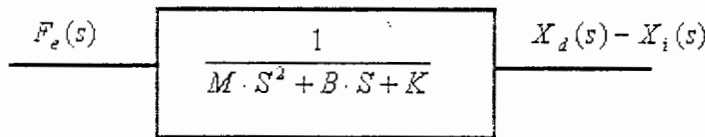
□ برای اجرای دینامیک محدود و کوچک در جهت مورد نظر  $M$  بزرگ انتخاب می شود.

□ برای کاهش انرژی جنبشی در جهت مورد نظر مقدار  $B$  بزرگ انتخاب می شود و در نتیجه

نوسانات سریعتر میرا میشود.

در جهتی که کنترل نیرو اعمال می شود باید  $K$  به قدر کافی کوچک باشد تا نیروهای تماس را محدود کند و در جهتی که کنترل موقعیت اعمال می شود ضریب سختی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا دقت لازم در نقطه نهایی فراهم گردد.

در شبیه سازی می توان قانون امپدانس را مانند شکل (۶-۷) مدل کرد.



شکل (۶-۷) دیاگرام بلوکی قانون امپدانس



#### ۶-۴ - مدل کردن جسم و دینامیک ربات:

یکی از مهمترین مسائلی که در کنترل امیدانس به آن پرداخته می شود دینامیک گرفتن اجسام است. بنابراین باید روابط دینامیک حاکم بر ربات و جسم نیز بررسی گردد. در حالت کلی در یک ربات معادله (۶-۲۴) وجود دارد.

$$F = M_x(q) \cdot \ddot{X} + C_x(q, \dot{q}) + G_x(q) + F_e \quad (۶-۲۴)$$

که:

$M_x(q)$  ماتریس اینرسی قسمت های متحرک ربات در فضای کار،  $C_x(q, \dot{q})$  بردار نیرو های گریز از مرکز و کوریولیسی در فضای کار،  $G_x(q)$  بردار نیروهای جاذبه ای در فضای کار و  $F_e$  بردار نیروی وارد از طرف جسم به نقطه انتهایی می باشد.

برای سیستم با یک درجه آزادی می توان آن را به صورت زیر ساده کرد:

$$F = M_r \cdot \ddot{X}_r + B_r \cdot \dot{X}_r + K_r \cdot X_r + F_e \quad (۶-۲۵)$$

که  $M_r$  اینرسی قسمت های متحرک ربات،  $B_r$  ضریب ویسکوز قسمت های متحرک ربات،  $K_r$  ضریب سختی قسمت های متحرک ربات،  $X_r$  میزان جابجایی نقطه انتهایی ربات،  $\dot{X}_r$  سرعت جابجایی نقطه انتهایی ربات،  $\ddot{X}_r$  شتاب جابجایی نقطه انتهایی ربات می باشد.

برای مجری نهایی طراحی شده با یک درجه آزادی معادله فوق حاکم است.

در شبیه سازی معادله (۶-۲۵)، چون در هنگام درگیری نقطه نهایی با جسم مقدار  $\ddot{X}$  خیلی کوچک است، از آن صرف نظر می کنیم، ( علت پیشنهاد این فرض محاسبات طولانی و وقت گیر مطلب هنگام وجود این عبارت می باشد). البته به کار بردن این فرض به کلیت شبیه سازی ایرادی وارد نمی کند، پس می توان معادله (۶-۲۵) را به صورت معادله (۶-۲۶) مدل کرد.

$$F = B_r \cdot \dot{X}_r + K_r \cdot X_r + F_e \quad (۶-۲۶)$$

از طرف دیگر بسته به این که جسم چه ویژگی‌هایی داشته باشد می توان  $F_e$  را به شکل های مختلف مدل کرد. اگر مدل جسم به صورت یک فنر فرض شود آنگاه معادله (۶-۲۷) را برای نیروی وارد شده به جسم می توان نوشت.

$$F_e = K_e \cdot X_e \quad (۶-۲۷)$$

و اگر مدل جسم به صورت یک فنر و میرا کننده فرض شود آنگاه معادله (۶-۲۸) را برای نیروی وارد شده به جسم می توان نوشت.

$$F_e = K_e \cdot X_e + B_e \cdot \dot{X}_e \quad (۶-۲۸)$$

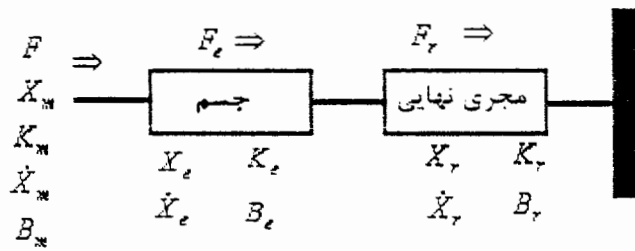
$F_e$  نیروی وارد شده به جسم،  $X_e$  میزان فرو رفتن جسم،  $\dot{X}_e$  سرعت فرو رفتن جسم،  $K_e$  ضریب سختی جسم،  $B_e$  ضریب ویسکوز جسم می باشد.

واضح است که می توان معادله (۶-۲۷) را حالت خاص معادله (۶-۲۸) با فرض ضریب ویسکوز صفر در نظر گرفت، پس در حالت کلی از معادله (۶-۲۸) استفاده می کنیم. می توان از معادله (۶-۲۶) و معادله (۶-۲۸) به معادله (۶-۲۹) رسید.

$$F = B_m \cdot \dot{X}_m + K_m \cdot X_m \quad (۶-۲۹)$$

که  $X_m$  میزان فرورفتن کل سیستم شامل چرخ دنده ها، فک، موتور و جسم،  $\dot{X}_m$  سرعت فرورفتن کل سیستم شامل چرخ دنده ها، فک، موتور و جسم،  $B_m$  ضریب ویسکوز کل سیستم شامل چرخ دنده ها، فک، موتور و جسم،  $K_m$  ضریب سختی کل سیستم شامل چرخ دنده ها، فک، موتور و جسم می باشد.

مجموعه جدید جسم و ربات در شکل (۶-۸) نشان داده شده است.



شکل (۶-۸) مجموعه جدید جسم و مجری نهایی سری

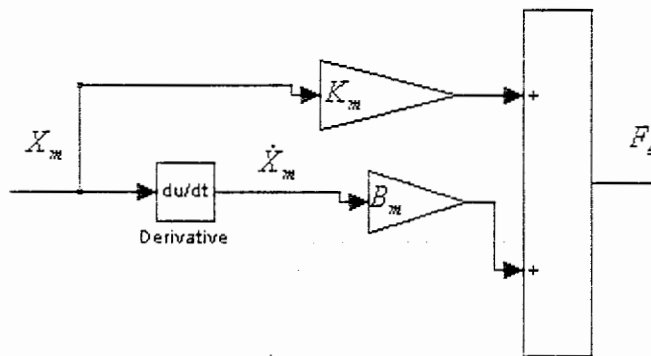
و با توجه به سری بودن جسم و مجری نهایی می توان نوشت.

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K_e} + \frac{1}{K_r} \quad (۳۰ - ۶)$$

و

$$\frac{1}{B_m} = \frac{1}{B_e} + \frac{1}{B_r} \quad (۳۱ - ۶)$$

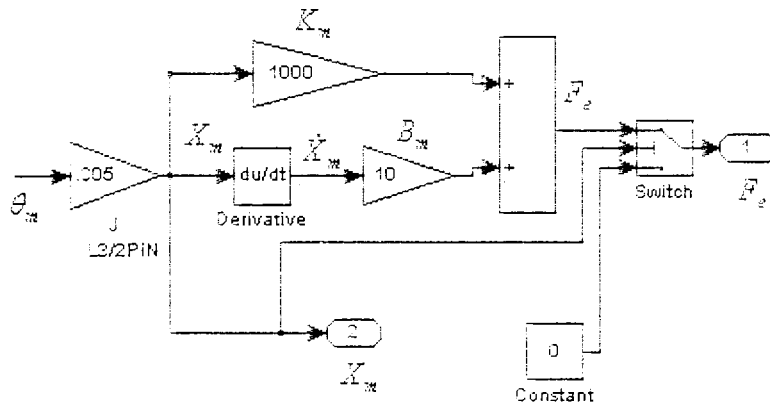
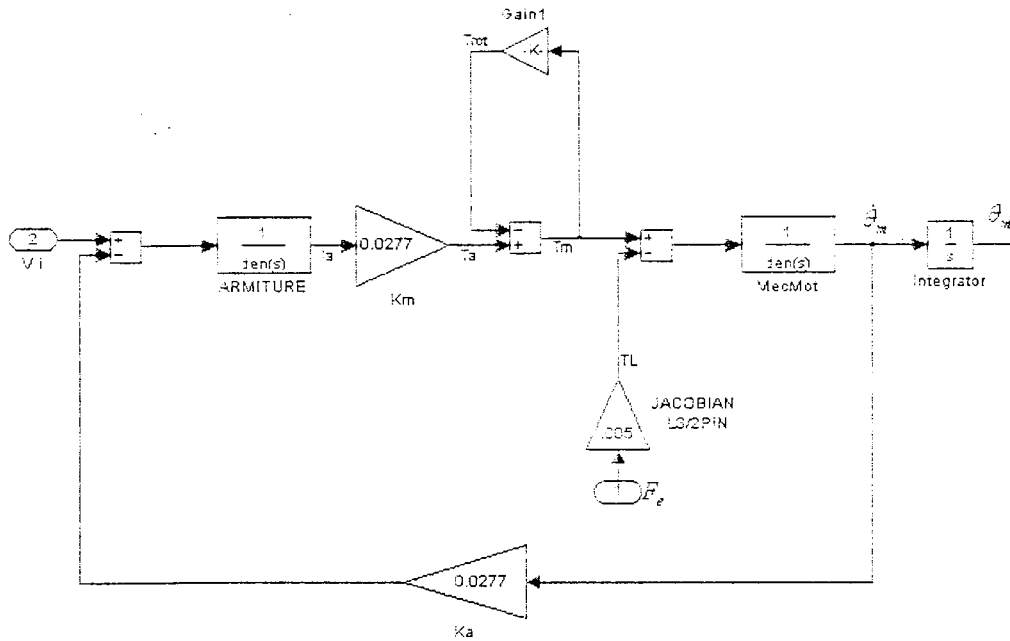
بنابر این دیاگرام بلوکی مدل دینامیک گرفتن جسم به صورت شکل (۶-۹) خواهد شد.



شکل (۶-۹) دیاگرام بلوکی مدل دینامیک مجری نهایی و جسم

## ۵-۶ مدل کلی سیستم

با توجه به آنچه در بخش های (۱-۶) و (۲-۶) و (۴-۶) گفته شد می توان دیاگرامهای بلوکی شکل (۴-۶)، شکل (۶-۶) و شکل (۹-۶) را ترکیب کرد و شکل (۱۰-۶) را نتیجه گرفت.



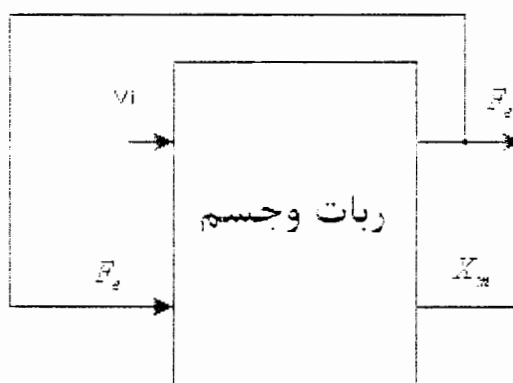
شکل (۱۰-۶) دیاگرام بلوکی گسترده ربات و جسم

همانطور که می بینید در قسمت انتهایی بلوک دیاگرام گسترده ربات و جسم، شکل (۱۰-۶) یک کنبد شرطی قرار گرفته است علت اضافه شدن این کلید آن است که در صورتی که  $X_m$  مقداری

منفی یافت نیروی وارد شده از جسم به فک صفر شود. زیرا منفی شدن  $X_m$  به معنی آن است که جسم توسط ربات گرفته نشده است.

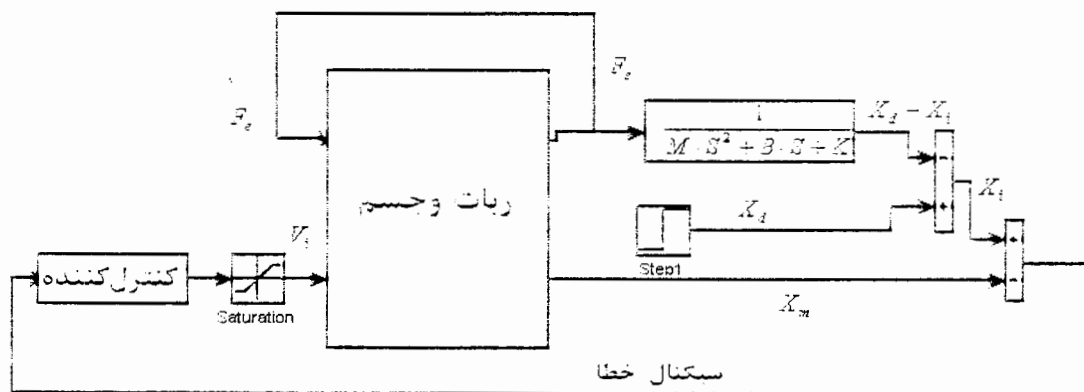
نکته دیگر حائز اهمیت، اثر بار بر روی محور موتور یا به عبارت دیگر پسخوری که موتور از بار می گیرد تا گشتاور مورد نظر را تامین کند، می باشد. و همانطور که در بخش (۶-۱) دیدیم این پسخور را با ضریب ژاکوبین مطابق بلوک دیاگرام شکل (۶-۴) پیاده می کنیم و آن را نیز در شکل (۶-۱۰) می بینید.

از این به بعد کل شکل (۶-۱۰) را به صورت یک بلوک دو ورودی دو خروجی مانند شکل (۶-۱۱) نمایش می دهیم.



شکل (۶-۱۱) بلوک دیاگرام فشرده ربات و جسم

حال اگر آنچه در بخش (۶-۳) دیدیم و به صورت دیاگرام بلوکی (۶-۷) مدل کردیم به شکل (۶-۱۱) بیافزاییم شکل (۶-۱۲) را به دست خواهیم آورد.



