

## مروری بر طراحی و ساخت بازوهای بسیار-افزونه با تحریک ناپیوسته

**چکیده:** بازوهای بسیار-افزونه از روی هم چیده شدن چند مکانیزم موازی به عنوان پودمان، ایجاد می شوند. اگر تمام عملگرهای این بازوها ناپیوسته باشند به آنها بازوهای بسیار-افزونه با تحریک ناپیوسته گفته می شود. عملگرهای ناپیوسته تنها به چند وضعیت محدود قابل تحریک هستند و نسبت به حالت معمولی پیوسته، کنترل ساده تر، تکرارپذیری بیشتر، دقت بالاتر و قیمت کمتری دارند. تعداد نقاط قابل دسترسی در بازوهای ناپیوسته محدود است و تعقیب مسیر با آنها به صورت تکه تکه، با سرعت غیر یکنواخت و با تقریب صورت می گیرد. بنابراین در اغلب موارد ترجیح داده می شود که از بازوهایی با تحریک پیوسته استفاده شود و استفاده از بازوهای ناپیوسته به موارد خاصی محدود می شود. به عنوان مثال قابلیت استفاده از عملگرهای دو حالت ساده، سبک، کم حجم، ارزان و با مصرف انرژی پایین در این نوع بازوها باعث شده بتوان از آنها در کاوش های فضایی، مصارف پزشکی از قبیل درون بینی رباتیک و آموزش رباتیک استفاده کرد. در این مقاله انواع مختلفی از این ربات ها که تا کنون ساخته شده اند، از لحاظ طراحی و قابلیت هایی که دارند، بررسی خواهد شد تا از این طریق طراحان در آینده بتوانند موارد بهتری را طراحی کنند و از مزایای این ربات ها استفاده کنند.

**واژه های راهنما:** طراحی و ساخت ربات، بازوهای بسیار-افزونه، عملگرهای دو حالت، تحریک ناپیوسته

غلامرضا خلیج

دانشیار

**علیرضا مطهری\***

استادیار،

دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد

ساوه، ساوه

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

**Gholamreza  
Khalaj**  
Associated Professor

**Alireza  
Motahari\***  
Assistant Professor,  
Saveh Branch,  
Islamic Azad  
University, Saveh

## A review of the design and implementation of discretely actuated hyper-redundant manipulators

**Abstract:** Hyper-redundant manipulators are created by stacking multiple parallel mechanisms as modules. If all the actuators of these manipulators are of the discrete type, they are called discretely-actuated hyper-redundant manipulators (DAHRMs). Discrete actuators (DAs) can only be actuated in a limited number of states. DAs have simpler control, more repeatability, higher accuracy, and a lower cost than the common continuous actuators. The number of accessible points in DAHRMs is limited, and they follow the paths segment by segment, at a non-uniform speed, and in an approximate, not exact, way. Therefore, in most cases, it is preferred to use continuous manipulators, and the use of DAHRMs is limited to certain cases. For example, the ability to use simple, light, compact, cheap and low-energy-consuming binary actuators in DAHRMs has made it possible to use them in space exploration, medical applications such as robotic endoscopy and robotic training. In this paper, different types of DAHRMs that have been made so far will be reviewed in terms of their design and capabilities so that designers can design better things in the future and use the advantages of these robots.

**Keywords:** Design and implementation of robots, Hyper-redundant manipulators, Binary actuators, Discrete actuation

## ۱- مقدمه

کاملاً جمع شده (یا کاملاً کشیده) برسد کافی است به شیر برقی مربوطه دستور داده شود تا مجرای درستی برای هوا باز شود، پس از این دستور، فقط باید زمان کافی به سیلندر داد تا کاملاً جمع (یا کاملاً کشیده) شود. در این حالت پیستون داخل سیلندر آنقدر حرکت می کند تا به متوقف کننده‌ها برخورد کند. بنابراین به هیچ حسگری برای تشخیص میزان حرکت سیلندر احتیاج نیست. در ضمن لازم نیست سیلندر در بین راه متوقف شود. در این حالت (تحریک پیوسته)، دقت و تکرار پذیری حرکت، مستلزم استفاده از لوازم کنترلی بیشتری بوده و این کار حتی بواسطه خاصیت تراکم پذیری هوا مشکل تر خواهد بود. رفتارهای غیر خطی در بسیاری از عملگرهای دیگر مثل عملگرهای اس-ام-ای<sup>۴</sup> یا عملگرهای دی الکتریک<sup>۵</sup> هم دیده می شود؛ کنترل پیوسته آن‌ها حتی با مشکلات بیشتری همراه است، اما تحریک ناپیوسته کنترل آنها را ساده تر می کند.

یکی از مکانیزم‌هایی که استفاده از عملگرهای ناپیوسته در آن مورد توجه قرار گرفته است، بازوهای بسیار-افزونه می باشد [۲-۶]. این بازوها از چیدن مکانیزم‌های موازی بر روی هم، به عنوان پودمان<sup>۶</sup>، ساخته می‌شود. به عنوان مثال یک پودمان وی-جی-تی<sup>۷</sup> در شکل ۱-الف) نمایش داده شده است.

هر پودمان وی-جی-تی یک مکانیزم زنجیره بسته<sup>۸</sup> صفحه‌ای شامل سه عملگر خطی دو حالت (میله‌های<sup>۹</sup> AC, AD, BC در شکل ۱-الف)) و دو میله با طول ثابت (میله‌های AB, CD در شکل ۱-الف)) می‌باشد. این میله‌ها مطابق آنچه در شکل ۱-الف) نمایش داده شده است در نقاط A, B, C, D به صورت غیر فعال<sup>۱۰</sup> با لولا اتصال داده شده اند. با ترکیب حالات تحریک عملگرها، این پودمان می تواند به  $2^3 = 8$  صورت مختلف تحریک شود، که در شکل ۱-ب) نمایش داده شده اند. به هر یک از این فرم ها یک پیکربندی<sup>۱۱</sup> گفته می‌شود. با چیدن این پودمان ها روی هم یک بازو به دست می آید که هر یک از پودمان‌های آن مستقلاً می توانند در یکی از هشت پیکربندی مذکور تحریک شود.

شکل (۲) یک بازو با چهار پودمان وی-جی-تی را نمایش می دهد که در آن پودمان اول (پودمان متصل به پایه) در پیکربندی شماره ۴، پودمان دوم در پیکربندی ۸، پودمان سوم در پیکربندی ۳ و آخرین پودمان در پیکربندی ۶ قرار دارد.

ربات‌ها معمولاً دارای عملگرهایی با تحریک پیوسته هستند. منظور از تحریک پیوسته یک عملگر آن است که مقدار تحریک آن می تواند هر عددی داخل یک بازه مشخص باشد. به عبارت دیگر مقدار حرکت عملگر در یک بازه پیوسته قابل کنترل است. از این پس به این نوع عملگرها، عملگرهای پیوسته گفته می‌شود. اگر تمام عملگرهای یک ربات، از نوع پیوسته باشند، به آن ربات پیوسته گفته می شود. آنچه از یک ربات پیوسته انتظار می رود آن است که بتواند حرکات دقیقی را انجام دهد و مقدار حرکت عملگرها در هر لحظه تحت کنترل باشد. این امر مستلزم استفاده از تجهیزات کنترلی دقیقی از قبیل حسگرها و پردازشگرها می باشد، علاوه بر آن عملگرهای مورد استفاده هم باید قابلیت کنترل پذیری بالا و ایجاد حرکات دقیق را داشته باشند. علاوه بر این تجهیزات سخت افزاری، نرم افزارهای پیچیده ای برای کنترل مناسب ربات باید طراحی شود. این موارد باعث می‌شود یک ربات پیوسته معمولاً دارای وزن، حجم و قیمت بالایی باشد، تعمیر و نگهداری آن مشکل و پر هزینه باشد و کاربری آن مشکل باشد و به دانش بالایی احتیاج داشته باشد. این مشکلات وقتی تعداد عملگرها بیشتر می شود (مثلاً در بازوهای بسیار-افزونه)، افزایش پیدا می کند.

برای کاستن از این مشکلات، برخی از محققین به فکر استفاده از عملگرهایی با تحریک ناپیوسته افتادند [۱،۲]. در عملگرهای ناپیوسته<sup>۱</sup>، مقدار تحریک به چند انتخاب محدود می شود. مثلاً در یک سیلندر دو حالت<sup>۲</sup>، فقط دو مقدار برای تحریک وجود دارد: حالت کاملاً جمع شده (حالت ۰) و حالت کاملاً کشیده (حالت ۱). به عملگرهای ناپیوسته می توان دستور داد که به اندازه یکی از این مقادیر حرکت کند و در حین حرکت دیگر کنترلی بر روی عملگر وجود ندارد. عملگرهای ناپیوسته می توانند ساختار ساده تری نسبت به عملگرهای پیوسته داشته باشند و کنترل آن‌ها نیز ساده تر است. برای کنترل آن‌ها به پسخور<sup>۳</sup> و تجهیزات کنترلی پیچیده احتیاج نیست. برنامه های کنترلی هم ساده تر خواهند بود. علاوه بر این‌ها دقت و تکرار پذیری این عملگرها بیشتر از نوع پیوسته خواهد بود. به عنوان مثال در مورد یک سیلندر دو حالت نیوماتیکی برای آنکه به حالت

<sup>7</sup> VGT: Variable Geometry Truss

<sup>8</sup> Closed chain

<sup>9</sup> Links

<sup>10</sup> Passive

<sup>11</sup> Configuration

<sup>1</sup> Discrete actuators

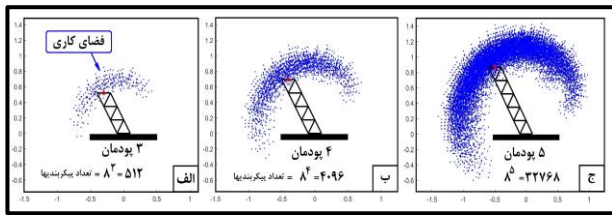
<sup>2</sup> Binary cylinder

<sup>3</sup> Feedback

<sup>4</sup> SMA: Shape-Memory Alloy

<sup>5</sup> Dielectric

<sup>6</sup> Module

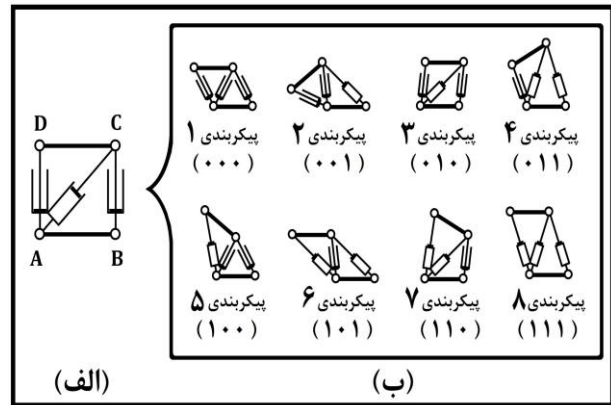


شکل ۳ نمایش فضای کاری یک بازوی وی-جی-تی، شامل: الف) سه پودمان، ب) چهار پودمان، ج) پنج پودمان

حالا اگر چگالی نقاط در فضای کاری بالا باشد، یعنی نقاط قابل دسترسی، فاصله کمی از هم داشته باشند، آنگاه خطای دسترسی به نقاط از نوع دوم کمتر خواهد بود. همانطور که شکل (۳) نشان می‌دهد برای افزایش چگالی فضای کاری، باید تعداد پودمان‌ها افزایش داده شود.

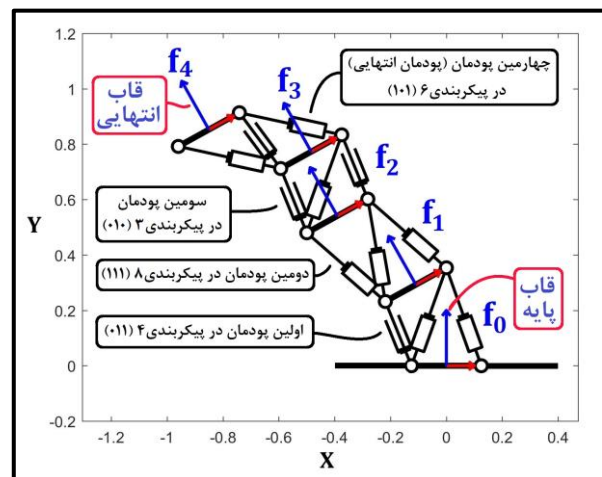
مفهوم درجه آزادی که در مورد ربات‌های پیوسته تعریف می‌شود، در مورد ربات‌های ناپیوسته کمی چالش برانگیزتر است. هنگامی که درجه آزادی یک بازوی صفحه‌ای بیش از سه باشد، به این معنی است که بازو می‌تواند بدون تغییر در موقعیت و جهت مجری نهایی حرکت کند و در پیکربندی دیگری قرار گیرد. اما این لزوماً در مورد بازوهای ناپیوسته صدق نمی‌کند، زیرا پیکربندی‌های آن‌ها محدود است. اگر تعداد پودمان‌ها به اندازه کافی زیاد باشد، به طوری که تراکم فضای کاری به اندازه کافی افزایش یابد بازو می‌تواند به طور تقریبی این کار را انجام دهد. این بدان معنی است که می‌توان پیکربندی بازو را تغییر داد، بدون اینکه مجری نهایی حرکت قابل توجهی داشته باشد. این موضوع در شکل (۴-الف) برای یک بازوی وی-جی-تی با ۲۰ پودمان در یک موقعیت نمونه نشان داده شده است. قاب‌های انتهایی به رنگ آبی نشان داده شده‌اند. از این ویژگی می‌توان برای جلوگیری از برخورد با موانع در حین تعقیب مسیر استفاده کرد.

شکل (۴-ب) کیفیت تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته را نشان می‌دهد. بازوی نمایش داده شده شامل ۱۰ پودمان وی-جی-تی است. مسیر مطلوب برای تعقیب توسط بازو یک خط بنفش رنگ است. جهت‌گیری مطلوب برای محور Y قاب انتهایی در طول این مسیر، عمودی و به سمت بالا است. پنج قاب مربوط به نقاط دقت در این مسیر با خط چین سبز رنگ و فریم انتهایی با خط قرمز نشان داده شده است. این مسیر در چهار مرحله با تغییر در پیکربندی بازو دنبال می‌شود. مسیر طی شده توسط مجری نهایی بازو با منحنی‌های آبی نشان داده شده است. فرض بر این است که سرعت سیلندرها در حین باز یا بسته شدن ثابت می‌ماند. همچنین این سرعت برای تمامی سیلندرها یکسان است. در تعقیب مسیر توسط بازوهای پیوسته، پیکربندی بازو در هر



شکل ۴ الف) پودمان وی-جی-تی، ب) پیکربندی‌های پودمان وی-جی-تی

این شماره‌ها مطابق با شکل (۱-ب) عنوان شده‌اند. بنابراین آنچه گفته شد، یک بازو با چهار پودمان وی-جی-تی می‌تواند  $A^4 = 8^4$  پیکربندی مختلف داشته باشد. هر پیکربندی، فریم انتهایی خود را در مکان خاصی از صفحه خواهد برد. بنابراین فضای کاری این بازو شامل همین تعداد فریم در صفحه خواهد بود. شکل‌های (۳-الف)، (۳-ب)، و (۳-ج) فضای کاری یک بازوی وی-جی-تی را نشان می‌دهد که به ترتیب شامل سه، چهار و پنج پودمان است. در این شکل‌ها طول سیلندرها در حالت کاملاً کشیده (حالت ۱) یک و نیم برابر طول آن‌ها در حالت کاملاً جمع شده (حالت ۰) است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پودمان‌ها، تعداد نقاط فضای کاری به طور نمایی افزایش می‌یابد. همچنین اندازه فضای کاری هم زیاد می‌گردد. اگر بازو بخواهد به یک نقطه دلخواه در محدوده فضای کاری دست پیدا کند، دو حالت مطرح می‌شود: این نقطه یکی از نقاط فضای کاری است یا آنکه بین آن‌ها واقع شده است. در حالت اول از نظر تئوری بازو می‌تواند بدون خطا به آن نقطه دست پیدا کند. اما در حالت دوم، خطا در دستیابی اجتناب ناپذیر است.



