مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۸۰-۶۹

طراحی کنترل‌کننده مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز برای سیستم‌های مکانیکی متصل خطی درحضور اغتشاش خارجی

بابک رنجبر[۱]، ابوالفضل رنجبر نوعی[۲]، بهروز رضایی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری برق-کنترل ، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، babak.r2012@yahoo.com

[۲]استاد تمام، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل،a.ranjbar@nit.ac.ir

[۳]دانشیار ، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل،brezaie@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹ ویرایش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۰

چکیده: در این مقاله یک کلاس از سیستم‌های مکانیکی متصل خطی دارای اغتشاش با اتصالات خطی ناشناخته بین زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شده که برای ردیابی ورودی مرجع، تکنیک کنترل مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز (DAITSMC) پیشنهاد شده است. برای کنترل غیرمتمرکز، سیستم متصل به چند زیرسیستم تقسیم شده و با انتخاب سطح لغزش ترمینال انتگرالی برای هر زیرسیستم، علاوه بر افزایش سرعت ردیابی ورودی مرجع در زمان محدود، اثر اغتشاش حذف می‌شود. اثر اتصالات خطی ناشناخته بین زیرسیستم‌ها بصورت نامعینی در نظر گرفته شده و بدلیل مشخص نبودن کران آن‌ها، توسط روابط تطبیقی تخمین زده می‌شوند. با کاندید شدن یک تابع لیاپانوف و انتخاب مناسب پارامترهای طراحی، پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می‌شود. روش پیشنهادی بر روی دو سیستم مکانیکی متصل اعمال گشته؛ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با چند روش کنترلی، نشان داده که روش پیشنهادی DAITSMC برای سیستم‌های متصل در حضور اغتشاش کارامد است و خطای همگرایی سریع‌تر صفر می‌شود.

کلمات کلیدی: سیستم متصل خطی، کنترل تطبیقی، کنترل مدلغزشی ترمینال غیرمتمرکز، تابع لیاپانوف، اتصالات خطی ناشناخته، اغتشاش خارجی.

Design of Decentralized Adaptive Integral Terminal Sliding Mode Controller for Linear Interconnected Mechanical Systems in the Presence of External Disturbance

Babak Ranjbar, Abolfazl Ranjbar Noiey and Behrooz Rezaie

Abstract: In this paper, a tracking decentralized Adaptive Integral Terminal Sliding Mode control (DAITSMC) technique is proposed for a class of linear interconnected mechanical systems with unknown linear interconnections between subsystems and in the presence of disturbance is considered. In this way, the interconnected system is divided into several subsystems. Then an integral terminal sliding surface is considered for each subsystem. The proposed approach increases the speed of input tracking in a finite time as well as the disturbance attenuation. The effect of unknown linear interconnections between subsystems is considered as uncertainty that is estimated by adaptive rules. The stability of the closed-loop system is guaranteed by a Lyapunov function and selecting the appropriate design parameters. The developed method is applied to two interconnected mechanical systems; the simulation results show that the proposed method (DAITSMC) is efficient for interconnected systems in the presence of disturbance. Comparison of simulation results with several control methods shows that the proposed method (DAITSMC) is efficient for linear interconnected systems in the presence of disturbance and the convergence error becomes zero faster.

Keywords: linear interconnected system, adaptive control, decentralized terminal sliding mode control, Lyapunov function, unknown linear interconnections, external disturbance.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

۱- مقدمه

کنترل مدلغزشی یک روش محبوب برای کنترل سیستم‌های نامشخص بوده و در زمینه‌های متنوعی از جمله کنترل وسایل زیرآب[۱]، بازوی ربات[۲]، فضاپیماها[۳] و وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین[۴] کاربرد دارد. بدلیل استفاده از تابع ناپیوسته در کنترل‌کننده مدلغزشی، ویژگی‌های اصلی آن مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت مدل و استحکام در مقابله با اغتشاش خارجی است. برای تشکیل مدلغزشی دو مرحله وجود دارد؛ در مرحله اول با انتخاب سطح لغزش مناسب، حالت‌ها بر روی سطح لغزش باقی مانده[۵] و در مرحله دوم با انتخاب قانون کنترلی مناسب، حالت‌های سیستم به سطح لغزشی انتخابی در مرحله اول میل می‌کنند[۶]. زمانی که حالت‌های سیستم به سطح لغزش میل کرده، مرتبه سیستم کنترل کاهش یافته و باعث مقابله با اغتشاش خارجی و عدم قطعیت می‌گردد[۷, ۸]؛ اما کنترل مدلغزشی دارای یک نقطه ضعف مهم بوده که سبب شده سیستم کنترل هنگام رسیدن به سطح لغزش دارای استحکام کافی نبوده و باعث ایجاد پدیده‌ای بنام چترینگ[۱] شود[۹] که یک مشکل برای سیستم‌های فیزیکی واقعی است[۱۰]. برای کاهش چترینگ، روش‌های مختلفی وجود دارد از جمله: ارائه تابع اشباع به جای تابع علامت[۱۱]، استفاده از کنترل مدلغزشی مرتبه دوم یا بالاتر[۲] که در آن مشتقات زمانی ورودی کنترل به صورت یک متغیر جدید آورده شده [۱۲]، ارائه کنترل مدلغزشی مبتنی بر رؤیتگر[۳][۱۳]، استفاده از روش مدلغزشی تمام مرتبه[۴][۱۴] که در این روش، بجای دینامیک مرتبه کاهش یافته از یک دینامیک مرتبه کامل مطلوب استفاده شده به طوری که یک فیلتر پایین‌گذر مرتبه اول[۵] برای صاف کردن سیگنال در دینامیک کنترل مدلغزشی آورده شده است.

اخیرا روش کنترل مدلغزشی ترمینال[۶] (TSMC) برای همگرایی زمان محدود حالت‌ها و کاهش چترینگ ارائه شده است[۱۵] که این روش دارای ویژگی‌هایی نظیر ردیابی سریع و همگرایی زمان محدود است[۱۶-۱۸]. در کنترل TSMC برای افزایش همگرایی، یک ترم غیرخطی به سطح لغزش افزوده تا علاوه بر داشتن مزایای SMC، عملکرد پایداری افزایش یافته و سرعت همگرایی در نزدیکی نقطه تعادل بیشتر شود. روش TSMC برای بسیاری از سیستم‌های خطی و سیستم‌های غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته اما بدلیل استفاده از توان کسری در طراحی سطح لغزش از مشکلات تکینگی[۷] رنج می‌برد[۱۹, ۲۰]. در [۲۱, ۲۲] برای از بین بردن مشکل تکینگی، روش nonsingular TSMC پیشنهاد شده است. در [۲۳] روش مدلغزشی ترمینال انتگرال[۸] آورده شده که سبب شده علاوه بر از بین بردن تکینگی، اثر چترینگ نسبت به SMC کاهش یابد.

کنترل مدلغزشی برای سیستم‌هایی کاربرد دارد که دارای عدم قطعیت و اغتشاش کراندار و محدود باشند. در صورت محدود نبودن عدم قطعیت، از روش‌های ترکیبی مانند کنترل مدلغزشی فازی[۲۴]، مدلغزشی عصبی[۲۵] و مدلغزشی تطبیقی[۲۶] استفاده شده تا بتوان با اثرات عدم قطعیت مقابله کرد.

امروزه طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های چندعاملی و سیستم های بهم پیوسته بیشتر مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات زیادی بر روی این سیستم‌ها انجام شده است[۲۷]. سیستم‌های قدرت، شبکه آبرسانی، شبکه‌های ارتباطی، اتصال بین بازوی ربات، اتصال بین چند سیستم مکانیکی؛ که شامل چند زیرسیستم بوده و زیرسیستم‌ها توسط اتصالات ویژه‌ای مانند خطوط انتقال نیرو و اتصالات مکانیکی بهم وصل شده چند نمونه از سیستم‌های متصل بوده که اخیرا بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند[۲۸, ۲۹]. در چند دهه گذشته استفاده از کنترل‌کننده متمرکز برای سیستم‌های متصل بعلت عملی نبودن و نداشتن قابلیت اجرا بسیار محدود بوده است[۳۰]. برای این سیستم‌ها روش‌های غیرمتمرکز بدلیل اجرای راحت، اندازه‌گیری محلی متغیرها و کاهش پیچیدگی محاسباتی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است[۳۱]. برای سیستم‌های متصل روش‌های مختلف کنترل غیرمتمرکز از جمله کنترل تناسبی انتگرال‌گیر غیرمتمرکز[۳۲]، کنترل مدل پیشبین غیرمتمرکز [۳۳]، کنترل فازی غیرمتمرکز [۳۴]، کنترل عصبی غیرمتمرکز[۳۵] و کنترل مدلغزشی غیرمتمرکز[۳۶] استفاده شده است. در سال‌های اخیر، کنترل مدلغزشی (SMC) در زمینه کنترل غیرمتمرکز سیستم‌های متصل بسیار مورد توجه قرار گرفته است[۳۷, ۳۸].

