

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد

پایدارسازی و طراحی مسیر یک ربات چهارپا

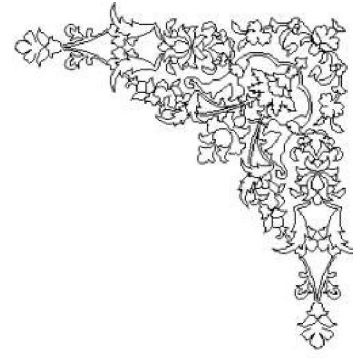
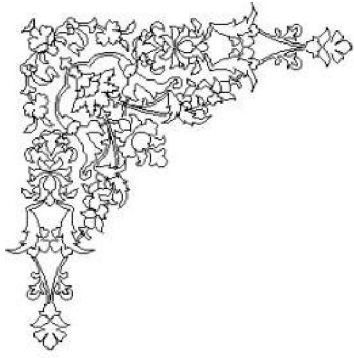
استاد راهنما:

دکتر سید علی اکبر موسویان

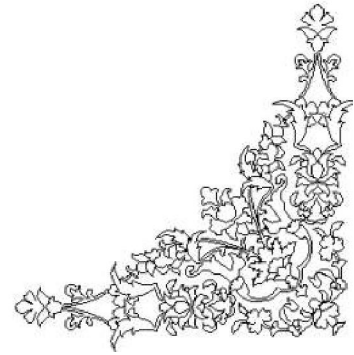
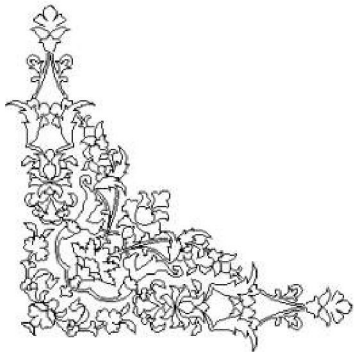
نگارنده:

علی زمانی

تابستان ۱۳۹۰



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تاییدیه هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

پایدارسازی و طراحی مسیر یک ربات چهارپا

توسط آقای علی زمانی، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی مورد تایید قرار می دهند.

۱- استاد راهنما: آقای دکتر سید علی اکبر موسویان.....امضاء

۲-ممتحن داخلی: آقای دکتر فرید نجفی.....امضاء

۳-ممتحن داخلی: آقای دکتر محمدرضا همایی نژاد.....امضاء

۴-نماینده تحصیلات تکمیلی: آقای دکتر محمدرضا همایی نژاد.....امضاء

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه: پایداری سازی و طراحی مسیر یک ربات چهارپا

استاد راهنما: دکتر سید علی اکبر موسویان

نام دانشجو: علی زمانی

شماره دانشجویی: ۸۷۰۲۵۵۴

اینجانب علی زمانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده است و صحت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد. همچنین در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده، اشاره شده است. همچنین گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده می‌باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

نخست سپاس بر آفریننده بی‌همتا که توان آموختن و پژوهش را بر من ارزانی داشت. هم او که به هنگام سختی‌ها، نومییدی را از من دور کرد تا از ناکامی‌ها پلی به سوی کامیابی‌ها بسازم. از آموزگاران و اساتیدی که در مراحل گوناگون تحصیل، سخاوت‌مندانه دانسته‌هایشان را در اختیارم گذاردند، سپاس‌گزاری می‌کنم. به ویژه سپاس فراوان نثار استاد گرانقدر جناب آقای دکتر موسویان می‌نمایم که در همه مراحل این پایان‌نامه از راهنمایی‌های ارزنده ایشان بسیار بهره بردم. همچنین بر من است سپاس‌گزاری از Prof. Shigeo Hirose از Chiba Institute of Technology و Prof. Kan Yoneda و Tokyo Institute of Technology که مساعدت‌های بی‌دریغ این عزیزان در طول پروژه راه‌گشا بود. از دوستان عزیز که بودن در کنارشان زیباترین خاطرات را برایم رقم زده سپاس‌گزاری می‌کنم و از آفریدگار بزرگ، بهترین‌ها را برایشان خواستارم.

چکیده

روبات‌های پادار دارای مانورپذیری بیشتری نسبت به ربات‌های چرخدار و زنجیری در محیط‌های ناهموار می‌باشند. مشخصه ربات‌های پادار که از نقاط تماس گسسته با زمین استفاده می‌کنند آن‌ها را قادر می‌سازد که محل مناسبی را برای گذاشتن پا انتخاب کنند به طوری که از گذاشتن پاها بر روی موانع یا حفره‌ها اجتناب شود.

