

۲۰۴۶۹۹۵

۵۱۹۱۴

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کنترل پیش بین مبتنی بر مدل و کاربرد آن در مهندسی پزشکی

تألیف:

دکتر فرزاد توحیدخواه

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دکتر گلناز بغدادی

تابستان ۱۳۹۸

سرشناسه	توحیدخواه، فرزاد، ۱۳۳۸
عنوان و نام پدیدآور	کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و کاربرد آن در مهندسی پزشکی
تألیف	فرزاد توحیدخواه، گلناز بغدادی
وضعیت ویراست	[ویراست ۲]
مشخصات نشر	تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر، ۱۳۹۸
مشخصات ظاهری	۶ص. مصور، جدول، نمودار
شابک	978-964-463-772-8
وضعیت فهرست‌نویسی	فیبا
یادداشت	واژه‌نامه، کتابنامه، نمایه
موضوع	کنترل پیش‌بین - - راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	Predictive control - - Study and teaching (Higher)
موضوع	کنترل پیش‌بین - - مسائل، تمرین‌ها و غیره (عالی)
موضوع	Predictive control - - Problems, exercises, etc. (Higher)
موضوع	مهندسی کنترل - - راهنمای آموزشی (عالی)
موضوع	Automatic control - - Study and teaching (Higher)
موضوع	مهندسی کنترل - - مسائل، تمرین‌ها و غیره (عالی)
موضوع	Automatic control - - Problems, exercises, etc. (Higher)
شناسه اسناد	بغدادی، گلناز، ۱۳۶۲
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر
رده‌بندی کنگره	TJ ۲۱۷/۶: ۹۷۹۹۸
رده‌بندی دیویی	۶۳۰-۱۸۰۷
شماره کتابشناسی ملی	۵۷.۸۱۴۷

این کتاب در جلسه مورخ ۱۳۹۷/۴/۳ شورای چاپ و نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسیده است.



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

عنوان کتاب	کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و کاربرد آن در مهندسی پزشکی - ویراست ۲
تألیف	دکتر فرزاد توحیدخواه - گلناز بغدادی
ناشر	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ و صحافی	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ اولی	تأیستان ۱۳۹۸
قیمت	۵۸,۰۰۰ تومان
تیراژ	۱۰۰ نسخه
شابک	ISBN: 978-964-463-772-8
	۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۷۷۲-۸

آدرس مرکز پخش: خیابان ولیعصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) - تلفن: ۶۶۴۹۸۸۶۸

وبسایت: <http://publication.aut.ac.ir>

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

فهرست

صفحه	عنوان
۱	۱- مقدمه‌ای بر سیستم‌های کنترل
۱	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- اجزای تشکیل‌دهنده یک سیستم کنترل
۳	۳-۱- روش‌های کنترل مدار (حلقه) باز و مدار بسته
۵	۴-۱- کنترل مدار باز و دینامیک معکوس
۷	۵-۱- کنترل مدار بسته یا با بازخورد
۹	۶-۱- شاخص‌های عملکرد یک سیستم کنترل
۱۰	۷-۱- کنترل‌کننده PID
۱۲	۸-۱- خلاصه فصل
۱۲	۹-۱- مسائل
۱۵	۲- مروری بر مفاهیم کنترل مدرن
۱۵	۱-۲- مقدمه
۱۶	۲-۲- مدل فضای حالت
۲۲	۳-۲- کنترل پذیری
۲۳	۴-۲- کنترل بازخورد حالت
۲۴	۵-۲- محاسبه بهره بازخورد حالت به کمک روش جابجایی قطب‌ها
۲۹	۶-۲- محاسبه بهره بازخورد حالت به کمک الگوریتم آکرمن
۳۰	۷-۲- رؤیت پذیری
۳۲	۸-۲- طراحی سیستم کنترل بازخورد حالت با رؤیت‌گر (دوگان)
۴۰	۹-۲- خلاصه فصل
۴۰	۱۰-۲- مسائل
۴۳	۳- مروری بر مفاهیم کنترل بهینه
۴۳	۱-۳- مقدمه

