



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1402.10.1.2.5

نشریه علمی غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۱۰ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۲

صفحات ۳۳ الی ۵۹

ISSN: 2322-3146

http://journals.sut.ac.ir/jnsee

طراحی کنترل کننده نظارتی با استفاده از رویکرد اغتشاش غیر خطی برای یک بازوی رباتیکی

رمضان هاونگی^۱، سیمین حسین زاده^۲

^۱ نویسنده مسئول، دانشیار گروه کنترل دانشگاه بیرجند

Havangi@Birjand.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری کنترل دانشگاه بیرجند

simin_hosseinzade@Birjand.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

بازوی رباتیک

کنترل کننده PD

اغتشاش نوسانی

رویتگر اغتشاش

کنترل کننده مد لغزشی

کنترل کننده نظارتی

از خصوصیات سیستم‌های فیزیکی وجود اغتشاش و عدم قطعیت است که می‌تواند موجب کاهش کارایی و یا ناپایداری در سیستم‌های صنعتی گردد. بازوی رباتیک نیز یکی از سیستم‌های پر کاربرد در صنعت است که به شدت تحت تأثیر اغتشاش‌های گوناگون قرار می‌گیرد. ایجاد فرایند کنترلی مناسب جهت حذف اغتشاش، یکی از ملزومات استفاده از این سیستم‌ها می‌باشد. از طرفی، بازوی رباتیک سیستمی غیرخطی است، بنابراین برای تخمین اغتشاشات ورودی به آن، نیاز به استفاده از رویکردی است که برای سیستم‌های غیرخطی کارا باشد. در این مقاله از رویکرد اغتشاش غیرخطی برای تخمین اغتشاش ثابت و اغتشاش نوسانی موجود در بازوی ربات استفاده شده است. از طرفی، کنترل کننده‌های عادی توانایی مقابله با اغتشاشات متفاوت را نداشته و نیاز به کنترل کننده‌های دیگری احساس می‌شود که در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها مقاوم باشند. لذا این مقاله ساختار کنترل کننده نظارتی را برای پایداری و حذف اغتشاش پیشنهاد می‌دهد. کنترل نظارتی شامل دو سطح است که سطح اول برای شرایط بدون اغتشاش طراحی شده است و سطح دوم در هنگام شناسایی اغتشاش و یا شرایط غیرعادی وارد عمل می‌گردد. در این مقاله، سطح اول کنترلی از PD^۲ جهت پایداری در حال عادی استفاده می‌نماید، اما چون PD به تنهایی توانایی مقابله با اغتشاش‌ها و عدم قطعیت‌ها را ندارد، ساختار کنترل کننده نظارتی^۳ وارد عمل می‌شود و برای پایداری و حذف اغتشاش از کنترل کننده مد لغزشی (SMC)^۴ بهره می‌برد. در واقع روش پیشنهادی، برپایه اغتشاش‌های پیش‌بینی شده تصمیم می‌گیرد که از کدام سطح کنترلی استفاده نماید و سیگنال کنترلی مناسب را برای پایداری مجانبی سیستم تولید کند. به علاوه، در این مقاله اثبات می‌شود که کنترل مد لغزشی ساده توانایی مقابله با اغتشاش ناسازگار^۵ ربات را ندارد و برای پایداری از کنترل مد لغزشی نوین (NSMC)^۶ استفاده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، در چندین حالت شبیه‌سازی انجام شده است که نتایج عددی، مزیت و کارایی کنترل کننده جدید پیشنهادی را نشان می‌دهد.

Nonlinear disturbance observer

^۲ Proportional-Derivative controller

^۳ Supervisory controller

^۴ Sliding mode control

^۵ Mismatched disturbance

^۶ Novel sliding mode control



Sahand University
of Technology

[20.1001.1.23223146.1402.10.1.2.5](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1402.10.1.2.5)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.10, No.1

Autumn and Winter 2022

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Nonlinear Disturbance Observer-based Supervisory Control Design for Robotic Manipulator

Ramazan Havangi¹ and Simin Hosseinzadeh²

¹ **Corresponding Author**, Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Havangi@Birjand.ac.ir

² PhD Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, simin_hosseinzade@Birjand.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Robotic Manipulator
Robotic Manipulator
PD Controller
oscillatory Disturbance
Disturbance Observer
Sliding Mode Controller
Supervisory Controller

One of the characteristics of physical systems is the presence of disturbance and uncertainty, which can cause a decrease in efficiency or instability in industrial systems. The robotic Manipulator is also one of the widely used systems in the industry, which is strongly affected by various disturbances. Creating a proper control process to eliminate disturbance is one of the requirements of using these systems. On the other hand, the robotic Manipulator has a non-linear system, so to estimate the input disturbances to it, it is necessary to use a visualization that is also effective for non-linear systems. In this article, the nonlinear disturbance Observer is used to estimate the static disturbance and the fluctuating disturbance in the robot Manipulator. On the other hand, normal controllers do not have the ability to deal with different disturbances and there is a need for other controllers that are resistant to disturbances and uncertainties. Therefore, this article proposes a supervisory controller structure for stability and disturbance removal. Supervisory control consists of two levels, the first level is designed for non-disturbance conditions, and the second level is activated when disturbance or abnormal conditions are detected. In this article, the first level of control uses PD to stabilize the normal state, but since PD alone does not have the ability to deal with disturbances and uncertainties, the supervisory controller structure is implemented and will use the sliding mode controller (SMC) to stabilize and eliminate the disturbance. In fact, the proposed method decides which control level to use based on the predicted disturbances and produces the appropriate control signal for the asymptotic stability of the system. In addition, in this article, it is proved that the simple sliding mode control is not able to deal with the inconsistent disturbance of the robot, and the new sliding mode control (NSMC) is used for stabilization. To evaluate the performance of the proposed method, simulations have been carried out in several modes, which numerical results show the advantage and efficiency of the proposed new controller.

۱- مقدمه

در سیستم‌های مدرن صنعتی وجود اغتشاش امری غیر قابل اجتناب است که باعث تخریب عملکرد سیستم کنترل و در نتیجه وارد آمدن خسارات فراوانی به آن می‌شود. در بازوی رباتیک اغتشاش به صورت گشتاور نامعلوم، گشتاور بار متغیر، جابه‌جایی ریل و اصطکاک ظاهر می‌شود. به علاوه اغتشاش می‌تواند شامل انحراف پارامترهای داخلی سیستم باشد [۱]. برای بهبود عملکرد و پایداری سیستم یکی از ایده‌ها، تخمین اغتشاش و سپس استفاده از یک کنترل کننده مناسب برای جبران‌سازی آن است [۲]. از طرفی یکی از بیشترین ماشین‌های خودکاری که در صنایع استفاده می‌شوند، بازوهای رباتیک هستند که بیشتر درصنایعی چون ساخت خودرو، اکتشافات فضایی و جراحی‌های پزشکی از راه دور به کار گرفته می‌شوند. به طور کلی این ربات‌ها توانایی جابه‌جایی را در n جهت دارا می‌باشند و برای هر فعالیتی که نیاز به نمونه‌برداری و یا انتقال اشیاء در شرایط سخت محیطی هستند، کاربرد دارند. این ربات‌ها براساس نوع حرکت به ربات‌هایی با n درجه آزادی تقسیم می‌شوند. همانطور که می‌دانید بازوی رباتیک بسیار غیر خطی است که عدم قطعیت نیز در آن دخیل است، به علاوه اغتشاش در عملکرد آن تاثیرگذار است، بنابراین نیاز به کنترل کننده‌ای که تاثیرات اغتشاش را کاهش دهد، احساس می‌شود [۳].

در حالت کلی اغتشاش به دو دسته اغتشاش ثابت و اغتشاش ناسازگار^۱ (از نوع سینوسی با دامنه و تاخیر نامشخص اما با دینامیک مشخص) تقسیم می‌شود [۳]. یکی از روش‌های حذف اغتشاش در سیستم‌های غیرخطی، استفاده از رویکرد اغتشاش است. کنترل کننده‌هایی که برپایه رویکرد اغتشاش هستند، با تخمین اغتشاش، جبران‌سازی پیشخور^۲ و قانون کنترل جدید می‌توانند عملکرد و پایداری سیستم را تضمین کنند [۴]. رویکردهای اغتشاش به فرم خطی و غیرخطی وجود دارند که با توجه به غیرخطی بودن بازوی رباتیک نیاز است از رویکرد اغتشاش غیرخطی (NDO) استفاده شود.

در سال‌های اخیر به جهت کاهش تأثیر اغتشاش‌ها از انواع رویکردهای اغتشاش استفاده شده است که به ویژه در جبران‌سازی اصطکاک و نقص عملکرد موتورها بسیار موثر بوده است [۵]. از طرفی رویکردهای اغتشاش برای تخمین انواع اغتشاش‌ها به کار گرفته می‌شود که بیشتر آنان مربوط به اغتشاش ثابت است. نحوه‌ی طراحی آنان را می‌توان در [۶-۲۱] برای اغتشاش ثابت و در [۴] و [۲۴-۲۲] برای تخمین اغتشاش‌های نوسانی بررسی نمود.

در مورد بازوی رباتیک، در [۱۰] در سال ۲۰۰۰ نخستین بار برای بازوی رباتیک رویکرد اغتشاش غیرخطی طراحی شده و کارایی آن در جبران‌سازی اغتشاش نشان داده شده است. در ادامه به جهت ساده‌سازی، مرجع [۲۵] از یک رویکرد اغتشاش خطی برای بازوی رباتیک بهره برده و طراحی آن را، برای شرایط خاص و به صورت مقاوم انجام داده است. در برخی موارد برای ربات‌های خاصی همانند مرجع [۶] که از رباتی با طرح زنجیری و یا در [۷] که رباتی برای توانبخشی به بیماران حرکتی است، از رویکرد اغتشاش استفاده شده است. به خصوص در [۷] از یک کنترل امپدانس تطبیقی برپایه‌ی کنترل بازگشتی، تخمین‌گر زمان تاخیر و رویکرد اغتشاش برای کنترل ربات توانبخش به انسان بهره برده شده است. همچنین در مرجع [۸] برای جبران‌سازی اغتشاش نوسانی ناشی از دینامیک‌های خاص، در جنگنده‌های دو دم^۳ استفاده شده است. در حقیقت این کنترل کننده برای جبران‌سازی، اشباع

¹ Discordant

² Feedforward

³ Twin-tailed fighter aircraft

ورودی در محرک‌های ربات، نیروی اصطکاک و همچنین وزنی که قسمت‌های فوقانی وارد می‌کند و خطاهای زمانی، بکار گرفته شده است. در بسیاری از تحقیقات همانند [۱۰]، [۱۴]، [۲۱]، [۲۶] و [۲۷] با استفاده از شبکه عصبی و منطق فازی، اغتشاش غیرخطی را تخمین زده شده، با پیشخور جبران‌سازی می‌شود. از طرفی، به دلیل تقویت سیستم کنترل و جبران‌سازی مناسب، بسیاری از محققین از اغتشاش تخمین زده شده به عنوان پارامتری در قانون کنترل بهره برده‌اند. در بین کنترل‌کننده‌ها، کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی می‌تواند به سادگی با رویکرد اغتشاش پیوند بخورد، در [۱]، [۱۰]، [۱۸] و [۲۵] این روش به تفصیل بیان شده است. به علاوه، مراجع [۱۴] و [۱۷] از کنترل‌کننده‌های تطبیقی برای جبران‌سازی استفاده نموده‌اند. همچنین بسیاری از مراجع از جمله [۲۰] از روش‌های کنترل پسگام برای جبران‌سازی استفاده کرده‌اند.

همانطور که در بالا اشاره شد از رویکرد اغتشاش و یک کنترل‌کننده مخصوص برای جبران‌سازی اغتشاش‌های ورودی استفاده می‌شود. اما در شرایط عادی، از کنترل‌کننده PD برای رسیدن به خواسته‌های مطلوب برای بازوی رباتیک استفاده می‌شود. از خصوصیات این کنترل‌کننده، سادگی در تنظیم پارامترها و تضمین پایداری در شرایط عادی می‌باشد. اما با توجه به اینکه در سیستم‌ها انواع اغتشاشات و خطاها وجود دارند، پایداری مجانبی PD از بین خواهد رفت و لذا نیاز به استفاده از کنترل‌کننده‌ای که بتواند در صورت ایجاد اغتشاش و یا عدم قطعیت پایداری را تضمین کند، احساس می‌شود. این خصوصیات می‌تواند شاخصه‌ی یک کنترل‌کننده نظارتی باشد که از یک یا دو رویکرد اغتشاش در دو حالت اغتشاش ورودی و اغتشاش ناسازگار، استفاده می‌کند تا اغتشاشات را تا حد ممکن جبران‌سازی نماید.

