

共創型介助システム Walk-Mate による歩行リズム制御

○野本 竜太* 三宅 美博*

Walking Rhythm controlled by Co-emergence System “Walk-Mate”

Ryuta Nomoto* Yoshihiro Miyake*

Abstract – We have already proposed co-emergent walking support system “Walk-Mate” and shown effectiveness for supporting the gait disturbance. However, the detailed dynamics of Walk-Mate system, such as timing control of walking rhythm, was not clarified yet. From this background, in this study, we aimed to analyze the change of walking rhythm under the timing control of Walk-Mate system.

Keywords: co-emergence, walking, entrainment, timing control, Walk-Mate

1. はじめに

高齢者や歩行障害者の歩行介助は、患者と理学療法士の協調歩行の形をとりつつ行われることが多い^{1), 2)}。このような方法が有効である理由は、患者と療法士が相互に身体運動を適応させあう中で、状況に応じた歩行機能が時々刻々と創り上げられるからである。我々は、このような人間-人間系に特有である共創的現象を人間-機械系に再構成し、歩行介助に役立てることを目的として、共創型歩行介助システム Walk-Mate^{3)~5)}を提案してきた。これは患者と仮想ロボットが足音の交換を通して協調歩行を実現するシステムであり、人間と仮想ロボットの歩行リズムが相互に引き込まれるプロセス^{6)~9)}を活用し、双方がリズムやタイミングを適応させ運動機能の改善をめざすものである。

既に、このような共創型介助システムの有効性は臨床現場でも注目され始めており、我々は様々な形でその成果を報告してきた^{10)~12)}。たとえば、高齢者の転倒防止への有効性、股関節障害や片麻痺の患者における歩行リハビリテーション、パーキンソン病患者の歩行安定化への有効性などである。しかし、Walk-Mate システムの基本的機能である、人間の歩行リズムと仮想ロボットの歩行リズムの間でのタイミング制御（位相差制御）の能力については、まだ十分には調査されていない。特に定量的な解析が不十分である。そこで本研究では、Walk-Mate のタイミング制御とそれに基づく人間の歩行リズムの調整機能について基礎的データを収集することを目標としている。

2. 実験方法

2.1 Walk-Mate の概要

Walk-Mate は人間と脚接地タイミングに関わる情報を交換

* 東京工業大学大学院 総合理工学研究科
* Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

することで、両者の歩行リズムを同調させて協調歩行するシステムである。Fig.1 に示すように、このシステムでは仮想空間内を歩行する Walk-Mate ロボットの脚接地のタイミングが、ヘッドフォンを介してステップ音として人間側に提示され、人間の脚接地のタイミングが加速度センサで検出され Walk-Mate 側に転送される。特に、脚接地のタイミングを検出する加速度センサ（ANALOG DEVICE 社, ADXL202E）は両足首に固定され、そのデータは無線（横山製作所, YM-103A）を介して小型 P C (SONY, PCG-U101) 内の仮想ロボットに送られる。このとき Walk-Mate の重要な機能は、人間と仮想ロボットの歩行リズムを同調させた上で、そのタイミングのずれ（位相差）を制御できることである。これを目標位相差と呼び、この値を負にすると人間の脚接地タイミングに先行してロボットのステップ音がなり、正にするとその逆になる。詳細は省略するが、これによって、結果的に歩行運動を促進したり抑制したりすることができる。

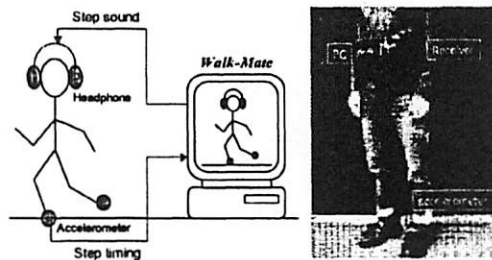


Fig.1 Walk-Mate system

2.2 実験課題と被験者

歩行実験は平坦で長い直線状の廊下で実施した。被験者は Walk-Mate を装着し、提示されるステップ音に歩調を合わせて歩行するように指示されている。廊下は 65m の直線状であり 240sec のあいだ往復歩行する。ただし廊下の端では大回りしてもらい、直線時の脚接地タイミングを大きく変化さ

