

مروری بر رباتیک نرم مبتنی بر پلیمر و الاستومر، از مواد تا عملگرها، حرکت و ناوبری

علی اسمعیلی، محمد حسین خالصی^{*}، محمدرضا دوست محمدیان
سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده ...

رباتیک نرم با بهره‌گیری از مواد پلیمری و الاستومری، بدنه‌های پیوسته و انعطاف‌پذیری ذاتی، الگوی نوینی در خودکار گردانی پدید آورده و سازگاری و ایمنی بی‌نظیری در محیط‌های پیش‌بینی‌ناپذیر عرضه می‌کند. این مرور نظام‌مند، پیشرفت‌های اخیر را از چهار منظر به هم پیوسته واکاوی می‌کند: مواد و عملگرها، الگوهای حرکتی، راهبردهای ناوبری و افق‌های آینده. نخست، عملگرهای نرم مبتنی بر پلیمر و الاستومر، از پنوماتیک‌های الاستومری، الاستومرهای دی‌الکتریک، پلیمرهای فعال الکتریکی یونی، هیدروژل‌های پلیمری زیست‌سازگار و ماتریس‌های پلیمری مغناطیسی، همراه با ساخت افزایشی چندماده‌ای و پلیمرهای برنامه‌پذیر با پاسخ ذاتی، بستر یکپارچه‌سازی حسگری و عملگری را فراهم آورده است. دوم، ربات‌های پلیمری و الاستومری با سازوکارهای الهام‌گرفته از طبیعت، از خزیدن و جهیدن در خشکی با پوسته‌های الکتروهیدرولیکی، تا شنای ماهی‌سان با باله‌های پلیمری، پیش‌رانش جت با محفظه‌های الاستومری و پرواز بال‌زن با بال‌های انعطاف‌پذیر، توانایی حرکت چندحالتی در محیط‌های پیچیده را به نمایش می‌گذارند. سوم، الگوریتم‌های مسیریابی، کنترل پیکربندی و حسگری بلادرنگ شکل، ربات‌های پیوسته پلیمری را به ناوبری خودمختار و دقیق در محیط‌های پرمانع قادر ساخته‌اند. چالش‌های باقی‌مانده شامل تأمین انرژی بی‌سیم، توسعه پلیمرهای چندکاره با استحکام، زیست‌سازگاری و خودترمیمی هم‌زمان، کنترل تطبیقی و استانداردسازی است. همگرایی رباتیک نرم با هوش مصنوعی و مهندسی پلیمر، نویدبخش نسلی از ربات‌هاست که مرز میان ماشین و موجود زنده را محو می‌کنند.

واژه‌های کلیدی:

رباتیک نرم، مواد پلیمری و الاستومری، حرکت چندحالتی، ربات‌های پیوسته، ناوبری خودمختار.

^{*}پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

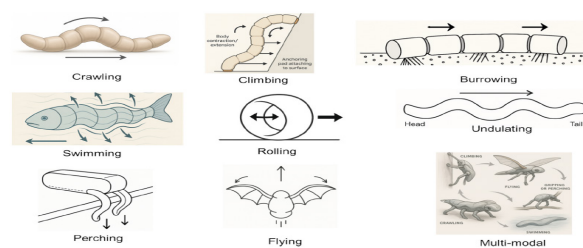
mhkhalesi@semnan.ac.ir

۱ مقدمه

رباتیک نرم به عنوان الگویی تحول آفرین در خودکارگردانی، با بدنه های پیوسته و به شدت کشسان خود، سازگاری و ایمنی بی نظیری برای مانور در محیط های درهم ریخته، ناهموار و پیش بینی ناپذیر فراهم می کند؛ قابلیت هایی همچون خزیدن، بالا رفتن، شناوری و حتی تغییر شکل، این ربات ها را قادر می سازد از موانع عبور کنند و از شکاف های باریک بگذرند، در حالی که ربات های صلب با بدنه خشک و مفاصل ثابت در چنین شرایطی ناکارآمدند [۱].

عملگرهای نرم به عنوان اجزای اصلی تولیدکننده حرکت و نیرو در این ربات ها، با تبدیل انرژی ورودی به حرکت مکانیکی، هسته عملکردی آن ها را شکل می دهند. در میان روش های مختلف تحریک، عملگرهای پنوماتیکی به دلیل دسترسی آسان به هوا و سادگی نسبی سامانه های کنترلی، بیشترین کاربرد را در رباتیک نرم به خود اختصاص داده اند [۲]. در کنار عملگرهای پنوماتیکی، عملگرهای الاستومر دی الکتریک با بهره گیری از تغییر شکل زیاد تحت میدان الکتریکی، پاسخ سریع و چگالی انرژی بالا، به عنوان گزینه ای کارآمد برای تحریک ربات های نرم متحرک مطرح شده اند [۳]. سامانه های نرم با بهره گیری از انعطاف پذیری و سازگاری ذاتی، به ویژه در محیط های زیر آب برای کاوش های اعماق دریا، پایش حیات دریایی و حسگری زیست محیطی بسیار نویدبخش ظاهر شده اند [۴].

با این حال، شکاف میان انعطاف پذیری ذاتی مواد مصنوعی و پیچیدگی سامانه های زیستی، پژوهشگران را به سوی مطالعه عمیق تر ساختارهای عملگری و حسی در جهان زنده سوق داده است. طیف متنوعی از راهبردهای حرکتی که ربات های نرم امروزی به کار می گیرند، در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. مطالعه ساختارهای عملگری و حسی در جهان زنده، به عنوان الگویی برای توسعه نسل جدید ربات های نرم با کارایی بی نظیر عمل کرده است [۵]. در این راستا، بهره گیری از روش های ساخت افزایشی چندماده ای مانند چاپ سه بعدی پردازش نور



شکل ۱. مروری بر راهبردهای حرکتی در رباتیک نرم، شامل خزیدن، شناکردن، بالارفتن، پرواز و حرکت موجی [۱].

دیجیتال، امکان یکپارچه سازی بی درنگ عملگری و حسگری را در پیکره ای واحد فراهم آورده و ربات های نرم را به سامانه هایی خودپایش گر و بی نیاز از حسگرهای بیرونی تبدیل کرده است [۶].

با وجود این پیشرفت ها، چاپ سه بعدی ربات های نرم هنوز با دشواری هایی چون انقباض غیریکنواخت، اتصال چندماده ای و نیاز به راهکارهای کنترلی نوین روبه روست [۷]. برای فایق آمدن بر این چالش ها، در سطح ماده، مواد نرم برنامه پذیر با بهره گیری از انرژی ذخیره شده یا پاسخ ذاتی به محرک های محیطی، می توانند تغییر شکل های برگشت پذیر و خودمختاری از خود نشان دهند که با سازوکارهای زیستی رقابت می کند [۸].

این دستاوردها در سطح ماده، شالوده لازم برای خلق ربات هایی با قابلیت های حرکتی پیچیده را فراهم آورده است. در این مسیر، رباتیک نرم با الهام از موجودات زنده به مدد پیشرفت در مواد محرک، حسگری و فناوری های ساخت، اکنون به بازآفرینی حرکت، پاسخ دهی و سازگاری شگفت انگیز سامانه های زیستی نزدیک شده است [۹]. برای نمونه، ربات نرم دوزیست و بی سیم با ساختاری ساده، با بهره گیری هم زمان از گرمایش القایی برای خزیدن، پشتک زدن و صعود به سطح آب و از نیروی لورنتس برای شنای هدایت شونده، گذار بی وقفه میان محیط های خشکی و آبی را ممکن ساخته است [۱۰]. هم چنین، میلی ربات نرم مغناطیسی که با پاسخ به رطوبت و دمای محیط ریخت خود را میان حالت پاماند برای راه رفتن دواندایی و حالت چرخ برای غلتش تغییر می دهد، ناوبری سازگار در سطوح ناهموار، پله ها و شکاف ها را به نمایش گذاشته است [۱۱]. حتی در سامانه هایی با ساختار صلب نیز بهره گیری از الگوهای حرکتی موجودات نرم تن، مانند سه مد حرکتی الهام گرفته از کرم اینچ با خزیدن سریع، خزش کند در فضاهای تنگ و دست ورزی چنددرجه آزادی امکان بازرسی سازه های پیچیده و عبور از موانع بزرگ را فراهم ساخته است [۱۲]. پیشرفت به سوی ربات های نرم خودمختار، با مفهوم چاپ چهاربعدی حلقه بسته شتاب گرفته است؛ در این رویکرد، حسگرها و عملگرهای چاپ شده به کمک مدل های یادگیری ماشین و کنترل کننده های پویا چنان یکپارچه می شوند که ربات بی نیاز از فرمان بیرونی می تواند در محیط های نامعین واکنش نشان دهد [۱۳]. این پیشرفت ها، طیف گسترده ای از ربات های نرم را با قابلیت های حرکتی و کنترلی متنوع پدید آورده است که بسته به سازوکار تحریک و نوع مواد سازنده برای کاربردهای ویژه عرضه می کنند.