شکل (۶-۱۲) دیاگرام بلوکی کلی سیستم

یادآوری این نکته خالی از لطف نیست که  $X_2$  به  $X_1$  تفاوت دارد. مقدار جابجایی است که مطلوب ما می باشد، یا به عبارت دیگر قانون امیدانس برای ایجاد دینامیک مطلوب به این مقدار جابجایی نیاز دارد. در صورتی که  $X_2$  مقدار واقعی جابجایی فک می باشد. بنابراین می توان تفاوت این دو را به عنوان سیگنال خطا به کنترل کننده برگرداند (شکل (۶-۱۲) را ببینید).

نکته دیگری که حائز اهمیت است ولتاژ ورودی موتور می باشد که به علت محدودیت های عایق بندی نباید از یک حد مشخص بیشتر گردد. بنابراین مطابق شکل (۶-۱۲) یک محدود کننده مابین ۱۲ و ۱۲- در ورودی موتور قرار دادیم.

## ۶-۶ طراحی کنترل کننده

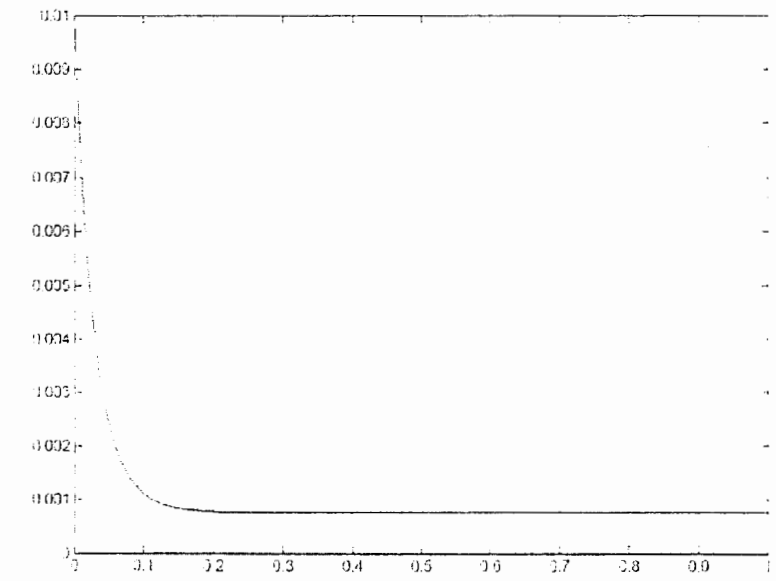
روش کنترل فازی امیدانس ضراحی و شبیه سازی گردیده و به منظور نشان دادن توانمندیهای آن با یکی از روشهای سنتی کنترل امیدانس مقایسه می شود. در روش سنتی مذکور از کنترل کننده PID در یک ساختار کنترل موقعیت استفاده شده است.

### ۶-۶-۱- کنترل کننده PID

قانون کنترل برای کنترل کننده PID به صورت زیر می باشد:

$$U = K_p \cdot S + K_i / S + K_d \cdot S^2 \quad (۶-۳۳)$$

که در آن  $K_p$  ضریب مشتقی،  $K_i$  ضریب انتگرالی،  $K_d$  ضریب تناسبی و  $U$  قانون کنترل است. قابل توجه آنکه رفتار مجری نهایی توسط قانون کنترل امیدانس با ضرایب  $M=0.01$  و  $B=10$  و  $K=40$  تعیین شده است و ضرایب کنترل کننده با مقادیر  $K_p=10$ ،  $K_i=3$  و  $K_d=883$  که با روش سعی و خطا بدست آمده است، جواب قابل قبولی می دهد و خطای رفتار سیستم به سرعت کاهش یافته و پس از تقریباً ۰.۱ ثانیه در مقدار حدود ۰.۰۰۱ تثبیت می شود. شکل (۶-۱۳) را ببینید.



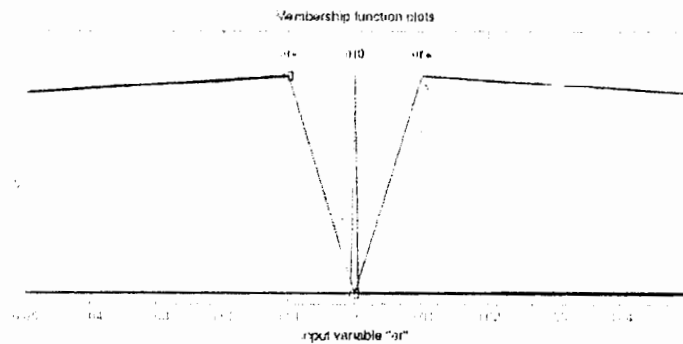
شکل (۶-۱۳) خطای رفتار سیستم PID به ازای  $k=40$

## ۶-۶-۲- کنترل کننده فازی

برای پیاده سازی کنترل فازی ابتدا متغیر های ورودی و خروجی کنترل کننده فازی را تعریف می کنیم. سپس با توجه به دامنه هر یک، گروههای فازی را تشکیل می دهیم و برای هر یک تابع عضویت مناسب را اختصاص می دهیم. این مرحله از کار فازی کردن نامیده می شود، سپس پایگاه قوانین را تشکیل می دهیم که به صورت دستورات شرطی رابطه بین ورودی ها و خروجی را معلوم می کند. پس از آن برای تبدیل مقادیر فازی در خروجی به مقادیر صریح از روش غیر فازی کردن ممدانی استفاده می نماییم.

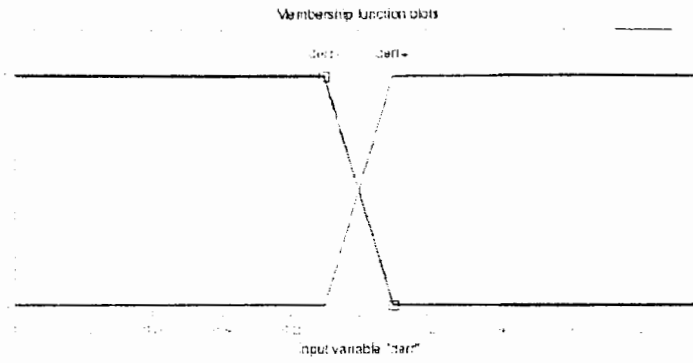
متغیر های ورودی عبارتند از خطا با گروههای فازی  $er+$ ،  $er$  و  $er0$  و توابع عضویت مانند شکل (۶-۱۴) و تغییرات خطا با گروههای فازی  $derr+$  و  $derr-$  و توابع عضویتی مانند شکل (۶-۱۵) و خروجی که ولتاژ موتور می باشد و شامل گروههای فازی  $vi--$  و  $vi-$  و  $vi0$  و  $vi+$  و  $vi++$  و توابع عضویت مطابق با شکل (۶-۱۶) نشان داده شده است. جدول قوانین نیز در شکل (۶-۱۷) آمده است.

در ابتدا برای تعیین تغییرات خطا از مشتق گیر استفاده شد ولی دیده شد که با ایجاد تاخیر و محاسبه تغییرات سیگنال خطا جوابی به مراتب بهتر می توان گرفت. مقدار این تاخیر  $0.0001$  در نظر گرفته شده است و مطابق بلوک دیاگرام شکل (۶-۱۸) ساخته می شود.

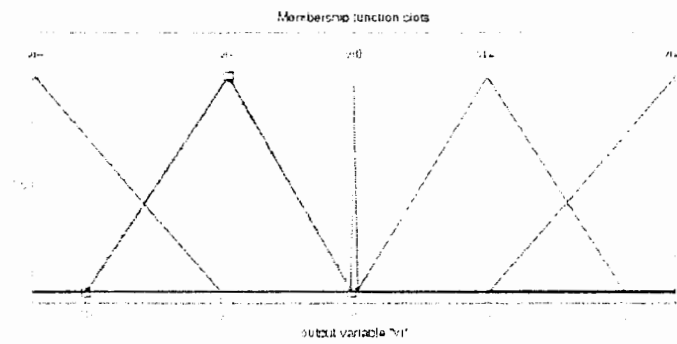


شکل (۶-۱۴) توابع عضویت خطا





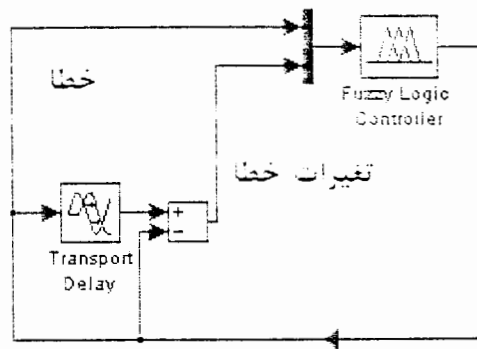
شکل (۶-۱۵) توابع عضویت تغییرات خطا



شکل (۶-۱۶) تابع عضویت خروجی - ولتاژ

		تغییرات خطا	
		منفی	مثبت
خطا	منفی	مثبت کم	خیلی منفی
	صفر	صفر	صفر
	مثبت		خیلی مثبت

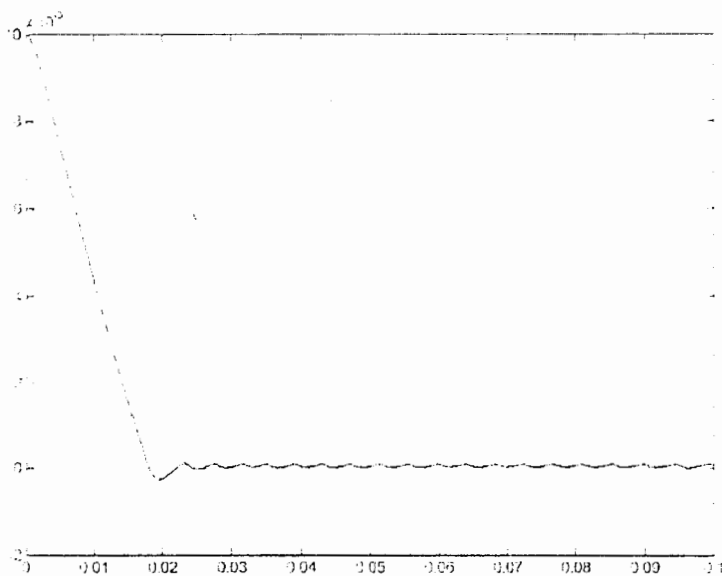
شکل (۶-۱۷) جدول قوانین فازی



شکل (۶-۱۸) دیاگرام بلوکی ساخت تغییرات خطا

در کنترل کننده فازی "و" به صورت مینیمم دو مقدار و درغیر فاز ساز از روش *MOM* (میانگین ماکزیممها) استفاده شده است و برای راحتی ساخت تمامی توابع عضویت به صورت مثلثی تعریف شده اند. با طراحی صورت گرفته همان آزمایش قبلی بخش (۶-۶-۱) که روی *PID* انجام شد را تکرار می کنیم.

با در نظر گرفتن ضریب سختی مجازی ۴۰ خطای رفتار سیستم در شکل (۶-۱۹) به سرعت کاهش یافته و پس از تقریباً ۰،۰۲ ثانیه در مقدار تقریبی صفر تثبیت می شود که در مقایسه با عملکرد کنترل کننده *PID*، بسیار سریع تر خطا کاهش یافته و تقریباً صفر می شود.



شکل (۶-۱۹) خطای رفتار سیستم فازی به ازای  $k = 40$

## ۶ - ۷ حسگرها

بر مبنای روش کنترل و نیازهای حس کردن در سیستم کنترل، با در نظر گرفتن شکل (۶ - ۱۲) لازم است که جابجایی فک در هنگام درگیری با جسم و نیروی وارد به فک ناشی از جسم اندازه گیری شود در این صورت:

□ نیرویی که از طرف فک به جسم وارد می شود به عنوان ورودی قانون امپدانس اندازه گیری می شود.

□ میزان جابجایی فک برای تعیین و محاسبه میزان خطا سیستم اندازه گیری می شود.

در حس کردن نیروی وارد از جسم به فک مشکلی وجود ندارد و می توان با قرار دادن یک حسگر نیرو روی فک ثابت به آسانی این نیرو را حس کرد زیرا اولاً قرار دادن حسگر روی فک ثابت راحتتر است و به راحتی می توان اطلاعات را انتقال داد و ثانياً نیروی که باید حس شود مقدار خیلی کوچکی ندارد تا نیاز به حسگری خیلی حساس و دقیق و مقاوم در برابر نویز داشته باشیم. اما در مورد حسگر جابجایی کار به این آسانی نیست، زیرا هنگامی که فک با جسم درگیر می شود میزان جابجایی بسیار کم شده و اندازه گیری این مقدار کم کاری سخت می باشد و اگر حسگر، نویز کمی هم بگیرد جواب نادرستی خواهد داد. برای رفع این مشکل کافی است حسگر را روی محور روتور قرار دهیم با این کار حسگر جابجایی اندازه ای بزرگتر که در اینجا با توجه به مقدار ژاکوبین ۲۰۰ برابر مقدار اولیه است را اندازه گیری می کند.

## فصل هفتم

### عملکرد سیستم و نتایج

#### ۷-۱ - انتخاب قانون امیدانس

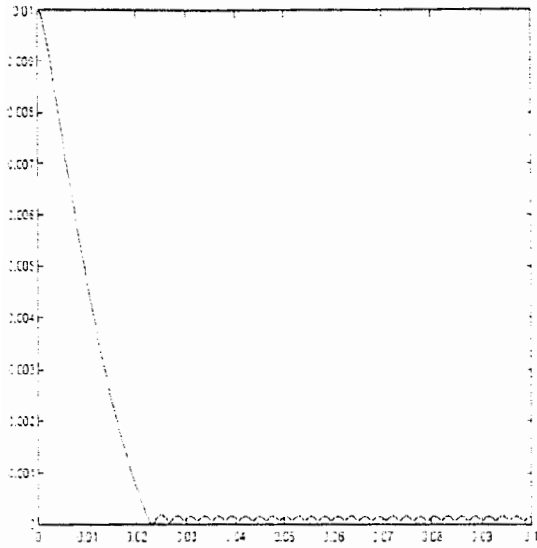
برای عملکرد مناسب مجری نهایی ربات در کار گرفتن اجسام لازم است که رفتار دینامیکی مناسبی برای آن تعریف شود با انتخاب ضرایب قانون امیدانس، رفتار دینامیکی سیستم مشخص می گردد. وزن، سستی و شکنندگی جسم عوامل مهمی در تعیین این رفتار می باشند. نحوه برخورد مجری نهایی با جسم نیز قابل توجه است.

