مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۲۲-۱۱

طراحی قانون کنترل تحریک-رویداد برای اجماع سیستم های چند عاملی فازی با تاخیر زمانی در ورودی

رضا رهنما[۱]، علی معرفیان پور[۲]، نیما مهدیان دهکردی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه کنترل، دانشکده مکانیک برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، rezarahnama62@yahoo.com

[۲] استادیار، گروه کنترل، دانشکدهٔ مکانیک برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران ، ایران، moarefian@srbiau.ac.ir

[۳] استادیار، گروه کنترل، دانشکدهٔ مهندسی برق ، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران ، ایران، nimamahdian@sru.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷ ویرایش اول: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴ ویرایش دوم: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۹

چکیده: در این مقاله طراحی قانون کنترل اجماع در سیستم‌های چند عاملی رهبر-پیرو، با عامل‌هایی با مدل دینامیکی فازی TS مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در این پژوهش با فرض وجود مکانیزم تحریک-رویداد برای بهنگام کردن سیگنال کنترلی هر عامل، ضمن کاهش تعداد بروزرسانی‌های سیگنال کنترل، پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین خواهد شد. علاوه بر این، در این روش پیشنهادی کنترل مبتنی بر رویداد از بروز رفتار زنو (Zeno) اجتناب شده است. هر عامل فقط در لحظات تحریک خود برای عامل‌های دیگر داده ارسال کرده و ورودی کنترلی او نیز فقط در همان زمان بروز رسانی می‌شود. طراحی قانون کنترلی و مکانیزم تحریک-رویداد به حل یک دستگاه نامساوی ماتریسی خطی منجر خواهد شد. نوآوری مطالعه انجام شده در انتخاب مدل فازی برای عاملها است که می‌تواند حل مساله اجماع در سیستم‌های چند عاملی را به سیستم‌های غیرخطی بیشتری تعمیم دهد. در نهایت اثربخشی روش پیشنهادی از طریق یک مثال عددی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: سیستم چند عاملی، اجماع، عامل‌های فازی، تحریک-رویداد.

Design of event-triggered control law for consensus of fuzzy multi-agent systems with input delay

Reza Rahnama, Ali Moarefianpour, Nima Mahdian Dehkordi

Abstract: In this paper, the design of consensus control law in leader-follower multi-agent systems will be studied with agents with TS fuzzy dynamic model. In this study, assuming an excitation-event mechanism for updating the control signal of each agent, while reducing the number of control signal updates, the closed-loop system stability will be guaranteed.

Moreover, in the proposed event triggered control strategy, the Zeno-behaviour is avoided. Each agent only sends data to other agents at the time of its trigger instants, and its control input is updated only at the same time. The design of the control law and the excitation-event mechanism will lead to the solution of a linear matrix inequality. The innovation of the study is in selecting a fuzzy model for agents that can extend the solution of the consensus problem in multi-agent systems to more nonlinear systems. Finally, the effectiveness of the proposed method is shown through a numerical example.

Keywords: Multi Agent System, Fuzzy Agents, Event-Trigger

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

۱- مقدمه

در طول دهه‌های گذشته، کنترل سیستم‌های چند عاملی، از نظر تئوریک و صنعتی توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده است. بسیاری از سیستم‌های دنیای واقعی می‌توانند به عنوان سیستم‌های چند عاملی، مانند وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین، هماهنگی چندین روبات [۱]، شبکه حسگر بی‌سیم توزیع شده [۲] و غیره در نظر گرفته شوند. برای سیستم‌های چند عاملی، اجماع یک مساله اساسی است. اجماع یعنی رسیدن همه عامل‌ها به حالات مشترک مشخص شده بر اساس اطلاعات محلی آنها و به دو شکل اجماع گروه عامل‌های بدون رهبر و اجماع رهبر-پیرو تقسیم می‌شود [۳] و [۴]. تلاش زیادی برای اجماع سیستم‌های چند عاملی با انواع مختلف دینامیک‌های عامل، [۵] و [۶]، توپولوژی تعامل [۷]، محیط ارتباطی [۸] و غیره شده است.

برای پیاده‌سازی عملی کنترل اجماع، محدودیت منابع انرژی باید در نظر گرفته شود. از سوی دیگر سرعت محاسبه و پهنای باند شبکه ارتباطی محدود است. بنابراین بزرگترین چالش، نحوه ایجاد تعادل در عملکرد کنترل و صرفه جویی انرژی است. اندازه‌گیری پریودیک و کنترل مبتنی بر تغییر رویداد برای صرفه جویی در منابع مفید است. در مرجع [۹] برای اولین بار مقایسه کنترلگر با نمونه‌برداری پریودیک و کنترلگر مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های مرتبه اول مطرح شد. اثبات شد که در مقایسه با استراتژی تحریک زمانی، رفتار کنترل مبتنی بر رویداد، از نظر صرفه‌جویی در هزینه ارتباطات بهتر است. در مرجع [۱۰] برای اولین بار روش تحریک رویداد در سیستم‌های چند عاملی اعمال شد. در کنترل مبتنی بر داده‌های نمونه-برداری شده، کنترل‌کننده هر عامل در لحظات زمان گسسته بروزرسانی می‌شود. کنترلگرهای مبتنی بر داده‌های نمونه‌برداری شده که شامل نمونه-برداری پریودیک و غیر پریودیک است در بسیاری از نتایج پذیرفته شده است[۱۱] و [۱۲]. با ارائه استراتژی توزیع یافته مبتنی بر تحریک-رویداد، کنترل‌کننده تنها زمانی بروزرسانی می‌شود که رویداد از پیش تعریف شده‌ای اتفاق افتد [۳] و [۱۳].

مساله اجماع مبتنی بر رویداد در سیستم‌های چند عاملی با دینامیک-های غیر خطی، هنوز یک مشکل چالش بر انگیز است. در سالهای اخیر مطالعات اندکی بر روی این موضوع انجام شده است. مساله کنترل مبتنی بر رویداد توزیع یافته با توپولوژی ثابت و سوئیچینگ در [۳] بررسی شده است که در آن قانون تحریک-رویداد جدیدی جهت کاهش بار ارتباطی شبکه های چند عاملی ارائه شده است. یک کلاس نسبتا عمومی از سیستم های چند عاملی با دینامیک‌های غیرخطی در [۱۴] در نظر گرفته شده است، که در آن نویسنده یک رویکرد مبتنی بر مدل را پیشنهاد می‌کند. در [۱۵] مساله اجماع سیستم‌های چند عاملی رهبر-پیرو با عامل‌های غیرخطی و یک مکانیزم کنترلی مبتنی بر تحریک-رویداد مورد بحث قرار گرفته است که روش پیشنهادی در این مقاله با شبیه‌سازی سیستم ارائه شده در [۱۵] نتایج مطلوب‌تری را در تعداد بروزرسانی‌های سیگنال کنترلی برای دستیابی به اجماع نشان می‌دهد. روشی دیگر از کنترل نمونه‌برداری مبتنی بر تحریک-رویداد توزیع شده برای اجماع سیستم‌های چند عاملی با دینامیک‌های غیرخطی ذاتی در [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۷]، ترکیبی از اشباع عملگر و طرح کنترل مبتنی بر تحریک-رویداد بیان شده است. در مرجع [۱۸]، تابع مبتنی بر تحریک-رویداد توزیع یافته برای انتخاب لحظات نمونه برداری بطور اتوماتیک در مورد مساله اجماع رهبر پیرو مبتنی بر تحریک-رویداد پیشنهاد شده است.

هدف مقاله حاضر معرفی یک استراتژی کنترل توزیع یافته جدید با تاخیر زمانی ورودی و یک مکانیزم ارتباطی مبتنی بر تحریک-رویداد، برای حل مساله اجماع در سیستم‌های چند عاملی، با عامل‌های به فرم فازی TS است. نوآوری‌های اصلی این مقاله عبارتند از:

i. رویکردی نوین مبتنی بر مدل فازی TS، برای هر یک از عامل‌های سیستم چند عاملی اتخاذ شده، که مزایای خود را در بکارگیری حداقل قوانین برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی مرتبه بالاتر نشان داده و از این رو نسبت به سایر تحقیقات و مقالات مرتبط، متمایز است.
ii. استراتژی اجماع ناشی از تحریک-رویداد، مبتنی بر داده‌های نمونه‌برداری بوده و زمان تحریک بین رویداد، حد پایین دوره نمونه‌برداری است از این رو، از رفتار زنو اجتناب می‌شود.
iii. بکارگیری مکانیزم مبتنی بر تحریک-رویداد برای صرفه-جویی در منابع محدود شبکه و همچنین روش جدید طراحی کنترل‌کننده، برای سیستم چند عاملی با عامل‌های به فرم فازی TS، با تاخیر زمانی ورودی و بهره‌گیری از رویکرد H_∞ در حضور اغتشاش خارجی

بخش ۲ مقدمات ریاضی و مفاهیم اولیه را ارائه می‌شود. تعریف مساله در ۳ ارائه شده است. بخش ۴ و ۵ به ترتیب به استخراج شرایط طراحی قانون کنترل اجماع مبتنی بر تحریک-رویداد برای عامل‌های فازی با تاخیر زمانی در ورودی و الگوریتم طراحی اختصاص دارد. در بخش ۶ با شبیه سازی یک مثال کارایی روش ارائه شده بررسی می‌شود و در نهایت بخش ۷ به نتیجه‌گیری از بحث اختصاص دارد

