Controller Design for Hyper-Redundant Manipulator Using Backbone Curve

Seyed Reza Ahmadzadeh[a], Mohamad Ali Hajabasi[a]

[a] *Mechanical Engineering Dept., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran*

Abstract

Hyper-redundant manipulators have many degrees of freedom that enables them to enter and move in constrained environments while avoiding obstacles. In order to maintain an effective control of the system, the manipulator dynamics have to be constrained. Handling the complicated dynamics equation is one of the reasons that the real-time control of the hyper-redundant manipulator is a challenging task. In this paper, we introduce a novel dynamics system representation for hyper-redundant robots and then design a corresponding controller for the system. The manipulator dynamics is constructed in posture space and only depends on three parameters. A path-tracking controller is then designed for the obtained model. The proposed framework is validated through several experiments in simulation.

Keywords: Hyper-Redundant, Control, Dynamic, Robot, Manipulator

*In Proc. 8^{th} International Conference of Mechanics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, May 2003.

Email addresses: seyedreza_ahmadzadeh@yahoo.com (Seyed Reza Ahmadzadeh), hajabasi@mail.uk.ac.ir (Mohamad Ali Hajabasi)

طراحی کنترل‌کننده برای بازوی مکانیکی ابرافزونه‌ای با استفاده از منحنی قامت

سیدرضا احمدزاده[۱] ، محمّدعلی حاج‌عبّاسی[۲]

بخش مهندسی مکانیک ـ دانشکده فنّی ـ دانشگاه شهید باهنر کرمان

Email: akef_1978@yahoo.com

چکیده

بازوهـای ابرافـزونه‌ای دارای تعـداد زیادی درجه آزادی سینماتیکی هستند که به آنها امکان ورود و حرکت در محیطهای مقـید، بدون برخورد با موانع را می‌دهد. برای کنترل چنین سیستمی باید دینامیک آنرا مقید کرد و به همین دلیل است کـه کنـترل زمـان- حقیقـی سیسـتم کاری دشوار است. در این مقاله ضمن معرفی مدلی مناسب برای دینامیک سیستم بـازوی ابرافـزونه‌ای، به طراحی کنترل‌کننده آن پرداخته می‌شود. مدلسازی دینامیک سیستم بازوی ابرافزونه‌ای بر پایـه فضـایی قـراردادی بـه نام فضای پاسچری که تنها به سه متغیر متکی است، انجام می‌شود و سپس کنترل کننده‌ای جهـت تعقیـب مسیر ، برای بازوی ابرافزونه‌ای طراحی می‌گردد. در انتها برای بررسی نتایج، شبیه سازی کامپیوتری برای سیستم انجام می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ابرافزونه‌ای ـ کنترل ـ دینامیک ـ روبات ـ بازوی مکانیکی

مقدمه

در مجموعه‌های صنعتی و یا حتی تحقیقاتی امروزی، برای غلـبه بـر بعضـی محدودیـتها و ایجـاد زمینه مناسبتر برای کاربـرد روباتهـا، موضـوع افزایش تعداد درجات آزادی مورد توجّـه قـرار گرفـته اسـت. امـا باید دانست که، هرگاه تعداد درجـات آزادی سیسـتمی از حداقـلّ تعـداد درجـات آزادی مـورد نـیاز آن بیشـتر باشـد، آن سیســتم دارای افزونگـی درجـات آزادی مـی‌باشد. به عنوان نمونه در یک فضای سه بعـدی تعـداد درجات آزادی معمول برای تعیین موقعیت و جهتگیری برابر با شش است و بازویی با هفت مفصل دراین فضـا دارای یـک درجـه افزونگی خواهد بود. حال اگر تعداد درجات آزادی سینماتیکی سیستمی بسیار زیاد ویا نامحدود باشـد، بـه آن سیسـتم، ابرافـزونه‌ای گویند. مبحث بازوهای مکانیکـی ابرافـزونه‌ای کـه تعداد درجات آزادی سینماتیکی آنهـا از حداقـل تعـداد مـورد نـیاز بسـیار بیشتر است، برای دسـتیابی بـه سیستمهای روباتیک پویاتر، مطرح شده‌است. هرچند افزایش تعداد درجات آزادی سینماتیکی باعث ایجاد پیچیدگـی در محاسـبات مـربوط بـه چنیـن سیسـتمهایی مـی‌گـردد، امـا بـرخورداری از قابلیتهای چشمگیری چون، آزادی عمـل فـوق‌العـادّه و حرکـت در محـیطهای مقـید، محققـان را بـرآن داشـته‌اسـت تـا با ارائه و اعمال روشهای گونـاگون علمـی، بـه مقابله با مشکلات مربوط به محاسبات چنیـن سیسـتمهایی بپردازند. از همین رو دریک دهه اخیر بـرای توسـعه و اسـتفاده از روباتهـای ابرافـزونه‌ای تلاشهای گسـترده‌ای بـه عمـل آمـده اسـت و اگـرچه قدمت کارهای انجـام‌شـده در ایـن زمیـنه، توسـط اندرسـن (Andeson) و هـورن (Horn)، بـه اواخـر دهـه ۱۹۶۰ بازمی‌گردد [۱]، اما رشـد و شـکوفایی این موضوع در یک دهه اخیر چشمگیرتر اسـت. توجـه بـه سابقه موضوع روباتهای ابرافزونه‌ای از نظر نـامگذاری نـیز مشـخص مـی‌سـازد کـه در شروع عصر این روباتهـا، همـواره نـامگذاری چنیـن سیسـتمهایی براسـاس کاربـرد و قابلیـتهای خـاص آنها انجام گرفته‌است. به عنوان

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استادیار

نمونـه نامهایـی چون، بازوی تانسوری (tensor-arm)، گردن قــو (swan'-sneck)، شــاخک (tentacle)، خــرطوم فــیل (elephant-trunk)، ریسمان کُنشگر (active-cord)، مارگونه (snake-like)، ســتون فقـرات(spine) [۱ ـ ۶]، برای معرفی روباتهـای ابرافـزونه‌ای بـه کارگرفـته شده‌اند. پس از چندی واژه (hyper-redundant) توسـط چیریکجیان (Chirikjian) و بـردیک (Burdick) بـرای اولیـن بار به منظور معرفی این دسـته از روباتهـا بـه کاربـرده شـد[۷] که بعدها جایگزینی مناسب برای سایر کلماتی که کاربرد موردی داشتند، گردید و عبارت ابرافزونه‌ای که دراین مقاله مکرّراً به کار می‌رود، به عنوان معادلی برای این عبارت در زبان فارسی درنظر گرفته شده است.

