دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – گرایش مکاترونیک

بالانسینگ بهینه برای ربات‌ها در مسیر تعیین شده

نگارش

علی اسماعیلی

استاد راهنما

دکتر ساسان آزادی

استاد مشاور

دکتر امین نیکوبین

مهرماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – گرایش مکاترونیک

بالانسینگ بهینه برای ربات‌ها در مسیر تعیین شده

نگارش

علی اسماعیلی

استاد راهنما

دکتر ساسان آزادی

استاد مشاور

دکتر امین نیکوبین

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

آنانکه وجودم برایشان همه رنج و وجودشان برایم همه مهر بود. آنانکه راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت. توانشان رفت تا به توانی برسم. مویشان سپید گشت تا رویم سپید بماند. فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان، سرمایه جاودانه من است. در برابر وجود گرمشان زانوی ادب بر زمین می نهیم و با قلبی مملو از عشق و محبت بر دستانشان بوسه می زنم. سرو وجودشان همیشه سرسبز و استوار باد.

تقدیر و تشکر

بنام خداوند لوح و قلم

حقیقت نگار وجود و عدم

خدایی که داننده رازهاست

نخستین سرآغاز آغازهاست

قبل از هر سخنی، خاضعانه از خداوند متعال بخاطر الطاف بی پایانش سپاسگذاری می کنم.

از خانواده گرامی، بخصوص پدر و مادر عزیزم که لحظه به لحظه زندگی با مهر و محبت و فداکاری های بیشمارشان رونق گرفته است، تشکر می کنم.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر آزادی و همچنین آقای دکتر نیکوبین بخاطر راهنمایی ها و زحمات ارزشمندشان سپاسگذارم. همچنین از آقای مهندس مجتبی مرادی که در تهیه و تکمیل این پایان‌نامه این پروژه همکاری و راهنمایی بسیاری داشته است کمال تشکر را دارم. از دوستان عزیزم که همواره یار بنده حقیر بوده‌اند، مهندس اسماعیل پورجم، مهندس پیام ناظم‌زاده، مهندس حمیدرضا رمضانی، مهندس سپهرفردوس‌زاد، مهندس محمد حسین مختاری، مهندس مهدی مرادی و بقیه دوستان که به دلیل کثرت اسامی از ایشان طلب بخشش می‌کنم، نهایت تشکر را دارم.

چکیده

بالانسینگ بهینه روشی جدید بر مبنای کنترل بهینه است که در آن مجهولات بالانسینگ به اضافه مجهولات مسیر(مانند پروفیل سرعت) به طور همزمان محاسبه می‌شوند. این روش در افزایش عملکرد ربات‌های صنعتی اثر قابل توجهی دارد که باعث کاهش حداکثری در مصرف انرژی خواهد شد. علی‌رغم اینکه در بسیاری از کاربردهای رباتیک مانند چسب‌کاری و جوشکاری، مسیر مشخص است ولی مجهولات دیگری همچون پروفیل سرعت مجهول می‌باشد. در این پایان نامه روش بالانسینگ بهینه ابتدا برای بالانس کردن منیپولاتورهای بالانس‌شده با فنر در حرکت نقطه به نقطه پیاده‌سازی شده است. سپس نتایج حاصله از این روش برای بالانس کردن منیپولاتورها در یک مسیر تعیین شده بررسی می‌شود. روش‌های دیگر بالانسینگ مانند بالانس استاتیکی و بالانس دینامیکی که در رباتیک مرسوم است صرفاً برای کاهش اثرات گرانشی ربات در نظر گرفته شده و اثرات مصرف انرژی و نیز تغییر بار ربات در نظر گرفته نمی‌شود و در واقع بالانسینگ استاتیکی ربات بدون در نظر گرفتن شرایط کاری ربات انجام می‌شود. انجام بالانسینگ غیر فعال با اضافه کردن عناصر غیرفعال مانند جرم و فنر به ساختار اصلی ربات امکان‌پذیر است. البته مقادیر پارامترهای اتصالی(مانند فاصله وزنه تعادل یا نقطه اتصال فنر) و مقداری(مانند مقدار جرم تعادل و مقدار سختی فنر) مجهول بوده که در بالانسینگ استاتیکی برای انرژی پتانسیل ثابت معلوم شده و در بالانسینگ بهینه برای کاهش انرژی تعیین می‌شوند. علاوه بر بالانسینگ استاتیکی، در کارهای سایر محققین قبل بالانسینگ با استفاده از روش‌های دینامیکی و بار-تطبیقی برای بعضی از منیپولاتورهای خاص نیز ارائه شده است. در این پایان‌نامه با استفاده از تئوری کنترل بهینه و با فرض مشخص‌بودن مسیر برای پنجه ربات، مقادیر بهینه سختی فنر بصورت انرژی-بهینه محاسبه می‌شوند. پس از بیان کلی این روش و شبیه‌سازی‌های مربوط به آن، به بررسی شرایط مختلف کاری مانند، شرایط مرزی و زمان اجرای حرکت پرداخته می‌شود. در نتیجه دیده می‌شود که شاخص کارآیی و یا میزان مصرف انرژی در بالانسینگ بهینه کمتر از بالانسینگ استاتیکی است.