هدف این مقاله ردیابی ورودی مرجع توسط کلاسی از سیستم‌های متصل با اتصالات خطی ناشناخته در حضور اغتشاشات خارجی است که برای رسیدن به این هدف، کنترل‌کننده مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز (DAITSMC) پیشنهاد شده است. با انتخاب سطح لغزش مناسب برای هر زیرسیستم، کنترل‌کننده ITSMC طراحی شده تا ردیابی ورودی مرجع در زمان محدود و رسیدن به سطح لغزش تضمین شود. در بسیاری از تحقیقات، اتصالات بین زیرسیستم‌ها دردسترس بوده لذا نیازی به تخمین آن‌ها نیست؛ اما در مقاله پیش‌رو فرض شده که اتصالات بین زیرسیستم‌ها نامشخص و نامعین بوده و بصورت عدم قطعیت درنظر گرفته می‌شود. کنترل‌کننده مدلغزشی در برابر عدم قطعیت و اغتشاش‌های کران‌دار استحکام خوبی داشته، لذا در اختیار نبودن محدوده اتصالات بین زیرسیستم‌ها می‌تواند باعث ناپایداری سیستم شود. برای مقابله با این مشکل، روش کنترل تطبیقی پیشنهاد شده تا اثرات اتصالات نامعین تخمین زده شود.

بطور خلاصه، نوآوری‌های این پژوهش بصورت زیر است:

- در نظر گرفتن اتصالات خطی ناشناخته به عنوان عدم قطعیت در سیستم‌های مکانیکی متصل
- استفاده از روابط تطبیقی برای تخمین اتصالات خطی ناشناخته

[1] Chattering
[2] Second-order or high-order sliding mode control
[3] Observer base sliding mode control
[4] Full order sliding mode control
[5] First order low pass filter
[6] Terminal sliding mode control
[7] Singularity
[8] Integral Terminal Sliding Mode Control

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

- پایداری سیستم متصل با اتصالات ناشناخته توسط کنترل مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز
- همگرایی زمان محدود و ردیابی ورودی مرجع سریع‌تر در مقایسه با چند روش کنترلی
- مقابله با اثرات اغتشاش خارجی اعمال شده به هر زیرسیستم

بخش‌های مختلف این مقاله برای ارائه طرح پیشنهادی بصورت زیر آورده شده است:

در **بخش ۲** معادله دینامیکی سیستم‌های مکانیکی متصل با چند زیرسیستم در حضور اغتشاش خارجی و اتصالات نامعین توصیف شده، در **بخش ۳** طراحی کنترل‌کننده DAITSMC آورده شده که با انتخاب سطح لغزش مناسب، کنترل‌کننده پیشنهادی طراحی شده و در **بخش ٤** با انتخاب یک تابع لیاپانوف مناسب، پایداری سیستم و ردیابی ورودی مرجع تضمین شده است. در **بخش ٥** مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها بر روی دو سیستم مکانیکی متصل(یک سیستم با سه زیرسیستم متصل و یک سیستم با پنج زیرسیستم که یک زیرسیستم غیرفعال است) آورده شده و با چند روش کنترلی مقایسه شده است؛ در نهایت جمع‌بندی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی در **بخش ٦** ارائه شده است.

۲- مدل فضای حالت سیستم متصل

مدل فضای حالت سیستم‌های مکانیکی متصل خطی با N زیرسیستم بصورت (۱) فرض شده است.

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1}(t) = x_{i2}(t) \\ \dot{x}_{i2}(t) = a_i x_{i1}(t) + b_i x_{i2}(t) + B_i u_i(t) \\ \qquad + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} a_{ij} y_j(t) + d_i(t) \\ y_i(t) = x_{i1}(t) \end{cases} \tag{۱}$$

که $x_i(t) \in R^{n_i}$ ، $u_i(t) \in R$ و $y_i(t) \in R^{r_i}$ بترتیب متغیرهای حالت، ورودی کنترلی و خروجی زیرسیستم iام (i=1,2,…,N) و N تعداد زیرسیستم‌هاست. a_i و b_i پارامترهای مشخص، B_i ضریب ورودی کنترلی برای هر زیرسیستم، a_{ij} و $d_i(t)$ بترتیب تداخل ناشناخته زیرسیستم jام بر زیرسیستم iام و اغتشاش خارجی اعمالی به هر زیرسیستم است.

فرض۱: اغتشاش خارجی $d_i(t)$ محدود به مقدار مثبت و معلوم ρ_i است بصورت:

$$\|d_i(t)\| < \rho_i \tag{۲}$$

۳- طراحی کنترل مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز

در این بخش، به منظور ردیابی ورودی مرجع سیستم‌های متصل(۱) با اتصالات ناشناخته بین زیرسیستم‌ها و اغتشاشات اعمالی به هر زیرسیستم، کنترل‌کننده مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز پیشنهادی طراحی می‌شود. بدلیل مشخص نبودن مقدار و کران a_{ij}، به کمک روابط تطبیقی مقدار a_{ij} تخمین زده می‌شود.

پیش از آوردن نتایج اصلی این بخش، **فرض۲** و **قضیه۱** در ادامه آورده شده است:

فرض۲: مسیر مورد نظر $x_{di1}(t)$ ، همچنین مشتق اول و مشتق دوم آن ($\dot{x}_{di1}(t)$ و $\ddot{x}_{di1}(t)$) کراندار هستند.

قضیه۱: سیستمی بصورت زیر فرض شود: (بخش proposition 8.1 از مرجع [۳۹])

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -k_1\, sign(x_1)|x_1|^{\frac{\alpha}{2-\alpha}} - k_2\, sign(x_2)|x_2|^{\alpha} \end{cases} \tag{۳}$$

اگر $k_1, k_2 > 0$ و $0 < \alpha < 1$ به گونه‌ای انتخاب شوند که چند جمله ای $s^2 + k_2 s + k_1$ هورویتز باشد آنگاه سیستم پایدار زمان محدود است.

مسیر مطلوب $x_{di1}(t)$ (ورودی مرجع) برای هر زیرسیستم مشخص شده، حال اگر خطای بین مسیر مطلوب و حالت هر زیرسیستم با $e_i(t)$ تعریف شود داریم:

$$e_i(t) = x_{di1}(t) - x_{i1}(t) \tag{۴}$$

مشتق زمانی مرتبه اول خطا با $\dot{e}_i(t)$ نشان داده می‌شود.

$$\dot{e}_i(t) = \dot{x}_{di1}(t) - \dot{x}_{i1}(t) = \dot{x}_{di1}(t) - x_{i2}(t) \tag{۵}$$

برای طراحی کنترل‌کننده غیرمتمرکز پیشنهادی، سطح لغزش $s_i(t)$ بصورت (۶) در نظر گرفته می‌شود.

$$s_i(t) = \dot{e}_i(t) + \int_0^t \alpha_i\ \dot{e}_i(t)^{\frac{q_i}{p_i}} + \beta_i\, e_i(t)^{\frac{q_i}{2p_i - q_i}}\ dt \tag{۶}$$

که α_i و β_i به ازای هر i (i=1,2..,N) بگونه‌ای انتخاب شده تا چند جمله‌ای $r^2 + \alpha_i r + \beta_i$ هورویتز گردد. p_i و q_i مقادیر فرد مثبت و نسبت به هم اول فرض شده که $p_i > q_i > 0$ است.

