بسم ا... الرحمن الرحيم

٣٣٢١١

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل سرعتها و نیروهای حدی بازوها در رباتهای موازی

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

پایان نامه کارشناسی ارشد طراحی کاربردی

مجتبی باشی زاده مقدم

۱۳۸۰ /۱۱/ ۱۰

استاد راهنما

10108

دکتر عباس فتاح

بهار ۱۳۷۹

۳۳۲۱۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته طراحی کاربردی آقای مجتبی باشی زاده مقدم

تحلیل سرعتها و نیروهای حدی بازوها در رباتهای موازی

در تاریخ ۱۳۷۹/۲/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱-استاد راهنمای پایان نامه — دکتر عباس فتاح

۲-استاد مشاور پایان نامه — دکتر مسعود سبحانی

۳-استاد داور — دکتر مصطفی غیور

۴-استاد داور — دکتر محسن اصفهانیان

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر حسن خادمی زاده

تشکر و قدرانی:

این تز با راهنمایی و مساعدت جناب آقای دکتر فتاح به اتمام رسیده است. بدین وسیله تشکر خود را از زحمات ایشان در زمان انجام پروژه به عنوان استاد راهنما ابراز داشته وبرای ایشان و خانواده محترمشان آرزوی موفقیت و سلامتی دارم.

همچنین از آقایان دکتر سبحانی و دکتر غیور که زحمت مطالعه وبازخوانی این پروژه را تقبل کردند، تشکر کرده و امید توفقیات روزافزون را برای ایشان دارم.

از کلیه اساتیدی که در زمان دانشجویی، بنده افتخار شاگردیشان را داشتم سپاسگزارم و امیدوارم که بتوانم برای جامعه خویش همچون ایشان ثمربخش باشم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتـایج مطالعـــات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع ایـــن
پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به همه باغبانان مهربانی که بذر دانایی در زمین وجودم افشاندند

و

نهال اندیشه ام را به مهر آبیاری نمودند

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	۱
فصل اول : مقدمه	۲
فصل دوم : تحلیل سرعتهای حدی در ربات موازی استوارت	۱۷
۲-۱- معرفی مکانیزم ربات موازی استوارت	۱۷
۲-۲-نظری بر سینماتیک سیستم	۲۰
۲-۳-تعیین سرعتهای حدی بازوها در ربات استوارت	۲۲
۲-۳-۱-تعیین سرعتهای حدی در حالت یک بعدی	۲۳
۲-۳-۲-تعیین سرعتهای حدی در حالت دو بعدی	۲۵
۲-۳-۳-تعیین سرعتهای حدی در حالت سه بعدی	۲۹
۲-۴-ارائه یک مثال عددی	۳۵
۲-۴-۱-مثال عددی برای سرعتهای حدی در حالت یک بعدی	۳۷
۲-۴-۲-مثال عددی برای سرعتهای حدی در حالت دو بعدی	۳۸
۲-۴-۳-مثال عددی برای سرعتهای حدی در حالت سه بعدی	۳۹
فصل سوم : تحلیل سرعتهای حدی برای یک ربات موازی با سه درجه آزادی	۴۱
۳-۱- معرفی ربات موازی با سه درجه آزادی	۴۱
۳-۲-نظری بر سینماتیک سیستم	۴۵

۳-۳-تعیین سرعتهای حدی بازوها در ربات موازی با سه درجه آزادی ۴۹
۳-۴-ارائه یک مثال عددی ۵۴
۳-۴-۱-تحلیل عددی سرعتهای حدی در حالت حرکت غیر مقید ۵۴
۳-۴-۲-تحلیل عددی سرعتهای حدی در حالت حرکت مقید ۵۵

فصل چهارم : تحلیل نیروهای حدی در ربات موازی استوارت ۵۸
۴-۱-روش عمومی برای تعیین نیروهای حدی بازوها در حالت کلی ۵۸
۴-۱-۱-تعیین نیروهای حدی در حالت یک بعدی ۶۲
۴-۱-۲-تعیین نیروهای حدی در حالت دو بعدی ۶۳
۴-۱-۳-تعیین نیروهای حدی در حالت سه بعدی ۶۸
۴-۲-ارائه یک مثال عددی ۷۴
۴-۲-۱-مثال عددی برای نیروهای حدی در حالت یک بعدی ۷۵
۴-۲-۲-مثال عددی برای نیروهای حدی در حالت دو بعدی ۷۶
۴-۲-۳-مثال عددی برای نیروهای حدی در حالت سه بعدی ۷۷

