

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月27日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2012

課題番号：23680059

研究課題名（和文） ロボットによる歩行支援で生じる感覚運動適応の解明：歩行機能回復への支援に向けて

研究課題名（英文） Sensorimotor adaptation induced by robotic assistant during walking: toward recovery of walking function

研究代表者

上林 清孝 (KAMIBAYASHI KIYOTAKA)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：70415363

研究成果の概要（和文）：本研究では健常者および歩行機能障害者に対する外骨格型ロボットの歩行支援によって生じる歩容の適応変化を動作解析や筋電図解析から明らかにすることを目的とした。神経系で生じる適応をより詳細に調べるために、アシスト歩行前後に電気生理学的検査も実施した。ロボットアシスト有無によって、歩容や筋活動パターンは健常者、歩行機能障害者ともに変化した。また、ロボットアシスト歩行の前後に行った通常歩行を比較した場合に、歩行速度の遅い患者ではステップ長や筋活動パターンに変化がみられた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to investigate adaptive changes in the lower limb movement and electromyographic (EMG) activities of the lower limb muscles following robot-assisted walking in healthy subjects and patients with locomotor disorder. Electrophysiological techniques were also used to investigate short-term adaptation in the neural pathways before and after the robot-assisted walking. The walking pattern and EMG activities of the lower limb muscles differed between normal walking and robot-assisted walking in healthy subjects and patients with locomotor disorder. By comparing walking parameters between normal walking conditions conducted before and after the assisted walking, changes in the step length and EMG pattern were observed in the patients who have slow walking speed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2012年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
年度			
総計	11,000,000	3,300,000	14,300,000

研究分野：神経生理学

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：神経科学、歩行、ロボット、歩容、リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

昨今の神経科学分野における研究成果によって中枢神経系の可塑性に関する数々の証拠が示され、ニューロリハビリテーションと呼ばれる神経系の回復を目指した積極的

なリハビリテーションが行われるようになってきている。その代表例に、脳卒中や脊髄損傷等の神経疾患による歩行機能障害者に対する免荷式歩行訓練があげられる。この歩行訓練はトレッドミル上で患者の体重を免荷し、

麻痺脚をセラピストが徒手的に歩行様に動かすもので、旧来のリハビリに比べて歩行再獲得の可能性が高まるとの報告がなされている(Wernig et al. 1995, Barbeau & Fung 2001)。しかしながら、この介入方法ではセラピストの徒手アシストに頼るため、訓練には質的・量的限界があったが、ロボティクスを応用した歩行アシストロボットの開発によって安定した歩行パターンにて長時間の訓練が行えるようになり始めている。また、高齢者に対して日常の身体動作を支援するためのアシストロボットも開発されている。しかしながら、ロボットアシストによる歩行に対して、最適な支援方法（トルクアシストのタイミングやその大きさなど）や歩行リハビリテーションの訓練プロトコル（訓練時間、訓練頻度など）が確立されていないことが現段階の問題点にあげられる。これらの要因を検討するため、まずロボットアシストを受けることでヒトの歩行様式がどう変容されるのか、適応に関して調べるのが重要となる。歩行支援後に歩容が著しく変化するようであれば、転倒原因にもなりえることから歩容変化について検証する必要があるものと思われる。

2. 研究の目的

歩行機能障害者の歩行訓練や高齢者の歩行支援を目的とした歩行支援ロボットが開発されているが、ロボットによる歩行支援がヒト側にどのような適応変化を生じさせるのか明らかとなっていない。ロボットアシストを用いた訓練プロトコルやアシスト方法を確立するうえでもロボットアシストによってもたらされる適応を調べることは重要な課題と考えられる。本研究では、歩行支援前後にロボットを装着せずに行う通常歩行を三次元動作解析や下肢の筋活動パターンから比較し、アシスト後に生じる変化を明らかにすることを目的とした。さらには、歩行支援を繰り返し行うことで適応に慣れ効果が生じるのか調べることにした。その他にも研究計画を一部変更し、関節トルクを支援されたアシスト歩行前後に Hoffmann 反射 (H 反射) や経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation: TMS) の電気生理学的指標から脊髄反射路や皮質脊髄路の興奮性変化を調べ、ロボットアシスト歩行でもたらされる神経系の適応変化を明らかにすることを研究目的とした。

