

# مهندسی کنترل

(ویزایش پنجم)

تالیف:

کاتسوهیکو اوگاتا

ترجمه:

دکتر سید خاکی صدیق

استاد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر پرویز جبه دار مارالانی

استاد دانشگاه تهران



انتشارات گوتنبرگ

شابک : ۹۷۸-۹۶۴-۷۶۱۹-۶۶-۰

شماره کتابشناسی ملی : ۴۴۵۱۳۹۱

عنوان و نام پدیدآور : مهندسی کنترل (ویرایش پنجم) // تالیف کاتسوهیکو اوگاتا؛ ترجمه پرویز جبه دارمارالانی، علی خاکی صدیق.

مشخصات نشر : تهران: انتشارات گوتنبرگ، ۱۳۹۵.

مشخصات ظاهری : ۸۱۰ص.؛ جدول، نمودار.؛ ۲۹×۲۲سم.

یادداشت : عنوان اصلی: Modern control engineering, 5th ed, c ۲۰۱۰

یادداشت : واژهنامه.

یادداشت : نمایه.

عنوان دیگر : کنترل.

موضوع : مهندسی کنترل

موضوع : Automatic control

موضوع : نظریه کنترل

موضوع : Control theory

رده بندی دیویی : ۶۲۹/۸۳

رده بندی کنگره : ۱۳۹۵ ۷۶۱۹الف/تج۲۱۳

سرشناسه : اوگاتا، کاتسوهیکو

Ogata, Katsuhiko

شناسه افزوده : جبه دار مارالانی، پرویز، ۱۳۲۰ - مترجم

شناسه افزوده : خاکی صدیق، علی، ۱۳۴۱ - مترجم

وضعیت فهرست نویسی : فیا



انتشارات گوتنبرگ

مهندسی کنترل (ویرایش پنجم)

تالیف: کاتسوهیکو اوگاتا

ترجمه: دکتر پرویز جبه دار مارالانی، دکتر علی خاکی صدیق

مدیر تولید و ناظر چاپ: بابک کاشی چی

حروفچینی و صفحه آرایی: گروه فنی هیمه

نوبت و تاریخ چاپ: اول ۱۳۹۵

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۷۶۱۹-۶۶-۰

شمارگان: ۱۰۵۰ نسخه

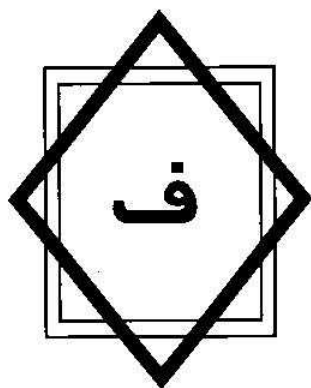
قیمت: ۴۰۰۰۰ تومان

کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است. تکثیر تمام و یا قسمتی از این اثر به هر شکل (چاپ، تهیه فایل الکترونیک و ...) ممنوع بوده و پیگرد قانونی دارد.

مراکز پخش

انتشارات گوتنبرگ: تهران، خیابان انقلاب، مقابل دانشگاه تهران، پلاک ۱۲۱۲ - تلفن: ۰۲۱-۶۶۴۱۳۹۹۸

انتشارات جاودان خرد: مشهد، خیابان احمدآباد، مقابل محتشمی - تلفن: ۰۵۱-۳۸۴۳۴۵۲۷



# فهرست مطالب

د		<b>پیشگفتار</b>
۱		<b>فصل ۱ آشنایی با سیستم‌های کنترل</b>
		۱-۱ مقدمه ۱
		۲-۱ مثال‌هایی از سیستم‌های کنترل ۳
		۳-۱ کنترل حلقه بسته در مقابل کنترل حلقه باز ۶
		۴-۱ طراحی و جبران‌سازی سیستم‌های کنترل ۷
		۵-۱ رنوس مطالب کتاب ۸
۱۱		<b>فصل ۲ مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های کنترل</b>
		۱-۲ مقدمه ۱۱
		۲-۲ تابع تبدیل و تابع پاسخ-ضربه ۱۱
		۳-۲ سیستم‌های کنترل خودکار ۱۴
		۴-۲ مدل‌سازی در فضای-حالت ۲۴
		۵-۲ نمایش فضای-حالت سیستم‌هایی با معادله دیفرانسیل اسکالر ۲۱
		۶-۲ تبدیل مدل‌های ریاضی با MATLAB ۳۴
		۷-۲ خطی‌سازی مدل‌های ریاضی غیرخطی ۳۶
		مسئله‌های نمونه و حل آنها ۳۸
		مسائل ۵۱
۵۵		<b>فصل ۳ مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های مکانیکی و سیستم‌های الکتریکی</b>
		۱-۳ مقدمه ۵۵
		۲-۳ مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های مکانیکی ۵۵
		۳-۳ مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های الکتریکی ۶۳
		مسئله‌های نمونه و حل آنها ۷۵
		مسائل ۸۵
۸۷		<b>فصل ۴ مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های سیالی و سیستم‌های حرارتی</b>
		۱-۴ مقدمه ۸۷
		۲-۴ سیستم‌های سطح-مایع ۸۸
		۳-۴ سیستم‌های پنوماتیکی ۹۲
		۴-۴ سیستم‌های هیدرولیکی ۱۰۷
		۵-۴ سیستم‌های حرارتی ۱۱۸
		مسئله‌های نمونه و حل آنها ۱۲۱
		مسائل ۱۲۱

