

## ロボットによる歩行支援が通常歩行時の歩容に及ぼす影響

After-effect of robotic assistance on walking pattern during normal walking

1091008



研究代表者 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 助教 上林清孝

共同研究者 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 助教 河本浩明

### [研究の目的]

近年、障害者の歩行回復訓練や高齢者の歩行支援にロボット技術が応用され始めている。しかしながら、ヒトの二足歩行に対する最適なアシスト方法は確立されておらず、機械的な歩行アシストによって生じる歩容の適応変化も明確ではない。そこで、健常者の歩行時にロボットアシストを与えることで、その後の歩行パターンが影響を受けるのか調べることを本研究の目的とした。ヒトの運動プログラムがロボットによる運動支援でどのように修正されるのか調べるこの研究は、ヒトの適応性を評価するものであり、ヒトと機械の調和という観点からも重要な研究課題であるものと考えられる。

### [研究の内容, 成果]

健常成人男性 10 名 (身長  $172.8 \pm 4.4$  cm, 体重  $62.9 \pm 7.1$  kg, 年齢  $24.0 \pm 3.9$  歳) が被験者として実験に参加した。ロボットアシストによる歩行支援には、両脚用のサイボーグ型ロボットスーツ HAL (Hybrid Assitive Limb, Cyberdyne 社製) を用いた (図 1)。このロボットスーツは股関節と膝関節にパワーユニットを装備しており、表面電極における下肢筋群の電位信号を基にトルクを与えて歩行支援を可能とする。

本研究では歩行アシストによる歩容の適応変



図1 サイボーグ型ロボットスーツ

化を調べるため、歩行における下肢 3 関節の角度変化やステップ長をビデオ映像による 3 次元動作解析から算出した。片脚あたり 2 台、計 4 台のデジタルビデオカメラ (HDR-CX550V, Sony 社製) で撮影を行い、動作解析システム (Frame-DIAS IV, DKH 社製) を用いて映像をデジタル化した。ビデオ映像は非インターレース化によって 60 Hz のサンプリングにて分析した。身体ランドマークに用いた反射マーカは直径 20 mm で、臨床歩行分析研究会で推奨されている両脚の第 5 中足骨骨頭、足関節外果、大腿骨外側上顆、大転子中央と上前腸骨棘を結んだ直線上で大転子から 1/3 の位置、肩峰の計 10 点に貼付した (図 2)。左右方向を X 軸、進行方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とし、DLT (Direct Linear Transformation) 法にて 3 次元座標値を割り出した。

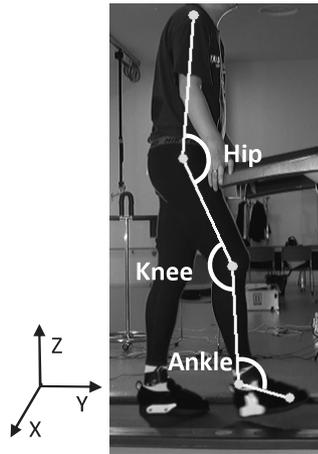


図2 身体マーカ位置と関節角度定義

歩行はトレッドミル (T630, SportsArt Fitness 社製) にて行い、速度は 3.5 km/h とした。ロボットスーツの大腿および下腿の長さは、あらかじめ被験者の脚長に合わせて調節した。歩行中、視線は前方の注視点に向けさせ、腕振りはずにトレッドミルの手すりを指で軽く掴ませた。歩行時には歩容を強く意識することなく、通常時と同様に歩くよう指示した。

実験プロトコルは、ベースラインとして3分間の通常歩行 (Pre 条件) を行った後、ロボットスーツを装着し、10分間のアシスト歩行 (Assist 条件) を実施した (図3)。その直後にロボットスーツをはずし、再度5分間の通常歩行 (Post 条件) を行い、後効果 (after-effect) として歩容の変化を観察した。それぞれの歩行条件で、歩行開始 30 秒後からを初期 (Early: E 期間)、Pre 条件で 1.5 分、Assist 条件で 5 分、Post 条件で 2.5 分からを中期 (Mid: M 期間)、条件終了の 30 秒前からを後期 (Late: L 期間) として動作解析を行った (図3)。時間の計測はトレッドミルが 3.5 km/h の定常速度