فهرست

۱ مقدمه **۲**

۱.۱ مروری اجمالی بر بالانسینگ بهینه **۲**

۱.۲ مقدمه ای بر بالانسینگ **۵**

۱.۲.۱ بالانس استاتیکی ۵

۱.۲.۲ بالانسینگ تطبیقی ۸

۱.۳ تاریخچه کنترل بهینه **۸**

۲ تئوری کنترل بهینه **۱٤**

۲.۱ استخراج معادلات بهینگی **۱٤**

۲.۱.۱ بررسی روشهای مختلف حل عددی معادلات بهینگی ۱٦

۲.۲ استخراج معادلات زمانبندی مسیر **۱۸**

۳ مدل سازی و بالانسینگ **۲۳**

۳.۱ بالانس استاتیکی برای منیپولاتور تک لینکی با استفاده از فنر **۲۳**

۳.۱.۱ بالانسینگ استاتیکی برای یک نمونه منیپولاتور دولینکی (طرح اول) ۲۵

۳.۱.۲ بالانسینگ استاتیکی برای یک نمونه منیپولاتور دولینکی (طرح دوم) ۲۷

۳.۱.۳ مقایسه دو طرح دولینکی ۲۹

۳.۲ بالانسینگ منیپولاتور با وزنه تعادل در حرکت نقطه به نقطه **۲۹**

۳.۲.۱ بالانسینگ با وزنه تعادل ۲۹

۳.۲.۲ فرمولاسیون بالانسینگ بهینه ۳۰

۳.۲.۳ بالانسینگ منیپولاتور دو لینکی با وزنه تعادل ۳۲
۳.۲.٤ شرایط بهینگی برای منیپولاتور دو لینکی بدون پارامتر ۳۵
۳.۲.۵ بالانسینگ بهینه منیپولاتور دولینکی ۳۸
۳.۲.٦ نتایج شبیه سازی ۳۸
۳.۳ بالانسینگ بهینه منیپولاتور دو لینکی با فنر در حرکت نقطه به نقطه **٤٤**
۳.۳.۱ مدل سازی منیپولاتور دو لینکی بالانس شده با فنر ٤۵
۳.۳.۲ بالانسینگ استاتیکی منیپولاتور دولینکی بالانس شده با فنر ٤٦
۳.۳.۳ شرایط بهینگی حالات نرمال و بالانس استاتیکی ٤۷
۳.۳.٤ بالانسینگ بهینه منیپولاتور دو لینکی با فنر ٤۹
۳.۳.۵ بالانسینگ ربات شبه پیوما بالانس شده با فنر ۵۰
۳.۳.٦ نتایج شبیه سازی ۵۲
۳.٤ بالانسینگ بهینه منیپولاتور دو لینکی در مسیر تعیین شده **۵۷**
۳.٤.۱ مدلسازی ربات دولینکی با در نظر گرفتن جرم و فنر ۵۷
۳.٤.۲ بالانسینگ بهینه برای منیپولاتور دولینکی ۵۹
۳.۵ بالانسینگ بهینه برای ربات شبه پیوما در مسیر مشخص **٦۲**

