

[研究助成 (C)]

片麻痺歩行に対する足関節ロボット治療における 適応者および非適応者の特徴分析

2227005



研究代表者
(助成金受領者)
共同研究者

関西医科大学
大学院医学研究科
関西医科大学
リハビリテーション学部
国際電気通信基礎技術研究所
(ATR)
関西医科大学
リハビリテーション医学講座

博士課程

助教

主任研究員

教授

桑原 嵩幸

森 公彦

野田 智之

長谷 公隆

[研究の目的]

脳卒中後片麻痺患者では、下肢の麻痺により歩行中に十分な推進力（床反力前方成分）を得ることが困難となることで、歩行速度低下などの歩行障害ひいては生活範囲の狭小化に繋がることが報告されている。従って、片麻痺歩行に対する歩行再建では、麻痺側推進力を最大限高める治療が重要である。歩行中の足関節をアシスト出来る足関節ロボットは、麻痺側推進力を改善させる歩行介入エンジンとして近年注目が高まっている。

しかし、足関節ロボットによるアシストを加えても麻痺側推進力が十分に改善する症例（Responders）と改善しない症例（Non-Responders）が存在することが報告されている。しかし、従来の研究では、Responders と Non-Responders の特徴の違いを十分に解明した報告はない。従って、全ての患者に効果的な足関節ロボット治療を展開するためには、Responders と Non-Responders の特徴を同定し、さらに治療前に Non-Responders を Responders に近付ける事前介入を行うことにより、ロボットリハビリテーションの効果を最大化できる可能性がある。

本研究では、「足関節ロボットの治療効果を最大限引き出すためにはアシストだけでなく患

者の準備状態を最適化する必要がある」というアイデアに基づき、足関節ロボット治療における Responders と Non-Responders の歩行の特徴を人工知能も用いて解明し、ロボット治療効果を最大化するための事前介入法を構築することにより人間と機械の調和を目指すことを目的としている。

[研究の内容、成果]

第一研究：足関節ロボット治療における Responders と Non-Responders における歩行特徴の違いを同定

1. 研究目的

足関節ロボット治療の Responders と Non-Responders における歩行の特徴の違いを教師なし学習によるクラスタリング手法を用いて同定すること。

2. 研究対象者

医師により脳卒中片麻痺と診断された 23 名（平均年齢 59.7 歳）を対象とした。除外基準は、脳卒中以外に歩行に障害を来すと考えられる疾患を合併している者や裸足で歩行困難な者とした。

3. 研究方法

対象者に対して、床反力内蔵トレッドミル（テック技販社製）上にて、空気圧人工筋肉付

き足関節ロボット（ATR 製）（図 1）による足関節底屈アシストを対象者ごとに正規化した 100% 歩行周期の 40-60%（麻痺側下肢が後ろに引けているタイミング）に 3 分間加え、アシストなし条件およびアシスト条件における麻痺側推進力を計測した。

対象者の平地歩行の特徴は、肩峰、上前腸骨棘、上後腸骨棘、大転子、大腿骨外側上顆、大腿骨内側上顆、外果、内果、第一中足骨、第五中足骨、踵骨に赤外線マーカーを対象者それぞれに貼付し（図 2）、3 次元動作解析装置（アニマ社製）および床反力計（アニマ社製）（図 3）を用いて、平地歩行における関節角度などの運動学的指標および関節モーメントなどの運動力学的指標をそれぞれ算出した。

算出された歩行データの内、麻痺側推進力と関連すると臨床上予想される歩行指標として、歩行中に麻痺側の爪先が離れるタイミング（TO）における股関節伸展角度および膝関節屈曲角度、足関節底屈角度を算出した。さらに麻痺側足関節底屈モーメントを加えた 4 項目を

それぞれ抽出した。

データ解析では、対象者においてそれぞれ抽出された歩行指標 4 項目を用いて K-means clustering を実装した。最適なクラスター数は先行研究を参考にシルエット法にて決定した。

