



یک چهارچوب کنترلی سلسله‌مراتبی و گسترده الهام گرفته شده از طبیعت برای یک ربات دو پای سه‌لینکی

مسعود یزدانی جهرمی¹، حسن سالاریه^{2*}، محمود سعادت فومنی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11365/8639، salarieh@sharif.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 مهر 1396

پذیرش: 07 دی 1396

ارائه در سایت: 26 بهمن 1396

کلید واژگان:

کنترل گسترده

کنترل سلسله‌مراتبی

ربات دوپا

گام‌برداری

سیستم‌های زیر تحریر

چکیده

گام‌برداری انسان یکی از مقاوم‌ترین و تطبیق‌پذیرترین پدیده‌های دینامیکی در طبیعت می‌باشد که در آن، تعامل پیچیده‌ای میان سیستم عصبی و بیومکانیکی بدن وجود دارد. یکی از نظریه‌های پیشنهاد شده برای این پدیده، وجود یک ساختار دو سطحی است که در سطح پایین، کنترل سیستم توسط سیستم عصبی پراکنده در بدن به همراه سیستم اسکلتی-عضلانی انجام می‌پذیرد و سیستم عصبی مرکزی (مغز) در سطح بالا، وظیفه کنترل سیستم در صورت عدم توانایی سطح پایین، نظارت و آموزش آن را بر عهده دارد. در این مقاله، براساس این نظریه، یک چهارچوب کنترلی دو لایه‌ای برای سیستم‌های زیر تحریر، با درجات آزادی بالا و دارای سیکل حد توسعه داده شده است که بر روی یک ربات دو پای سه‌لینکی در حال گام‌برداری پیاده‌سازی گردیده است. در این چهارچوب کنترلی، لایه پایین کنترلی از شبکه‌ای از کنترل‌های ساده متناظر با هر درجه آزادی تشکیل می‌گردد که به منظور حفظ پایداری سیستم، توسط یک پسخوراند از وضعیت کلی سیستم تغذیه می‌گردد. علاوه بر این در لایه بالا، یک کنترلر مرکزی در نظر گرفته شده است که وظیفه آموزش این شبکه و نظارت بر حفظ پایداری سیستم را برعهده دارد. در ادامه نشان داده شده است که به وسیله این شبکه کنترلی که با حداقل اطلاعات کنترلی تغذیه می‌شود، می‌توان سیستم در نظر گرفته شده را که یک سیستم دینامیکی ناپایدار است، کنترل نمود.

A Bio-inspired Distributed Hierarchical Control Framework for Walking of a 3-Link Biped Robot

Masoud Yazdani, Hassan Salarieh*, Mahmoud Saadat Foumani

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1365/8639, Tehran, Iran, salarieh@sharif.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 October 2017
Accepted 28 December 2017
Available Online 15 February 2018

Keywords:
Distributed Control
Hierarchical Control
Biped Robot
Locomotion
Under-actuated System

ABSTRACT

Human walking is one of the most robust and adaptive locomotion mechanisms in nature, involves sophisticated interactions between neural and biomechanical levels. It has been suggested that the coordination of this process is done in a hierarchy of levels. The lower layer contains autonomous interactions between muscles and spinal cord and the higher layer (e.g. the brain cortex) interferes when needed. Inspiringly, in this study, we present a hierarchical control architecture in order to control under-actuated and high degree of freedom systems with limit cycle behavior and it is implemented for the walking control of a 3-link biped robot. In this architecture, the system is controlled by independent control units for each joint at the lower layer. In order to stabilize the system, these units are driven by a sensory feedback from the posture of the robot. A central stabilizing controller at the upper layer arises in case of failing the units to stabilize the system and take the responsibility of training the lower layer controllers. We show that using this architecture, a highly unstable system can be stabilized with identical simple controller units even though they do not have any feedback from all other units and the robot.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، ربات‌های زیرتحریر و به ویژه ربات‌های دو پا یکی از موضوعات مورد توجه محققین بوده است که منجر به عرضه و تولید ربات‌های قابل توجهی گردیده است. با این وجود، گام‌برداری این ربات‌ها همچنان فاصله بسیاری با گام‌برداری انسان دارد و هیچ یک دینامیک، تطبیق‌پذیری و مقاومت گام‌برداری انسان را ندارند. ریشه این مشکل، علاوه بر طراحی و

ساختار ربات‌ها، با سیستم کنترلی آن‌ها نیز مرتبط می‌باشد. روش‌های متعددی تاکنون برای کنترل ربات دو پا مورد استفاده قرار گرفته است که به‌صورت کلی می‌توان آن را در دو دسته دینامیک محور و مسیر محور قرار داد. روش‌های دینامیک محور، روش‌هایی هستند که براساس سینماتیک و دینامیک ربات و با در دست داشتن کلیه پارامترهای سیستم، کنترل طراحی می‌گردد [1-7]. این روش‌ها با وجود مقاوم بودن در مقابل

Please cite this article using:

M. Yazdani, H. Salarieh, M. Saadat Foumani, A Bio-inspired Distributed Hierarchical Control Framework for Walking of a 3-Link Biped Robot, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 02, pp. 392-400, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گردیده است. سپس شرح چهارچوب کنترلی مدنظر در بخش 3 مورد بحث قرار گرفته و سپس نتایج شبیه‌سازی در بخش 4 آورده شده است.

2- مدل‌سازی ربات

مدل استفاده شده در این پژوهش [22]، یک مدل سه لینکی شامل یک لینک به‌عنوان تنه و دو لینک به‌عنوان دو پا می‌باشد که در نقطه‌ای به نام لگن به یکدیگر لولا شده‌اند (شکل 1). در این مدل فرض می‌گردد که حرکت تنها در صفحه کناری² و در امتداد یک خط افقی صورت می‌پذیرد. علاوه بر این، با توجه به نقطه‌ای بودن کف پا، فرض می‌گردد که در هنگام حرکت، پا روی زمین سر نخورد. همچنین فرض می‌گردد زمان برخورد پا به زمین ناچیز بوده و برخورد پا به زمین را می‌توان به‌صورت یک برخورد صلب و کاملاً پلاستیک در نظر گرفت. علاوه بر این، با توجه به مدل ساده در نظر گرفته شده، فرض می‌گردد که پای معلق پس از جدا شدن از زمین کمی از صفحه خارج شده تا از برخورد آن به زمین جلوگیری شود و هنگامی که $\theta_1 = \theta_{1d}$ می‌گردد، این پا دوباره به صفحه کناری باز می‌گردد تا برخورد اتفاق افتد [22].

با فرضیات در نظر گرفته شده، گام‌برداری ربات را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود: (1) حرکت ربات هنگامی که یک پا بر روی زمین لولا بوده و پای دیگر معلق است و (2) برخورد پا به زمین.

بخش اول حرکت را می‌توان با یک معادله دیفرانسیل مدل‌سازی نمود که در آن $q = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ بردار حالات سیستم و $u = (u_1, u_2)$ بردار ورودی سیستم می‌باشد. بردار ورودی شامل دو مولفه است که مولفه اول نماینده گشتاور ورودی میان مفصل پای روی زمین با تنه و المان دوم نشان‌دهنده گشتاور ورودی میان مفصل پای معلق با تنه می‌باشد. با استفاده از روش لاگرانژ، معادله حاکم بر سیستم را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = B(q)u \quad (1)$$

که به‌صورت فرم فضای فاز، به‌صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ D^{-1}(q)(B(q)u - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)) \end{bmatrix} \\ := f(x) + g(x)u, \quad (2)$$

که در آن، $x = (q^T, \dot{q}^T)^T$ می‌باشد.

