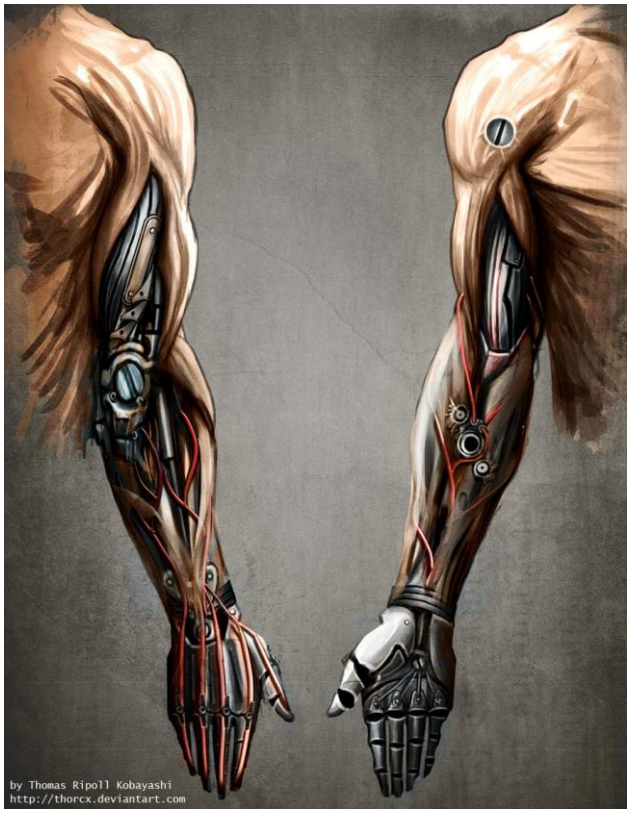
باسمه تعالی



ARTIFICIAL MUSCLES

ماهیچه‌های مصنوعی

خلاصه

ماهیچه‌های مصنوعی عملگرهایی مصنوعی هستند که با توجه به نوع مکانیزم تحریک منحصر به فرد خود قادرند تا از نحوه عملکرد عضلات طبیعی تقلید کنند. این نوع ماهیچه‌ها این توانایی را دارند تا چندین برابر عضلات طبیعی توان ایجاد کرده و به صورت خستگی ناپذیر و بدون افت و ضعف در عملکرد خود حرکات برنامه ریزی شده را انجام دهند. در این گزارش به صورت مختصر به شرح انواع این ماهیچه‌ها، نحوه عملکرد و شاخص‌های مهم آن‌ها پرداخته و سعی شده تا چشم انداز توسعه آن ترسیم و تحولی که در حوزه‌های مختلف ایجاد خواهد کرد مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست

۱- مقدمه ۲

۲- معرفی ۳

۳- مزیت‌های و محدودیت‌های ماهیچه‌های مصنوعی ۴

۴- تقسیم بندی ماهیچه‌های مصنوعی ۵

۴-۱- تحریک میدان الکتریکی ۵

۴-۲- تحریک بر پایه یون ۶

۴-۳- تحریک با نیروی الکتریکی ۷

۴-۴- تحریک پنوماتیکی ۸

۴-۵- تحریک حرارتی ۹

۵- مقایسه ویژگی‌های ماهیچه‌های مصنوعی ۱۱

۶- چشم‌انداز و کاربردهای توسعه ماهیچه‌های مصنوعی ۱۴

۶-۱- گجت‌های پوشیدنی توانبخشی ۱۴

۶-۲- سیستم‌های پروازی ۱۵

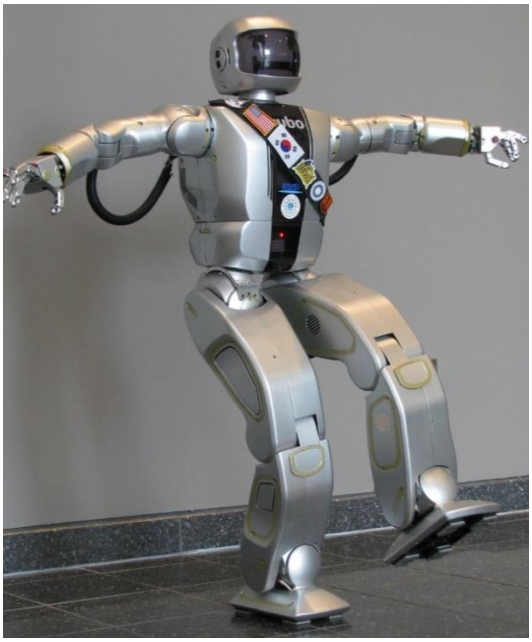
۶-۳- انواع ربات‌های زیست تقلیدپذیر ۱۵

۷- منابع ۱۶

۱- مقدمه

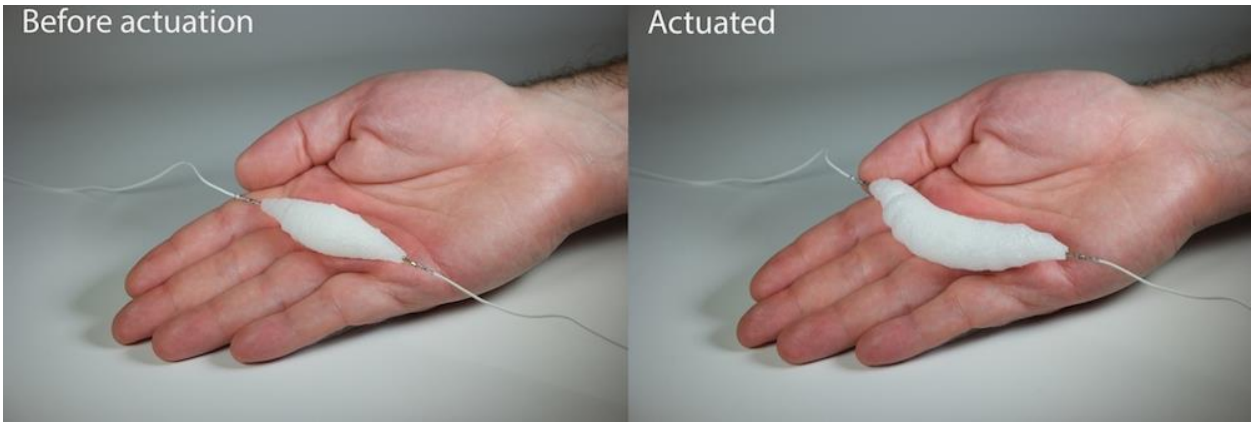
کمتر از ۹۰ سال از ساخت فیلم عصرجدید چارلی چاپلین می‌گذرد فیلمی که در آن نگاه خاص و هنرمندانه‌ای به صنعتی سازی و مدرنیته شده است. در بخشی از این فیلم رباتی که برای صرف غذا ساخته شده، بر روی یک کارگر ساده (چاپلین) امتحان می‌شود و به علت نقص فنی باعث آسیب دیدن کارگر می‌شود.