3. 研究の方法

(1) 股関節と膝関節にパワーユニットを装備した外骨格型の歩行アシストロボットを用い、ロボットによる関節トルクが歩行の位相にあわせて両脚に与えられ、歩行運動がアシストされた。このロボットによる歩行アシ

スト前後には、外骨格ロボットを装着しない状態で通常歩行を実施した。健常成人ではトレッドミルにて 3.5 (もしくは 2.5) km/h の速度でロボットアシスト歩行前後の通常歩行 (Pre および Post 条件) とロボットアシスト歩行 (Assist 条件) を実施した。脊髄不全損傷や脳卒中による歩行機能障害者では、フロア上で快適速度による歩行を Pre および Post 条件とし、Assist 条件もフロア上で速度は規定せず実施した。研究に参加した歩行機能障害者はいずれも慢性期患者であり、見守りで歩行が可能であった。Pre と Post の通常歩行時には日常使用している補助具を使用した。転倒を回避するため、Assist 条件ではハーネスを装着するタイプの移動式歩行器を用いた。歩行時の下肢の動きは複数台のデジタルビデオカメラによって撮影を行い、テレメータ式の表面筋電システムによって両側の下肢筋群 (主に大腿直筋、大腿二頭筋、ヒラメ筋、前脛骨筋) から筋活動を記録した。ビデオカメラの映像は動作解析システムを用いて、後に三次元化した。

(2) ロボットアシスト歩行によってヒト側に生じる適応を神経生理学的側面から検討するため、ロボットアシスト歩行の前後に安静座位の状態、H 反射や TMS によって神経路の興奮性変化を調べた。単シナプス性脊髄反射興奮性の指標となる H 反射では後脛骨神経への経皮的電気刺激 (1 ms 矩形波) を膝窩部に与えることでヒラメ筋に誘発した。刺激強度の大きさは最大 M 波振幅の 10% にあたる M 波が誘発される強度とした。TMS では運動野下肢領域の頭皮上に刺激コイルを固定し、前脛骨筋に対する安静時運動閾値の 1.05 倍の強度で刺激を与えた。下肢の筋電図上に導出される運動誘発電位の振幅から皮質脊髄路の興奮性を評価した。

4. 研究成果

(1) 9 名の健常者における Assist 条件では通常歩行とは異なった歩行パターンとなり、Assist 条件でのステップ長は Pre 条件よりも 7.3 ± 5.2 cm 延長し、歩行率は Assist 時に低下した (Pre: 49.5 ± 4.3 steps/min, Assist: 43.1 ± 3.9 steps/min)。このようにアシスト歩行時にはステップ長が長くなり、歩行周期時間が延長する変化がみられた。しかしながら、アシスト歩行前後に行った通常歩行を比較してみると、ステップ長や歩行率で大きな変化はなく、アシスト歩行による強い残存効果は観察されなかった。

歩行機能障害者において Pre 条件と Assist 条件で歩容を比較してみると、平均値では健常者と同様に Assist 条件で歩行率の低下がみられた。脳卒中片麻痺患者では麻痺側の単脚支持期の延長が特徴的であり、歩行支援時

