



Kinematic Modelling of Origami-Inspired Continuum Robotic Arm by Constant-Curvature Elements

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sahebsara F.¹ MSc,
Taghvaeipour A.*¹ PhD,
Ghafarirad H.¹ PhD

How to cite this article

Sahebsara F, Taghvaeipour A, Ghafarirad H. Kinematic Modelling of Origami-Inspired Continuum Robotic Arm by Constant-Curvature Elements. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(11):2729-2735.

ABSTRACT

Origami, as a paper folding art and Japanese culture, has been utilized broadly in engineering areas. The exclusive features of origami such as negative Poisson's ration, lightweight, deployable and so forth, can be considered in the design of deployable space structures, expandable shelters, drug delivery, and robots. In this study, firstly, the continuum robot with six serial modules of origami parallel structure as its skeleton and the helical springs as the compliant backbone is studied, and constant curvature kinematics was implemented in order to simplify and approximate the kinematic model. Accordingly, the kinematic model of one module was derived. Then, the robot kinematics was obtained as a series of mentioned modules. Furthermore, the proposed continuum robot was modeled by an equivalent mechanism, and a comparison was conducted between the methods to obtain a workspace. Based on the results, the modeling of the equivalent mechanism has an advantage in terms of calculation's volume compared to the constant curvature method and the workspace obtained from both methods was the same. The Jacobian matrix was obtained through the constant curvature approximation methods, which can be considered for singularity analysis in specific conditions and the analysis reveals that the singularities occur when the curve and radius are equal and symmetry is created and the other is when the radius is equivalent to zero. The paper concludes a perspective on several of the themes of current research that are shaping the future of origami-inspired robotics.

Keywords Continuum Robot; Kinematic Modelling; Constant-Curvature Element; Origami; Origami Robot

¹Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: No: 350, Hafez Street, Valiasr Square, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 64543418
Fax: -
ataghvaei@aut.ac.ir

Article History

Received: July 18, 2018
Accepted: May 21, 2019
ePublished: November 2, 2019

CITATION LINKS

[1] Continuum robots - a state of the art [2] Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: a review [3] The mechanics and positioning of highly flexible manipulator limbs [4] 4-A hyper-redundant manipulator [5] Design of a lightweight hyper-redundant deployable binary manipulator [6] Dynamics modeling of continuum manipulators by constant-curvature elements without numerical singularities [7] A survey on snake robot modeling and locomotion [8] Towards printable robotics: Origami-inspired planar fabrication of three-dimensional mechanisms [9] Origami inspired printed robots [10] Origami robot: a self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing [11] Kinematics and mobility analysis of carton folds in packing manipulation based on the mechanism equivalent [12] From origami to a new class of centralized 3-DOF parallel mechanisms [13] Origami-based robotic paper-and board packaging for food industry [14] Four motion branches of an origami based eight bar spatial mechanism [15] Kinematic analysis and stiffness validation of origami cartons [16] A novel continuum-style robot with multilayer compliant modules [17] An extensible continuum robot with integrated origami parallel modules [18] Robotic origami: self-morphing modular robots [19] Robogami: a fully integrated low-profile robotic origami. Journal of Mechanisms and Robotics [20] Tribot: a deployable, self-righting and multi-locomotive origami robot [21] SeleMori: a modular origami robot [22] Minimally actuated transformation of origami machines [23] Design methodology for constructing multimaterial origami robots and machines

مدل‌سازی سینماتیکی بازوی ربات پیوسته الهام گرفته از اوریگامی با المان‌های انحنای ثابت

فرید صاحب‌سرا MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

افشین تقوایی‌پور PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

حامد غفاری‌راد PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

اوریگامی که هنر تا کردن کاغذ و همچنین فرهنگ ژاپن است به صورت گسترده در زمینه‌های مهندسی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. ویژگی‌های منحصر به فرد اوریگامی از جمله ضریب پواسون منفی، وزن سبک، قابلیت گسترش یافتن، و غیره به منظور طراحی سازه‌های قابل گسترش، جان‌پناه‌ها، انتقال دارو و ربات‌ها نظر محققین را به خود جلب نموده است. در این پژوهش، رباتی پیوسته با شش ماژول از مکانیزم موازی اوریگامی که به عنوان اسکلت و یک فنر در هر ماژول، به عنوان ستون فقرات، مورد مطالعه قرار گرفت و سینماتیک انحنای ثابت به منظور ساده‌سازی و تقریب مدل سینماتیکی ربات پیاده‌سازی شد. بدین ترتیب ابتدا معادلات سینماتیک برای یک ماژول بدست آمدند و سپس مدل سینماتیکی کل ربات به صورت سری از ماژول‌های ذکر شده استخراج خواهد شد. به علاوه، ربات پیوسته مورد نظر به وسیله یک مکانیزم معادل مدل‌سازی شده است و مقایسه‌ای میان دو روش مذکور برای به دست آوردن فضای کاری صورت پذیرفت. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل‌سازی مکانیزم معادل از نظر حجم محاسبات نسبت به روش انحنای ثابت ارجحیت داشت و فضای کاری به دست آمده از هر دو روش یکسان بود. ماتریس ژاکوبین، از روش‌های تقریب انحنای ثابت برای تحلیل تکینگی در شرایط خاص بدست آمده است و تحلیل آن بیانگر بروز تکینگی در در مکان هندسی نقاطی از فضا بود که شعاع انحنای با طول قوس یکسان شده و تقارن ایجاد می‌کرد و حالت دیگر، زمانی که ربات بدون انحنای باشد. در نهایت چشم‌انداز پژوهش فعلی که شکل‌گیری آینده ربات‌های الهام گرفته از اوریگامی است ارائه شد.