شاید در آن زمان و از دید یک هنرمند استفاده از چنین ربات‌هایی و ورود مکانیزم‌های خودکار در ساده‌ترین و روزمره‌ترین فعالیت‌های انسانی به نوعی یک ناهنجاری تلقی شده که می‌تواند بشر را رو به انحطاط برد اما با پیشرفت در این حوزه، ربات‌ها توانسته‌اند نقش موثر و مفید خود را در بخش‌های مختلف زندگی بشر اثبات کنند. امروزه ربات‌ها در بخش‌های مختلف زندگی به صورت مستقیم یا غیر مستقیم و به صورت خستگی ناپذیر در حال خدمت‌رسانی به انسان‌ها هستند. توسعه روزافزون علم در بخش‌های مختلف باعث شده تا روز به روز این محصولات بهینه شده و استفاده از آن مقرون به صرفه باشد. با این وجود سیستم‌های رباتیک کنونی هنوز هم محدودیت‌هایی دارند که توسعه دهندگان این محصولات با استفاده از فناوری‌های جدید می‌خواهند به رفع آن بپردازند. یکی از این فناوری‌ها که در صورت توسعه و بهینه شدن می‌تواند تحولی شگرف در حوزه رباتیک ایجاد کند استفاده از **ماهیچه‌های مصنوعی** است. در این گزارش تلاش شده تا پس از تعریف این نوع ماهیچه‌ها به بررسی انواع و مقایسه ویژگی‌های آن پرداخته شود و در نهایت برخی از کاربردهایی که می‌تواند در صورت توسعه داشته باشد بیان گردد.



۲- معرفی

ماهیچه های مصنوعی[1] که به عنوان محرک های عضلانی نیز شناخته می شوند، مواد یا دستگاه‌هایی هستند که از عضله طبیعی تقلید می کنند و می توانند سختی خود را تغییر دهند، بطور معکوس منقبض شوند، منبسط شوند یا به دلیل یک محرک خارجی (مانند ولتاژ، جریان، فشار یا دما) درون یک جزء بچرخند. سه واکنش اصلی تحریک – انقباض، انبساط و چرخش می‌توانند در یک مؤلفه واحد با یکدیگر ترکیب شوند تا انواع دیگر حرکات (به عنوان مثال خم شدن، با انقباض یک طرف مواد در حالی که طرف دیگر را گسترش می دهد) تولید کند.



موتورهای متداول و پنوماتیک خطی و چرخشی به عنوان ماهیچه‌های مصنوعی شناخته نمی‌شوند زیرا در آن‌ها بیش از یک عضو برای حرکت درگیر می‌شود. به دلیل انعطاف پذیری بالا، تطبیق پذیری و نسبت قدرت به وزن در مقایسه با محرک های سفت و سخت سنتی، عضلات مصنوعی این پتانسیل را دارند که به عنوان یک فناوری نوظهور برافکن باشند. اگرچه در حال حاضر استفاده از این فناوری بسیار محدود است اما در آینده می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در صنایع، پزشکی، رباتیک و رشته‌های گوناگون دیگر داشته باشد.

در حالی که هیچ تئوری عمومی وجود ندارد که امکان مقایسه محرک‌ها را داشته باشد، "معیارهای قدرت" برای فناوری‌های عضلات مصنوعی وجود دارد که می‌تواند مشخصات فناوری‌های محرک جدید را در مقایسه با خصوصیات عضلانی طبیعی امکان پذیر سازد.

از سال ۲۰۱۴، قدرتمندترین الیاف ماهیچه های مصنوعی موجود می‌توانند باعث افزایش صد برابر قدرت در طول معادل با فیبرهای عضلانی طبیعی شوند. محققان، سرعت، چگالی انرژی، قدرت و کارایی عضلات مصنوعی را اندازه‌گیری می کنند. هیچ نوع ماهیچه‌ای مصنوعی وجود ندارد که در همه این زمینه ها بهترین باشد.

[1] - Artificial Muscles

۳- مزیت‌های و محدودیت‌های ماهیچه‌های مصنوعی

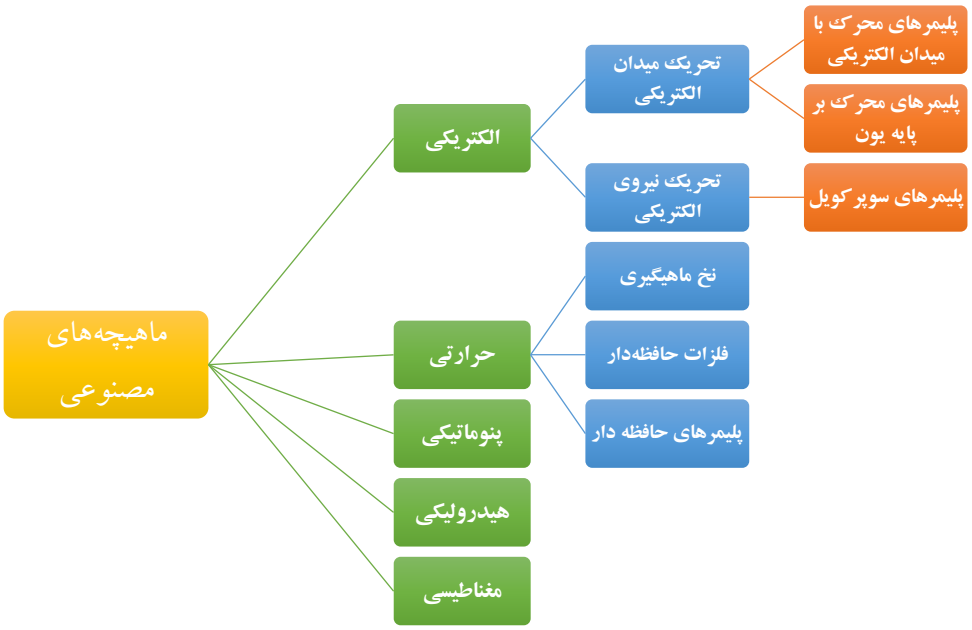
ماهیچه‌های مصنوعی نسبت به عملگرهای سنتی مرسوم مزیت‌های فراوانی دارند مانند: نسبت بالای توان و قدرت به وزن، انطباق ذاتی، عدم نیاز به اتصالات پیچیده، قابلیت انجام متوالی حرکات بدون افت در عملکرد، صدای کم و.... این مزیت‌ها باعث می‌شود تا بهره جستن از آنها در بازوهای رباتیک، ربات های زیست تقلید پذیر، پروتز رباتیک و اسکلت خارجی، ربات‌های نرم و بسیاری از کاربردهای مختلف مقرون به صرفه باشد، اگر چه تا به حال هیچ مقاله مشخصی به جزئیات استفاده از این نوع ماهیچه‌ها نپرداخته است و تنها به کاربردهایی که این ماهیچه‌ها در زمینه رباتیک، فضانوردی، گجت‌های پوشیدنی و ... می‌تواند داشته باشد اشاره شده است.

