

# リズムの相互同調に基づく歩行介助システムWalk-Mateによる パーキンソン病患者の歩行安定化に向けた試み Walking stabilization of Parkinson's disease patient by support system Walk-Mate based on mutual-synchronization

鈴木 一輝<sup>1</sup>, 織茂 智之<sup>2</sup>, 西 辰徳<sup>1</sup>, 三宅 美博<sup>1</sup>  
Kazuki SUZUKI<sup>1</sup>, Satoshi ORIMO<sup>2</sup>, Tatsunori NISHI<sup>1</sup>, Yoshihiro MIYAKE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院, <sup>2</sup> 公立学校組合関東中央病院  
<sup>1</sup> Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup> Kanto Central Hospital

**Abstract** Walking support system Walk-Mate is based on mutual-synchronization between human's walking rhythm and nonlinear oscillator model. In this study, to evaluate the effectiveness of Walk-Mate, we applied it to Parkinson's disease patients. First, we focused on festinating gait of Parkinson's disease, and analyzed temporal development of gait cycle to estimate the effectiveness for stabilizing it. As a result, it was shown that Walk-Mate inhibits festinating gait.

## 1. はじめに

歩行運動のリハビリテーションの多くは患者と理学療法士が歩調を相互に適応させあう協調歩行によって行われている[1].これまで、われわれは患者と理学療法士の間に見られる、双方向の適応を介した協調歩行の創出過程を人間-機械系に再構築することをめざして、共創型歩行介助システムWalk-Mateの開発を進めてきた.Walk-Mateは仮想ロボットと人間の間で足接地タイミングに対応するリズム音を交換することで、両者の歩行リズムが相互に同調し、動的に安定な歩行状態を実現するシステムである[2].そのため、歩行運動のリズム生成に障害を有する疾患に適用することが有効であると考えられており、その代表的なものとしてパーキンソン病(以下PDと記載)が挙げられる。

PDは中脳黒質の神経細胞に変性が生じることで起こる疾患で、脳内ドーパミンが減少し、大脳基底核の機能不全を招く。その機能不全は、「基底核皮質系」と「基底核脳幹系」という歩行運動における2つ調節系の活動の異常を引き起こし、結果として、歩行運動に障害が生じると考えられている[3-4].それぞれの調節系の役割としては、前者は歩行運動の開始や停止という随意的な運動過程に関与しており、後者は歩行時のリズムカルな手足の動作や筋緊張調節という自動的な運動過程に関与していると考えられている[3].2つの調節系において、本研究では後者の基底核-脳幹系に着目した。基底核-脳幹系はPD患者に見られる内的リズム生成の障害に関連が深いと考えられており、加速歩行やすくみ足といったPD患者固有の歩行障害との関連も示唆されている[5].そのため、基底核-脳幹系のリズム生成機能を補助することで、歩行運動機能の回復につながることを期待される。

そこで、本研究ではWalk-Mateを用いて相互適応的に外的リズムを与えることで、PD患者の内的リズム障害を補償し、歩行を安定化することを試みる。われわれは今回、PD患者の歩行安定化に向けた第1歩として、PD患者の歩行障害の中でも、加速歩行に着目した.Walk-Mateによる加速歩行の抑制効果を分析することで、歩行リズムの相互同調の有効性を示していく。

## 2. 実験方法

### 2.1 被験者

被験者は医師による問診において加速歩行があると答えた患者で、治療薬を服用しており、聴覚障害、認知症のないPD

患者21名(男性9名,女性12名,平均75.3歳, Hoehn and Yahr stage 2~4)である。いずれの被験者も杖や歩行器なしに自立歩行が可能であった。なお、本実験は関東中央病院の倫理委員会の承認を得た。また、全ての被験者には事前に実験の概要を説明し、同意を得た上で実施された。

### 2.2 実験課題と実験手順

被験者にはリズム音刺激用のヘッドホン、歩行リズム検出用のフットセンサを装着してもらい、リズム音刺激(純音)を聞きながら直線状の80mの水平な廊下を歩行するよう指示された。

実験は1試行において3つの連続したStageから構成されており、Stage1で単独歩行、続くStage2でWalk-Mate歩行、最後のStage3で単独歩行となっている。なお、Walk-Mateの目標位相差は+0.2radとし、仮想ロボットの足接地タイミングが患者の足接地タイミングよりもわずかに遅れるように設定した。

### 2.3 Walk-Mate

Walk-Mateは人間と仮想ロボットが足接地タイミングに対応したリズム音を交換するプロセスを介して、歩行運動の相互同調を実現するシステムである.Walk-Mateは身体モデルと内部モデルの2つのサブモデルからなる二重ダイナミクスモデルによって実現されている[2].