با توجه به مطالب بیان شده، کنترل‌کننده‌های کلاسیک توانایی مقابله با اغتشاشات متفاوت را نداشته، لذا این مقاله ساختار کنترل‌کننده نظارتی را برای پایداری و حذف اغتشاش پیشنهاد می‌دهد. کنترل نظارتی شامل دو سطح است که سطح اول برای شرایط عادی طراحی شده است و سطح دوم در هنگام شناسایی اغتشاش و یا شرایط غیرعادی وارد عمل می‌گردد. این مقاله برای شناسایی حالت غیر عادی، رویکردهای اغتشاش ثابت و متغیر را پیشنهاد داده است، همچنین سطح اول کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی شامل یک کنترل‌کننده PD است که ضرایب آن برای بهبود کارایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده است و سطح دوم شامل یک کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی است که براساس اغتشاش‌های تخمین زده شده، سیگنال کنترلی مناسب را ایجاد می‌نماید.

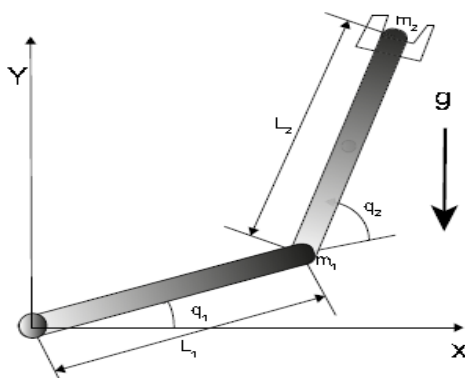
به علاوه در این مقاله، ثابت می‌شود که SMC توانایی مقابله با اغتشاش نوسانی را ندارد. در نتیجه، به جهت بهبود عملکرد کنترل نظارتی، از کنترل مد لغزشی نوین NSMC جهت تضمین پایداری استفاده شده است. در نهایت شبیه‌سازی در چندین حالت انجام شده و نتایج با کنترل‌کننده مد لغزشی فوق چرخشی^۱ (STC) [۲۸] مقایسه می‌گردد. به طور خلاصه مهمترین نوآوری‌های مقاله عبارتند از ۱- تخمین اغتشاش ثابت و نوسانی با استفاده از رویکردهای غیرخطی ۲- طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی جدید به عنوان کنترل سطح دوم با استفاده از سیگنال‌های تخمین اغتشاش و مقابله با اغتشاش ناسازگار است.

ساختار ادامه‌ی مقاله به این شرح است: در بخش ۲ مدل‌سازی ربات دو درجه آزادی ارائه می‌شود. ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی و طراحی قانون کنترل مبتنی بر رویکرد در بخش ۳ ارائه شده است. در بخش ۴ مدل کنترلی پیشنهادی تحت شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش ۵ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

^۱ Super twisting sliding mode controller

۲-مدل سازی ربات دو درجه آزادی

مدل سازی در نحوه ی کنترل یک سیستم مکانیکی نقش بسیار مهمی را ایفا می کند. مدل ریاضی یک توصیف هم ارز از سیستم مکانیکی است که ارتباط بین ورودی های سیستم و خروجی های آن را به صورت یک تابع ریاضی به نمایش در می آورد. دینامیک بازوی رباتیک از معادلات لاگرانژ-اولر به صورت مستقیم بدست می آید. بازوی رباتیک شکل (۱) شماتیک یک ربات دو درجه آزادی (DOF)^۱ را نشان می دهد که زاویه هر بازو به ترتیب q_1 و q_2 است، همچنین طول هر بازو به ترتیب l_1 و l_2 ، جرم هر بازو m_1 و m_2 است.



شکل ۱- مدل ربات دو درجه آزادی

مدل یک بازوی رباتیک دو درجه آزادی به صورت زیر تعریف می شود.

$$M(q, \theta)\ddot{q} + V(q, \dot{q}, \theta)\dot{q} + F(q, \dot{q}) = u + d_1 \quad (۱)$$

که q ماتریس موقعیت مفاصل، $M(q)$ ماتریس اینرسی، $V(q, \dot{q})$ ماتریس کوریولیس و نیروی گریز از مرکز، u نیروی کنترلی (ورودی کنترلی)، d_1 اغتشاش خارجی از نوع ثابت (در این مقاله)، $F(q, \dot{q})$ دینامک مدل نشده و $\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 \\ m_2 l_2^2 \end{bmatrix}$ است. بعد از استفاده از معادلات لاگرانژ-اولر ماتریس اینرسی و ماتریس کوریولیس به صورت ماتریس های زیر بدست می آیند.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + 2m_2 l_2^2 + 2m_2 l_2^2 \cos(q_2) & m_2 l_2^2 + m_2 l_2^2 \cos(q_2) \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_2^2 \cos(q_2) & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2m_2 l_2^2 \dot{q}_2 \sin(q_2) & -m_2 l_2^2 \dot{q}_2 \sin(q_2) \\ m_2 l_2^2 \dot{q}_1 \sin(q_2) & 0 \end{bmatrix}$$

^۱ Degree of freedom

برای تبدیل به فرم فضای حالت، اگر $x_1 = q$ و $x_2 = \dot{x}_1$ باشند، معادلات حالت بازوی رباتیک به معادله‌ی زیر تبدیل می‌شود [۱۱].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + d_0 \\ \dot{x}_2 &= M^{-1}(-Vx_2 - F + u + d_1) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (۳)$$

که d_0 اغتشاش ناسازگار است. همانطور که می‌دانید، بازوی رباتیک دارای عدم قطعیت و تغییر پارامتر در وزن بازوهاست، بنابراین ضرایب مدل می‌توانند مخالف مقادیر نامی شوند، به عبارتی ماتریس M و V به صورت $M = M_0 + \Delta M$ و $V = V_0 + \Delta V$ در نظر گرفته شده که M_0 و V_0 مقادیر نامی و ΔM و ΔV قسمت‌های نامعینی هستند [۲۹] همچنین برای معادله دینامیکی شرایط زیر فرض می‌شود [۲۳].

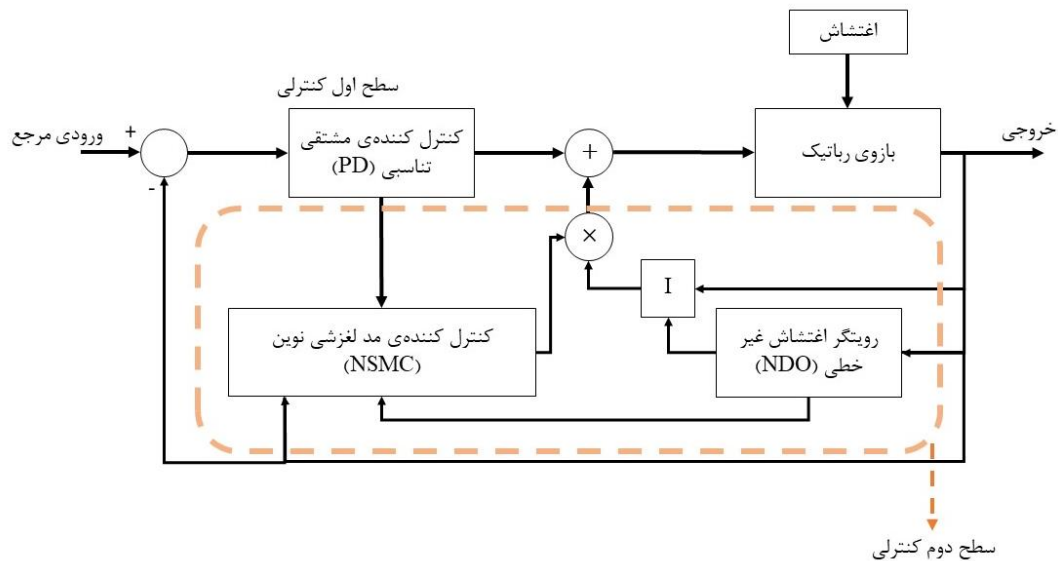
(۱) ماتریس اینرسی مقدار مثبت و محدودی دارد.

(۲) $q^T [\dot{M}(q) - 2 \times V(q, q)] \dot{q} = 0$ خاصیت شبه متقارن^۱ دارد و از نظر ساختار مکانیکی سیستم برقرار است.

۳- ساختار کنترل کننده پیشنهادی و طراحی قانون کنترل مبتنی بر رویکرد

ساختار کلی کنترل کننده پیشنهادی جهت کنترل بازوی ربات بصورت شکل (۲) است. همانطور که بیان شد، سطح اول برای حالت بدون اغتشاش است که در مدل پیشنهادی فقط از کنترل کننده PD که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده، استفاده شده است. همچنین سطح دوم پس از تخمین اغتشاش‌ها وارد روند کنترل می‌گردد. این سطح شامل ۱- مجموعه‌ی رویتهای اغتشاش (NDO) ۲- بلوک تصمیم‌گیری (I) و ۳- کنترل مد لغزشی نوین (NSMC) است. در واقع سطح دوم وظیفه‌ی شناسایی و کاهش اثر اغتشاش‌های وارده به بازوی رباتیک را دارد. به علاوه در شکل زیر، ورودی مرجع، d اغتشاش نامعلوم و q زاویه‌ی بازوهای رباتیک برحسب رادیان است.

¹ Skew symmetric property



شکل ۲- شماتیک کنترل کننده پیشنهادی

همانطور که بیان شد، بازوی رباتیک دارای دینامیک غیر خطی با تداخل بسیار است و همچنین اغتشاش‌های متفاوتی به آن اعمال می‌گردد، که موجب دشواری برای رسیدن به اهداف کنترلی شده و در نتیجه نیازمند استفاده از کنترل کننده‌های کارا تر است. بنابراین استفاده از کنترل کننده نظارتی پیشنهاد می‌شود، که بلوک I براساس خروجی رویکرد اغتشاش، زمان ورود سطح دوم کنترلی را تعیین می‌نماید. قانون کنترل یک کنترلر نظارتی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$u = u_{pd} + I \cdot u_s \quad (4)$$

که u_{pd} خروجی کنترل کننده PD، u قانون کنترل مد لغزشی و u_s تلاش کنترلی وارده به بازوی رباتیک است.

۱-۳- طراحی رویکرد اغتشاش غیر خطی

در این مقاله با توجه به تعداد متغیرهای حالت، دو نوع اغتشاش در نظر گرفته شده است که یکی ثابت و دیگری ناسازگار است. اغتشاش ناسازگار (d_0) که به صورت تابعی نوسانی (سینوسی) به سیستم اعمال می‌شود که ناشی از عوامل درونی بازوی ربات است. دیگری نیز اغتشاش خارجی ثابت (d_1) است که از عوامل بیرونی است. لذا برای تخمین این اغتشاشات دو رویکرد پیشنهاد می‌شود.

