

کنترل غیر خطی کاربرد

ژان - ژاک اسلوتین

ویپینگ لی

دکتر عبدالله شمیسا

مهندس زهرا کیانی

نیاز دانش

E Slotine, Jean Jacques

سرشناسه	: اسلوتین، ژان ژاک ای.
عنوان و نام پدیدآور	: کنترل غیر خطی کاربردی
مشخصات نشر	: تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۴
مشخصات ظاهری	: ۴۲۲ص: تصویر، جدول؛ وزیری
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۱۸-۷
وضعیت فهرست نویسی	: فیپای مختصر
یادداشت	: فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است
یادداشت	: عنوان اصلی: applied nonlinear control
شناسه افزوده	: لی، ویپینگ، ۱۹۶۵.
شناسه افزوده	: شمیسا، عبدالله، ۱۳۵۶، مترجم.
شناسه افزوده	: کیانی، زهرا، ۱۳۵۶، مترجم.
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۸۶۶۸۳۵



نیاز دانش

نام کتاب	: کنترل غیر خطی کاربردی
مؤلفان	: ژان - ژاک اسلوتین / ویپینگ لی
مترجمان	: دکتر عبدالله شمیسا / مهندس زهرا کیانی
مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ	: حمیدرضا / محمد شیرازی - محمد شمس
ناشر	: نیاز دانش
صفحه آرا	: واحد تولید انتشارات نیاز دانش
نوبت چاپ	: اول - ۱۳۹۴
شمارگان	: ۵۰۰ نسخه
قیمت	: ۲۲۵۰۰۰ ریال

ISBN:978-600-7724-18-7

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۲۴-۱۸-۷

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیهی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است. متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵-۰۶۶۴۷۸۱۰۸-۰۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۲۱

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲-۳۱۰۶۷۰۹

پیشگفتار نویسنده

در سال‌های اخیر، دسترسی کم هزینه به پردازشگرهای قدرتمند، موجب پیشرفت‌های بزرگی در تئوری‌ها و کاربردهای کنترل غیرخطی شده است. در زمینه تئوری، عمده مطالعات در حوزه‌های خطی‌سازی با فیدبک، کنترل لغزشی و تکنیک‌های غیرخطی تطبیقی انجام شده است. در زمینه کاربردی، سیستم‌های کنترل غیرخطی زیادی اعم از سیستم‌های کنترل پرواز دیجیتال "پرواز با سیم" برای هواپیماها، تا خودروهای "رانندگی با سیم"، تا سیستم‌های پیشرفته روباتیک و فضایی ایجاد شده‌اند. در نتیجه، موضوع کنترل غیرخطی به یک جایگاه در حال رشد در مهندسی کنترل خودکار دست یافته و به عنوان یک بخش ضروری از پیش‌زمینه‌ها و سوابق اصلی مهندسين کنترل در آمده است.

این کتاب بر مبنای یک درس ارائه شده در دانشگاه MIT، به عنوان کتاب درسی دانشجویان کارشناسی ارشد و تحصیلات تکمیلی و نیز کتابی خودخوان برای مهندسين عملی در نظر گرفته شده است. هدف آن ارائه نتایج اصلی کنترل غیرخطی پیشرفته با حداقل پیچیدگی ریاضی و نمایش استفاده و نتایج آن‌ها در طراحی سیستم‌های کنترل غیرخطی عملی است. هر چند یک انگیزه اصلی این کتاب پرداختن به جزئیات بسیاری از تحولات اخیر در کنترل غیرخطی است، ولی تکنیک‌های کلاسیک مانند تحلیل صفحه فاز و روش تابع توصیفی نیز بدلیل تداوم اهمیت عملی آن‌ها مورد بحث قرار گرفته‌اند. به منظور دستیابی به هدف اساسی خود، تلاش کرده‌ایم تا کتاب ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- **خوانایی:** توجه ویژه‌ای به خوانایی کتاب با سازماندهی دقیق مفاهیم، تفسیر واضح نتایج اصلی و استفاده گزینشی از ابزارهای ریاضی شده است. فرض شده که خواننده فقط یک دوره مقدماتی کنترل را گذرانده است. هیچ پیش‌زمینه‌ی ریاضی در مورد معادلات دیفرانسیل معمولی و جبر مقدماتی ماتریس‌ها مورد نیاز نیست. برای هر نتیجه جدید، علاوه بر ریاضیات، به تفسیر آن نیز اهمیت داده شده است. برای هر نتیجه اصلی، سعی می‌کنیم سوالات زیر را پرسیده و سپس پاسخ دهیم: مفهوم فیزیکی و درک حسی این نتیجه چیست؟ چگونه می‌توان آن را روی مسائل عملی اعمال کرد؟ رابطه آن با دیگر قضایا چیست؟ تمام مفاهیم و نتایج اصلی با مثال نشان داده خواهند شد. باور داریم که یادگیری و تعمیم مسائل با مثال‌ها، برای مهارت در استفاده از هر نتیجه تئوری‌ای بسیار مهم است.

