

مدل سازی و کنترل ربات

مؤلفین:

مارک اسپانگ (Mark W. Spong)

ست هاتچینسون (Seth Huthcinson)

ماتھوکومالی ویدیا ساگار (Mathukumalli Vidyasagar)

مترجم: دکتر سعید ابراهیمی

(استادیار دانشگاه یزد)

پیشگفتار مترجم

با توجه به پیشرفت علم رباطیک و کاربرد گسترده آن، دسترسی به منابع مهم و کلیدی این علم برای اساتید و دانشجویان از اهمیت فراوانی برخوردار است. کتاب حاضر، ترجمه یکی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین کتاب‌های علم رباطیک است که توسط افراد سرشناس این علم به نگارش در آمده است و در حال حاضر به عنوان یکی از منابع مهم مطالب آموزشی علم رباطیک در اکثر دانشگاه‌های دنیا تدریس می‌شود.

در ترجمه این کتاب، سعی بر آن بوده است تا کلمات تخصصی لاتین با بهترین و مصطلح‌ترین کلمات فارسی جایگزین شوند. همچنین، جهت اطلاع خوانندگان تمامی کلمات کلیدی لاتین به صورت پاورقی در ذیل صفحات ذکر شده است. لازم به ذکر است که کتاب اصلی به زبان لاتین، حاوی برخی اشتباهات تایپی در فرمول‌ها و متن بوده است. اینجانب با توجه به تجربه چندساله خود در تدریس این کتاب، تا حد توان این اشتباهات را در متن ترجمه تصحیح کرده‌ام. جهت اطلاع خوانندگان کتاب، لیست کلیه این تغییرات در صفحات پایانی کتاب ارائه می‌شود.

از ویژگی‌های بارز این کتاب ترجمه نسبت به ترجمه‌های دیگر این است که قبل از انتشار توسط سه تن از اساتید برجسته رباطیک در دانشگاه‌های معتبر ایران بازبینی شده و نظرات اصلاحی این عزیزان اعمال شده است.

در پایان بر خود لازم می‌دانم تا از آقایان مهندس محمدرضا نعمت‌اللهی و مهندس محمدباقر دانشمند که در آماده‌سازی برخی از فصل‌های این کتاب همکاری داشته‌اند، کمال تشکر و قدرانی را داشته باشم. همچنین، از دوست و همکار خوبم آقای دکتر مجید پویا جهت ویرایش ادبی کتاب بسیار سپاسگزارم.

امید است که این کتاب ترجمه مورد استقبال اساتید و دانشجویان محترم در کشور عزیزمان واقع شده و همواره با نظرات اصلاحی خود اینجانب را در رفع نواقص یاری رسانند.

سعید ابراهیمی

آبان ۱۳۸۹

پیشگفتار مؤلفین

شاخه علم رباتیک از دهه ۸۰ میلادی که ربات‌ها به عنوان راه حل نهایی در فرآیندهای ساخت خودکار به کار گرفته شدند، تاکنون به طرق مختلف و قابل توجهی تغییر کرده است. در پیش‌بینی‌های اولیه تصور بر آن بود که در فرآیندهای ساخت در کارخانه‌ها در زمان آینده، عملیات انسانی حتی در صورت وجود انگشت‌شمار خواهد بود. برخی افراد بر این باور بودند که حتی نیازی به روشنایی الکتریکی نیز نخواهد بود زیرا که ربات‌ها می‌توانند وظایفشان را بدون هیچ مشکلی در تاریکی مطلق نیز انجام دهند. اگر چه امروزه این تصورات بی اساس به نظر می‌رسند اما به هر حال پی بردن به بعضی از علت‌هایی که باعث شده چنین تصوراتی جامه عمل به خود نپوشانند، جالب می‌باشد. اولین علت را می‌توان به سادگی چنین بیان کرد: رباتیک علم مشکلی است یا به عبارت دیگر، انسان‌ها در انجام کارهایی که به آنها محول می‌شود بسیار خوب عمل می‌کنند. فرآیندهای ساخت خودکار را نمی‌توان به راحتی با جایگزین کردن یک انسان توسط یک ربات در یک خط تولید دنبال کرد. بلکه بر خلاف این تصور شامل مشکلات عدیده‌ای در استفاده از سیستم‌های پیچیده می‌باشند. در اغلب موارد کل محوطه کاری می‌بایست دوباره طراحی شود. این مورد با شروع آنالیز و تحلیل فرآیند مونتاژ و سپس طراحی مجدد قطعات و مفاصل، طرح‌بندی محوطه کاری، توسعه حس‌گرها، طراحی سیستم کنترل، بررسی صحت نرم‌افزار و دسته‌ای از دیگر مفاهیم مرتبط انجام می‌پذیرد. نتیجه این خواهد بود که هر گونه صرفه‌جویی در هزینه‌های کاری و کارگری در اغلب موارد منجر به کاهش هزینه‌های توسعه و پیشرفت به جز در مورد کارهای نسبتاً سبک و ساده نظیر جوشکاری، نقاشی و حمل قطعات نخواهد شد.

