طراحی کنترل کننده ربات پاندول معکوس دوچرخ با روش مد لغزشی

مرتضی حیاتی\*1،علی رحمانی هنزکی2 ،احسان سوایی3

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیرشهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

3-دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

\*تهران، صندوق پستی16785-136، morteza1224asdf@gmil.com

چکیده

ربات پاندول معکوس دوچرخ از جمله ربات­های تعادلی می­باشد، که دارای رفتاری غیر­خطی بوده و به طور ذاتی ناپایدار است. این ربات دارای دوچرخ در طرفین، بدنه واسطه بوده که بدنه نیز شامل شاسی و پاندول می­باشد. در این مقاله با استفاده از روش اویلر-لاگرانژ، معادلات دینامیک غیرخطی ربات با سه درجه آزادی نوشته شده، و با استفاده از یک روش سریع و دقیق سه کنترل کننده مد لغزشی به طور مجزا برای پایداری زاویه پاندول، ردیابی زاویه جهت گیری ربات (یاو) و جابجایی ربات مورد استفاده قرار می­گیرد. برای شبیه سازی نیز از نرم افزار سیمولینک متلب استفاده شده است. برای این منظور، پارامترهای یک ربات پاندول معکوس دوچرخ آزمایشگاهی (موجود در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه شهید رجایی) با اندازه­گیری استخراج شده، و برای شبیه سازی مورد استفاده قرار می­گیرد. نتایج شبیه سازی نشان می­دهد که با وجود عدم قطعیت­ها که ناشی از نامعلوم بودن پارامترهای دقیق سیستم بوده و همچنین اغتشاشات وارده، پایداری سیستم تضمین شده است. برای جلوگیری از بوجود آمدن پدیده چترینگ در سیستم، از تابع اشباع به جای تابع علامت استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می­دهد که علاوه بر تعادل زاویه پاندول، جابجایی و زاویه جهت­گیری حرکت ربات به خوبی ردیابی می­شود. البته همواره باید توازنی بین نوسان سیگنال کنترلی و دقت ردیابی در نظر گرفته شود.

**کلی**د‌واژگ**ان**

ربات پاندول معکوس دو چرخ، ربات تعادلی، کنترل کننده مد لغزشی

Controller design for a two-wheeled inverted pendulum robot using sliding mode approach

Morteza Hayati1\*, Ali Rahmani Hanzaki2, Ehsan Savaee3

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B.16785-136 Tehran, Iran, morteza1224asdf@gmail.com

Abstract

Two-wheeled inverted pendulum (TWIP) robot is one of the balancing robots, which has nonlinear behavior and it is inherently unstable. The robot has two wheels next to each other, and an intermediate body with chassis and a pendulum. In this paper, Three-Dof nonlinear dynamic equations are written using Euler- Lagrange method. Then employing an accurate and rapid approach, three individual sliding mode controllers are utilized for the stability of pendulum angle, tracking orientation angle (yaw), and displacement of the robot. In the following, the simulation is fulfilled in Matlab/Simulink environment. For this purpose, the parameters of a two-wheeled inverted pendulum robot (available in the Robotics laboratory of Shahid Rajaee Uni.) are extracted, by measuring and utilized for simulation. The simulation results show that despite the uncertainties, which is due to the unknown exact parameters, as well as the disturbances in the system, the stability of the system is guaranteed. To prevent the chattering phenomenon in the system, the saturation function is used instead of the sign function. The simulation results show that in addition to the balance of the pendulum angle, the displacement and the orientation angle of the robot's movement are well traced. It is obvious that equilibrium must always be considered between the fluctuation of the control signal and the tracking accuracy.

