

آخرین پیشرفت‌های علمی ربات‌های دو پا برای توان‌بخشی اندام تحتانی

ربات‌های دو پا (Bipedal robots) یکی از جذاب‌ترین انواع ربات‌ها با توجه به شباهت آن‌ها به حرکت انسان و توانایی آن‌ها برای کمک به مردم در هنگام راه رفتن در طی توان‌بخشی هستند. این مقاله خلاصه‌ای از رشد و پیشرفت این ربات‌های دوپایی به تفکیک زمانی و معرفی برخی از ربات‌های دوپای محبوب و متداول روز دنیا است. ربات‌های دو پایی طیف وسیعی از برنامه‌های کاربردی در سرویس، آموزش، سرگرمی و سایر صنایع را دارند. سپس، به‌طور خاص در مورد استفاده کاربردی از ربات‌های دوپا در توان‌بخشی اندام تحتانی، شامل ربات پوشیدنی اگزواسکتون با پوشش محافظ خارجی، تجهیزات توان‌بخشی، ربات‌های نرم و انعطاف‌پذیر، و روش‌های کنترل آن‌ها صحبت می‌کنیم. در نهایت، توسعه آینده و چالش‌های این حوزه مورد بحث قرار می‌گیرد.



Time	Scientist/Institution	Achievement
۱۹۹۳	Honda, Japan	P-۱
۱۹۹۷	Honda, Japan	P-۳
۱۹۹۷	J. E. Pratt and G. A. Pratt, United States	Virtual model control
۱۹۹۹	MIT, United States	COG
۲۰۰۰	Honda, Japan	ASIMO
۲۰۰۰	Sony, Japan	SDR-۳X
۲۰۰۲	Beijing Institute of Technology, China	BHR
۲۰۰۴	South Korea	HUBO
۲۰۰۴	RobotCub Consortium, Italy	iCUB
۲۰۰۵	University of Florida, United States	Rabbit
۲۰۰۵	MIT, America	Domo
۲۰۰۷	Aldebaran Robotics, France	NAO
۲۰۰۸	University of Tehran, Iran	Surena I
۲۰۰۹	Technical University of Munich, German	LOLA
۲۰۰۹	Aldebaran Robotics, France	Romeo
۲۰۱۰	AIST, Japan	HRP-۳C
۲۰۱۲	NRL, United States	SAFFIR
۲۰۱۳	Institute of Robotics and Mechatronics, German	TORO
۲۰۱۳	Boston Dynamics, United States	PETMAN
۲۰۱۵	University of Tehran, Iran	Surena III
۲۰۱۶	Boston Dynamics, United States	Atlas

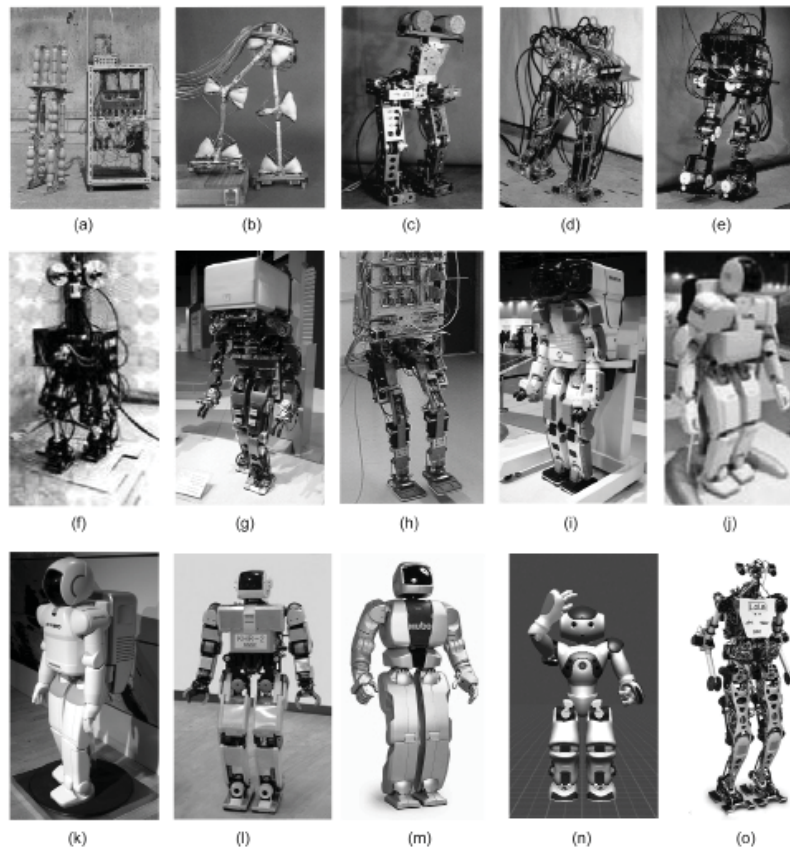
جدول ۱) توسعه اصلی ربات دو پا

Bipedal robots ربات‌هایی با دو پا هستند که تفاوت اصلی بین آن‌ها و سایر ربات‌ها، حرکت دوجانبه آن‌هاست. تحقیق در مورد ربات‌های دوپایی در دهه ۱۹۶۰ آغاز شد. و در سال ۱۹۶۸ اسموشر، که در جنرال موتورز در ایالات متحده مشغول به کار بود، یک ربات حرکتی دوپا با نام Rig را توسعه داد. از سال ۱۹۶۸ تا سال ۱۹۶۹، دانشمند معروف یوگوسلاوی ویوکوبراتویچ، یک نظریه مهم در مورد ربات‌های دو پا، با نام معیارهای پایداری نقطه صفر (ZMP) را پیشنهاد کرد. جریان اصلی و رشد ربات دو پا در طی سالیان در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