شکل ۵ یک بازوی وی-جی-تی چهار پودمانی در پیکربندی ۴۸۳۶

همانطور که قبلاً بحث شد، برای افزایش انعطاف پذیری، جلوگیری از برخورد با موانع، افزایش دسترسی به نقاط و افزایش دقت در تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته، باید تعداد پودمان‌های آن‌ها افزایش یابد. اما با این کار وزن و قیمت آنها افزایش می‌یابد. این یک چالش برای این نوع بازوهاست و باعث می‌شود که بازوهای پیوسته در بیشتر موارد بر بازوهای ناپیوسته ترجیح داده شوند. دلیل دیگری که باعث می‌شود بازوهای ناپیوسته کمتر مورد استفاده قرار گیرند، ضعف آن‌ها در تعقیب مسیر است (همانطور که در شکل (۴-ب) توضیح داده شد). این دلایل باعث می‌شود که استفاده از بازوهای ناپیوسته به موارد خاصی محدود می‌شود. این موارد در بخش بعدی مقاله توضیح داده خواهد شد. برخی از مزایا و معایب بازوهای ناپیوسته در جدول (۱) ارائه شده است.

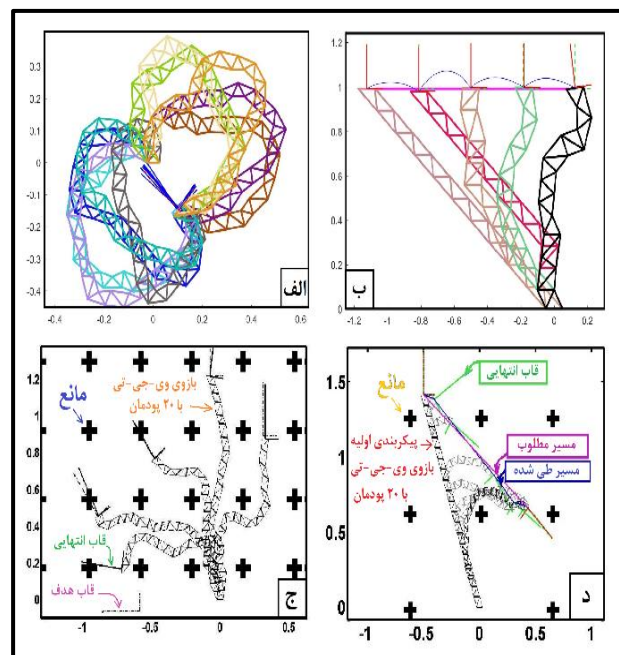
جدول ۱ مزایا و معایب بازوهای ناپیوسته در مقایسه با بازوهای پیوسته

مزایا	معایب
کنترل آسان عملگرهای ناپیوسته بدون نیاز به پسخور دقت بالا و تکرارپذیری عملگرهای ناپیوسته	فضای کاری گسسته است، بنابراین برای افزایش تعداد نقاط دسترسی باید تعداد پودمان‌ها را افزایش داد. این کار باعث افزایش هزینه و وزن بازو می‌شود.
بدلیل عدم نیاز به تجهیزات کنترلی پیچیده، از وزن، حجم و قیمت آن کاسته می‌شود.	تعقیب مسیر معمولاً نمی‌تواند به صورت دقیق انجام شود. بازو از یک نقطه هدف به نقطه هدف بعدی می‌رود و در حین تغییر پیکربندی هیچ امکان ساخت عملگرهای ناپیوسته در ابعاد میلی، میکرو و نانو بهتر از نوع پیوسته است.
نوعی از عملگرهای ناپیوسته به نام عملگرهای دو پایا بعد از تغییر پیکربندی قفل می‌شوند و برای حفظ موقعیت خود در حالت بی حرکت، احتیاج به مصرف انرژی ندارند. این کار مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.	تعقیب مسیر نمی‌تواند با سرعت ثابت انجام شود. زیرا در حین تغییر پیکربندی، هیچ کنترلی روی ربات وجود ندارد. در ضمن تعقیب مسیر به صورت تکه تکه انجام می‌شود و پس از اجرای هر دستور اندکی مکث می‌کند.

همانطور که گفته شد بازوهای ناپیوسته مصارف خاص و محدودی دارند. اما در مقابل امکاناتی فراهم می‌کنند که از عهده نوع مرسوم بازوها خارج است. برای آشنایی با این توانایی‌ها در ادامه مقاله در بخش دوم، تمام نمونه‌هایی که از بازوهای ناپیوسته تا کنون ساخته شده است، مورد به مورد معرفی و بررسی می‌شوند. پس از آن در بخش سوم به جمع بندی و پیشنهاد برای تحقیقات آتی پرداخته می‌شود. در نهایت، منابع ارائه می‌گردد.

## ۲- معرفی و بررسی نمونه های ساخته شده از بازوهای ناپیوسته

لحظه تحت کنترل است و مسیر طی شده توسط مجری نهایی بازو معمولاً بسیار شبیه به مسیر مطلوب می‌باشد. همچنین مجری نهایی می‌تواند کل مسیر را با سرعت تقریباً ثابتی طی کند. اما در بازوهای ناپیوسته این طور نیست؛ ابتدا دستور یک تغییر پیکربندی اجرا می‌شود و سپس باید به اندازه کافی منتظر شد تا تغییر پیکربندی به طور کامل انجام شود. سپس برای تعقیب ادامه مسیر، یک تغییر پیکربندی جدید باید اجرا شود. بنابراین تعقیب مسیر معمولاً به صورت تکه تکه انجام می‌شود و بین هر تکه از پیمایش مسیر، بازو برای مدتی ثابت می‌ماند. تعداد این تکه‌ها برابر با تعداد نقاط دقت است. انتخاب تعداد و محل نقاط دقت می‌تواند موضوعی برای یک تحقیق باشد. علاوه بر این، در حین تغییر پیکربندی، هیچ کنترلی روی بازو وجود ندارد و مسیر پیموده شده لزوماً به صورت دقیق بر روی مسیر مطلوب منطبق نمی‌گردد (عدم انطباق منحنی پیموده شده آبی رنگ و مسیر مطلوب بنفش رنگ در شکل (۴-ب)). بنابر آنچه گفته شد، بازوهای ناپیوسته برای کارهایی که نیاز به تعقیب مسیر با دقت بالا و سرعت ثابت دارند، مناسب نیستند. به عنوان مثال، رنگ آمیزی پاششی خودرو یا جوشکاری قوس الکتریکی مداوم برای این بازوها مناسب نیست و بهتر است توسط بازوهای پیوسته انجام شود. شکل (۴-ج) توانایی بازوهای ناپیوسته را برای دوری از موانع نشان می‌دهد. شکل (۴-د) توانایی بازوهای ناپیوسته را برای دنبال کردن یک مسیر در یک محیط با مانع نشان می‌دهد.

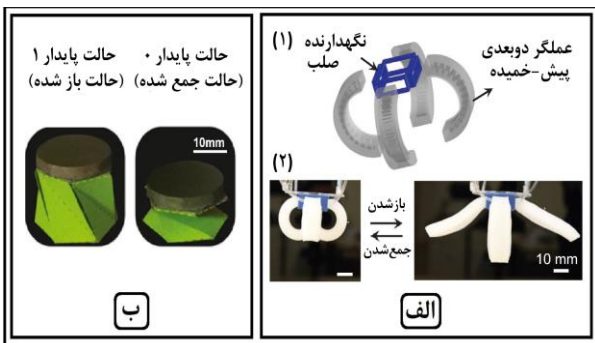


شکل ۴ الف) ۱۰ پیکربندی با موقعیت قاب انتهایی نزدیک به هم مربوط به یک بازوی وی-جی-تی با ۲۰ پودمان، ب) یک نمونه از تعقیب مسیر توسط بازوی وی-جی-تی با ۱۰ پودمان، ج) ۵ نمونه پیکربندی بدون برخورد [۵]، د) یک نمونه از تعقیب مسیر در فضای مانع دار [۶]

از پیش کشیده شده ایجاد می شود؛ این لایه از زیر به یک لایه الاستومری بدون تنش ضخیتر چسبانده می شود که حاوی کانال های هوا می باشد.

برخی از عملگرهای چند پایا، با کمک از اورینگامی<sup>۵</sup> ایجاد شده اند و در حال توسعه هستند [۵۰-۴۶، ۱۹، ۱۴، ۱۰]. خوانندگان برای اطلاعات بیشتر در مورد عملگرهای چند پایایی که بر اساس اورینگامی ابداع شده اند می توانند به مقاله مروری سان و همکاران [۵۱] مراجعه نمایند.

در شکل (۵-ب)، نمونه ای از یک عملگر دو پایا نمایش داده شده که بر اساس طرح اورینگامی کرسلینگ<sup>۶</sup> ارائه شده است [۴۷]. در این عملگر، از تحریک الکترومغناطیس بدون تماس استفاده می شود. دیسک رویی این عملگر یک آهنربای دائمی است و وقتی در یک میدان مغناطیسی نامسو قرار می گیرد، گشتاور پیچشی به دیواره اعمال کرده و باعث چرخش دیسک و در نتیجه، جمع شدن و یا باز شدن دیواره می شود.



شکل ۵ الف- یک چنگک با چهار عملگر دو پایای نرم بادی [۷]؛  
ب- یک عملگر دو حالتی که بر اساس طرح اورینگامی کرسلینگ ساخته شده است [۴۷]

بررسی انواع عملگرهای ناپیوسته به بحث مفصلی احتیاج دارد که خود می تواند موضوع یک مقاله مروری دیگر باشد و در اینجا به همین مقدار بسنده می شود. اما چیزی که موضوع این مقاله است بررسی بازوهای ناپیوسته ای است که تا کنون ساخته شده اند. هدف از این بررسی پاسخ به سوالات زیر می باشد: (۱) زمینه هایی که این نوع بازوها می توانند به کار روند، چیست؟ (۲) ساختار و طراحی این ربات ها چگونه بوده است؟ (۳) این بازوها تا چه حد در انجام وظایف خود موفق هستند؟ (۴) سرعت عمل و قدرت این بازوها و ابعاد و وزن آنها چگونه است؟ پاسخ به این سوالات می تواند راهنمایی برای طراحی های بعد باشد و اطلاع

عملگرهای ناپیوسته امروزه مصارف متنوعی دارند، علاوه بر بازوهای بسیار-افزونه، این عملگرها در چنگک ها<sup>۱</sup> [۷-۱۳]، سوئیچ ها [۱۴]

ربات های پوشیدنی توانبخشی<sup>۲</sup> [۱۵-۱۶]، آینه های متمرکز کننده نور [۱۷-۱۸]، میلی روباتها [۱۹] و میکروروباتها [۲۰-۲۲]، ربات هایی برای هدایت سوزن تشخیص و درمان سرطان پروستات [۲۳-۲۴]، سازه های فعال با چند شکل پایدار [۲۵-۲۶]، ربات برای گذاشتن و برداشتن سریع اشیاء [۲۷] کاربرد دارند. اغلب این عملگرها را می توان در یکی از انواع بادی [۲۷، ۲۶، ۲۴، ۱۶] الکترومغناطیسی [۲۸]، الکتروترمال [۲۲، ۲۰]، مکانیکی [۱۲]، پلیمرهای تحریک پذیر با الکتروسیسته یا دی الکتریک [۲۳-۲۹، ۳۱]، آلیاژهای حافظه دار یا اس-ام-ای [۳۲-۳۹] و الکتروموتورها [۱۵، ۴۰-۴۲] قرار داد.

لازم به ذکر است که دسته وسیعی از ربات های نرم<sup>۳</sup> از نوعی از عملگرهای دو حالتی به نام عملگرهای دو پایا<sup>۴</sup> استفاده می کنند [۷-۱۱، ۱۳، ۲۹، ۴۳-۴۴]. عملگرهای دو پایا دو حالت تعادل پایدار دارد. در این عملگرها، معمولاً از یک مکانیزم دو پایا و یک ماده نرم تحریک پذیر استفاده می شود. مکانیزم های دو پایایی مختلفی وجود دارند؛ به عنوان مثال می توان از نوار خمیده فلزی دو پایا نام برد [۷، ۹، ۱۱، ۲۹]. نوار فلزی دو پایا شبیه متر نواری فلزی دارای دو حالت مستقیم و حلقه ای می باشد. مواد نرم تحریک پذیر هم شامل انواع پلیمرهایی هستند که با تحریک الکتریکی [۱۰، ۲۹، ۴۳]، بادی [۷-۹، ۱۱، ۱۳]، مغناطیسی [۴۴] و مانند آن، تغییر شکل می دهند. تغییر شکل ماده نرم پلیمری باعث اعمال نیرو به مکانیزم دو پایا و تغییر وضعیت آن از یک حالت پایدار به حالت پایدار دوم می شود. از این عملگرهای نرم در انواع چنگک های چند انگشتی [۷-۹، ۱۱، ۱۳] و ربات هایی برای خزیدن، دوییدن، پریدن، غلطیدن و شنا کردن [۷، ۱۳، ۴۳] استفاده می شود. برخی از این ربات ها می توانند با سرعت بیش از دو برابر طول خود در ثانیه بدون [۱۳]. خوانندگان برای اطلاعات بیشتر در مورد عملگرهای نرم دو پایا چند پایا می توانند به مقاله چی و همکاران مراجعه نمایند [۴۵].

در شکل (۵-الف) یک نمونه چنگک با چهار انگشت نمایش داده شده که هر انگشت، خود یک عملگر دو پایای نرم است [۷]. این عملگر با تحریک بادی کنترل می شود؛ به این صورت که در حالت بدون باد، بصورت جمع شده و در حالت اعمال باد، بصورت باز شده در می آید. مکانیزم دو پایا بواسطه یک لایه الاستومری

<sup>4</sup> Bistable actuators

<sup>5</sup> Origami

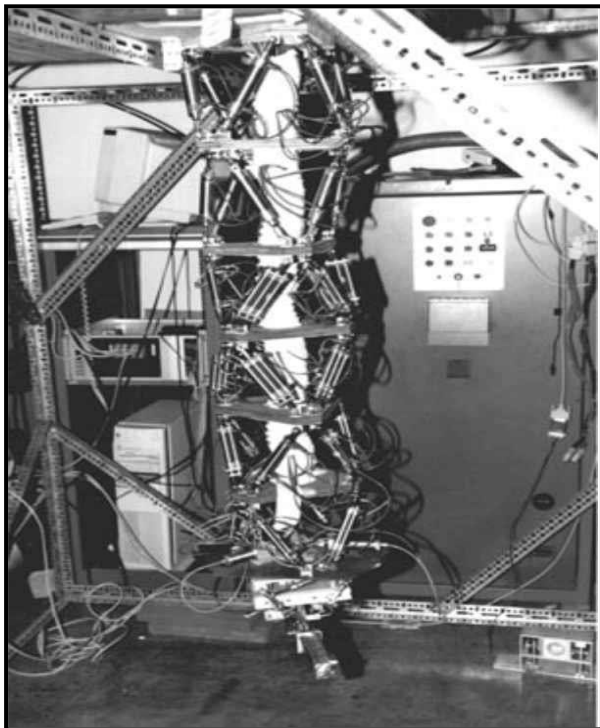
<sup>6</sup> Kresling pattern-based origami actuators

<sup>1</sup> Grippers

<sup>2</sup> Exoskeleton Rehabilitation Robots

<sup>3</sup> Soft robots

جهت بودند، حرکت سیلندر با سرعت زیادی اتفاق می افتاد. این امر با وجود مکانیزمی که برای کنترل جریان هوا در نظر گرفته بودند اتفاق می افتاد. این مکانیزم شامل مجرای قابل کنترلی<sup>۸</sup> برای عبور هوا بود که بر روی هر شیر برقی<sup>۹</sup> بطور جداگانه نصب می شد. علت اصلی بروز این مشکل، قطر کم سیلندرها در مقایسه با بار استاتیکی وارد بر هر سیلندر بود. علت دیگر آن بود که مجرای کنترل هوا به جای آنکه در مجرای هوای سیلندر قرار بگیرد بر روی شیر برقی نصب شده بود، که به واسطه قابلیت فشرده شدن هوا در شیلنگ های رابط بین سیلندرها و شیر برقی ها، از تاثیر کنترل کنندگی در جریان هوا کاسته می شد. ایبرت-یوفاف و چیریکجیان علاوه بر ساخت بازوی مذکور، مقالات ارزنده ای در ارتباط با محاسبه چگالی فضای کاری بازوهای ناپیوسته بسیار-افزونه و سینماتیک معکوس آنها ارائه کردند [۵۳-۵۶].