کلیدواژه‌ها: ربات پیوسته، مدل‌سازی سینماتیکی، المان منحنی- ثابت، اوریگامی، ربات اوریگامی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

نویسنده مسئول: ataghvaei@aut.ac.ir

۱- مقدمه

ربات‌های پیوسته علاوه بر وزن سبک، قابلیت‌های حرکتی متمایزی نسبت به ربات‌های متداول با لینک‌های صلب دارند. با توجه به این قابلیت‌های ذاتی، از ربات‌های پیوسته می‌توان به منظور جابه‌جایی اجسام، پاهای ربات راه‌رونده و بازوی ربات بهره‌برداری نمود. پتانسیل فراوان در کاربردهای ربات‌های پیوسته باعث توسعه آن‌ها در دهه‌های اخیر شده است [1, 2].

ربات‌های پیوسته و بیش‌افزونه، طیف وسیعی از حرکت و کنترل را برای کل بازوی ربات فراهم می‌کنند. ویلسون و ماهاجان [3] رباتی انعطاف‌پذیر با استفاده از تعدادی المان تیوب‌پلیمری ارائه کردند و تغییر شکل الاستیک آن را که توسط فشار مایع درون آن ایجاد می‌شد، مورد بررسی قرار دادند. چیریکجیان و بوردیک [4] نیز معیارهایی برای طراحی ربات صفحه‌ای بیش‌افزونه با ۳۰ درجه آزادی را معرفی کردند و از آن برای صحنه‌گذاری سینماتیک این ربات استفاده کردند. سوچان و دوبوفسکی [5] رباتی سبک با بیش‌افزونی ساختند که زنجیری سری از ماژول‌های موازی، آن را تشکیل داده بود. دهقانی و موسویان [6] نیز مدل دینامیکی بدنه انعطاف‌پذیر ربات پیوسته را مستقل از نوع عملگر آن مورد بررسی

قرار دادند و با استفاده از بسط تیلور، از مشکل حالات تکین محاسباتی که در المان‌های انحنای ثابت رخ می‌دهد، جلوگیری کرده‌اند.

از دیگر ظرفیت‌های ربات‌های پیوسته، بهره‌برداری از آن‌ها در ماموریت‌های نجات و ناحیه‌های خطرناک می‌باشد که اغلب ربات مارمانند به دلیل پایداری بالا و قابلیت حرکت در انواع سطح‌ها، بسیار مورد توجه محققان می‌باشد [7]. ونال و همکاران [8] پژوهشی بر ربات‌های قابل چاپ انجام داده‌اند. در این پژوهش، تکنیکی برای تبدیل سطح به سیستم‌های رباتیکی ۳ بعدی ارائه شده است. در واقع با بهره‌بردن از تکنیک‌های ساخت سریع، روش ساختی با هزینه اندک و سریع برای کاربردهای دنیای واقعی صنعت رباتیک معرفی کرده‌اند. برای تحقق این هدف، طرح‌های اوریگامی برای ایجاد طیف جدیدی از سیستم‌های رباتیک مد نظر قرار گرفتند. اوریگامی با توجه به اینکه در ابتدا طرحی ۲ بعدی است، امکان استفاده از روش چاپ ۳ بعدی را برای ربات‌های قابل چاپ به ارمغان آورد. ونال و همکاران در پژوهشی دیگر [9] به منظور بهبود فرآیند ساخت ربات که نیازمند تخصص، زمان، هزینه و در برخی موارد، سفارشی‌سازی است از تکنیک‌های ساخت سریع، به طور مثال چاپ ۳ بعدی، استفاده کرده‌اند. اگرچه این روش قابلیت ایجاد هندسه‌های پیچیده را دارد و همچنین در دسترس است، اما در انتخاب مواد برای چاپگر محدودیت‌هایی را به همراه دارد. در مرجع [10] نیز که توجه پژوهش بر ربات‌های قابل چاپ می‌باشد، با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصر به فرد کاغذ، کاغذ مکترونیک را معرفی کرده‌اند.

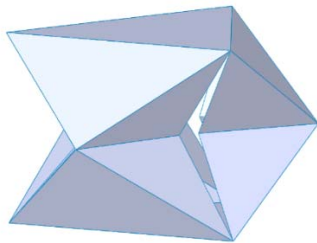
دای و همکاران پژوهش‌هایی در زمینه سینماتیک تا خوردن کاغذ، مقوا و طرح‌های اوریگامی بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ انجام داده‌اند. با توجه به اهمیت تا کردن مقوا در صنایع بسته‌بندی، دای و ریس‌جونز [11] مدلی ریاضی از هندسه کارتن‌ها و تحلیل سینماتیک آن‌ها با استفاده از تئوری پیچ ارائه کردند. در سال ۲۰۰۷ پژوهش‌بیر مکانیزم‌های موازی با الهام از اوریگامی انجام شد [12] که در آن موقعیت و هندسه مکانیزم بررسی و راه‌حل‌های گوناگون برای حل مسئله سینماتیک معکوس شناسایی شد. پتاسیل بازار بسته‌بندی با استفاده از مقوا و کاغذ در اروپا باعث شد تا دای و کالدول [13] به دنبال راه‌حل‌های اتوماسیون بسته‌بندی مواد غذایی، طرح‌های تا کردن کاغذ و مقوا از نوع اوریگامی را مورد مطالعه قرار دهند. پژوهش‌های بیشتری در سال ۲۰۱۳ توسط دای و همکاران پیرامون مکانیزم‌های اوریگامی انجام شد که در مرجع [14]، سینماتیک مکانیزم بسته‌بندی کارتن با ارائه مکانیزم معادل ۸ میله‌ای فضایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در پژوهشی دیگر [15] بسته‌بندی ۳ نوع کارتن که با تکنیک اوریگامی طراحی شده بودند، مدل‌سازی ریاضی شدند و مدل‌ها با روش تجربی صحنه‌گذاری شدند. با این دستاورد، رفتار کارتن‌ها هنگام بسته‌بندی با ابعاد و مواد مختلف قابل پیش‌بینی می‌باشد. کی و همکاران [16] ربات پیوسته‌ای تشکیل شده از چند لایه ماژول را معرفی کردند که در آن خم شدن ربات از فشرده شدن آن مستقل می‌باشد و این ماژول‌ها به گونه‌ای طراحی شده بودند که با وجود خمش قابل توجه ربات، از ایجاد اصطکاک در مفصل‌ها جلوگیری می‌کرد. در این پژوهش همچنین سینماتیک و استاتیک ربات به دست آمده است و روش‌های تجربی برای صحنه‌گذاری طراحی و تحلیل آن ارائه شده است. همچنین سینماتیک ربات پیوسته محرک کابلی با بهره‌گیری از ماژول‌های اوریگامی مدل‌سازی شده است که در آن ماژول‌های اوریگامی با مکانیزم معادل تحلیل

