ماهنامه علمى پژوهشى

mme.modares.ac.ir

تحلیل حرکتی ساختارهای رباتهای پیوسته با محرک کابل

2 مهدی مامداد^{1}، آر مان مردانی

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود ، شاهرود 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود * شاهرود، صندوق پستی bamdad@shahroodut.ac.ir 3619995161

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 04 اردیبهشت 1393	این مقاله به بازوان رباتیک پیوسته که از کابل محرک بهره میبرد، میپردازد. رباتهای پیوسته قدرت مانور بهتری از رباتهای سری متداول با رازمان مان با زشان مردهند به خصص در محطهای بههدینچته انطاق ذاته این بیاتها باعث مرشد پیخیند مرتباها مناسبت با با
پذیرش: 25 مرداد1393 ارائه در سایت: 19 مهر 1393	باروان طلب را مسان می دهند به حصوص در محیدهای با مهرویات. اطلبی دانی این بالی بالک می شود بر فرار و محاص مناسباری را ب اجسامی که با آن روبرو می شوند، ارائه کنند. در این مقاله، مطالعه جامعی شامل طراحی مکانیکی، تحلیل سینماتیک، دینامیک و کنترل ربات
کلید واژگان:	صفحه ای پیوسته مهرهای ارائه میشود. هدف اصلی، دستیابی به ترکیبی مناسب از کابل.های شاخهای در ساختار مهرهای است، که بیشترین
ربات های پیوسته	دوران را در کنار انتقال بیشینه گشتاور مهره ها حاصل کند. معادلات لاگرانژ برای این مسئله دینامیک به کار گرفته شده و سپس ربات ساختار
محرک کابل	پیوسته کنترل میشود. محدودیت های حرکتی، تنش تسلیم و لغزش برای شرایط مختلف بارگذاری در نظر گرفته شده است. نیروی داخلی
مهره	کابلها، گشتاور موتور محرک و میزان زاویه چرخش در طول مسیر حرکت ربات ارزیابی شده و اثرات پیکربندی کابل ها و نسبت هندسی با
هندسه	مقایسه عملکردی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی، اثر بخشی طرح پیشنهادی و کنترلر را نشان میدهد. با توجه به بحث پیش
	رو، رباتهای پیوسته و بازوان رباتیکی با درجات آزادی اضافی بستر مناسبی برای تحقیقات عملی و نظری است.

Motion analysis of continuum robots structures with cable actuation

Mehdi Bamdad1*, Arman Mardany2

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran. 2- Department of Mechatronic Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran.

*P.O.B. 3619995161, Shahrood, Iran, bamdad@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 24 April 2014 Accepted 16 August 2014 Available Online 11 October 2014	This paper focuses on a class of continuum robotic manipulators that uses cables for actuation. Continuum robots promise better maneuverability than traditional rigid-link robots in cluttered environments, and their inherent compliance renders them gentler to objects they encounter. A comprehensive study is presented including the theoretical analysis of the mechanical design,
Keywords: Continuum robots Cable-actuated Back bone Geometry	kinematics, and dynamics and tracking control of a planar continuum backbone robot. The main goal is to achiev a branched cable configuration in backbone structure, with maximum rotation in addition to the maximum torque for links. Lagrange's equations are applied to the dynamic problem and the system is controlled. This paper explores the motion limitations, yield stress and sliding problem for different loading conditions. The cable internal forces, actuation torque and angle of rotation are investigated during the motion. The comparative performance analysis is applied on robot structures considering cable configuration and geometrical ratio. The simulation results illustrate the efficiency of the proposed design and controller. Nevertheless, the field of continuum and hyper-redundant manipulation holds great promise in the experimental and theoretical domains.

1- مقدمه

ساختار هندسی متمرکز است. ساختارهای پیوسته موجود بنا به تنوع کاربرد، تفاوت بسیاری با یکدیگر دارند. از آنجایی که دسته مهمی از رباتهای پیوسته، توسط کابلهای انتقال قدرت تغذیه می گردند، ربات پیوستهی محرک کابلی در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد.

رباتهای محرک کابل بسته به آرایش اجزا در قالب ساختارهای سری و موازی قابل تحلیل هستند. اگرچه در این مقاله، ربات پیوسته (ساختار پیوسته) از چیدمان سری بهره میبرد، ساختارهای موازی قابلیتهای دیگری در حفظ تعادل، فضاى كارى وسيع و ظرفيت ديناميكي ايجاد مى كنند [2]. ساختار حرکتی مبتنی بر کابل به دو دسته بدون پایان (حلقه بسته

بازوهای رباتیک مدتها است که چهارچوب اصلی بسیاری از فعالیتهای صنعتی، پژوهشی و نظامی را شکل میدهند. یکی از بخشهای نسبتاً جدید، شاخه رباتهای ساختار پیوسته است. فعالیتها در این زمینه از حدود 40 سال پیش آغاز شده است. ربات ساختار پیوسته از طبیعت ایده گرفته شده-است. ساختار حرکت پیوسته و دامنهدار مار، قابلیت حرکت گسترده بازوان هشتپا و ماهی مرکب با حرکت موجداری که به پیشرانش منجر می گردد، الهام بخش پژوهندگان بوده است[1]. این پژوهش بر تحلیل حرکت و

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.12.7

کابل) و پایان پذیر (اتصال مهره-کابل) تقسیم می گردند[3] که هردو شیوه از هزینه، وزن کم و استهلاک پایین برخوردارند. در کنار این مزایا، بنا بر ساختار هندسی و دینامیکی، ناهنجاریهایی را نیز به سیستم می افزایند که از جمله آن می توان به افزایش نوسانات و انعطاف پذیری ناخواسته، کاهش قابلیت حمل بار و افزایش درجات اضافی آزادی اشاره کرد[4].

یکی از کاربردهای متداول، استفاده از این ساختارها با تعداد بازوی محدود در زمینه انگشتهای مکانیکی است[5]. برای نمونه، انگشت با سه بازوی پیوسته برای عمل گرفتنِ اجسام پیشنهاد شده است[6]. اغلب ربات-های مهرهای با این هدف به کار گرفته میشوند؛ که تعداد زیادی بازو به کمک تعدادی محدودی موتور به پیش رانده شوند. معمولاً یک کابل، چندین چرخک (پولی) را به صورت مشترک و سری حرکت میدهد[7] طوری که بازوها دارای تغییرات زاویهای نسبی برابر باشند. البته این شرایط ایده آل در مواردی به دلیل ساختار انتقال حرکت و نحوه ورود اصطکاک به معادلات برآورده نمیشود[8].