٤ نتیجه گیری **٦۷**

٤.۱ پیشنهادهایی برای ادامه پایان نامه **٦۷**

۵ مراجع **٦۸**

فهرست اشکال

شکل ۱-۱- مکانیزم در حالت بالانس تطبیقی (90)..... ۸
شکل ۳-۱- شماتیک سیستم تک لینکی (13) ۲۳
شکل ۳-۲- شماتیک منیپولاتور دو لینکی طرح اول (13) ۲۶
شکل ۳-۳- شماتیک منیپولاتور دو لینکی طرح دوم (13)..... ۲۷
شکل ۳-٤- شماتیک منیپولاتور دو لینکی با وزنه های تعادل (12) ۳۳
شکل ۳-۵- شماتیک منیپولاتور دو لینکی بالانس تطبیقی شده (12)..... ۳۵
شکل ۳-٦- مسیرهای بهینه برای منیپولاتور دو لینکی (12) ٤۰
شکل ۳-۷- موقعیت زاویه ای مفصل ها (12)..... ٤۰
شکل ۳-۸- سرعت زاویه ای مفصل ها (12)..... ٤۰
شکل ۳-۹- گشتاور مفصل ها (12)..... ٤۲
شکل ۳-۱۰- وزنه های تعادل استاتیک و بهینه نسبت به مدت زمان t_f (12)..... ٤۲
شکل ۳-۱۱- شاخص کارآیی طی زمان t_f (12)..... ٤۲
شکل ۳-۱۲-شاخص کارآیی نسبت به وزنه های تعادل (12)..... ٤۲
شکل ۳-۱۳- شماتیک منیپولاتور سه لینکی و مسیر بهینه منیپولاتور سه لینکی (12) ٤۳
شکل ۳-۱٤- گشتاور مفصل ها برای حالات مختلف (12) ٤۳
شکل ۳-۱۵- شماتیک ربات دولینکی بالانس شده با فنر..... ٤٦
شکل ۳-۱٦- شماتیک ربات سه لینکی بالانس شده با فنر ۵۲
شکل ۳-۱۷- مسیرهای بهینه برای حالات مختلف ۵۳
شکل ۳-۱۸- گشتاورهای ورودی موتور ۱ و ۲ ..... ۵٤
شکل ۳-۱۹- موقعیت و سرعت زاویه ای لینک ها..... ۵٤
شکل ۳-۲۰- گشتاورهای ورودی موتورها..... ۵۵
شکل ۳-۲۱- موقعیت و سرعت زاویه ای لینک ها..... ۵٦
شکل ۳-۲۲- مسیرهای بهینه برای حالات نرمال(شکل سمت راست) و بالانس بهینه (سمت چپ) ۵٦
شکل ۳-۲۳- شماتیک ربات دولینکی بالانس شده با استفاده از فنر و جرم ۵۷
شکل ۳-۲٤- مسیردر نظر گرفته شده برای ربات..... ٦۱
شکل ۳-۲۵- کنترل بهینه برای حالات مختلف ٦۱

شکل ۳-۲۶- تلرانس حرکت نسبت به حالات مختلف برای حالت بالانس با جرم ٦١
شکل ۳-۲۷- مسیر تعریف شده برای ربات ٦٣
شکل ۳-۲۸- شماتیک ربات شبه پیوما که بالانس بهینه شده ٦٤
شکل ۳-۲۹- موقعیت و سرعت زاویه ای لینک ها..... ٦٥
شکل ۳-۳۰- گشتاور ورودی موتورها ٦٥

فهرست جداول

جدول ۱-۱. طرح های بالانسینگ برای سیستم های رباتیک ٦
جدول ۳-۱- مقایسه دو طرح دو لینکی (13) ۲۸
جدول ۳-۲- پارامترهای ربات شبیه سازی شده (12) ۳۹
جدول ۳-۳- مقدار شاخص کارآیی برای حالات مختلف، $t_f = 1s$ (12) ٤۱
جدول ۳-٤- پارامترهای منیپولاتور سه لینکی (12) ٤۳
جدول ۳-۵- مقدار شاخص کارآیی برای حالات مختلف (12) ٤٤
جدول ۳-٦- پارامترهای دناویت-هارتمبرگ برای ربات شبه پیوما (108) ۵۱
جدول ۳-۷- پارامترهای ربات شبه پیوما (108) ۵۱
جدول ۳-۸- پارامترهای ربات دولینکی ۵۳
جدول ۳-۹- مقایسه شاخص کارآیی حالات مختلف ۵٤
جدول ۳-۱۰- مقادیر پارامترها برای حالات استاتیکی و بهینه ۵۵
جدول ۳-۱۱- مقادیر بهینه پارامترها برای ربات شبه پیوما ۵۷
جدول ۳-۱۲- مقادیر استفاده شده برای شبیه سازی ٦۰
جدول ۳-۱۳- نتایج بهینه سازی مقادیر انرژی مصرفی برای حالات مختلف ٦۲
جدول ۳-۱٤- مقادیر بهینه برای ربات شبه پیوما در مسیر مشخص ٦٤

فصل اول

مقدمه

۱ مقدمه

۱.۱ مروری اجمالی بر بالانسینگ بهینه

منیپولاتورهای صنعتی کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله چسب‌کاری، جوش‌کاری، کار در محیط‌های پرخطر و ... دارند. از آنجایی که امروزه هزینه مصرف انرژی به عنوان یک پارامتر اساسی در کاربرد ربات‌ها در صنعت محسوب می‌شود، موضوع بالانسینگ منیپولاتورها با هدف کاهش انرژی مصرفی و کوچک شدن عملگرها به یک موضوع مورد بحث تبدیل شده است. یک هدف مهم در بالانسینگ ربات، حذف یا کاهش بار متغیر دینامیکی است که ربات به ماشین‌های مجاور منتقل می‌کند. روشهای متعددی برای بالانس کردن ربات‌ها توسعه یافته است (1) (2). همچنین با وجود تاریخچه طولانی بالانسینگ ربات، راه-حل جدیدی با عنوان تئوری بالانسینگ بهینه گزارش شده است. طراحی سیستم‌های مکانیکی برای کاربردهای سریع زمینه جدید در سطح بالانسینگ است (3).