در این پژوهش، به طراحی مسیر پایدار برای یک ربات چهارپا پرداخته می‌شود. ربات موردنظر، دارای شش درجه آزادی غیر فعال در بدنه و سه درجه آزادی فعال در هر پا می‌باشد. در نتیجه، در حالت غیر مقید روبات مزبور دارای ۱۸ درجه آزادی است و به واسطه حرکت بر روی سطح معین یک سیستم مقید به قیود سینماتیکی می‌باشد. برای طراحی مسیر پایدار، ابتدا تحلیل سینماتیکی و دینامیکی ربات انجام می‌شود و چون ربات توسط پاها بر زمین مقید شده و تمامی درجات آزادی بدنه غیرفعال می‌باشد، روشی برای حذف قیود پاهای تکیه‌گاهی ارائه می‌شود. سپس ربات موردنظر در نرم‌افزار SimMechanics مدل‌سازی شده و مقایسه‌ای بین تمامی گشتاورهای مفاصل در هر دو مدل تحلیلی و نرم افزاری صورت گرفته و چون اختلاف حاصله از این مقایسه در حد صفر است، صحت مدل با دقت بالا تایید می‌شود.

سپس، با توجه به اینکه پایداری یکی از مهمترین مسائل در زمینه سیستم‌های پادار است، معیارهای مختلف پایداری استاتیکی از روش‌های هندسی استخراج گردیده و مهمترین معیارهای دینامیکی که تاکنون ارائه شده، مورد مطالعه قرار گرفته و با توجه به ملاحظات پایداری، به طراحی گیت‌های پررودیک استاتیکی و دینامیکی ربات پرداخته می‌شود. برای طراحی گیت استاتیکی، دو نوع گیت استاتیکی پیوسته و گسسته در نظر گرفته شده که هر یک به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در گیت استاتیکی پیوسته، به طراحی گیت‌های خرچنگی، چرخشی و صعود از پلکان پیوسته بر مبنای حداکثر استفاده از فضای کاری ربات پرداخته می‌شود. برای بالا رفتن ربات از پلکان، روشی برای پیکربندی پاهای ربات پیشنهاد می‌شود. با چنین پیکربندی، ربات قادر است با حفظ پایداری و استفاده از حداکثر فضای کاری و حداقل ضریب کار از روی پلکان بالا رود. در گیت استاتیکی گسسته، به طراحی گیت‌های خرچنگی و چرخشی گسسته پرداخته می‌شود و با استفاده از گیت‌های گسسته طراحی شده، ربات قادر است مسیر دلخواه را بپیماید. در بین انواع گیت‌های دینامیکی، گیت یورتمه بر مبنای معیار پایداری ZMP به گونه‌ای طراحی می‌شود که پیوستگی موقعیت و سرعت حرکت بدنه در حین سوئیچ کردن پاها حفظ شود. نتایج حاصله از این طراحی نشان می‌دهد که ربات قادر است بر اساس فرمان کاربر، مسیر مورد نیاز را به صورت کاملاً پایدار بپیماید.

فهرست مطالب

فصل ۱. مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- تاریخچه ربات‌های پادار	۱
۱-۲-۱- ربات‌های پادار استاتیکی	۲
۱-۲-۲- ربات‌های پادار دینامیکی	۶
۱-۳- سینماتیک و دینامیک ربات‌های پادار	۱۲
۱-۴- معیارهای پایداری	۱۳
۱-۵- انواع گیت‌های حرکتی ربات چهارپا	۱۵
۱-۶- طراحی گیت	۱۷
۱-۶-۱- گیت‌های استاتیکی	۱۷
۱-۶-۲- گیت‌های دینامیکی	۲۱
۱-۷- اهداف و خواسته‌های پایان‌نامه	۲۲
۱-۸- معرفی فصل‌های پایان‌نامه	۲۲
فصل ۲. تحلیل سینماتیک و مدلسازی دینامیکی	۲۴
۱-۲- مقدمه	۲۴
۲-۲- معرفی ربات طراحی شده	۲۴
۳-۲- تحلیل سینماتیک مستقیم ربات	۲۵
۱-۳-۲- سینماتیک بدنه ربات	۲۶
۲-۳-۲- سینماتیک پاهای ربات	۲۹
۴-۲- سینماتیک معکوس	۳۲
۱-۴-۲- محاسبه متغیرهای مفصلی	۳۲
۲-۴-۲- محاسبه نرخ متغیرهای مفصلی	۳۳
۳-۴-۲- محاسبه شتاب مفصلی	۳۳
۵-۲- معادلات حرکت ربات	۳۴
۱-۵-۲- معادلات دینامیکی ربات غیر مقید	۳۴
۲-۵-۲- معادلات دینامیکی ربات مقید	۳۸
فصل ۳. پایداری ربات‌های پادار	۴۲
۱-۳- مقدمه	۴۲