پیاپی پیاده‌روی را معرفی کرد و باعث شد تا توانایی پیاده‌روی ربات دو پا دوباره بهبود یابد. در حال حاضر، تحقیق و توسعه بر روی ربات‌های دو پا عمدتاً در ژاپن، ایالات متحده آمریکا، چین، کره جنوبی و فرانسه متمرکز دارد. با این حال، تمرکز پژوهش در هرکدام از این کشورها متفاوت است. طراحی ربات‌های دوپا ژاپنی به سمت شبیه‌سازی حرکت‌های انسانی و ربات‌های دوپا کشورهای اروپایی به سمت خدمات پزشکی متمرکز شده‌اند. آمریکا نیز روی برنامه‌های نظامی تمرکز کرده‌است. ربات *Surena III* آخرین نسل از ربات‌های دوپاست که توسط دانشگاه تهران در سال ۲۰۱۵ راه‌اندازی شده‌است. این ربات می‌تواند درحالی‌که روی یک پا ایستاده است، حرکت کند. در سال ۲۰۱۶، بوستون دینامیک ربات اطلس را به نمایش گذاشت، که برای ارتش ایالات متحده طراحی شده بود. اطلس نه تنها می‌تواند مانند یک انسان با پاهای خود راه برود، بلکه می‌تواند با انواع مختلف حالات در هوای آزاد هماهنگ شود. این ربات دو پا، همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، نشان‌دهنده سطح بالایی از توسعه ربات‌های دو پا است. تئوری حرکات دو طرفه اساساً رشد زیادی کرده، هرچند هنوز هم جا برای بهبود وجود دارد. محققان به ربات دو پا اجازه داده‌اند تا اطلاعات محیط خارجی را شناسایی کند تا بداند که چگونه و کجا باید برود. بنابراین توسعه ربات‌های دوپا افزایش توان بخشی را ترویج خواهد داد و توان بخشی به یکی از کاربردهای مهم این ربات‌ها تبدیل خواهد شد.

الگوریتم هوشمند

معرفی صحیح از یک الگوریتم کنترل هوشمند، قابلیت کاربردی و کارایی الگوریتم را بهبود می‌بخشد. الگوریتم‌های کنترل هوشمند قدیمی، مانند اتصالات،

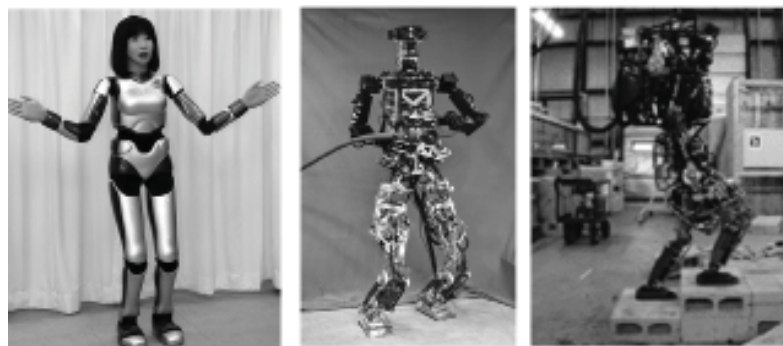


شکل (۱) توسعه تاریخی از ربات دوپا

و *Hitachi* است که در زمینه توسعه ربات دوپایی T تحقیقات نظری قابل توجهی انجام داده‌اند. در مواجهه با تحولات ژاپن، مگیر در سال ۱۹۸۹ تئوری "تابع راه رفتن پایدار" را مطرح کرد. این نظریه سیستم ربات‌های دوپای را بهبود بخشید. سال بعد، ژنگ و همکارانش پیشنهاد استفاده از شبکه‌های عصبی برای دستیابی به راه رفتن پایدار را مطرح کردند و با کمک ربات دوپای سری SD به هدف خود رسیدند. این اولین الگوریتم هوشمند با برنامه‌ریزی راه رفتن بود. در سال ۱۹۹۷، پرات و همکارانش از موسسه فناوری ماساچوست، یک استراتژی کنترل مدل مجازی (VMC) را پیشنهاد دادند. در سال ۲۰۰۵ دانشگاه فلوریدا برای نشان دادن توانایی‌های در حال اجرا در جهان، یک ربات دوپا *Rabbit* با قابلیت

