

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26350603

研究課題名(和文)脳卒中片麻痺患者における知覚運動連関の解明と新たな適応的動作獲得への応用

研究課題名(英文)Elucidation of perception-action coupling in stroke survivors and application to the acquisition of adaptive sensorimotor control

研究代表者

倉松 由子 (Kuramatsu, Yuko)

東北大学・医学系研究科・大学院非常勤講師

研究者番号：40634978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新たな視点から片麻痺の運動障害を解明し、機能を改善する(運動学習のための)手がかりを探るため、全身運動(立ち上がり動作)の生成過程に視覚の制約という介入を行った。そして、制約による運動の変化を動作遂行のための知覚と運動の適応としてとらえ、3次元動作解析装置により計測して、運動を調整する知覚の働き(視覚と体性感覚)に着目して運動(力)学的データを解析した。その結果、視覚の制約による全身運動の変化は、知覚の相互補完性(体性感覚の活用)や健常者にはない側方の不安定性に対するバランス制御の点で、片麻痺者が獲得した個体の特性に合わせた運動スキルとして特徴づけられることが示された。

研究成果の概要(英文)：Although stroke survivors with hemiparesis need to relearn whole-body motion sensorimotor strategies, it is not clear whether they do so in a common manner. This study investigated dynamic balance control sensorimotor strategies in stroke survivors. Sit-to-stand movements were performed with restricted vision by hemiparetic and healthy control participants. When vision was restricted, the variability in the mediolateral center-of-pressure position decreased significantly in stroke survivors, but not in healthy controls (We evaluated the variability in the control theoretical sense.). Participants with hemiparesis adopted strategies that explicitly differed from those used by healthy individuals. However, variability may be decreased in the direction that most requires accuracy, and appropriate methods for collecting feedback may be set by each individual. This study suggests that stroke survivors adopt strategies appropriate to their individual characteristics.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：運動学習 感覚運動制御 片麻痺 全身運動 動的バランス 視覚制約 体性感覚 転倒

1. 研究開始当初の背景

元来、ヒトは二足直立位という不安定な身体構造を有しているため、自身の姿勢や動きの状態(四肢の位置や動く速さなど)を正確に知覚して運動を制御する必要がある。また、変化の多い現実の環境に適応して運動の目的を達成するためにも、外界(地面の傾斜や障害物の位置など)を知覚する働きは重要である(図1.参照)。ことに、片麻痺患者の場合は、訓練室の椅子からは立ち上がることができても、病室に戻ると立ち上がれないということがよくみられ、環境から受ける影響、つまり知覚が運動に及ぼす影響が大きいことが推察される。従って、環境を操作し、知覚に介入することによって動作が改善される可能性は大きいと思われるが、従来リハビリテーションにおいて注目されてきたのは歩行速度や力の発揮といった運動機能で、その運動に影響を及ぼす知覚(環境の状況およびそこでの身体の位置や動きを、視覚・体性感覚などの感覚情報を受けて統合し認識すること)からアプローチするという視点は乏しかった。