۴۳	۲-۳- معیارهای پایداری استاتیکی
۴۸	۳-۳- معیارهای پایداری دینامیکی
۵۵	فصل ۴. طراحی گیت‌های استاتیکی
۵۵	۱-۴- مقدمه
۵۵	۲-۴- ایجاد گیت
۵۷	۳-۴- طراحی گیت‌های پیوسته
۵۷	۱-۳-۴- تعاریف
۶۰	۲-۳-۴- طراحی مسیر حرکت پا
۶۶	۳-۳-۴- طراحی گیت موجوار پیوسته در راستای x
۷۲	۴-۳-۴- طراحی گیت خرچنگی
۷۹	۵-۳-۴- طراحی گیت چرخشی (Spinning Gait)
۸۷	۶-۳-۴- طراحی گیت برای صعود از پلکان
۱۰۴	۴-۴- طراحی گیت‌های گسسته
۱۰۴	۱-۴-۴- طراحی گیت گسسته دوفازی
۱۰۵	۲-۴-۴- مقایسه گیت‌های گسسته و پیوسته
۱۰۸	۳-۴-۴- گیت‌های گسسته چهار فازی
۱۰۹	۴-۴-۴- طراحی گیت‌های گسسته دوفازی خرچنگی
۱۱۳	۵-۴-۴- پیمودن مسیر با استفاده از گیت خرچنگی
۱۱۷	۶-۴-۴- طراحی گیت‌های گسسته چرخشی
۱۳۲	فصل ۵. طراحی گیت‌های دینامیکی
۱۳۲	۱-۵- مقدمه
۱۳۲	۲-۵- تعیین موقعیت ZMP
۱۳۳	۳-۵- طراحی گیت trot
۱۳۴	۱-۳-۵- طراحی حرکت پا
۱۳۶	۲-۳-۵- طراحی حرکت بدنه
۱۴۵	۴-۵- شبیه‌سازی
۱۴۵	۱-۴-۵- شبیه‌سازی به ازای $vcy = 0$, $\psi_c = 0$, $\beta = 0.5$ و متغیر vcx
۱۴۷	۲-۴-۵- شبیه‌سازی به ازای $vcy = 0$, $\psi_c = 0$ و β و متغیر vcx
۱۴۹	۳-۴-۵- شبیه‌سازی به ازای $vcx = 0$, $\psi_c = 0$, $\beta = 0.5$ و متغیر vcy