در سال ۱۹۶۸، پروفیسور کاتو ایچیرو از دانشگاه وستا اولین توسعه ربات دو پا در ژاپن را آغاز کرد. از سال ۱۹۶۹ تا ۱۹۸۴، آزمایشگاه کاتو بیش از ۱۰ ربات دو پا را معرفی کرد. سرعت پیاده‌روی ربات از *WL-5* با ۴۵ ثانیه در هر مرحله، به *WL-10RD* با ۱/۳ ثانیه در هر مرحله توسعه یافت. کاتو یکی از پیشگامان تحقیق ربات دو پا، سهم قابل توجهی را به خود اختصاص داده است. از سال ۱۹۸۶، هوندا ۷ ربات سری E، ۳ ربات سری P و یک ربات هوشمند *ASIMO* را راه‌اندازی کرده‌است. تحقیقات هوندا، به ویژه *P-3* و *ASIMO*، توسعه ربات‌های دو پای را به سطح جدیدی رساند. ژاپن دارای بسیاری از مؤسسات تحقیقاتی دیگری نظیر *Matsushita Electric Works*، *Fujitsu*، *Farrah*

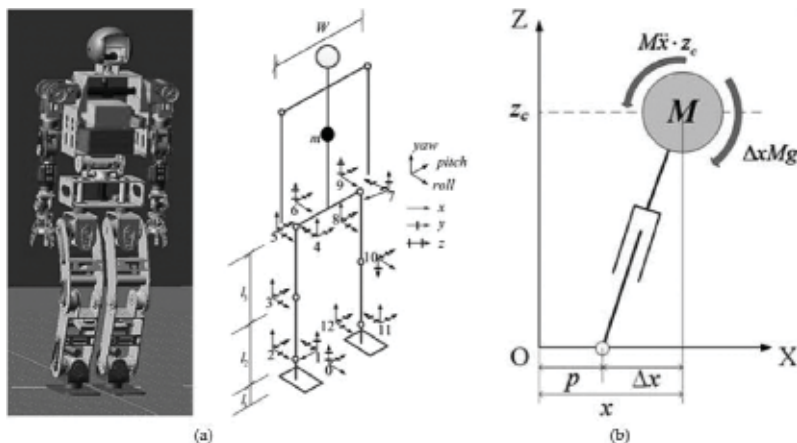
ساده تر می شود. تیم تحقیقاتی هوندا راه رفتن ASIMO را براساس تجزیه و تحلیل محدودیت های متقابل و هماهنگی بین مفاصل اندام های تحتانی انسان تولید کرده است. با این حال امکان سنجش روش، به طور کامل به داده های پیاده روی بستگی دارد. بنابراین به دست آوردن اطلاعات راه رفتن برای ربات چالش برانگیز است.



شکل ۲: (a) HRP-۲C: برای سرگرمی استفاده می شود؛ (b) SAFFIR: مورد استفاده برای آتش نشانی؛ (c) Atlas: راه رفتن اطلس در زمین ناهموار.

۲. برنامه ریزی راه رفتن بر اساس ثبات
مطالعه بر روی حرکات انسان نشان می دهد که هماهنگی بدن پیچیده است. برای دستیابی به یک سرعت ثابت، تعداد زیادی از محققان معیارهای مهمی را برای مدل های مختلف، مانند مرکز معیار فشار (CoP)، شاخص چرخش پا (FRI) و معیار نقطه صفر (ZMP) پیشنهاد کرده اند. در این میان، ASIMO از نظریه ZMP برای راه رفتن بهره برده است.

۳. مدل مبتنی بر برنامه ریزی راه رفتن
مدل مبتنی بر روش برنامه ریزی راه رفتن عمدتاً شامل مدل چند لینک (شکل ۳a) و مدل آونگ معکوس (شکل ۳b) است. برنامه ریزی مدل چند لینک با موفقیت در ربات هوندا اعمال شده است. در این ربات حرکت محوری و افقی اتصالات نادیده گرفته شده و این باعث ایجاد خطایی اجتناب ناپذیر می شود. با این حال، این یکی از روش هایی است که به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۳: (a) مدل مبتنی بر برنامه ریزی راه رفتن (a) مدل چند لینک (b) مدل آونگ معکوس

سال ۲۰۱۳، DLR یک ربات شبیه انسان با کنترل گشتاور (TORO) را معرفی کرد.

برنامه ریزی حرکت

ربات دوقطبی مانند انسان با پاهای متناوب راه می رود. برای رسیدن به یک پیاده روی باثبات، سرعت راه رفتن معقول باید برنامه ریزی شود. کیفیت راه رفتن به طور مستقیم بر ثبات پیاده روی و اندازه گشتاور حرکت تأثیر می گذارد. به طور کلی پنج نوع روش برنامه ریزی راه رفتن وجود دارد.

۱. برنامه ریزی چیدمان بر اساس سینماتیک مصنوعی

هدف از حرکت با دو پا این است که ویژگی های پیاده روی انسان (راه رفتن مصنوعی) را تقلید کنیم. هنگامی که مرجع حرکت انسان است، روش برنامه ریزی

منطق فازی و الگوریتم ژنتیک توانایی خودیادگیری، تطبیق و سازگاری، و قابلیت های تحمل پذیر خطا... به تدریج برای کنترل هر یک از مدل ها معرفی شدند. در ابتدا آن ها با استفاده از یادگیری تحت نظارت شروع به آموزش سه شبکه عصبی CMAC به منظور یادگیری حالات انطباقی کردند و سپس آن ها را برای کنترل تعادل حرکت جلو به عقب، سمت چپ به راست، آونگ، و تغییر حالات مداوم مورد استفاده قرار دادند. علاوه بر این، با توجه به نیازهای کنترل واقعی ربات، ترکیبی از الگوریتم های کنترل هوشمند مانند شبکه عصبی فازی، منطق فازی عصبی و الگوریتم ژنتیک نورو نیز در کنترل ربات های دوبا استفاده می شود.

