事例紹介 NEDO「人間支援型ロボット実用化基盤技術開発」

歩行補助ロボットの開発

Development of Wearable Power Assist Locomotor

村岡 慶裕* 才藤 栄一* *藤田保健衛生大学
Yoshihiro Muraoka* and Eiichi Saitoh* *Fujita Health University

1. はじめに

ヒトが体を動かすとき、脳からの運動指令信号は、脊髓、末梢神経、筋肉へと伝わり、筋収縮、すなわち運動が生じる。脊髓を損傷すると、脳から筋肉への指令が遮断され、運動麻痺を呈する。損傷部位により、対麻痺（下肢麻痺）や四肢麻痺（上下肢の麻痺）を発症する。

対麻痺者にとって、車いすは、利便性の高い唯一の実用的移動手段である。しかし、低い目線での車いす生活は、対麻痺者に大きな精神的負担を課し、さらには内臓疾患や関節拘縮などの弊害をもたらしている。車いすの利便性を維持し、適宜に立位および歩行を実現できる歩行補助装置の開発が望まれる。

従来の歩行補助装具は、股継手が両股関節の外側に位置する「外側系」であり、装着は床上で介助を要し、起立動作も容易ではなく、車いすとの併用が不可能であるため、日常生活ではほとんど使用されていない。一方、才藤らが本邦に導入した股継手を大腿部の内側に配する「内側系」装具 [1] [2] は、体幹部分の拘束感がなく、車いす上での装着、取り外しが可能で、日常生活での使用が可能である。しかし、動力をもたない膝関節伸展位固定の下肢装具では、歩行器を用いた自力での起立動作は不可能であり、歩行の際にも身体への負担が過剰で、約5分間の連続歩行が限界であったため実用化には至らなかった。

本研究では、対麻痺者が、車いすを併用し、歩行器を用いた自立的な起立と、より軽負担で平地歩行を実現する装着型歩行補助ロボット「Wearable Power-Assist Locomotor: WPAL」の開発を目的とした。

2. 開発体制

実用的な人間支援型ロボットを開発するためには、ユーザから工学系開発者など多様な立場の者がお互いに意思疎通をはかり、ユーザのニーズを把握して開発を行える体制

図1 開発メンバー

づくりが必要不可欠である。

我々の研究開発メンバーは、医師4名、訓練を行う理学療法士（以下PT）兼工学博士1名、工学博士7名、義肢装具士1名、PT3名、エンジニア4名、デザイナー2名と総勢22名の異種の専門家で構成され（図1）、週に2日、臨床を有する藤田保健衛生大学にて、開発作業、意見交換、実証試験などを行った。さらに、2名の医師は、対麻痺者でもあったので、他の研究者は、ユーザのニーズを適切に把握することが可能となった。

3. WPALの概要

WPAL本体は、図2に示すように、臨床用内側股継手付長下肢装具に、その股・膝・足の各継手内側に計6個のモータを付加した構成となっている。制御器とバッテリーは、歩行器に搭載した。さらに、ロボット本体部分は、図3に示すように、車いす上も含め常時装着する装具部と、モジュラ構造のロボット部に分割可能となっており、起立・歩行時に、ロボット部を装具部に接合させる構造とした。この構造により、ロボット部のモジュラ化による量産性と、装具部の可調整による個別性が確保される。特に、装具部は、感覚の損なわれている対麻痺者の褥瘡を予防するために、慎重な個別対応が必要である。歩行器や足底には、圧力センサ、電気角度計などを配置し、歩幅、歩行速度、離地タイミングの次歩行のパターンの推定を行った。本センサにより、下肢運動の予測的制御 [3] と、離地モニタによる安全性

原稿受付 2008年8月5日

キーワード: Paraplegia, Gait Analysis, Gait Assist Robot, Primewalk, Orthosis

*〒470-1192 豊明市香掛町田楽ヶ窪 1-98

*Toyoake-shi, Aichi

図2 WPAL 構成：従来装具（左）WPAL 本体（中央）歩行器（右）

図3 WPAL 本体構成（装具部とロボット部の分離可）と車いす上での装着手順

の向上を実現させた。

4. WPAL 歩行訓練・評価システム

乗り物である WPAL は、自動車と同様に転倒などの事故が予想され、自動車教習に相当する WPAL 歩行訓練が、実地使用時の安全対策上必要である。WPAL と自動車を比較すると、自動車教習所はリハビリ訓練室、教習所教官は PT やリハビリ医、公安委員会はリハビリ医に相当する。