در ابتدا ضرایب قانون امیدانس در رابطه (۶-۲۳) را مطابق با جدول (۷-۱) تعیین میکنیم سپس با تغییر هر ضریب اثر تغییر آن را مشاهده می کنیم:

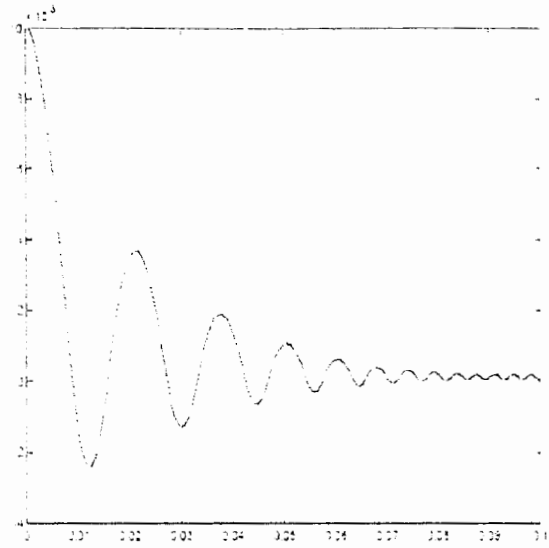
جدول (۷-۱)

$M = 0.01$	$K = 400$	$B = 10$
------------	-----------	----------

مقایسه شکل (۷-۱) با شکل (۷-۲) نشان می دهد که با افزایش ضریب میرایی مجازی از ۱ به ۱۰ نوسانات کاهش می یابد ولی خطای حالت دائم رفتار سیستم همچنان به صفر میل می کند.

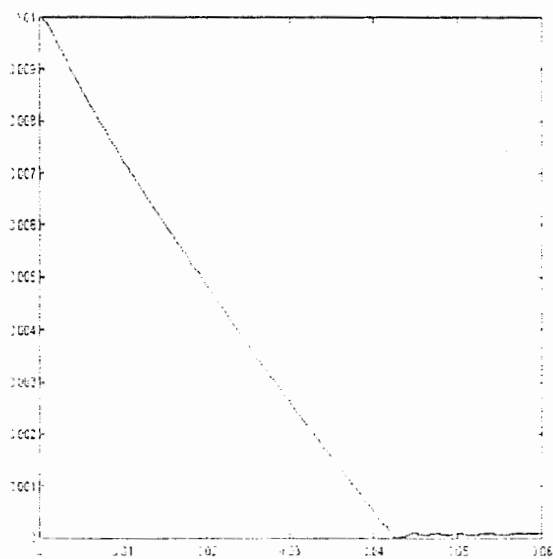


شکل ( ۲-۷ ) خطای رفتار سیستم با  $B=10$

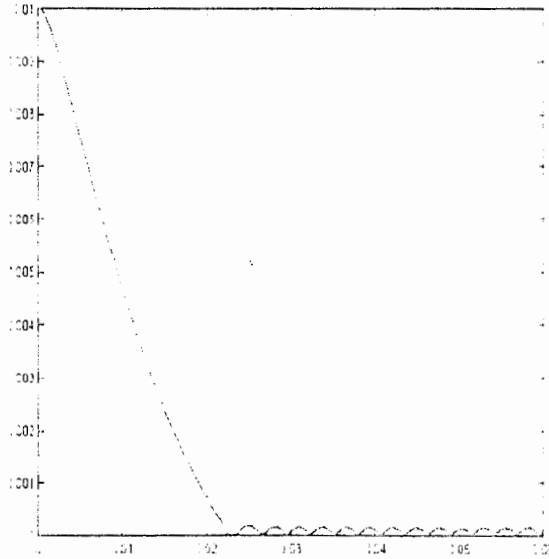


شکل ( ۱-۷ ) خطای رفتار سیستم با  $B=1$

در آزمایش بعدی از ضرایب جدول ( ۱-۷ ) فقط ضریب اینرسی مجازی  $M$  را تغییر می دهیم مقایسه شکل ( ۳-۷ ) با شکل ( ۴-۷ ) نشان می دهد که با افزایش ضریب اینرسی مجازی از ۰،۰۱ به ۰،۵۱ سرعت سیستم کاهش می یابد و سرعت سیستم از ۰،۰۲ ثانیه به مقدار ۰،۰۴ ثانیه افزایش می یابد ولی خطای حالت دائم رفتار سیستم همچنان به صفر میل می کند.



شکل ( ۴-۷ ) خطای رفتار سیستم با  $M=0.51$



شکل ( ۳-۷ ) خطای رفتار سیستم با  $M=0.01$

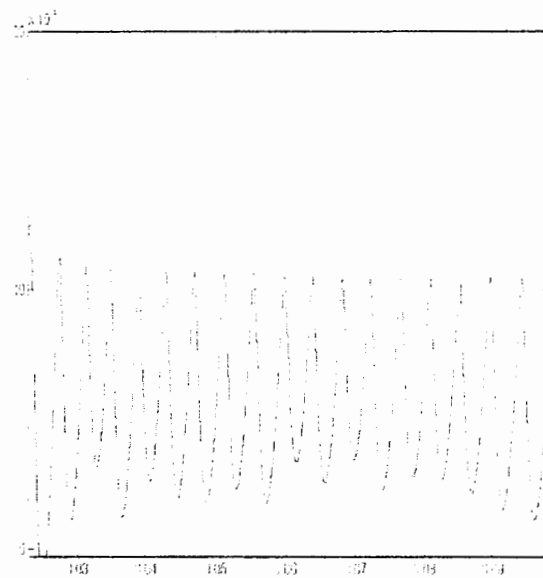
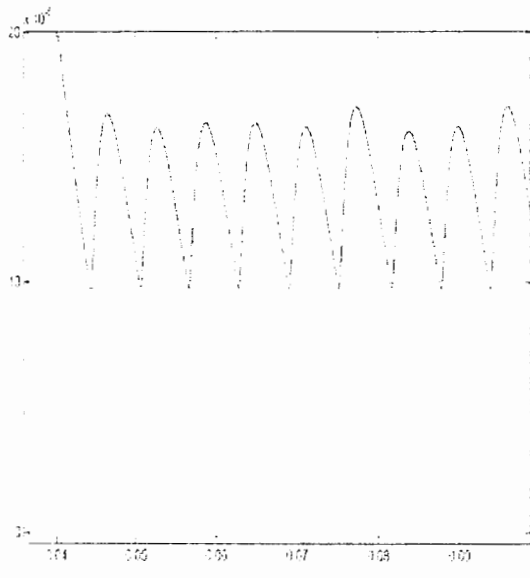
به نظر می‌رسد تنها عاملی که در پاسخ حالت ماندگار سیستم تاثیر گذار است ضریب سختی مجازی است که می‌تواند میزان خطای حالت دائم سیستم را مشخص کند. برای نشان دادن این مطلب در آزمایش بعدی ضرایب قانون امپدانس را مطابق با جدول ( ۷ - ۲ ) تنظیم میکنیم سپس با تغییر ضریب سختی مجازی اثر تغییر آن را مشاهده می‌کنیم:

جدول ( ۷ - ۲ )

$M = 0.01$	$K = 40$	$B = 10$
------------	----------	----------

با مقایسه شکل ( ۷ - ۵ ) با شکل ( ۷ - ۶ ) می‌توان دید که با افزایش ضریب سختی مجازی خطای حالت دائمی سیستم کمی افزایش می‌یابد.

یاد آوری این نکته اهمیت دارد که دامنه تغییرات این سه پارامتر محدود است و نمی‌توانیم هر کدام را با همان کنترل فازی قبل هر مقدار که خواستیم تغییر دهیم، زیرا ممکن است آنچه مد نظر ما می‌باشد نتیجه گرفته نشود و حتی سیستم ناپایدار گردد.



شکل ( ۷ - ۶ ) خطای رفتار سیستم با  $K = 800$

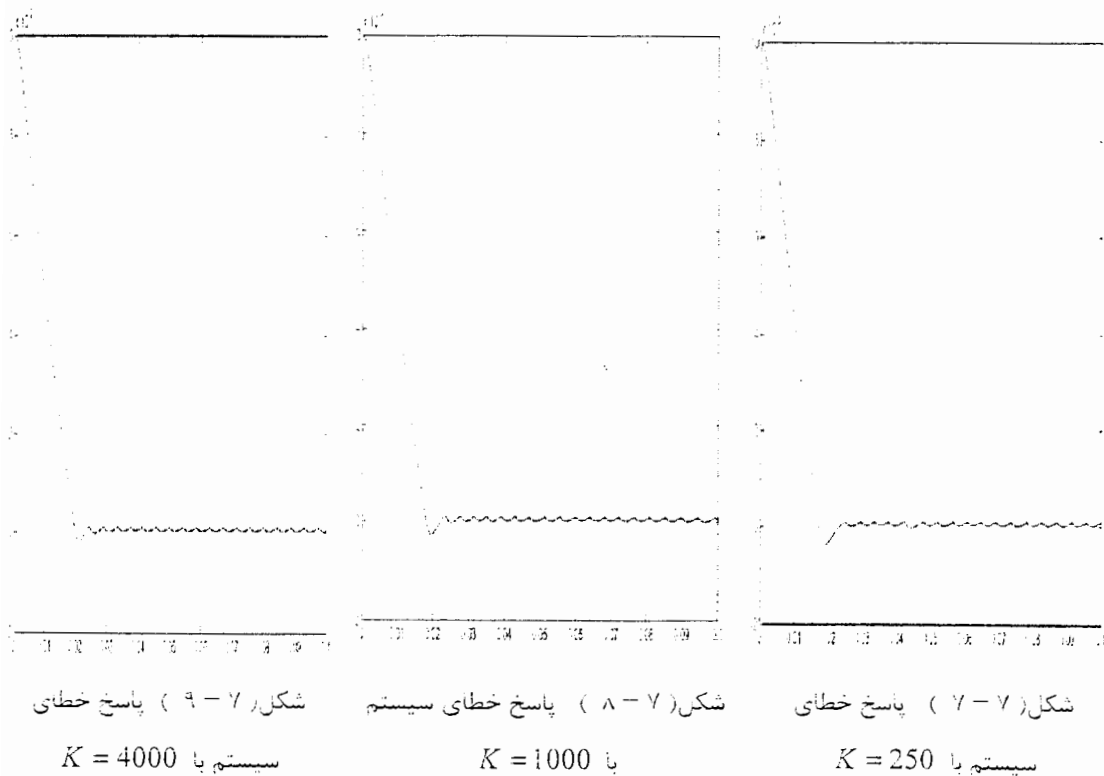
شکل ( ۷ - ۵ ) خطای رفتار سیستم با  $K = 40$

با آنچه در این بخش دیدیم می‌توانیم ضرایب را طوری تعیین کنیم که دینامیک مد نظر ما بر روی جسم پیاده گردد. حال ممکن است این سوال پیش آید که این قانون امپدانس با کنترل فازی طراحی شده برای هر نوع جسمی مناسب است؟ در بخش بعد به این موضوع می‌پردازیم.

## ۷-۲ - تاثیر قانون امپدانس بر اجسام مختلف

همانطور که در بخش (۶-۴) دیدیم می توان در حالت کلی جسمی را که توسط فک گرفته می شود به صورت فرمول (۶-۲۹) مدل کرد و این  $B_m$  و  $K_m$  می باشند که خواص جسم را مشخص می کنند. در این قسمت می خواهیم مدل اجسام مختلف را در شبیه سازی خود لحاظ کرده و اثر تغییر خواص جسم را بر روی قانون امپدانس مشاهده کنیم و پاسخ این سوال را بیابیم که آیا با تغییر خواص جسم این قانون امپدانس و کنترل فازی جوابی یکسان می دهد یا خیر؟

ابتدا فرض کنیم سه جسم با ضریب ویسکوز یکسان داریم که مقدار آن همراه با ضریب ویسکوز ناشی از چرخ دنده ها و بلبرینگهای موتور برابر  $10 Nms/Rad$  می باشد حال با تغییر ضریب سختی جسم در سه حالت مختلف خطای پاسخ سیستم را به این سه مقدار ضریب سختی مشاهده می کنیم، ضرایب قانون امپدانس را مطابق با جدول (۷-۲) تعیین کرده ایم (شکل (۷-۷) نمایشگر پاسخ خطای سیستم به یک جسم نرم می باشد و شکل (۷-۸) نمایشگر پاسخ خطای سیستم به یک جسم نه خیلی نرم نه خیلی سخت می باشد و شکل (۷-۹) نمایشگر پاسخ خطای سیستم به یک جسم سخت است.



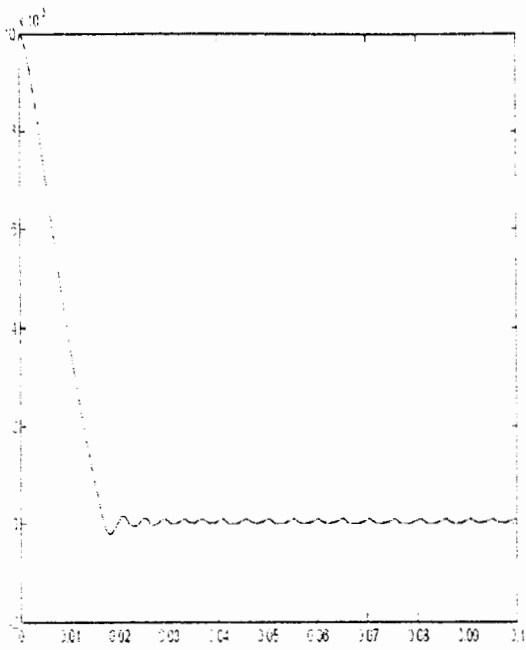
سه شکل فوق به خوبی نشان می دهند که قانون امپدانس و کنترل کننده فازی طراحی شده نسبت به تغییر ضریب سختی جسم حساس نیست و پاسخی تقریباً یکسان به آنها می دهد. تنها تفاوت دیده شده ناشی از فرو جهش ابتدایی است که هر چه ضریب سختی جسم بزرگتر می شود مقدار آن کاهش می یابد و این امری بدیهی است زیرا هر چه جسم سخت تر می شود فرو رفتن فک داخل آن کمتر صورت می گیرد.