統計解析では、両クラスター内における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化を Wilcoxon 符号付順位検定を用いて検討した。加えて、両クラスター間における、足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量およびアシストなし条件における麻痺側推進力、抽出された歩行指標 4 項目と先行研究において麻痺側推進力と関連すると報告されている Trailing limb angle（TLA）（麻痺側下肢伸展角度）（図 4）との差を Mann-Whitney U 検定を用いて分析した。また各クラスター内において麻痺側推進力の変化量と歩行指標 4 項目および TLA との関連を Spearman 順位相関係数にて分析した。統計学的有意水準は 5 % 未満とした。



図 1 足関節ロボットによる歩行練習場面

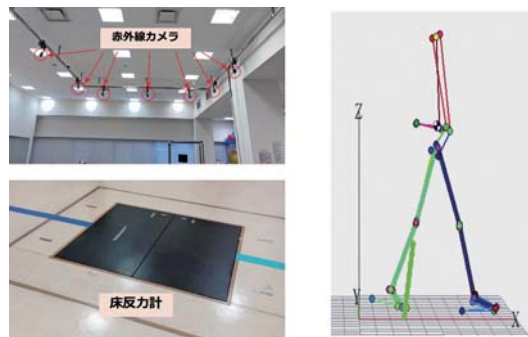


図 3 3次元動作解析



図 2 赤外線マーカー貼付位置

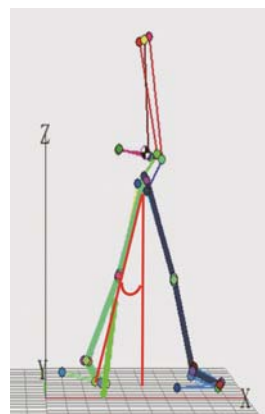


図 4 Trailing limb angle

4. 研究結果

K-means クラスタリングにより対象者は Cluster A (10 例) と Cluster B (13 例) の 2 群に類型化された。

Cluster A および Cluster B における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化を表 1 に示す。Cluster A では足関節アシストにより有意に麻痺側推進力の向上を認めたが、Cluster B では足関節アシストによる麻痺側推進力の有意な変化は認められなかった。

クラスター間における解析結果を表 2 に示す。Cluster B は Cluster A と比べて平地歩行時における TO 時の膝関節屈曲角度および足関節底屈モーメントと TLA が有意に大きかった。足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量および足関節アシストなし条件における麻痺側推進力、TO 時の股関節伸展、足関節底屈角度に群間差は認められなかった。Cluster A および Cluster B の代表的な患者の平地歩行を図 5 に示す。Cluster B の患者では Cluster A の患者と比べて麻痺側下肢伸展角度が大きい特徴があ

表 1 各クラスターにおける麻痺側推進力の変化

Cluster A (N=10)	足関節 アシストなし ¹⁾	足関節 アシスト ¹⁾	P 値 ²⁾
麻痺側推進力 (N/BW)	0.54 [0.45, 0.88]	0.75 [0.61, 0.99]	0.027
Cluster B (N=13)			
麻痺側推進力 (N/BW)	0.74 [0.51, 1.20]	0.78 [0.57, 1.34]	0.146

1) 中央値 [四分位範囲]

2) Wilcoxon 符号付順位検定

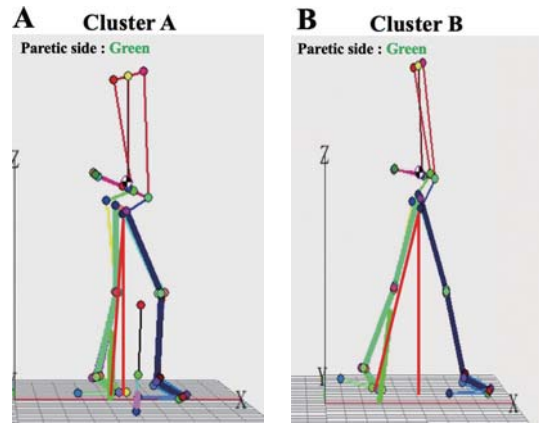


図 5 各クラスターにおける歩行の特徴

ることが分かる。

各クラスター内における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量と平地歩行指標との関連性を表 3 に示す。Cluster A では足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量と TO 時の股関節伸展角度および TLA との間に有意な正