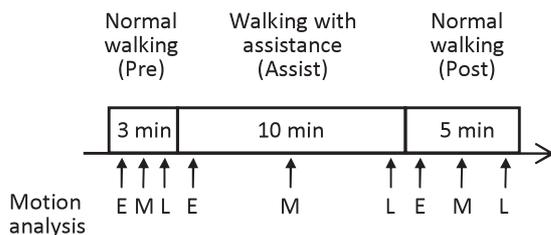


図3 実験プロトコル

に達してからスタートした。各期間ともに 10 歩行周期を解析した。

定量的な評価項目として、1 歩行周期における股・膝関節での最大伸展・屈曲角度から屈伸角度範囲、足関節の最大底屈・背屈角度から底背屈角度範囲を算出した。歩行周期時間は、右脚の第 5 中足骨頭の矢状面座標データを用いて、最大の進行方向位置を基準に割り出した。また、イニシャルコンタクト時の左右の第 5 中足骨頭マーカでの進行方向位置の差 (2 点間距離) からステップ長を計算した。歩行周期とステップ長は、Pre・Assist・Post 条件のすべての期間で計測したが、ロボットスーツによって反射マーカが隠れてしまうことがあるため、関節角度は Pre および Post の通常歩行時でのみ解析を行った。各データ値は、平均値 ± 標準偏差で示した。

図4は、各歩行条件の初期に1名の被験者で得られた左右脚の第5中足骨マーカの矢状面リサージュ図形である。Pre 条件と比較して、Assist 条件での地面に対するマーカ位置は遊脚初期には低かったが、接地直前にはより上昇していた。また Pre 条件に比べて、Assist 歩行時ではステップ長の延長 (右 9.2cm, 左 6.3cm) が観察された。一方、Post 条件では Pre 条件と比較して軌跡にばらつきが大きく、遊脚中期で中足骨位置が高くなる傾向を示したものの、移動パターン自体は Pre 条件に類似していた。

図5は、全被験者による左右脚のステップ長および歩行周期時間の平均である。Pre 歩行と

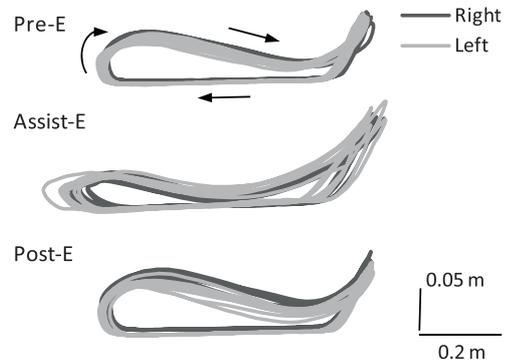


図4 矢状面における第5中足骨のリサージュ図形

Assist 歩行の E・M・L の 3 期間で得られた値に経時的な変化がみられなかったため、3 つの歩行期間での平均値を用いてグラフ化した。左右ともにステップ長は、Pre 条件に比べて Assist 条件で延長がみられ、左右平均で 7.3 cm 変化していた。Post 条件の 3 期間では、初期からすでに Pre 条件でのステップ長に戻っていた。

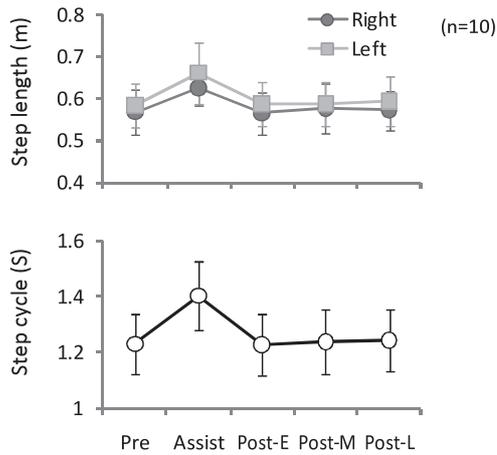


図5 ステップ長と歩行周期時間

同様に、歩行周期においても Assist 条件では Pre 条件に比べて  $173 \pm 106$  ms 長くなった (図5)。Post 条件の 3 期間では、初期で最も歩行周期が短く、その後わずかな増加傾向がみられたものの、Pre 条件での歩行周期時間と有意な差はみられなかった。

図6は全被験者で1歩行周期での各関節の角度範囲を平均したものである。Assist 歩行時には角度を計測することができなかったため、Pre と Post 条件での比較となっている。この図においても、Pre 条件では初・中・後期の 3 期間を平均化したものを代表値とした。各関節ともに、Post 条件の 3 期間で関節角度範囲に有意な変化は生じず、Pre 条件での角度変化と同様であった。

しかしながら、股関節の角度範囲では Post 条件の初期 (開始 30 秒後) に減少する傾向が半数の被験者に観察され、その解析時間より前にはさらに減少しているようであった。そこで、