اکنون آزمایش دیگری را برای دو مقدار متفاوت ضریب ویسکوز جسم انجام می دهیم، مقدار ضریب سختی جسم و چرخ دنده ها و موتور برابر  $K = 1000$  فرض شده است و ضریب ویسکوز را که ناشی از ضریب اصطکاک ویسکوز چرخ دنده ها و ضریب ویسکوز جسم است را به ترتیب  $B = 1$  و  $B = 10$  می گیریم. همانطور که در شکل ( ۷ - ۱۰ ) و شکل ( ۷ - ۱۱ ) دیده می شود تغییر ضریب اصطکاک ویسکوز جسم بر روی خطای پاسخ سیستم تاثیر محسوسی نمی گذارد.

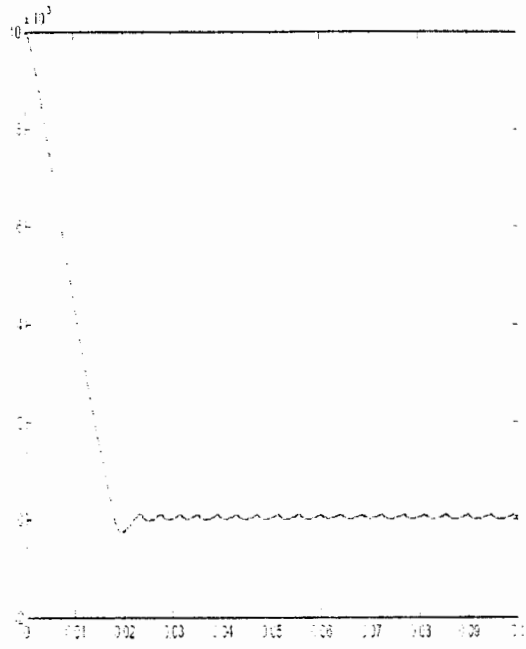
برای ملموس تر شدن مطلب بیایید شبیه سازی زیر را انجام دهیم. فرض کنید روی یک نوار نقاله دو جسم با ویژگیهای متفاوت وجود دارد و فک ربات قرار است آنها را بردارد، یکی از اجسام دارای ضریب سختی و ضریب ویسکوز بزرگی (مثلاً یک مکعب فلزی) است، بنابر این با توجه به آنچه در بخش ( ۶ - ۴ ) گفته شد ضریب اصطکاک و ضریب سختی معادل برابر ضریب اصطکاک و ضریب ویسکوز کوچکتر یا ضریب اصطکاک و ضریب ویسکوز ربات می شود. که مقدار آن  $K = 4000 N/m$  و  $B = 20 Nms/Rad$  فرض شده است.

جسم دیگری که توسط فک گرفته می شود دارای ضریب سختی و ضریب ویسکوز کم است که مقدار آن  $K = 250 N/m$  و  $B = 4 Nms/Rad$  فرض شده است. ( ضرایب قانون امپدانس را مطابق با جدول ( ۷ - ۲ ) تعیین کرده ایم). در شکل ( ۷ - ۱۲ ) و شکل ( ۷ - ۱۳ ) پاسخ خطای سیستم را به این دو جسم با خواص کاملاً متفاوت مشاهده می کنیم.

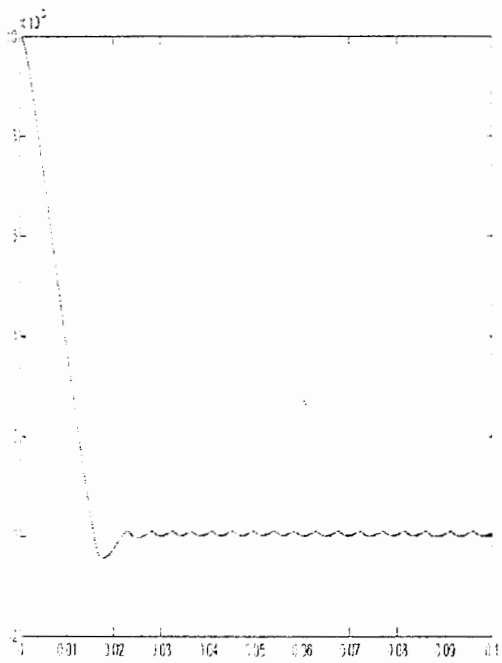




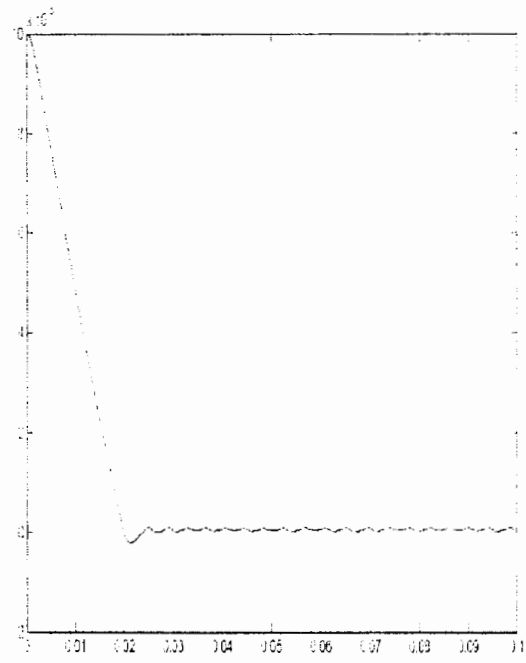
شکل (۷-۱۱) پاسخ خطای سیستم با  $B=1$



شکل (۷-۱۰) پاسخ خطای سیستم با  $B=10$



شکل (۷-۱۳) پاسخ خطای سیستم به جسم نرم



شکل (۷-۱۲) پاسخ خطای سیستم به جسم سخت

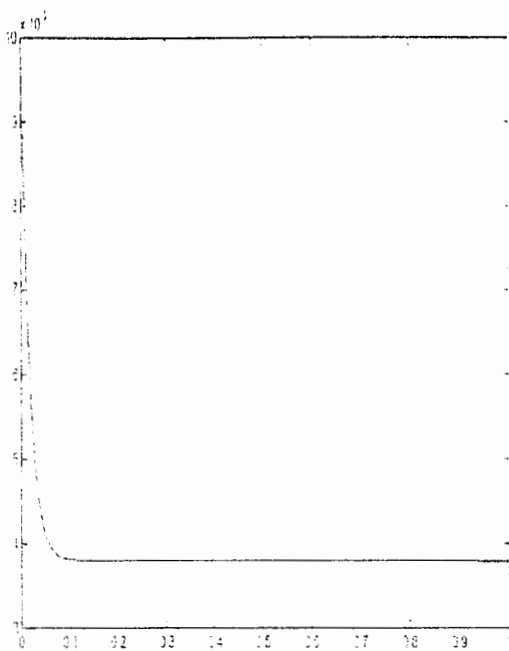
این مطلب به خوبی نشان می دهد خطای پاسخ سیستم به ازای تغییر خواص جسم محسوس نبوده و می توان از قانون امیدانس به همراه کنترل کننده فازی برای گرفتن اشیا مختلف استفاده کرد بدون اینکه قید سختی یا نرمی جسم مطرح باشد.

### ۷ - ۳ - مقایسه دو کنترل کننده:

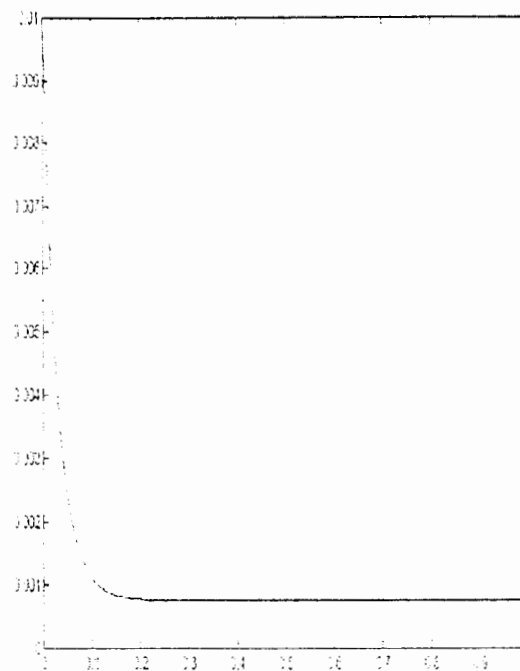
در اینجا می خواهیم به یک سوال دیگر پاسخ دهیم و آن این است که چرا از کنترل فازی استفاده کردیم و این کنترل کننده چه مزیتی نسبت به کنترل کننده های کلاسیکی مثل کنترل کننده PID دارد ؟

در این قسمت تاثیر تغییر پارامترهای سیستم را با استفاده از کنترل کننده فازی را با کنترل کننده کلاسیک PID مقایسه می کنیم. در ابتدا ضرایب قانون امپدانس را مطابق با جدول ( ۷ - ۲ ) تعیین می کنیم و مقدار ضریب سختی جسم و چرخ دنده ها و موتور برابر  $K = 1000$  فرض شده است و ضریب ویسکوز را که ناشی از ضریب اصطکاک ویسکوز چرخ دنده ها و ضریب ویسکوز جسم است را برابر  $B = 10$  میگیریم.

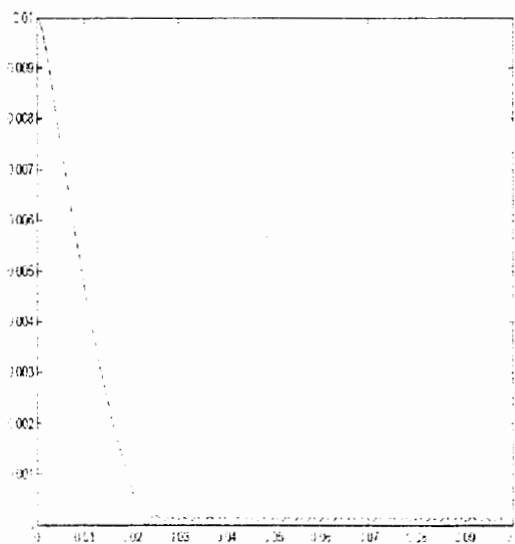
چنانچه ضریب سختی مجازی را در سیستم مجهز به کنترل کننده PID از مقدار ۴۰ به ۴۰۰ افزایش دهیم (خطای رفتار سیستم در شکل ( ۷ - ۱۴ ) و شکل ( ۷ - ۱۵ ) نشان داده شده است ) خطای حالت ماندگار از کمتر از ۰،۰۰۱ به حدود ۰،۰۰۴ افزایش می یابد. حال چنانچه ضریب سختی مجازی را در سیستم مجهز به کنترل کننده فازی از مقدار ۴۰ به ۴۰۰ افزایش دهیم (خطای رفتار سیستم در شکل ( ۷ - ۱۶ ) و شکل ( ۷ - ۱۷ ) نشان داده شده است ) خطای حالت ماندگار تغییر آنچنانی نکرده و همان مقدار صفر باقی می ماند.



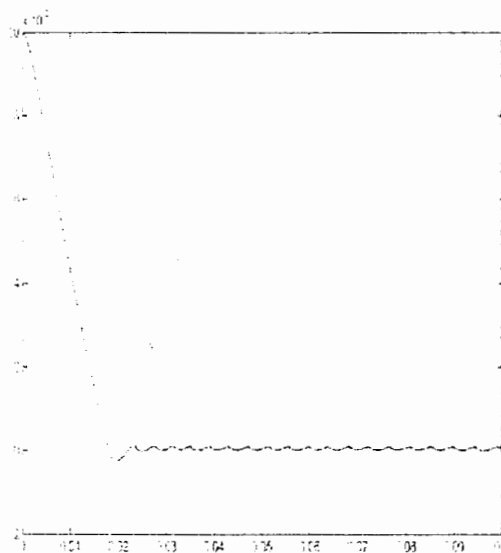
شکل ( ۷-۱۵ ) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده  
PID به ازای  $k = 400$



شکل ( ۷-۱۶ ) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده  
PID به ازای  $k = 40$



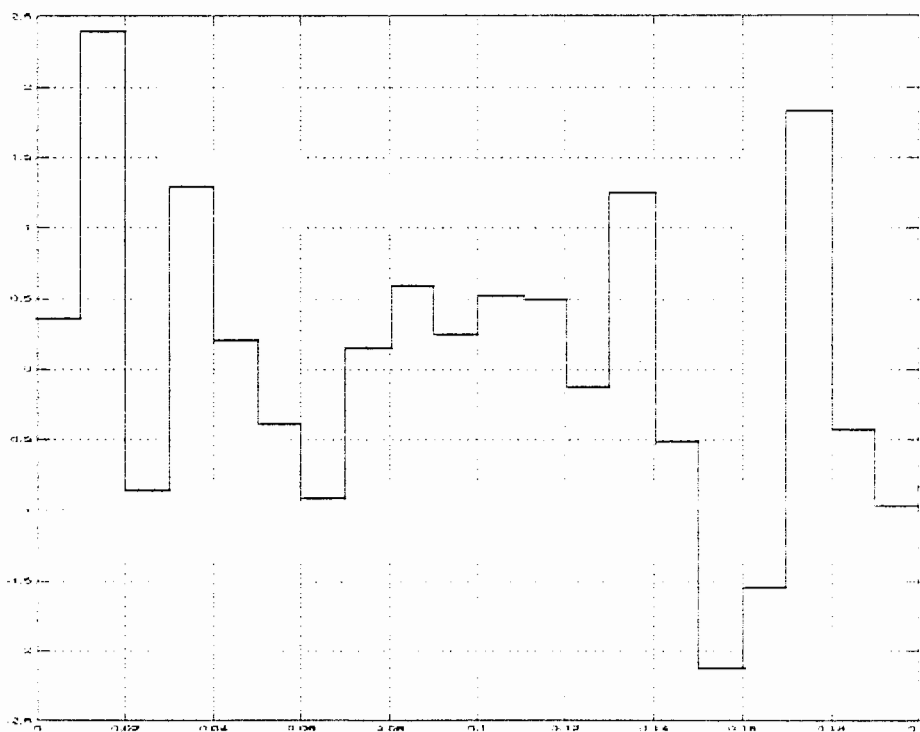
شکل ( ۷-۱۷ ) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده  
فازی به ازای  $k = 400$



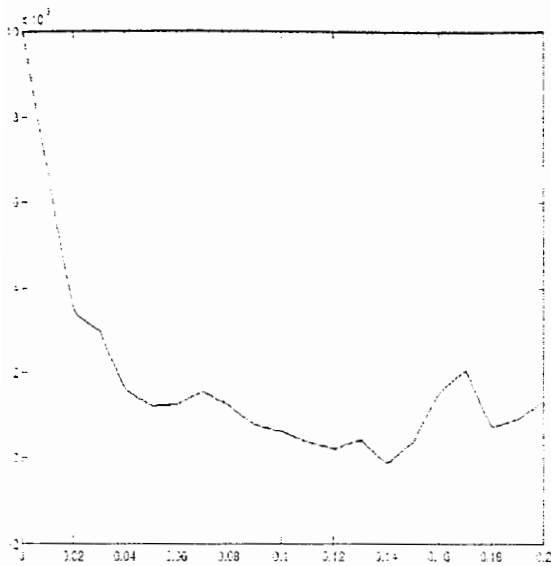
شکل ( ۷-۱۸ ) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده  
فازی به ازای  $k = 40$

در این قسمت اثر وارد کردن نویز را در یک مورد خاص بررسی می‌کنیم و تفاوت دو کنترل کننده را می‌بینیم. همانطور که در بخش (۶-۷) دیدیم دو نوع حسگر نیاز داریم یکی مربوط به نیروی وارد شده از فک به جسم و دیگری حسگر جابجایی می‌باشد. در قسمت اول فرض می‌کنیم نویز سفیدی مطابق شکل (۷-۱۸) بر اثر حسگر نیرو روی  $F_e$  سیستم می‌افتد.

