



کنترل اولویت بندی شده ی موقعیت، جهت و امپدانس در ربات های افزونه

عبّاس کرمی¹، حمید صادقیان^{2*}، مهدی کشمیری³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی پزشکی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 81746-73441، h.sadeghian@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 اردیبهشت 1396

پذیرش: 10 تیر 1396

ارائه در سایت: 17 مرداد 1396

کلید واژگان:

کنترل موقعیت و جهت

مشاهده گر

اولویت بندی وظایف

تعامل فیزیکی

چکیده

در این پژوهش مسئله ی کنترل وظایف متعدد به صورت اولویت بندی شده در حین تعامل فیزیکی ناخواسته با ربات افزونه مورد بررسی قرار می گیرد. این مسئله به دلیل افزایش استفاده از ربات ها در محیط های ناشناخته و متغیر با زمان و در کنار انسان ها برای عملیات های دقیق، حساس و پیچیده بسیار مهم و کاربردی است. به کارگیری افزونگی ربات به منظور تضمین ایمنی و سازگاری در عین انجام دقیق فعالیت های دشوار در این کار مدنظر است. به این منظور، مسئله ی کنترل موقعیت و جهت به صورت مجزا یا ترکیبی و با اولویت دل خواه به عنوان وظایف اصلی و کنترل امپدانس در فضای پوچ وظایف اصلی مورد بررسی قرار می گیرد. نیروهای خارجی وارد بر بدنه ی ربات به کمک یک مشاهده گر و بدون استفاده از حس گرهای نیرو و گشتاور تخمین زده می شوند و ربات با استفاده از افزونگی سینماتیکی، رفتاری سازگار را در حین تعامل فیزیکی از خود نشان می دهد. به منظور اولویت بندی وظایف در این جا روش جدیدی پیشنهاد شده و به کمک آن، همگرایی خطای وظایف مورد نظر و خطای تخمین نیروهای خارجی اثبات می شود. به علاوه نشان داده می شود که سرعت فضای پوچ نیز به صفر میل می کند. در نهایت کارکرد روش پیشنهادی به کمک شبیه سازی کامپیوتری و نیز پیاده سازی تجربی بر روی ربات 7 درجه آزادی کوکا نشان داده شده است.

Hierarchical Position, Orientation and Impedance Control in redundant robots

Abbas Karami¹, Hamid Sadeghian^{2*}, Mehdi Keshmiri¹

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Department of Biomedical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

* P.O.B. 81746-73441, Isfahan, Iran, h.sadeghian@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 May 2017

Accepted 01 July 2017

Available Online 08 August 2017

Keywords:

Position and orientation control

Observer

prioritized tasks

physical interaction

ABSTRACT

This paper presents the problem of controlling multiple tasks in a prioritized scheme during accidental external physical interaction with redundant robot. This issue arises when robots are employed in social, unknown, dynamic environments for complex and critical missions. Exploiting robot redundancy to ensure safety and compliance during performing hierarchical tasks is considered in this work. A general approach to control the main task (position/orientation of the end-effector) with allocated priorities besides compliance behavior in the null space of the tasks is proposed. External interactions on the robot body are estimated with an appropriate observer without using any force/torque sensors which are further used to bring compliance in the redundant space. A novel task allocation method is proposed and the convergence of the task space error, interaction estimation error, as well as null space velocities are guaranteed. Finally, the performance of the method is investigated through computer simulation and real experiments on KUKA robot arm.

1- مقدمه

در حوزه ی کنترل ربات نیاز است کنترل کننده ربات با توجه به نوع تعامل تعریف شده بین ربات و محیط اطراف، رفتار آن را تنظیم کند. این رفتار همواره باید رفتاری سازگار و بدون ایجاد خطر در محیط اطراف باشد [4]. برای مثال، زمانی که ربات ها با فضای اطراف برهم کنش فیزیکی دارند، لازم است نیروی ایجاد شده در این برهم کنش با شرایط محیطی سازگار باشد. به دلیل حضور انسان و سایر عوامل دینامیک در محیط، امکان برخورد ناخواسته فیزیکی با ربات نیز وجود دارد. این برخوردها می تواند علاوه بر ایجاد اختلال در عملکرد ربات، موجب آسیب دیدن دو طرف برخورد شود. استفاده از حس گرهایی همچون دوربین یکی از راهکارهای ایجاد تعامل بین انسان و ربات است (ر. ک. [5] و [6]). این روش به دلیل سرعت پایین

به طور کلی می توان تعاملات بین انسان و ربات¹ را به دو دسته ی فیزیکی و غیرفیزیکی تقسیم نمود. حل مباحث متعدد مطرح در تعامل انسان و ربات از مسائل ضروری به منظور استفاده از ربات ها در محیط های اجتماعی² و در کنار انسان هاست. تعامل انسان و ربات نیازمند بازنگری در طراحی و کنترل ربات ها به منظور سازگاری و ایمنی بیشتر، به خصوص در حین تعامل فیزیکی بین انسان و ربات³ است. این مسئله در [1]، [2] و [3] مورد بررسی قرار گرفته اند.

¹ Human Robot Interaction (HRI)² Social environments³ physical Human Robot Interaction (pHRI)

Please cite this article using:

A. Karami, H. Sadeghian, M. Keshmiri, Hierarchical Position, Orientation and Impedance Control in redundant robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 117-125, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Karami, H. Sadeghian, M. Keshmiri, Hierarchical Position, Orientation and Impedance Control in redundant robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 117-125, 2017 (in Persian)

ماتریس اینرسی^۷، امکان به‌دست آوردن دینامیک مستقل برای وظایف ربات فراهم می‌شود (برای مثال ر. ک. [17]). به این ترتیب طراحی کنترل‌کننده در سطح شتاب و گشتاور برای وظیفه یا وظایف متعدد مدنظر تسهیل می‌شود. برخی از معروف‌ترین دستورهای کنترلی در فضای وظیفه در [15] به صورت تجربی و تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مهمترین چالش در تمامی این دستورات کنترلی بحث پایداری در فضای پوچ است.

در [4]، با استفاده از حداقل مختصات در تعریف فضای پوچ، رابطه‌ی دینامیکی مشابه با فضای وظیفه برای فضای پوچ حاصل شده که به کمک آن دستیابی به رفتار مطلوب ربات در فضای پوچ و بررسی پایداری آن تسهیل می‌شود.

کنترل‌کننده- مشاهده‌گرهای پیشنهادی در [4] تاثیر زیادی در افزایش دقت عمل ربات در فضای وظیفه در مسئله تنظیم^۸ موقعیت داشت. در این پژوهش با پیشنهاد روش مناسب اولویت‌بندی وظایف متعدد با حداقل بعد در فضای پوچ، مسئله کنترل سلسله مراتبی چندین وظیفه بررسی می‌شود. به علاوه با استفاده از مشاهده‌گر مناسب، تلاش شده دقت در انجام وظایف تنظیم موقعیت و جهت در اولویت‌های مختلف افزایش یابد.

در مقاله پیش‌رو ابتدا در بخش 2 به بررسی روابط دینامیکی مسئله و ارائه روش جدید اولویت‌بندی مسایل می‌پردازیم. در بخش 3، روش کنترلی برای تنظیم موقعیت و جهت به همراه رفتار سازگار در فضای پوچ پیشنهاد خواهد شد. در بخش 4 نتایج شبیه‌سازی و تجربی استفاده از روش پیشنهادی گزارش شده است. در نهایت در بخش 5، به جمع‌بندی مسایل مطرح شده می‌پردازیم.