۲- مقدمات ریاضی

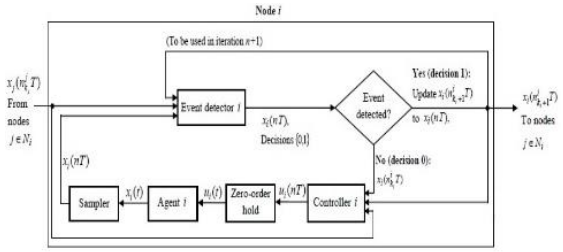
توپولوژی ارتباطی بین N عامل پیرو به صورت گراف $\mathbb{G} = \{\mathbb{V}, \mathbb{E}, \mathbb{W}\}$ بیانگر $\mathbb{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ نشان داده می شود که مجموعه گره‌ها و $\mathbb{E} \in \mathbb{V} \times \mathbb{V}$ بیانگر مجموعه یال‌ها است. اگر یک یال $(v_i, v_j) \in \mathbb{E}$ بین گره‌های v_i و v_j وجود داشته باشد، آنگاه v_i و v_j با هم همسایه هستند. $\mathbb{W} = [w_{ij}] \in R^{N\times N}$ ماتریس همسایگی وزن‌دار نامیده می شود. اگر $(v_i, v_j) \in \mathbb{E}$ عنصر $w_{ij} > 0$ و در غیر این صورت $w_{ij} = 0$ است. شاخص مجموعه همسایگی عامل i بصورت $N_i = \{j: v_j \in \mathbb{V} | (v_j, v_i) \in \mathbb{E}\}$ تعریف می‌شود. درجه ماتریس گراف بصورت $\mathbb{S} = \text{diag}\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ نمایش داده شده

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

است که s_i تعداد یال‌های وارد شده به گره i بوده و $i = 1,2,\dots,N$, $s_i = \sum w_{ij}$. ماتریس لاپلاسین $\mathbb{L}$ مربوط به گراف جهت‌دار $\mathbb{G}$ بصورت $\mathbb{L} = \mathbb{S} - \mathbb{W}$ تعریف می‌شود. $B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ به عنوان ماتریس تعامل بین عامل های پیرو و رهبر شناخته می شود. اگر عامل i بتواند به اطلاعات رهبر دسترسی داشته باشد آنگاه $b_i = 1$ و در غیر این صورت $b_i = 0$ است.

دیاگرام بلوکی شکل ۱، نحوه عملکرد عامل i ام مبتنی بر تحریک-رویداد را برای سیستم چند عاملی نشان می‌دهد.



شکل ۱: دیاگرام بلوکی کنترل مبتنی بر تحریک-رویداد در سیستم‌های چند عاملی

تعریف ۱ [۱۹]: اجماع رهبر-پیرو به صورت مجانبی حاصل می‌شود، هرگاه $\lim_{t\to\infty} ||x_i(t) - x_0(t)|| = 0$، برای تمامی شرایط اولیه برقرار باشد.

لم ۱ [۲۰]: فرض کنید $f(x,y)$ یک تابع پیوسته از متغیرهای x , y با دامنه تعریف شده

$D: \tau(x) \le y \le \mu(x)$ ، $\phi(t) \le x \le \theta(t)$ ، $\alpha \le t \le \beta$

که در آن $\tau(x)$ و $\mu(x)$ نسبت به x پیوسته و $\phi(t)$ و $\theta(t)$ نسبت به t متمایز هستند. انتگرال دوگانه تابع با دامنه D تعریف می‌شود بصورت

$$k(t) = \int_{\phi(t)}^{\theta(t)} dx \int_{\tau(x)}^{\mu(x)} f(x,y)\, dy \qquad \alpha \le t \le \beta \qquad (۱)$$

سپس

$$\dot{k}(t) = \dot{\theta}(t) \int_{\tau(\theta(t))}^{\mu(\theta(t))} f(\theta(t), y)\, dy - \dot{\phi}(t) \int_{\tau(\phi(t))}^{\mu(\phi(t))} f(\phi(t), y)\, dy \quad , \alpha \le t \le \beta \qquad (۲)$$

لم ۲ (Schur complement) [۲۱]: فرض کنید یک ماتریس بلوکی بصورت $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}$ داده شده باشد که $S_{11} = S_{11}^T, S_{22} = S_{22}^T$ ، آنگاه سه شرط زیر با یکدیگر معادل هستند:

i. $S < 0$
ii. $S_{11} < 0\,, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$
iii. $S_{22} < 0\,, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$

لم ۳ [۲۲]: برای هر یک از بردارهای $x, y \in R^n$، و ماتریس مثبت معین $\epsilon \in R^{n\times n}$، نامساوی $-2x^T y \le x^T \epsilon^{-1} x + y^T \epsilon y$ برقرار است.

لم ٤ [۲۳]: برای ماتریس مثبت معین $M > 0$, X با ابعاد سازگار و هر مقدار اسکالر $\rho > 0$ ، نامساوی $-XM^{-1}X \le \rho^2 M - 2\rho X$ برقرار است.

لم ٥ [۲٤]: فرض کنید M_2 , M_3 و M_1، ماتریس‌های ثابت با ابعاد مناسب هستند و $0 \le \eta_1 \le \eta(t) \le \eta_2$، آنگاه شرط

$$M_1 + (\eta_2 - \eta(t))M_2 + (\eta(t) - \eta_1)M_3 < 0 \qquad (۳)$$

برقرار است اگر و تنها اگر

$$M_1 + \bar{\eta} M_2 < 0 \quad , \quad M_1 + \bar{\eta} M_3 < 0 \qquad (۴)$$

۳- تعریف مساله

سیستم چند عاملی متشکل از N عامل پیرو و یک رهبر را در نظر بگیرید که در آن عامل i به صورت یک سیستم فازی TS با r قاعده که قاعده p ام آن بصورت

If $\theta_1(t)$ is W_1^p and ... and $\theta_g(t)$ is W_g^p Then

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_p x_i(t) + B_p(t) u_i(t) + B_{wp} w_i(t) \\ z_i(t) = C_p x_i(t) + D_p u_i(t) \end{cases} \qquad (۵)$$

و عامل رهبر با r قاعده که قاعده p ام آن بصورت

If $\theta_1(t)$ is W_1^p and ... and $\theta_g(t)$ is W_g^p Then

$$\begin{cases} \dot{x}_0(t) = A_p x_i(t) + B_{wp} w_0(t) \\ z_0(t) = C_p x_0(t) \end{cases} \qquad (۶)$$

بیان می‌شود. در رابطه (۵) متغیرهای $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ و $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ به ترتیب بردار حالت و بردار ورودی عامل i بوده و $x_0(t) \in \mathbb{R}^n$ بردار حالت عامل رهبر است. $W_g^p (p = 1,2,\dots,r; j = 1,2,\dots,g)$ مجموعه‌های فازی و $\theta_j(t)$ متغیر فرضی می‌باشد و $\theta_j(t) = [\theta_1(t), \dots, \theta_g(t)]^T$، یک بردار از پیش تعیین شده، که ممکن است به بردار حالت بستگی داشته باشد. ورودی $w_i(t) \in \mathcal{L}_2[0,\infty)$ و $w_0(t) \in \mathcal{L}_2[0,\infty)$ به ترتیب، سیگنال اغتشاش خارجی عامل i و عامل رهبر و $z_i(t) \in \mathbb{R}^q$ و $z_0(t) \in \mathbb{R}^q$ به ترتیب، خروجی عامل i و خروجی عامل رهبر است. $A_p \in \mathbb{R}^{n\times n}$ ، $B_p \in \mathbb{R}^{n\times m}$ ، $B_{wp} \in \mathbb{R}^{n\times m}$ ، $C_p \in \mathbb{R}^{q\times n}$ و $D_p \in \mathbb{R}^{q\times m}$ ماتریس‌های ثابت هستند. با استفاده از فازی‌زدای میانگین مراکز، رابط ضرب و فازی کننده تکین، دینامیک سیستم فازی (۵) برای عامل i بصورت:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{p=1}^{r} \mu_p(\theta(t)) \left[A_p x_i(t) + B_p u_i(t) + B_{wp} w_i(t)\right]$$

$$z_i(t) = \sum_{p=1}^{r} \mu_p(\theta(t)) \left[C_p x_i(t) + D_p u_i(t)\right] \quad (۷)$$

و دینامیک رهبر بصورت:

$$\dot{x}_0(t) = \sum_{p=1}^{r} \mu_p(\theta(t)) \left[A_p x_0(t) + B_{wp} w_0(t)\right] \quad (۸)$$

بیان می‌شود که در آن $\mu_i(t) = h_i(\theta(t)) / \sum_{i=1}^{r} h_i(\theta(t))$ و $h_i(\theta(t)) = \prod_{j=1}^{g} W_j^p(\theta_j(t))$ و $W_j^p(\theta_j(t))$، مقدار عضویت $\theta_j(t)$ در W_j^p است.

