

曲線上歩行の動作力学的特性—学習効果の検討—

Adaptive changes of the gait characteristics due to walking on the curvature path

○ 荒川卓也 (芝工大), 高橋智大 (芝工大), 山本紳一郎 (芝工大), 河島則天 (国リハ研)

Takuya ARAKAWA, Shibaura Institute of Technology

Tomohiro TAKAHASHI, Shibaura Institute of Technology

Shin-ichiroh YAMAMOTO, Shibaura Institute of Technology

Noritaka KAWASHIMA, Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

Abstract: Previous studies demonstrated basic characteristics of the walking on curvature path, for example, inside shift of the center of mass and increase (decrease) of the stance time in inside (outside) of leg, and modulation of muscle activity in the gastrocnemius muscle. We here aimed to identify whether the kinetic aspects of curved walk alter in accordance with the degree of curvature path. Furthermore, in order to identify the adaptive changes due to curved walk, we compared gait pattern before and after 8 minutes of walking on the curvature path (radius=1.5m, counter-clockwise). Nine healthy male subjects participated in this study. The results demonstrated systematic alteration of the stride length, stance duration, and ground reaction force during curved walking. Although the subject walked at similar speed, we found asymmetric ground reaction force during straight walk after walking on the curvature path.

Key Words: curved walk, ground reaction force, Three-dimensional motion analysis

1. 研究背景と目的

ヒトの歩行運動の特性は、立脚（遊脚）時間などの時間的要素やストライド長などの空間的要素、地面反力などの力学的要素によって構成され、歩行速度や周辺環境などに応じてこれら構成要素が変化する。曲線上を歩行する際には内側脚の立脚（遊脚）時間の増加（減少）とストライド長の減少が生じること、さらには内外側腓腹筋の活動が方向依存的な変化を示すことなどが先行研究で報告されている^{1, 2)}。これらの左右非対称性は、曲線上歩行時の物理的制約に応じて歩行運動が合目的に調節された結果として生じるものと考えられる。本研究では、曲線上歩行について、先行研究で行なわれている動作特性に加え、力学的特性の観点から検討すること（実験Ⅰ）、さらに8分間の曲線上歩行を継続して行った際の歩行の変化と残存効果について検討すること（実験Ⅱ）を目的とした。

2. 実験Ⅰ：曲線上歩行の動作力学的特性

2-1 実験方法

健康成人男性9名に対し、直線上 (ST) および半径 1.5m の半円上を時計回り (CW), 反時計回り (CCW) で3試行ずつ歩行させた。被検者の身体標点に計 29 個の反射マーカを取り付け (Helen-Hayes marker set), 三次元動作解析システム (Motion Analysis 製, MAC3D) を用いて、マーカの三次元位置座標を取得した。取得した反射マーカ座標より、歩行パラメータ (歩行速度, ケイデンス, ステップ長,

ストライド長, 立脚時間), 身体重心 (COM) 軌跡を算出し, Cortex2 ソフトウェアを使用して床反力を推定した。MAC3D のサンプリング周波数は 60Hz とした。垂直床反力積分値, 前後方向床反力積分値は直線歩行時の値で正規化した。

2-2 結果と考察

歩行パラメータを Table 1 に示した。曲線上歩行において立脚時間は外側脚より内側脚の方が大きい値を示し ($p < 0.05$), ストライド長は内側脚で減少した ($p < 0.05$)。また, Fig.2 に示す通り, COM 軌跡は ST において目標軌跡上を左右に振れながら前方に移動している一方で, 曲線上歩行では, COM が床のテープの内側の内側脚の方にシフトしていた。曲線上歩行では, 進行方向を斜め前方に取る必要性から COM が目標軌跡の内側にシフトする傾向になったと考えられる。

Table 1 Gait parameter

	ST	1.5m	
Gait velocity (m/s)	1.01 ± 0.21	0.84 ± 0.23	
Cadence (step/min)	95.9 ± 10.11	91.97 ± 10.88	
Step length (m)	0.64 ± 0.08	0.58 ± 0.09	
Stride length (m)	1.25 ± 0.15	Inside	Outside
		1.03 ± 0.16	1.15 ± 0.19
Stance time (s)	0.82 ± 0.11	0.87 ± 0.13	0.84 ± 0.13