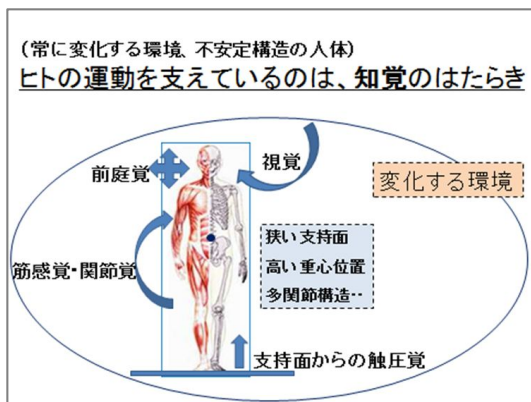


図1. ヒトの運動が適切に行われる背景

先行研究では、施設療養中の高齢者において、起立、歩行などの全身運動の能力が高いほど正確に姿勢を知覚する傾向があることや健常者が立ち上がり動作を行う場合、知覚が制約されると、前後と上下方向の速度のばらつきを抑え安定化して動作を遂行することを明らかにし、知覚と運動の相互作用の強さを示してきた。特に後者では、ばらつきを抑えるという制御の強化が図られたのは二つの感覚様式(視覚と体性感覚)を同時に制約したときで、一つだけの制約では他の感覚からの補償によって通常と変わりなく運動が遂行されること、さらに、前後と上下方向のばらつきは抑制しても、左右方向は抑制しない*という、最適フィードバック制御仮説(Todorov, Nat Neurosci 2002)に一致した巧みな制御が行われていることを明らかにした(*身体の左右が同等に立位を支えるという人体構造の特性により、左右方向の多少の偏りは運動の成否に関わらないことによる)。このように、健常者が安定して運動を遂行す

る基盤には、複数の感覚を統合して運動を支える知覚の働きと、左右対称性に同等の立位支持能力があることが示唆された。これに対して、片麻痺患者はその対称性が失われ、かつ麻痺によって片側の体性感覚が不全で視覚に依存する傾向が強いという特性がある。したがって、視覚制約時の変化を片麻痺者が運動を遂行するための知覚と運動の適応過程としてとらえ、新たな視点から片麻痺の運動障害を解明し機能を改善する手がかりを探索することは、リハビリテーションにとって有用と考えた。

2. 研究の目的

本研究では、脳卒中片麻痺患者の視覚を制約して全身運動の生成過程に介入する。そして、複数の感覚情報を統合して運動を調節する知覚の働きに着目することで、新たな視点から片麻痺の運動障害を解明し、運動学習や転倒防止へのリハビリテーションの可能性を探り出すことを目的とする。

(1) 片麻痺患者の運動が環境や状況の変化に脆弱である理由として、麻痺側の体性感覚不全により複数の感覚様式を統合して互いに補完する能力が健常者に比べて低いことを、視覚の制約によって全身運動のパフォーマンスが低下することで示す。

(2) 視覚制約下での個々の立ち上がり動作における運動力学的変数や運動学的変数を分析し、健常者との違いの考察から、視覚制約への適応として片麻痺者の特性に応じた動作方略が採用されていることを示す。

3. 研究の方法

(1) 対象者

片麻痺者 8 名(女性 2 名・男性 6 名、平均年齢 58 歳)、コントロール群として健常者 8 名(女性 4 名・男性 4 名、平均年齢 57.8 歳)。

(2) 装置および実験手順

立ち上がり動作の計測は、三次元動作解析システム(赤外線カメラ 8 台、床反力計 4 台、サンプリングレート 120Hz)を用い、身体的主要な関節中心点等 21 か所に反射マーカを装着して、イスからの立ち上がり動作を計測した。条件設定は、開眼条件(A) 5 回×2、閉眼条件(B) 5 回×2 を、練習や疲労の効果が相殺されるよう、ABAB と BABA の 2 種類のブロックデザインにして、被験者を等分に振り分けて実施した。

(3) 解析

カメラから得られた身体各部位の三次元座標により全身運動を表す指標として、COM(身体質量中心)の位置や速度の運動学的変数を、床反力計から得られたデータから運動力学的変数(COP:(足圧中心))を算出した。そして、視覚条件の差によるこれら変数の変

動性（10 試行分の標準偏差の値を算出）を制御理論的に、つまり外乱に対して変動が少ない、あるいは反復したときに時間的に合致した点において再現性が高いものほど神経系によって優先的に制御されているという概念に基づいて解析し (Schoner, Ecol Psychol 1995)、視覚制約の影響と、片麻痺患者と健常者におけるそれぞれの制御の優先性を探った。統計解析は、2 つの視覚条件に関して、3 軸方向（前後、上下、左右）における COM の位置と速度の変動性と COP の位置（前後、左右）の変動性を本動作のコントロール・ポイントである離臀時において算出し、2 × 2 の分散分析（反復測定）によって比較した。2 要因は被験者群（片麻痺・健常）と視覚条件（開眼・閉眼）で、有意水準 $p < 0.05$ とした。