اگر پارامترهای قانون امپدانس خود را مطابق با جدول (۷-۲) تعیین کنیم و دو کنترل کننده فازی و  $PID$  را روی سیستم پیاده‌سازی کنیم، می‌توانیم اثر نویز حسگر نیرو را روی هر یک ببینیم. شکل (۷-۱۹) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده فازی با حضور نویز معین بر روی  $F_e$  و شکل (۷-۲۰) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده  $PID$  با حضور نویز بر روی  $F_e$  را، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم این پارامترهای قانون امپدانس بهترین حالتی است که  $PID$  به آن جواب می‌دهد یا به عبارت دیگر  $PID$  برای این مقادیر طراحی شده است. ولی باز هم در شکل (۷-۱۹) و شکل (۷-۲۰) مزیت کنترل کننده فازی بر  $PID$  به خوبی واضح است.

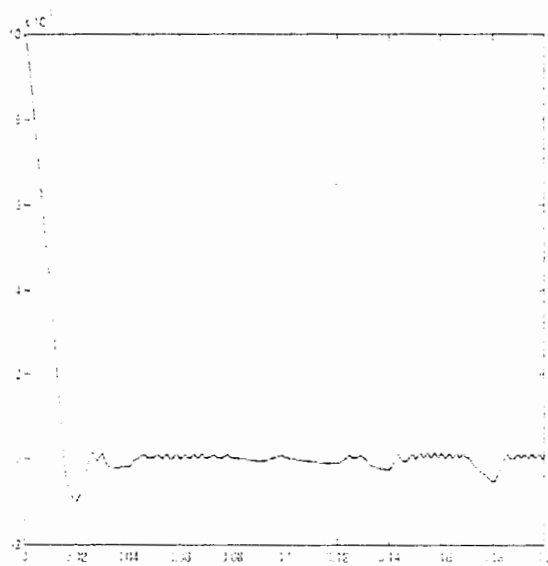


شکل (۷-۱۸) نویز سفید حسگر نیرو



شکل (۷-۲۰) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده

$PID$  با حضور نویز بر روی  $F_e$

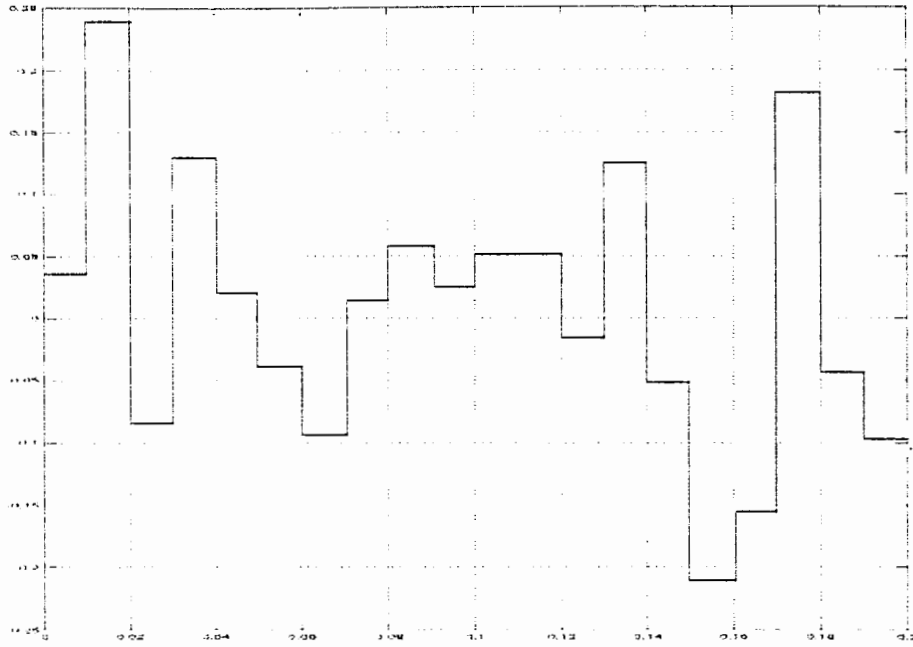


شکل (۷-۱۹) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده

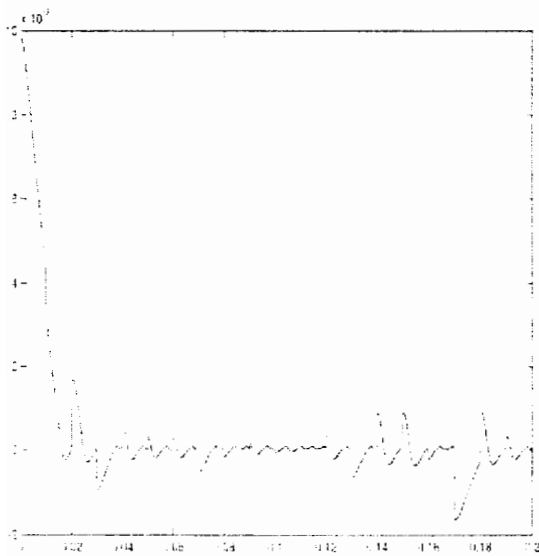
فازی با حضور نویز بر روی  $F_e$

در قسمت دوم فرض می‌کنیم نویز سفیدی مطابق شکل (۷-۲۱) بر اثر حسگر جابجایی روی سیستم می‌افتد.

اگر پارامترهای قانون امپدانس خود را مطابق با جدول (۷-۲) تعیین کنیم و دو کنترل کننده فازی و  $PID$  را روی سیستم پیاده‌سازی کنیم، می‌توانیم اثر نویز را روی هر یک ببینیم. شکل (۷-۲۳) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده فازی با حضور نویز بر روی  $X_m$  و شکل (۷-۲۲) خطای رفتار سیستم با کنترل کننده  $PID$  با حضور نویز بر روی  $X_m$  را، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم این پارامترهای قانون امپدانس بهترین حالتی است که  $PID$  به آن جواب می‌دهد یا به عبارت دیگر  $PID$  برای این مقادیر طراحی شده است. ولی باز هم در شکل (۷-۲۲) و شکل (۷-۲۳) مزیت کنترل کننده فازی بر  $PID$  به خوبی واضح است.

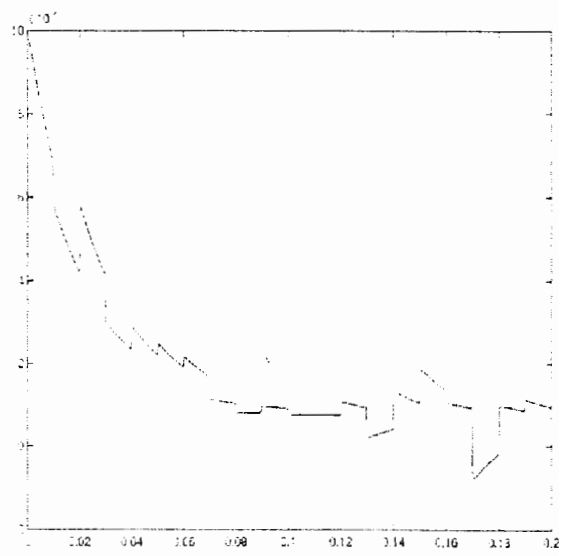


شکل (۲۱-۷) نویز سفید اعمال شده به متغیر  $X_m$



شکل (۲۳-۷) خطای رفتار سیستم فازی با حضور نویز

بر روی  $X_m$



شکل (۲۲-۷) خطای رفتار سیستم  $PID$  با حضور

نویز بر روی  $X_m$

این مقایسه‌ها توانمندی استفاده از کنترل‌کننده فازی را مشخص می‌نماید.

توجه به یک نکته دیگر نیز مفید می‌باشد که سیستم به نویز جابجایی حساستر از نویز نیرو است به شکل (۷-۲۳) و شکل (۷-۱۹) توجه کنید.



## ۷-۴ - کنترل موقعیت به کمک کنترل امپدانس:

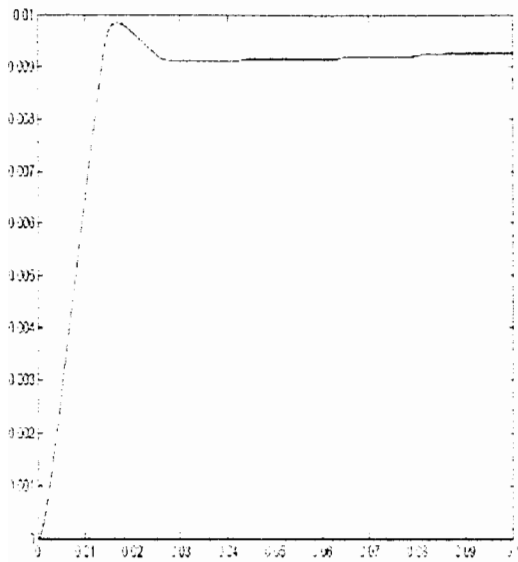
سوالی که در ابتدا مطرح می گردد این است که چگونه مدل سیستم در نظر گرفته شده را تغییر دهیم تا برای کنترل موقعیت، مدلی مناسب باشد؟

در کنترل موقعیت که جسم با فک درگیر نمی باشد، در اثر نیروی وارد شده به فک هوا شکافته شده و دو فک به یکدیگر نزدیک می شوند. در این حالت ضریب سختی معادل جسم بسیار ناچیز می گردد و می توان آن را صفر در نظر گرفت، در نتیجه ضریب سختی معادل  $K_m$  برابر صفر خواهد بود. در این حالت ضریب اصطکاک ویسکوز وجود دارد زیرا هم ضریب اصطکاک ویسکوز بین اجزا موتور و چرخ دنده ها موجود می باشد و هم به علت شکافته شدن هوا توسط فک که متناسب با سرعت حرکت فک به آن نیرو وارد می نماید و آن را می توان به صورت ضریب اصطکاک ویسکوز مدل کرد، پس ضریب اصطکاک ویسکوز معادلی وجود دارد که مقدار آن بزرگ نیست. بدین طریق مدل ما برای حالتی که فک با جسم درگیر نشده است مناسب می باشد.

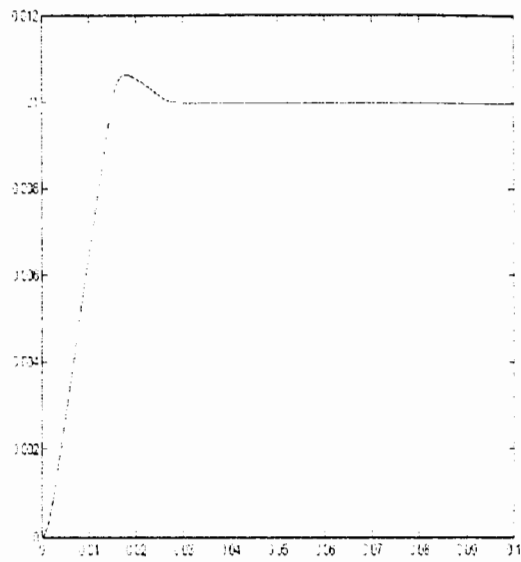
در شبیه سازی صورت گرفته مقدار ضریب سختی معادل یعنی  $K_m$  برابر صفر و ضریب ویسکوز معادل یعنی  $B_m = 1$  در نظر گرفته شده است.

در کنترل موقعیت به کمک کنترل امپدانس باید ضریب سختی مجازی در قانون امپدانس به اندازه کافی بزرگ باشد. با انتخاب ضریب سختی مجازی ۴۰۰۰۰ می بینیم که کنترل امپدانس به خوبی به عنوان کنترل موقعیت به ردگیری ورودی پله ۰،۰۱ در شکل (۷-۲۴) پرداخته است. خطای ماندگار خروجی سیستم صفر می شود. برای آنکه اهمیت ضریب سختی مجازی روشن شود مقدار آن را به ۴۰ کاهش می دهیم، ردگیری موقعیت در شکل (۷-۲۵) نامطلوب بودن عملکرد این سیستم را نشان می دهد.