شکل ۶ بازوی ایبرت-یوفاف، این بازو شامل شش پودمان از نوع مکانیزم شش پایه ای (استوارت-گاوف) می باشد [۵۲]

## ۲-۲- بازوی سوتاکن

سوتاکن در جریان رساله دکتری خود به راهنمایی دکتر چیریکجیان در دانشگاه جان هاپکینز در سال ۲۰۰۳، با تکیه بر

از نقاط قوت و ضعف این بازوها می تواند برای طراحان مفید باشد. تاکنون تعداد کمی از انواع بازوهای ناپیوسته، آن هم در مقیاس آزمایشگاهی، ساخته شده اند. این بازوها به شرح زیر هستند: (۱) بازوی ایبرت-یوفاف<sup>۱</sup>، (۲) بازوی سوتاکن<sup>۲</sup>، (۳) بازوی براید<sup>۳</sup>، (۴) بازوی جنیفن و لانتینگن<sup>۴</sup>، (۵) بازوی درون بینی اس-ام-ای، (۶) بازوی تیپ<sup>۵</sup> و همکاران، (۷) بازوی مطهری و همکاران. در ادامه به شرح تک تک این موارد پرداخته می شود.

## ۱-۲- بازوی ایبرت-یوفاف

ایبرت-یوفاف در جریان پایان نامه دکترای خود به راهنمایی دکتر چیریکجیان در دانشگاه جان هاپکینز در سال ۱۹۹۸، یک بازوی ناپیوسته ساخت که شامل شش پودمان استوارت-گاوف<sup>۶</sup> بود [۵۲]. این بازو در شکل (۶) قابل مشاهده است. هر پودمان شامل شش سیلندر نیوماتیکی است که به صورت دو حالتی تحریک می شوند. بنابراین هر پودمان  $2^6 = 64$  پیکربندی دارد و از آنجا که بازو شامل شش پودمان است، تعداد پیکربندی های بازو که همان تعداد نقاط فضای کاری است برابر با  $6(2^6) = 1010 \times 6/87$  خواهد بود. بیشترین شیب صفحه متحرک یک پودمان نسبت به صفحه پایه آن در پنج پودمان انتهایی  $16/2$  درجه و در پودمان پایه  $14/5$  درجه است. ارتفاع بازو در حالتی که تمام سیلندرها جمع هستند،  $118/5$  سانتی متر می باشد. جنس صفحات میانی<sup>۷</sup>، چوبی در نظر گرفته شده اند تا وزن بازو کمتر شود. قیمت تمام شده در حدود ۴۳۰۰ دلار گزارش شده است که به نظر سازنده، قیمت پایینی در مقایسه با انواع بازوهای تحریک پیوسته به حساب می آید.

محدوده حرکتی اندک پودمان های گاوف باعث می شد تا فضای کاری در این بازو به شدت کاهش پیدا کند و این از معایب این بازو به حساب می آید. در آزمایش هایی که بر روی این ربات صورت گرفت ثابت شد که ربات می تواند از هر پیکربندی ای به پیکربندی دیگر برود. البته رفتار ربات در انتقال از یک پیکربندی به پیکربندی دیگر آنچنان که کسی انتظار دارد، نرم و ملایم نبود. این امر بدان سبب بود که سیلندرهایی که تحت بار استاتیکی زیادی بودند با تاخیر در حد چند ثانیه شروع به حرکت می کردند. این تاخیر در برخی موارد به ۸ ثانیه می رسید؛ اما برعکس در سیلندرهایی که بار استاتیکی و جهت حرکت سیلندر در یک

<sup>6</sup> Stewart-Gough modules

<sup>7</sup> Platforms

<sup>8</sup> Orifice

<sup>9</sup> Solenoid valve

<sup>1</sup> Ebert-Uphoff

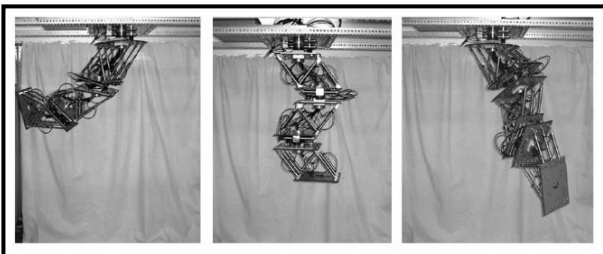
<sup>2</sup> Suthakorn

<sup>3</sup> BRAID

<sup>4</sup> Jnifene and Lantaigne

<sup>5</sup> Tappe

قیمت کل بازو ۵۲۰۲/۹۷ دلار شده است. هدف از ساخت این ربات، بررسی نحوه کارکرد این نوع بازو معرفی شده است. آزمایشات بر روی این ربات برای بررسی سه هدف طراحی شدند: تکرار پذیری (قابلیت انجام حرکت صحیح و کامل، به دفعات)، کنترل ارتعاشات در انتهای حرکت و طول زمانی که ربات به فرمان ورودی پاسخ حرکتی می دهد. این آزمایشات به صورت دپداری انجام شده و داده آماری ای در بر نداشته است. آزمایشات نشان دادند استفاده از میراگرهای پر شده از روغن بطور موثری از ارتعاشات (که به واسطه سرعت بالای عملگرها ایجاد می شد) می کاهد. زمان پاسخ و تکرارپذیری وقتی فشار هوای ورودی مناسب باشد، خیلی خوب گزارش شده است؛ اما وقتی فشار هوای تانک کم می شود این دو نیز کاهش پیدا می کنند.



شکل ۷ سه پیکربندی مختلف از بازوی سوتاکن [۵۸]

### ۲-۳- بازوهای براید

دوبوسکی<sup>۳</sup> و شاگردانش در دانشگاه ام-آی-تی طی سالهای ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶، چند بازوی دوحالته با نام کلی براید<sup>۴</sup> ساختند [۶۰-۶۸]. تفاوت عمده این بازوها در نوع عملگر آنها بود. در اولین نمونه ساخته شده بازوی براید، از عملگر اس-ام-ای استفاده شد [۶۱-۶۲]. دومین نمونه، از عملگرهای الکترومغناطیس بهره گرفت [۶۳]. سومین و چهارمین نمونه هم از عملگرهای الاستومری دی الکترونیک<sup>۵</sup> یا به طور خلاصه عملگرهای دی-ای<sup>۶</sup> استفاده می کرد [۶۴-۶۸]. استفاده از عملگرهای رایج مثل موتورهای دی-سی یا سیلندرهای نیوماتیک و هیدرولیک به خاطر جرم زیاد و پیچیدگی آنها ممکن نبود؛ بنابراین در تمام این بازوها، طراحی عملگرها به طور اختصاصی و با هدف کاهش جرم، پیچیدگی و مصرف انرژی انجام شد. سازه اصلی براید در تمام نمونه ها، شامل یک مکانیزم موازی سه پایه بود که برای کاهش وزن، تماماً از جنس پلاستیک ساخته

تجرباتی که از ساخت بازوی ایبرت-یوفاف بدست آمده بود یک بازوی ناپیوسته جدید ساخت و سعی کرد تا نواقص آن را جبران کند [۵۷-۵۹]. این بازو شامل سه پودمان بود که هر کدام، یک پودمان وی-جی-تی صفحه ای سه بیته دو حالته<sup>۱</sup> بودند. بنابراین هر پودمان  $2^3=8$  پیکربندی داشت. اما برای آنکه بازو حرکتی فضایی داشته باشد، بین هر دو پودمان مجاور و همچنین قبل از اولین پودمان، یک مفصل چرخشی ناپیوسته با ۱۶ حالت پایدار قرار داده شد، که قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه هر پودمان را نسبت به پودمان قبلی ایجاد می کرد.

شکل (۷) سه پیکربندی مختلف از این بازو را نمایش می دهد. تعداد پیکربندی های بازو که برابر با تعداد نقاط فضای کاری آن می باشد برابر است با  $2/1 \times 10^6 \cong (2^3 \times 16)^3$ . سیستم قدرت در این بازو نیز نیوماتیکی بود. سیستم نیوماتیکی به واسطه وزن کم، قیمت پایین و قدرت بالای آن مورد استفاده قرار گرفت. هر پودمان شامل ۹ عملگر بود که سه به سه با هم موازی بودند. هر سه عملگر نیوماتیکی موازی هم به عنوان یک بیت از پودمان به حساب می آمد. عملگر میانی از هر سه عملگر موازی، از روغن پر می شد و به عنوان میراگر عمل می کرد، در حالی که دو تای دیگر، بوسیله فشار هوا و به صورت موازی تحریک می شدند. استفاده از میراگر باعث ایجاد حرکتی نرمتر در هنگام تغییر پیکربندی بازو می شد. این طراحی برای رفع مشکلی در نظر گرفته شد که در بازوی ایبرت-یوفاف دیده شده بود.

بازوی وی-جی-تی از نظر محدوده مجاز برای تغییر زاویه صفحه متحرک، بسیار مناسب بود، چرا که در آن از مفاصل لولایی استفاده می شد. هرچه نسبت طول حداکثر به طول حداقل سیلندرها بیشتر می بود مقدار این زاویه بیشتر می شد؛ بنابراین بیشترین نسبت ممکن برای انتخاب عملگرها مورد استفاده قرار گرفت، که تقریباً برابر ۱/۵ بود.

برای کاهش وزن بازو، صفحات میانی از جنس گارلولایت<sup>۲</sup> که یک نوع فایبرگلاس بود ساخته شدند. علاوه بر سبکی، طول عمر بالا و قابلیت ماشینکاری ساده از دیگر مزایای این جنس بود. بر روی صفحه متحرک انتهایی یک چنگک ساده نصب شد. برای نصب بازو یک قاب طراحی شد و پایه بازو به سقف قاب متصل گردید. همانطور که در شکل (۷) مشخص است، بازو از سقف قاب به صورت وارونه نصب شد. طول بازو در حالت جمع شده ۷۸۸ میلیمتر و در حالت کشیده ۱۱۶۹ میلیمتر می باشد.

<sup>4</sup> BRAID: Binary Robotic Articulated Integrated Device

<sup>5</sup> Dielectric Elastomer Actuators (DEAs)

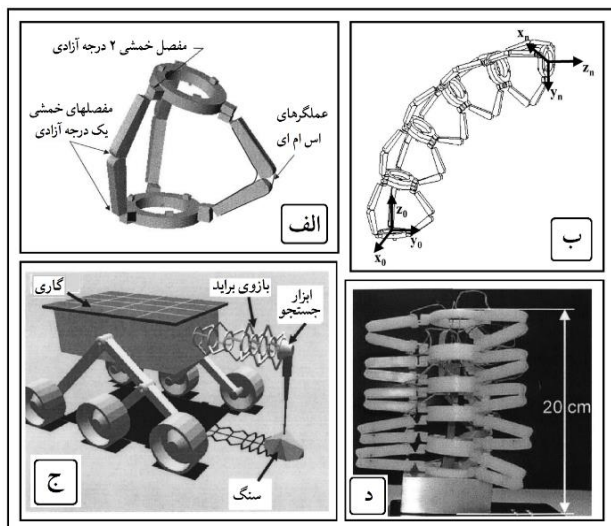
<sup>6</sup> DE

<sup>1</sup> A 3-bit binary planar VGT module

<sup>2</sup> Garlolite

<sup>3</sup> Dubowsky

معمولی، با باریک کردن میله‌ها در محل مفاصل به صورت یک نوار، از خم شدن این قسمت استفاده می‌شود. در مورد مفصل-های کروی در انتهای پایه‌ها با توجه به اضافی بودن یک درجه آزادی، از مفصل دو درجه آزادی استفاده شده است که خود شامل دو مفصل خمشی مجاور می‌شود.



شکل ۸ بازوی برایید با عملگرهای اس-ام-ای، الف) مدل یک پودمان از بازو، ب) مدل بازو در یک پیکربندی خاص، ج) کاربرد بالقوه بازو در کاوشگری فضایی، د) بازوی ساخته شده در پیکربندی کاملاً جمع شده [۶۱-۶۲].

### ۲-۳-۲- بازوی برایید با عملگرهای الکترومغناطیسی

با توجه به محدودیت‌های بازوی برایید با عملگرهای اس-ام-ای، از جمله زمان نسبتاً طولانی پاسخ به تحریک و اتلاف زیاد انرژی از طریق حرارت، دوبوسکی و همکاری یک بازوی برایید با عملگرهای الکترومغناطیسی طراحی کرده و ساختند [۶۳]. یک طرح از این بازو با سه پودمان در شکل (۹-الف) نمایش داده شده است. اما بازویی که ساخته شد، مطابق شکل (۹-ب) دارای دو پودمان مشابه بود که هر کدام یک مکانیزم موازی لولایی-لولایی-کروی سه گانه بود. عملگر الکترومغناطیس شامل آهنربای دائمی و سیم پیچ خمیده با مقطع مستطیلی بود که می‌توانست مطابق شکل (۹-ج) در دو وضعیت پایدار صفر و یک تحریک شود و روی مفصل لولایی دوم عمل می‌کرد. خمیدگی آهنربا و سیم پیچ برای به حداقل رساندن فاصله هوایی این دو در حین حرکت چرخشی مفصل خمشی مربوطه بود. معیارهای اصلی در طراحی عملگر برای بازوی برایید، افزایش نیرو، کاهش

می‌شد. هدف از پروژه ساخت بازوی برایید، ساخت یک بازوی سبک، ارزان و با مصرف انرژی پایین، با وجود تعداد درجات آزادی بالای دو حالت بود، به نحوی که بتوان از آن برای توسعه سیستم‌های رباتیک در کاوش‌های فضایی استفاده کرد. در ادامه هر یک از نمونه‌های ساخته شده برایید به طور جداگانه معرفی خواهد شد.

### ۲-۳-۱- بازوی برایید با عملگرهای اس-ام-ای

دوبوسکی و همکاریانش، ربات برایید با عملگرهای اس-ام-ای را در آزمایشگاه رباتیک زمین و فضای دانشگاه ام-آی-تی<sup>۱</sup> ساختند [۶۱-۶۲]. بازوی برایید (شکل ۸) شامل پنج پودمان بسیار سبک و کوچک از جنس پلی اتیلن<sup>۲</sup> بود و هر پودمان یک مکانیزم موازی لولایی-لولایی-کروی سه گانه<sup>۳</sup> بود. عملگرهای این بازو هم از نوع مرسوم نبودند، بلکه از جنس مواد حافظه دار (سیم اس-ام-ای) ساخته شده بودند که به صورت دو حالت تحریک می‌شدند. برای تحریک، از جریان الکتریسته استفاده می‌شد. اعمال جریان الکتریکی سبب داغ شدن سیم اس-ام-ای و جمع شدن آن می‌شد. سیم اس-ام-ای فقط قادر است در حین تحریک و جمع شدن نیرو اعمال کند، اما در حین بازگشت به طول اولیه پس از قطع جریان و خنک شدن، نمی‌تواند نیرو اعمال کند، چون کماتش در آن ایجاد می‌شود. بنابراین در اینجا از چیزی شبیه ماهیچه‌های متقابل استفاده شد، به این معنی که مطابق شکل (۸-الف)، در مفصل خمشی یک درجه آزادی در میانه هر پایه از یک پودمان، از دو سیم اس-ام-ای استفاده می‌شود؛ وقتی یکی از آنها تحریک می‌شود، دیگری در حالت خاموش است. بنابراین می‌توان نیرو را در هر دو جهت ایجاد کرد. برای باقی ماندن عملگر در حالت جمع شده، احتیاج به جریان مداوم الکتریسته بود و این سبب اتلاف انرژی می‌شد. از عیوب عملگرهای اس-ام-ای، کندی آن‌ها در پاسخ به تحریک الکتریکی، تغییر شکل کم آن‌ها و نیروی کمی بود که می‌توانستند اعمال کنند.

