

スマートフォンを用いた 歩行リハビリテーション支援システムの開発

伊藤 将*¹ 太田 玲央*¹ 磯崎 保徳*¹ 小林 洋平*² 織茂 智之*³ 三宅 美博*¹

Development of Walking Rehabilitation Support System Using Smartphones

Shou Itou*¹, Leo Ota*¹, Yasunori Isozaki*¹, Yohei Kobayashi*², Satoshi Orimo*³ and Yoshihiro Miyake*²

Abstract – We have developed a gait assist system Walk-Mate and have been studying to apply Walk-Mate to rehabilitation. In previous studies, Walk-Mate has been suggested potentially useful for rehabilitation but the usability of the system has been low because the system is consisted of devices which require some knowledge to operate. In this study, we developed the system on smartphones as a new hardware to improve the usability of Walk-Mate. In particular, we implemented the function of Walk-Mate by developing an algorithm of gait measuring which has been used in existing system on smartphones, and developed an application interface that can operate functions of existing system in an integrated manner. Then, we evaluated Walk-Mate function and the usability of the new system by applying with Parkinson's disease, a type of gait disturbance. As a result, the system has realized the function of Walk-Mate and usability has been improved.

Keywords : Walk-Mate system, Gait rehabilitation, Smartphone

1. リハビリテーションを取り巻く社会的背景

人間の健康状態は、運動機能や身体活動に大きく影響を与えることが知られている。中でも歩行は、日常生活における基本的かつ重要な動作であり、健康とも密接に関わっている。歩行が困難になり、車椅子や寝たきり生活になると QOL が急激に低下してしまうことから、健全な歩行は、人が日常生活を営む上で非常に重要であることが分かる。

したがって、歩行機能が何らかの要因によって低下してしまった場合、対策を講じなければならない。そのための手法としては、理学療法士や作業療法士によるリハビリテーションが現在の主流である。しかし、リハビリテーションは必要者数に対して療法士が人員が不足しているのが現状である。

2. Walk-Mate と残された問題

我々はこの現状の解決を目指し、歩行支援システム Walk-Mate を開発して研究を進めてきた^[1]。Walk-Mate は、歩行時の人間同士のリズムの相互引き込み現象のモデルに基き、仮想ロボットを用いて歩行支援を行うシステムである(図1)。このシステムは、使用者

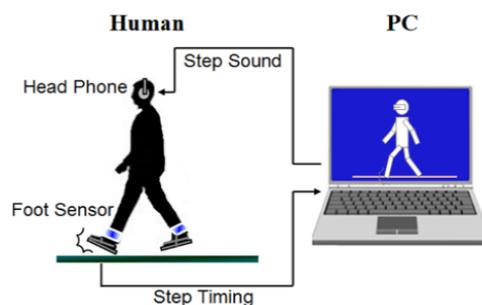


図1 歩行支援システム Walk-Mate の概念図
Fig. 1 The Concept of Walk-Mate

が仮想ロボットの足音に相当するリズム聴覚刺激を聞きながら歩くことにより、擬似的にそれと並んで歩く状態を再現できることから、療法士と患者が対となって行われる歩行のリハビリテーションと同質なものを提供できる可能性がある。

我々は、このシステムを実際の歩行疾患に適用し、臨床実験を行ってきた。脳血管障害に起因する片麻痺では、歩行が左右非対称になるという症状が見られるが、Walk-Mate 適用時の歩行の対称性が非適用時よりも高くなったことから、Walk-Mate が対称性の回復に有用であることが確認された^[2]。神経変性疾患の一種であるパーキンソン病 (Parkinson's disease, PD) では、症状の一つである加速歩行を抑制する効果が確認され、またリハビリテーションで重要となる持続効果の累積も確かめられた^[4]。

ところが、Walk-Mate は研究用のシステムとして開発されたため、日常生活の場で使用するにはユーザ

*1: 東京工業大学 大学院総合理工学研究所

*2: 株式会社 脳機能研究所

*3: 公立学校共済組合 関東中央病院

*1: Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

*2: Brain Functions Laboratory, Inc.