رباتهای مهرهای کاملاً مقید سینماتیکی، ضربهپذیری بالایی ندارند؛ و امکان ویرانی ساختار تحت بارهای ضربهای افزایش می یابد. کابل به عنوان یک جزء اساسی این ساختارها، به تنهایی قابل تحلیل و دارای اهمیت است، به گونهای که انعطاف پذیری کابل به عنوان فنریت ساختار مهرهای تلقی می گردد [7]. در ساختارهای طبیعی، این انتقال قدرت کابلی و انعطاف پذیری، قابل کنترل است[8]؛ در ربات های کابلی، انتقال قدرت میتواند به مهم مفاصل انجام گیرد [9]. کابل های شاخهای به ربات کمک می کند تا با یک رشته کابل متصل به محرکه، چندین بازوی رباتیکی را کنترل کند. انگشتان رباتیک که به وسیله این کابل و یا چند کابل کنترل می شوند؛ متأثر از مدل دینامیکی بازوها و بدنه است. انعطاف پذیری کابل در اغلب موارد خطی در نظر گرفته می شود؛ اما مواردی وجود دارد که پژوهشگران این انعطاف پذیری را به صورت غیرخطی شبیه سازی می کنند[1].

علاوه بر موضوع انعطاف پذیری، نحوه اعمال نیروی خارجی و آرایش محرکههای داخلی نیز اهمیت دارد. برخی ربات ها توسط یک کابل کنترل میشوند که از دو طرف به موتور متصل است؛ اما گروهی دیگر دارای دو کابل جفت شده میباشند که از هر طرف به یک محرکه متصل است[11]. این امر به دلیل نبود قابلیت انتقال قدرت در کابل ها در شرایط فشار است. جفت شدن دو کابل کمک میکند؛ تا زمانی که یک کابل دیگر توان اعمال فشار را ندارد کابل دیگر با اعمال کشش، نقص را جبران نماید. همین امر سبب به وجود آمدن راهبردهای گوناگون کنترلی برای این گونه از رباتها شده است. این بدان معناست که یک ربات با کابل جفت شده مرکب با دو موتور کنترل میشود و یک ربات با یک کابل همواره در کشش، با یک موتور کنترل میگردد.

وجود کابل های شاخهای در رباتهایی که به صورت کابل های جفت شده استفاده میشوند؛ سبب ایجاد ساختار دینامیکی خاصی می گردد که از طرفی قابلیت ایجاد تنشهای همواره کششی را بر روی ربات دارد؛ و از طرفی می تواند ربات را از هر دو طرف به صورت فعال کنترل کند[12].

درحالی که اغلب سیستم ها فقط دستور کشش میدهند و این فرمانهای یکطرفه منجر به واکنش شدید و مشکلات دیگر در حرکت بازوی رباتیکی می گردد، الگوریتم مطرح شده در [13] اجازه میدهد هر دو نیروی فشار و کشش به محرک فرمان داده شود و اطمینان حاصل میشود که کابل

شل نشده است.

سیستم کنترل بر اساس الگوریتم کنترل امپدانس تطبیقی که در [14] پیشنهاد شده میتواند نیروی تماس را نزدیک به آنچه انتظار میرود، حفظ نماید. زمانی که موقعیت و سختی نامشخص در محیط پیرامون وجود دارد، الگوریتم می تواند پارامترهای امپدانس را به طور غیر مستقیم تنظیم نماید. همچنین اصطکاک می تواند روی عملکرد کنترل تأثیر بگذارد، به طوری که بایستی از مدل اصطکاک برای کابلها و مغاصل بهره برد[15].

سایش کابل به ساختار مهره، و یا محل اتصال مهرها به هم میتواند عامل ایجاد اصطکاک در ساختارهای محرک کابلی باشد. مدیریت اصطکاک در این مکانیزمهای زیرمحرک یک چالش است که اصطکاک کمتر در انتقال نیرو ترجیح داده میشود[16]. در این نوع رباتهای مهرهای، اصطکاک نیروی مطلوبی تلقی نمیشود و با هرزگردها و روغنکاری، تا حد مناسبی اصطکاک را از بین میبرند. در مواردی نیز، نه تنها اصطکاک حذف نشده بلکه دینامیک سیستم بر مبنای اصطکاک بنا شده است[17].

در این پژوهش تلاش شده است تا پس از بررسی ساختار عمومی ربات های پیکر پیوسته، تأثیر هندسه با نسبت هندسی معرفی شده، در دینامیک ساختار دیده شود. در ادامه از کابل های شاخهدار در ساختار مهرهای بهره گرفته شده است. با استفاده از پاسخ معادلات دینامیک و بررسیهای سینماتیک، بهترین تناسب بین پارامترهای هندسی با در نظر گرفتن عواملی همچون حداکثر زاویه چرخش هر مهره و گشتاور بیشینه منتقل شده به هر مهره، به دست آمده است. پس از رسیدن به یک ساختار هندسی کارا و ترکیب آن با کابل های انتقال توان شاخهای، به تحلیل مکانیکی ساختار حاصله پرداخته شده و پاسخ به ضربهی خارجی بررسی شده است. در نهایت پس از انتخاب ساختار مهره مثلثی با کابل شاخهای و نسبت هندسی مناسب، کارکرد کنترلی ساختار ارزیابی شده است. کنترل کنندههایی برای چندین آزمایش با وضعیتهای بدون بارگذاری، در حضور نیروی خارجی و در حضور ضربه خارجی طراحی شده است. در مجموع نوآوریهای این در حضور ضربه خارجی طراحی شده است. در مجموع نوآوریهای این

1-استفاده از پارامتر هندسی معرفی شده، در دستیابی به ساختار هندسی مناسب

2-استفاده از کابل های شاخه ای در ترکیب با ساختار مهره ای.

3-در نظر گرفتن لغزش و برخورد در بررسی های دینامیکی با استفاده از مدل برخورد.

4-در نظر گرفتن معیار تنش در بررسی کارکرد کابل ها.