## فصل ۵ تحلیل‌های پاسخ گذرا و حالت - دائمی

۱-۵	مقدمه	۱۳۹
۲-۵	سیستم‌های مرتبه اول	۱۴۰
۳-۵	سیستم‌های مرتبه دوم	۱۴۳
۴-۵	سیستم‌های مرتبه بالاتر	۱۵۶
۵-۵	تحلیل پاسخ گذرا با MATLAB	۱۶۰
۶-۵	معیار پایداری روث	۱۸۵
۷-۵	اثرات عمل‌های کنترل انتگرالی و مشتقی بر عملکرد سیستم	۱۹۰
۸-۵	خطاهای حالت دائمی در سیستم‌های کنترل پسخور واحد	۱۹۵
	مسئله‌های نمونه و حل آنها	۲۰۰
	مسائل	۲۲۸

۲۳۳

## فصل ۶ تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل به روش مکان ریشه

۱-۶	مقدمه	۲۳۳
۲-۶	نمودارهای مکان ریشه	۲۳۴
۳-۶	رسم مکان ریشه با MATLAB	۲۵۱
۴-۶	نمودارهای مکان ریشه سیستم‌های پهن باند	۲۶۲
۵-۶	رویکرد مکان ریشه به طراحی سیستم‌های کنترل	۲۶۵
۶-۶	جبران‌سازی پیش‌افت	۲۶۸
۷-۶	جبران‌سازی پس‌افت	۲۷۸
۸-۶	جبران‌سازی پس‌افت-پیش‌افت	۲۸۹
۹-۶	جبران‌سازی موازی	۲۹۶
	مسئله‌های نمونه و حل آنها	۳۰۱
	مسائل	۳۴۰

۳۴۵

## فصل ۷ تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل با روش پاسخ فرکانسی

۱-۷	مقدمه	۳۴۵
۲-۷	دیاگرام‌های بودی	۳۵۰
۳-۷	نمودارهای قطبی	۳۷۱
۴-۷	نمودارهای لگاریتم اندازه بر حسب فاز	۳۸۴
۵-۷	معیار پایداری نایکوئیست	۳۸۶
۶-۷	تحلیل پایداری	۳۹۴
۷-۷	تحلیل پایداری نسبی	۴۰۰
۸-۷	پاسخ فرکانسی حلقه بسته سیستم‌های پسخور واحد	۴۱۴
۹-۷	تعیین تجربی توابع تبدیل	۴۲۱
۱۰-۷	طراحی سیستم‌های کنترل با رویکرد پاسخ فرکانسی	۴۲۵
۱۱-۷	جبران‌سازی پیش‌افت	۴۲۶
۱۲-۷	جبران‌سازی پس‌افت	۴۳۴
۱۳-۷	جبران‌سازی پس‌افت-پیش‌افت	۴۴۱
	مسئله‌های نمونه و حل آنها	۴۵۰
	مسائل	۴۸۴