تحقـیقات زیاد و متنوّعی درمورد روباتهای ابرافزونه‌ای انجام شـده‌اسـت که زمینه این تحقیقات رامی‌توان به چند شاخه کلـی تقسـیم کـرد، که این شاخه‌ها عبارتند از : ۱- طرح و سـاختار هندسی، ۲- سینماتیک و سینماتیک معکوس، ۳- دینامیک، ۴- کنترل و بهینه‌سازی.

قطعـاً یکـی از مهمتریـن زمیـنه‌هـای علمـی و تحقیقی در بـرخورد بـا فـنّاوری روباتهای ابرافزونه‌ای، دستیابی به شیوه کنـترل زمـان- حقیقـی آنها است و روباتهای ابرافزونه‌ای با قابلیـتهای برخاسـته از ماهیـت ذاتـی‌شان می‌توانند مزایای زیـادی در صـنعت و علـوم مختلف ایجاد نمایند، امّا این امر تنها هنگامی ممکن می‌گردد که کنترل چنین سیستمهایی مقـدور و ممکـن باشـد. همچنیـن واضـح اسـت کـه تعداد درجـات آزادی زیـاد مشخصـاً بحث کنترل این روباتها را با پیچیدگـی مواجـه خواهـد کـرد. بنابراین برای پرداختن به چنیـن مبحثـی، در اختـیار داشـتن اطّلاعات کافی درمورد روشـهای کنـترل کلاسـیک و مـدرن و دیگرشاخه‌های ذکر شـده دربالا مورد نیاز محققین است. ازآنجا که هدف از ارائه ایـن مقالـه، پـیش نهـادن گامـی درجهـت طرّاحـی کنترل کنـنده‌ای بـرای بازوهـای مکانیکی ابرافزونه‌ای می‌باشد، لذا درابـتدا بطور مختصر درمورد هریک از شاخه‌های چهارگانه فوق، مروری برکارهای گذشته ارائه می‌گردد.

در اوّلیـن بـرخورد بـا روباتهـای ابرافـزونه‌ای بحـث ساختار هندسـی سیسـتم مطـرح مـی‌شـود. روباتهـای ابرافـزونه‌ای مـی‌توانـند دارای سـاختارهای هندسـی مختلفی باشند که گوناگونـی سـاختارها، مـنجر به ایجاد قابلیتهای متنوعی در ایـن سیسـتمها می شود. ساختار این روباتها می‌تواند شامل اجزای پنیوماتیک، زنجیره‌ای سری شامل تعداد زیادی رابط صـلب، سـاختار هندسـی متغیر و غیره باشند. یک گام مهم در تحلیل رباتهای ابرافزونه‌ای شناسایی سینماتیک معکوس سیسـتم اسـت کـه چنین معلوماتی در برخی از فرآیندهای کنترلی به کارگرفته می‌شود. دستیابی به چنین دانشی تنها بـا شـناخت و بررسی روشهای سودمند سینماتیکی، ممکن مـی‌گـردد. روشـها و الگوریـتمهای مختلفـی بـرای حـل سـینماتیک معکوس ارائه شده‌اند که هریک دارای معایب و مـزایای خـاص خـود بوده، و ازبین آنها می‌توان به روشهایی چـون: کاربـرد معکـوس کـاذب ژاکوبیـن، کاربـرد معکـوس گسـترده ژاکوبیـن، و کاربرد معکوس افزوده ژاکوبین، اشاره کـرد. بـه عـنوان نمونـه اسـتفاده از کاربـرد معکوس کاذب ژاکوبیـن، یکی از روشهای مورد استفاده در طراحی سیستم کنترل مسیر برای بازوی ابرافزونه‌ای است که دراین روش از معنای کمترین مربّعات در هر نقطه، استفاده می‌شود. کلین (Klain) و هوانـگ (Huang) نگرشـی جـامع را بر این روش ارائـه کـرده‌انـد [۸]. برای کنترل سیستم با استفاده از مدل دینامیکـی، فرمولـه کـردن دینامیک مسئله امری حیاتی به شـمار مـی‌رود. دینامیک بازوهای ابرافزونه‌ای برای اوّلین بار توسط چیریکجیان به صورت ماکروسکوپیک فرموله شد[۹-۱۰]. وی بـرای فرمولـه کـردن سیسـتم از ماهیـت مکانیک محـیطهای پیوسـته استفاده کرد و بطور تقریبی سیستم را فــرمول‌بــندی کــرد. امــا شــوگن مــا (S.Ma)، واتانابــه (Watanabe) و کــندو (Kondo) در روش دیگــری بــرای فرمولـه کـردن دینامـیک سیسـتم بطـور پارامتریزه شده از گشـتاور مفاصـل در فضـای موقعیـت به عنوان پارامتر سود جستند [۱۱].