の歩容は左右の対称性が強まった。計測した全患者による平均値でみるとフローアでの歩行速度はPre条件よりもAssist条件で遅かったが、通常歩行時の歩行速度が遅い患者ではAssist条件で速度増加がみられた。したがって、残存歩行機能によってロボットアシストから受ける効果が異なる可能性が示唆された。PreとPostの通常歩行条件を比較してみると、ほとんどの患者で明確な変化がみられないものの、通常歩行時のステップ長が比較的短い3名の脳卒中患者ではPost条件でステップ長が延長するafter-effectが観察された。また、脊髄不全損傷2名でも同様に、Post条件でステップ長に延長が生じた。図1は通常歩行条件間で変化がみられた歩行機能障害者5名のステップ長と歩行速度を示している。Post条件でのステップ長の延長に伴い、歩行速度もPre条件に比べて速まっていた。平均増加率でみると、ステップ長は $15.5 \pm 4.1\%$ 、歩行速度は $18.9 \pm 16.2\%$ であった。歩行率の増加は3.1%に留まっていたことから、歩行速度の増加はステップ長の延長が関連したものと考えられる。日を変えて再度計測した場合にもこれらの歩行機能障害者ではAssist条件後にステップ長の延長が確認されており、再現性の高い現象であった。

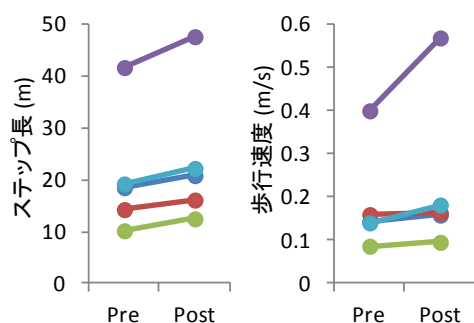


図1 アシスト歩行後にステップ長が延長した歩行機能障害者におけるステップ長と歩行速度の変化 (Pre: アシスト歩行前, Post: アシスト歩行後)

筋活動からみてみると、通常歩行とアシスト歩行では活動パターンに相違がみられた。歩行条件間の筋活動パターンの変化については患者間で相違が大きく、平均化して論じることは困難であった。脳卒中患者では健側の筋活動が減少する一方、患側では増加しているケースが比較的多くみられた。患側での活動レベルの増加は患側の単脚支持期の延長に関連したものかもしれない。また、接地時の下腿筋群の活動レベル減少がAssist条件にみられたが、これは歩行機能障害者では通常歩行に比べてロボットアシスト歩行での歩行速度が遅いことに起因するかもしれない。Assist条件での歩行速度が遅いことで接地時にかかる衝撃も小さくなり、筋活動が弱まっている可能性がある。そのため、より

詳細な検討には、通常歩行とアシスト歩行を同一歩行速度で今後計測する必要がある。

図2にはPost条件での歩行速度がPre条件よりも速くなった代表例として、脊髄不全損傷患者1名の筋活動パターンを示した。各歩行条件で1歩行周期の長さが異なるため、時間成分は歩行周期時間で標準化した。左膝の最大屈曲時を時間軸0としており、歩行周期10%から80%あたりが左脚のスタンス期となり、右脚では65%くらいからスタンス期が開始し、30%あたりで離地していた。筋活動パターンに関して、最も歩行速度が速かったAssist条件の接地タイミングでヒラメ筋に大きな筋活動がみられ、伸張反射が誘発されているようであった。また、立脚後半にもヒラメ筋の活動レベルが高くなった。一方、前脛骨筋では、Assist条件のスタンス期に活動レベルが低くなる変化がみられた。このように、アシスト歩行で、ヒラメ筋と前脛骨筋の拮抗的な活動が顕在化した。この患者ではPre条件に比べてPost条件で歩行速度が増加していたが、筋活動からみると右脚で活動の開始タイミングがPre条件よりも早まっております、Assist条件と同様のタイミングに変化していた。