我々は、ユーザの操作能力の向上、そして、実地前のユーザおよび本体のリスク評価を、他患者への配慮を要し、時間的・空間的制約のある臨床において実現するために、図4に示すトレッドミルと三次元動作解析装置を組み合わせた省スペースの評価・訓練システム [4]～[6] を構築した。さらに、懸垂装置を設置したことで、安全を確保したうえで、多数歩のデータの取得・訓練が可能となった。

5. 実証試験

胸髄損傷 Th6-12 の5名の被験者の参加により、従来の装具（内側股継手付長下肢装具）に対する優位性を確認した。まず、膝関節伸展位固定の従来の装具では実現不可能であった歩行器使用による起立が、WPAL では全症例において容易に実現された。平地歩行は、4名において歩行器を用いた歩行、1名で医療スタッフ監視下での歩行器を用

図4 WPAL 歩行訓練システム：外観（左）、解析画面（右上）、構成概念図（右下）

いた歩行が可能となった。WPAL の一連操作をほぼ習得した1名の被験者において、トレッドミル上での7分間の連続歩行時の身体負担を計測し、従来の装具と比較した。歩行時のエネルギー効率を示す指標である生理的コスト指数 (PCI (拍/m) = [歩行後心拍数 (拍/分) - 安静時心拍数 (拍/分)] ÷ 歩行速度 (m/分))、心拍数、自覚的運動強度の指標である Borg 指数（運動負荷試験時に、本人に0を安静、10を非常にきつい、としたときの相当段階を申告させる）、上肢筋電図、いずれの指標においても、身体負担の著明な軽減が確認された。これは、特に遊脚期の膝関節が屈曲可能になったことにより、トゥクリアランスを確保するための左右への大きな重心移動の必要がなくなったことが大きな要因と推察された。また、同被験者による約40分間（約580[m]）の連続歩行が実現された。

6. WPAL の発展

将来的には、坂道および階段歩行も視野に入れている。さらに、WPAL 歩行訓練・評価システムによる WPAL 歩行訓練は、免荷式トレッドミル訓練において、これまで人手で行っていたステップ動作をロボットで実現した動力機構付補装具であるロボット型歩行訓練機：Lokomat [7] と同等の機能も有しているため、免荷式トレッドミル訓練が目的としている中枢神経系の再構築を促進する歩行訓練装置としての使用も可能と考えられる。しかも、装着型ロボットである WPAL は、日常生活のなかでの使用が、そのまま訓練にもなっているという利点があり拡張性も高い。脊髄再生医療が現実的に医療現場に導入されたとき、WPAL は中枢神経再生後の中枢神経系再構築のための日常的歩行訓練装置として、その威力を発揮するものと考えられる [8]。

7. ま と め

WPAL は、ユーザの立場から生活のなかで必要とされる機能を徹底追及し、開発されてきた。核となるロボット技

術すなわちシーズが存在し、それを応用できる分野を探して応用するといった従来の技術先行型の開発手順とは異なり、まず支援すべき明確な対象が存在し、それを原点として必要とされる機能を満たす技術を開発、あるいは適用するというニーズ先行型の開発手順を採用した。そのためには、ニーズを的確に把握することが最重要課題であり、開発当初からユーザが開発者として参加することでこの課題を克服した。実証試験においては、ユーザの参加が避けられない。そのため、参加者に対して、安全面も含めた倫理的配慮が必要であった。さらには、ユーザの能力を最大限に高める体制、すなわちロボットを使いこなすための訓練体制も整備した。訓練を通して、ヒトとロボット双方がお互いに融合し、最終的に一つの系として、歩行器による自立的起立と平地歩行を達成した。この開発体制、開発手順こそが、人間支援型ロボット開発における実用化技術といえ、個々のロボット技術にも増し、大きな研究成果であったといえるであろう。