۳-۱-۱- طراحی رویکرد اغتشاش ثابت

همانطور که بیان شد تخمین اغتشاش همواره یکی از موضوعات مورد علاقه در سیستم‌های کنترلی است. یکی از مهمترین روش‌هایی که می‌توان اغتشاش و عدم قطعیت را بدون سنسور اضافه تخمین زد، رویکرد اغتشاش است. هدف اصلی این نوع رویکرد اندازه‌گیری گشتاور اغتشاش خارجی و نامعلوم بدون استفاده از سنسور اضافه است. همچنین از رویکرد اغتشاش ثابت معمولاً برای

جبران سازی نواقص و یا عیب های محرک استفاده می شود. به عنوان مثال جبران سازی اصطکاک با این روش بسیار مرسوم است [۵].
 در این مقاله اغتشاش خارجی ثابت با نام d_1 شناخته شده و از معادله (۱) به صورت زیر محاسبه می شود.

$$d_1 = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} - u \quad (5)$$

لذا برای تخمین اغتشاش همانند [۱] می توان از یک سیستم درجهی یک با ورودی های نشات گرفته از مدل بازوی رباتیک، بهره برد.

$$\dot{\hat{d}}_1 = -L(q, \dot{q})\hat{d}_1 + L(q, \dot{q})(M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} - u) \quad (6)$$

که $L(q, \dot{q})$ پارامتر رویکرد اغتشاش است که ضریب آن مثبت معین انتخاب می شود و \hat{d}_1 خروجی رویکرد اغتشاش است. از طرفی، با توجه به اینکه اغتشاش ثابت است (شبه ثابت) در نتیجه $\dot{d} = 0$ است و خطای رویکرد به صورت زیر تعریف می شود.

$$e_d = d_1 - \hat{d}_1 \Rightarrow \dot{e}_d = \dot{d}_1 - \dot{\hat{d}}_1 \quad (7)$$

با ترکیب معادلات (۶) و (۷) داریم:

$$\dot{e}_d = L(q, \dot{q})\hat{d}_1 - L(q, \dot{q})d_1 = -L(q, \dot{q})e_d \quad (8)$$

اگر $L(q, \dot{q})$ مثبت معین انتخاب شود آنگاه خطای تخمین به صفر میل می کند. هر چند با توجه به اینکه در معادله (۵) عبارت غیر قابل اندازه گیری (\ddot{q}) وجود دارد، لذا پیاده سازی آن ممکن نخواهد بود. از این رو با استفاده از متغیر کمکی، رویکرد جدید به صورت زیر پیشنهاد می شود.

$$z = \hat{d}_1 - P(q, \dot{q}) \quad (9)$$

که $P(q, \dot{q})$ پارامتر طراحی رویکرد است و تابع $L(q, \dot{q})$ به صورت زیر تعریف می شود.

$$L(q, \dot{q})M(q)\ddot{q} = \left[\frac{\partial P(q, \dot{q})}{\partial q} \quad \frac{\partial P(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

درواقع $P(q, \dot{q})$ و $L(q, \dot{q})$ پارامترهایی هستند که برای پایداری رویکرد توسط طراح، انتخاب می شوند. از طرفی، چون سیستم بازوی رباتیک است از معادله (۹) برای ساده سازی حل مسئله، استفاده می شود [۵]. با مشتق گیری از z رویکرد اغتشاش به صورت زیر محاسبه می شود.

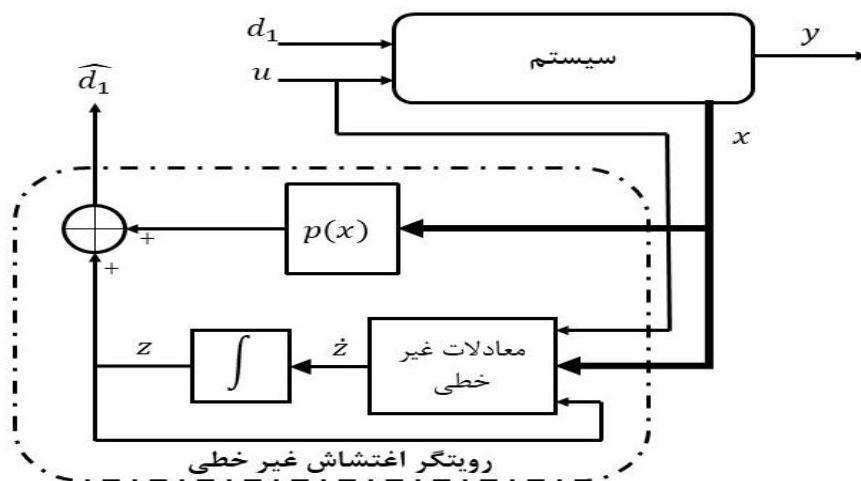
$$\dot{z} = -L(q, \dot{q})(z - V(q, \dot{q})\dot{q} + P(q, \dot{q})) \quad (11)$$

$$P(q, \dot{q}) = c \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{\partial P(q, \dot{q})}{\partial t} = \left[\frac{\partial P(q, \dot{q})}{\partial q} \quad \frac{\partial P(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \ddot{q}$$

$$L(q, \dot{q}) = c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} M^{-1}(q)$$

از فرض (۱) داریم $M^{-1}(q)$ مقداری مثبت معین دارد لذا $L(q, \dot{q})$ نیز مثبت معین است. در نتیجه رویتگر اغتشاش پایدار مجانبی است و سرعت همگرایی آن با اندازه c تغییر خواهد کرد. شکل (۳) ساختار یک رویتگر اغتشاش ثابت غیر خطی را نشان می دهد. در شکل (۳)، $P(x)$ ضریب رویتگر و z متغیر کمکی است.



شکل ۳- بلوک دیاگرام NDO برای اغتشاش ثابت

۳-۱-۲- طراحی رویتگر اغتشاش نوسانی

ابتدا فرض می شود اغتشاش d_0 نوسانی است که دارای فرکانس مشخص و اندازه و تاخیر نامشخص است (اغتشاش و نوسانات داخلی ربات مانند نوسانات موتور) که به صورت اغتشاش ناسازگار در معادلات سیستم ظاهر می شود. معادله ی زیر یک سیستم نوسانی با فرکانس A و اندازه C است.

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi \\ d_0 = C\xi \end{cases} \quad (13)$$

که ξ متغیر حالت داخلی اغتشاش نوسانی است. با توجه به اینکه اغتشاش از نوع ناسازگار است لذا از رابطه ی متغیرهای حالت می توان مقدار اغتشاش را بدست آورد.

$$d_0 = \dot{x}_1 - x_2 \quad (14)$$

همانند رویتگر اغتشاش ثابت می توان از متغیر کمکی برای تخمین این دست از اغتشاشات بهره برد. رویتگر به صورت زیر تعریف می شود [۳].

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + L(X)(\dot{x}_1 - x_2 - \hat{d}_0) \\ \hat{d}_0 = C\xi \end{cases} \quad (15)$$

که \hat{d}_0 خروجی رویکرد، $\hat{\xi}$ تخمین پارامتر داخلی رویکرد و $L(X)$ ضریب رویکرد هستند. با نوشتن فرمول خطای رویکرد داریم:

$$e_{\xi} = \hat{\xi} - \xi \Rightarrow \dot{e}_{\xi} = \dot{\hat{\xi}} - \dot{\xi}$$

$$\dot{e}_{\xi} = \dot{\hat{\xi}} - \dot{\xi} = A\hat{\xi} + L(X)(\dot{x}_1 - x_2 - \hat{d}_0) - A\xi = [A - CL(X)]e_{\xi} \quad (16)$$

که e_{ξ} خطای رویکرد می‌باشد. بنابراین اگر $L(X)$ به گونه ای طراحی شود که ماتریس $[A - CL(X)]$ منفی معین باشد، خطای رویکرد اغتشاش به صفر میل خواهد کرد. به علاوه، فرض می‌شود $A = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}$ و $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ است. در نتیجه می‌توان نشان داد اگر $L(X)$ به صورت زیر باشد پایداری برقرار است.

$$L(X) = \begin{bmatrix} k & -2 \\ 2 & k \end{bmatrix} \quad (17)$$

که k ضریبی است که طراح آن را مشخص می‌نماید و هرچه بزرگتر باشد سرعت تخمین افزایش می‌یابد.

۲-۳- طراحی کنترل کننده مد لغزشی

همانطور که بیان شد می‌توان با استفاده از کنترل کننده‌ای برپایه رویکرد اغتشاش علاوه بر رسیدن به خواسته‌های کنترلی، اغتشاش را نیز حذف کرد. یکی از روش‌های کنترل غیر خطی که با رویکردهای اغتشاش به خوبی هماهنگ می‌شود، روش مد لغزشی است که از حدود ۵۰ سال پیش مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع بیشترین کاربرد آن پایداری مقاوم سیستم‌های غیرخطی است و در این مقاله به عنوان سطح دوم کنترل نظارتی مورد استفاده قرار گرفته است. توصیف معادلات ربات در معادله‌ی (۳) بیان شده و مفروضات زیر برای طراحی پارامترهای کنترل کننده‌ی مد لغزشی وجود دارد.

- اندازه اغتشاش d_0 و d_1 محدود است و بیشینه‌ی آنان به ترتیب برابر d_0^* و d_1^* است.

- مقدار حداکثر خطای رویکردهای اغتشاش برابر حداکثر مقدار اغتشاش است

- $M(q)$ مقدار مثبت و محدودی بین $M_{min} \leq M(q) \leq M_{max}$ دارد.

- سطح لغزش به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$s = e_2 + \lambda e_1 \quad (18)$$

که $e_1 = x_1 - x_{1d}$ و $e_2 = x_2 - \dot{x}_{1d}$ به ترتیب خطاهای حالت x_1 و x_2 هستند و $x_{2d} = \dot{x}_{1d}$ است. همچنین λ مقدار مثبت دلخواه و یکی از پارامترهای طراحی SMC است. برای بدست آوردن مشتق سطح لغزش از معادله‌ی بالا مشتق گرفته می‌شود.

$$\dot{s} = \dot{e}_2 + \lambda \dot{e}_1 \quad (19)$$

با توجه به معادله‌ی بازوی رباتیک، قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$u_s = V(q, \dot{q})x_2 - \hat{d}_1 + M(q)\dot{x}_{2d} - M(q)\lambda(x_2 + \hat{d}_0 - x_{2d}) - M(q)\gamma \operatorname{sgn}(s) \quad (20)$$

که γ مقداری مثبت و $\operatorname{sgn}()$ تابع علامت است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (21)$$

با ادغام معادله‌ی (۱۹) و (۲۰) مشتق سطح لغزش به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$\dot{s} = M^{-1}(q)e_d - \gamma \operatorname{sgn}(s) + \lambda \hat{d}_0 \quad (22)$$

تابع لیاپانوف به فرم مثبت معین زیر تعریف شده است. در صورت منفی معین شدن مشتق آن، پایداری مجانبی اثبات شده و خطا به صفر میل می‌کند.

$$V = \frac{1}{2}s^2 \Rightarrow \dot{V} = s\dot{s} < -\eta|s| = \operatorname{sgn}(s)\dot{s} < -\eta \quad (23)$$

که η مقدار مثبت دلخواه و یکی از پارامترهای طراحی است. با ادغام رابطه (۲۲) و (۲۳) داریم.

$$\dot{V} = M^{-1}(q)e_d \operatorname{sgn}(s) - \gamma + \lambda e_\xi \operatorname{sgn}(s) < -\eta \quad (24)$$

برای اینکه مقدار γ بدست آید تمامی متغیرها در میزان حداکثری جایگذاری می‌شوند.

$$\gamma = \eta + M^{-1}(q)d_1^* + \lambda d_0^* \quad (25)$$

در این صورت همواره $\dot{V} < 0$ و در نتیجه سیستم کنترل پایداری را تضمین می‌نماید. از طرفی لازم است سطح لغزش برابر صفر گردد.

$$0 = e_2 + \lambda e_1 \Rightarrow \dot{e}_1 + \lambda e_1 = d_0 \quad (26)$$

به وضوح دیده می‌شود که در صورت وجود اغتشاش ناسازگار سطح لغزش صفر نشده و موجب می‌شود خروجی به مقدار دلخواه نرسد. برای غلبه بر این مشکل، کنترل کننده‌ی مد لغزشی نوین پیشنهاد داده می‌شود.