پـس از فرمولـه کـردن دینامـیک سیستم، گام نهایی یعنی فرایـند کنـترل سیسـتم پیش رو قرار می‌گیرد. اما همانطور کـه قبلاً گفته شد، کنترل سیستمی دارای افزونگی درجات آزادی، کـار سـاده‌ای نیسـت. امـا مـی‌توان روشهایی جهت سـاده‌سـازی مسـئله کنترل به کاربرد، بدون اینکه به مقدار زیـادی از قابلیـتهای سیسـتم کاسته گردد. یکی از راههای سـاده‌سـازی مسـئله کنـترل بـازوی مکانیکـی ابرافزونه‌ای، افـزودن قـیودی مناسـب بـه دینامیک سیستم است. ایجاد قـید، در مسـئله بـازوی ابرافـزونه‌ای، معـادلات دینامـیک

سیستم را ساده‌تر کرده و امکان ارائه و طرح روشهای مختلف طراحی کنترل‌کننده را به سادگی فراهم می‌آورد. در این مقاله از رهیافتی که بر مبنای دیدگاه مودال پایه‌ریزی شده‌است استفاده می‌شود. هدف اصلی در این مقاله، بکارگیری دیدگاه مودال، جهت طرّاحی کنترل‌کننده‌ای برای بازوی ابرافزونه‌ای است، که برای پرداختن به آن باید درابتدا منحنی قامت تعریف شود. لازم به ذکر است که تمام موارد ارائه شده دراین مقاله محدود به فضای کاری دوبعدی می‌باشند.

منحنی قامت

برای تشریح و تحلیل وضعیت سینماتیکی بازوی ابرافزونه‌ای، در ابتدا باید به مدلسازی سیستم پرداخت. برای مدلسازی چنین سیستمی، بدون اینکه از ماهیت مکانیکی آن کاسته شود، تعریف یک منحنی پیوسته به گونه‌ای که با عبور از مراکز هندسی هریک از رابطهای مربوط به بازوی مکانیکی گویای پیکربندی کلّی آن باشد کارساز است. بنابراین درابتدا منحنی قامت، تعریف می‌شود. منحنی قامت: عبارتست از یک منحنی هموار تا حدّ لزوم، که بر مراکز هندسی رابطهای بازوی مکانیکی ابرافزونه‌ای انطباق یافته و شکل‌پذیری آن با زمان برای بیان خصوصیات کلّی در هندسه یا پیکر بندی بازوی مکانیکی ابرافزونه‌ای کفایت می‌کند. همانگونه که تداعی می‌شود استفاده از نکات کلاسیک در بحث منحنی‌ها و هندسه دیفرانسیل برای فرموله کردن سینماتیک منحنی قامت کارساز است و ذکر آنها به فهم مطالب خواهد افزود، معهذا برای اجتناب از اطاله کلام تنها نکاتی که ضروری هستند آورده می‌شوند.

فرموله کردن سیستم مورد نظر

توجه به این نکته ضروری است که موقعیت هر نقطه از منحنی قامت با گذشت زمان تغییر می‌کند. لذا برای پارامتریزه‌کردن منحنی مذکور در مختصات کارتزین، تابع برداری به شکل کلی $\mathbf{X}(s,t)$ معرّفی می‌شود که درآن s پارامتر اندازه‌گیری فاصله در طول منحنی و t زمان می‌باشد. درفضای سه بعدی کارتزین، مولّفه‌های این تابع برداری $x_1(s,t), x_2(s,t), x_3(s,t)$ و درفضای دو بعدی مولّفه‌های $x_1(s,t), x_2(s,t)$ هستند. لازم به ذکر است که برای پارامتریزه کردن منحنی قامت استفاده از شیوه‌ای که با حدّاقل کمّیات مرتبط باشد بیشتر مورد توجه است. این شیوه که بیان ذاتی نامیده می‌شود در قیاس با شیوه غیرذاتی از ارجحیت برخوردار است. زیرا در شیوه ذاتی با تغییر دستگاه مختصات کارتزین، معادلات سیستم ناوردا و دستخوش تغییر اساسی نمی‌شوند در حالیکه در شیوه‌های غیر ذاتی در نظر گرفتن قیود مرتبط به بازوی مکانیکی روبات مانند قید مکان مچ، قابل تحمیل نیست. در شیوه ذاتی تنها خمیدگی منحنی برای تبیین منحنی، کفایت می‌کند. با توجه به شکل‌پذیری منحنی قامت با گذشت زمان و تابع خمیدگی، برای منحنی قامت به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa(s)=\frac{2\pi}{l}\left(a_1 Cos\left(\frac{2\pi}{l}s\right)+a_2 Sin\left(\frac{2\pi}{l}s\right)\right) \qquad (۱)$$

که در رابطه بالا a_1, a_2 ضرایبی متغیر با زمان، برای تعریف تابع خمیدگی، s فاصله هرنقطه روی منحنی از مبداء و l طول منحنی است که با طول بازو برابر می‌باشد. اگر بر هر نقطه از منحنی خطی مماس شود، زاویه حاصل از آن، زاویه شیب نامیده می‌شود که از انتگرال گیری بر روی طول منحنی حاصل می‌گردد:

$$\begin{aligned}\alpha(s)&=\alpha_0+\int_0^s \kappa(u)du\\&=\alpha_0+a_1 Sin\frac{2\pi}{l}s-a_2 Cos\frac{2\pi}{l}s+a_2\end{aligned} \qquad (۲)$$

با انتگرال‌گیری از تصاویر معادله زاویه شیب در طول بازو می‌توان مختصات انتهای آن یعنی مختصات مچ را بدست آورد :

$$\begin{aligned}x(l)&=\int_0^l Cos(\alpha(s))ds\\&=Cos(a_2+\alpha_0)J_0\left(\sqrt{a_1^2+a_2^2}\right)l\end{aligned} \qquad (۳)$$

$$\begin{aligned}y(l)&=\int_0^l Sin(\alpha(s))ds\\&=Sin(a_2+\alpha_0)J_0\left(\sqrt{a_1^2+a_2^2}\right)\end{aligned} \qquad (۴)$$

که α_0 زاویه شیب اوّلیه نسبت به محور طولها در مبداء بازو، و J_0 تابع بسل مرتبه صفر است.