2- دسته بندی ساختار ربات های پیوسته

ساختارهای سینماتیکی و انتقال حرکت، بنا بر نوع و کاربرد به دو دسته دارای مهره و چرخک تقسیم بندی میشوند. ساختار مهره ای همچون ستون مهرههای بدن انسان، شامل تعداد زیادی مهرههای به هم پیوسته است که با یک یا چند محرکه محدود و از طریق کابل هدایت میشود. در ساختار دیگر چرخک موجب انتقال حرکت از محرکه کابلی به بازوان رباتیک میگردد. در 0 دو نمونه مشاهده میگردد. 0- الف یک خرطوم مصنوعی را نشان میدهد که با مهره ساخته شده است و شکل ب یک انگشت مصنوعی را نشان میدهد که به وسیله چرخک هدایت شدهاست. درجه آزادی سیستمها بنا بر تعداد محرکه های به کار رفته میتواند متغیر باشد. در 0. نمونه ساختارهای مهرهای محرک کابل با آرایشهای متفاوت شش گانه نمایش داده شده اند.









شكل2 دسته بندى عمومى كابل ها

3- سینماتیک و قیود حرکتی

در پژوهش های گذشته مبناهایی همچون نحوه اتصال تاندون به بدنه برای تقسیم بندی ربات های مهره ای در نظر گرفته میشد[3]. در این مقاله، مبنای تقسیم بندی بازوان سری محرک کابلی؛ شکل و ابعاد هندسی مهره است. در آنها اعضا به طور متوالی پشت سر هم قرار گرفته و عملگرها آنها را به صورت منفرد و یا دسته ای حرکت می دهند. در این میان، بازوان پیوسته بصورت دسته ای و عموماً توسط یک عملگر به حرکت در میآیند.

در جدول1، روابط حاکم بر دستهبندی نمونههای نمایش دادهشده 0، به ترتیب تشریح شده است. در 0، هر دو نوع ساختار اصلی با پارامترهای هندسی بیان شده است.

در شکلS، r شعاع چرخک و نصف عرض مهره، X زاویه تماس کابل با

چرخک و a طول بازوی ربات است. فرم کلی معادله سینماتیک این رباتها در رابطه (1) بیان شده است. سطر اول بردار، نمایانگر جابجایی مرکز مهره در راستای افق، سطر دوم، جابجایی در راستای عمود و سطر سوم زاویه نسبت به مهره قبل است.

$$q_{i} = \begin{cases} \left[\sum_{j=1}^{i-1} \cos\left(\sum_{k=1}^{j} \theta_{k}\right) + 0.5 \cos\left(\sum_{c=1}^{i} \theta_{c}\right) \right] \\ \left[\sum_{j=1}^{i-1} \sin\left(\sum_{k=1}^{j} \theta_{k}\right) + 0.5 \sin\left(\sum_{c=1}^{i} \theta_{c}\right) \right] \\ \sum_{k=1}^{i} \theta_{k} \\ a \begin{bmatrix} 0.5 \cos(\theta_{1}) \\ 0.5 \sin(\theta_{1}) \\ \theta_{1} \end{bmatrix}, i = 1 \end{cases}$$



رابطه **(2)(1**(نمایشدهنده ماتریس ژاکوبین _i*I* هر بازو است. i شمارگان مهره، _iq بردار مشخصات سینماتیک مرکز بازو i و θ زاویه هر بازو نسبت به بازوی قبلی است.

0







41

 $\tau_i = r(T_{ir} - T_{il})$

جدول 2 قيود هندسي ساختار ها		ساختار	جدول1 قیود سینتیکی ساختار	
قید هندسی مهره	شماره	نوع ساختار	قيد ديناميكي موتور	
$r + r\cos(\theta_i) - a\sin(\theta_i)$		مهره يک طرفه	$T_{i=1} = -\frac{\tau_m}{R_m} + T_p$	
$\tau_{ir} = rT_{ir} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2r^2 - 2r(\sin(\theta_i) + \sin(\theta_i))}}\right)^2}$	1	مهره دو طرفه	$T_{ir} = -\frac{\tau_{m_i}}{R_m} + T_p$	
$\tau_{il} = rT_{il} \sqrt{1 - \left(\frac{-r + r\cos(\theta_i) + a\sin(\theta_i)}{\sqrt{2r^2 + a^2 - 2r(\sin(\theta_i) + a\sin(\theta_i))}}\right)^2}$		کابل مشترک	$T_{il} = \frac{\tau_{m_i}}{R_m} + T_p$	
$\tau_{ir} = rT_{ir} \sqrt{1 - \left(\frac{r + r\cos(\theta_i) - a\sin(\theta_i)}{\sqrt{2r^2 - 2r(\sin(\theta_i) + \sin(\theta_i))}}\right)^2}$	2	مهره دو طرفه کابل مستقل	$T_{ir} = -\frac{\tau_{m_i}}{R_m} + T_p$	
$\tau_{ii} = rT_{il} \sqrt{1 - \left(\frac{-r + r\cos(\theta_i) + a\sin(\theta_i)}{\sqrt{2r^2 + a^2 - 2r(\sin(\theta_i) + a\sin(\theta_i))}}\right)^2}$			$T_{il} = \frac{\tau_{m_i}}{R_m} + T_p$	
$\tau_{ir} = rT_{ir} \sqrt{1 - \left(\frac{r + r\cos(\theta_i) - a\sin(\theta_i)}{\sqrt{2r^2 - 2r(\sin(\theta_i) + \sin(\theta_i))}}\right)^2}$	3	چرخک یک طرفه	$T_{ir} = -\frac{\tau_m}{R_m} + T_p$	
$\tau_{il} = rT_{il} \sqrt{1 - (\frac{-r + r\cos(\theta_i) + a\sin(\theta_i)}{\sqrt{2r^2 + a^2 - 2r(\sin(\theta_i) + a\sin(\theta_i))}})^2}$		چرخک دو طرفه کابل مشترک	$T_{ir} = -\frac{\tau_m}{\mathbf{R}_m} + T_p$ $T_{il} = \frac{\tau_m}{\mathbf{R}_m} + T_p$	
$T_{i+1} = T_i e^{-2\mu X}$	4	م جام رخ	τ_{mi}	
$\tau_i = r(T_i - T_{i+1})$		چرف تاندن	$T_{ir} = -\frac{m}{\mathbf{R}_{m}} + T_{p}$	
$T_{i+1} = T_i e^{-2\mu X}$	5	مستقل	$T_{il} = T_{ir} e^{\mu \Sigma}$	
$\tau_i = r(T_{ir} - T_{(i+1)r} - T_{il} + T_{(i+1)l})$				

6

تحلیل حرکتی ساختارهای رباتهای پیوسته با محرک کابل

شمارہ 1

2

3

4

5

6

در جدول 2 قیود سینتیک که رابطه میان نیروی کابل ها و گشتاور روی هر مهره است، برای نمونههای 1 تا 6 0، به ترتیب بیان شده است.