۳-۲-۱- کنترل کننده مد لغزشی نوین

با توجه به اینکه SMC در برخورد با اغتشاش d_0 ناتوان است لذا ایده‌ی اصلی مد لغزشی نوین استفاده از \hat{d}_0 در سطح لغزش است. با این ایده، سطح لغزش به صفر میل خواهد کرد. سطح لغزش در NSMC به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$s = (e_2 + \hat{d}_0) + \lambda e_1 \quad (27)$$

بر این اساس قانون کنترلی مطرح خواهد شد که در ادامه اثبات پایداری آن را انجام خواهیم داد و نشان می‌دهیم ضمن منفی شدن مشتق تابع لیاپانوف سطح لغزش به صفر میل خواهد کرد.

$$\dot{s} = \dot{e}_2 + \lambda \dot{e}_1 + \dot{\hat{d}}_0 \quad (28)$$

قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد داده می‌شود.

$$u_s = V(q, \dot{q})x_2 - \hat{d}_1 + M(q)\dot{x}_{2d} - M(q)\lambda(x_2 + \hat{d}_0 - x_{2d}) - M(q)\gamma \operatorname{sgn}(s) \quad (29)$$

همانند قسمت قبل تابع لیاپانوف به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$V = \frac{1}{2}s^2 \Rightarrow \dot{V} = s\dot{s} < -\eta|s| = \operatorname{sgn}(s)\dot{s} < -\eta \quad (30)$$

که مقدار مثبت دلخواه و یکی از پارامترهای طراحی است. با ادغام رابطه (۲۹) و (۳۰) داریم:

$$\dot{V} = M^{-1}(q)e_d \operatorname{sgn}(s) - \gamma + \lambda e_\xi \operatorname{sgn}(s) + \operatorname{sgn}(s)\dot{\hat{d}}_0 < -\eta \quad (31)$$

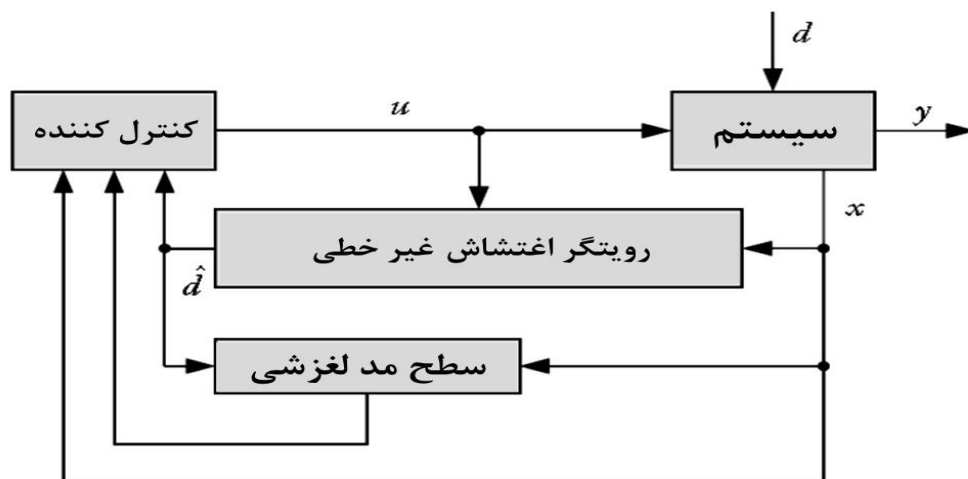
برای تعیین مقدار γ تمامی متغیرها در میزان حداکثر جایگذاری می‌گردند. همچنین با توجه به اینکه d_0 نوسانی است و در نتیجه مشتق آن نیز نوسانی است بنابراین حداکثر $\dot{\hat{d}}_0$ برابر حداکثر d_0 یعنی d_0^* انتخاب می‌گردد.

$$\gamma = \eta + M^{-1}(q)d_1^* + (\lambda + 1)d_0^* \quad (32)$$

در این صورت $\dot{V} < 0$ شده و سیستم پایدار مجانبی است و برای سطح لغزش داریم:

$$0 = e_2 + \lambda e_1 + \dot{\hat{d}}_0 \Rightarrow \dot{e}_1 + \lambda e_1 = -e_2 \quad (33)$$

با توجه به اینکه e_ξ از معادله (۱۶) به سمت صفر میل خواهد کرد، لذا می‌توان نتیجه گرفت سطح لغزش پس از گذشت زمان محدود به صفر خواهد رسید. شکل (۴) دیاگرام نحوه استفاده NSMC را از رویکرد اغتشاش نشان می‌دهد.



شکل ۴- ترکیب NSMC و رویکرد اغتشاش

۳-۳- طراحی بخش نظارتی

در قسمت‌های پیشین اجزای سیستم شامل، مدل دینامیکی سیستم، کنترل کننده PD، رویکردهای اغتشاش و کنترل کننده مد لغزشی مدل‌سازی و طراحی شده‌اند. در این قسمت اجزای معرفی شده براساس خواص و پارامترهای کنترلی از جمله مقاوم بودن سیستم در برابر اغتشاش‌ها و عدم قطعیت پارامترها، با یکدیگر ادغام شده و در نتیجه ساختار کنترل کننده نهایی (شکل (۲)) بدست خواهد آمد.

در ابتدا لازم است بلوک تصمیم گیرنده I تعریف شود، با توجه به خواسته‌های مسأله I به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I = \begin{cases} 0, & \|x\| < M_x \text{ or } \|\hat{d}\| < M_d \\ 1, & \|x\| \geq M_x \text{ or } \|\hat{d}\| \geq M_d \end{cases} \quad (34)$$

که تابع $\| \cdot \|$ دو و متغیرهای M_x و M_d به ترتیب حدهای کمینه برای مقدار اغتشاش و مقدار متغیر حالت هستند. در واقع بلوک I با توجه به اغتشاش و اندازه متغیرهای حالت، تصمیم ورود NSMC به چرخه کنترل را خواهد گرفت. برای حذف اثر کلید زنی در بلوک I می‌توان آن را به صورت تابع زیر تعریف کرد.

$$I = \begin{cases} 0, & \|x\| < M_{xmin} \text{ or } \|\hat{d}\| < M_d \\ \frac{\|x\| - M_{xmin}}{M_{xmax} - M_{xmin}}, & M_{xmin} \leq \|x\| \leq M_{xmax} \text{ or } M_{dmin} \leq \|\hat{d}\| \leq M_{dmax} \\ 1, & \|x\| > M_{xmax} \text{ or } \|\hat{d}\| \geq M_d \end{cases} \quad (35)$$

که M_{xmax} و M_{xmin} به ترتیب مقدار کمینه و بیشینه‌ی متغیرهای حالت در حالت گذار هستند، M_{dmin} و M_{dmax} مقدارهای کمینه و بیشینه برای اغتشاش‌های تخمین زده شده در حالت گذار هستند. با توجه به $\frac{\|x\| - M_{xmin}}{M_{xmax} - M_{xmin}} \leq 1$ و اینکه تابع I مقداری بین ۰ و ۱ را اختیار می‌نماید، قانون کنترل از فرمول (۴) به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$u = (1 - I) \cdot u_{pd} + I \cdot u_s \quad (36)$$

با در نظر گرفتن این قانون کنترل، نیاز به تغییر در کنترل کننده مد لغزشی به صورت زیر خواهد بود.

$$u_s = V(q, \dot{q})x_2 - \hat{d}_1 + M(q)\dot{x}_{2d} - M(q)\lambda(x_2 + \hat{d}_0 - x_{2d}) - M\gamma \operatorname{sgn}(s) - (1 - I) \times u_{pd} \quad (37)$$

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش بازوی رباتیک شکل (۱) با استفاده از کنترل نظارتی پیشنهادی شبیه سازی شده و نتایج آن با کنترل کننده مد لغزشی فوق چرخشی [۲۸] مقایسه می گردد. طول هر بازو ۰/۴ متر و وزن هر بازو ۲ کیلوگرم است و ضرایب کنترل کننده PD با استفاده از الگوریتم ژنتیک بدست آمده و با تابع هدف و خواسته های کنترلی زیر بهینه شده است.

- رسیدن خطای حالت دائم به صفر
- فراجش کمتر از ۲ درصد
- زمان نشست^۱ کمتر از ۱ ثانیه

تابع هدف باید شامل خطای پاسخ و برخی از پارامترهای مهم که در این مقاله زمان نشست و فراجش است، باشد. براساس درجه اهمیت شاخص های کنترلی (خطا، زمان نشست، میزان فراجش)، برای هر کدام وزنی براساس سعی و خطا مشخص شده است [۳۰]، که در نهایت تابع بهینه سازی به صورت زیر نوشته می شود.

$$\text{Cost function} = 24(e_1 + e_2) + (po_1 + po_2) + (Ts_1 + Ts_2)$$

$$e_i = \frac{\sum 1 - q_i}{\text{Time}}, \quad po_i = \text{percent overshoot}, \quad Ts_i = \text{settling time}$$

در واقع تابع هدف، انحراف از پلهی واحد و اندازهی فراجش و مدت زمان نشست است. پس از بهینه سازی، ضرایب PD به صورت زیر بدست می آیند.

$$k_p = \begin{bmatrix} 46.7957 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}, \quad k_v = \begin{bmatrix} 14.6038 & 0 \\ 0 & 9.9203 \end{bmatrix}$$

همچنین ضرایب کنترل کننده نظارتی در جدول (۱) نشان داده شده است.

^۱ Settling Time

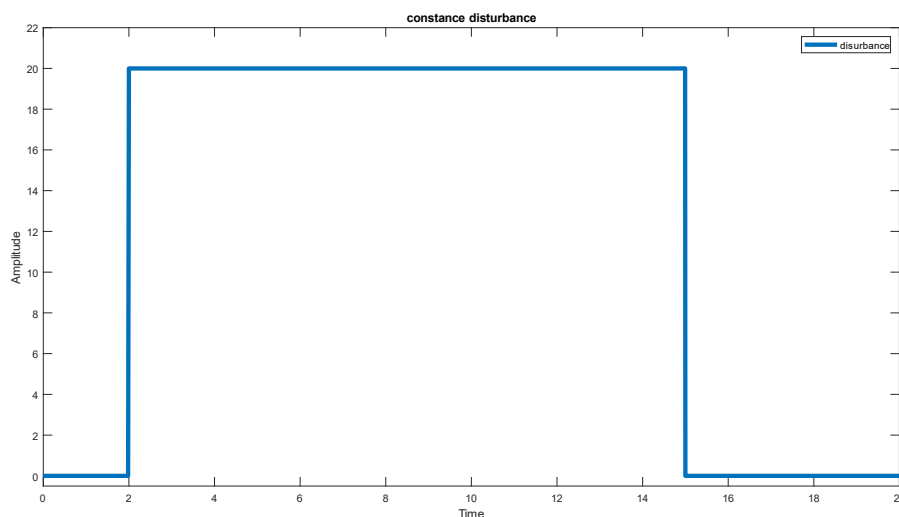
جدول ۱- ضرایب کنترل کننده‌ی نظارتی

$T_s = 1e^{-4}s$	زمان نمونه برداری
$C=5$	مقدار ثابت روتیگر اغتشاش ثابت
$k=5$	مقدار ثابت روتیگر اغتشاش نوسانی
$M_{xmax} = 1.5$	بیشینه مقدار حالت در بلوک I
$M_{xmin} = 1$	کمینه مقدار حالت در بلوک I
$M_d = 0.5$	کمینه اندازه اغتشاش در بلوک I
$\lambda = \eta = 5 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	ضرایب ثابت NSMC

برای آزمایش سیستم پیشنهادی ۴ حالت مطرح می‌شود. ۱- اعمال اغتشاش ثابت فقط به PD ۲- اعمال فقط اغتشاش ثابت ۳- اعمال فقط اغتشاش نوسانی ۴- وجود عدم قطعیت، اغتشاش ثابت، اغتشاش نوسانی.