با توجه به روابط بالا تا هنگامی که مختصات انتهای بازو مشخّص بوده و زاویه شیب اوّلیه معلوم باشد، با حل

معـادلات (۳) و (۴) می‌توان ضرایب a_1, a_2 را بدست آورد و در نتـیجه، تابع خمیدگی مربوط به هرنقطه انتهایی، برای بازو بدست می‌آید. روابط معکوس عبارتند از:

$$a_2 = \tan^{-1}\left(y(l)/x(l)\right) - \alpha_0$$

$$a_1 = \left(\left[J_0^{-1}\left(\left(x(l)^2 + y(l)^2\right)^{\frac{1}{2}} \big/ l\right)\right]^2 - a_2^2\right) \quad (۵)$$

کـه در رابطـه بـالا J_0^{-1} بـیانگر معکـوس محدود تابع بسل مرتـبه صـفر است. همانطور که دیده می‌شود، منحنی قامت دارای سـه متغیر a_1, a_2, α_0 است، که از این میان متغیر α_0 کـه همـان شیب اوّلیه می‌باشد، تنها در ابتدای حرکت قـابل تغیـیر اسـت و دو متغـیر دیگـر بـا حرکـت بـازوی ابرافـزونه‌ای در هـر لحظـه تغیـیر مـی‌کـنند. بـا محـدود و مشـخّص کـردن رفـتار بـازو توسـط منحنی قامت، می‌توان موقعیت بازو را تحت کنترل داشت و نیز با دراختیار داشتن زاویـه خـط مماس بر منحنی قامت در مرکز هر رابط، زاویه هریک از مفاصل بازوی ابرافزونه‌ای، چنین حاصل می‌شوند:

$$q_1 = \alpha(\frac{L}{2}) = a_1 \sin(\frac{\pi}{n})$$

$$+ a_2(1 - \cos(\frac{\pi}{n})) + \alpha_0$$

$$q_i = \alpha\left(\left(i - 1 + \frac{1}{2}\right)L\right) - \alpha\left(\left(i - 1 - \frac{1}{2}\right)L\right) \quad (۶)$$

$$= a_1\left[\sin\left(\frac{\pi}{n}(2i-1)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{n}(2i-3)\right)\right]$$

$$- a_2\left[\cos\left(\frac{\pi}{n}(2i-1)\right) - \cos\left(\frac{\pi}{n}(2i-3)\right)\right]$$

در روابـط بـالا، q بـیانگر زاویـه مفصـل، $i = 2,3,\ldots,n$ ، n برابـر بـا تعـداد رابطهـای بکـار رفـته در سـاختار روبات ابرافـزونه‌ای، و L طول هر رابط است که با مقدار l/n برابر اسـت. توجّـه بـه ایـن نکـته ضروری است که، با اعمال این روش کـه سـاختاری گسسته دارد به منحنی پیوسته قامت، خطـای موقعیـت مـچ، در عمـل، مقـداری کوچـک و قـابل چشمپوشـی خواهـد بود. همانطور که دیده شد، با دراختیار داشتن معادله مسیری که باید توسط مچ ربات تعقیب شود، یعنـی بـا داشـتن $(x(l), y(l))$ درهـر لحظه، و جایگذاری نقطه به نقطه این مسیر در روابط (۵) مقادیر a_1, a_2 در هر لحظـه از زمـان بدسـت مـی‌آیند. با جایگذاری این مقادیر و زاویـه شـیب اولـیه در روابـط (۶)، زاویـه مفاصـل بـازوی ابرافـزونه‌ای در هر لحظه از زمان مشخّص می‌گردند. اکنون بـا معلـوم بـودن مسـیر حرکـت هـر مفصل از بازو، می‌توان سـرعت و شـتاب همان مفصل را در اختیار داشت. و همین معلومـات بـرای اعمـال گشـتاور مناسب به هر مفصل، برای کنـترل کـل سیستم کافی است. در ادامه لازم به ذکر است کـه روش فوق در بوجودآوردن امکان کنترل زمان- حقیقی بـازوی ابرافـزونه‌ای، بـا افـزایش سـرعت محاسـباتی، نقـش بسزایی دارد [۱۱].

تعریف فضای موقعیت برای بازوهای ابرافزونه‌ای

در بـرخورد بـا مسـئله بازوهای ابرافزونه‌ای با درجات بزرگ آزادی سـینماتیکی‌شـان، لـزوم معرفـی فضـایی کـه ترسیم حرکـت بـازو درآن ممکن باشد، ضروری می‌نماید. همانطور کـه قـبلاً دیـده‌شـد، تا هنگامی که به دیدگاه منحنی قامت پایبـند باشـیم، موقعیـت بـازو توسـط سـه متغـیر مشخّص مـی‌گـردد. از بیـن ایـن سـه متغیـیر، a_1, a_2 مشخّصـاً در پیکربـندی فضـای موقعیـت، سـهیم خواهـند بود. اما برای افـزایش فضای‌کاری بازو، مقدار ثابت α_0 نیز به عنوان یکی از پارامـترهای ایـن فضـا منظورمی‌گردد. به عبارت دیگر، با افـزودن ایـن پارامـتر، بـرای تشـکیل فضـای موقعیـت، از محدودیتـی کـه در تعـریف تـابع منحنی قامت وجود دارد، کاسـته مـی‌شـود. بنابراین فضای موقعیت $\overline{\lambda}(a_1, a_2, \alpha_0)$، عـبارت اسـت از، فضایی که بتوان، تمام موقعیت‌های ممکن بـرای بازوی ابرافزونه‌ای را درآن گنجاند؛ و مبداء این فضا را مـــــی‌تـــــوان بطـــــور دلخـــــواه در موقعیـــــت $(a_1 = 0, a_2 = 0, \alpha_0 = 0)$ قـرار داد، طـوری کـه در ایـن وضـعیت، انـتهای بـازوی مکانیکـی بـه موازات محور طولها قرارگرفـته باشـد. بـا توجه به موارد بالا، برای منحنی قامت حاصـل از حرکـت بـازو در ازای گذر هر لحظه از زمان، یک نقطـه معـادل در فضـای موقعیت، وجود دارد. اعمال نگرش فضـای موقعیـت، در تحـلیلهای کنترلـی آیـنده بدین شکل اسـت کـه، کنـترل‌کـننده بـازو را وادار بـه تعقیـب مسیری مشـخّص در فضای موقعیت کند و این فضا خود دربرگیرنده تمام جزئیات حرکت سیستم است.