ربات های نرم امروزی، بنابر سازوکار تحریک و نوع مواد سازنده، طیفی گسترده از سامانه ها را تشکیل می دهند که هر

چندگانه، قابلیت تغییر شکل برگشت پذیر را با زیست سازگاری بالا تلفیق کرده، گزینه های ایده آلی برای رباتیک نرم و مهندسی پزشکی به شمار می آیند [۱۹]. در مقیاسی فراگیرتر، ربات های نرم پزشکی با بهره گیری از مواد منعطف هم سان با بافت های زیستی، مسیر تحول را از تشخیص و درمان کم تهاجمی تا توانبخشی و اندام های مصنوعی رباتیکی پیموده اند و ایمنی بیمار را با کاستن از تهاجم و بهبود ناوبری در معابر تنگ آناتومیک ارتقا می بخشند [۲۰]. در مرز میان زیست شناسی و مهندسی، ربات های زیست تلفیقی با ادغام بافت های زنده نظیر سلول های عضلانی و ریزاندامگان ها با اجزای مصنوعی، از بازده انرژی بالا، خودترمیمی و سازگاری ذاتی با محیط بهره می برند و مرز میان ماشین و موجود زنده را بازتعریف می کنند [۲۱]. این تنوع در مواد و شیوه های تحریک، شالوده قابلیت های حرکتی ربات های نرم را شکل می دهد و نحوه تعامل آن ها با محیط های گوناگون را تعیین می کند، موضوعی که در ادامه به تفصیل واکاوی می شود. حرکت در محیط های خشکی برخلاف ربات های صلب که با چرخ یا مفاصل مکانیکی بر زمین مسلط می شوند، ربات های نرم خشکی رو برای جابه جایی ناگزیر از گفت و گویی هوشمندانه با سطح زیرین خود هستند. در رویکردی مدولار، ربات خزنده تماماً نرم با الهام از کرمینه ها، از دو پودمان الکترو هیدرولیکی با پوسته پلیمری انعطاف پذیر و پرشده با مایع دی الکتریک تشکیل شده است. با اعمال ولتاژ، نیروی الکترواستاتیک را به بخش بدون الکتروود می راند و پودمان سر رو به بالا خم می شود. این خمش از طریق قاب بدنه موجی طولی پدید می آورد که با کمک پدهای تماسی با ضریب اصطکاک ناهمسان، سازوکار لنگر متناوب کرمینه را بازآفرینی می کند: هنگام خمش، پد سر با اصطکاک بالا قفل می شود و پد دم را به جلو می کشد و هنگام بازگشت، پد دم مهار شده و پد سر می لغزد. این چرخه با وزنی تنها ۸ گرم، پیشروی پایدار ربات را روی سطوح گوناگون ممکن ساخته است [۲۲].

در مسیری دیگر، یک ربات میلی متری با بهره گیری از چاپ چهاربعدی و پاسخ هم زمان به گرما و میدان مغناطیسی، روی سطوح ناهموار می خزد، می غلتد و با هم افزایی دو سازوکار، از پله های بستر جامد بالا رفته، محموله را به نقطه هدف حمل می کند [۲۳]. این قابلیت های حرکتی در محیط های ناهموار و حتی بسترهای نرم زیستی، مکمل دیدگاه های کلان تری است که از مرور نظام مند طراحی ربات های نرم پادار به دست می آید. در این زمینه، مرورهای جامع طراحی ربات های نرم پادار نشان می دهد که الگوی گام برداری به شدت تابع محیط عملیاتی ربات است. در ربات های خزنده، گام دومهاره با درگیری متناوب

یک مزیت های منحصربه فردی برای کاربردهای ویژه عرضه می کنند. عملگرهای نرم پاسخگو به محرک های محیطی، با الهام از رفتارهای هوشمندانه زیستی همچون بسته شدن برگ گیاه قهقهه و حرکت کرم اینچ، قادرند با دریافت محرک هایی نظیر دما، رطوبت، نور و میدان های الکتریکی یا مغناطیسی، تغییر شکل های برگشت پذیر و قابل برنامه ریزی از خود نشان دهند و به دلیل انعطاف پذیری و سبکی ذاتی، گزینه های ایده آلی برای طیف گسترده ای از کاربردهای رباتیک نرم به شمار می آیند [۱۴]. تنوع محرک ها، مواد پاسخگو و گستره کاربردهای این عملگرها، یک جا در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

در این میان، پلیمرهای فعال الکتریکی یونی با وزن سبک، فعال سازی با ولتاژ پایین و امکان بهره گیری از منابع تجدید پذیر، گزینه هایی پایدار برای توسعه عملگرهای نرم، ماهیچه های مصنوعی و حسگرها به شمار می آیند [۱۵]. هم چنین، الیاف عضله مصنوعی الکتروشیمیایی با بهره گیری از تزریق یون میان رشته و الکترولیت، تغییر شکل برگشت پذیر و کنترل پذیری دقیق را با ولتاژ پایین و اثر گرمایی ناچیز فراهم می کنند و به دلیل ریخت شناسی رشته ای و سازوکار انقباضی، قرابت چشمگیری با ماهیچه های طبیعی دارند [۱۶]. در مسیری موازی، ربات های پیوسته مغناطیسی با بهره گیری از کنترل غیرتماسی میدان، قابلیت های برجسته ای در ناوبری فضاهای تنگ و دست ورزی دقیق مانند هدایت سیم راهنما درون رگی و جراحی کم تهاجمی از خود نشان داده اند [۱۷]. در حوزه پزشکی، ربات های نرم مغناطیسی ساخته شده از ذرات مغناطیسی نشانه در ماتریس های پلیمری منعطف، با بهره گیری از طراحی های ساختاری برگرفته از اورینگامی و کیریگامی، چشم انداز تازه ای در دارورسانی هدفمند، جراحی کم تهاجمی و تشخیص بیماری ها گشوده اند [۱۸]. عملگرهای هیدروژلی زیست الهام نیز با بهره گیری از طراحی های ساختاری ناهمسانگرد و پاسخ دهی به محرک های

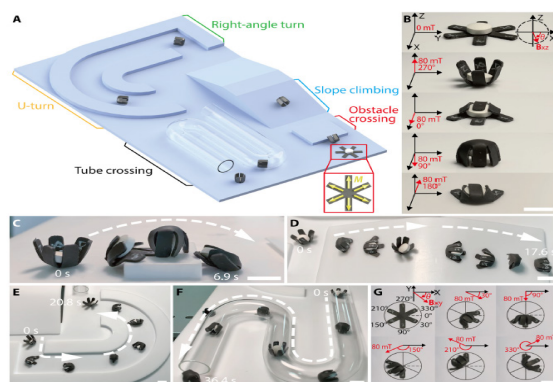


شکل ۲ طرح واره ی کلی از عملگرهای نرم پاسخگو به محرک های محیطی و کاربردهای آن در حوزه های گوناگون [۱۴].

