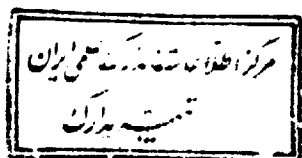


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۲۷۹ / ۵ / ۲۱

به نام خدا



دانشکده مهندسی برق - گروه کنترل

طراحی و شبیه سازی یک کنترل کننده با استفاده از شبکه های عصبی
برای کلاسی از سیستم های غیر خطی

۲۷۱۶۸

شاهین نصر آزادانی

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی کنترل

استاد راهنما: دکتر علی اکبر جلالی

استاد مشاور: دکتر محمد فرخی

دی ماه ۱۳۷۸

۳۰۱۲۳

تقدیم به:

تمام هستی‌ام

پدر فداکار و مادر دلسوزم

چکیده:

روش خطی سازی با فیدبک با وجودی که روشی جذاب و قانونمند را برای کنترل سیستمهای غیرخطی ارائه می دهد، اما در عرصه عمل از محدودیت هایی رنج می برد. یکی از مهمترین آنها، لزوم داشتن مدلی کاملاً دقیق از سیستم است تا حذف ترمهای غیرخطی با دقتی کامل صورت گیرد. در چند دهه اخیر با توجه به پتانسیل خوب شبکه های عصبی چند لایه در تقریب توابع غیرخطی، روشهایی در راستای استفاده از شبکه های عصبی چند لایه در شناسایی سیستمهای غیرخطی پیشنهاد شده است. در این پایان نامه، مسئله کنترل تعقیب سیستمهای غیرخطی زمان گسسته و زمان پیوسته خطی پذیر با فیدبک تک ورودی-تک خروجی و همچنین چند ورودی-چند خروجی با بکارگیری از شبکه های عصبی چند لایه بررسی می شود. ساختار کنترل کننده شامل روش خطی سازی با فیدبک است که بجای توابع غیرخطی نامعلوم، مدل شبکه های عصبی آنها جایگزین می گردد. وزنه های شبکه های عصبی، در حین کنترل، با توجه به خطای تعقیب تنظیم می شوند. در اینجا، با توجه به نحوه تنظیم وزنها، دو روش برای کنترل سیستمهای غیرخطی ارائه می شود. در روش اول، ابتدا وزنه های شبکه های عصبی برای شناسایی توابع به صورت قطع-خط توسط الگوریتم پس-انتشار آموزش می بینند و سپس، در حین کنترل، با کمک الگوریتمی که شامل ناحیه مرده است تنظیم می گردند. همچنین در این رساله، روشی برای مقاوم سازی سیستم کنترل شده با استفاده از این روش در برابر اغتشاش ارائه می شود. در روش دوم که نیازی به تعلیم قطع-خط شبکه های عصبی نیست، شبکه های عصبی به صورت وصل-خط، تنظیم می گردند که برای این منظور از الگوریتمی مشابه اصلاح- ϵ در کنترل تطبیقی، استفاده می شود که شامل قانون دلتا یا پس-انتشار اصلاح شده است. یکی از مزایای این روش مقاوم کردن سیستم در مقابل اغتشاش های محدود نامعین است. قابل ذکر است که در روشهای فوق نیازی به برخی از محدودیت های متداول در روش کنترل تطبیقی، از قبیل خطی بودن توابع به پارامترهای نامعلوم، نیست.

تقدیر و تشکر:

پس از حمد و ستایش بیکران خداوند متعال که توفیق دانش‌اندوزیم عطا فرمود، برخود لازم می‌دانم که بدینوسیله از استاد ارجمند آقای دکتر جلالی که با رهنمودهای خویش مرا در جهت انجام و ارائه این پایان‌نامه یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از استاد گرامی آقای دکتر فرخی که راهنما و مشوق اینجانب در تمامی مراحل انجام این پروژه و نیز تهیه این پایان‌نامه بوده‌اند، صمیمانه تشکر می‌کنم. بعلاوه از اعضای محترم هیئت داور، آقایان دکتر بلندی و دکتر مجد بخاطر حضور در جلسه دفاعیه و رفع اشکالات این پایان‌نامه بسیار سپاسگذارم.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱. کلیات ۱

