

特集

ロボットリハビリテーション治療戦略

平野 哲* 大高洋平** 角田哲也***

はじめに

近年、リハビリテーション領域におけるロボットの開発と臨床応用は急速に進んでいる。脳卒中診療ガイドラインや海外のガイドラインにおいても、ロボットを用いたリハビリテーションが取り上げられるようになり^{1,2)}、実臨床においても導入施設は増加している。令和2年度診療報酬改定で運動量増加機器加算が新設されたことも、こうした流れを後押ししている。

ロボットは、適切なタイミングで定量的かつ再現性高く力学的補助を提供できる。また、多数回の反復練習を安定した条件下で実施しやすい。しかし、ロボットを用いれば自動的にリハビリテーション効果が高まるわけではない。ロボットを活用した治療においても、本質は「運動学習をいかに促進するか」にある。

ロボットの適応は、脳卒中、脊髄損傷、神経筋疾患、運動器疾患など幅広い。その中でも脳卒中を主な対象としたロボットは非常に多くの種類が開発され、本邦の回復期リハビリテーション病棟への導入も進んでいる。そこで本稿では、主に脳卒中を対象としたリハビリテーションロ

ボットの特徴とエビデンスを整理した上で、ロボットを用いたリハビリテーション治療戦略について述べる。

1. リハビリテーションロボットの特徵

リハビリテーションロボットの最大の特徴は、運動学習を促進するための変数を精緻に制御できる点にある。運動学習を成功させる4つの重要な要素として、課題特異性(練習した課題そのものが最も上達しやすく、類似した課題ほど効果が転移しやすいという性質)、動機づけ、行動変化(練習によって実際の運動パフォーマンスが変化すること)、保持・汎化(獲得した能力を長期間維持し、他の課題や実生活へ応用できること)が知られている^{3,4)}。そして行動変化には、フィードバック、練習量、難易度が大きく影響する。ロボットは、これらの要素を定量的かつ再現性高く制御しやすいという特徴を有しており、この点がロボットリハビリテーションの大きな価値と考えられる。

難易度調整を行うために、多くのロボットでは複数のパラメータを調整可能である。歩行練習用ロボットであれば、歩行速度、関節運動補助トルク、体重免荷量などを調整できる。上肢機能練習用ロボットであれば、患者が支持部を動かす力や軌道、運動方向性などを調整できる。

フィードバック機能も重要であり、関節角度、荷重量、歩行周期、軌跡偏位などをリアルタイムで提示する機能を備えたロボットも存在する。これは、療法士の視診のみでは得られない定量的情報であり、患者に対する結果の知識(knowledge

— Key words —

リハビリテーションロボット、運動学習、脳卒中、歩行練習

* Satoshi Hirano: 藤田医科大学 医学部リハビリテーション医学講座 臨床教授

** Yohei Otaka: 藤田医科大学 医学部リハビリテーション医学講座 教授

*** Tetsuya Tsunoda: 藤田医科大学 医学部 連携リハビリテーション医学講座 講師

of results : KR) や、運動の知識 (knowledge of performance : KP) として有用である。KR は「目標が達成できたかどうか」に関する結果のフィードバックであり、KP は「どのような動き方をしたか」に関する運動過程のフィードバックである。

さらに、ロボットは評価機器としての側面も持つ。従来、療法士の経験に依存していた異常歩行パターンや時間距離因子などの歩行分析、および練習難易度設定が、データとして記録可能となる。近年では歩行分析機能やパラメータ設定支援機能を備えたロボットも登場しており、経験の少ない療法士でも一定水準の練習設計を行いやすくなってきている。

実用面での利点も大きい。歩行練習では、本来 2 名介助が必要な重度片麻痺患者に対しても、ロボットを用いることにより療法士 1 名で対応可能となることがある。また、上肢ロボットのように転倒リスクが低い機器では、医療者による適切な設定管理の下で自主練習に活用することも可能であり、練習量増加に寄与する。