در حالت کلی بالانسینگ می‌تواند به دو نوع بالانسینگ فعال و بالانسینگ غیر فعال دسته‌بندی شود. در بالانسینگ فعال یک نیروی خارجی مانند نیروی الکتریکی، پنوماتیکی و یا هیدرولیکی برای بالانس کردن سیستم بکار می‌رود (4)، در حالی که در بالانسینگ غیرفعال جرم‌های جبران‌ساز (6) (5) و یا فنرها (8) (7) بکار می‌رود. از آنجایی که عملگرهای اضافی در بالانسینگ غیرفعال نیاز نیست، این روش بالانسینگ اقتصادی‌تر و ساده‌تر از بالانسینگ فعال است. یکی از پر کاربردترین روشهای بالانسینگ، بالانسینگ استاتیکی است. هنگامی که یک ربات بالانس استاتیکی شده است، انرژی پتانسیل آن برای همه پیکربندی‌های ممکن ثابت است (8) (9) (5).

روشهای بالانسینگ غیرفعال در حالت کلی شامل بالانسینگ استاتیکی (10)، بالانسینگ دینامیکی (11)، بالانسینگ کامل (6)، بالانسینگ اپتیموم[1] (8) و همچنین بالانسینگ بهینه (12) است. اگر عملگرها هیچ نیرویی برای نگه‌داشتن سیستم در حالت تعادل مصرف نکنند، گفته می‌شود یک ماشین بالانس استاتیکی شده است (14) (13). بالانسینگ دینامیکی یک مرحله بیشتر از بالانسینگ استاتیکی دارد و آن کاهش نیروها و ممان‌های عکس‌العملی روی تکیه‌گاه و عملگرها در همه پیکربندی‌ها است. بنابراین هنگامی که یک ربات بالانس دینامیکی شده است، بعضی از عکس‌العمل‌هایی را که به محیط خود انتقال می‌دهد نسبت به حالت استاتیکی کاهش می‌دهد (11). بالانسینگ کامل، نوع سوم بالانسینگ است که بعضی اصلاحات را برای مکانیزم‌های نابالانس از جمله راهی برای تعیین بالانسینگ استاتیکی محاسبه بالانسینگ دینامیکی و پروسه قطری کردن ماتریس جرم دارد (14). همه این روشها بجز روشهای بالانسینگ اپتیموم و بالانسینگ بهینه که در اینجا مورد توجه قرار می‌گیرند، بدون توجه به کنترل و مسیر ربات بکار می‌روند. بالانسینگ اپتیموم زمانی بکار می‌رود که مسیر یا طرح کنترلی ربات مشخص است و انتظار می‌رود که پارامترهای ربات تعیین شوند (15). در حالات زیادی بالانسینگ اپتیموم یک روش مناسب برای کاهش تابعی هزینه

[1] optimum

است. اما این روش برای حل، اپتیموم کلی نیست و زمانی که مسیر مورد توجه قرار می‌گیرد، مسیر و طرح کنترلی روی تابعی هزینه خیلی موثر است. بنابراین روش بالانسینگ بهینه به عنوان یک روش جدید به مقدار بهینه پارامترهای ربات و مسیر بطور همزمان توسط تابعی هزینه دست می‌یابد (12).

بطور کلی بالانسینگ بهینه، مسئله طراحی مسیر با تعدادی پارامتر مجهول است. طراحی مسیر بهینه منیپولاتورها بر پایه بهینه‌سازی تابعی هزینه است با توجه به اینکه معادلات دینامیکی حرکت به عنوان قید، به خوبی روی موقعیت‌ها، سرعت‌ها و گشتاورهای مفصل که باید محاسبه شوند محدود می‌شود (16). مسئله کلی کنترل بهینه آنقدر پیچیده است که فقط می‌تواند توسط کامپیوتر حل شود (17). به همین دلیل دو استراتژی معروف برای بهینه‌سازی مسیر عبارتند از: روشهای غیر مستقیم و روشهای مستقیم. این تکنیک‌ها در مقالات زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر کدام مزایا و معایب خودشان را دارند (19) (18) (17).

روشهای غیر مستقیم، شرایط لازم بهینگی مسئله نامحدود را برای حاصل شدن یک مسئله مقدار مرزی (BVP) در معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE) بکار می‌برند (20). مسئله مقدار مرزی BVP باید بطور عددی حل شود و روش غیر مستقیم اغلب با عبارت " اول بهینه‌سازی، سپس جداسازی" شرح داده می‌شود (21). کلاس روشهای غیرمستقیم همچنین شامل حساب تغییرات و معادلات دیفرانسیل اویلر-لاگرانژ و قانون مینیمم پونتریاگین است (22). در مرحله بعد این مسئله برای رسیدن به حل عددی با بکار بردن روشی از جمله تکنیکهای پرتابی[1] ، ریلکسیشن[2] یا کالوکیشن[3] جداسازی می‌شود. این روش بطور گسترده به عنوان یک ابزار قوی و کارا در آنالیز سیستم‌های غیرخطی و طراحی مسیر انواع سیستم‌های مختلف بکار می‌رود (26) (25) (24) (23). فتوحی[4] و همکارانش روش غیرمستقیم را برای تعیین مسیر زمان بهینه منیپولاتورهای دو لینکی بکار بردند (23)، فورنو[5] و همکارانش این تکنیک را برای طراحی مسیر مفصل منیپولاتورهای متحرک بکار بردند (27) و نیکوبین و همکاران این روش را برای طراحی مسیر مفصل انعطاف پذیر (28)، لینک انعطاف پذیر (29) و منیپولاتورهای با درجات اضافی[6] (30) بکار بردند. یک مرور کلی در (19) ارائه شده است.