در نتیجه مشکلات ذکر شده، رباتیک جذابیت خود را در اواخر دهه ۸۰ میلادی تا حدی از دست داد. ما در حال حاضر شاهد احیاء مجدد رباتیک، نه تنها در زمینه ساخت، بلکه در سایر زمینه‌ها نظیر کاربردهای پزشکی، عملیات جستجو و نجات، سرگرمی و خدمات می‌باشیم. در سالهای اخیر شاهد به‌کارگیری ربات‌ها در عملیات کاوش سطح سیاره مریخ، یافتن کشتی‌های غرق شده، جستجو در معادن و یافتن قربانیان ساختمان‌های تخریب شده هستیم. امروزه می‌توان رباتیک را به عنوان قسمتی از شاخه مکاترونیک که در حقیقت تلفیق علوم مکانیک، الکترونیک، کنترل و کامپیوتر می‌باشد، دانست. یک ربات یک سیستم مکاترونیکی کامل است. این کتاب ویرایش دوم کتاب *دینامیک و کنترل ربات* که M.W. Spong و M. Vidyasagar در سال ۱۹۸۹ توسط انتشارات John Wiley & Sons به چاپ رسانده‌اند می‌باشد. از ابتدای متن مشخص می‌شود که به دلیل فاصله زمانی طولانی بین ویرایش اول و این ویرایش و همچنین تحولات عظیمی که در طی سالهای اخیر در زمینه رباتیک رخ داده است، این

ویرایش به عنوان یک کتاب کاملاً

مصنوعی، روش الگوریتم‌های تصادفی و روش نقشه مسیر احتمالی توضیح داده می‌شود. مسأله تولید مسیر به عنوان یک مسأله درون‌یابی با توابع اسپلاین چندجمله‌ای بررسی می‌شود. برای این منظور، روند تولید مسیر بر پایه چندجمله‌ای درجه سه و چهار و همچنین مدل سرعت دوزنقه‌ای شکل به منظور درون‌یابی در فضای مفصلی توصیف می‌گردد.

فصل ۶ به روش کنترل مفصل مستقل می‌پردازد. کنترل خطی بر پایه روش‌های PD و PID و فضای حالت جهت ردیابی و حذف اغتشاش در دینامیک عملگر خطی و سیستم انتقال قدرت ارائه می‌گردد. مفهوم کنترل پیش‌خورده برای ردیابی مسیرهای مرجع متغیر با زمان آورده می‌شود.

فصل ۷ به جزئیات دینامیک ربات می‌پردازد. معادلات اوایلر-لاگرانژ از قوانین اولیه دینامیک استخراج شده و به تفصیل خواص ساختاری این دسته از معادلات ذکر می‌گردد. در ادامه روش معادلات بازگشتی نیوتن-اوایلر بیان می‌شود.

فصل ۸ درباره کنترل چند متغیره بحث می‌کند. این فصل دربرگیرنده نتایج تحقیقات زیادی که در اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ میلادی در زمینه کنترل ربات بدست آمده است می‌باشد. روش‌های ساده استخراج اکثر الگوریتم‌های کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی جهت فراهم کردن زمینه آشنایی بیشتر خواننده با کنترل ربات ارائه می‌گردد.

فصل ۹ در رابطه با روش کنترل نیرو می‌باشد. هر دو روش کنترل امپدانس و کنترل ترکیبی مورد بحث قرار می‌گیرد. ما همچنین روش کمتر شناخته شده کنترل امپدانس ترکیبی را بیان می‌کنیم. این روش، امکان کنترل امپدانس و تنظیم حرکت و نیرو را در یک زمان فراهم می‌کند.