4. 研究成果

(1) 視覚制約の影響

片麻痺群と健常コントロール群とで、片麻痺群の方が動作速度はより遅く、動作時間はより長かった（片麻痺群の全試行の平均動作時間 2.9 秒、健常コントロール群の全試行の平均 1.4 秒）。ただし、動作時間では被験者群と視覚条件との間に交互作用があり、事後検定の結果、片麻痺群では差が生じたが、健常群では差は認められなかった（片麻痺群の動作時間は、平均で 2.6 秒が 3.2 秒に閉眼で 600ms 程度増えたのに対し、健常コントロール群は 1.38 秒が 1.43 秒に 50ms 程度変化したのみ）。また、動作中の各イベント（動作開始、前進速度ピーク時点、離臀、上昇速度ピーク時点、動作終了）のタイミングにおいても片麻痺群の方に閉眼によってより多くのばらつきが生じ、動作の一貫性が損なわれた。したがって、視覚の影響の大きさは片麻痺の方が大きいことが確かめられた。

健常者が視覚の制約下でも動作速度や動きの一貫性を維持できたのは、知覚システムに冗長性がある、視覚と体性感覚間に相互補完性が働いて視覚情報の欠落を体性感覚情報により補償できたためと推察される。これに対して片麻痺被験者は、麻痺側に（体性）感覚障害や筋緊張の異常を有し、体性感覚情報の精度が低下して視覚制約に対する体性感覚による補償が健常者ほど有効に機能しないことが示唆された。

(2) 左右方向の制御

COP の位置と COM の位置と速度に関する分散分析の結果は、COP の左右方向と前後方向の変動性の両方に視覚の主効果が認められ、左右方向の場合は交互作用あり、前後方向の場合は交互作用なしだった。視覚制約下において変動性の抑制が明確に現れたのは、片麻痺群の COP の左右方向の位置のみだった。前後方向においては片麻痺群・コントロール群ともに、変動性が増える傾向だった（図 2. 参照）。

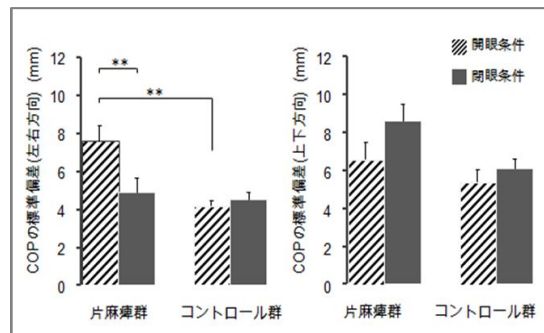


図 2. 離臀時における COP の左右・前後方向の変動性（標準偏差）比較 (** $p < 0.001$)

片麻痺被験者で閉眼条件時に変動性が有意に減少したのは、左右方向に関してであった。これは、健常者において制約下で左右方向の変動性が増大する傾向にあるのとは対照的である。健常者の場合、立ち上がり動作において左右方向は、前後方向と上下方向に比べて課題の達成にとってより重要度が小さい動作方向である。立ち上がり動作では左右方向の動きは小さく、左右とも下肢の支持性が十分あるので多少左右に偏倚してもそれほど問題は生じない。

これに対して片麻痺者の場合は、体重を支持する能力が左右それぞれの足で（麻痺側か非麻痺側かで）明確に異なる。また、脳卒中片麻痺患者にとって、立位保持や座位から立位への移行は、非麻痺側の下肢へのより大きな荷重という左右非対称な体重支持によって特徴づけられており、立ち上がり動作を遂行する（転倒しないで立ち上がる）にあたって体重支持力のそれぞれの下肢への配分は重要となる。従って、片麻痺者が前後方向の制御より左右方向の制御を優先し、左右方向の COP の変動性が減少したということは、彼らの動的バランス維持にとって効果的な制御方略として理解することができる。