**فصل ۸ کنترل‌کننده‌های PID و کنترل‌کننده‌های PID اصلاح شده**

۱-۸ مقدمه ۴۸۹

۲-۸ قواعد زیگلر- نیکولز برای تنظیم کنترل‌کننده‌های PID ۴۹۰

۳-۸ طراحی کنترل‌کننده‌های PID با رویکرد پاسخ فرکانسی ۴۹۸

۴-۸ طراحی کنترل‌کننده‌های PID با رویکرد بهینه‌سازی محاسباتی ۵۰۱

۵-۸ اصلاحات شیماهای کنترل PID ۵۰۸

۶-۸ کنترل دو-درجه‌آزادی ۵۱۱

۷-۸ رویکرد جایابی-صفر برای بهبود مشخصه‌های گذرا ۵۱۳

مسئله‌های نمونه و حل آنها ۵۲۹

مسائل ۵۵۲

**فصل ۹ تحلیل سیستم‌های کنترل در فضای حالت**

۱-۹ مقدمه ۵۵۹

۲-۹ نمایش فضای-حالت سیستم‌های تابع تبدیل ۵۶۰

۳-۹ تبدیل مدل‌های سیستم با MATLAB ۵۶۶

۴-۹ حل معادله حالت تغییرناپذیر با زمن ۵۶۹

۵-۹ چند نتیجه سودمند در تحلیل بردار- ماتریسی ۵۷۸

۶-۹ کنترل‌پذیری ۵۸۴

۷-۹ رویت‌پذیری ۵۹۱

مسئله‌های نمونه و حل آنها ۵۹۷

مسائل ۶۲۵

**فصل ۱۰ طراحی سیستم‌های کنترل در فضای حالت**

۱-۱۰ مقدمه ۶۲۹

۲-۱۰ جایابی قطب ۶۲۹

۳-۱۰ حل مسائل جایابی قطب با MATLAB ۶۴۱

۴-۱۰ طراحی سیستم‌های سرو ۶۴۴

۵-۱۰ رویت‌گرهای حالت ۶۵۶

۶-۱۰ طراحی سیستم‌های رگولاتور با رویت‌گرها ۶۸۱

۷-۱۰ طراحی سیستم‌های کنترل با رویت‌گر ۶۸۹

۸-۱۰ سیستم‌های رگولاتور بهینه درجه دوم ۶۹۴

۹-۱۰ سیستم‌های کنترل مقاوم ۷۰۷

مسئله‌های نمونه و حل آنها ۷۱۶

مسائل ۷۵۱

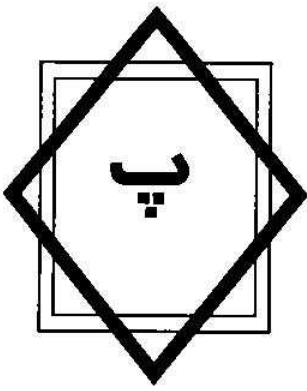
**پیوست الف**

**پیوست ب**

**پیوست پ**

**مراجع**

**نمایه و واژه‌نامه**



این کتاب مفاهیم مهم در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل را معرفی می‌کند. خوانندگان ملاحظه خواهند کرد که کتابی روشن و قابل فهم برای درس‌های سیستم کنترل درک می‌ها. دانشگاه‌ها می‌باشد. این کتاب برای دانشجویان سال چهارم مهندسی برق، مکانیک، هوافضا یا شیمی نوشته شده است. انتظار می‌رود که خوانندگان پیش‌نیازهای زیر را تکمیل کرده باشند: درس مقدماتی در معادلات دیفرانسیل، تبدیلات لاپلاس، تحلیل بردار-ماتریسی، تحلیل مدار، مکانیک و ترمودینامیک مقدماتی. تجدیدنظرات اصلی که در این ویرایش انجام شده است به شرح زیر است:

- استفاده از MATLAB برای بدست آوردن پاسخ‌های سیستم کنترل به انواع ورودی‌ها افزایش یافته است.
- سودمندی روش بهینه‌سازی محاسباتی با استفاده از MATLAB شاز داده شده است.
- مسائل مثالی جدید در تمام کتاب اضافه شده است.
- به منظور ایجاد فضا جهت معرفی موضوعات مهم‌تر بعضی از مطالب و مسائل حذف شده است. گراف‌های جریان سیگنال از کتاب حذف شده است. فصلی درباره تبدیل لاپلاس حذف شده است. در مقابل جداول تبدیل لاپلاس و گسترش کسرهای جزئی با MATLAB به ترتیب در پیوست‌های کتاب اضافه شده است.
- خلاصه کوتاهی از تحلیل بردار-ماتریسی در پیوست پ ارائه شده است. این کار به خوانندگان کمک خواهد کرد که عکس ماتریس  $n \times n$  را که ممکن است در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل لازم باشد بدست آورند.

این ویرایش از مهندسی کنترل مدرن در ده فصل سازمان یافته است. رئوس مطالب کتاب چنین است: فصل ۱ آشنایی با سیستم‌های کنترل را ارائه می‌دهد. فصل ۲ به مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های کنترل می‌پردازد. یک روش خطی‌سازی برای مدل‌های ریاضی غیرخطی در این فصل ارائه شده است. فصل ۳ مدل‌های ریاضی سیستم‌های مکانیکی و سیستم‌های الکتریکی را بدست می‌آورد. فصل ۴ مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های سیالی (مانند سیستم‌های سطح-مایع، سیستم‌های پنوماتیکی، سیستم‌های هیدرولیکی) را مورد بررسی قرار می‌دهد.