表 3 クラスターにおける麻痺側推進力の変化量と関連する歩行指標

Cluster A (N=10)	麻痺側推進力の変化量 ¹⁾	P 値
TO 股関節伸展角度	0.661	0.038
TO 膝関節屈曲角度	-0.042	0.907
TO 足関節底屈角度	-0.333	0.347
足関節底屈モーメント	0.515	0.128
TLA	0.685	0.029
Cluster B (N=13)	麻痺側推進力の変化量 ¹⁾	P 値
TO 股関節伸展角度	0.264	0.383
TO 膝関節屈曲角度	0.314	0.297
TO 足関節底屈角度	0.501	0.081
足関節底屈モーメント	0.561	0.046
TLA	0.347	0.246

1) Spearman 順位相関係数 (ρ)

表 2 クラスターにおける歩行特徴の違い

	Cluster A (N=10) ¹⁾	Cluster B (N=13) ¹⁾	P 値 ²⁾
アシストによる 麻痺側推進力変化量 (N/BW)	0.11 [0.07, 0.24]	0.06 [0.01, 0.14]	0.182
アシストなし条件の 麻痺側推進力 (N/BW)	0.54 [0.45, 0.88]	0.74 [0.51, 1.20]	0.277
TO 股関節伸展角度 (degree)	-6.18 [-11.99, -4.10]	-8.83 [-12.00, -4.16]	0.828
TO 膝関節屈曲角度 (degree)	23.70 [15.33, 26.93]	47.37 [40.69, 49.34]	<0.001
TO 足関節底屈角度 (degree)	1.22 [0.20, 9.14]	3.71 [-5.97, 12.47]	0.925
足関節底屈モーメント (Nm/HT*BW)	5.15 [4.17, 5.77]	6.29 [6.09, 6.82]	0.003
TLA (degree)	12.61 [8.10, 16.19]	19.71 [12.78, 22.11]	0.007

1) 中央値 [四分位範囲]

2) Mann-Whitney U 検定

の相関関係を認めた。一方 Cluster B では、足関節底屈モーメントのみ麻痺側推進力の変化量との間に有意な正の相関関係を認めた。

5. 考察

足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量は、両クラスターで群間差は認めなかったが、Cluster A では足関節アシストにより有意に麻痺側推進力が増加した。一方で、Cluster B では麻痺側推進力に有意な変化は認められなかった。先行研究では、麻痺側推進力の変化における最小可検変化量 (MDC) は、0.078 N/BW であると報告されている (Kesar et al, 2011)。Cluster A および Cluster B における足関節アシストによる麻痺側推進力の変化量の中央値は、それぞれ 0.11 N/BW, 0.06 N/BW であり、Cluster A のみ MDC を超える変化を認めたことも考慮すると Cluster A の患者群が Responders, Cluster B の患者群が Non-Responders である可能性が考えられた。

クラスター間の特徴に関する分析では、Non-Responders である Cluster B が Responders である Cluster A よりも平地歩行時における TO 時の膝関節屈曲角度および足関節底屈モーメント、TLA が有意に大きい特徴を示した。片麻痺歩行における麻痺側 TLA の拡大および足関節底屈モーメントの増加は、麻痺側推進力の改善に貢献する要因であることが報告されており (Hsiao et al, 2015)、我々の仮説では、平地歩行において TLA や足関節底屈モーメントが大きい患者群ほど足関節アシストが伝達されやすいと予想されるため、Responders になりやすいと考えていた。しかし、Responders の患者において Non-Responders の患者よりも TLA および足関節底屈モーメントが小さいことは我々の仮説に反する結果となった。加えて、我々は Responders の特徴に近付ける事前介入が足関節ロボット治療効果を最大化する上で重要であると考えていたが、平地歩行において推進力が伝達されやすい特徴を持つ Non-Responders を推進力が比較的伝達されにくい