۱۵۰ شبیه‌سازی به ازای $\psi_c = 0$ و β ، vcx ، vcy متغیر
۱۵۲ شبیه‌سازی به ازای ψ_c ، β ، vcx ، vcy متغیر
۱۵۴ فصل ۶. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات
۱۵۴ ۱-۶- نتیجه‌گیری
۱۵۵ ۲-۶- دستاوردها
۱۵۶ ۳-۶- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی
۱۵۷ منابع و مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. (الف) مکانیزم Chebyshev, [6]. (ب) اسب مکانیکی، [9]. ۳
- شکل ۲-۱. (الف) ربات جنرال الکترونیک، [3]. (ب) ربات Big Muskie, [10]. (ج) ربات Phony Pony, [6]. ۴
- شکل ۳-۱. (الف) ربات OSU, [9]. (ب) ربات ASV, [9]. ۵
- شکل ۴-۱. (الف) ربات KUMO-I, [11]. (ب) ربات TITAN III, [11]. ۶
- شکل ۵-۱. (الف) ربات Scout II, [13]. (ب) ربات KOLT, [15]. ۷
- شکل ۶-۱. (الف) ربات Airhopper, (ب) ربات Dexter. ۸
- شکل ۷-۱. ربات KenKel I, [18]. (ب) ربات KenKel II, [19]. ۹
- شکل ۸-۱. (الف) ربات تک پای Hopper, [1]. (ب) ربات دوپا، [1]. (ج) ربات چهارپا، [1]. ۱۰
- شکل ۹-۱. (الف) ربات BigDog 2005, [23]. (ب) ربات BigDog 2006, [24]. (ج) ربات BigDog 2008, [25]. ۱۱
- شکل ۱۰-۱. انواع شیوه‌های حرکتی یک ربات چهارپا. ۱۷
- شکل ۱-۲. ساختار ربات چهارپا. ۲۵
- شکل ۳-۲. دستگاه‌های انتخاب شده برای توصیف بدنه و پای نام ربات. ۳۰
- شکل ۴-۲. مدل شبیه سازی شده در نرم افزار SimMechanics. ۳۶
- شکل ۵-۲. بلوک دیاگرام بدنه و پای نام در نرم افزار SimMechanics. ۳۷
- شکل ۶-۲. خطای صحنه گذاری دینامیک غیر مقید بدنه ربات. ۳۸
- شکل ۷-۲. خطای صحنه گذاری دینامیک غیر مقید پاهای ربات. ۳۸
- شکل ۱-۳. چندضلعی تکیه گاهی و حدود پایداری استاتیکی. ۴۴
- شکل ۲-۳. پارامترها و نوع فضای کاری هر پا. ۴۵
- شکل ۳-۳. زوایای بحرانی در گیت خرچنگی. ۴۵
- شکل ۴-۳. حد پایداری S_{SM} به ازای α و β های مختلف. ۴۶
- شکل ۵-۳. مقایسه حدود پایداری به ازای $\beta = 7/8$. ۴۷
- شکل ۶-۳. هندسه مورد استفاده برای محاسبه حد پایداری انرژی، [36]. ۴۸
- شکل ۷-۳. نیروهای وارده بر ربات. ۴۹
- شکل ۸-۳. واژگونی ربات حول محور دوران. ۵۰
- شکل ۹-۳. نمای هندسی برای محاسبه حد پایداری نیرو-زاویه، [69]. ۵۳
- شکل ۱۰-۳. نمای هندسی برای محاسبه S_{NDES} , [71]. ۵۴
- شکل ۱-۴. (الف) نمای فوقانی ربات. (ب) نمودار ترتیب حرکت پاها. (ج) ترتیب حرکت. ۵۷

- شکل ۲-۴. تعاریف هندسی ۵۹
- شکل ۳-۴. گیت دیاگرام گیت موجوار پیوسته به ازای $\beta = 3/4$ برای ربات چهارپا ۶۰
- شکل ۴-۴. گیت دیاگرام گیت موجوار پیوسته به ازای $\beta = 5/6$ برای ربات چهارپا ۶۰
- شکل ۵-۴. نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب انتهای پا در راستای x ۶۵
- شکل ۶-۴. نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب انتهای پا در راستای z ۶۵
- شکل ۷-۴. مسیرهای حرکت انتهای پا در فضای سه بعدی ۶۵
- شکل ۸-۴. حالت استاندارد ربات ۶۶
- شکل ۹-۴. موقعیت مطلوب پاها نسبت به بدنه قبل از آغاز سیکل حرکتی ۶۷
- شکل ۱۰-۴. ترتیب حرکت پاها از حالت استاندارد به حالت مطلوب ۶۸
- شکل ۱۱-۴. موقعیت نسبی پاها نسبت به بدنه در گیت پیوسته موجوار ۷۱
- شکل ۱۲-۴. فلوچارت طراحی گیت استاتیکی ۷۲
- شکل ۱۳-۴. نحوه حرکت پای آم و بدنه به ازای زوایای مختلف خرچنگی ۷۳
- شکل ۱۴-۴. موقعیت نسبی پاها نسبت به بدنه در گیت خرچنگی نوع $+x$ ۷۵
- شکل ۱۵-۴. مسیرهای حرکت پاها و بدنه در فضای سه بعدی ۷۷
- شکل ۱۶-۴. حد پایداری و حد پایداری طولی ۷۷
- شکل ۱۷-۴. زوایای مفصلی پای ۱ ۷۸
- شکل ۱۸-۴. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۷۸
- شکل ۱۹-۴. شتابهای مفصلی پای ۱ ۷۸
- شکل ۲۰-۴. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۷۸
- شکل ۲۱-۴. حالت استاندارد ربات ۷۹
- شکل ۲۲-۴. موقعیت مطلوب پاها نسبت به بدنه قبل از آغاز سیکل حرکتی در گیت spinning در جهت $+z$ ۸۰
- شکل ۲۳-۴. ترتیب حرکت پاها از حالت استاندارد به حالت مطلوب در گیت spinning در جهت $+z$ ۸۱
- شکل ۲۴-۴. هندسه مورد استفاده برای طراحی گیت spinning در جهت $+z$ ۸۲
- شکل ۲۵-۴. موقعیت نسبی پاها نسبت به بدنه در گیت spinning در جهت $+z$ ۸۴
- شکل ۲۶-۴. مسیرهای حرکت پاها در فضای سه بعدی ۸۵
- شکل ۲۷-۴. زاویه دوران بدنه حول $+z$ ۸۵
- شکل ۲۸-۴. سرعت زاویه‌ای بدنه حول $+z$ ۸۵
- شکل ۲۹-۴. حد پایداری گیت spinning در جهت $+z$ ۸۶