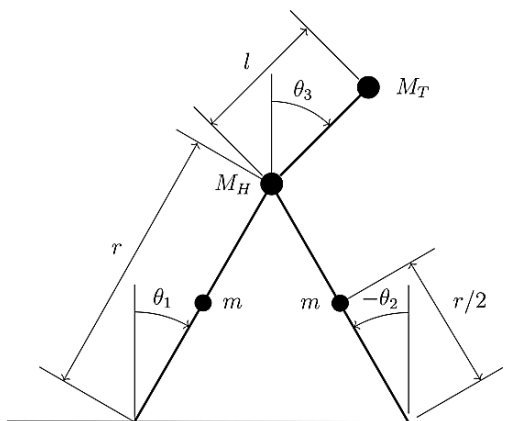


Fig. 1 Schematic of considered biped robot model showing all model parameters [5]

شکل 1 شمای مدل ربات مورد استفاده به همراه پارامترهای مدل [5]

اغتاشات، از نیاز به دانش نسبت به کلیه پارامترهای سیستم به‌صورت عموم و نیاز به محاسبات بالا به‌صورت ویژه در سیستم‌های با درجه آزادی بالا رنج می‌برند. در مقابل، روش‌های طراحی مسیر محور، روش‌هایی هستند که قدمت بیشتری نسبت به روش‌های دینامیک محور داشته و مسیر مطلوب مربوط به هر درجه آزادی محاسبه شده و سپس توسط یک کنترلر پسخوراند، سعی به تبعیت سیستم از آن می‌گردد. برای محاسبه این مسیرها نیز روش‌های متعددی وجود دارد که از میان آن می‌توان به روش‌های بهینه‌سازی [11-8]، روش‌های مبتنی بر مدل‌های مشابه مکانیکی [12] و یا روش‌های الهام گرفته از طبیعت [13-16] اشاره کرد.

تحقیقات نشان می‌دهد که رفتارهای تناوبی در انسان توسط تمرین آموخته می‌شود (کنترلر دینامیک محور) و پس از آموزش، این رفتارها کاملاً خودکار و شبیه به مدارهای عصبی تولید کننده رفتار متناوب به نظر می‌رسد (کنترل مسیر محور) [17]. بنابراین، به نظر می‌رسد شیوه کنترلی بدن انسان ترکیبی از دو روش ذکر شده می‌باشد.

این ایده در دهه اخیر مورد پژوهش‌گران قرار گرفته است. از اولین پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به پژوهش کرونین و همکاران [18] اشاره نمود. در این پژوهش، یک ربات انسان نمای کاملاً فعال¹ مورد بررسی قرار گرفته است که در آن مسیر هر یک از مفاصل به‌صورت پیش‌فرض از داده‌های تجربی استخراج شده و به‌عنوان ورودی مفاصل در نظر گرفته شده است. همچنین، اوداشیما و همکاران [19] در پژوهش خود، دو لایه کنترلی را برای کنترل یک ربات 6 پا در نظر گرفته‌اند که مسیریابی توسط لایه بالا و اجرا توسط لایه پایین انجام می‌پذیرد. در این پژوهش همواره دو لایه کنترلی در تعامل با یکدیگر بوده و مستقل از یکدیگر نمی‌باشند. در ادامه نیز، آرنا و همکاران [20] ایده فوق را بر روی ربات شش پا پیاده‌سازی نموده است. در این پژوهش نیز لایه بالای در نظر گرفته شده، یک نگاشت ورودی به خروجی بوده که از قبل تعریف شده است. این ایده همانند موارد فوق در مرجع [21] نیز ملاحظه می‌گردد. در این پژوهش، براساس ایده‌های فوق ساختار کنترلی نوینی ارائه شده است که برخلاف اسلاف، قابل پیاده‌سازی بر روی سیستم‌های زیرفعال و ذاتا ناپایدار باشد.

بر این اساس، روش کنترلی در این مقاله شامل دو سطح کنترلی است که در سطح بالا، یک کنترلر دینامیک-محور قرار داشته و تا زمانی که کنترلرهای سطح پایین (کنترلرهای مسیر-محور) قابلیت کنترل سیستم را نداشته باشد، به آموزش و کنترل سیستم می‌پردازد. هنگامی که سطح پایین، قابلیت کنترلی مدنظر را به‌دست آورد، کنترلر سطح بالا خاموش شده و سیستم توسط شبکه گسترده کنترلی سطح پایین کنترل می‌گردد. در روش نوین ارائه شده، در سطح بالا، بر خلاف پژوهش‌های پیشین، هر نوع کنترلی که سیستم را پایدار نماید می‌تواند استفاده گردد. از طرفی کنترلرهای سطح پایین، همگی ساختار یکسان داشته و مستقل از سیستم می‌باشد. بدین ترتیب برای پیاده‌سازی بر روی هر ربات، کافی است هر کنترلر بر یک درجه آزادی فعال نصب گردد. این موضوع سبب کاهش هزینه‌های تولید و ماژولار شدن سیستم می‌گردد.

به منظور نمایش نوآوری این مقاله و نمایش کارکرد روش ارائه شده و به منظور خودداری از ورود پیچیدگی‌های مدل‌سازی که سبب دور شدن از هدف مدنظر می‌گردد، این مدل کنترلی بر روی یک ربات ساده دو پا پیاده‌سازی شده است. بدین ترتیب، در بخش 2 ابتدا مدل‌سازی ربات ارائه

² Sagittal

¹ Fully-actuated

اطمینان از قابلیت تولید سیگنال‌های کنترلی مناسب، کنترلرهای سطح پایین از حالت آموزش به حالت تقلید رفته، کنترلر سطح بالا از مدار خارج گشته و کنترل سیستم توسط شبکه کنترلی سطح پایین (سامانه کنترلی^۳) انجام می‌پذیرد. در این حالت، به محض آن که مشکلی در کنترل سیستم توسط این شبکه رخ دهد، سامانه ارزیاب کنترل سیستم را به‌دست کنترلر سطح بالا سپرده و شبکه را دوباره به حالت آموزش می‌برد. نمایی از تعامل سامانه‌های موجود در یک گره کنترلی با کنترلر سطح بالا و با یکدیگر در "شکل 3" ملاحظه می‌گردد.

این نوع کنترل را می‌توان در مقابل کنترلر سطح بالا قرار داد که در آن از کلیه مفاصل باید در آن واحد پسخوراند دریافت شود و شدیداً وابسته به شناخت کامل دینامیک سیستم است. هر گره کنترلی یک کنترلر ساده مسیر محور می‌باشد و همگی به‌صورت موازی با هم کار می‌کنند. استفاده از این ساختار، علاوه بر کاهش بار بر روی شبکه کنترلی (با توجه به سادگی ساختار کنترلی قرار گرفته روی هر مفصل)، منجر به افزایش مقاومت سیستم در برابر خرابی به‌علت ساده شدن و توزیع شدن کنترلرها و افزایش تعداد، می‌شود. در حقیقت ربات از مزایای یک ساختار توزیع شده کنترلر برخوردار می‌شود.

در ادامه به بررسی کنترلر سطح بالا و کنترلر سطح پایین و سامانه‌های مربوطه برای مدل در نظر گرفته شده پرداخته خواهد شد.

3-1- کنترلر سطح بالا

همان‌گونه که ذکر گردید، کنترلر سطح بالا در این چهارچوب کنترلی، کاملاً آزادانه قابل انتخاب و طراحی است. در این مقاله، برای پیاده سازی کنترلر سطح بالا از روش ارائه شده توسط گریزل و همکاران، [22]، استفاده شده است. در این روش، قیودی مجازی بر حرکت سیستم اعمال می‌گردد و سپس توسط روش خطی‌سازی پسخوراند^۴ سیستم کنترل می‌گردد. بدین منظور قیود مطلوب زیر به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$y = G \cdot h(q) \quad (6)$$

که در آن

$$h(q) := \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_3 - \theta_{3d} \\ \theta_1 + \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

به عبارت دیگر در قید اول، مطلوب آن است که همواره زاویه تنه برابر $\theta_{1d} > 0$ باشد. این قید سبب می‌گردد که ربات رو به جلو حرکت نماید. قید دوم نیز سبب می‌گردد که پای معلق ربات رو به جلو حرکت نماید و به عبارت دیگر، ربات گام‌برداری نماید. همچنین به‌منظور وزن‌دهی به هر یک از قیود در خروجی سیستم، ماتریس وزن قیود به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است.

