



دانشگاه زنجان

پایان نامه کارشناسی

دانشکده مهندسی

گروه برق

گرایش: کنترل

عنوان:

شبیه سازی و کنترل حالت لغزشی پاندول معکوس

استاد راهنما: جناب آقای دکتر صالح مبین

نگارش: سمیه مرادی

شماره دانشجویی: 90450278

بهار ۹۶

چکیده

سیستم پاندول معکوس^۱، یک سیستم کاملاً غیرخطی و حلقه باز^۲ می باشد، بنابراین، کنترل چنین سیستم غیرخطی و ناپایدار، یک کار چالشی است. این تحقیق، ابتدا مدل غیرخطی سیستم را به منظور طراحی کنترل-

کننده برای سیستم پاندول معکوس فراهم می کند. هدف از این پروژه طراحی یک کنترل کننده خطی مربعی

بهینه و همچنین کنترل کننده PID و کنترل کننده مد لغزشی برای سیستم پاندول معکوس می باشد. در این

هدف، استراتژی کنترلی برای عملکرد بهینه در سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته و حالت های مختلف وضعیت

اولیه و نهایی متغیرهای حالت برای کنترل سیستم پاندول معکوس ارائه می گردد که شامل کنترل زاویه حرکتی

و موقعیت آن بوده است. سیستم پاندول معکوس دارای چالش های بسیاری برای کنترل بوده و بدون کنترل

کننده با کوچکترین تغییری به سمت ناپایداری سوق پیدا می کند. نتایج شبیه سازی در محیط متلب گویای

این واقعیت بوده که استفاده از روش کنترل رگولاتور بهینه خطی برای کنترل وضعیت حرکتی کابین و کنترل

زاویه پاندول معکوس و همچنین استفاده از روش کنترل کننده مد لغزشی نسبت به کنترل کننده PID، توانسته

است مفید واقع گردد. گذشته از این کنترل کننده می توان با استفاده از روش LQR و مد لغزشی نیز سیستم

را به عنوان یک سیستم تک ورودی و چهار خروجی و به عنوان یک سیستم چند متغیره در نظر گرفت که می

تواند به عنوان یک پیشنهاد در ادامه کار پایان نامه باشد.

کلمات کلیدی: سیستم پاندول معکوس، کنترل بهینه، LQR، کنترل کننده مد لغزشی،

کنترل کننده PID

^۱ Inverted pendulum system

^۲ Open-loop system

۴-۳	شرایط موجود برای حالت صعود.....	۱۸
۵-۳	طراحی قانون شبیه سازی کنترل.....	۲۱
۶-۳	مشکل تصادم و کاهش آن.....	۲۳
۷-۳	الغزش نمونه کنترل حالت.....	۲۵
۷-۳-۱	طراحی سطح لغزش.....	۲۶
۷-۳-۲	طراحی قانون کنترل.....	۲۷
۷-۳-۳	نتیجه شبیه سازی.....	۲۸
۷-۳-۴	طراحی یک عملکرد کنترل بدون اشکال با استفاده از عملکرد sigmoid-link.....	۲۹
فصل چهارم - طراحی کنترل کننده چرخ و پاندول معکوس.....		
۴-۱	مقدمه.....	۳۲
۴-۲	طرح کنترل PID.....	۳۴
۴-۱-۲	مقدمه.....	۳۴
۴-۲-۲	مشخصات و ویژگیهای D.I.P.....	۳۴
۴-۳	طرح رگولاتور خطی درجه دوم.....	۳۵
۴-۳-۱	مقدمه.....	۳۵
۴-۳-۲	معادله درجه دوم مطلوب برای تعدیل کننده (رگولاتور).....	۳۵
۴-۴	طرح کنترل حالت لغزش.....	۳۸
۴-۴-۱	صفحه سوئیچینگ.....	۳۹
۴-۴-۲	محاسبه بهروری.....	۴۰
فصل پنجم.....		
طراحی کنترل کننده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان		