روشهای مستقیم، مسئله کنترل بهینه نامحدود اصلی را به یک مسئله برنامه ریزی غیرخطی با بعد محدود (NLP) تبدیل می‌کند (16) (18). سپس NLP توسط روشهای تغییراتی بهینه‌سازی حل می‌شود و بنابراین روش مستقیم اغلب با عنوان " اول گسسته-سازی، سپس بهینه‌سازی" شرح داده می‌شود (19). یکی از مهمترین مزایای روشهای مستقیم در برابر روشهای غیرمستقیم این است که آنها می‌توانند به‌سادگی در برابر قیود نامساوی رفتار کنند، همانند قیود نامساوی مسیر که در (31) آمده است. همه روشهای مستقیم بر پایه پارامتری کردن مسیر کنترل با بعد محدود هستند، اما در جایی که مسیر حالت بکار برده می‌شود تفاوت

[1] shooting
[2] relaxation
[3] collocation
[4] Fotouhi
[5] Furuno
[6] redundant

دارند (32). نتایج مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی توسط الگوریتم‌های استاندارد مانند روشهای برنامه‌ریزی غیرخطی[1] (32)، روشهای نقطه درونی[2] (33) یا تکاملی[3] (35) (34) برای تعیین مقادیر بهینه پارامترها عمل می‌کنند.

روش بالانسینگ بهینه اخیراً توسط نیکوبین و همکارانش ارائه شده است (12). این روش جدید بر پایه حل مسئله کنترل بهینه برای تعیین مسیر بهینه منیپولاتور با در نظر گرفتن بعضی از پارامترها به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی ارائه شده است. در روش پیشنهاد شده حالات، کنترل‌ها و مقادیر سختی فنر یا مقادیر وزنه تعادل بطور همزمان تعیین می‌شوند بصورتی که شاخص کارآیی داده شده کمینه شود.

مؤلفه‌های اصلی برای بکار بردن بالانسینگ بهینه غیر فعال شامل جرم‌ها (توسط اضافه کردن وزنه‌های تعادل و یا توسط توزیع جرم) و فنرها است. بالانسینگ بهینه با جرم دارای مزایای زیادی است اما در عوض اینرسی منیپولاتور را افزایش می‌دهد (14). بنابراین کاربرد بالانسینگ بهینه با فنر دارای توجیه بیشتری است. روشهای مختلف بالانسینگ استاتیکی با فنر می‌توانند بصورت زیر فرض شوند: اتصال مستقیم فنر به لینک‌های منیپولاتور، با بکار بردن یک مکانیزم کابل و پولی (36)، کاربرد یک اهرم‌بندی کمکی (37) (13) (38) و کاربرد مکانیزم بادامک (39). مقالات زیادی در زمینه بالانسینگ با فنر وجود دارد. آلریچ[4] و همکارانش (36) یک روش جبران‌سازی کابل-پولی-فنر را برای حذف اثر گرانش برای منیپولاتور تک‌لینکی که توسط فنر بالانس می‌شود ارائه کرده‌اند. کلارسکی[5] و همکارانش (10) بعضی مقایسه‌های رفتار دینامیکی برای ربات پیوما در حالات نابالانس، بالانس با فنر و بالانس با وزنه تعادل را انجام دادند. مطالعه آنها به عنوان بالانسینگ استاتیکی در حالت فنر و جرم انجام شد. آگراوال[6] و همکارانش (37) بالانسینگ با فنر را برای منیپولاتورهای دو درجه آزادی و سه درجه آزادی فضایی ارائه کردند. آنها تئوری بالانسینگ گرانشی با فنر را برای منیپولاتورهای فضایی با بکار بردن متوازی‌الاضلاع‌های کمکی برای تشخیص مرکز جرم ارائه کردند. هردر[7] و همکارانش (1) مفهوم فنر ذخیره‌ساز را برای بالانسینگ فنر-به-فنر به عنوان روش تعدیل بدون-انرژی برای بالانس‌کننده‌های گرانشی بکار بردند. بیشتر بررسی‌ها در زمینه بالانسینگ در مقالات مختلف در زمینه بالانسینگ استاتیکی ارائه شده است (49) (48) (47) (46) (45) (44) (43) (42) (41) (40) (39).