فصل پنجم : تحلیل نیروهای حدی برای یک ربات موازی با سه درجه آزادی ۷۹
۵-۱-روش کلی برای تعیین نیروهای حدی بازوها ۷۹
۵-۲-ارائه یک مثال عددی ۸۶

فصل ششم : نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۸۹
۶-۱-نتیجه گیری ۸۹
۶-۲-ارائه پشنهادات ۹۲
پیوست اول ۹۳
فهرست مراجع ۹۹

چکیده

رباتهای موازی از دیدگاههای مختلفی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. یکی از مسائل مهم در اینگونه رباتها، طراحی ربات با ساختار بهینه نسبت به معیار یا معیارهای معین میباشد. معیار مورد استفاده در این پروژه فضای کار معین است. منظور از فضای کار معین فضایی است که سکوی متحرک یا مجری نهایی تمام نقاط آن را پوشش میدهد.

با استفاده از این معیار دو هدف عمده برای دو نوع ربات موازی، یکی ربات استوارت با شش درجه آزادی و دیگری یک ربات موازی با سه درجه آزادی دنبال میشود. در مرحله نخست تعیین سرعتهای حدی یا حداقل و حداکثر سرعت بازوها در یک فضای کار معین با توجه به ابعاد معلوم مکانیزم و همچنین سرعت معین مجری نهایی در آن فضا برای هر یک از رباتها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در حالت دوم تعیین نیروهای حدی بازوها با توجه به همین معیار یعنی مشخص بودن محدوده فضای کار و با فرض معلوم بودن ابعاد مکانیزم و نیروهای وارده بر سکوی متحرک مورد بررسی قرار گرفته است.

در ربات استوارت با توجه به فرضییات بیان شده و نوع فضای کار(پاره خط، صفحه و یا مکعب) تابع سرعت یا نیروی هر بازو بر حسب متغیرهای فضای کار که در اینجا مؤلفه های بردار موقعیت مرکز سکوی متحرک میباشند، بدست آمده و مقادیر حدی تابع تعیین میشوند. در ربات موازی با سه درجه آزادی نیز تابع سرعت یا نیرو با توجه به متغیرهای فضای کار معین شده و مقادیر حداکثر و حداقل تابع بدست میآیند.

نکته مهمی که باید در آخر توضیح داده شود این است که، مقادیر حدی تابع در یک محدوده مشخص مورد نظر است. با توجه به همین اصل علاوه بر بررسی تابع در فضای کار، مقدار تابع در شرایط مرزی یا به عبارتی در دو انتهای محدوده متغیرهای فضای کار نیز باید بررسی شود.

فصل اول

مقدمه

در این فصل ابتدا ضمن بیان تاریخچه مختصری از رباتها بطـور عمـوم و رباتهـای مـوازی بصـورت خـاص، مطالبی درباره مشخصات موارد کاربرد و مقایسه آنها با رباتهای سری آورده شده است. در ادامه توضیحاتی در مورد ساختار این دسته از رباتها و همچنین اهمیت موضوع و اهداف دنبال شده در پـروژه و همچنیـن تحقیقات انجام شده در این مورد بحث قرارگرفته است.