Keywords

Two wheeled inverted pendulum robot, (TWIP), balancing robot, sliding mode controller

1. مقدمه

امروزه ربات های متحرک در همه جا به طور چشمگیری حضور داشته و در کاربردهای گوناگونی از قبیل اکتشاف و جستجو در فضاهایی که برای انسان سخت یا با خطر مواجه است، عملیات امداد و نجات، حمل مواد و تجهیزات و همچنین به منظور سرگرمی مورد استفاده قرار می گیرند. با وجود اینکه ربات های پادار قادر به حرکت از روی موانع هستند ولی به دلیل درجه آزادی بالاتر، دارای پیچیدگی­های بیشتری در طراحی و کنترل می­باشند.از سوی دیگر، ربات

های چرخ دار انرژی کمتری مصرف می­کنند و با توجه به ساختار مکانیکی جمع­و­جورتر­، دارای دینامیک ساده­تری در مقایسه با ربات پادار می­باشند. ربات­های دارای حداقل سه چرخ به صورت استاتیکی پایدار هستند، ولی ربات­های دو چرخ به صورت ذاتی ناپایدار بوده و کنترل آنها با مشکلاتی همراه است. ربات دوچرخ پاندول معکوس که از ربات­های تعادلی معروف است، دارای قابلیت چرخش حول یک نقطه و مانورپذیریی بالا است. بنابراین، از این ربات در مکان­های باریک و پرجمعیت استفاده می­شود. سگوی[[1]](#footnote-1)که یکی از اینگونه ربات­ها است، که اخیرا در گشت­زنی­های شهری، یا به عنوان ربات سرویس دهنده (خدمتکار)[[2]](#footnote-2) بکار می­رود. ربات ان بوت[[3]](#footnote-3) [1] یکی دیگر از نمونه ربات­های تعادلی است که توسط دیوید اندرسون ساخته شده است. علاوه بر این، ربات پاندول معکوس دارای سیستم کم­محرک[[4]](#footnote-4) غیر­خطی، چند ­متغیره، و ناپایدار می­باشد. کم­محرک به سیستمی اطلاق می ­شود که تعداد محرک­های قابل کنترل آن کمتر از تعداد درجه آزادی سیستم است. کنترل سیستم­های کم­محرک از روش ­های رایج کنترل کلاسیک قابل اجرا نمی­باشد [2]. چنانچه یک سیستم کنترلی کم­محرک خوب کار کند باعث کاهش پیچیدگی, هزینه و وزن سیستم می­شود. در مواقعی که در سیستم­های چند متغیره یکی از محرک­ها خراب شود، سیستم کنترلی به صورت سیستم کم­محرک عمل می­کند و جبران محرک از مدار خارج شده، را می­نماید [3]. برای مدل­سازی ریاضی حرکت ربات از روش های نیوتن-اویلر و لاگرانژین و کین[[5]](#footnote-5) استفاده می­شود. در خصوص کنترل این ربات­ها، کارهای زیادی گزارش شده است. از آن جمله، در مرجع [4] سیستم به صورت خطی تقریب زده شده است، و ژاکوبین خطی، قبل از طراحی کنترل کننده خطی، بدست آمده است. در مرجع[5] از کنترل کننده با سه قسمت مجزا استفاده شده است، کنترل تعادل و سرعت، کنترل زاویه سر ربات، و کنترل مسیر حرکت. همچنین مراجع [7-6] به مدل­سازی و کنترل سیستم­هایی با دو درجه آزادی پرداخته است. اولین هدف در کنترل ربات، حفظ تعادل و جلوگیری از افتادن آن بوده و سپس ردیابی[[6]](#footnote-6) یک مسیر[[7]](#footnote-7) یا سرعت مشخص می­باشد. برخی از روش­های کنترل خطی، بر روی مدل خطی شده ربات به کار گرفته شده است. روش کنترل بهینه خطی یک روش رایج است و در مقایسه با سایر روش­های کنترل خطی رفتار بهتری دارد [8]. هان و همکاران در [9] یک مدل خطی را با استفاده از یک ماتریس بهره پایدار کردند. همانطور که در شکل1 نشان داده شده است، در این روش با استفاده از جایگذاری قطب های مطلوب سیستم، همه حالت­های سیستم، پایدار می­شود، و می­توان عملکرد مورد انتظار در زمان نشست و فراجهش را به دست آورد.