せないように事前に要求している。なお、室温、照度などは快適なレベルに調整されており、また被験者以外の歩行者はいない条件で計測を行った。このような実験環境のもとで、Walk-Mate のタイミング制御機能について評価した。

被験者は、健康な 20 代男性 3 名と 40 代男性 1 名に計 4 名に無償で協力をお願いした。歩行介助との関連からすれば、本来は歩行に障害を持つ人々を被験者とするべきであるが、本研究では、それに向けた第一段階としてのタイミング制御に関する基礎的データの取得を目的としているので、このような条件を用いている。

2.3 実験手順

実験の各セッションは 240sec であり 3 つのステージから構成されている。初めの 60sec 間は目標位相差を 0[rad]とする (stage1)。これは人間の脚接地のタイミングと同時に仮想ロボットのステップ音が聞こえる状況に対応している。次の 120sec 間では、様々な条件の目標位相差を設定し Walk-Mate の提示する音に合わせて歩く協調歩行 (stage2) である。最後の 60sec 間は最初の stage1 と同じ位相差 0[rad]の歩行となる (stage3)。このような手順は実際の歩行訓練が 4~5min を 1 タームとして行われていることに基づいている。

なお、Stage2 における目標位相差のセットは、大きく 2 つに分類される。左右脚の間で、目標位相差が対称となる場合と非対称となる場合である。左右脚で対称の場合は、 $-0.75[\text{rad}]$, $-0.5[\text{rad}]$, $-0.25[\text{rad}]$, $0[\text{rad}]$, $+0.25[\text{rad}]$, $+0.5[\text{rad}]$, $+0.75[\text{rad}]$ の 7 通りである。そして左右で非対称の場合は、左脚 $0[\text{rad}]$ 右脚 $0[\text{rad}]$, 左脚 $-0.25[\text{rad}]$ 右脚 $+0.25[\text{rad}]$, 左脚 $-0.5[\text{rad}]$ 右脚 $+0.5[\text{rad}]$ の 3 通りである。これらの目標位相差に対して、歩行リズムの応答を解析することになる。

2.4 解析方法

本研究ではタイミング制御 (位相差制御) を行ったときの歩行リズムの特徴を時間的側面から定量的に解析する。その指標として、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を表す歩行周期、人間とロボットの同側脚の接地タイミングのずれを表す位相差、人間の左右脚の接地タイミングのずれを表す非対称性の 3 つに注目する。歩行周期、位相差、非対称性は以下のように定義する。

歩行周期として、左脚の歩行周期を表す左脚歩行周期 $T_L(n)$ と右脚の歩行周期を表す右脚歩行周期 $T_R(n)$ を定義する。 $T_L(n)$ は $n+1$ 歩目の左脚接地時刻 $t_L(n+1)$ と n 歩目の左脚接地時刻 $t_L(n)$ の差分とし、 $T_R(n)$ は $n+1$ 歩目の右脚接地時刻 $t_R(n+1)$ と n 歩目の接地時刻 $t_R(n)$ との差分とする。

$$T_L(n) = t_L(n+1) - t_L(n) \quad (1)$$

$$T_R(n) = t_R(n+1) - t_R(n) \quad (2)$$

非対称性を定義する前に、まず左脚接地から右脚接地までの左右脚間歩行周期 $T_{LR}(n)$ 、右脚接地から左脚接地までの右左脚間歩行周期 $T_{RL}(n)$ を定義する。 $T_{LR}(n)$ は n 歩目の右脚踏地時刻 $t_R(n)$ と n 歩目の左脚接地時刻 $t_L(n)$ の差分とし、 $T_{RL}(n)$ は $n+1$ 歩目の左脚踏地時刻 $t_L(n+1)$ と n 歩目の右脚踏地時刻 $t_R(n)$ の差分とする。