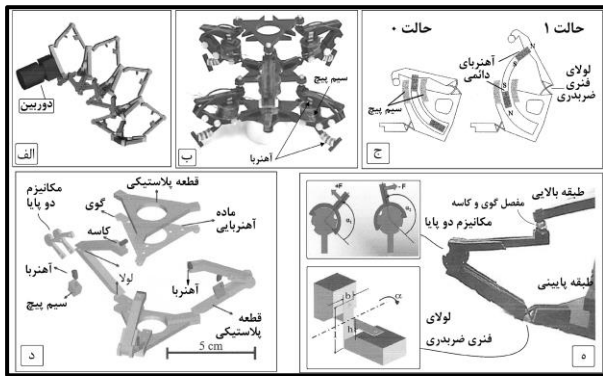
طراحی مفاصل در بازوی برایید به طور اختصاصی انجام شده است و برای کاهش جرم آنها از هیچ جنس فلزی که در مفاصل معمولی رایج است، استفاده نشده است. مثلاً به جای مفاصل لولایی از مفاصل‌های خمشی استفاده شده است، به این معنی که برای چرخش در محل مفصل، به جای استفاده از یاتاقان‌های

<sup>3</sup> 3-RRS

<sup>1</sup> MIT Field and Space Robotics Laboratory

<sup>2</sup> Polyethylene





شکل ۹ معرفی بازوی برابرد با عملگرهای الکترومغناطیسی،  
الف) طرحی از بازو با سه پودمان، ب) نمونه ساخته شده بازو با دو  
پودمان، ج) نمایش نحوه عملکرد عملگر در دو وضعیت صفر و یک،  
د) مدل انفجاری یک پودمان از بازو، ه) نمایش مکانیزم دو حالت و  
مفصل خمشی از یک پایه [۶۳]

### ۲-۳-۳- بازوی برابرد با عملگرهای دی-ای سری اول

دوبوسکی و همکارانش پس از ساخت نمونه ای از بازوی دو حالتی  
برای با عملگرهای الکترومغناطیسی برای بهبود عملکرد این بازو  
به سراغ طراحی و ساخت عملگرهای الاستومری دی الکتریک  
(دی-ای) رفتند [۶۴-۶۶]. آزمایشات نشان می داد که مواد دی-  
ای به عنوان عملگر، علاوه بر جرم و قیمت کم، کرنش های بالا  
(در شرایط آزمایشگاهی می توانند تا ۳۸۰٪ کرنش را ایجاد کنند)  
ولی در عمل این مقدار کمتر خواهد بود) و چگالی انرژی بالاتری  
نسبت به سایر عملگرهای مرسوم دارند. منظور از چگالی انرژی  
عملگر، نسبت کار خروجی عملگر در یک سیکل کاری بر واحد  
جرم عملگر می باشد. بنابراین پتانسیل خوبی برای استفاده به  
عنوان عملگر در بازوهای بسیار-افزونه دو حالتی دارند. چالش  
اصلی در مورد طراحی عملگرهای دی-ای، تبدیل این پتانسیل  
بالا در مورد کرنش و چگالی انرژی به فعل می باشد. بر این اساس  
چند نوع عملگر دی-ای یکی پس از دیگری توسط دوبوسکی و  
شاگردانش در دانشگاه ام آی تی طراحی و ساخته شدند. در این  
قسمت اولین سری از این دسته بررسی می شود.

اساس کار یک عملگر دی-ای در شکل (۱۰-الف) نمایش  
داده شده است. یک لایه الاستومر دی الکتریک با دو لایه نازک  
رسانای الکتریکی (الکترودها) در دو سمت پوشش داده می شود.  
وقتی اختلاف پتانسیل بالا به این الکترودها اعمال می شود،  
نیروی الکترواستاتیکی بین دو الکترودها ایجاد می شود که در  
راستای ضخامت لایه الاستومری دی الکتریک، به آن فشار اعمال  
می کند و باعث انبساط این لایه در راستای سطح می گردد.  
مشکل در این است که به عنوان یک عملگر، این افزایش سطح

اتلاف انرژی، کاهش حجم و جرم عملگر به صورت همزمان عنوان  
شده است. هر پودمان مطابق شکل (۹-د) شامل دو صفحه مثلثی  
شکل در پایین و بالای خود می شکه با سه پایه به هم متصل  
می شوند. هر پایه شامل دو میله بود که از طریق یک مفصل  
خمشی<sup>۱</sup> به همراه یک مکانیزم دو پایا به هم وصل می شد. مفصل  
خمشی و مکانیزم دو پایا در شکل (۹-ه) به وضوح نمایش داده  
شده اند. مفصل خمشی که مانند مفصل لولایی عمل می کند  
شامل دو نوار پلاستیکی فنری با عمر خستگی بالا می باشد، که  
به صورت ضربدری استفاده می شوند. این طراحی، دامنه حرکتی  
بالا و سفتی قابل قبولی برای جلوگیری از حرکت های خارج از  
صفحه ایجاد می کند. مکانیزم دو پایا به صورت غیر فعال دو  
وضعیت پایدار برای مفصل ایجاد می کند. استفاده از مکانیزم های  
دو پایا مختص به این بازو نمی شود، مثلاً در درب تاشو شامپوها،  
پایه تاشو دوچرخه ها، سوئیچ های فشاری دو پایا و خودکارهایی  
که دکمه فشاری در سر خود دارند نیز دیده می شود.

استفاده از مکانیزم دو پایا در بازو مزایای زیادی به همراه  
دارد؛ باعث می شود بتوان در وضعیت های پایدار، برق عملگر را  
قطع کرد و مصرف انرژی را از این طریق پایین آورد. این مورد به  
خصوص در مورد وسایلی که در فضا استفاده می شوند و منبع  
انرژی محدودی دارند، بسیار مهم است. در ضمن تکرارپذیری و  
دقت عملگر را بالا می برد.

هر پایه از پایین با یک مفصل خمشی به صفحه پایینی و از  
بالا با یک مفصل کاسه ساچمه (کروی)<sup>۲</sup> به صفحه بالایی متصل  
می شود. بنابراین در مجموع هر پایه ۵ درجه آزادی خواهد  
داشت، که شامل یک درجه آزادی در هر مفصل خمشی و سه  
درجه آزادی در مفصل کاسه ساچمه است. هر پودمان سه درجه  
آزادی دو حالتی داشت و در نتیجه می توانست در  $2^3 = 8$   
پیکربندی مختلف قرارگیرد؛ همچنین بازوی ساخته شده با دو  
پودمان می توانست  $8^2 = 64$  پیکربندی مختلف داشته باشد.  
محدودیت حرکتی در مفصل خمشی پایینی  $\pm 25$  درجه و در  
مفصل خمشی میانی  $\pm 17$  درجه می باشد. محدودیت کج شدن  
مفصل کاسه ساچمه  $\pm 60$  درجه است.

تمام سازه از جمله مفاصل ذکر شده، برای سبکی از یک  
جنس پلاستیکی به نام دلرین<sup>۳</sup> (پلی اکسی متیلن با ۲۰٪  
تفلون<sup>۴</sup>) ساخته شده است. جنس دلرین علاوه بر سبکی،  
استحکام، مقاومت به ضربه و تحمل خستگی بالایی دارد و در  
ضمن، قابلیت ماشینکاری خوبی هم دارد. نیروی عملگر در حدود  
۱/۵ نیوتون و جرم آن ۲۰ گرم بود.

<sup>3</sup> Delrin 100

<sup>4</sup> Polyoxymethylene with 20% teflon

<sup>1</sup> Cross-flexural hinge

<sup>2</sup> Spherical joint or cone-ball sliding bearing

آمپراژ بسیار پایین) و توان ورودی ۰/۱۶۵ وات است. جدول (۲) برای مقایسه عملگر دی-ای سری اول با عملگر الکترومغناطیس مورد استفاده در بازوی برآید قبلی ارائه شده است.

جدول ۲ مقایسه عملکرد عملگرهای الکترومغناطیسی و دی-ای سری اول ساخته شده برای بازوی برآید [۶۶]

عملگر دی-ای سری اول	عملگر الکترومغناطیس	عملگر
۱/۵ نیوتون	۱/۵ نیوتون	بیشترین نیروی عملگر
۱۵ میلی ژول	۱۵ میلی ژول	کار در هر سیکل
۹/۲ گرم	۲۰ گرم	جرم عملگر
۱/۶ ژول بر کیلوگرم	۰/۸ ژول بر کیلوگرم	کار در هر سیکل بر واحد جرم عملگر
مقایسه تنها بر اساس اجزاء فعال عملگر		
۰/۲ گرم	۱۴ گرم	جرم قسمت‌های فعال عملگر
۷۵ ژول بر کیلوگرم	۱/۱ ژول بر کیلوگرم	کار در هر سیکل بر واحد جرم قسمت‌های فعال عملگر

بر اساس جدول (۲) می‌توان گفت جرم عملگر دی-ای سری اول کمتر از نصف عملگر الکترومغناطیسی است. در هر دو بازو کسر قابل توجهی از جرم مربوط به ساختار نگهدارنده است و سهم قسمت فعال خیلی کمتر است. بازوی برآید ساخته شده با عملگر دی-ای سری اول در شکل (۱۰-د) قابل مشاهده است. این بازو شامل دو پودمان مشابه کاملاً پلاستیکی با مکانیزم موازی لولایی-کشویی-کروی سه گانه و سه درجه آزادی دو حالتی در هر پودمان می‌باشد که در شکل (۱۰-ه) بیشتر قابل تشخیص است. جرم کل بازو ۷۴ گرم و جرم کل عملگرها ۵۸ گرم است. اما جرم قسمت‌های فعال عملگرها شامل لایه های الاستومری و الکترودها روی هم، ۱/۲ گرم است که ۲٪ کل جرم بازو می‌باشد. بنابراین بدون نگرانی از افزایش جرم بازو یا عملگر می‌توان تعداد لایه را افزایش داد. در مورد عملگر الکترومغناطیس اجزای فعال شامل سیم پیچ و آهنربا می‌شود که در یک عملگر ۱۴ گرم جرم دارد در حالی که در یک عملگر دی-ای اجزای فعال ۰/۲ گرم جرم دارد. کار عملگر در هر سیکل بر واحد جرم اجزای فعال آن، در مورد عملگر دی-ای سری اول، حدوداً ۷۰ برابر عملگرهای الکترومغناطیس است. هزینه ساخت بازوی دی-ای چندین برابر کمتر از بازوی الکترومغناطیس گزارش شده است. نیروی تولید شده در عملگرهای دی-ای برای حمل یک

باید اعمال نیرو کرده و بتواند چیزی را جابجا کند؛ اما وقتی لایه الاستومری تحت فشار قرار گیرد به راحتی کماتش می‌کند. برای حل این مشکل دوبوسکی و همکارانش، لایه الاستومری با پوشش الکترودها را با یک پیش-کشش در یک قاب انعطاف پذیر قرار دادند. وقتی ولتاژ به الکترودها اعمال می‌شود، با انبساط این لایه، از نیروی کششی لایه کاسته شده و به اصطلاح لایه کمی شل می‌شود؛ در نتیجه قاب کمی آزاد شده و در راستای فعال خود افزایش طول می‌دهد. در عمل از شروع چروک شدن لایه الاستومری برای تعیین حداکثر ولتاژ تحریک استفاده می‌شود. در نهایت خاموش شدن ولتاژ باعث بازگشت عملگر به طول اولیه می‌شود.

در شکل (۱۰-ب) یک مجموعه دو لایه ای الاستومر و قاب انعطاف پذیر شش ضلعی مهار کننده آن، نمایش داده شده است. وقتی تعداد لایه های الاستومری زیاد می‌شود، نیروی عملگر هم زیادتر می‌شود؛ بنابراین در اینجا از دو لایه به جای یک لایه استفاده شده است. البته با افزایش لایه‌ها باید قاب هم به طور متناسب با آن تقویت شود تا نیروی پیش-کشش مناسب را بتواند ایجاد کند. ضخامت یک تک لایه کشیده شده در قاب، ۰/۱ میلیمتر (مثل ضخامت یک ورق کاغذ) می‌باشد. قاب عملگر، از یک جنس پلاستیکی (رزین استال یا دلرین<sup>۱</sup>) یک تکه و شش ضلعی ساخته شده است که به صورت یک مکانیزم حلقه بسته شش میله‌ای عمل می‌کند و مفصل بین این میله‌ها از طریق نازک کردن محل اتصال ایجاد شده است. برای لایه الاستومری در اینجا از یک ماده اکریلیک<sup>۲</sup> به نام وی-اچ-بی ۳۴۹۱۰ که توسط شرکت تری-ام<sup>۳</sup> به عنوان نوار چسب ساخته شده، استفاده شده است. این ماده ارزان و در دسترس است. البته می‌شد از مواد سیلیکونی<sup>۵</sup> هم استفاده کرد. برای الکترودها از پوشش یک لایه رسانا مثل پودر کربن مخلوط شده با گریس نقره (گریس رسانای الکتریکی) می‌توان استفاده کرد. علاوه بر لایه های الاستومری و قاب نگه دارنده، یک مکانیزم غیر فعال دو پایا برای این عملگر طراحی شده است که عملگر را در دو وضعیت پایدار نگه می‌دارد. عملگر ساخته شده در دو وضعیت پایدار خود، در شکل (۱۰-ج) قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود با اعمال ولتاژ طول عملگر در راستای فعال خود از ۱۴ میلیمتر به ۲۲ میلیمتر افزایش پیدا می‌کند. یعنی طول کورس عملگر ۸ میلیمتر و کرنش آن  $57\% = 100 \times (8 \div 14)$  است. ولتاژ تحریک ۵/۵ کیلو ولت و آمپراژ آن ۰/۰۳ میلی آمپر (ولتاژ بسیار بالا و

<sup>4</sup> 3M

<sup>5</sup> Silicones

<sup>1</sup> Acetal resin (Delrin)

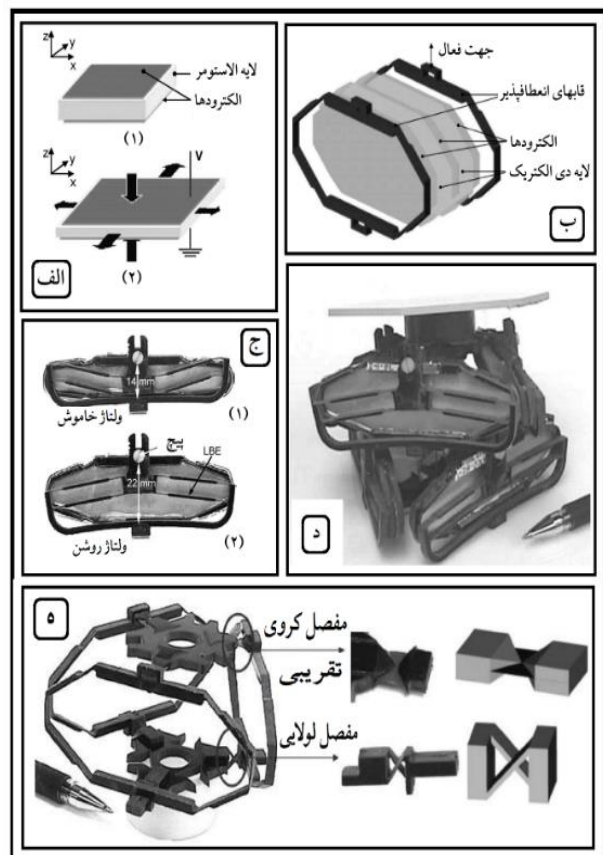
<sup>2</sup> Acrylic

<sup>3</sup> VHB 4910

دوربین کوچک توسط بازو کفایت می‌کند. برای تغییر پیکربندی عملگر دی-ای سری اول، حدوداً ۳ ثانیه زمان لازم است. البته سرعت پاسخ عملگر تا حد زیادی به جنس لایه الاستومری وابسته است. در این عملگر از جنس اکریلیک وی-اچ-بی ۴۹۱۰ به خاطر در دسترس بودن، هزینه کم و عدم حساسیت نسبی به تکنیک‌های ساده ساخت مورد استفاده در آزمایشگاه استفاده شد. در حالی که این جنس به خاطر خاصیت ویسکوالاستیک<sup>۱</sup> متوسطی که دارد سرعت پاسخش محدود است. بسیاری از مواد دی-ای دیگر مثل مواد پایه سیلیکونی، خاصیت ویسکوالاستیکی کمتری دارند و سریعتر به تحریک پاسخ می‌دهند.