II. リハビリテーションロボットのエビデンス

上肢ロボット療法については、比較的多くのエビデンスが蓄積している。Liu らの umbrella review では、2019 年以降の 21 件のメタ解析、計 535 件の RCT、27,598 人を統合した結果、ロボット支援練習は従来療法と比べて上肢の運動機能を改善する一方、日常生活活動 (ADL) では有意差を認めなかった⁵⁾。一方、Wang らの network meta-analysis では、ロボット支援訓練は上肢機能 (FMA-UE) の改善に加えて、ADL (Barthel Index, FIM) の改善とも関連することが示された。また、上肢機能の改善には end-effector 型 (手先や足部など末端部を介して運動を誘導するタイプ)、ADL の改善には exoskeleton 型 (身体に沿って装着し各関節運動を直接補助するタイプ) が相対的に有利である可能性が示唆された⁶⁾。ADL への波及が限定的である背景には、ロボット訓練が主として反復的な上肢運動の練習に焦点を当てており、実際の生活動作に近い課題練習が



図1 ウェルウォーク WW-3000

十分でない可能性や、生活場面で必要となる多様な要素が十分に含まれていない可能性がある。

下肢ロボットでは、歩行能力への効果に関する報告が多い。Mehrholz らのメタアナリシスでは、通常理学療法に加えてロボット支援歩行練習を行うことで、歩行の自立を獲得する可能性が高まると報告されている⁷⁾。特に「発症 3 か月以内」「介入開始時点で歩行困難」な症例で効果が高いことが示唆されている。これは、重度症例ほど定量的かつ強力な力学的補助の恩恵を受けやすいためと考えられる。一部のロボットでは、歩行速度や歩行耐久性、歩容の改善も報告されているが、エビデンスは十分ではない。

どのロボットがどの患者に最適かについては、なお未解明な点が多い。ロボットごとに機構や制御思想が大きく異なるため、「ロボット全般」として一括りに評価することには限界がある。

III. ロボットリハビリテーション治療戦略

「ロボットだから特別な治療戦略が必要」というわけではない。ロボットを用いたとしても、本質は従来のリハビリテーションと同じく、運動学習をどう成立させるかにある。

筆者が開発に関わったトヨタ自動車製の歩行練習支援ロボット「ウェルウォーク」(図 1) を例

に説明する。ウェルウォークは片麻痺者の歩行練習を支援するために開発されたシステムで、麻痺側にのみロボット型長下肢装具を装着し、専用のトレッドミル上で歩行練習を行う。荷重センサ(従来機ではロボット型長下肢装具の足底部に内蔵されていたが、最新機のWW-3000ではトレッドミルに内蔵された)や膝関節角度により歩行周期を判定し、遊脚期には膝屈曲を、立脚期には膝伸展を支援する。これにより、従来は長下肢装具が必要なレベルの重度下肢麻痺患者であっても、練習初期から膝屈曲を伴う自然な歩容で歩行練習が可能である。

難易度調整に使用する主要なパラメータとしては、膝伸展アシスト(立脚中の膝伸展トルクを調整)、振り出しアシスト(遊脚期の麻痺側下肢の振り出しを補助する程度を調整)、体重免荷量、歩行速度がある。従来の下肢装具を使った歩行練習では、患者の歩行が自立するまでは、療法士が介助を行うことが一般的であった。触れる程度の介助であれば影響は少ないが、介助量が多く、療法士が患者の運動を制御するような状況では、患者自身は「自分の運動が正しかったのか」を感じ取ることができない。療法士の介助をできるだけロボットの補助に置き換え、患者が適切に身体制御を行えば成功し、不適切であれば失敗する程度の難易度を作り上げることが重要である。これにより、患者は自分自身の身体の適切な制御を学習しやすくなる。

具体的な練習の進め方としては、練習開始時は、必要に応じてロボットの補助を十分に使用し、療法士の介助量をできるだけ減らすことを意識する。患者の歩行が上達してくれば、まず療法士の介助を漸減し、介助が不要となった後に、患者の上達に合わせてロボットの補助を漸減してゆく。常に患者に対して適切な難易度が提供されることで、練習効果の最大化を目指す。患者の能力に対してロボットの補助が多すぎれば、患者の運動学習を阻害する可能性があるので注意する。