کشسان، اعمال خمش موضعی به ناحیه‌ای از حلقه، با علامتی مخالف انحنا ذاتی آن، مرکز جرم ربات را چنان جابه‌جا می‌کند که وقتی جابه‌جایی از نصف طول تماس با زمین فراتر رود، گشتاور گرانشی پدیدآمده ربات را یک گام به جلو می‌غلطاند. این سازوکار با تغییر شکل کوچک (نرخ تغییر شکل ۰/۰۹) و سرعت متوسط ۱۸۳ میلی‌متر بر ثانیه (۰/۹۴ طول بدنه بر ثانیه)، ربات را قادر می‌سازد از پله‌هایی به بلندی ۱۵ میلی‌متر بالا رود، شیب ۱۲/۴ درجه را بپیماید و از شکافی به پهنای ۱۰۰ میلی‌متر (۰/۵۳ طول بدنه) عبور کند [۲۸]. ربات‌های مغناطیسی نرم با قابلیت بازیکربندی نیز می‌توانند با غلتش بر روی بازوهای خود جابه‌جا شوند؛ برای نمونه، ربات شش‌بازویی که با روش مغناطیسی کردن تک‌مرحله‌ای، گشتاور مغناطیسی شعاعی را در هر بازو ذخیره می‌کند، تحت میدان دوار پشتک می‌زند و پیش می‌رود، در حالی که جسمی را در آغوش گرفته، می‌تواند از پله ۴ میلی‌متری بالا رود، شیب ۱۶ درجه را بپیماید و در لوله شیشه‌ای S شکل ناوبری کند [۲۹]. توانایی این ربات شش‌بازویی در غلتش، حمل هم‌زمان محموله، بالا رفتن از پله و شیب و ناوبری در مسیرهای مارپیچ، در شکل ۳ به‌نمایش درآمده است. بدین ترتیب، ربات‌های نرم خشکی‌رو، از خزندگان مدولار الکتروهایدرولیکی گرفته تا پرشگران پنوماتیکی چشم‌اندازی نویدبخش برای ناوبری مستقل در زمین‌های پیچیده ترسیم کرده‌اند.

حرکت در محیط‌های آبی

ربات‌های مینباتوری زیرآب، به‌واسطه ابعاد کوچک، نوفه کم و چابکی بالا، به‌ابزاری کارآمد برای کاوش‌های دریایی، پایش

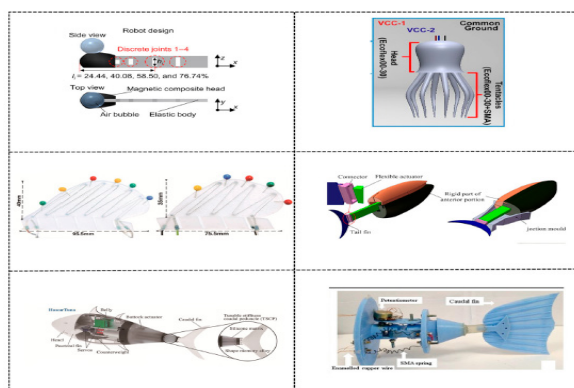


شکل ۳ ربات مغناطیسی نرم شش‌بازویی در حال اجرای مانورهای گوناگون: غلتش و حمل هم‌زمان قرص، بالا رفتن از پله‌ای به بلندی ۴ میلی‌متر، بالا و پایین رفتن از شیب ۱۶ درجه، انجام چرخش‌های تند و عبور از لوله شیشه‌ای S شکل [۲۹].

پاهای جلویی و عقبی و انقباض و انبساط بدنه، کارآمدترین راهکار پیش‌رانش است و بسته به ترتیب تعویض تکیه‌گاه پاها، به دو شیوه پله‌ای و پشتک‌زدن تقسیم می‌شود. در ربات‌های راه‌رونده، تقارن توزیع پاها پایداری ایستایی را افزایش می‌دهد، حال‌آنکه گام قطری در ربات‌های چهارپا سرعت بیشتری با کمترین اتکای هم‌زمان پاها فراهم می‌کند و ربات‌های شش‌پا با گام سه‌پایی متناوب پایدارترند. چالش کلیدی در همه این پیکربندی‌ها ایجاد اصطکاک ناهمسانگرد است که در ساده‌ترین حالت با طراحی پاهای شیب‌دار و در طرح‌های پیشرفته‌تر با پاهای چندماده‌ای و ضرایب اصطکاک متغیر تأمین می‌شود [۲۴]. در افق پیشرفته‌تر، یادگیری تقویتی عمیق نیز به کمک طراحی گام ربات‌های چهارپای نرم آمده است؛ در نمونه‌ای، رباتی با چهار پای پیوسته تاندون-محرك، بدون نیاز به مدل ریاضی صریح، از طریق الگوریتم سافت اکتور-کریٹیک و یادگیری برنامه درسی، گام بهینه خود را فراگرفت و با تصحیح خودکار انحراف مسیر، توانست ابزارهای دستی را تا مقصد حمل کند [۲۵].

افزون بر بهینه‌سازی گام، دسته‌ای دیگر از ربات‌های نرم با بهره‌گیری از ناپایداری کمانش پوسته‌های کروی دوقطبی، جهش را برای عبور از موانع بزرگ برمی‌گزینند. این فراسازه‌های مدولار بادشونده، با موتناژ پودمان‌های Snap متشکل از محفظه بادی و پوسته الاستومری دوپایدار طراحی شده‌اند و با رسیدن فشار به آستانه بحرانی، انرژی کشسان ذخیره‌شده را به‌صورت ناگهانی آزاد می‌کنند. این سازوکار با ورودی فشار واحد، جهش‌های چندمسیره بازگشت‌پذیر و تغییر ریخت میان پیکربندی تخت برای خزیدن و استوانه‌ای برای بالارفتن از کابل را ممکن می‌سازد [۲۶]. در مسیری موازی، پرشگر نرم پنوماتیکی جهت‌دار با بهره‌گیری از کمانش نامتقارن پوسته‌ای نیمه‌باز با شکاف T شکل طراحی شده است؛ در این سازوکار، با افزایش فشار داخلی، پوسته به‌طور نامتقارن دچار وارونگی ناگهانی می‌شود و بخشی از آن پیش از بخش دیگر به زمین برخورد می‌کند، که این برخورد مایل، گشتاوری کوچک ایجاد کرده و ربات را در جهتی مشخص پرتاب می‌کند. با پیش‌تنظیم فشار هوای ورودی، مسیر پرش به دقت قابل کنترل است و ربات می‌تواند بر سکوهایی با فاصله و ارتفاع گوناگون بپرد، از درون بطری عمیق خارج شود و از روی موانعی چون ماسه و سنگ‌فرش عبور کند [۲۷].

سازوکار غلتش در ربات‌های نرم با رویکرد بارگذاری خمش موضعی نیز به‌خوبی تحلیل شده است؛ در رباتی با پیکربندی بیضی‌وار و هشت عملگر پنوماتیک توزیع‌شده روی یک حلقه



شکل ۴ کاربرد ساختارهای سفتی متغیر گرمایی در ربات‌های ماهی‌سان؛ نمونه‌هایی از شناگر نرم موجی لاروماند، ربات هشت‌پای نرم چندماده‌ای، ربات ماهی با باله‌های نرم پشتی و مخرجی، ربات ماهی نرم با مازول‌های عضله مصنوعی، ربات ماهی با ساقه دم تنظیم‌پذیر و ربات ماهی کارانژیفرم مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار [۳۲].

به گیره امکان می‌دهد از روزنه‌ای تنگ وارد محفظه‌ای بسته شود، موانع را دور بزند و شی هدف را گرفته بازیابی کند کاری که بازوی رباتیک به‌تنهایی قادر به انجام آن نیست [۳۳].