کنترل گشتاور

این روش بر اساس تعادل نیرو در مفاصل است. به طور کلی، یک سنسور گشتاور در مفاصل ربات نصب می شود. حرکت ربات می تواند با پردازش داده های سنسور به دست آید و محل و اندازه نیروی خارجی را می توان محاسبه کرد. بر این اساس ربات می تواند توانایی توقف با لمس، به دست آوردن آموزش، کنترل امپدانس و دیگر توابع را با استفاده از یک الگوریتم کنترل نیروی معقول به دست آورد. انعطاف پذیری این ربات باعث افزایش ایمنی، و استحکام بیشتر در تماس با محیط زیست می شود. در

۴. برنامه‌ریزی راه رفتن بر اساس بهینه‌سازی مصرف انرژی

انسان‌ها با کمترین مصرف انرژی راه می‌روند و در حالت تعادل باقی می‌مانند. بنابراین، برنامه‌ریزی برای راه رفتن با استفاده از روش بهینه‌سازی انرژی می‌تواند راه رفتن را شبیه انسان کند. ویوکوبراتویچ برای اولین بار گشتاور موردنیاز برای دستیابی به حرکت مشترک از نقطه نظر انرژی را تجزیه و تحلیل کرد. کاپی مسیر راه رفتن ربات Bonten-Maru را برای هدف بهینه‌سازی با کم‌ترین انرژی و حداقل تغییرات در گشتاور مشترک تولید کرد. روش بهینه‌سازی انرژی می‌تواند به طور کامل عملکرد ربات‌های دوپایی را توسعه و الزامات سیستم را کاهش دهد. با این حال، محاسبه برنامه‌ریزی بهینه پیچیده است و نمی‌تواند در زمان واقعی اجرا شود.

۵. برنامه‌ریزی راه رفتن بر اساس الگوریتم هوشمند

تکنیک‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی، منطق فازی و الگوریتم‌های ژنتیکی توانایی خودآموزی، سازگاری و قابلیت تحمل خطا را دارند که بسیاری از محققان رباتیک را به خود جذب کرده‌اند. در سال ۱۹۹۲، هر مفصل ربات SD-2 توسط یک نورون مشترک معرفی شد. در این مطالعه، شبکه عصبی رابطه بین نیروی پا و تنظیم زاویه مربوطه را به دست می‌آورد. علاوه بر شبکه عصبی، به دلیل مزایای منطق فازی برحسب بیان اطلاعات، بسیاری از محققان آن را در نسل‌های قبلی و کنترل راه رفتن ربات دوپا اعمال می‌کنند. در این روش از یک الگوریتم تنظیم پارامتر راه رفتن فازی برای پویایی کنترل پارامترهای راه رفتن، از جمله اندازه گام و سرعت چرخش استفاده می‌شود. در مجلات و مقالات چاپ‌شده، مفهوم منطق فازی با تئوری کنترل‌کننده خطی درجه دوم (LQR) ترکیب شده است تا بهترین روش را برای طراحی یک سیستم رباتیک دوپایه به

دست آورند و یک مدل راه رفتن متعادل و پایدار داشته باشد. با این حال، الگوریتم‌های هوشمند به طور کلی نیاز به تعداد زیادی از نمونه‌های آموزشی و محاسبات درازمدت دارند و ساختار فضایی و همگرایی داده‌ها از نمونه‌ها به طور کامل حل نشده است.