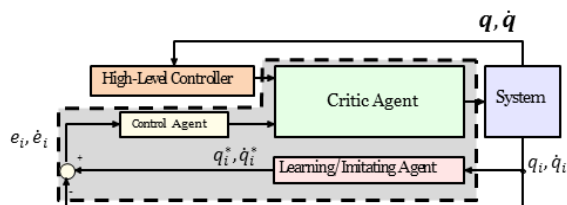


Fig. 3 the low-level controller structure for each node in interaction with the system and the high-level controller; the dashed line border area is the low-level controller boundary

شکل 3 ساختار کنترلی در نظر گرفته شده برای کنترلر سطح پایین در هر گره در تعامل با سیستم و کنترلر سطح بالا؛ کنترلر سطح پایین در محدوده مشخص شده با خط چین متمایز گردیده است.

معادلات بخش دوم حرکت با استفاده از روابط پایستگی تکانه در هنگام برخورد و با فرض پلاستیک بودن آن استخراج می‌گردد [5]. با توجه به فرض ناچیز بودن زمان برخورد، این معادله به‌صورت تغییر پای معلق به پای ثابت و تبدیل پای ثابت به پای معلق به همراه جهش در سرعت‌های آن خواهد بود.

$$x^+ = \Delta(x^-), \quad (3)$$

بدین ترتیب، معادله حاکم بر سیستم را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود [22].

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t), & x^-(t) \notin \mathcal{S} \\ x^+ = \Delta(x^-) & x^-(t) \in \mathcal{S} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن $\mathcal{S}$ مجموعه کلیه حالاتی ممکن است که در آن برخورد قابل رخ دادن است. این مجموعه به‌صورت زیر قابل تعریف است:

$$\mathcal{S} = \{(q, \dot{q}) | \theta_1 = \theta_1^d\}. \quad (5)$$

3- چهارچوب کنترلی

چهارچوب کنترلی در نظر گرفته شده دارای دو حالت کنترلی است: (1) کنترلر سطح بالا که در آن سیستم توسط یک کنترلر دینامیک محور با استفاده از کلیه اطلاعات حالات سیستم، کنترل می‌گردد. (2) کنترلر سطح پایین که در آن، سیستم توسط یک شبکه متشکل از دو کنترلر ساده مسیرمحور کنترل می‌شود (ر.ک. شکل 2). هر کنترلر مد نظر در این شبکه متناظر با یکی از مفاصل فعال ربات بوده و پسخوراند آن به‌صورت محلی (سرعت و مکان مفصل مربوطه) به همراه یک سیگنال هماهنگ‌ساز می‌باشد. سیستم مادامی که کنترل سطح پایین قابلیت کنترل آن را نداشته باشد، توسط کنترلر سطح بالا کنترل می‌گردد. در این حالت، کنترلرهای سطح پایین در حالت آموزش قرار گرفته و سعی به تولید مکان، سرعت و سیگنال کنترلی تولید شده توسط کنترلر سطح بالا (مقادیر مطلوب) می‌نمایند (سامانه آموزش/تقلید^۱). به موازات آن، این کنترلرها به ارزیابی مقادیر تولید شده توسط خود نسبت به مقادیر مطلوب نموده (سامانه ارزیاب^۲) و در صورت

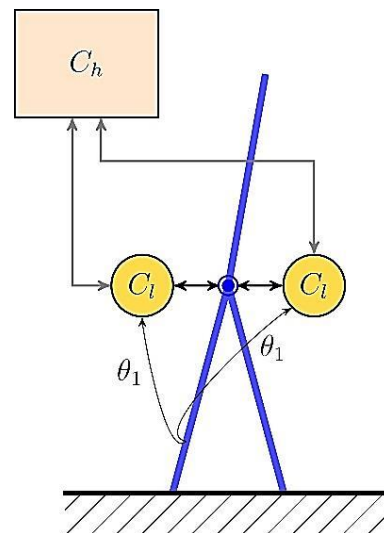


Fig. 2 the proposed control structure for considered model; C_l represents a low level controller node and C_h represents the high-level controller

شکل 2 ساختار کنترلی در نظر گرفته شده برای مدل مدنظر؛ C_l نماینده یک گره در شبکه کنترلرهای سطح پایین و C_h نماینده کنترلر سطح بالا می‌باشد.

³ Control Agent

⁴ Feedback Linearization

¹ Learning/Imitating Agent

² Critic Agent

به عنوان ورودی زیرسیستم کنترلی استفاده می‌گردد. این زیرسیستم و خواص آن در بخش 2-2-3 بیان شده است.

2. کنترل درجه آزادی فعال به منظور کاهش فاصله مسیر تولید شده از مسیر مطلوب: این وظیفه توسط زیرسیستم کنترلی انجام می‌پذیرد. در این زیرسیستم که در حالت تقلید فعال است، از درجه آزادی متناظر پسخوراند گرفته و سعی در کاهش فاصله این مسیر نسبت به مسیر مطلوب می‌شود. این زیرسیستم در بخش 1-2-3 مورد بحث قرار گرفته است.

3. ارزیابی قابلیت کنترل سیستم: وظیفه این زیرسیستم، بررسی فاصله میان مسیر تولید شده با مسیر مطلوب و تصمیم‌گیری در مورد تغییر وضعیت سیستم از حالت آموزش (کنترل سیستم توسط کنترلر سطح بالا) و حالت تقلید (کنترل سیستم توسط شبکه کنترلی سطح پایین) خواهد بود. این زیرسیستم در بخش 3-2-3 بررسی گردیده است.

1-2-3- زیرسیستم کنترلی

در زیر سیستم کنترلی، هدف آن است که فاصله میان مسیر مطلوب تولید شده توسط زیرسیستم مقلد و مسیر سیستم کمینه گردد و سیستم حول این مسیر پایدار باشد.

به‌منظور استخراج منطق کنترلی، فرض می‌گردد مسیر تولید شده توسط زیرسیستم مقلد برای کنترلر سطح پایین $\dot{u}_i$ ، به‌صورت $(\dot{q}_{a,i}^*, \dot{q}_{a,i}^*)$ بوده و سیگنال کنترلی مطلوب به‌صورت u_i^* باشد.

بدیهی است که اگر سیستم ذاتا پایدار باشد، تنها با وارد کردن u_i^* مسیر مطلوب را می‌توان به‌دست آورد. اما در سیستم ناپایدار نیاز به یک کنترلر پسخوراند جهت پایداری می‌باشد. بدین منظور، در این زیرسیستم، سیگنال ورودی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$u_i = u_i^* + \delta u_i \quad (14)$$

که در آن، δu_i وظیفه پایداری سیستم حول مسیر مطلوب را بر عهده دارد. اگر مسیر سیستم منحرف شده از مسیر مطلوب به‌صورت $\bar{q} = q_i^* + \delta q_i$ در نظر گرفته شود، معادله حاکم به اغتشاش وارد بر سیستم برای درجه آزادی فعال $\dot{u}_i$ را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود (ر.ک. پیوست 1):

$$\bar{D}_{ii} \delta \ddot{q}_i + \Delta_i^{(1)} \delta \dot{q}_i + \Delta_i^{(2)} \delta \bar{q}_i + \Delta_i^{(3)} = \delta u_i. \quad (15)$$

که در آن، $\Delta_i^{(j)}$ ها توابع وابسته به زمان (مسیر مطلوب) می‌باشد. بدیهی است که در صورت پایداری سیستم فوق، مسیر سیستم به مسیر مطلوب همگرا شده و هدف کنترلی برآورده خواهد شد. بدین منظور یک ساختار پسخوراند با وزن بالا² زیر برای δu_i در نظر گرفته می‌شود.

$$\delta u_i = -\frac{1}{\varepsilon} (\delta \ddot{q}_i + c \delta \bar{q}_i), \quad (16)$$

که در آن $c > 0$ و $\varepsilon \ll 1$ می‌باشد. به‌منظور اثبات کارایی کنترلر فوق، دینامیک مدار بسته سیستم را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\varepsilon \bar{D}_{ii} \delta \ddot{q}_i + (1 + \varepsilon \Delta_i^{(1)}) \delta \dot{q}_i + (c + \varepsilon \Delta_i^{(2)}) \delta \bar{q}_i + \varepsilon \Delta_i^{(3)} = 0, \quad (17)$$

