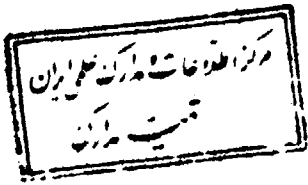


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

٢٩٧٧٩



دانشگاه علم و صنعت ایران

۱۳۷۸ / ۷ / ۱۲

دانشکده مکانیک

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی ربات بر عملکرد دینامیکی بهینه‌اش

مهدی آقامینی

۱۴۲۰۵

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک (گرایش طراحی کاربردی)

استاد راهنما: دکتر محرم حبیب نژاد کورایم

بهمین ۱۳۷۷ ۲۹۷۷۹

تقدیم به پدر و مادرم

چکیده

دینامیک بازوی مکانیکی دارای مشخصات ذاتی از قبیل غیرخطی بودن و کوپله بودن زیاد (بنابر تأثیر نیروهای اینرسی، جانب مرکزی، کوریولیس و جاذبه) می‌باشد. این مشخصات موجب پیدایش مشکلاتی در پیشگویی رفتار دینامیکی ساختمان بازوی مکانیکی داده شده، می‌شود. این نیروهای مؤثر بشدت به ساختار هندسی و شرایط کاری بازوی مکانیکی بستگی دارند. بنابراین، لازم است که برای رسیدن به طرح بهینه، رفتار دینامیکی ربات را تحت شرایط مختلف بررسی کرد.

در این پروژه مشخصه‌ای برای اندازه‌گیری عملکرد دینامیکی بازوی یک ربات نسبت به تغییرات پارامترهای هندسی آن، تعریف شده است. چون رفتار دینامیکی بازوی ربات به شدت به ترمهای اینرسی اش بستگی دارد، مشخصه عملکرد بصورت یک تابع لگاریتمی از حساسیت مقادیر ویژه ماتریس اینرسی نسبت به تغییرات پارامترهای هندسی ربات تعریف شده است. همچنین، چون ماتریس اینرسی تابعی از جابجایی مفصلی است، در این پروژه، عملکرد نسبت به پارامترهای غیر صفر ربات صنعتی PUMA 560، در محدوده زوایای مفصلی بررسی شده است.

این پروژه در ابتدا مروری بر سینماتیک و دینامیک ربات دارد و سپس روشهای تولید مسیر بطور خلاصه توضیح داده می‌شود. در فصل پنجم و ششم که عمده پروژه در این رابطه می‌باشد، رفتار دینامیکی رباتهای SCARA و PUMA560 بررسی شده و نتایج آن بطور مبسوط توضیح داده شده است.

در خاتمه، برنامه کامپیوتری که به زبان (4) Visual Basic نوشته شده است، مبنای کار طراحی ربات می‌باشد که با توجه به اطلاعات ورودی، نمودارهای رفتار دینامیکی ربات در خروجی رسم می‌شود و در نتیجه طراح می‌تواند رفتار دینامیکی ربات را قبل از ساخت پیش بینی کند.

فهرست علائم

q_t موقعیت در لحظه t	a طول لینک
q_0 موقعیت اولیه در $t=0$	d فاصله مفصلی
q_1 موقعیت نهایی در $t=1$	D_i کمیت اسکالر وابسته به جاذبه
Tr عملگر مجموع عناصر قطر اصلی	D_{ij} کمیت اسکالر وابسته به اینرسی
T_p ماتریس تبدیل مختصات لینک p به	D_{ijk} کمیت اسکالر وابسته
مختصات پایه	به جانب مرکزی و کوریولیس
α زاویه پیچش لینک	F_i بردار نیرو یا گشتاور مفصلی
λ مقادیر ویژه ماتریس اینرسی	J_p ماتریس اینرسی لینک p
ξ پارامتر هندسی ربات	N تعداد مفاصل
μ نرم مقادیر ویژه	q متغیر مفصلی
Γ_ξ مشخصه عملکرد دینامیکی نسبت به ξ	\dot{q} سرعت مفصلی
$()^T$ ترانسپوز ماتریس $()$	\ddot{q} شتاب مفصلی