برای تضمین پایداری، ورودی کنترلی درنظر گرفته شده بصورت:

$$u_i(t) = \frac{1}{B_i}\Big(\ddot{x}_{di1}(t) - a_i x_{i1} - b_i x_{i2} + \alpha_i\ \dot{e}_i(t)^{\frac{q_i}{p_i}} + \beta_i\, e_i(t)^{\frac{q_i}{2p_i - q_i}} + \lambda_i\, sat(s_i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} \hat{a}_{ij} y_j\Big) \tag{۷}$$

λ_i یک اسکالر به ازای هر i ($i = 1, 2, .., N$) است که با انتخاب مقادیر مناسب پایداری سیستم تضمین می‌گردد. $\hat{a}_{ij}$ تخمین a_{ij} (پارامتر اتصالات ناشناخته و نامعین بین زیرسیستم‌ها) توسط قوانین تطبیقی است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

$$\dot{\hat{a}}_{ij}^T = -y_j s_i^T \Gamma_i \quad i,j=1,2,..,N, i\neq j \tag{۸}$$

که Γ_i ضریب سرعت همگرایی کنترل‌کننده تطبیقی است.

٤- آنالیز پایداری

در ادامه، با ارائه قضیه‌ای نشان داده شده که با انتخاب تابع لیاپانوف مناسب، کنترل مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز پیشنهادی قادر است علاوه بر حذف اغتشاش خارجی، اتصالات نامشخص بین هر زیرسیستم را تخمین زده و سیستم ورودی مطلوب را در زمان محدود دنبال کند.

قضیه۲: اگر **فرض۱- ۲**و **قضیه ۱** برقرار باشد، ردیابی ورودی مرجع و پایداری سیستم متصل با اتصالات ناشناخته در حضور اغتشاش(۱)، با انتخاب تابع لیاپانوف $V(t)$(۹) و ورودی کنترلی (۷) تضمین می گردد اگر برای گین $\lambda_i\,(i=1,2,..N)$ در قانون کنترلی داشته باشیم $\lambda_i > \rho_i$.

$$V(t)=\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{1}{2}s_i^T s_i+\frac{1}{2}trace(\sum_{\substack{j=1\\ i\neq j}}^{N}\tilde{a}_{ij}^T\Gamma_i^{-1}\tilde{a}_{ij})\right) \tag{۹}$$

لم ۱: از خواص اثر[1] برای دو بردار a وb داریم: (رابطه 10.21 صفحه ۲۹۶ از مرجع [۴۰])

$$a^T b = trace(b\,a^T) \tag{۱۰}$$

اثبات قضیه۲: تابع لیاپانوف $V(t)$در (۹) مشخص شده است، داریم:

$$\tilde{a}_{ij}=a_{ij}-\hat{a}_{ij} \tag{۱۱}$$

که در(۱۱)، $\tilde{a}_{ij}$ اختلاف بین مقدار واقعی (a_{ij}) و مقدار تخمینی اتصالات بین زیرسیستم‌ها($\hat{a}_{ij}$،محاسبه شده توسط قانون تطبیقی(۸)) است.

با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف(۹) داریم:

$$\dot{V}(t)=\sum_{i=1}^{N}\left(s_i^T\,\dot{s}_i+trace(\sum_{\substack{j=1\\ i\neq j}}^{N}\dot{\tilde{a}}_{ij}^T\Gamma_i^{-1}\tilde{a}_{ij})\right) \tag{۱۲}$$

از (۱۱) و $\dot{a}_{ij}=0$ داریم:

$$\dot{V}(t)=\sum_{i=1}^{N}\left(s_i^T\,\dot{s}_i-trace(\sum_{\substack{j=1\\ i\neq j}}^{N}\dot{\hat{a}}_{ij}^T\Gamma_i^{-1}\tilde{a}_{ij})\right) \tag{۱۳}$$

از مشتق‌گیری سطح لغزش $s_i(t)$ (۶) نتیجه می‌شود که:

$$\dot{s}_i(t)=\ddot{e}_i(t)+\alpha_i\,\dot{e}_i(t)^{\frac{q_i}{p_i}}+\beta_i\,e_i(t)^{\frac{q_i}{2p_i-q_i}} \tag{۱۴}$$

از انجا که $\ddot{e}_i(t)=\ddot{x}_{di1}(t)-\dot{x}_{i2}(t)$ است، با جایگذاری (۱) در (۱۴) داریم:

$$\begin{aligned}\dot{s}_i(t)&=\ddot{x}_{di1}(t)-a_ix_{i1}-b_ix_{i2}-B_iu_i(t)\\&-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}a_{ij}y_j(t)-d_i(t)\\&+\alpha_i\,\dot{e}_i(t)^{\frac{q_i}{p_i}}+\beta_i\,e_i(t)^{\frac{q_i}{2p_i-q_i}}\end{aligned} \tag{۱۵}$$

باجایگذاری ورودی کنترلی $u_i(t)$ (۷) در مشتق سطح لغزش (۱۵) داریم:

$$\begin{aligned}\dot{s}_i(t)&=\ddot{x}_{di1}(t)-a_ix_{i1}-b_ix_{i2}\\&-B_i\left(\begin{array}{l}\frac{1}{B_i}(\ddot{x}_{di1}(t)-a_ix_{i1}-b_ix_{i2}+\alpha_i\,\dot{e}_i(t)^{\frac{q_i}{p_i}}\\+\beta_i\,e_i(t)^{\frac{q_i}{2p_i-q_i}}+\lambda_i\,sat(s_i)-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\hat{a}_{ij}y_j)\end{array}\right)\\&-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}a_{ij}y_j(t)-d_i(t)+\alpha_i\,\dot{e}_i(t)^{\frac{q_i}{p_i}}+\beta_i\,e_i(t)^{\frac{q_i}{2p_i-q_i}}\end{aligned} \tag{۱۶}$$

که در نهایت نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned}\dot{s}_i(t)&=-\lambda_i\,sat(s_i)\\&-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}a_{ij}y_j(t)+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\hat{a}_{ij}y_j-d_i(t)\end{aligned} \tag{۱۷}$$

با جایگذاری $\dot{s}_i$ (۱۷) و $\dot{\hat{a}}_{ij}^T$ (۸) در (۱۳)داریم:

$$\dot{V}(t)=\sum_{i=1}^{N}\left(\begin{array}{l}s_i^T(-\lambda_i\,sat(s_i)-\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\tilde{a}_{ij}y_j(t)\\-d_i(t))+trace(\sum_{\substack{j=1\\ i\neq j}}^{N}y_js_i^T\tilde{a}_{ij})\end{array}\right) \tag{۱۸}$$

از **لم۱** نتیجه می‌شود که:

$$\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}s_i^T\tilde{a}_{ij}y_j(t)=trace(\sum_{\substack{j=1\\ i\neq j}}^{N}y_js_i^T\tilde{a}_{ij}) \tag{۱۹}$$

با جایگذاری (۱۹) در (۱۸) و ساده سازی داریم:

$$\dot{V}(t)=\sum_{i=1}^{N}\left(-\lambda_i\,\|s_i\|-s_i^Td_i(t)\right) \tag{۲۰}$$

از **فرض۱** ($\|d_i(t)\|<\rho_i$) می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\dot{V}(t)\leq\sum_{i=1}^{N}-(\lambda_i-\rho_i)\|s_i\| \tag{۲۱}$$

از آنجا که تابع لیاپانوف $V(t)$ (۹) همیشه مثبت بوده و با انتخاب $\lambda_i>\rho_i$ مشتق تابع لیاپانوف $(\dot{V}(t))$ (۱۲) همیشه منفی شده، پس $V(t)$ یک کاندید مناسب برای اثبات پایداری سیستم متصل است. می‌توان نتیجه گرفت که سیستم به ازای سطح لغزش(۶)، ورودی کنترلی(۷) و روابط تطبیقی(۸) پایدار و ورودی مرجع را دنبال می‌کند. ■

در **الگوریتم ۱** مراحل طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی ارائه شده است:

[1] trace

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

الگوریتم ۱: روال طراحی کنترل‌کننده مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی برای کلاسی از سیستم‌های متصل خطی با اتصالات ناشناخته در حضور اغتشاش

هدف: ردیابی زمان محدود ورودی مرجع، حذف اغتشاش و چترینگ برای سیستم‌های متصل که اثرات بین زیرسیستم‌ها نامعین است.