- ۳-۲- تعریف معیار بهینه‌سازی (تابع هزینه) در مسائل کنترل بهینه ۴۴
- ۳-۲-۱- کمینه‌سازی زمان عملکرد ۴۴
- ۳-۲-۲- کمینه‌سازی انحراف حالت نهایی از یک مقدار مرجع ۴۴
- ۳-۲-۳- مسئله ردیابی و تنظیم‌کننده ۴۵
- ۳-۲-۴- کمینه‌سازی سیگنال کنترل ۴۶
- ۳-۲-۵- تابع هزینه چند مؤلفه‌ای ۴۶
- ۳-۳- تحذب و اثر آن در بهینه‌سازی ۴۸
- ۳-۴- روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی بدون در نظر گرفتن قید ۵۰
- ۳-۴-۱- برنامه‌ریزی خطی (LP) ۵۰
- ۳-۴-۲- بهینه‌سازی بر اساس حداقل‌سازی مربعات (برنامه‌ریزی مربعی) ۵۰
- ۳-۴-۳- روش نیوتن و شبه نیوتن ۵۲
- ۳-۵- روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی با در نظر قید ۵۷
- ۳-۵-۱- برنامه‌ریزی خطی (LP) ۵۷
- ۳-۵-۲- بهینه‌سازی بر اساس حداقل‌سازی مربعات (برنامه‌ریزی مربعی) ۵۸
- ۳-۵-۳- برنامه‌ریزی مربعی برای قیود نامساوی ۵۹
- ۳-۵-۴- ضرایب لاگرانژ ۶۰
- ۳-۵-۵- کمینه‌سازی با قیود نامساوی ۶۴
- ۳-۵-۶- روش‌های مجموعه فعال ۶۷
- ۳-۵-۷- روش دوگان اولیه ۶۹
- ۳-۵-۸- برنامه‌ریزی مربعی هیلدرث ۷۰
- ۳-۵-۹- حل بسته λ^* ۷۵
- ۳-۶- روش‌های بهینه‌سازی بر اساس جستجوی تصادفی و هدایت یافته ۷۶
- ۳-۶-۱- روش جستجوی تصادفی ۷۷
- ۳-۶-۲- روش جستجوی شبکه ۷۸
- ۳-۶-۳- روش جستجوی تکاملی ۷۸
- ۳-۷- روش جدول جستجو ۸۱

۸۲	۸-۳- تنظیم‌کننده مربعی خطی گسسته (DLQR)
۸۲	۸-۳-۱- افق محدود
۸۳	۸-۳-۲- افق نامحدود
۸۵	۸-۳-۳- کنترل گوسی مربعی خطی (LQG)
۸۶	۹-۳- خلاصه فصل
۸۷	۱۰-۳- مسائل
۹۱	۴- روش‌های کنترل مبتنی بر مدل
۹۱	۴-۱- مقدمه
۹۲	۴-۲- استفاده از مدل معکوس در مسیر رفت
۹۴	۴-۳- استفاده از مدل گسسته در مسیر برگشت
۹۷	۴-۴- کنترل مدل دینامیک (IMC)
۹۹	۴-۵- سیستم‌های با تأخیر خالص
۹۹	۴-۵-۱- حالت (۱) تأخیر در مسیر رفت
۹۹	۴-۵-۲- حالت (۲) تأخیر در مسیر رفت
۱۰۰	۴-۶- کنترل پیش‌بین اسمیت
۱۰۳	۴-۷- اصول کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل (MPC)
۱۰۹	۴-۸- مقایسه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و اسمیت
۱۱۳	۴-۹- خلاصه فصل
۱۱۴	۴-۱۰- مسائل
۱۱۷	۵- روش‌های اولیه و پایه‌ای کنترل پیش‌بین
۱۱۷	۵-۱- مقدمه
۱۱۸	۵-۲- طراحی کنترل‌کننده DMC
۱۱۸	۵-۲-۱- پیش‌بینی خروجی
۱۲۰	۵-۲-۲- محاسبه سیگنال کنترل
۱۲۱	۵-۳- طراحی کنترل‌کننده DMC با در نظر گرفتن قيود
۱۳۳	۵-۴- اغتشاش‌های قابل اندازه‌گیری

۱۳۳	۵-۵- تعمیم DMC به حالت چند متغیره
۱۳۴	۵-۶- طراحی کنترل کننده GPC
۱۳۴	۵-۶-۱- پیش‌بینی خروجی
۱۳۶	۵-۶-۲- محاسبه سیگنال کنترل
۱۴۰	۵-۷- خلاصه فصل
۱۴۱	۵-۸- مسائل
۱۴۵	۶- کنترل پیش‌بین در فضای حال
۱۴۵	۶-۱- مقدمه
۱۴۵	۶-۲- مدل افزوده‌شده فضای حالت
۱۴۸	۶-۳- پیش‌بینی حالت و متغیرهای خروجی
۱۵۰	۶-۴- بهینه‌سازی و کنترل
۱۵۴	۶-۵- سیستم کنترل با افزایش لغز
۱۵۷	۶-۶- سیستم کنترل مدار بهینه
۱۶۲	۶-۷- کنترل پیش‌بین برای سیستم‌ها با چند ورودی-چند خروجی
۱۶۴	۶-۷-۱- مقادیر ویژه‌ی مدل افزوده‌شده
۱۶۴	۶-۷-۲- کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری مدل افزوده‌شده
۱۶۷	۶-۷-۳- راه‌حل کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های MIMO
۱۶۸	۶-۸- تخمین متغیر حالت با استفاده از رؤیت‌گر
۱۷۴	۶-۸-۱- محاسبه بهره رؤیت‌گر با استفاده از الگوریتم آکره
۱۷۵	۶-۸-۲- تنظیم بهره رؤیت‌گر (K_{ob}) در حضور نویز: فیلتر کالمن
۱۷۷	۶-۸-۳- تنظیم دینامیک‌های رؤیت‌گر
۱۷۹	۶-۹- کنترل پیش‌بین با تخمین حالت
۱۸۳	۶-۱۰- روش کنترل پیش‌بین تفاضلی تعمیم‌یافته (GIPC)
۱۸۳	۶-۱۰-۱- مراحل طراحی
۱۸۸	۶-۱۰-۲- معادله‌ی مشخصه‌ی مدار بسته‌ی سیستم با روش GIPC
۱۹۰	۶-۱۱- خلاصه فصل