با استفاده از آنالیز اغتشاش تکین³ [24]، پاسخ معادله فوق را می‌توان به‌صورت زیر نوشت.

$$\begin{aligned} \delta \bar{q}_i(t) &= \delta \bar{q}_i(0) e^{-ct} + \mathcal{O}(\varepsilon) \\ \delta \dot{q}_i(t) &= -c \delta \bar{q}_i(0) e^{-ct} + (\delta \dot{q}_i(0) + c \delta \bar{q}_i(0) \varepsilon D((t)/\varepsilon) + \mathcal{O}(\varepsilon)), \end{aligned} \quad (18)$$

$$G := \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

بدین ترتیب، با استفاده از روش خطی‌سازی پسخوراند، دینامیک قیود سیستم را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = L_f^2 h(q, \dot{q}) + L_g L_f h(q) u, \quad (9)$$

که در آن $L_f h(q, \dot{q})$ نماد مشتق لی $h(q, \dot{q})$ در راستای میدان برداری f می‌باشد. با فرض وارون‌پذیر بودن ماتریس $L_g L_f h$ (که در ناحیه مورد مطالعه در این مسئله برقرار است [22])، ورودی کنترلی را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت.

$$u = (L_g L_f h)^{-1} (-L_f^2 h + v), \quad (10)$$

بدین ترتیب، با جایگذاری رابطه (10) در معادله دینامیک قیود (9)، می‌توان نوشت:

$$\ddot{y} = v \quad (11)$$

بنابراین با استفاده از یک کنترلر تناسبی-مشتق‌گیر¹ می‌توان قیود در نظر گرفته شده را پایدار نمود.

$$v = k_1 y + k_2 \dot{y} \quad (12)$$

که در آن $k_1 > 0$ و $k_2 > 0$ می‌باشد. این ساختار پسخوراند، میدا را در فضای قیود به‌صورت نمایی پایدار می‌نماید. با پایداری مجانبی میدا در فضای قیود، گزیرل و همکاران [23] با استفاده از نگاشت پوآنکاره نشان داده‌اند که رفتار سیستم تحت شرایط فوق تناوبی و پایدار می‌باشد. این بدان معناست که ربات گام‌برداری نموده و این گام‌برداری پایدار می‌باشد.

2-2-3- کنترلر سطح پایین

در این چهارچوب کنترلی، کنترلرهای سطح پایین کنترلرهای ساده‌ای هستند که هر یک متناظر با یک درجه آزادی فعال سیستم خواهند بود و مطلوب آن است که با حداقل پسخوراند از وضعیت سیستم، شبکه تشکیل شده از این کنترلرها، قابلیت پایداری و کنترل سیستم را داشته باشد. از این رو، به‌منظور مطالعه قابلیت‌های هر یک از این کنترلرها و تحلیل سیستم با وجود این شبکه کنترلی، لازم است که معادلات حرکت در دستگاه مختصات نسبی $(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$ بازنویسی گردد که در آن $\bar{q} = (q_u, q_a)$ می‌باشد. در این دستگاه مختصات، $q_u = \theta_1$ نماینده درجه آزادی زیرفعال و $q_a = (\psi_1, \psi_2)$ مختصات درجات آزادی فعال می‌باشد که در آن $\psi_1 = \theta_1 - \theta_3$ و $\psi_2 = \theta_2 - \theta_3$ زاویه در هر مفصل فعال می‌باشد.

بدین ترتیب، معادله حاکم بر سیستم را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\bar{D}(\bar{q}) \ddot{\bar{q}} + \bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) \dot{\bar{q}} + \bar{g}(\bar{q}) = \bar{B}(\bar{q}) \cdot u, \quad (13)$$

که در آن، به سادگی می‌توان نشان داد که $\bar{B}(\bar{q}) = [0, I_{2 \times 2}]^T$. به عبارت دیگر، دینامیک حاکم بر هر درجه آزادی، یک دینامیک درجه دو می‌باشد که در آن ترم‌های ناشی از اثرات درجات آزادی دیگر وجود دارد.

بدین ترتیب، وظیفه هر کنترلر سطح پایین را می‌توان به موارد زیر تقسیم‌بندی نمود:

1. آموزش و بازتولید مسیر مطلوب تولید شده توسط کنترلر سطح بالا: این وظیفه توسط زیرسیستم مقلد انجام می‌پذیرد که دارای دو حالت آموزش و تقلید می‌باشد. در حالت آموزش، مسیر تولید شده توسط سیستم و سیگنال کنترلی تولید شده تحت کنترل سطح بالا به این زیرسیستم به‌صورت پسخوراند وارد شده و سعی در بازتولید آن می‌گردد. همچنین پس از تغییر وضعیت از حالت آموزش به حالت تقلید، مسیر تولید شده

² High-Gain Feedback

³ Singular perturbation analysis

¹ PD Controller

$$J_i(t) = \frac{1}{2} \left(q_{a,i}^*(t) - q_{a,i}(t) \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\dot{q}_{a,i}^*(t) - \dot{q}_{a,i}(t) \right)^2 + \frac{1}{2} \left(u_i^*(t) - u_i(t) \right)^2 \quad (21)$$

بدین منظور، از روش گرادیان نزولی [27] به‌منظور استخراج قوانین تطبیق وزن‌های توابع پایه استفاده می‌گردد. به‌عنوان مثال، قوانین تطبیق مربوط به وزن‌های w_k^i ها به شرح زیر آورده شده است.

$$\begin{aligned} \dot{w}_0^i &= -\gamma_w \nabla_{w_0^i} J_i \\ &= -\gamma_w (q_{a,i}^* - q_{a,i}) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{w}_k^i &= -\gamma_w \nabla_{w_k^i} J_i \\ &= -\gamma_w (q_{a,i}^* - q_{a,i}) \Phi_k(\phi_i), \quad k \in \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \quad (23)$$

که در $\nabla_x(\cdot) = \frac{\partial}{\partial x}(\cdot)$ و γ_w ضریب کنترل گرادیان می‌باشد. لازم به ذکر است که قوانین تطبیق مربوط به v_k^i ها و θ_k^i ها نیز همانند قوانین تطبیق فوق قابل استخراج می‌باشد.

در نهایت، پس از آن که سیستم از حالت آموزش به حالت تقلید سوئیچ می‌نماید، کلیه وزن‌ها ثابت گردیده و از آن‌ها به‌منظور تولید مقادیر مطلوب استفاده می‌گردد.

3-2-3- زیرسیستم ارزیاب

سامانه ارزیاب، یکی از بخش‌های اصلی چهارچوب کنترلی طراحی شده می‌باشد و وظیفه تصمیم‌گیری در مورد قابلیت کنترل سیستم توسط کنترل سطح پایین را برعهده دارد. هنگامی که سیستم در حالت آموزش قرار دارد، این سامانه براساس توانایی تولید خروجی مطلوب در کلیه زمان‌ها، کنترل سطح پایین را فعال می‌نماید. در حالت تقلید نیز، این سامانه در صورت وارد شدن اغتشاش بیشتر از آستانه کنترلی، به سرعت سیستم را به حالت آموزش بر می‌گرداند و کنترل سیستم را به کنترل سطح بالا می‌سپارد.