۲-۱. روند مطالب ۶

فصل دوم: مروری بر کنترل سیستمهای غیرخطی ۷

۱-۲. مقدمه ۷

۲-۲. روش کنترل خطی سازی با فیدبک برای سیستمهای زمان-گسسته ۸

۳-۲. روش کنترل خطی سازی با فیدبک برای سیستمهای زمان-پیوسته ۱۰

۴-۲. روش کنترل با ساختار متغیر ۱۴

۲-۵. مروری مختصر بر ساختار کنترل تطبیقی ۱۶

فصل سوم: اصول آموزش شبکه‌های عصبی پیشخورد

در مدل سازی توابع غیرخطی ۱۹

۱-۳. مقدمه ۱۹

۲-۳. اصول و مبانی تقریب در شبکه‌های عصبی ۱۹

۳-۳. شبکه‌های عصبی پیشخورد ۲۰

۴-۳. الگوریتم آموزش پس-انتشار ۲۲

فصل چهارم: کنترل سیستمهای غیرخطی زمان-گسسته

با بکارگیری شبکه‌های عصبی چند لایه ۲۵

۱-۴. مقدمه ۲۵

۲-۴. کنترل سیستمهای زمان-گسسته به روش STR و با شناسایی اولیه ۲۶

۱-۲-۴. توصیف مدل غیرخطی ۲۶

۳۰	۲-۲-۴. مدل سازی توابع غیرخطی واحد تحت کنترل توسط شبکه های عصبی
۳۳	۳-۲-۴. قانون تنظیم وزنه های شبکه عصبی
۳۴	۴-۲-۴. قضیه همگرایی
۳۵	۳-۴. کاهش اثر اغتشاش در سیستم های غیرخطی با استفاده از شبکه عصبی
۳۶	۱-۳-۴. توصیف سیستم های خطی و غیرخطی در برابر اغتشاش
۳۷	۲-۳-۴. تحلیل نظری حذف اثر اختلال در خروجی سیستم
۴۱	۴-۴. کنترل سیستم های زمان گسسته به روش MRAC و بدون شناسایی اولیه
۴۱	۱-۴-۴. توصیف مدل غیرخطی MIMO
۴۳	۲-۴-۴. طراحی کنترل کننده با استفاده از شبکه عصبی
۴۸	۳-۴-۴. الگوریتم تصویر
۵۰	۵-۴. شبیه سازی

فصل پنجم: کنترل سیستم های غیرخطی زمان-پیوسته

۶۹	با بکارگیری شبکه های عصبی چند لایه
۶۹	۱-۵. مقدمه
۷۰	۲-۵. کنترل سیستم های غیرخطی زمان-پیوسته به روش MRAC و با شناسایی اولیه
۷۰	۱-۲-۵. کنترل خطی سازی با فیدبک سیستم غیرخطی SISO
۷۱	۲-۲-۵. کنترل تطبیقی سیستم SISO با استفاده از شبکه عصبی
۷۴	۳-۲-۵. قضیه همگرایی
۷۵	۴-۲-۵. کنترل خطی سازی با فیدبک سیستم غیرخطی MIMO
۷۷	۵-۲-۵. کنترل تطبیقی سیستم MIMO با استفاده از شبکه عصبی
۸۰	۳-۵. کنترل مقاوم سیستم های غیرخطی زمان-پیوسته
۸۰	۱-۳-۵. کنترل ساختار متغیر
۸۱	۲-۳-۵. قانون تنظیم وزنه های شبکه های عصبی
۸۲	۴-۵. کنترل سیستم های غیرخطی زمان-پیوسته به روش MRAC و بدون شناسایی اولیه
۸۳	۱-۴-۵. توصیف سیستم غیرخطی
۸۵	۲-۴-۵. ساختار و طراحی کنترل کننده با استفاده از شبکه عصبی
۸۶	۱-۲-۴-۵. طراحی کنترل کننده خوش تعریف

۸۷.....	۲-۲-۴-۵. تنظیم وزنه‌های شبکه‌های عصبی
۸۸.....	۳-۲-۴-۵. قضیه پایداری
۸۹.....	۵-۵. شبیه‌سازی
۱۱۳.....	فصل ششم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات
۱۱۳.....	۱-۶. مقدمه
۱۱۳.....	۲-۶. نتیجه‌گیری
۱۲۰.....	۳-۶. پیشنهادات
۱۲۲.....	پیوست الف: معادله دینامیکی پاندول معکوس
۱۲۳.....	پیوست ب: معادله دینامیکی ربات دو درجه آزادی
۱۲۵.....	پیوست پ: قضیه همگرایی
۱۲۸.....	پیوست ت: اثبات پایداری و همگرایی پارامترها
۱۳۰.....	پیوست ث: تعریف ابزار ریاضی
۱۳۱.....	فهرست مراجع