فهرست مندرجات

صفحه

عنوان

فصل اول - مقدمه

- ۱.۱. اهمیت موضوع پروژه ۱
- ۲.۱. موضوعات مورد بررسی ۲
- ۳.۱. برخی از مشخصات ریاتها
- ۱.۳.۱. تعداد محورها ۲
- ۲.۳.۱. پارامترهای سینماتیکی ۳

فصل دوم - مروری بر سینماتیک ریات

- ۱.۲. سینماتیک مستقیم ۶
- ۱.۱.۲. روش نام گذاری D-H ۶
- ۲.۱.۲. معادله بازو ۹
- ۲.۲. سینماتیک معکوس ۱۱

فصل سوم - مروری بر دینامیک بازو

- ۱.۳. مقدمه ۱۴
- ۲.۳. روش لاگرانژ-اویلر ۱۵
- ۳.۳. روش نیوتن-اویلر ۱۵
- ۴.۳. دینامیک مستقیم و معکوس ۱۶

فصل چهارم - روشهای طراحی مسیر

۱۸	۱.۴. مقدمه
	۲.۴. انواع مسیرهای کاربردی
۱۹	۱.۲.۴. چند جمله‌ای‌ها
۲۱	۲.۲.۴. مسیر ذوزنقه‌ای
۲۱	۳.۲.۴. مسیر مستقیم‌الخط
۲۲	۴.۲.۴. مسیر کنترل عددی
۲۲	۳.۴. روشهای طراحی مسیر پیوسته

فصل پنجم - رفتار دینامیکی ربات تحت مسیرهای سرعت متفاوت

۲۵	۱.۵. مقدمه
۲۶	۲.۵. مسیرهای بکار رفته
۲۷	۳.۵. مطالعه رفتار دینامیکی
۲۷	۱.۳.۵. کاربرد اول
۲۷	۱.۱.۳.۵. پاسخ دو لینک اول
۳۰	۲.۱.۳.۵. پاسخ لینک سوم
۳۱	۲.۳.۵. کاربرد دوم
۳۳	۳.۳.۵. کاربرد سوم
۳۵	۴.۳.۵. کاربرد چهارم
۳۹	۵.۳.۵. کاربرد پنجم
۴۱	۴.۵. نتیجه‌گیری

۴۸	.....	Γ_{α_1}	دیاگرام شماتیک مسیر حرکت اول ربات برای	۲.۶
۴۸	.....		عملکرد دینامیکی بر حسب α_1 و زمان (مسیر اول)	۳.۶
۵۰	.....	Γ_{α_1}	دیاگرام شماتیک مسیر حرکت دوم ربات برای	۴.۶
۵۱	.....		عملکرد دینامیکی بر حسب α_1 و زمان (مسیر دوم)	۵.۶
۵۲	.....	Γ_{α_2}	دیاگرام شماتیک مسیر حرکت اول ربات برای	۶.۶
۵۳	.....		عملکرد دینامیکی بر حسب α_2 و زمان (مسیر اول)	۷.۶
۵۴	.....	Γ_{α_2}	دیاگرام شماتیک مسیر حرکت دوم ربات برای	۸.۶
۵۵	.....		عملکرد دینامیکی بر حسب α_2 و زمان (مسیر دوم)	۹.۶
۵۶	.....		عملکرد دینامیکی بر حسب α_3 و زمان	۱۰.۶
۵۷	.....	L_2	عملکرد دینامیکی بر حسب	۱۱.۶
۶۰	.....		فرم اصلی برنامه اول	۱.۷
۶۲	.....		فرم مربوط به تنظیم داده‌های ربات	۲.۷
۶۲	.....		فرم مربوط به بارگذاری	۳.۷
۶۳	.....		فرم مربوط به بارگذاری (برای حالت خاص بارگذاری پیوسته)	۴.۷
۶۴	.....		فرم مربوط به انتخاب مسیر	۵.۷
۶۵	.....		فرم مربوط به فضای کارترین	۶.۷
۶۵	.....		انواع حالات بازو و آرنج	۷.۷
۶۶	.....	Help	فرم مربوط به منوی	۸.۷
۶۷	.....		فرم اصلی برنامه دوم	۹.۷
۶۷	.....	PUMA	فرم مربوط به تنظیم داده‌های ربات	۱۰.۷
۶۸	.....		فرم مربوط به تعیین شرایط مسئله	۱۱.۷