به دست آوردن رابطه طول تاندون‌ها با موقعیت مجری نهایی، استخراج می‌شود. سپس سینماتیک دیفرانسیلی با استفاده از المان انحنا- ثابت به دست می‌آید و ماتریس ژاکوبین ارائه می‌گردد.

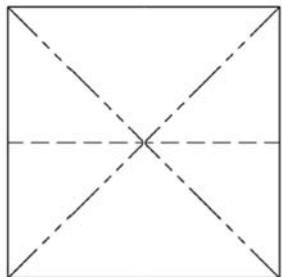
۲- طراحی ماژول اورینگامی

یک سازه اورینگامی با تا کردن الگویی از خط تاهای یک ورق کاغذی شکل می‌گیرد. در این بخش فرآیند طراحی سازه اورینگامی با ۳ درجه آزادی و مونتاژ ماژول‌ها برای تشکیل یک ربات کابلی پیوسته توضیح داده شده است.

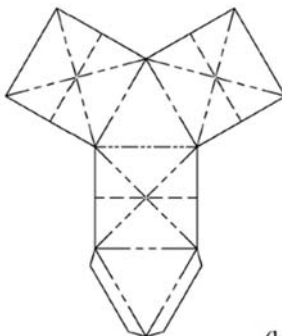
شکل ۲- الف الگوی واتریمب را نمایش داده است. این الگو از ۶ خط تا، در یک صفحه مربعی تشکیل شده است. الگوی ۲ بعدی ماژول اورینگامی برای استفاده در ربات کابلی پیوسته مطابق شکل ۲- الف می‌باشد که در آن از ۳ الگوی واتریمب و ۲ مثلث متساوی الاضلاع استفاده شده است. این طرح ۲ بعدی با ۲ فلپ در مثلث پایینی به شکل "Y" درمی‌آید و با تا کردن آن از خط تاها به حالت ۳ بعدی مطابق شکل ۱ تبدیل می‌شود.



شکل ۱) ماژول: سازه موازی اورینگامی ساخته شده از کاغذ



(a)



(b)

شکل ۲) (a) الگوی ۲ بعدی خط تا واتریمب، (b) الگوی ۲ بعدی ماژول اورینگامی با ۳ الگوی واتریمب و ۲ مثلث متساوی الاضلاع

۳- تحلیل سینماتیک

در این بخش، مدل سینماتیک یک المان به ترتیب با استفاده از المان‌های انحنا- ثابت و مکانیزم معادل استخراج می‌شود. ابتدا

شده‌اند و با ۲ نگاهت امکان انتقال از فضای پیکربندی به فضای کاری و از فضای عملگرها به فضای کاری فراهم آمده است [17].

پایک و همکاران در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در مورد مکانیزم‌هایی با قابلیت پیکربندی مجدد و ربات‌های اورینگامی انجام داده‌اند. پژوهش [18] ربات اورینگامی ماژولار که امکان وصل شدن و قطع شدن المان‌های ربات را مهیا می‌سازد را معرفی می‌کند و در نتیجه آن، شکل‌ها و الگوهای پیچیده و نوینی را به ارمغان می‌آورد. این ربات تکنیک منحصر به فردی از ساخت ربات‌ها، با ادغام عملگرهای حافظه‌دار و مدارهای الکترونیک انعطاف‌پذیر را ارائه می‌دهد. رباتی سبک وزن و کم هزینه می‌باشد که با تبدیل از حالت ۲ بعدی به ۳ بعدی امکان تبدیل به یک ربات خزنه ۴ پا را دارد. تکنیک ساخت این ربات به گونه‌ای است که در صفحه‌های متعدد مدار کنترلی و الکترونیک، گرم‌کن و سنسورها به صورت دقیق و لایه به لایه نصب می‌شوند که با تحریک عملگرها این صفحه به ربات ۴ پا تبدیل می‌شود [19]. تری بات، ربات سیاری است که می‌تواند هم‌زمان ۲ نوع حرکت جهش و خزیدن را انجام دهد [20]. به منظور ساخت این ربات از ۲ روش استفاده شده است. اولین روش همان تکنیک ساخت لایه به لایه ربات‌های اورینگامی است و روش دوم استفاده از چاپگرهای ۳ بعدی برای آماده‌سازی بیشتر قطعه‌ها می‌باشد. بلکی و پایک [21] پژوهشی درباره رباتی با قابلیت پیکربندی مجدد انجام دادند. این ربات از ماژول‌هایی تشکیل شده است که امکان پیاده‌سازی چند الگو از طرح‌های اورینگامی را دارد. در مرجع [22] رفتار دینامیکی سازه‌های اورینگامی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش رابطه پاسخ دینامیکی سیستم و فرکانسی که به آن اعمال می‌شود، نشان داده شده است. همچنین این فرکانس را می‌توان با سختی و جرم متفاوت برای مکانیزم تغییر داد. از این دستاورد در سازه‌های اورینگامی به منظور طراحی مکانیزم‌های چنگکی می‌توان بهره برد. متدولوژی طراحی ربات‌های اورینگامی در پژوهش [23] مورد توجه قرار گرفته است. ۴ اصلی که هنگام طراحی مکانیکی ربات اورینگامی باید به آن‌ها توجه شود، هندسه، مکانیزم، مواد و ساخت می‌باشد. در شاخه هندسه ربات، یک یا چند شکل ۳ بعدی که قابل تبدیل به یکدیگر هستند، تعریف می‌گردند و سپس الگوی خط تا ۲ بعدی به دست می‌آید و ترتیب تا کردن و زاویه تا، با توجه به لایه‌های ساندویچ شده معین می‌شود. همچنین در این مرحله انتخاب مواد در حرکت، سنسور و غیره تاثیرگذار است. در آخر فرآیند ساخت ۲ بعدی ربات‌های اورینگامی در چند مرحله تعیین می‌شود.

