

## 生活期までの補装具支援

## 補装具支援におけるロボット工学の関わり

平野 哲<sup>1)</sup>

キーワード | ロボット, 練習支援, 自立支援, 運動学習

## 抄録

ロボットは、正確な作業を疲労なく、繰り返し実施可能で、必要に応じて早いスピード、強い力を発揮できる。誤動作の可能性が減り、また仮に誤動作したとしても周囲への危害を最低限とする技術が確立してきた現在において、ロボットを利用するメリットは大きい。特に、身体障害を有する患者のリハビリや介護に有用であり、導入が進んでいる。本稿では、補装具支援に対するロボット技術応用例として、電子制御義足、電動義手、歩行補助具、電動車いす、装具型ロボットについて解説した。ロボットはとても便利な道具であるが、万能ではない。ロボットに助けてもらう部分と、人が達成すべき課題を意識して、上手に活用したい。

## 1. はじめに

ロボットには様々な定義があるが、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「NEDO ロボット白書 2014」（2014年3月）では、ロボットを「センサ、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を有する、知能化した機械システム」と定義されている。この定義からわかるように、すでに我々の生活の中には様々なロボットが活躍している。ペットロボットや掃除ロボットがすぐに思い浮かぶかもしれないが、洗濯機の洗剤自動投入や一眼レフカメラの自動露出調整にもロボット技術が用いられている。自動車の自動緊急ブレーキ、アダプティブ・クルーズ・コントロール（車間距離保持）などもロボット技術の応用である。ロボット技術が進歩し、誤動作なく安全に用いることができるようになったことで、産業用以外の用途が広がったと考えられる。

人による作業と比較したロボットの長所は

- ・ 正確な作業を疲労なく、繰り返し実施可能
- ・ 早いスピード、強い力を発揮可能
- ・ センシングしてから駆動するまでのタイムラグがきわめて少ない
- ・ 危険な作業にも従事可能

などが挙げられる。一方、短所としては、

- ・ 想定外の事態に対する柔軟な対応が困難
- ・ 故障、誤動作の可能性
- ・ 導入コストが高い

などが挙げられるだろう。誤動作の可能性が減り、また仮

に誤動作したとしても周囲への危害を最低限とする技術が確立してきた現在においては、想定した（あらかじめプログラミングしておいた）動作でしか利用できないとしても、ロボットを利用するメリットは非常に大きい。特に、体の一部を正確かつ十分な力で駆動することができなくなってきている身体障害者のサポートにおいては重要な役割を果たすと考えられ、これが、リハビリ・介護分野でロボットの導入が進んだ最大の理由と考えられる。

## 2. 補装具支援におけるロボット技術応用例

## 2-1 電子制御義足

義足パーツの中で、コンピュータによる制御が最も進んでいる部品が電子制御膝継手である。遊脚相のみを制御するものと、立脚相・遊脚相両方を制御するものに分類できる<sup>1)</sup>。前者としては、1993年にナブテスコ社が発売したIntelligent knee が世界初の製品であり、現在は同製品に加えて、同社のHybrid knee、Ottobock社の3E80、徳林社のTGK-5PSOICなどが完成用部品として普及している。後者としては、1997年にOttobock社が発表したC-Legがその最初の製品であり、日本では3代目のC-Leg（通称C-Leg3）が2013年に完成用部品として認可された。現在では、Ottobock社のC-Leg 4、Genium、Kenevo、Össur社のRHEO KNEE、RHEO KNEE XC、ナブテスコ社のALLUXなどが認可されている。モーメントセンサ、荷重センサ、ジャイロセンサ、加速度計などから得られる情報を元に装着者の状況が判断され、油圧や磁気粘性流体の制御が行わ

Involvement of robotics in prosthetic support

- 1) 藤田医科大学医学部リハビリテーション医学I講座 〒470-1192 愛知県豊明市杣掛町田楽ケ窪 1-98  
Department of Rehabilitation Medicine I, School of Medicine, Fujita Health University  
1-98 Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake-shi, Aichi, 470-1192 Japan  
Satoshi HIRANO (医師)

れる。遊脚相に加えて立脚相が制御されることによって、膝折れによる転倒のリスク軽減が期待できるようになった。また、義足側に安心して体重をかけられるため、健側下肢の負担を減らし、変形性膝関節症のリスク軽減にもつながるとされる<sup>2)</sup>。中～高活動レベルのユーザを対象としたものが多いが、Kenevoは低活動者向けである。大腿切断だけでなく、股離断患者にも適応がある。電子制御膝継手については、当学会誌でも繰り返し紹介されており、最近では36巻4号に特集が組まれているので、ぜひ参考にされたい。