۱۹۱	۱۲-۶- مسائل
۱۹۳	۷- کنترل پیش‌بین با در نظر گرفتن قیود
۱۹۳	۱-۷- مقدمه
۱۹۴	۲-۷- بیان مسئله از طریق مثال
۱۹۸	۳-۷- فرمول‌بندی مسئله کنترل با وجود قیود
۱۹۸	۱-۳-۷- قیود متعارف
۲۰۱	۲-۳-۷- قیود به‌عنوان بخشی از مسئله بهینه‌سازی
۲۰۴	۱-۴-۷- مثال قیود
۲۰۴	۲-۴-۷- اعمال قید بر روی نرخ سیگنال کنترل
۲۰۸	۳-۴-۷- اعمال قید بر روی اندازه سیگنال کنترل
۲۱۲	۴-۴-۷- اعمال هم‌زمان بر روی اندازه و نرخ تغییرات
۲۱۵	۵-۴-۷- قید بر روی مسیر خروجی
۲۱۷	۵-۷- روش کنترل پیش‌بین نفاذ، تعمیم‌یافته (GIPC) با در نظر گرفتن قیود
۲۱۹	۶-۷- خلاصه فصل
۲۲۰	۷-۷- مسائل
۲۲۳	۸- کنترل پیش‌بین با استفاده از توابع لاگر
۲۲۳	۱-۸- مقدمه
۲۲۴	۲-۸- تعریف تابع لاگر
۲۲۹	۳-۸- استفاده از توابع لاگر در توصیف سیستم
۲۳۰	۴-۸- تعیین قطب در روش لاگر
۲۴۱	۵-۸- استفاده از توابع لاگر در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین
۲۴۲	۱-۵-۸- تعریف تابع هزینه
۲۴۵	۲-۵-۸- کمینه‌سازی تابع هزینه
۲۴۶	۳-۵-۸- جمع کانولوشن
۲۴۷	۴-۵-۸- کنترل افق لغزان
۲۴۸	۵-۵-۸- مقدار بهینه Δu

- ۸-۶- توسعه روابط به سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی MIMO..... ۲۵۶
- ۸-۷- کنترل با وجود قیود با استفاده از توابع لاگرم ۲۶۱
- ۸-۷-۱- اعمال قید بر روی تغییرات سیگنال کنترل (Δu)..... ۲۶۱
- ۸-۷-۲- اعمال قید بر روی دامنه سیگنال کنترل ۲۶۴
- ۸-۸- تحلیل پایداری ۲۶۸
- ۸-۸-۱- پایداری با قیود حالت نهایی ۲۶۸
- ۸-۸-۲- پایداری با افق پیش‌بینی بزرگ ۲۶۹
- ۸-۹- روش کنترل دوگان ۲۷۰
- ۸-۱۰- ف- بسته‌ی پاسخ از کنترل مقید برای سیستم تک ورودی-تک خروجی ۲۷۲
- ۸-۱۰-۱- فرم بسته‌ی پاسخ برای قید روی نرخ ورودی کنترل ۲۷۲
- ۸-۱۰-۲- فرم بسته‌ی پاسخ برای قید روی ورودی کنترل ۲۷۳
- ۸-۱۰-۳- فرم بسته‌ی پاسخ برای قید روی متغیر خروجی ۲۷۴
- ۸-۱۰-۴- اولویت‌بندی قیود ۲۷۵
- ۸-۱۱- خلاصه فصل ۲۸۰
- ۸-۱۲- مسائل ۲۸۰
- ۹- طراحی کنترل پیش‌بین با درجه پایداری از پیش تعیین‌شده ۲۸۳
- ۹-۱- مقدمه ۲۸۳
- ۹-۲- افق پیش‌بینی محدود ۲۸۴
- ۹-۳- مفهوم عدد وضعیت ۲۸۵
- ۹-۴- استفاده از وزن‌دهی نمایی داده‌ها ۲۸۷
- ۹-۵- پایداری مجانبی مدار بسته با استفاده از ضرایب وزنی نمایی ۲۹۳
- ۹-۶- کنترل پیش‌بین با درجه پایداری از پیش تعیین‌شده ۳۰۲
- ۹-۷- تنظیم پارامترها برای اصلاح عملکرد سیستم مدار بسته ۳۰۵
- ۹-۷-۱- رابطه بین پاسخ معادله ریکاتی و حداقل تابع هزینه ۳۰۶
- ۹-۷-۲- زمانی که مرتبه توابع لاگرم (N) به اندازه کافی زیاد است ۳۰۷
- ۹-۷-۳- حالت دوم، مرتبه توابع لاگرم کم باشد ۳۰۹