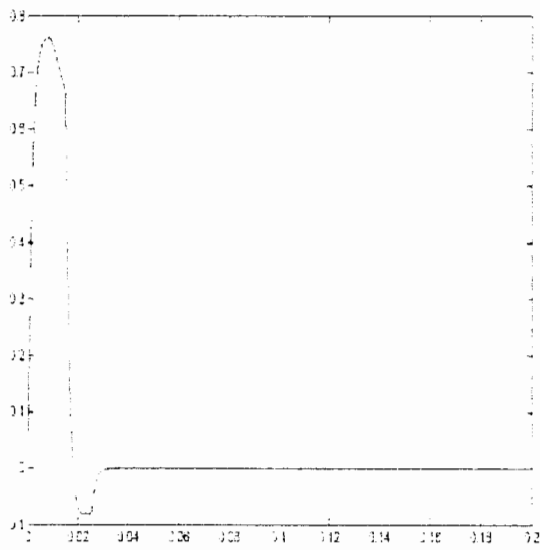
شکل (۷-۲۶) خطای پاسخ سیستم را در حالت مطلوب یا انتخاب ضریب سختی مجازی ۴۰۰۰۰ را نشان می دهد و شکل (۷-۲۷) نیروی وارد شده به فک را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود ابتدا نیرو مقدراری مثبت و کم پیدا می کند تا فک شروع به حرکت در کرده تا به نقطه مورد نظر برسد. سپس مقدراری منفی پیدا می کند تا فرآیندش موقعیتی خود را تصحیح کند و هنگامی که فک به نقطه انتهایی رسید، نیرو صفر می گردد.



شکل (۷-۲۵) تعقیب مسیر پله 0.01 با  $K=40$

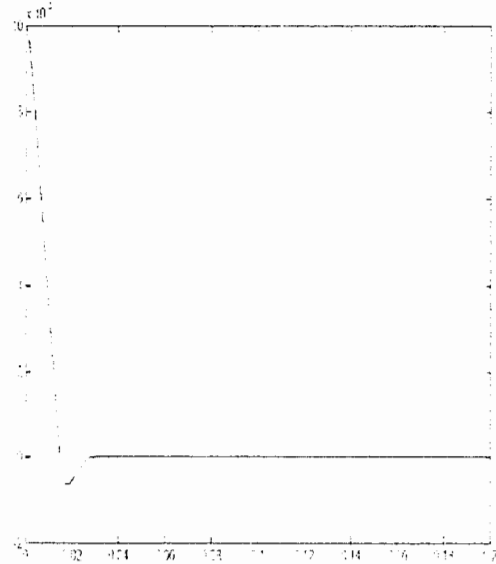


شکل (۷-۲۴) تعقیب مسیر پله 0.01 با  $K=40000$



شکل (۷-۲۷) نیروی وارد شده به جسم در تعقیب

مسیر



شکل (۷-۲۶) خطای پاسخ سیستم در تعقیب مسیر

## ۷-۸ - کنترل نیرو به همراه کنترل امپدانس

در برخی از کاربردهایی صنعتی احتیاج داریم که ربات، جسم را با نیروی مشخص بگیرد و این نیرو تحت دینامیک مشخص به جسم وارد شود. از آنجا که کنترل امپدانس منحصرًا رفتار دینامیکی سیستم را کنترل می نماید، با افزودن این امکان به سیستم می توان راه حل جدیدی پیشنهاد داد تا کنترل هماهنگ نیرو و دینامیک را روی مدل پیاده سازی نماییم.

برای روشن کردن موضوع نحوه کارکرد سیستم کنترل امپدانس را مرور می کنیم: همانطور که قبلاً مطرح شد برای پیاده سازی قانون کنترل امپدانس، یک نقطه مرجع، داخل جسم در نظر گرفته و آن را با  $X_d$  نمایش می دهیم. در این صورت، قانون کنترل مطابق معادله (۷-۱) را بدست می آید.

$$F_e = M \cdot (\ddot{X}_d - \ddot{X}_i) + B \cdot (\dot{X}_d - \dot{X}_i) + K \cdot (X_d - X_i) \quad (7-1)$$

با فرض ثابت بودن  $X_d$  خواهیم داشت.

$$F_e = -M \cdot \ddot{X}_i - B \cdot \dot{X}_i + K \cdot (X_d - X_i) \quad (7-2)$$

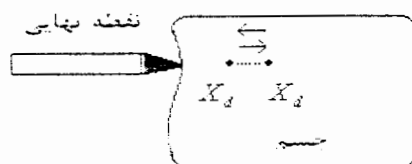
با تنظیم  $M$ ،  $B$  و  $K$  دینامیک مورد نظر را روی سیستم پیاده می نماییم.

در معادله (۷-۲)، نیروی وارد به مجری نهایی  $F_e$  را به عنوان ورودی در نظر گرفته و با توجه به قانون امپدانس،  $X_i$  را تعیین و آن را با مقدار واقعی،  $X_m$ ، مقایسه کرده و اختلاف آنها به عنوان سیگنال خطا به کنترل کننده وارد می نماییم و در صدد صفر نمودن آن بر می آیم.

در این معادله  $F_e$  تابعی از  $X_i$  و مشتقات آن می باشد، پس نمی توان آن را متغیر مستقل فرض نمود. حال اگر  $X_d$  را ثابت در نظر بگیریم در این صورت می توان یک درجه آزادی به سیستم اضافه کرد و از آن برای تنظیم نیروی نهایی استفاده نماییم. در حالت نهایی داریم:

$$F_e = K \cdot (X_d - X_i) \quad (7-3)$$

حال می توان را برای صفر کردن خطای نیرو،  $X_d$  را جابجا نمود. (به شکل (۷-۲۸) نگاه کنید).



شکل (۷-۲۸) جابجا شدن  $X_d$  در داخل جسم

بنابراین می توان قانون کنترل جدیدی در نظر گرفت و از قانون کنترل  $PID$  مانند معادله (۷-۴) استفاده کرد:

$$X_d = K_3 \cdot (\dot{F}_d - \dot{F}_e) + K_2 \cdot (F_d - F_e) + K_1 \cdot \int (F_d - F_e) dt \quad (۷-۴)$$

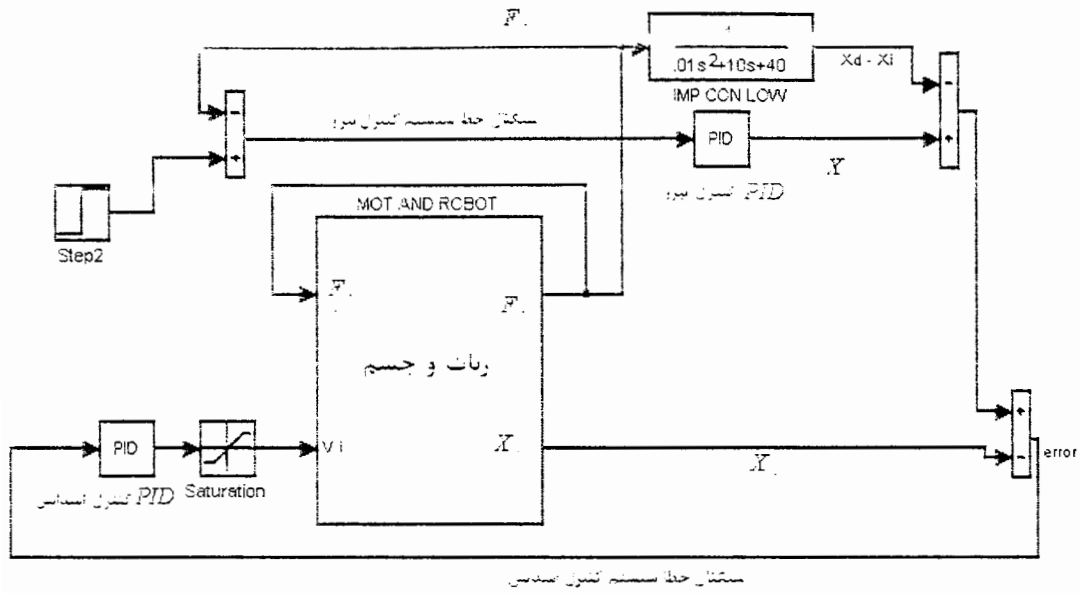
که  $F_d$  نیروی مطلوب،  $F_e$  نیروی واقعی است.

برای کاهش اثر  $X_d$  در رفتار دینامیکی سیستم، ضریب  $K_3$  در معادله (۷-۴) برابر صفر و ضریب  $K_2$  کوچک انتخاب می شود و در نتیجه  $X_d$  انتگرال خطای نیرو خواهد بود که اثر آن در حالت ماندگار برجسته خواهد شد.

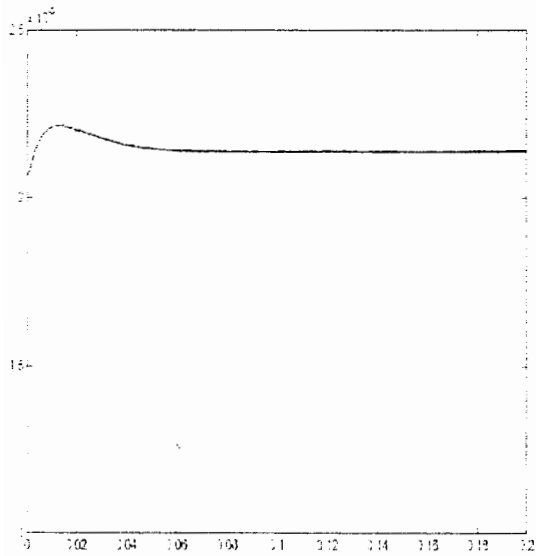
شبیه سازی سیستم در شکل (۷-۲۹) آمده است.

برای قانون امیدانسی مطابق با جدول (۷-۲)،  $PID$  کنترل نیرویی با ضرایب  $K_p = 0.001$ ،  $K_v = 0$  و  $K_f = 11$  بدست می آید.

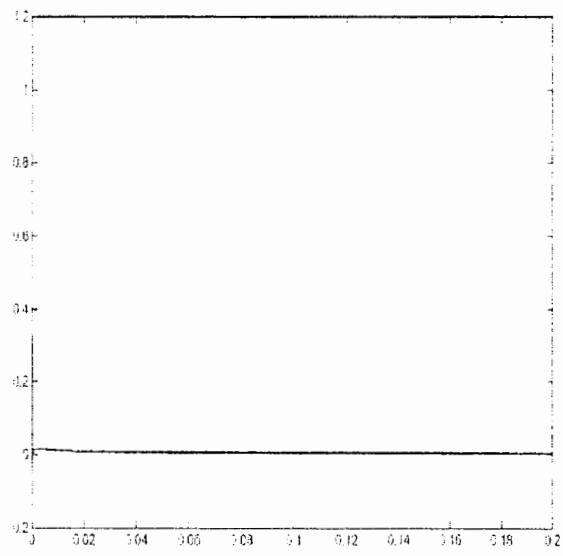
در شکل (۷-۳۰) سیگنال خطای نیرو را نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود این سیگنال خطا با سرعت بسیار زیادی به سمت صفر میل کرده و مقدار نهایی آن صفر می گردد. در شکل (۷-۳۱) سیگنال خطا قانون امیدانس را مشاهده می کنید. همانطور که دیده می شود خطای موقعیت این سیستم نیز کم می باشد.



شکل (۷-۲۹) بلوک دیاگرام سیستم کنترل نیرو به همراه کنترل آمپدانس

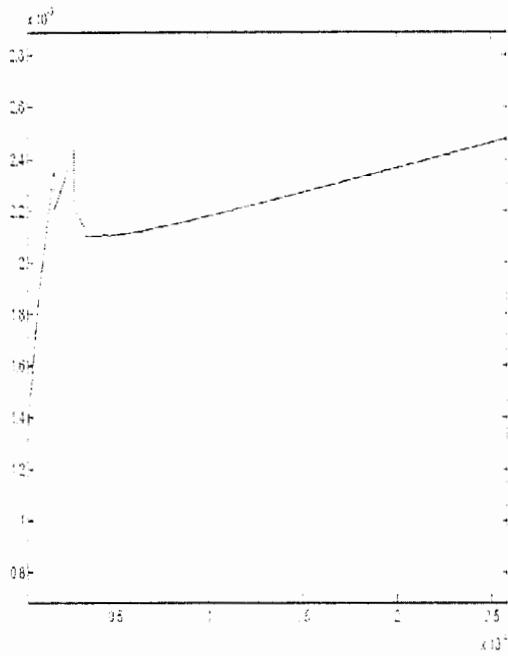


شکل (۷-۳۱) سیگنال خطای قانون آمپدانس

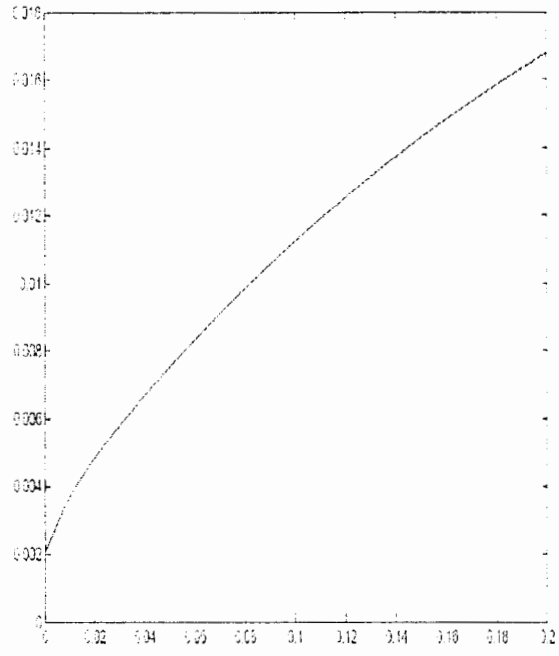


شکل (۷-۳۰) سیگنال خطای نیرو

در شکل (۷-۳۳) تغییرات  $V_{ij}$  برای دفر شدن در یک حال خالی نیرو را مشاهده می کنند. چون در لحظات ابتدایی این تغییرات کوچکتر و شدیدتر است شکل (۷-۳۲) در شکل (۷-۳۳) بزرگنمایی کرده ایم.



شکل (۷-۳۳) تغییرات  $X_d$  برای صفر شدن سیکنال  
خطای نیرو (بزرگنمایی شده)



شکل (۷-۳۲) تغییرات  $X_d$  برای صفر شدن سیکنال  
خطای نیرو

## فصل هشتم

# نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پایان نامه کنترل فازی امیدانس مجری نهایی ربات برای گرفتن اجسام سخت طراحی و شبیه سازی شده است. با هدف کنترل رفتار دینامیکی مجری نهایی برای گرفتن اجسام، کنترل امیدانس به کار برده شده است. استفاده از کنترل کننده فازی در سیستم کنترل امیدانس موجب شده است که سیستم بتواند عدم قطعیت‌های پارامتری مجری نهایی را مهار نماید و در برابر تغییرات وزن، سفتی و شکل بار، مقاوم باشد. به علاوه، قابلیت تطبیق مناسبی برای اجرای قانون امیدانس با ضرایب مختلف داشته باشد. نتایج شبیه سازی مزیت‌های سیستم فازی را نسبت به روش سنتی  $PID$  نشان داده است.