2- روابط حاکم بر مسئله

معادله دینامیکی یک ربات n بازاری با اتصالات چرخشی در فضای مفاصل را می‌توان به صورت

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau - \tau_{\text{ext}}, \quad (1)$$

نوشت که در آن $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس جرم، $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ بردار گشتاورهای کریولیس و جانب مرکز و $g(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ نشان‌دهنده بردار

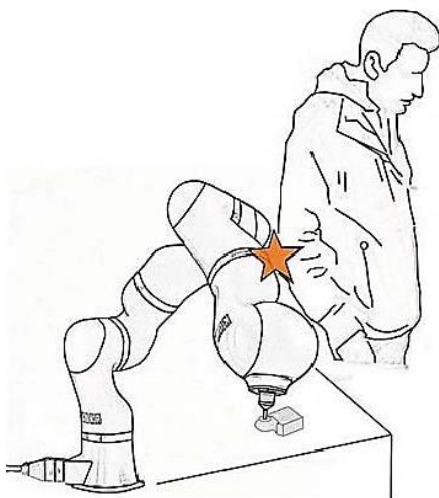


Fig. 1 Schematic of accidental human robot physical interaction
شکل 1 نمونه‌ای از برخورد فیزیکی اتفاقی میان انسان و ربات

پردازش تصویر، در تعاملات سریع و اتفاقی ممکن است نتواند ربات را از مانعی که به سمت آن می‌آید دور کند [7] و یا نیروی وارد شده را در زمان مناسب به دقت تخمین بزند [6]. پوشاندن بدنه ربات با حس‌گر نیرو [8] یا استفاده از مشاهده‌گرها دو راهکار برای مدیریت تعاملات فیزیکی است. مشاهده‌گرهای گوناگونی با استفاده از شبکه عصبی [9]، خطای فضای وظیفه [4] و تکانه‌ی ربات [10] به منظور تخمین نیروی خارجی وارد بر ربات پیشنهاد شده‌اند.

استفاده از ربات‌ها با درجات آزادی زیاد امکان انجام وظایف پیچیده [11] و اولویت‌بندی شده [12] را فراهم می‌آورد. با این حال، زمانی که بعد فضای وظیفه‌ی ربات از فضای مفاصل آن کمتر باشد، بررسی پایداری سیستم پیچیده می‌شود. افزونگی موجب ایجاد دینامیک دیگری در سیستم به نام دینامیک فضای پوچ یا دینامیک داخلی علاوه بر دینامیک فضای وظیفه می‌شود. تبیین دینامیک فضای پوچ با حداقل بُعد، موضوع مهمی در اثبات پایداری سیستم است (ر. ک. [13,14]). به منظور اطمینان از پایداری سیستم در فضای پوچ در [14] به کمک بردارهای پایه فضای پوچ مختصات جدیدی برای سیستم تعریف شده است. البته مسئله پایداری فضای پوچ در [13] و [15] نیز بررسی شده است.

از مزایای استفاده از ربات‌های افزونه می‌توان به انجام همزمان وظایف متعدد، دور شدن از برخورد با موانع، پرهیز از تکینگی^۲ و بهینه‌سازی رفتار ربات اشاره کرد [16-18]. وظایف مدنظر ممکن است علاوه بر فضای وظیفه در فضای مفاصل ربات نیز تعریف شوند [19]. برای این منظور از روش گوناگونی برای اختصاص اولویت به هر یک از اهداف می‌توان استفاده کرد.

رویکردهای متعدد اولویت‌بندی اکید^۳ و منعطف^۴ در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است. در روش‌های منعطف، وظایف به کمک شیوه‌های وزن‌دهی اولویت‌بندی می‌شوند [20,21]. معمولاً با استفاده از این روش‌ها انجام دقیق وظایف با اولویت بالا ممکن نیست. در [12] تلاش شده با ارائه روش تغییر تدریجی اولویت بندی از منعطف به اکید، ایراد فوق تا حدودی رفع شود. در رویکردهای اولویت‌بندی اکید، به کمک تصویر کردن وظیفه با اولویت پایین‌تر در فضای پوچ اولویت‌های بالاتر، انجام کامل وظیفه‌ی اول تضمین و وظایف با اولویت‌های پایین‌تر تا زمانی که با وظایف قبلی در تضاد نباشند، انجام خواهند شد [12,14,23,24].

از روش اولویت‌بندی در سطح سرعت در کنترل ربات‌های انسان‌نما [25] و بازوهای رباتیک [24] به خصوص به منظور هدایت بصری^۵ استفاده شده است [12]. تعریف وظایف متعدد در سطح شتاب برای ربات‌های انسان‌نما به منظور افزایش قابلیت‌های ربات در انجام وظایف پیچیده [17] و حفظ تعادل ربات در محیط‌های ناهموار [18] یکی از حوزه‌های مطالعاتی مورد توجه است. در [26] الگوریتم جدیدی پیشنهاد شده تا بتوان چندین وظیفه را تعیین و ارضای دقیق وظیفه‌ی اصلی و قیود متعدد در دامنه‌ی حرکت، سرعت و شتاب در فضای مفاصل را تضمین کرد.

استفاده از فرمول‌بندی فضای عملیاتی^۶ ارائه شده در [27] یکی از روش‌های متداول به‌منظور طراحی دستور کنترلی در فضای وظیفه‌ی ربات‌هاست. با استفاده از ماتریس معکوس تعمیم یافته وزن‌دهی شده با

¹ Momentum based observer

² singularity

³ Strict

⁴ Non-strict

⁵ Visual servoing

⁶ Operational space formulation

⁷ Inertia-weighted generalized inverse matrix

⁸ Regulation

$$\bar{J}_i^\# = \begin{cases} M^{-1}\bar{J}_i^T (\bar{J}_i M^{-1}\bar{J}_i^T)^{-1} & i = 1, \dots, r-1 \\ z_r^T & i = r. \end{cases} \quad (9)$$

همچنین رابطه‌ی فضای وظایف و مفاصل در سطح شتاب به صورت

$$\ddot{q} = J_e^{-1}(q)(\ddot{x} - \dot{J}_e \dot{q}), \quad (10)$$

به دست می آید که در آن $\ddot{x} = [\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \dots, \ddot{v}]$ با استفاده از روش فرمول بندی فضای عملیاتی ارائه شده در [27]، برای هر یک از وظایف مدنظر می توان معادله‌ای به صورت

$$\bar{A}_i(q)\ddot{x}_i + \bar{\mu}_i(q, \dot{q})\dot{x}_i + \bar{p}_i(q) = \bar{J}_i^{\#T} \tau_{\text{control}} - \bar{J}_i^{\#T} \tau_{\text{ext}} \quad (11)$$

در فضای وظیفه نوشت که در آن

$$\begin{aligned} \bar{A}_i(q)^{-1} &= \bar{J}_i(q)M(q)^{-1}\bar{J}_i(q)^T, \\ \bar{\mu}_i(q, \dot{q}) &= \left(\bar{J}_i^{\#T} C(q, \dot{q}) - \bar{A}_i \dot{J}_i \right) \bar{J}_i^\#, \\ \bar{p}_i(q) &= \bar{J}_i^{\#T} g(q). \end{aligned} \quad (12)$$

به کمک روابط (3)، (4) و (5) می توان نشان داد.

$$J_{\text{aug}, i-1} \bar{J}_i^\# = 0, \quad (13)$$

$$\bar{J}_j M^{-1} \bar{J}_i^T = 0, \quad (14)$$

که رابطه‌ی (13) پیروی از اولویت بندی مدنظر را تضمین و رابطه‌ی (14) نشان می دهد ماتریس اینرسی سیستم در فضای عملیاتی به صورت

$$\bar{A} = \text{diag}(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_r), \quad (15)$$

حاصل می شود و به عبارت دیگر ماتریس شبه معکوس ارائه شده در (9) سازگار با دینامیک¹ است [14]. همچنین به کمک تعریف ارائه شده در (3)، بُعد ماتریس ژاکوبین وظیفه‌ی آخر $(n - \sum_{i=1}^r m_i \times n)$ حاصل می شود که در به دست آوردن رفتار مطلوب در فضای پوچ و اثبات پایداری موثر است.

3- طراحی کنترل کننده و بررسی پایداری

در این بخش در ابتدا کنترل کننده- مشاهده گر مطلوب برای کنترل موقعیت و جهت در حین تعامل فیزیکی تصادفی با ربات پیشنهاد شده و سپس به بررسی پایداری آن خواهیم پرداخت.