در مرز میان شنا و تعامل با بستر، سامانه رباتیکی زیست‌الهام با بهره‌گیری از جت آب برای روان‌سازی موضعی، خود را درون ماسه‌های اشباع زیرآب فرو می‌برد و سپس با یک سازوکار نرم و بی‌سیم مبتنی بر انبساط شعاعی چرخه‌ای همانند صدف تیغی، از دل رسوبات بیرون می‌آید [۳۴].

در مرز نوآوری پیش‌رانش زیرآب، رانشگر جت مصنوعی پیژوالکتریک با ابعاد فشرده $3 \times 3 \times 1/5$ سانتی‌متر و مقاوم به فشار ۲۰ مگاپاسکال معادل عمق ۲۰۰۰ متر، طراحی شده که با بهره‌گیری از تغییر شکل سریع لرزاننده‌ی پیژوالکتریک تحت موج مربعی، در هر چرخه دو بار جت رو به بیرون تولید می‌کند و به بیشینه رانش $16/4$ میلی‌نیوتن و سرعت متوسط $9/4$ سانتی‌متر بر ثانیه دست می‌یابد. این پودمان‌ها که بدون هرگونه سازوکار انتقال یا درزگیر پویا کار می‌کنند، می‌توانند به‌صورت بازپیکربندی‌پذیر به یکدیگر متصل شوند و دو پیکربندی رباتیکی متمایز Driller برای فرو رفتن و نمونه‌برداری چرخشی از بستر و Catcher برای حرکت چابک، گرفتن هدف و بازگشت را شکل دهند و بدین‌ترتیب راهکاری نویدبخش برای مأموریت‌های اکتشافی در فضاها تنگ و اعماق دریا ارائه کنند [۳۵].

بدین‌ترتیب، ربات‌های نرم زیرآب با بهره‌گیری از طیف گسترده‌ای از سازوکارهای پیش‌رانش از نوسان باله‌ها و پیش‌رانش جت گرفته تا خزیدن، نفوذ در بستر و شناوری

محیط‌های آبی و بازرسی فضاها تنگ زیرآب بدل شده‌اند. این ربات‌ها با الهام از جانداران آبی، شش‌الگوی حرکتی اصلی شامل شنای ماهی‌سان، پیش‌رانش جت، پاروزنی، خزیدن زیرآبی، حرکت تازک‌سان و شیوه‌های ترکیبی را به کار می‌گیرند که هر یک متناسب با شرایط محیطی و نیازهای مأموریتی برگزیده می‌شود [۳۰].

در ربات‌های ماهی‌سان، پیش‌رانش عمدتاً به دو شیوه تحقق می‌یابد: نوسان بدن و باله دم که موجی گذرا را در طول بدن به‌سوی دم گسیل می‌دهد و بسته به میزان درگیری بدنه، به زیرگروه‌های مارماهی‌وار، زیرکارانژیفرم، کارانژیفرم و تون‌ماهی‌وار تقسیم می‌شود و نوسان باله‌های میانی و جفتی که در آن باله‌های پشتی، مخرجی و سینه‌ای با حرکات مواج یا نوسانی نیروی رانش تولید می‌کنند و مانورپذیری بالاتری در شتاب‌گیری و چرخش‌های درجا فراهم می‌آورند. در کنار این دو، پیش‌رانش جت با پرتاب ناگهانی آب از محفظه بدن، شتاب‌های لحظه‌ای بالایی ایجاد می‌کند و پاروزنی با زائده‌های انعطاف‌پذیر، حرکت کم‌صدا و سازگار با محیط را ممکن می‌سازد [۳۱].

افزون بر الگوهای حرکتی، تنظیم سفتی بدن نیز عاملی کلیدی در شنای کارآمد به‌شمار می‌رود؛ ماهی‌های طبیعی با تغییر سفتی عضلات خود، ویژگی‌های مکانیکی بدن را با بسامد نوسان و شرایط جریان هم‌آهنگ می‌کنند و ربات‌های ماهی‌سان نیز با بهره‌گیری از ساختارهای سفتی‌متغیر شامل مواد هوشمند، سازوکارهای متخاصم، سامانه‌های سیالی و رویکردهای پیوندی می‌توانند به‌طور بی‌درنگ صلیبت بدنه را تغییر دهند تا بیشینه رانش، بازده پیش‌رانشی و مانورپذیری در طیف گوناگونی از سرعت‌ها و مانورها تأمین شود [۳۲]. نمونه‌هایی از ربات‌های ماهی‌سان از میلی‌شناگرهای لاروماند تا ربات‌های مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار، در شکل ۴ به‌تصویر کشیده شده‌اند.

در مرز میان دست‌ورزی و جابه‌جایی، گیره نرم زیرآبی با شش بازوی مستقل و مکنده‌های توزیع‌شده روی هر بازو، فراتر از نقش مرسوم گیره‌های انتهایی بازوهای رباتیک، قادر است خود به‌تنهایی بخزد و شنا کند. این گیره با الهام از هشت‌پا، سریع‌ترین گام خزیدن خود را با تحریک هر دو بازوی جداشده با بازوی غیرفعال به دست می‌آورد و می‌تواند در شش جهت حرکت کند و مسیرهای مربع، مثلث و ۸ را با چابکی بالا بپیماید. با تحریک هم‌زمان شش بازو، شنای عمودی ممکن می‌شود و با ایجاد اغتشاش نامتقارن حین شنای عمودی، شنای مایل و فرود جهت‌دار نیز به‌دست می‌آید. این قابلیت‌های حرکتی همه‌جانبه، همراه با توانایی گرفتن اجسامی به‌مراتب بزرگ‌تر از ابعاد خود،

مکعبی خود به طور ذاتی قفل می شود، بدین معنا که هیچ نیروی فشاری یا گشتاوری بر صفحه فوقانی نمی تواند آن را تا کند، با عبور تاندون ها از درون صفحات جانبی و بهینه سازی مسیر آن ها برای کاهش اصطکاک، تنها با یک موتور از حالت تخت به مکعب کامل باز می شود. فنرهای پیچشی نصب شده در لولاها، نیروی لازم برای استقرار خودکار را تأمین می کنند و با تنظیم تعداد فنرها یا طول تاندون ها، می توان ترتیب باز شدن پودمان های متوالی یا موازی را برنامه ریزی کرد. نتیجه، بازوی رباتیکی است با نسبت تاشوندگی طولی بالا، حدود ۳/۷، وزن کم و قابلیت تحمل بار فشاری محوری در حالت قفل شده، که چشم انداز روشنی برای کاربرد در مأموریت های فضایی، پناهگاه های تاشو و ربات های بازپیکربندی پذیر ترسیم می کند [۳۷].

گامی فراتر از تغییر شکل صلب، مفهوم هواپیمای برخاست و فرود عمودی نرم (Soft-PVTOL) نشان می دهد که چگونه تغییر شکل پذیری پیوسته می تواند دینامیک پرواز را به طور بنیادین دگرگون کند. در این پیکربندی، پیش ران ها بر بازوهای نرمی سوار شده اند که با مدل انحنای ثابت توصیف می شوند؛ انحنای بازوها به عنوان ورودی کنترلی مجازی عمل کرده، سامانه را کاملاً عملگر می سازد، ویژگی ای که در پرند PVTOL معمولی فرومحرک دست نیافتنی است. این قابلیت به Soft-PVTOL اجازه می دهد تا موقعیت و وضعیت را مستقل از یکدیگر ردیابی کند، از جمله شناور ماندن در زاویه پیچ ۹۰ درجه، در حالی که کنترل کننده مبتنی بر انفعال، پایداری نمایی سراسری خطای ردیابی را تضمین می کند [۳۸].