- شکل ۴-۳۰. زوایای مفصلی پای ۱ ۸۶
- شکل ۴-۳۱. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۸۶
- شکل ۴-۳۲. شتاب مفصلی پای ۱ ۸۶
- شکل ۴-۳۳. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۸۷
- شکل ۴-۳۴. بالا رفتن ربات از روی پلکان در حالت ۱ ۸۸
- شکل ۴-۳۵. مسیر حرکت پا حین عبور از روی مانع برای حالت ۱ ۹۰
- شکل ۴-۳۶. مدل شبیه‌سازی شده روبات در حین صعود از پلکان برای حالت ۱ در جعبه‌ابزار
SimMechanics ۹۱
- شکل ۴-۳۷. مسیر حرکت پاها ۱ و ۲ و بدنه در فضای سه‌بعدی ۹۲
- شکل ۴-۳۸. حد پایداری ۹۲
- شکل ۴-۳۹. زوایای مفصلی پای ۱ ۹۲
- شکل ۴-۴۰. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۹۳
- شکل ۴-۴۱. شتاب‌های مفصلی پای ۱ ۹۳
- شکل ۴-۴۲. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۹۳
- شکل ۴-۴۳. بالا رفتن ربات از روی پلکان در حال ۲ ۹۴
- شکل ۴-۴۴. مسیر حرکت پا حین عبور از روی مانع برای حالت ۲ ۹۵
- شکل ۴-۴۵. (الف) حرکت ربات بر روی سطح صاف به ازای $\beta = 0.75$. (ب) حرکت ربات بر روی سطح
شیبدار به به ازای $\beta = 0.75$ ۹۶
- شکل ۴-۴۶. حرکت ربات بر روی سطح صاف به ازای $\beta = 0.75$ با فضای کاری کاهش یافته، [72] ۹۶
- شکل ۴-۴۷. حرکت پایدار ربات بر روی سطح شیبدار به ازای $\beta = 0.75$ ۹۷
- شکل ۴-۴۸. مثلث‌های تکیه‌گاهی برای سه حالت A، B و C ۹۸
- شکل ۴-۴۹. حرکت ربات بر روی سطح شیبدار و دستگاه‌های ملصق به ربات و زمین ۹۸
- شکل ۴-۵۰. ترتیب و نحوه حرکت ربات بر روی سطح شیبدار ۱۰۰
- شکل ۴-۵۱. نمودار حداکثر زاویه شیب، θ_{max} ، بر حسب δ ۱۰۰
- شکل ۴-۵۲. مدل شبیه‌سازی شده روبات در حین صعود از پلکان برای حالت ۲ در جعبه‌ابزار
SimMechanics ۱۰۱
- شکل ۴-۵۳. مسیر حرکت پاها و بدنه در فضای سه‌بعدی ۱۰۲
- شکل ۴-۵۴. حد پایداری ۱۰۲
- شکل ۴-۵۵. زوایای مفصلی پای ۱ ۱۰۲