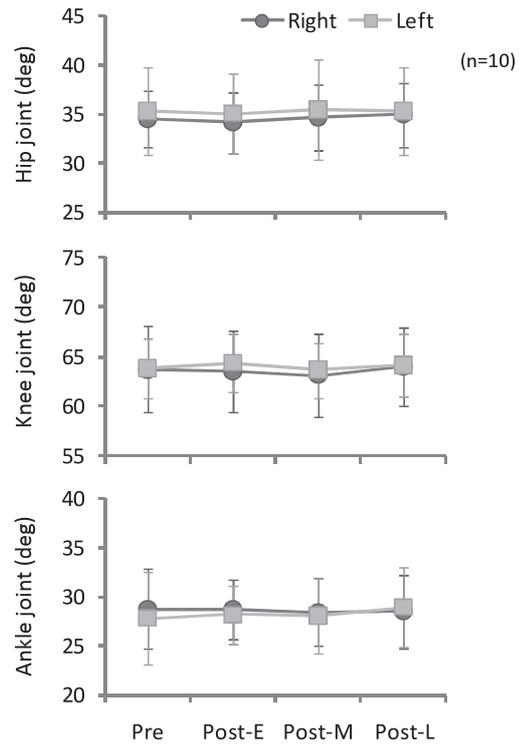


図6 1歩行周期における股・膝・足関節の角度変化

それら 5 名の被験者を対象として、より詳細に after-effect を調べる目的で、Post 条件の歩行開始時から 1 分後までの期間にて追加解析を行った。3.5 km/h の歩行速度に達した測定開始時から 10 秒ごとに区分し、各区分内のステップで股関節と膝関節の屈伸角度範囲を平均した結果が図7である。屈伸角度範囲は Pre

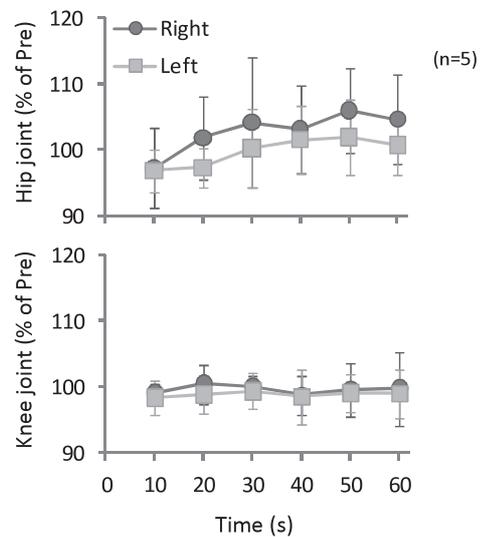


図7 Post 歩行開始 1 分間での股・膝関節の角度変化

歩行における3期間の平均値を100%に相対化して表示した。Post開始10秒間では、股関節の屈伸角度がPre条件のおよそ97%であり、その後に漸増する変化が両脚にみられた。その1ステップにおける関節角度範囲はPost開始から1分以内で定常レベルに達するようであった。一方、膝関節においては、そのような屈伸角度範囲の経時的な変化がみられなかった。

#### [今後の研究の方向, 課題]

通常歩行と同一速度でのアシスト歩行によって、ステップ長や歩行周期時間が通常歩行に比べて延長されており、今回測定していない関節の角度変化パターンや発揮トルクも通常歩行とは異なっていたものと思われる。本研究では10分間の歩行アシストによってその後の歩容に生じる影響を調べる目的であったが、全被験者での平均からみた場合、Post条件で30秒経過した段階において測定項目には明確な適応変化が観察されなかった。しかしながら、Post歩行開始直後には半数の被験者において股関節の屈伸角度で経時的な変化が生じていた。したがって、今回のアシスト条件では全被験者から適応変化を引き起こすほど強い影響はなかったものと示唆される。そのため、今後はより長時間での歩行支援やアシストトルクを増大することでafter-effectを調べる必要があるだろう。

実際のアシスト歩行によって随意的な力発揮がどの程度が軽減していたのかについても、発

揮トルクや筋活動量などの評価項目によって定量的に評価すべきであろう。カメラ配置の変更などによって反射マーカがロボットスーツに隠れてしまう点を補足し、アシスト歩行時の角度変化や関節トルクを計測する計画である。

加えて、本研究結果から膝関節よりも股関節において適応変化が生じやすい可能性があげられる。ヒト二足歩行の遊脚期においては、大腿部と下腿部はつながった振り子として運動し、その原動力は股関節屈筋であり、膝関節の屈曲・伸展は受動的であることがこの結果に関連するかもしれない。今後はこの点についても実験プロトコルを工夫して調べていく予定である。

このようなロボットによる歩行支援でヒト側に生じる変化に関する研究結果を蓄積することで、障害者に対する歩行訓練の効率化や歩行関連機器の開発へとつながることが期待される。

#### [成果の発表, 論文等]

- 1) 上林清孝, 中島剛, 小川哲也, 中澤公孝: 受動歩行時の速度増加による皮質脊髄路興奮性の促通とH反射経路の抑制. 第65回日本体力医学会大会 (2010. 9)
- 2) 上林清孝: ロボット型歩行支援装置の使用経験について. マスターズレーブ方式リハビリテーションシステム研究会 (2010. 12)
- 3) K. Kamibayashi, T. Nakajima, M. Takahashi, K. Nakazawa: Changes in input-output relations in the corticospinal pathway to the lower limb muscles during robot-assisted passive stepping. 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (2011. 9 発表予定)