۳۱۵	۸-۹- کنترل مقید با ضرایب وزن دار نمایی
۳۱۸	۹-۸-۱- فواید بیشتر استفاده از وزن دهی نمایی
۳۲۱	۹-۸-۲- کنترل پیش بین بدون وزن نمایی ($\alpha=1$)
۳۲۲	۹-۸-۳- کنترل پیش بین با وزن نمایی بزرگ تر از یک ($\alpha=1.2$)
۳۲۳	۹-۸-۴- کنترل مقید ($\alpha=1.2$)
۳۲۴	۹-۹- خلاصه فصل
۳۲۴	۹-۱۰- مسائل
۳۲۷	۱۰- کنترل پیش بین غیر خطی کلاسیک
۳۲۷	۱۰-۱- مقدمه
۳۲۸	۱۰-۲- الگوریتم EDMC توسعه یافته (EDMC)
۳۵۱	۱۰-۳- استفاده از سیلت بالمر- تعمیم یافته در کنترل عمق بیهوشی
۳۵۶	۱۰-۴- کنترل مفصل اطراف پذیرفتاربات با استفاده از الگوریتم GIPC
۳۵۸	۱۰-۴-۱- تنظیم پارامترهای سیستم کنترل غیر خطی
۳۵۹	۱۰-۴-۲- عملکرد سیستم کنترلی در پاسخ با سرعت بالا
۳۶۰	۱۰-۴-۳- تأثیر غیر خطی بودن مدل بر بری عملکرد سیستم کنترل کننده
۳۶۲	۱۰-۴-۴- مقاومت الگوریتم های GPC و GIPC نسبت به مدل غیر قطعی FJR
۳۶۳	۱۰-۴-۵- استفاده از الگوریتم GIPC با محدودیت انتقال کنترل
۳۶۵	۱۰-۵- کنترل راکتور مخزن دائماً متحرک با استفاده از الگوریتم GIPC
۳۷۰	۱۰-۶- کنترل پیش بین غیر خطی تقریبی بر اساس بسط تیلور
۳۷۱	۱۰-۷- طراحی و شبیه سازی کامپیوتری کنترل کننده FES با استفاده از الگوریتم NMPC
۳۷۱	تقریبی برای برخاستن بیماران پاراپلژیک
۳۷۲	۱۰-۷-۱- مدل بیمار پاراپلژیک
۳۷۴	۱۰-۷-۲- طرح ریزی مسیر حرکت
۳۷۵	۱۰-۷-۳- طراحی کنترل پیش بین غیر خطی تقریبی با نقطه انتهایی ثابت
۳۷۷	۱۰-۷-۴- طراحی کنترل پیش بین غیر خطی تقریبی کلی
۳۷۸	۱۰-۷-۵- نتایج شبیه سازی کامپیوتری

۳۸۵	۸-۱۰- خلاصه فصل
۳۸۵	۹-۱۰- مسائل
۳۸۷	۱۱- ترکیب کنترل کننده پیش بین و PID
۳۸۷	۱-۱۱- مقدمه
۳۸۸	۲-۱۱- طراحی یک کنترل کننده PID با استفاده از قوانین GPC
۳۸۸	۱-۲-۱۱- فرم کلی کنترل کننده PID
۳۸۹	۲-۲-۱۱- مدل فرآیند
۳۹۰	۳-۲-۱۱- طراحی کنترل GPC
۳۹۴	۴-۲-۱۱- انتخاب ماتریس های وزن
۳۹۸	۵-۲-۱۱- شبیه سازی
۴۰۱	۳-۱۱- کنترل پیش بین امیدانسی
۴۰۳	۴-۱۱- کنترل پیش بین امیدانسی در کنترل حرکات انسان
۴۰۹	۱-۴-۱۱- امیدانسی ثابت- تبع معیار فقط بر حسب خطا
۴۲۴	۲-۴-۱۱- امیدانسی متغیر- تابع معیار فقط خطا
۴۲۵	۳-۴-۱۱- امیدانسی متغیر- تابع معیار ترکیب خطا و انرژی
۴۳۰	۴-۴-۱۱- ارائه راه حل تحلیلی جهت محاسبه بر خط امیدانسی بهینه در مسیر حرکت
۴۴۰	۵-۱۱- ترکیب کنترل کننده امیدانسی و مدل حرکت نظارت در حرکات دست
۴۴۲	۱-۵-۱۱- واحد سرپرستی
۴۴۴	۲-۵-۱۱- شبیه سازی
۴۴۷	۳-۵-۱۱- یادگیری حرکت
۴۴۹	۴-۵-۱۱- اثر پس تأثیر و پایایی یادگیری سفتی
۴۵۱	۶-۱۱- خلاصه فصل
۴۵۲	۷-۱۱- مسائل
۴۵۵	۱۲- کنترل پیش بین مبتنی بر روش های هوشمند
۴۵۵	۱-۱۲- مقدمه
۴۵۶	۲-۱۲- کنترل پیش بین مبتنی بر مدل با استفاده از شبکه های عصبی