در این مقاله، مدل‌سازی سینماتیک بازوی ربات الهام گرفته از اورینگامی با در نظر گرفتن ۶ ماژول مطابق شکل ۱ پرداخته می‌شود. هندسه این ماژول‌ها مطابق پژوهش‌های [2, 6, 17] با در نظر گرفتن المان انحنا- ثابت و مکانیزم معادل بررسی می‌شود. سینماتیک انحنا- ثابت اغلب به عنوان مدلی مطلوب در ربات‌های پیوسته به دلیل ساده‌سازی‌هایی که به همراه دارد، مورد توجه است. در این مدل، ربات متشکل از تعداد محدود لینک‌های منحنی در نظر گرفته می‌شود و این لینک‌های منحنی با پارامترهای کمان مشخص می‌شوند. این پارامترها که فضای پیکربندی ربات را تعریف می‌کنند، شامل شعاع انحنا، زاویه صفحه‌ای که منحنی در آن قرار دارد و طول کمان می‌باشند.

در مدل سینماتیک دیگر، ماژول در یک حالت عمومی در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از هندسه مکانیزم موازی ماژول اورینگامی، محور دوران مجازی و به دنبال آن مکانیزمی معادل برای آن به دست می‌آید. نگاشتی از فضای عملگرها به فضای پیکربندی برای

بیان می‌کند و دومی، ماتریس دوران حول محور Z را عنوان می‌کند تا موقعیت‌گیری ربات را در خارج صفحه نمایش دهد. ماتریس همگن انتقال با توجه به جدول ۱ به صورت معادله ۲ استخراج می‌شد که باید در نظر داشت $k = 1/r$ و $\theta = ks$ می‌باشد.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos ks & -\sin \phi & \cos \phi \sin ks & \frac{\cos \phi (1 - \cos ks)}{k} \\ \sin \phi \cos ks & \cos \phi & \sin \phi \sin ks & \frac{\sin \phi (1 - \cos ks)}{k} \\ -\sin ks & 0 & \cos ks & \frac{\sin ks}{k} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

جدول ۱) پارامترهای دناویت- هارتبرگ مازول انحنای ثابت الهام گرفته از اورینگامی، مطابق شکل ۴

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
۱	$-\pi/2$.	.	ϕ
۲	$\pi/2$.	.	$ks/2$
۳	$-\pi/2$.	$(r/k) \times \sin(ks/2)$.
۴	$\pi/2$.	.	$ks/2$
۵	.	.	.	$-\phi$

در ادامه به منظور مدل‌سازی سینماتیک سازه اورینگامی با در نظر گرفتن تقارن و ساختار موازی آن، می‌توان به یک مکانیزم معادل با ۳ درجه آزادی برای تحلیل ربات دست یافت. به منظور ساده‌سازی، مختصات‌های $O_p - uvw$ و $O_b - XYZ$ مطابق شکل ۵، به ترتیب به مرکزهای O_p و O_b از پایه و پلتفرم متحرک متصل شده‌اند و در یک حالت عمومی از وضعیت مازول ربات اورینگامی، ۲ صفحه پایه و پلتفرم خط مشترک $D_1 D_2$ را پدید می‌آورند. این خط به واسطه ۲ نقطه D_1 (از تلاقی محورهای $C_1 C_2$ و $C_1' C_2'$) و D_2 (از تلاقی محورهای $C_1 C_3$ و $C_1' C_3'$)، قابل رسم است. با توجه به اینکه صفحه‌های پایه و پلتفرم متحرک نسبت به صفحه Π متقارن و محورهای Z و w دارای نقطه مشترک F بر روی صفحه Π می‌باشند، پلتفرم متحرک حول محور دوران مجازی که از نقطه F می‌گذرد، دوران می‌کند. این محور با FG مشخص می‌شود و عمود بر صفحه $O_b O_p E$ می‌باشد. همچنین این صفحه به وسیله ۲ بردار Z و w نیز قابل تعریف است. در نتیجه، خط $D_1 D_2$ عمود بر صفحه $O_b O_p E$ و همچنین موازی محور مجازی FG می‌باشد. با توجه به اینکه خط $D_1 D_2$ عمود بر صفحه $O_b O_p E$ می‌باشد، نقطه E بر خط $D_1 D_2$ قرار دارد و خط ED_2 بر خط‌های EO_p و EO_b نیز عمود می‌باشد. حال راستای EO_b قابل استخراج می‌باشد که در نتیجه آن راستای خط ED_2 و محور مجازی FG که با آن موازی می‌باشد، به دست می‌آید. در ادامه تحلیل هندسی، بردار واحد Se که راستای EO_b را در دستگاه مختصات $O_b - XYZ$ بیان شده است، به صورت رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$S_e = \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