*3: Kanto Central Hospital

ビリティが低いという問題がある．システムは，使用者の歩行を計測するためのフットセンサと無線送受信機，仮想ロボットの計算と制御を行うノート PC，聴覚刺激を提示するためのヘッドフォンで構成されている．しかし，フットセンサは靴を覆うように装着するため手間がかかる．また，ノート PC もロボットの制御をターミナル上で行っており，システムを用いて円滑に歩行支援を行うためには，経験と知識を有する者が必要となる．

3. 本研究の目的と方針

このように，日常生活の場における Walk-Mate のリハビリテーションでの使用を想定すると，ユーザビリティの向上が必要である．もし，フットセンサやノート PC などの機能を併せ持つハードウェアに Walk-Mate を実装することができれば，ユーザビリティの向上に繋がる可能性がある．

以上より，我々は，Walk-Mate のユーザビリティの向上を目標として，Walk-Mate を新たなハードウェアに実装する．本研究では，ハードウェアとしてスマートフォンに注目した．スマートフォンは，仮想ロボットの制御やリズム計算を行える計算能力を有していることから，Walk-Mate を動作させることが可能である．また，アプリケーションという高いカスタマイズ性を持ったインターフェースを通して機能を提供することから，既存の Walk-Mate のユーザビリティの改善も行える可能性がある．そこで，我々は，既存の Walk-Mate の機能を実現するスマートフォン用のアプリケーションを開発し，その既存システムの機能を統合的に操作できるインターフェースを構築する．

4. システム開発

4.1 概要

本研究では，Walk-Mate を実装するハードウェアとしてスマートフォンに注目した．機種としては，デバイス毎の搭載センサの性能差が少ない Apple 社 iPhone を使用し，Objective-C を用いてアプリケーションを開発した．ここでは，スマートフォンに搭載されている加速度センサを用いて Walk-Mate の機能を実装し，機能を統合的に扱うことができるインタフェースを構築した．

4.2 Walk-Mate について

既存の Walk-Mate は，歩行計測を行うフットセンサ（カスタムメイド），計算のためのノート PC (Panasonic Let's Note, Cent OS)，聴覚刺激を提示するヘッドフォンで構成される（図 1）．Walk-Mate はリズムの相互引

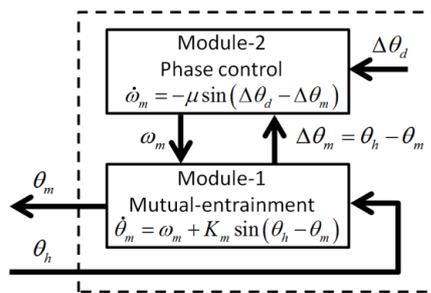


図 2 Walk-Mate の動作に用いられるフィードバックモデル

Fig. 2 Feedback Model of Walk-Mate

き込みモデルを採用している．具体的には，使用者と仮想ロボットそれぞれの歩行を位相振動子モデルで表し，それらの位相差をある目標値に収束するよう制御している（図 2）．すなわち，ある時点で使用者の歩行の位相 θ_h が観測されると，その時点での仮想ロボットの位相 θ_m との位相差 $\Delta\theta_m = \theta_h - \theta_m$ が計算され，次式に基づいてロボットの位相と振動数を制御する．

$$\dot{\theta}_m = \omega_m + K_m \sin \Delta\theta \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_m = -\mu \sin(\Delta\theta_d - \Delta\theta_m) \quad (2)$$

K_m 及び μ はそれぞれフィードバックモデルにおける位相ゲイン，振動数ゲインであり， $\Delta\theta_d$ は目標位相差である．位相差 $\Delta\theta_m$ が目標位相差 $\Delta\theta_d$ 付近に収束するとき，仮想ロボットは使用者に追従しており，Walk-Mate は安定して動作している．

4.3 Walk-Mate のスマートフォンへの実装

既存の Walk-Mate の動作は，大きく 3 段階に分けられる．すなわち，フットセンサを用いて使用者の歩行を計測し，その情報に基づいてノート PC 上で仮想ロボットのリズムのシミュレーションを行い，ヘッドフォンを通して聴覚刺激を使用者にフィードバックする．本研究では，これらの 3 段階に分けて，Walk-Mate のスマートフォン用アプリケーションを開発した．

4.3.1 歩行計測

既存のフットセンサは，位相計算に必要な接地時刻を検出するために使用されてきたが，スマートフォンへの実装に際してはフットセンサに代わる接地検出の手法が必要であった．そこで，本研究では，スマートフォンで計測可能な指標として，加速度から接地時刻を算出するアルゴリズムを考案した．このアルゴリズムは，歩行時の 3 軸加速度のノルムから接地点を抽出し（図 3），その時刻を求めるものである．この際，後述するリズムのシミュレーションをリアルタイムで行わせるため，観測点よりも以前の情報のみを使用し，接地時刻を推定するアルゴリズムとした．