فصل ۵ تحلیل‌های پاسخ‌گذا و حالت دائمی سیستم‌های کنترل را ارائه می‌دهد. از MATLAB برای بدست آوردن منحنی‌های پاسخ‌گذا به‌طور گسترده استفاده می‌شود. برای تحلیل پایداری سیستم‌های کنترل، معیار پایداری روث ارائه شده است. معیار پایداری هورویتز نیز ارائه شده است.

فصل ۶ تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل را با روش مکان ریشه مورد بررسی قرار می‌دهد که سیستم‌های با پاسخور مثبت و سیستم‌های پایدار مشروط را شامل می‌شود. رسم مکان ریشه با MATLAB به تفصیل بحث شده است. طراحی جبران‌کننده‌های پیش‌افت، پس‌افت، پیش‌افت-پس‌افت با روش مکان ریشه گنجانیده شده است.

فصل ۷ تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل را در حوزه فرکانسی مورد بررسی قرار می‌دهد. معیار پایداری نایکوئیست با یک روش قابل درک راحتی ارائه شده است. روش دیاگرام بودی در طراحی جبران‌کننده‌های پیش‌افت، پس‌افت و پیش‌افت-پس‌افت مورد بحث قرار گرفته است.

فصل ۸ با کنترل‌کننده‌های PID اصلی و تغییر یافته سروکار دارد. روش‌های محاسباتی بدست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای کنترل‌کننده PID مفصلاً مورد بحث قرار گرفته است، به خصوص نسبت به برآورده کردن نیازهای مشخصه‌های پاسخ پله مطرح شده است.

فصل ۹ تحلیل اساسی سیستم‌های کنترل در فضای حالت را بررسی می‌کند. مفاهیم کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

فصل ۱۰ طراحی سیستم‌های کنترل در فضای حالت را ارائه می‌دهد. بحث‌ها شامل جایابی قطب، رؤیت‌گر حالت و کنترل بهینه درجه دوم می‌باشد. یک بحث مقدماتی از سیستم‌های کنترل مقاوم در انتهای فصل ۱۰ ارائه شده است.

کتاب چنان مرتب شده است که درک تدریجی نظریه کنترل را برای دانشجویان آسان‌تر کند. در ارائه مطالب از بحث‌های ریاضی شدید به دقت اجتناب شده است. هر رقع که اثبات مطالبی برای درک موضوع مطرح شده کمک کند ارائه شده است.

تلاش ویژه‌ای به عمل آمده است تا مسائل مثالی در جاهای لازم ارائه شود به قسمی که خواننده درک روشنی از موضوع مورد بحث داشته باشد. علاوه بر این تعدادی مسائل اضافی در انتهای هر فصل به جز فصل ۱ قرار داده شده است. به خوانندگان توصیه می‌شود که تمام چنین مسائل را به دقت مطالعه کنند. این کار موجب خواهد شد که خواننده درک عمیقی از موضوعات بحث شده بدست آورد. علاوه بر این مسائل دروس بدون حل نیز در انتهای هر فصل به جز فصل ۱ قرار داده شده است. مسائل حل نشده (مسائل ب) را می‌توان به عنوان تمرین یا مسائل کرنیز مورد استفاده قرار داد.

اگر این کتاب به عنوان یک کتابی درسی یک نیمسال (۵۶ ساعت درس) به کار برده شود قسمت‌های خوبی از مطالب را می‌توان با موضوعات معینی پوشش داد. با علت فراوانی مسائل مثالی و مسائل حل شده (مسائل الف) به بسیاری از سوالات که خوانندگان ممکن است داشته باشند جواب داده می‌شود. همچنین این کتاب می‌تواند مورد استفاده مهندسی شاغل که علاقمند مطالعه نظریه‌های اصلی کنترل باشند قرار گیرد.

مایلم از بررسی‌کنندگان زیر برای این ویرایش کتاب تشکر نمایم. مارک سمپل از دانشگاه کرنل، هنری سودانو از دانشگاه ایالتی آریزونا و آتول جی کلکار از دانشگاه ایالتی آیووا. سرانجام مایلم قدردانی عمیق خود را از خانم آلس دورکین، ویراستار همدست، آقای اسکات دی‌سانو مدیریت ویراستار ارشد و تمام کسانی که درگیر این پروژه چاپ بودند برای چاپ سریع و در عین حال عالی این کتاب ابراز دارم.