فصل اول

کنترل حالت لغزشی پاندول معکوس

۱- مقدمه

سیستم پاندول معکوس از جمله سیستم های مورد علاقه در مهندسی کنترل می باشد. این سیستم در گروه سیستم های با درجات بالا و دارای ترم های غیر خطی و نامینیمم فاز قرار می گیرد. از اینرو سیستم بشدت و ذاتا غیرخطی می باشد و مناسب آن است تا با استفاده از روش های کنترل غیرخطی به کنترل آن پرداخته و سیستم کنترلی خود را با آن ارزیابی و آزمایش نمائیم. ربات های حمل کننده دوچرخ چند سالی است که مورد علاقه قرار گرفته اند. از اینرو آنها راها های مختلفی را برای کنترل موقعیت و حرکت خود فراهم می آورند. در حقیقت در این سیستم می توان مانند پاندول معکوس از یک موتور برا حرکت سیستم در جهت افق بهره جست در حقیقت با تغییر مکان چرخ ها و بدنه، پاندول که همان دسته ای است که انسان آنرا می گیرد در زاویه خاص

و یا به صورت عمودی قرار می گیرد. ثابت نگه داشتن آن هدف اصلی کنترلی بوده چرا که بدون کنترل کننده مناسب، پاندول می افتد و به اصطلاح سیستم ناپایدار می گردد. بنابراین کاربر توانایی کنترل سرعت و حرکت آنرا با بازوی که کنترل سیستم می باشد بر عهده دارد. در حقیقت ما با استفاده از روش کنترلی سیستم را به یک نقطه غیر پایدار ولی تعدلی بروی و سعی داریم با تغییر دادن موقعیت حرکتی کابین، آنرا در زاویه خاص ثابت نگه می داریم. روش های کنترلی مختلفی برای کنترل سیستم پاندول معکوس مطرح شده است. که از جمله آنها می توان به کنترل کننده PID، PD، MPC، کنترل کننده فازی و... اشاره نمود. به هر حال استفاده از کنترل کننده های کلاسیک به دلیل فقدان قوام در آنها نمی توانند برای کنترل سیستم پاندول معکوس با ترم های غیرخطی مفید واقع گردند. از اینرو استفاده از دانش ها و کنترل کننده های مدرن برای سیستم پاندول

معکوس مطرح شده است. از اینرو استفاده از رگولاتور بهینه مربعی خطی می تواند مفید واقع گردد. این کنترل کننده با تولید یک قانون کنترلی فیدبک حالت و با بهره های کنترلی که با استفاده از الگوریتم درونی سیستم

کنترلی طراحی می گردد می تواند با جابه جا کردن قطب های نامطلوب سیستم، باعث پایداری و کنترل

سیستم گردد. در این الگوریتم هدف کمینه کردن شاخص عملکرد سیستم بوده که در نتیجه با طراحی ماتریس

های وزنی بخصوصی این مسأله رخ می دهد. ماتریس های وزنی در حل مسأله ریکاتی مورد استفاده قرار گرفته

و از حل آن قانون کنترلی تولید می گردد. پس از معرفی مختصر در ادامه مدل مکانیکی و ریاضی سیستم

پاندول معکوس را مورد ارزیابی قرار داده و هدف خود را خطی کردن و بدست آوردن یک مدل فضای حالت

برای سیستم فوق قرار می دهیم. سپس به معرفی روش رگولاتور بهینه خطی پرداخته و به طراحی کنترل

کننده مناسب برای سیستم پاندول معکوس با استفاده از روش فوق می پردازیم و با کمک گیری از کمینه کردن

شاخص عملکردی کنترل بهینه خروجی های سیستم که تغییر وضعیت و تغییر زاویه ای آن می باشد را کنترل

کرده و در انتها به شبیه سازی سیستم در محیط متلب می پردازیم. شواهد گویای این واقعیت بوده که سیستم

کنترلی به خوبی توانسته است سیستم پاندول معکوس را در یک وضعیت مطلوب پایدار ثابت نگه دارد و این

الگوریتم از قوام بالایی در کنترل سیستم های غیرخطی و دفع اثر اغتشاش و نویز برخوردار است.