بردار واحد S_{en} موازی محور ED_2 می‌باشد که عمود بر بردار S_e است. در نتیجه آن رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$S_{en} = \begin{bmatrix} \sin \delta \\ -\cos \delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

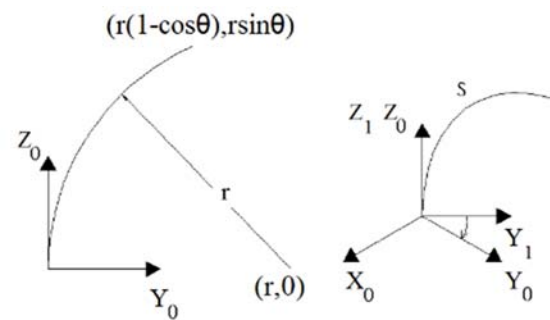
بردار τ_p که موقعیت مرکز O_p را در دستگاه مختصات $O_b - XYZ$ معین می‌سازد، به صورت رابطه ۵ به دست می‌آید.

پارامترهای هندسی معرفی شده، سپس نگاشتی از فضای پیکربندی به فضای کاری به دست می‌آید.

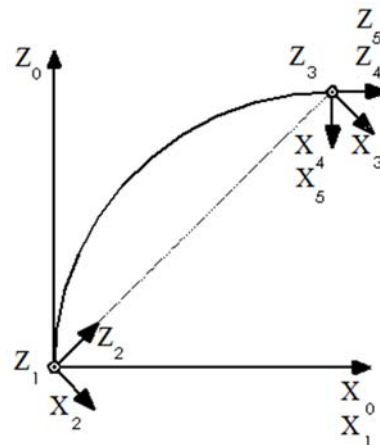
به منظور تعریف فضای پیکربندی ربات پیوسته، همانند شکل ۳ در یک حالت عمومی ربات که در فضا، کمائی ایجاد می‌کند در نظر گرفته می‌شود. این کمائی با پارامترهای k، معکوس شعاع انحنای کمائی (r) می‌باشد و ϕ زاویه صفحه‌ای که کمائی در آن قرار دارد و همچنین l که طول کمائی است، تعریف می‌گردد.

در نتیجه به واسطه پارامترهای کمائی این امکان فراهم می‌شود که با یک نگاه از فضای عملگرها به فضای پیکربندی انتقال یافت. البته این نگاه برای هر ربات پیوسته به دلیل انحصار نوع عملگر متفاوت می‌باشد و در حالت خاص با در نظر گرفتن تقریب مناسب برای گشتاور و نیروی اعمالی، این نگاه متغیرهای عملگر را برای هر قسمت از ربات با پارامترهای کمائی بیان می‌کند. نگاه دوم، برخلاف نگاه اول که وابسته به نوع عملگرها می‌باشد برای هر نوع ربات پیوسته قابل پیاده‌سازی می‌باشد و با ثابت در نظر گرفتن طول قوس هر قسمت از ربات، کل ربات به صورت منحنی ثابت تقریب زده می‌شود. این نگاشتی کاملاً سینماتیکی می‌باشد که مطابق معادله ۱، پارامترهای کمائی را به فضای کاری انتقال می‌دهد.

$$T = \begin{bmatrix} R_z(\phi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_y(\theta) & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



شکل ۳ الف) کمائی در صفحه X-Z، هنگامی که ϕ صفر می‌باشد، نمایش داده شده است. ب) زاویه ϕ کمائی را خارج از صفحه X-Z حول محور Z دوران می‌دهد.



شکل ۴) محورهای مختصات دناویت- هارتبرگ متصل شده به المان انحنای ثابت ربات اورینگامی

نگاشت سینماتیکی شامل ۲ انتقال می‌باشد که اولی، نقطه انتهائی کمائی را در صفحه به صورت $p = [r \sin \theta \quad r(1 - \cos \theta)]$ صفر

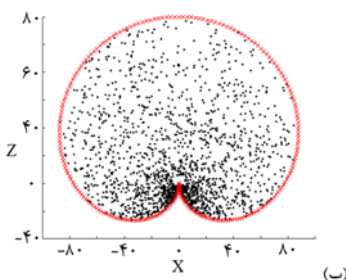
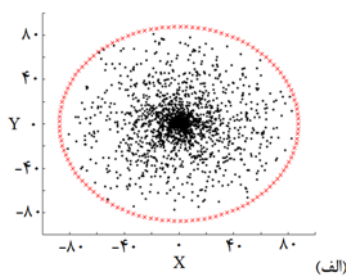
۳-۱- فضای کاری

در این مقاله، از روش مونته کارلو برای به دست آوردن فضای کاری ربات بر اساس مدل‌سازی مکانیزم معادل استفاده شده است. اساس این روش تعیین مقادیری تصادفی برای هر یک از پارامترهای کمان در بازه مشخص آن‌ها می‌باشد. به این صورت که مقداری تصادفی از تفاضل کمینه و بیشینه پارامتر انتخاب شده و مقدار کمینه پارامتر جمع می‌گردد. شعاع انحنای ربات بین صفر تا ۱۷ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به این که ربات با شعاع انحنای صفر در موقعیت تکین قرار می‌گیرد، مقدار کمینه یک میلی‌متر برای آن لحاظ گردید. برای طول کمان، با توجه به ضخامت ورق‌های پی‌وی‌سی و فنر در حالت جمع شده ماژول، مقداری بین ۲ تا ۲۰ در نظر گرفته شد و زاویه خارج از صفحه X-Z بین صفر تا ۳۶۰ درجه تعیین شد. با پیاده‌سازی الگوریتم مذکور، فضای کاری ربات اورینگامی که از روش مکانیزم معادل مدل‌سازی شده، مطابق شکل ۶ به دست می‌آید.