فهرست جداول

صفحه	عنوان	جدول	
۲	محورهای بازوی ربات	۱.۱
۴	پارامترهای سینماتیکی	۲.۱
۱۰	تبدیل چارچوب (k-1) به چارچوب (k)	۱.۲
۴۳	پارامترهای هندسی سه لینک اول از PUMA560	۱.۶
۴۷	داده‌های مربوط به مسیر حرکت اول برای Γ_{α_1}	۲.۶
۴۹	داده‌های مربوط به مسیر حرکت دوم برای Γ_{α_1}	۳.۶
۵۲	داده‌های مربوط به مسیر حرکت اول برای Γ_{α_2}	۴.۶
۵۴	داده‌های مربوط به مسیر حرکت دوم برای Γ_{α_2}	۵.۶

فهرست تصاویر

شکل	عنوان	صفحه
۱.۱	زاویه مفصل و فاصله مفصل	۳
۲.۱	طول لینک و زاویه پیچش لینک	۵
۱.۲	چارچوبهای سیستم مختصات برای هر لینک بازوی ربات	۸
۲.۲	تبدیل سیستم مختصات بین دو لینک مجاور	۹
۳.۲	زوایای Yaw و Pitch و Roll	۱۲
۴.۲	سینماتیک مستقیم و معکوس	۱۲
۱.۳	روش فرمول بندی بازگشتی نیوتن-اوایلر	۱۶
۲.۳	دینامیک مستقیم و معکوس	۱۶
۱.۴	مسیر چند جمله ای	۲۰
۲.۴	مسیر دوزنقه ای	۲۱
۳.۴	مسیر Bang-Bang	۲۱
۴.۴	مسیر NC2	۲۳
۱.۵	تصویر شماتیک ربات SCARA	۲۶
۲.۵	رفتار دینامیکی هر سه لینک نسبت به	
۲۸	مسیرهای افزایش سرعت چند جمله ای	۲۸
۳.۵	رفتار دینامیکی هر سه لینک نسبت به مسیرهای افزایش سرعت NC2	۲۹
۴.۵	اثر کوپلینگ دینامیکی با کاربرد مسیر P-N-P	۳۲
۵.۵	اثر کوپلینگ دینامیکی با کاربرد مسیر N-P-N	۳۲
۶.۵	اثر موقعیتهای شروع و انتها، (مورد اول)	۳۴
۷.۵	اثر موقعیتهای شروع و انتها، (مورد دوم)	۳۴
۸.۵	اثر موقعیتهای شروع و انتها، (مورد سوم)	۳۴
۹.۵	داده مربوط به مثال کاربرد فضای کارتزین	۳۶
۱۰.۵	بارگذاری	۳۶
۱۱.۵	نمودارهای موقعیت	۳۷
۱۲.۵	نمودارهای سرعت	۳۷
۱۳.۵	نمودارهای شتاب	۳۸
۱۴.۵	نمودارهای گشتاور	۳۸
۱۵.۵	داده های مربوط به مثال بارگذاری	۳۹
۱۶.۵	نمودارهای بارگذاری	۳۹
۱۷.۵	نمودارهای گشتاور	۴۰
۱.۶	دیاگرام شماتیک ربات PUMA560	۴۳