膝継手以外の電子制御パーツはまだ少ないが、電子制御足部としては、OttoBock社のMeridiumが完成用部品として利用可能である。足関節運動に連動してMP関節の運動まで電子制御される点が特徴である。歩行や路面状況は1/100秒毎に検知され、油圧シリンダーの制御により、最適な関節運動が生み出される。使用者が静止している時には、足関節背屈モーメントが制御され、膝折れを防止するため、転倒予防にも有用と考えられる。

## 2-2 電動義手

電動義手の多くは、断端の筋肉から検出した筋電信号により電動モータをコントロールすることで、電動ハンドの開閉を制御する筋電義手である。前腕筋電義手として世界で最も普及しているのはOttoBock社のMYOBOCKであり、日本においても公的支給制度に則って支給されている電動ハンドのほとんどを占める<sup>3,4)</sup>。ハンドはセンサハンドスピード/バリプラススピード/DMCプラス/デジタルツインの4種類から選択できる<sup>5)</sup>。デジタルツインは筋電シグナルが一定の閾値を超えるとハンドが開閉するON-OFF制御であり、1カ所しか筋電を検出できない場合も使用可能である。その他は筋電シグナルの強さに比例する比例制御を用いており、開閉スピードや把持力は筋電のシグナルの強弱で制御する。センサハンドスピードには、母指先端にセンサがあり、把持している物体の滑り感知すると、1.5倍まで把持力が増加されるという特徴がある。前腕の回内外を筋電操作で行う部品(リストローテータ)を付加することも可能である。小児用の小型のハンドも用意されている。前腕能動義手と比較した前腕筋電義手のメリットとして、

- ・肢位によらずハンドの開閉が可能
- ・把持力が大きい
- ・ハーネスが不要

などが挙げられる<sup>4,6)</sup>。使用者の装着時間が長く、定着率も良いとの報告もある<sup>7)</sup>。上腕切断や肩離断に対して電動ハンドを用いる場合には、肩継手や肘継手は従来の能動義手と同じシステムを用い、ハンドの開閉は電動モータで行うハイブリッド型が多い。前述のMYOBOCKにおけるグリップは、母指と示指、中指による対立把持の1種類のみであるが、近年では、母指のポジションを対立位から外転位に切り替えが可能で、多彩なグリップパターンを有する

5指駆動型筋電義手も製品化されている<sup>8)</sup>。現在、国内では、OttoBock社のミケランジェロハンド、bionicハンド、Össur社のi-limb quantumハンドが購入可能である。これらはMYOBOCKと比較すると確かに高機能であるが、本当にADLやQOLの向上につながるのか、高価格に見合う効果があるのかはこれからの検討が必要である。また一方で、筋電センサではなく筋隆起を検出する距離センサを採用し、3Dプリンタで製作することで、低コストを実現したFinchやHACKberryなど新たな電動義手<sup>4)</sup>も登場してきた。様々な機能や価格の電動義手が提供されることで、電動義手の普及が進むことが期待される。

## 2-3 歩行補助具

歩行車は歩行に不安を抱えた高齢者が幅広く利用している補装具であるが、これにもロボット技術を応用したものがある。RTワークス株式会社が開発したロボットアシストウォーカーRT.2は、6軸モーションセンサで路面状況や使用者の動きをセンシングし、状況に合わせてアシスト/ブレーキを行う<sup>9)</sup>。具体的には、上り坂では歩行車の駆動をアシストすることで歩行を楽にし、下り坂ではブレーキをかけることで歩行速度の過度な上昇を防ぐ。過剰な速度を検知した場合は自動ブレーキにて転倒を防止し、横傾斜路では片流れ防止も可能である。現在は同機と同様の歩行車が他にも開発され、介護保険での利用も可能となっている。

転倒予防を目的とした杖型歩行補助ロボットの開発も進められている。Nakagawaら<sup>10,11)</sup>は、歩行者が旋回しようとするとき、支持脚の状況に応じてロボットの動作を調整することで、支持基底面の減少を防ぎ、転倒リスクを低下させられると報告した。