۴۵۶.....	۱۲-۲-۱- استفاده از شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی سیستم خطی
۴۶۴.....	۱۲-۲-۲- استفاده از شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی سیستم غیرخطی
۴۶۸.....	۱۲-۲-۳- استفاده از شبکه‌های عصبی در حل مسئله بهینه‌سازی
۴۷۸.....	۱۲-۳-۳- کنترل پیش‌بین فازی
۴۸۱.....	۱۲-۳-۱- مدل‌سازی سیستم کنترل حرکت بدن: مدل دستگاه (مخچه) با استفاده از قواعد فازی
۴۸۸.....	۱۲-۳-۲- طراحی کنترل پیش‌بین
۴۹۱.....	۱۲-۴-۱- اتصال به شبکه
۴۹۱.....	۱۲-۴-۲- اتصال به شبکه
۴۹۳.....	۱۳- کنترل پیش‌بین در سیستم‌های وقایع گسسته
۴۹۳.....	۱۳-۱- مقدمه
۴۹۴.....	۱۳-۲- نمونه‌هایی از سیستم‌های وقایع گسسته
۴۹۸.....	۱۳-۳- مدل‌سازی سیستم‌های وقایع گسسته
۴۹۹.....	۱۳-۴- کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در سیستم‌های وقایع گسسته
۵۰۰.....	۱۳-۵- مدل‌سازی بر اساس جبر خطی مادل-پلاس (MPL)
۵۰۱.....	۱۳-۵-۱- سیستم‌های خطی ماکس-پلاس (MPLS)
۵۰۴.....	۱۳-۵-۲- سیستم‌های خطی ماکس-پلاس سویچینگ
۵۰۸.....	۱۳-۶- MPC برای سیستم‌های وقایع گسسته خطی ماکس-پلاس
۵۱۱.....	۱۳-۶-۱- MPC برای سیستم‌های وقایع گسسته خطی ماکس-پلاس با قیود
۵۱۲.....	۱۳-۶-۲- تأثیر پارامترهای تنظیم
۵۱۷.....	۱۳-۷-۱- مدل‌سازی بر اساس رهیافت شبکه‌های پتری
۵۱۸.....	۱۳-۷-۱- اجزای شبکه‌های پتری
۵۲۰.....	۱۳-۷-۲- مفاهیم مطرح در شبکه‌های پتری
۵۲۳.....	۱۳-۷-۳- بیان ریاضی شبکه‌های پتری
۵۲۶.....	۱۳-۸- کنترل شبکه پتری پیوسته از طریق MPC
۵۲۷.....	۱۳-۸-۱- تبدیل مدل خطی به فرم زمان گسسته

پیشگفتار

از آنجایی که کنترل جزئی جدایی ناپذیر از سیستم‌های طبیعی و یا ساخته دست انسان است، توسعه و بهبود الگوریتم‌های کنترل به منظور به کارگیری آن‌ها برای فرایندها و دستگاه‌هایی با ویژگی‌های مختلف، همواره مورد توجه محققین بوده است.

کنترل کننده PID به عنوان یک روش کلاسیک و مهم در صنعت همواره مطرح بوده است، ولی در سیستم‌های واقعی با مواردی نظیر چند متغیره بودن سیستم، وجود تأخیر، تغییرپذیری با زمان، غیر کمینه فاز بودن، وجود عدم قطعیت‌هایی نظیر اغتشاش و وجود محدودیت‌ها، مواجه هستیم. هر یک از روش‌های سنتی نظیر PID، در برخورد با موارد اشاره شده از موفقیت نسبی برخوردار بوده‌اند، لیکن کنترل صنعتی نوین، نیازمند روش‌های هوشمندانه و پیشرفته‌تری است. با الهام از سیستم‌های زیستی به خصوص عملکرد انسان، روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل که به اختصار کنترول پیش‌بین نیز نامیده می‌شود، از اواخر دهه ۷۰ میلادی به عنوان یکی از روش‌های کنترلی پیشرفته مطرح گردید و در ابتدا در صنایع پتروشیمی مورد استفاده قرار گرفت و بعدها مبانی تئوری آن در دانشگاه و مراکز علمی توسعه پیدا کرد و امروزه به عنوان یک روش مهم و جدی در روش‌های کنترل پیشرفته مطرح است.

این روش کنترل، زمانی که یک مدل سببی را قابل قبول از سیستم تحت کنترل در دسترس است، به عنوان یک روش مناسب مطرح می‌شود. در این روش، در یک افق محدود، رفتار سیستم به کمک مدل پیش‌بینی می‌شود و با یک رفتار مرجع و محدود انتظار مقایسه شده و سپس بر اساس تئوری‌های مطرح در کنترل بهینه، سیگنال کنترل مناسب محاسبه و تولید می‌شود.

نظر به خصوصیات دینامیکی خاص سیستم‌های زیستی و اهمیت پیش‌بینی رفتار آینده سیستم در تولید سیگنال کنترل مناسب توسط سیستم عصبی، استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین در حوزه مدل سازی و کنترل سیستم‌های زیستی در مطالعات اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

در کتاب حاضر که نتیجه سال‌ها تدریس درس کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در دانشکده مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر است، علاوه بر ارائه مبانی نظری و الگوریتم‌های مطرح، کاربردهایی از این روش کنترل در حوزه مهندسی پزشکی نیز آورده شده است. به این ترتیب، این کتاب به عنوان ابزاری جهت پر نمودن فاصله بین تئوری‌های مهندسی مطرح در صنعت و دانش موجود از سیستم‌های زیستی نیز قابل ارائه است و مطالعه آن برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری در گرایش‌های مختلف مهندسی پزشکی، مهندسی برق،

مهندسی کامپیوتر، مهندسی مکانیک، مکترونیک، مهندسی شیمی و پلیمر، مهندسی هوافضا و مدیریت و برنامه‌ریزی می‌تواند مفید و مؤثر واقع شود.