具体的成果としては、対麻痺者がWPALを装着し、これまで不可能とされていた歩行器による車いすからの自力での立ち上がり、限界とされてきた5分間の連続歩行を大きく上回る約40分間の連続歩行を世界で初めて実現した。

従来装具の二つの大きな課題を克服できたことから、対麻痺者の日常生活における歩行再建は、実現にむけて大きく前進した。

謝辞 本稿で取り上げたWPAL開発研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究による。また、本研究成果は、アスカ株式会社 武満知彦氏、中村清和氏、樋口励氏、藤田保健衛生大学 鈴木亨教授、

藤野宏紀先生、清水康裕先生、田辺茂雄講師、伊藤実和先生、土本有香先生、窪田慎治先生、東名ブレース 宇野秋人氏、ティムス株式会社 林正康氏、理化学研究所 向井利春先生、加藤陽先生、高嶋一登先生、愛知県立芸術大学 中島聡准教授、本田敬先生、名古屋大学 宇野洋二教授、香川高広助教、豊橋技術科学大学 福村直博准教授 他との共同研究による。稿を終えるにあたり諸先生に感謝致します。

参考文献

- [1] E. Saitoh, T. Suzuki, S. Sonoda, J. Fujitani, Y. Tomita and N. Chino: "Clinical experience with a new hip-knee-ankle-foot orthotic system using a medial single hip joint for paraplegic standing and walking," Am. J. Phys Med Rehabil, vol.75, pp.198-203, 1996.
- [2] 園田, 才藤, 富田, 田中, 山口, 村岡, 鈴木, 鈴木, 藤谷, 千野: "Walkaboutと機能的電気刺激を用いた対麻痺歩行パターンの分析", 臨床リハビリテーション, vol.6, pp.508-512, 1997.
- [3] 香川, 宇野, 村岡, 才藤: "加速度センサーを用いた滑らかさの規範に基づく手先移動距離の推定", 日本神経回路学会第16回全国大会講演論文集, vol.16, pp.70-72, 2006.
- [4] 大塚, 才藤, 寺西, 金田: "【リハビリテーション医学の進歩と展開】トレッドミル歩行分析と歩行訓練", 現代医療, vol.32, pp.1439-1444, 2000.
- [5] 藤野, 米田, 松永, 才藤, 加藤, 大塚: "不全四肢麻痺者のトレッドミル歩行訓練", 日本脊髄障害医学会雑誌, vol.18, pp.186-187, 2005.
- [6] 大塚, 才藤, 村岡, 山村, 沢田: "トレッドミル歩行分析—リサーチ図形を用いた新しい三次元動作解析法—", 臨床脳波, vol.48, pp.541-546, 2006.
- [7] G. Colombo, M. Joerg, R. Schreier and V. Dietz: "Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis," J. Rehabil. Res. Dev., vol.37, pp.693-700, 2000.
- [8] 村岡, 田辺, 才藤, 香川, 宇野: "リハビリテーション工学の進歩と応用歩行補助ロボットの開発と臨床", The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, vol.44, no.1, pp.29-35, 2007.

村岡慶裕 (Yoshihiro Muraoka)

工学博士, 国立病院機構村山医療センター生体機能制御解析室室長, 慶應義塾大学医学部訪問准教授。1995年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。慶應義塾大学理工学部助手, 藤田保健衛生大学医療科学部准教授を経て, 2008年8月より現職。生体計測, 電気生理学等の研究に従事。ロボットビジネス推進協議会, 宇宙軌道上の運動検討委員会等に所属。

才藤栄一 (Eiichi Saitoh)

医学博士, 日本リハビリテーション医学会専門医。1980年慶應義塾大学医学部卒業。現在藤田保健衛生大学医学部リハビリテーション医学講座教授。専門領域はリハビリテーション医学, 摂食・嚥下障害, 歩行再建, リハビリテーション心理学など。著書に『摂食・嚥下リハビリテーション第2版』医歯薬出版(2007), 『FITプログラム』医学書院(2003), 『リハビリテーション医療心理学キーワード』文光堂(1995)など。社会活動として日本摂食・嚥下リハビリテーション学会理事長, 日本リハビリテーション医学会理事, 日本義肢装具学会理事, Johns Hopkins大学客員教授, Dysphagia Research Society 理事(米国), Dysphagia 編集委員など。