臨床トピックス

脳卒中患者のリハビリテーションにおけるロボット活用

大高洋平*

はじめに

医学・医療分野で工学は，画像診断装置を代表とし，常にその進化を支えている。近年では，ロボット技術の医療応用，なかでも外科やリハビリテーション医学領域においての活用に期待が寄せられている。リハビリテーションで重要なのは，反復練習，適切な介助量・負荷量，課題学習のための難易度調整とフィードバック，そして能動性を引き出す仕組みである。ここで，ロボット機器には，高精度なセンシングと正確なアクチュエータにより介助・負荷量の精緻な設定，定量評価に基づくフィードバック，仮想環境による魅力的課題提供など優れた特徴があり，より良いリハビリテーションを提供できる可能性がある。

脳卒中患者の歩行・バランス機能障害は，患者のADL（日常生活活動）に大きく影響を与えるため，その改善が望まれる。しかし，集中的なリハビリテーションを行った後も移動能力を再獲得できない患者は多く存在する。そこで脳卒中患者の歩行・バランス練習の更なる効果的介入手段が模索されている。

本稿では，リハビリテーション医学におけるロボット活用の中で，実証や実装が進んでいる脳卒中患者の歩行・バランス機能向上のためのロボットについてエビデンスを整理し，更に我々の取り組みについて紹介する。

Key words
脳血管障害，リハビリテーション，ロボティクス，歩行，バランス

* Yohei Otaka：藤田医科大学医学部リハビリテーション医学Ⅰ講座

Ⅰ．歩行・バランス訓練へのロボット活用のエビデンス

ロボットの脳卒中リハビリテーション効果に関するエビデンスは，集積が進んでいる。最新の歩行ロボットの効果に対する系統的レビュー（62試験，2,440人）では[1]，通常訓練と組み合わせてロボット練習を行うことで，有意に歩行自立度（High-quality evidence），歩行速度（Low-quality evidence）が改善するとしている。特にロボットの使用は，脳卒中発症後3カ月以内の患者の歩行自立度を，介入開始時に歩行が自立していなかった患者の歩行速度を改善させるとされ，発症早期で比較的重度の患者がよい適応となる。

また，エビデンスをもとに，ロボットの使用は脳卒中リハビリテーションのガイドラインでも取り上げられている。例えばAmerican Heart Association/American Stroke Associationガイドラインでは[2]，通常練習に組み合わせてロボットによる歩行練習を行うことは考慮されてもよい（Class Ⅱb）とされている。一方，バランス機能については，歩行訓練のロボット使用によって副次的にバランスが改善する効果を認めるという報告がある[3]。

Ⅱ．歩行再建のための リハビリテーション支援ロボット

従来の歩行練習では，下肢装具が重要な役割を果たす。重度片麻痺者では，膝関節と足関節の両方の運動を制限する長下肢装具を用い，膝折れのリスクなく麻痺側に体重をかける練習を行いやすくし，立脚に関する運動学習が進むようにする。そして，十分な立脚ができるようになった後に足関節のみ制限する短下肢装具を使用し，遊脚の練習を積極的に進める。しかし，装具による歩行練習の進め方はシームレスではない。長下肢装具は，膝折れを防ぎ，立脚の難易度を下げることができるが，膝を伸ばした状態で麻痺側下肢を振り出す必要があり，遊脚の難易度が高く振り出しが著しく困難となる。一方で，短下肢装具は，振り出しが容易になるが立脚を支持する力が弱い。

この従来の装具を用いた歩行練習で生じる問題解決という発想から，脳卒中患者のリハビリテーションのための歩行練習支援ロボット，ウェルウォークが開発された。ウェルウォークはロボット脚，低床型トレッドミル，安全懸架装置，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（**図１**）。遊脚期には膝屈曲により足部クリアランスを確保する一方，立脚期には麻痺側下肢支持性を確保することで，前述した長・短下肢装具の問題を解決している。膝伸展および振り出しの補助力は，多段階に調整できる。この調整に加えて，足関節背屈角度設定，膝屈曲開始タイミング，膝屈曲伸展時間，体重免荷量などを患者の歩行能力に合わせて適切に調整できる。前面モニタに，全身・足元・側面像が表示できるほか，姿勢目標，足部接地位置目標，麻痺側荷重量，足圧中心軌跡を重ねて表示することもできる。さらに，膝折れ，目標荷重量についての音声フィードバックが利用可能である。これらの多様なフィードバックにより，運動学習を促進する。