مفروضات: هیچ اطلاعاتی از اتصالات بین زیرسیستم‌ها در اختیار نبوده و اغتشاش خارجی وارد شده به هر زیرسیستم کراندار و محدود (طبق **فرض ۱**) است.

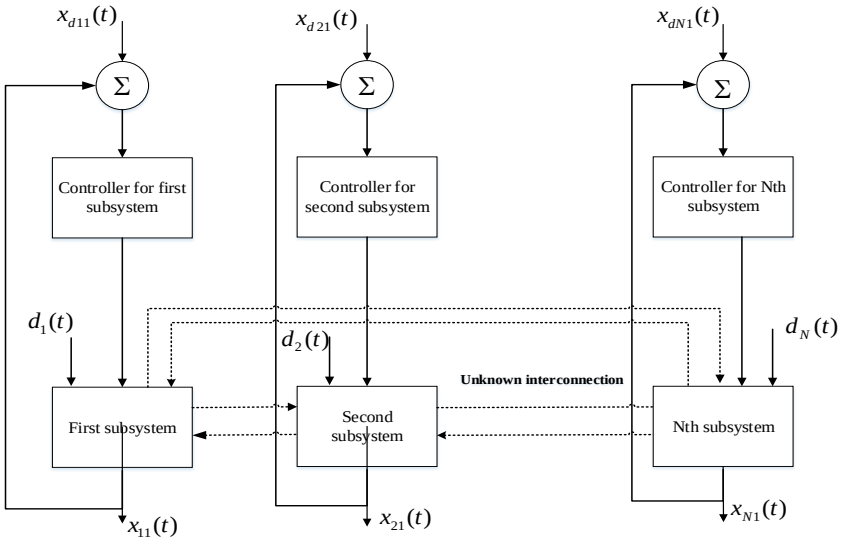
گام ۱: تعیین سطح لغزش ترمینال انتگرال(۶) توسط معادله خطا(۴) و مشتق خطا(۵)

گام ۲: اعمال قانون تطبیقی(۸) و محاسبه $\hat{a}_{ij}$ (اثرات متقابل بین زیرسیستم‌ها)

گام ۳: تعیین پارامتر λ_i برای پایداری سیستم متصل و ردیابی ورودی مرجع

گام ٤: اعمال ورودی کنترلی(۷) به هر زیرسیستم و کنترل غیرمتمرکز سیستم متصل

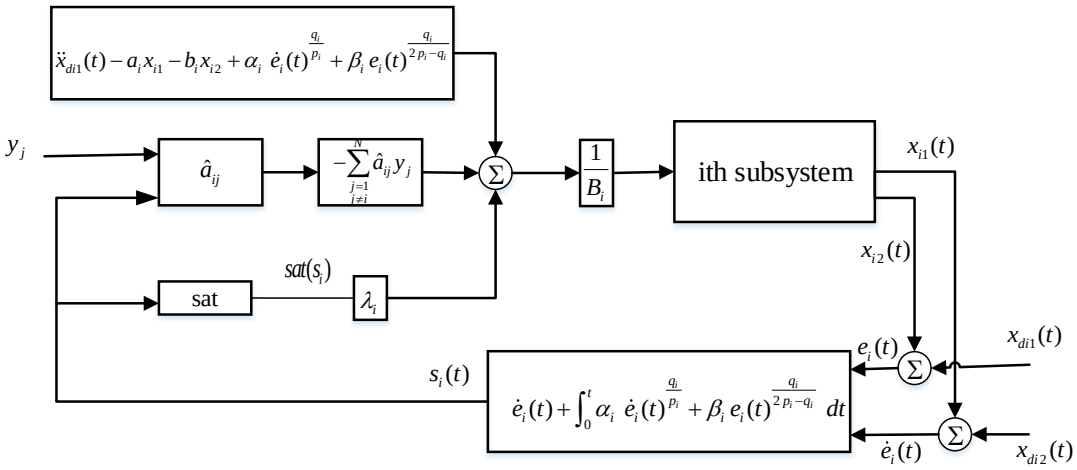
در شکل ۱ بلوک دیاگرام کلی سیستم در حضور اغتشاش خارجی $d_i(t)$ و اتصالات نامعین و نامشخص نشان داده شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام کلی سیستم متصل با اتصالات ناشناخته در حضور اغتشاش خارجی

در شکل ۱، $u_i(t)$ ، $x_{i1}(t)$ و $x_{di1}(t)$ برای $(i=1,2,...N)$ بترتیب ورودی کنترلی، حالت هر زیرسیستم و ورودی‌های مرجع هستند. شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ جزئیات طراحی کنترل‌کننده DAITSMC برای زیرسیستم iام آورده شده است.

در شکل ۲، $u_i(t)$، $s_i(t)$ و $\hat{a}_{ij}$ بترتیب ورودی کنترلی(۷)، سطح لغزش هر زیرسیستم و تخمین اتصالات نامعین بین زیرسیستم‌ها هستند.



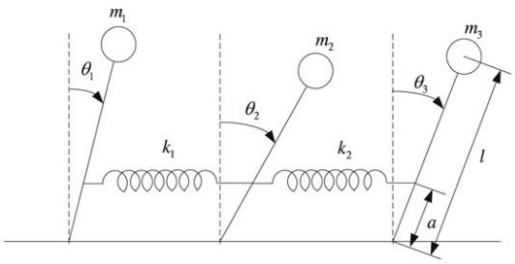
شکل ۲: بلوک دیاگرام طراحی کنترل‌کننده پیشنهادیDAITSMC برای زیرسیستم iام

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

۵- شبیه سازی عددی

در این بخش برای نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی DAITSMC، دو سیستم مکانیکی متصل خطی با اتصالات خطی ناشناخته ارایه شده است. در مثال اول یک سیستم سه پاندول معکوس متصل خطی آورده شده که با کنترل مدلغزشی غیرمتمرکز مقایسه می‌گردد. در مثال دوم سیستم مکانیکی متصل با پنج زیرسیستم (پنج چرخ متصل)، چهار زیرسیستم فعال(دارای ورودی) و یک زیرسیستم غیر فعال، آورده شده و در این مثال، روش کنترلی پیشنهادی با روش مدلغزشی سوپر-توئیستینگ (فراپیچش) غیرمتمرکز[1](DSTSMC) [۴۱] و کنترل تطبیقی غیرمتمرکز[2] (DAC) [۴۲] ، مقایسه شده است.

مثال اول: برای نشان دادن اثر بخشی روش پیشنهادی، سیستم سه پاندول معکوس[3] که سیستمی متصل با سه زیرسیستم است در نظر گرفته شده است (شکل ۳).



شکل ۳ سیستم سه پاندول معکوس متصل[۴۳]

معادله سه پاندول معکوس متصل بصورت (۲۲) تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_{11}(t) = x_{12}(t) \\ \dot{x}_{12}(t) = \frac{g}{l} sinx_{11}(t) + u_1(t)) \\ + \frac{K_1 a^2}{m_1 l^2}(\text{sinx}_{21}(t) cosx_{21}(t) - sinx_{11}(t) cosx_{11}(t)) \\ y_1(t) = x_{11}(t) \end{cases}$$
$$\begin{cases} \dot{x}_{21}(t) = x_{22}(t) \\ \dot{x}_{22}(t) = \frac{g}{l} sinx_{21}(t) + 0.7u_2(t) \\ + \frac{K_1 a^2}{m_2 l^2}(\text{sinx}_{11}(t) cosx_{11}(t) - sinx_{21}(t) cosx_{21}(t)) \\ + \frac{K_2 a^2}{m_2 l^2}(\text{sinx}_{31}(t) cosx_{31}(t) - sinx_{21}(t) cosx_{21}(t) \\ y_2(t) = x_{21}(t) \end{cases} \qquad (۲۲)$$
$$\begin{cases} \dot{x}_{31}(t) = x_{32}(t) \\ \dot{x}_{32}(t) = \frac{g}{l} sinx_{31}(t) + 1.2u_3(t) \\ + \frac{K_2 a^2}{m_3 l^2}(\text{sinx}_{21}(t) cosx_{21}(t) - sinx_{31}(t) cosx_{31}(t)) \\ y_3(t) = x_{31}(t) \end{cases}$$

پارامترهای سیستم در جدول ۱ انتخاب شده است.