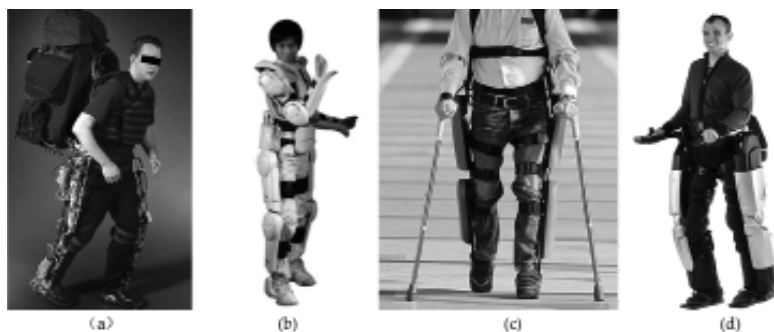
برنامه توان بخشی

اندام تحتانی از بدن انسان به طور عمده برای ایستادن، حفظ تعادل، و راه رفتن است. ربات‌های دوپا توسط اصل تقلید واقعی از افراد طراحی و کنترل می‌شوند. در نتیجه ربات‌های bipedal و فن‌آوری‌های مرتبط، مانند کنترل پایداری و برنامه‌ریزی حرکت، می‌توانند در آموزش و توان بخشی اعضای تحتانی بدن به کار روند. در سال ۲۰۰۰، آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته وزارت دفاع آمریکا، آزمایشگاه مهندسی انسانی برکلی (HEL)، SARCOS Robotics، آزمایشگاه ملی ORNL (Oak Ridge, Millennium Jet) تحقیقاتی در مورد ربات‌های دوپایه اگزواسکتون (Exoskeleton) انجام دادند. با اینکه Exoskeleton هنوز در مراحل اولیه توسعه است اما، دستاوردهای فنی بر روی ربات‌های دوپا به توسعه ربات توان بخشی اندام تحتانی به‌ویژه برای برنامه‌ریزی راه رفتن، کنترل پایداری، و برنامه‌های کاربردی سنسورها کمک کرده است. ربات‌های دوپا و ربات‌های توان بخشی نمی‌توانند برابر باشند. برای ربات‌های توان بخشی، از تئوری کنترل ربات دوپا استفاده می‌شود و انسان‌ها

می‌توانند به‌عنوان یک پیوند در کنترل عمل کنند، درحالی‌که تکنولوژی ربات دوپا غالباً این جنبه را در نظر نمی‌گیرد.

ربات Exoskeleton پوشیدنی

ربات اگزواسکتون پوشیدنی یکی از اولین ربات‌های پیشنهادی است که به طیف وسیعی از کاربران برای پیاده‌روی کمک می‌کند تا محدودیت‌هایشان را کمتر کنند. این ربات پوشیدنی می‌تواند برای کمک به بیماران مبتلا به Hemiplegia برای پیاده‌روی و بهبود عملکرد طبیعی بدن استفاده شود. پروژه Exoskeleton Extremity Bercle (BLEEX) (شکل ۴a) توسط دانشگاه کالیفرنیا در برکلی و آزمایشگاه ارگونومی انجام شده است. سنسورها و محرک‌های نصب‌شده بر روی پاهای Exoskeleton، اطلاعات کنترلی لازم را برای مرکز کنترل فراهم می‌کنند. کامپیوتر این اطلاعات را در حین تشخیص وضعیت واقعی کاربر می‌پذیرد. با تنظیم گشتاور محرک‌ها برای کمک به مفاصل، افراد می‌توانند مسافت‌های طولانی را در حین حمل بار خارجی پیاده طی کنند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد هنگامی که بار بر روی BLEEX-1 برابر ۳۴ کیلوگرم است، سرعت پیاده‌روی می‌تواند به ۱.۳ متر برسد و بدن انسان فقط ۲ کیلو وزن خارجی را احساس کند. وقتی بار بر روی BLEEX-2 برابر ۴۵ کیلوگرم است، سرعت پیاده‌روی می‌تواند تا ۲ متر بر ثانیه افزایش یابد. با توجه به پیچیدگی ساختار مکانیکی و مصرف انرژی تجهیزات، بازده فعلی ربات



شکل ۴) ربات اگزواسکتون پوشیدنی. (a) BLEEX; (b) Cyberdyne HAL; (c); Israel ReWalk; (d) Rex Bionics'

اگزواسکتون پوشیدنی کم است.

تجهیزات توان بخشی

تجهیزات توان بخشی نیز از فن آوری ربات های دو پا استفاده می کنند. برخلاف ربات اگزواسکتون پوشیدنی، تجهیزات توان بخشی عموماً بزرگتر، سنگین تر و گران هستند. تجهیزات توان بخشی معمولاً نیاز به سنسورهای بیشتری برای به دست آوردن داده های حرکتی انسان دارند و تجهیزات پردازش داده ای ویژه ای دارند. بنابراین، ربات های توان بخشی تنها در بیمارستان ها یا مراکز توان بخشی بزرگ وجود دارند. تویوتا تجهیزات توان بخشی Welwalk-1000 را در سال ۲۰۱۷ رونمایی کرد و به نهادهای مختلف پزشکی خواهد فروخت. ران، زانوها، مچ پا و پاهای بیمار را به وسیله تجهیزات کامل ثابت می کنند و سپس بیمار را در یک تردمیل راه می برند. در حین پیاده روی، سنسور داخلی این عمل را تشخیص می دهد و دائماً ربات را تنظیم می کند. این سیستم با استفاده از حرکت آهسته و آموزش به بهبود بیماران کمک کرده و می تواند توان بخشی را تسریع کند. به طور هم زمان، سیستم به درمانگر کمک می کند تا پیشرفت بیمار را کنترل و وضعیت بیمار را رصد کند. LOKOMAT (شکل a, ۵)، LokoHelp (شکل b, ۵)، عملکردی شبیه به Welwalk-1000 دارند.

بزرگی و سختی حرکت از جمله معایب آن هاست.