فصل ۱۰ مقدمه‌ای به کنترل غیر خطی هندسی می‌باشد. مطالب این فصل به طور قابل توجهی به مراتب از مطالب دیگر فصل‌ها پیشرفته‌تر بوده و می‌توان آن را برای تدریس دروس مقاطع تحصیلی بالا در زمینه کنترل غیرخطی و رباتیک در نظر گرفت. اما با این وجود، مطالب این فصل به گونه‌ای شیوا بیان گردیده تا قابل درک برای مقطع تحصیلی دوره کارشناسی نیز باشد. شرایط لازم و کافی برای خطی سازی پس‌خورده موضعی در سیستم کنترلی تک-ورودی/تک-خروجی به منظور کاربرد در مسأله کنترل مفصل انعطاف‌پذیر استخراج و ثابت می‌گردد. همچنین تئوری Chow در مسأله کنترل سیستم‌هایی که تحت تاثیر قیدهای غیر هولونومیک هستند، به طور مختصر بیان می‌گردد.

فصل ۱۱ به مسأله بینایی کامپیوتری می‌پردازد. بدین منظور، بیشتر به وجوهی از این مسأله پرداخته می‌شود که نظیر حد آستانه‌ای، قطعه‌بندی عکس و درجه‌بندی دوربین در کاربردهای رباتیک مفید واقع می‌شوند.

فصل ۱۲ مسأله کنترل خودفرمان از طریق حس‌گرهای بینایی را مطرح می‌کند. این موضوع در رابطه با کنترل ربات از طریق سیگنال‌های بازگشتی از دوربین‌های سوار شده بر روی ربات و یا دوربین‌های موجود در فضای کاری ربات می‌باشد.

کتاب حاضر هم به عنوان یک متن مکمل و هم کتاب جداگانه جهت تدریس مناسب می‌باشد. شش فصل اول را می‌توان به عنوان مقدمه‌ای به رباتیک برای دانشجویان سطح مقدماتی با اطلاعات حداقل در زمینه سیستم‌های کنترل خطی در نظر گرفت. یکی از کلیدی‌ترین تغییراتی که در این متن در مقایسه با ویرایش قدیم این کتاب انجام داده شده است، قرار دادن فصل مربوط به کنترل مفصل مستقل قبل از فصل دینامیک می‌باشد. مسأله کنترل مفصل مستقل به طور قابل توجهی کنترل عملگر و دینامیک سیستم انتقال قدرت را نیز در بر می‌گیرد. از اینرو اکثر مطالب را می‌توان بدون اطلاعات قبلی از دینامیک اوپلر-لاگرانژ تدریس کرد. در ادامه شرح دو روش تدریس ممکن بر پایه این کتاب آورده می‌شود:

دوره ۱: مقدمه‌ای به رباتیک

سطح: دانشجویان سال سوم/سال آخر دوره کارشناسی

مدت: نیم ترم (یک دوره ده هفته‌ای)

فصل ۱: مقدمه

فصل ۲: حرکت‌های صلب و تبدیل همگن

فصل ۳: سینماتیک مستقیم و معکوس

فصل ۴: ژاکوبین

مدت: یک ترم (یک دوره ۱۶ هفته‌ای)

فصل ۵: طرح‌ریزی و تولید مسیر

فصل ۶: کنترل مفصل مستقل

فصل ۱۱: بینایی کامپیوتری

دوره ۲: مقدمه‌ای به رباتیک

سطح: دانشجویان سال آخر دوره کارشناسی/دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترا

مدت: نیم ترم (یک دوره ده هفته‌ای)
 فصل‌های ۱ تا ۵: مرور سریع بر سینماتیک (مباحث منتخب)
 فصل ۶: کنترل مفصل مستقل
 فصل ۷: دینامیک
 فصل ۸: کنترل چند متغیره
 فصل ۹: کنترل نیرو
 مدت: یک ترم (یک دوره ۱۶ هفته‌ای)
 فصل ۱۰: کنترل غیر خطی هندسی
 فصل ۱۱: بینایی کامپیوتری
 فصل ۱۲: کنترل خودفرمان از طریق حس‌گرهای بینایی

ما هر دو دوره را در طول یک ترم کامل در دانشگاه Illinois تدریس کرده‌ایم. دانشجویانی که اولین دوره را می‌گذرانند عمدتاً از گروه‌های درسی علوم کامپیوتری، مهندسی الکترونیک و کامپیوتر، مهندسی مکانیک و دیگر رشته‌ها می‌آیند. بدین جهت، سعی بر آن بوده است که این فصل‌ها برای تعداد وسیعی از دانشجویان قابل دسترس باشد. دوره دوم عمدتاً توسط دانشجویان دوره تحصیلات تکمیلی فعال در زمینه رباتیک و کنترل اخذ می‌گردد و بنابراین مطالب این فصل‌ها در سطح پیشرفته‌تری ارائه شده‌اند.