جدول ۱. پارامترهای سیستم سه پاندول معکوس متصل

$m_1 = 0.2\ kg$	جرم پاندول
$m_2 = 0.4\,kg$	
$m_3 = 0.3\ kg$	
$a = 3m$	فاصله محوری تا مرکز ثقل میله
$l = 9\ m$	طول هر میله
$k_1 = 100\ N/m\ \ k_2 = 1.2\ N/m$	ثابت فنر
$g = 9.8\ m/s^2$	شتاب گرانش

با خطی‌سازی سیستم غیرخطی(۲۲) حول نقطه کار و با جایگذاری پارامترهای جدول۱، معادله خطی هر زیرسیستم در حضور اغتشاش خارجی بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0.535 & 0 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1(t) \\ \quad + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.555 & 0 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d_1(t) \\ \dot{x}_2(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0.48 & 0 \end{bmatrix} x_2(t) \\ \quad + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.7 \end{bmatrix} u_2(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.277 & 0 \end{bmatrix} x_1(t) \\ \quad + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.339 & 0 \end{bmatrix} x_3(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d_2(t) \\ \dot{x}_3(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0.646 & 0 \end{bmatrix} x_3(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.2 \end{bmatrix} u_3(t) \\ \quad + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.444 & 0 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d_3(t) \end{cases} \qquad (۲۳)$$

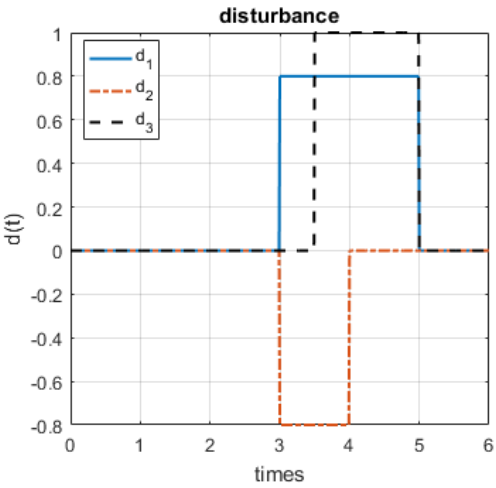
در شبیه‌سازی فرض شده که اتصالات بین زیرسیستم‌ها ناشناخته بوده و توسط قانون تطبیقی(۸) تخمین زده شده و سیستم با اعمال ورودی کنترلی(۷) ورودی مرجع را دنبال می‌کند. مقادیر اولیه $x_{11}(0) = 1$ ، $x_{12}(0) = -0.5$ ، $x_{21}(0) = -1$ ، $x_{22}(0) = 0.7$ ، $x_{31}(0) =$ 1.3 و $x_{32}(0) = 0.7$ برای شبیه‌سازی انتخاب شده است[۴۳]. اغتشاش خارجی بصورت زیر به هر زیرسیستم اعمال می‌شود(شکل ۴).

$$\begin{cases} d_1(t) = 0.8 & 3 < t < 5 \\ d_2(t) = -0.8 & 3 < t < 4 \\ d_3(t) = 1 & 3.5 < t < 5 \end{cases} \qquad (۲۴)$$

که $\|d_1(t)\| \le 0.8$ ، $\|d_2(t)\| \le 0.8$ و $\|d_3(t)\| \le 1$ است.

[1] Decentralized Super-Twisting Sliding Mode Controllers
[2] Decentralized Adaptive Sliding Mode Controllers
[3] triple inverted pendulum

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]



شکل ۴. اغتشاش خارجی وارد شده به سیستم سه پاندول معکوس متصل

برای طراحی کنترل مدلغزشی غیرمتمرکز(DSMC)(با فرض در دسترس بودن اتصالات بین زیرسیستم‌ها)، سطح لغزش برای زیرسیستم iام انتخاب شده بصورت:

$$s_i(t) = \dot{e}_i(t) + c_i e_i(t) \qquad (۲۵)$$

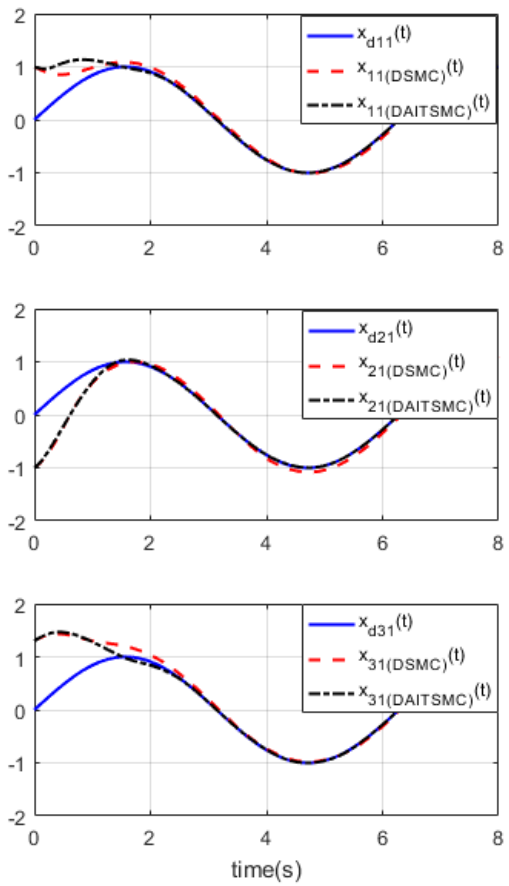
برای ردیابی ورودی مرجع، ورودی کنترلی مدلغزشی غیرمتمرکز در نظر گرفته شده بصورت:

$$u_i(t) = \frac{1}{B_i}(\ddot{x}_{di1}(t) - a_i x_{i1} - b_i x_{i2} + c_i \dot{e}_i(t) + \lambda_i\, sat(s_i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} a_{ij} y_j) \qquad (۲۶)$$

که اتصالات بین زیرسیستم‌ها (a_{ij})برای این روش کنترلی مشخص فرض شده است. پارامترهای کنترل مدلغزشی غیرمتمرکز(۲۶) به صورت $c_i = 3$ و $\lambda_i = 5$ برای هر زیرسیستم تنظیم شده است.

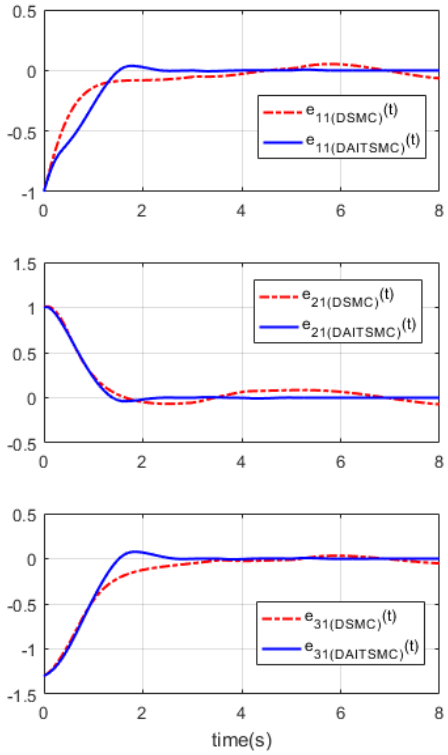
در روش پیشنهادی DAITSMC، پارامترها برای اعمال ورودی کنترلی(۷) به زیرسیستم iام (i=1,2,3) بصورت $p_i = 7$ و $q_i = 5$ (p_i و q_i مقادیر فرد مثبت و نسبت به هم اول فرض شده که $p_i > q_i > 0$ است)، $\beta_i = 4$ و $\alpha_i = 3$ (تا چند جمله‌ای $r^2 + \alpha_i r + \beta_i$ هورویتزباشد)، $\lambda_i = 5$ ($\lambda_i > \rho_i$ که ρ_i کران اغتشاش d_i به ازای هر i است) و $\Gamma_i = 10$ (پارامتر سرعت تطبیقی(۸) است که بزرگ بودن آن سبب به اشباع رفتن ورودی کنترلی در لحظات ابتدایی می‌شود) انتخاب شده است. ورودی مرجع برای هرزیرسیستم را $x_{di1} = \sin(t)\ (i = 1,2,3)$ در نظر گرفته و نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۵-۸ آورده شده است. در شکل ۵ ورودی مرجع و حالت کنترل شده هر زیرسیستم و در شکل ۶ خطای ردیابی برای هر زیرسیستم مشاهده می‌شود. همچنین سطح لغزش و ورودی کنترلی اعمال شده به هر زیرسیستم، بترتیب در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.