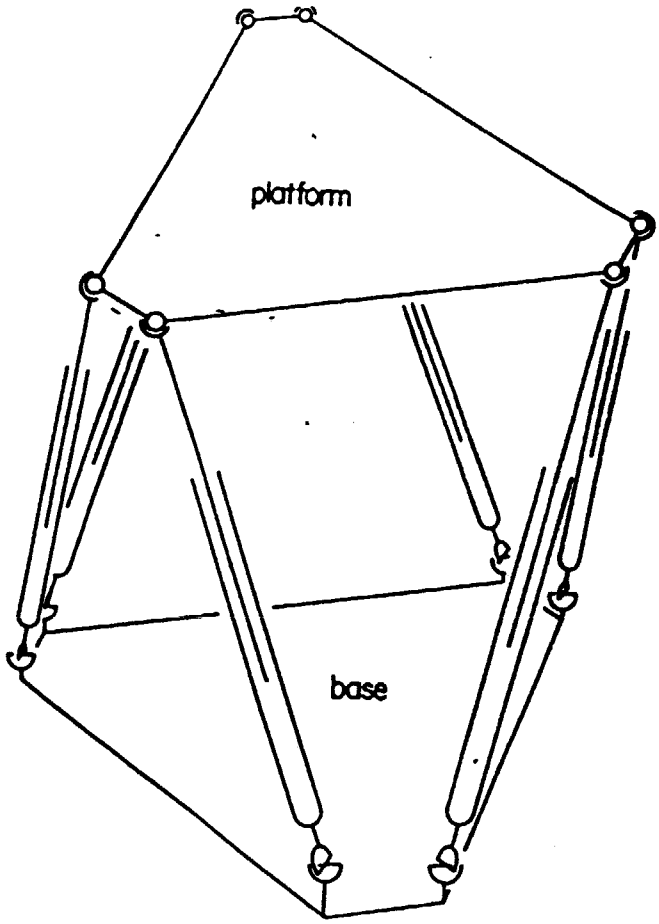
انسان از بدو تولد در کره خاکی همواره سعی و تلاش خود را معطوف به ابداع و اختراع وسـایلی نمـوده تـا کارهای خویش را بوسیله آن ابزار آسان نماید. در طول سده های مختلف دستگاه ها و ابزار آلات مکـانیکی که با انرژیهایی همچون باد و آب بـه حرکـت در مـی آمدنـد اخـتراع و سـاخته شـدند. یکـی از بزرگـترین آرزوهای بشر ساختن ماشینی همچون خود او بود یعنی آدم ماشینی مصنوعـی. در اولیـن قدمهـا در سـال ۱۸۳۰ چارلز بابیج ایده یک ماشین حساب کاملا مکانیکی را مطرح کرد کـه بعدهـا هولریـخ آن را تکمیـل نمود. در حقیقت این ماشین یک پردازشگر مکانیکی بود. در طول قرن بیستم و فرآینـد پـر شـتاب رشـد و توسعه تکنولوژی تلاشهایی در جهت هر چه کمتر استفاده کردن از نـیروی انسـان و انجـام دادن کارهـای سخت و دشوار وتکراری توسط ماشینهای خودکار انجـام شـد. اینگونـه تلاشـها را میتـوان در زمینـه هـای مختلف دیگر که در حقیقت به نوعی بیان کننده آرزوها وایده های بشری میباشند، جستجو کرد. اولین بار

کلمه ربات توسط کارل کپک یک نمایشنامه نویس اهل چک، به کاربرده شد. کلمه ای کـه از لغتـی در در زبان چک گرفته شده و به معنای کارهای اجباری و سخت میباشد. با پیشـرفت علـوم و همزمـان بـا رشـد ابزارهای کنترل از راه دور و ماشینهای کنترل عددی، رباتهای صنعتی به عرصه ظهور رسـیدند. اولیـن بـار رباتها در دهه ۱۹۶۰ میلادی به عنوان یکی از معیارهای شاخص در روند اتوماسیون صنعتی بـه کـار بـرده شده اند. ابتدا از رباتها در کارهای نسبتا ساده و تکراری که محتاج دقت زیاد نبودند، استفاده شـد ولـی بـا رشد سریع کامپیوترها و توسعه سریع و ارزان میکروپروسسورها، استفاده از رباتها در کارهایی که بـه دقت بیشتری نیاز داشتند، مورد توجه قرار گرفت. شرکتهای خودروسازی جزء اولین صنایعی بودند کـه از ربـات بصورت صنعتی استفاده کردند. جوش نقطه ای وسیعترین کاربرد آن در این صنعت میباشد.

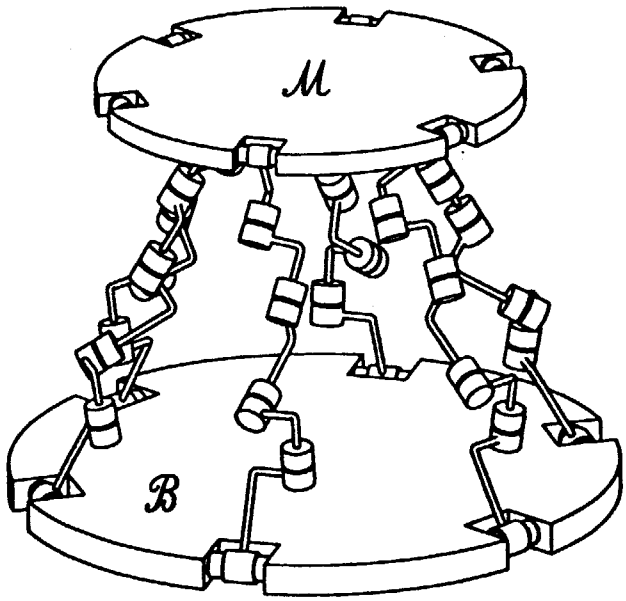
در تعریف ربات آن را وسیله ای مکانیکی میدانند که میتوان آن را برای انجام اعمال بسیار متنوعی برنامـه ریزی کرد تا بتواند اشیاء را بطور خودکار در بین محلهای مختلف در فضا جابه جا کند، برخلاف ماشینهای کنترل عددی[1] که برای انجام کارهای خاصی طراحی میشوند.