## 2-4 電動車いす

電動車いす全てを「知能化した機械システム」と捉えるべきかは議論のあるところであるが、ロボット技術を応用した、より高機能な電動車いすはロボットと捉えてよいと筆者は考える。スウェーデンPermobil社の電動車いすF5 Corpusは、電動座位変換機能により、チルトやリクライニングに加え、立位姿勢を取ることができる。振動の吸収力が強化されたサスペンションにより、立位姿勢のまま移動も可能である。これらの機能は褥瘡予防に役立つだけでなく、健常者と視線を合わせられることで、自己像再獲得にも有用と考えられる。やや高額ではあるが、日本でも購入可能である。スイスScewo社が開発したScewo Broは、車輪に追加してキャタピラ駆動システムを備えており、自力で階段を昇降可能である。こちらは2020年時点ではスイス国内でのみ販売されている。これらの電動車いすにより、車いす使用者の社会参加が促進されると期待している。

## 2-5 装具型ロボット

### 2-5-1 分類

装具型ロボットは、その目的により、練習支援用と自立

支援用に分けて考えると理解しやすい。練習支援用は、実生活ではなく練習中のみに使用し、練習の効果を上げる目的で用いられる。操作者は患者自身ではなく、訓練を受けた医療者であることが多いため、使用方法が多少複雑であっても、効果が高ければ許容される。後述する自立支援用と比べると、装着性や重量などの制約も少ない。一方で、1台を複数人で共有する可能性があること、1人の患者の状況もリハビリの経過で刻々と変化していくことから、使用者の状況に合わせて柔軟に設定を変えられることが求められる。自立支援用は、残存した障害を補完し、装具型ロボットを使用している間だけ、目的とする動作を可能とするものである。患者自身が操作者となるため、より高い安全性が求められるとともに、装着の容易さや長時間使用時の快適性も重要である。家屋で使うことを想定して、重量、騒音、外観への配慮も必要である。

### 2-5-2 歩行練習支援装具型ロボット

歩行練習支援ロボットは、足部位置のみを制御するエンドエフェクタ型と、下肢の関節を直接制御する外骨格型に大別される。装具型ロボットと呼べるものは外骨格型であり、構造によって、骨盤帯付き両長下肢装具型、長下肢装具型、短下肢装具型に分類される。

最も多く製品化されているのが、骨盤帯付き両長下肢装具型である。その中でも、スイス Hocoma 社が開発した Lokomat<sup>12)</sup> は世界で最も普及しており、1,000 台以上の販売実績がある。骨盤帯で連結された両側長下肢装具類似のフレームには、両側股関節・膝関節にモータが取り付けられ、関節運動を制御する。骨盤帯は専用のトレッドミルに連結しており、患者はトレッドミル上でのみ歩行練習を行う。元々、脊髄損傷者に対する体重免荷式トレッドミル歩行練習の省力化を狙って開発されたものであり、脊髄に存在する Central Pattern Generator を促進することによって、歩行能力を向上させることが狙いであった。その後、片麻痺者を対象とするため、片脚ずつの設定が調整可能となったが、その効果にはいまだ議論がある。Lokomat と同

様の機構・機能を持ったロボットが多数開発されている。

Ekso<sup>13)</sup> は、Lokomat 同様、骨盤帯と両下肢フレームを有し、両側股関節・膝関節をコントロールする装具型ロボットであるが、平地で歩行練習を行う。患者は杖や歩行器を使用し、介助者が後方から転倒予防の介助を行う。Lokomat 同様、脊髄損傷者の歩行練習用に開発されたが、現在は片麻痺患者にも応用されている。片麻痺者の歩行練習では、後方からの体幹介助者に加えて、歩行器を補助する介助者の2名が必要となることが多いようである。

HAL<sup>®</sup> 医療用下肢タイプ<sup>14)</sup> は筑波大学で開発され、サイバーダイン社が販売を行っている。トレッドミル上でも平地でも使用可能である。両側の脚部が腰フレーム(骨盤帯)に連結され、股関節・膝関節のモータは HAL<sup>®</sup> 独自の随意制御と自律制御の組み合わせにより制御される。随意制御では、使用者の生体電位信号を検出して、これを元にモータの制御を行う。一方、自律制御では、重心移動などの情報から使用者の動作を予測し、あらかじめパターン化しておいた基本動作を再現する。両脚タイプの HAL 医療用は希少性神経・筋難病疾患に対して歩行速度の改善を認め<sup>15)</sup>、2015 年に医療機器として承認された。脳卒中への適用拡大に向けて国内で医師主導治験が実施され、2020 年 12 月に終了した。脊髄損傷に関しても治験が計画されており、結果が注目される。