عملگرهای دی-ای نسل اول با مشکلاتی مواجه بود که مهمترین آنها خرابی‌های<sup>۲</sup> لایه دی-ای بود که توجیهی برای آن وجود نداشت؛ در نتیجه قابلیت اطمینان به این عملگرها زیاد نبود و عملاً کاربرد آنها را توجیه ناپذیر می‌کرد. در واقع روی مکانیک عملگرهای دی-ای و مکانیزم‌های تخریب آن مطالعه کافی انجام نشده بود؛ بنابراین دوبروسی و همکارانش مطالعات بیشتری در این زمینه انجام دادند و عملگر جدیدی را طراحی کرده و ساختند که مشکلات عملگر نسل قبل را به خصوص در زمینه قابلیت اطمینان نداشت [۶۷-۶۸]. این عملگر در شکل (۱۱-الف) به شکل نمادین در دو حالت بسته و باز نمایش داده شده است. این عملگر شامل سه لایه دی-ای از جنس وی-اچ-بی ۴۹۰۵ بود که ضخامت هر کدام ۰/۵ میلی‌متر بود. همچنین لایه‌ها در یک قاب لوزی شکل از جنس پلاستیک قرار می‌گرفت که به صورت یک مکانیزم چهار میله ای با مفاصل لولایی عمل می‌کرد. لایه‌های دی-ای را قبل از قرار دادن در قاب‌های لوزی شکل، در جهت فعال عملگر، یعنی قطر کوچک لوزی، می‌کشند. علاوه بر این از دو نوار الاستیک برای ایجاد نیروی پیش-بار استفاده می‌شود که در شکل (۱۱-ب) قابل مشاهده است. با وصل کردن ولتاژ بالای الکتریکی (۱۰ کیلو ولت) به الکترودها، این عملگر مطابق شکل (۱۱-ب) در جهت فعال خود، از طول ۱۹ میلی‌متر به طول ۴۱ میلی‌متر تغییر طول میدهد. بنابراین کورس حرکتی آن ۲۲ میلی‌متر خواهد بود و کرنش آن از ۱۰۰٪ فراتر خواهد رفت. نیروی حداکثر عملگر ۳ نیوتون می‌باشد. برای آزمون قابلیت اطمینان و عمر عملگر، از یک عملگر تک لایه ای تحت ۶۰٪ کرنش استفاده کردند و دیده شد که این عملگر ۱۵۰۰۰ بار تحریک را تحمل کرده است. تحقیقات این محققین نشان داد که مود اصلی تخریب در عملگرهای دی-ای به نام مود شکست کششی<sup>۳</sup> است که به شدت به نرخ کشش<sup>۴</sup>، که همان سرعت عملگر است، وابسته است. در نرخ‌های کششی بالا، نیروی ویسکوز لایه دی-ای، این لایه را سخت و محکم ساخته و جلو تخریب کششی را می‌گیرد؛ بنابراین در نرخ‌های پایین کشش، عمر و قابلیت اطمینان به شدت پایین می‌آید و برعکس در نرخ‌های بالای کشش عمر و قابلیت اطمینان به عملگر زیاد می‌شود. برای عملکرد دوحالته دقیق و با قابلیت تکرار بالا، بهتر است از مکانیزم‌های دو پایای غیر فعال، به صورت کمکی، استفاده شود. اولین طرحی که دنبال شد، در شکل (۱۱-ج) قابل مشاهده است که با نام عملگر دی-ای متقابل یا دوتایی<sup>۵</sup> معرفی شده که در آن

شکل ۱۰ معرفی بازوی برآید با عملگرهای دی-ای (سری اول)، الف) نمایش اساس عملکرد عملگرهای دی-ای، ب) یک عملگر دو لایه دی-ای با قاب شش ضلعی انعطاف پذیر، ج) عملکرد نمونه ساخته شده عملگر دو حالتی دی-ای به همراه مکانیزم غیر فعال دو پایا، در دو وضعیت پایدار خود، د) نمونه ساخته شده بازوی دو حالتی برآید با عملگرهای دی-ای سری اول، ه) نمایش سازه و مفاصل یک پودمان از بازو [۶۴-۶۶]



شکل ۱۰ معرفی بازوی برآید با عملگرهای دی-ای (سری اول)، الف) نمایش اساس عملکرد عملگرهای دی-ای، ب) یک عملگر دو لایه دی-ای با قاب شش ضلعی انعطاف پذیر، ج) عملکرد نمونه ساخته شده عملگر دو حالتی دی-ای به همراه مکانیزم غیر فعال دو پایا، در دو وضعیت پایدار خود، د) نمونه ساخته شده بازوی دو حالتی برآید با عملگرهای دی-ای سری اول، ه) نمایش سازه و مفاصل یک پودمان از بازو [۶۴-۶۶]

### ۲-۳-۴- بازوی برآید با عملگرهای دی-ای سری دوم

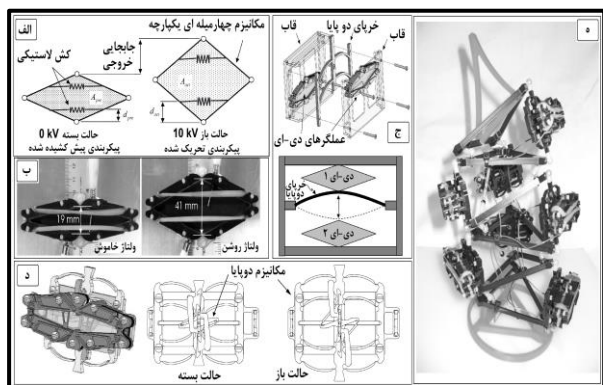
<sup>۱</sup> Stretch rate

<sup>۵</sup> Antagonistic actuators

<sup>۱</sup> Viscoelastic

<sup>۲</sup> Failure

<sup>۳</sup> Pull-in failure



شکل ۱۱ معرفی بازوی برای دو عملگرهای دی-ای سری دوم، (الف) نمایش نمادین عملگر دی-ای نسل دوم در دو حالت بسته و باز، (ب) نمایش عملگر ساخته شده در دو وضعیت ولتاژ خاموش و روشن، (ج) نمایش اجزای عملگر دی-ای دو تایی، (د) نمایش اجزای عملگر دی-ای تکی، (ه) بازوی ساخته شده [۶۷-۶۸]

## ۴-۲- بازوی جنیفن و لانتینگن

جنیفن و لانتینگن در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸، یک بازوی ناپیوسته با چهار پودمان مشابه ساختند که هر کدام از این پودمان‌ها شامل ۳ عملگر دوحالته اس-ام-ای بود [۶۹-۷۰]. این بازو و اجزای آن در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. وقتی جریان الکتریکی مناسب به یک عملگر اس-ام-ای (شماره ۱ در شکل ۱۲-ج) اعمال می‌شود، دمای آن بالا رفته و در نتیجه تغییر ساختار میکروسکوپی آن از مارتنزیت<sup>۲</sup> به آستنیت<sup>۳</sup>، طول آن کاهش پیدا می‌کند. برای برگشت عملگر به طول اولیه در حین خنک شدن از هوای فشرده استفاده می‌شود. این هوای فشرده، توسط پمپ از سوراخ مرکزی پایه بازو به بازو تزریق می‌شود و از طریق لوله‌های تهویه (شماره ۴ در شکل ۱۲-ج) به داخل هر پودمان راه پیدا می‌کند و از سوراخ‌های کناری روی صفحات نگهدارنده (شماره ۳ در شکل ۱۲-ج) باز می‌گردد. این گردش هوا، سبب خنک‌کاری اجباری عملگرها می‌شود که زمان بازگشت عملگرها را به یک سوم کاهش می‌دهد. در ضمن فشار هوای فشرده که در لوله خرطومی‌ها (شماره ۲ در شکل ۱۲-ج) حفظ می‌شود، باعث اعمال نیروی کششی در عملگرها شده که در هنگام خنک شدن آن‌ها را به طول اولیه باز می‌گرداند و بازو را راست نگه می‌دارد.

مشکلی که مواد اس-ام-ای دارند این است که تغییر طولشان کم است. برای حل این مشکل از یک ساختار زیگزاگ مطابق شکل (۱۲-د) استفاده شده است. تغییر شکل در قسمت‌های خمیده با تغییر زاویه ای همراه است که طول کل عملگر را به

از دو عملگر سه لایه لوزی شکل و یک خریای دو پایا استفاده شده است. در این مجموعه همواره یکی از عملگرها در حالت روشن (تحریک) و دیگری در حالت خاموش می‌باشد. اما جرم این مجموعه زیاد بود (۲۲۰ گرم) و عملاً با نیروی کمی که تولید می‌کرد (حداکثر ۳ نیوتون) برای استفاده در بازوهای ایستاده، که عملگر مجبور است وزن قسمت‌های بالایی بازو را تحمل کند، مناسب نبود. بنابراین برای کاهش جرم، مکانیزم دوحالته دیگری مطابق شکل (۱۱-د) طراحی شد که در آن از یک عملگر سه لایه لوزی شکل و دو خریای دو پایا استفاده می‌شد. بنابراین جرم این مجموعه به ۱۶/۴ گرم کاهش پیدا کرد. به این مجموعه، عملگر تکی<sup>۱</sup> گفته شده است. لازم به ذکر است که جنس تمام قسمت‌های الحاقی، پلاستیکی بود. جدول (۳) به مقایسه ویژگی‌های عملگر دو تایی و تکی می‌پردازد.

بازوی ساخته شده با عملگر تکی در شکل (۱۱-ه) نمایش داده شده است. این بازو شامل ۷ عملگر تکی و در نتیجه ۷ درجه آزادی دوحالته می‌باشد و مکانیزم طبقات آن با سایر بازوهای برابری متفاوت است. جرم بازو ۱۷۳ گرم و زاویه کج شدن انتهای بازو نسبت به پایه مطابق شکل، بین ۳۵- تا ۲۰+ می‌تواند تغییر کند. این بازو تماماً پلیمری است و می‌تواند برای مداخلات پزشکی کم نیرو (در حد ۵ نیوتون) در داخل محیط‌های تصویر برداری شدیداً مغناطیسی (ام-آر-آی) استفاده شود.

جدول ۳ مقایسه ویژگی‌های دو عملگر دوتایی و تکی [۶۰]

ویژگی	عملگر دو تایی (در سرعت ۱/۶ میلیمتر بر ثانیه)	عملگر تکی (در سرعت ۰/۸ میلیمتر بر ثانیه)
جابجایی (طول کورس)	۲۵ میلیمتر	۱۳ میلیمتر
کرنش	۳۰٪	۳۵٪
نیرو (حداکثر/حداقل)	۳-۱ نیوتون	۳/۵-۱ نیوتون
جرم عملگر	۲۲۰ گرم	۱۶/۴ گرم
نسبت نیرو به وزن	۰/۴۶	۶
کار خروجی بر واحد جرم عملگر	$10^{-4} \times 1/14$ ژول بر گرم	$0/0015$ ژول بر گرم
زمان سوئیچ کردن یا تغییر وضعیت عملگر	تقریباً ۵ ثانیه	تقریباً ۵ ثانیه
اندازه عملگر در حالت جمع شده	$135 \times 81 \times 48$ میلیمتر	$65 \times 35 \times 22$ میلیمتر

<sup>3</sup> Austenite

<sup>1</sup> Single actuator

<sup>2</sup> Martensite

شکل (۱۲-ج)) در عمل قابل مونتاژ نبوده و اصلاً ساخته نشده و نصب هم نشده است. در مجموع، هدف سازندگان برای ساخت بازویی کوچک و سبک با قابلیت مانور بالا تا حدودی موفق شده است، البته همانطور که گفته شد، مشکلاتی هم وجود دارد.

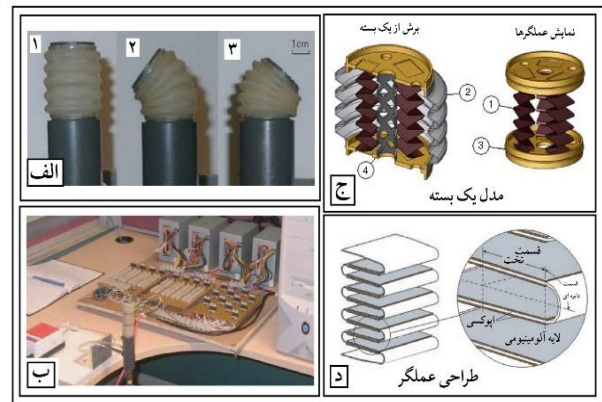
## ۲-۵- بازوی درون بینی اس-ام-ای

زوراکلفدراکیس و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک بازوی هشت پودمانی دوحالته ساختند (شکل ۱۳) [۷۱-۷۲]. آن‌ها برای کاهش وزن و قطر بازو، از سیم‌هایی با جنس اس-ام-ای (نایتینول<sup>۱</sup>) به جای عملگرهای کشویی معمولی استفاده کردند. این سیم‌ها با اعمال جریان الکتریکی، داغ شده و تا حدی جمع می‌شدند و بعد از قطع جریان، با خنک شدن دوباره به طول اولیه بر می‌گشتند. البته این فرآیند چند ثانیه طول می‌کشد که از عیوب این بازو به حساب می‌آید. هر پودمان شامل سه سیم اس-ام-ای و یک فنر فولادی برای برگرداندن سیم‌ها به طول اولیه در حین خنک شدن بود. هر پودمان طوری طراحی شده بود که به صورت یک مکانیزم لولایی-کشویی-کروی سه گانه کار می‌کرد که سیم‌های اس-ام-ای بعنوان پایه‌های این مکانیزم بود و یک فنر آنها را احاطه می‌کرد.

مطابق شکل (۱۳)، هر مکانیزم توسط یک میله استوانه‌ای به مکانیزم بعدی متصل می‌شود. این میله با روش نمونه سازی سریع و از جنس پلاستیک ساخته شده و توخالی می‌باشد، تا سیم‌های الکتریکی و دیگر موارد از داخل آن عبور کند و علاوه بر آن یک تراشه کنترل کننده پودمان، داخل آن قرار بگیرد. قطر میله‌ها (قطر بازو) ۲۰ میلی‌متر و طول آن ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. طول کلی بازو ۲۵۰ میلی‌متر و وزن آن ۸۰ گرم می‌باشد. وزن هر پودمان به تنهایی ۱۰ گرم است. زاویه خم شدن پودمان‌ها ۸ درجه است. بازو علاوه بر وزن خود، قادر به حمل ۱۰۰ گرم بار اضافی خارجی متصل به انتهای بازو را دارد.

استفاده از عملگرهای اس-ام-ای مزایا و محدودیت‌هایی به همراه دارد که قبل از انتخاب این نوع عملگرها حتماً باید مد نظر قرار گیرد. از جمله مزایای این نوع عملگرها به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: قیمت کم، اندازه و وزن فوق العاده کم، عملیات بی سر و صدا، تحریک آسان (تنها با اعمال جریان الکتریکی پایین)، نسبت قدرت به وزن بالا، سازگاری با محیط و مقاومت در برابر خوردگی. این مجموعه مزایا آن‌ها را برای استفاده در ابعاد کوچک مناسب می‌سازد و دو عامل آخری برای استفاده در داخل بدن،

مقدار زیادی تغییر می‌دهد. طول کشیده عملگرها ۳۰ میلی‌متر و در حین تحریک کامل به ۱۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد یعنی کورس عملگر ۴۰٪ طول اولیه آن می‌باشد. برای این عملگر از یک نوار از جنس اس-ام-ای با ضخامت ۷۰ میکرون متر و عرض ۷ میلی‌متر استفاده شده که در جریان ۲/۹ آمپری حدوداً ۱۰ ثانیه طول می‌کشد تا کاملاً جمع شود و نیرویی معادل ۳/۸ نیوتون در دمای بالای ۸۵ درجه سانتی‌گراد تولید کند. برای سرد شدن و برگشت به طول اولیه یعنی ۳۰ میلی‌متر در هوای ساکن ۵۰ ثانیه طول می‌کشد، اما در شرایط جریان هوای فشرده بازو این زمان به ۲۰ ثانیه تقلیل می‌یابد. فرکانس کاری عملگرهای این بازو ۰/۰۴۶ هرتز اعلام شده است. قطر صفحات نگهدارنده ۲۰ میلی‌متر و حداکثر قطر خارجی خرطوم‌ها ۲۸ میلی‌متر، وزن یک پودمان ۴/۵ گرم، فشار هوای فشرده ۲۲ کیلو پاسکال و بار قابل حمل توسط بازو ۶۲/۳ گرم اعلام شده است.