کاتسوهیکو اوگاتا

مهندسی کنترل به مدل سازی و تحلیل رفتار سیستم های فیزیکی می پردازد و بر اساس نتایج بدست آمده و در جهت پایدارسازی، مقاوم سازی و ارتقاء کیفیت عملکرد سیستم، سیستم های کنترل پسخور برای آنها طراحی می کند. مهندسی کنترل تقریباً در تمام زمینه های مهندسی و همچنین بسیاری از رشته های علوم کاربرد دارد. این کاربرد در بسیاری از موارد کلیدی است و عملکرد مطلوب و قابل اطمینان سیستم های ساخته شده به تحلیل و طراحی درست سیستم کنترلی وابسته است. به همین دلیل و برای آشنایی اولیه دانشجویان مهندسی با موضوع مهندسی کنترل، درسی درباره تحلیل و طراحی سیستم های کنترل خطی در اکثر برنامه های آموزشی مهندسی گنجانده شده است. سرفصل موضوع های این درس برای رشته ها و گرایش های مختلف اعم از مهندسی برق، مهندسی مکانیک، مهندسی مکترونیک، مهندسی شیمی، مهندسی هوافضا، و... بسیار نزدیک است. هر چند که بر حسب مورد ممکن است دانشجویان زمینه خاصی را عمیق تر مطالعه کنند.

با توجه به نیاز مبرم دانشجویان کارشناسی و مهندسان فعال در صنعت، خوشبختانه کتاب های فراوانی در این زمینه به رشته تحریر درآمده است و بسیاری از کتاب های انگلیسی به فارسی نیز ترجمه شده اند. اما کتاب مهندسی کنترل مدرن تألیف استاد برجسته دانشگاه مینی سوتا، کاتسوهیکو اوگاتا و ویژگی های خاصی دارد که ما را بر آن داشت تا به ترجمه آن اقدام کنیم. مؤلف این کتاب چندین کتاب دیگر نیز در زمینه های مختلف مهندسی کنترل چاپ کرده است که کتاب سیستم های کنترل دیجیتال وی نیز توسط اینجانبان ترجمه شده است و با توجه به استقبال فراوان دانشجویان، این کتاب تاکنون چندین بار تجدید چاپ شده است. لازم به ذکر است که کتاب مهندسی کنترل مدرن اوگاتا اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی به چاپ رسید و در طی چهار دهه گذشته با استقبال گسترده ای روبرو شده و در سال ۲۰۱۰ میلادی ویرایش پنجم آن نیز به علاقمندان عرضه شد. مؤلف در هر ویرایش، با توجه به تجربیات ارزشمند خود و نیازهای روز، مطالبی از کتاب کم کرده و مطالبی نیز به آن افزود. یا تغییراتی در نحوه ارائه مطالب داده است. کتاب حاضر ترجمه ای از ویرایش پنجم کتاب مهندسی کنترل مدرن است و محتوای آن شامل المان های درسی مصوب رشته های گوناگون مهندسی را در سطح کارشناسی به خوبی پوشش می دهد. مطالب کتاب با بیانی بسیار ساده و روان و ارائه مثال های فراوان عرضه شده است. همچنین، تنوع مسائل حل شده در کتاب عمق یادگیری و سرعت فهم خواننده را افزایش می دهد. علاوه بر آن در طول کتاب، کار با نرم افزار MATLAB در تمام زمینه های تحلیل و طراحی سیستم های کنترل خطی زمان پیوسته به خوبی آرازش داده می شود. نرم افزار MATLAB ابزاری قدرتمند برای شبیه سازی و تحلیل سیستم ها است، که امروزه یادگیری آن در تمام گرایش های مهندسی و علوم برای دانشجویان ضروری است.

در ترجمه این کتاب سعی و تلاش ما بر آن بوده است ضمن حفظ اصالت و امانت داری کامل اصل کتاب، مفاهیم آن را به گونه ای به فارسی برگردانیم که برای خوانندگان بسیار روشن و روان بوده و به سادگی قابل فهم باشد. امیدواریم که این وظیفه را به خوبی انجام داده باشیم، اما اگر خطای ترجمه یا اشکال های فنی دیگری توسط خوانندگان مشاهده شد، از تذکر آنها بسیار سپاسگزار خواهیم بود. در آخر از مدیریت محترم انتشارات گوتنبرگ که مقدمات چاپ سریع و با کیفیت این کتاب را فراهم کردند، و همچنین از گروه فنی هیمه که کار حرفه چینی و صفحه آرایی این کتاب را با دقت، و سرعت بسیار خوبی انجام دادند، صمیمانه تشکر و قدردانی می کنیم.

مترجمان: جبه دارمارالانی علی خاکی صدیق