- شکل ۴-۵۶. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۱۰۳
- شکل ۴-۵۷. شتاب‌های مفصلی پای ۱ ۱۰۳
- شکل ۴-۵۸. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۱۰۳
- شکل ۴-۵۹. ترتیب و نحوه حرکت پاها و بدنه در گیت گسسته دوفازی ۱۰۵
- شکل ۴-۶۰. نمودارهای S_{LSMD}/Rx و S_{LSMC}/Rx ۱۰۶
- شکل ۴-۶۱. سرعت گیت‌های پیوسته موجوار و گیت‌های گسسته دوفازی ۱۰۸
- شکل ۴-۶۲. دیاگرام گیت مربوط به گیت گسسته دوفازی به ازای $K=3$ ۱۰۸
- شکل ۴-۶۳. موقعیت اولیه پاها و مسیرهای حرکت پاها در گیت گسسته خرچنگی ۱۱۰
- شکل ۴-۶۴. حدود پایداری گیت گسسته خرچنگی با تغییر در موقعیت اولیه پاها ۱۱۱
- شکل ۴-۶۵. مسیرهای حرکت پاها و بدنه در فضای سه‌بعدی ۱۱۲
- شکل ۴-۶۶. حد پایداری و حد پایداری طولی ۱۱۲
- شکل ۴-۶۷. زوایای مفصلی پای ۱ ۱۱۲
- شکل ۴-۶۸. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۱۱۳
- شکل ۴-۶۹. شتاب‌های مفصلی پای ۱ ۱۱۳
- شکل ۴-۷۰. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۱۱۳
- شکل ۴-۷۱. مسیرهای حرکت پاها و بدنه در فضای سه‌بعدی ۱۱۵
- شکل ۴-۷۲. مسیرهای حرکت پاها و بدنه در فضای دوبعدی و منحنی $y=0.25\sin(x)$ ۱۱۶
- شکل ۴-۷۳. حد پایداری ۱۱۶
- شکل ۴-۷۴. زوایای مفصلی پای ۱ ۱۱۶
- شکل ۴-۷۵. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۱۱۶
- شکل ۴-۷۶. شتاب‌های مفصلی پای ۱ ۱۱۷
- شکل ۴-۷۷. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۱۱۷
- شکل ۴-۷۸. مسیر حرکت بدنه در گیت circling گسسته ۱۱۸
- شکل ۴-۷۹. حد پایداری S_{LSM} بر حسب زاویه دوران در حین حرکت پای نشان داده شده ۱۲۱
- شکل ۴-۸۰. حد پایداری S_{LSM} بر حسب شعاع دوران برای دوران مثبت در حین حرکت پای نشان داده شده ۱۲۱
- شکل ۴-۸۱. مسیرهای حرکت پاها و بدنه در فضای سه‌بعدی ۱۲۲
- شکل ۴-۸۲. زاویه دوران بدنه ۱۲۳
- شکل ۴-۸۳. سرعت زاویه‌ای دوران بدنه ۱۲۳

- شکل ۴-۸۴. مسیر حرکت بدنه و مسیر مطلوب ۱۲۳
- شکل ۴-۸۵. حد پایداری ۱۲۴
- شکل ۴-۸۶. زوایای مفصلی پای ۱ ۱۲۴
- شکل ۴-۸۷. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۱۲۴
- شکل ۴-۸۸. شتاب‌های مفصلی پای ۱ ۱۲۴
- شکل ۴-۸۹. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۱۲۵
- شکل ۴-۹۰. بدنه و هر پای ربات در ابتدای فاز اول (قرمز رنگ) و انتهای فاز اول (آبی رنگ) ۱۲۶
- شکل ۴-۹۱. بدنه و هر پای ربات در ابتدای فاز دوم (آبی رنگ) و انتهای فاز دوم (سبز رنگ) ۱۲۶
- شکل ۴-۹۲. گیت گسسته Spinning. Leg i(j). نشان دهنده S_{LSM} در فاز زام در حین حرکت پای نام. ۱۲۸
- شکل ۴-۹۳. مسیرهای حرکت پاها و بدنه در فضای سه‌بعدی ۱۲۹
- شکل ۴-۹۴. زاویه دوران بدنه ۱۲۹
- شکل ۴-۹۵. سرعت زاویه‌ای دوران بدنه ۱۳۰
- شکل ۴-۹۶. حد پایداری ۱۳۰
- شکل ۴-۹۷. زوایای مفصلی پای ۱ ۱۳۰
- شکل ۴-۹۸. نرخ زوایای مفصلی پای ۱ ۱۳۰
- شکل ۴-۹۹. شتاب‌های مفصلی پای ۱ ۱۳۱
- شکل ۴-۱۰۰. گشتاور عملگرهای پای ۱ ۱۳۱
- شکل ۵-۱. پاهای مجازی ۱۳۵
- شکل ۵-۲. مسیر حرکت بدنه و دستگاه‌های ملصق به پاهای مجازی ۱۳۷
- شکل ۵-۳. گیت دیاگرام trot به ازای $\beta = 5/8$ ۱۳۸
- شکل ۵-۴. حرکت COG و الگوی ایجاد شده توسط پاهای تکیه‌گاهی ۱۴۶
- شکل ۵-۵. نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب COG در راستای x و y نسبت به دستگاه اینرسی ۱۴۷
- شکل ۵-۶. حرکت COG و الگوی ایجاد شده توسط پاهای تکیه‌گاهی ۱۴۸
- شکل ۵-۷. نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب COG در راستای x و y نسبت به دستگاه اینرسی ۱۴۸
- شکل ۵-۸. حرکت COG و الگوی ایجاد شده توسط پاهای تکیه‌گاهی ۱۴۹
- شکل ۵-۹. نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب COG در راستای x و y نسبت به دستگاه اینرسی ۱۵۰
- شکل ۵-۱۰. حرکت COG و الگوی ایجاد شده توسط پاهای تکیه‌گاهی ۱۵۱
- شکل ۵-۱۱. نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب COG در راستای x و y نسبت به دستگاه اینرسی ۱۵۱