فصل اول

مقدمه

۱.۱. اهمیت موضوع پروژه

با توجه به تقاضای رو به فزونی استفاده از رباتهای صنعتی، رقابت شدیدی در تولید آن وجود دارد. اما بعلت پیچیدگی روابط (غیر خطی و کوپله بودن زیاد)، یک طراح ربات به راحتی نمی تواند اثر تغییر در عملگر (مثلاً سرعت و یا ظرفیت بار) و یا تغییر در مشخصه های هندسی را در رفتار دینامیکی ربات پیش بینی کند. با توجه به هزینه بسیار سنگین ساخت ربات، پس بهتر است که قبل از ساخت دید کافی در رابطه با تجزیه و تحلیل مشخصه های دینامیکی بازوی ربات تحت شرایط عمل متفاوت به طراح ربات داده شود تا از اتلاف هزینه و وقت جلوگیری شود. برای روشن شدن موضوع کافی است یادآور شد که مثلاً برای یک بازوی ربات ۶ درجه آزادی، احتیاج به ۱۸ پارامتر هندسی، ۶۰ پارامتر جرم و ۱۲ پارامتر ترکیبی است و هزینه طراحی و ساخت هر ربات بالغ بر میلیونها دلار می گردد. همچنین عوامل مؤثری (از قبیل دقت عمل، سرعت دورانی عمل، بارهای خارجی، ترکیب هندسی و ...) در طراحی ربات وجود دارند که لزوم آگاهی طراح از رفتار دینامیکی ربات را قبل از ساخت، روشن می سازد. پس ضرورت دارد که یک ابزار ریاضی و نرم افزار در رابطه با ربات تهیه و تدوین گردد که در ارتباط با ساخت یک ربات جدید، کارآمد باشد.

۲.۱. موضوعات مورد بررسی

در این پایان نامه موضوعات زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- (۱) مروری بر سینماتیک مستقیم و معکوس ربات
- (۲) مروری بر دینامیک ربات و روشهای طراحی مسیر
- (۳) تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی ربات تحت مسیرهای سرعت مختلف، که با ۲ نوع مسیر NC2 و چند جمله‌ای در نظر گرفته شده است. همچنین کاربردها و نتایج این دو مسیر و نیز تلفیق این دو مسیر و مقایسه آنها با یکدیگر.
- (۴) اثر پارامترهای هندسی ربات PUMA560 بر عملکردهای دینامیکی بهینه‌اش.
- (۵) برای تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی بازوی ربات احتیاج به بسته نرم‌افزاری بود که با استفاده از زبان برنامه نویسی Visual Basic 4 این برنامه تهیه شده است.

۳.۱. برخی از مشخصات رباتها

۱.۳.۱. تعداد محورها

هر بازوی مکانیکی تعدادی محور دارد که لینکهایش حول آنها دوران می‌کند یا در طول آنها حرکت انتقالی انجام میدهد.

جدول (۱.۱): AXES OF A ROBOTIC MANIPULATOR

Axes	Type	Function
1-3	Major	Position the wrist
4-6	Minor	Orient the tool
7-n	Redundant	Avoid obstacles

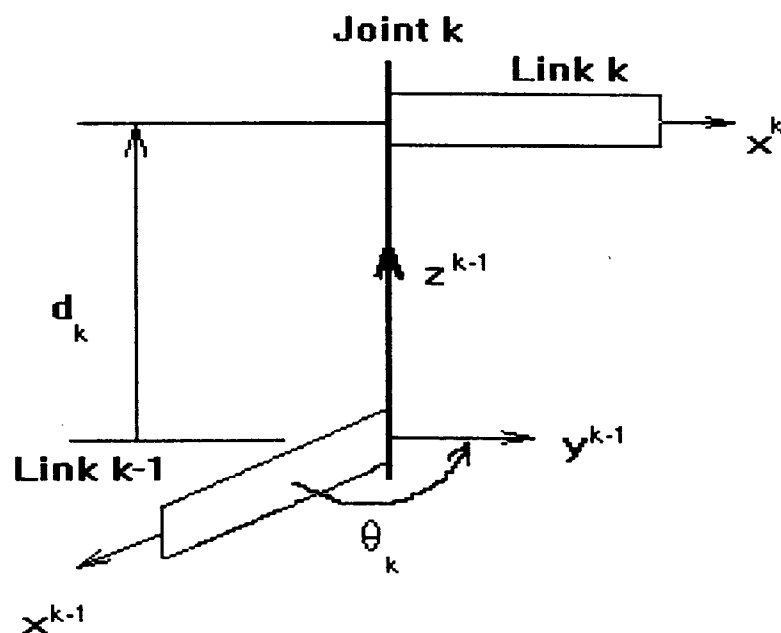
معمولاً سه محور اول، یا محورهای اصلی، برای تعیین موقعیت میچ بکار می‌روند، در حالیکه بقیه محورها برای تعیین جهتگیری ابزار یا پنجه (gripper) استفاده می‌شوند (جدول ۱.۱).