شکل ۱۲ بازوی جنیفن و لانتینگن، الف- سه پیکربندی از یک پودمان، ب- بازوی ساخته شده در حال کار، ج- نمایش اجزای یک پودمان، د- نمایش یک عملگر اس-ام-ای [۶۹-۷۰]

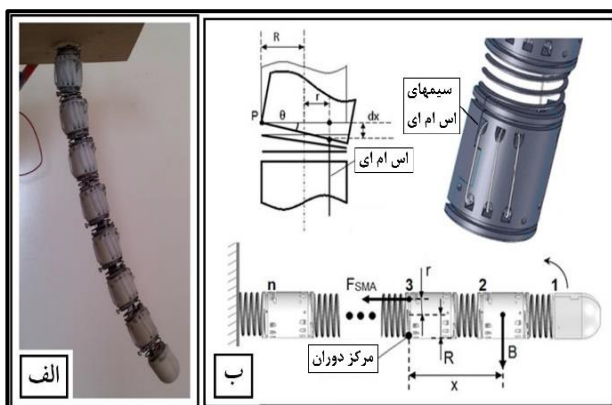
در شکل (۱۲-الف) سه پیکربندی مختلف یک پودمان نمایش داده شده است. در قسمت ۱، تمام عملگرها غیر فعال و در طول حداکثر خود هستند. در قسمت ۲، یکی از عملگرها فعال شده است که باعث کج شدن صفحه نگهدارنده در زاویه ۵۳ درجه شده است. در قسمت ۳، دو عملگر فعال شده اند و زاویه کج شدن ۴۲ درجه می‌باشد. اما حالتی که هر سه عملگر فعال شده اند با موفقیت اجرا نشده و نمایش داده نشده است. وقتی هر سه عملگر فعال شده اند به خاطر حرارت بالا چسب اپوکسی اتصال دهنده عملگرها به صفحه نگهدارنده جدا شده است. در ضمن تصویری که از بازو نمایش داده شده سه پودمانی است نه چهار پودمانی. همچنین اعلام شده که لوله تهویه (شماره ۴ در

<sup>1</sup> Nitinol wires

کاست. برای این کار هر سیم اس-ام-ای را از داخل یک تیوب نایلونی عبور داده می شود.

انتخاب قطر سیم بر اساس حداکثر نیروی لازم در عملگر انجام می شود. سیم‌های قطورتر نیروی بیشتری هم می توانند ایجاد کنند؛ اما مشکلی هم وجود دارد: وقتی سیم قطور می شود در حین پیچش طول اضافی داخل سوراخ های میله، خم می-خورد و گیر می کند. برای حل این مشکل از دو سیم نازکتر به جای یک سیم قطورتر استفاده شده است.

نکته مهم دیگر در مورد عملگرهای اس-ام-ای این است که قابلیت تکرارپذیری دارند یا خیر. به این معنی که اگر یک عملگر را چندین بار تحریک کامل و سپس کاملاً سرد کنیم، در هر بار رفتار مشابهی را نشان می دهد یا خیر. مثلاً اگر در بار نخست، عملگر در تحریک کامل ۸ درجه خم شد، در بار دوم و سوم و بیشتر هم همان ۸ درجه خم می شود یا خیر. با آزمایشاتی که بر روی بازو انجام شده، از این بابت اطمینان داده شده است که بازو از نظر تکرارپذیری خوب عمل می کند.



شکل ۱۳ الف- بازوی ناپیوسته درون بینی اس-ام-ای، ب- نمایش ساختار این بازو [۷۱-۷۲]

## ۲-۶- بازوی ناپیوسته تیپ و همکاران

تیپ و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹، یک بازوی ناپیوسته مارگونه ۱۰ پودمانی ساختند که با نیروی الکترومغناطیس کار میکرد (شکل ۱۴) [۷۳-۷۸]. هر پودمان در واقع یک عملگر چرخشی دوحالتی با یک درجه آزادی بود که با نیروی الکترومغناطیس کار می کرد. هر عملگر، مطابق شکل (۱۴-ب) شامل چهار نیم حلقه از جنس فرومغناطیس<sup>۴</sup> بود که با یک لولای آلومینیومی به هم متصل می شدند. انتخاب جنس

مثلاً به عنوان بازوی رباتیک درون بینی، مناسب می باشد. اما محدودیت های این نوع عملگرها به ترتیب زیر هستند: بازده پایین (کمتر از ۱۰٪)، کورس حرکتی پایین (میزان کاهش طول یک عملگر اس-ام-ای در تحریک کامل، در حدود ۳٪ از طول اولیه آن می باشد)، ناتوانی تحریک با فرکانس بالا (به این معنی که برای آنکه بتوان یک عملگر را دوباره تحریک کرد باید به آن فرصت داد تا خنک شده و به طول اولیه برگردد که به آن زمان سرد شدن<sup>۱</sup> می گویند؛ علاوه بر آن در حین تحریک، برای رسیدن سیم اس-ام-ای به دمای گذار<sup>۲</sup>، به آن جریان الکتریکی اعمال میشود و سیم در اثر مقاومت الکتریکی خود داغ می شود و در نتیجه به خاطر خواص ذاتی ماده اس-ام-ای شروع به جمع شدن می کند. زمان لازم برای جمع شدن عملگر<sup>۳</sup>، بسته به قطر سیم و جریان اعمالی و بار وارده متفاوت است)، کنترل مشکل عملگرهای اس-ام-ای به خاطر غیرخطی بودن شدید اثر حافظه داری این مواد (البته در تحریک دو حالتی این مشکل وجود ندارد چون یا عملگر خاموش است یا در تحریک کامل).

دمای گذار در سیم مورد استفاده ۹۰ درجه سانتیگراد و زمان رسیدن به دمای گذار، یک ثانیه در نظر گرفته شده و جریان تحریک بر این اساس محاسبه گردیده است. اما زمان جمع شدن عملگرها در آزمایشاتی که بر روی بازو انجام شده است، بسته به میزان بار، بین ۳/۵ تا ۷ ثانیه اعلام شده است. اما زمان خنک شدن عملگر از این هم بیشتر است چون خنک شدن از طریق هوای اطراف انجام می شود. برای کاهش این زمان پیشنهاد شده است که از خنک کاری اجباری، مثلاً از طریق یک تیوب حاوی سیال خنک کننده که از داخل بازو می گذرد، استفاده کرد. در مجموع زمان نسبتاً زیاد لازم برای سیکل تحریک و خنک کاری عملگر یکی از مشکلات کار با این نوع عملگرها می باشد که باید مد نظر قرار گیرد.

محدودیت دیگری که اشاره شد، کورس کم جمع شدن سیم اس-ام-ای است. در بازوی ارائه شده، برای آنکه یک پودمان بتواند ۸ درجه خم شود، طول عملگر باید ۲/۲۴ میلیمتر کوتاه شود. با توجه به کورس ۳٪ که اشاره شد، طول سیم باید ۷۴/۷ میلیمتر باشد که از طول فنر (۱۰ میلیمتر) و طول میله استوانه ای (۲۰ میلیمتر) بیشتر است.

برای رفع این مشکل، سوراخ‌هایی در دیواره میله تعبیه شده که اضافی سیم دور آن بیچد. اما برای آنکه طول سیم بتواند کم و زیاد شود باید از اصطکاک آن در تماس با سوراخ و دیواره میله

<sup>3</sup> Rise time

<sup>4</sup> Ferromagnetic material

<sup>1</sup> Cooling (descent) time

<sup>2</sup> Transition temperature

مراحل بصورت برخط انجام شود و در ثانی کنترل بازو باید بصورت بصری و کاربر پسند<sup>۴</sup> انجام شود و در نهایت تعقیب مسیر بدون اعمال فشار به دیواره محیط اطراف و ایجاد جراحات انجام شود. لازم به یادآوری است که حرکت بازو درون حفره، ناشی از دو حرکت مجزا می باشد: اول، تغییر پیکربندی بازو و دوم، حرکت تغذیه یا پیشروی که از سر بازو و بصورت خودکار اعمال می شود<sup>۴</sup>. سازندگان این بازو، برای تعقیب مسیر از روش پیروی از سر بازو<sup>۵</sup> استفاده کردند که تمام ویژگی های گفته شده را دارد [۷۶،۷۴]. برای آنکه تعقیب مسیر با کمترین انحراف از مسیر انجام شود، سنتر پارامترهای سینماتیکی بر روی این بازو انجام گرفته است.

این پارامترها شامل ارتفاع عملگرها، زاویه کج شدن و زاویه پیچش می باشد. همچنین تاثیر این پارامترها بر فضای کاری و شعاع انحنای بازو مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد فضای کاری، هر چه حجم فضای کاری و چگالی نقاط در آن بیشتر باشد، بهتر است. بیشتر بودن چگالی نقاط قابل دسترسی در محدوده فضای کاری به معنی کم شدن فاصله این نقاط می باشد که باعث می شود دسترسی بازو به یک هدف دلخواه در محدوده فضای کاری با خطای کمتری قابل انجام باشد. به عنوان مثال وقتی زاویه کج شدن عملگرها بیشتر می شود، حجم فضای کاری افزایش پیدا می کند، اما چگالی فضای کاری کم می شود. علاوه بر فضای کاری، حداقل شعاع انحنای قابل حصول توسط بازو هم از عوامل مهم تاثیرگذار بر کارایی بازو می باشد. هر چه این شعاع کمتر باشد یا به عبارت دیگر هر چه بازو بتواند بیشتر خم شود، بهتر می تواند بر روی مسیرهای منحنی شکل مختلف بنشیند<sup>۶</sup> و در نتیجه، تعقیب مسیر هم با انحراف کمتری از مسیر قابل انجام خواهد بود. هر چه ارتفاع عملگر کمتر باشد و یا زاویه کج شدن بیشتر گردد، شعاع انحنای بازو هم کمتر خواهد بود [۷۳].

تیپ و همکاری آن علاوه بر مسائلی که مطرح شد، یک مدل دینامیکی از بازو ارائه کردند [۷۵]. برای بررسی دینامیک بازو ابتدا لازم بود تا رابطه ای برای پیش بینی مقدار گشتاور تولیدی در اثر تحریک الکترومغناطیسی معین شود. بنابراین، عوامل موثر بر گشتاور تولید شده در یک عملگر را مورد بررسی قرار گرفت و با ساده سازی، ارتباط بین گشتاور، جریان سیم پیچ و زاویه کج شدن عملگر پیشبینی گردید. در نهایت موارد پیش بینی شده با آزمایش عملی بر روی بازو، مورد صحت گذاری قرار گرفت.

آلومینیومی به منظور جداسازی مغناطیسی نیم حلقه ها بود. برای ایجاد مدار مغناطیسی در هر نیم حلقه، از یک سیم پیچ الکتریکی استفاده شده که به دور یک هسته فولادی بسته شده است. مدل یک عملگر و کل بازو بصورت مونتاژ شده، در شکل (۱۴-ج) قابل مشاهده است.

مشخصات هندسی عملگرها به این صورت است: ارتفاع هر عملگر ۱۶ میلیمتر، قطر عملگر ۴۵ میلیمتر و حداکثر زاویه کج شدن عملگر به طرفین یا به طور خلاصه، زاویه کج شدن  $6 \pm 1$  درجه. محور چرخش هر عملگر نسبت به عملگر قبلی ۹۰ درجه حول محور بازو می چرخید تا فضای کاری بازو بیشترین پوشش فضایی را ایجاد کند. به این زاویه بطور خلاصه، زاویه پیچش<sup>۲</sup> گفته می شود. فضای کاری این بازو شامل  $10.24 = 210$  نقطه در فضا می باشد. هدف طراحی و ساخت این نمونه، استفاده به عنوان یک سیستم رباتیک درون بینی معرفی شده است [۷۷-۷۸].

سیستم های معمول درون بینی شامل یک لوله انعطاف پذیر و غیر فعال هستند که وظیفه پیشروی و تصویر برداری داخل بدن را بر عهده دارند؛ البته نمونه هایی هم برای بازرسی فنی در داخل دستگاه هایی مثل موتور جت و لوله به منظور تشخیص زود هنگام خرابی ها وجود دارد. این سیستم ها در حین پیشروی تمایل دارند در اثر نیروهای وارده حلقه بزنند و با تکیه بر دیواره محیط اطراف، به آن نیرو وارد کنند که با درد و ایجاد جراحات در فرد بیمار همراه خواهد بود. استفاده از سیستم فعال رباتیک برای رفع این مشکلات پیشنهاد شده است. وظیفه یک سیستم رباتیک درون بینی آن است که بتواند با قابلیت خوب تعقیب مسیر و مقاومت در برابر نیروهای اعمالی، کار جستجو و تصویر برداری در محیط خواسته شده را انجام دهد.

برای جلوگیری از ایجاد خراش و گاز گرفتگی در اندام، یک غلاف سیلیکونی برای پوشاندن بدنه بازو طراحی و ساخته شده است. این غلاف نباید جلو حرکت و آزادی عمل بازو را بگیرد؛ همچنین در کشیده و فشرده شدن های متوالی که در حرکت بازو اجتناب ناپذیر است، خاصیت کشسانی خود را حفظ کند. برای ضبط و ذخیره حرکات بازو، حسگرهایی به این غلاف اضافه شده است و تشخیص پیکربندی عملگرها از طریق حسگرهای روی غلاف انجام می گیرد؛ البته در خود بازو از هیچ حسگری استفاده نشده و کنترل بازو، بدون پسخور صورت می گیرد.

یکی از وظایف سیستم های درون بینی، تعقیب مسیر است. تعقیب مسیر در عمل باید به شیوه ای انجام شود که اولاً تمام

<sup>4</sup> Automatic feed motion

<sup>5</sup> Follow-the-leader

<sup>6</sup> Curve fitting

<sup>1</sup> Tilting angle

<sup>2</sup> Twisting angle

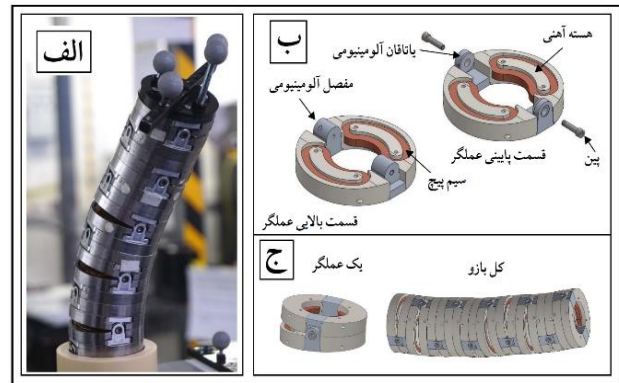
<sup>3</sup> User friendly

سیلندرها به صفحه متحرک و صفحه پایه در هر پودمان، گوشه-های مثلثی متساوی الاضلاع به اضلاع ۱۷۳ میلیمتر بود.

در ساخت صفحات مذکور، برای سبکی و استحکام مناسب، از جنس آلومینیوم استفاده شد. برای جلوگیری از تکان خوردن پایه بازو یا افتادن آن در حین تغییر پیکربندی، پایه بازو به یک چهارپایه سنگین و بزرگ با طول و عرض ۸۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۴۰۰ میلیمتر پیچ شده است. تجهیزات نیوماتیک و الکترونیک کنترل کننده در یک سینی فلزی در زیر میز قرار دارند. برای فرمان دادن به هر سیلندر، از یک شیر برقی استفاده می شود که باد را به از مجراهای بالا یا پایین سیلندر وصل میکند و فشار باد تا وقتی فرمان جدیدی اجرا نشود، حفظ خواهد شد. شیرهای برقی، که ۹ عدد هستند و هر کدام به یک سیلندر مرتبط میباشند، از یک پی-ال-سی<sup>۲</sup> با ۱۶ خروجی دیجیتال فرمان می-گیرد و خود پی-ال-سی هم از رایانه دستور می گیرد. برای ثبت حرکات بازو برای تحقیقات، به هر سیلندر یک خط کش اهمی متصل شده است (شکل ۱۵-ب). طول سیلندرها در هر لحظه توسط خط کش‌های متصل به آنها اندازه گیری شده و به رایانه فرستاده می شود و از طریق محاسبات سینماتیکی مختصات کل ربات در هر لحظه قابل رصد خواهد بود.