همانطور که گفته شد پارامترهای مختلفی برای سنجش عملکرد یک ماهیچه‌مصنوعی تعریف شده که در حال حاضر ماهیچه مصنوعی که در تمام این پارامترها عملکرد خوبی داشته باشد وجود ندارد. برخی از این محدودیت‌ها شامل طولانی بودن زمان پاسخگویی، عدم امکان بازخوردگیری از وضعیت عملگر، نسبت تغییر طول نامناسب، انرژی مورد نیاز بالا، محدودیت در نوع حرکت و... می‌باشد که با توجه به نوع ماهیچه ممکن است یک تا چند محدودیت را دارا باشد. با این حال پروژه‌های تحقیقاتی زیادی در این زمینه و در راستای بهینه‌سازی به منظور استفاده از این نوع ماهیچه‌ها توسط پژوهشگاه‌ها و نهادهای دانشگاهی تعریف شده است که این نشان از توسعه این نوع ماهیچه‌ها و کاربردی شدن آن در آینده دارد.

در حال حاضر برخی از دانشگاه‌های مطرح در دنیا مانند کلورادو، ام آی تی، کالیفرنیا، دانشگاه فنی دانمارک، مؤسسه فناوری توکیو، دانشگاه ملی سنگاپور، مؤسسه پلی‌تکنیک فدرال لوزان، بریستول انگلستان،... و مجموعه‌های بزرگی مانند ناسا در حال کار به منظور توسعه این نوع ماهیچه‌های مصنوعی هستند.

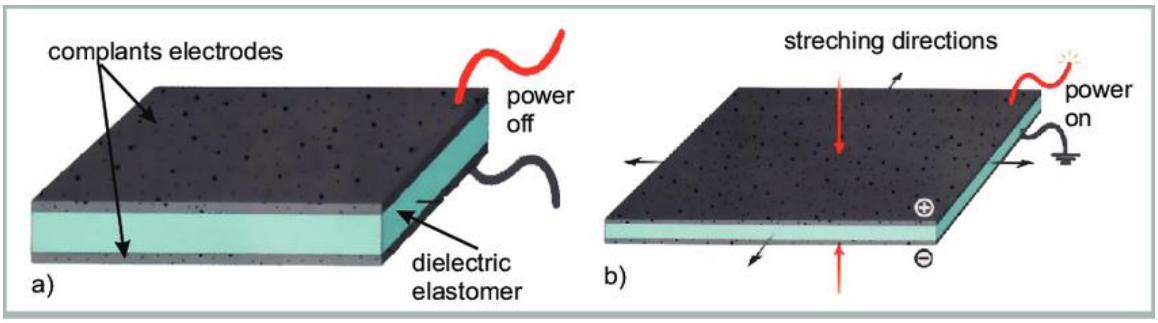
٤- تقسیم بندی ماهیچه‌های مصنوعی

ماهیچه‌های مصنوعی را با توجه به مکانیزم تحریک می‌توان به چند گروه اصلی تقسیم نمود:



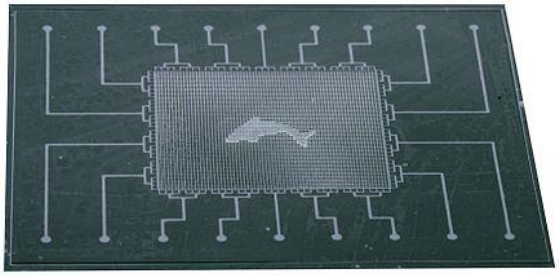
٤-١- تحریک میدان الکتریکی[١]

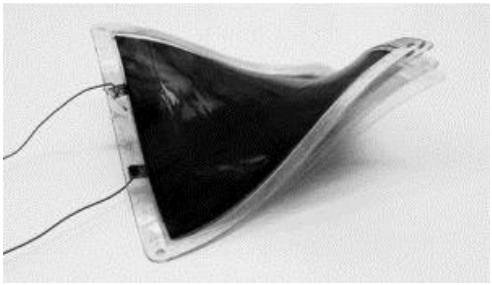
پلیمرهای الکترواکتیو[٢] (EAPs) پلیمرهایی هستند که با استفاده از میدان‌های الکتریکی فعال می‌شوند. در حال حاضر اصلی‌ترین EAP ها شامل *پلیمرهای پیزوالکتریک*[٣]، *محرک‌های دی‌الکتریک*[٤] (DEAs)، *الاسترومرهای پیوند الکتریکی*[٥]، *الاستومرهای کریستال مایع*[٦] (LCE) و *پلیمرهای فروالکتریک*[٧] می باشند.