چون بازوهای مکانیکی در فضای سه بعدی کار می‌کنند، بنابراین یک ربات شش محوری از این جهت که می‌تواند به هر موقعیت و جهتگیری دلخواهی در فضای کاری دسترسی داشته باشد، یک بازوی معمولی (general) می‌باشد.

مکانیزم باز کردن و بستن انگشتان ربات یا دیگر فعالیتهای ابزار به عنوان یک محور مستقل بحساب نمی‌آید، زیرا که نقشی در موقعیت و جهتگیری ابزار ایفاء نمی‌کند. رباتهای صنعتی معمولاً شامل ۴ الی ۶ محور می‌باشند. البته ممکن است بعضی از رباتها دارای بیشتر از ۶ محور باشند که در این صورت محورهای اضافی برای جلوگیری از برخورد با مانع یا پرهیز از ساختار هندسی نامطلوب بازوی مکانیکی استفاده می‌شوند.

۲.۳.۱. پارامترهای سینماتیکی

هر دو لینک مجاور بوسیله مفصل دورانی (revolute) یا منشوری (prismatic) بهم متصل می‌شوند. موقعیت و جهتگیری نسبی دو لینک متوالی را می‌توان بوسیله پارامترهای مفصل (joint parameters) بیان کرد، همان گونه که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۱.۱): زاویه مفصل θ و فاصله مفصل d

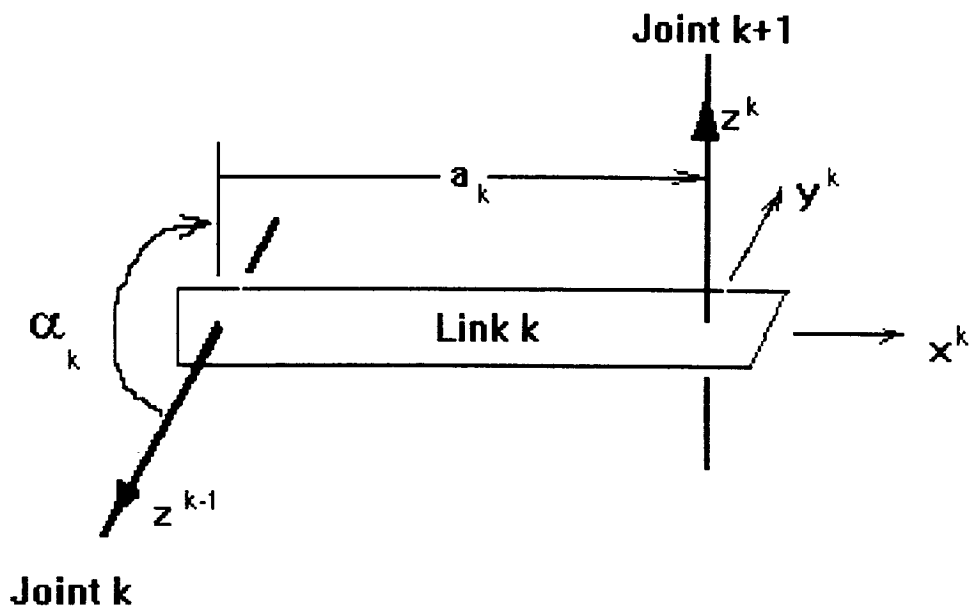
توجه کنید که مفصل $k^{\text{ام}}$ ، لینک $k-1$ را به لینک $k^{\text{ام}}$ متصل می‌کند. پارامترهای مفصل $k^{\text{ام}}$ نسبت به محور z^{k-1} ، که بر محور مفصل $k^{\text{ام}}$ منطبق است، تعریف می‌شوند. اولین پارامتر مفصل، زاویه مفصل (joint angle)، θ_k ، می‌باشد که آن زاویه‌ای است که x^{k-1} باید حول z^{k-1} دوران کند تا موازی x^k شود.