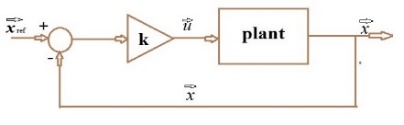


Fig. 1 Linear tracking controller

شکل1 کنترل ­ردیابی خطی

البته اوی و همکاران در [10] نشان دادند که روش جایگذاری قطب نسبت به اغتشاش مقاوم نمی­باشد، اما کنترل کننده مد لغزشی نسبت به اغتشاشات خارجی و نامعینی های سیستم مقاوم است. روش های کنترل فازی برای ربات تعادلی در مراجع [13-11]، و روش کنترل هوشمند شبکه عصبی در [14] گزارش شده است. کنترل گام به عقب [15] و [16] و کنترل تطبیقی [17] نیز جزء روش­های کنترل مقاوم هستند که برای ربات پاندول معکوس بکار رفته­اند.

2-معادلات دینامیکی

ترسیمه یک ربات پاندول معکوس در شکل­2 نشان داده شده است. این ربات از دو قسمت، چرخ­ها و بدنه تشکیل شده است که بدنه بین چرخ­ها قرار داشته و شامل شاسی و میله پاندول متصل به آن است. جدول1 متغیرها و پارامترهای ربات را نشان می­دهد.

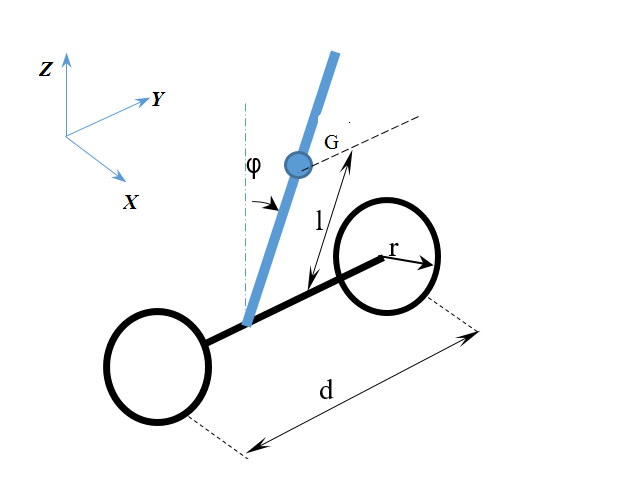


Fig. 2 shematic diagram of the TWIP

شکل2 نمودار شماتیک از پاندول معکوس

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول1 : متغیرها و پارامتر­های ربات پاندول معکوس  Table 1-Inverted Pendulum parameters and variables | | | | |
| **نماد** | | **عنوان** | | |
|  |  | | فاصله بین چرخ ها در راستای محورچرخ ها | |
|  |  | | شتاب جاذبه زمین | |
|  |  | | ممان اینرسی بدنه واسطه حول محور چرخ | |
|  |  | | ممان اینرسی چرخ، حول محور چرخ | |
|  |  | | ممان اینرسی چرخ حول محورZ که از نقطه O می­گذرد | |
|  |  | | ممان اینرسی بدنه واسطه حول محورZ که ازنقطه O می­گذرد | |
|  |  | | فاصله مرکز ثقل ربات از نقطه O | |
|  |  | | جرم بدنه واسطه | |
|  |  | | جرم چرخ | |
|  |  | | شعاع چرخ | |
|  |  | | گشتاور محرک چرخ راست و چپ | |
|  |  | | سرعت ربات | |
|  |  | | جابجایی ربات در صفحه X-Y | |
|  |  | | مختصات نقطه O در صفحه X-Y | |
|  |  | | زاویه جهت­گیری ربات | |
|  |  | | زاویه چرخش چرخ چپ و راست | |
|  |  | | زاویه کج­شدن پاندول | |
|  |  | | |

اگر چرخ­ها دارای چرخش خالص و بدون لغزش باشند، قیود غیر­هولونومیک حاکم بر شاسی به صورت زیر خواهد بود.