地時刻 $t_R(n)$ と n 歩目の左脚接地時刻 $t_L(n)$ の差分とし、 $T_{RL}(n)$ は $n+1$ 歩目の左脚踏地時刻 $t_L(n+1)$ と n 歩目の右脚踏地時刻 $t_R(n)$ の差分とする。

$$T_{LR}(n) = t_R(n) - t_L(n) \quad (3)$$

$$T_{RL}(n) = t_L(n+1) - t_R(n) \quad (4)$$

非対称性として、左脚歩行周期 $T_L(n)$ における非対称性を表す左脚非対称性 $A_L(n)$ 、右脚歩行周期 $T_R(n)$ 間における非対称性を表す右脚非対称性 $A_R(n)$ を定義する。 $A_L(n)$ は右左脚間歩行周期 $T_{RL}(n)$ と左脚歩行周期 $T_L(n)$ の差分を左脚歩行周期 $T_L(n)$ で除したものとし、 $A_R(n)$ は右左脚間歩行周期 $T_{LR}(n)$ と右脚歩行周期 $T_R(n)$ の差分を右脚歩行周期 $T_R(n)$ で除したものとす。

$$A_L(n) = \frac{T_{RL}(n) - T_L(n)}{T_L(n)} \quad (5)$$

$$A_R(n) = \frac{T_{LR}(n) - T_R(n)}{T_R(n)} \quad (6)$$

位相差として、左脚での人間とロボットの接地タイミングのずれを表す左脚位相差 $\Phi_L(n)$ 、右脚での人間とロボットの接地タイミングのずれを表す右脚位相差 $\Phi_R(n)$ を定義する。 $\Phi_L(n)$ は n 歩目のロボット左脚接地時刻 $t'^L(n)$ と n 歩目の人間左脚接地時刻 $t_L(n)$ の差分に $2\pi/T_L(n)$ を乗じたものとし、 $\Phi_R(n)$ は n 歩目のロボット右脚接地時刻 $t'^R(n)$ と n 歩目の人間右脚接地時刻 $t_R(n)$ の差分に $2\pi/T_R(n)$ を乗じたものとする。

$$\Phi_L(n) = (t'^L(n) - t_L(n)) \times \frac{2\pi}{T_L(n)} \quad (7)$$

$$\Phi_R(n) = (t'^R(n) - t_R(n)) \times \frac{2\pi}{T_R(n)} \quad (8)$$

上記で定義した指標を Fig.2 に示す。

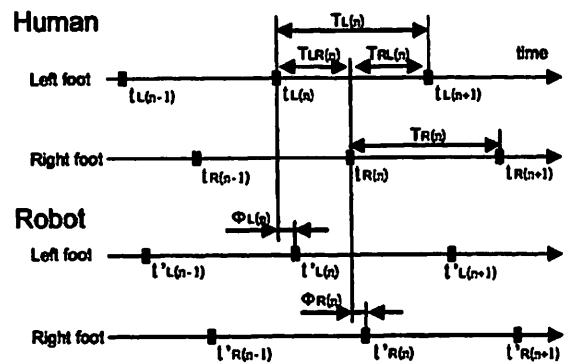


Fig.2 Definition of parameters

3. 実験結果

3.1 目標位相差が左右脚対称の場合

前節で定義した位相差、歩行周期、非対称性を用いて、脚

接地タイミングと歩行リズムを解析する。ここでは左右脚の目標位相差が対称に設定された stage2 において、目標位相差に依存した歩行リズムの変化を調べる。まず、240sec 間すべて目標位相差が 0[rad]のときの位相差、歩行周期、非対称性を求め、以下の一連の解析の基準とする。その一例を Fig.3 に示す。同図より位相差、歩行周期、非対称性はいずれも 240sec 間を通して変化しないことがわかる。このときの stage2 におけるそれぞれの値を基準とし、目標位相差を左右脚対称のまま正方向および負方向に拡大したとき歩行リズムがどのように変化するかを評価していく。

stage2 での目標位相差を左右脚対称に設定した上で、正方向 (+0.25[rad], +0.5[rad], +0.75[rad]) と負方向 (-0.25[rad], -0.5[rad], -0.75[rad]) に変化させたときの位相差変化の一例を Fig.4、歩行周期変化の一例を Fig.5 に示す。さらに目標位相差に依存した歩行リズムの変化を定量的に評価するために、stage2 での平均位相差 Φ を全被験者について平均した Φ_{mean} と stage2 での目標位相差の関係を図.6 に示した。また、stage2 での平均歩行周期 T_{mean} を stage1 での平均歩行

周期 T_0 mean で除して 1 を引き標準化したものを全被験者について平均した周期変化率と stage2 での目標位相差との関係を Fig.7 に示した。stage2 で平均した非対称性 A_{mean} の全被験者平均と stage2 での目標位相差の関係は Fig.8 に示した。