در هر یک از لحظات تحریک-رویداد، عامل i اطلاعات نمونه-برداری شده خود را به عامل همسایه‌اش ارسال کرده و ورودی کنترلی خود را نیز بروزرسانی می‌کند. توالی زمانی تحریک عامل i بصورت $0 \le t_1^i < \cdots < t_k^i < \cdots$ در نظر گرفته می‌شود که t_k^i، kامین لحظه تحریک-رویداد عامل i، $(k = 1,2, \dots), (\sigma = 1,2, \dots)$، $t_k^i = \sigma h$ و h دوره نمونه‌برداری هستند. نماد $t_{k'}^j$، k'امین لحظه تحریک-رویداد عامل j را نشان می‌دهد که $k' = 1,2, \dots$. همچنین نمادهای $t_{k'(t)}^j = t_{k'(t_k^i)}^j = \max\{t_{k'}^j | t_{k'}^j \le t_k^i\}$ و $\max\{t_{k'}^j | t_{k'}^j \le t\}$، به ترتیب آخرین زمان رویداد برای عامل j تا زمان t_k^i و آخرین زمان رویداد برای عامل j تا زمان t را نشان می‌دهند. قاعده pام قانون کنترل فازی فیدبک حالت برای عامل i به فرم

If $\theta_1(t)$ is W_1^P and…and $\theta_g(t)$ is W_g^p Then

$$u_i^p(t) = K_q \left[\sum_{j \in N_i} w_{ij} \left(x_i(t_k^i - \tau) - x_j(t_{k'_1(t_k^i)}^j - \tau)\right) + b_i\left(x_i(t_k^i - \tau) - x_0(t_k^i - \tau)\right)\right] \quad (۹)$$

بیان می‌شود. رابطه ورودی-خروجی کنترلگر فازی به صورت

$$u_i(t) = -\sum_{q=1}^{r} \mu_q(\theta(t)) K_q \left[\sum_{j \in N_i} w_{ij} \left(x_i(t_k^i - \tau) - x_j(t_{k'(t_k^i)}^j - \tau)\right) + b_i\left(x_i(t_k^i - \tau) - x_0(t_k^i - \tau)\right)\right] \quad (۱۰)$$

خواهد بود که در آن τ تاخیر زمانی ورودی و K_q به ازای $q = 1, \dots, r$ بهره‌های کنترل‌کننده اجماع هستند که باید طراحی شوند. از رابطه (۱۰) می‌توان دید که عامل i از اطلاعات نمونه‌برداری شده عامل‌های همسایه در زمان $t_{k'(t_k^i)}^j$ استفاده می‌کند. بنابراین سیگنال کنترلی عامل i در بازه زمانی بین $t \in [t_k^i, t_{k+1}^i)$ ثابت می‌ماند. در حقیقت هنگامیکه شرط

$$\begin{aligned} g_i(t) &= e_i^T(t-\tau)\phi_i e_i(t-\tau) \\ &+ E_{1_i}^T(t-\tau)\phi_i E_{1_i}(t-\tau) \\ &+ E_{0_i}^T(t-\tau)\phi_i E_{0_i}(t-\tau) \\ &- \delta_i \Bigg[\sum_{j \in N_i} w_{ij} \left(x_i(t_k^i - \tau) - x_j(t_{k'(t_k^i)}^j - \tau)\right) \\ &+ b_i\left(x_i(t_k^i - \tau) - x_0(t_k^i - \tau)\right)\Bigg]^T \phi_i \Bigg[\sum_{j \in N_i} w_{ij} \left(x_i(t_k^i - \tau) - x_j(t_{k'(t_k^i)}^j - \tau)\right) \\ &+ b_i\left(x_i(t_k^i - \tau) - x_0(t_k^i - \tau)\right)\Bigg] > 0 \end{aligned} \quad (۱۱)$$

برقرار شود عامل i سیگنال کنترلی خود را بروزرسانی کرده و اطلاعات خود را به عامل‌های همسایه ارسال می‌کند. $g_i(t)$ تابع تولیدکننده رویداد برای عامل i بوده و ماتریس مثبت معین $\phi_i \in R^{n \times n}$ ماتریس تحریک-رویداد برای عامل i نام دارد که باید طراحی شود. $\delta_i > 0$ پارامتر انتخاب شده تحریک-رویداد است ([۱۵]).

در رابطه (۱۱)، عبارت $e_i(t) = \varepsilon_i(t_k^i) - \varepsilon_i(mh)$ است که در آن $\varepsilon_i(t_k^i) = x_i(t_k^i) - x_0(t_k^i)$ و $\varepsilon_i(mh) = x_i(mh) - x_0(mh)$ هستند. عبارت $E_{1_i}(t) = \sum_{j \in N_i} w_{ij} e_{1_{ij}}(t)$ بیانگر مجموع خطاهای عامل‌های همسایه با عامل i ام است که در آن $e_{1_{ij}}(t) = \varepsilon_j(t_{k'(t_k^i)}^j) - \varepsilon_j(t_{k'(mh)}^j)$ تعریف می‌شود و $\varepsilon_j(t_{k'(t_k^i)}^j) = x_j(t_{k'(t_k^i)}^j) - x_0(t_{k'(t_k^i)}^j)$، و $\varepsilon_j(t_{k'(mh)}^j) = x_j(t_{k'(mh)}^j) - x_0(t_{k'(mh)}^j)$ بیانگر مجموع خطاهای بردار حالت عامل‌ها با رهبر است. عبارت $e_{0_{ij}}(t)$ بصورت $e_{0_{ij}}(t) = x_0(t_k^i) - x_0(t_{k'(t_k^i)}^j)$ تعریف می‌شود.

فرض ۱: فرض کنید گراف $\mathbb{G}$ شامل یک درخت پوشای جهت‌دار و حداقل یک عامل پیرو است که اطلاعات رهبر را می‌تواند دریافت کند.

فرض ۲. فرض کنید ورودی شامل زمان تاخیر محدود τ است که $\tau < h$ و h بیانگر دوره نمونه‌برداری سیستم است.

توجه ۱: شرط تحریک-رویداد (۱۸) در تمام لحظات نمونه‌برداری mh ارزیابی می شود. تابع تولیدکننده رویداد $g_i(t)$ نه تنها شامل داده نمونه-برداری خود عامل است بلکه شامل داده نمونه‌برداری شده عامل همسایه و رهبر نیز می‌باشد. مادامیکه $g_i(t) \le 0$ باشد، خطاهای اندازه‌گیری نمونه‌برداری شده هنوز در محدوده قابل قبول قرار داشته و در نتیجه

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

رویدادی تحریک نمی‌شود. در لحظه تحریک kام، t_k^i امین تحریک-رویداد برای عامل i اتفاق می‌افتد و عامل i سیگنال کنترلی خود را بر اساس اطلاعات خود و رهبر بروزرسانی کرده و اطلاعات خود را نیز به عامل‌های همسایه ارسال می‌کند.

توجه ۲: در رابطه (۱۱) فرض کنید δ_i ها به اندازه کافی به صفر نزدیک شوند. دراین حالت تمامی داده‌های نمونه‌برداری شده با دوره نمونه‌برداری ثابت h باید در شبکه‌های ارتباطی انتقال داده شوند. در این حالت مکانیزم تحریک-رویداد که منجر به ارسال داده در ازای تحقق شرطی خاص است به طرح تحریک-زمانی تبدیل می‌شود.

٤- طراحی قانون کنترل

خطای سیستم چند عاملی بین رهبر و پیرو iام به ازای $i = 1,2,\dots,N$ بصورت

$$\varepsilon_i(t) = x_i(t) - x_0(t) \tag{۱۲}$$

تعریف می‌شود. با جایگذاری دینامیک کنترل‌کننده (۱۰) در دینامیک عامل i (۷)، سیستم حلقه بسته چند عاملی بصورت

$$\begin{aligned}&\dot{x}_i(t)\\&= \sum_{p=1}^{r}\sum_{q=1}^{r}\mu_p(\theta(t))\,\mu_q(\theta(t))\,(A_p x_i(t)\\&- B_p K_p[\sum_{j\in N_i} w_{ij}\,(x_i(t_k^i-\tau)\\&- x_j(t^{j}_{k'_1(t_k^i)}-\tau))\\&+ b_i(x_i(t_k^i-\tau) - x_0(t_k^i-\tau))])\\&+ B_{wp}w_i(t)\end{aligned} \tag{۱۳}$$

قابل توصیف است. با تعریف $\hat{A} = \sum_{p=1}^{r}\mu_p(\theta(t))\,A_p$،

$\hat{B} = \sum_{p=1}^{r}\sum_{q=1}^{r}\mu_p(\theta(t))\,\mu_q\big(\theta(t)\big)\,B_pK_p$،

$\hat{C} = \sum_{p=1}^{r}\mu_p\big(\theta(t)\big)\,C_p$ و

$\widehat{D} = \sum_{p=1}^{r}\sum_{q=1}^{r}\mu_p\big(\theta(t)\big)\,\mu_q\big(\theta(t)\big)\,D_pK_p$ رابطه (۱۳) به صورت

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) = \hat{A}x_i(t) - \hat{B}[&\sum_{j\in N_i} w_{ij}\,(e_i(t-\tau)\\&+ \varepsilon_i(mh-\tau)\\&+ e_{0_{ij}}(t-\tau)\\&- e_{1_{ij}}(t-\tau)\\&- e_j(t-\tau)\\&- \varepsilon_j(mh-\tau))\\&+ b_i(e_i(t-\tau)\\&+ \varepsilon_i(mh-\tau))]\\&+ \hat{B}_w w_i(t)\end{aligned} \tag{۱۴}$$

قابل بازنویسی است. در صورتی که قانون کنترلی در لحظات نمونه‌برداری $t = mh$ محاسبه شود، رابطه (۱۴) به صورت

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) = \hat{A}x_i(t) - \hat{B}[&\sum_{j\in N_i} w_{ij}\,(e_i(mh-\tau)\\&+ \varepsilon_i(mh-\tau)\\&+ e_{0_{ij}}(mh-\tau)\\&- e_{1_{ij}}(mh-\tau)\\&- e_j(mh-\tau)\\&- \varepsilon_j(mh-\tau))\\&+ b_i(e_i(mh-\tau)\\&+ \varepsilon_i(mh-\tau))]\\&+ \hat{B}_w w_i(t)\end{aligned} \tag{۱۵}$$