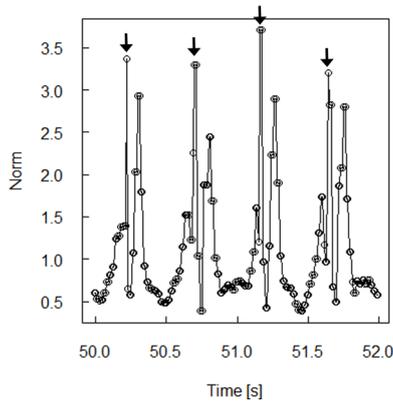


図3 腰の加速度の3軸ノルムの時系列の例, 矢印部分が検出する接地点
Fig.3 Tri-axial Norm of Acceleration Measured on Waist

4.3.2 リズムのシミュレーション

既存のシステムでは、ノート PC(Cent OS) 上で C++ で記述されたプログラムを用いて計算を行っていた。本研究で用いた iPhone のアプリケーションは Objective-C で記述するため、言語的に仕様の異なる部分を変更して実装した。

また、動作面では、接地検出の手法の変更によってプログラムを一部改良した。具体的には、フットセンサによる計測では接地検出が左右独立して行われていたが、実装したアルゴリズムでは左右の接地が統合的に検出されるようになったため、接地情報の処理のプロトコルを後者に合わせて変更した。

4.3.3 聴覚刺激のフィードバック

聴覚刺激の提示については、既存のシステムと同じ仕様を iPhone でも実現した。すなわち、iPhone の本体に付いているスピーカー及び接続されたヘッドホンによって聴覚刺激を提示する。

4.4 ユーザビリティの改善

まず、システムの構成面では、これまでの構成する機器が複数あったため、運用が複雑であった。そこで、開発したシステムではそれらの機器の機能をスマートフォンに集約したことにより、スマートフォン単独で Walk-Mate を運用することが可能となった。

また、アプリケーションのインターフェースの構築では、最小限の画面数で既存のシステムと同じ機能を実現した。すなわち、インターフェースは、Walk-Mate の説明を行う起動画面、Walk-Mate の運用する動作画面、歩行の結果を使用者にフィードバックする結果画面の3つから構成される(図4)。動作画面では、これまではノート PC 上のターミナルで操作していた Walk-Mate が、ボタンによる GUI で操作できるようになった。結果画面では、使用者の歩行状態を表す指標として、歩行周期を表示する(図5)。この歩行周期

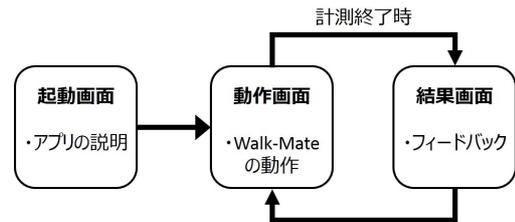


図4 アプリケーションの動作フローチャート
Fig.4 Flowchart of the Application

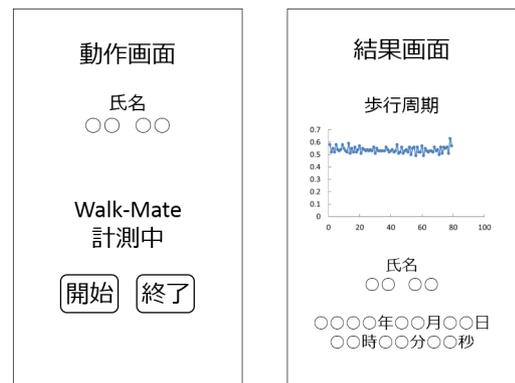


図5 動作画面と結果画面のイメージ
Fig.5 Image of the Result Window

は、Walk-Mate で検出された接地時刻の時間差を時系列として並べたものである。既存のシステムでは、歩行状態を表示させるために計測データを解析ソフトで処理していたが、新システムでは計測直後に自動で表示されるようになった。

5. 開発したシステムの評価

5.1 概要

開発したシステムについて、アプリケーションとして実装した Walk-Mate の機能と、ユーザビリティの改善の効果について評価を行った。Walk-Mate の機能については、実際の PD 患者の歩行に適用した場合に安定して動作するか実験を行い、ユーザビリティについては、既存のインターフェースからどのように変化したかを確かめた。

5.2 Walk-Mate 機能の評価

実験参加者は、PD 患者 4 名 (66 ± 3.6 歳) であった。今回、スマートフォンとして iPhone に準ずる機能を持つ iPod touch(第 5 世代) を使用し、図 6 に示すように、腰の後額面に装着した。参加者には、腰にデバイスをつけてもらった上で、長さ 80[m] の廊下を、まず 1 回上記のコースを歩いてもらって実験に慣れてもらい、2 回目に Walk-Mate を目標位相差 0[rad] で動作させながら歩いてもらった。