特徴を持つ Responders に近付ける介入は臨床上現実的ではないと考えた。本研究の各クラスター内における麻痺側推進力の変化量と関連する平地歩行指標における解析では、Responders である Cluster A では麻痺側の爪先が離れるタイミングの股関節伸展角度と TLA が有意な正の相関関係を、Non-responders である Cluster B では足関節底屈モーメントが有意な正の相関関係を認めたことから、それぞれのクラスターにおいて足関節ロボット治療の麻痺側推進力の増加に寄与する平地歩行の指標は異なる可能性が考えられる。すなわち、足関節アシストの効果を最大限高めるためには、単に Non-Responder を Responders に近付ける介入ではなく、Responders と Non-responders のそれぞれに応じた事前介入が重要である可能性が本研究の結果から新たに示唆された。

本研究の結果より、足関節ロボット治療を最大化させるためには、Responders には歩行時の麻痺側下肢伸展角度を拡大する事前介入が効果的であり、Non-Responders には麻痺側足関節底屈モーメントを増加させ、蹴り出しを改善する事前介入が有効である可能性が推察された。

第二研究：Responders および Non-Responders に対する事前介入が足関節ロボット治療に与える効果

1. 研究目的

第一研究にて Responders 群および Non-Responder 群と同定された対象者それぞれに応じた事前介入が足関節ロボットの効果に与える影響を検証すること。

2. 研究対象者

第一研究にて、Responders である Cluster A と判断された 50 歳代の右片麻痺男性（第一研究における麻痺側推進力の変化：0.094 N/BW）と Non-Responders である Cluster B と判断された 40 歳代の右片麻痺男性（第一研究における麻痺側推進力の変化：0.011 N/BW）とした。

3. 研究方法

足関節ロボット治療前の事前介入として、Cluster A の対象者には、高速度でのトレッドミル歩行練習（図 6）により歩行中の麻痺側 TLA を増加させる治療介入を 1 度行った後、再度足関節ロボットによるアシストが麻痺側推進力に与える影響を検討した。Cluster B の対象者には、麻痺側下肢片脚立位での踵挙げや歩行中の蹴り出しを意識させ麻痺側足関節底屈モーメントの向上を目指した歩行練習を週 1-2 回の頻度で 1 ヶ月間行った後、足関節ロボット治療による効果を再検討した。事前介入による各歩行指標の変化は、Cluster A の対象者では、マーカーレス動作分析装置（アニマ社製）を用いて事前介入前後におけるトレッドミル歩行中の麻痺側 TLA の変化を評価した。加えて、Cluster B の対象者では、第一研究と同様に 3 次元動作解析装置を使用し、事前介入前後の平地歩行における麻痺側足関節底屈モーメントの変化を分析した。

足関節ロボット治療における計測項目は、第一研究と同様に、歩行中の麻痺側下肢に足関節底屈アシストを 40-60% 歩行周期のタイミングに加え、アシストなし条件および足関節アシスト条件における麻痺側推進力を対象者ごとにそれぞれ算出した。

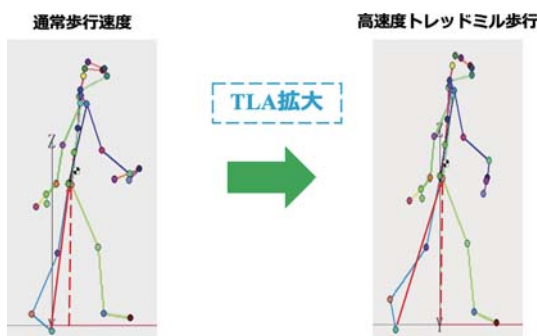


図 6 高速度トレッドミル歩行における麻痺側 TLA の変化

4. 研究結果

Cluster A の対象者

1 回の事前介入により対象者の麻痺側 TLA

は 23.0° から 24.2° まで拡大を認めた（図 7）。また足関節アシストにより麻痺側推進力は、 1.183 N/BW から 1.354 N/BW に増加した（表 4）。