آزمایشات اولیه بر روی بازو مشکلاتی را نشان داد. تغییر پیکربندی بازو بصورت نرم و یکنواخت انجام نمی شد و با تاخیر زمانی همراه بود. سرعت بازو یا بسته شدن سیلندرها ثابت نبود. بخصوص در مواردی که بازو از حالت خم شده به یک سمت می خواست به سمت دیگری خم شود، سرعت برخی سیلندرها به یکباره زیاد میشد. برای حل این مشکل، از شیرهای کنترل جریان<sup>۳</sup> بر روی مجراهای ورودی و خروجی تمام سیلندرها بازو، استفاده شد. این شیرها یک پیچ تنظیم داشتند که با آن مجرای عبور هوا تنگ یا گشاد می شد. با تنگ کردن مجرای عبور هوا در ورودی و خروجی سیلندر، سرعت بازو بسته شدن سیلندر یکنواخت تر می شد. البته اگر مجرا خیلی تنگ می شد سرعت حرکت سیلندر کم شده و حتی ممکن بود به صفر برسد.

دو آزمایش بر روی بازو انجام گرفت: اول بررسی سرعت حرکت سیلندرها بازو در حین دو تغییر پیکربندی متفاوت، و دومی بررسی نحوه تعقیب مسیر بر روی یک مسیر مستقیم با تعداد نقاط دقت مختلف. آزمایشات نشان داد بازو می تواند در حالت بدون بار تمام تغییر پیکربندی هایی که به آن فرمان داده می شود را به نحو مطلوبی انجام دهد. برای تغییر در پیکربندی‌های



شکل ۱۴ الف- بازوی ناپیوسته تیپ و همکاران، ب- مدل دو نیمه از یک عملگر، ج- مدل یک عملگر و کل بازو [۷۷-۷۸]

## ۲-۷- بازوی مطهری و همکاران

مطهری و همکارانش در سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ با هدف بررسی نحوه حرکت و تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته اقدام به طراحی و ساخت یک بازوی ناپیوسته شامل سه پودمان مشابه لولایی-کشویی-کروی سه گانه کردند که پایه‌های آن شامل یک سیلندر بادی با تحریک دوحالته بود [۷۹،۶]. بنابراین هر پودمان، هشت پیکربندی مختلف داشت که با ترکیب این حالات برای سه پودمان،  $8^3 = 512$  پیکربندی مختلف برای بازو وجود داشت. این بازو در شکل (۱۵-الف) قابل مشاهده است. در شکل (۱۵-ب) یک پایه از یک پودمان نمایش داده شده است. به جای مفصل کروی در اینجا از مفصل چهارشاخه<sup>۱</sup> استفاده شده است، چراکه نیازی به درجه آزادی سوم در این مفصل وجود ندارد. به عبارت دیگر، با توجه به جهت گیری خاصی که محور لولاها روی صفحه پایه نسبت به هم دارند، صفحه متحرک هر پودمان حول محور عمود بر خودش، چرخشی نخواهد داشت.

مفصل‌های چهارشاخه موجود در بازار تحت زاویه بیشتری نسبت به مفاصل کروی می توانند کج بشوند و از این طریق فضای کاری وسیعتری را میتوانند ایجاد کنند، بنابراین به مفاصل کروی ترجیح داده می شوند. زاویه خم شدن صفحه متحرک نسبت به صفحه ثابت در هر پودمان حداکثر ۳۲ درجه است، بنابراین کل بازو میتواند  $96 = 3 \times 32$  درجه خم شود (شکل ۱۵-الف). تمام ۹ سیلندر بازو با قطر داخلی ۲۵ میلیمتر و طول کورس ۸۰ میلیمتر هستند. طول جمع شده آن‌ها ۲۲۰ میلیمتر و طول باز شده ۳۰۰ میلیمتر میباشد، بنابراین حداقل طول بازو ۶۶۰ میلیمتر و حداکثر آن ۹۰۰ میلیمتر میباشد. محل اتصال

<sup>3</sup> Flow control valves

<sup>1</sup> Universal joint

<sup>2</sup> PLC

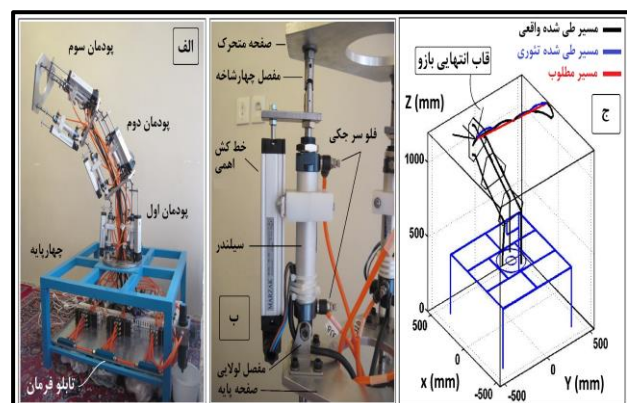


نوع پیوسته ترجیح داده می شود. این به خاطر چالش‌هایی است که در استفاده از تحریک ناپیوسته وجود دارد. با افزایش تعداد پودمان‌ها، بازوهای ناپیوسته مانند نوع پیوسته دارای فضای کاری وسیع و قابلیت دوری از موانع خواهند بود. در عین حال عملگرهای ناپیوسته معمولاً از نوع پیوسته ارزانتر هستند و کنترل ساده‌تری دارند، همچنین دقت حرکتی و تکرار پذیری بالایی دارند. بازوهای ناپیوسته تنها قابلیت قرارگیری در پیکربندی‌های محدودی را دارند، اما تعداد این پیکربندی‌ها با افزایش تعداد پودمان‌ها بصورت نمایی رشد کرده و تعداد زیادی خواهد شد. بنابراین می توان انتظار داشت که بازو با دقت قابل قبولی به هر نقطه که در محدوده فضای کاریش باشد دسترسی پیدا کند. اما از طرف دیگر، افزایش تعداد پودمان‌ها باعث می شود هزینه و وزن بازو زیاد شود. مشکل مهمتر در مورد بازوهای ناپیوسته، کیفیت تعقیب مسیر در آن‌ها است. وقتی به بازو فرمان داده می شود که از یک پیکربندی به پیکربندی دیگری برود، نحوه این تغییر در بین مسیر قابل کنترل نیست، چون عملگرها پیوسته نیستند. بنابراین نمی توان مسیر حرکت را در بین دو پیکربندی مذکور کنترل کرد. بنابراین، تعقیب مسیر به صورت نقطه به نقطه صورت میگیرد. دو مشکل در اینجا بروز می کند، اولاً مسیر طی شده بین نقاط لزوماً روی مسیر مطلوب نمی افتد، در ثانی بین هر تکه از تعقیب مسیر یک مکس وجود دارد. بنابراین سرعت طی مسیر یکنواخت نیست و با وقفه‌های همراه است و در ضمن مسیر بصورت دقیق دنبال نمی شود. این ویژگی بازوهای ناپیوسته نقصان اجتناب ناپذیری نسبت به عملگرهای پیوسته محسوب می شود که کاربرد آن‌ها را محدود می کند. اما در بسیاری از وظایف ربات‌ها، دقت در مسیر حرکت اهمیت چندانی ندارد و فقط دقت نقاط ابتدایی و انتهایی مهم هستند؛ مثلاً گذاشتن و برداشتن اشیاء اینگونه است و می توان از یک بازوی ناپیوسته برای این نوع وظایف استفاده کرد. بازوهای ناپیوسته در عمل خیلی مورد توجه قرار نگرفته اند و تنها چند نمونه از آن‌ها ساخته شده است که در این مقاله مورد بررسی اجمالی قرار گرفت. اکثر این موارد هم فقط با هدف تحقیقات دانشگاهی ساخته شده‌اند. تنها چند مورد در سال‌های اخیر با هدف کاربردهای پزشکی و درون بینی در مرحله تحقیقاتی ساخته شده اند.

جدول (۴)، یک جمع بندی از ویژگی‌های بازوهای ناپیوسته مطرح شده در این مقاله را ارائه می کند. آنچه در طراحی این بازوها مشهود است، استفاده از ویژگی عملگرهای ناپیوسته (که عمدتاً از نوع دو حالت هستند) برای ساخت بازوهایی سبک، ساده، کوچک، ارزان، با کنترل ساده و مصرف انرژی پایین است.

مختلف، کمتر از ۴ ثانیه زمان اعلام شده است. اما برای حالت حمل بار، گزارشی ارائه نشده است. تجربه نشان داد که برای رسیدن به سرعت‌های ثابت باید مجرای هوای سیلندر تنگ شود، که باعث ایجاد تاخیر و یا گاهی توقف حرکت سیلندر در بارهای سنگین می شد. برای کاهش این مشکل بهتر است از سیلندرهایی با قطر بیشتر از آنچه برای حمل بار لازم است، استفاده شود. همچنین برای پودمان‌های نزدیک به پایه بازو، که بار بیشتری نسبت به پودمان‌های انتهایی تحمل می کنند از سیلندرهایی قطورتری استفاده شود.

در آزمون دوم، برای تعقیب یک مسیر مشخص، ابتدا تعداد و مکان نقاط دقت تعیین می شد، سپس نرم افزار، چند پیکربندی (به تعداد نقاط دقت) با کمترین خطای ممکن را مشخص می کرد. سپس این پیکربندی‌ها، یکی پس از دیگری با فواصل زمانی کافی (زمان لازم برای اجرای حرکت) به بازو فرمان داده می شد. در شکل (۱۵-ج) نتیجه یک آزمون با پنج نقطه دقت نمایش داده شده است. مسیر مطلوب یک خط است که با رنگ قرمز نمایش داده شده. مسیری که در عمل مجری نهایی طی کرده، به کمک داده‌هایی که خط کش‌های اهمی اندازه گیری کرده اند، مشخص می شود. این مسیر با رنگ سیاه نمایش داده شده است. منحنی آبی رنگ با این فرض ترسیم شده که سرعت بازو یا بسته شده تمام سیلندرها ثابت و مساوی بوده است. این فرض با آنچه در عمل اتفاق می افتد اندکی متفاوت است. در این شکل هم می توان ماهیت تقریبی و تکه تکه بودن تعقیب مسیر توسط بازوهای ناپیوسته را مشاهده کرد.



شکل ۱۵ الف- بازوی ناپیوسته مطهری و دیگران، ب- یک پایه از یک پودمان این بازو، ج- نتایج آزمون تعقیب مسیر با ۵ نقطه دقت [۷۹].

### ۳- نتیجه‌گیری

بازوهای ناپیوسته با وجود مزایایی که نسبت به بازوهای پیوسته دارند، در عمل استفاده از آن‌ها بسیار محدود بوده است و غالباً

عملی نمی گردد. مثلاً وقتی عملگر سبک و کوچک است، نیروی زیادی تولید نمی کند و نمی توان تعداد پودمان‌ها را زیاد کرد. سادگی در ارتباط با کاربر و کنترل ربات، ارزان بودن، سبکی، کم حجم بودن و مصرف کم انرژی استفاده شود. احتمال می رود بتوان بازوهای رباتیک ناپیوسته ارزان و ساده ای ساخت که محیط های آموزش رباتیک بتوانند از آن بهره ببرند.

چالشی که در مقابل این اهداف وجود دارد بیشتر بر روی طراحی عملگر می باشد. چراکه معمولاً تمام این اهداف بصورت یکجا چون در این صورت وزن خود را تحمل نمی کند و نمی تواند تمام تغییر پیکربندی‌ها را به درستی اجرا کند. بنابراین پیشنهاد می شود محققین بر روی طراحی و ساخت عملگرهای ناپیوسته ای که تمام این ویژگی‌ها را داشته باشد کار کنند. در ضمن پیشنهاد می شود بر روی طراحی و ساخت بازوهای ناپیوسته ای کار شود که مناسب برای محیط های آموزشی باشند و در این راه از قابلیت

جدول ۴ ویژگی‌های بازوهای ناپیوسته ساخته شده

نام بازو	سال ساخت	تعداد پودمان	مکانیزم پودمان	تعداد پیکربندی‌ها	نوع تحریک	هدف طراحی و کاربرد بازو	نقاط قوت و ضعف
ایبرت-یوفاف	۱۹۹۸	۶	استوارت-گاوف	$6/87 \times 10^3$	نیوماتیک	بررسی رفتار بازوهای ناپیوسته	محدوده حرکتی کوچک؛ تاخیر زیاد در انجام برخی تغییر پیکربندی‌ها؛ حرکات بصورت نرم و ملایم انجام نمی شد.
سوتاکن	۲۰۰۳	۳	وی-جی-تی صفحه ای با چرخش فضایی	$2/1 \times 10^6$	نیوماتیک	بررسی رفتار بازوهای ناپیوسته	فضای کاری وسیع؛ استفاده از میراگر روغنی برای یکنواخت کردن حرکات
براید اس-ام-ای	۲۰۰۱-۲۰۰۴	۵	آر-پی-اس سه گانه	۳۲۷۶۸	اس-ام-ای	طراحی با هدف کاهش وزن، پیچیدگی و مصرف انرژی برای استفاده در کاوش‌های فضایی	وزن اندک به خاطر بدنه تمام پلاستیک؛ قابلیت جمع شدن بازو؛ کندی در پاسخ؛ نیروی کم؛ اتلاف انرژی در اثر حرارت سیم‌های اس-ام-ای
براید الکترومغناطیسی	۲۰۰۳	۲	آر-آر-اس سه گانه	۶۴	الکترومغناطیس	کاهش اتلاف انرژی در حین سبکی و کوچکی برای استفاده در کاوش‌های فضایی	جرم نسبتاً بالا؛ نیروی کم؛ تعداد پودمان‌های کم
براید دی-ای سری اول	۲۰۰۲-۲۰۰۶	۲	آر-پی-اس سه گانه	۶۴	دی الکتریک	هدف طراحی کاهش وزن در حین مصرف کم انرژی، برای استفاده در کاوش‌های فضایی	جرم نسبتاً بالا؛ نیروی تولیدی کم؛ خرابی زیاد عملگر و عدم اطمینان؛ تعداد پودمان‌های کم



- Masia and A. Merola, "Design, Computational Modelling and Experimental Characterization of Bistable Hybrid Soft Actuators for a Controllable-Compliance Joint of an Exoskeleton Rehabilitation Robot," *Actuators*, vol. 11, no. 2, p. 32, 2022. <https://doi.org/10.3390/act11020032>.
- [17] S. J. Lee, A. M. Bilton and S. Dubowsky, "On the kinematics of solar mirrors using massively parallel binary actuation," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 44106, pp. 1177-1186, 2010. <https://doi.org/10.1115/DETC2010-28875>.
- [18] S. M. Rudolph, M. W. Nurnberger, H. F. Alqadah and J. P. Bobak, "Ultra-Low-Loss, Binary-State Elements for a Mechanically Actuated Reconfigurable Reflectarray," in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 1951-1952. <https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889144>.
- [19] Q. Ze, S. Wu, J. Dai, S. Leanza, G. Ikeda, P. C. Yang, G. Iaccarino and R. R. Zhao, "Spinning-enabled wireless amphibious origami millirobot," *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, p. 3118, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30802-w>.
- [20] A. Mohand-Ousaid, I. Bouhadda, G. Bourbon, P. Le Moal, Y. Haddab and P. Lutz, "Compact Digital Microrobot Based on Multistable Modules," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 1926-1933, 2021. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3061003>.
- [21] H. Hussein, I. Bouhadda, A. Mohand-Ousaid, G. Bourbon, P. Le Moal, Y. Haddab and P. Lutz, "Design and fabrication of novel discrete actuators for microrobotic tasks," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 271, pp. 373-382, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.12.065>.
- [22] L. Zhou and H. Xie, "A Novel Out-of-Plane Electrothermal Bistable Microactuator," in *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)*, Berlin, Germany, 2019, pp. 1953-1956. <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808360>.
- [23] K. Tadakuma, L. M. DeVita, J.-S. Plante, Y. Shaoze, and S. Dubowsky, "The experimental study of a precision parallel manipulator with binary actuation: With application to MRI cancer treatment," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008, pp. 2503-2508. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4536003>.
- Advanced Materials Technologies*, vol. 5, no. 9, p. 2000370, 2020. <https://doi.org/10.1002/admt.202000370>.
- [8] Y. Lin, C. Zhang, W. Tang, Z. Jiao, J. Wang, W. Wang, Y. Zhong et al., "A Bioinspired Stress-Response Strategy for High-Speed Soft Grippers," *Advanced Science*, vol. 8, no. 21, p. 2102539, 2021. <https://doi.org/10.1002/advs.202102539>.
- [9] X. Wang, A. Khara and C. Chen, "A soft pneumatic bistable reinforced actuator bioinspired by Venus Flytrap with enhanced grasping capability," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 15, no. 5, p. 056017, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aba091>.
- [10] M. Mungekar, L. Ma, W. Yan, V. Kackar, S. Shokrzadeh and M. K. Jawed, "Design of Bistable Soft Deployable Structures via a Kirigami-Inspired Planar Fabrication Approach," *Advanced Materials Technologies*, vol. 11, no. 2, p. 2300088, 2023. <https://doi.org/10.1002/admt.202300088>.
- [11] X. Wang, H. Zhou, H. Kang, W. Au and C. Chen, "Bio-inspired soft bistable actuator with dual actuations," *Smart Materials and Structures*, vol. 30, no. 12, p. 125001, 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac2e19>.
- [12] J. McWilliams, Y. Yuan, J. Friedman and C. Sung, "Push-on push-off: A compliant bistable gripper with mechanical sensing and actuation," in *2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, New Haven, CT, USA, 2021, pp. 622-629. <https://doi.org/10.1109/RoboSoft51838.2021.9479209>.
- [13] Y. Tang, Y. Chi, J. Sun, T.-H. Huang, O. H. Maghsoudi, A. Spence, J. Zhao, H. Su and J. Yin, "Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots," *Science advances*, vol. 6, no. 19, p. eaaz6912, 2020. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6912>.
- [14] R. Masana, S. Khazaaleh, H. Alhussein, R. S. Crespo and M. F. Daqaq, "An origami-inspired dynamically actuated binary switch," *Applied Physics Letters*, vol. 117, no. 8, p. 081901, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0010236>.
- [15] L. Cappello, M. Xiloyannis, B. K. Dinh, A. Pirrera, F. Mattioni and L. Masia, "Multistable series elastic actuators: Design and control," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 118, p. 167-178, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.04.014>.
- [16] D. Dragone, L. Randazzini, A. Capace, F. Nesci, C. Cosentino, F. Amato, E. De Momi, R. Colao, L.