از شکل‌های ۵-۸ و مقایسه روش کنترلی پیشنهادی (DAITSMC) با روش کنترل مدلغزشی غیرمتمرکز (DSMC) می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز برای کنترل سیستم متصل دارای اغتشاش و اتصالات ناشناخته عملکرد بهتری نسبت به کنترل مدلغزشی غیرمتمرکز داشته و خطای همگرایی در زمان کمتری صفر می‌گردد.

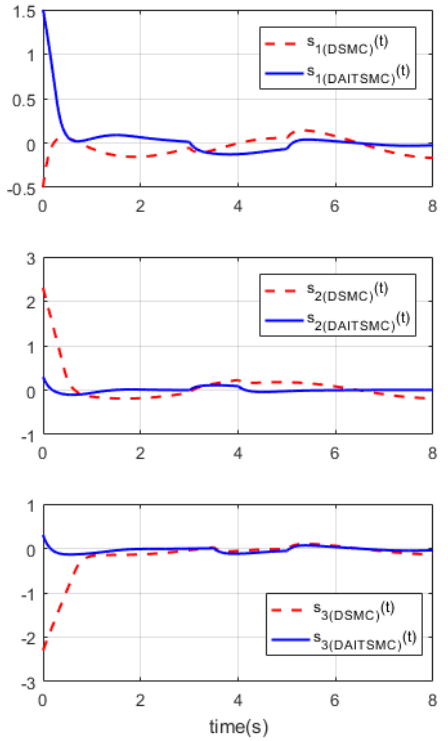


شکل ۵ ورودی مرجع و پاسخ زمانی حالت هر زیرسیستم

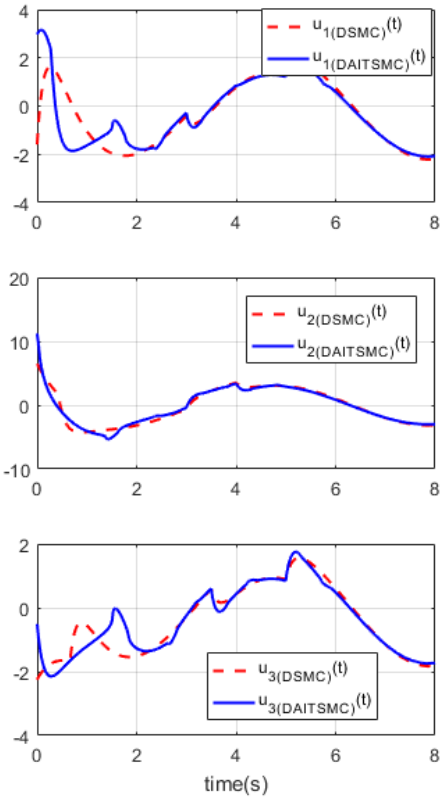
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]



شکل ۶. خطای ورودی مرجع و پاسخ زمانی حالت هر زیرسیستم

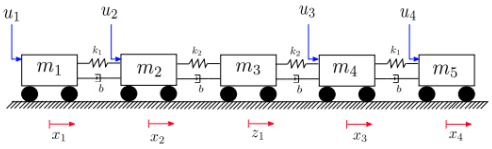


شکل ۷. سطح لغزش برای هر زیرسیستم



شکل ۸. ورودی کنترلی اعمال شده به هر زیرسیستم

مثال دوم: در این مثال یک سیستم ابعاد وسیع در شکل ۹ در نظر گرفته شده که سیستم شامل پنج چرخ متصل است. چرخ سوم با جرم m_3 تنها گره غیر فعال بوده که هیچ ورودی دریافت نمی‌کند. معادله سیستم بصورت زیر است[۴۱].



شکل ۹. سیستم متصل ابعاد بزرگ متشکل پنج چرخ [۴۱]

$$\begin{cases}\dot{x}_{11} = x_{12}\\ \dot{x}_{12} = -\dfrac{k_1}{m_1}x_{11} - \dfrac{b}{m_1}x_{12} + \dfrac{1}{m_1}(u_1 + F_1)\\ y_1 = 2x_{11} + x_{12}\end{cases}$$
$$\begin{cases}\dot{x}_{21} = x_{22}\\ \dot{x}_{22} = -\dfrac{(k_1 + k_2)}{m_2}x_{21} - \dfrac{2b}{m_2}x_{22} + \dfrac{1}{m_2}(u_2 + F_2)\\ y_2 = 2x_{21} + x_{22}\end{cases} \qquad (۲۷)$$
$$\begin{cases}\dot{z}_{11} = z_{12}\\ \dot{z}_{12} = -\dfrac{2k_2}{m_3}z_{11} - \dfrac{2b}{m_3}z_{12} + \dfrac{1}{m_3}G\\ y_z = 5z_{11} + z_{12}\end{cases}$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

$$\begin{cases}\dot{x}_{31}=x_{32}\\ \dot{x}_{32}=-\dfrac{(k_1+k_2)}{m_4}x_{31}-\dfrac{2b}{m_4}x_{32}+\dfrac{1}{m_4}(u_3+F_3)\\ y_3=2x_{31}+x_{32}\end{cases}$$

$$\begin{cases}\dot{x}_{41}=x_{42}\\ \dot{x}_{42}=-\dfrac{k_1}{m_5}x_{41}-\dfrac{b}{m_5}x_{42}+\dfrac{1}{m_5}(u_4+F_4)\\ y_4=2x_{41}+x_{42}\end{cases}$$

که تابع‌های F_i و G_i اتصال بین گره‌ها (اتصالات خطی ناشناخته) بوده و تعریف می‌شود بصورت:

$$\begin{aligned}F_1&=k_1x_{21}+bx_{22}\\ F_2&=k_1x_{11}+bx_{12}+k_2z_{11}+bz_{12}\\ G&=k_2(x_{21}+x_{31})+b(x_{22}+x_{32})\\ F_3&=k_1x_{41}+bx_{42}+k_2z_{11}+bz_{12}\\ F_4&=k_1x_{31}+bx_{32}\end{aligned}\qquad(۲۸)$$

مقدار اولیه حالت‌ها بصورت $x_{11}(0)=0.2$، $x_{21}(0)=0.15$، $x_{31}(0)=-0.1$، $x_{41}(0)=0.12$ ، $z_{11}(0)=0.2$ و بقیه مقادیر اولیه صفر هستند[۴۱]. مقدار پارامترهای مدل، بصورت **جدول ۲** است.

جدول ۲. پارامترهای پنج چرخ[۴۱]

$m_1=m_3=m_5=3\ kg$	جرم هر چرخ
$m_2=m_4=1\ kg$	
$k_1=2\ N/m$	ثابتهای فنر
$k_2=5\ N/m$	
$b=1\ N\,s/m$	ضریب میرایی

مدل ورودی مرجع برای هر گره فعال توصیف می‌شود بصورت:

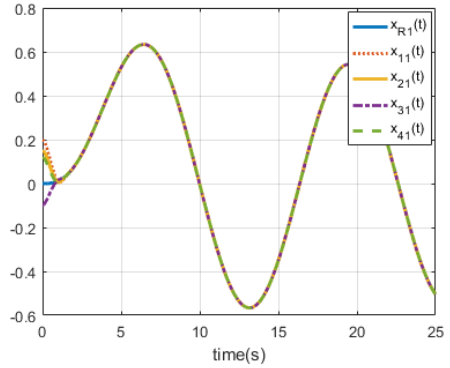
$$\begin{cases}\dot{x}_{R1}=x_{R2}\\ \dot{x}_{R2}=-0.16x_{R1}-0.5656x_{R2}+0.16\sin(0.5t)\end{cases}\qquad(۲۹)$$

که $x_R=col(x_{R1},x_{R2})$ است. پارامتر های کنترلی برای هر زیرسیستم در **جدول ۳**درج شده است.