[١] - Electric Field Actuation
[٢] - Electroactive Polymers
[٣] - Piezoelectric Polymers
[٤] - Dielectric Actuators
[٥] - Electrostrictive Graft Elastomers
[٦] - Liquid Crystal Elastomers
[٧] - Ferroelectric Polymers

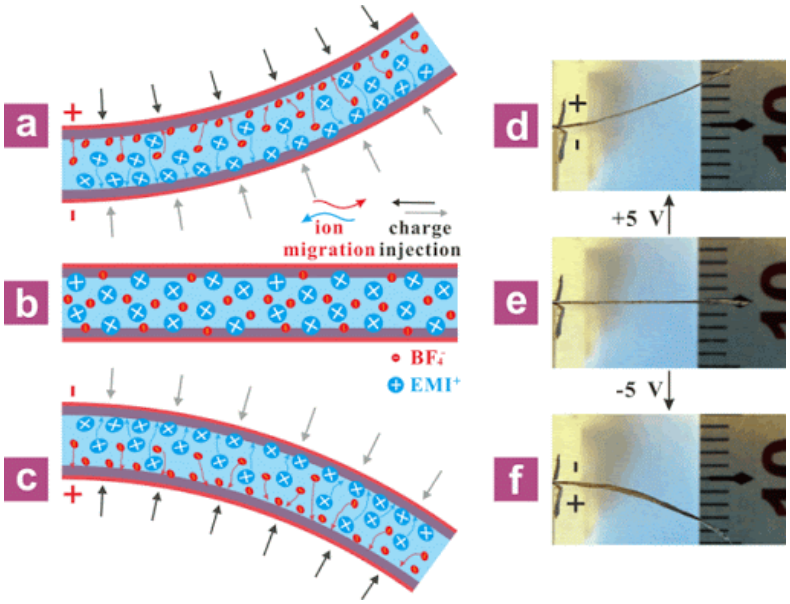
در حالی که این پلیمرهای الکترواکتیو میتوانند برای خم شدن استفاده شوند، اما دارای عملکرد خوبی برای انجام حرکت گشتاور نیستند و همین نقص از سودمندی آن‌ها به عنوان عضلات مصنوعی می‌کاهد. علاوه بر این، بدون یک ماده استاندارد تاییدشده برای ایجاد دستگاه‌های بر پایه پلیمرهای الکترواکتیو، تجاری سازی آن نیز غیرعملی شده است. با این حال، پیشرفت قابل توجهی در فن آوری این نوع پلیمرها از دهه ۱۹۹۰ به دست آمده است.





٤-٢- تحریک بر پایه یون[۱]

پلیمرهای الکترواکتیو تحریک یونی پلیمرهایی هستند که می توانند از طریق انتشار یون‌ها در محلول الکترولیت (علاوه بر کاربرد میدان‌های برقی) فعال شوند. نمونه‌های فعلی پلیمرهای الکتروشیمیایی یونی شامل *ژل‌های پلی‌الکترود*[۲]، *کامپوزیت های فلزی پلیمر یونی*[۳] (IPMC)، *پلیمرهای رسانا*[۴] و *مایعات*

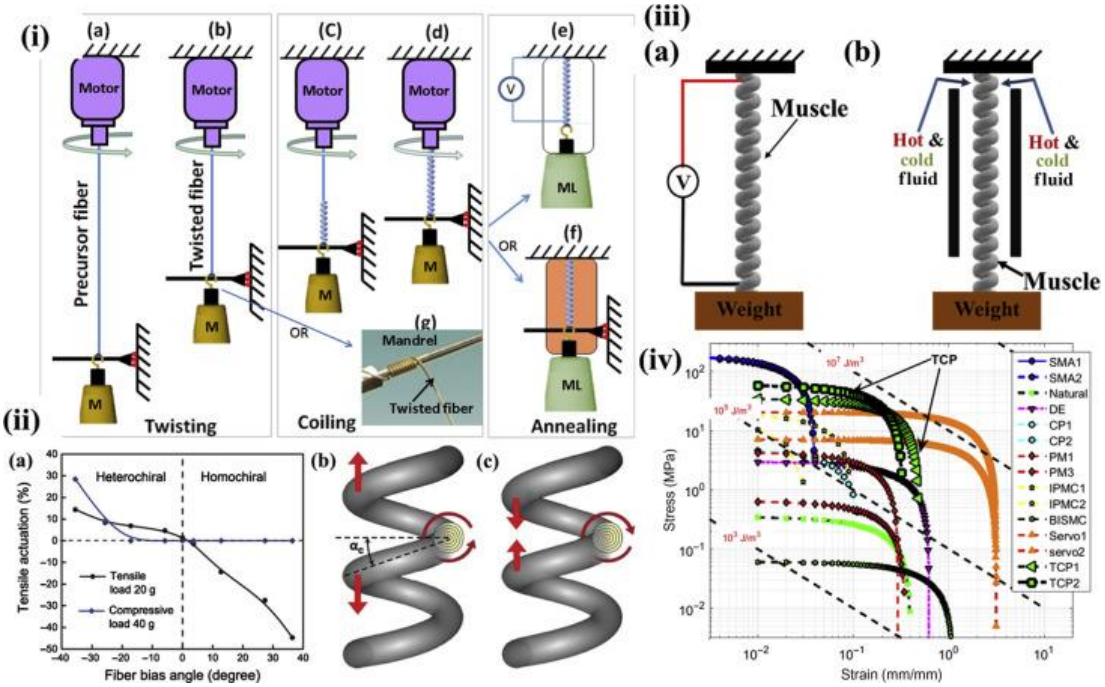


[۱] - Ion-based actuation
[۲] - Polyelectrode gels
[۳] - Ionomeric polymer metallic composites
[٤] - Conductive polymers

الکتروکروولوژیکی[1] (ERF) هستند. در سال ۲۰۱۱، نشان داده شد که نانولوله‌های کربنی پیچ خورده[2] نیز با استفاده از یک میدان الکتریکی قابل فعال شدن هستند.

٤-۳- تحریک با نیروی الکتریکی[3]

ماهیچه های پلیمری پیچ خورده و سیم پیچ[4] (TCP) که به عنوان ***پلیمر سوپرکویل***[5] (SCP) نیز شناخته می‌شوند، پلیمرهای پیچ خورده‌ای هستند که با نیروی الکتریکی فعال می‌شوند. این نوع ماهیچه مصنوعی مانند فنر مارپیچ به نظر می رسد.این ماهیچه های معمولاً از ***نایلون با روکش نقره*** ساخته می شوند همچنین نوع پوشش دهی آن نیز می‌توان از مواد رسانای دیگر مانند طلا نیز باشد. این ماهیچه های مصنوعی باید تحت فشار قرار گیرند تا منبسط شوند. انرژی الکتریکی به دلیل مقاومت الکتریکی تبدیل به انرژی حرارتی می‌شود، که همچنین به گرمای ژول، گرمای اهمی و گرمایش مقاومت نیز معروف است. با افزایش دمای این ماهیچه، بر اثر انقباض، پلیمر و عضله نیز منقبض می‌شود.