در جدول 1و 2، T_{il} ، T_{mi} ، T_{mi} ، T_{il} ، T_{ic} کشش کابل سمت راست و چپ مهره *i*ام، گشتاور موثر موتور برای حرکت بازو *i* ام، شعاع پولی موتور و ضریب اصطکاک کابل هستند. $T_{i=1}$ کشش در کابل در ساختار کابل یک طرفه در یکی از مهره ها است. $T_p _m$ پیشکشش و گشتاور کل موتور میباشند. اثبات روابط جدول 2 در پیوست (لف) آورده شده است.

4- دینامیک رباتهای مهره ای و چرخک

وجه اشتراک رباتهای دارای چرخک و مهره در این پژوهش، وجود کابل برای انتقال حرکت در بازوان رباتیک پیوسته سری است. هر چند در ساختار-های مهرهای معمولاً تعداد مهره زیاد(خرطومهای مصنوعی) است و در ساختار چرخک تعداد مهره کم [6]؛ اما میتوان این دو ساختار را در یک ساختار معادلات مشابه توصیف و مقایسه کرد.

با وجود اینکه ساختار اعمال محرکه از طریق موتورها متفاوت است؛ اما به دلیل استفاده از اجزای با اینرسی و جرم یکسان، ماتریسهای ساختاری اینرسی و ژیروسکوپی همانند هستند.

اگرچه تحلیل نیرویی به دلیل تفاوت در ساختار انتقال حرکت سینماتیک و قیود مسئله، متفاوت است لیکن به دلیل اینکه انتقال قدرت در هر دو ساختار توسط کابل صورت می گیرد؛ فرضیات اساسی ذیل مد نظر است:

- 1- عدم انعطاف اجزا شامل كابلها
 - 2- عدم خزش كابلها
 - се на се н

معادلات حرکت با روش لاگرانژ استخراج شده و روابط (3) و (4) نمایش دهنده معادلات تعمیمیافته لاگرانژ در فضای ماتریسی است. رابطه (5) معادلات حرکت یک ربات مهرهای را نشان میدهد.

$$L = T - U$$
(3)
$$\partial \partial L \quad \partial L$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \theta_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = Q_i \tag{4}$$

$$H\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + G + F_c = \tau$$
(5)

که θ زاویه چرخش هر مهره است. در روابط (3) تا (5)، I و U به Q_i ترتیب پارامتر لاگرانژین، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ساختار است؛ Q_i تأثیر نیروهای خارجی بر مرکز بازو i است. H ماتریس اینرسی معادله جامع دینامیک؛ G_i تأثیر نیروی جاذبه بر بازو i و T_c هم بهترتیب بردار گشتاور خارجی و گشتاورهای ناشی از نیروهای فنریت و میرایی هستند. ماتریسهای حاصله از روش لاگرانژ در پیوست ب آمده اند.

5- پیشنهاد قانون کنترل

برای کنترل از روش خطیسازی پسخورد در فضای کاری استفاده شده است. این قانون کنترل در رابطه(6) نمایش داده شده است و برای تمامی موارد آزمایش یکسان است.

 $\widehat{H}\left(\ddot{q}_{d} + k_{p}(q_{d} - \hat{q}) + k_{d}(\dot{q}_{d} - \hat{q})\right) + \hat{h} + \hat{G} + \hat{F} + \tau_{c} = \tau$ (6)

که در رابطه (**16)،** \widehat{H} و k_d ، r, τ_c , \widehat{F} , \widehat{G} , \widehat{h}_9 \widehat{H} ، رابطه (16) در رابطه اینرسی، تخمین ماتریس نیروی جاذبه، اینرسی، تخمین ماتریس نیروی جاذبه، تخمین ماتریس نیروهای میرایی و فنری ، گشتاور محاسبه شده برای طی

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.12.7

مسیر دلخواه، ضریب کنترل کننده مشتق گیر و ضریب کنترل کننده تفاضلی است. \hat{q}_{d} سرعت حس شده توسط حسگر و \dot{q}_{d} ، \dot{q}_{d} ، \dot{q}_{d} بهترتیب سرعت، جابجایی و شتاب مسیر دلخواه در هر لحظه است.

در این قانون گشتاور مورد نیاز برای انجام حرکت مطلوب به صورت پیشخورد به سیستم داده می شود. این کار به قانون کنترل کمک می کند تا با دقت و کارکرد بهتری عمل کند. الگوریتم شبیه سازی در شکل 4 به تصویر کشیده شده است. بخش الف در شکل 4 حل کلی را نشان میدهد و شکل 4-ب شامل قسمت تشريح شده موتور در دياگرام كلى است.

معادلات دینامیک سیستم که از روش لاگرانژ استخراج شد توسط الگوریتم محاسباتی در نرمافزار متلب کنترل می شود. در مدلسازی به راحتی با اعمال یک قانون کنترل ساده و خطی سازی دادهها در پسخورد میتوان ترمهای غیر خطی را حذف و با اعمال کنترل به ردگیری مناسب دست یافت. از جمله موارد اختلاف با مدل واقعی که اجازه این کار را نمیدهد؛ عبارتهای ناخواسته دینامیک و تأخیر پردازنده و حسگرها است. بنابراین تأخیر حسگرها و پردازنده ها در الگوریتم شبیه سازی در نظر گرفته شده است.

6- شبیه سازی ربات مهرهای

با هدف تحلیل رباتهای با ساختار پیوسته، با استناد به جداول 1 و 2، دو مورد شماره 2 و 5 برای معرفی دقیقتر شبیه سازی انتخاب میشود. "مهره دو طرفه کابل مشترک" و "چرخک دو طرفه کابل مشترک" با مقادیر عددی پارامترها در جدول 3 مقایسه میشوند.