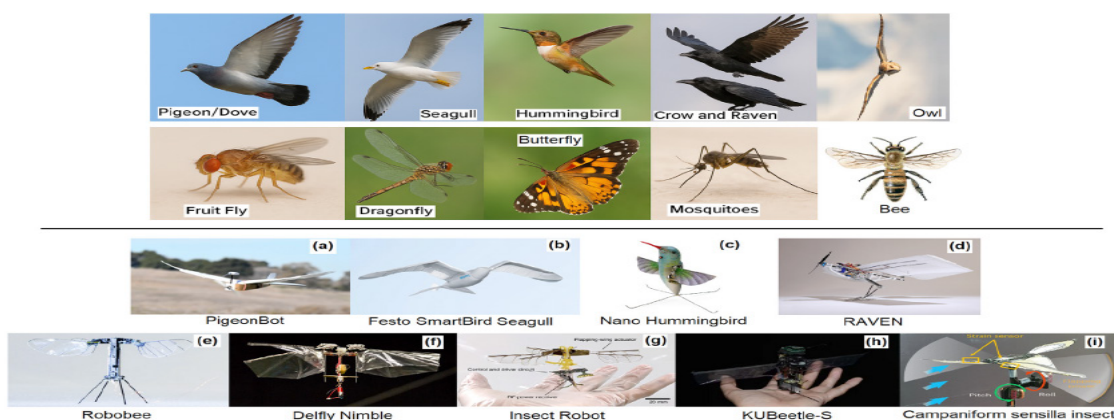
یک ریزپرند بالزن چندحالتی با الهام از سوسک های مهاجر، تلفیق پرواز و جابه جایی زمینی را با یک موتور واحد به پیش می راند. بال های انعطاف پذیر الیاف کربنی با رگ بندی شعاعی،

چندحالتی و با کمک مواد پاسخگو، ساختارهای سفتی متغیر و طراحی های بازپیکربندی پذیر، اکنون قادرند مأموریت های پیچیده اکتشافی و عملیاتی را در محیط های چالش برانگیز آبی به انجام رسانند.

حرکت در هوا و سازوکارهای نشست و قفل شونده

ربات های پرند بالزن در مقیاس میکرو، با الهام از حشرات و مرغ های مگس خوار، از سازوکارهای آیرودینامیکی ناپایا مانند گردابه لبه حمله، بازچرخانی بال و کف زدن و پرتاب برای تولید برآ و پیش رانش در اعداد رینولدز پایین بهره می برند. در این پرند های کوچک، بال های انعطاف پذیر که به طور سازه ای با بسامد تشدید کوک شده اند، بخش عمده ای از انرژی اینرسی را در چرخه بال زدن ذخیره و آزاد می کنند و مصرف انرژی را کاهش می دهند. فراتر از پرواز ایستا و پیش رونده، مانور نشست بر سطوح عمودی یا وارونه یکی از چالش برانگیزترین مهارت ها در این ربات هاست که نیازمند هماهنگی دقیق میان ترمز آیرودینامیکی، بازجهت دهی زاویه پیچ و انطباق بدنه برای چسبیدن یا قفل شدن بر سطح است. حسگرهای کوچک بینایی، جریان نوری و واحدهای اندازه گیری اینرسی، همراه با کنترل کننده های بازتابی سریع، نقش کلیدی در پایداری پرواز و اجرای موفق نشست ایفا می کنند [۳۶]. پیوند میان پروازگران طبیعی و نمونه های مهندسی شده الهام گرفته از آن ها، در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

در حوزه سازه های جمع شونده و قفل شونده، بازوهای رباتیکی تاندون-محرک با الهام از اورینگامی مکعبی، نمونه دیگری از تلفیق هوشمندانه طراحی سازه ای و تحریک ساده هستند. در این طرح، ساختار اورینگامی تخت پذیر و صلب که در پیکربندی



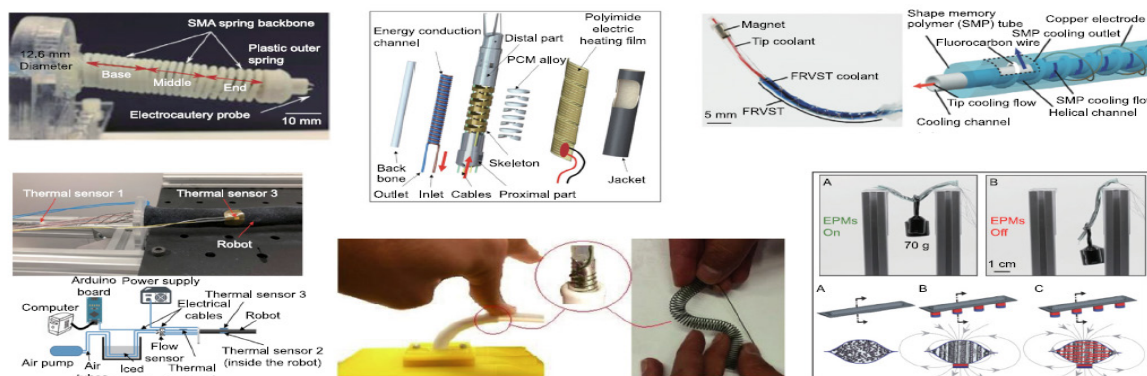
شکل ۵ نمای کلی از پروازگران طبیعی شامل پرندگان و حشرات در نیمه بالایی و نمونه های مهندسی شده ریزپرند های بالزن زیست الهام در نیمه پایینی [۳۶].

پیکربندی ربات‌های پیوسته در محیط‌های پرممانع، به دلیل درجات آزادی بالا و افزونگی ذاتی، همواره با چالش محاسبات سنگین سینماتیک معکوس و نرخ موفقیت پایین در یافتن راه‌حل‌های شدنی روبه‌رو بوده است. در نوآوری الگوریتمی، پژوهشگران با بهره‌گیری از الگوریتم درخت تصادفی سریع‌الکشف (RRT)، مسیر اولیه بدون برخورد را در فضای کاری ربات می‌یابند و سپس آن را با سه منحنی بزیه مرتبه دوم، که هر یک متناظر با قطعه‌ای از ربات سه‌قطعه‌ای است، برازش می‌کنند. در این فرایند، قیده‌های پیوستگی و انحنای یکنواخت با واداشتن برابری بردارهای مماس در نقاط اتصال قطعات و کنترل فاصله میان نقاط کنترل تأمین می‌شود و خطای طولی میان منحنی برازش‌شده و طول واقعی هر قطعه به‌عنوان معیار پذیرش پیکربندی به‌کار می‌رود. این روش، کاملاً بی‌نیاز از محاسبات سینماتیک معکوس است و در آزمون‌های شبیه‌سازی با شش چیدمان مانع مختلف، نرخ موفقیت دستیابی به پیکربندی شدنی را تا ۹۶/۵٪ رسانده است، دست‌کم ۱۴/۸٪ بیش از الگوریتم مرسوم FABRIK، درحالی‌که میانگین زمان محاسبه را بیش از ۵۵ کاهش داده، خطای انتهایی را در نمونه اولیه فیزیکی ربات شیردار نیتینولی به حدود ۰/۶۷ میلی‌متر رسانده است [۴۱].

در چشم‌اندازی فراگیرتر، مرور نظام‌مند راهبردهای ناوبری خودمختار در جراحی‌های درون‌مجرای و درون‌رگی نشان می‌دهد که سطح خودمختاری ناوبری، از هدایت غیرفعال (سطح ۱) تا خودمختاری مشروط با برنامه‌ریزی حرکت بلادرنگ (سطح ۳)، مستقیماً به انتخاب و بلوغ الگوریتم‌های برنامه‌ریزی حرکت وابسته است. الگوریتم‌های گراف‌منا مانند ای‌استار و دیکسترا برای مسیرهای ایستا با انحنای کم مناسبند، اما در محیط‌های دینامیک و بافت‌های تغییرشکل‌پذیر، روش‌های نمونه‌برداری فضایی مانند RRT و نقشه‌راه احتمالاتی،