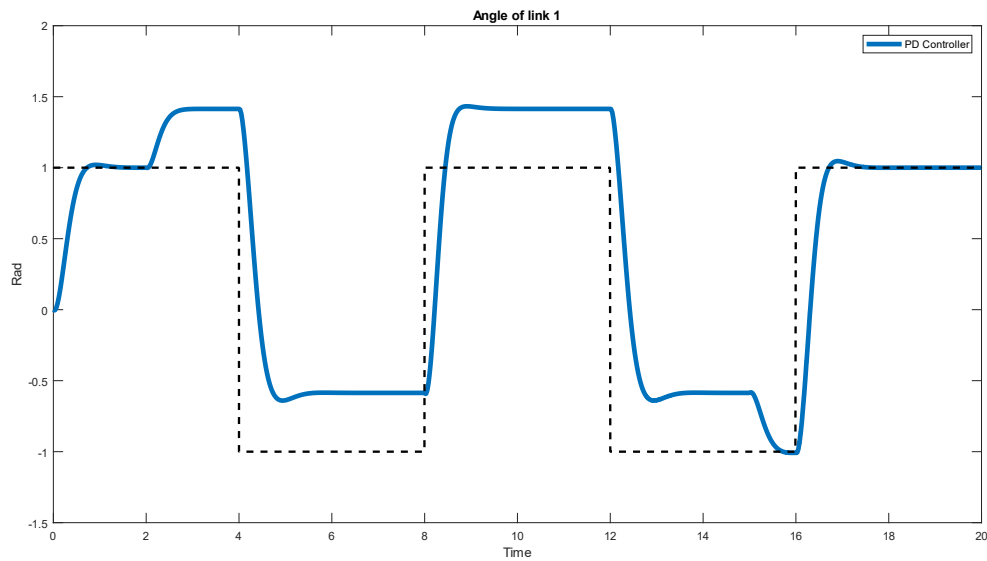
۱-۴- اعمال اغتشاش ثابت فقط به PD

در این حالت عملکرد کنترل کننده PD با اغتشاش ثابت مورد آزمایش قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است اغتشاش از ثانیه ۲ تا ۱۵ اعمال می‌شود. لازم به ذکر است برای ساده‌سازی به هر بازو اغتشاش هم اندازه وارد می‌شود.

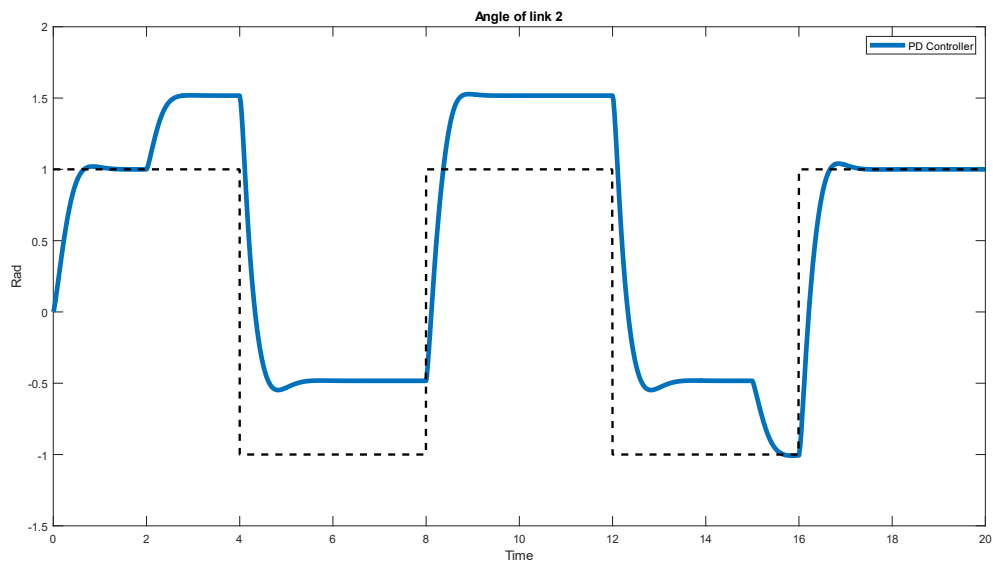


شکل ۵- اغتشاش ثابت خارجی

پاسخ سیستم در دو بازو، در شکل (۶) برای بازوی اول و شکل (۷) برای بازوی دوم نشان داده شده است. در ثانیه‌ی ۲ (ورود اغتشاش) بین خروجی و ورودی مرجع حدوداً ۰/۴۵ رادیان تفاضل ایجاد می‌شود و تا پایان وجود اغتشاش این اختلاف حفظ می‌گردد.



شکل ۶- زاویه بازوی اول با استفاده از کنترل کننده PD پس از اعمال اغتشاش ثابت d_1



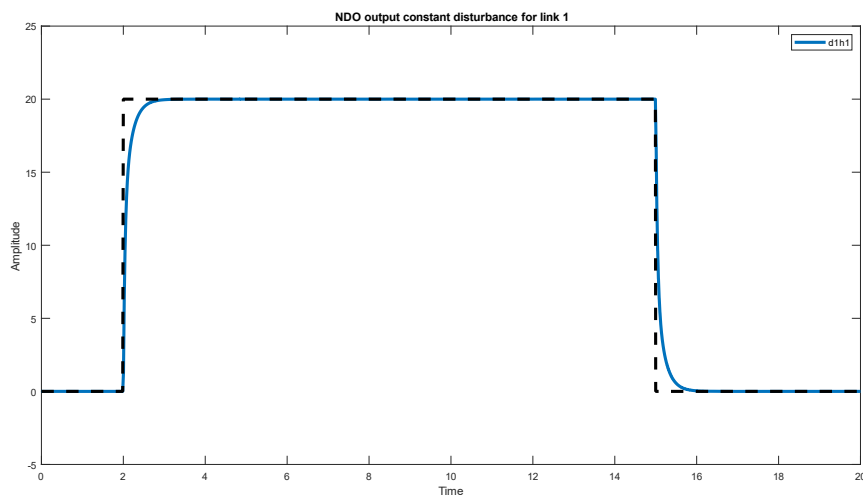
شکل ۷- زاویه بازوی دوم با استفاده از کنترل کننده PD پس از اعمال اغتشاش ثابت d_1

به وضوح مشاهده می شود کنترل کننده PD توانایی مقابله با اغتشاش را ندارد، لذا برای پایداری مجانبی نیاز است که از کنترل کننده ای کارا تر استفاده شود. از طرفی در حالت عادی نیاز نیست از کنترل کننده پیچیده ای همانند مد لغزشی که خروجی کنترلی آن معمولاً به صورت وزوز^۱ است، استفاده شود. بنابراین از ترکیب دو کنترل کننده در زمان های اغتشاش و بدون اغتشاش استفاده می شود.

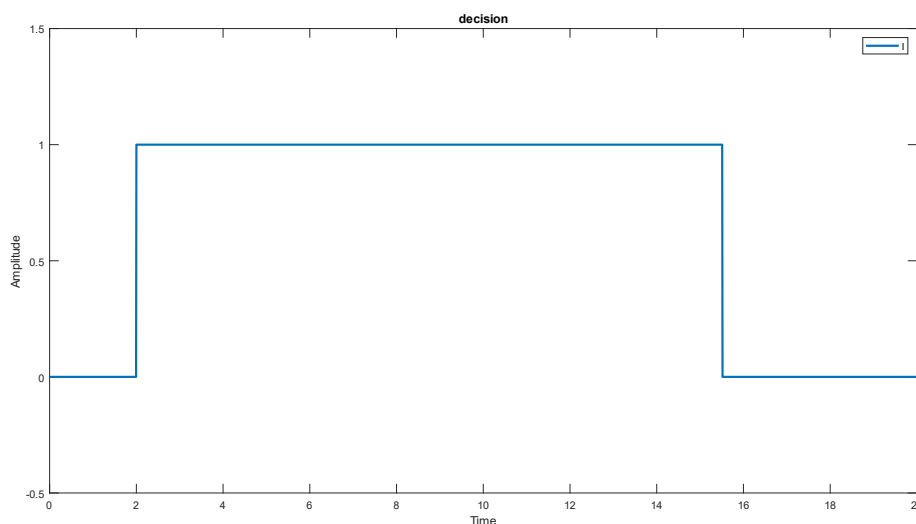
^۱ chattering

۴-۲-۱ اعمال اغتشاش ثابت

در این حالت عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با اغتشاش ثابت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. عملکرد سیستم روتینگر اغتشاش ثابت در شکل (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با افزایش پارامتر c سرعت تخمین بیشتر می شود. زیرا c جزء ضریب مشتق خطا است لذا با افزایش c شیب نمودار خطا به سمت صفر بیشتر می شود.



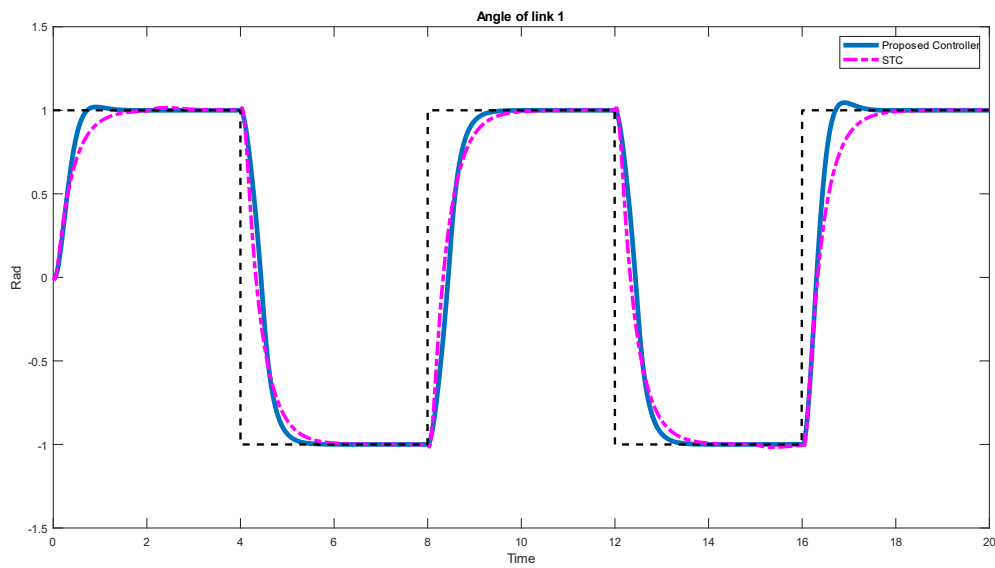
شکل ۸ - تخمین اغتشاش بازوی اول پس از اعمال اغتشاش ثابت d_1



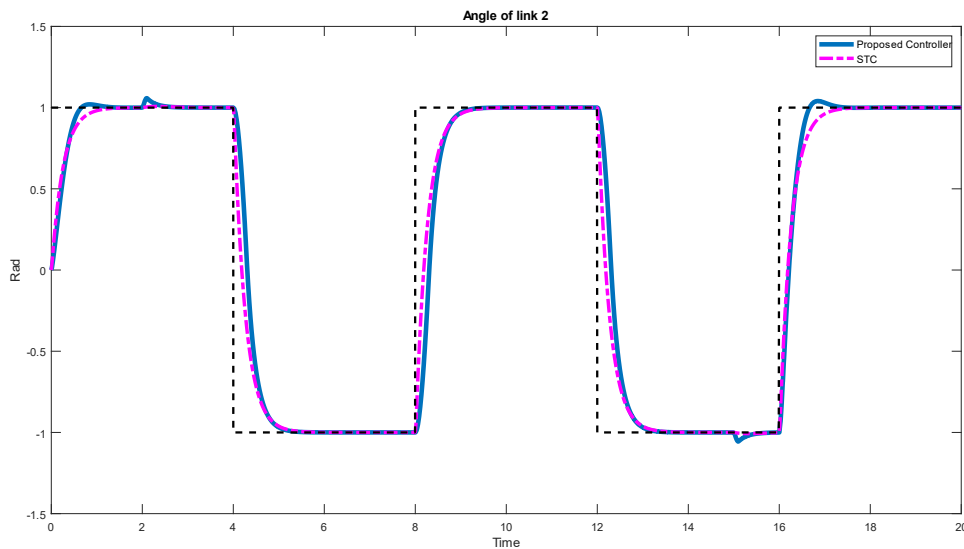
شکل ۹ - خروجی بلوک تصمیم گیری پس از اعمال اغتشاش ثابت d_1

بر اساس مقدار اندازه خروجی (حالت ها) و تخمین اغتشاش بلوک تصمیم گیری I استفاده از کنترل کننده مد لغزشی را تعیین می کند، همانطور که در فرمول (۳۵) نشان داده شده در بعضی موارد این تصمیم گیری می تواند به صورت ۰ و ۱ نباشد. شکل (۹) خروجی بلوک I را نشان می دهد.

پاسخ سیستم در دو بازو در شکل های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. در ثانیه ۲ (ورود اغتشاش) کنترل نظارتی به خوبی اغتشاش را جبران سازی کرده، ولی STC مقداری خطا داشته و پس از تغییر ورودی مرجع خطای آن نیز صفر شده است.