کنترل موقعیت با روش کنترل امیدانس برای ردگیری مسیر زمانی موقعیت مجری نهایی در کار فشرده کردن جسم نرم و شکل دادن به اجسام، بررسی و قانون امیدانس مناسب پیشنهاد شده است. نتایج شبیه سازی، عملکرد مناسب سیستم کنترل را تایید می نمایند. در قانون امیدانس انتخاب ضریب ویسکوز مجازی کوچک باعث زیاد شدن نوسانات می شود و انتخاب ضریب اینرسی مجازی بزرگ باعث کند شدن سیستم می گردد. انتخاب ضریب سختی مجازی در قانون امیدانس تنها پارامتر تاثیر گذار بر حالت دائمی سیستم است. بنابراین می توان با انتخاب مناسب این سه پارامتر ربات را وادار به پیروی از دینامیک مد نظر کرد.

عملکرد کنترل امپدانس در بسیاری از نتایج آن نشان داده شده است. از کنترل امپدانس می توان به عنوان کنترل موقعیت استفاده کرد. برای اینکار کافی است ضریب سختی مجازی بزرگ انتخاب شود. از کنترل امپدانس برای کنترل نیرو نیز می توان استفاده کرد. در راه حل جدیدی که ارائه شده است دینامیک گرفتن جسم و مقدار نیرو در حالت دائم را می توان کنترل نمود.

کنترل کننده فازی امپدانس مزیت های فراوانی نسبت به کنترل کننده  $PID$  امپدانس دارد. در کنترل فازی امپدانس، تغییر خواص جسم مانند سختی، سفتی و ضریب ویسکوز هیچگونه تاثیر محسوسی بر عملکرد سیستم کنترل نداشته و از آن برای گرفتن هر جسمی با هر ویژگی با دینامیک مورد نظر می توان استفاده نمود. سیستم مجهز به کنترل فازی نسبت به تغییر پارامترهای قانون امپدانس حساس نمی باشد و نسبت به وارد شدن نویز در محل هایی که حسگر ها قرار گرفته اند مقاوم می باشد.

با توجه به مزایای فراوان کنترل کننده فازی امپدانس استفاده از آن در آن دسته از کاربردهای کنترل موقعیت و نیرو که عدم شناخت از محیط، جسم و ربات وجود دارد و یا در مواردی که دینامیک گرفتن شی اهمیت دارد پیشنهاد می شود. اگر بگوییم که پیاده سازی قانون امپدانس می تواند تحول عظیمی در سیستمهایی که نیرو و یا موقعیت در آن کنترل می شود، بوجود می آورد سخنی به گراف نگفته ایم. کاربرد وسیع کنترل امپدانس، که در بخش (۵ - ۱) گفته شد اثباتی است بر این ادعا. با مشتق گرفتن از طرفین رابطه امپدانس می توان آن را برای برقراری رابطه دینامیک مورد نیاز بین ضربه و سرعت بکار برد، و از آن برای مواردی که ضربه مطرح است مثل سپر خودرو، کمک فنر و فنر خودرو استفاده کرد.



## ضمیمه الف

### روش Hsia در کنترل امیدانس

در این ضمیمه روش دیگری در فرمول بندی کنترل امیدانس ارائه شده است [۵].

فرض کنید معادله ربات به شکل زیر باشد:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + T_f(\dot{q}) = T - T_e \quad (\text{الف} - ۱)$$

که  $D(q)$  ماتریس لختی یا اینرسی  $N \times N$  و مثبت معین و متقارن می باشد.  $C(q, \dot{q})\dot{q}$  بردار ناشی از گشتاورهای کوریولیسی و گریز از مرکز به ابعاد  $N \times 1$  باشد و  $g(q)$  بردار گشتاور  $N \times 1$  ناشی از گرانش می باشد و  $T_f(\dot{q})$  بردار  $N \times 1$  ناشی از نیروی اصطکاک عملگر و  $T$  بردار گشتاور  $N \times 1$  ناشی از عملگر و  $T_e$  بردار گشتاور مفصلی ناشی از بار خارجی با ابعاد  $N \times 1$  است

برای راحتی جایگذاری زیر را انجام می دهیم :

$$H(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (\text{الف} - ۲)$$

پس معادله (الف - ۱) به صورت زیر در می آید :

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + T_f(\dot{q}) = T - T_e \quad (\text{الف} - ۳)$$

با ضرب کردن معادله (الف - ۲) در  $J^{-T}$  داریم :

$$D_X \ddot{X} + H_X + F_f = F - F_e \quad (\text{الف} - ۴)$$

که همان معادله در فضای کار یا کارترین است و در آن :

$$D_X = J^{-T} D J^{-1} \quad (\text{الف} - ۵)$$

$$H_v = J^{-T} H - D_v J J^{-1} \dot{X} \quad (\text{الف- ۶})$$

$$F_r = J^{-T} T_r \quad (\text{الف- ۷})$$

می باشد و  $J$  ماتریس ژاکوبین بایستی معکوس پذیر باشد.

در بیشتر کاربرد ها مقادیر دقیق  $D_X$  و  $H_X$  و  $F_X$  معلوم نیست فرض کنید  $\hat{D}$  و  $\hat{H}$  تقریبی برای  $D$  و  $H$  باشد قانون کنترل را به صورت زیر تعریف می کنیم :

$$F = \hat{D}V + \hat{H} + F_e \quad (\text{الف- ۸})$$

توجه کنید که  $F_e$  توسط محیط اعمال می شود و  $V$  بردار کنترل است.

و چنین تعریف می شود :

$$V = \ddot{X}_r + M^{-1} [B (\dot{X}_r - \dot{X}) + K (X_r - X) - F_e] \quad (\text{الف- ۹})$$

که نتیجه می دهد :

$$D \ddot{X} + H + F_r = \hat{D} \ddot{X}_r + \hat{D} M^{-1} [\ddot{X}_r + M^{-1} [B (\dot{X}_r - \dot{X}) + K (X_r - X) - F_e]] + \hat{H} + F_e - F_e \quad (\text{الف- ۱۰})$$

با حذف  $F_e$  داریم :

$$D \ddot{X} + H + F_r = \hat{D} \ddot{X}_r + \hat{D} M^{-1} [\ddot{X}_r + M^{-1} [B (\dot{X}_r - \dot{X}) + K (X_r - X) - F_e]] + \hat{H} \quad (\text{الف- ۱۱})$$

طرفین را در  $\hat{D}^{-1}$  ضرب می کنیم داریم :

$$\hat{D}^{-1} D \ddot{X} + \hat{D}^{-1} H + \hat{D}^{-1} F_r = \ddot{X}_r + M^{-1} [\ddot{X}_r + M^{-1} [B (\dot{X}_r - \dot{X}) + K (X_r - X) - F_e]] + \hat{D}^{-1} \hat{H} \quad (\text{الف- ۱۲})$$

به طرفین یک  $-\ddot{X}$  اضافه می کنیم داریم :

$$\hat{D}^{-1} D \ddot{X} + \hat{D}^{-1} H + \hat{D}^{-1} F_r - \ddot{X} = \ddot{E} + M^{-1} B \dot{E} + M^{-1} K E - M^{-1} F_e + \hat{D}^{-1} \hat{H} \quad (\text{الف- ۱۳})$$

که :

$$E = (X_p - X) \quad (\text{الف - ۱۴})$$

می توان معادله را چنین نوشت :

$$\ddot{E} + M^{-1} B \dot{E} + M^{-1} K E = \hat{D}^{-1} D \ddot{X} - \ddot{X} + \hat{D}^{-1} H - \hat{D}^{-1} \hat{H} + \hat{D}^{-1} F_f + M^{-1} F_v \quad (\text{الف-۱۵})$$

در نتیجه :

$$\ddot{E} + M^{-1} B \dot{E} + M^{-1} K E = \hat{D}^{-1} (D \ddot{X} - \hat{D} \ddot{X}) + \hat{D}^{-1} (H - \hat{H}) + \hat{D}^{-1} F_f + M^{-1} F_v \quad (\text{الف-۱۶})$$

یا

$$\ddot{E} + M^{-1} B \dot{E} + M^{-1} K E = \hat{D}^{-1} \Delta D + \hat{D}^{-1} \Delta H + \hat{D}^{-1} F_f + M^{-1} F_v \quad (\text{الف - ۱۷})$$

که در آن

$$\Delta D = D - \hat{D} \quad (\text{الف - ۱۸})$$

$$\Delta H = H - \hat{H} \quad (\text{الف - ۱۹})$$

در حالت ایده آل  $\Delta D$  و  $\Delta H$  و  $F_f$  صفر می شود و معادله به صورت زیر ساده می شود:

$$F_v = M \ddot{E} + B \dot{E} + K E \quad (\text{الف - ۲۰})$$

که می توان با تعیین  $M$  و  $B$  و  $K$  به رابطه مورد نظر رسید [۵].

## ضمیمه ب

# کنترل فازی

برای مطالعه بیشتر در این زمینه به مرجع [۳۳] مراجعه نمایید.

### ب - ۱ سیستم فازی

واژه فازی در فرهنگ لغت آکسفورد بصورت مبهم، گنگ، نادقیق، گیج، منبوش، در هم و نامشخص تعریف شده است. سیستم های فازی، سیستم هایی هستند با تعریف دقیق و کنترل فازی نیز نوع خاصی از کنترل غیر خطی می باشد که آن هم دقیقاً تعریف می گردد. این مطلب مشابه کنترل سیستم های خطی می باشد که واژه خطی یک صفت فنی بوده که حالت و وضعیت سیستم و کنترل را مشخص می کند، چنین چیزی برای واژه فازی نیز وجود دارد. اساساً اگر چه سیستم های فازی پدیده های غیر قطعی و نامشخص را توصیف می کنند، با این حال خود تئوری فازی یک تئوری دقیق می باشد.

### ب-۲ تاریخچه

تئوری فازی بوسیله پروفیسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ در مقاله ای به نام "مجموعه های فازی" معرفی گردید. قبل از کار بر روی تئوری فازی پروفیسور لطفی زاده یک شخص برجسته در تئوری کنترل بود. او مفهوم حالت که اساس تئوری کنترل مدرن را شکل می دهد، توسعه داد. در اوایل دهه ۶۰ او فکر کرد که تئوری کنترل کلاسیک بیش از حد بر روی دقت تأکید داشته و از این رو با سیستم های پیچیده نمی تواند کار کند. در سال ۱۹۶۲ چیزی به این مضمون برای سیستم های بیولوژیک

نوشت: "ما اساساً به نوع جدیدی ریاضیات نیازمندیم، ریاضیات مقادیر مبهم یا فازی که توسط توزیع احتمالات قابل توصیف نیستند." پس از آن وی ایده اش را در مقاله "مجموعه های فازی تجسم بخشید. با پیدایش تئوری فازی، بحث ها و جدل ها پیرامون آن نیز آغاز گردید. بعضی ها آنرا تایید کرده و کار روی این زمینه جدید را شروع کردند و برخی دیگر نیز این ایراد را گرفتند که این ایده برخلاف اصول علمی است.

اگر بگوییم پذیرفته شدن تئوری فازی به عنوان یک زمینه مستقل به واسطه کارهای برجسته پروفیسور لطفی زاده بوده، سخنی به گزاف نگفتیم. بسیاری از مفاهیم بنیادی تئوری فازی بوسیله پروفیسور لطفی زاده در اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰ مطرح گردید. پس از معرفی مجموعه های فازی در سال ۱۹۶۵، او مفاهیم الگوریتم های فازی در سال ۱۹۶۸ و تصمیم گیری فازی در سال ۱۹۷۰ و ترتیب فازی در سال ۱۹۷۱ مطرح نمود. در سال ۱۹۷۳ او مقاله دیگری را منتشر کرد به نام: "طرح یک راه حل جدید برای تجزیه و تحلیل سیستم های پیچیده و فرایند های تصمیم گیری". این مقاله اساس کنترل فازی را بنا نهاد. پروفیسور لطفی زاده در این مقاله مفهوم متغیر های زبانی و استفاده از قواعد اگر- آنگاه را برای فرمونه کردن دانش بشری معرفی نمود.

رخداد بزرگ در دهه ۱۹۷۰، تولد کنترل کننده های فازی برای سیستم های واقعی بود. در سال ۱۹۷۵، ممدانی و آسلیان چهارچوب اولیه ای برای کنترل کننده های فازی مشخص کردند، در دهه ۸۰ دانشمندان ژاپنی به مفهوم کنترل فازی علاقه مند شدند. آنها به سرعت دریافتند که کنترل کننده های فازی به سهولت قابل طراحی بوده و بدلیل اینکه کنترل فازی به یک مدل ریاضی نیاز ندارد، آنرا می توان در مورد خیلی از سیستم هایی که بوسیله تئوری کنترل متعارف قابل پیاده سازی نیستند، بکار برد. و سوگنو این تئوری را برای پیاده سازی سیستم کنترل تصفیه آب عملی ساخت.

### ب- ۳ انواع سیستم های فازی

سیستم های فازی، سیستم هایی مبتنی بر دانش یا قواعد می باشند. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بشری بوده که از قواعد اگر - آنگاه فازی تشکیل شده است. یک قاعده اگر- آنگاه فازی یک عبارت اگر - آنگاه فازی بوده که بعضی کلمات آن بوسهله توابع تعلق پیوسته مشخص شده اند.

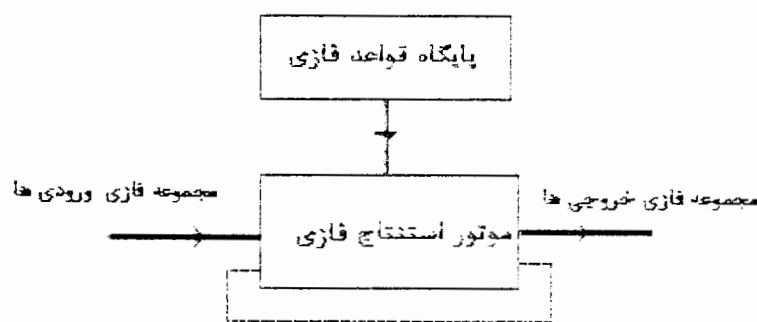
به طرز خلاصه، نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی بدست آوردن مجموعه ای از قواعد اگر - آنگاه فازی از دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی می باشد. مرحله بعدی ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد است. سیستم های فازی مختلف از اصول و روشهای متفاوتی برای ترکیب این قواعد استفاده می کنند.