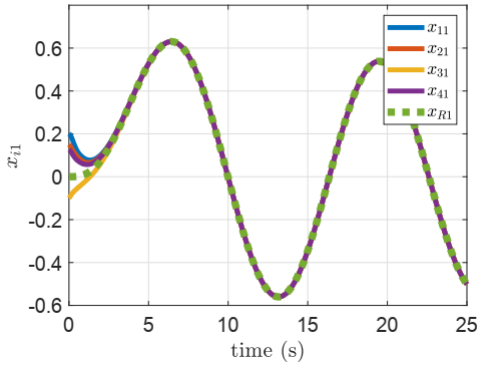
جدول ۳. پارامترهای کنترلی (DAITSMC)

$p_i=5$	$i=1,2,3,4$
$q_i=3$	
$\beta_i=3$	
$\alpha_i=2$	
$\lambda_i=10$	
$\Gamma_i=10$	

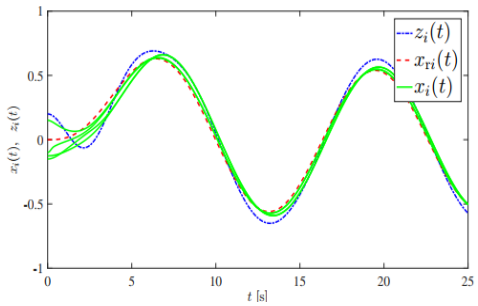
از طرح پیشنهادی (۷) برای کنترل سیستم مکانیکی متصل خطی با زیرسیستم‌های (۲۷) استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با دو روش کنترلی مدلغزشی سوپر-توئیستینگ (فراپیچش) غیرمتمرکز (DSTSMC) [۴۱] و کنترل تطبیقی غیرمتمرکز (DAC) [۴۲] در شکل-های ۱۰-۱۳ ارایه شده است. ردیابی ورودی مرجع توسط هر متغیر حالت (گره فعال) در شکل ۱۰، نرم خطای همگرایی($||x_{i1}-x_{R1}||$)در شکل ۱۱ و پاسخ زمانی حالت‌های گره غیر فعال (z_{11},z_{12}) در شکل ۱۲ آورده شده است که از شکل ۱۲ نتیجه می‌شود که حالت‌های گره غیر فعال محدود هستند. در نهایت در شکل ۱۳ ورودی‌های کنترلی اعمال شده به هر گره فعال (زیرسیستم دارای ورودی) مشاهده می‌شود.



الف



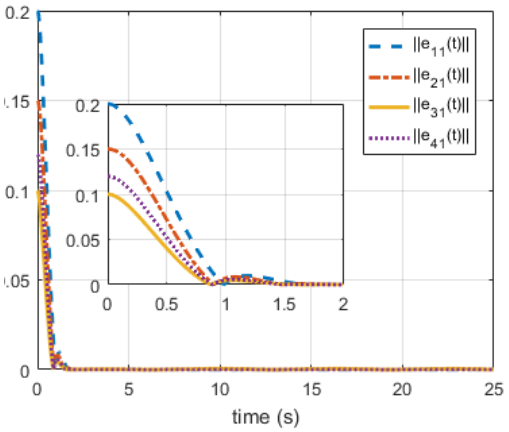
ب



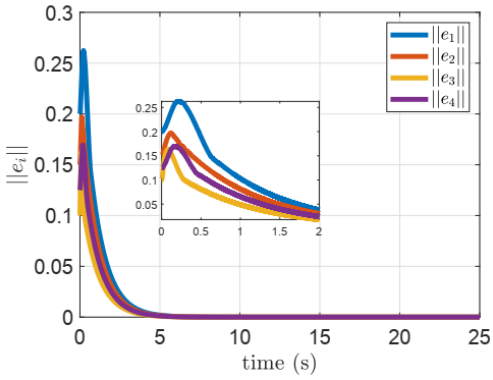
ج

شکل ۱۰. پاسخ زمانی متغیر حالت اول(موقعیت) برای هر گره فعال همراه با ورودی مرجع. الف) روش DAITSMC پیشنهادی. ب) روش Decentralized Super-Twisting SMC [۴۱]. ج) روش DAC [۴۲]

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

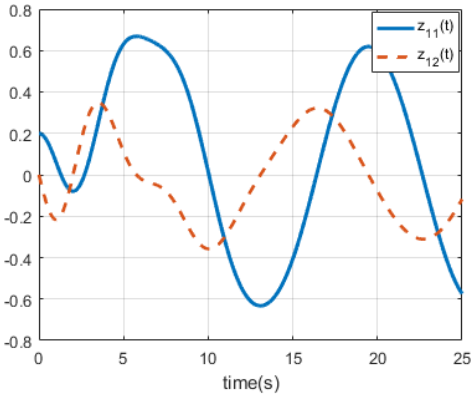


الف

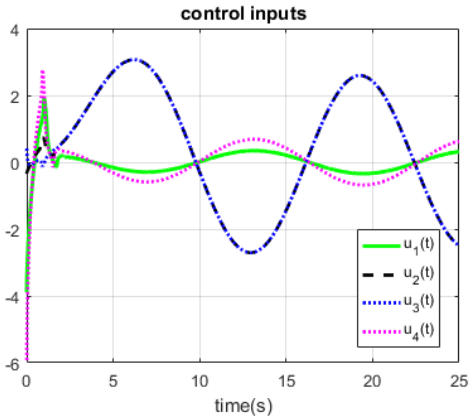


ب

شکل ۱۱. نرم خطای همگرایی($||\mathbf{e_i}||$) در هر گره فعال(زیرسیستم دارای ورودی). الف) روش DAITSMC پیشنهادی. ب) روش Decentralized Super-Twisting SMC [۴۱].



شکل ۱۲. پاسخ زمانی دو متغیر حالت (موقعیت و سرعت، به ترتیب) گره غیرفعال(زیرسیستم با جرم $\mathbf{m_3}$).



شکل ۱۳. ورودی‌های کنترلی اعمال شده به هر گره فعال(زیرسیستم دارای ورودی).

از مقایسه نتایج روش پیشنهادی DAITSMC (شکل ۱۰ - الف) با روش کنترل مدلغزشی سوپرتوئیسینگ(فراپیچش) غیرمتمرکز (شکل ۱۰ –ب) و کنترل مدلغزشی تطبیقی غیرمتمرکز (شکل ۱۰–ج) نتیجه می‌شود که سرعت همگرایی روش پیشنهادی بیشتر بوده و خطای همگرایی سریع‌تر صفر می‌شود.

۸ – نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش طراحی کنترل‌کننده مدلغزشی ترمینال انتگرال تطبیقی غیرمتمرکز (DAITSMC) برای سیستم‌های متصل با اتصالات خطی ناشناخته بین زیرسیستم‌ها در حضور اغتشاش پیشنهاد شد. روش پیشنهادی برای سیستم‌های فیدبک-اکید متصل با زیرسیستم‌های مرتبه دوم و اغتشاش محدود با کران مشخص کاربرد دارد. در روش پیشنهادی با انتخاب سطح لغزش ترمینال انتگرالی مناسب برای هر زیرسیستم، کنترل‌کننده محلی طراحی شد. همچنین با استفاده از قانون تطبیقی، اثرات اتصالات ناشناخته و نامعین اعمال شده به هر زیرسیستم، تخمین زده شد. برای اثبات پایداری سیستم یکپارچه، تابع لیاپانوفی کاندید شده و با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی، پایداری سیستم حلقه بسته تضمین گردید. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با چند روش کنترلی بر روی سیستم‌های مکانیکی متصل نشان داده شد که روش پیشنهادی برای پایداری سیستم‌های متصل با اتصالات خطی ناشناخته مناسب بوده و عملکرد بهتری در ردیابی ورودی مرجع دارد.

مراجع

[1] X. Xiang, C. Yu, and Q. Zhang, "Robust fuzzy 3D path following for autonomous underwater vehicle subject to uncertainties," *Computers & Operations Research*, vol. 84, pp. 165-177, 2017.

[2] S. Yu, X. Yu, B. Shirinzadeh, and Z. Man, "Continuous finite-time control for robotic

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

[16] S. Mobayen, D. Baleanu, and F. Tchier, "Second-order fast terminal sliding mode control design based on LMI for a class of non-linear uncertain systems and its application to chaotic systems," *Journal of Vibration and Control*, vol. 23, no. 18, pp. 2912-2925, 2017.

[17] D. Zhao, S. Li, and F. Gao, "Finite time position synchronised control for parallel manipulators using fast terminal sliding mode," *International Journal of Systems Science*, vol. 40, no. 8, pp. 829-843, 2009.