(1)

اگر q = (Xo, Yo, θ, φ, θr, θl ) را به عنوان مختصات تعمیم یافته ربات در نظر گرفته شده، و معادلات قیدی به فرم زیر بازنویسی می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

(3)

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

که در فضای پوچی ماتریس به صورت زیر ارائه می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |
| (6) |  |

که در آن v سرعت ربات می­باشد که عمود بر محور چرخ ها در نقطه o است. رابطه (7)، مجموع انرژی جنبشی انتقالی و دورانی چرخ­های ربات است.

(7)

و انرژی جنبشی انتقالی (8) و دورانی بدنه واسطه (9) است.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (8) |  | |
| (9) | |  |

در اینجا ممان اینرسی Iz به موقعیت پاندول (φ) وابسته است. اما برای زوایای کوچک پاندول از تغییرات آن صرفنظر شده و ثابت در نظر گرفته شده است. این مسأله توسط پاخک و همکاران [18] مورد بررسی قرار گرفته و ممان اینرسی در دستگاه متحرک بدست می آید. چرا که تغییر در زاویه پاندول سبب جابجا شدن مرکز جرم ربات شده و موجب تغییرات ممان اینرسی می­شود. رابطه (10) انرژی پتانسیل گرانشی را نشان می­دهد.

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

تابع لاگرانژین

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |

با استفاده از معادله اویلر-لاگرانژ، معادله دینامیکی سیستم به شکل زیر بدست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (12) |  |

در اینجا T بردار گشتاور ورودی موتور و 𝜆 بردار ضرایب لاگرانژ است. با مرتب کردن متغیرهای مرتبه اول و دوم، سیستم به فرم زیر بدست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (14) |  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| (15) |  |

با مشتق گیری از دو طرف معادله (5) نسبت به زمان و جایگذاری در معادله (13) بدست می­آید.

(16)

که از سمت چپ به طرفین معادله (16) ضرب شده است، و منجر به حذف ضرایب لاگرانژ می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (17) |  |
| (18) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| (19) |  |

با ساده سازی معادله

|  |  |
| --- | --- |
| (20) |  |

که در آن است.

در نهایت معادلات دینامیکی را به فرم زیر بازنویسی می­شود.

(21)

که در اینجا

(22)

3- طراحی کنترل کننده

3-1- طراحی کنترل کننده مد لغزشی

در این قسمت کنترل کننده مد لغزشی برای تعادل پاندول و ردیابی جابجایی و زاویه چرخش ربات طراحی می­شود. سه کنترل کننده به صورت مجزا طراحی شده، و با شبیه سازی نشان داده شده است، که این امکان عملی می­باشد.

سطح لغزش برای کنترل تعادل پاندول به فرم زیر انتخاب می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (23) |  |

مقدار ثابت مثبتی است که بایستی تعیین ­شود.

برای رسیدن مسیر سیستم به سطح لغزش از مشتق گرفته شده، و دینامیک سطح لغزش را با تابع علامت به صورت زیر آورده شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (24) |  |

*در اینجا مقداری ثابت است، و برای اینکه سطح لغزش یک سطح جاذب باشد معادله*(21) *در رابطه (*24*) جایگزین می­شود.*

(25)

و در نهایت قانون کنترلی برای پایداری زاویه پاندول بترتیب زیر بدست می­آید.