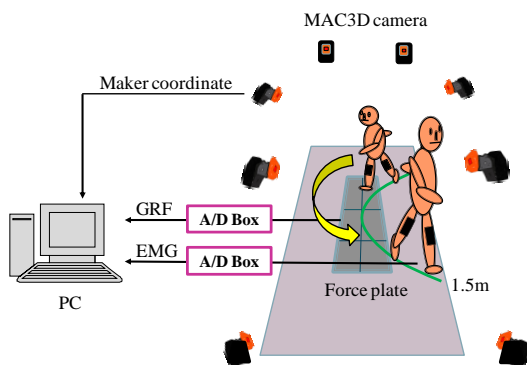


Fig.1 Experimental set up in the present study

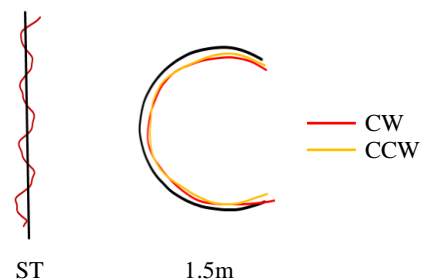


Fig.2 Typical example of the trajectory of COM

Fig.3には床反力の典型波形と定量データを示した。曲線上歩行では、外側脚と比較して内側脚で垂直床反力が有意に大きい結果になった ($p < 0.05$)。曲線上歩行では進行方向が斜め前方となり、Fig.2で示されるようにCOMが円の内側にシフトすることで、内側脚の立脚時間が増加し、垂直床反力に反映される荷重シフトが内側脚で多く生じたと考えられる。また、STでは左足と右足の制動成分・駆動成分共に有意差は無かったが、曲線上歩行では制動成分・駆動成分共に外側脚で大きい傾向にあった (Fig.3 中段)。特に、駆動成分は内側脚より外側脚で有意に大きい結果になった ($p < 0.05$)。これはストライド長と関連している可能性がある。すなわち、外側脚のより大きなストライドを得るため、前後方向の床反力の駆動成分を増加させることで推進力を確保している可能性がある。Fig.3 下段に示した左右方向の床反力は、内側脚・外側脚共に内側方向に向く成分が大きくなっていく傾向にあった。これは、Fig.2で示すようにCOM軌跡の内側へのシフトに伴い、体幹の内側への傾きが生じ、内側方向にシフトする結果になったと考えられる。

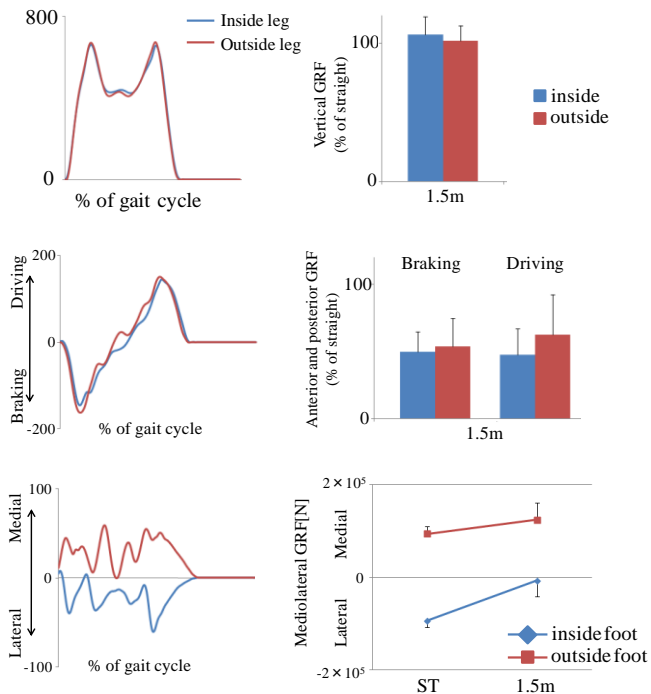


Fig. 3 Comparison of the ground reaction force between inside (blue) and outside (red) of the leg during walking on the curvature path.