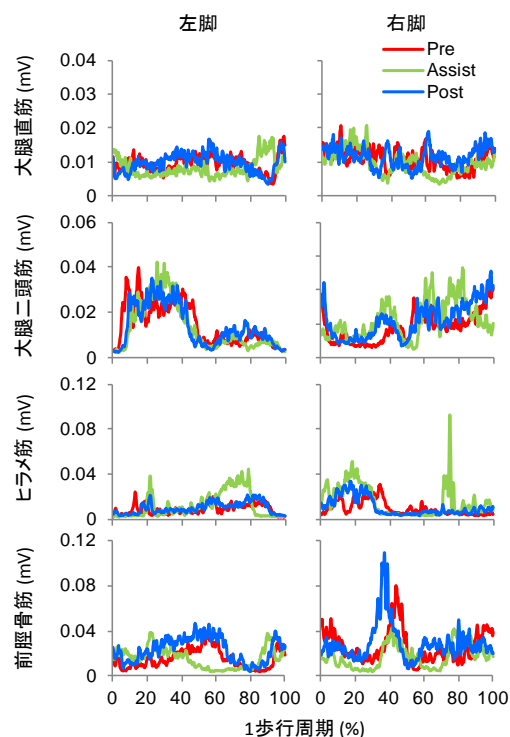


図2 脊髄不全損傷者におけるアシスト歩行前後の通常歩行 (Pre・Post) およびアシスト歩行 (Assist) での下肢筋活動パターン例

(2) 6名の健常者で、アシスト歩行後のヒラメ筋H反射興奮性の経時的な変化から脊髄反射回路における短期的適応を調べた。反射の計測は座位姿勢にて行い、アシスト歩行後には10秒間隔で反射を誘発し、アシスト歩行前に計測した平均振幅を100%として相対

化した。図 3 は、アシスト歩行後の H 反射データを 2 分毎に平均化した全被験者からの結果である。アシスト歩行直後の 2 分間で H 反射振幅は、アシスト歩行前の 87% 程度に低下した。その後、時間経過とともに反射の興奮性は徐々に回復していき、10 分後にはほぼアシスト歩行前の興奮水準へと戻った。アシスト歩行の代わりに立位姿勢保持とした条件では、このような抑制性の効果はみられなかった。我々がこれまでに調べた通常歩行後の抑制効果に比べると、アシスト歩行後に生じたこの抑制効果は小さいようであるが、アシスト歩行条件においても抑制が短時間持続するようであった。完全に歩行をアシストした状態、つまり被験者は全く力を発揮する必要がない条件での歩行動作ではこのような抑制性効果がみられなかったことから、歩行に関連した上位中枢からの指令が短期的な抑制効果に関連しているものと思われる。反射が亢進している患者にとって、脊髄反射興奮性の抑制は自身の意志で脚を動かすことを容易にしているかもしれず、アシスト歩行後にステップ長が増加した変化に関しては、反射興奮性の変化が一部関連している可能性も考えられる。

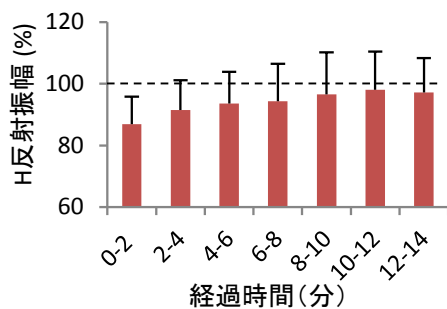


図 3 アシスト歩行後のヒラメ筋 H 反射の経時的変化(アシスト歩行前の反射振幅を 100%に相対化)

一方、アシスト歩行前後に調べた前脛骨筋に対する皮質脊髄路の興奮性については、明確な変化はみられなかった。今回の実験では弱い磁気刺激強度でも運動誘発電位が誘発されやすい前脛骨筋をターゲットにした。この前脛骨筋はアシスト歩行時に直接的なアシスト効果を受けておらず、アシストが加えられていた股関節や膝関節周りの筋では変化が生じていた可能性もある。したがって、今後さらに対象とする筋の変更やより長い時間の歩行アシストなど条件を変更して検討する必要があるように思われる。

今回の研究では、通常歩行とロボットによってアシストされた歩行との比較から、一定の速度で行った健常者ではロボットアシストによってステップ長が延長し、歩行率が低下する変化がみられた。通常歩行とアシスト歩行で歩行速度をそれぞれの快適速度とし