در کتب و مقالات معمولاً از سه نوع سیستم فازی صحبت به عمل می آید:

- سیستم های فازی خالص
- سیستم های فازی تاکاگی-سوگنو و کانگ ( TSK )
- سیستم های فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز

به طور خلاصه این سه نوع سیستم را شرح می دهیم:

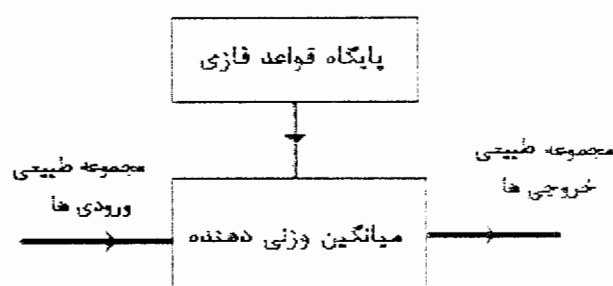
ساختار اصلی یک سیستم فازی خالص در شکل (ب-۳-۱) نشان داده شده است. پایگاه قواعد فازی مجموعه ای از قواعد اگر- آنگاه فازی را نشان می دهد. موتور استنتاج فازی این قواعد را به یک نداشت از مجموعه های فازی در فضای ورودی به مجموعه های فازی در فضای خروجی بر اساس اصول منطق فازی ترکیب می کند در شکل(ب-۳-۱) اگر خط نقطه چین وجود داشته باشد، چنین سیستمی، سیستم فازی دینامیک نامیده می شود.



شکل(ب-۳-۱) سیستم فازی خالص

مشکل اصلی در رابطه با سیستم های فازی خالص این است که ورودی ها و خروجی های آن مجموعه های فازی می باشند (واژه های در زبان طبیعی). در حالی که سیستم های مهندسی، ورودی ها و خروجی ها متغیرهایی با مقادیر حقیقی می باشند. برای حل این مشکل، تاکاگی-سوگنو و کانگ نوع

بیشتری از سیستم های فازی مدرفنی کردند که ورودی ها و خروجی های آن متغیر هایی با مقادیر حقیقی می باشند. منایسه این دو نوع سیستم فازی نشان می دهد که بخش آنگاه قواعد فازی از یک عبارت توصیفی با مقادیر زبانی به یک رابطه ریاضی ساده تبدیل شده است. این تغییر، ترکیب قواعد فازی را آسان تر می کند. در حقیقت سیستم های فازی تاکاگی-سوگنو و کانگ ( *TSK* ) یک میانگین وزنی از مقادیر بخش های آنگاه قواعد می باشد. ساختار اصلی سیستم های فازی تاکاگی-سوگنو و کانگ ( *TSK* ) در شکل (ب- ۳- ۲) نشان داده شده است.



شکل(ب-۳-۲) سیستم فازی تاکاگی-سوگنو و کانگ ( *TSK* )

مشکلات عمده سیستم فازی *TSK* عبارتند از:

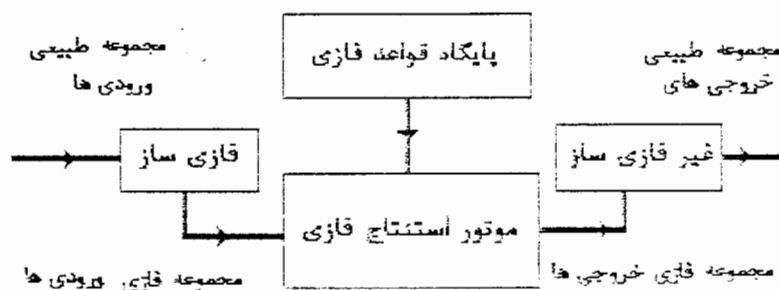
□ بخش آنگاه قاعده یک فرمول ریاضی بوده و بنابراین چهارچوبی را برای نمایش دانش بشری فراهم نمی کند.

□ این سیستم دست ما را برای اعمال اصول مختلف منطق فازی باز نمی گذارد و در نتیجه انعطاف پذیری سیستم های فازی در این ساختار وجود ندارد.

برای حل این مشکلات از نوع سومی از سیستم های فازی یعنی سیستم های فازی با ساز و غیر فازی ساز استفاده میکنیم.

به منظور استفاده از سیستم های فازی خالص در سیستم های مهندسی، یک روش ساده اضافه کردن یک فازی ساز در ورودی که متغیر های با مقادیر حقیقی را به یک مجموعه فازی تبدیل کرده و یک غیر فازی ساز که یک مجموعه فازی را به یک متغیر با مقدار حقیقی در خروجی تبدیل می کند، می

باشد. نتیجه یک سیستم فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز بوده که در شکل (ب-۳-۳) نشان داده شده است. این سیستم فازی معایب سیستم فازی خالص و سیستم فازی TSK را می پوشاند.



شکل (ب-۳-۳) سیستم فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز



Reference:

- 1- Khalil W. and Dombre E., "Modeling, Identification and Control of Robots chapter 15 Compliant Motion Control".
- 2- Asada H. and Slotin E. , "Robot Analysis and Control". (MIT) Translated by: Dr.M. Habibnejad Chapter 4, 7.
- 3- Spong M.W. and Vidyasagar M., "Robot Dynamics and Control", 1989, Jhon Wilay and Sons, INC.
- 4- Hogan Neville , "Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control" ,Department of Mechanical Engineering and Laboratory for Manufacturing and Productivity MIT
- 5- Jung Seul , Hsia T.C. and Bonits Robert G., "Force Tracking Impedance Control of Robot Manipulators under Unknown Environment", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.12, No.3, 2004.
- 6- Huang L. and Gee S. S. and T. H. Lee, "Adaptive Impedance Control of Constrained Robotic", Dep. Of Electric and Communication Singapore Poly Technique and Dep. Of Engineering National UN. Of Singapore. Asian Control Conference, 4 -7 July, 2000, shanghai.
- 7- Jinglei Liand Perry Y. Li. "Passive Velocity Filed Control (PVFC) Approach to Robot Force Control and Countor Following" Dep. Of Mechanical Engineering UN. Of Minnesota, Japan/USA Symposium on Flexible Automation, July 23-26, 2000 Ann Arbor, Michigan, USA.
- 8- Alin Albu Schaffer and Christian Ott and G. Hirzinger. "Passivity Based Cartesian Impedance Control for Flexible Joint Manipulator" . Institute of Robotic and Mechatronic German Aerospace Center.

- 9- Nitzsch F. Dep. Mechanic and Aerospace Engineering Cartoon UN. And Zimick D. G. and Yong C. Institute for Aerospace Researcher, Ottawa. Canada. "Control Laws for an Active ..." the Aerospace Journal. January 2004.

۱۰- محمد خنخالی و حمید رضا تقی راد، "کنترل امیدانس سکان شبیه ساز پرواز"، دانشکده مهندسی برق دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

- 11- Yoshida K.; Nakanishi H.; Ueno H.; Inaba N.; Nishimaki T.; Oda M., "Dynamics, Control and Impedance Matching for Robotic Capture of a Non-Cooperative Satellite", *Advanced Robotics*, 1 March 2004, Vol. 18, No. 2, pp. 175-198(24).
- 12- Bruzzone L.E. and. Molfino R. M and M. Zoppi, "Mechatronic Design of a Parallel Robot for High Speed. Impedance Controlled Manipulation", *Proc. Of the 11<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation*, June 18-20, 2003.
- 13- Bruzzone L.E. and Molfino R. M. and M. Zoppi, "Modeling and Control of Peg in Hole Assembly Performance by a Translation Robot", *Proc. Of the IASTED International Conference Modeling, Identification and Control (MIC2002)*, Austria, February, 18-21, 2002.
- 14- Ales Hace and Karei Jezernik and Suzana Uran. "Robust Impedance controls".
- 15- Srikaew A., Cambron M. E., Northrup S., Peters R. A. II, D. M. Wilkes, and K. Kawamura, "Humanoid Drawing Robot", Center For Intelligent Systems, Vanderbilt University.
- 16- Lim H-O.: Setiawan S.A.: Takanishi A. "Position-Based Impedance Control of a Biped Humanoid Robot", *Advanced Robotics*, 1 May 2004, Vol. 18, No. 4, pp. 415-435(21), Publisher: VSP.
- 17- Fusaomi Nagata and Keigo Watanabe and Satoshi Hashino and Hiroyuki Tanaka and Takuro Matsuyama and Kenji Hara. "Polishing Robot Using a Joystick Controlled Teaching System"

- 18- Marcelo H. Ang Jr and Wei Lin and Ser-Yong Lim. "A Walk-Through Programmed Robot for Welding in Shipyards." *Industrial Robot*. Vol. 26 ,No.5 , 1999. pp377-388
  
- 19- Haruhiko Asada and Yukio Asari. "The Direct Teaching of Tool Manipulation Skills Via the Impedance Identification of Human Motions", Department of Applied System Science Kyoto UN. IEEE 1988.
  
- 20- Frisoli A. and Sotgiu E. and C. A. Avizzano and D. Checcacci and M. Bergamasco. "Force-Based Impedance Control of a Haptic Master System for Teleportation." 2004.
  
- 21- Srikaew A. and Cambron M. E. and Northrup S. and Peters R. A. and Wilkes D. M. and Kawamura K.. "Humanoid Drawing Robot". Center for Intelligent System. Vanderbilt University.
  
- 22- Chien -Chern Cheah and Danwei Wang "learning Impedance Control for Robotic Manipulators", *IEEE Transaction On Robotic AND Automation* , Vol.14 , No.3 . June1998
  
- 23- Salisbury K. J., "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinator", the 19<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Albuquerque, 1980, pp.95-100.
- 24- Raibert M. H. and Crige J. J., "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, 1981.pp.407-410.
  
- 25- Bruyninckx H. and Schutter J.D.. "Specification of Force Controlled Actions in the Task Frame Formalism Synthesis", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol.12. No.4, august1996.pp.581-589.
  
- 26- Zeng G., hemami A., "An Overview of Robot Force Control", *Robotica*, Vol.15.1997. pp.473-482.
  
- 27- Hogan N., "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I, Part II, Part III," *ASME j. Dynam. Syst. Contr.*, Vol.107, 1985.
  
- 28- Seraji H. and Colbaugh R., "Force Tracking in Impedance Control", *International Journal of Robotics Research*. Vol.16, No.1, 1997.pp.97-117.
  
- 29- Zhong Li and Gu Fang "Fuzzy impedance Control for Robots In Complex Spatial Edge Following", UN.Western Sydney.

- 30- Babaci S., Amirat Y. and Pontnau J., "fuzzy Adaptation Impedance of 6 DOF Parallel Robot Application to Peg in Hole Insertion", Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 1996 .pp.1770-1776.
- 31- Nagata F., Watanabe K. and Izumi k. "Position Based Impedance Control Using a Fuzzy Compensator", Third International Conference on Knowledge Based Intelligent Engineering System 1999, Adelaide. Australia. Pp.125-128.
- 32- Shibata. T. Murakami and K. Ohnishi. "A Unified Approach to Position and Force Control by Fuzzy logic". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.43, No.1. 1996. Pp.81-87.

۳۳- لی وانگ، سیستم های فازی و کنترل فازی، ترجمه محمد تشنه لب، چاپ دود، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

- 34- Drake S. H., "Using Compliance in lieu of Sensory Feedback for Automatic Assembly", PH.D. Thesis. Dept. of Mechanical Engineering, MIT, USA. September 1977.
- 35- Whitney D. E., Nevins J. L., "What Is The Remote center compliance RCC and what can it do", Proc. 9<sup>th</sup> Int. symp. On industrial robots, Washington, USA, March 1979, pp135-147.
- 36- Mason M.T., "Compliant Motion", In Robot Motion: Planning and Control, M. Brady et al Eds., MIT Press, Cambridge, USA, 1982.
- 37- Nevins J. L. et al., "Exploratory Research in Industrial Modular Assembly", Charles Stark Draper Lab., Cambridge, USA, Report, R-1111, 1971.
- 38- The Zodiac, Theory of Robot Control, C. Canudas Dewit, B. Siciliano, G. Bastin eds, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1996.
- 39- Kazeroni h., Sheridan T., Houpt D., "Robust compliant motion for manipulators", Part I and II, IEEE J., of robotics and automation, Vol.RA-2(2), 1986. pp. 83-105.

40- Whitney D.E., "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St Louis USA, March 1985, pp.262-268.

*Abstract:*

*This M.S. thesis considers methods of stiffness control including active stiffness control and passive stiffness control. It show that how to design passive stiffness control and then it compares the methods.*

*There is a comprehensive explanation of mechanical impedance and a comparison between stiffness control and impedance control. Then it presents concept of impedance control and shows that how to calculate it and it's benefit and it's defect. Then it expresses and compares some typical methods of impedance control, that all of those are model based. And show how to adjust coefficient of impedance law and result of this adjust.*

*Differences between two impedance law's that using force feedback or not, are considered by mathematical equation.*

*In order to consider impedance control, an end effectors of robot is designed including a permanent magnet dc motor and spiral gear and parallel gear. The equations of system are derived. And design impedance control based on position control. Both fuzzy controller and PID controller are design for impedance law then simulated all the system with fuzzy and PID controller.*

*A comparison between two controllers and show's that the impedance control based on fuzzy logic is much better.*

*In this simulation the effect of coefficient impedance law are considered and it can be concluded that impedance control using fuzzy controller not sensitive to each kind of object, then the ability of impedance control as a position control is presented and finally, a novel solution using both of impedance control and force control to control the force and dynamic behavior of the end effectors together is developed.*

*In The Name of god*



*Shahrood University of Technology*

*Department of Electrical and Robotic Engineering*

*Master Thesis in control engineering*

***Fuzzy Impedance Control  
For Grasping Rigid Object With Two  
Fingers End Effector***

*By: Mazdak Teimoortashloo*

*Supervisor: Dr. Mohamad Mehdi Fateh*

*Summer 2005*