ویرایش اول این کتاب در دو بخش تنظیم شده بود: مفاهیم کنترل پیش‌بین کلاسیک و معرفی روش‌های پیشرفته. در ویرایش دوم این کتاب، با توجه به نظرات دریافت شده از طرف اساتید، دانشجویان و محققین، بخش جدیدی در چهار فصل، جهت مرور مفاهیم کنترل کلاسیک، مدرن و بهینه که پیش‌نیاز درک و به‌کارگیری الگوریتم‌های کنترل پیش‌بین هستند، به ابتدای کتاب اضافه گردید. در ویرایش قبل، بخش اعظم این مرور در پیوست الکترونیکی کتاب ارائه شده بود؛ ولی از آنجایی که مخاطبین این کتاب عموماً از رشته‌های مختلف مهندسی هستند، لزوماً با مفاهیم لازم در مورد کنترل کلاسیک، مدرن و بهینه آشنایی کافی را ندارند. لذا ارائه یک مرور از این مفاهیم عنوان بخشی از بدنه اصلی کتاب ضروری به نظر می‌رسید. البته افرادی که با مفاهیم پایه کنترل کلاسیک، مدرن و بهینه آشنایی دارند می‌توانند از چهار فصل اول کتاب گذر کرده و به مطالعه اصول جدید بپردازند.

همان‌طور که در پیشگفتار ویرایش قبل نیز اشاره شده بود، در مورد سیستم‌های زیستی و همچنین برخی فن‌آوری‌های نو، یافته‌ی ساخت انسان، گاهی نمی‌توان دینامیک سیستم‌ها را با معادلات زمان-پیوسته، زمان-نمنا کلاسیک و یا سیستم‌های با درجه صحیح توصیف نمود. با در نظر گرفتن جایگاه این سیستم‌ها در حوزه‌های مختلف به‌خصوص مهندسی پزشکی، اشاره به امکان به‌کارگیری الگوریتم‌های کنترل پیش‌بین در سیستم‌های وابسته به رویداد و همچنین سیستم‌های درجه کسری در بدنه اصلی کتاب مفید و لازم به نظر می‌رسید. در ویرایش جدید، دو فصل در این زمینه به انتهای کتاب در بخش سود اضافه شده است. به این ترتیب ویرایش دوم کتاب، بر اساس مفاهیم لازم جهت آشنایی، یادگیری و به‌کارگیری الگوریتم‌های کلاسیک و پیشرفته‌ی کنترل پیش‌بین در سه بخش تنظیم شده است.

در بخش اول که شامل فصول یک تا چهار است، به بیان تعاریف و مفاهیم مقدماتی لازم جهت ورود به الگوریتم کنترل پیش‌بین پرداخته شده است. در فصل اول اجزای تشکیل‌دهنده یک سیستم کنترل و مفاهیم مطرح در تئوری کنترل معرفی شده و سپس شرح مختصری از نحوه طراحی کنترل‌کننده PID، به‌عنوان یک ابزار کنترلی که از دیرباز در حوزه‌های صنعتی مطرح بوده است، آورده شده است. در فصول دیگری از کتاب نیز عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل با PID به‌عنوان یک روش مبنا مقایسه شده است. با توجه به محدودیت‌های موجود در طراحی سیستم‌های کنترل در حوزه زمان و یا فرکانس، در فصل دوم مفاهیم مربوط به کنترل مدرن که بر پایه معادلات حالت و حوزه زمان است، آورده شده است. از آنجایی که اکثر

الگوریتم‌های ارائه شده در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل بر مبنای معادلات فضای حالت است، مطالعه این فصل برای دانشجویانی که با مفاهیم پایه کنترل مدرن نظیر طراحی مدل در فضای حالت، کنترل‌پذیری، رؤیت‌پذیری و کنترل بازخورد حالت‌آشنایی ندارند، توصیه می‌شود. همان‌طوری که اشاره گردید، کنترل پیش‌بین بر اساس بهینه‌سازی و سیستم‌های مدل مبنای پایه‌گذاری شده است. لذا نظر به ضرورت مسئله بهینه‌سازی در الگوریتم‌های مربوط به طراحی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در **فصل سوم** مروری بر مفاهیم کنترل بهینه شده است. در این فصل بعد از معرفی انواعی از توابع هزینه، روش‌های متعارف و الگوریتم‌های هوشمند مطرح در حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده است. در انتهای این فصل روش تنظیم‌کننده مربعی خطی (LQR) نیز به عنوان یکی دیگر از روش‌های کنترلی مطرح، معرفی می‌شود. در طول کتاب در برخی موارد، نتیجه به دست آمده از این روش که در آن سیگنال کنترل بر اساس بهینه‌سازی تابع هزینه محاسبه می‌شود، با خروجی حاصل از الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل مقایسه شده است. هر چند که در طراحی و به‌کارگیری عموم روش‌های کنترل کلاسیک و مدرن استفاده از اطلاعات سیستم و مدل به‌کارها راز است؛ لیکن حضور مشخص و فعال مدل در ساختار کنترل‌کننده، مبنای دسته‌ای از روش‌های کنترل مدرن است که به‌عنوان روش‌های کنترل مبتنی بر مدل شناخته می‌شوند و در **فصل چهارم** اشاره مختصر کلی به آن‌ها شده است. در میان این روش‌ها، روش کنترل پیش‌بین اسمیت است که به نوعی یک کنترل مدل داخلی است و برای سیستم‌هایی که تأخیر دارند و مقدار تأخیر راسیالیم استفاده می‌شود. در انتهای این فصل بعد از معرفی کنترل پیش‌بین اسمیت، یک مقایسه کلی بین عملکرد این روش با الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل شده است و زمینه ورود به فصل بعدی جهت معرفی الگوریتم‌های مطرح در کنترل پیش‌بین فراهم شده است.