بازده برآ را تا ۲۲ درصد افزایش می‌دهند و در مد زمینی، میله پیش‌بال تاشو عرض ربات را از ۳۵/۶ به ۱۰/۲ سانتی‌متر کاهش داده، گذر از شیب ۱۰ درجه و سطوح ناهموار را ممکن می‌سازد [۳۹]. فراتر از یک سازوکار منفرد، مرور نظام‌مند روش‌های سفتی متغیر در ربات‌های انعطاف‌پذیر جراحی نشان می‌دهد که این روش‌ها در سه خانواده جای می‌گیرند: تقابل نیروهای داخلی، با افزایش هم‌زمان کشش تاندون‌ها یا فشار بادی برای مقاومت در برابر خمش؛ محدودسازی حرکت نسبی، با جرم‌شدگی دانه‌ای، لیفی یا لایه‌ای، یا با قفل‌کننده‌های مکانیکی که درگیری دندان‌های یا مغناطیسی را فعال می‌کنند و بهره‌گیری از مواد پاسخگو، از جمله آلیاژهای ذوب‌شونده و پلیمرهای حافظه‌دار شکلی که با گرمایش نرم و با سرمایش صلب می‌شوند، یا سیالات رئولوژیک که تحت میدان مغناطیسی یا الکتریکی گرانروی خود را تغییر می‌دهند. هر روش موازنه‌ای متفاوت میان پیوستگی تنظیم، نسبت تغییر سفتی، سرعت پاسخ، حجم اشغالی و پیچیدگی سامانه کمکی ارائه می‌دهد و انتخاب نهایی به نیازهای بالینی، از جمله قطر مجرای آناتومیک، آستانه آسیب گرمایی بافت و ضرورت قفل‌شدگی بدون مصرف انرژی، گره خورده است [۴۰]. نمونه‌هایی از ربات‌های جراحی انعطاف‌پذیر که با بهره‌گیری از مواد پاسخگو، سفتی خود را تغییر می‌دهند، در شکل ۶ نشان داده شده است.

بدین ترتیب، ربات‌های پرنده نرم با بهره‌گیری از سازوکارهای پیشرفته پرواز، طراحی‌های جمع‌شونده و قفل‌شونده و روش‌های سفتی متغیر، اکنون قادرند میان پرواز، نشستن، خزیدن و حتی پیکربندی مجدد جابه‌جا شوند. این قابلیت‌های حرکتی و ساختاری، همراه با الگوریتم‌های پیشرفته مسیریابی و حسگری شکل، موضوعی است که در ادامه به تفصیل واکاوی می‌شود. برنامه‌ریزی مسیر و کنترل پیکربندی در ربات‌های پیوسته کنترل



شکل ۶ ربات‌های جراحی انعطاف‌پذیر با قابلیت تغییر سفتی از طریق مواد پاسخگو؛ از چپ به راست، ربات پیوسته با فنرهای آلیاژ حافظه‌دار، بازوی جراحی با آلیاژ ذوب‌شونده، کاتر مغناطیسی با بدنه ذوب‌شونده، ربات پیوسته با لوله‌های پلیمری و ربات نرم با سیال رئولوژیک مغناطیسی [۴۰].

این پیشرفت‌ها نشان می‌دهند که ربات‌های پیوسته اکنون به بلوغی رسیده‌اند که می‌توانند مسیر خود را در محیط‌های پیچیده بیابند، پیکربندی خود را با قیدهای انحنای تطبیق دهند و شکل واقعی خود را برای تصحیح بی‌درنگ مسیر حس کنند؛ قابلیت‌هایی که تا همین اواخر تنها در داستان‌های علمی-تخیلی یافت می‌شدند.

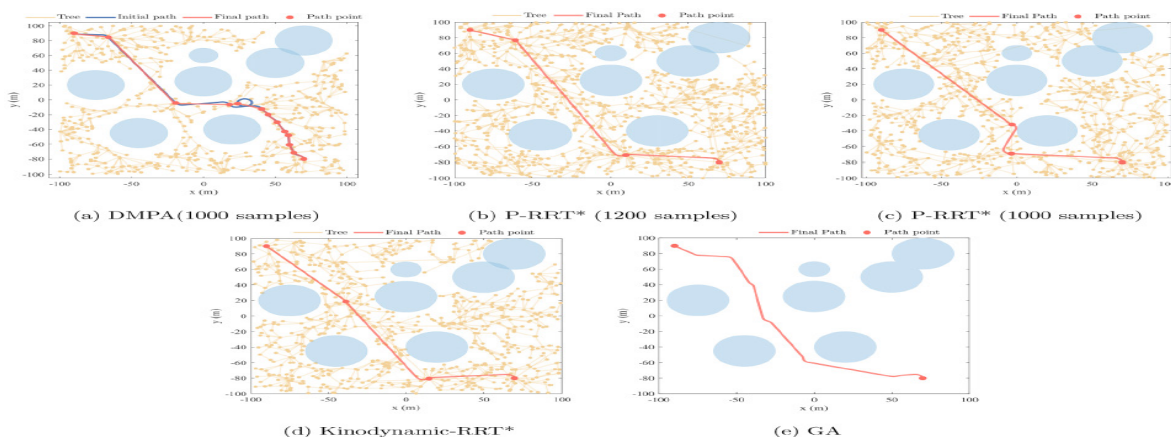
نتیجه‌گیری و افق‌های آینده

مرور نظام‌مند ارائه‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که رباتیک نرم در طول دو دهه اخیر، از ایده نوظهور در حاشیه رباتیک کلاسیک، به یکی از پویاترین و میان‌رشته‌ای‌ترین شاخه‌های پژوهشی تبدیل شده است. در بعد مواد و عملگرها، جامعه پژوهشی اکنون به جعبه‌ابزار غنی از مواد پاسخگو و سازوکارهای تحریک دست یافته است: از عملگرهای پنوماتیکی با نیروی بالا و کنترل ساده گرفته تا الاستومرهای دی‌الکتریک با پاسخ سریع و چگالی انرژی بالا، از پلیمرهای فعال الکتریکی یونی با ولتاژ پایین و زیست‌سازگاری مناسب تا رشته‌های عضله مصنوعی الکتروشیمیایی که با سازوکار انقباضی خود قرابت چشمگیری با ماهیچه‌های طبیعی دارند و از ربات‌های مغناطیسی با قابلیت ناوبری غیرتماسی در فضاهای تنگ تا عملگرهای هیدروژلی زیست‌الهام با قابلیت تغییر شکل برگشت‌پذیر و زیست‌سازگاری بالا. در انتهای این طیف، ربات‌های زیست‌تلفیقی با ادغام بافت‌های زنده و اجزای مصنوعی، مرز میان ماشین و موجود زنده را بازتعریف می‌کنند. این تنوع مواد و شیوه‌های تحریک، شالوده قابلیت‌های حرکتی ربات‌های نرم را شکل داده است. در بعد حرکت و ناوبری، ربات‌های نرم امروزی دیگر به یک یا دو الگوی حرکتی محدود نیستند. در محیط‌های خشکی، آن‌ها

به‌ویژه وقتی با بهینه‌سازی محلی یا یادگیری تقویتی تلفیق شوند، انعطاف‌پذیری بیشتری عرضه می‌کنند [۴۲].

در همین امتداد، برای وسایل نقلیه دابینز، مانند هواپیماهای بدون سرنشین بال‌ثابت و ربات‌های زیرآبی خودمختار، که شعاع گردش کمینه دارند، الگوریتم MDR-RRT* با بهره‌گیری از بزرگ‌سازی شعاع ایمنی، برخوردیابی مسیرهای دابینز را به برخوردیابی پاره‌خط‌های ساده با حاشیه امن تبدیل می‌کند و با راهبرد نمونه‌برداری تطبیقی، زاویه ورود گره‌های میانی را چنان تنظیم می‌کند که از انحنای زائد جلوگیری شود. سپس، الگوریتم CCPOA با بسط نظریه دابینز سه‌نقطه‌ای به مسئله کوتاه‌ترین مسیر مقید به انحنای، زوایای راه‌نقاط را از طریق حل تکراری معادلات مثلثاتی بهینه می‌کند و طول مسیر نهایی را بدون نیاز به برنامه‌ریزی غیرخطی پرحجم به کمینه می‌رساند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این رویکرد تلفیقی، اکتشاف سریع با MDR-RRT* و بهینه‌سازی زاویه با CCPOA، در محیط‌های پرممانع، مسیرهایی هموارتر و کوتاه‌تر از الگوریتم‌های kinody-namic-RRT* و ژنتیک تولید می‌کند [۴۳]. در شکل ۷ مقایسه روند مسیریابی این الگوریتم‌ها در محیط دارای مانع نمایان شده است.