6-1- آزمون ساختار مقاوم

نقطه شروع حركت و وضعیت اولیه این رباتها نظیر انگشت های رباتیكی افقی

در نظر گرفته میشود[5]. در اولین آزمایش، ربات در وضعیت افقی قرار داده شده و یک نیروی خارجی بر نقطه انتهایی به صورت عمودی مطابق شکل 5 اعمال می شود؛ در حالی که موتور قفل شده و توان چرخش ندارد. هدف یافتن بیشینه نیروی قابل تحمل ساختار ربات است.

بیشینه تأثیر نیرو بر روی ساختار، که مهرهها و چرخکها را وادار به حرکت میکند، در وضعیت توصیف شده، رخ میدهد. لا نشان دهنده زاویه بازو با راستای کابل ها در نقطه اتصال به مهره، ۲ زاویه راستای مهره باراستای کابل کشش همان مهره و R، R به ترتیب بازوی گشتاور و شعاع چرخک هستند. در آزمون ساختار مقاوم، یک نیرو به انتهای هر دو ساختار اعمال می شود. نیرو در یک ضربه با محیط انعطاف پذیر، همواره به صورت یک زنگوله است که سطح زیر آن نمایان گر تغییر مقدار تکانه کل سیستم برخوردکننده و ربات است. مهم ترین بخش این نمودار، بیشینه نیروی وارد شده است؛ که تقریباً در نصف زمان ضربه اعمال می گردد. اغلب مدل برخورد، یک سیستم فنر- دمپر در نظر گرفته میشود[18]. رابطه اساسی مدل نیروی برخورد در رابطه(7) آورده شده است.

$F = \begin{cases} k[x(t)]^{\alpha} & x > 0, \\ 0 & \ddots & \ddots \end{cases}$ (7)

lpha که F نیروی خارجی ناشی از ضربه، k ضریب سختی سطح برخورد و Fضریب متغیر با شکل سطح برخورد است. x میزان فرو رفتگی دو جسم در نقطه برخورد در یکدیگر است. در این شبیه سازی، مقادیر درنظر گرفته شده برای پارامترها در جدول 3 آورده شده است. lpha در سطوح ایدهآل 1/5 در نظر گرفته میشود[19].



شكل4 (الف) فلوچارت كنترلى (ب) ساختار موتور در الگوريتم حل مسئله

مہدی بامداد و آرمان مردانی

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.12.7

محرك كابل	ىتە با	های پیوس	فای ربات،	ساختاره	حركتى	تحليل
-----------	--------	----------	-----------	---------	-------	-------

و آرمان مردانی	مہدی بامداد
----------------	-------------

در (11) به دست میآید. رابطه(11) بیشینه نیرو با توجه به مرز لغزش را بیان میکند. باید بیشینه نیرو با توجه به مرز تنش نیز بررسی گردد. حداکثر نیروی قابل اعمال F_P بر انتهای ساختار چرخک و F_T بر ساختار مهره است. طبق روابط (12-15) داریم:

$$F_{P_i} < \frac{2r_i(\sigma_y A - T_p)}{R}$$
(12)

$$F_{T_i} < (\sigma_y A - T_P) \frac{2r_i}{R} \cos(\beta_2)$$
(13)

$$F_{P} = \max[F_{P_{i}}]$$
 (i = 1,2,3) (14)

$$F_T = \max[F_{T_i}]$$
 (*i* = 1,2,3) (15)

درحالی که A و σ_v سطح مقطع کابل و تنش تسلیم کابل است و γ نصف زاویه بین دو کابل یک چرخک است. بیشینه نیروی قابل تحمل برای هر ساختار در شکل b نمایش داده شده است. ساختار با چرخک همواره در خطر لغزش قرار دارد و بنابراین بازوان مهرهای ساختار پیوسته در محیطهای ناشناخته و تحت ضربات احتمالی سیستم مهره میتواند انتخاب مناسب تری باشد.

با توجه به رابطه (11) و میزان بیشینه نیروی آستانه ناپایداری در شکل6، مدلسازی دینامیکی ضربه در انتهای هر دو نوع زنجیره مطابق شکل7 صورت می گیرد. این ضربه بیشینه نیرویی معادل 18 نیوتن (برابر با نیروی آستانه پایداری از شکل5) را به انتهای ربات مهره ای وارد می کند با توجه به پروفیل نیروی ضربه به انتهای بازوی آخر و با توجه به روابط (14) و (15)میزان تنش محاسبه می شود. این پروفیل به صورت شبه گوسی رشد و نزول پیدا می کند؛ که ناشی از فنریت نفوذ دو جسم در یکدیگر است[19]. نمودار شکل 8، برخلاف شکل 7 بر مبنای فرض عدم لغزش ساختار چرخک به دست آمده است.

مشاهده می شود که ساختار چرخک با فرض عدم لغزش نیز ضعیفتر از ساختار مهره است و زودتر به حالت تسلیم می سد. در شکل8 نیروی پروفیل ضربه سبب ایجاد دو تنش در بدنه کابل ها شده است که تنش در ساختار چرخک به شدت بالاتر از تنش در ساختار مهرهای است و این خود سبب گسستگی سیستم در ساختار چرخک می گردد. در شکل 9-ب، بیشینه زاویه قابل چرخش مهره ها نسبت به هم تا حدی که توانایی اعمال گشتاور وجود داشته باشد، نشان داده شده است.







شکل5 تعادل نیروها میان کابل ها و نیروی خارجی روی بازویچرخک

کشش کابل های روی یک پولی به واسطه اصطکاک مطابق معادله (8-10) تعریف میشود. همچنین میزان نیروی کابل چپ و راست متناسب با پیش کشش و نیروی خارجی نیز بدست میآید[17]. با جایگذاری روابط (8-10) در یکدیگر رابطه (11) حاصل میگردد.

$$T_l e^{-\Sigma \mu} = T_r \tag{8}$$

$$T_{l} = T_{p} + \frac{Fr}{\frac{2R}{Fr}}$$
(9)

$$T_r = T_p - \frac{1}{2R}$$

$$2rT_r (1 - e^{-X\mu})$$
(10)

$$F \leq \frac{-r_p(\mathbf{1} - e^{-\chi_\mu})}{R(\mathbf{1} + e^{-\chi_\mu})} \tag{11}$$

بعد از بیان نیرو و پیش کشش مورد نیاز در معادله (11)، با در نظر گرفتن تنشهای بیشینه در حالت پلاستیک کابلها، حداکثر نیروی قابل اعمال بر انتهای ربات به دست میآید. نیروی به دست آمده با F_c متفاوت است؛ بر انتهای ربات وارد میشود