۱-۲ ادبیات مورد مطالعه

مفهوم کنترل مد لغزشی در اواخر دهه ۱۹۷۰ شروع شده و تا به امروز ادامه دارد. این روش جذابیت های زیادی

بخاطر عدم حساسیت به اختلالات و متغیرهای پارامترها دریافت نموده است. حالت کشویی یا حالت لغزنده

(SMC) نوع خاصی از ساختار متغیر سیستم کنترل (VSCS) است. اخیرا بسیاری از برنامه های عملی موفق،

در حالت لغزشی کنترل (SMC) اهمیت نظریه لغزشی را ایجاد کرده اند، که در سه دهه گذشته به طور عمده

توسعه یافته اند. نظریه لغزشی کنترل SMC تا زمانیکه آتکین^۳ مقاله ای در این خصوص منتشر کرد برای

جامعه کنترل ناشناخته بود. الگوریتم کنترل حالت لغزشی به طور دقیق برای همان حالت نیز در منابع

[۲] و [۳] توسعه یافت است. الگوریتم حالت لغزشی کنترل در منابع [۴] و [۵] یافت می شود. تلاش های پیاده

سازی الگوریتم حالت کنترل لغزشی در یک سیستم پاندول معکوس در منابع [۱۰] و [۱۳] ساخته شده است.

^۳ Utkin

که در خصوص بحث در حالت کنترل لغزشی جامع متناسب را می توان در بخش منبع [۱۳] یافت. در حالی که کنترل کننده لغزشی متناسب و جامع در منابع [۱۹] و [۲۰] و [۲۱] بکار رفته اند. کنترل کننده لغزشی متناسب در منبع [۱۰] بحث شده است. کل مباحث ارائه شده در بالا با استفاده از حالت کنترل لغزشی معمولی طراحی شده اند. بر فرمول بحث شده در منابع [۸] و [۹] که توسط آکرمن ارائه شده است، کنترل کننده های زیادی وجود دارند که از سیستم کنترل کننده پاندول معکوس استفاده می کنند. که در منابع [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] مورد بحث قرار گرفته اند. اطلاعات سیستم پاندول معکوس که در پایان نامه من در نظر گرفته شده است با جزئیات در منبع [۱۵] بحث شده است. در منبع [۱۵] یک سیستم پاندول معکوس خطی استفاده شده است. در این پایان نامه کنترل کننده لغزشی را مورد استفاده قرار می دهم که از فرمول آکرمن که در منبع [۸] و [۹] بحث شده است، برای سیستمی که در منبع [۱۵] تشریح شده بکار برده ام.

۳-۱ انگیزه

کنترل موشک یک مشکل کلاسیک در مهندسی هوا فضا^۴ است. موشک ها با بدنه ای استوانه ای قائم و بلند که اغلب کاملاً برخلاف جاذبه حرکت می کنند، گرانیگاه^۵ آنها در نقطه بالایی واقع، و تنها با دادن فرمان از انتها پائین قابل کنترل هستند. کنترل کننده برای یک سیستم هدایت موشک نه تنها باید بتواند جهت حرکت را کنترل کند بلکه قادر به کنترل انواع مختلف ارتعاشات ناشی از شکل دراز آن باشد. همه این ویژگی های موجود در یک سیستم پاندول معکوس می باشد. بنابراین به عنوان یک نمونه پاسخ گو در تجهیزات مختلف هوا فضا مورد استفاده قرار می گیرد. چرخ و سیستم پاندول معکوس همچنین آزاد کننده قیاسی در بازوی کنترل^۶ در باتیک می باشد.