身体モデルは仮想ロボットの歩行リズムを生成し、人間の歩行リズムとの相互同調を介して安定な位相関係を自己組織する。内部モデルは身体モデルで生成した位相関係における位相差を制御する機能を持ち、設定された目標位相差に接近するように、身体モデルを制御する。また、目標位相差を変化させることで、歩行リズムを同調させることだけでなく、人間の歩行リズムの促進や抑制が可能になる。

### 2.4 分析方法

本研究では、PD患者の歩行中の足接地タイミングから得られた歩行周期の時間発展の分析を行った。歩行周期は一方の脚が接地してから次に同側脚が接地するまでの時間とした。

加速歩行は、歩き始めてから徐々に早足になるため、時間と共に歩行周期が減少する。そのため、歩行周期の時間発展において、最小2乗法を用いて線形近似し、回帰直線の傾き $\alpha$ より歩行周期変化の勾配を評価する。若年健常者10名(男性7名,女性3名,平均25.6歳)による予備実験の結果に基づいて $\alpha < -0.001$ の場合に加速歩行と定義した。

### 3. 実験結果

Fig.1 に PD 患者の歩行周期の時間発展の一例を示す。初めの 40 秒間は単独歩行(Stage1)であり、次の 40 秒間が Walk-Mate 歩行(Stage2)、それ以降が単独歩行(Stage3)となっている。Fig.1 に示すように、Stage1 の単独歩行では、徐々に歩行周期が減少していく傾向にあり( $\alpha=-0.0021$ )、顕著に加速歩行が現れていることが分かる。これに対して、続く Walk-Mate 歩行においては、歩行周期の減少が緩和し( $\alpha=-0.0004$ )、加速歩行が抑制されていることが確認された。

全被験者 21 名における歩行周期変化の勾配 $\alpha$ を算出し、加速歩行が観察された 19 名の被験者を解析対象とした。Fig.2 に示すように、周期勾配 $\alpha$ の平均値において対応のある t 検定で評価したところ、単独歩行(Stage1)と Walk-Mate 歩行の間で有意な差が確認された( $t(18)=5.65, p<0.001$ )。また、若年健常者 10 名(男性 7 名、女性 3 名、平均 25.6 歳)の単独歩行と PD 患者の Walk-Mate 歩行における $\alpha$ を対応なしの t 検定で評価した。その結果、Fig.3 に示すように両者の間で有意な差は観察されなかった( $t(27)=1.639, p=0.113$ )。

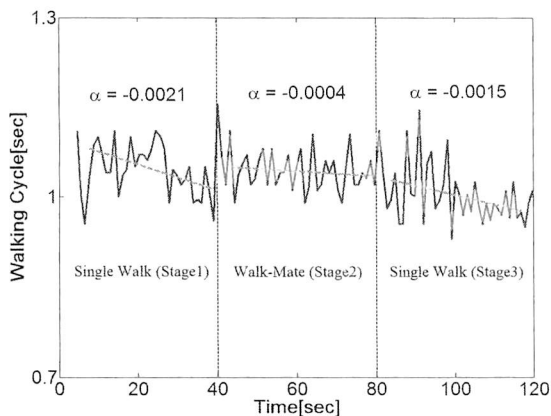


Fig. 1 Walking cycle of Parkinson's disease patient

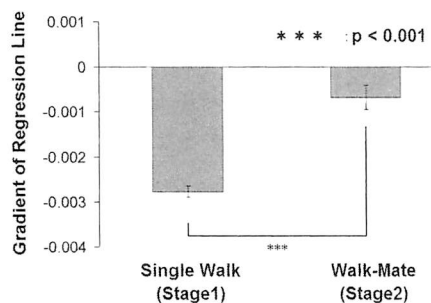


Fig. 2 t-test of gradient (Single Walk vs Walk-Mate)