میزان نیروی بیشینه که در یک ضربه می تواند به سیستم اعمال گردد، بر اساس پارامترهای هندسی و دینامیکی در ساختار چرخک با روابط (8-10)



شکل9 رابطه زاویه پیچش لولا با راستای بازو

6-2- طرح آزمون جامع حركتى

شبیهسازی مطابق شکل 10 برای رسیدن انتهای ربات به یک زاویه مشخص نسبت به پایه مطرح می شود. مشخصات فیزیکی نیز در جدول 3 نمایش داده-می شود. این نکته قابل ذکر است که آیا هندسه تأثیری بر این بیشینه نیروی قابل تحمل دارد؟ در پاسخ، آزمونی طرح شده که طی آن حداکثر نیروی قابل اعمال روی هر دو ساختار مهرهای، بر اساس هندسه به دست آمده و کنترل





شكل10 زاویه نهایی انتهای ربات (الف) ساختار شماتیک سه لينكى (ب) مدل چيدمان و اتصال كابل ها.

ردگیری ربات مهرهای پیشنهاد و اعمال میشود.

در آزمون ردگیری، هر مسیر بر مبنای تغییرات زاویهای انتهای ربات نسبت به مرجع لخت (پایه) α تعریف می شود. در این شبیه سازی، پاسخ دینامیکی به همراه گشتاور نهایی بررسی می شود. رابطه (16) نشان دهنده پارامترهای سینماتیک مسیر بر حسب t زمان شبیه سازی است.

$$\begin{array}{l} \alpha = \sin(2t) \\ \alpha = 2\cos(2t) \end{array} \tag{16}$$
$$\begin{array}{l} \alpha = -4\sin(2t) \end{array}$$

3-6- اثر نسبت هندسی و نوع ساختار در پاسخ

نسبت هندسی، نسبت طول مهره به بازوی گشتاور آن و یا بهعبارتی نسبت عرض مهره به ارتفاع آن است. با ساده سازی روابط(14) و(15)، ارتباط پارامتر هندسی arphi با بیشینه نیروها در روابط (17)و (18) حاصل شده است. رابطه (17) از جایگذاری نسبت هندسی در رابطه (11) با بیشینه نیروی اعمالی روي لينک اول به دست ميآيد.

$$F \leq \frac{2T_p (1 - e^{-(2\pi - 2\cos^{-1}\frac{1}{\varphi})\mu})}{3\varphi(1 + e^{-(2\pi - 2\cos^{-1}\frac{1}{\varphi})\mu})}$$
(17)

$$F_T \le (\sigma_y A - T_P) \frac{2}{3\omega}$$
(18)

بیشینه محدوده حرکت مهره با نسبت هندسی، مطابق با متغیرهای نمایش داده شده در شکل8-ب از رابطه (19) بهدست میآید. پارامترartheta بیان کننده حداکثر زاویه چرخش مهره نسبت به مهره قبل، بر مبنای پارامتر نسبت هندسی arphi است.

$$\vartheta \leq \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\frac{1}{\varphi}) \tag{19}$$

ساختار چرخک این امکان را به ربات مهرهای میدهد تا با محدوده

زاویهای وسیعتری بچرخد اما در مورد ربات با ساختار مهره محدودیت وجود دارد به دلیل آنکه سیستم گشتاوری اعمال نمی کند و خطر تداخل مهرهها نیز پیش میآید. در شکل11، رابطه مستقیم سطح گشتاور با نسبت هندسی به خوبی نشان داده شده است. به علاوه یک بیشینه زاویه چرخش نیز برای هر کدام از مهرهها وجود دارد. این بیشینه زاویه در رابطه (20) نمایش داده شده و بر مبنای نسبت هندسی درشکل 12 نشان داده شده است.

اگر ربات به انتهای زاویه قابل چرخش برای هر مهره نزدیک شود، توانایی اعمال گشتاور ناشی از کشش کابل ها بر مهره کاهش مییابد. این بدان معناست که ربات در وضعیتی قرار می گیرد که موتور با گشتاور بالا، تأثیر کمی بر روی مهرهها می گذارد. این مرز زاویهای در شکل8-ب نمایش داده شده است. در این شکل، وضعیتی نشان داده شده است که هر چه کابل چپ کشیده شود تأثیری بر روی حرکت مهره ندارد. این امر به خوبی در افزایش گشتاور موتور در شکل 11 و در ثانیه 7/0 و 2/5 نشان داده شده است.

در بیشینه زاویه قابل چرخش، کابل یک طرف مهره با بازوی گشتاور هم راستا و میزان انتقال گشتاور به صفر میرسد. مطابق شکل 12، حداکثر میزان چرخش انتهای ربات 90 درجه مطلوب است.

$$-\frac{\pi}{2} < \vartheta < \frac{\pi}{2} \tag{20}$$

در نتیجه مقدار حداقلی 0/5 تا 0/7 برای میزان نسبت هندسی در شکل 12 بیان کننده بیشینه نیروی قابل تحمل حدود 60 نیوتن است. متغیر مفصلی **9** شامل زوایای به فرم رابطه (21) است:

$$q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^{\mathrm{T}}$$
(21)

اگرچه معادلات دینامیک ربات سه درجه آزادی دارند؛ ولی به واسطه قید هندسی $\theta_1 = \theta_2 = \theta_1$ سیستم دینامیکی یک درجه آزادی است[20]. معادله حرکت با روش لاگرانژ محاسبه میشود. طبق رابطه (22) داریم: $H_0\ddot{a} + C_0\dot{a} + G_0 + F_0 = T_1 + T_0$

$${}_{0}q + c_{0}q + a_{0} + r_{0} = i_{1} + i_{2} + i_{3}$$
(22)

مقادیر ترمهای گشتاوری ناشی از اینرسی، گریز از مرکز و جاذبه بر اساس پارامترهای هندسی و دینامیکی بدست میآید. طبق روابط (23-26) داریم:

$$H_o = 13.2I + 2.75Ma^2 + 4Ma^2 \cos(q) + 2Ma^2 \cos(q)^2$$
(23)

$$G_o = -gMa(2\cos(q) - 6\cos(q)^2 - 6\cos(q)^3 + 3)$$
(24)



$$F_o = \mathbf{3}c\dot{q}$$

$$C_o = (-4a^2m\sin(q) - 4a^2m\sin(q)\cos(q))\dot{q}$$
(26)

(25)

3

که پارامتر *c* نشانگر ضریب میرایی داخلی است. در شکل **12** با افزایش نسبت هندسی میزان تحمل بار کاهش مییابد و برای آنکه به مقدار حداقل نسبت زاویه مورد نظر دست یافت، باید معیار زاویه بیشینه قابل چرخیدن برای هر بازو را در نظر گرفت. در کنار این کاهش تحمل بار مزیت افزایش زاویه چرخش نیز باید در نظر گرفته شود.