بازنویسی می‌شود. با تعریف $e_{wi}(t) = w_i(t) - w_0(t)$ و انتخاب

$$\begin{aligned}&x(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_N^T(t)]^T\\&\varepsilon(t) = [\varepsilon_1^T(t), \varepsilon_2^T(t)\ , \dots, \varepsilon_N^T(t)]^T\\&e(t) = [e_1^T(t), e_2^T(t), \dots, e_N^T(t)]^T\\&e_w(t) = [e_{w1}^T(t), e_{w2}^T(t), \dots, e_{wN}^T(t)]^T\\&E_1(t) = \left[E_{1_1}^T(t), E_{1_2}^T(t), \dots, E_{1_N}^T(t)\right]^T\\&E_0(t) = \left[E_{0_1}^T(t), E_{0_2}^T(t), \dots, E_{0_N}^T(t)\right]^T\\&w = [w_1^T, w_2^T, \dots, w_N^T]^T\\&\delta = \mathrm{diag}\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N\}\\&\phi = \mathrm{diag}\{\phi_1, \phi_2\ , \dots, \phi_N\}\\&\phi_\delta = \mathrm{diag}\{\delta_1\phi_1, \delta_2\phi_2\ , \dots, \delta_N\phi_N\}\\&\bar{\mathbb{L}} = \mathbb{L} + \mathbb{B}\end{aligned} \tag{۱۶}$$

و با ترکیب معادله (۷) و (۱۵) دینامیک خطای تعقیب (۱۲)، به صورت

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}(t) = &\big(I_N \otimes \hat{A}\big)\varepsilon(t)\\&+ \big(I_N \otimes \hat{B}\big)E_1(mh-\tau)\\&- \big(I_N \otimes \hat{B}\big)E_0(mh-\tau)\\&- \big(\bar{\mathbb{L}} \otimes \hat{B}\big)e(mh-\tau)\\&- \big(\bar{\mathbb{L}} \otimes \hat{B}\big)\varepsilon(mh-\tau)\\&+ \big(I_N \otimes \hat{B}_w\big)e_w(t)\end{aligned} \tag{۱۷}$$

بیان می‌شود. با بررسی شرط (۱۱) در لحظه نمونه‌برداری mh، $(h = 1,2,\dots)$ عبارت (۱۱) به صورت

$$\begin{aligned}&g_i(t)\\&= e_i^T(mh-\tau)\phi_i e_i(mh-\tau)\\&+ E_{1_i}^T(mh-\tau)\phi_i E_{1_i}(mh-\tau)\\&+ E_{0_i}^T(mh-\tau)\phi_i E_{0_i}(mh-\tau)\\&- \delta_i\Bigg[\sum_{j\in N_i} w_{ij}\Big(e_i(mh-\tau) - e_j(mh-\tau)\\&+ \varepsilon_i(mh-\tau) + e_{0_{ij}}(mh-\tau)\\&- e_{1_{ij}}(mh-\tau) - \varepsilon_j(mh-\tau)\Big)\\&+ b_i\big(e_i(mh-\tau)\\&+ \varepsilon_i(mh-\tau)\big)\Bigg]^T\phi_i\Bigg[\sum_{j\in N_i} w_{ij}\,(e_i(mh-\tau)\\&- e_j(mh-\tau) + \varepsilon_i(mh-\tau) + e_{0_{ij}}(mh-\tau)\\&- e_{1_{ij}}(mh-\tau) - \varepsilon_j(mh-\tau))\\&+ b_i\big(e_i(mh-\tau) + \varepsilon_i(mh-\tau)\big)\Bigg] > 0\end{aligned} \tag{۱۸}$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

قابل توصیف است که در آن $e_j(mh)=\varepsilon_j(t^j_{k'_{(mh)}})-\varepsilon_j(mh)$ بیانگر خطای حالت اندازه-گیری شده عامل jام است. در ادامه، با تعریف یک تابع تکه‌ای پیوسته $0<\tau\le\eta(t)\le\tau+h\triangleq\bar{\eta}$ ،$\eta(t)=t-(mh-\tau)$ و $\dot{\eta}(t)=1$ دینامیک خطای سیستم چند عاملی (۱۷) به صورت

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}(t)=&\left(I_N\otimes\hat{A}\right)\varepsilon(t)\\&+\left(I_N\otimes\hat{B}\right)E_1(t-\eta(t))\\&-\left(I_N\otimes\hat{B}\right)E_0(t-\eta(t))\\&-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes\hat{B}\right)e(t-\eta(t))\\&-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes\hat{B}\right)\varepsilon(t-\eta(t))\\&+\left(I_N\otimes\hat{B}_w\right)e_w(t)\end{aligned}\qquad(۱۹)$$

و خروجی سیستم چند عاملی به صورت

$$\begin{aligned}z(t)=&\left(I_N\otimes\hat{C}\right)\varepsilon(t)\\&+\left(I_N\otimes\hat{D}\right)E_1(t-\eta(t))\\&-\left(I_N\otimes\hat{D}\right)E_0(t-\eta(t))\\&-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes\hat{D}\right)e(t-\eta(t))\\&-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes\hat{D}\right)\varepsilon(t-\eta(t))\end{aligned}\qquad(۲۰)$$

و با ترکیب (۱۸) و (۱۲)، شرط تولید رویداد به صورت

$$\begin{aligned}&e^T(t-\eta(t))\phi e(t-\eta(t))\\&+E_1^T(t-\eta(t))\phi E_1(t-\eta(t))\\&+E_0^T(t-\eta(t))\phi E_0(t-\eta(t))\\&-\left[(\bar{L}\otimes I_n)\varepsilon(t-\eta(t))+(\bar{L}\otimes I_n)e(t-\eta(t))-E_1(t-\eta(t))+E_0(t-\eta(t))\right]^T\phi_\delta\left[(\bar{L}\otimes I_n)\varepsilon(t-\eta(t))+(\bar{L}\otimes I_n)e(t-\eta(t))-E_1(t-\eta(t))+E_0(t-\eta(t))\right]\le 0\end{aligned}\qquad(۲۱)$$

تبدیل می‌شوند.

همانطور که مشاهده شد مساله اجماع در سیستم چند عاملی رهبر-پیرو (۷) و (۸) که در آن عامل‌ها دارای مدل فازی هستند و از قانون کنترلی پیشنهاد شده در (۱۰) با توجه به شرط تحریک (۱۱) استفاده می کنند، به بررسی پایداری سیستم (۱۹) تبدیل شد.

قضیه ۱: یک گروه شامل N عامل پیرو و یک رهبر را به ترتیب با دینامیک‌های (۵) و (۶)، در نظر بگیرید. در صورت برقرار بودن فرض ۱ ، اگر ماتریس‌های مثبت معین $T>0$ ،$P_i>0$ و $R_i>0$ $(i=1.2)$ و ماتریس‌های M، N، L ، $\phi=\mathrm{diag}\{\phi_1,\dots,\phi_N\}>0$ و $\phi_\delta=\mathrm{diag}\{\delta_1\phi_1,\dots,\delta_N\phi_N\}>0$ وجود داشته باشند بطوریکه شرط

$$\begin{aligned}\Pi_A^{ij}+\Pi_A^{ji}<0\\ \Pi_B^{ij}+\Pi_B^{ji}<0\end{aligned}\qquad(۲۲)$$

به ازای $i<j\,,i,j=1,2,\dots,r$ برقرار باشد، آنگاه اجماع گروه عامل‌ها با کنترل‌کننده (۱۰) تحت مکانیزم تحریک (۱۱) برای مقادیر مثبت و ثابت $\bar{\eta}$، λ و ماتریس K_j به صورت مجانبی حاصل می‌شود. در رابطه (۲۲)

$$\Pi_A^{ij}=\begin{bmatrix}\Pi_{A1}^{ij} & \Pi_{A2}^{ij\,T}\\ \Pi_{A2}^{ij} & \Pi_{A3}^{ij}\end{bmatrix},\ \Pi_B^{ij}=\begin{bmatrix}\Pi_{B1}^{ij} & \Pi_{B2}^{ij\,T}\\ \Pi_{B2}^{ij} & \Pi_{B3}^{ij}\end{bmatrix}$$

$$\Pi_{\mathrm{A1}}^{ij}=F^{ij}+2\bar{\eta}L_1(I_N\otimes R_1)L_2^{ij}+\Delta+\Delta^T$$

$$\Pi_{\mathrm{A2}}^{ij}=\mathrm{col}\{\bar{\eta}(I_N\otimes T)L_2^{ij}\,,\bar{\eta}(I_N\otimes R_2)L_2^{ij}\,,\bar{\eta}L^T,\phi_\delta\theta^{ij},L_3^{ij}\}$$

$$\Pi_{\mathrm{A3}}^{ij}=-\mathrm{diag}\{\bar{\eta}(I_N\otimes T)\,,\bar{\eta}(I_N\otimes R_2)\,,\bar{\eta}(I_N\otimes T),\phi_\delta,I\}$$

$$\Pi_{\mathrm{B1}}^{ij}=F^{ij}+\Delta+\Delta^T$$

$$\Pi_{\mathrm{B2}}^{ij}=\mathrm{col}\{\bar{\eta}(I_N\otimes T)L_2^{ij}\,,\bar{\eta}N^T\,,\bar{\eta}M^T,\phi_\delta\theta^{ij},L_3^{ij}\}$$

$$\Pi_{\mathrm{B3}}^{ij}=-\mathrm{diag}\{\bar{\eta}(I_N\otimes T)\,,\bar{\eta}(I_N\otimes R_2)\,,\bar{\eta}(I_N\otimes T),\phi_\delta,I\}$$

$$F^{ij}=\mathrm{diag}\{(I_N\otimes P_2)\,,0\,,-\phi\ \,,-\phi\,,-\phi\,,-(I_N\otimes P_2)\,,0\,,-\lambda\}+\left(L_2^{ij}\right)^T(I_N\otimes P_1)\,L_4+(L_4)^T(I_N\otimes P_1)\,L_2^{ij}-L_1\,(I_N\otimes R_1)(L_1)^T$$

$$\theta^{ij}=[0,(\bar{L}\otimes I_n),(\bar{L}\otimes I_n),-I,I,0,0,0]$$

$$\Delta=[-M-N,M-L,0,0,0-L,N,0]$$

$$L_1=\mathrm{col}\{(I_N\otimes I_n),0,0,0,0,0\,,-(I_N\otimes I_n),0\}$$

$$L_2^{ij}=\left[(I_N\otimes A_i),\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes B_iK_j\right),-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes B_iK_j\right),\left(I_N\otimes B_iK_j\right),-\left(I_N\otimes B_iK_j\right),0,0,(I_N\otimes B_{wi})\right]$$

$$L_3^{ij}=\left[(I_N\otimes C_i),\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes D_iK_j\right),-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes D_iK_j\right),\left(I_N\otimes D_iK_j\right),-\left(I_N\otimes D_iK_j\right),0,0,0\right]$$

$$L_4=[(I_N\otimes I_n),0,0,0,0,0,0,0]\qquad(۲۳)$$

اثبات: سیستم دینامیکی تاخیردار (۱۹) و (۲۰) را در نظر بگیرید. برای سیستم مذکور تابع لیاپانوف کراسوفسکی بصورت