شکل ۵-۱۲. حرکت COG و الگوی ایجاد شده توسط پاهای تکیه‌گاهی ۱۵۲

شکل ۵-۱۳. نمودارهای موقعیت، سرعت و شتاب COG در راستای x و y نسبت به دستگاه اینرسی ۱۵۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۱. مهمترین تحقیقات صورت گرفته در زمینه طراحی گیت‌های استاتیکی برای ربات‌های چندپا .. ۲۰
- جدول ۱-۲. مشخصات هندسی ربات ۲۵
- جدول ۲-۲. پارامترهای دنویت-هانتبرگ برای پای نام ۳۰
- جدول ۱-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای ترسیم مسیرهای حرکت پا ۶۴
- جدول ۲-۴. محدوده زاویه خرچنگی، نوع گیت و ترتیب حرکت پاها ۷۳
- جدول ۳-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی گیت خرچنگی نوع $+x$ ۷۶
- جدول ۴-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی گیت spinning در جهت $+z$ ۸۴
- جدول ۵-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی گیت صعود از پلکان در حالت ۱ ۹۱
- جدول ۶-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی گیت صعود از پلکان در حالت ۲ ۱۰۱
- جدول ۷-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی گیت گسسته خرچنگی با تغییر در موقعیت اولیه پاها ۱۱۱
- جدول ۸-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی جهت پیمودن مسیر موردنظر ۱۱۵
- جدول ۹-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی گیت گسسته Circling ۱۲۲
- جدول ۱۰-۴. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی گیت گسسته Spinning ۱۲۸
- جدول ۱-۵. مقادیر پارامترهای ورودی به ربات ۱۴۶
- جدول ۲-۵. مقادیر پارامترهای ورودی به ربات ۱۴۷
- جدول ۳-۵. مقادیر پارامترهای ورودی به ربات ۱۴۹
- جدول ۴-۵. مقادیر پارامترهای ورودی به ربات ۱۵۰
- جدول ۵-۵. مقادیر پارامترهای ورودی به ربات ۱۵۲

فهرست علائم

سینماتیک و دینامیک

q, \dot{q}, \ddot{q}	بردار مختصات تعمیم یافته کل سیستم و نرخ‌های زمانی آن
β	بردار درجات آزادی مستقل روبات
$J(q)$	ماتریس ژاکوبین
${}^{i,j-1}T_{i,j}$	ماتریس تبدیل پارامترهای دنویت- هارتنبرگ
m	جرم
g	شتاب گرانش
COG	مرکز جرم بدنه
$\tau_{i,j}$	گشتاور مفصلی پای i ام مفصل j ام
$M(q)$	ماتریس اینرسی جرم
$V(q, \dot{q})$	بردار شامل ترم‌های وابسته به سرعت در مدل دینامیکی محاسبه شده
$G(q)$	بردار شامل ترم‌های گرانش در مدل دینامیکی محاسبه شده
$A(q)$	قیود پاهای تکیه‌هایی
λ	بردار ضرایب لاگرانژ

پایداری

e	بردار یکه در راستای لبه‌های چندضلعی تکیه‌گاهی
H	ارتفاع مرکز جرم بدنه نسبت به زمین
S_{SM}	حد پایداری
S_{LSM}	حد پایداری طولی
S_{SSM}	حد پایداری جانبی
S_{CLSM}	حد پایداری طولی خرچنگی
S_{ESM}	حد پایداری انرژی
S_{NESM}	حد پایداری انرژی نرمالیزه شده
S_{DSM}	حد پایداری دینامیکی
S_{TSM}	حد پایداری واژگونی
S_{MHS}	حد پایداری گشتاور- ارتفاع
S_{FASM}	حد پایداری نیرو- زاویه
S_{NDESM}	حد پایداری انرژی دینامیکی نرمالیزه شده