著者らはトヨタ自動車と共同で片麻痺者の歩行練習支援に特化した歩行練習支援ロボット“ウエルウォーク”<sup>16,17)</sup> の開発を進めてきた。ウエルウォーク WW-1000 のレンタルが 2017 年に開始され、2020 年からは歩行分析機能が強化された WW-2000 (図 1) が販売されている。ウエルウォークは長下肢装具型ロボット、低床型トレッドミル、安全懸架装置(部分体重免荷装置としても使用可能)、脚部免荷装置、患者用モニタ、操作パネルから構成され、トレッドミル上で歩行練習を行う。骨盤帯付き両長下肢装具型とは異なり、ウエルウォークは麻痺側下肢のみをアシストし、非麻痺側下肢の運動を制限しない。また、骨盤帯が存在せず、ロボットは体幹を制御しない。したがって、片麻痺者に



図 1 ウェルウォーク WW-2000 (トヨタ自動車株式会社より提供)



とって必要な非麻痺側下肢および体幹の運動学習がスムーズに進むと考えられる。ロボット足底部の圧力センサと膝関節角度から歩行周期を判断し、適切なタイミングで膝関節の屈曲・伸展を行う。立脚期に膝伸展を支持するトルクは10段階に変更可能である。長下肢装具型ロボットの重量はロボット免荷装置によりキャンセルされ、ロボットの重量以上に免荷することで、振り出しの補助も可能であり、その程度を可変できる。操作は全て専用の操作パネルで行い、多くの片麻痺患者の歩行練習においては、療法士1人で対応可能である。熟練した療法士であれば、装着は2~3分、取り外しは1~2分で実施できる。Tomida<sup>18)</sup>らは、回復期リハビリテーション病棟に入院中の初発脳卒中片麻痺患者を対象に、ウェルウォークのプロトタイプであるGEARを用いて無作為化比較試験を行った。対象者は歩行練習にGEARを用いる群（GEAR群）と、一般的な理学療法のみ行う群（対照群）に無作為に割りつけられ、両群とも同じ時間の理学療法を行ったところ、GEARを用いた群で1週間当たりの歩行自立度の改善が有意に高く、GEARは歩行自立度の改善を促進することが示唆された。

足首アシスト歩行装置は株式会社安川電機、芝浦工業大学、広島大学、株式会社スペース・バイオ・ラボラトリーズが共同開発した短下肢装具型ロボットである。両足の足裏センサの情報を元に歩行周期を判定し、モータが足関節底背屈をアシストする。現在は、安川電機から足首アシスト装置CoCoroe AADとして、スペース・バイオ・ラボラトリーズからRE-Gait<sup>®19)</sup>として発売されている。歩容の改善が期待できるとのことだが、有効性はまだ明らかではない。

### 2-5-3 歩行自立支援装具型ロボット

歩行自立支援装具型ロボットは、完全対麻痺者を主な対象としている。完全対麻痺者の場合、現在の医学では下肢運動機能の回復は困難であり、下肢装具や杖などの歩行補助具を用いても実用的歩行を獲得できることは稀だが、ロボットが下肢の運動障害を補完することで、実用的な歩行を獲得できる可能性があるためである。認知や上肢機能に問題がないため、歩行再獲得に強い希望を持っている人が多いことも影響しているだろう。

完全対麻痺者用のロボットとして、米国ではReWalk<sup>20)</sup>とIndego Personal<sup>21)</sup>が日常生活でも使用されている。どちらも、両下肢外側のフレームを骨盤帯に連結した外側系という構造である。両側股関節・膝関節がモータで制御され、足関節には動力を持たない。歩行器やロフトランド杖を用いてバランスを取りながら歩行する。ReWalkは世界で約500台が利用されており、歩行自立支援装具型ロボットとしては最も普及している。腕時計型コミュニケーターで着座/起立/歩行の3つの中から駆動モードを選択し、骨盤帯の側面に設置された傾斜センサが使用者の体幹が前傾したことを検知すると、足が振り出される。段差昇降も可能である。Indego Personalは重量が12kgと軽量であ