Cluster B の対象者では、1 ヶ月間の事前介入により、歩行中の麻痺側足関節底屈モーメントは、 5.52 Nm/HT*BW から 6.13 Nm/HT*BW まで増加し（図 8），足関節アシストにより麻痺側推進力は、 0.510 N/BW から 0.638 N/BW に改善を認めた（表 4）。

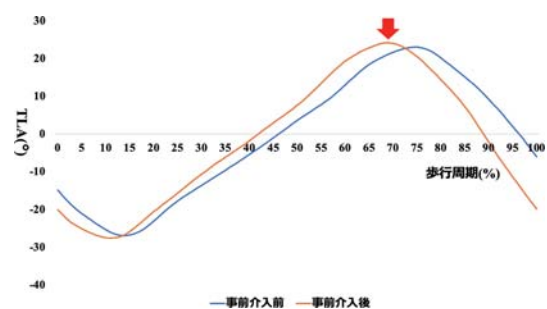


図 7 Cluster A の対象者における事前介入による TLA の変化

表 4 各対象者における足関節ロボット治療後の麻痺側推進力の変化

Cluster A の対象者	足関節 アシストなし	足関節 アシスト	変化量
麻痺側推進力 (N/BW)	1.183	1.354	0.171
Cluster B の対象者	足関節 アシストなし	足関節 アシスト	変化量
麻痺側推進力 (N/BW)	0.510	0.638	0.128

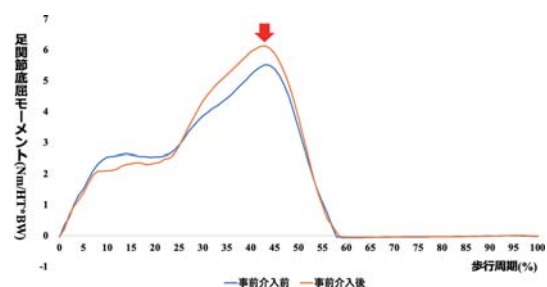


図 8 Cluster B の対象者における事前介入による足関節底屈モーメントの変化

5. 考察

Responders である Cluster A の対象者および Non-Responders である Cluster B の対象者に対して、それぞれのクラスターの特徴に応じた事前介入を行うことにより足関節アシスト

の効果を更に高めれる可能性があることが本研究から示唆された。Cluster A の対象者および Cluster B の対象者に対する事前介入後の足関節アシストによる麻痺側推進力の変化は、いずれも第一研究における麻痺側推進力の変化よりも大きな向上を示し、MDC である 0.078 N/BW を超える変化を両者共に認めていることから、各クラスターの特徴に応じた事前介入は足関節ロボット治療において重要である可能性が示唆される。加えて、特に第一研究において、Non-Responders であった Cluster B の対象者が事前介入後のロボット治療では、MDC を越える麻痺側推進力の向上を示したことから、患者の特徴に応じた足関節アシスト歩行練習前の事前介入は、Non-Responders の患者を Responders に変化させる可能性があることも推察された。