¹ Fly-by-wire

² Drive-by-wire

- **عملی بودن:** انتخاب و تاکید روی مطالب بر اساس این هدف اصلی است که یک مهندس یا دانشجو قادر به انجام مسائل عملی کنترل در صنعت باشد. برخی از نتایجی که غالباً از نظر تئوری جالب هستند، در این کتاب مطرح نشده‌اند. مطالب انتخاب شده به روش‌های مختلف سعی دارند که خواننده بیش از لازم جهت حل مسائل واقعی را بدست آورد.
- **جامعیت:** کتاب هم شامل مطالب کلاسیک مانند تحلیل لیاپانف و تکنیک‌های تابع توصیفی و هم شامل موضوعات پیشرفته‌تر مانند خطی‌سازی با فیدبک، کنترل تطبیقی و کنترل لغزشی است. برای سادگی در فهم مطالب، بخش‌هایی را که بدلیل پیچیدگی آن‌ها، در اولین بار مطالعه می‌توان از آن‌ها گذشت، با علامت ستاره "*" مشخص کرده‌ایم.
- **جدید بودن:** در چند سال اخیر، نتایج مهمی در کنترل غیرخطی مخصوصاً در طراحی سیستم‌های کنترل غیرخطی و در رویاتیک بدست آمده است. یکی از اهداف این کتاب ارائه این تحولات و توسعه‌هایی جدید و مهم و کاربردها و نتایج آن‌ها به روشی شفاف و قابل فهم است. این کتاب می‌تواند به عنوان یک مرجع و راهنما برای متون فعال در این حوزه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

این کتاب به دو بخش اصلی تقسیم شده است. فصل‌های ۲ تا ۵ ابزارهای تحلیلی مهم مورد استفاده برای مطالعه سیستم غیرخطی را ارائه می‌کنند، در صورتی که فصل‌های ۶ تا ۹ تکنیک‌های اصلی طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی را مطرح می‌کنند. هر فصل به تمرین‌هایی مجهز شده است تا به خواننده اجازه بررسی جنبه‌های خاص و بیشتری از مطالب مطرح شده را بدهد. یک راهنمای موضوعی و کتاب‌شناسی (مراجع) مفصل در انتهای کتاب آورده شده است.

مطالب کتاب بیشتر از آن هستند که بتوان در یک ترم درس داده یا در یک دوره کوتاه به طور خودخوان یاد گرفت. این کتاب را می‌توان به روش‌های مختلفی بر اساس علاقه و نظر خاص خواننده یا مدرس مطالعه کرد. پیشنهاد می‌کنیم که اولین مطالعه شامل یک مطالعه کامل فصل ۳ (تئوری لیاپانف)، بخش‌های ۴-۵ تا ۴-۷ (لم باربالات و ابزارهای انفعال)، بخش ۶-۱ و قسمت‌هایی از بخش‌های ۶-۲ تا ۶-۴ (خطی‌سازی با فیدبک)، فصل ۷ (کنترل لغزشی)، بخش‌های ۸-۱ تا ۸-۳ و ۸-۵ (کنترل تطبیقی سیستم‌های خطی و غیرخطی) و فصل ۹ (کنترل سیستم‌های فیزیکی چند-ورودی) باشد. بخش‌هایی که با علامت "*" مشخص شده‌اند را می‌توان در اولین مطالعه نادیده گرفت.

ژان-ژاک اسلوتین

وینینگ لی

پیشگفتار مترجم

گسترش روز افزون علم و فناوری و به دنبال آن درخواست‌های رو به رشد برای کسب آموزش‌های تحصیلات تکمیلی در کشورمان، نیاز به تولید محتوای علمی درخور و مناسب این شرایط را ایجاد کرده است. بخش بزرگی از منابع علمی مورد استفاده محققین، مهندسين و دانشجویان در دانشگاه‌های بزرگ دنیا به زبانی غیر از زبان شیرین پارسی تدوین می‌گردد. هر چند آشنایی این عزیزان با زبان‌های معتبر علمی دنیا ضرورتی اجتناب ناپذیر است، ولی برای افزایش غنای زبان رسمی و مادری و ارتقای منابع پارسی، احساس کردیم که شاید ترجمه کتاب حاضر بتواند بخشی از نیاز جامعه علمی کشور عزیزمان را برآورده سازد.