また、健常者においては COM の速度情報が位置や加速度より運動制御にとって有効であるという複数の先行研究の知見があり、全身運動の場合には COM の速度が制約に対する制御ストラテジーを描出するパラメータとして検知されてきた。しかし、本研究において、片麻痺者の制御ストラテジーがあらわれたのは COP という体重を支える力の位置（方向）に関する変数であった。片麻痺者は、その多くを下肢の筋によって生成される COM の速度情報ではなく、力（加速度）や位置に関する他の体性感覚や前庭覚情報に依る COP によって運動の制御を図ったのは、伸張反射の亢進等筋に関わる片麻痺特有の症状や筋感覚障害によって速度情報の精度の信頼性が低いための代替と考えられる。つまり、適切な運動を生成するための信頼性の高いフィードバック情報として、片麻痺者は自らの特性に適合したものを使用することが示唆された。これは、前述したように健常者と異なる制御ストラテジーを用いているようで、実

は状況に応じて最適なフィードバックゲインを考慮して運動制御が行われるという点に関しては健常者の方略 (Liu, J Neuro Sci 2007) と共通するメカニズムが働いている可能性が考えられる。

(3) 成果のまとめ

本研究により、立ち上がり動作という全身運動を行うときに視覚の制約を受けると、片麻痺者は健常者とは異なる制御ストラテジーによって運動を遂行することが示された。片麻痺者は視覚の制約の影響を健常者より大きく受けて動作時間がより長くなり動作パターンの一貫性が損なわれるが、離臀の瞬間に身体を支える力の方向の左右のばらつきを抑えること (健常者にはみられない現象) によって課題を遂行していた。それは、相対的に安定な状態からより不安定な状態へ切り替わる離臀の時点で、最もバランスを崩しやすい方向を信頼性のより高いフィードバック情報によって、巧みに柔軟性をもって動作コントロールしたことを示唆する。したがって、片麻痺者のリハビリテーションを考えるにあたって、彼らの感覚運動適応を考慮しないで単に健常者の動作パターンを模倣するのは不適切であること、片麻痺者の障害にもとづいて感覚運動ストラテジーを理解する必要があることが明らかになった。

<引用文献>

Todorov, E., & Jordan, M. I., Optimal feedback control as a theory of motor coordination. Nature Neuroscience 5, 2002, 1226-1235.

Schoner G., Recent development and problems in human movement science and their conceptual implications. Ecological Psychology, 8, 1995, 291-314.

Liu, D., & Todorov, E. Evidence for the flexible sensorimotor strategies predicted by optimal feedback control. J. Neurosci. 27, 2007, 9354-9368.

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 4 件)

倉松 由子、片麻痺者の動的姿勢制御における 2 つのタイプの感覚運動適応、運動学習研究会報告集、査読無、vol. 26、2017、57-63

倉松 由子、視覚の制約が片麻痺者の力制御に及ぼす影響、運動学習研究会報告集、査読無、vol. 24、2016、42-45
<http://www.htc.nagoya-u.ac.jp/~yamamoto/jmls/>

倉松 由子、全身運動の最適化と片麻痺者

の感覚運動制御方略の適応的柔軟性、第 24 回バイオメカニズム・シンポジウム予稿集、査読無、2015、01-08

倉松 由子、片麻痺者の柔軟な感覚運動ストラテジーと最適制御、運動学習研究会報告集、査読無 vol. 23、2015、9-12
<http://www.htc.nagoya-u.ac.jp/~yamamoto/jmls/>

[学会発表](計 4 件)

倉松 由子、片麻痺者の動的姿勢制御における 2 つのタイプの知覚運動適応、第 26 回運動学習研究会、2017

倉松 由子、視覚の制約と片麻痺者の力制御の変化、第 24 回運動学習研究会、2016

倉松 由子、片麻痺者の全身運動における感覚運動戦略の適応的柔軟性、第 17 回バイオメカニズム・シンポジウム、2015

倉松 由子、片麻痺者の柔軟な感覚運動ストラテジーと最適制御、第 23 回運動学習研究会、2015

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉松 由子 (KURAMATSU Yuko)
東北大学・大学院医学系研究科・非常勤講師
研究者番号： 40634978

(2)研究協力者

山本 裕二 (YAMAMOTO Yuji)
名古屋大学・総合保健体育科学センター・教授

出江 紳一 (IZUMI Shin-Ichi)
東北大学・大学院医学系研究科、医工学研究科・教授