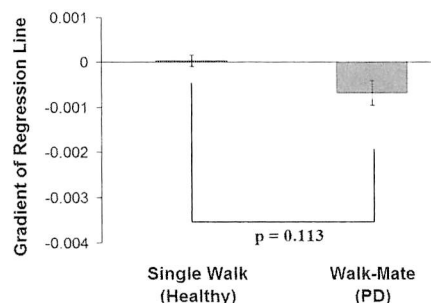


Fig. 3 t-test of gradient (Healthy vs PD)

### 4. 考察

本研究では PD 患者に Walk-Mate を適用し、加速歩行に対する抑制効果を定量的に評価した。Fig.2 に示したように、周期勾配 $\alpha$ の平均値において、Walk-Mate 歩行と単独歩行の間で有意な差が確認されたことから、単独歩行で観察された加速歩行が抑制されることが明らかとなった。また、健常者の単独歩行と PD 患者の Walk-Mate 歩行の間で周期勾配 $\alpha$ の平均値に有意差が見られなかった。以上のことから、PD 患者の歩行の安定化において、歩行リズムの相互同調の有効性が示唆された。今後は歩行リズムの相互同調状態としての、PD 患者の歩行の動的安定性を更に検証すべく、動力学的な観点から歩行ダイナミクスの解析を行っていく必要がある。

歩行ダイナミクスに関連する先行研究として、Hausdorff らは歩行周期変動のゆらぎに着目し、PD 患者のように歩行障害を伴う場合の歩行周期変動において、ランダム性が増し、健常者に見られる自己相似性(長期相関特性)が減少することを報告している[6]。

また、これまでわれわれの研究グループでも、擬似歩行障害者に Walk-Mate を適用したところ、歩行周期変動のゆらぎが自己相似特性に近づくことから、歩行リズムの相互同調により、安定な歩行ダイナミクスが実現されることが示唆されている[7]。

以上のことから、われわれは現在、予備的実験として、Walk-Mate 適用時の PD 患者の歩行周期変動のダイナミクスの分析を行っている。今後、更に一定のリズム音刺激を用いた時との比較も行っていく予定である。

### 5. まとめ

本研究では、歩行リズムの相互同調による PD 患者の歩行安定化に向けた第 1 歩として、加速歩行に対する抑制効果を歩行周期変化の勾配として定量的に評価した。その結果、Walk-Mate は単独歩行に比べて有意に加速歩行を抑制する効果があることが示された。このことから、PD 患者の歩行の動的安定化に歩行リズムの相互同調が有効であることを示唆した。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、関東中央病院神経内科の関係者の方々、にご協力を頂いた。記して心から感謝の意を表する。

### 参考文献

- [1] 長谷川幹, 中島鈴美: 寝たきりにさせない看護技術, 62/74, 医学芸術社 (2001)
- [2] Y. Miyake: Interpersonal synchronization of body motion and the Walk-Mate walking support robot, IEEE Transactions on Robotics, **25**-3, 638/644 (2009)
- [3] 高草木薫, 斉藤和也, 幅口竜也, 杉本純子: 大脳基底核による歩行と筋緊張の制御, 脳の科学 **23**, 1049/1054 (2001)
- [4] 荻原直道, 高草木薫, 土屋和雄: 身体適応-歩行運動の神経機構とシステムモデル, 81/89, オーム社 (2010)
- [5] P. Brown, Williams D: Basal ganglia local field potential activity: character and functional significance in the human, Clin Neurophysiol, **116**-11, 2510/2519 (2005)
- [6] J. M. Hausdorff: Gait dynamics in Parkinson's disease: Common and distinct behavior among stride length, gait variability, and fractal-like scaling, CHAOS, **19**-2, 026113-1/026113-14 (2009)
- [7] 栗塚義人, 三宅美博, 小林洋平: 音楽的コミュニケーションに基づく歩行介助システム, 計測自動制御学会論文集, **41**-10, 866/875 (2005)