

Split-belt トレッドミルにおける速度比の違いが歩行の適応・学習過程に及ぼす影響

Speed-ratio dependent changes of gait adaptation during split-belt treadmill walking

○佐藤 浩司(芝工大) 山本 紳一郎(芝工大) 河島則天(国リハ研)

Koji SATO and Shinichiro YAMAMOTO, Shibaura Institute of Technology
Noritaka KAWASHIMA, National Rehabilitation Center for persons with Disabilities

Abstract: Split-belt treadmill walking has been recently used as a tool to investigate the process of adaptation and learning during walking. The experimental paradigm consists of baseline, gait on two independently controlled belts drive at two deferent speed (adaptation), and then walking on the treadmill with tied belt speed (washout). In the present study, we aimed to compare the extent of adaptation and aftereffect among five different speed ratio of two belt. Results shows that stance time was systematically increased with the ratio of two belts, and was not followed by subsequent aftereffects. In contrast, the breaking force at early stance phase was gradually changed with time during adaptation period, and then, revealed aftereffect in all speed ratio conditions. The extent of adaptation and subsequent aftereffect strongly depend on the ratio of two belts. Our results suggest that the extent of adaptation and learning is determined by split-belt treadmill-induced environmental constraint.

Key Words: gait, motor learning, locomotor adaptation

1. 背景・目的

ヒトの歩行運動は整地、砂利道、坂道といった路面状態、暗闇、雨風などの外部環境に応じて適切に調節される。普段道を歩いている時には、我々は歩行運動そのものに対して特に意識を働かせることなく、安定したステップを刻んでいる。このような自律的な左右下肢の協調運動は、脊髄内の歩行リズムを生成する神経回路(Central Pattern Generator: CPG)を介して出力される。一方、不安定な路面や、経験したことのない環境下での歩行運動を行う場合(たとえば平均台の上を歩くような場合)、歩行開始後に、歩数ごとに不安定感を最小化するような誤差修正が行われ、歩数を重ねていくと次第に円滑な歩行が可能になるような「運動学習」を経験する。上肢や手指の動作で生じる運動学習は小脳を神経基盤として生じるとされているが⁽³⁾、歩行の場合には運動の発現に関わる神経基盤が上肢の随意運動とは異なり、脊髄を中心とした随意性の少ない運動形態であるために、上肢運動とは異なる運動学習の機序が想定される。

これまでの研究では、歩行の運動学習のプロセスを実験的に検討する手段として、左右のベルトスピードの異なる split-belt トレッドミルを用いて、新規な歩行環境での歩行開始からの適応プロセス、再び元のスピードに戻した時の後効果(after effect)を検討する研究が行われてきた^{(1), (2)}。本研究では split-belt トレッドミルを用いて、従来行われている左右のベルト速度比 1:2 条件と比較し小さな速度比条件(1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:1.8)の左右非対称な歩行環境に対する歩行の適応、左右対称な歩行環境に戻した際に生じる後効果の相違について比較・検討することを目的とした。

2. 実験方法

健康成人男性 10 名(28.1±4.94 歳)を対象に 9 分間のトレッドミル歩行を行った。左右のベルト速度を独立に設定可能な Split-belt トレッドミル(Bertec 社製)を用いて実験を行い、トレッドミルに内蔵されている床反力計から得られたデータをサンプリング周波数 1000Hz で計測した(Fig.1A)。

Baseline としてベルト速度比 1:1 のトレッドミル歩行 1 分間を行った。次に歩行の適応過程の変化を検証するために adaptation 期として左右のベルト速度が異なる速度比条件(1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:1.8, 1:1.2)におけるトレッドミル歩行 5 分間を行った。その後、適応効果を検証するために washout

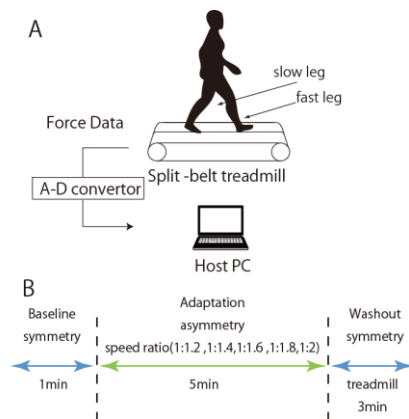


Fig.1 Experimental set-up (A) and protocol (B)

期としてトレッドミル歩行 3 分間行った。実験は異なるベルト速度比 5 条件(1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:1.8, 1:1.2)を行った(Fig.1B)。

2-2 分析方法

歩行周期の同定には床反力データを用いて、各周期の床反力左右、前後、鉛直成分のピーク値、時間変数を算出した。定量値として各フェイズ(baseline, adaptation, washout)の最初と最後の 10 秒から算出した。各変数は左右非対称性の指標である symmetry index を用いて評価した(Eq.1)。以下に用いた式を示す。0 が左右対称を示す。

$$\text{Symmetry index} = \frac{(\text{Fast leg} - \text{Slow leg})}{(\text{Fast leg} + \text{Slow leg})} \quad (\text{Eq.1})$$

Fast leg; ベルト速度が速い側 Slow leg; ベルト速度が遅い側

3. 結果

Fig.2A に立脚時間 symmetry index の群間の平均データを示す。Adaptation 初期と baseline を比較すると全条件で左右非対称性が増加し、時間経過に伴う変化はみられなかった。Washout 期においては瞬時に左右対称に戻り、baseline との差はみられなかった。Fig.2B に各フェイズの平均値を示す。全条件で Baseline と比較して adaptation 初期は有意