با توجه به وظیفه تعریف شده، معیار در نظر گرفته شده برای تصمیم‌گیری، به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$u_{\beta,i} = \begin{cases} 0 & e_{\beta,i} < e_{i,\max} \\ 1 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (24)$$

به عبارت دیگر، در صورتی که خطای ترکیبی از مقدار مطلوب $e_{i,\max}$ کمتر باشد، خطایی مشاهده نمی‌گردد (ناحیه قابل کنترل توسط کنترل سطح پایین) و در غیر این صورت خطا برابر یک خواهد شد. لازم به ذکر است که $e_{\beta,i}$ خطای ترکیبی مابین مسیر مطلوب و مسیر واقعی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$e_{\beta,i} = k_e |\dot{e}_i| + k_e |e_i|, \quad (25)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} e_i &= (q_{a,i} - q_{a,i}^*) \\ \dot{e}_i &= (\dot{q}_{a,i} - \dot{q}_{a,i}^*). \end{aligned} \quad (26)$$

بدین ترتیب، براساس خطای تعریف شده، سیستم ارزیاب حالت دینامیکی خود را به‌صورت زیر به روزرسانی می‌نماید.

$$\dot{\beta}_i = \epsilon_u u_{\beta,i} (1 - \beta_i) - \frac{1}{\epsilon_l} (1 - u_{\beta,i}) \beta_i \quad (27)$$

در این معادله، در صورتی که مقدار β_i از حد مرزی β_u کمتر گردد، سیستم از حالت کنترل سطح بالا به سطح پایین سوئیچ می‌نماید و پس از این سوئیچ، در صورتی که مقدار β_i از حد مرزی β_l بیشتر گردد، سیستم از حالت کنترلی سطح پایین به سطح بالا باز می‌گردد. لازم به ذکر است که در معادله فوق، دو مقیاس زمانی در تقابل با یکدیگر عمل می‌نمایند. مقیاس زمانی کند، مختص افزایش β_i و سوئیچینگ از حالت کنترل سطح بالا به سطح پایین می‌باشد. کندی این مقیاس به دلیل تأثیر دادن اختلاف میان مسیر مطلوب و مسیر

که در آن، $\delta_D(\cdot)$ به صورت نمایی کاهش می‌یابد و $\delta_D(0) = 1$.

بدین ترتیب، استفاده از ساختار کنترلی (14) و (16) تضمین می‌نماید که سیستم در همسایگی $\mathcal{O}(\varepsilon)$ از مسیر مطلوب باقی بماند.

3-2-2- زیرسیستم مقلد

با توجه به زیرفعال بودن سیستم مد نظر، آن را می‌توان به دو بخش دینامیک صفر و دینامیک فعال تقسیم‌بندی نمود. در این حالت، دینامیک فعال سیستم، حول صفر پایدار بوده و دینامیک صفر، تولید مسیر در فضای فاز را می‌نماید [25]. بدین ترتیب، مسیر هر درجه‌آزادی تصویری از فضای فاز کل سیستم بوده که زاویه فاز آن، زاویه فاز دینامیک صفر می‌باشد.

هدف اصلی این زیرسیستم در هر گره کنترلی، آموزش و تقلید مسیر مطلوب برای درجه آزادی مرتبط با آن می‌باشد. در واقع، این مسیر مطلوب، تصویر مسیر سیستم در صفحه فضای فاز درجه آزادی مربوطه می‌باشد. بدین ترتیب، برای بازتولید آن، فضای فاز درجه آزادی مربوطه، توسط یک تبدیل عمل-زاویه^۱، به زاویه فاز و مکان آن بر روی مسیر تبدیل می‌گردد. سپس، مکان مسیر توسط یک نگاشت به نام شبکه شکل استخراج می‌گردد که تابعی از زاویه فاز می‌باشد که به عنوان ورودی به این زیر سیستم در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به دینامیک سیستم و قیودهای در نظر گرفته شده، مکان پای روی زمین در هر سیکل یکنوا می‌باشد [5]. از این رو، این زاویه به عنوان زاویه فاز مسیر مطلوب و به‌عنوان ورودی نگاشت تولیدکننده مسیر مطلوب به سیستم، به‌عنوان ورودی، اعمال می‌گردد.

در این مقاله، از ترکیب خطی توابع پایه شعاعی^۲ به‌عنوان نگاشت تولید کننده مسیر استفاده شده است. به‌عبارت دیگر، برای مسیر و سیگنال ورودی مطلوب، توابع زیر در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} q_{a,i}^* &= \sum_{k=1}^n w_k^i \Phi_k(\theta_1) + w_0^i \\ \dot{q}_{a,i}^* &= \sum_{k=1}^n v_k^i \Phi_k(\theta_1) + v_0^i \\ u_i^* &= \sum_{k=1}^n \theta_k^i \Phi_k(\theta_1) + \theta_0^i \end{aligned} \quad (19)$$

که در آن، $\Phi_k(\cdot)$ تابع پایه شعاعی می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\Phi_k(\theta_1) = \exp\left(-\frac{1}{\eta^2} (\theta_1 - \chi_k)^2\right) \quad (20)$$

که در آن، θ_1 زاویه پای ایستا (متغیر زاویه فاز دینامیک صفر) بوده و ثوابت w_k^i و v_k^i و θ_k^i وزن‌های توابع پایه می‌باشد.

لازم به ذکر است که در رابطه (20)، χ_k مرکز توابع پایه می‌باشد. این مراکز می‌تواند توسط روش‌های مختلفی نظیر نمونه‌گیری تصادفی در میان ورودی‌ها، استفاده از الگوریتم آموزش‌پذیر کمترین مربعات متعامد^۳ [26] و یا با خوشه‌بندی ورودی انتخاب گردد. علاوه بر این، η عرض توابع پایه را تعیین می‌نماید که به صورت معمول برای همگی توابع یکسان و ثابت در نظر گرفته می‌شود.

در حالت آموزش، مطلوب آن است که کلیه وزن‌های توابع پایه به‌گونه‌ای تغییر می‌نماید تا تابع هدف زیر کمینه گردد:

¹ action-angle

² RBF

³ Orthogonal Least Square Learning Algorithm

با استفاده از این پارامترها، سیستم برای بیش از 120 ثانیه با استفاده از نرم‌افزار متلب¹ شبیه‌سازی گردیده است. در "شکل 4"، فضای فاز تخمین زده شده دقیقاً قبل از سوئیچ به حالت کنترلی سطح پایین آورده شده است. لازم به ذکر است که در این سیستم کنترلی، تنها نیاز به تخمین فضای فاز در حالتی است که پا به زمین برخورد نمی‌نماید. بنابراین، در "شکل 4"، تنها این بخش از فضای فاز تخمین زده شده است. ملاحظه می‌گردد که غیر از نقاطی که تغییرات سریع در فاز رخ داده است (لحظه برخورد پا به زمین)، مابقی نقاط به درستی تخمین زده شده است.

این سوئیچینگ توسط زیرسیستم ارزیاب انجام می‌شود که تحول زمان حالات آن در "شکل 5" آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد هنگامی که مقدار این حالات از مقدار β_u کمتر شده است، سیستم به حالت کنترلی سطح پایین سوئیچ نموده است. در "شکل 6"، خطای مقدار مطلوب از مقدار واقعی درجات آزادی فعال آورده شده است. این خطا پس از زمان سوئیچ، در حقیقت خطای ردگیری سیستم می‌باشد. در ادامه، "شکل 8" نمایانگر ورودی‌های سیستم برحسب زمان می‌باشد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، مقادیر ورودی سیستم پس از سوئیچ به کنترل سطح پایین به دلیل عدم قابلیت تخمین در زمان‌های برخورد، افزایش یافته است. لازم به ذکر است که در نقاط ضربه، به دلیل عدم توانایی سیستم در شناسایی ناپوستگی، مقدار خطا افزایش می‌یابد که با توجه به ضرایب کنترلی، سبب جهشی در مقادیر ورودی می‌گردد. این مقادیر طبقاً در واقعیت محقق نخواهد شد و سیستم در اشباع می‌رود. اما با توجه به حاشیه پایداری سیستم و توانایی

پس‌خوراند در طول زمان می‌باشد. در مقابل، مقایس زمانی تند می‌باشد که در هنگام افزایش خطای میان خروجی و مقدار مطلوب، مقدار β_l را به سرعت کاهش داده و سیستم را مجبور به استفاده از کنترلر سطح بالا می‌نماید.