[1] - Electrorheological fluids
[2] - Twisted carbon nanotubes
[3] - Electric power actuation
[4] - Twisted and coiled polymer
[5] - Supercoiled Polymer

٤-٤- تحریک پنوماتیکی

ماهیچه های مصنوعی پنوماتیک[1] (PAM) با پر کردن محفظه پنوماتیک با هوای تحت فشار کار می‌کنند. پس از اعمال فشار گاز به محفظه، افزایش حجم ایزوتروپیک اتفاق می افتد، اما این انقباض توسط سیم‌های بافته در اطراف محفظه محدود شده و گسترش حجم را به یک انقباض خطی در امتداد محور محرک تبدیل می‌کند. این ماهیچه‌ها را می‌توان بر اساس عملکرد و طراحی آن‌ها طبقه بندی نمود: هیدرولیکی یا پنوماتیکی؛ فشار بالا یا فشار پایین؛ غشا جداسازی شده یا بافته/توری؛ غشاء کششی یا rearranging membranes

امروزه از جمله رایج ترین این عضله‌ها، عضله ای استوانه ای بافته است که به نام **عضله مک کیبن** معروف است و اولین بار توسط J. L. McKibben در دهه ۵۰ ساخته شد.

البته این نوع ماهیچه‌ها نسبت به سایر ماهیچه‌های ذکر شده دارای قدمت بیشتری بوده و کاربردهای مختلفی به خصوص در برخی دستگاه‌های صنعتی دارد.

[1] - Pneumatic Artificial Muscles

٤-٥- تحریک حرارتی[1]

نخ ماهیگیری[2]

ماهیچه‌های مصنوعی ساخته شده از نخ ماهیگیری معمولی و نخ خیاطی می توانند ۱۰۰ برابر، وزن بیشتری بلند کنند و ۱۰۰ برابر بیشتر از عضله انسانی با همان طول و وزن، توان تولید کنند. ماهیچه های مصنوعی مبتنی بر نخ ماهیگیری در حال حاضر قیمت ارزانتری (در هر پوند) نسبت به آلیاژ حافظه شکل یا نخ نانولوله کربن دارند. اما در حال حاضر این نوع ماهیچه‌ها راندمان نسبتاً ضعیفی دارند.

الیاف پلیمری، مانند نخ ماهیگیری پلی اتیلن یا نخ خیاطی نایلون، برخلاف اکثر مواد، هنگام گرم شدن به ازای هر ۲۵۰ درجه کلوین در حدود ۴٪ کوتاه می شود. با پیچاندن این فیبر و پیچاندن فیبر پیچ خورده به سیم پیچ، گرم شدن باعث می شود تا طول کویل تا ۴۹٪ کاهش یابد. محققان راه دیگری برای افزایش طول کویل پیدا کردند به طوری که گرم کردن باعث می شود که سیم پیچ ۶۹ ٪ تغییر طول داشته باشد.

یکی از کاربردهای ماهیچه‌های مصنوعی، باز کردن و بسته شدن پنجره ها به طور خودکار از طریق تغییرات دما و بدون استفاده از نیروی الکتریکی است.

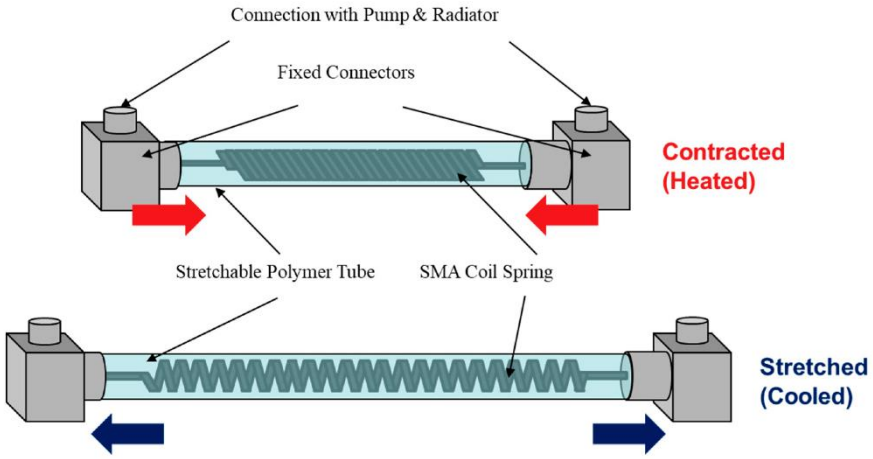
ماهیچه های مصنوعی نازک که از نانولوله های کربنی پیچ خورده پر از پارافین تشکیل شده اند، ۲۰۰ برابر از ماهیچه‌های انسان قوی‌تر هستند.

[1] - Thermal Actuation
[2] - Fishing Line

آلیاژهای فلزی حافظه‌دار[1]

آلیاژهای فلزی حافظه دار (SMA) الاستومرهای کریستالی مایع و آلیاژهای فلزی هستند که می توانند تغییر شکل داده و سپس در معرض گرما به شکل اصلی خود برگردند. این آلیاژها می‌توانند به عنوان عضلات مصنوعی عمل کنند.

عضلات مصنوعی مبتنی بر محرک حرارتی دارای ویژگی‌هایی نظیر مقاومت در برابر گرما، مقاومت در برابر ضربه، چگالی کم، استحکام خستگی بالا و قابلیت تولید نیروی زیاد به هنگام تغییر شکل هستند. از آلیاژهای مهم حافظه‌دار می‌توان به نیکل-تیتانیوم (Ni-Ti)، مس-روی-آلومینیوم و مس-آلومینیوم-نیکل اشاره کرد. معروف ترین و پر کاربردترین آلیاژ حافظه‌دار، آلیاژ نیکل-تیتانیوم است که با نام تجاری نایتینول[2] شناخته می‌شود.