تشکر و قدردانی

از زحمات Peter Hokayem و Daniel Herring به خاطر کار برجسته‌شان در آماده‌سازی اکثر شکل‌های کتاب صمیمانه قدردانی می‌کنیم. علاوه بر آن Benjamin Sapp و Nick Gans به ترتیب اکثر شکل‌های فصل‌های ۱۱ و ۱۲ را تهیه کرده‌اند. همچنین از Francois Chaumette به خاطر بحث در رابطه با روابط ماتریس متقابل در فصل ۱۲ و از Martin Corless برای بحث در باره مسأله کنترل مقاوم در فصل ۸ تشکر می‌شود. ما مدیون چندین تن از کسانی که با دقت و حوصله کار بازبینی و تصحیح این کتاب را به عهده داشته‌اند هستیم؛ به خصوص Brad Bishop, Kevin Lynch, Matt Mason, Ning Xi و Eric Westervelt. از دانشجویانمان Nikhil Chopra, Chris Graesser, James Davidson, Erick Gans, Jon Holm, Silvis Mastellone, Adrian Lee, Oscar Martinez.

Rodriguez، و Kunal Srivastava که متحمل زحمات زیادی در آماده‌سازی نسخه اولیه شدند و جهت بهبود کتاب همواره با نظرات و پیشنهادات سازنده خود ما را یاری کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

Mark W. Spong
Seth Hutchinson
M. Vidyasagar

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه.....
۴	۱-۱ مدل سازی ریاضی ربات‌ها.....
۵	۱-۱-۱ بیان نمادین ربات‌ها.....
۶	۲-۱-۱ فضای وضعیت.....
۷	۳-۱-۱ فضای حالت.....
۷	۴-۱-۱ فضای کاری.....
۸	۲-۱ ربات‌ها به عنوان وسایل مکانیکی.....
۸	۱-۲-۱ طبقه‌بندی ربات‌ها.....
۱۱	۲-۲-۱ سیستم‌های رباتیک.....
۱۲	۳-۲-۱ دقت و تکرارپذیری.....
۱۳	۴-۲-۱ مچ‌ها و مجری نهایی.....
۱۵	۳-۱ ترتیبات سینماتیکی متداول.....
۱۶	۱-۳-۱ ربات مفصلی (RRR).....
۱۷	۲-۳-۱ ربات کروی (RRP).....
۱۸	۳-۳-۱ ربات اسکارا (RRP).....
۱۹	۴-۳-۱ ربات استوانه‌ای (سیلندری RPP).....
۲۰	۵-۳-۱ ربات کارت‌تیزین (PPP).....
۲۰	۶-۳-۱ ربات موازی.....
۲۲	۴-۱ رئوس مطالب کتاب.....
۳۱	مسائل.....
۳۴	ملاحظات و مراجع.....
۳۹	فصل ۲: حرکت‌های صلب و تبدیل‌های همگن.....
۴۰	۱-۲ بیان موقعیت‌ها.....

۴۲	۲-۲ بیان دوران‌ها
۴۳	۱-۲-۲ دوران در صفحه
۴۶	۲-۲-۲ دوران‌های سه بعدی
۴۹	۳-۲ تبدیل‌های دورانی
	..... ۱-۳-۲ تبدیل‌های تشابهی
	..... ۴-۲ ترکیب دوران‌ها
	..... ۱-۴-۲ دوران نسبت به دستگاه مختصات جاری
	..... ۲-۴-۲ دوران نسبت به دستگاه مختصات ثابت
	..... ۳-۴-۲ قواعدی برای ترکیب تبدیل‌های دورانی
	..... ۵-۲ پارامتری کردن دوران‌ها
	..... ۱-۵-۲ زوایای اوپلر
	..... ۲-۵-۲ زوایای رول، پیچ و یاو
	..... ۳-۵-۲ بیان محور/ زاویه
	..... ۶-۲ حرکت‌های صلب
	..... ۷-۲ تبدیل‌های همگن
	..... ۸-۲ خلاصه مطالب
۷۳	مسائل
۸۰	ملاحظات و مراجع