[1] sequential quadratic programming
[2] interior point methods
[3] evolutionary
[4] Ulrich
[5] Kolarski
[6] Agrawal
[7] Herder

۱.۲ مقدمه ای بر بالانسینگ

۱.۲.۱ بالانس استاتیکی

اگر عملگرها و یا ترمزها نیاز به صرف نیرو برای نگه‌داشتن سیستم در حالت تعادل نداشته باشند، گفته می‌شود یک ماشین بالانس استاتیکی شده است. در این حالت سیستم طوری رفتار می‌کند که گویا ربات در محیط با گرانش کمتر کار می‌کند. بعضی از کارهای قبلی روی ماشین‌هایی که بطور استاتیکی بالانس شده است شامل طرح‌هایی با وزنه‌های تعادل، فنرهای با طول آزاد صفر و متوازی‌الاضلاع‌های کمکی (53) (52) (51) (50) است. یک روش بالانسینگ گرانشی به کمک فنرها (55) (54)، اضافه کردن مکانیزم متوازی‌الاضلاع به منظور تعیین مرکز جرم مکانیزم است که برای بالانس کردن ربات بکار می‌رود (56).

در یک ماشین در صورتی می‌توان به بالانسینگ استاتیکی دست یافت که یا مرکز جرم طی حرکت ثابت بماند و یا انرژی پتانسیل در هر پیکربندی ربات ثابت بماند. انرژی پتانسیل سیستم می‌تواند با اضافه کردن فنرها در مکان‌های مناسب به سیستم ثابت بماند. یکی از کاربردهای بالانسینگ توسط فنر، ساخت یک وسیله برای شخصی است که نمی‌تواند بدلیل ضعیف بودن ماهیچه بطور کامل پای خود را بلند کند، یعنی ماهیچه‌های پا نمی‌تواند نیروی کافی برای بلند کردن پا را تولید کند (13).

در حالت کلی، انواع روش‌های بالانسینگ به روش استاتیکی برای سیستم‌های رباتیک را می‌توان به گروه‌های زیر تقسیم کرد: بالانسینگ به کمک وزنه‌های تعادل (گروه الف)، بالانسینگ به کمک فنرها (گروه ب) و بالانسینگ به کمک سیلندرهای پنوماتیکی و هیدرولیکی یا وسایل الکترومغناطیسی (گروه ج) که هر کدام بصورت زیر بیان می‌شوند:

الف-۱- بالانسینگ با استفاده از وزنه‌های تعادلی که روی سیستم اولیه نصب شده‌اند. بالانسینگ به این روش بسیار ساده است اما منجر به افزایش قابل ملاحظه جرم‌های حرکتی و در نتیجه اینرسی منیپولاتور می‌شود.

الف-۲- بالانسینگ به کمک وزنه‌های تعادلی که روی اهرم‌بندی‌های کمکی نصب می‌شوند. دو عضوی مفصلی یا مکانیزم پانتوگراف[1] یک اهرم‌بندی کمکی را بکار می‌برند.

ب-۱- بالانسینگ به کمک فنرهایی که بطور مستقیم روی لینک‌های منیپولاتور متصل شده است.

ب-۲- بالانسینگ توسط مکانیزم کابل و پولی. این روش به ما اجازه می‌دهد تا برای رسیدن به بالانسینگ کامل، فنرهای با طول آزاد غیر صفر را با تحت کشش قرار دادن به میزان طول آزاد فنر، به فنرهای با طول آزاد صفر تبدیل کرد.

بالانسینگ توسط یک مکانیزم کمکی می‌تواند به دسته‌های زیر تقسیم شود:

[1] pantograph

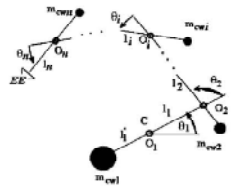
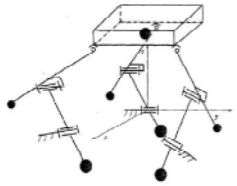
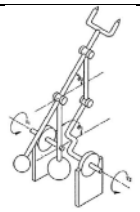
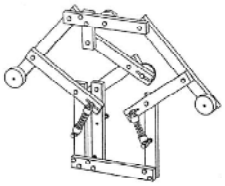
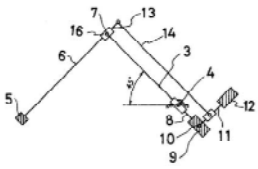
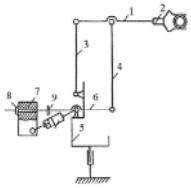
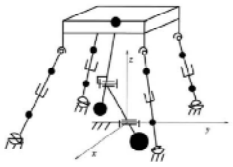
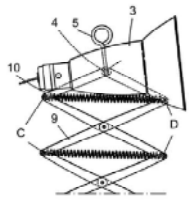
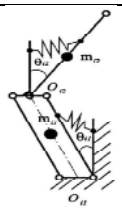
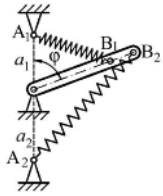
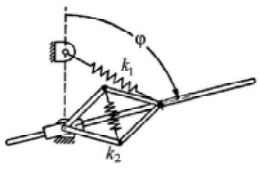
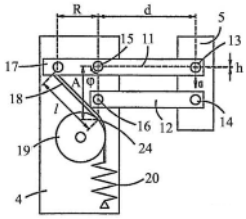
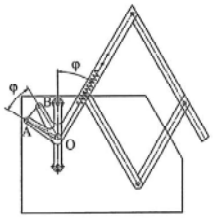
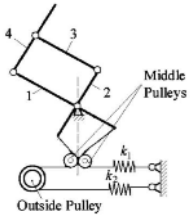
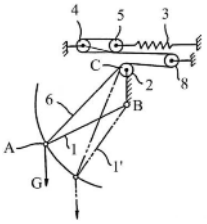
ب-۳-۱- بالانسینگ با بکار بردن یک اهرم‌بندی کمکی