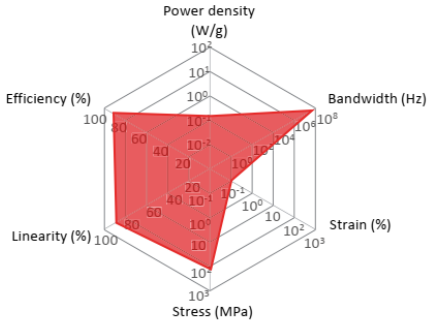
[1] - Shape-Memory Alloys
[2] - NITINOL

۵- مقایسه ویژگی‌های ماهیچه‌های مصنوعی

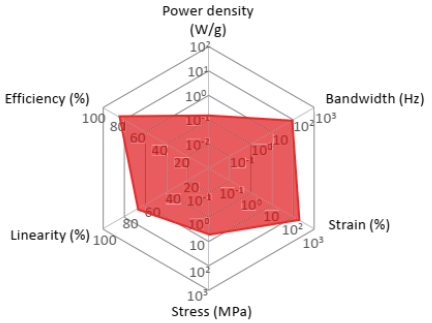
در حال حاضر تعداد زیادی ماهیچه مصنوعی وجود دارد که هر کدام دارای ویژگی‌های خاص و مزایا و معایب متفاوتی است اما به طور کلی چند شاخص برای بررسی و مقایسه این نوع از ماهیچه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل موارد زیر است:

Power Density	• کار خروجی به وجود آمده با توجه به سیستم تحریک و جرم و دوره تحریک
Bandwidth	• حداکثر فرکانس سینوسی قابل ارائه توسط ماهیچه مصنوعی
Strain	• نسبت تغییر طول در هنگام تحریک به طول عادی
Stress	• نیروی داخلی ایجاد شده در ماهیچه مصنوعی بر اثر تحریک و نیروی خارجی اعمال شده
Linearity	• دقت یک مدل برای توصیف یا پیش بینی وضعیت ماهیچه مصنوعی
Energy Efficiency	• نسبت توان خروجی ماهیچه مصنوعی نسبت به توان ورودی است.

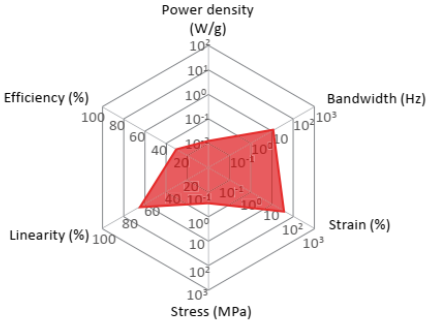
تصویر مربوط به مقایسه انواع ماهیچه‌های مصنوعی با مکانیزم تحریک الکتریکی و حرارتی



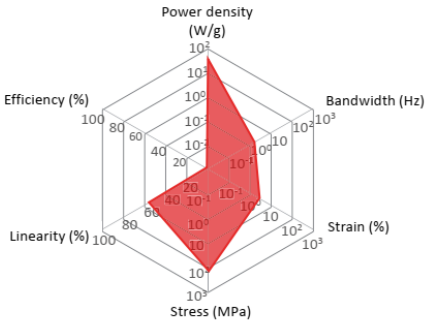
(a) Piezoelectric



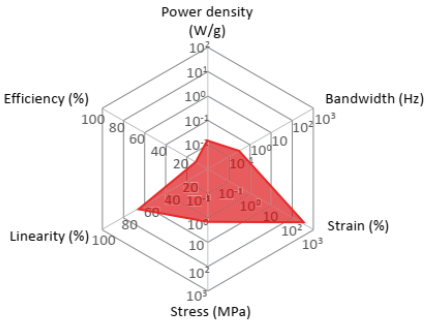
(b) Dielectric elastomer actuator (DEA)



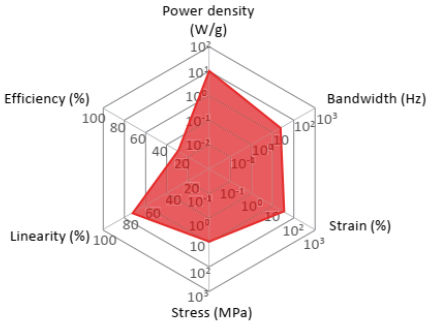
(c) Ionic polymer-metal composite (IPMC)



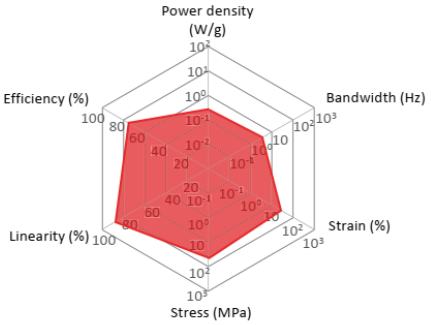
(d) Shape memory alloy (SMA)



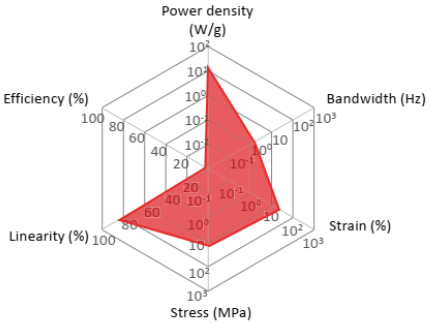
(e) Shape memory polymer (SMP)