به منظور بررسی فضای کاری ربات اورینگامی که با المان‌های انحنای ثابت مدل‌سازی شده است، الگوریتمی ساده در نظر گرفته شده است. در این الگوریتم ابتدا دامنه متغیرها و مقادیر اولیه آنها تعیین شده و سپس با تقسیم دامنه بر تعداد گام‌ها، گام متغیرها به دست می‌آید. با معرفی شمارنده و تعداد گام هر متغیر به عنوان متغیری وابسته به شمارنده، الگوریتم پیاده‌سازی می‌شود که نتیجه مطابق شکل ۶ مرزی برای روش قبلی خواهد بود. از قیاس این مرز در صفحه‌های X-Y و X-Z با فضای کاری به دست آمده از روش مونت کارلو می‌توان دریافت که هر ۲ روش مدل‌سازی خروجی یکسانی داشته است و موقعیت تصادفی مجری نهایی از روش مکانیزم معادل درون مرز قرار گرفته است، با این تفاوت که در روش مکانیزم معادل سرعت محاسبات بهینه‌تر بود.

۳-۲- ماتریس ژاکوبین

به منظور به دست آوردن روابط حاکم بر سرعت مجری نهایی، مناسب است که مطابق شکل ۷، از فضای عملگرها به فضای پیکربندی انتقال صورت گیرد و با توجه به اینکه پیش‌تر ماتریس تبدیل از فضای پیکربندی به فضای کاری استخراج شد، می‌توان به مشتق‌گیری از ستون چهارم ماتریس تبدیل‌ها، ژاکوبین ربات را به دست آورد.



شکل ۶ الف) فضای کاری ربات اورینگامی از صفحه X-Y، ب) فضای کاری ربات اورینگامی از صفحه X-Z

$$r_p = r_o \begin{bmatrix} \sin \psi \cos \delta \\ \sin \psi \sin \delta \\ \cos \psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

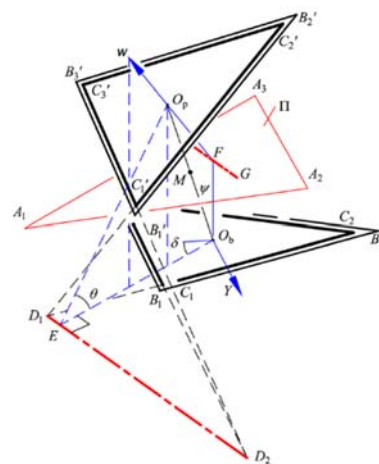
که در این رابطه r_o فاصله بین مرکز O_p و مرکز O_b ، زاویه ψ زاویه بین بردار r_p و محور Z را اندازه می‌گیرد. به منظور به دست آوردن فاصله نقطه F از مرکز O_b بیان شده در دستگاه مختصات $O_b - XYZ$ ، نقطه دلخواه N در صفحه Π و نقطه M منصف خط $O_b O_p$ که از صفحه Π نیز می‌گذرد، انتخاب می‌شوند. با توجه به هندسه مسئله، خط گذرنده از نقاط N و M بایستی بر بردار r_p عمود باشد.

$$r_p \cdot r_{nm} = 0 \quad (6)$$

که در این رابطه نقطه دلخواه N را نقطه F فرض کرده و بردار موقعیت نقطه F با جایگذاری $x=0$ و $y=0$ و حل قید فوق به صورت رابطه ۷ حاصل می‌گردد. سپس با داشتن راستای محور دوران مجازی، بردار موقعیت این محور که در صفحه Π بیان شده، به دست می‌آید.

$$r_f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r_o}{2} \cos \psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

با توجه به اینکه در بخش قبل محور دوران هر یک از ماژول‌های موازی اورینگامی و بیان تحلیلی آن برای محور دوران به دست آمد، مدل سینماتیکی ربات از روش دناویت-هارتنبرگ قابل مدل‌سازی می‌باشد. به منظور بررسی سینماتیک، دستگاه‌های مختصات به هر ماژول متصل شده است. به طوری که برای پایه مختصات $O_b - XYZ$ ، برای مختصات موقعیت نهایی $O_a - X_d Y_d Z_d$ و مختصات‌های $O_i - X_i Y_i Z_i$ برای پلتفرم متحرک ماژول‌های $i = 1, 2, \dots, 5$ در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه موقعیت و جهت‌گیری بخش انتهایی ربات از سینماتیک مستقیم به دست می‌آید. با تعریف پارامترهای دناویت-هارتنبرگ، مطابق جدول ۲، ماتریس تبدیل بین ۲ صفحه پایه و پلتفرم متحرک برای هر ماژول اورینگامی قابل استخراج است.



شکل ۵) مدل سینماتیکی از مکانیزم معادل سازه اورینگامی [17]

جدول ۲) پارامترهای دناویت-هارتنبرگ برای ربات اورینگامی با روش مکانیزم معادل

i	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
۱	δ	.	.	.
۲	ψ	.	.	$-\pi/2$
۳	.	.	.	$\pi/2$
۴	ψ	.	.	$-\pi/2$
۵	.	.	.	$\pi/2$

رابطه (۱۳) و (۱۴)، از فضای پیکربندی به فضای کاری و از فضای عملگرها به فضای پیکربندی را به دست آورد.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(l_2 + l_3 - 2l_1)}{3(l_2 - l_3)} \right) \quad (11)$$

$$k = \frac{2\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - l_1 l_2 - l_1 l_3 - l_2 l_3}}{(l_1 + l_2 + l_3)d} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_{CW} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{k} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{\phi} \\ \dot{k} \end{bmatrix} = J_{AC} \begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

با تحلیل ماتریس‌های (۱۳) و (۱۴)، تکینگی در ماتریس J_{AC} مشاهده نمی‌شود. به این معنی که با اعمال ورودی به عملگرها که تاندون‌های ربات می‌باشد در نگاشت از فضای عملگرها به فضای پیکربندی که شعاع انحنا d ، طول ربات و زاویه‌ای که صفحه ربات در آن قرار گرفته مقدار خواهند داشت و در همه حالت‌ها درجه آزادی خود را از دست نمی‌دهد. اما در ماتریس J_{CW} با توجه به معادله (۱۵) دارای تکینگی خواهد بود.