(26)

*برای ردیابی جابجایی ربات در صفحه، ابتدا معادله حرکت ربات تولید می­شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (27) |  |

*که جابجایی مطلوب تولید شده،v سرعت ثابت ربات وt زمان می­باشد. سپس خطای ردیابی را با رابطه (*28*) نوشته می­شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (28) |  |

*سطح لغزش براساس خطای ردیابی انتخاب می­شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (29) |  |

*که مقدار ثابت مثبت می­باشد. حال دینامیک سطح لغزش بدست می­آید و برای اینکه این سطح لغزش جاذب باشد، از تابع علامت به فرم معادله (*30*) استفاده می­شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (30) |  |

*با جایگذاری معادله دینامیک ربات (*21*) در رابطه (*30*)، سیگنال ورودی کنترلی را بدست می­آید.*

(31)

*به طور مشابه برای ردیابی چرخش ربات، ابتدا زاویه چرخشی ربات در صفحه به فرم رابطه*(32) *نوشته می­شود، تا یک منحنی شبه سینوسی را در صفحه xy تولید شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (32) |  |

*سپس خطای ردیابی زاویه چرخش را با معادله (33) بدست می­آید.*

|  |  |
| --- | --- |
| (33) |  |

*برای ردیابی زاویه چرخش، سطح لغزش براساس خطای ردیابی زاویه چرخش تعریف می­شود.*

|  |  |
| --- | --- |
| (34) |  |

*سپس دینامیک سطح لغزش بدست آمده، و برای اینکه سطح لغزش جذب کننده باشد از تابع علامت استفاده می­شود. برای این منظور با مشتق­گیری از رابطه*(34)  *و جایگذاری معادله دینامیکی ربات* (21) *در مشتق رابطه* (34) *سیگنال ورودی کنترلی را بدست می­آید.*

|  |  |
| --- | --- |
| (35) |  |

3-2- تحلیل پایداری

در حقیقت مدل دینامیکی سیستم با یک سری عدم قطعیت و نامعینی همراه است و نمی­تواند تمام جزئیات سیستم را بیان کند. معادله دینامیکی سیستم واقعی با پارامترهای نامعین به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (36) |  |

که پارامتر نامعین سیستم است. با انتخاب یک تابع لیاپانف به­صورت

|  |  |
| --- | --- |
| (37) |  |

و مشتق گیری نسبت به زمان

|  |  |
| --- | --- |
| (38) |  |

و با استفاده از معادلات (24)و (36) و کنترل کننده (26) رابطه (38)دوباره بازنویسی می­شود.

Fig. 3 Matlab Simulink block diagram

شکل3 نمودار بلوک سیمولینک در متلب

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (39) |  | |
| (40) | |  |

بنابراین کنترل کننده (26) تضمین می­کند که در صورت برقراری شرط(40)، سیستم پایدار می­شود. بطور مشابه برای تحلیل ردیابی جابجایی و زاویه چرخش ربات، با انتخاب مناسب ضرایب ثابت، اثبات می­شود که سیگنال­های کنترلی می­تواند سیستم را پایدار کند.