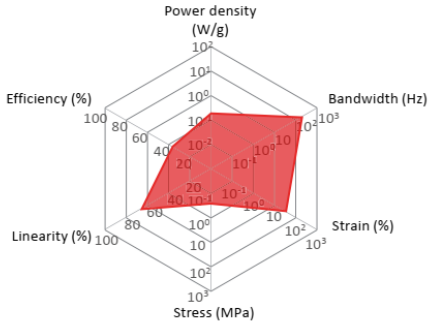
(f) Soft fluidic actuator



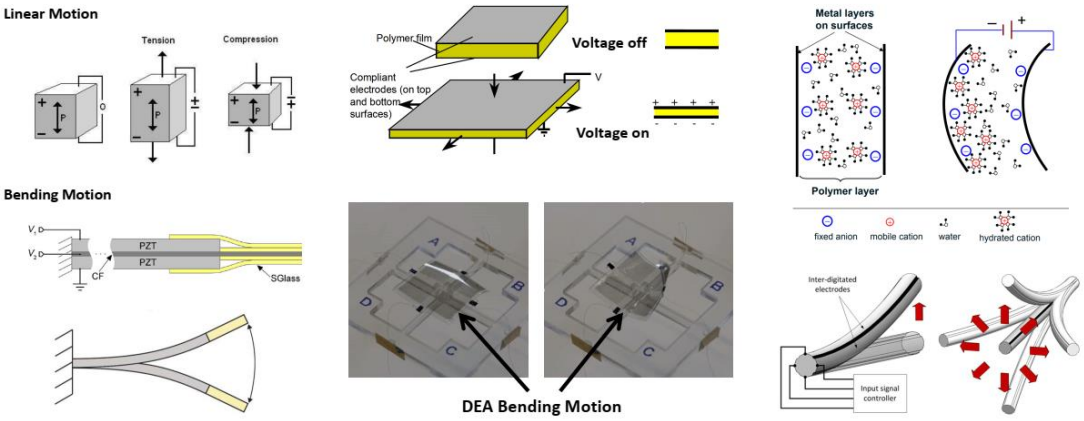
(g) Twisted string actuator (TSA)



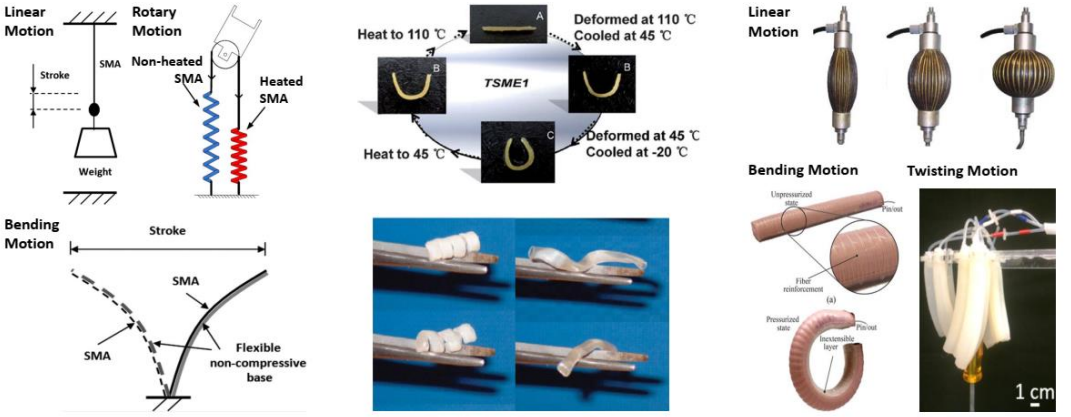
(h) Super-coiled polymer (SCP)



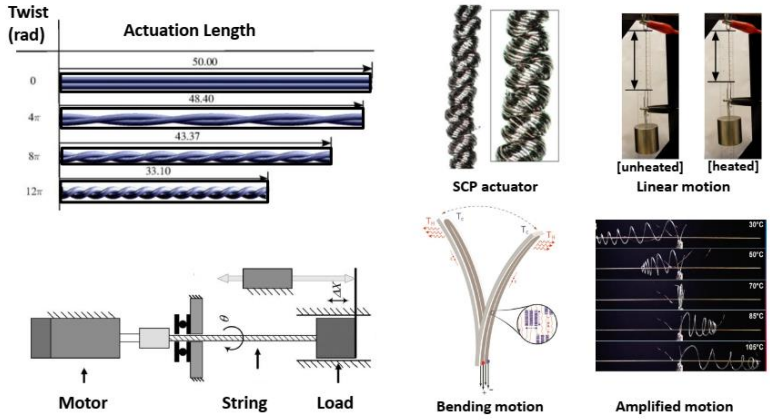
(i) Skeletal muscle



(a) Piezoelectric actuator (b) DEA (c) IPMC actuator



(d) SMA actuator (e) SMP actuator (f) Soft fluidic actuator



(g) TSA (h) SCP actuator

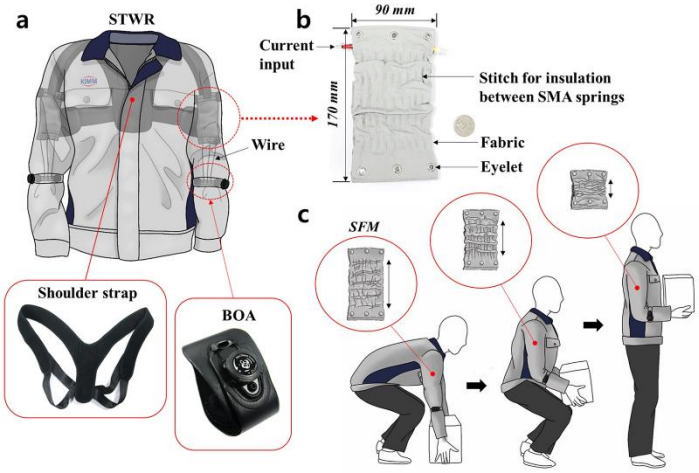
(a)عملگرهای پیزوالکتریک می‌توانند در میدان الکتریکی بر اثر خاصیت پیزوالکتریک ایجاد حرکت کنند.(b) عملگرهای دی الکتریک بر اثر اختلاف پتانسیل بین دو الکترود کاهش ضخامت می‌دهند. (c) عملگرهای IMPC به دلیل نیروی تورم ناشی از سیال و نیروی الکترواستاتیک، حرکات خمشی را در زیر یک میدان الکتریکی تولید می کند.(d) محرک آلیاژهای فلزی حافظه‌دار می‌توانند در اثر تغییرات دما به دلیل انتقال فاز باعث انقباض و کشیدگی شوند.همچنین حرکات خمشی و چرخشی نیز در آن‌ها قابل تحقق است. (e) محرک آلیاژهای پلیمری حافظه‌دار به دلیل دارا بودن حافظه شکلی می‌تواند دچار تغییر شکل و برگشت به حالت اول شود و حرکات پیچشی، خمشی و ... ایجاد کند. (f) عملگرهای نرم سیال می‌توانند حرکات خطی را در محیط‌های مختلف فشار ایجاد کنند که در آن حرکات خمشی و پیچشی نیز قابل دستیابی است. (g) TSA با تبدیل حرکت چرخشی به نیروی کششی خطی، حرکات خطی تولید می‌کند. (h) محرک‌های SCP که از الیاف یا رشته‌های پلیمری پیچیده شده تشکیل می‌شوند به دلیل خاصیت انبساط حرارتی و ساختار هندسی خود می‌توانند حرکات خطی، خمشی و چرخشی ایجاد کنند.