3-3- مقایسه هزینه محاسباتی سطوح کنترلی

هزینه محاسباتی برای یک سیستم با n درجه آزادی فعال در دو سطح کنترلی قابل بررسی است. ساختار مطرح شده برای کنترلر سطح پایین، برای محاسبه ورودی کنترلی در هر مفصل، محاسبات جبری انجام می‌دهد، بنابراین هزینه محاسباتی برای محاسبه کلیه ورودی‌های کنترلی از مرتبه $O(n)$ خواهد بود که این هزینه محاسباتی میان گره‌های کنترلی در شبکه توزیع می‌گردد. به عبارت دیگر هزینه محاسباتی در هر گره $O(1)$ خواهد بود. در صورتی که کنترلر سطح بالا برای محاسبه ورودی‌های کنترلی از خطی‌سازی پس‌خوراند استفاده می‌نماید که در آن نیاز به حل یک دستگاه معادلات خطی از مرتبه n است. بدین ترتیب، هزینه محاسباتی برای این کنترلر از مرتبه $O(n^3)$ خواهد بود [28] که قابلیت توزیع آن نیز وجود ندارد.

4- شبیه‌سازی

در این بخش، شبیه‌سازی مدل ذکر شده بررسی می‌گردد. در این شبیه‌سازی، پارامترهای مدل (ر.ک. شکل 1) به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

$$m = 5\text{kg}, M_H = 15\text{kg}, M_T = 10\text{kg}, \\ r = 1\text{m}, l = 0.5\text{m} \quad (28)$$

همچنین فرض شده است که زاویه مطلوب تنه در هنگام گام‌برداری، $\theta_{3d} = \pi/6$ باشد و زاویه مطلوب برخورد برای پایه ثابت (زاویه‌ای که پای معلق به داخل صفحه باز می‌گردد) برابر با $\theta_{1d} = \pi/8$ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این در کنترلر سطح بالا، به منظور پایداری قیود، ضرایب پس‌خوراند، $k_1 = 5000$ و $k_2 = 1000$ انتخاب گردیده است.

به منظور تخمین مسیر و سیگنال کنترلی، تعداد توابع پایه شعاعی، 100 عدد ($n = 100$) در نظر گرفته شده است و ضریب تعیین عرض توابع پایه ($\eta = 0.07$) انتخاب گردیده است. علاوه بر این، ضریب کنترل گرادیان برای کلیه توابع، $\gamma_w = \gamma_v = \gamma_\theta = 3$ در نظر گرفته شده است.

زمانی که سیستم به حالت تقلید و کنترل توسط شبکه کنترلی سطح پایین سوئیچ می‌نماید، ضرایب در نظر گرفته شده برای زیر سیستم کنترلی برابر با $\varepsilon = 10^{-4}$ و $c = 0.01$ می‌باشد.

همچنین مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای زیرسیستم ارزیاب در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مقادیر مورد استفاده برای پارامترهای ارزیاب در شبیه‌سازی

Table 1 Values of the critic agents' parameters used in the simulation

پارامتر	توضیحات	مقدار
$e_{\max}$	بیشینه مقدار خطا	0.05
k_e	وزن خطا	1
k_θ	وزن سرعت خطا	0
ϵ_u	ثابت زمانی دینامیک سریع	0.5
ϵ_l	ثابت زمانی دینامیک کند	0.1
β_u	سطح سوئیچ از حالت آموزش به تقلید و کنترل توسط شبکه کنترلی سطح پایین	0.02
β_l	سطح سوئیچ از حالت تقلید به آموزش و کنترل توسط کنترلر سطح بالا	0.3

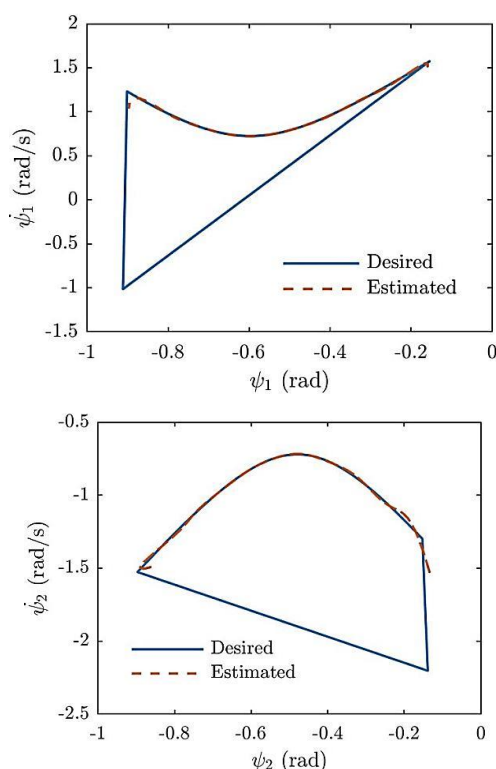


Fig. 4 State space of actuated DoFs for desired trajectories and the output of imitating/learning agents just before the switching time

شکل 4 فضای فاز درجات آزادی فعال برای مسیر مطلوب و مسیر تخمین زده شده توسط زیرسیستم مقلد قبل از زمان سوئیچ به حالت کنترلی سطح پایین

¹ MATLAB

همچنان پایدار باقی مانده و مقدار قیود همچنان در سطح مناسبی قرار دارد. در نهایت، در "شکل 9"، نمودار گام‌برداری ربات شبیه‌سازی شده در طول زمان آورده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل تابعیت کنترل سطح پایین به دینامیک غیرفعال سیستم، تغییر فرکانس گام‌برداری قابل رخ دادن است که در این تصویر ملاحظه می‌گردد. به عبارت دیگر، فاصله میان تصاویر عکس‌برداری کاهش یافته است که به معنای افزایش سرعت گام برداری است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار کنترلی با کاربرد در سیستم‌های زیرفعال ارائه گردیده است. ساختار ارائه شده شامل دو سطح کنترلی می‌باشد که در سطح بالا، یک کنترلر دینامیک-محور و بدون محدودیت قرار دارد که همانند نقش مغز را ایفا می‌نماید. بدیهی است که این سطح کنترلی، به دلیل نیاز به پاسخ‌رساندن از کل سیستم، بالاخص در سیستم‌های با درجه آزادی بالا، هزینه محاسباتی و پهنای باند کنترلی بالایی نیاز دارند. در مقابل در سطح پایین یک شبکه از کنترلرها قرار دارد که همگی ساختار یکسان و ساده‌ای داشته و هر یک بر روی یک درجه آزادی فعال نصب می‌شوند. این کنترلرهای ساده تنها با استفاده از پاسخ‌رساندهای محلی (سرعت و مکان درجه آزادی خود) و تنها با استفاده از اطلاعات کلی سیستم، قادر هستند که آموزش دیده و سیستم را کنترل نمایند. این سطح کنترلی را می‌توان همانند تولیدکننده‌های مرکزی الگو و سیستم اعصاب در بدن جانوران در نظر گرفت. بدین ترتیب، مزایای این چهارچوب کنترلی را می‌توان موارد زیر برشمرد:

(1) سیستم دارای افزونگی بالای کنترلی خواهد بود. (2) پایداری و مقاومت یک کنترلر دینامیک محور را خواهد داشت. (3) پس از آموزش، مقدار محاسبات موردنیاز دو مرتبه کاهش می‌یابد. (4) پهنای باند مورد نیاز کاهش در نتیجه توزیع شدگی کنترل، می‌یابد.

لازم به ذکر است که در این مقاله به‌منظور نمایش عملکرد و پرهیز از ورودی به جزئیات مدل‌سازی و کنترلر سطح بالا، به‌صورت خاص بر روی یک مدل ساده گام‌برداری پیاده‌سازی گردیده است و نتایج آن ارائه شده است. اما این ساختار، قابلیت بر روی کلیه سیستم‌های زیرتحریر و سیستم‌های با تحریر کامل را به‌صورت کامل دارد. در این راستا، به‌عنوان پژوهش‌های آتی، می‌توان این چهارچوب کنترلی را بر روی سیستم‌های واقعی و یا ربات‌های موجود پیاده‌سازی نمود. علاوه بر آن، در زمینه تحقیقاتی، بررسی زیرسیستم مقلد با کاهش میزان پاسخ‌رساندها و تشکیل شبکه‌ای با حداقل پاسخ‌رساندن می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، بررسی الگوریتم‌های آموزشی مناسب‌تر می‌تواند به غنای این چهارچوب کمک نماید.