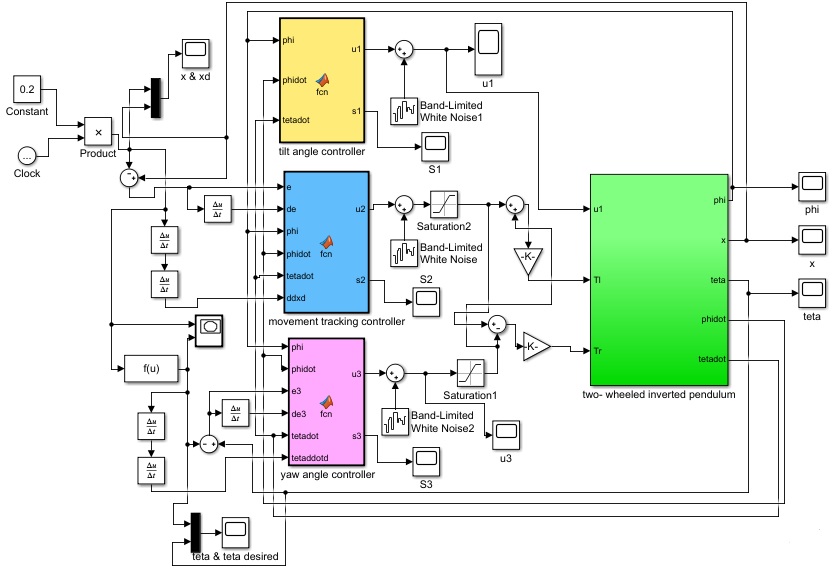
4- شبیه سازی

به منظور پیاده سازی کنترل ربات پاندول معکوس دوچرخ، از قسمت سیمولینک نرم افزار متلب استفاده شده است. شکل3 نمودار بلوک شبیه سازی را نشان می­دهد، که از سه کنترل کننده استفاده شده است، و سیگنال­های ورودی کنترل کننده همراه با اغتشاش است، همچنین از تابع اشباع برای محدود کردن دامنه سیگنال کنترلی استفاده شده است.

جدول2، پارامترهای ربات آزمایشگاهی را برای شبیه سازی نشان می­دهد. **جدول2:** اندازه­ها و مشخصات ربات

**Table. 2** sizes and parameters of the Robot

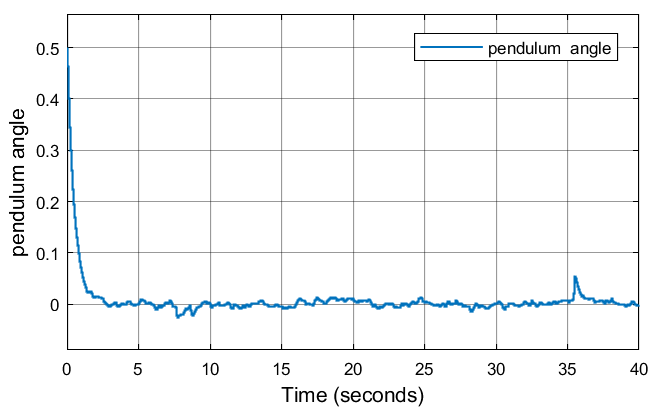
|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |



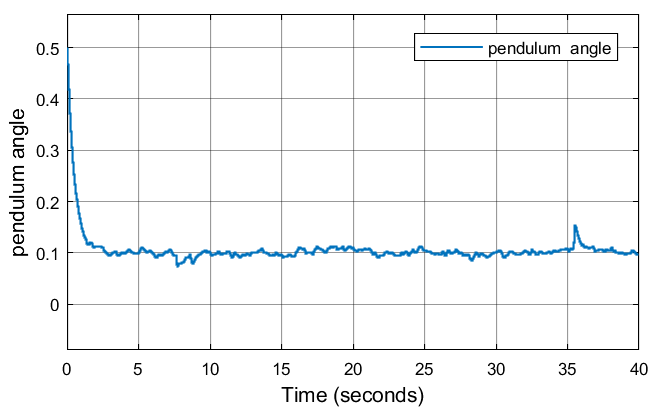
در شبیه سازی، برای جلوگیری از چترینگ از تابع اشباع به جای تابع علامت در کنترل کننده ها استفاده شده است. در شکل­4، پاندول دارای شرط اولیه انحراف زاویه­ای 0.5 رادیان دارد، و پس از اعمال کنترل ­کننده در زاویه صفر پایدار شده است. در شکل­5 زاویه تعادل پاندول 0.1 رادیان در نظر گرفته شده است. لازم است برای زاویه تعادل غیر صفر معادله سطح لغزش(23) به فرم زیر نوشته شود