در این پژوهش، از مشاهده گر بر مبنای تکانه به منظور برآورد گشتاور خارجی وارد شده به ربات استفاده می شود. این مشاهده گر در موارد متعددی همچون [31, 10, 4] استفاده شده و کارایی خود را نشان داده است. به کمک رابطه‌ی (1)، بردار $r(t)$ به صورت

$$r(t) = K_I [p(t) - \int_0^t (\tau + C^T(q, \dot{q}) - g(q) + r(\sigma)) d\sigma], \quad (16)$$

تعریف می شود. در رابطه (16) داریم: $p(0) = 0$, $p(t) = M\dot{q}$ و $r(0) = 0$. $K_I \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس مثبت معین است. در این مشاهده گر گشتاور خارجی وارد به ربات به کمک سیگنال q ، $\dot{q}$ و گشتاور کنترلی اعمالی به ربات تخمین زده می شود. می توان نشان داد دینامیک بردار تخمین به صورت

$$\dot{r}(t) = -K_I \tau_{\text{ext}} - K_I r, \quad (17)$$

حاصل می شود. با فرض در اختیار بودن مدل دقیق دینامیکی و عدم وجود هرگونه اختلال ناشناخته، در صورت اعمال گشتاور خارجی به بدنه‌ی ربات داریم $r = -\tau_{\text{ext}}$ و در غیر این صورت $r = 0$. در کنترل کننده پیشنهادی، از

گشتاورهای گرانشی می باشند. $\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ بردار گشتاورهای کنترلی است و گشتاورهای خارجی ناشی از برهم کنش میان ربات و محیط با $\tau_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ نشان داده شود.

اگر r وظیفه برای ربات مدنظر باشد، رابطه‌ی میان موقعیت پنجه در وظیفه‌ی i -ام (x_i) و پیکربندی فضای مفاصل ربات (q) به کمک رابطه‌ی $x_i = f_i(q) \in \mathbb{R}^{m_i}, 1 \leq i \leq r$ به دست می آید. وظیفه با بالاترین اولویت با $i = 1$ نشان داده می شود و بُعد وظیفه‌ی i -ام m_i است. به این ترتیب داریم

$$\dot{x}_i = J_i(q)\dot{q} \quad (2)$$

که در این رابطه $J(q) \in \mathbb{R}^{m_i \times n}$ را ماتریس ژاکوبین پنجه‌ی وظیفه‌ی i -ام گویند. با فرض آن که آخرین وظیفه‌ی مدنظر برای ربات $(i = r)$ کنترل امیدانس به منظور نشان دادن رفتاری سازگار در فضای پوچ وظایف قبلی باشد، روش اولویت بندی جدیدی پیشنهاد می شود که تضمین کند:

- وظایف با اولویت پایین بر عملکرد وظایف با اولویت بالا تاثیر نمی گذارند. به عبارت دیگر انجام وظیفه‌ی j -ام بر i -ام بی تاثیر است اگر $j > i \geq 1$.

- بُعد وظیفه‌ی r -ام برابر $m_r = n - \sum_{i=1}^{r-1} m_i$ باشد.

به این منظور ماتریس ژاکوبین تصویر شده به صورت

$$\bar{J}_i = \begin{cases} J_1 & i = 1 \\ J_i Z_{i-1}^T (Z_{i-1} M Z_{i-1}^T)^{-1} Z_{i-1} M & i = 2, \dots, r-1 \\ (Z_{r-1} M Z_{r-1}^T)^{-1} Z_{r-1} M & i = r \end{cases} \quad (3)$$

پیشنهاد می شود. در رابطه‌ی (3)، $Z_i(q) \in \mathbb{R}^{n - \sum_{j=1}^i m_j \times n}$ ماتریس پایه فضای کمینه پوچ است که مرتبه کامل سطری دارد و به صورت

$$J_{\text{aug}, i}(q) Z_i(q)^T = 0 \quad (4)$$

تعریف می شود جایی که

$$J_{\text{aug}, i} = \begin{bmatrix} \bar{J}_1 \\ \bar{J}_2 \\ \vdots \\ \bar{J}_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

محاسبه‌ی $Z_i(q)$ پیچیدگی‌های خاصی دارد و باید با دقت انتخاب شود. به این منظور، ماتریس ژاکوبین الحاقی فوق را به صورت $J_{\text{aug}, i} = [J_m \ J_r]$ تفکیک می کنیم به صورتی که J_m معکوس پذیر باشد. در نتیجه ماتریس پایه فضای پوچ به صورت $Z_i = [J_r^T \ I]^T$ حاصل می شود [28]. روش دیگر محاسبه‌ی $Z_i(q)$ استفاده از شیوه‌های عددی است. البته این روش ها ممکن موجب ناپیوستگی در جواب حاصل شده شوند [29]. بر این اساس رابطه مابین سرعت در فضای وظیفه و مفاصل به صورت

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{r-1} \\ v \end{bmatrix} = J_{\text{aug}, r}(q)\dot{q}. \quad (6)$$

حاصل می گردد. در رابطه‌ی فوق $J_{\text{aug}, r}$ ماتریس $n \times n$ از مرتبه کامل است و v سرعت در فضای پوچ وظایف بالایی است. همان گونه که در مراجعی همچون [30] آمده سرعت فضای پوچ انتگرال ناپذیر است. به این ترتیب داریم

$$\dot{q} = J_{\text{aug}, r}(q)^{-1} \dot{x} \quad (7)$$

و همان گونه که در [31] و [19] آمده است $J_{\text{aug}, r}(q)^{-1}$ را می توان به صورت

$$J_{\text{aug}, r}(q)^{-1} = [\bar{J}_1^\# \ \bar{J}_2^\# \ \dots \ \bar{J}_r^\#], \quad (8)$$

نوشت که در این رابطه

¹ Dynamically consistent

بردار باقی‌مانده در دستور کنترلی به منظور جبران اثر نیروی خارجی بر انجام وظایف ربات استفاده می‌شود.

گزاره 1: شتاب مرجع کنترل موقعیت و جهت به صورت

$$\ddot{x}_{cp} = -K_{pd}\dot{x} + K_{pp}\ddot{x} - \bar{A}_p^{-1}\bar{J}_p^{\#T}r, \quad (18)$$

$$\ddot{x}_{co} = -K_{od}\omega_e + K_{op}\varepsilon_{de} - \bar{A}_o^{-1}\bar{J}_o^{\#T}r, \quad (19)$$

و شتاب مرجع در فضای پوچ وظایف اصلی به صورت

$$\dot{v}_c = -\bar{A}_v^{-1}((\bar{\mu}_v + K_{rd})v - Z_{r-1}K_{rp}\tilde{q}) \quad (20)$$

پیشنهاد می‌شود. در (18)، $\tilde{x} = x_d - x$ بردار موقعیت در فضای وظیفه و $x_d \in \mathbb{R}^{m_p}$ موقعیت مطلوب می‌باشد. در (19) سرعت زاویه‌ای پنجه ω_e و قسمت برداری پارامتر کوآرنیون برای بیان راستا و جهت پنجه می‌باشد. پارامترهای کوآرنیون به صورت

$$\dot{\eta}_{de} = -\frac{1}{2}\varepsilon_{de}^e \tilde{\omega}_{de}^e, \quad (21)$$

$$\varepsilon_{de}^e = \frac{1}{2}E(\eta_{de}, \varepsilon_{de}^e)\tilde{\omega}_{de}^e, \quad (22)$$

تعریف می‌شوند که در آن $\omega_d^e = 0$ ، $\tilde{\omega}_{de}^e = \omega_d^e - \omega_e^e$ ، $\varepsilon_{de} = R_e \varepsilon_{de}^e$ می‌باشد [32]. در رابطه‌ی (21) داریم $(\eta_{de}, \varepsilon_{de}^e) = \eta_{de} - S(\tilde{\omega}_{de}^e)$ جایی که S عملگر پادمتقارن است. K_{pd} ، K_{pp} ، K_{od} و K_{op} ضرایب کنترل‌کننده هستند. این ماتریس‌ها همگی ماتریس‌های مربعی مثبت معین می‌باشند. در (20) داریم $\tilde{q} = q_{rd} - q$ که پیکربندی مطلوب با q_{rd} نشان داده شده و K_{rp} و K_{rd} ماتریس‌های مثبت معین هستند. با استفاده از روابط فوق خطای موقعیت و جهت نسبت به شرایط مطلوب، سرعت در فضای پوچ و تخمین نیروی خارجی وارد بر بدنه‌ی ربات که به صورت $\tilde{r} = r + \tau_{ext}$ تعریف می‌شود به صفر میل می‌کند.