۴-۱ شرح مشکل

بخش اول از مشکل شامل مدل سازی و خطی کردن آن در اطراف نقطه تعادل ناپایدار است. سپس در بخش دوم جابه جایی کنترل PID و PID+LQR برای سیستم بطوری که سیستم پاندول معکوس بتواند در نقطه تعادل ایجاد ثبات کند. به عنوان مثال ایجاد ثبات در پاندول منجر به موقیعت عمودی پایدار شده و خطای حالت ماندگار و پایدار صفر می شود صرف از نظر از اینکه PID و PID+LQR یک کنترل کننده لغزشی هستند که برای مقایسه پاسخهای سه کنترل کننده دیگر طراحی شده اند. تغذیه ورودی سیستم از کمی حد تنظیم زمان

^۴ aero-space engineering

^۵ gravity

^۶ Arm control

۵-۱ ترتیب پایان نامه

این پایان نامه شامل ۶ فصل است، فصل اول: خلاصه ای از پایان نامه های فصل دوم: توضیحی از سیستم فیزیکی و مدل ریاضی از وسایل و تجهیزات ارائه می دهد. فصل دوم: در مورد SMC و مراحل طراحی آن مبحث می کند. همچنین شرایط وجود SMC و روش کنترل در این فصل ارائه می شود. روش و کاهش تضادم نیز آدرس دهی شده است این بخش با برخی مثالها SMC نتیجه گیری شده و تمام شده است. فصل چهارم: در مورد سه نوع کنترل کننده متفاوت برای کنترل سیستم پاندول معکوس بحث می کند. همچنین خلاصه ای از آزمایشات و توضیحات مراحل طراحی PID و PID+LQR و کنترل کننده SMC نیز مورد بحث قرار گرفته است. فصل پنجم: نتیجه شبیه سازی کامپیوتر^۷ را که در فصل چهار توضیح داده می شود ارائه می دهد در این فصل همچنین یک مقایسه ای انجام شده است. فصل ۶: نتیجه گیری بر اساس کنترل و چشم اندازهای آینده به دست می دهد.

^۷Computer simulation

فصل ششم

6-1 نتایج

از نتایج شبیه سازی نشان داده شده در فصل قبل می توان نتیجه گرفت که روشهای کنترل متعارفی قدیمی

مانند LQR وضعیت چرخ و زاویه پاندول را برای یک سیستم پاندول معکوس خطی کنترل کند، همانگونه که

سیستم غیر خطی پاندول معکوس خطی شده است. پس یک وضعیت ثابت و پایدار خطا در پاسخهای سیستم

حاضر خواهد بود زمانیکه از کنترل کننده های LQR استفاده می شود .

2-6 چشم انداز تحقیقات و کارهای آینده

در مهندسی سیستم های کنترل چشم اندازهای بسیاری وجود دارد برای اینکه تعادل پاندول معکوس را نشان

دهند. تنها کنترل کننده های قدیمی (کلاسیک) در این پروژه مورد بحث قرار گرفتند تعادل پاندول معکوس با

استفاده از دیگر انواع کنترلرها به عنوان تحقیقات آینده باقی مانده است. کنترل کننده هایی با هوش

مصنوعی، مانند به کارگیری الگوریتم ژنتیکی و آزمایش بهینه سازی دسته ای می توانند هدف این تحقیقات

قرار گیرند.

منابع

[1] V. I. Utkin, Sliding Modes and Their Application in Variable Structure System, Translated from the Russian by A. Parnakh, Mir Publishers, 1978.

[2] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," IEEE Trans. Automatic Control, Vol.22, no.2, pp.212-222, 1977.

[3] C.Edward, S.H. Spurgeon, Sliding Mode Control: Theory and Applications, Taylor and Francis Ltd, UK, 1988.

[4] R.A. De Carlo, S.H Zak, G.P. Matthews, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable systems: A Tutorial," in the Proceedings of IEEE, vol.76, no.3, pp.212-232, 1988.

[5] J.Y. Hung, W. Gao, J.C. Hung, "Variable Structure Control: A Survey," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.40, no.1, 1993.

[6] Katsuhiko Ogata, University of Minnesota, A text book of "Modern Control Engineering", ISBN-81-203-X.