سرانجام، هر راهکار مسیریابی و کنترل پیکربندی، هرچقدر هم دقیق، زمانی در عمل کارآمد خواهد بود که ربات بتواند شکل واقعی خود را در لحظه حس کند. در اینجا است که شبکه حسگری شکل تلفیقی (FSN)، با تصحیح خطاهای ذاتی مدل انحنای ثابت قطعه‌ای با استفاده از داده‌های IMU، حداکثر خطای موقعیت را بر روی نمونه دو متری پنج‌قطعه‌ای به ۱۲/۳۸ میلی‌متر می‌رساند و با زمان استنتاج متوسط ۸/۲ میلی‌ثانیه، بازخورد بلادرنگ را برای حلقه کنترل فراهم می‌کند [۴۴].



شکل ۷ مقایسه کوتاه‌ترین مسیرهای برنامه‌ریزی‌شده توسط DMPA، P-RRT*، Kinodynamic-RRT و الگوریتم ژنتیک در محیط پرممانع [۴۳].



شکل ۸ مروری بر کاربردهای واقعی رباتیک نرم در حوزه‌های گوناگون، شامل پزشکی، کشاورزی و تعاملی [۱].

اما شکاف میان شبیه‌سازی و واقعیت، هزینه بالای گردآوری داده و دشواری تعبیه حسگرهای چندحالتی در بدنه‌های نرم، موانعی هستند که باید برطرف شوند. گستره کاربردهای واقعی ربات‌های نرم در حوزه‌های گوناگون، از پزشکی و کاوش‌های زیرآب گرفته تا کشاورزی و تعامل انسان-ربات، در شکل ۸ به‌نمایش درآمده است.

در افق پیش رو، هم‌گرایی رباتیک نرم با هوش مصنوعی، مواد هوشمند و زیست‌مهندسی، نویدبخش نسلی از ربات‌هاست که نه‌تنها از موجودات زنده الهام می‌گیرند، بلکه می‌توانند با بدن انسان و محیط‌های طبیعی چنان سازگار شوند که مرز میان ماشین و موجود زنده را محو کنند. تحقق این چشم‌انداز به همکاری بین‌رشته‌ای پایدار میان رباتیک، علم مواد، زیست‌شناسی، پزشکی و علوم رایانه گره خورده است؛ هم‌افزایی‌ای که رباتیک نرم را به یکی از تأثیرگذارترین حوزه‌های علمی قرن بیست‌ویکم بدل خواهد کرد.

می‌توانند با بهره‌گیری هوشمندانه از اصطکاک، تغییر شکل بدنه و ناپایداری‌های کشسان، بخزند، راه بروند، بجهند و بغلطند. در محیط‌های آبی، از شنای ماهی‌سان و پیش‌رانش جت گرفته تا خزیدن در بستر و نفوذ در رسوبات، طیف گسترده‌ای از سازوکارهای پیش‌رانش را به‌کار می‌گیرند. در هوا نیز ربات‌های بال‌زن با الهام از حشرات، همراه با طراحی‌های جمع‌شونده و قفل‌شونده و روش‌های سفتی متغیر، قادرند میان پرواز، نشستن، خزیدن و حتی پیکربندی مجدد جابه‌جا شوند. هم‌زمان، پیشرفت‌های چشمگیر در الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر و کنترل پیکربندی مانند روش‌های مبتنی بر RRT که بی‌نیاز از سینماتیک معکوس عمل می‌کنند و الگوریتم‌های بهینه‌ساز مسیرهای مقید به انحنا همراه با حسگری بلادرنگ شکل از طریق شبکه‌های یادگیری عمیق، ربات‌های پیوسته را به بلوغ رسانده است که می‌توانند مسیر خود را در محیط‌های پرمانع بیابند، پیکربندی خود را با قیدهای انحنا تطبیق دهند و شکل واقعی خود را برای تصحیح بی‌درنگ مسیر حس کنند.

با وجود این دستاوردهای خیره‌کننده، رباتیک نرم هنوز در آستانه بلوغ کامل قرار دارد و چالش‌های مهمی پیش روی آن است. تأمین انرژی و توان برای سامانه‌های کاملاً بی‌سیم، به‌ویژه در کاربردهای پزشکی و کاوش‌های زیرآب، همچنان گلوگاه اساسی به‌شمار می‌رود. در حوزه مواد و ساخت، نیاز به توسعه مواد چندکاره‌ای که هم‌زمان استحکام مکانیکی، زیست‌سازگاری، خودترمیمی و پاسخ‌دهی به محرک‌ها را داشته باشند، همراه با روش‌های ساخت افزایشی دقیق‌تر و مقیاس‌پذیرتر، برای عبور از نمونه‌های آزمایشگاهی به محصولات تجاری ضروری است. پیچیدگی دینامیک غیرخطی ربات‌های نرم نیز الگوریتم‌های کنترلی مبتنی بر یادگیری را بیش از پیش ضروری می‌سازد،