با استفاده از روابط (18)، (19) و (20) گشتاور کنترلی به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\tau_{control} = \sum_{i=1}^{r-1} \bar{J}_i^T \bar{A}_i (\ddot{x}_{ci} - \dot{\bar{J}}_i \dot{q}) + \bar{J}_r^T \bar{A}_v (\dot{v}_c - \dot{\bar{J}}_r \dot{q}) + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q), \quad (23)$$

اثبات گزاره 1: با استفاده از روابط (17)، (18)، (19)، (20) و (23) معادلات حلقه بسته سیستم به صورت

$$\dot{\tilde{r}} + K_1 \tilde{r} = \dot{\tau}_{ext} \quad (24)$$

$$-\ddot{x} - K_{pd}\dot{x} + K_{pp}\ddot{x} = \bar{A}_p^{-1}\bar{J}_p^{\#T}\tilde{r}, \quad (25)$$

$$-\dot{\omega}_e - K_{od}\omega_e + K_{op}\varepsilon_{de} = \bar{A}_o^{-1}\bar{J}_o^{\#T}\tilde{r}, \quad (26)$$

$$-\bar{A}_v\dot{v} - (\bar{\mu}_v + K_{rd})v + Z_{r-1}K_{rp}\tilde{q} = Z_{r-1}\tau_{ext} \quad (27)$$

به همراه (6)، (21) و (22) حاصل می‌شود. در این پژوهش برای نشان دادن پایداری سیستم از تئوری پایداری مشروط [33] استفاده می‌شود که پیش‌تر در پژوهش‌هایی همچون [34] و [14] نیز استفاده شده است.

تئوری 1: فرض کنید $z = 0$ یک نقطه‌ی تعادل برای سیستم دینامیکی $\dot{z} = f(z)$ باشد. اگر در همسایگی Ω از نقطه‌ی تعادل، تابع $V(z) \in C^1$ وجود داشته باشد به گونه‌ای که

$$V(0) = 0 \text{ و } z \in \Omega \text{ برای } V(z) \geq 0$$

$$t \geq 0 \text{ و } z \in \Omega \text{ برای } \dot{V}(z) \leq 0$$

- در مجموعه نامتغیر و مثبت $\Sigma = \{z \in \Omega | \dot{V}(z) = 0\}$ سیستم دارای پایداری مجانبی باشد.

آن‌گاه نقطه‌ی تعادل مبدا دارای پایداری مجانبی است.

به منظور بررسی پایداری سیستم، بدون از دست رفتن کلیت مسئله، فرض می‌شود یک وظیفه‌ی کنترل موقعیت و یک وظیفه‌ی کنترل جهت مدنظر است. به علاوه فرض می‌شود مجموع ابعاد این دو وظیفه از درجات آزادی سیستم کمتر است و از این افزونگی به منظور نشان دادن رفتار سازگار استفاده می‌شود ($r = 3$). حال به کمک تئوری 1، در چندین گام به بررسی پایداری سیستم می‌پردازیم. در گام نخست، با فرض نیروی خارجی ثابت (یا به آرامی متغیر با زمان) در رابطه‌ی (24) تابع لیپانوف

$$V_1(z) = \frac{1}{2}\tilde{r}^T\tilde{r} \quad (28)$$

که مثبت نیمه معین است، استفاده و مشتق زمانی در راستای مسیر سیستم به صورت

$$\dot{V}_1(z) = -\tilde{r}^TK_1\tilde{r} \quad (29)$$

به‌دست می‌آید که منفی نیمه معین است. به این ترتیب دو شرط ابتدایی تئوری 1 ارضا شده است. مطابق شرط سوم تئوری پایداری مشروط، به منظور نشان دادن پایداری مجانبی کل سیستم، لازم است پایداری مجانبی سیستم در مجموعه‌ی $\Sigma_1 = \{z \in \{\tilde{r}, \dot{x}, \ddot{x}, \omega_e, \varepsilon_{de}, \eta_{de}, \tilde{q}, \dot{v}\} | \dot{V}_1(z) = 0\}$ نشان داده شود. به عبارت دیگر، مطابق "شکل 1"، در گام دوم به بررسی پایداری سیستم در Σ_1 می‌پردازیم.

در گام دوم، تابع لیپانوف به صورت

$$V_2(z) = \frac{1}{2}\dot{x}^T(I + K_{pp}^{-1})K_{pd}^{-1}\dot{x} + \dot{x}^TK_{pp}^{-1}\tilde{x} + \frac{1}{2}\tilde{x}^T(K_{pd}^{-1}(I + K_{pp}) + K_{pp}^{-1}K_{pd})\tilde{x} \quad (30)$$

پیشنهاد می‌شود، که مشتق زمانی آن با توجه به (25) به صورت

$$\dot{V}_2(z) = -\dot{x}^T\dot{x} - \tilde{x}^T\tilde{x} \quad (31)$$

حاصل می‌شود. روابط (30) و (31) نشان می‌دهند بار دیگر شرایط اول و دوم تئوری 1 ارضا شده و برای شرط سوم نیازمند بررسی پایداری سیستم در $\Sigma_2 = \{z \in \Sigma_1 | \dot{V}_2(z) = 0\}$ هستیم. با در نظر گرفتن تابع

$$V_3(z) = K_{op}((\eta_{de} - 1)^2 + \varepsilon_{de}^T \varepsilon_{de}) + \frac{1}{2}\omega_e^T \omega_e \quad (32)$$

و مشتق آن که به کمک (21)، (22) و (26) به صورت زیر ساده می‌شود

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(z) &= 2K_{op}((\eta_{de} - 1)\dot{\eta}_{de} + \varepsilon_{de}^T \dot{\varepsilon}_{de}) + \omega_e^T \dot{\omega}_e \\ &= K_{op}((\eta_{de} - 1)\varepsilon_{de}^e \omega_e \\ &\quad - \varepsilon_{de}^T E(\eta_{de}, \varepsilon_{de}^e)\omega_e) \\ &\quad - K_{op}\omega_e^T \omega_e + K_{op}\omega_e^T \varepsilon_{de}^e \\ &= -K_{op}\omega_e^T \omega_e \end{aligned} \quad (33)$$

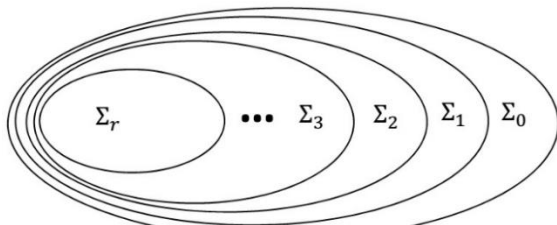


Fig. 2 Graphical interpretation of the sets used in the proof. The largest set Σ_0 describes the (unrestricted) complete state space z . Each overlying set Σ_i is a subset of Σ_{i-1} for all $1 \leq i \leq r$

شکل 2 نمایش مجموعه‌های تودرتوی فضای حالت سیستم، Σ_0 مجموعه کامل و بدون محدودیت فضای حالت (z) است و Σ_i ها زیرمجموعه‌های فضای حالت هستند که در گام‌های مختلف اثبات پایداری ایجاد شده‌اند.

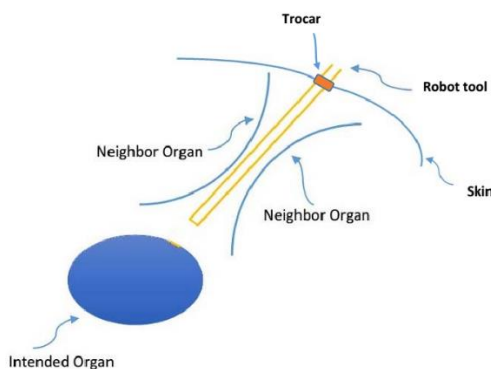


Fig. 3 Sample case for orientation control; a surgery tool mounted at the end-effector passes through an incision point in a MIS scenario

شکل 3 نمونه کاربرد کنترل جهت در جراحی رباتیک، ابزار جراحی نصب شده بر روی پنجه که در یک جراحی کم تهاجمی از نقطه‌ی برش وارد بدن بیمار شده است.

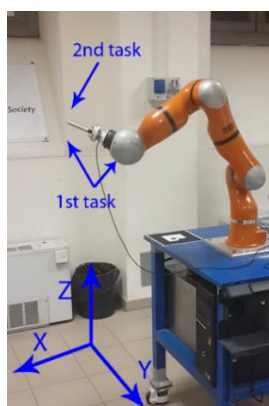


Fig. 4 Snapshots of the experimental setup during manipulation

شکل 4 تصاویری از ربات در حین انجام آزمایشات

عملکرد دستورات کنترلی جهت و موقعیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهاد شده در بخش 3، از مدل کامپیوتری و نمونه واقعی ربات 7 درجه‌ی آزادی کوکا⁶ استفاده شده است. در سناریوی مدنظر در این پژوهش کنترل در سه سطح اولویت‌بندی شده انجام می‌شود. وظیفه‌ی اول، کنترل جهت بازوی آخر و موقعیت "X" و "Y" مفصل 6-ام، وظیفه‌ی دوم، کنترل موقعیت انتهایی پنجه در راستای "Z" و وظیفه‌ی سوم کنترل امپدانس است (شکل 4). پیکربندی ابتدایی ربات در این آزمایش به صورت $q_d = \{0, \pi/6, 0, -\pi/2, 0, -\pi/3, 0\}$ می‌باشد.