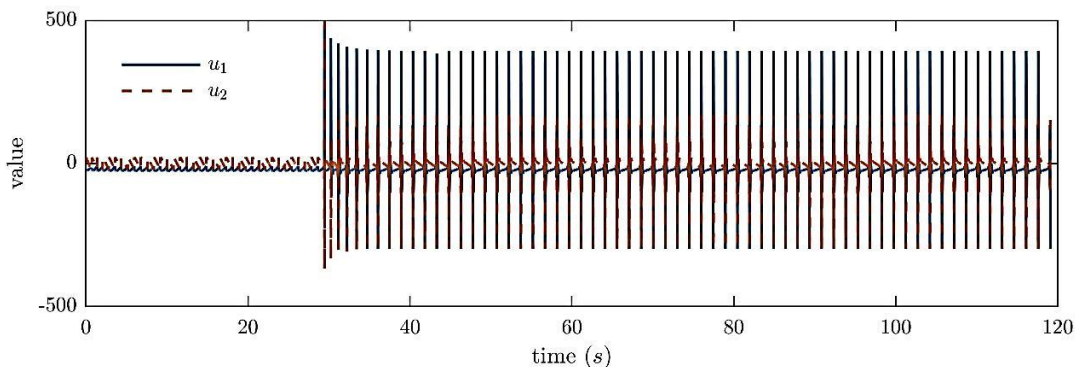


Fig. 7 The inputs' values of the system vs. time; the inputs have increased when the system is switched to low-level control mode

شکل 7 مقدار ورودی سیستم بر حسب زمان؛ پس از زمان سوئیچ سیستم از کنترلر سطح بالا به سطح پایین، مقدار ورودی‌ها افزایش یافته است.

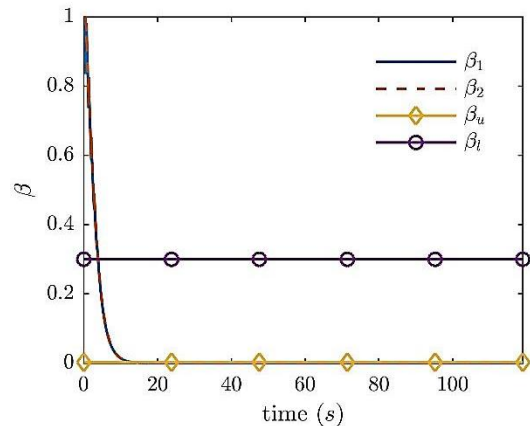


Fig. 5 Time evolution of the critic states; the system is switched to be controlled by low-level controller when all β_i s became less than β_u
شکل 5 تحول زمانی حالات سامانه ارزیاب؛ سیستم زمانی که کلیه β_i ها کمتر از β_u گردیده است، به حالت استفاده از کنترلرهای سطح پایین سوئیچ نموده است.

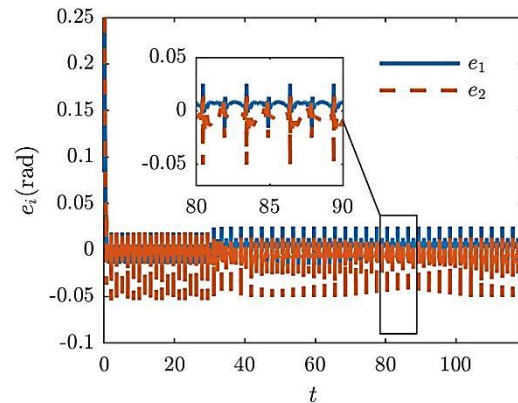


Fig. 6 The error between the outputs of the imitating/learning agent and the actual angle of active DoFs

شکل 6 خطای خروجی زیرسیستم مقلد از مقدار واقعی برای درجات آزادی فعال

سیستم در رفع اغتشاشات ورودی، حتی با اعمال اشباع نیز سیستم پایدار می‌ماند. شبیه‌سازی‌های انجام شده نیز موید این موضوع می‌باشد. اما بدیهی است که در مورد پایداری برای این حالت به صورت کلی دیگر نمی‌توان اظهار نظری نمود.

علاوه بر این، در "شکل 8"، مقدار قیود در نظر گرفته شده برای سیستم (ر.ک. رابطه (7)) برای کل زمان‌ها ترسیم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، با وجود سوئیچ سیستم به حالت کنترلی سطح پایین، سیستم

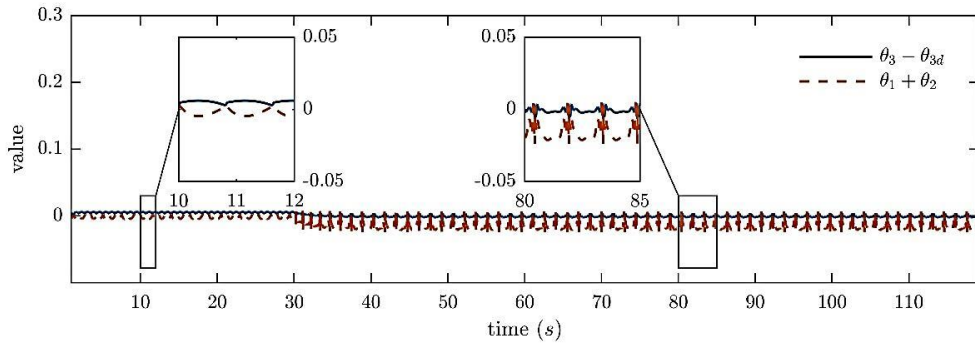


Fig. 8 The outputs' values of the system vs. time; the outputs have increased when the system is switched to low-level control mode

شکل 8 مقدار خروجی سیستم بر حسب زمان؛ زمانی که مقدار قیود افزایش یافته است، زمان سوئیچ سیستم از کنترل سطح بالا به سطح پایین می‌باشد.

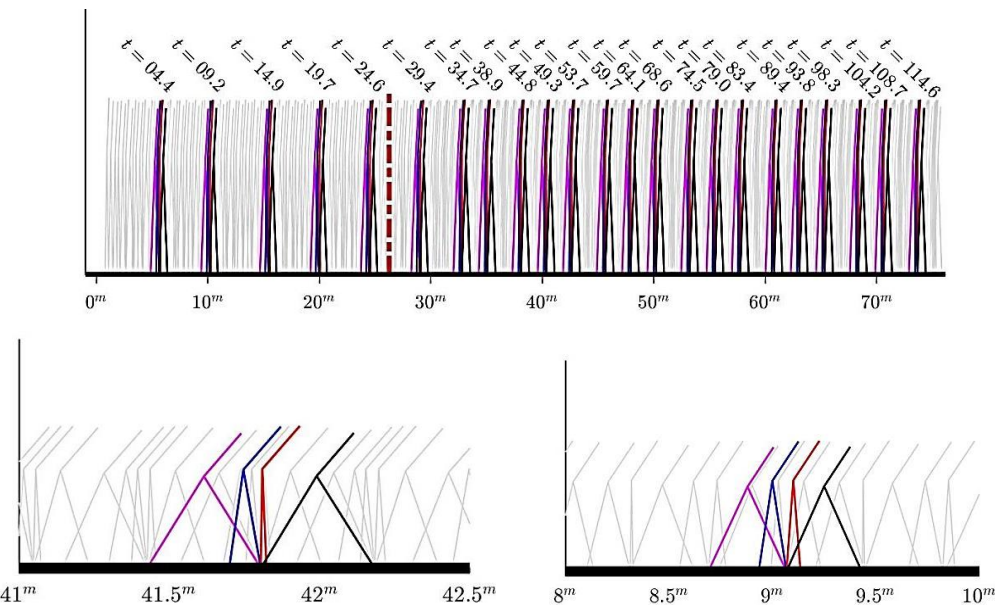


Fig. 9 Simulated gait; the divider dashed line shows the position the system has been switched to be controlled by low level controllers. Some snapshots of the gait is shown by colored lines

شکل 9 گام برداری شبیه سازی شده؛ خط چین جدا کننده نشان‌دهنده مکانی است که سیستم به حالت کنترلی سطح پایین سوئیچ نموده است. برخی از تصاویر لحظه‌ای گام برداری با خطوط رنگی نمایش داده شده است.