た歩行機能障害者では、全患者からの平均ではアシスト歩行時に歩行速度が低下した。しかしながら、通常歩行時にステップ長が短く歩行速度の遅い患者のなかには、アシスト歩行時にステップ長が増加し、歩行速度が速まるものもいた。これらの患者ではアシスト歩行直後に行った通常歩行時に、アシスト歩行前よりもステップ長が延長しており、歩行速度も速く、アシスト歩行時の効果が残存していた。このようにロボットによるアシスト歩行に対する適応変化は、歩行機能障害者の歩行能力に関連する可能性が示唆された。アシスト歩行直後に脊髄反射の興奮性が低下していたことから、アシスト歩行後に観察された歩行機能障害者の歩容変化に神経系での変化が関連しているかもしれない。今後はより多くの患者で同様の計測を行い、歩行機能と適応変化の関連性をさらに詳しく検討する必要がある。また、アシスト歩行時間の延長による影響やアシストの強さによる影響など歩行訓練プログラムに関連する要因を変更することでもたらされる残存効果についても調べるべき課題と思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Kamibayashi K, Kawamoto H, Sankai Y. Aftereffects of robotic-assisted treadmill walking on the locomotor pattern in humans. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 査読有 2012, 3560-3563
DOI: 10.1109/EMBC.2012.6346735
- ② 上林清孝、河本浩明、江口清、山海嘉之、ロボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による機能改善事例、生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2012 講演論文集、査読無、2012、0S1-14 1-3、
J-GLOBAL ID : 201302263260483272
- ③ Kamibayashi K, Nakajima T, Takahashi M, Nakazawa K. Changes in input-output relations in the corticospinal pathway to the lower limb muscles during robot-assisted passive stepping. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 査読有 2011, 4140-4144
DOI: 10.1109/IEMBS.2011.6091028
- ④ 上林清孝、中島 剛、中澤公孝、ロボットアシストによるステップング条件変更で生じる脊髄反射興奮性変化、生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会講演論文集、査読無、2011、249
J-GLOBAL ID : 201302292976927155

[学会発表] (計 9 件)

- ① 上林清孝、ヒト歩行時の体性感覚入力による皮質脊髄路および脊髄反射の興奮性変化、第 198 回つくばブレインサイエンスセミナー、2012.12.11、つくば
- ② 上林清孝、歩行支援ロボットを用いた脊髄損傷患者のニューロリハビリテーション、第 75 回ロボット工学セミナー、2012.12.7、東京
- ③ 上林清孝、河本浩明、江口清、山海嘉之、ロボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による機能改善事例、生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2012(LIFE2012)、2012.11.2、名古屋
- ④ 上林清孝、歩行時の体性感覚が皮質脊髄路興奮性に与える影響、日本健康行動科学会第 11 回学術大会、モーニング・セミナー【歩行の神経機構－基礎から臨床へ－】、2012.10.7、東京
- ⑤ Kamibayashi K, Kawamoto H, Sankai Y, Aftereffects of robotic-assisted treadmill walking on the locomotor pattern in humans. 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2012), 2012.8.30, San Diego, USA.
- ⑥ 喜多村 拓、上林清孝、小川哲也、河島則天、山本紳一郎、中澤公孝、歩行後に見られるヒラメ筋 H 反射興奮性の短期的抑制、第 41 回日本臨床神経生理学会・学術大会、2011.11.10、静岡
- ⑦ 上林清孝、中島 剛、中澤公孝、ロボットアシストによるステッピング条件変更で生じる脊髄反射興奮性変化、生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (ABML) 2011、2011.11.4、東京
- ⑧ 上林清孝、直立二足歩行の神経制御：感覚入力と下行性指令による影響、第 17 回サイバニクス・サロン、2011.9.22、つくば
- ⑨ Kamibayashi K, Nakajima T, Takahashi M, Nakazawa K, 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 (EMBC2011), 2011.9.1, Boston, USA.

[図書] (計 1 件)

- ① Kamibayashi K, Springer, Cybernetics Fusion of human, machine and information systems, Chapter 4 Motor control and learning, 2013, 23 pages

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上林 清孝 (KAMIBAYASHI KIYOTAKA)
 筑波大学・システム情報系・助教
 研究者番号：70415363