دومین پارامتر مفصل، فاصله مفصل (joint distance)، d_k ، که آن جابجایی در راستای z^{k-1} می‌باشد تا x^{k-1} با x^k متقاطع شود. در هر مفصل همواره یکی از این دو پارامتر، ثابت و دیگری متغیر می‌باشد، که این موضوع، همانطور که در جدول (۲.۱) نشان داده شده است، به نوع مفصل بستگی دارد.

جدول (۲.۱): KINEMATIC PARAMETERS

Arm		Revolute	Prismatic
Parameter	Symbol	Joint (R)	Joint (P)
Joint angle	θ	Variable	Fixed
Joint distance	d	Fixed	Variable
Link length	a	Fixed	Fixed
Link twist angle	α	Fixed	Fixed

موقعیت و جهتگیری نسبی محورهای دو مفصل متوالی را می‌توان بوسیله پارامترهای لینک (Link parameters) بیان کرد، همان گونه که در شکل (۲.۱) نشان داده شده است. در این مورد، لینک $k^{\text{ام}}$ ، مفصل $k^{\text{ام}}$ را به مفصل $k+1$ متصل می‌کند. پارامترهای لینک $k^{\text{ام}}$ نسبت به محور x^k ، که عمود مشترک بین محور مفصل k و محور مفصل $k+1$ است، تعریف می‌شوند. اولین پارامتر لینک، طول لینک (Link length)، a_k ، می‌باشد که آن جابجایی در راستای x^k می‌باشد تا z^{k-1} با z^k متقاطع شود. دومین پارامتر لینک، زاویه پیچش لینک (Link twist angle)، α_k ، می‌باشد که آن زاویه‌ای است که z^{k-1} باید حول x^k دوران کند تا موازی z^k شود.



شکل (۲.۱): طول لینک a و زاویه پیچش لینک α

فصل دوم

مروری بر سینماتیک ربات

۱.۲. سینماتیک مستقیم

بازوی مکانیکی را می‌توان بصورت زنجیره‌ای از جسم‌های صلب که لینک نامیده می‌شوند، مدل کرد. لینکها توسط مفصلها به یکدیگر متصل می‌شوند. یک طرف این زنجیره به پایه ربات ثابت شده است و انتهای دیگر آن، که ابزار یا مجری نهایی نام دارد، برای حرکت آزاد است.

هدف کنترل موقعیت و جهتگیری ابزار در فضای سه بعدی می‌باشد. ابزار را می‌توان طوری برنامه ریزی کرد که مسیر خاصی را طی کند و در فضای کاری اش کار خاصی را انجام دهد. بمنظور برنامه ریزی حرکت ابزار ابتدا باید روابط بین متغیرهای مفصلی و موقعیت و جهتگیری ابزار را بدست آورد. این مسئله را سینماتیک مستقیم می‌نامند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

مسئله سینماتیک مستقیم: بردار متغیرهای مفصلی بازوی یک ربات داده شده است، موقعیت و جهتگیری ابزار را نسبت به چارچوب مختصات پایه ربات تعیین کنید.

۱.۱.۲. روش نام‌گذاری دناویت-هارتنبرگ (D-H)

در سال ۱۹۵۵ دناویت و هارتنبرگ (Denavit & Hartenberg) یک روش نام‌گذاری