り、骨盤帯・両大腿部・両下腿部に分解して持ち運ぶことができる点が特徴である。ReWalkは第7頸髄~第5腰髄レベル、Indego Personalは第3胸髄~第5腰髄レベルの脊髄損傷患者が対象である。どちらもトレーニングを受けた同伴者の監視下であれば、日常生活で使用可能である。交通事故患者や退役軍人には保険が適用され、200人以上が個人で購入しているといわれている。

ReWalk, Indego Personalのような外側系構造を採用した装具型ロボットは、歩幅の確保に優れる一方で、股継手・骨盤帯のたわみにより、立位が不安定である。そこで、著者の所属する藤田医科大学リハビリテーション部門は、下肢フレームを両下肢内側に配置し、会陰直下で股継手で連結する構造（内側系構造）を考案した。アスカ株式会社、東名ブレースと共同で開発を進め、完成したロボットがWearable Power-Assist Locomotor (WPAL)である(図2)<sup>22,23)</sup>。両側股関節・膝関節・足関節に合計6個のモータが配置され、各関節は患者毎に個別に計算された最適な歩行パターンに従って制御される。モータ制御回路やバッテリーを搭載した専用歩行器を用いることによって、安全性を担保するとともに、患者の負担重量が軽減される。歩行器に設置された2つのレバースイッチと2つのボタンスイッチにより、患者自身で全ての操作が可能である。着脱も患者自身で実施可能であり、熟練した患者であれば、2分程度で装着できる。WPALを用いて歩行するには、WPALの動きに合わせて患者自身の体をリズム良く動かすことが必要であり、懸垂下平行棒内足踏み練習、懸垂下平行棒内歩行練習、懸垂下トレッドミル歩行練習、懸垂下歩行器歩行練習、歩行器歩行練習（懸垂なし）と5段階の専用プログラムで練習を行う<sup>24)</sup>。装具を用いた場合と比較して、WPALを用いるとより長時間、長距離を連続で歩行可能であり<sup>23)</sup>、最も熟練した完全対麻痺者は、84分間、1,513mの連続歩行を達成した。日本では、WPAL以外に、ReWalk, FREE Walkが使用可能であるが、日常生活で用いている人はいない。公的補助がないことが一因と考えられ、改善が期待される。

片麻痺に代表される片側下肢麻痺患者では、下肢装具や歩行補助具を利用するなどして実用的な歩行を獲得することが多いため、片側下肢麻痺者向けの歩行自立支援ロボットはほとんど実用化されていない。数少ない製品がOttoBock社から発売されているC-Brace<sup>25)</sup>である。同社の電子制御膝継手であるC-Legの技術を応用し、各種センサで歩行状況を検知し、その情報を基に油圧センサが膝関節を制御することで膝折れを防ぐことができる。膝継手だけで1,060gあるので、膝折れのリスクがある重度の片麻痺者においては、振り出しが困難となる可能性が高い。筆者の主観であるが、主な対象は脳卒中片麻痺ではなく、非麻痺側と麻痺側股関節機能が保たれたポリオ、ポストポリオ、末梢神経損傷、片側性脊髄損傷などと考えられる。



図 2 Wearable Power-Assist Locomotor (アスカ株式会社より提供)

### 3. 最後に

ロボット技術が応用されている補装具について紹介した。歩行車や車いすでは、ロボット技術が黒子となっていて、ロボット技術に助けられていることを意識しなくても安全・快適に使用できるが、義肢や装具型ロボットでは、その機能を引き出すためには、使用者がロボットの機能を深く理解し、使いこなす必要がある。例えば、電子制御膝継手は確かに膝折れ防止に有用であるが、本来は適切なアライメントスタビリティと随意制御の獲得によって達成可能であり、傾斜路、不整地、アクティビティに対する対応策として活用すべきと思われる。歩行練習支援装具型ロボットの使用においても、ロボットの補助で見かけ上うまく歩くことに意味はない。ロボットに補助してもらうことは何か、患者に焦点を当ててもらふ課題は何かを考えて、練習をデザインする必要がある。ロボットはとても便利な道具であるが、万能ではない。その限界を知って、上手に活用したい。