[18] S. Mobayen, "Finite-time robust-tracking and model-following controller for uncertain dynamical systems," *Journal of Vibration and Control*, vol. 22, no. 4, pp. 1117-1127, 2016.

[19] A. Modirrousta and M. Khodabandeh, "Adaptive non-singular terminal sliding mode controller: new design for full control of the quadrotor with external disturbances," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 39, no. 3, pp. 371-383, 2017.

[20] A. Al-Ghanimi, J. Zheng, and Z. Man, "A fast non-singular terminal sliding mode control based on perturbation estimation for piezoelectric actuators systems," *International Journal of Control*, vol. 90, no. 3, pp. 480-491, 2017.

[21] H. Komurcugil, "Non-singular terminal sliding-mode control of DC–DC buck converters," *Control Engineering Practice*, vol. 21, no. 3, pp. 321-332, 2013.

[22] T. Madani, B. Daachi, and K. Djouani, "Non-singular terminal sliding mode controller: Application to an actuated exoskeleton," *Mechatronics*, vol. 33, pp. 136-145, 2016.

[23] L. Peng, M. Jianjun, G. Lina, and Z. Zhiqiang, "Integral terminal sliding mode control for uncertain nonlinear systems," in *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, 2015, pp. 824-828: IEEE.

[24] S. Wen, M. Z. Chen, Z. Zeng, X. Yu, and T. Huang, "Fuzzy control for uncertain vehicle active suspension systems via dynamic sliding-mode approach," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 24-32, 2016.

[25] X. Lu, X. Zhang, G. Zhang, J. Fan, and S. Jia, "Neural network adaptive sliding mode control for omnidirectional vehicle with uncertainties," *ISA transactions*, vol. 86, pp. 201-214, 2019.

[26] O. Mofid and S. Mobayen, "Adaptive sliding mode control for finite-time stability of quad-rotor UAVs with parametric uncertainties," *ISA transactions*, vol. 72, pp. 1-14, 2018.

[27] J. Mohammadpour and K. M. Grigoriadis, *Efficient modeling and control of large-scale systems*. Springer Science & Business Media, 2010.

[28] H. Huerta, A. G. Loukianov, and J. M. Cañedo, "Decentralized sliding mode block control of multimachine power systems," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 32, no. 1, pp. 1-11, 2010.

manipulators with terminal sliding mode," *Automatica*, vol. 41, no. 11, pp. 1957-1964, 2005.

[3] Q. Hu and G. Ma, "Variable structure control and active vibration suppression of flexible spacecraft during attitude maneuver," *Aerospace Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 307-317, 2005.

[4] C. Zhang, Z. Chen, and C. Wei, "Sliding mode disturbance observer-based backstepping control for a transport aircraft," *Science China Information Sciences*, vol. 57, no. 5, pp. 1-16, 2014.

[5] E.-H. Zheng, J.-J. Xiong, and J.-L. Luo, "Second order sliding mode control for a quadrotor UAV," *ISA transactions*, vol. 53, no. 4, pp. 1350-1356, 2014.

[6] D. Ginoya, P. Shendge, and S. Phadke, "Sliding mode control for mismatched uncertain systems using an extended disturbance observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 1983-1992, 2013.

[7] S. Mondal and C. Mahanta, "Chattering free adaptive multivariable sliding mode controller for systems with matched and mismatched uncertainty," *ISA transactions*, vol. 52, no. 3, pp. 335-341, 2013.

[8] J.-J. Yan and T.-L. Liao, "Discrete sliding mode control for hybrid synchronization of continuous Lorenz systems with matched/unmatched disturbances," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 40, no. 5, pp. 1417-1424, 2018.

[9] J. A. González, A. Barreiro, S. Dormido, and A. Baños, "Nonlinear adaptive sliding mode control with fast non-overshooting responses and chattering avoidance," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 354, no. 7, pp. 2788-2815, 2017.

[10] X. Yu and O. Kaynak, "Sliding-mode control with soft computing: A survey," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 56, no. 9, pp. 3275-3285, 2009.

[11] I. M. Boiko, "Chattering in sliding mode control systems with boundary layer approximation of discontinuous control," *International Journal of Systems Science*, vol. 44, no. 6, pp. 1126-1133, 2013.

[12] G. Bartolini, A. Pisano, E. Punta, and E. Usai, "A survey of applications of second-order sliding mode control to mechanical systems," *International Journal of control*, vol. 76, no. 9-10, pp. 875-892, 2003.

[13] K. D. Young, V. I. Utkin, and U. Ozguner, "A control engineer's guide to sliding mode control," *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 7, no. 3, pp. 328-342, 1999.

[14] Y. Feng, F. Han, and X. Yu, "Chattering free full-order sliding-mode control," *Automatica*, vol. 50, no. 4, pp. 1310-1314, 2014.

[15] S. Mobayen, "Finite-time stabilization of a class of chaotic systems with matched and unmatched uncertainties: An LMI approach," *Complexity*, vol. 21, no. 5, pp. 14-19, 2016.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]

Tolerant Control for Heterogeneous Multiagent Systems," *IEEE transactions on cybernetics*, 2019.

[37] A. Sabanovic, "Variable structure systems with sliding modes in motion control—A survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 212-223, 2011.

[38] X. Li, M. Z. Chen, and H. Su, "Finite-time consensus of second-order multi-agent systems via a structural approach," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 353, no. 15, pp. 3876-3896, 2016.

[39] S. P. Bhat and D. S. Bernstein, "Geometric homogeneity with applications to finite-time stability," *Mathematics of Control, Signals and Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 101-127, 2005.

[40] P. A. Ioannou and J. Sun, *Robust adaptive control*. Courier Corporation, 2012.

[41] G. Rinaldi, P. P. Menon, C. Edwards, and A. Ferrara, "Variable Gains Decentralized Super-Twisting Sliding Mode Controllers for Large-Scale Modular Systems," in *2019 18th European Control Conference (ECC)*, 2019, pp. 3577-3582: IEEE.

[42] B. C. Gruenwald, E. Arabi, T. Yucelen, A. Chakravarthy, and D. McNeely, "A decentralized adaptive control architecture for large-scale active-passive modular systems," in *2017 American Control Conference (ACC)*, 2017, pp. 3347-3352: IEEE.

[43] S. J. Yoo, J. B. Park, and Y. H. Choi, "Decentralized adaptive stabilization of interconnected nonlinear systems with unknown non-symmetric dead-zone inputs," *Automatica*, vol. 45, no. 2, pp. 436-443, 2009.

[29] G. Rinaldi, P. P. Menon, C. Edwards, and A. Ferrara, "Design and Validation of a Distributed Observer-Based Estimation Scheme for Power Grids," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018.

[30] X.-G. Yan, S. K. Spurgeon, and C. Edwards, "Decentralized output feedback sliding mode control of nonlinear large-scale systems with uncertainties," *Journal of optimization theory and applications*, vol. 119, no. 3, pp. 597-614, 2003.

[31] F. Dörfler, J. W. Simpson-Porco, and F. Bullo, "Breaking the hierarchy: Distributed control and economic optimality in microgrids," *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 241-253, 2015.

[32] D. Chen and D. E. Seborg, "Design of decentralized PI control systems based on Nyquist stability analysis," *Journal of Process Control*, vol. 13, no. 1, pp. 27-39, 2003.

[33] X. Du, Y. Xi, and S. Li, "Distributed model predictive control for large-scale systems," in *Proceedings of the 2001 American Control Conference.(Cat. No. 01CH37148)*, 2001, vol. 4, pp. 3142-3143: IEEE.

[34] Y. Fan, W. Wang, X. Jiang, and Z. Li, "Decentralized fuzzy linguistic control of multiple robotic manipulators with guaranteed global stability," *Interaction Studies*, vol. 20, no. 1, pp. 185-204, 2019.

[35] H. Sun, L. Hou, G. Zong, and X. Yu, "Adaptive Decentralized Neural Network Tracking Control for Uncertain Interconnected Nonlinear Systems With Input Quantization and Time Delay," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2019.

[36] C. Liu, B. Jiang, R. J. Patton, and K. Zhang, "Decentralized Output Sliding-Mode Fault-

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2025-07-15]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.8.5]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.69]