دینامیک مسئله

ازاینرو که معادلات دینامیکی سیستم، باید شامل مؤلّفه‌های، زاویه، سرعت و شتاب مفاصل باشد، لذا کارآیی رابطه (۶) به وضوح دیده می‌شود و این رابطه را می‌توان به شکل خلاصه‌شده زیر بازنویسی کرد:

$$\vec{q} = q(\vec{\lambda}) \qquad (۷)$$

که در رابطه (۷)، تمام معادلات به شکل توابعی از متغیرهای تعریف شده در فضای موقعیت (پاسچری)، خواهند بود. برای محاسبه سرعت مفاصل با مشتق‌گیری رابطه (۷) نسبت به زمان، خواهیم داشت :

$$\dot{\vec{q}} = \widetilde{J}_{\lambda}\dot{\vec{\lambda}} \qquad (۸)$$

و نـیز با مشتق‌گیری مجدد نسبت به زمان روابط مربوط به شتاب عبارتند از:

$$\ddot{\vec{q}} = \widetilde{J}_{\lambda}\ddot{\vec{\lambda}} + \dot{\widetilde{J}}_{\lambda}\dot{\vec{\lambda}} \qquad (۹)$$

کـه در روابـط بـالا $J_{\lambda} \in \Re^{n\times 3}$ نمایانگـر ماتریس ژاکوبین اسـت کـه اعضـای آن از رابطـه $\widetilde{J}_{\lambda}(i,j) = \partial\vec{q}_i / \partial\vec{\lambda}_j$ محاسبه می‌شوند و عبارتند از:

$$J_{\lambda}(i,1) = \begin{cases} \sin(\dfrac{\pi}{n}) & i=1 \\ \sin(\dfrac{\pi}{n}(2i-1)) & \\ -\sin(\dfrac{\pi}{n}(2i-3)) & i=2,\dots,n \end{cases}$$

$$J_{\lambda}(i,2) = \begin{cases} \left(1-\cos\left(\dfrac{\pi}{n}\right)\right) & i=1 \\ \cos\left(\dfrac{\pi}{n}(2i-3)\right) & \\ -\cos\left(\dfrac{\pi}{n}(2i-1)\right) & i=2,\dots,n \end{cases} \qquad (۱۰)$$

$$J_{\lambda}(i,3) = \begin{cases} 1 & i=1 \\ 0 & i=2,\dots,n \end{cases}$$

همانطور که دیده می‌شود تمام اعضای ماتریس ژاکوبین ثابت و نامتغیر با زمان می‌باشند و ازاین رو مشتق ماتریس ژاکوبین، برابر با صفر خواهد بود و بنابراین رابطه (۹) چنین اصلاح می‌شود:

$$\ddot{\vec{q}}(\lambda,\ddot{\lambda}) = \widetilde{J}_{\lambda}\ddot{\vec{\lambda}} \qquad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱) می‌توان دید که شتاب مفاصل، مستقل از سرعتشان می‌باشند. در نهایت معادله دینامیک سیستم به شکل کلّی زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{\tau} = \widetilde{M}(q)\ddot{\vec{q}} + \widetilde{C}(q,\dot{q}) + \widetilde{g}(q) \qquad (۱۲)$$

که در معادله (۱۲)، $\vec{\tau} \in \Re^n$ بردار گشتاور مفاصل، $\widetilde{M} \in \Re^{n\times n}$ ماتریس جرم، $\widetilde{C} \in \Re^n$ ماتریس نیروهای کریولیس و $\widetilde{g} \in \Re^n$ ماتریس نیروهای گرانشی را نشان می‌دهندکه معادله برابر با گشتاوری است که برای تعقیب مسیر باید به مفاصل وارد شود. پس از اعمال روابط تبدیل کننده به معادله (۱۲)، تعداد معادلات دینامیک سیستم به تعداد متغیرهای فضای موقعیت کاهش می‌یابد، که این امر در فرایند کنترل بازو نقشی بسزا خواهد داشت.

کنترل بازوی مکانیکی

همانطور که گفته‌شد یکی از روشهای موجود در برخورد با مسئله کنترل بازوی ابرافزونه‌ای اعمال قیودی مناسب به دینامیک سیستم است، اما افزودن قیود مختلف اثرات گوناگونی نیز برسیستم دارد و لذا باید مناسبترین قید را انتخاب‌کرده و بکار برد. بهترین قید عبارتست از قیدی که بدون اعمال تغییراتی قابل توجه در ماهیت کلی سیستم، معادلات دینامیک سیستم را ساده‌تر کند. یکی از روشهای موجود، روش مودال نام دارد. با اعمال چنین روش و دیدگاهی به مسئله، و تعیین تعداد مدها، بازوی ابرافزونه‌ای مقید به حرکت تحت مدهای مشخصی گشته و تعداد متغیرها در معادلات دینامیک بازو به تعداد مدهای درنظر گرفته‌شده برای سیستم کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه اگر تنها دو مد مجاز برای حرکت بازو درنظر گرفته شود، معادلات دینامیک بازو با هرچند رابط، با معادلات بازوی دو رابطی مشابه می‌گردد. همانطور که انتظار می‌رود تمام روشهای طراحی کنترل‌کننده برای بازو با دو رابط در مورد بازوی ابرافزونه‌ای مقید به دو مد صادق می‌باشند. برای بررسی تحقّق این موضوع یکی از این روشها برای هر دو سیستم آزمایش می‌شود. در ابتدا مسئله کنترل بازوی دارای دو رابط یا همان آونگ وارون دوگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد[۱۴-۱۲]. این سیستم با رفتار دینامیکی شناخته شده یکی از معروفترین سیستمهای غیرخطی در زمینه کنترل است. چراکه طی دهه‌های گذشته تقریباً تمام روشهای کنترلی اعم از طراحی کنترل‌کننده، تحلیل پایداری، روشهای بهینه‌سازی و غیره برآن اعمال شده است