رباتها را از نقطه نظرهای خاص میتوان گروه بندی کرد. یکـی از ایـن دیدگـاه هـا، طبقـه بنـدی پیکـره و ساختار آنها از جنبه اصول طراحی مکانیزمها میباشد. سیستمهای رباتیکی در ابتدا بصورت زنجیره باز ارائه شدند. در این نوع مکانیزمها، عضوها بصورت متوالی توسط مفاصل کشویی مانند جکها و یا مفاصل دورانـی به یکدیگر متصل شده اند. به همین دلیل به آنها رباتهای سری گفته میشود. بخاطر همیـن مـاهیت،یعنـی اتصال متوالی اعضاء به یکدیگر، ایـن نـوع مکانیزمهـا دارای ظرفیـت انتقـال بـار کـم و همچنیـن صلبیـت پایینتری نسبت به مکانیزمهای بسته هستند. بدلیل همین نواقص، سیستمهای رباتیکی بـا سـاختار بسـته معرفی شدند تا بتوانند ظرفیت بار بالاتری با عضوهای سبکتر داشته باشند. یکی از پیکره های مهم در این رباتها، مکانیزمهای سکودار میباشند که از یک سکوی ثابت[2] ،یک سکوی متحرک[3] و تعـدادی عملگـر[4] یـا رابط که توسط مفاصلی به دو سکو متصل میشوند، تشکیل شده است. نکته مهمی که لازم به ذکر میباشـد آن است که درربا‌تهای موازی[5]، مفاصل غیر فعال وجود دارد یعنی بعضی از مفاصل به عنوان محرک عمـل نمیکنند، به دلیل همین امر تحلیل آنها در مقایسه با رباتهای سـری پیچیـده تـر و مشـکلتر خواهـد بـود. دونمونه از این مکانیزمها با مفاصل مختلف در شکلهای(۱-۱) و (۱-۲) نمایش داده شده است.

1-NC
2-base platform
3-moving platform
4-actuator
5-parallel manipulators



شکل (۱-۱)ربات موازی با مفاصل کشویی



شکل (۱-۲)ربات موازی با مفاصل دورانی

نخستین ربات موازی سکودار توسط گاف و وایت هال[1] در سال ۱۹۶۲ برای دستگاه تست تایر طراحی و ساخته شد[۱]. سپس در ۱۹۶۵ استوارت[2] مهمترین کاربرد این نوع مکانیزم را به عنوان یک شبیه ساز پرواز معرفی کرد. بعدها در سال ۱۹۷۸ ، هانت[3] آن را به عنوان یک ربات معرفی کرد. از آن به بعد مطالعات و تحقیقات بسیاری در مورد این نوع مکانیزمها انجام شده است. امروزه نقش مهم شبیه سازها را به عنوان ابزارهای قوی برای آموزش و توسعه و تحقیق در صنایع مختلف نمیتوان انکار کرد. از جمله این کاربردها میتوان به شبیه ساز پرواز هواپیماهای جنگی، مسافربری ،... برای تعلیم و آموزش بیخطر- خلبانان اشاره کرد. علاوه بر شبیه ساز پرواز میتوان از این مکانیزم برای آموزش راننده قطار یا اتومبیل ویا کاپیتان کشتی نیز استفاده کرد. همچنین در سازه های فضایی و تعلیق خودرو و به عنوان تنظیم کننده موقعیت فیکسچرها، این مکانیزم کاربرد دارد. علاوه بر آن در صنعت نیز استفاده شده که از آن جمله میتوان به عملیات فرزکاری ،پرداختکاری سطوح ،لبه تراشی و شیار زنی اشاره کرد[۲].