[7] Netranjeeb Lenka, "Modeling and Controller Design for an Inverted Pendulum System," MTech thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2011.

[8] Jurgen Ackermann and Vadim I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Based on Ackermann's Formula," Proceedings of the 33rd, Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, FL - December 1994, 0-7803-1 968-0/94\$4.0001994 IEEE.

[9] Juergen Ackermann and Vadim Utkin, "Sliding Mode Control Design Based on Ackermann's Formula," IEEE Transactions on Automatic Control, VOL. 43, NO. 2, February 1998.

[10] A. Banrejee, M. J. Nijam, "Design of Proportional Sliding Mode Controller for Linear One Stage Inveerted Pendulum", Power Engineering and Electrical Engineering, Volume:9, Number:2, 2011.

[11] A journal by Ahmad Nor Kasruddin Bin Nasir, Universiti Technology Malaysia, "Modelling and controller design for an inverted pendulum system", 2007.

[12] B. Bandyopadhyay, Kyung-Soo Kim and Fulwani Deepak, "Sliding Mode Control Using Novel Sliding Surfaces," ISBN 978-3-642-03447-3, LCCN:2009933690, ISSN 0170-8643, ©2009 Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[13] A. N. K. Nasir, R. M. T. Raja Ismail and M. A. Ahmad, "Performance Comparison between Sliding Mode Control (SMC) and PD-PID Controllers for a Nonlinear Inverted Pendulum System," World Academy of Science, Engineering and Technology 71 2010.

[14] L. B. Prasad, B. Tyagi and H. O. Gupta, "Modelling & Simulation for Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System using PID Controller & LQR," DOI 10.1109/AMS.2012.21 Sixth Asia Modelling Symposium.

[15] L. B. Prasad, B. Tyagi and H. O. Gupta, "Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System with Disturbance Input using PID Controller & LQR," 2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering. 978-I-4577-1642-3/11/\$26.00 ©2011 IEEE.

[16] A. Rybovic, M. Pricinsky and M. Paskala, "Control of Inverted Pendulum Using State Feedback Control," 2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering. 978-I-4673-1179-3/12/\$31.00 ©2012 IEEE

[17] C. Kumar, S. Lal, N. patra, K. Haldar, M. Reza, "Optimal Controller Design for Inverted Pendulum System based on LQR method," 2012 IEEE international Conference on Advance Communication Control and Computing Technologies. ISBN No.978-1-4673-2048-1/12/\$31.00 ©2012 IEEE

[18] Yong Xin, Jian Xu, Bo Xu and Hui Xin "The Inverted-Pendulum Model with Consideration of Pendulum Resistance and its LQR Controller," 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 978-1-61284-088-8/11/\$26.00 ©2011 IEEE.

[19] P. Bhavasar, V. Kumar, "Trajectory Tracking of Linear Inverted Pendulum Using Integral Sliding Mode Control," MECS, I.J. Intelligent System and Applications, 2012, 6, 31-38 DOI:10.5815/2012.06.04.

[20] Huy-Tung Le, Sang-Ryong Lee, Choon-Young Lee, "Adaptive Global Asymptotic Stable Based on Model Reference and Disturbance Attenuation for MIMO Uncertain Linear Systems with Persistent Disturbances," ICIC International ©2012 ISSN349-4198, Volume 8, Number 2, February 2012, pp. 1175-1190.

[21] M. Basin, A. Ferreira and L. Fridman, "Sliding Mode Identification and Control for Linear Uncertain Stochastic System," International Journal of Systems Science, Vol. 38, No.11, November 2007, 861-869.

[22] Control Tutorials for Matlab, THE UNIVERSITY OF MICHIGAN, 1817.
<http://www.engin.umich.edu/group/ctm/PID/PID.html>

[23] Aritro Day, "Sliding Mode Compensation of Inverse Dynamics Velocity Control," MTech thesis, Department of Electrical Engineering, Jadavpur