- no. 4, p. 046002, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/4/046002>.
- [33] Y. Gandhi, A. Pironi, and L. Collini, "Analysis of bistable composite laminate with embedded SMA actuators," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 12, pp. 429-437, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.075>.
- [34] K.-J. Cho, B. Selden, and H. H. Asada, "Segmented binary control of multi-axis SMA array actuators," in *Smart Structures and Materials 2005: Modeling, Signal Processing, and Control*, San Diego, California, USA, 2005, p. 314. <https://doi.org/10.1117/12.600307>.
- [35] K.-J. Cho and H. H. Asada, "Architecture design of a multi-axis cellular actuator array using segmented binary control of shape memory alloy," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 22, no. 4, pp. 831-843, Aug. 2006. <https://doi.org/10.1109/TRO.2006.878981>.
- [36] E. Ottaviano, G. Carbone, and M. Ceccarelli, "Workspace analysis and performance of a binary actuated parallel manipulator with flexural joints," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 217, no. 3, pp. 313-330, Mar. 2003. <https://doi.org/10.1243/095440603762869984>.
- [37] G. Borchert, C. Löchte, S. Brumme, G. Carbone, M. Ceccarelli, and A. Raatz, "Design methodology for a compliant binary actuated parallel mechanism with flexure hinges," in *New Trends in Mechanism and Machine Science: Theory and Applications in Engineering*, V. Parenti-Castelli and C. Fanghella, Eds. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2013, pp. 171-179. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4902-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4902-3_18).
- [38] G. Carbone, E. D'Aliesio, G. Borchert, and A. Raatz, "Design and validation of the binary actuated parallel manipulator BAPAMAN2," *Adv. Robot.*, vol. 27, no. 13, pp. 1033-1043, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1080/01691864.2013.804800>.
- [39] G. Carbone, "Experimental characterization of a binary actuated parallel manipulator," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 445-453, May 2016. <https://doi.org/10.3901/CJME.2016.0323.036>.
- [40] R. Addo-Akoto and J.-H. Han, "Bidirectional actuation of buckled bistable beam using twisted string actuator," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 30, no. 4, pp. 506-516, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1177/1045389X18817830>.
- [41] M. Gerbl and J. Gerstmayr, "Self-reconfiguration of shape-shifting modular robots with triangular structure," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 147, p. 103930, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103930>.
2508. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543589>.
- [24] G. Miron, A. Girard, J.-S. Plante, and M. Lepage, "Design and manufacturing of embedded pneumatic actuators for an MRI-Compatible Prostate Cancer Binary Manipulator," in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, Illinois, USA, 2012, pp. 1133-1142. <https://doi.org/10.1115/DETC2012-71380>.
- [25] T. Chen and K. Shea, "An autonomous programmable actuator and shape reconfigurable structures using bistability and shape memory polymers," *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 5, no. 2, pp. 91-101, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1089/3dp.2017.0118>.
- [26] W. Ding and Y.-A. Yao, "Construction and locomotion analysis of modular robots with pneumatic-actuated and binary-controlled expandable cubes," *Adv. Robot.*, vol. 28, no. 22, pp. 1487-1505, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.959052>.
- [27] D. Schütz, A. Raatz, and J. Hesselbach, "Adapted task configuration of a reconfigurable binary parallel robot with PRRRP structure," *Robotica*, vol. 31, no. 2, pp. 285-293, Mar. 2013. <https://doi.org/10.1017/S0263574712000240>.
- [28] M. Russo, J. Barrientos-Diez, and D. Axinte, "A kinematic coupling mechanism with binary electromagnetic actuators for high-precision positioning," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 27, no. 2, pp. 892-903, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3074286>.
- [29] H. Shao, S. Wei, X. Jiang, D. P. Holmes, and T. K. Ghosh, "Bioinspired electrically activated soft bistable actuators," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 35, p. 1802999, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1002/adfm.201802999>.
- [30] I. A. Anderson, T. A. Gisby, T. G. McKay, B. M. O'Brien, and E. P. Calius, "Multi-functional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines," *J. Appl. Phys.*, vol. 112, no. 4, p. 041101, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1063/1.4740023>.
- [31] P. Chouinard and J.-S. Plante, "Bistable antagonistic dielectric elastomer actuators for binary robotics and mechatronics," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 17, no. 5, pp. 857-865, Oct. 2011. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2135862>.
- [32] H. Yuk, D. Kim, H. Lee, S. Jo, and J. H. Shin, "Shape memory alloy-based small crawling robots inspired by *C. elegans*," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 6,

- [com.access.semantak.com/dissertations-theses/on-development-discretely-actuated-hybrid-serial/docview/304420212/se-2?accountid=173708](https://www.semanticscholar.org/thesis/development-discretely-actuated-hybrid-serial/docview/304420212/se-2?accountid=173708).
- [53] I. Ebert-uphoff and G. S. Chirikjian, "Efficient workspace generation for binary manipulators with many actuators," *J. Robot. Syst.*, vol. 12, no. 6, pp. 383–400, Jun. 1995. <https://doi.org/10.1002/rob.4620120605>.
- [54] I. Ebert-Uphoff and G. S. Chirikjian, "Inverse kinematics of discretely actuated hyper-redundant manipulators using workspace densities," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA, Apr. 1996, vol. 1, pp. 139–145. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1996.503586>.
- [55] I. Ebert-Uphoff and G. S. Chirikjian, "Discretely actuated manipulator workspace generation by closed-form convolution," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Irvine, CA, USA, Aug. 1996, vol. 97577, p. V02AT02A014. <https://doi.org/10.1115/96-DETC/MECH-1162>.
- [56] G. S. Chirikjian and I. Ebert-Uphoff, "Numerical convolution on the Euclidean group with applications to workspace generation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 14, no. 1, pp. 123–136, Feb. 1998. <https://doi.org/10.1109/70.660856>.
- [57] J. Suthakorn, "Paradigms for service robotics," Baltimore, MD, USA: *The Johns Hopkins University*, 2003. <https://www-proquest-com.access.semantak.com/dissertations-theses/paradigms-service-robotics/docview/288276541/se-2?accountid=173708>.
- [58] J. Suthakorn and G. S. Chirikjian, "Design and implementation of a new discretely-actuated manipulator," in *Experimental Robotics VII*, D. Rus and S. Singh, Eds. Berlin, Germany: Springer, 2002, pp. 151–157. [https://doi.org/10.1007/3-540-45118-8\\_16](https://doi.org/10.1007/3-540-45118-8_16).
- [59] J. Suthakorn and G. S. Chirikjian, "A new inverse kinematics algorithm for binary manipulators with many actuators," *Adv. Robot.*, vol. 15, no. 2, pp. 225–244, 2001. <https://doi.org/10.1163/15685530152116245>.
- [60] J. Plante et al., "Binary actuation," in *Electroactive Polymers for Robotic Applications: Artificial Muscles and Sensors*, K. J. Kim and S. Tadokoro, Eds. London, U.K.: Springer, 2008, ch. 26, pp. 270–278. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=53ad7c3afb1092c833daae26d21a48c3a21d346>.
- [42] M. Gerbl and J. Gerstmayr, "Self-reconfiguration planning of adaptive modular robots with triangular structure based on extended binary trees," in *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, Oct. 2020, pp. 3312–3319. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341300>.
- [43] D. K. Patel et al., "Highly Dynamic Bistable Soft Actuator for Reconfigurable Multimodal Soft Robots," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 8, no. 2, p. 2201259, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1002/admt.202201259>.
- [44] Z. Zhang et al., "Magnetic actuation bionic robotic gripper with bistable morphing structure," *Compos. Struct.*, vol. 229, p. 111422, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111422>.
- [45] Y. Chi et al., "Bistable and multistable actuators for soft robots: Structures, materials, and functionalities," *Adv. Mater.*, vol. 34, no. 19, p. 2110384, May 2022. <https://doi.org/10.1002/adma.202110384>.
- [46] W. Ma et al., "An origami-inspired cube pipe structure with bistable anti-symmetric CFRP shells driven by magnetic field," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 2, p. 025028, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaf6ba>.
- [47] L. S. Novelino et al., "Untethered control of functional origami microrobots with distributed actuation," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 117, no. 39, pp. 24096–24101, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013292117>.
- [48] Q. Ze et al., "Soft robotic origami crawler," *Sci. Adv.*, vol. 8, no. 13, p. eabm7834, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7834>.
- [49] K. Hu, T. Jeannin, J. Berre, M. Ouisse, and K. Rabenorosoa, "Toward actuation of Kresling pattern-based origami robots," *Smart Mater. Struct.*, vol. 31, no. 10, p. 105025, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac9020>.
- [50] S. Wu et al., "Stretchable origami robotic arm with omnidirectional bending and twisting," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 118, no. 36, p. e2110023118, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1073/pnas.2110023118>.
- [51] H. Son, Y. Park, Y. Na, and C. Yoon, "4D Multiscale Origami Soft Robots: A Review," *Polymers*, vol. 14, no. 19, p. 4235, Sep. 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14194235>.
- [52] I. R. Ebert-Uphoff, "On the development of discretely actuated hybrid-serial-parallel manipulators," Baltimore, MD, USA: *The Johns Hopkins University*, 1998. <https://www-proquest-com.access.semantak.com/dissertations-theses/on-the-development-of-discretely-actuated-hybrid-serial-parallel-manipulators/docview/304420212/se-2?accountid=173708>.

- pp. 1180-1183, 2006. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2006.277347>.
- [70] E. Lantaigne and A. Jnifene, "An experimental study on a SMA driven pressurized hyper-redundant manipulator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, no. 9, pp. 1067-1076, 2008. <https://doi.org/10.1177/1045389X07083185>.
- [71] A. Mavrommati, E. Tzorakoleftherakis, and A. Tzes, "Design and development of a hyper-redundant binary active laparoscopic manipulator," in *2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, pp. 327-332, 2012. <https://doi.org/10.1109/MED.2012.6265659>.
- [72] E. Tzorakoleftherakis, A. Mavrommati, and A. Tzes, "Design and implementation of a binary redundant manipulator with cascaded modules," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 8, no. 1, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4030372>.
- [73] S. Tappe, J. Kotlarski, T. Ortmaier, M. Dörbaum, A. Mertens, and B. Ponick, "The kinematic synthesis of a spatial, hyper-redundant system based on binary electromagnetic actuators," in *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, pp. 211-216, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICARA.2015.7081149>.
- [74] S. Tappe, J. Pohlmann, J. Kotlarski, and T. Ortmaier, "Towards a follow-the-leader control for a binary actuated hyper-redundant manipulator," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3195-3201, 2015. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353820>.
- [75] S. Tappe, M. Dörbaum, J. Kotlarski, B. Ponick, and T. Ortmaier, "Kinematics and dynamics identification of a hyper-redundant, electromagnetically actuated manipulator," in *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 601-607, 2016. <https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576834>.
- [76] S. Tappe, J. Pohlmann, J. Kotlarski, and T. Ortmaier, "Optimization strategies for task specific path-following capabilities of a binary actuated snake-like robot using follow-the-leader control," in *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 298-303, 2017. <https://doi.org/10.1109/AIM.2017.8014243>.
- [77] S. Tappe, P. Boyraz, H. Korz, and T. Ortmaier, "Design, production and integration of a shape sensing robotic sleeve for a hyper-redundant, binary actuated robot," in *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 298-303, 2018. <https://doi.org/10.1109/AIM.2018.8452710>.
- [61] V. A. Sujan, M. D. Lichter, and S. Dubowsky, "Lightweight hyper-redundant binary elements for planetary exploration robots," in *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings*, Como, Italy, Jul. 2001, vol. 2, pp. 1273-1278. <https://doi.org/10.1109/AIM.2001.936904>.
- [62] V. A. Sujan and S. Dubowsky, "Design of a lightweight hyper-redundant deployable binary manipulator," *J. Mech. Des.*, vol. 126, no. 1, pp. 29-39, Jan. 2004. <https://doi.org/10.1115/1.1637647>.
- [63] M. Hafez, M. D. Lichter, and S. Dubowsky, "Optimized binary modular reconfigurable robotic devices," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 8, no. 1, pp. 18-25, Mar. 2003. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2003.809156>.
- [64] A. Wingert, M. D. Lichter, S. Dubowsky, and M. Hafez, "Hyper-redundant robot manipulators actuated by optimized binary-dielectric polymers," in *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Y. Bar-Cohen, Ed., San Diego, CA, USA, Mar. 2002, vol. 4695, pp. 415-423. <https://doi.org/10.1117/12.475189>.
- [65] J. Vogan et al., "Manipulation in MRI devices using electrostrictive polymer actuators: With an application to reconfigurable imaging coils," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004, New Orleans, LA, USA, Apr. 2004, vol. 3, pp. 2498-2504. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1307436>.
- [66] A. Wingert, M. D. Lichter, and S. Dubowsky, "On the design of large degree-of-freedom digital mechatronic devices based on bistable dielectric elastomer actuators," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 11, no. 4, pp. 448-456, Aug. 2006. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2006.878542>.
- [67] J.-S. Plante, M. Santer, S. Dubowsky, and S. Pellegrino, "Compliant bistable dielectric elastomer actuators for binary mechatronic systems," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 47446, pp. 121-126, 2005. <https://doi.org/10.1115/DETC2005-85576>.
- [68] J.-S. Plante, "Dielectric elastomer actuators for binary robotics and mechatronics," *Ph.D. dissertation*, Massachusetts Institute of Technology, 2006. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/35305>.
- [69] E. Lantaigne and A. Jnifene, "Design of a link-less hyper-redundant manipulator and composite shape memory alloy actuator," in *2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*,

- [79] A. Motahari, H. Zohoor, and M. Habibnejad Korayem, "Design and construction of a discretely actuated hyper-redundant manipulator," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 669-676, 2020. <https://mme.modares.ac.ir/article-15-30410-en.html>.
- [78] M. Dörbaum, S. Tappe, T. Ortmaier, and B. Ponick, "Design and analysis of electromagnetic tilting actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 5, pp. 2171-2181, 2019. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2929735>.