گیت‌های استاتیکی و دینامیکی

β	فاکتور وظیفه
ϕ	فاز پا

R	گام پا
Φ	گام زاویه‌ای
λ	طول گام بدنه
Ω	زاویه گام بدنه
t	زمان
t_0	زمان شروع سیکل اول
T	زمان یک سیکل
T_{sw}	زمان انجام فاز انتقالی
T_{sup}	زمان انجام فاز تکیه‌گاهی
T'	زمان انجام یک فاز چهارپا تکیه‌گاهی
ΔG	بردار م مسافت طی شده توسط بدنه در یک فاز انتقالی
$\Delta G'$	بردار مسافت طی شده توسط بدنه در یک فاز چهارپا تکیه‌گاهی
$\Delta\Omega$	مقدار دوران بدنه در یک فاز انتقالی
$\Delta\Omega'$	مقدار دوران بدنه در یک فاز چهارپا تکیه‌گاهی
α	زاویه خرچنگی
α_c	زاویه خرچنگی بحرانی
h_{max}	حداکثر ارتفاع پای در حال حرکت نسبت به زمین
θ_{max}	حداکثر زاویه سطح شیب‌دار
${}^i\mathbf{G}(t)$	بردار موقعیت مرکز جرم نسبت به دستگاه \hat{a}_m
T_0	زمان شروع step کنونی
T_1	زمان شروع step بعدی
T_2	زمان نهایی step بعدی
T_s	زمان نهایی فاز دوپا تکیه‌گاهی

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مقدمه

طبیعت از مخلوقات شگفت‌انگیزی تشکیل شده است و انسان‌ها همواره کنجکاو و علاقه‌مند درباره رفتار آن‌ها بوده‌اند و تلاش کرده‌اند تا رفتارهای آن‌ها را درک نموده و تقلید نمایند. تقلید کردن رفتار و حرکات موجودات زنده ایده‌ای جالب و در عین حال بسیار مشکل است. بنابراین، به ناچار دستگاه‌های ساده-تری باید ساخته شود که بتوانند فقط تعداد بسیار محدودی از جنبه‌هایی را که در اطراف خود می‌بینیم تقلید نمایند: مخلوقات قدرت بینایی، شنوایی، انجام کار و راه رفتن و غیره را دارا هستند.

مناسب‌ترین دستگاهی که بتوان با آن تعدادی از رفتارهای این مخلوقات را تقلید کرد، ربات‌های پادار می‌باشند. بر مبنای تعداد پاهای ربات، ربات‌های پادار به ربات‌های دوپا مانند انسان یا پرنده، ربات‌های چهارپا مانند پستانداران و خزندگان، ربات‌های شش‌پا مانند حشرات و ربات‌های هشت‌پا مانند تارتانان تقسیم‌بندی می‌شوند. ربات‌های تک‌پا [1]، سه‌پا [2]، پنج‌پا [3]، هفت‌پا [4]، یا با تعداد پاهای بیشتر [5]، غیر معمول بوده ولی امکان‌پذیر می‌باشد. ربات‌های راه‌رونده دارای مزایای زیادی نسبت به ربات‌های چرخدار و شنی می‌باشند و در عین حال پیچیدگی آن‌ها نیز بیشتر است. این پیچیدگی نه تنها به دلیل نوع مکانیزم مورد استفاده، بلکه به دلیل سیستم‌های الکترونیکی و الگوریتم‌های حسی و کنترلی می‌باشد.

۱-۲- تاریخچه ربات‌های پادار

تکنولوژی حرکت - راه رفتن با ابداع مکانیزم‌های بسیار ساده مشابه اسباب‌بازی‌ها آغاز گردید. چنین مکانیزم‌هایی قادر به حرکت تحت شرایط خاص بوده و فقط بر روی سطوح صاف قابلیت حرکت داشتند. سپس محققان با مشاهده و ثبت مودهای حرکتی گونه‌های خاصی از موجودات زنده تلاش کردند تا به عملکرد حرکت در طبیعت پی ببرند. پس از آن، گیت‌ها بر مبنای مدل‌های ریاضی فرمول‌بندی گردید. سپس معیارهای پایداری و الگوریتم‌های ایجاد گیت بر مبنای حالت‌های ایده‌آل به وجود آمدند. ربات‌های پادار را می‌توان به ربات‌های پادار استاتیکی و ربات‌های پادار دینامیکی تقسیم بندی نمود. در ربات‌های پادار