شکل ۱۰ - زاویه بازوی اول با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال اغتشاش ثابت d_1



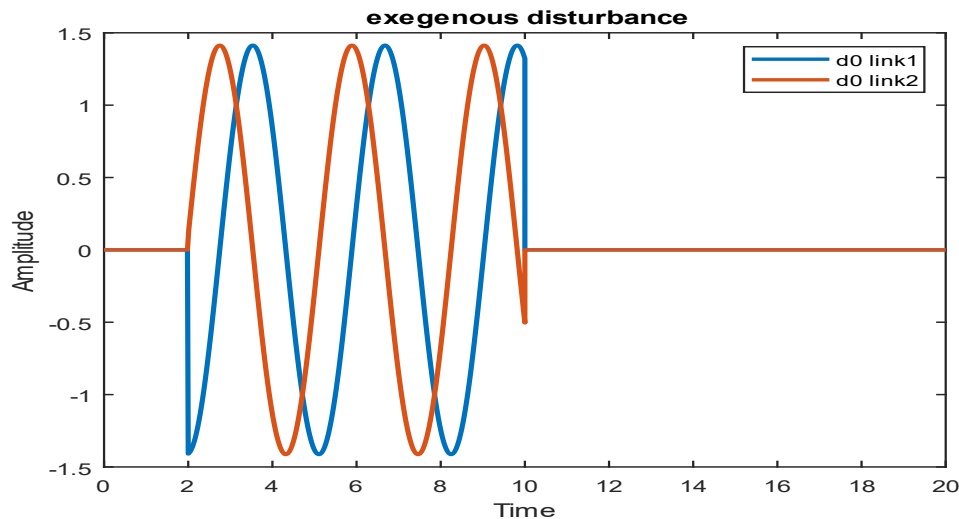
شکل ۱۱ - زاویه بازوی دوم با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال اغتشاش ثابت d_1

همچنین در ثانیه ۱۵ حذف ناگهانی اغتشاش باعث اختلال شده که پس از مدت زمان کوتاهی برطرف می گردد. همانطور که مشاهده می شود روش STC نیز به خوبی بر اغتشاش غلبه کرده هرچند در بازوی اول دچار مقداری فروجهش^۱ شده است. کنترل STC یک نوع از روش های مد لغزشی است که در آن سعی شده پدیده وزوز برطرف شود زیرا باعث تخریب سیستم واقعی و کاهش دقت می شود.

¹ Undershoot

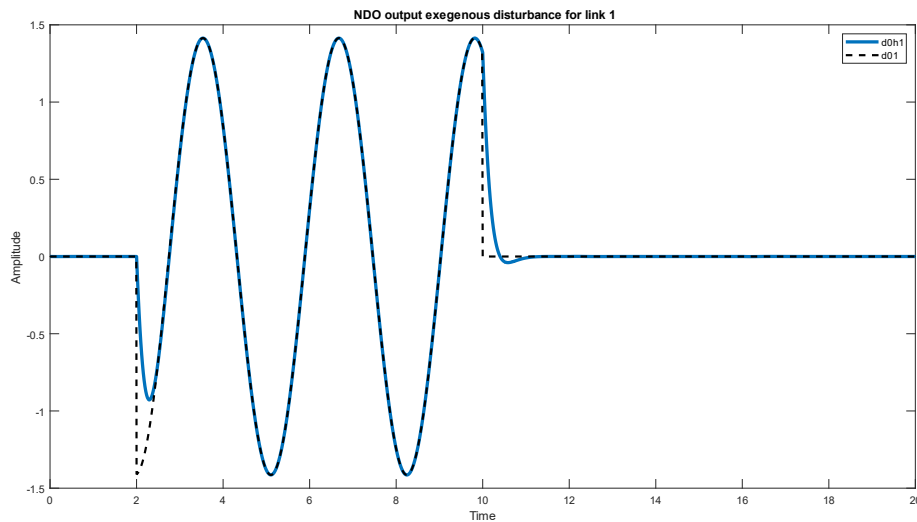
۳-۴- اعمال اغتشاش فقط نوسانی

در این قسمت عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در برخورد با اغتشاش نوسانی مورد بررسی قرار می گیرد. مشخصات این اغتشاش در معادله (۱۳) آورده شده است که بین ثانیه ۲ تا ۱۰ به سیستم اعمال می شود. شکل (۱۲) این اغتشاش را در دو بازو نشان می دهد.



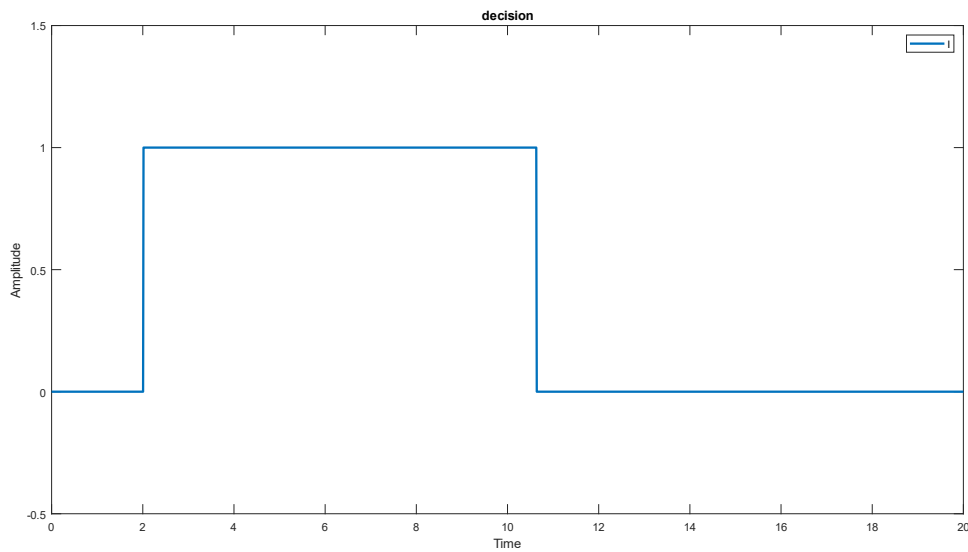
شکل ۱۲- اغتشاش نوسانی (عدم قطعیت ناسازگار)

عملکرد رویکرد این اغتشاش در شکل (۱۳) نشان داده شده است که توانسته مقدار اغتشاش وارده را به درستی تخمین بزند.



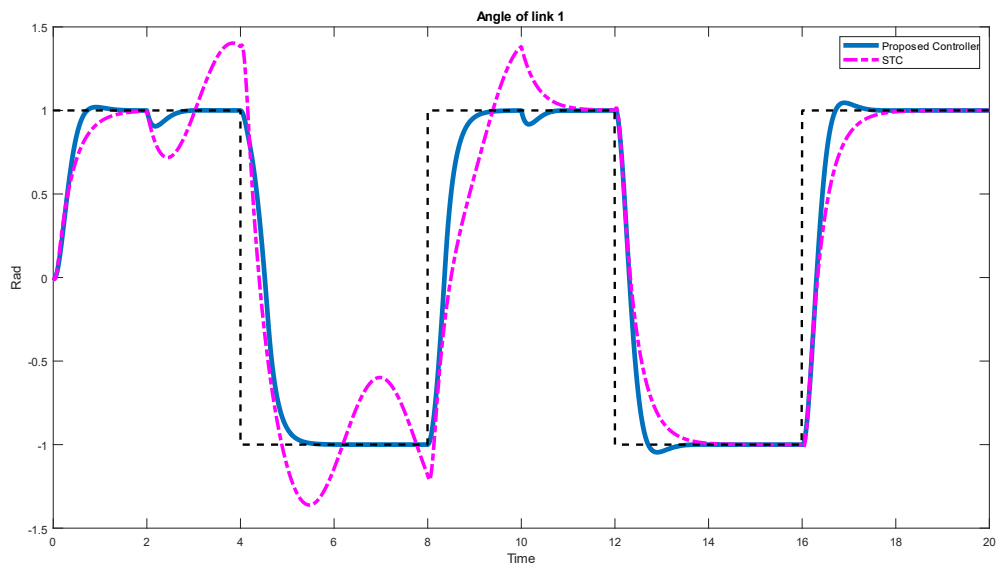
شکل ۱۳- تخمین اغتشاش نوسانی برای بازوی اول پس از اعمال اغتشاش d_0

با توجه به خروجی رویکرد اغتشاش، بلوک تصمیم گیری مقدار $I=1$ را بین ثانیه ۲ و ۱۰ اختیار می کند که در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

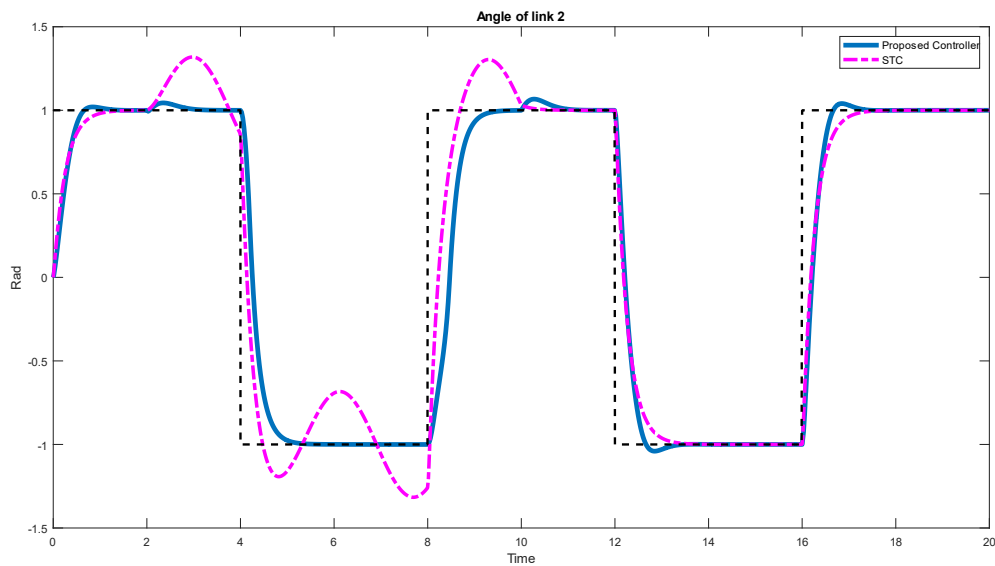


شکل ۱۴- خروجی بلوک تصمیم گیری پس از اعمال اغتشاش d_0

شکل های (۱۵) و (۱۶) زاویه (برحسب رادیان) بازوها را نشان می دهد، همانطور که ملاحظه می شود کنترل کننده پیشنهادی به خوبی توانسته اثر اغتشاش را حذف کرده و خطا را به صفر برساند. لازم به ذکر است که پس از خروج اغتشاش در ثانیه ۱۰ تغییری در خروجی ایجاد شده است که پس از مدتی میرا می گردد. همان طور که انتظار می رود فقط در زمانی که I مقداری غیر از صفر را اختیار می کند سیگنال کنترلی از NSMC استفاده کرده و در مواقع عادی وجود نخواهد داشت. لازم به ذکر است، کنترل کننده STC به علت صفر نشدن سطح لغزش توانایی مقابله با این اغتشاش را ندارد.