بر کسی پوشیده نیست که کنترل غیرخطی یکی از حوزه‌های جذاب و کاربردی رشته‌های مختلف دانشگاهی از جمله مهندسی برق، مهندسی مکانیک، مهندسی هوافضا، مهندسی شیمی، مهندسی پزشکی، ریاضیات کاربردی و برخی رشته‌های دیگر است. در حال حاضر توسعه روز افزون سیستم‌های پردازش کامپیوتری ما را قادر به تحلیل، طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های دینامیکی پیچیده‌ای می‌کند که در سالیان نه چندان دور از مسائل حل نشده (یا به دشواری حل شده) کاربردی به شمار می‌رفتند. کتاب کنترل غیرخطی کاربردی یکی از منابع ارزشمند کنترل غیرخطی بوده که به زبانی ساده و کاربردی سعی کرده است مطالب لازم جهت آشنایی با سیستم‌های دینامیکی غیرخطی و درک مفاهیم تحلیل، طراحی و پیاده‌سازی آنها برای استفاده در صنعت را به خواننده آموزش دهد. وجه تمایز این کتاب با بسیاری از دیگر منابع موجود در این است که از پیچیدگی‌های ریاضی خاص سیستم‌های غیرخطی دوری کرده است و قضایا و مثال‌ها را با زبانی که به راحتی قابل فهم است و نیاز به پیش زمینه‌های زیادی ندارد، ارائه کرده است.

بر حسب علاقه‌ای که در طول سالیان گذشته چه در دوران تحصیل و چه دوران تدریس به کنترل غیرخطی پیدا کردیم، بر آن شدیم تا کتاب حاضر را برای استفاده عزیزان علاقمند به این حوزه علمی به نثری روان در آوریم. آن چه برای ما خیلی مهم بود، یکدستی و روانی متن و نیز کمترین دخل و تصرف در جملات کتاب اصلی است، تا ضمن حفظ امانت نویسنده صاحب اثر، بتوانیم کتابی به زبان پارسی برای علاقمندان ارائه کنیم. هر چند خیلی تلاش شده تا کمترین نقصی در ترجمه و تدوین کتاب نباشد، ولی خطای انسانی جزء جدا نشدنی هر ساخته بشر است. امیدوارم که شما سرور گرامی با نظرات و پیشنهادات خود در مورد متن کتاب، ما را برای انجام کارهای مشابه دلگرم نمایید.

دکتر عبدالله شمیسا

مهندس زهرا کیانی

پست الکترونیکی: shamisa@aut.ac.ir

پست الکترونیکی: zkiani@outlook.com

فهرست مطالب

پیشگفتار نویسنده	۳
پیشگفتار مترجم	۵

فصل ۱	مقدمه	۱۳
۱-۱	چرا کنترل غیر خطی؟	۱۳
۲-۱	رفتار سیستم غیر خطی	۱۵
۳-۱	مروری بر این کتاب	۲۴
۴-۱	ملاحظات و مراجع	۲۵

بخش I

تحلیل سیستم‌های غیر خطی	۲۷
-------------------------	----

فصل ۲	تحلیل صفحه فاز	۳۱
۱-۲	مفاهیم تحلیل صفحه فاز	۳۱
۱-۱-۲	تصاویر فاز	۳۱
۲-۱-۲	نقاط تکین	۳۳
۳-۱-۲	تقارن در تصاویر صفحه فاز	۳۵
۲-۲	ساختن تصاویر فاز	۳۶
۳-۲	تعیین زمان از روی تصاویر فاز	۴۱
۴-۲	تحلیل صفحه فاز سیستم‌های خطی	۴۲
۵-۲	تحلیل فاز سیستم‌های غیر خطی	۴۵
۶-۲	وجود چرخه‌های حدی	۴۸
۷-۲	خلاصه	۴۹

۵۰	۸-۲	ملاحظات و مراجع
۵۰	۹-۲	تمرین‌ها

فصل ۳ اصول تنوری لیاپانف

۵۲	۱-۳	سیستم‌های غیرخطی و نقاط تعادل
۵۸	۲-۳	مفاهیم پایداری
۶۳	۳-۳	خطی‌سازی و پایداری محلی
۶۷	۴-۳	روش مستقیم لیاپانف
۶۸	۱-۴-۳	توابع مثبت معین و توابع لیاپانف
۷۱	۲-۴-۳	فضای نقطه تعادل
۷۶	۳-۴-۳	فضای مجموعه نامتغیر
۸۴	۵-۳	تحلیل سیستم براساس روش مستقیم لیاپانف
۸۵	۱-۵-۳	تحلیل لیاپانف سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان
۹۱	۲-۵-۳	روش کراسفسکی
۹۳	۳-۵-۳	روش گرادیان متغیر
۹۵	۴-۵-۳	توابع لیاپانف با انگیزش‌های فیزیکی
۹۷	۵-۵-۳	تحلیل عملکرد و کارایی
۱۰۰	۶-۳	طراحی کنترل بر مبنای روش مستقیم لیاپانف
۱۰۱	۷-۳	خلاصه
۱۰۲	۸-۳	ملاحظات و مراجع
۱۰۲	۹-۳	تمرین‌ها