همان‌طور که اشاره شد، افرادی که با مفاهیم پایه کنترل مدرن و کنترل بهینه‌آشنایی دارند و هدف اصلی آن‌ها از خواندن این کتاب آشنایی با نحوه طراحی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل است، می‌توانند با گذر از چهار فصل اول به مطالعه **بخش دوم** کتاب که دربردارنده اصول پنج‌تانه است، بپردازند.

تاکنون روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی سیستم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل ارائه شده است. در **فصل پنجم** به معرفی روش‌های اولیه که بر اساس مدل‌های زمانی و تابع تبدیل پایه‌گذاری شده بودند، پرداخته می‌شود. از جمله روش‌های معرفی شده کنترل‌کننده ماتریس دینامیک (DMC) است که بر اساس پاسخ پله سیستم کار می‌کند و در ابتدای ورودش با استقبال وسیعی در دنیای صنعت به‌ویژه در صنایع پتروشیمی روبه‌رو شد. روش دوم معرفی شده در این فصل، روش تعمیم‌یافته کنترل پیش‌بین یا GPC است که بر مبنای تابع تبدیل سیستم طراحی

می‌شود و نسبت به الگوریتم DMC دارای این مزیت است که مدل نویز را نیز می‌توان به آن اضافه نمود. مباحث ارائه شده در فصل ششم تا نهم، از کتاب خانم ونگ برگرفته شده است که در تکمیل آن، در موارد لازم توضیحات و مثال‌هایی نیز اضافه شده است. در ادامه فصل قبلی، در **فصل ششم** به منظور بهره‌گیری از مزایای فضای حالت، نحوه پیاده‌سازی الگوریتم GPC در فضای حالت به طور کامل آورده شده است. در انتهای این فصل روش کنترل پیش‌بین تفاضلی تعمیم‌یافته (GIPC) و طراحی GPC بر اساس مدل افزوده شده در فضای حالت آورده شده است و طی چند مثال مزیت آن‌ها نسبت به الگوریتم GPC متعارف در برخورد با عدم قطعیت‌های موجود در مدل نشان داده شده است. از آنجایی که تمامی سیستم‌های واقعی در ورودی، خروجی و حالت‌هایشان با محدودیت‌هایی همراه هستند، در **فصل هفتم** نحوه فرموله بندی الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در حضور قیود تشریح شده است. الگوریتم‌های کلاسیک کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، به علت وجود محاسبات زیاد جزو روش‌های کند به حساب می‌آید که استفاده از آن را در سیستم‌هایی با دینامیک سریع غیرممکن می‌سازد. استفاده از توابع پایه جهت توصیف سیستم می‌تواند باعث کاهش حجم اطلاعات و محاسبات لازم شده و به این ترتیب با کاهش متغیرهای تصمیم‌گیری، سرعت محاسبات را در کاربردهای کنترل پیش‌بین تا حدی افزایش داد. یکی از این توابع پایه‌ای، توانایی خود را در الگوریتم‌های کنترل پیش‌بین نشان داده است توابع لاگر است که در **فصل هشتم** به نحوه طراحی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با استفاده از این توابع پرداخته می‌شود. برای دسته‌ای از سیستم‌های کنترل پیش‌بین که در آن‌ها انتگرال‌گیر جاسازی شده است، انتخاب مقدار تقویتی پیش‌بینی خروجی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند و مقدار نامناسب آن می‌تواند باعث ناپایداری در سیستم شود. در **فصل نهم** روشی مبتنی بر درجه پایداری از پیش تعیین‌شده مطرح شده است که بر آن مدل طراحی‌شده طوری اصلاح می‌شود که تمامی مقادیر ویژه در صفحه مختلط در درون دایره واحد قرار بگیرند.