فهرست تصاویر و نمودارها

فصل دوم

- شکل (۱-۲) سیستم کنترل تطبیقی غیر مستقیم ۱۷
- شکل (۲-۲) سیستم کنترل تطبیقی مستقیم ۱۷

فصل سوم

- شکل (۱-۳) ساختار شبکه عصبی پیشخورد سه لایه ۲۱
- شکل (۲-۳) گراف آموزش یک شبکه سه لایه با دو مرحله: انتشار مستقیم و پس-انتشار ۲۳

فصل چهارم

- شکل (۱-۴) تعیین هویت سیستم غیرخطی توسط شبکه‌های عصبی ۳۲
- شکل (۲-۴) مدل شبکه عصبی سیستم ۳۲
- شکل (۳-۴) نمودار ورودی-خروجی تابع ناحیه مرده D ۳۴
- شکل (۴-۴) ساختار کنترل کننده عصبی ۴۵
- شکل (۵-۴) خروجی سیستم با الف) $d_0=0.07$ ب) $d_0=0.03$ پ) $d_0=0$ ۵۱
- شکل (۶-۴) رفتار وزن w_{11} شبکه عصبی با الف) $d_0=0.07$ ب) $d_0=0.03$ پ) $d_0=0$ ۵۱
- شکل (۷-۴) خروجی سیستم به ازای سه حالت اولیه مختلف و با $d_0=0.05$ ۵۲
- شکل (۸-۴) خروجی سیستم برای مسئله رگولاسیون الف) با $d_0=0.09$ ب) با $d_0=0$ ۵۳
- شکل (۹-۴) تأثیر ناحیه مرده بر روی رفتار یکی از وزنهای انتخابی ۵۳
- شکل (۱۰-۴) ساختار تعلیم شبکه‌های عصبی برای شناسایی مدل ۵۵
- شکل (۱۱-۴) خروجی پاندول معکوس به ازای الف) $d_0=0.015$ ب) $d_0=0.01$ ۵۶
- شکل (۱۲-۴) رفتار یکی از وزنهای شبکه عصبی به ازای الف) $d_0=0.015$ ب) $d_0=0.01$ ۵۶
- شکل (۱۳-۴) ورودی اغتشاش به سیستم ۵۷
- شکل (۱۴-۴) خروجی سیستم کنترل شده در حضور اغتشاش الف) $q=0$ و $d_0=0.015$ ب) $q=3$ و $d_0=0.01$ ۵۷
- پ) $q=5$ و $d_0=0.005$ ت) $q=6$ و $d_0=0.005$ ۵۹

- شکل (۴-۱۷) خروجی پاندول با استفاده از الگوریتم تصویر و $\xi_{3f}=0.7$ ۶۲
- شکل (۴-۱۸) خروجی پاندول با استفاده از الگوریتم تصویر و $\xi_{3f}=0.1$ ۶۲
- شکل (۴-۱۹) خروجی پاندول معکوس در حضور اغتشاش در ورودی ۶۳
- شکل (۴-۲۰) خروجی پاندول معکوس در حضور اغتشاش در خروجی ۶۴
- شکل (۴-۲۱) خروجی پاندول معکوس در حضور اغتشاش پله‌ای در خروجی ۶۴
- شکل (۴-۲۲) خروجی‌های سیستم غیرخطی کنترل شده الف) x_1 ب) x_2 ۶۵
- شکل (۴-۲۳) خروجی‌های سیستم غیرخطی کنترل شده در حضور اغتشاش الف) x_1 ب) x_2 ۶۶
- شکل (۴-۲۴) خروجی‌های ربات با استفاده از کنترل کننده عصبی الف) زاویه بازوی اول
ب) زاویه بازوی دوم ۶۷
- شکل (۴-۲۵) خروجی‌های ربات با استفاده از کنترل کننده PD الف) زاویه بازوی اول ب) زاویه بازوی دوم ۶۸