فصل ۴ تنوری پیشرفته پایداری

۱۰۸	۱-۴	مفاهیم پایداری برای سیستم‌های غیرخودگردان
۱۱۲	۲-۴	تحلیل لیاپانف سیستم‌های غیرخودگردان
۱۱۲	۱-۲-۴	روش مستقیم لیاپانف برای سیستم‌های غیرخودگردان
۱۲۰	۲-۲-۴	تحلیل لیاپانف سیستم‌های خطی متغیر با زمان
۱۲۲	۳-۲-۴	روش خطی‌سازی برای سیستم‌های غیرخودگردان*
۱۲۳	۳-۴	فضای ناپایداری*
۱۲۵	۴-۴	وجود توابع لیاپانف*
۱۲۷	۵-۴	تحلیل شبه لیاپانف با استفاده از لم باربالات

۱۲۷	۱-۵-۴ ویژگی‌های مجانبی توابع و مشتقات آنها
۱۲۸	۲-۵-۴ لم باربالات
۱۳۱	۶-۴ سیستم‌های خطی مثبت
۱۳۱	۱-۶-۴ توابع تبدیل PR و SPR
۱۳۴	۲-۶-۴ لم کالمن-یاکوبویچ
۱۳۵	۳-۶-۴ ماتریس‌های تبدیل حقیقی مثبت
۱۳۶	۷-۴ تدوین تئوری انفعال
۱۳۶	۱-۷-۴ ترکیبات بلوکی
۱۴۰	۲-۷-۴ انفعال در سیستم‌های خطی
۱۴۵	۸-۴ پایداری مطلق*
۱۵۰	۹-۴ ساختن کران سیگنال‌ها*
۱۵۴	۱۰-۴ وجود و یکتایی پاسخ‌ها*
۱۵۵	۱۱-۴ خلاصه
۱۵۶	۱۲-۴ ملاحظات و مراجع
۱۵۷	۱۳-۴ تمرین‌ها

فصل ۵ تحلیل تابع توصیفی

۱۵۹	۱-۵ اصول تابع توصیفی
۱۶۰	۱-۱-۵ یک مثال از تحلیل تابع توصیفی
۱۶۳	۲-۱-۵ حوزه کاربردها
۱۶۵	۳-۱-۵ فرضیات پایه‌ای
۱۶۶	۴-۱-۵ تعاریف پایه
۱۶۷	۵-۱-۵ محاسبه توابع توصیفی
۱۶۹	۲-۵ غیرخطی‌گری‌های متداول در سیستم‌های کنترل
۱۷۳	۳-۵ توابع توصیفی غیرخطی‌گری‌های متداول
۱۷۹	۴-۵ تحلیل تابع توصیفی سیستم‌های غیرخطی
۱۷۹	۱-۴-۵ معیار نایکویست و تعمیم آن
۱۸۱	۲-۴-۵ وجود چرخه‌های حدی
۱۸۳	۳-۴-۵ پایداری چرخه‌های حدی
۱۸۴	۴-۴-۵ اعتبار تحلیل تابع توصیفی
۱۸۵	۵-۵ خلاصه
۱۸۶	۶-۵ ملاحظات و مراجع

۱۸۶	۷-۵ تمرین‌ها
-----	--------------

بخش II

۱۸۹	طراحی سیستم‌های کنترل غیرخطی
-----	------------------------------

فصل ۶ خطی‌سازی با فیدبک

۲۰۵	۱-۶ مفاهیم شهودی
۲۰۶	۱-۶-۱ خطی‌سازی با فیدبک و فرم کانونیکال
۲۱۰	۱-۶-۲ خطی‌سازی ورودی-حالت
۲۱۳	۱-۶-۳ خطی‌سازی ورودی-خروجی
۲۲۴	۲-۶ ابزارهای ریاضی
۲۳۱	۳-۶ خطی‌سازی ورودی-حالت سیستم‌های SISO
۲۴۱	۴-۶ خطی‌سازی ورودی-خروجی سیستم‌های SISO
۲۶۰	۵-۶ سیستم‌های چند-ورودی *
۲۶۳	۶-۶ خلاصه
۲۶۴	۷-۶ ملاحظات و مراجع
۲۶۵	۸-۶ تمرین‌ها