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

$$V(t,\varepsilon(t),\dot{\varepsilon}(t)) = V_1(t,\varepsilon(t),\dot{\varepsilon}(t)) + V_2(t,\varepsilon(t),\dot{\varepsilon}(t)) \quad (۲۴)$$

انتخاب می‌شود بطوریکه

$$V_1(t,x(t)) = \varepsilon^T(t)(I_N \otimes P_1)\varepsilon(t) + \int_{t-\bar{\eta}}^{t} \varepsilon^T(v)P_2\varepsilon(v)dv + \int_{t-\bar{\eta}}^{t}\int_{s}^{t} \dot{\varepsilon}^T(v)T\dot{\varepsilon}(v)dvds$$

$$V_2(t,x(t)) = (\bar{\eta}-\eta(t))\Big\{[\varepsilon^T(t) - \varepsilon^T(s_k)](I_N \otimes R_1)[\varepsilon(t)-\varepsilon(s_k)] + \int_{s_k}^{t} \dot{\varepsilon}^T(v)R_2\dot{\varepsilon}(v)dv\Big\} \quad (۲۵)$$

که در آن $T>0$، $P_1>0$، $P_2>0$، $R_1>0$، $R_2>0$ و $s_k = t_k h + mh + \tau$ است.

با استفاده از رابطه نیوتن-لیبنیتس[1]، برای ماتریس های M، N و L با ابعاد مناسب می توان نوشت

$$2\psi^T(t)M\Big[\varepsilon(t)-\varepsilon\big(t-\eta(t)\big) - \int_{t-\eta(t)}^{t}\dot{\varepsilon}(s)ds\Big] = 0$$

$$2\psi^T(t)N\Big[\varepsilon(t)-\varepsilon(s_k) - \int_{s_k}^{t}\dot{\varepsilon}(s)ds\Big] = 0$$

$$2\psi^T(t)L\Big[\varepsilon\big(t-\eta(t)\big)-\varepsilon(t-\bar{\eta}) - \int_{t-\bar{\eta}}^{t-\eta(t)}\dot{\varepsilon}(s)ds\Big] = 0 \quad (۲۶)$$

که در آن

$$\psi^T(t) = \big[\varepsilon^T(t), \varepsilon^T\big(t-\eta(t)\big), e^T\big(t-\eta(t)\big), E_1^T\big(t-\eta(t)\big), E_0^T\big(t-\eta(t)\big), \varepsilon^T(t-\bar{\eta}), \varepsilon^T(s_k), w^T(t)\big]^T \quad (۲۷)$$

طبق لم ۳، همواره ماتریس‌های $R_2>0$ و $T>0$ وجود دارند بطوریکه:

$$2\psi^T(t)M\int_{t-\eta(t)}^{t}\dot{\varepsilon}(s)ds \le \eta(t)\psi^T(t)M(I_N\otimes T^{-1})M^T\psi(t) + \int_{t-\eta(t)}^{t}\dot{\varepsilon}^T(s)T\dot{\varepsilon}(s)ds \quad (۲۸)$$

$$2\psi^T(t)N\int_{s_k}^{t}\dot{\varepsilon}(s)ds \le \eta(t)\psi^T(t)N(I_N\otimes R_2^{-1})N^T\psi(t) + \int_{s_k}^{t}\dot{\varepsilon}^T(s)R_2\dot{\varepsilon}(s)ds$$

$$2\psi^T(t)L\int_{t-\bar{\eta}}^{t-\eta(t)}\dot{\varepsilon}(s)ds \le (\bar{\eta}-\eta(t))\psi^T(t)L(I_N\otimes T^{-1})L^T\psi(t) + \int_{t-\bar{\eta}}^{t-\eta(t)}\dot{\varepsilon}^T(s)T\dot{\varepsilon}(s)ds$$

با مشتق گیری از (۲۴) در امتداد مسیر حالت سیستم (۱۹) و با ترکیب (۲۶)-(۲۸) و (۱۸)، می‌توان نوشت

$$\dot{V} \le \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\mu_i(\theta(t))\mu_j(\theta(t))\psi^T\big(\Lambda^{ij} + \Lambda^{ji}\big)\psi - z^T(t)z(t) + \lambda^2 w^T(t)w(t) \quad (۲۹)$$

که در آن

$$\Lambda^{ij} = F^{ij} + \bar{\eta}\big(L_2^{ij}\big)^T(I_N\otimes T)L_2^{ij} + \big(\theta^{ij}\big)^T\phi_\delta\theta^{ij} + \big(L_3^{ij}\big)^T L_3^{ij} + \Delta + \Delta^T + (\bar{\eta}-\eta(t))H_1^{ij} + \eta(t)H_2$$

$$F^{ij} = \mathrm{diag}\{(I_N\otimes P_2), 0, -\phi, -\phi, -\phi, -(I_N\otimes P_2), 0, -\lambda\} + \big(L_2^{ij}\big)^T(I_N\otimes P_1)L_4 + (L_4)^T(I_N\otimes P_1)L_2^{ij} - L_1(I_N\otimes R_1)(L_1)^T$$

$$H_1^{ij} = L(I_N\otimes T^{-1})L^T + \big(L_2^{ij}\big)^T(I_N\otimes R_2)L_2^{ij} + 2L_1(I_N\otimes R_1)L_2^{ij}$$

$$H_2 = M(I_N\otimes T^{-1})M^T + N(I_N\otimes R_2^{-1})N^T$$

بر اساس لم ۲، مشتق تابع لیاپانوف کراسوفسکی در (۲۴) منفی شده که می‌توان نتیجه گرفت که سیستم (۱۹) به ازای $w\equiv 0$ بطور مجانبی پایدار است و تحت شرایط اولیه صفر داریم $\|z\|_2 < \lambda\|w\|_2$.

قضیه ۲: یک گروه شامل N عامل پیرو و یک رهبر را به ترتیب با دینامیک‌های (۵) و (۶)، در نظر بگیرید. فرض کنید فرض ۱ برقرار باشد. با توجه به دوره نمونه‌برداری $h>0$، تاخیر ورودی کنترل $0<\tau<h$ و پارامترهای تحریک $\delta_1,\dots,\delta_N>0$، اگر ماتریس‌های مثبت معین $\bar{T}>0$، $\bar{P}_i>0$ و $\bar{R}_i>0$ $(i=1.2)$ و ماتریس های $\bar{M}$، $\bar{N}$ و $\bar{L}$ با ابعاد مناسب و $\bar{\phi}=\mathrm{diag}\{\bar{\phi}_1,\dots,\bar{\phi}_N\}>0$ و $\bar{\phi}_\delta=\mathrm{diag}\{\delta_1\bar{\phi}_1,\dots,\delta_N\bar{\phi}_N\}>0$ و $Z_j>0$ وجود داشته

1 Newton-Leibnitz

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

باشند بطوریکه شرط LMI در (۲۲) برای $i<j\,,i,j=1,2,\dots,r$ برقرار باشد، آنگاه اجماع گروه عامل‌ها با کنترل‌کننده مبتنی بر تحریک-رویداد (۱۰) تحت مکانیزم تحریک (۱۱)، با نرم H_∞ محدود به λ و بهره های فیدبک $K_j=Z_jX^{-1}$ برای مقادیر مثبت وثابت $\bar{\eta}$، λ و ϵ، به صورت مجانبی حاصل می‌شود.