麻痺側推進力は、TLA および足関節底屈モーメントで構成され (Hsiao et al, 2015)、脳卒中患者においてはその貢献率は、TLA が足関節底屈モーメントの約 4 倍であることが報告されている。従って、脳卒中片麻痺患者における麻痺側推進力の伝達には、歩行中の TLA の拡大を目指すことが重要となる。一方で、歩行速度の向上に伴う足関節底屈パワーの貢献度は、歩行機能が高い患者群でのみ高く、歩行機能が低い患者群では貢献しないことも報告されている (Jonkers et al)。これらから、片麻痺患者における麻痺側推進力の向上に伴う歩行機能改善には、歩行機能が低い患者では、TLA の拡大に着目し、歩行機能の高い患者では、TLA のみならず足関節底屈モーメントの改善を目指した介入も重要であることが示唆される。本研究において、Responders である Cluster A の患者群は、Non-Responders である Cluster B の患者群よりも歩行機能が低い特徴を持つ。従って、Cluster A においては、TLA の拡大を目的とした事前介入により足関節アシストが推進力として伝達されやすかったと考えられる。一方、歩行機能が比較的高い Cluster B では、

TLA ではなく、足関節底屈モーメントを高める事前介入が麻痺側推進力の改善に効果的であったと推察された。

本研究の結果から、足関節ロボット治療における Responders および Non-Responders の特徴に応じた事前介入によりその後の足関節アシストの効果をより高められる可能性が明らかになった。これらから、足関節アシスト歩行練習では、ロボット治療前の歩行状態を事前に調整することにより、Responders ではより治療効果を高めることができ、Non-Responders では、Responders に変化できる可能性が示唆された。

6. 今後の展望

本研究では、「足関節ロボットの治療効果を最大限引き出すためにはアシストだけでなく患者の準備状態を最適化する必要がある」というアイディアに基づき、第一研究および第二研究を行った。第一研究では、足関節ロボット治療の効果を最大限高めるためには、単に Non-Responders を Responders に近付ける介入ではなく、Responders および Non-Responders のそれぞれの特徴に応じた事前介入が重要であることが示された。また、第二研究では、実際に、Responders および Non-Responders に対する事前介入により足関節アシストの効果をさらに高められる可能性が示唆された。

今後は、さらに被験者数を増やし、Responder および Non-Responders に対する事前介入が足関節ロボット治療に与える効果を検証し、体系的な足関節ロボット治療アルゴリズムの構築を行っていく必要がある。

[成果の発表、論文など]

桑原嵩幸, 森公彦, 久保鳴峰, 間野直人, 中條雄太, 野田智之, 長谷公隆: 片麻痺歩行の麻痺側推進力を増加させる高速度トレッドミルと併用した足関節アシスト歩行練習の効果, 第 59 回リハビリテーション医学会学術集会, 2022 年 6 月 22-25 日, 横浜
桑原嵩幸, 森公彦, 久保鳴峰, 間野直人, 中條雄太, 寺前達也, 野田智之, 長谷公隆: 足関節ロボット歩行練習において麻痺側推進力を増加させる底屈アシ

ストタイミングの検討, 第 20 回日本神経理学療法学会学術大会, 2022 年 10 月 15-16 日, 大阪
Takayuki Kuwabara, Kimihiko Mori, Takanari Kubo, Naoto Mano, Yuta Chujo, Tatsuya Teramae, Tomoyuki Noda, Kimitaka Hase: Gait characteristics of patients with increased paretic propulsion during ankle-assisted gait training-Analysis using machine learning-, 第 20 回日本神経理学療法学会学術大会, 2022 年 10 月 15-16 日, 大阪
桑原嵩幸, 森公彦, 久保鳴峰, 間野直人, 中條雄太,

脇田正徳, 寺前達也, 野田智之, 長谷公隆: 足関節ロボット歩行練習において麻痺側床反力の特徴を用いた底屈アシストタイミングの検討, 第 48 回日本運動療法学会学術集会, 2023 年 6 月 17 日, 大阪
桑原嵩幸, 森公彦, 久保鳴峰, 間野直人, 中條雄太, 寺前達也, 野田智之, 長谷公隆: 片麻痺歩行の立脚期後半における制動力が足関節ロボット底屈アシストのタイミング設定に及ぼす影響, 第 60 回日本リハビリテーション医学会学術集会, 2023 年 6 月 29-7 月 2 日, 福岡