فصل پنجم

- شکل (۵-۱) ساختار کنترل کننده عصبی ۸۵
- شکل (۵-۲) ساختار شبکه عصبی با یک لایه مخفی ۸۵
- شکل (۵-۳) الف) خروجی پاندول معکوس کنترل شده ب) خطای بین خروجی سیستم و خروجی مطلوب ۹۱
- شکل (۵-۴) تغییرات یکی از وزنهای انحراف داده شده ۹۱
- شکل (۵-۵) خروجی پاندول معکوس کنترل شده الف) خطای اولیه ۰.۲ ب) خطای اولیه ۰.۴ ۹۲
- شکل (۵-۶) خروجی ناپایدار سیستم پاندول معکوس به ازای خطای اولیه ۰.۵ و $\mu=0.004$ و $p_1=18$ ۹۲
- شکل (۵-۷) خروجی پایدار سیستم پاندول معکوس به ازای خطای اولیه ۰.۵ و $\mu=0.004$ و $p_1=20$ ۹۳
- شکل (۵-۸) خروجی پاندول معکوس در حضور اغتشاش الف) $K=0.05$ ب) $K=0.1$ پ) $K=0.2$ ۹۵
- شکل (۵-۹) خروجی پاندول معکوس کنترل شده الف) خطای اولیه ۰.۲ ب) خطای اولیه ۰.۴ ۹۶
- شکل (۵-۱۰) نحوه تغییرات یکی از وزنهای شبکه‌های عصبی به ازای خطای اولیه ۰.۲ ۹۶
- شکل (۵-۱۱) سیگنال ورودی کنترل الف) بدون استفاده از روش حذف فرکانس بالا ب) با استفاده از آن ۹۷
- شکل (۵-۱۲) خروجی سیستم کنترل شده در حضور اغتشاش الف) $K=0.05$ ب) $K=0.1$ پ) $K=0.2$ ۹۸
- شکل (۵-۱۳) الف) خروجی سیستم ب) سیگنال وردی کنترل پ) نحوه تغییر یکی از وزنهای شبکه عصبی
به ازای خطای اولیه صفر ۹۹
- شکل (۵-۱۴) خروجی پاندول معکوس کنترل شده الف) خطای اولیه ۰.۲ ب) خطای اولیه ۰.۳ ۱۰۰
- شکل (۵-۱۵) خروجی سیستم کنترل شده در حضور اغتشاش الف) $K=0.05$ ب) $K=0.1$ پ) $K=0.2$ ۱۰۱
- شکل (۵-۱۶) الف) خروجی سیستم و ندریل کنترل شده ب) سیگنال ورودی کنترل ۱۰۲
- شکل (۵-۱۷) الف) خروجی سیستم کنترل شده ب) سیگنال ورودی کنترل ۱۰۲
- شکل (۵-۱۸) خروجی سیستم ربات کنترل شده الف) $q1(0)=2, q2(0)=0$ ب) $q1(0)=-2, q2(0)=0$ ۱۰۴

- شکل (۱۹-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده در حضور اغتشاش به ازای
 الف) $K=0.005$ ب) $K=0.1$ پ) $K=0.5$ ت) $K=1$ ۱۰۵
- شکل (۲۰-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده در حضور اغتشاش الف) $K=0.1$ ب) $K=0.5$ پ) $K=1$ ۱۰۶
- شکل (۲۱-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده الف) $q1(0)=2, q2(0)=0$ ب) $q1(0)=-2, q2(0)=0$ ۱۰۶
- شکل (۲۲-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده در حضور اغتشاش به ازای
 الف) $K=0.05$ ب) $K=0.1$ پ) $K=0.5$ ت) $K=1$ ۱۰۷
- شکل (۲۳-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده در حضور اغتشاش الف) $K=0.1$ ب) $K=0.5$ پ) $K=1$ ۱۰۸
- شکل (۲۴-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده الف) $q1(0)=2, q2(0)=0$ ب) $q1(0)=-2, q2(0)=0$ ۱۰۹
- شکل (۲۵-۵) نحوه تغییرات وزنه‌های نمونه شبکه عصبی ۱۰۹
- شکل (۲۶-۵) خروجی ربات کنترل شده با استفاده از کنترل کننده PD ۱۱۰
- شکل (۲۷-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده در حضور اغتشاش به ازای
 الف) $K=0.05$ ب) $K=0.1$ پ) $K=0.5$ ت) $K=1$ ۱۱۱
- شکل (۲۸-۵) خروجی سیستم ربات کنترل شده در حضور اغتشاش الف) $K=0.1$ ب) $K=0.5$ پ) $K=1$ ۱۱۲

فهرست جداول

جدول (۱-۴) رابطه بین مقادیر d_0 و Δ	۵۲
جدول (۱-۵) رابطه بین مقادیر p_1 و d_0	۹۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱. کلیات

از جمله مباحثی که در مهندسی کنترل همواره مدنظر بوده و دارای اهمیت بسیار است، کنترل سیستمهایی است که دارای پیچیدگی، نامعینی و دینامیک‌های غیرخطی هستند. بر این اساس، برای طراحی کنترل اینگونه سیستمها تحقیقات بیشماری انجام گرفته که از جمله برای کنترل غیرخطی چندین روش پیشنهاد شده است. ساده‌ترین این روشها، تقریب خطی یک سیستم غیرخطی حول یک نقطه کار مشخص است که این روش برای سیستمهایی مناسب است که یا دارای دامنه کار محدود و یا دارای میزان کم غیرخطی باشند، که البته با توجه به حجم گسترده سیستمهای غیرخطی در عمل و نیز مسائلی از قبیل نامعینی‌ها و اغتشاشات در سیستم، کارایی این روش محدود می‌گردد. روشهای متداول دیگر در زمینه کنترل غیرخطی عبارتند از: کنترل تطبیقی^۱، کنترل مبتنی بر لیاپانوف^۲، کنترل مقاوم^۳، کنترل ساختار متغیر^۴.