در این آزمون مقادیر مختلف نسبت هندسی (عرض مهره به ارتفاع آن) سبب ایجاد گشتاورهای متفاوت شده است؛ که درشکل 11 مشاهده می شود. گشتاور موتور با کاهش نسبت هندسی پایین می آید. به همین دلیل مقدار نسبت هندسی $\frac{1}{2}$ در ادامه برای مقایسه سیستم با مهره گردنده با محرک چرخک استفاده می شود؛ که خود بنا بر شکل 12 تحمل 60 نیوتن نیرو را دارد. در ادامه، میزان گشتاور مورد نیاز برای موتورها در هر دو نوع مهره روی مسیر مرجع ذکرشده، بررسی و محاسبه شده است. نتایج این آزمون در شکل 13 آورده شده است. سطح گشتاور ساختار دارای چرخک 10 درصد کمتر از مهره است. این به دلیل اشباع شدن گشتاور روی هر مهره است؛ که موتور را وادار به اعمال گشتاور بیشتر برای انجام حرکت مورد نظر می کند. با توجه به تحلیلهای شکل 13، مهرهی ساختار چرخک مناسبتر است چون سطوح پایین تری از گشتاور را دارا است.



مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-02



شکل14 نمایانگر میزان گشتاور موتور در فرآیند پیروی از مسیر مرجع به واسطه کنترلر است. با توجه به انتخاب مهره و با استفاده از قانون کنترل پیشنهادی که در بخش کنترل بیان شده است، پیروی دینامیکی ربات از همان مسیر ذکر شده را بررسی میکنیم. در این بررسی گشتاور نهایی کنترلر و کشش کابل های راست و چپ محاسبه میگردد که به ترتیب در شکل14 و شکل15 بیان شده است. نمودارها در ابتدای بازه زمانی شبیه سازی شامل اندکی جهش است؛ که به پاسخ کنترلر برمیگردد. این جهش در پاسخ کنترلر به خاطر تعریف شرایط اولیه متفاوت و یا پاسخ لحظهای به پیشخورد همراه سیگنال گشتاور جاذبه است.

پیروی از مسیر مطلوب تابع تأخیر پردازنده و حسگر است. مجموعه تأخیر پردازش و حساسه 0/004 در نظر گرفته شده است. این مشکل سبب اختلاف در دادههای خطیساز پسخورد با میزان حقیقی است که این امر اجازه حذف کامل ترمهای غیرخطی را نمیدهد. به همین سبب در قانون کنترل از ترم-های با تأخیر استفاده خواهد شد؛ تا شبیه سازی به واقعیت



نزدیکتر گردد[21]. تأخیر در سویچینگ کنترل ها میتواند سبب نوسانات دامنه کوتاه حول مقادیر مطلوب مطابق شکل16 شود. پیروی ربات از مسیر مطلوب شبیهسازی شده و شکل 17 نشان دهنده مسیر انتهای ربات بر مبنای معیار زاویه انتها نسبت به پایه است. در این شکل، مسیر با تأخیر کمینه حسگر طی شده است و دو مسیر تقریباً بر روی هم قرارگرفتهاند. به نحوی که کنترل خطیساز به همراه پیشخورد گشتاور محاسبه شده با خطای کمتر از 2 درصد عمل می کند.

6-4- پیادہ سازی کنترلی

برای اعتبارسنجی کنترل ساختار ربات، در ادامه چندین روش کنترلی مذکور در جدول 4 بهکاربرده شده است. در اولین گام، پاسخ پله به میزان 0/1 رادیان، بررسی شده است. شکل17 نشانگر پاسخ پله بدون نیروی خارجی است.

جدول4 کنترل کنندهها				
D	Р	كنترلر	نوع	
5	7	خطی ساز پسخورد	1	
5	7	خطی ساز پسخورد با ماتریس تقریبی	2	
5	7	PD	3	
3	10	PD	4	



شکل16 پیروی بازو از مسیر مرجع با تأخیرهای زمانی



شکل18 پاسخ پله بدون نیروی خارجی مال

در گام دوم، نیروی خارجی 7 نیوتن به شکل موج سینوسی با سرعت زاویهای 2 رادیان بر ثانیه به ساختار مکانیکی ربات اعمال می شود. پاسخ کنترلی با در نظر گرفتن همزمان این نیروی خارجی و دستور مسیر پله، در شکل 19 نمایش داده شده است.



با توجه به پاسخ پله در دو حالت بدون حضور نیروی خارجی و با حضور آن، استفاده از کنترلر خطی ساز پسخورد با ماتریس های حقیقی و بدون خطا، بیشترین دقت را دارد. در ادامه ضربه هشت نیوتنی در فاصله زمانی 0/9 تا 0/93 ثانیه اعمال می شود. پاسخ ساختار به این اغتشاش با دو کنترل کننده نوع یک و سه، در شکل 20 آورده شده است.

6- نتيجه گيرى

در این پژوهش تلاش شد تا با بررسی هندسی ربات های مهرهای از دید سطوح گشتاور و کنترل مناسب به همراه کشش کابلها به ساختار مناسب کارکرد دست یافت. در این مسیر، مدلسازی دینامیکی با روش لاگرانژ محقق، و دینامیک معکوس با توجه به ساختار هندسی مهرهها محاسبه شد.