$$\bar{\Pi}_{\mathrm{A}}^{ij}+\bar{\Pi}_{\mathrm{A}}^{ji}<0$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{B}}^{ij}+\bar{\Pi}_{\mathrm{B}}^{ji}<0$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{A}}^{ij}=\begin{bmatrix}\bar{\Pi}_{\mathrm{A1}}^{ij} & \bar{\Pi}_{\mathrm{A2}}^{ij\,T}\\ \bar{\Pi}_{\mathrm{A2}}^{ij} & \bar{\Pi}_{\mathrm{A3}}^{ij}\end{bmatrix}$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{B}}^{ij}=\begin{bmatrix}\bar{\Pi}_{\mathrm{B1}}^{ij} & \bar{\Pi}_{\mathrm{B2}}^{ij\,T}\\ \bar{\Pi}_{\mathrm{B2}}^{ij} & \bar{\Pi}_{\mathrm{B3}}^{ij}\end{bmatrix}$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{A1}}^{ij}=\bar{F}^{ij}+\bar{\Delta}+\bar{\Delta}^{T}$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{A2}}^{ij}=\mathrm{col}\{\sqrt{\bar{\eta}}\bar{L}_2^{ij},\sqrt{\bar{\eta}}\bar{L}_2^{ij},\sqrt{\bar{\eta}}\bar{L}^{T},\theta^{ij},\bar{L}_3^{ij},\bar{L}_2^{ij},\bar{\eta}\bar{R}_1L_1^{T}\}$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{A3}}^{ij}=-\mathrm{diag}\{(I_N\otimes X)\bar{T}^{-1}(I_N\otimes X),(I_N\otimes X)\bar{R}_2^{\ -1}(I_N\otimes X),\bar{T},(I_N\otimes X)\bar{\phi}_\delta^{-1}(I_N\otimes X),I,\epsilon,(I_N\otimes X\epsilon^{-1}X)\}$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{B1}}^{ij}=F^{ij}+\Delta+\Delta^{T}$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{B2}}^{ij}=\mathrm{col}\{\sqrt{\bar{\eta}}\bar{L}_2^{ij},\sqrt{\bar{\eta}}\bar{N}^{T},\sqrt{\bar{\eta}}\bar{M}^{T},\theta^{ij},\bar{L}_3^{ij}\}$$
$$\bar{\Pi}_{\mathrm{B3}}^{ij}=-\mathrm{diag}\{(I_N\otimes X)\bar{T}^{-1}(I_N\otimes X),\bar{R}_2,\bar{T},(I_N\otimes X)\bar{\phi}_\delta^{-1}(I_N\otimes X),I\}$$
$$\bar{F}^{ij}=\mathrm{diag}\{(I_N\otimes\bar{P}_2),0,-\bar{\phi},-\bar{\phi},-\bar{\phi},-(I_N\otimes\bar{P}_2),0,-\lambda\}+\left(\bar{L}_2^{ij}\right)^{T}L_4+(L_4)^{T}\bar{L}_2^{ij}-L_1(I_N\otimes\bar{R}_1)(L_1)^{T}$$
$$\bar{\Delta}=[-\bar{M}-\bar{N},\bar{M}-\bar{L},0,0,0-\bar{L},\bar{N},0]$$
$$\bar{L}_2^{ij}=\left[(I_N\otimes A_iX),\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes B_iZ_j\right),-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes B_iZ_j\right),\left(I_N\otimes B_iZ_j\right),-\left(I_N\otimes B_iZ_j\right),0,0,(I_N\otimes B_{wi})\right]$$
$$\bar{L}_3^{ij}=\left[(I_N\otimes C_iX),\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes D_iZ_j\right),-\left(\bar{\mathbb{L}}\otimes D_iZ_j\right),\left(I_N\otimes D_iZ_j\right),-\left(I_N\otimes D_iZ_j\right),0,0,0\right] \qquad (۳۰)$$

اثبات: تعریف می‌کنیم: $X=p^{-1}$,

$$(I_N\otimes X)(P_2)(I_N\otimes X^{T})=\bar{P}_2,$$
$$(I_N\otimes X)(R_1)(I_N\otimes X^{T})=\bar{R}_1,$$
$$(I_N\otimes X)(R_2)(I_N\otimes X^{T})=\bar{R}_2,$$
$$(I_N\otimes X)(T)(I_N\otimes X^{T})=\bar{T},$$
$$(I_N\otimes X)(M)(I_N\otimes X^{T})=\bar{M},$$
$$(I_N\otimes X)(N)(I_N\otimes X^{T})=\bar{N},$$
$$(I_N\otimes X)(L)(I_N\otimes X^{T})=\bar{L},$$
$$(I_N\otimes X)(\phi)(I_N\otimes X^{T})=\bar{\phi},$$
$$(I_N\otimes X)(\phi_\delta)(I_N\otimes X^{T})=\bar{\phi}_\delta$$

و $Z_j=K_jX^{T}$

برای هر $\epsilon>0$ و نتیجه می‌شود (بر اساس لم ۳)

$$\bar{\eta}L_1(I_N\otimes XR_1)\bar{L}_2^{ij}+\bar{\eta}\left(\bar{L}_2^{ij}\right)^{T}(I_N\otimes R_1X)L_1^{T}=\left(\bar{L}_2^{ij}\right)^{T}\epsilon^{-1}\bar{L}_2^{ij}+\bar{\eta}^2L_1(I_N\otimes\bar{R}_1)(I_N\otimes X^{-1})\epsilon\,(I_N\otimes X^{-1})(I_N\otimes\bar{R}_1)L_1^{T} \qquad (۳۱)$$

سپس، طرفین $\Pi_{\mathrm{A}}^{\mathrm{ij}}$ و $\Pi_{\mathrm{A}}^{\mathrm{ji}}$، در (۲۲) را با

$$diag\{(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),I,I,I,(I_N\otimes X),I,I,I\}$$

و ترانهاده آن و $\Pi_{\mathrm{B}}^{\mathrm{ij}}$ و $\Pi_{\mathrm{B}}^{\mathrm{ji}}$، در (۲۲) را با

$$diag\{(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),I,I,(I_N\otimes X),(I_N\otimes X),I,I\} \qquad (۳۲)$$

و ترانهاده آن، به ترتیب ضرب می کنیم، با استفاده از لم ۲ و (۳۱)، به آسانی می توان از نتیجه قضیه ۱ در (۲۲) به (۳۰) رسید و اثبات کامل می‌شود.

توجه۳: نامساوی‌های ماتریسی (۳۰)، به دلیل وجود عبارات غیر خطی $(I_N\otimes X)\bar{T}^{-1}(I_N\otimes X)$، $(I_N\otimes X)\bar{R}_2^{\ -1}(I_N\otimes X)$، $(I_N\otimes X)\bar{\phi}_\delta^{-1}(I_N\otimes X)$، $(I_N\otimes X\epsilon^{-1}X)$، محدب نمی-باشند، لذا نمی‌توانند بطور مستقیم توسط ابزار LMI متلب حل شوند. بطور کلی، دو روش برای حل چنین مسئله غیر محدبی، توسط ابزار LMI متلب وجود دارد، روش عددی مکمل مخروط (CCL) [۲۰]، و روش ساده خطی طبق لم ۴، که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

توجه ٤: در ملاحظات عملی، اجتناب از رفتار زنو برای استراتژی اجماع ناشی از تحریک-رویداد بسیار مهم است [۲۵]. از آنجا که از طرح نمونه-برداری دوره‌ای استفاده می‌شود، زمان بین دو لحظه رویداد متوالی می-بایستی حداقل پایین‌ترین مقدار از محدوده دوره نمونه‌برداری h باشد بطوریکه

$$t_{k+1}^{i}=t_k^{i}+\min_{l_i\geq1}\{l_ih|\,g_i(t)\geq0\}$$

که در آن $l_i\in\mathbb{N}$ و $g_i(t)$، شرط تحریک-رویداد (۱۱) است از این رو، طرح پیشنهادی تحریک-رویداد، رفتار زنو را نشان نمی‌دهد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

۵- الگوریتم طراحی و فرآیند کنترل

همانطور که از قضیه ۲ دیده می شود برای دستیابی به مقادیر ماتریس-های $\bar{T} > 0$، $\bar{P}_i > 0$ و $\bar{R}_i > 0 (i = 1.2)$، ماتریس های $\bar{M}$، $\bar{N}$ و $\bar{L}$، $\bar{\phi}$ و Z_j، برای رسیدن به ماتریس کنترل بهره K_j و ماتریس تحریک-رویداد ϕ، نیاز به حل شرط LMI در (۳۰) وجود دارد. این روش فرآیند کنترل در الگوریتم شکل ۲ خلاصه شده است.

توجه ۵: در الگوریتم طراحی، δ_i پارامتر انتخابی تحریک-رویداد است. توجه داشته باشید که تعداد تحریک ها برای عامل i با افزایش δ_i کاهش خواهد یافت، در حالیکه خطاهای حالت در فرآیند قبل از اجماع با افزایش δ_i، افزایش می یابد.

تنظیمات اولیه الگوریتم طراحی

- انتخاب τh ,بطوریکه $h > \tau$
- مقداردهی مناسب $\lambda, \epsilon\bar{\eta}\ ; \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N$,
- تشکیل LMI در (۳۰) با ماتریس‌های تعریف‌شده سازگار $\bar{P}_i > 0$ و $\bar{R}_i > 0\ (i = 1.2)$, $\bar{T} > 0$ $(i < j\ , i, j = 1,2, \dots, r)$, $\bar{\phi}_\iota\ , Z_j > 0$
- حل LMI در (۳۰) جهت دستیابی به مقادیر بهینه $\bar{P}_i > 0$ و $\bar{R}_i > 0\ (i = 1.2)$, $\bar{T} > 0$ $(i < , \bar{\phi}_\iota\ , Z_j > 0$ $j\ , i, j = 1,2, \dots, r)$
- استخراج ماتریس های بهره کنترلی و تحریک-رویداد بطوریکه $K_j = Z_j X^{-1}$,

$$\phi_i = (I_N \otimes \bar{P}_i^{-1})\bar{\phi}_\iota (I_N \otimes \bar{P}_i^{-1})$$

تنظیمات اولیه الگوریتم فرآیند کنترل

- مقداردهی اولیه به شمارنده تحرک-رویداد $k \leftarrow 0$; $u_i(t_k^0) = u_i(0)\ ; t_k^i \leftarrow 0$
- مقداردهی اولیه به شمارنده نمونه‌برداری $m \leftarrow 0$

While $m < \frac{T}{h}$ **do** (T، زمان در نظر گرفته شده جهت شبیه سازی)

محاسبه $\varepsilon_i(mh)\ , e_i(mh-\tau), E_{0_i}(mh-\tau)$

While $j \in N_i$ and $j \neq i$ **do**

محاسبه $E_{1_i}(mh-\tau)$

If $g_i(mh) \leq 0$ **then**

$m = m + 1\ \ ;\ \ k = k\ \ ;\ \ t_k^i = t_k^i$; $u_i(mh) = u_i(t_k^i)$

Else

$e_i(mh-\tau) \leftarrow 0\ , E_{0_i}(mh-\tau) \leftarrow 0\ , E_{1_i}(mh-\tau) \leftarrow 0$

$m = m + 1\ \ ;\ \ k = k + 1\ \ ;\ \ t_k^i = t_{k+1}^i$;

به روزرسانی سیگنال کنترلی $u_i(t_k^i) = u_i(t_{k+1}^i)$ بر اساس (۱۰) و ارسال اطلاعات حالت به عامل همسایه

Break;

End if

End while

شکل ۲: الگوریتم اجماع مبتنی بر تحریک-رویداد برای عامل $\boldsymbol{i} = \boldsymbol{1, 2 \dots, N}$

٦- شبیه سازی

در این بخش، دو مثال عددی برای نشان دادن کارایی روش طراحی پیشنهادی بر پایه تحریک-رویداد ارائه شده است. دراینجا از نرم افزار متلب برای حل نامساوی های ماتریسی خطی استفاده شده است.