دیگر ربات های Exoskeleton در حال ظهور

برای به حداقل رساندن بار بر روی اندام تحتانی بدن انسان و توانایی غلبه بر محدودیت، ربات اگزواسکتون با سازه های نرم، توسط پژوهشگران ارائه شده است. اگزواسکتون نرم می تواند با تغییر شکل بدن انسان در طول راه رفتن بهتر سازگار باشد. با این حال، اینکه چگونه یک ماده نرم حرکت و راه رفتن را به طور مؤثر به بدن انسان منتقل می کند، به یک چالش تبدیل می شود. در سال ۲۰۱۳، دانشگاه هاروارد ربات اگزواسکتون Exosuit را توسعه داد (شکل a, ۶). این ربات با استفاده از یک طراحی انعطاف پذیر ساخته شده است که به کاربر اجازه می دهد محدودیت های مواد سفت و سخت را از بین ببرد. ربات تنها ۷/۵ کیلوگرم وزن دارد. وقتی که اگزواسکتون بیرونی نرم پوشیده می شود، بیماران دیگر نیازی به عصا ندارند و توانایی پاهایشان بهبود می یابد. ربات اگزواسکتون Unpowered یک مفهوم جدید است که شبیه به راه رفتن غیرفعال در ربات های دوپاست. مفاصل رباتیک نیازی به یک راننده ندارند و با استفاده از گرانش خود بدن یا قابلیت ارتجاعی به

راه رفتن کمک می کند. محققان دانشگاه CarnegieMellon و دانشگاه کارولینای شمالی یک سیستم Exoskeleton غیرفعال، Exoboot (شکل b, ۶) را طراحی کردند. در ساخت سیستم Exoskeleton از مواد فیبرکربن با وزن بسیار سبک در حدود ۵۰۰ گرم استفاده شده است که حالت ارتجاعی باعث ذخیره انرژی شده و انرژی مصرفی در راه رفتن را تقریباً ۷٪ کاهش می دهد. ربات های Exoskeleton پیشرفته دارای مزایای بسیاری نسبت به ربات های قدیمی هستند. تحقیقات بر روی ربات های اگزواسکتون پیشرفته به تازگی آغاز شده است. جدول ۲ خلاصه ای از ویژگی های ربات های مختلف اگزواسکتون را مقایسه می کند.

برنامه ریزی راه رفتن براساس سینماتیک مصنوعی نیاز به مجموعه ای از داده های حرکت انسان دارد. از آنجایی که کمک رسانی ربات های Exoskeleton براساس دقیق بودن هدف حرکت انسان استوار است، این تکنیک های کسب سیگنال می تواند در کنترل ربات های Exoskeleton نیز اعمال شود. اندام کمکی هیبریدی (HAL) (شکل b, ۷)، توسط شرکت Cyberdyne تولیدکننده ربات ژاپنی معرفی شده است که براساس سیگنال EMG کنترل می شود. HAL همچنین اولین ربات اگزواسکتون دو پا در جهان است که می تواند توسط ذهن انسان کنترل شود. در سال ۲۰۱۳، ربات دو پا Exoskeleton HAL گواهینامه ایمنی جهانی را در ژاپن دریافت کرد. کسب گواهینامه جهانی بدین معناست که HAL می تواند در سراسر جهان وارد بازار شود. ربات ReWalk (شکل c, ۷)، طراحی و تولید شده توسط Israel ReWalk، دارای خاصیت تطبیقی، برخلاف دیگر اسکلت های خارجی رایج و یا انواع پروتزهاست. این خودیادگیری و پیاده روی با سرعت معمول کاربر با روش کنترل هوشمند محقق می شود. شکل ۷ اصول عملکرد کل سیستم را نشان می دهد.



(a)



(b)

شکل ۵) تجهیزات توان بخشی (a) LOKOMAT و (b) LokoHelp

تعمیرات زودرس نیز دارند. ربات‌های جدید توان‌بخشی نرم تا حد زیادی ساختار تجهیزات را ساده کرده و وزن آن‌ها را کاهش داده‌است. از بُعد هزینه نیز قیمت ربات‌های توان‌بخشی مانند HAL و ReWalk بسیار بالاست و همه بیماران استطاعت مالی استفاده از آن‌ها را ندارند. هزینه تجهیزات توان‌بخشی برای تجاری‌سازی در آینده باید به‌خوبی کنترل شود.