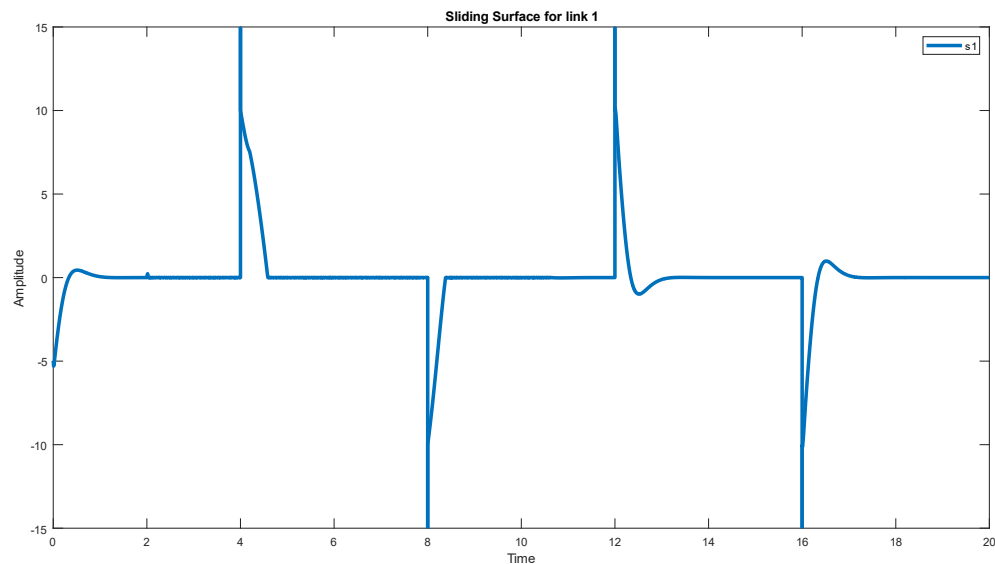


شکل ۱۵- زاویه بازوی اول با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال اغتشاش d_0

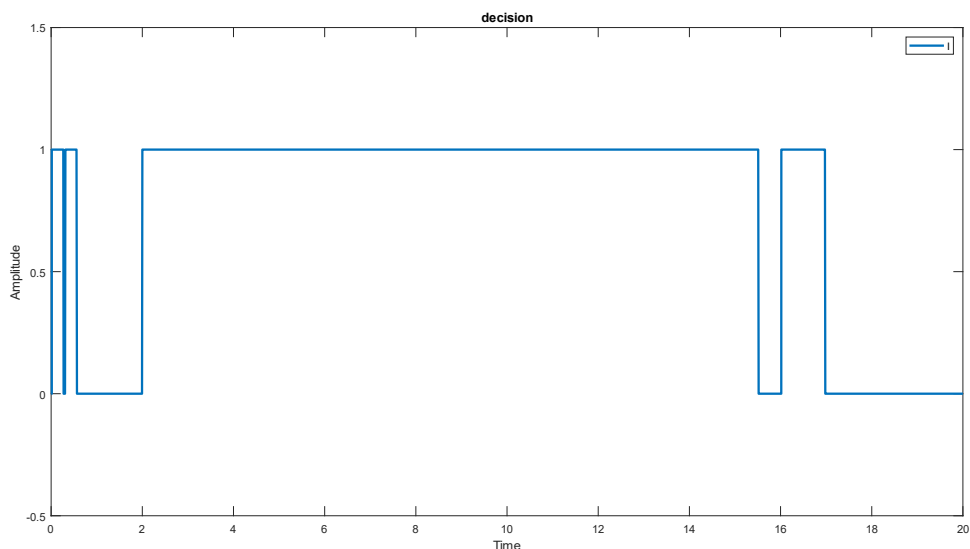


شکل ۱۶- زاویه بازوی دوم با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال اغتشاش d_0

همانطور که در قسمت طراحی کنترل کننده مد لغزشی اشاره شد، به علت عدم میل کردن سطح لغزش به صفر، کنترل کننده SMC توانایی مقابله با این نوع اغتشاش را ندارد، لذا NSMC معرفی شد. بنابراین، باید سطح لغزش به صفر میل کند. اصلی ترین دلیل استفاده از NSMC میل کردن سطح لغزش در حضور اغتشاش ناسازگار به صفر است که شکل (۱۷) سطح لغزش این کنترل کننده را نشان می دهد. طبق انتظار سطح لغزش در NSMC به صفر میل کرده است.



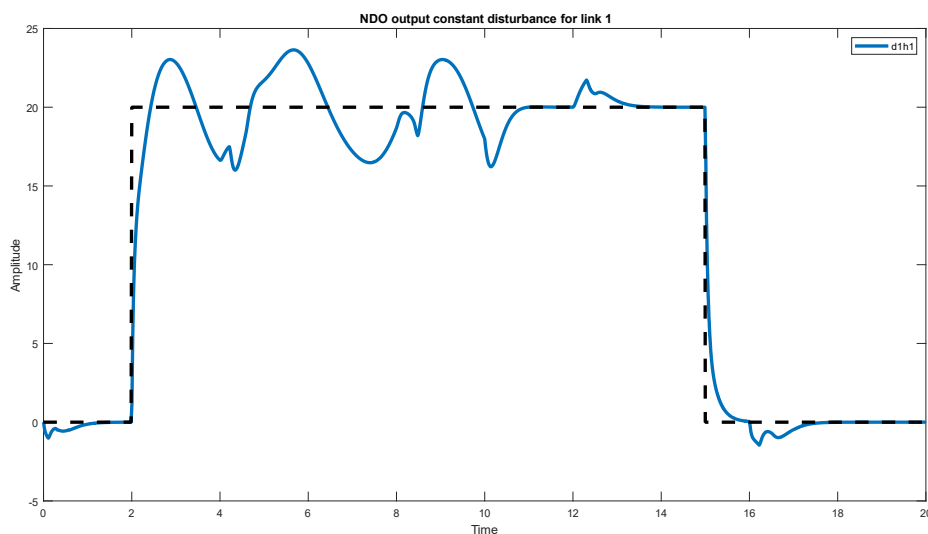
شکل ۱۷- سطح لغزش بازوی اول با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال اغتشاش d_0



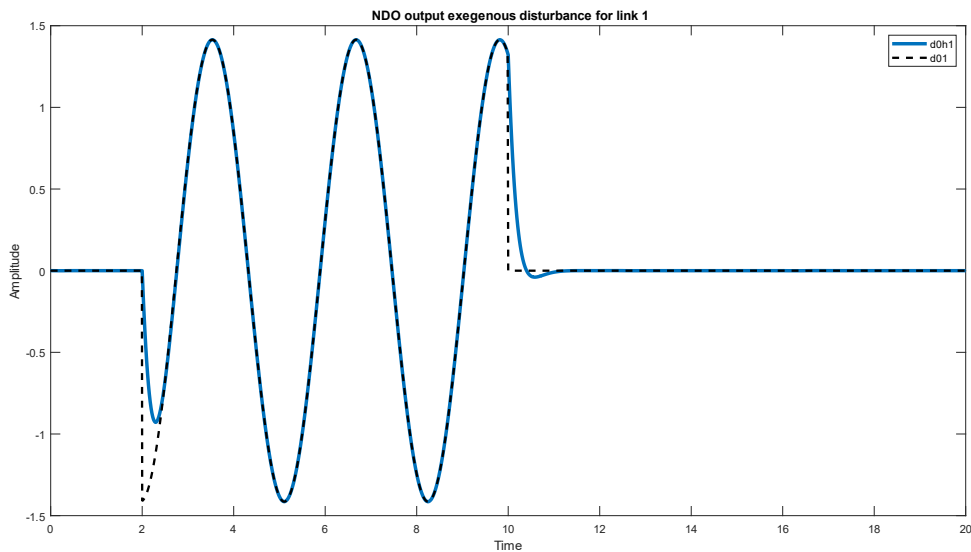
شکل ۱۸ - خروجی بلوک تصمیم گیری پس از اعمال عدم قطعیت، اغتشاش ثابت و اغتشاش نوسانی

۴-۴- وجود عدم قطعیت، اغتشاش ثابت، اغتشاش نوسانی

اگر یک یا چند پارامتر ربات بر اثر بار ناگهانی و یا عوامل دیگر دچار تغییر شود باید ربات نسبت به این تغییرات مقاوم بوده و بتواند ورودی سیستم را دنبال کند و پاسخ مناسبی داشته باشد. لذا، در این بخش تأثیر عدم قطعیت بر کنترل کننده پیشنهادی بررسی می شود. لذا وزن بازوی دوم به اندازه ۵۰ درصد اضافه می گردد [۳۱]. روتیگر اغتشاش به تغییرات در پارامترهای سیستم واکنش نشان داده و آن‌ها را به عنوان اغتشاش در نظر می گیرد. همچنین دو اغتشاش ثابت و نوسانی همانند دو حالت قبل به سیستم اضافه می گردند. در واقع عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در شرایط سخت گیرانه مورد بررسی قرار می گیرد. خروجی بلوک تصمیم گیری و خروجی روتیگرهای اغتشاش در زیر نشان داده شده است.

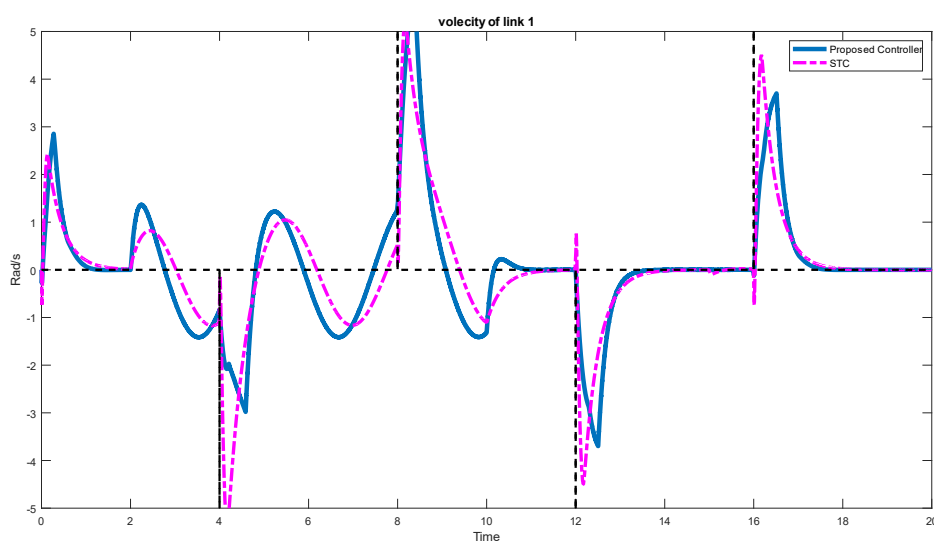


شکل ۱۹ - تخمین اغتشاش ثابت بازوی اول پس از اعمال عدم قطعیت، اغتشاش ثابت و اغتشاش نوسانی



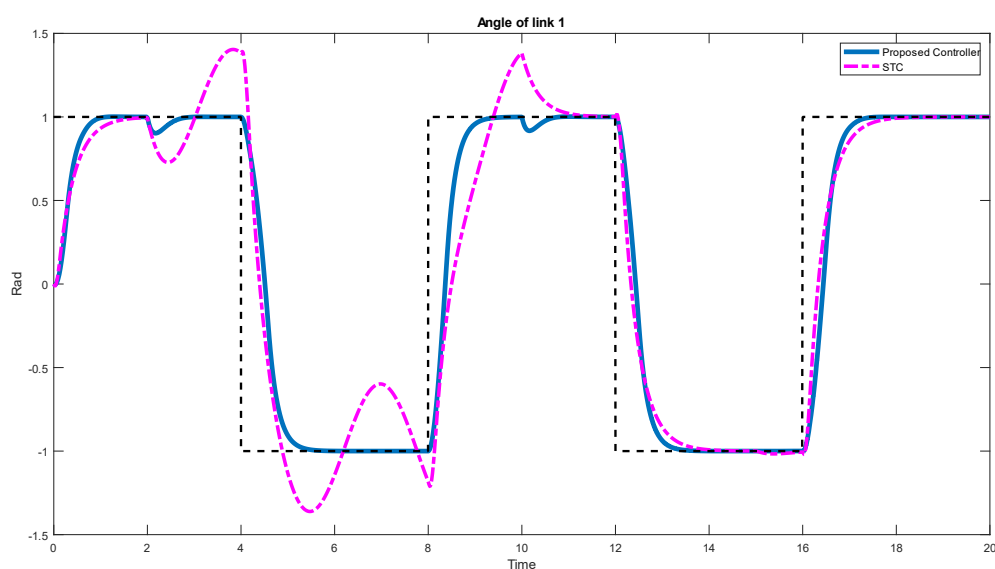
شکل ۲۰- تخمین اغتشاش نوسانی برای بازوی اول پس از اعمال عدم قطعیت، اغتشاش ثابت و اغتشاش نوسانی

همانطور که ملاحظه می کنید، رویتگر اغتشاش غیرخطی برای اغتشاش ثابت به خوبی نتوانسته اغتشاش را تعقیب نماید هرچند که نتوانسته است در نزدیکی اغتشاش ثابت نوسان کند. با توجه به اینکه \dot{q} برابر با صفر نمی شود، رویتگر به مقداری غیر از اغتشاش میل خواهد کرد که بستگی به مقدار \dot{q} دارد. اغتشاش ناسازگار باعث تغییر در \dot{q} می شود. بنابراین خروجی رویتگر در نزدیکی اغتشاش نوسان می نماید. سرعت زاویه برای بازوی اول را می توان در شکل (۲۱) مشاهده کرد، با مقایسه با شکل (۲۲) می توان به این نتیجه رسید که زمانی سرعت زاویه ای به صفر می رسد، رویتگر اغتشاش ثابت، می تواند اغتشاش را به درستی ردیابی کند. لازم به ذکر است که رویتگر اغتشاش برای اغتشاش نوسانی به علت بستگی نداشتن به تغییر پارامترها به درستی عمل تشخیص را انجام می دهد.