فصل ۳: سینماتیک مستقیم و معکوس

	..... ۱-۳ زنجیره‌های سینماتیکی
	..... ۲-۳ قرارداد دیناویت-هارتنببرگ
	..... ۱-۲-۳ قضایای وجود و یکتایی
	..... ۲-۲-۳ تعیین دستگاه‌های مختصات
	..... ۳-۲-۳ مثالها
	..... ۳-۳ سینماتیک معکوس
	..... ۱-۳-۳ مسأله سینماتیک معکوس کلی
	..... ۲-۳-۳ تجزیه سینماتیکی

.....	۳-۳-۳ موقعیت معکوس: یک روش هندسی
.....	۴-۳-۳ وضعیت مفصلی
.....	۵-۵-۳ وضعیت کروی
.....	۶-۳-۳ وضعیت دورانی معکوس
.....	خلاصه مطالب
۱۲۰.....	مسائل
۱۲۵.....	ملاحظات و مراجع

فصل ۴: سینماتیک سرعت ژاکوبین

.....	۱-۴ سرعت زاویه‌ای: حالت محور ثابت
.....	۲-۴ ماتریس‌های پادمتقارن
.....	۱-۲-۴ خواص ماتریس‌های پادمتقارن
.....	۲-۲-۴ مشتق یک ماتریس دوران
.....	۳-۴ سرعت زاویه‌ای: حالت کلی
.....	۴-۴ جمع سرعت‌های زاویه‌ای
.....	۵-۴ سرعت خطی یک نقطه متصل به یک دستگاه مختصات متحرک
.....	۶-۴ مشتق ژاکوبین
.....	۱-۶-۴ سرعت زاویه‌ای
.....	۲-۶-۴ سرعت خطی
.....	۳-۶-۴ ترکیب ژاکوبین‌های سرعت خطی و زاویه‌ای
.....	۷-۴ سرعت ابزار
.....	۸-۴ ژاکوبین تحلیلی
.....	۹-۴ تکین‌ها
.....	۱-۹-۴ تجزیه تکین‌ها
.....	۲-۹-۴ وضعیت‌های تکین میچ
.....	۳-۹-۴ تکین‌های بازو
.....	۱۰-۴ روابط نیرو/گشتاور استاتیکی

.....	۱۱-۴ سرعت و شتاب معکوس
.....	۱۲-۴ حرکت پذیری
.....	۱۳-۴ خلاصه مطالب
۱۶۹.....	مسائل
۱۷۱.....	ملاحظات و مراجع

فصل ۵: طرح ریزی مسیر حرکت Error! Bookmark not defined.

.....	۱-۵ فضای وضعیت
.....	۲-۵ طرح ریزی مسیر با استفاده از میدان های پتانسیل
.....	۱-۲-۵ میدان جاذبه ای
.....	۲-۲-۵ میدان دافعه ای
.....	۳-۲-۵ تصویر کردن نیروهای فضای کاری به گشتاورهای مفاصل
.....	۴-۲-۵ طرح ریزی با استفاده از روش گرادیان نزولی
.....	۳-۵ فرار از مینیمم موضعی
.....	۴-۵ روش های نقشه مسیر احتمالی
.....	۱-۴-۵ نمونه برداری از فضای وضعیت
.....	۲-۴-۵ اتصال جفت های وضعیت ها
.....	۳-۴-۵ فاز تقویت
.....	۴-۴-۵ هموارسازی مسیر
۲۰۰.....	۵-۵ طرح ریزی خط سیر حرکت
۲۰۲.....	۱-۵-۵ خطوط سیر برای حرکت نقطه به نقطه
۲۱۱.....	۲-۵-۵ خطوط سیر برای مسیرهای تعیین شده توسط نقاط بینابینی
۲۱۴.....	۶-۵ خلاصه مطالب
۲۱۵.....	مسائل
۲۱۷.....	ملاحظات و مراجع

فصل ۶: کنترل مفصل مستقل	۲۵۶
..... ۱-۶ دینامیک قسمت محرک	
..... ۲-۶ مدل مفصل مستقل	
..... ۳-۶ ردیابی نقطه تنظیم	
..... ۱-۳-۶ جبران کننده PD	
..... ۲-۳-۶ جبران کننده	
..... ۳-۳-۶ اثر اشباع و انعطاف پذیری	
..... ۴-۶ کنترل پیشخورد	
..... ۵-۶ دینامیک سیستم انتقال قدرت	
..... ۶-۶ طراحی فضای حالت	
..... ۱-۶-۶ کنترل پسخورد حالت	
..... ۲-۶-۶ مشاهده گرها	
..... ۷-۶ خلاصه مطالب	
..... مسائل	۲۵۶
..... ملاحظات و مراجع	۲۵۹