یکی دیگر از روشهای کنترل غیرخطی که از دیرباز مورد توجه بوده، روش خطی‌سازی با فیدبک^۵ است که ایده اصلی آن انتقال یک سیستم غیرخطی به پایه جدید برای حذف غیرخطی‌ها و سپس استفاده از روشهای معمول کنترل خطی برای در اختیار گرفتن سیستم غیرخطی است. ولیکن مشکل این روش در این است که برای حذف کامل غیرخطی‌های سیستم نیاز به دانستن مدلی دقیق از سیستم است و لذا با حضور کوچکترین نامعینی در سیستم، حذف این جمله‌های غیرخطی غیرممکن می‌شود که این به نوبه خود موجب می‌گردد کنترل به خوبی صورت نگیرد. بنابراین برای کنترل چنین سیستمهایی که مدل آنها بطور دقیق مشخص نیست، باید در حین کنترل از روشهای شناسایی جهت استخراج مدل مناسب استفاده شود که یکی از موفق‌ترین روشها، کنترل تطبیقی است که از اوایل دهه ۶۰ میلادی کارهای جدی برای رشد و توسعه آن آغاز شده است و تاکنون بطور وسیع برای کنترل

1- adaptive control

2- Lyapunov-based control

3- robust control

4- variable structure control

5- feedback linearization

سیستمهای خطی که دارای پارامترهای نامعلوم باشند بکار گرفته شده است. در چند سال اخیر نیز سعی بر این بوده که این روش برای سیستمهای غیرخطی توسعه داده شود. این ایده برای سیستمهای زمان پیوسته با فرض اینکه غیرخطیهای سیستم را بتوان با تعدادی پارامتر نامعلوم بطور خطی پارامتر-سازی^۱ کرد بررسی شده است [۲۱] که البته این روش با توجه به فرض فوق، بخش محدودی از سیستمهای غیرخطی را دربرمیگیرد. برای برطرف کردن این مشکل تحقیقاتی انجام شده که می توان به کار مارینو و تومی^۲ [۳] اشاره کرد که در آن نیازی به خطی بودن پارامترهای نامعلوم نیست، ولی چون در این روش باید فرم کلی غیرخطی مشخص و همچنین پارامترهای غیرخطی نامعلوم به توابع معین محدود باشند، استفاده از این روش، محدود به برخی از سیستمهای خاص می شود. بنابراین برای مواجه نشدن با این مشکلات، روشهای دیگر شناسایی پیشنهاد می شود که استفاده از شبکههای عصبی از جمله آنهاست.

در سالهای اخیر با گسترش تحقیقات در زمینههای مختلف ثوری و کاربردی شبکههای عصبی، استفاده از آنها در حل مسائل مختلف، موضوع مورد علاقه جامعه کنترل شده است. شبکههای عصبی با توجه به توانایی پردازش موازی اطلاعات و داشتن پتانسیل خوب برای تقریب توابع غیرخطی می توانند به عنوان ابزاری برای دسته بندی کردن اطلاعات، شناسایی و کنترل سیستمهای غیرخطی بکار روند. از جمله پرکاربردترین نوع شبکههای عصبی، می توان به شبکههای عصبی چند لایه^۳ اشاره کرد. برای اولین بار در سال ۱۹۸۹ از این شبکهها، با توجه به توانایی بالای آنها در تقریب توابع غیرخطی، برای کنترل سیستمها استفاده شد [۴ و ۵]. ولی در واقع، ایده بکارگیری شبکههای عصبی چند لایه در کنترل تطبیقی سیستمهای قابل خطی سازی با فیدبک در سال ۱۹۹۰ و توسط نارندرا^۴ [۶] و چن^۵ [۷] مطرح گردید، که در روشهای بیان شده، در قانون کنترل خطی سازی با

1- linear parameterization

2- Marino and Tomei

3- multilayer neural networks

4- Narendra

5- Chen