٦- چشم‌انداز و کاربردهای توسعه ماهیچه‌های مصنوعی

در حال حاضر موسسات تحقیقاتی و دانشگاهی در حال کار بر روی ایجاد انواع جدیدی از این نوع ماهیچه ها با مشخصات عملکردی بهتر هستند که در صورت موفقیت در توسعه این نوع ماهیچه‌های مصنوعی، انتظار می‌رود تحولی اساسی در زمینه ساختارهای مبتنی بر عملگرهای سنتی مانند موتورها و ... صورت گیرد. گونه های مختلف این نوع ماهیچه در صورت توسعه می‌تواند در صنایع مختلف مانند هوافضا، صنعت خودرو، پزشکی، رباتیک، مکانیسم‌های مفصل سازی، سرگرمی، انیمیشن، اسباب بازی، پوشاک، رابط های لمسی، سازه‌های هوشمند، صنایع نظامی و ... مورد استفاده قرار گیرد. در حال حاضر طرح‌های اولیه‌ای برای محصولات دارای این نوع ماهیچه‌ها ایجاد شده اما با توجه به محدودیت‌های موجود هنوز محصول کاملا تجاری سازی شده در این حوزه وجود ندارد. برخی از طرح‌ها اولیه موجود در ادامه ذکر شده است:

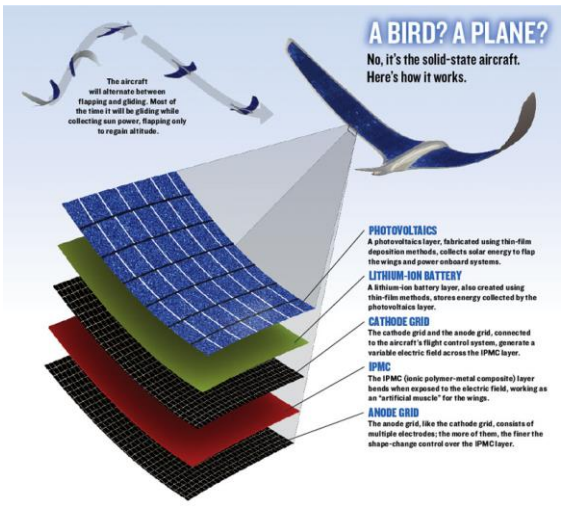
٦-١- گجت‌های پوشیدنی توانبخشی

این گجت‌های پوشیدنی با استفاده از ماهیچه‌های مصنوعی قادرند تا به کمک عضلات طبیعی آمده و بلند کردن اجسام سنگین را تسهیل کنند. همچنین می‌توانند در دستگاه‌های توانبخشی، لباس‌های نظامی، فضانوردی و ... مورد استفاده قرار گیرند.



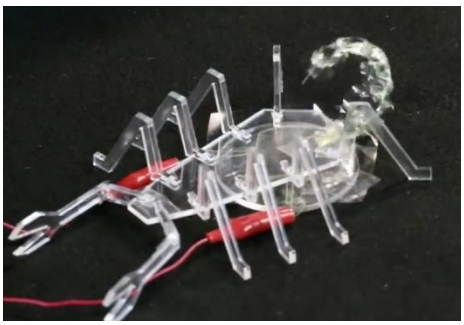
۲-٦- سیستم‌های پروازی

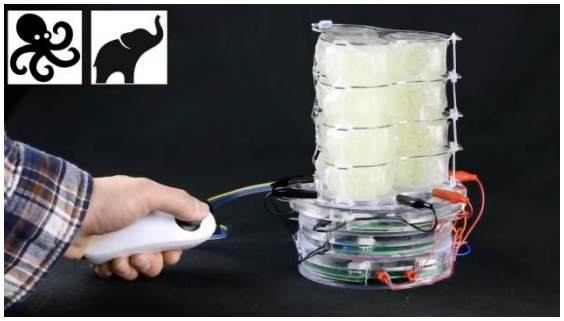
این نوع ماهیچه‌ها با توجه به وزن سبک و امکان انقباض و انبساط سریع و بدون افت در عملکرد می‌تواند در برخی سامانه‌های پروازی خاص مورد استفاده قرار گیرد.

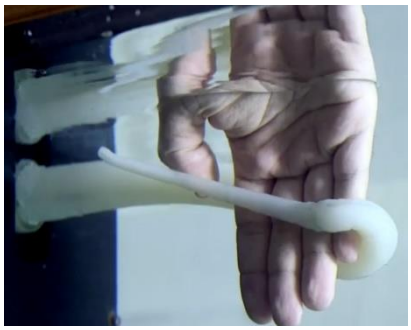


۳-٦- انواع ربات‌های زیست تقلیدپذیر

شباهت‌هایی که در نحوه عملکرد این ماهیچه‌ها مصنوعی با ماهیچه‌های طبیعی وجود دارد باعث شده که بتواند در طیف وسیعی از ربات‌های زیست تقلید پذیر قابل استفاده باشد و نسبت به گونه‌های سنتی عملکرد بهتری داشته باشد.







۷- منابع

۱- Robotic Artificial Muscles: Current Progress and Future Perspectives ؛Jun Zhang, Jun Sheng, Ciaran T. O’Neill, Conor J. Walsh, Robert J. Wood, Jee-Hwan Ryu, Jaydev P. Desai, and ´Michael C. Yip

۲- https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_muscle#cite_note-۱۵

۳- https://www.youtube.com/watch?v=Ssfr_HCcz-۰

٤- ADVANCED MATERIAL; Artificial Muscles: Mechanisms, Applications, and Challenges ; Seyed M. Mirvakili Ian W. Hunter; Volume ۳۰,Issue ٦

٥- Suit-type Wearable Robot Powered by Shape-memory-alloy-based Fabric Muscle ; Seong Jun Park & Cheol Hoon Park ; Scientific Reports volume ۹, Article number: ۹۱٥۷ (۲۰۱۹)

٦- https://hackmd.io/s/By-H-EzAx#Types-of-artificial-muscles