ب-۳-۲- بالانسینگ با بکار بردن یک مکانیزم بادامک

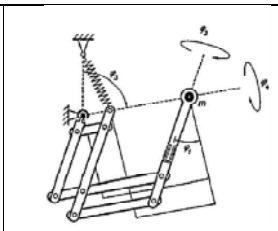
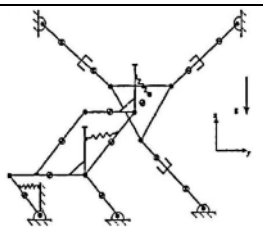
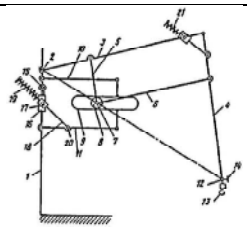
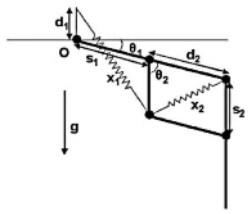
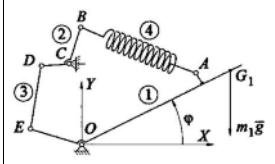
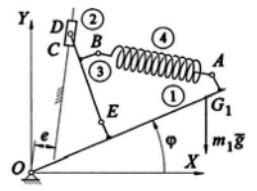
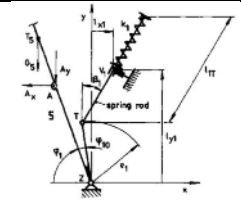
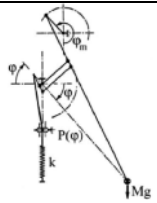
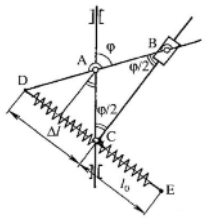
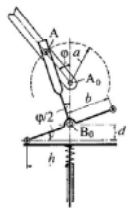
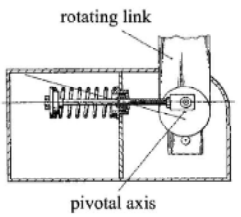
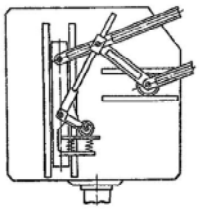
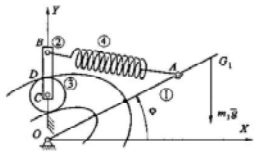
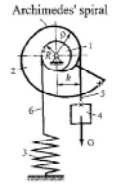
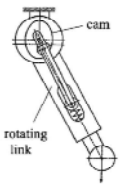
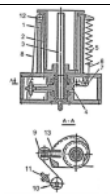
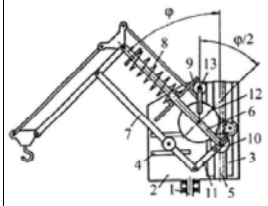
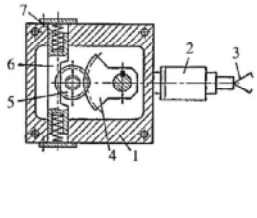
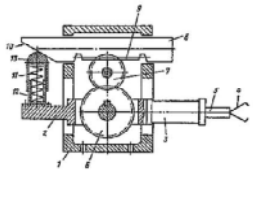
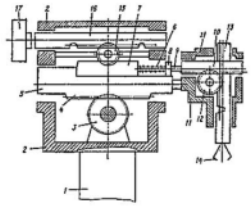
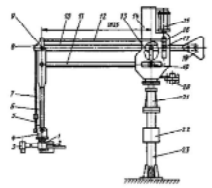
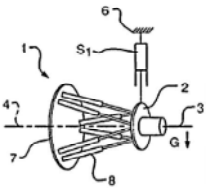
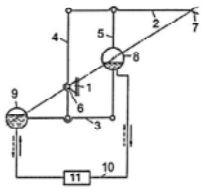
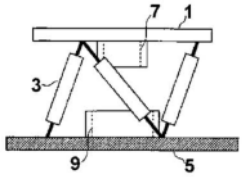
ب-۳-۳- بالانسینگ با بکار بردن مجموع چرخدنده‌ها[1]