بنابر تعریف مسئله، وظیفه‌ی اول کنترل هیبرید موقعیت و جهت است که با استفاده از شتاب مرجع (18) و (19) و وظیفه‌ی دوم به کمک رابطه (18) پیاده‌سازی شده است. کنترل امپدانس در فضای پوچ وظایف اصلی و با بکارگیری شتاب مرجع (20) انجام می‌شود. با استفاده از شتاب‌های مرجع فوق‌الذکر در رابطه‌ی (23) گشتاور کنترلی هدف محاسبه می‌شود.

4-1 نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت روش پیشنهاد شده در بخش 3، پیش از انجام آزمایش بر روی ربات واقعی، شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب⁷ و بر روی مدل ربات کوکا انجام شده است.

نتایج شبیه‌سازی انجام شده در "شکل 5، شکل 6 و شکل 7" آمده است.

در گام سوم مجموعه‌ی نامتغیر جدید

$$\Sigma_3 = \{z \in \{\tilde{r} = 0, \dot{\tilde{x}} = 0, \ddot{\tilde{x}} = 0, \omega_e = 0, \varepsilon_{de}, \eta_{de}, \tilde{q}, \tilde{v}\} | \dot{V}_3(z) = 0\}:$$

به دست می‌آید. همچنین از روابط حلقه بسته، نقطه‌ی تعادل سیستم به صورت

$$z_{eq} = \{\tilde{r} = 0, \dot{\tilde{x}} = 0, \ddot{\tilde{x}} = 0, \omega_e = 0, \varepsilon_{de} = 0, \eta_{de} = 1, \tilde{q}^* = 0, \tilde{v} = 0\}, \quad (34)$$

به دست می‌آید، که در آن

$$Z_{r-1}(K_{rp}\tilde{q} - \tau_{ext}) = Z_{r-1}K_{rp}(q - q^*) = 0, \quad (35)$$

و $\tilde{q}^* = q - q^*$ و $r - 1 = 2$. به این ترتیب در گام نهایی بررسی پایداری استفاده از تابع لیپانوف

$$V_4(z) = K_{op}((\eta_{de} - 1)^2 + \varepsilon_{de}^T \varepsilon_{de}) + \frac{1}{2}v^T \bar{L}_v v + \frac{1}{2}\tilde{q}^{*T} K_{3p} \tilde{q}^*, \quad (36)$$

پیشنهاد می‌شود. در مجموعه‌ی Σ_3 ، $\dot{q} = Z_2^T v$ می‌باشد و در نتیجه

$$\begin{aligned} \dot{V}_4(z) &= 2K_{op}((\eta_{de} - 1)\dot{\eta}_{de} + \varepsilon_{de}^T \dot{\varepsilon}_{de}) \\ &\quad - v^T(\bar{\mu}_v + K_{3d})v + v^T Z_2 K_{3p} \tilde{q} \\ &\quad - v^T Z_2 \tau_{ext} - v^T Z_2 K_{3p} \tilde{q}^* \\ &= -v^T(\bar{\mu}_v + B_v)v. \end{aligned} \quad (37)$$

این نکته حایز اهمیت است که در Σ_3 ، $\omega_e = 0$ است و در نتیجه با توجه به (20) و (21)، $\dot{\eta}_{de}$ و $\dot{\varepsilon}_{de}$ صفر است. با استفاده از قضیه لاسال¹ می‌توان گفت که متغیرهای حالت سیستم به بزرگترین مجموعه‌ی ناوردا² شامل $v = 0$ در Σ_3 میل می‌کند که بنابر معادلات حلقه بسته سیستم همان نقطه‌ی تعادل یا z_{eq} است. با توجه به پایداری مجانبی در Σ_3 سه شرط تئوری 1 در Σ_2 ارضا شده است. به این ترتیب پایداری مجانبی در Σ_1 را نیز می‌توان به کمک تئوری 1 و با توجه به پایداری مجانبی Σ_2 نشان داد. به این ترتیب پایداری کل سیستم اثبات می‌شود.

اثبات فوق، مستقل از اولویت وظایف پایداری سیستم را نشان می‌دهد. به علاوه در تمامی مراحل اثبات فرض شده فضای کاری ربات از تکینگی سینماتیکی دور باشد. به علاوه، در صورتی که وظایف تعریف شده برای ربات از یکدیگر مستقل نباشند، تکینگی الگوریتمی رخ می‌دهد. در این شرایط وظیفه‌ی اول به طور کامل ارضا شده و در سایر وظایف نرم دوم خطا به صورت محلی کمینه خواهد شد (برای جزئیات بیشتر ر.ک. [35] و [4]).

4-2 پیاده‌سازی روش کنترلی

در برخی کاربردهای ربات‌ها، حفظ جهت و راستای مطلوب یک هدف مهم است. برای مثال راستای بازوی ربات در جراحی کم تهاجمی رباتیک³ و هدایت بصری⁴ حایز اهمیت فراوان است. در شکل 3 بازوی ربات در بدن بیمار نشان داده شده است. این بازو ممکن است وظایفی همچون جراحی یا تصویر برداری حین جراحی را در داخل بدن بیمار انجام دهد. به منظور حفظ سلامت ارگان‌های مجاور، ربات باید تنها در یک راستای به خصوص کار کند. به علاوه در حالت کلی در مسایل هدایت بصری، راستای تصویربرداری از اهمیت به خصوص برخوردار است، به خصوص زمانی که تصویر حاصل توسط کاربر به صورت $\dot{\theta}$ تحلیل و مورد استفاده قرار می‌گیرد. اعمال نیرو در راستای مشخص شده به منظور هل دادن جسم خارجی، انجام ماشین‌کاری و ... از دیگر کاربردهای کنترل راستای بازوی ربات باشد. در این بخش

¹ LaSalle principle

² Invariant subset

³ Minimal invasive surgery (MIS)

⁴ Visual servoing

⁵ Online

⁶ KUKA LWR IV

⁷ Matlab R2015b

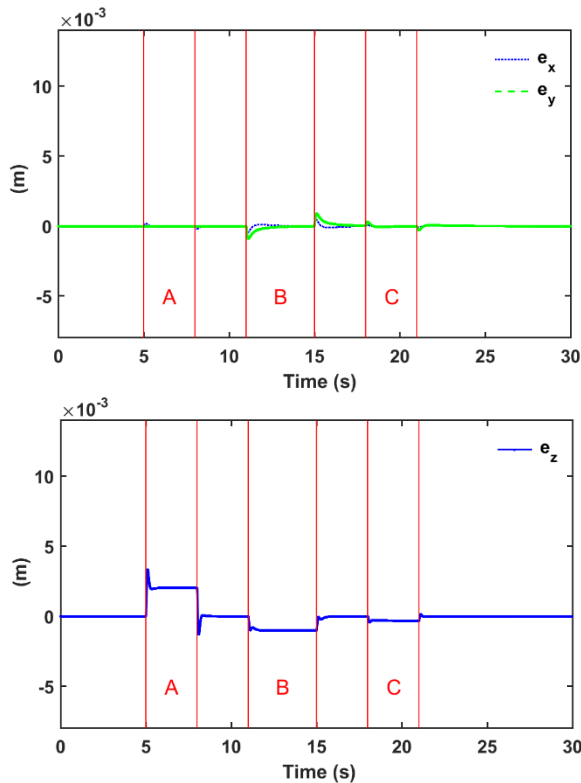


Fig. 7 Position control error for the first (top) and second task (down) during simulation

شکل 7 خطای تنظیم موقعیت در وظیفه‌ی اول (بالا) و دوم (پایین) در شبیه‌سازی

نسبت به وظیفه‌ی دوم انجام شده است. این مهم نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش اولویت‌بندی می‌باشد. با توجه به این نتایج، در بخش بعد به پیاده‌سازی تجربی روش می‌پردازیم.