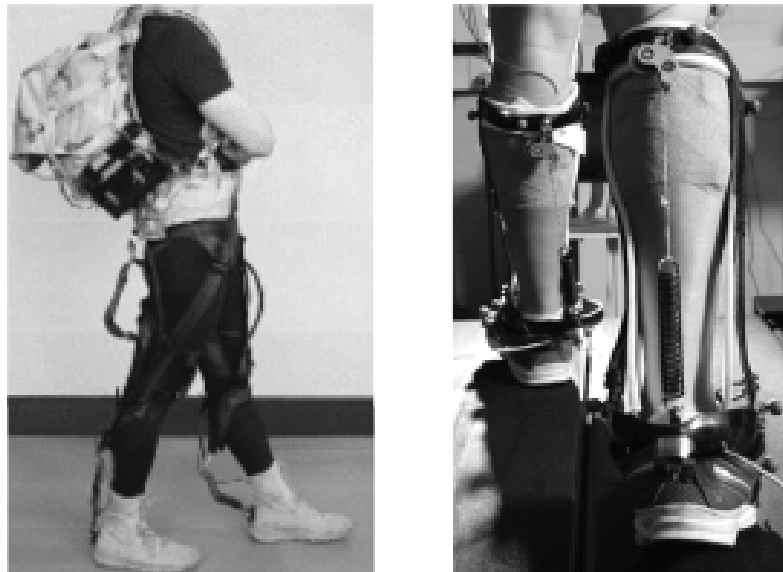
چالش‌های نظری و فنی

ساختار مکانیکی

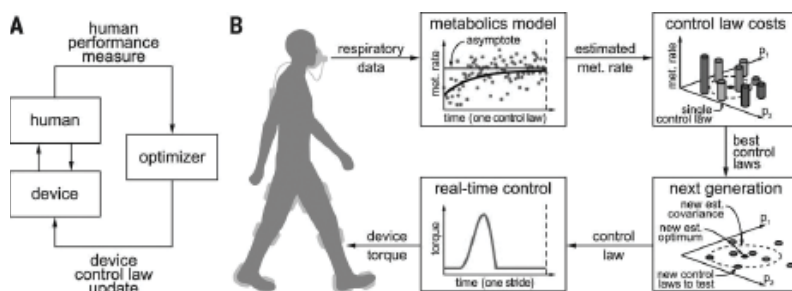
ربات توان‌بخشی یک سیستم پیچیده و سنگین با مفاصل متعدد و درجه آزادی‌های فراوان است. یک ربات توان‌بخشی هوشمند کاملاً کاربردی باید دارای یک مکانیسم مکانیکی و متراکم و محکم باشد. بهینه‌سازی چنین ساختاری ارزش جستجو را دارد. استفاده از مواد پیشرفته مانند آلیاژ کربن و آلیاژ تیتانیوم، روش معمولی برای کاهش وزن ربات‌های توان‌بخشی است. با این حال، انواع مواد پیشرفته محدود هستند و هزینه‌ها معمولاً زیاد است. به‌طور کلی، ساختار مکانیکی باید به‌منظور رعایت انعطاف‌پذیری، ثبات و راحتی افراد طراحی شود.

سینماتیک و دینامیک

کنترل ربات توان‌بخشی و دقت مدل کنترل نهایی و اتصال قوی و غیرخطی بودن سیستم ربات توان‌بخشی به‌طور کامل توسط سینماتیک و دینامیک حل می‌شود. برخی از محققان روش‌هایی از قبیل شبکه‌های



شکل ۶) پیشرفت ربات‌های توان‌بخشی. (a) ربات‌های توان‌بخشی نرم؛ (b) ربات‌های غیرمتمرکز توان‌بخشی



شکل ۷) انسان در حلقه بهینه‌سازی کمک‌های ربات‌های توان‌بخشی در هنگام راه رفتن

چالش‌ها و چشم‌اندازها

تجهیزات هنوز به سطح فیزیوتراپیست نرسیده‌است. ساختار تجهیزات توان‌بخشی مصنوعی سنتی بسیار پیچیده و سنگین است و نه تنها پوشیدن این تجهیزات باعث آسیب رساندن می‌شود، بلکه نیاز به نگهداری و

تأثیر تجهیزات توان‌بخشی، جنبه‌ای است که مردم بیشتر نگران آن هستند. اگرچه تجهیزات توان‌بخشی می‌توانند به کمک فیزیوتراپ‌ها بیایند اما تأثیر توان‌بخشی

نمونه	معایب	ویژگی	نوع
BLEEX, HAL, ReWalk	عدم راحتی کاربر، ساختار سنگین و سخت	پوشیدنی، طیف استفاده گسترده است	ربات‌های توان‌بخشی پوشیدنی
Welwalk-1000, LOKOMAT	بزرگ و ضخیم	کاربردی، اثر توان‌بخشی خوب است	تجهیزات توان‌بخشی
Exosuit	نیروی کمکی نسبتاً کوچک است	سبک و بدون محدودی	ربات‌های توان‌بخشی نرم
Exoboot	طراحی سازه دشوار است	بدون سیستم کنترلی	Unpowered ربات‌های توان‌بخشی

جدول ۲) مقایسه انواع مختلف ربات‌های توان‌بخشی

عصبی، الگوریتم ژنتیک، منطق فازی، تئوری هرج و مرج و روش‌های دیگر را معرفی کرده‌اند که مزایا و معایب خود را دارند. با معرفی روش‌های نظری جدید و بهبود مستمر عملکرد کامپیوتر، باید در آینده راه‌حل‌های بهتری برای شبیه‌سازی سینماتیک دقیق و دینامیک ارائه شود.

محرك‌های جدید ربات

تجهیزات توان‌بخشی باید قدرت لازم را برای کمک به راه رفتن فراهم کنند. برای فراهم کردن قدرت کافی، محرك مورد استفاده توسط ربات باعث افزایش وزن تجهیزات و هدررفت انرژی می‌شود. برای داشتن حرکت باید ضمن سبک‌وزن بودن گشتاور مناسبی نیز داشته باشد. محرك‌های قدیمی نیازهای رو به افزایش مردم را برآورده نکردند، به همین دلیل تلاش‌ها در جهت پیدا کردن محرك‌های جدید است. امروزه محرك‌های سرمایکی و پیزوالکتریک به تدریج در زمینه ربات‌ها به کار برده می‌شود. این محرك‌ها سریع‌تر و توان‌تر هستند چشم‌انداز روشن‌تری را ترسیم می‌کنند.