実験の結果、参加者 4 人分の位相差の時系列が得



図6 腰の後額面へのスマートフォンの装着の様子
Fig.6 The Smartphone is Implemented on the Back of Waist by Belt

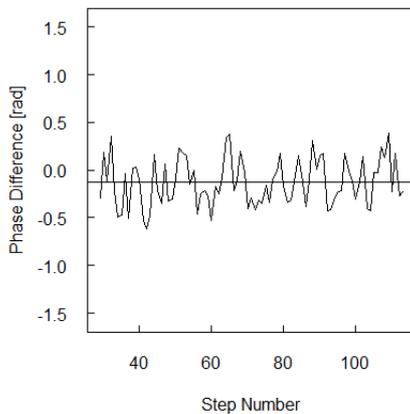


図7 計測された位相差の時系列の例
Fig.7 Typical Example of Timeseries of Phase Difference

表1 参加者の位相差の平均値と標準偏差 (平均値 ± 標準偏差)
Table 1 Means and Standard Deviations of All Participants (Mean ± S.D)

参加者 01	参加者 02	参加者 03	参加者 04
-0.29 ± 0.24	-0.13 ± 0.25	0.20 ± 0.18	-0.30 ± 0.32

られた．その一例を図7に示す．グラフの縦軸は位相差 [rad]，横軸はステップ数を表す．歩行の開始と終了時の過渡期の影響を除くため，時系列の長さの前後20%分をカットしてある．

各参加者の平均値と標準偏差を表1に示す．この結果より，それぞれの参加者において，位相差の値が一定値に収束していることから，実装した Walk-Mate は安定して使用者に追従していたことが確認された．

5.3 ユーザビリティの評価

開発したシステムでは，既存のシステムの構成機器の機能をスマートフォンに集約したことで，既存のシステムでボトルネックとなっていた運用の複雑さが改

善された．具体的には，使用者にフットセンサを装着する手間が解消され，PC上でのターミナル操作も不必要となり，計測直後にその場で歩行状態を確認することができるようになった．これについては，前述の実験においても，既存のシステムを用いるより確かに円滑に実験を進めることができた．また，実際の使用者からも，フットセンサよりもデバイスを腰に装着したほうが格段に歩きやすくなった，という意見もあったことから，開発したシステムの構成やインターフェースはユーザビリティの改善に効果があった．

6. 今後の展望

本研究では，我々が運用してきた歩行支援システム Walk-Mate を，リハビリテーションにおける応用を目指してスマートフォンに実装した．そして，実装したシステムを用いて実際の患者で歩行実験を行い，実装した Walk-Mate が安定して動作したことが確認された．また，スマートフォン単独での運用と GUI によるインタフェースを開発し，Walk-Mate のユーザビリティが改善された．

今後は，開発したシステムを歩行障害に適用し，その歩行の変容具合を分析することにより，既存のシステムと同じく歩行障害を改善する効果があるか確認する．また，ユーザビリティの改善の効果の評価をより定量的に行うため，アンケートなどの指標を導入する．

参考文献

- [1] Miyake, Y.: Interpersonal synchronization of body motion and the Walk-Mate walking support robot; IEEE Transactions on Robotics, **vol.25**, no.3, pp.638-644 (2009)
- [2] Muto, T., Herzberger, B., Hermsdoerfer, J., Poppel, E., Miyake, Y.: Interactive gait training device "Walk-Mate" for hemiparetic stroke rehabilitation; Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2268-2274 (2007)
- [3] Hove, M.J., Suzuki, K., Uchitomi, H., Orimo, S., Miyake, Y.: Interactive rhythmic auditory stimulation reinstates natural 1/f timing in gait of Parkinson's patients; PLoS ONE, **vol.7**, no.3, pp.1-8 (2012)
- [4] Uchitomi, H., Suzuki, K., Nishi, T., Hove, M.J., Wada, Y., Orimo, S., Miyake, Y.: Interpersonal synchrony -based dynamic stabilization of the gait rhythm between human and virtual robot-clinical application to festinating gait of Parkinson's disease patient-; Proc. of the 23rd 2012 Int. Symp. on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, pp.460-465 (2012)
- [5] Redd, C.B., Morris Marnberg, S.J.: A Wireless Sensory Feedback Device for Real-Time Gait Feedback and Training; IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **vol.17**, no.3, pp.425-433 (2012)