مثال ۱: یک سیستم چندعاملی متشکل از یک عامل رهبر و چهار عامل پیرو $(N = 4)$، مطابق شکل ۳، در نظر بگیرید [۱۵] که در آن دینامیک عاملها به صورت

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + 0.8u \\ \dot{x}_2 = -0.4x_2 + 0.5u - sin(x_2(t)) \end{cases} \quad (۳۳)$$

است. سیستم غیرخطی (۳۳) به صورت مدل TS فازی

$$Rule\ i: If\ \ x_1\ is\ \mu_i\ \ then$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + B_{wi} w(t) \\ z(t) = C_i x(t) \quad , \quad i = 1,2 \end{cases} \quad (۳۴)$$

قابل نمایش است که در آن $\mu_1 = (x_2 - \sin(x_2))/(1.2127 *)$ و $\mu_2 = 1 - \mu_1$ ، $x_2)$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\mu_1 * 0.1828 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\mu_2 * 1.4 \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.5 \end{bmatrix}, B_{wi} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_i = [1 \quad 0] \quad (۳۵)$$

ماتریس مجاورت وزن دار $\mathbb{W}$ و ماتریس مجاورت عامل رهبر $\mathbb{B}$، بصورت

$$\mathbb{W} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbb{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

است. در این مثال تاخیر ورودی و دوره نمونه‌برداری به ترتیب $\tau = 0.05s$ و $h = 0.06s$ و پارامتر $\lambda = 1.9$ انتخاب شده است. با انتخاب پارامترهای شرط تحریک (۱۱) بصورت $\delta_4 = 0.013\ , \delta_3 = 0.016\ , \delta_2 = 0.007\ , \delta_1 = 0.01$ و با استفاده از قضیه ۲، ماتریس‌های بهره فیدبک K و ماتریس های تحریک Φ به صورت

$$K_1 = [-0.5263\ , -0.0912]$$

$$K_2 = [0.1081\ , -0.4420]$$

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} 11.0096 & 4.3041 \\ 4.3041 & 14.6119 \end{bmatrix}$$

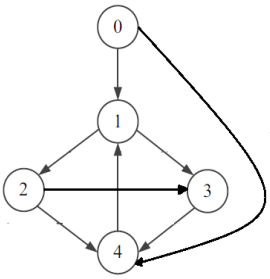
$$\phi_2 = \begin{bmatrix} 54.1825 & 10.6995 \\ 10.6995 & 59.5996 \end{bmatrix}$$

$$\phi_3 = \begin{bmatrix} 49.6933 & 10.4048 \\ 10.4048 & 49.5247 \end{bmatrix}$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

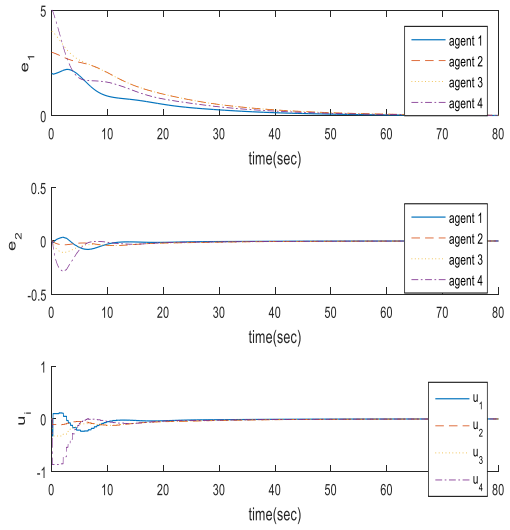
$$\phi_4 = \begin{bmatrix} 12.6469 & -13.2910 \\ -13.2910 & 31.6564 \end{bmatrix}$$

بدست می آیند.



شکل ۳: گراف ارتباطی عامل ها در مثال ۱

شرایط اولیه عامل رهبر و عامل‌های پیرو برای $t \in [-\tau, 0)$ به ترتیب به صورت $x_0(t) = [-1 \quad 0]^T$ و $x_i(t) = [i \quad 0]^T$ که $i = 1, 2, 3, 4$ در نظر گرفته می شوند. بعلاوه فرض می‌شود تمامی اطلاعات در لحظه $t = 0$ ارسال شده باشد، در حقیقت t_0^i , $i = 1,2,3,4$ لحظه 0ام تحریک است. خطای حالت را بین عامل i و رهبر به صورت $e_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$ تعریف می شود. شکل ۴، پاسخ‌های زمانی خطاهای حالت بین عامل‌های پیرو و رهبر و سیگنال کنترلی ورودی را نشان می‌دهد. می‌توان دید که خطاهای حالت به صفر همگرا شده لذا اجماع بطور مجانبی حاصل می‌شود.



شکل ٤: مسیر خطای حالت e_1، e_2 و سیگنال کنترلی ورودی برای عامل‌های پیرو

در جدول ۱ تعداد زمان‌های نمونه‌برداری و زمان‌های تحریک-رویداد برای هر عامل در طول دوره $t \in [0,20]$ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود تعداد زمان‌های تحریک بسیار کمتر از زمان‌های نمونه‌برداری است. علاوه بر این تعداد زمان‌های تحریک و بروزرسانی سیگنال کنترلی هر یک از عامل‌ها در مقایسه با روش مرجع [۱۵] کاهش یافته است.

جدول ۱: زمان‌های نمونه برداری و تحریک برای هر یک از عامل‌های پیرو

	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴
زمان‌های نمونه برداری	۶۶۶	۶۶۶	۶۶۶	۶۶۶
زمان‌های تحریک	۴۲	۳۶	۳۳	۴۲

مثال ۲: یک سیستم چندعاملی متشکل از یک عامل رهبر و چهار عامل پیرو مطابق شکل ۵ در نظر بگیرید که هر عامل دارای مدل دینامیکی یک سیستم روبات تک-لینک ([۲۶]) به صورت

$$\mathcal{M}\ddot{p}_i + \frac{1}{2}mgl\,sin(p_i) = \tau_i \qquad (۳۶)$$

و $i = 0, \dots, 4$ است. p_i زاویه سمت، τ_i نیروی کنترل، g شتاب گرانشی، l طول ربات، m جرم مجموعه به صورت $l = m = 1$ است. $\mathcal{M}$ نشان دهنده اینرسی و به صورت $\mathcal{M} = 0.5$ در نظر گرفته شده است. دینامیک‌های عامل‌ها را می توان به صورت

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} = 2\tau_i + f_{i2} \end{cases} \qquad (۳۷)$$

بازنویسی کرد که در آن $x_{i1} = p_i$ و $x_{i2} = \dot{p}_i$. سیستم غیرخطی (۳۷) را می توان به صورت مدل TS فازی

$$Rule\ i: If\ \ x_1\ is\ \mu_i\ \ then$$
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + B_{wi} w(t) \\ z(t) = C_i x(t) \quad , \quad i = 1,2 \end{cases} \qquad (۳۸)$$

نشان داد که در آن $\mu_1 = (x_{i1} - \sin(x_{i1}))/(1.2127 * x_{i1})$ و $\mu_2 = 1 - \mu_1$،

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\mu_1 * 10 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\mu_2 * 10 & 0 \end{bmatrix}$$
$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}, B_{wi} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_i = [1 \quad 0] \qquad (۳۹)$$

ماتریس مجاورت وزن دار $\mathbb{W}$ و ماتریس مجاورت عامل رهبر، $\mathbb{B}$، به ترتیب بصورت

$$\mathbb{W} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbb{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

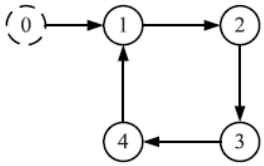
است. در این مثال تاخیر ورودی و دوره نمونه‌برداری به ترتیب $\tau = 0.002s$ و $h = 0.003s$ و پارامتر $\lambda = 3$ انتخاب شده است. با انتخاب پارامترهای شرط تحریک (۱۱) بصورت $\delta_4 = 0.01$, $\delta_3 = 0.01$، $\delta_2 = 0.01$, $\delta_1 = 0.03$، و با استفاده از قضیه ۲ ماتریس-های بهره فیدبک K و ماتریس های تحریک ϕ به صورت

$$K_1 = [0.7571 \quad 0.0875]$$
$$K_2 = [-2.8916 \quad -1.1161]$$
$$\phi_1 = \begin{bmatrix} 51.9152 & -14.0714 \\ -14.0714 & 75.3419 \end{bmatrix}$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

$$\phi_2 = \begin{bmatrix} 75.4914 & 7.6857 \\ 7.6857 & 63.0566 \end{bmatrix}$$
$$\phi_3 = \begin{bmatrix} 167.6557 & 52.9531 \\ 52.9531 & 85.4439 \end{bmatrix}$$
$$\phi_4 = \begin{bmatrix} 306.3752 & 21.7180 \\ 21.7180 & 275.2721 \end{bmatrix}$$

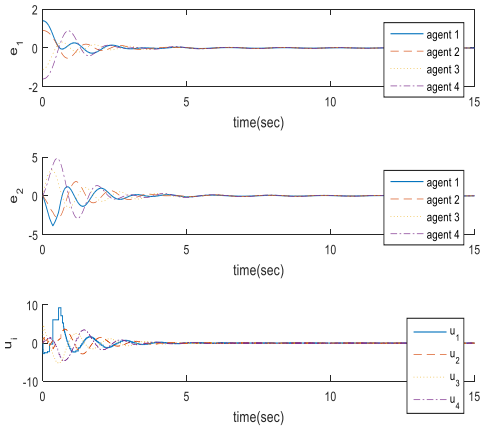
محاسبه خواهد شد.