منابع انرژی

محدوده حرکت ربات‌ها با ظرفیت و کارایی باتری محدود می‌شود. منبع انرژی ایده‌آل باید دارای ظرفیت انرژی بالا، مقاومت در برابر دمای بالا، مقاومت در برابر خوردگی بوده و تجدیدپذیر و ارزان باشد. محققان در آینده می‌توانند به تکنولوژی‌های انرژی جدید، از جمله انرژی خورشیدی و انرژی زیستی برای مقابله با تنگنای توسعه انرژی توجه کنند. با توسعه فناوری نانو، انتظار می‌رود که باتری‌های با ظرفیت بالا مانند باتری‌های گرافین مشکل انرژی را حل کنند. شارژ بی‌سیم نیز یکی از ابزارهای حل مشکلات انرژی در ربات‌های توان‌بخشی است.

فناوری سنسور

برای دستیابی دقیق به اطلاعات حرکت کاربر، بسیاری از سنسورها، مانند سنسورهای نیرو، سنسورهای گشتاور، ژيروسکوپ‌ها،

سنسورهای دید و سنسورهای صوتی در ربات‌های دوجا نصب می‌شوند. کنترل ربات مبتنی بر سنسور است. باین‌حال، دقت سنسور می‌تواند بهبود یابد و هزینه را کاهش دهد. علاوه بر این، حسگرهای قدیمی نسبتاً بزرگ هستند و حرکت بدن انسان را محدود می‌کنند.

بسیاری از انواع جدید سنسورها برپایه مواد نرم طراحی شده‌اند که مناسب برای تشخیص حرکات بدن انسان هستند. میکرو سنسور نوع جدیدی از سنسور است که مبتنی بر تکنولوژی نیمه‌هادی است. گرچه این سنسورهای جدید همچنان با مشکلاتی در ساخت، حساسیت و ثبات روبرو هستند، اما پتانسیل لازم برای کاربری در بخش توان‌بخشی را دارند.

همبستگی انسان با ربات

در روش سنتی، توان‌بخشی، تعاملی بین بیمار و درمانگر فیزیکی است. ربات ایده‌آل باید بتواند همانند درمانگرهای فیزیکی از نظر توانایی شناسایی شرایط توان‌بخشی بیمار، طراحی یک برنامه آموزش شخصی و بهینه‌سازی روند آموزشی درست عمل کند. یک مفهوم جدید به نام "حلقه انسانی" توسط تیم تحقیقاتی CMU پیشنهاد شده است. در این روش ربات و انسان در یک حلقه بسته متصل می‌شوند و ربات قادر به تنظیم شرایط کاری با توجه به شرایط انسانی است. این نوع همجوشی انسان و ربات می‌تواند مسیری برای توسعه ربات‌های توان‌بخشی باشد.

نتیجه‌گیری

اگرچه تحقیق بر روی ربات‌های دوجا دستاوردهای زیادی داشته است، اما بسیاری از کاستی‌ها در ثبات، تناسب بین ماشین و انسان و همکاری هنوز وجود دارند. با توسعه بیوتکنولوژی، تکنولوژی یکپارچه‌سازی الکترومکانیکی و تکنولوژی کنترل، تکنولوژی ربات دو پا نیز پیشرفت خواهد کرد. در آینده نزدیک، ربات دوجا در زمینه توان‌بخشی و ارائه خدمات بهتر به مردم مورد استفاده فراوان قرار خواهد گرفت.

منابع

1. Lee, H.W. A study of the use of fuzzy control theory to stabilize the gait of biped robots. *Robotica* 2016, 34, 777–790. [CrossRef]
2. Vukobratovic', M.; Branislav, B. Zero-moment point—Thirty five years of its life. *Int. J. Humanoid Robot.* 2004, 1, 157–173. [CrossRef]
3. Akhtaruzzaman, M.; Shafie, A.A. Evolution of humanoid robot and contribution of various countries in advancing the research and development of the platform. In *Proceedings of the 2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS)*, Gyeonggi-do, Korea, 27–30 October 2010; pp. 1021–1028.
4. Takanishi, A. Quasi dynamic walking of the biped walking robot. *J. Robot. Soc. Jpn.* 1983, 1, 196–203. [CrossRef]
5. Zoss, A.B.; Hami, K.; Andrew, C. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2006, 11, 128–138. [CrossRef]
6. Sankai, Y. Leading edge of cybernics: Robot suit hal. In *Proceedings of the International Joint Conference*, Orlando, FL, USA, 12–17 August 2007; pp. 1–2.
7. Chen, B.; Ma, H.; Qin, L.Y.; Gao, F.; Chan, K.M.; Law, S.W.; Qin, L.; Liao, W.H. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *J. Orthop. Transl.* 2016, 5, 26–37.
8. Chen, B.; Luo, M.; Guo, F.; Chen, S. Walking mechanism and kinematic analysis of humanoid robot. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS)*, Luoyang, China, 25–27 September 2013; pp. 491–494.