2-4- نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت نتایج پیاده‌سازی کنترل‌کننده-مشاهده‌گر پیشنهادی بر روی ربات کوکا بررسی می‌شود. الگوریتم کنترلی به کمک کتابخانه "فست ریسرچ اینترفیس" به کنترل‌کننده داخلی ربات ارسال می‌شود.

سناریو، روابط کنترلی و ضرایب اختیار شده در روابط دقیقاً مطابق قسمت شبیه‌سازی است. اغتشاش در عملکرد سیستم با وارد کردن نیرو بر بدنه‌ی ربات توسط دست انسان انجام شده است (شکل 8). گشتاور حاصل از نیروی وارده در مختصات فضای مفاصل به کمک رابطه‌ی (16) تخمین زده شده و در "شکل 9" نشان داده شده است. بازه‌های اعمال نیرو بر بدنه‌ی ربات در تمامی شکل‌های مربوط به این آزمایش، با حروف "A"، "B"، "C" و "D" مشخص شده‌اند. در "شکل 9 و 10" رفتار ربات در فضای وظیفه ملاحظه می‌شود. خطای ایجاد شده در اثر اندرکنش‌های فیزیکی با ربات ناچیز است و پس از آن که تغییرات اندازه‌ی نیروی خارجی برحسب زمان آرام می‌شود، در اکثر موارد، خطای ایجاد شده اصلاح می‌شود.

به‌منظور برآورد دقیق‌تر عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، لازم است نتایج با آزمایش بدون استفاده از مشاهده‌گر در شتاب‌های مرجع، مقایسه شود. به این منظور، عبارت سمت راست در روابط (18) و (19) حذف شده و آزمایشات تکرار شده‌اند.

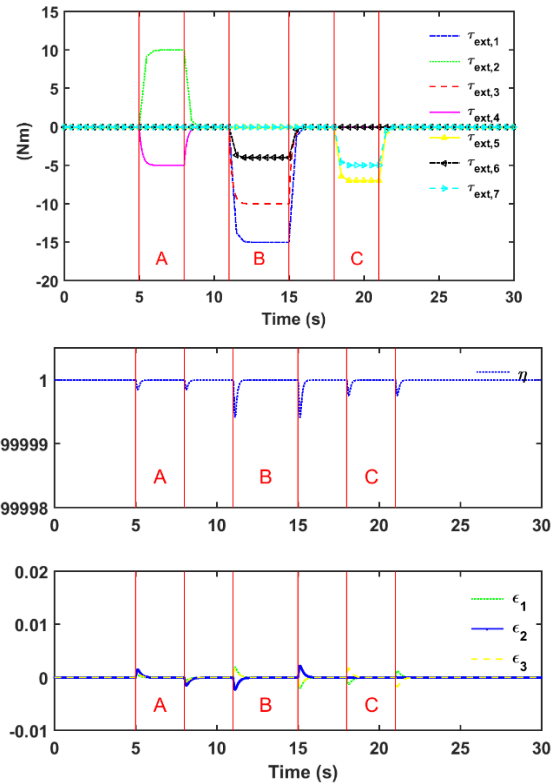


Fig. 5 External torque applied to the robot body (top) and orientation regulation error quaternion parameter during simulation

شکل 5 گشتاور خارجی وارد بر بدنه‌ی ربات و خطای تنظیم جهت در وظیفه‌ی اول نشان داده شده به کمک پارامترهای کوآترنیون در شبیه‌سازی

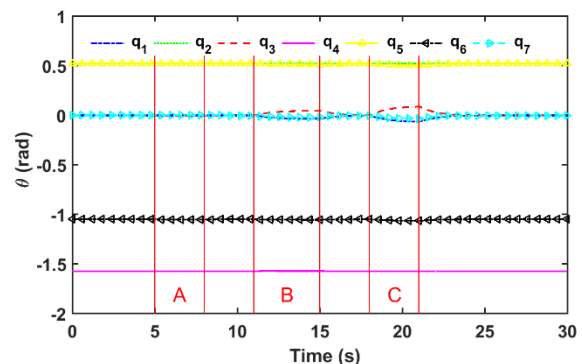


Fig. 6 Joint space trajectory during simulation

شکل 6 موقعیت مفاصل در طول در شبیه‌سازی

بازه‌های اعمال گشتاورهای خارجی در هر یک از اشکال مربوطه با حروف "A"، "B" و "C" نشان داده شده‌اند. بزرگی گشتاور خارجی وارد بر ربات در مختصات مفاصل و در بازه‌ی "A" $\tau_{ext} = [0, -10, 0, 5, 0, 0, 0]$ ، در بازه‌ی "B" $\tau_{ext} = [15, 0, 10, 0, 0, 4, 0]$ و در بازه‌ی "C" $\tau_{ext} = [0, 0, 0, 0, 7, 0, 5]$ است. "شکل 5" مقادیر تخمین زده شده‌ی این گشتاورها توسط مشاهده‌گر را نشان می‌دهد که دقت بسیار مناسبی را دارد.

مطابق با مباحث مطرح در بخش 4، در "شکل 4" می‌بینیم که پس از ایجاد اغتشاش در سیستم، $\eta \rightarrow 1$ و $\epsilon \rightarrow 0$ میل می‌کند. به‌علاوه در "شکل 7" دقت در عملکرد کنترل‌کننده موقعیت در وظیفه‌ی اول و دوم را می‌توان دید. "شکل 6" پیکربندی ربات در طول شبیه‌سازی و عملکرد کنترل امپدانس را نشان می‌دهد. کنترل موقعیت وظیفه‌ی اول با دقت بسیار بالاتری

¹ Fast research interface

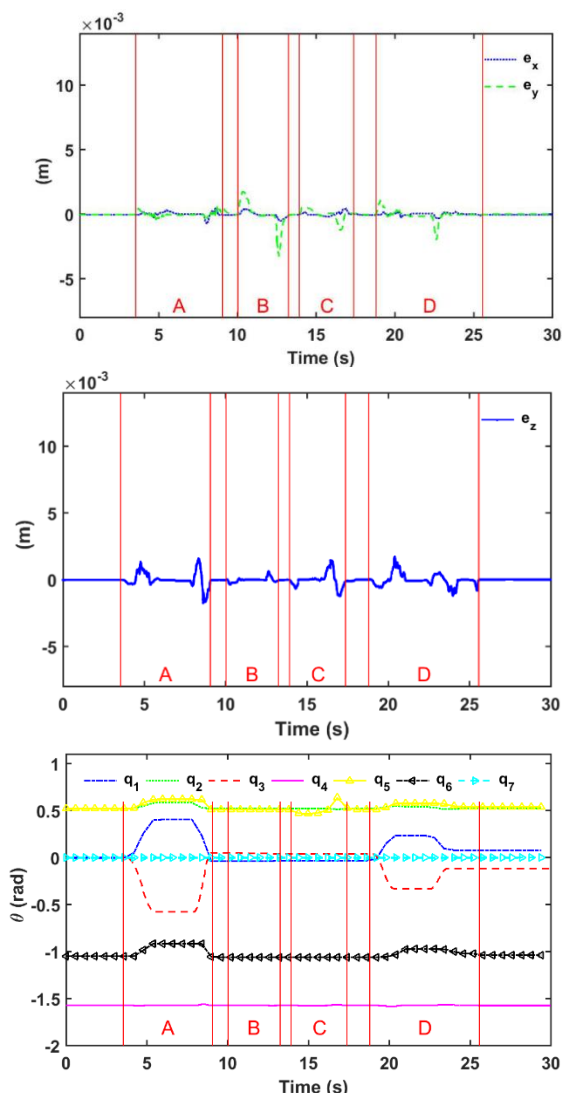


Fig. 10 1st task position error (top), 2nd task position error (middle) and joint space trajectory (down): with using observer

شکل 10 خطای موقعیت در وظیفه اول (بالا)، وظیفه دوم (وسط) و موقعیت مفاصل (پایین) در آزمایش با استفاده از مشاهده گر