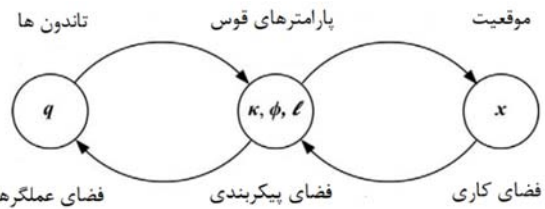
$$\frac{-6(\cos(6kl)-1)^2}{k^3} = 0 \quad (15)$$

در واقع هنگامی که بازوی ربات به سوی حالت قائم (شعاع انحنا ربات صفر است) میل می‌کند، k به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و معادله ۱۵ با تکینگی مواجه می‌شود و حالت دیگری از تکینگی ($\cos(6kl) - 1 = 0$)، با دوران ۶۰ درجه حول محور مجازی مجری نهایی در موقعیت پایه قرار گرفته و با دوران خارج از صفحه ϕ موقعیت آن تغییر نمی‌کند.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

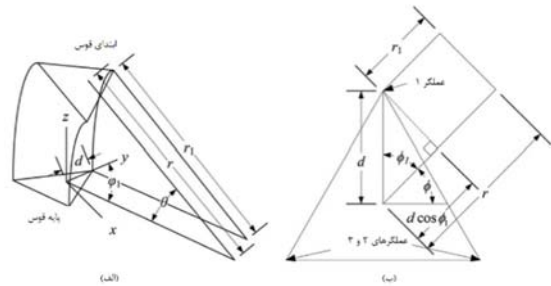
هدف این پژوهش ارائه مدلی از ربات الهام گرفته از اورینگامی می‌باشد که در بخش ۲ طراحی مازول مکانیزم موازی اورینگامی با استفاده از طرحی در فضای ۲ بعدی مورد بحث قرار گرفت و سینماتیک ربات الهام گرفته از اورینگامی از ۲ روش مکانیزم معادل و المان‌های انحنا ثابت مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که در تحلیل موقعیت و فضای کاری مشخص است، هر ۲ روش نتیجه‌ای یکسان داشته و با این تفاوت که حجم محاسبات روش مکانیزم معادل در مقایسه با المان‌های انحنا ثابت به طور قابل توجهی اندک می‌باشد. ۲ ماتریس ژاکوبین برای نگاشت از فضای عملگرها به فضای پیکربندی و سپس از فضای پیکربندی به فضای کاری به دست آمد. با بررسی ماتریس‌ها، تکینگی ربات اورینگامی در موقعیتی که ربات در راستای قائم پایه و هنگامی که حول محور مجازی ۶۰ درجه دوران کرده، به دست آمد.

در پژوهش‌های آینده با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این ربات در محل‌های تاخوردن، سختی مازول‌ها و ربات اورینگامی مورد توجه قرار خواهد گرفت. همچنین با توجه به کاربرد آن در زمینه جابجایی اجسام، ارتعاشات آن مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و مدلی برای کنترل ارتعاشات ربات ارائه خواهد شد. با توجه به ویژگی‌های ربات اورینگامی، کاربردی‌های وسیعی در زمینه‌های فضایی، ماموریت‌های نجات و جابجایی اجسام می‌توان برای آن در نظر داشت.



شکل ۷) فضای کاری، پیکربندی و عملگرها و نگاشت بین آنها برای تعریف سینماتیک ربات منحنی- ثابت

در نتیجه، ابتدا ماتریس تبدیل بین فضای عملگرها و فضای پیکربندی را به دست آورده و سپس با مشتق‌گیری از ماتریس تبدیل بین فضای کاری و فضای پیکربندی و ماتریس تبدیل فضای پیکربندی و فضای عملگرها و با بهره‌گیری از مشتق زنجیری، ماتریس ژاکوبین بین متغیرهای عملگرها و فضای کاری استخراج خواهد شد. شکل ۸، پایه و صفحه متحرک ربات را در حالت عمومی نمایش می‌دهد. در معادله ۸، d فاصله مرکز مقطع ربات تا تاندون عملگر می‌باشد و زاویه ϕ ، زاویه بین راستای خم شدن ربات با هر عملگر را بیان می‌کند. با ضرب زاویه قوس θ در رابطه ۸ و با توجه به اینکه $l_i = \theta r_i$ و $s = \theta r$ برقرار می‌باشند، معادله ۹ به دست می‌آید.



شکل ۸) الف) بخشی از کمان که پارامترهای کمان در آن تعریف شده است. ب) نمایی از بخش پایه کمان

$$r_i = r - d \cos \phi_i \quad (8)$$

$$s = l_i + \theta d \cos \phi_i \quad (9)$$

با توجه به اینکه روابط $\phi_1 = 90 - \phi$ ، $\phi_2 = 210 - \phi$ و $\phi_3 = 330 - \phi$ برقرار می‌باشند و با قراردادن آن‌ها در معادله ۹، طول قوس بر اساس طول عملگرها به صورت رابطه ۱۰ قابل بیان می‌باشد

$$s = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3} \quad (10)$$

با استفاده از معادله ۹ برای ۲ عملگر ۱ و ۲، رابطه‌ای با متغیرهای θ ، ϕ_i و طول عملگرها به صورت $l_1 - l_2 + \theta d (\cos \phi_1 - \cos \phi_2) = 0$ به دست می‌آید که با تکرار این روند برای عملگرهای ۲ و ۳، با حذف θ و جای‌گذاری ϕ_i ، ϕ را می‌توان به دست آورد.