ج- بالانسینگ با بکار بردن سیلندرهای پنوماتیکی و هیدرولیکی، که به لینک‌های منیپولاتور یا بطور مستقیم به پلتفرم متصل می‌شوند. یک روش بالانسینگ بر مبنای وزنه‌های تعادل وجود دارد که به کمک مخازن مایع هستند. بالانسینگ توسط پمپ کردن مایع از وزنه تعادل مخزن اول به دومی نائل شود. تأثیرات الکترومغناطیسی نیز برای بالانسینگ بکار برده شده است.

جدول ۱-۱. طرح های بالانسینگ برای سیستم های رباتیک

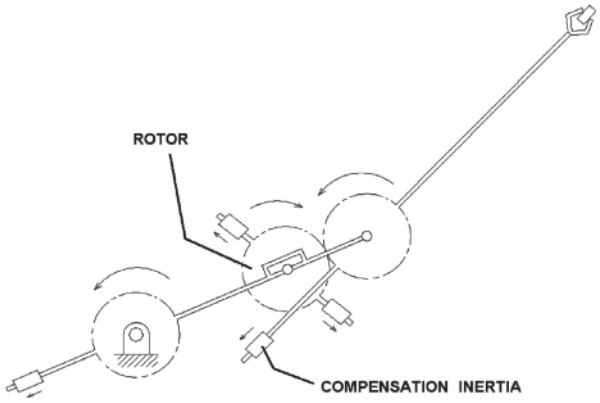
الف-۱	 (59)	 (53)	 (58)	 (57)
الف-۲	 (63)	 (62)	 (61)	(60)
ب-۱	 (66)	 (65)	 (43)	 (64)
ب-۲	 (70)	 (69)	 (68)	 (67)

[1] Gear train

ب-۳-۱	 (73)	 (72)	 (71)	 (13)
	 (76)	 (75)	 (75)	 (74)
	 (46)	 (79)	 (78)	 (77)
ب-۳-۲	 (76)	 (81)	 (47)	 (80)
ب-۳-۳	 (84)	 (48)	 (83)	 (82)
ج	 (88)	 (87)	 (86)	 (85)

۱.۲.۲ بالانسینگ تطبیقی[1]

بالانسینگ تطبیقی تکنیکی است که بعضی اصلاحات را روی سیستم نابالانس انجام می‌دهد بصورتی کـه بالانسـینگ اسـتاتیکی و دی‌کوپلینگ کامل معادلات دینامیکی را حتی هنگامی که بار تغییر می‌کند، تعیین می‌کند. بنابراین ترم‌های کریولیس، جانب مرکـز، گرانش و اینرسی عرضی[2] در سیستمی که بالانس تطبیقی شده است، حذف می‌شود. این اهداف با اضافه کردن اینرسی‌های حرکتی جبران‌ساز به زنجیره سینماتیکی مکانیزم بدست می‌آیند. شکل ۱-۱ شماتیک یک ربات دولینکی که به صورت تطبیقی بالانس شده است را نشان می‌دهد (89).



شکل ۱-۱- مکانیزم در حالت بالانس تطبیقی (90)

انواع روشهای دیگر بالانسینگ بطور خلاصه در بخش ۱.۱ بیان شد. در این پایان نامه روش بالانسینگ بهینه مورد توجه قرار مـی-گیرد که در فصل ۳ بطور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۳ تاریخچه کنترل بهینه

در این بخش به مروری بر تاریخچه کنترل بهینه می‌پردازیم (91). کنترل بهینه در حـدود ۳۱۳ سـال قبـل در سـال ۱۶۹۷ در یـک شهرک دانشگاهی در شمال هلند، متولد شد، یعنی همان زمانی که پروفسور ریاضیات یوهان برنولی[3] در آن دانشگاه از سال ۱۶۹۵ تا سال ۱۷۰۵ مقالاتی در زمینه حل مسئله براچیستوکرون[4] منتشر کرد. یکسال قبل از اینکه وی حل این مسئله را بیـان نمایـد، بـه رویدادهای بین سال‌های ۱۶۹۶ تا ۱۶۹۷ یعنی همان زمانی که مسائل حل شده توسـط یوهـان برنـولی و دیگـر دانشـمندان نظیـر نیوتن[5]، لایبنیتز[6]، تیشیرناس[7]، لوپیتال[1] و برادر یوهان، ژاکوب برنولی[2] ارائه شده است می‌پردازیم و سپس به پیشرفت این موضـوع

[1] Adaptive Balancing
[2] Cross inertia
[3] Johann Bernoulli
[4] brachystochrone
[5] Newton
[6] Leibniz
[7] Tschirnhaus