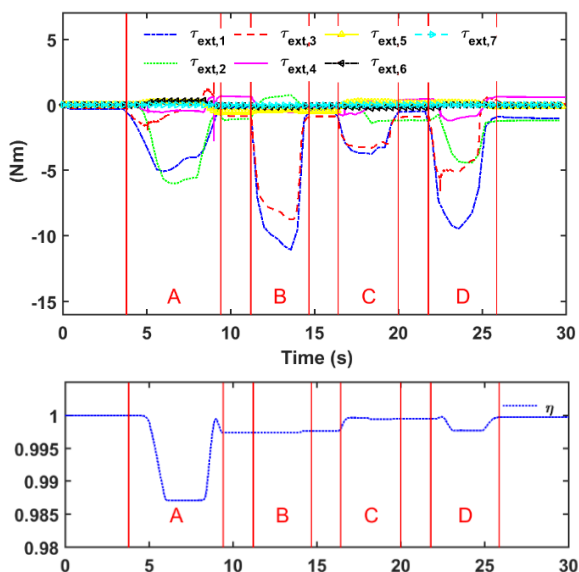


Fig. 8 Snapshots of the experimental setup during manipulation

شکل 8 تصاویری از ربات در حین انجام آزمایشات

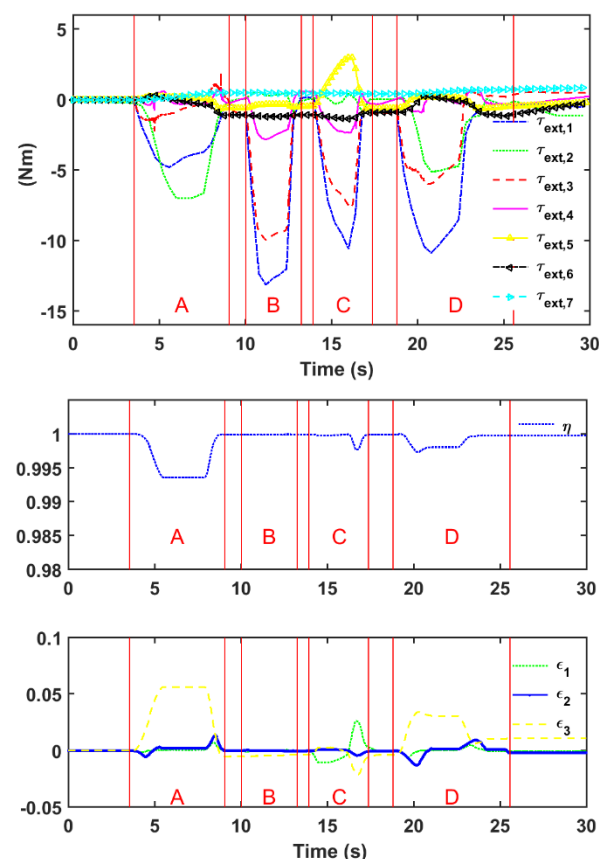


Fig. 9 External torque applied to the robot body (top), orientation regulation error quaternion parameters (down): with using observer

شکل 9 گشتاور خارجی وارد بر بدنه ربات (بالا) و پارامترهای کوآترنیون خطای تنظیم جهت وظیفه اول (پایین) در آزمایش با استفاده از مشاهده گر

عملکرد کنترل کننده بدون استفاده از مشاهده گر در دستور کنترلی در "شکل 11 و شکل 12" نشان داده شده است. در این دو شکل نیز بازه های اعمال نیروی خارجی با خطوط قرمز و حروف "A"، "B"، "C" و "D" نشان داده شده اند. گشتاور خارجی وارد بر ربات در آزمایش اخیر که در "شکل 11" نشان داده شده است. گشتاور خارجی وارد بر بدنه ربات در حالت بدون مشاهده گر در تمامی بازه ها کوچکتر یا مساوی گشتاور اعمال شده به ربات در آزمایش با دستور کنترلی (18) و (19) است که در "شکل 9" گزارش شده است.

در هر دو آزمایش گزارش شده، در بازه ی "A" و "D" نیرو به بدنه ی ربات و خارج از فضای وظیفه وارد می شود (مانند تصویر سمت راست در شکل 8). اما در بازه ی "B" نیرو به اتصال 6-ام (محل کنترل موقعیت در

است. بدون استفاده از مشاهده‌گر، تمامی خطاهای تنظیم در هر دو وظیفه‌ی اول و دوم در حین اعمال نیروی خارجی، غیرصفر است. به علاوه خطای وظایف ربات پس از بین رفتن نیروی خارجی به شکل کاملاً دقیق صفر نمی‌شود. حال آن که با استفاده از دستور کنترلی پیشنهادی، علاوه بر کوچک‌تر بودن خطاهای ایجاد شده، اختلال ایجاد شده در انجام وظایف به سرعت اصلاح و به صفر میل می‌کند.

وظیفه‌ی سوم که با شتاب مرجع (20) در دستور کنترلی اعمال شده است، سبب رفتار نوسانی حول q_d در اثر نیروی خارجی می‌شود. انتظار می‌رود ربات پس از وارد شدن نیروی خارجی به آن، به موقعیت ابتدایی باز گردد. البته این وظیف تا زمانی که با انجام وظایف با اولویت‌های بالاتر در تناقض نباشد انجام می‌گیرد. بررسی موقعیت مفاصل در آزمایش نخست (شکل 10) و آزمایش اخیر (شکل 12) نشان می‌دهد بازگشت ربات به پیکربندی ابتدایی پس از هر تعامل فیزیکی در حالتی که از مشاهده‌گر استفاده شده، دقت بالاتری دارد.

توجه به این نکته لازم است که روش ارائه شده برای مدیریت تعاملات فیزیکی ناخواسته، تنها تا زمانی کاربرد دارند که اندازه‌ی نیروی خارجی در بازه‌ی مشخص و قابل قبولی باشد. در صورتی که نیروی خارجی از حد معینی بزرگتر شود، لازم است انجام عملیات توسط ربات کاملاً متوقف شود. دلیل این مسئله بزرگ شدن گشتاورهای کنترلی ربات است که می‌تواند ایمنی ربات و فرد (یا هر عامل دیگر ایجادکننده‌ی اختلال) را به خطر اندازد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کنترل‌کننده‌ی مشاهده‌گر جدیدی به منظور افزایش دقت کنترل موقعیت و جهت و نیز سازگاری ربات در حین تعامل فیزیکی با محیط پیشنهاد شده است. به علاوه روش جدید اولویت‌بندی وظایف پیشنهاد شد که با استفاده از آن، می‌توان از دستور کنترلی ارائه شده برای انجام همزمان چندین وظیفه بهره برد. پایداری سیستم در فضای وظیفه و پوچ با استفاده از روش فوق به صورت تحلیلی اثبات شد. کارکرد روش ارائه شده در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی بر روی ربات KUKA LWR IV بررسی شد. با استفاده از دستور کنترلی پیشنهادی دقت در کنترل موقعیت و جهت ربات به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. به علاوه ربات در حین تعامل فیزیکی با محیط از خود رفتاری سازگار و ایمن نشان می‌دهد.

6- مراجع

- [1] A. Albu-Schaeffer, A. Bicchi, G. Boccadamo, R. Chatila, et al., Physical human-robot interaction in anthropic domains: safety and dependability, *Proceeding 4th IARP/IEEE-EURON Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments*, 2005.
- [2] S. Haddadin, A. Albu-Schaeffer, G. Hirzinger, Requirements for safe robots: Measurements, analysis and new insights, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 11-12, pp. 395-407, 2009.
- [3] S. Haddadin, A. Albu-Schaeffer, F. Haddadin, J. Rosmann, G. Hirzinger, Study on soft-tissue injury in robotics, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 8, No. 4, pp. 20-34, 2011.
- [4] H. Sadeghian, L. Villani, M. Keshmiri, B. Siciliano, Task-space control of robot manipulators with null-space compliance, *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 30, No. 2, pp. 493-506, 2013.
- [5] E. Magrini, F. Flacco, A. De Luca, Control of generalized contact motion and force in physical human-hobot interaction, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seatel, Washington, USA, 2015.
- [6] E. Magrini, F. Flacco, A. De Luca, Estimation of contact forces using a virtual force sensor, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, Chicago, USA, Sept. 14-18, 2014.