### 文 献

- 1) 田中洋平. 電子制御膝継手の特徴と有用性. 義装会誌 36, 240-243 (2020).
- 2) 野坂利也. 電子制御膝継手の調整法. 義装会誌 36, 251-257 (2020).
- 3) 陳 隆明. 筋電義手の現状. J. Clin. Rehabil. 24, 122-127 (2015).
- 4) 田中洋平. 筋電義手・電動義手の現状と課題—医師の立場から—. 義装会誌 34, 110-114 (2018).
- 5) Ottobock社ホームページ. URL:[https://www.ottobock.co.jp/prosthetic\\_ue/myoelectric/myo\\_system/8e38/](https://www.ottobock.co.jp/prosthetic_ue/myoelectric/myo_system/8e38/) (2021年10月1日参照)
- 6) 浅見豊子. 筋電義手における導入と活用のポイント. Jpn. J. Rehabil. Med. 55, 227-233 (2018).
- 7) 田中洋平 他. 上肢切断者に対する能動義手, 筋電義手の現状と課題—当院6年間の義手処方と処方後調査より—. 義装会誌 33, 56-59 (2017).
- 8) 溝部二十四 他. 最新の筋電義手の動向. 義装会誌 36, 110-112 (2020).
- 9) 藤井 仁 他. ロボットアシストウォーカー RT.1の開発. 日本ロボット学会誌 34, 254-259 (2016).
- 10) Kondo, I. et al. Frailty in an aging society and the applications of robots. Jpn. J. Compr. Rehabil. Sci. 47-49 (2019).
- 11) Nakagawa, S. et al. Tandem stance avoidance using adaptive and asymmetric admittance control for fall prevention. IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng. 24, 542-550 (2016).
- 12) Colombo, G. et al. Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegic patients. Spinal Cord. 39, 252-255 (2001).
- 13) Kressler, J. et al. Understanding therapeutic benefits of overground bionic ambulation : exploratory case series in persons with chronic, complete spinal cord injury. Arch. Phys. Med. Rehabil. 95, 1878-1887 (2014).
- 14) 中島 孝. HAL 医療用下肢タイプによる歩行運動療法. Jpn. J. Rehabil. Med. 54, 14-18 (2017).
- 15) Nakashima, T. et al. Cybernetic treatment with wearable cyborg hybrid assistive limb (HAL) improves ambulatory function in patients with slowly progressive rare neuromuscular diseases : A multicentre, randomised, controlled crossover trial for efficacy and safety (NCY-3001). Orphanet J. Rare Dis. 16, 304 (2021).
- 16) Hirano, S. et al. The feature of gait exercise assist robot —Precise assist control and enriched feedback—. NeuroRehabilitation 41, 77-84 (2017).
- 17) 平野 哲 他. 動画で見る リハビリテーションロボットの臨床応用の実際 4. 歩行練習アシスト (GEAR). J.

- Clin. Rehabil. 25, 322-327 (2016).
- 18) Tomida, K. et al. Randomized controlled trial of gait training using gait exercise assist robot (GEAR) in stroke patients with hemiplegia. *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 28, 2421-2428 (2019).
- 19) 籾 拓郎 他. 歩行補助装置 RE-Gait<sup>®</sup>が慢性期脳血管障害患者の歩容改善に及ぼす影響. *J. Clin. Rehabil.* 28, 819-824 (2019).
- 20) Zeilig, G. et al. Safety and tolerance of the ReWalk<sup>™</sup> exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury : A pilot study. *J. Spinal Cord Med.* 35, 96-101 (2012).
- 21) Hartigan, C. et al. Mobility outcomes following five training sessions with a powered exoskeleton. *Top Spinal Cord Inj. Rehabil.* 21, 93-99 (2015).
- 22) Tanabe, S. et al. Design of the wearable power-assist locomotor (WPAL) for paraplegic gait reconstruction. *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.* 8, 84-91 (2013).
- 23) Hirano, S. et al. Comparison between gait-assisting robot (WPAL) and bilateral knee-ankle-foot orthoses with a medial single hip joint in gait reconstruction for patients with paraplegia. *Jpn. J. Compr. Rehabil. Sci.* 6, 21-26 (2015).
- 24) Tanabe, S. et al. Wearable power-assist locomotor (WPAL) for supporting upright walking in persons with paraplegia. *NeuroRehabilitation* 33, 99-106 (2013).
- 25) Thomas, S. et al. A functional comparison of conventional knee-ankle-foot orthoses and a microprocessor-controlled leg orthosis system based on biomechanical parameters. *Prosthet. Orthot. Int.* 40, 277-286 (2016).