فصل ۷: دینامیک	۲۷۷
..... ۱-۷ معادله‌های اوپلر-لاگرانژ	
..... ۱-۱-۷ تبیین روش	
..... ۲-۱-۷ قیود هولونومیک و کار مجازی	
..... ۳-۱-۷ اصل دالامبر	
..... ۲-۷ انرژی جنبشی و پتانسیل	
..... ۱-۲-۷ تانسور اینرسی	
..... ۲-۲-۷ انرژی جنبشی برای یک ربات عضوی	۲۷۷
..... ۳-۲-۷ انرژی پتانسیل برای یک ربات عضوی	۲۷۸
..... ۳-۷ معادله‌های حرکت	
..... ۴-۷ برخی وضعیت‌های متداول	۲۸۱

۲۹۱	۵-۷ خصوصیات معادله‌های دینامیک ربات
۲۹۲	۱-۵-۷ پادتقارنی و غیرفعال بودن
۲۹۴	۲-۵-۷ کران‌های ماتریس اینرسی
	۳-۵-۷ خطی بودن بر حسب پارامترها
	۶-۷ روش نیوتن-اوایلر
۳۰۵	۱-۶-۷ بررسی مجدد ربات آرنجی صفحه‌ای
۳۰۸	۷-۷ خلاصه مطالب
۳۱۱	مسائل
	ملاحظات و مراجع

فصل ۸: کنترل چندمتغیره Error! Bookmark not defined.

	۱-۸ بررسی مجدد کنترل PD
	۱-۱-۸ اثر انعطاف‌پذیری مفصل
	۲-۸ دینامیک معکوس
	۱-۲-۸ دینامیک معکوس فضای مفصل
	۲-۲-۸ دینامیک معکوس فضای کاری
	۳-۸ کنترل مقاوم و تطبیقی حرکت
	۱-۳-۸ دینامیک معکوس مقاوم
	۲-۳-۸ دینامیک معکوس تطبیقی
	۴-۸ کنترل غیرفعال حرکت
	۱-۴-۸ کنترل مقاوم غیرفعال
	۲-۴-۸ کنترل تطبیقی غیرفعال
	۵-۸ خلاصه مطالب
	مسائل
۳۴۶	ملاحظات و مراجع

فصل ۹: کنترل نیرو Error! Bookmark not defined.

	۱-۹ دستگاه‌های مختصاتی و قیود
--	-------------------------------

.....	۱-۱-۹ پایه‌های متقابل
.....	۲-۱-۹ قیود طبیعی و مصنوعی
.....	۲-۹ مدل‌های شبکه‌ای و امیدانس
.....	۱-۲-۹ عملگرهای امیدانس
.....	۲-۲-۹ طبقه‌بندی عملگرهای امیدانس
.....	۳-۲-۹ معادل‌های توینین و نورتن
.....	۳-۹ دینامیک و کنترل فضای هدف
.....	۱-۳-۹ دینامیک فضای هدف
.....	۲-۳-۹ کنترل امیدانس
.....	۳-۳-۹ کنترل ترکیبی امیدانس
۳۶۶	۴-۹ خلاصه مطالب
۳۶۸	مسائل
۳۶۹	ملاحظات و مراجع

فصل ۱۰: کنترل غیرخطی هندسی Error! Bookmark not defined.

.....	۱-۱۰ پیش‌زمینه
.....	۱-۱-۱۰ مانیفولدها، میدان‌های برداری، و توزیع‌ها
.....	۱-۲-۱۰ قضیه فروبنیوس
.....	۲-۱۰ خطی‌سازی پس‌خورد
.....	۳-۱۰ سیستم‌های تک ورودی
.....	۴-۱۰ خطی‌سازی پس‌خورد برای ربات‌های عضو
.....	۵-۱۰ سیستم‌های غیرهولونومیک
.....	۱-۵-۱۰ اینولوتی و هولونومی
.....	۲-۵-۱۰ سیستم‌های کنترلی بدون دریافت
.....	۳-۵-۱۰ مثالهایی از سیستم‌های غیرهولونوم
.....	۶-۱۰ تئوری Chow
.....	۷-۱۰ کنترل سیستم‌های بدون دریافت

.....	۸-۱۰ خلاصه مطالب
..... ۴۱۱	مسائل
..... ۴۱۳	ملاحظات و مراجع

فصل ۱۱: بینایی کامپیوتری Error! Bookmark not defined.