و از آنجا که رفتار چنین سیستمی کاملاً شناخته شده‌است، لذا با آزمایش و اجرای روشهای جدید طراحی کنترل‌کننده درمورد آن، می‌توان کارآیی روشهای جدید را آزمود. شمائی از این سیستم در شکل (۱) دیده می‌شود. با اعمال معادلات لاگرانژ می‌توان معادلات دینامیک سیستم را به شرح زیر نوشت:

$$\tilde{M}(\theta)\ddot{\vec{\theta}} + \tilde{C}(\theta,\dot{\theta}) + \tilde{g}(\theta) = \vec{Q} \qquad (۱۳)$$

همانطورکه گفته‌شد، طراحی کنترل‌کننده برای چنین سیستمی را می‌توان به روشهای بسیار زیادی انجام داد. در اینجا به منظور طراحی کنترل‌کننده تعقیب مسیر در ابتدا از روش مدل پایه برای حذف جملات غیرخطی موجود در معادلات سیستم و دستیابی به مدل پایه سیستم، استفاده می‌شود و سپس برای این مدل پایه با استفاده از روش کلاسیک جایدهی قطب یک کنترل‌کننده PD برای تعقیب مسیر طراحی می‌گردد، هرچند که می‌توان از روشهای بسیار زیاد دیگری هم سود جست. در روش مدل پایه با حذف عملی غیرخطی‌کننده‌ها از دینامیک سیستم به شکل جبرانی، معادلات دینامیک به حالت خطی سیستم پایه رسانیده می‌شوند و همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود با حذف غیرخطی کننده‌ها، دو سیستم خطی حاصل می‌گردد. قابل ذکر است که انجام این عمل به معنای نادیده‌گرفتن جملات غیرخطی در سیستم نبوده و اثر این جملات همواره در سیستم لحاظ می‌گردد. برای طراحی کنترل‌کننده تعقیب مسیر باید سیگنال خطای سیستم را تصحیح کرده و خطا را به صفر رسانید بنابراین ضرایب بهره کنترل‌کننده بر سیگنال خطا اعمال می‌شوند که در نهایت برای سیستم مدل پایه معادله زیر حاصل می‌گردد:

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e = 0 \qquad (۱۴)$$

که در معادله بالا e سیگنال خطا برابر با $e = \theta_d - \theta$ و K_p, K_v ماتریسهای بهره کنترل‌کننده هستند. برای بدست آوردن این دو ماتریس قطری از روش جایدهی قطب استفاده شده‌است. در این مورد قطبهای سیستم را به مکانی انتقال می‌دهیم که تعقیب مسیر با ویژگیهای خوبی ممکن گردد. برای مقادیر $m_1 = m_2 = 1kg$ و $l_1 = l_2 = 1m$، ضرایب $k_v = 14, k_p = 100$ حاصل شده‌اند. همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود نمودار بلوکی شبیه‌سازی شده سیستم با استفاده از نرم‌افزار MATLAB آماده شده‌است. نتایج اعمال بار اولیه پله واحد بر زوایای θ_1, θ_2 و صفر بودن سایر ورودی‌های سیستم نیز در شکل (۴) دیده می‌شود و همانطور که مشخص است سیستم پاسخ خوبی به اعمال ورودی اولیه داده و مسیر را به خوبی تعقیب می‌کند. نتایج حاصله، با بسیاری از مراجع موجود قابل مقایسه می‌باشند[۱۴].

با انجام محاسبات و آزمایش روشهای ذکر شده بر سیستم بازویی دارای افزونگی درجات آزادی و با تعداد مشخصی رابط، می‌توان کارآیی روش مودال را بر سیستم بازوی ابرافزونه‌ای آزمود. به عنوان نمونه در اینجا از بازویی با چهار رابط در فضای کاری دوبعدی استفاده می‌شود. همانطور که گفته‌شد چنین سیستمی دارای دو درجه افزونگی می‌باشد. در ابتدا با استفاده از رابطه لاگرانژ چهار معادله دینامیک سیستم بدست می‌آید. (به علت گستردگی معادلات از ذکر آنها در این مقاله صرفنظر شده است.)، سپس برای انجام تبدیل و قیدگذاری ماتریس ژاکوبین توسط رابطه (۱۰) برای سیستم با فرض $\alpha_0 = 0$، محاسبه می‌شود و با جایگذاری آن در معادلات (۷) و (۸) و (۱۱) معادلات دینامیک سیستم حاصل می‌شوند. با انجام محاسبات مربوطه دو معادله مشابه با معادلات آونگ وارون دوگانه به دست می‌آید. در آونگ وارون دوگانه متغیرها همان زوایای سیستم θ_1, θ_2 بوده ولی در بازوی ابرافزونه‌ای متغیرها مَدهای سیستم a_1, a_2 هستند. این معادلات تبدیل یافته سیستم عبارتند از:

$$\begin{aligned}
&\tilde{M}^*(q)\ddot{\vec{q}} + \tilde{C}^*(q,\dot{q}) + \tilde{g}^*(q) = \vec{Q}_p^* \\
&M^*{}_{11} = m_{11}/2 + 2m_{33} - 2m_{13} \\
&M^*{}_{12} = M^*{}_{21} = 0.207m_{11} - 0.414m_{13} \\
&+ m_{12} - 2m_{32} - m_{14} + 2m_{34} \\
&M^*{}_{22} = 0.085m_{11} + 2m_{22} + 2m_{44} + \\
&0.828m_{12} - 0.828m_{14} - 4m_{24} \\
&C^*{}_{11} = c_{12} - 2c_{32} - c_{14} + 2c_{34} - 0.414c_{31} \\
&C^*{}_{21} = -C^*{}_{11} \\
&g^*{}_{11} = 0.707g_{11} - 1.414g_{31} \\
&g^*{}_{21} = 0.293g_{11} + 1.414g_{21} - 1.414g_{41}
\end{aligned} \qquad (۱۵)$$