بطور کلی میتوان جنبه های مختلف کاربرد این نوع ربات را به موارد زیر تقسیم کرد:

۱. وسیله ای جهت نمایش نیروهای اعمالی بر یک جسم در فضا.

۲. وسیله ای برای شبیه سازی عملکرد مثلا یک هواپیما و یا یک هلیکوپتر.

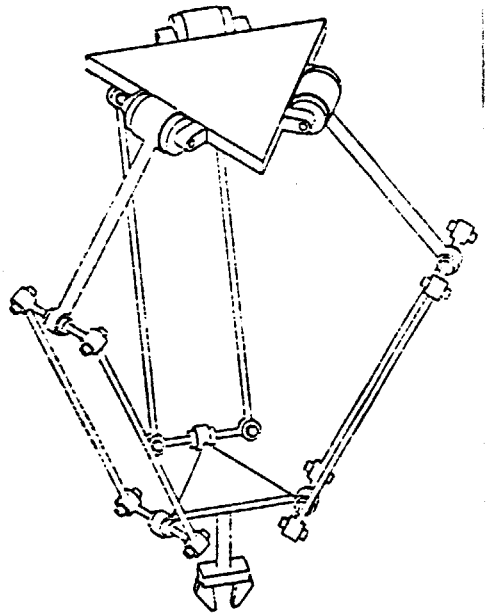
۳. وسیله ای که توسط فرمانی از طرف انسان کنترل میشود.

۴ . مکانیزمی برای شکل جدیدی از ماشین ابزار [۳].

در ادامه مقایسه ای بین رباتهای سری و موازی انجام داده و به مزایا و معایب هرکدام بطور مختصر اشاره میشود. از نقطه نظر فیزیکی رباتهای سری دارای مزایایی همچون فضای کار بیشتر، قابلیت مانور در فضاهای کار کوچک، و توانایی در دسترسی به اهداف با فاصله زیاد را دارند. شاخص مهم این نوع رباتها قابلیت ارتجاعی بودن آنها و فضای کار بزرگ است. اما به علت وضعیت یک سر گیردار اعضاء و صلبیت کم و اینرسی متغیر هر عضو، اینگونه رباتها عملکرد دینامیکی مناسبی ندارند. در واقع این مسئله هنگامی که ربات بخواهد بار سنگینی را با سرعت زیاد از نقطه ای به نقطه دیگر منتقل نماید ،کاملا نمایان خواهد شد. نقاط ضعف این رباتها را میتوان صلبیت کم و فرکانس طبیعی پایین و عدم توانایی حمل بارهای سنگین دانست. نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که هر یک از اعضاء و موتورها از طرف پایه به طرف مجری نهایی، باید بتوانند وزن قسمت قبلی را تحمل کنند که در واقع از ظرفیت حمل بار کاسته میشود و در نتیجه رفتار دینامیکی مکانیزم حساسیت بالایی نسبت به پارامترها و اندازه و جرم اعضاء پیدا

1-Goufh and Whitehall
2-Stewart
3-Hunt

خواهد کرد. علاوه بر آن جمع شدن خطای هر یک از عضوها بدلیل آرایش سری آنها سبب پایین آمدن دقت موقعیت مجری نهایی[1] میشود. در واقع خطای عملگرها در طول زنجیره باز مکانیزم با یکدیگر جمع میشوند و خطای زیادی در موقعیت مجری نهایی بوجود میآید. از مطالب بالا میتوان فهمید که رباتهای سری برای کاربردهایی که در آن سرعت و دقت بالا و تحمل وزن زیاد مطرح است، مناسب نیستند. برای جلوگیری از معایب فوق رباتهای موازی جایگزین مناسبتری خواهند بود. از جمله این مزایا میتوان به سختی بالا و در نتیجه فرکانس طبیعی بالاتر، توزیع همگن اینرسی بهتر در حالت دینامیکی، دقت بیشتر در خروجی بدلیل حذف ساختار یک سر گیردار ،حساسیت کمتر نسبت به تغییرات بار خارجی در یک موقعیت مشخص،حرکت دقیق با سرعت زیاد،ظرفیت نیرو-گشتاور بالا برای عملگرها بواسطه آرایش موازی آنها، مسئله سینماتیک معکوس ساده تر و تحمل بار دینامیکی بالا اشاره کرد. بطور مثال نسبت نیرو به وزن در رباتهای سری حدودا ۳٪ است در حالیکه این نسبت در رباتهای موازی به ۵۰۰٪ میرسد. در واقع یکی از دلایل استفاده از این رباتها در شبیه ساز های پرواز قدرت مانور سریع آنها میباشد. از نقاط ضعف این رباتها میتوان به فضای کار محدود و قابلیت مانور پایین نسبت به شرایط مشابه با رباتهای سری ذکر کرد، البته با طراحی مناسب رابطها، بطور مثال با جایگزین نمودن مفاصل لولایی بجای مفاصل کشویی و تغییرعملگرها براساس آن مفاصل این نقیصه را میتوان تاحدی جبران کرد[۴][۵][۶][۷][۸]. اخیرا طرحهایی متشکل از یک ربات سری و یک ربات موازی ارائه شده است که مزایا هریک باعث پوشش معایب دیگری خواهد شد[۹]. نمونه ای از این ربات در شکل(۱-۳)معرفی شده است.