با توجه به اینکه ساختار دارای مهره 10 درصد سطح گشتاور بالاتری را روی موتورها اعمال می کند و دارای اشباع شدگی در انتهای گستره زاویهای است، ساختار پیوسته دارای چرخک مناسب تر به نظر میرسد چرا که دارای کارکرد بهینه از نظر مصرف توان است. اما با توجه به اعمال نیروی خارجی بر انتهای ربات، مشخص گردید که حتی نیروهای سطح پایین هم می توانند سبب لغزش این ساختار و بههمریختگی ساختار هندسی اصلی شوند. این امر زمانی اهمیت می یابد که کنترلر بر مبنای فرض عدم لغزش طراحی شده باشد زیرا نیروی 0/5 نیوتنی نیز میتواند یک ساختار مهره چرخک را وادار به لغزش کند. با در نظر گرفتن محیطهای ناشناخته و کارکرد ربات، ساختار مهرهای توانایی چرخش را در یک گستره زاویهای بنا به شکل مهره و نسبت هندسی آن دارد. نسبت هندسی معرفی شده در این مقاله، هر چه کمتر باشد سطح گشتاورها نیز متعادل تر خواهند بود اما سبب کاهش حداکثر زاویه چرخش می شود. این نسبت از میان چند آزمون 5/0در نظر گرفته شد که توان چرخش تا 45 درجه را در هر مهره فراهم می آورد. کنترل خطی ساز پسخورد و کنترل با روش ضرایب PID به مدل دینامیکی اعمال شده است. نتایج شبیهسازی کنتری همراه با تأخیر زمانی پردازنده و حسگر، از پیروی مناسب مسير حكايت دارد.

7- پيوست



الف -روابط هندسی

- [3] J. Lee & Y. H. Lee, Dynamic analysis of tendon driven robotic mechanisms, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 4, PP. 229-238, 2003.
- [4] H. Meckl Peter, and R. Kinceler. Trajectory determination for vibration-free motions of a flexible-joint robot, *American Control Conference*, Vol. 3. IEEE, 1994.
- [5] R. Ozawa ,K. Hashirii, Y. Yoshimura, M .Moriya & H. Kobayashi, Design and control of a three-fingered tendon-driven robotic hand with active and passive tendons. *Autonomous Robots*, 36(1-2), 67-78, 2014.
- [6] Y. Matsuoka, The mechanisms in a humanoid robot hand. Autonomous Robots, Vol. 4, No. 2, pp.199-209, 1997.
- [7] S. L. Chang, J. Lee & H. C. Yen, Kinematic and compliance analysis for tendon-driven robotic mechanisms with flexible tendons, *Mechanism and machine theory*, Vol. 6, No. 40, pp. 728-739, 2005.
- [8] S. Mori, and komada, simple tension distribution converting workspace commands for 2-joint with 3 point of 6 tendons, international conference of robotic and biometric. Thailand. 2011.
- [9] D. Sawada & R. Ozawa, Joint control of tendon-driven mechanisms with branching tendons. In *Robotics and Automation* (*ICRA*), *IEEE International Conference*, pp. 1501-1507, 2010.
- [10] T. Wimbock,C. Ott, & G. Hirzinger, Immersion and invariance control for an antagonistic joint with nonlinear mechanical stiffness. In *Decision and Control (CDC), IEEE Conference*, pp. 1128-1135, 2010.
- [11] S. Ma, S. Hirose & H. Yoshinada. Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator. *Control Systems, IEEE*, 13(1), 30-36. 1993.
- [12] A. D. Deshpande, J. Ko, D. Fox & Y. Matsuoka, Y, Control strategies for the index finger of a tendon-driven hand. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 32, No. 1, pp. 115-128. 2013.
- [13] S. Jacobsen, H. Ko, E. Iversen & C. Davis, Control strategies for tendon-driven manipulators, *Control Systems Magazine, IEEE*, Vol. 10, No. 2, PP. 23-28, 1990.
- [14] J. Chen & D. HanThe ,Control of Tendon-Driven Dexterous Hands with Joint Simulation. Sensors, Vol. 14,No. 1,pp. 1723-1739, 2014.
- [15] K. Dermitzakis, M. R. Morales & A. Schweizer, Modeling the frictional interaction in the tendon-pulley system of the human finger for use in robotics, *Artificial life*, Vol. 19,No. 1,pp. 149-169. 2013.
- [16] M. Baril, T. Laliberté, C. Gosselin & F. Routhier, On the Design of a Mechanically Programmable Underactuated Anthropomorphic Prosthetic Gripper, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 135, No. 12, pp. 121008. 2013.
- [17] J. Jung, R. S. Penning, N. J. Ferrier & M. R. Zinn, A modeling approach for continuum robotic manipulators: Effects of nonlinear internal device friction, *Intelligent Robots and Systems* (*IROS*), *IEEE/RSJ International Conference*, pp. 5139-5146. IEEE, 2011.
- [18] P. Flores, J. Ambrósio, J. P. Claro & H. M. Lankarani, Influence of the contact—impact force model on the dynamic response of multi-body systems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, Vol. 220, No. 1, pp. 21-34, 2006.
- [19] Y. A. Khulief & A. A. Shabana, A continuous force model for the impact analysis of flexible multibody systems, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 22, No. 3, pp. 213-224. 1987.
- [20] B. A. Jones, B & I. D. Walker, Kinematics for multisection continuum robots. *Robotics, IEEE Transactions*, Vol. 22, No. 1, pp. 43-55, 2006.
- [21] J. P. Richard, Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. *automatica*, Vol. *39, No.* 10, pp. 1667-1694, 2003.



$$\begin{cases} \sin(\beta_1) = \frac{(b_2 - b_1) \times (b_3 - b_1)}{|b_2 - b_1| ||b_3 - b_1|} \\ \sin(\beta_2) = \frac{(b_2 - b_4) \times (b_6 - b_4)}{|b_5 - b_4| ||b_6 - b_4|} \\ b_2 - b_1 = [r - r\cos\theta - a - r\sin\theta] \\ b_3 - b_1 = [\cos(\theta - \frac{\pi}{2}) - \sin(\theta - \frac{\pi}{2})] \\ b_5 - b_4 = [-r - r\cos(\theta + \pi) - a - r\sin(\theta + \pi)] \\ b_6 - b_4 = [\cos(\theta + \pi + \frac{\pi}{2}) - \sin(\theta + \pi + \frac{\pi}{2})] \end{cases}$$

- B. Klaassen, &K. L. Paap, GMD-SNAKE2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control, *Robotics and Automation, Proceedings. IEEE International Conference*, Vol. 4, pp. 3014-3019). 1999.
- [2] M. Bamdad, S. Faroghi, Stability measure for a parallel cable driven robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 25-34, 2013. (In Persian)