با در نظر داشتن $l_i = \theta r_i$ ، $s = \theta r$ و $ks = \theta$ و جای‌گذاری آن‌ها در رابطه ۸ نیز می‌توان k را به دست آورد. در نتیجه ϕ و k که به ترتیب زاویه خارج از صفحه ربات و شعاع انحنا قوس ربات در صفحه را معین می‌سازند به صورت معادله‌های ۱۱ و ۱۲ استخراج می‌شوند. با مشتق‌گیری از روابط (۳)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) و سپس مرتب‌سازی آن‌ها می‌توان به ترتیب ماتریس‌های ژاکوبین، مطابق

snake robot modeling and locomotion. *Robotica*. 2009;27(7):999-1015.

8- Onal CD, Wood RJ, Rus D. Towards printable robotics: Origami-inspired planar fabrication of three-dimensional mechanisms. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China; 2011.

9- Onal CD, Tolley MT, Wood RJ, Rus D. Origami inspired printed robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20(5):2214-2221.

10- Shigemune H, Maeda S, Hara Y, Hosoya N, Hashimoto S. Origami robot: a self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2016;21(6):2746-2754.

11- Dai JS, Rees Jones J. Kinematics and mobility analysis of carton folds in packing manipulation based on the mechanism equivalent. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2002;216(10):959-970.

12- Rodriguez Leal E, Dai JS. From origami to a new class of centralized 3-DOF parallel mechanisms. *31st Mechanisms and Robotics Conference*. Las Vegas, Nevada; 2007.

13- Dai JS, Caldwell DG. Origami-based robotic paper-and board packaging for food industry. *Trends in Food Science & Technology*. 2010;21(3):153-157.

14- Qin Y, Dai JS. Four motion branches of an origami based eight bar spatial mechanism. *37th Mechanisms and Robotics Conference*. Portlan, Oregon; 2013.

15- Qiu C, Aminzadeh V, Dai JS. Kinematic analysis and stiffness validation of origami cartons. *Journal of Mechanical Design*. 2013;135(11):MD-13-1072.

16- Qi P, Qiu C, Liu H, Dai JS, Seneviratne L, Althoefer K. A novel continuum-style robot with multilayer compliant modules. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, USA; 2014.

17- Zhang K, Qiu C, Dai JS. An extensible continuum robot with integrated origami parallel modules. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2016;8(3):031010.

18- Paik JK, Byoungkwon A, Rus D, Wood RJ. Robotic origamis: self-morphing modular robots. *2nd International Conference on Morphological Computation (ICMC)*, Venice, Italy, Sept. 12-14 2012. Geneva: ICMC; 2012.

19- Firouzeh A, Paik J. Robogami: a fully integrated low-profile robotic origami. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2015;7(2):1-8.

20- Zhakypov Z, Belke CH, Paik J. Tribot: a deployable, self-righting and multi-locomotive origami robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vancouver, Canada; 2017.

21- Belke CH, Paik J. Mori: a modular origami robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2017;22(5):2153-2164.

22- Zuliani F, Liu C, Paik J, Felton SM. Minimally actuated transformation of origami machines. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2018;3(3):1426-1433.

23- Zhakypov Z, Paik J. Design methodology for constructing multimaterial origami robots and machines. *IEEE Transactions on Robotics*. 2018;34(1):151-165.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

سهم نویسندگان: فرید صاحب‌سرا (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی

(۴۰٪): افشین تقوایی‌پور (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی

(۳۰٪): حامد غفاری‌راد (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری (۳۰٪)

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

۵- فهرست علائم

k	عکس شعاع انحنا
l_i	طول تاندون i
r	شعاع انحنا
r_o	فاصله ۲ مبدأ O_B و O_P
s	طول کمان
d	فاصله مرکز مقطع ربات تا تاندون
C_i	رأس آام مثلث پایه
C'_i	رأس آام مثلث پلتفرم متحرک
J_{CW}	ژاکوبین انتقال از فضای پیکربندی به فضای کاری
J_{AC}	ژاکوبین انتقال از فضای عملگرها به فضای پیکربندی
O_b	مرکز دستگاه مختصات متصل به پایه
O_a	مرکز دستگاه مختصات متصل به مجری نهایی
O_i	مرکز دستگاه مختصات متصل به صفحه‌های میانی
FG	محور دوران مجازی
علائم یونانی	
δ	زاویه دوران حول محور O_bF
θ	زاویه دوران حول محور مجازی
ϕ	زاویه دوران خارج از صفحه
ψ	زاویه دوران حول محور FG
π	صفحه متقارن مکانیزم معادل

منابع

1- Robinson G, Davies JBC. Continuum robots - a state of the art. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Detroit, Michigan; 1999.

2- Webster RJ, Jones BA. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: a review. *The International Journal of Robotics Research*. 2010;29(13):1661-1683.

3- Wilson JF, Mahajan U. The mechanics and positioning of highly flexible manipulator limbs. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*. 1989;111(2):232-237.

4- Chirikjian GS, Burdick JW. 4-A hyper-redundant manipulator. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 1994;1(4):22-29.

5- Sujan VA, Dubowsky S. Design of a lightweight hyper redundant deployable binary manipulator. *Journal of Mechanical Design*. 2004;126(1):29-39.

6- Dehghani M, Moosavian SAA. Dynamics modeling of continuum manipulators by constant-curvature elements without numerical singularities. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(15):231-240. [Persian]

7- Traneth AA, Pettersen KY, Liljebäck P. A survey on