|  |  |
| --- | --- |
| (41) |  |

که در اینجا زاویه تعادل است، و اغتشاش نیز وجود دارد و زاویه اولیه پاندول 0.5 رادیان است. در شکل­6 ردیابی جابجایی ربات با سرعت ثابت ربات را نشان می­دهد و در شکل7 ردیابی زاویه چرخشی سینوسی تولید شده را نشان می­دهد. با افزایش دقت ردیابی، نوسانات سیگنال کنترلی نیز زیاد خواهد شد. همواره باید بین مشخصات ردیابی قابل قبول و میزان نوسانات سیگنال کنترلی توازنی برقرار کنیم. همچنین از تابع اشباع برای محدود کردن دامنه سیگنال کنترلی استفاده شده است. در بررسی اثر اغتشاش بر روی ردیابی جابجایی ربات و چرخش ربات از یک بلوک نویز سفید در سیمولینک استفاده شده است. همانطورکه در شکل­های 7 و 8 نشان داده شده است، با وجود اغتشاش در حرکت، سیستم کنترل به طور موفقیت آمیزی تابع سینوسی ردیابی می­کند.

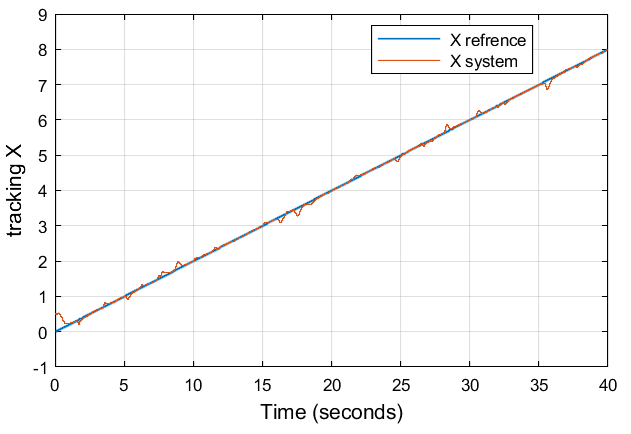
 **Fig. 4** Balancing of the pendulum with disturbance

**شکل4** تعادل پاندول با اغتشاش



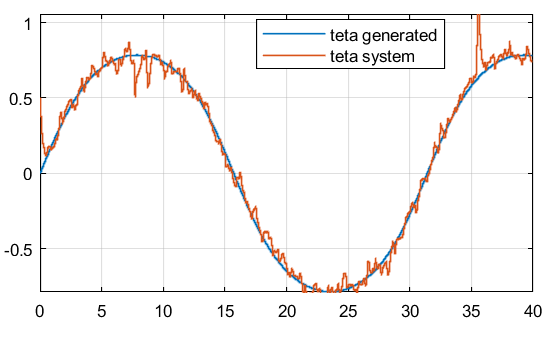
**Fig. 5** Balancingof the pendulum with disturbance

**شکل5** تعادل پاندول با اغتشاش



**Fig. 6** Tracking reference signal of the displacement with disturbance

**شکل6** ردیابی سیگنال مرجع جابجایی ربات با اغتشاش

 **Fig. 7**  Tracking sinusoidal rotation angle with disturbance

**شکل7** ردیابی زاویه چرخش سینوسی با اغتشاش

**5- نتیجه گیری**

در این تحقیق یک کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل ربات پاندول معکوس دوچرخ طراحی شده است. ویژگی این کنترل کننده این است که با وجود عدم قطعیت در پارامترها، و اغتشاشات خارجی وارد بر سیستم و دینامیک غیرخطی سیستم، کنترل کننده به خوبی توانسته است با وجود اغتشاش، زاویه پاندول را پایدار کرده و سیگنال های تولیدی جابجایی و چرخش ربات را با دقت قابل قبولی ردیابی کند. در شبیه سازی از تابع اشباع به جای تابع علامت استفاده شده است که باعث حذف چترینگ سیگنال کنترلی می­شود.

6- مراجع

[1] A.D. *nBot Balancing Robot, Available* from: http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/, 2008.

[2] Fantoni I, Lozano R, *Nonlinear control for  
 underactuated mechanical systems*. 1st edn. Springer-Verlag, London(2001).

[3] Spong MW *Control problems in robotics and automation*.1stedn.Springer-Verlag, London. (1998).