(۱-۳) ربات ترکیبی موازی - سری

1-end-effector

پس از معرفی مختصر رباتهای موازی، به مسائل مورد بحث در تحلیل اینگونه رباتها از نقطه نظر تئوری میپردازیم. همانند رباتهای سری عموم مسائلی که به آنها پرداخته میشود عبارتند از : سینماتیک، دینامیک، کنترل، نقاط یا ساختار های تکین[1]، محدوده حرکت یا فضای کار، بهینه سازی و پارامترهای طراحی. سینماتیک و دینامیک نیز به حالتهای مستقیم و معکوس تقسیم میشوند.در حالت مستقیم با استفاده از مقادیر معلوم ورودیها یا حرکت بازوها،خروجیها یا به عبارتی حرکت مجری نهایی یا سکوی متحرک بدست آورده میشود و درحالت معکوس، با استفاده از خروجیها، مقادیر ورودیها بدست می آید.

در اینجا به مقایسه ای بین دو نوع ربات از دیدگاه تئوری میپردازیم. درربا‌تهای سری مسئله سینماتیک مستقیم موقعیت یعنی تعیین موقعیت مجری نهایی به ازای مقادیر معلوم از عملگرها، عموما مسئله ای ساده بوده و شامل حل یک سیستم با معادلات خطی است، اماسینماتیک معکوس موقعیت این رباتها مسئله مشکلی است که در واقع شامل حل معادلات غیر خطی بر حسب چند مجهول است که دارای جوابهای مختلفی است. اما رباتهای موازی از این نقطه نظر در مقابل رباتهای سری قرار دارند، بدین معنی که سینماتیک معکوس موقعیت آنها عموما یک مسئله ساده است، که شامل حل یک سیستم معادله همگن میباشد. مسئله سینماتیک مستقیم موقعیت این رباتها یک مسئله تحلیلی مشکل است، زیرا شامل حل سیستمی از معادلات چند متغیره خطی است که هرگونه قید هندسی تحلیل آنرا پیچیده تر میکند. در ضمن برخلاف سینماتیک مستقیم موقعیت، سینماتیک مستقیم سرعت و شتاب این رباتها معمولا دارای سیستم معادلات خطی است.

بدلیل اهمیت سینماتیک رباتها بطور اختصار به ذکر روشهای مختلف جهت حل این مسئله میپردازیم که عبارتند از روشهای تحلیلی، روش عددی ، روش هندسی، و استفاده از سنسورها.

منظور از روش تحلیلی استخراج یک معادله چند جمله ای برحسب یکی از متغیرهای فضای کار است یعنی به کمک سیستم معادلات چند متغیره غیر خطی که از قیود هندسی مکانیزم بدست آمده اند، معادله یک متغیره حاصل خواهد آمد و سپس با حل این معادله، دیگر متغیرهای فضای کار بدست میآیند. در این زمینه میتوان به مقالات نانوا و والدرون[2] [۱۰] و اینوسنتی و کستلی[3] [۶][۱۱] اشاره کرد. البته روشهای دیگری در این زمینه وجود دارد که در مقالات متعددی به آنها اشاره شده است[۱۲][۱۳][۱۴][۱۵][۱۶]. در حل این معادله ریشه های موهومی وحقیقی نیز بدست میآیند که باید ریشه های سازگار با پیکره حقیقی مورد نظر از مکانیزم تعیین شوند که این کار وقت زیادی خواهد گرفت.

1-singular cinfiguration
2-Nanua and Waldron
3-Innocenti and Castelli