.....	۱-۱۱ هندسه تصویرسازی
.....	۱-۱-۱۱ دستگاه مختصات دوربین
.....	۲-۱-۱۱ تصویر کردن پرسپکتیو
.....	۳-۱-۱۱ صفحه تصویر و آرایه حسگر
.....	۲-۱۱ درجه بندی دوربین
.....	۱-۲-۱۱ پارامترهای فرعی دوربین
.....	۲-۲-۱۱ پارامترهای اصلی دوربین
.....	۳-۲-۱۱ محاسبه پارامترهای دوربین
.....	۳-۱۱ قطعه قطعه سازی تصویر با در نظر گرفتن یک حد آستانه
.....	۱-۳-۱۱ مروری کوتاه بر آمار
.....	۲-۳-۱۱ انتخاب خودکار حد آستانه
.....	۴-۱۱ اجزاء متصل
.....	۵-۱۱ موقعیت و وضعیت دورانی
.....	۱-۵-۱۱ ممان ها
.....	۲-۵-۱۱ مرکز ثقل یک شیء و ممان های مرکزی
.....	۳-۵-۱۱ وضعیت دورانی یک جسم
.....	۶-۱۱ خلاصه مطالب
..... ۴۴۴	مسائل
..... ۴۴۸	ملاحظات و مراجع

فصل ۱۲: کنترل بر پایه بینایی کامپیوتری Error! Bookmark not defined.

.....	۱-۱۲ ملاحظات طراحی
-------	--------------------

.....	۱-۱-۱۲ وضعیت دوربین
.....	۲-۱-۱۲ روش‌های بر پایه تصویر در مقابل روش‌های بر پایه موقعیت
.....	۲-۱۲ حرکت دوربین و ماتریس تقابل
.....	۳-۱۲ ماتریس تقابل برای نقاط نما
.....	۱-۳-۱۲ سرعت یک نقطه ثابت نسبت به یک دوربین متحرک
.....	۲-۳-۱۲ ساختن ماتریس تقابل
.....	۳-۳-۱۲ خصوصیات ماتریس تقابل
.....	۴-۳-۱۲ ماتریس تقابل برای نقاط چندگانه
.....	۴-۱۲ قوانین کنترل بر پایه تصویر
.....	۱-۴-۱۲ محاسبه حرکت دوربین
.....	۲-۴-۱۲ روش‌های تناسبی کنترل
.....	۳-۴-۱۲ کارآیی سیستم‌های IBVS
.....	۵-۱۲ حرکت‌های مجری نهایی و دوربین
.....	۶-۱۲ روش‌های تفکیک شده
.....	۷-۱۲ مشاهده‌پذیری حرکت
.....	۸-۱۲ خلاصه مطالب
.....	۴۷۷
.....	۴۷۹ مسائل
.....	۴۸۱ ملاحظات و مراجع

Error! Bookmark not defined. پیوست الف: مثلثات

..... الف-۱ تابع دو آرگومان آرکتانژانت

..... الف-۲ روابط مثلثاتی مفید

Error! Bookmark not defined. پیوست ب: جبر خطی

..... ب-۱ بردارها

..... ب-۲ مشتق‌گیری از بردارها

..... ب-۳ مستقل خطی

..... ب-۴ ماتریس‌ها

.....	ب-۵ تغییر مختصه‌ها
.....	ب-۶ مقادیر ویژه و بردارهای ویژه
.....	ب-۷ تجزیه مقدار منفرد
Error! Bookmark not defined.	پیوست ج: سیستم‌های دینامیکی
Error! Bookmark not defined.	پیوست د: پایداری لیاپانوف
.....	د-۱ فرم‌های درجه دوم و توابع لیاپانوف
.....	د-۲ پایداری لیاپانوف
.....	د-۳ پایداری سراسری و نمایی
.....	د-۴ پایداری لیاپانوف برای سیستم‌های خطی
.....	د-۵ قضیه لاسال
.....	مراجع
.....	تصحیحات

۵۱۰

۵۱۳

۵۲۵