これまでに，いくつかの臨床研究でウェルウォークの効果が検証されている。回復期脳卒中患者において，ウェルウォークのプロトタイプである Gait Exercise Assist Robot：GEAR を用いた練習を行った群と，一般的な訓練のみ行った群の比較において，GEAR 群は歩行自立度の改善を有意に促進した[4]。維持期の脳卒中片麻痺者においても，GEAR 群とトレッドミル群との比較では，歩行速度は GEAR 群においてのみ，介入後と 1 カ月後で向上した。また，介入直後のバランス指標，6 分間歩行距離の改善幅は，GEAR 群で有意に大きかった[5]。また，歩容についても GEAR を用いることで，異常歩行パターンが改善することが報告されている[6,7]。

図１　ウェルウォーク WW-2000（トヨタ自動車株式会社製）の外観

Ⅲ．バランス機能向上のためのバランス練習アシストロボット

これまで，バランス練習に特化したロボット開発と効果検証の報告は少ない。立ち乗り型パーソナル移動支援ロボット「Winglet」と動的なゲームを組み合わせたバランス練習アシストロボット（Balance Exercise Assist Robot：BEAR）は，バランス練習に特化したロボットである（**図２**）。倒立二輪技術を活用し，患者の前後・左右の体重移動がゲームの中のキャラクターと連動する。重心移動課題（テニス，スキー）と外乱に対する重心保持課題（ロデオ）があり，課題を通してバランス機能

図2　バランス練習アシストロボット(BEAR)
外観(A)と3つのゲーム課題(B：テニス、C：スキー、D：ロデオ)。楽しみながらバランス機能の向上をはかる。

(文献8より引用)

の向上をはかる。練習者のバランス機能の回復の度合いに合わせて練習難易度は自動的に設定される。

最近の回復期脳卒中患者を対象にした臨床試験において，通常のリハビリテーションに加えて20分のBEAR訓練を週6日間2週間行うことで，有意なバランス向上が得られることが示された。そして，その効果は同時間の療法士による集中的バランストレーニングと同等であることが示唆された[8]。さらに，BEAR訓練での方が集中的バランス訓練よりも有意に楽しい，という主観的評価を得たと報告されている。今後，更なる検証と機器改良が期待されている。

おわりに

本稿では，リハビリテーションの主要な対象疾患である脳卒中の歩行・バランス訓練におけるロボットの活用について解説した。今後は，どのような機序のロボットを，どのような症状・状態の患者に用いれば良いのか，更に検証がなされロボットの改良と普及が進むことが期待される。

利益相反

筆者は，リハビリテーションロボットの開発研究に関連し，トヨタ自動車株式会社より研究費および寄付講座の支援を受けており，利益相反を有する。

文　献

1) Mehrholz J, et al：Electromechanical-assisted training for walking after stroke. Cochrane Database Syst Rev 2020；10：CD006185.
2) Winstein CJ, et al：Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery：a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. Stroke 2016；47：e98-e169.
3) Wang L, et al：Effects of robot-assisted training on balance function in patients with stroke：a systematic

review and meta-analysis. J Rehabil Med 2021；53：jrm00174.
4) 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 2019；28：2421-2428.
5) Ogino T, et al：Effects of gait exercise assist robot (GEAR) on subjects with chronic stroke：a randomized controlled pilot trial. J Stroke Cerebrovasc Dis 2020；29：104886.
6) Katoh D, et al：The effect of using gait exercise assist robot (GEAR) on gait pattern in stroke patients：a cross-sectional pilot study. Top Stroke Rehabil 2020；27：103-109.
7) Ogino T, et al：Improving abnormal gait patterns by using a gait exercise assist robot (GEAR) in chronic stroke subjects：a randomized, controlled, pilot trial. Gait Posture 2020；82：45-51.
8) Inoue S, et al：Effects of balance exercise assist robot training for patients with hemiparetic stroke：a randomized controlled trial. J Neuroeng Rehabil 2022；19：12.