فصل ۷ کنترل لغزشی

۲۷۱	۱-۷ سطوح لغزشی
۲۷۲	۱-۷-۱ یک ساده‌سازی نوشتاری
۲۷۳	۱-۷-۲ طرز ساخت فیلپف دینامیک معادل *
۲۷۹	۱-۷-۳ کارایی کامل-به چه قیمتی
۲۸۳	۱-۷-۴ پیاده‌سازی مستقیم قوانین کنترل سوئیچینگ
۲۸۴	۲-۷ تقریب پیوسته قوانین کنترل سوئیچینگ
۲۹۳	۳-۷ موازنه‌های مدل‌سازی / کارایی
۲۹۶	۴-۷ سیستم‌های چند-ورودی *
۲۹۸	۵-۷ خلاصه
۲۹۹	۶-۷ ملاحظات و مراجع
۲۹۹	۷-۷ تمرین‌ها

فصل ۸ کنترل تطبیقی ۳۰۳

- ۱-۸ مفاهیم اصلی کنترل تطبیقی ۳۰۴
- ۱-۱-۸ چرا کنترل تطبیقی؟ ۳۰۴
- ۲-۱-۸ کنترل تطبیقی چیست؟ ۳۰۶
- ۳-۱-۸ کنترل‌کننده‌های تطبیقی را چگونه طراحی کنیم؟ ۳۱۴
- ۲-۸ کنترل تطبیقی سیستم‌های مرتبه اول ۳۱۷
- ۳-۸ کنترل تطبیقی سیستم‌های خطی با فیدبک کامل حالت ۳۲۶
- ۴-۸ کنترل تطبیقی سیستم‌های خطی با فیدبک خروجی ۳۲۸
- ۱-۴-۸ سیستم‌های خطی با درجه نسبی یک ۳۳۰
- ۲-۴-۸ سیستم‌های خطی با درجه نسبی بالاتر ۳۳۴
- ۵-۸ کنترل تطبیقی سیستم‌های غیرخطی ۳۳۹
- ۶-۸ مقاومت سیستم‌های کنترل تطبیقی ۳۴۲
- ۷-۸ تخمین برخط پارامتر* ۳۴۶
- ۱-۷-۸ مدل پارامتری شده خطی ۳۴۷
- ۲-۷-۸ روش‌های تخمین براساس خطای پیش‌بینی ۳۵۲
- ۳-۷-۸ تخمین‌گر گرادیان ۳۵۲
- ۴-۷-۸ تخمین‌گر حداقل مربعات استاندارد ۳۵۷
- ۵-۷-۸ حداقل مربعات با فراموشی نمایی ۳۶۱
- ۶-۷-۸ فراموشی با بهره کران‌دار ۳۶۴
- ۷-۷-۸ ملاحظات نهایی و مسائل پیاده‌سازی ۳۶۸
- ۸-۸ تطبیق ترکیبی ۳۶۹
- ۹-۸ خلاصه ۳۷۴
- ۱۰-۸ ملاحظات و مراجع ۳۷۵
- ۱۱-۸ تمرین‌ها ۳۷۵

فصل ۹ کنترل سیستم‌های فیزیکی چند ورودی ۳۷۹

- ۱-۹ رباتیک به عنوان یک الگوی اولیه ۳۷۹
- ۱-۱-۹ کنترل موقعیت ۳۸۱
- ۲-۱-۹ کنترل مسیر ۳۸۳
- ۲-۹ کنترل تطبیقی مسیر روبات ۳۹۰

۳۹۰	۱-۲-۹ الگوریتم پایه
۳۹۷	۲-۲-۹ کنترل تطبیقی ترکیبی مسیر*
۴۰۲	۳-۹ به کارگیری فیزیک در کنترل
۴۰۲	۱-۳-۹ دینامیک مدل نشده فرکانس بالا
۴۰۳	۲-۳-۹ دینامیک پایستار و اتلافی
۴۰۵	۳-۳-۹ روباتیک به عنوان یک استعاره
۴۰۷	۴-۹ کنترل فضاییما
۴۰۷	۱-۴-۹ مدل فضاییما
۴۱۱	۲-۴-۹ کنترل وضعیت
۴۱۷	۵-۹ خلاصه
۴۱۷	۶-۹ ملاحظات و مراجع
۴۱۸	۷-۹ تمرین‌ها
۴۲۱	مراجع