که در آن اپراتور دیفرانسیلی δ_j به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\delta_j = \delta \bar{q}_j \frac{\partial}{\partial \bar{q}_j} + \delta \dot{\bar{q}}_j \frac{\partial}{\partial \dot{\bar{q}}_j} \quad (31)$$

7- مراجع

- [1] A. D. Ames, P. Tabuada, A. Jones, W. L. Ma, M. Rungger, B. Schürmann, S. Kolathaya, J. W. Grizzle, First steps toward formal controller synthesis for bipedal robots with experimental implementation, *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Vol. 25, pp. 155-173, 2017.
- [2] K. A. Hamed, J. W. Grizzle, Reduced-order framework for exponential stabilization of periodic orbits on parameterized hybrid zero dynamics manifolds: Application to bipedal locomotion, *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Vol. 25, pp. 227-245, 2017.
- [3] H. Sadeghian, C. Gianluca, O. Cheng, G. Gordon, Passivity-based control of underactuated biped robots within hybrid zero dynamics approach, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, pp. 4096-4101, 2017.
- [4] J. W. Grizzle, C. Chevallereau, R. W. Sinnet, A. D. Ames, Models, feedback control, and open problems of 3D bipedal robotic walking, *Automatica*, Vol. 50, No. 8, pp. 1955-1988, 2014.
- [5] E. R. Westervelt, J. W. Grizzle, C. Chevallereau, J. H. Choi, B. Morris, *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion*, pp. 45-135, Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.
- [6] M. M. Kakaei, H. Salarieh, A novel robust control method for three-link underactuated planar biped robot, *Modes Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 47-58, 2018. (in Persian)

6- پیوست

در این پیوست، به استخراج رابطه (15) پرداخته شده است. بدین منظور، رابطه (13) به صورت تانسوری نوشته شده و حول $(q^*, \dot{q}^*)$ خطی می‌گردد. به عبارت دیگر رابطه (13) را برای حالات مغشوش شده می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} \bar{D}_{ij}(\bar{q}^* + \delta q)(\ddot{\bar{q}}_j^* + \delta \ddot{\bar{q}}_j) + \bar{C}_{ij}(\bar{q}^* + \delta q, \dot{\bar{q}}^* + \delta \dot{\bar{q}})(\dot{\bar{q}}_j^* + \delta \dot{\bar{q}}_j) + \bar{g}_i(\bar{q}^* + \delta q) \\ = \bar{B}_{ij} \cdot (u_j^* + \delta u_j), \end{aligned} \quad (29)$$

با خطی سازی معادله فوق، رابطه (15) استخراج می‌گردد که ضرایب آن به شرح زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \Delta_i^{(1)} &= \bar{C}_{ij} \delta \ddot{\bar{q}}_j + \sum_k \left[\frac{\partial \bar{C}_{ik}}{\partial \dot{\bar{q}}_i} \dot{\bar{q}}_k^* + \frac{\partial \bar{D}_{ik}}{\partial \dot{\bar{q}}_i} \ddot{\bar{q}}_k^* \right] \\ \Delta_i^{(2)} &= \frac{\partial \bar{g}_i}{\partial \bar{q}_i} + \sum_k \left[\frac{\partial \bar{D}_{ik}}{\partial \bar{q}_i} \ddot{\bar{q}}_k^* + \frac{\partial \bar{C}_{ik}}{\partial \bar{q}_i} \dot{\bar{q}}_k^* \right] \\ \Delta_i^{(3)} &= \sum_{j \neq i} \left[\bar{D}_{ij} \delta \ddot{\bar{q}}_j + \delta_j \bar{g}_i + \bar{C}_{ij} \delta \dot{\bar{q}}_j \right. \\ &\quad \left. + \sum_k [\delta_j \bar{D}_{ik} \ddot{\bar{q}}_k^* + \delta_j \bar{C}_{ik} \dot{\bar{q}}_k^*] \right] \end{aligned} \quad (30)$$

- [17] S. L. Hooper, Central Pattern Generators, D. J. Perkel (Eds.), Encyclopedia of Life Sciences, pp. 1-9, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [18] J. Cronin, R. Frost, R. Willgoss, Walking biped robot with distributed hierarchical control system, CIRA Proceedings of 1999 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Monterey: IEEE, pp. 150-156, 1999.
- [19] T. Odashima, Z. Luo, S. Hosoe, Hierarchical control structure of a multilegged robot for environmental adaptive locomotion, Artificial Life and Robotics, Vol. 6, No. 1-2, pp. 44-51, 2002.
- [20] P. Arena, L. Fortuna, M. Frasca, G. Sicurella, An adaptive, self-organizing dynamical system for hierarchical control of bio-inspired locomotion, Vol. 34, No. 4, pp. 1823-1837, 2004.
- [21] J. H. Barron-Zambrano, C. Torres-Huitzil, B. Girau, Perception-driven adaptive CPG-based locomotion for hexapod robots, Neurocomputing, Vol. 170, Supplement C, pp. 63-78, 2015.
- [22] J. W. Grizzle, G. Abba, F. Plestan, Asymptotically stable walking for biped robots: analysis via systems with impulse effects, Automatic Control, IEEE Transactions on, Vol. 46, No. 1, pp. 51-64, 2001.
- [23] E. R. Westervelt, J. W. Grizzle, D. E. Koditschek, Hybrid zero dynamics of planar biped walkers, Automatic Control, IEEE Transactions on, Vol. 48, No. 1, pp. 42-56, 2003.
- [24] F. Verhulst, Methods and Applications of Singular Perturbations, pp. 93-120, New York, NY: Springer Science & Business Media, 2005.
- [25] A. Isidori, Nonlinear Control Systems, pp. 165-172, London: Springer Science & Business Media, 1995.
- [26] S. Chen, C. F. N. Cowan, P. M. Grant, Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 2, No. 2, pp. 302-309, 1991.
- [27] D. Saad, On-Line Learning in Neural Networks, pp. 13-15, New York, NY: Cambridge University Press, 2009.
- [28] L. N. Trefethen, D. Bau, Numerical Linear Algebra, pp. 247-248, Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.
- [7] B. Beigzadeh, On Correlation of Dynamic Biped Locomotion and Dynamic Object Manipulation, Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, 2011.
- [8] C. Chevallereau, Y. Aoustin, Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot, Robotica, Vol. 19, No. 05, pp. 557-569, 2001.
- [9] D. Djoudi, C. Chevallereau, Y. Aoustin, Optimal Reference Motions for Walking of a Biped Robot, ICRA Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona: IEEE, pp. 2002-2007, 2005.
- [10] M. Hardt, K. Kreutz-Delgado, J. W. Helton, Optimal biped walking with a complete dynamical model, Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, Arizona: IEEE, pp. 2999-3004, 1999.
- [11] V. S. E. Abadi, M. Rostami, S. M. A. Rahmati, S. Sadeghnejad, Walking path prevision of biped robot along with stability and optimization of power consumption in a single support phase, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 1-11, 2018. (in Persian فارسی)
- [12] M. Eslami, A. Y. Koma, M. Khadiv, A novel model based on the three-mass inverted pendulum for real-time walking pattern generation of biped robots, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 326-334, 2016. (in Persian فارسی)
- [13] J. H. Barron-Zambrano, C. Torres-Huitzil, CPG Implementations for Robot Locomotion: Analysis and Design, A. Dutta (Eds.), Robotic Systems - Applications, Control and Programming, pp. 1-23, Croatia: InTech, 2012.
- [14] J. Nassour, P. Hénaff, F. Benouezdou, G. Cheng, Multi-layered multi-pattern CPG for adaptive locomotion of humanoid robots, Biological Cybernetics, Vol. 108, No. 3, pp. 291-303, 2014.
- [15] J. Yu, M. Tan, J. Chen, J. Zhang, A survey on CPG-inspired control models and system implementation, Neural Networks and Learning Systems, IEEE Transactions on, Vol. 25, No. 3, pp. 441-456, 2014.
- [16] J. Zhang, X. Zhao, C. Qi, A Series Inspired CPG Model for Robot Walking Control, Machine Learning and Applications (ICMLA), 11th IEEE International Conference on, pp. 444-447, 2012.