بدلیل تشابه معادلات دینامیک دو سیستم تمام موارد ذکر شده برای آونگ وارون دوگانه را می‌توان مجدداً تکرار کرد و تنها با جایگزین کردن ضرایب جدید در نمودار بلوکی

موجود برای آونگ وارون دوگانه و محاسبه مجدد ضرایب کنترلی با روش جایدهی قطب می‌توان نتایج را مشاهده نمود . همانطور که در شکل (۵) دیده می‌شود سیستم در پاسخ به ورودی پله واحد نتایج مطلوبی را نشان می‌دهد. پاسخ سیستم موردنظر به ورودی‌های شیب واحد و موج سینوسی نیز به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده‌اند. با فرض اینکه جرم هر رابط برابر واحد و طول آن نیز برابر طول واحد باشد، ضرایب کنترل‌کننده مناسب با توجه به پایداری سیستم $K_p = 800, K_v = 60$ خواهند بود. پاسخ به ورودی پله ، شیب و سینوسی، کارآیی روش را در تعقیب این مسیرها نشان می‌دهد هر چند لزوماً این مقادیر گین بهینه نیستند. بحث طرح کنترلر بهینه در مورد این سیستم غیرخطی پیچیده‌تر است و در این مقاله با روشی که ارائه شد تنها امکان استفاده از کاهش دادن مرتبه سیستم دارای ابرافزونگی مورد مطالعه قرار گرفت. در واقع تشابه معادلات دینامیکی این نوع بازوی مکانیکی با بازوی مکانیکی دو درجه آزادی انگیزه استفاده از تجربیات طراحی کنترل‌کننده‌های بازوی دو درجه آزادی را بوجود آورد و در قالب یک مثال کارآیی آن نشان داده شد.

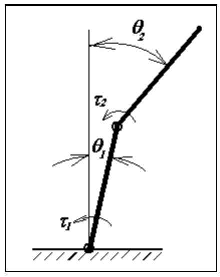
جمع‌بندی

همانطور که گفته‌شد، کنترل بازوهای ابرافزونه‌ای بدون اعمال قیود مناسب بر دینامیک سیستم کار ساده‌ای نیست ولی به علت جایگاه وسیع این سیستمها در صنعت و فناوری امروز توجه به آنها روز به روز بیشتر می‌شود. در این مقاله یک روش کنترل دینامیک با اعمال قیدهای مودال برای دستیابی به کنترل زمان حقیقی بازوهای ابرافزونه‌ای معرفی گردید. در ابتدا سینماتیک مسئله بر پایه بیان منحنی قامت مورد تحلیل قرار گرفت و سپس دینامیک مسئله در فضای موقعیت فرموله گردید. سپس اعمال نگرش مودال به عنوان افزودن قیدی به دینامیک سیستم مورد بررسی قرار گرفت و چون در این مقاله بازو تحت دو مد محدود گردیده‌است و به علت تشابه معادلات دینامیک بازوی ابرافزونه‌ای تحت دو مد با دینامیک بازو با دو رابط، روش اعمال کنترل‌کننده تعقیب مسیر برای آونگ وارون دوگانه با استفاده از نگرش مدل پایه بطور مشابه برای بازوی ابرافزونه‌ای با چهار رابط در فضای دوبعدی اعمال، شبیه‌سازی و آزمایش گردیده است و نتایج حاصله نشان دهنده کارآیی این روش بر بازوهای ابرافزونه‌ای است.

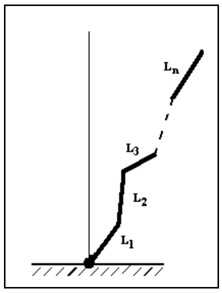
مراجع

[1]. V. V. Anderson and R. C. Horn, "Tensor-arm Manipulator design," ASME Trans., pp. 1-12, 1967.
[2]. M. Ivanescu and I. Badea, " Dynamic control for a tentacle manipulator," in Proc. Int. Conf. on Robotics and Factories of the Future, Dec. 4-7, 1984, USA, pp. 317-328.
[3]Pettinato Stephanou, "Manipulability and stability of a tentacle based robot manipulator," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat. 1989, pp. 458-463.
[4]. F. Naccarato and P. C. Hughes, "An inverse kinematics algorithm for a highly redundant variable-geometry-truss manipulator," in Proc. 3rd Annual Conf. Aerospace Computational Control, D. E. Bernard and G. K. Man, Eds. Oxnard, CA: JPL Pub., 89-45, Dec. 15, 1989.
[5]. A. Morecki, et al., "Robotic system Elephant trunk type elastic manipulator combined with a quadruped walking machine," in Proc. Of Second Int. Conf. on Robotics and Factories of the Future, San Diego, July 1987, pp. 649-656.
[6]. S. Hirose and Y. Umetani, "Kinematic control of active cord mechanism with tactile sensors," in Proc. 2nd Int. CISM-IFT Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp.241-252, 1976.
[7]. G. S. Chirikjian, and J. W. Burdick, "An obstacle avoidance algorithm for hyper-redundant manipulators," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., Cincinnati, OH, May 14-17, 1990.
[8]Klein- Huang, "Review of the pseudoinverse for control of kinematically redundant manipulators," IEEE Trans. Syst. Man Cyber., March, 1983.
[9]. G. S. Chirikjian, "Hyper-redundant manipulator dynamics: A continuum approximation," Advanced Robotics, vol. 9, no. 3, pp. 217-243, 1995.
[10] G. S. Chirikjian and J. W. Burdick, "A geometric approach to hyper-redundant manipulator kinematics," ASME Journal of Mechanical Design, vol. 114, Dec, pp. 580-585, 1992.
[11]. S. Ma, M. Watanabe, and H. Kondo, "Dynamic control of curve-constrained hyper-redundant Manipulators," in Proc. IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in robotics and automation, July 29-August 1, Banff, Alberta,
[12]. H. Seraji, "Configuration control of redundant manipulators: Theory and implementation," IEEE Trans. Robotics, vol. 5, no. 4, pp. 472-490, 1989.
[13]. S. Ma, M. Watanabe, and H. Kondo, "Dynamic control of curve-constrained hyper-redundant Manipulators," in Proc. IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in robotics and automation, July 29-August 1, Banff, Alberta, Canada pp.83-88. 2001.