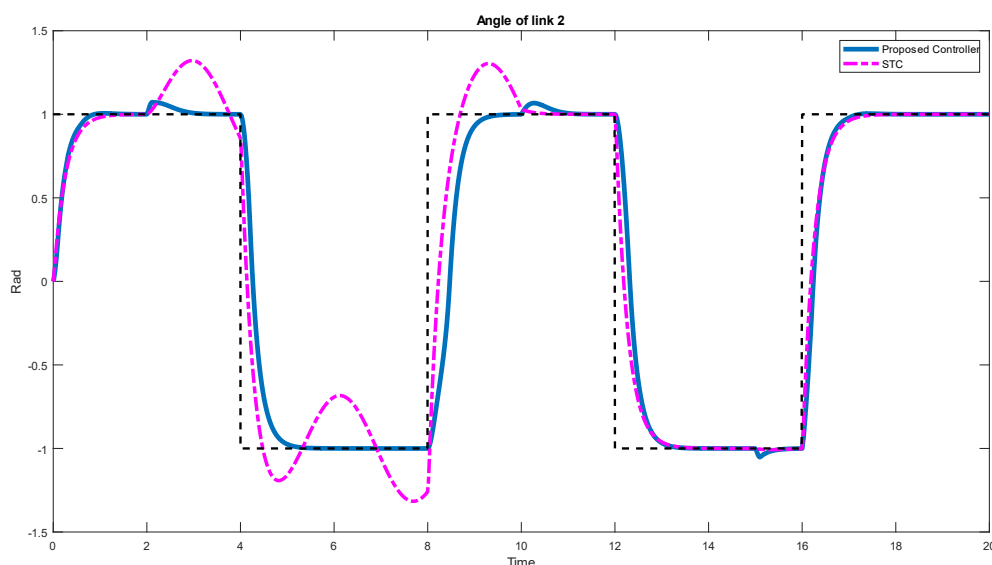


شکل ۲۱- سرعت زاویه‌ای بازوی اول با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال عدم قطعیت، اغتشاش ثابت و اغتشاش نوسانی

همانطور که گفته شد، روتینگر اغتشاش ثابت به درستی عمل نمی‌نماید اما با توجه به اینکه بلوک I بگونه ای طراحی شده است که اینگونه نوسانات را در نظر نگیرد، لذا کنترل کننده به درستی خطا را به صفر می‌رساند که در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۲- زاویه بازوی اول با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال عدم قطعیت، اغتشاش ثابت و اغتشاش نوسانی



شکل ۲۳- زاویه بازوی دوم با استفاده از کنترل کننده نظارتی پس از اعمال عدم قطعیت، اغتشاش ثابت و اغتشاش نوسانی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای تخمین اغتشاش از رویکردهای اغتشاش غیرخطی استفاده شد که نتایج عددی، توانایی آنان را در شبیه‌سازی تایید کردند. نشان داده شد که این رویکردها در مقابل تغییر در پارامترهای سیستم مقاوم هستند و حتی می‌توانند عدم قطعیت‌ها را شناسایی و به خوبی تاثیر آن‌ها را کم کنند. به طور کلی می‌توان مزایای کنترل نظارتی بر پایه رویکرد اغتشاش را در این موارد خلاصه کرد. ۱- مقاوم بودن در برابر اغتشاش خارجی ۲- مقاوم بودن در برابر اغتشاش ناسازگار ۳- مقاومت در برابر عدم قطعیت در پارامترها در استفاده از کنترل کننده PD در شرایط عادی ۴- حذف وزوز در صورت وجود عدم قطعیت پس از ثابت شدن شرایط سیستم. مجموع موارد بالا خواص کنترل کننده‌ای مقاوم در برابر شرایط اغتشاش و عدم قطعیت و کنترل کننده‌ای مناسب در شرایط عادی را نشان می‌دهد. یکی از مشکلاتی که کنترل کننده‌ی پیشنهادی دارد، عدم تخمین مناسب اغتشاشات در صورت وجود ورودی غیر از پله است. در اینصورت رویکرد اغتشاش را با خطا تخمین می‌زند و نیاز است که کنترل کننده‌ی مد لغزشی به گونه‌ای طراحی گردد که این مقدار خطا را جبران نماید. حل این مسئله در آینده یکی از مهمترین فعالیت‌هایی است که باید انجام شود. به علاوه، با توجه به اینکه رویکردها در بعضی موارد ممکن است با خطا رو به رو شوند لازم است رویکردی طراحی شود که بتواند در تمامی شرایط اغتشاش را تخمین بزند و همچنین می‌توان از کنترل کننده‌های متفاوتی همانند کنترل کننده مد لغزشی انتگرالی و کنترل مد لغزشی غیر منفرد^۱ نیز استفاده کرد. لازم به ذکر است که تمامی این کنترل کننده‌ها باید توانایی مقابله با اغتشاش ناسازگار را داشته باشند.

^۱ Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control

مراجع

1. S. H. Li, J. Yang, W.-H. chen, Disturbance observer-based control, CRC Press, 2014.
۲. ب. م. مجتبی، "تحلیل نیروهای تعمیم یافته فضای مفاصل و شبیه سازی حرکت پاها در ربات انسان نما با استفاده از معادلات لاگرانژ، کنگره ملی سالانه ایده‌های نوین پژوهشی در علوم مهندسی و تکنولوژی،" ۱۳۹۷.
3. S. Mobayen, S. Mostafavi and A. Fekih, "Non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for underactuated robotic manipulators," IEEE Access, vol. 8, pp. 198067-198077, 2020.
4. X. Liu and D. Liu, "Composite control of nonlinear robotic system with exogenous disturbance," IEEE Access, vol. 7, pp. 19564-19571, 2019.
5. W. -H. Chen, D. J. Ballance, P. J. Gawthrop and J. O'Reilly, "A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 47, no. 4, pp. 932-938, 2000.
6. C. Veil, D. Müller, O. Sawodny, "Nonlinear disturbance observers for robotic continuum manipulators," Mechatronics, vol. 78, Article ID 102518, 2021.
7. B. Brahmi, M. Driscoll, I. K. El Bojairami, M. Saad and A. Brahmi, "Novel adaptive impedance control for exoskeleton robot for rehabilitation using a nonlinear time-delay disturbance observer," ISA Transactions, vol. 108, pp. 381-392, 2021.
8. Y. Mahgoub and A. El-Badawy, "A nonlinear disturbance observer-based control of a structural dynamic model of a twin-tailed fighter aircraft," Nonlinear Dyn, vol. 108, pp. 315-328, 2022.
9. E. Kim, "A fuzzy disturbance observer and its application to control," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 10, no. 1, pp. 77-84, 2002.
10. E. Sariyildiz, H. Sekiguchi, T. Nozaki, B. Ugurlu, and K. Ohnishi, "A stability analysis for the acceleration-based robust position control of robot manipulators via disturbance observer," IEEE/Asme Trans. Mechatronics, vol. 23, no. 5, pp. 2369-2378, 2018.
11. W. Won and K. S. Lee, "Nonlinear observer with adaptive grid allocation for a fixed-bed adsorption process," Comput. Chem. Eng, vol. 46, pp. 69-77, 2012.
12. Y. Pi and X. Wang, "Observer-based cascade control of a 6-DOF parallel hydraulic manipulator in joint space coordinate," Mechatronics, vol. 20, no. 6, pp. 648-655, 2010.
13. H. Fallah Ghavidel and A. A. Kalat, "Observer-based robust composite adaptive fuzzy control by uncertainty estimation for a class of nonlinear systems," Neurocomputing, vol. 230, pp. 100-109, 2017.
14. W. He, H. Huang and S. S. Ge, "Adaptive neural network control of a robotic manipulator with time-varying output constraints," IEEE Trans. Cybern, vol. 47, no. 10, pp. 3136-3147, 2017.
15. H. Zhang, X. Wei, H. R. Karimi, and J. Han, "Anti-disturbance control based on disturbance observer for nonlinear systems with bounded disturbances," J. Franklin Inst, vol. 355, no. 12, pp. 4916-4930, 2018.
16. Z. J. Yang, Y. Fukushima, and P. Qin, "Decentralized adaptive robust control of robot manipulators," vol. 20, no. 6, pp. 181-186, 2018.
17. H. Zhang, X. Wei, L. Zhang and M. Tang, "Disturbance rejection for nonlinear systems with mismatched disturbances based on disturbance observer," J. Franklin Inst, vol. 354, no. 11, pp. 4404-4424, 2017.
18. J. Y. Lau, W. Liang and K. K. Tan, "Adaptive sliding mode enhanced disturbance observer-based control of surgical device," ISA Trans, vol. 90, pp. 178-188, 2019.
19. M. Van, "An enhanced tracking control of marine surface vessels based on adaptive integral sliding mode control and disturbance observer," ISA Trans, vol. 90, pp. 30-40, 2019.

20. E. Sariyildiz and K. Ohnishi, "Bandwidth constraints of disturbance observer in the presence of real parametric uncertainties, " *Eur. J. Control*, vol. 19, no. 3, pp. 199–205, 2013.
21. K. S. Eom, I. H. Suh and W. K. Chung, "Disturbance observer based path tracking control of robot manipulator considering torque saturation, " *Mechatronics*, vol. 11, no. 3, pp. 325–343, 2001.
22. C. Jing, H. Xu, and X. Niu, "Adaptive sliding mode disturbance rejection control with prescribed performance for robotic manipulators, " *ISA Trans*, vol. 91, pp. 41–51, 2019.
23. W.-H. Chen, "Disturbance observer based control for nonlinear systems, " *IEEE/Asme Trans. Mechatronics*, vol. 9, no. 4, pp. 706–710, 2004.
24. N. Masud, C. Smith and M. Isaksson, "Disturbance observer based dynamic load torque compensator for assistive exoskeletons, " *Mechatronics*, vol. 54, pp. 78–93, 2018.
25. X. S. Chen, J. Yang, S. H. Li, and Q. Li, "Disturbance observer based multi-variable control of ball mill grinding circuits, " *J. Process Control*, vol. 19, no. 7, pp. 1205–1213, 2009.
26. A. Vahidi-Moghaddam, A. Rajaei and M. Ayati, "Disturbance-observer-based fuzzy terminal sliding mode control for MIMO uncertain nonlinear systems, " *Appl. Math. Model*, vol. 70, pp. 109–127, 2019.
27. S. Li, H. Wang, A. Aitouche and N. Christov, "Sliding mode observer design for fault and disturbance estimation using Takagi–Sugeno model, " *Eur. J. Control*, vol. 44, pp. 114–122, 2018.
28. A. Ibrahim, "Optimal design of super twisting control with PSO algorithm for robotic manipulator, " no. 9, pp. 1–15, 2018.
29. M. Khamar and M. Edrisi, "Designing a backstepping sliding mode controller for an assistant human knee exoskeleton based on nonlinear disturbance observer, " *Mechatronics*, vol. 54, pp. 121–132, 2018.
30. A. Otsuka and F. Nagata, "Application of genetic algorithms to fine-Gain tuning of improved the resolved acceleration controller, " *Procedia - Procedia Comput. Sci*, vol. 22, pp. 50–59, 2013.
31. V. S. Jr, "Dynamic model of a two-link robot manipulator with fuzzy uncertain parameters, " vol. 6, pp. 986–992, 2014.