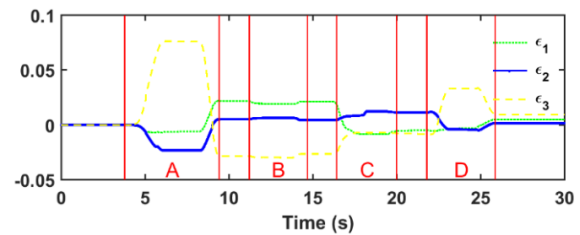


Fig. 11 External torque applied to the robot body (top), orientation regulation error quaternion parameters (down): without using observer
شکل 11 گشتاور خارجی وارد بر بدنه‌ی ربات (بالا) و پارمترهای کوآترنیون خطای تنظیم جهت وظیفه‌ی اول (پایین) در آزمایش بدون استفاده از مشاهده‌گر

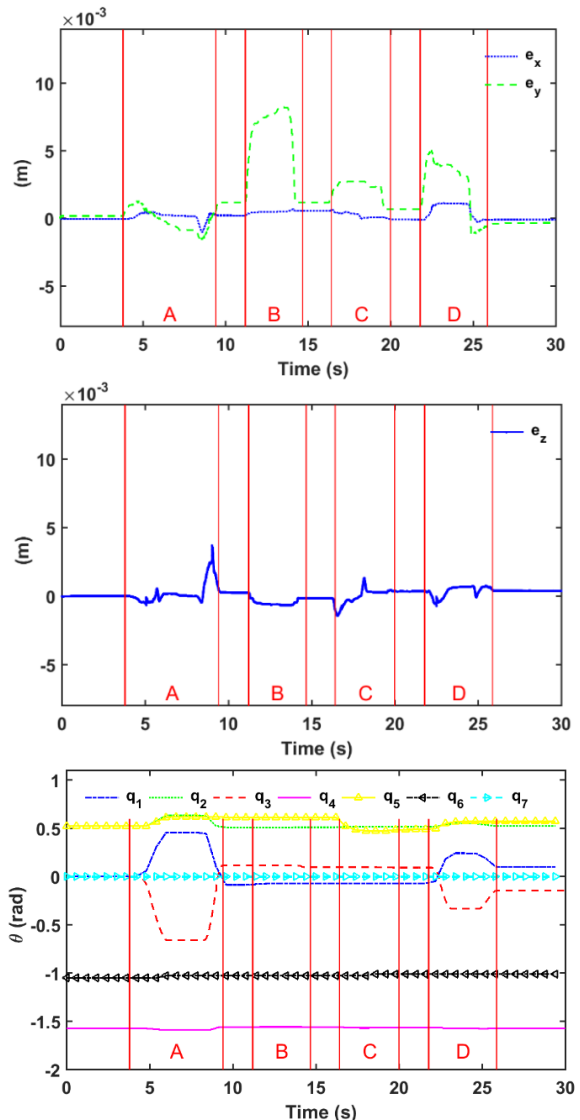


Fig. 12 1st task position error (top), 2nd task position error (middle) and joint space trajectory (down): without using observer

شکل 12 خطای موقعیت در وظیفه‌ی اول (بالا)، وظیفه‌ی دوم (وسط) و موقعیت مفاصل (پایین) در آزمایش بدون استفاده از مشاهده‌گر

وظیفه‌ی اول) و در بازه‌ی "C" به عضو 7-ام ربات (تصویر سمت چپ در شکل 8) محل تنظیم جهت در وظیفه‌ی اول، وارد می‌شود.

با مقایسه خطای تنظیم جهت (شکل 9 و شکل 11) و خطای موقعیت (شکل 10 و شکل 12) در دو آزمایش انجام شده، ملاحظه می‌شود در آزمایش اخیر، دقت ربات در انجام وظایف تعریف شده کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته-

- Nov - 01 Dec, 2007.
- [21] K. Bouyarmane, A. Keddar, Using multi-objective controller to synthesize simulated humanoid robot motion with changing contact configuration, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sept. 25-30, 2011.
 - [22] M. Liu, Y. Tan, V. Padoris, Generalized hierarchical control, *Autonomous Robots*, Vol. 40, No. 1, pp. 17-31, 2016.
 - [23] B. Siciliano, J. J. E. Slotine, A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems, *Advanced Robotics*, Pisa, Italy, 1991.
 - [24] F. Flacco, A. De Luca, A reverse priority approach to multi-task control of redundant robots, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, IL, USA, Sept. 14-18, 2014.
 - [25] M. Mistry, J. Michael, S. Schaal, Task space control with prioritization for balance and locomotion, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, Oct. 29 – Nov. 2, 2007.
 - [26] F. Flacco, A. De Luca, O. Khatib, Prioritized multi-task motion control of redundant robots under hard joint constraints, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Algarve, Portugal, Oct. 7-12, 2012.
 - [27] O. Khatib, A unified approach for motion and force control of robot manipulators: the operational space formulation, *IEEE Journal of robotics and automation*, Vol. RA-3, No. 1, pp. 43-53, 1987.
 - [28] C. Ott, *Cartesian Impedance Control of Redundant and Flexible-Joint Robots*: pp. 45-62, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
 - [29] B. Nemec, L. Zlajpah, D. Omrcen, Comparison of null-space and minimal null-space control algorithms, *Robotica*, Vol. 25, No. 5, pp. 511-520, 2007.
 - [30] A. De Luca, G. Oriolo, Nonholonomic behavior in redundant robots under kinematic control, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 5, pp. 776-782, 1997.
 - [31] A. De Luca, R. Mattone, Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control, *IEEE Internationalconference on Robotic and Automation*, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005.
 - [32] B. Siciliano, L. Sciacivco, L. Villani, G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*, pp. 54-56, Glasgow: Springer, 2008.
 - [33] A. Iggidr, G. Sallet, On the stability of nonautonomous systems, *Automatica*, Vol. 3, No. 1, pp. 167-171, 2003.
 - [34] C. Ott, A. Kugi, Y. Nakamura, Resolving the problem of non-integrability of nullspace velocities for compliance control of redundant manipulators by using semi-definite lyapunov functions, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008.
 - [35] P. Chang, A closed-form solution for inverse kinematics of robot manipulators with redundancy, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 5, pp. 393-403, 1987.
 - [7] A. De Luca, F. Flacco, Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration, *IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Roma, Italy, June 24-27, 2012.
 - [8] M. Fritzsche, N. Elkmann, E. Schulenburg, Tactile sensing: A key technology for safe physical human robot interaction, *6th ACM/IEEE International conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Lausanne, Switzerland, March 6-9, 2011.
 - [9] A. C. Smith, F. Mobasser, K. Hashtrudi-Zaad, Neural-Network-Based contact force observers for haptic applications, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 6, pp. 1163-1175, 2006.
 - [10] A. De Luca, A. Albu-Schaffer, S. Haddadin, G. Hirzinger, Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight robot arm, *Proceeding of the 2006 IEEE/RSJ International Conference On Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, Oct. 9-15, 2006.
 - [11] N. Aghakhani, M. Geravand, N. Shahriari, M. Vendittelli, G. Oriolo, Task control with remote center of motion constraint for minimally invasive robotic surgery, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013.
 - [12] A. Karami, H. Sadeghian, M. Keshmiri, Multi-task control of multi-contact manipulators during accidental interactions with robot body, *RSI International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, Oct. 25-27, 2015.
 - [13] H. Sadeghian, L. Villani, M. Keshmiri, B. Siciliano, Dynamic multi-priority control in redundant robotic systems, *Robotica*, Vol. 31, No. 7, pp. 1155-1167, 2013.
 - [14] C. Ott, A. Dietrich, A. Albu-Schäffer, Prioritized multi-task compliance control of redundant manipulators, *Automatica*, Vol. 53, pp. 416-423, 2015.
 - [15] J. Nakanishi, R. Cory, M. Mistry, J. Peters, S. Schaal, Operational space control: a theoretical empirical comparison, *International Journal of Robotics Researches*, Vol. 27, No. 6, pp. 737-756, 2008.
 - [16] H. Sadeghian, L. Villani, Z. Kamranian, A. Karami, Visual Servoing with Safe Interaction using Image Moments, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Sept 28 - Oct 2, 2015.
 - [17] L. Sentis, J. Park, O. Khatib, Compliant control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots, *IEEE Transaction of Robotics*, Vol. 26, No. 3, pp. 483-501, 2010.
 - [18] O. Khatib, S. Y. Chung, SupraPeds: Humanoid contact-supported locomotion for 3D unstructured environments, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, May 31 - June 7, 2014.
 - [19] Y. Oh, W. Chung, Y. Youm, Extended impedance control of redundant manipulators based on weighted decomposition of joint space, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 15, No. 5, pp. 231-258, 1998.
 - [20] C. Collette, A. Micaelli, C. Andriot, P. Lemerle, Dynamic balance control of humanoids for multiple grasps and non coplanar frictional contacts, *7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 81-88, 29