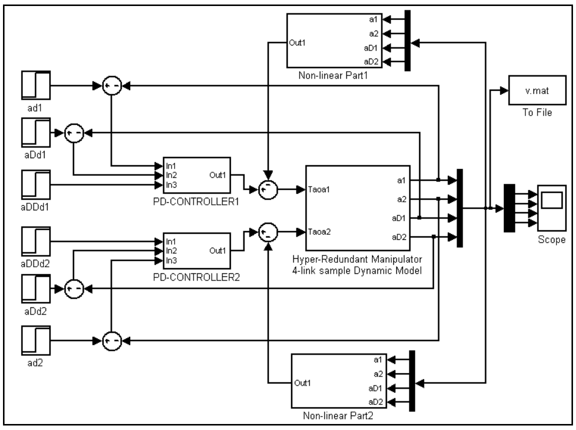
[14]. Y.S.Lin, J.X.Qian, A.K.Xue and J.H.Wang, "Simple Multi-PD Control Algorhitm of Double Inverted Pendulum," in Proc. IEEE Tencon Conf. pp.1428-1431, 2002



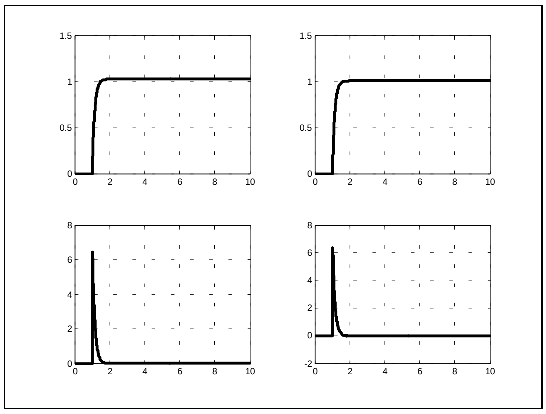
شکل۱- آونگ وارون دوگانه



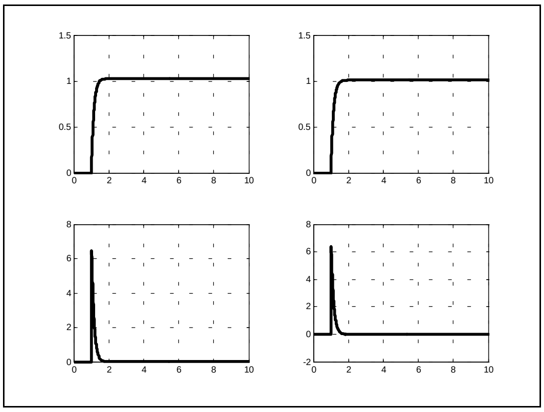
شکل۲- بازوی ابرافزونه‌ای



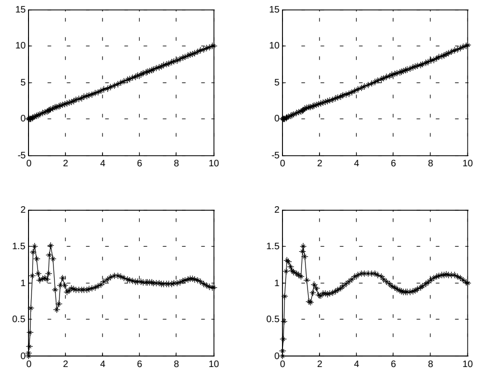
شکل۳- نموداربلوکی شبیه‌سازی‌شده در **MATLAB**



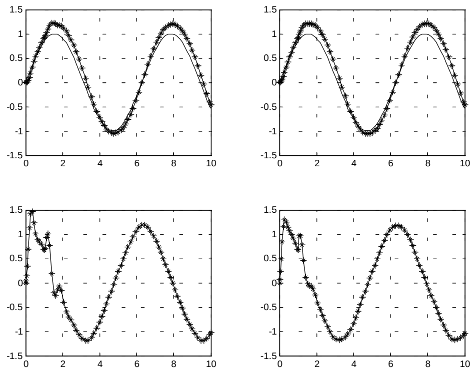
شکل۴- پاسخ آونگ وارون دوگانه به ورودی پله واحد (دو نمودار بالا θ_1, θ_2 و دو نمودار پایین $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$



شکل۵- پاسخ بازو باچهار رابط به ورودی پله واحد (دو نمودار بالا θ_1, θ_2 و دو نمودار پایین $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$



شکل۶- پاسخ بازو باچهار رابط به ورودی شیب (دونمودار بالا θ_1, θ_2 ودونمودار پایین $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$



شکل۷- پاسخ بازو باچهار رابط به ورودی سینوسی (دونمودار بالا θ_1, θ_2 ودونمودار پایین $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$