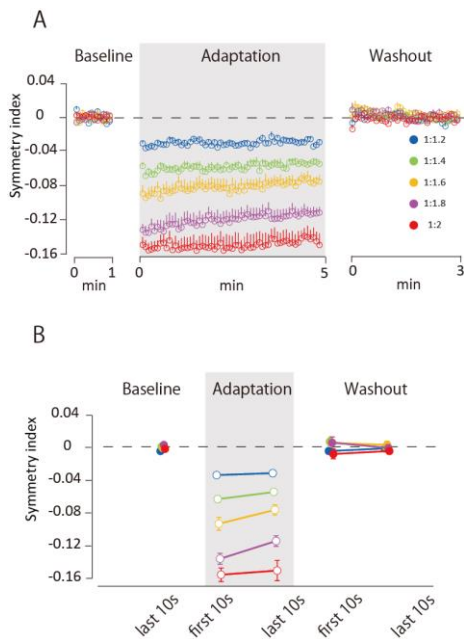


Fig.2 A : Time course of the changes in the stance time symmetry. B : Comparison of the stance time symmetry. Opened circles indicate statistically significant differences from those during the baseline period. $P < 0.05$.

に低値を示し、左右非対称になる傾向がある。また、速度比の大きさに応じて左右非対称性が增大する傾向がみられた。一方、washout 期では baseline との有意な差はみられなかった。

Fig.3A に床反力制動成分 symmetry index の群間の平均データを示す。全条件で adaptation 期を通して徐々に左右非対称性が増加する傾向がみられる。また、Washout 期では徐々に左右非対称性が減少する傾向がみられる。Fig.3B に各フェイズの平均値を示す。

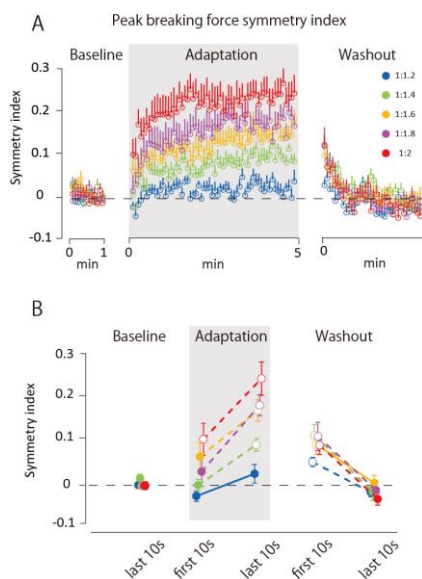


Fig.3 A : Time course of the changes in the breaking force symmetry. B : Comparison of the breaking force symmetry. Opened circles indicate statistically significant differences from those during the baseline period, and the dotted lines show the significant differences between the variables. $P < 0.05$.

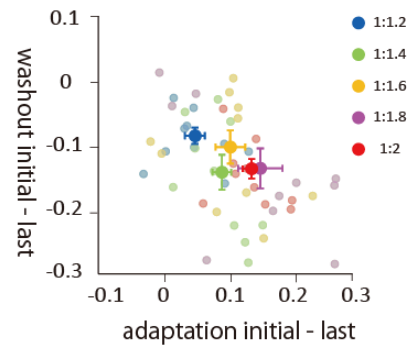


Fig.4 Relationship between the extent of adaptation and extent of washout for breaking force symmetry.

Adaptation 初期と baseline を比較すると 1:2 条件のみ有意に高値を示した。Adaptation 終期と baseline を比較すると 1:1.2 条件以外の 4 条件で有意に高値を示し、adaptation 初期と終期を比較すると有意に高値を示し、左右非対称性が增大する傾向がみられた。また、washout 初期では全条件において baseline に対して有意に高値を示し、後効果が確認された。Washout 初期、終期を比較すると 1:1.6 条件以外の 4 条件で有意に低値を示した。

Fig.3 に床反力制動成分 symmetry index における adaptation 期、washout 期の変化量の群間平均データを示す。Adaptation 期の変化量においては 1:1.2 条件と 1:1.8, 1:2 条件を比較すると有意差がみられた。一方、washout 期の変化量では有意な差はみられなかった。

4. 考察

立脚時間、床反力制動成分ともに、adaptation 期にベルト速度比に応じて段階的に変化した。一方で、washout 期の変化は両変数で異なり、立脚時間には後効果はみられなかった一方で、床反力制動成分では後効果を認められた。床反力制動成分は、踵接地時の足関節の安定性を高めるための予測的制御に関わることから、この結果は左右非対称な歩行環境に対して制動成分を逐次修正する適応的調節がなされていることが考えられる⁽²⁾。但し、左右の速度比がわずかな 1:1.2 条件では adaptation 期の変化、後効果ともに他の条件と比較して小さいことから、上記のような予測的制御が必要となる臨界点は、1:1.2 から 1:1.4 の間に存在するものと考えられる。他方、1:1.4 よりも左右比の大きい 4 条件間で washout 初期に起こる後効果の大きさ、washout 期の変化量に速度比条件間で有意な差がみられなかったことを踏まえると、運動学習の程度は必ずしも adaptation 期の変化に依存しないことが示唆された。

5. 参考文献

- (1) Reisman DS, AJ Bastian. Interlimb Coordination During Locomotion: What Can be Adapted and Stored? ; J Neurophysiol 94:2403-2415, 2005
- (2) Ogawa T, Kawashima N, Ogata T, Nakazawa K. Predictive control of ankle stiffness at heel contact is a key element of locomotor adaptation during split-belt treadmill walking in humans. J Neurophysiol 111: 722-732, 2014
- (3) Jayaram G, Galea JM, Bastian AJ, Celnik P. Human locomotor adaptive learning is proportional to depression of cerebellar excitability. Cerebral Cortex 21:1901-1909 August 2011;