شکل ۵: گراف ارتباطی عامل ها در مثال ۲

شرایط اولیه بردار حالت اولیه عامل رهبر و عامل‌های پیرو برای $t \in [-\tau, 0)$ را به ترتیب به صورت $x_0(t) = [0.1 \quad 0]^T$، $x_1(t) = [1 \quad -1]^T$، $x_2(t) = [1 \quad -1]^T$، $x_3(t) = [1 \quad -1]^T$ و $x_4(t) = [1 \quad -1]^T$ در نظر گرفته شده است. فرض کنید تمامی اطلاعات در لحظه $t = 0$ ارسال شده باشند.

خطاهای حالت را بین عامل i و رهبر به صورت $e_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$ تعریف می شود. شکل ۶، ، پاسخ‌های زمانی خطاهای حالت بین عامل‌های پیرو و رهبر و سیگنال کنترلی ورودی را نشان می‌دهد. می‌توان دید که خطاهای حالت به صفر همگرا شده لذا اجماع بطور مجانبی حاصل می‌شود. همانطور که از این شکل دیده می شود هر عامل تنها در لحظات تحریک خودش بروزرسانی شده و در فواصل تحریک ثابت می‌ماند.



شکل ٦: مسیر خطای حالت e_1، e_2 و سیگنال کنترلی ورودی برای عامل‌های پیرو

تعداد زمان‌های نمونه‌برداری و زمان‌های تحریک-رویداد برای هر عامل در طول دوره $t \in [0,15]$، در جدول ۲ ثبت شده است. همانطور که دیده می شود تعداد زمان‌های تحریک بسیار کمتر از زمان‌های نمونه-برداری است. در ضمن حداکثر زمان مجاز تاخیر و نمونه برداری در روش پیشنهادی به ترتیب $\tau = 0.007\ sec$ و $h = 0.09\ sec$ می‌باشد.

جدول ۲: زمان‌های نمونه برداری و تحریک برای هر یک از عامل‌های پیرو (مثال ۲)

	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴
زمان‌های نمونه برداری	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰
زمان‌های تحریک	۲۶۱۰	۳۴۳۱	۳۵۶۰	۳۵۱۴

۷- نتیجه‌گیری

یک استراتژی جدید به منظور اجماع سیستم‌های چند عاملی مبتنی بر تحریک-رویداد با عامل‌های به فرم TS فازی و تاخیر زمانی ورودی، که مزایای خود را در بکارگیری حداقل قوانین برای مدل‌سازی سیستم‌های واقعی غیرخطی مرتبه بالا نشان می‌دهد، در این مقاله بیان گردید. این استراتژی در جلوگیری از ارتباط پیوسته بین عامل‌ها و کاهش زمان‌های تحریک عامل‌ها عملکردی قابل قبول داشته است. شرایط کافی برای طراحی قانون کنترل به جهت دستیابی به اجماع رهبر-پیرو در قالب نامساوی ماتریسی خطی ارائه شد که با حل آن، ماتریس‌های تحریک-رویداد و بهره فیدبک، محاسبه می‌شوند. مثالی نیز جهت نشان دادن اثربخشی و مزایای این نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

۸- مراجع

[1] S. J. Yoo and T.-H. Kim, "Predesignated fault-tolerant formation tracking quality for networked uncertain nonholonomic mobile robots in the presence of multiple faults," Automatica, vol. 77, pp. 380-387, 2017.

[2] W. Li, F. Bassi, L. Galluccio, and M. Kieffer, "Peer-Assisted Individual Assessment in a multi-agent system," *Automatica*, vol. 83, pp. 351-360, 2017.

[3] Z.-G. Wu, Y. Xu, R. Lu, Y. Wu, and T. Huang, "Event-triggered control for consensus of multiagent systems with fixed/switching topologies," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48, pp. 1736-1746, 2017.

[4] X. Wang, H. Su, M. Z. Chen, and X. Wang, "Observer-based robust coordinated control of multiagent systems with input saturation," *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 29, pp. 1933-1946, 2017.

[5] C.-E. Ren, L. Chen, and C. P. Chen, "Adaptive fuzzy leader-following consensus control for stochastic multiagent systems with heterogeneous nonlinear dynamics," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 25, pp. 181-190, 2016.

[6] F. Zhang and W. Wang, "Decentralized optimal control for the mean field LQG problem of multi-agent systems," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 13, pp. 55-66, 2017.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]

triggered control," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 65, pp. 1696-1706, 2017.

[19] W. Zhu and Z.-P. Jiang, "Event-based leader-following consensus of multi-agent systems with input time delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 60, pp. 1362-1367, 2014.

[20] S. Yang, Peng, X, "Double integral defined functions derivation (Studies in

College Mathematics, 2006)," pp. 40–41, 2006.

[21] Y. Zi-Zong, "Schur complements and determinant inequalities," *Journal of mathematical inequalities*, vol. 3, pp. 161-167, 2009.

[22] Y. Wang, L. Xie, and C. E. De Souza, "Robust control of a class of uncertain nonlinear systems," *Systems & control letters*, vol. 19, pp. 139-149, 1992.

[23] X. Yin, D. Yue, and S. Hu, "Adaptive periodic event-triggered consensus for multi-agent systems subject to input saturation," *International Journal of Control*, vol. 89, pp. 653-667, 2016.

[24] E. Tian, D. Yue, and Y. Zhang, "Delay-dependent robust H∞ control for T–S fuzzy system with interval time-varying delay," *Fuzzy sets and systems*, vol. 160, pp. 1708-1719, 2009.

[25] G. Guo, L. Ding, and Q.-L. Han, "A distributed event-triggered transmission strategy for sampled-data consensus of multi-agent systems," *Automatica*, vol. 50, pp. 1489-1496, 2014.

[26] W. Wang and Y. Li, "Observer-Based Event-Triggered Adaptive Fuzzy Control for Leader-Following Consensus of Nonlinear Strict-Feedback Systems," *IEEE transactions on cybernetics*, 2019.

[7] H. Meng, Z. Chen, and R. Middleton, "Consensus of multiagents in switching networks using input-to-state stability of switched systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 63, pp. 3964-3971, 2018.

[8] H. Fang, Y. Wei, J. Chen, and B. Xin, "Flocking of second-order multiagent systems with connectivity preservation based on algebraic connectivity estimation," *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 47, pp. 1067-1077, 2016.

[9] K. J. Åström and B. Bernhardsson, "Comparison of periodic and event based sampling for first-order stochastic systems," in *Proceedings of the 14th IFAC World congress*, 1999, pp. 301-306.

[10] D. V. Dimarogonas and K. H. Johansson, "Event-triggered control for multi-agent systems," in Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference, 2009, pp. 7131-7136.

[11] W. Chen and X. Li, "Observer-based consensus of second-order multi-agent system with fixed and stochastically switching topology via sampled data," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 24, pp. 567-584, 2014.

[12] Y. Fan, Y. Yang, and Y. Zhang, "Sampling-based event-triggered consensus for multi-agent systems," *Neurocomputing*, vol. 191, pp. 141-147, 2016.

[13] M.-M. Duan, C.-L. Liu, and F. Liu, "Event-triggered consensus seeking of heterogeneous first-order agents with input delay," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5215-5223, 2017.

[14] D. Liuzza, D. V. Dimarogonas, M. Di Bernardo, and K. H. Johansson, "Distributed model based event-triggered control for synchronization of multi-agent systems," *Automatica*, vol. 73, pp. 1-7, 2016.

[15] H. Su, Z. Wang, Z. Song, and X. Chen, "Event-triggered consensus of non-linear multi-agent systems with sampling data and time delay," *IET Control Theory & Applications*, vol. 11, pp. 1715-1725, 2016.

[16] H. Li, G. Chen, T. Huang, W. Zhu, and L. Xiao, "Event-triggered consensus in nonlinear multi-agent systems with nonlinear dynamics and directed network topology," *Neurocomputing*, vol. 185, pp. 105-112, 2016.

[17] X. You, C. Hua, and X. Guan, "Event-triggered leader-following consensus for nonlinear multiagent systems subject to actuator saturation using dynamic output feedback method," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 63, pp. 4391-4396, 2018.

[18] K. Liu, P. Duan, Z. Duan, H. Cai, and J. Lü, "Leader-following consensus of multi-agent systems with switching networks and event-

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.2.7.4]
[DOI: 10.52547/joc.15.2.11]