[4] Åkesson, J., Blomdell, A., & Braun, R, *Design and control of YAIP –An inverted pendulum on two wheels robot*. In International conference on control applications (pp. 2178–2183). Munich, Germany, (2006).

[5] Ha, Y., & Yuta, S. i. *Trajectory tracking control for navigation of selfcontained mobile inverse pendulum*. In Proceedings of the IEEE/RSJ/GIinternational, conference on intelligent robots and systems’94.’Advanced Robotic Systems and the Real World’ (pp. 1875–1882).

[6] Han, J. H., Zhao, S. S., Li, J. S., & Li, H. *Research on developed parallel twowheeled robot and its control system*. In Proceedings of the IEEE international conference on automation and logistics (ICAL) (pp. 2471–2475). Qingdao. (2008).

[7] Nomura, T., Kitsuka, Y., Suemitsu, H., & Matsuo, T. *Adaptive backstepping control for a two-wheeled autonomous robot*. In Presented at the ICROS-SICE, international joint conference. (2009).

[8] Alarfaj, M., and Kantor, G., *Centrifugal force compensation of a two-wheeledbalancing robot*,’’ in Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2010 11th International Conference on, pp. 2333-2338. )2010(

[9] Han, J. H., Zhao, S. S., Li, J. S., & Li, H. *Research on developed parallel twowheeled robot and its control system*. In Proceedings of the IEEE internation conference on automation and logistics (ICAL) (pp. 2471–2475). Qingdao .(2008).

[10] Ooi, R. C. *Balancing a two-wheeled autonomous robot*. Degree in MechatronicsEngineering Final year report. School of Mechanical Engineering, The Universityof Western Australia, Crawley. (2003).

[11] Chiu, C.-H., & Peng, Y.-F. *Design and implement of the self-dynamiccontroller for two-wheel transporter.* In IEEE international conference on fuzzy systems (pp. 480–483). (2006).

[12] Nasir, A. N. K., Ahmad, M. A., Ghazali, R., & Pakheri, N. S. *Performancecomparison between fuzzy logic controller (FLC) and PID controller for a highlynonlinear two-wheels balancing robot*. In First international conference oninformatics and computational intelligence (ICI), 2011 (pp. 176–181). (2011).

[13] S. F. Hassell. *Stress Analysis in Pressure Vessels*, Accessed on 8 September 2009; http://www.shieldco.com/tutorial/24.

[14] Wu, J., & Zhang, W. *Design of fuzzy logic controller for two-wheeled selfbalancing robot.* In 6th International forum on strategic technology (IFOST), 2011(pp. 1266–1270). (2011b).

[15] Tsai, C.-C., & Ju, S.-Y. *Trajectory tracking and regulationof a self-balancing two-wheeled robot: A backstepping sliding-mode control approach*. In Proceedings of SICE annual conference 2010 (pp. 2411–2418). (2010).

[16] Ruan, X., & Chen, J. H1 *robust control of self-balancing two-wheeled robot*.In 8th World congress on intelligent control and automation (WCICA), 2010 (pp.6524–6527). (2010a).

[17] Li, C., Li, F., Wang, S., Dai, F., Bai, Y., Gao, X., et al. *Dynamic adaptive equilibrium control for a self-stabilizing robot*. In IEEE international conferenceon robotics and biomimetics (ROBIO), 2010 (pp. 609–614). (2010).

[18] Pathak, K., Franch, J., & Agrawal, S. K. *Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization.* IEEE Transactionson Robotics, 21, 505–513. (2005).

1. segway [↑](#footnote-ref-1)
2. Service robot [↑](#footnote-ref-2)
3. nbot [↑](#footnote-ref-3)
4. Underactuated [↑](#footnote-ref-4)
5. Kan’s Method [↑](#footnote-ref-5)
6. tracking [↑](#footnote-ref-6)
7. trajectory [↑](#footnote-ref-7)