مراجع

1. Eyvazian A., Song Y., Hovhannes C., Savari A., Sawaran Singh N.S., State-of-the-Art Soft Robotic Systems for Unstructured and Real-World Environments: A Systematic Review, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 73, 102264, **2025**.
2. Liu J., Cheng Q., Sun T., Liu Z., Xu J., Wang Y., Design, Fabrication, and Measurement of Pneumatic Soft Actuators: A Review, *Sensors and Actuators A: Physical*, 398, 117326, **2025**.
3. Xi S., Yang S., Xiang C., Chen Y., Niu Y., Yang J., He X., Advancements and Challenges in Dielectric Elastomer Actuator-Based Biomimetic Mobile Robots, *Sensors and Actuators A: Physical*, 380, 116024, **2024**.
4. Hasib S.A., Gulzar M.M., Oishy S.R., Maaruf M., Habib S., Shakoor A., An Investigation of Innovative Strategies in Underwater Soft Robotics, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 70, 102123, **2025**.
5. Ren L., Li B., Wei G., Wang K., Song Z., Wei Y., Ren L., Liu Q., Biology and Bioinspiration of Soft Robotics: Actuation, Sensing, and System Integration, *iScience*, 24, 103075, **2021**.
6. Miao Y., Liu X., Yang S., Ma J., Fabrication of Self-Sensing Soft Robots via Multi-Material Digital Light Processing 3D Printing of Hydrogels, *Materials & Design*, 257, 114394, **2025**.
7. Arivendan A., Thangiah W.J.J., Palanisamy S., Palaniappan M., Karuppiyah G., 3D Printing Technologies for Soft Robotics—An Overview, Sustainable Composites for Automotive Engineering, Woodhead Publishing, First Edition, Cambridge, UK, 295-320, **2026**.
8. Hebner T.S., White T.J., Dickey M.D., Hayward R.C., Ware T.H., Programmable Soft Matter: Shaping Function, *Matter*, 9, 102526, **2026**.
9. Chen Z., Chen J., Jung S., Kim H.-Y., Lo Preti M., Laschi C., Ren Z., Sitti M., Full R.J., Yang G.-Z., Bioinspired and Biohybrid Soft Robots: Principles and Emerging Technologies, *Matter*, 8, 102045, 1-56, **2025**.
10. Yang X., Leanza S., Ze Q., Zhao R.R., Electromagnetic-Stimulated Untethered Amphibious Soft Robot with Multimodal Locomotion, *Materials Today*, 87, 11-19, **2025**.
11. Zhong S., Nie R., Zheng Z., Hou Y., Shi Q., Huang Q., Fukuda T., Wang H., Magnetically Controlled Multimodal Motion for Environmentally Adaptive Soft Millirobots with Transformable Wheel-Leg Morphology, *The Innovation*, 7, 101146, 1-11, **2026**.
12. Tang Y., Liu C., Ma X., Zhang L., Wang J., Inchworm-Inspired Climbing Robot for Steel Structures with Three Bionic Operating Modes, *Automation in Construction*, 181(Part C), 106665, **2026**.
13. Zolfagharian A., Kaynak A., Kouzani A., Closed-Loop 4D-Printed Soft Robots, *Materials & Design*, 188, 108411, **2020**.
14. Sun L., Li Z., Zhang Y., Lu Y., Zhang S., Stimuli-Responsive Shape-Morphing Soft Actuators: Metrics, Materials, Mechanism, Design and Applications, *Progress in Materials Science*, 155, 101531, **2025**.
15. Dayyoub T., Zadorozhnyy M., Ladokhin D.G., Askerov E., Filippova K.V., Iudina L.D., Iushina E., Telyshev D.V., Maksimkin A., Ionic Electroactive Polymers as Renewable Materials and Their Actuators: A Review, *Journal of Renewable Materials*, 13, 1267-1292, **2025**.
16. Deng J., Ren M., Dong L., Li W., Di J., Recent Progress and Challenges of Electrochemical Artificial Muscle Fiber, *Materials Today*, 92, 780-800, **2025**.
17. Li P., Chen Y., Lin X., Ye C., Zhang J., Fang D., Liang C., A Survey on Magnetically Driven Continuum Robots for Biomedical Application, *Robotics and Autonomous Systems*, 198, 105316, **2025**.
18. Li B., Xu N., Liu H., Li R., Zhang Y., Zhang Y., Wu R., Lyu Y., Liu X., Magnetic Robotization in Clinic Medicine: A Review, *Magnetic Medicine*, 1, 100037, **2025**.
19. Li C., Pan K., Xu Q., Chen H., Research Progress in Bio-inspired Hydrogel Actuators: From Structural Design to Actuation Mechanisms, Performance Optimization, and Applications, *Materials Today Chemistry*, 48, 102917, **2025**.
20. Fei G., Zhang S., Li Y., Peng M., Tang Z., Gu X., Li X., Zhang K., Xie J., Ni Y., Zhou K., Tu M., Emerging Soft Medical Robots for Clinical Translations from Diagnosis through Therapy to Rehabilitation, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 165, 100990, **2025**.
21. Li Y., Zhang C., Zhang Q., Guo J., Yang L., Liang W., Liu L., Construction and Control of Bio-Syncretic Robots Actuated by Living Materials, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 5, 100263, **2025**.
22. Kim S., Cha Y., A Soft Crawling Robot with a Modular Design Based on Electrohydraulic Actuator, *iScience*, 26, 106726, **2023**.
23. Hu X., Ge Z., Wang X., Jiao N., Tung S., Liu L., Multifunctional Thermo-Magnetically Actuated Hybrid Soft Millirobot Based on 4D Printing, *Composites Part B: Engineering*, 228, 109451, **2022**.
24. Yu Z., Duan A., Zhu Z., Zhang W., Biomimetic Soft-Legged

- Robotic Locomotion, Interactions and Transitions in Terrestrial, Aquatic and Multiple Environments, *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00930, **2024**.
25. Ji Q., Fu S., Tan K., Thorapalli Muralidharan S., Lagrelius K., Danelia D., Andrikopoulos G., Wang X.V., Wang L., Feng L., Synthesizing the Optimal Gait of a Quadruped Robot with Soft Actuators Using Deep Reinforcement Learning, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, 102382, **2022**.
 26. Park J.-S., Ki K., Lee A., Sun J.-Y., Kim H.-Y., Snap Inflatable Modular Metastructures for Multipath, Multimode Morphing Machines, *Cell Reports Physical Science*, 6, 102448, **2025**.
 27. Li M., Zhang H., Fang W., Wu J., Feng X.-Q., Directional Soft Jumper by Harnessing Asymmetric Snapping of a Semi-Open Shell, *Extreme Mechanics Letters*, 72, 102242, **2024**.
 28. Yang P., Gao L., Huang R., Xiong Y., Mao Y., Huang F., Dang F., Rolling Mechanism and Performance of a Soft Robot Driven by Local Curvature Loading, *Robotics and Autonomous Systems*, 195, 105212, **2025**.
 29. Ju Y., Hu R., Xie Y., Yao J., Li X., Lv Y., Han X., Cao Q., Li L., Reconfigurable Magnetic Soft Robots with Multimodal Locomotion, *Nano Energy*, 87, 106169, **2021**.
 30. Wang P., Liu X., Song A., Actuation and Locomotion of Miniature Underwater Robots: A Survey, *Engineering*, 51, 195-214, **2025**.
 31. Koiri M.K., Sharma A.K., Jha A., Kumar J., A Comprehensive Review of Bio-Inspired Swimming in Robotic Fishes, *Sensors and Actuators A: Physical*, 394, 116913, **2025**.
 32. Shao H., Lin C., Yang Z., Deng L., Yang J., He X., Xie F., Variable Stiffness Structures in Biomimetic Robotic Fish: A Review of Mechanisms, Applications, and Challenges, *Biomimetics*, 11, 219, **2026**.
 33. Wu M., Afridi W.H., Wu J., Afridi R.H., Wang K., Zheng X., Wang C., Xie G., Octopus-Inspired Underwater Soft Robotic Gripper with Crawling and Swimming Capabilities, *Research*, 7, 0456, **2024**.
 34. Nayak A., Seo H., Gravish N., Tolley M.T., Burrowing and Unburrowing in Submerged Granular Media through Fluidization and Shape-Change, *Frontiers in Robotics and AI*, 12, 1546407, **2025**.
 35. Li K., Zhang H., Chen Z., Li L., Chen S., Zhang L., Reconfigurable Underwater Robots with Dual-Jet Piezoelectric Synthetic Jet Thruster, *International Journal of Mechanical Sciences*, 300, 110510, **2025**.
 36. Hashim H.A., From Insects to Bio-Inspired Micro Flapping Wing Aerial Vehicles Intelligent Flight: A Review, Design Principles, and Future Prospects, *Defence Technology*, 11, 100114, **2026**.
 37. Liu F., Terakawa T., Liang Z., Komori M., A Self-Locking Tendon-Driven Robotic Arm Inspired by Cubic Origami, *Mechanism and Machine Theory*, 217, 106230, **2025**.
 38. Flores G., Spong M.W., The Soft-PVTOL: Modeling and Control, *Robotics and Autonomous Systems*, 187, 104925, **2025**.
 39. Zhu H., Zhang W., Sun J., Multimodal Bioinspired Flapping-Wing Vehicle (M-BioFMAV): Design and Aerodynamic Optimization for Agricultural Plant Protection in Greenhouses, *Computers and Electronics in Agriculture*, 241, 111261, **2025**.
 40. Lin B., Song S., Wang J., Variable Stiffness Methods of Flexible Robots for Minimally Invasive Surgery: A Review, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 4, 100168, **2024**.
 41. Pan Q., Wang H., Feng Y., Guo S., Luo J., RRT-Based CPC: A Configuration Planning Method for Continuum Robots Using Rapidly-Exploring Random Tree Algorithm, *Robotics and Autonomous Systems*, 195(Part C), 105190, **2025**.
 42. Pan M., Ma C., Wang K., Su Y., Zhang Z., Li M., Liang K., A Systematic Review of Autonomous Navigation Strategies in Robot-Assisted Interventional Surgery, *Applied Soft Computing*, 186(Part B), 114141, **2026**.
 43. Wang J., Bi C., Liu F., Shan J., Dubins-RRT Motion Planning Algorithm Considering Curvature-Constrained Path Optimization, *Expert Systems with Applications*, 296(Part B), 128390, **2026**.
 44. Zhang Y., Zhang J., Jin T., Ma G., Chen L., Li L., IMU-Based Fusion Shape Network for Shape Sensing in Continuum Robot, *Sensors and Actuators A: Physical*, 401, 117630, **2026**.