フィードバックの選択も重要である。ウェルウォークでは、麻痺側荷重量が設定値を超えた

際に成功音を、立脚中の膝屈曲角度が設定値を下回った際に失敗音を鳴らす機能があり、これはKRに相当する。一方で、前面モニタに全身像や足圧中心軌跡、姿勢偏位を表示し、患者自身が歩行中の身体運動を確認できる機能はKPとして機能する。ロボットは大量の情報を提示できるが、多すぎるフィードバックはかえって混乱を招くことがあるため、その時点で患者に必要な課題に絞って提示するべきである。漫然と多くのフィードバックを与え続けるべきではない。最終的にはロボットなしでの生活を目指す以上、ロボットによる外在的フィードバックへの依存を減らし、内在的フィードバックによる身体制御へ移行させる視点も必要となる。

ウェルウォークは、マーカーレスの歩行分析機能を備えており、身体に反射マーカーやカラーマーカーを装着することなく歩行を解析し、脳卒中片麻痺者に典型的な異常歩行パターンの重症度を提示する。そして、出現している異常歩行パターンの組みあわせによって、膝伸展アシストや振り出しアシストなどのロボット設定パラメータのうち、修正が推奨される項目が優先度順に提示される。必ずしも最適とは限らないが、ロボットの使用に不慣れな療法士にとっては、パラメータ設定の参考になる。また、患者への指示、パラメータ、フィードバックを変更した際には、異常歩行パターンが改善するかを確認することで、療法士の判断が正しかったかを確かめることにも役立つ。

ここまでウェルウォークを例に説明してきたが、全ての患者にウェルウォークが有用とは限らない。ロボットの適応判断も極めて重要である。例えば、対麻痺者向けに開発されたロボットを、そのまま片麻痺患者へ適用しても効果が十分とは限らない。歩行自立度向上を目的とするロボットと、歩行速度や左右対称性改善を目的とするロボットでは、適応となる患者像が大きく異なる。ロボットは万能ではなく、「どの患者に、どのロボットを、どのタイミングで使用するか」を見極める必要がある。

おわりに

リハビリテーションロボットは、練習量の増加、難易度調整、フィードバック提示、定量評価などにおいて大きな可能性を有している。一方で、ロボットを使用すれば自動的に良い結果が得られるわけではない。ロボットリハビリテーションの本質は、従来のリハビリテーションと同様、「適切な運動学習を成立させること」にある^{3,4)}。ロボットは、練習量、補助量、歩行速度、体重免荷量、フィードバック内容など、運動学習に関わる要素を精緻に制御できる優れたツールと位置づけるべきであろう。

さらに、ロボットを使いこなす人材育成も欠かせない。近年はウエルウォークのようにパラメータ設定支援機能を備えたロボットも登場しているが、現時点では最適な難易度設定やフィードバック選択を完全に自動化できる段階にはない。ロボットの特徴と運動学習を理解した医師・療法士が介在することで、初めてロボットの効果が引き出される。

一方で、将来的には、ロボットに蓄積された歩行分析データや設定履歴を活用することで、「どの患者にどの設定が有効か」を解析し、患者ごとに最適化できる可能性がある。従来、装具や歩行補助具の設定は経験依存の側面が大きかったが、ロボットによる定量的データ蓄積は、

歩行練習体系そのものの精緻化に繋がる可能性を有している。ロボットと医療者の双方が進化することで、より質の高いリハビリテーションが実現されることを期待したい。

利益相反

著者らの所属講座は、トヨタ自動車株式会社との共同研究を実施しており、共同研究費の提供を受けている。

文献

- 1) 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.
- 2) 日本脳卒中学会 脳卒中ガイドライン委員会 編 : 脳卒中治療ガイドライン 2021 [改訂 2025]. 協和企画, 東京, 2025.
- 3) Schmidt RA, et al : Motor Learning and Performance, 5th ed. Human Kinetics, Champaign, 2013 ; pp 256-284.
- 4) 才藤栄一 : 運動学習エッセンス. FIT プログラム - 統合的高密度リハビリ病棟の実現に向けて. 医学書院, 東京, 2003 ; pp 89-99.
- 5) Liu S, et al : Robot-assisted therapy for upper limb rehabilitation after stroke : Umbrella review. J Med Internet Res 2026 ; 28 : e79363.
- 6) Wang L, et al : Efficacy of robot-assisted training on upper limb motor function and daily life ability after stroke : a systematic review and network meta-analysis. Front Neurol 2024 ; 15 : 1640522.
- 7) Mehrholz J, et al : Electromechanical-assisted training for walking after stroke. Cochrane Database Syst Rev 2020 ; 10 : CD006185.