یکی از مشکلات موجود در الگوریتم‌های کلاسیک کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، ضعف عملکرد آن‌ها در مورد سیستم‌های غیرخطی، هیبریدی و سریع است. خیرا در مطالعات مختلف روش‌های جدیدی در توسعه الگوریتم‌های کلاسیک ارائه شده است که در **فصل سوم** این کتاب به معرفی تعدادی از این الگوریتم‌های جدید پرداخته شده است. به خوانندگانی که بر مفاهیم کلاسیک مطرح در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل تسلط دارند و صرفاً علاقه‌مند به آشنایی با روش‌های نوین مطرح در این زمینه هستند، توصیه می‌شود که با گذر از دو بخش قبلی به مطالعه فصول مطرح شده در بخش سوم بپردازند.

در تمامی فصول قبل مدل‌های سیستم تحت کنترل که در طراحی کنترل پیش‌بین مورد استفاده قرار می‌گرفت خطی فرض می‌شدند. از آنجایی که بسیاری از سیستم‌های واقعی به‌خصوص

سیستم‌های بیولوژیکی غیرخطی هستند، در فصل دهم به توسعه الگوریتم کنترل پیش‌بین جهت به‌کارگیری آن برای سیستم‌های غیرخطی پرداخته می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم DMC توسعه‌یافته و GIPC اشاره نمود که در این فصل با ارائه مثال‌های مختلف، توانایی این الگوریتم‌های توسعه‌یافته در مواجهه با سیستم‌های غیرخطی بررسی شده است. همان‌طوری که بیان شد، کنترل‌کننده PID یکی از روش‌های کنترلی مینا به شمار می‌رود که به علت سادگی طراحی و کاربرد آن در سیستم‌های صنعتی بسیار مورد توجه است. به‌منظور ترکیب و به‌کارگیری مزایای هر دو روش در فصل یازدهم روش‌های مختلفی که در طراحی سیستم‌های کنترلی از ترکیب این دو کنترل‌کننده استفاده شده است، معرفی شده است. روش‌هایی ارائه شده در فصل دهم جهت به‌کارگیری کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های غیرخطی عموماً بر اساس توسعه و ایجاد تغییراتی در الگوریتم‌های کلاسیک کنترل پیش‌بین است. در فصل دوازدهم الگوریتم‌های دیگری بر اساس روش‌های هوشمندی نظیر شبکه‌های عصبی و فازی ارائه می‌گردد که نسبت به روش‌های قبلی می‌توانند محدوده وسیع‌تری از سیستم‌ها با ویژگی‌های خاص را در بر بگیرند. به پیشرفت در فن‌آوری، انسان شروع به ساخت سیستم‌های مصنوعی پیچیده‌تر کرد. در این سیستم‌ها و همچنین سیستم‌های بیولوژیکی به ازای هر رویداد جدید، ممکن است نحوه کار سیستم تغییر کرده و یک روند عملکردی جدید به ازای آن رویداد انتخاب گردد. چنین دینامیک‌هایی را که سیستم‌ها در مواقع گسسته نام‌گذاری می‌شوند، نمی‌توان صرفاً با معادلات زمان-پیوسته یا زمان-گسسته توصیف نمود. در فصل سیزدهم نحوه به‌کارگیری الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، برای چنین سیستم‌های ارائه شده است. با در نظر گرفتن توجه اخیر محققین به معادلات با درجه کسری، به‌کارگیری آن‌ها در توصیف برخی از پدیده‌های طبیعی و یا مصنوعی، در فصل چهاردهم مقدمه‌ای از بگونگی کنترل سیستم‌های درجه کسری با الگوریتم‌های کنترل پیش‌بین آورده شده است.

یک پیوست الکترونیکی نیز همراه این کتاب ارائه گردیده که دربردارنده برنامه‌های تکمیلی و کدهای پیاده‌سازی الگوریتم‌های اشاره شده در فصول دوم تا ششم در محیط MATLAB است. این پیوست از طریق لینکی که در انتهای فهرست کتاب ذکر شده است، قابل دسترسی است.

در این کتاب سعی شده است تا حد ممکن، مباحث موجود در زمینه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل پوشش داده شود، ولی این زمینه کنترل، محدود به مفاهیم مطرح شده در این کتاب نبوده و بسیار گسترده‌تر از آن است که بتوان در قالب یک کتاب آن‌ها را بیان نمود. اگرچه، امید بر آن بوده است که این کتاب بتواند وسیله‌ای باشد که راه ورود به این حوزه را برای دانشجویان و دیگر علاقه‌مندان هموارتر بنماید. همچنین از آنجایی که هیچ اثری از انسان وجود ندارد که خالی

از اشکال باشد، لذا از خوانندگان محترم تقاضا می‌شود که با ارسال اشکالات موجود در کتاب، ما را در ویرایش و اصلاح آن یاری برسانند.

در انتها جا دارد که از جناب آقای دکتر حائری که مفاهیم کنترل پیش‌بین را از محضر ایشان فراگرفته‌ایم، جناب آقای دکتر قهرمانی و نیز از دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی امیرکبیر که آماده‌سازی این کتاب را امکان‌پذیر کردند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

فرزاد توحیدخواه

(towhidkhah@aut.ac.ir)

گلناز بغدادی

(golnaz_baghdadi@aut.ac.ir)

دانشجده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تابستان ۱۳۹۸