3. 実験Ⅱ：曲線上歩行の学習効果

3-1 実験方法

実験Ⅰと同様のシステム構成を用い、健康成人男性9名を対象とした以下の実験を実施した。被検者は直線歩行 (pre)を2分間行った後、8分間の円歩行 (半径1.5m, CCW)を行い、再度8分間の直線歩行 (post)を行った。マーカ座標からストライド長、立脚時間を算出し、Cortex2ソフトウェアを使用して床反力を推定した。ストライド長、立脚時間、床反力は、内側脚に対する外側脚の割合で算出した。

3-2 結果と考察

実験Ⅱにおけるストライド長と立脚時間の結果を Fig.4 上段に示した。曲線上歩行中では、外側脚においてストライド長は直線歩行に比べ大きい値を示し、ストライド長と

立脚時間共に曲線上歩行の継続時間に伴ってデータのばらつきが小さくなる傾向が認められた。曲線上歩行では、外側脚は内側脚と比較して長い距離を移動させる必要があることから、ストライド長が大きくなり、時間経過とともに安定した歩調に収束して過過程を反映しているものと考えられる。曲線上歩行後は両変数とも、preと比較して明確な増減傾向は示さなかったものの、preに比べpostではばらつきが大きくなる傾向が認められた。

垂直床反力の結果を Fig.4 下段に示した。実験Ⅰと同様に曲線上歩行中は内側脚で垂直床反力が大きい結果を示し、時間経過に伴ってばらつきが少なくなる結果を示した。また、postの直線歩行では、曲線上歩行で外側であった脚に大きな垂直床反力を示す傾向にあった。これは、曲線上歩行中常に内側脚に多くの荷重がかかっていたため、その影響が残存しており、再び直線を歩いた際に反対側への荷重シフトとして現れたものと考えられる。

4. まとめ

本研究の結果は、環境や課題に応じた歩行調節の機序を知る上で重要な知見となり得る。曲線上を歩行するには、物理的制約により歩行キネマティクスや筋活動、床反力が変化することを示した。実験Ⅱでは、上記変化が学習効果として保持される可能性を示した。学習効果に関する結果は、歩行動作に左右非対称性を持つ患者 (例えば脳卒中片麻痺患者) に対する効果的リハビリテーション方法を考える上で有用な手がかりを与えるものと考えられる。

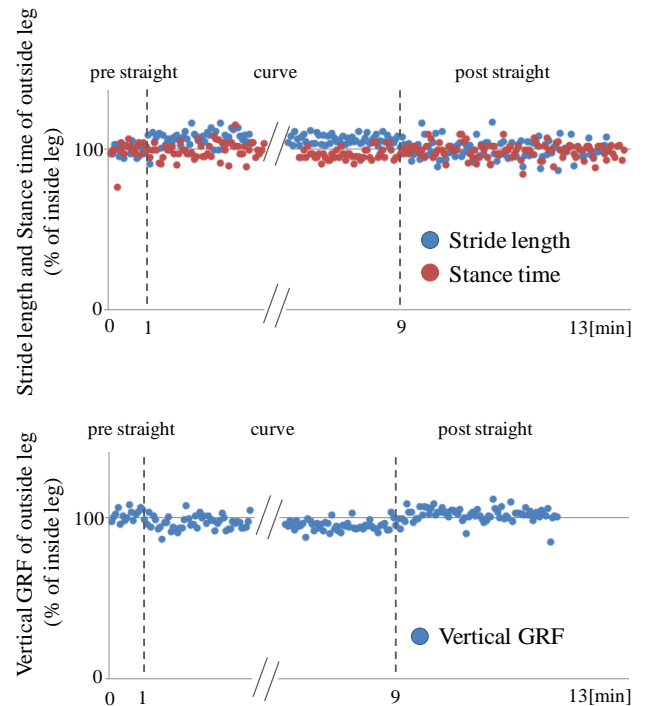


Fig. 4 Changes of the stride length (blue in top) and stance time (red in top), and vertical ground reaction force (bottom) before, during, and after 8 minutes of curved walk

参考文献

- (1) Courtine G. et al. Human walking along a curved path. I. Body trajectory, segment orientation and the effect of vision, *Eur J Neurosci* 18:177-190, 2003
- (2) Courtine G. et al. Coordinated modulation of locomotor muscle synergies constructs straight-ahead and curvilinear walking in humans, *Exp Brain Res* 170: 320-335, 2006