Fig.3, Fig.5 より stage2 の位相差は、設定した目標位相差に近い値をとっていることがわかる。さらに Fig.6 より、目標位相差と実際に実現された人間とロボットの位相差の間に非常に強い比例関係が存在することもわかる。このことより、Walk-Mate システムは人間とロボットの位相差を目標位相差になるように制御できていることが確認された。

Fig.5, Fig.7 より、stage2 での歩行周期は Fig.3 と比較して目標位相差が正方向に設定されるときは歩行周期が遅い方へ、目標位相差が負方向に設定したときは歩行周期が速い方へ変化していることがわかった。特に、目標位相差は負方向に比べて正方向に設定した方がより大きく歩行周期に影響が出ていた。また、Fig.8 より目標位相差を左右脚で対称に設定した場合は、その値にかかわらず stage2 での非対称性はほとんど観察されなかった。

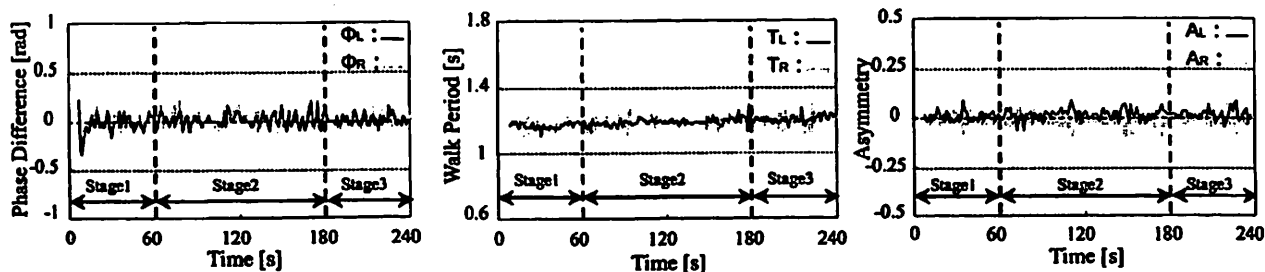


Fig.3 Temporal development of phase difference, walk period and asymmetry (Target Phase = 0 rad)

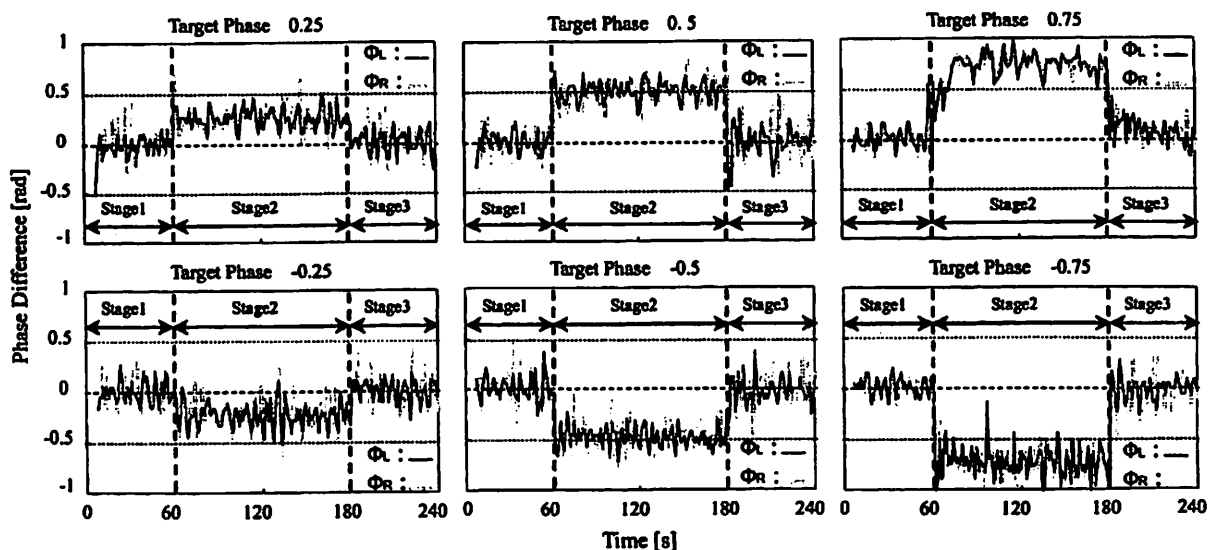


Fig.4 Temporal development of phase difference at each target phase

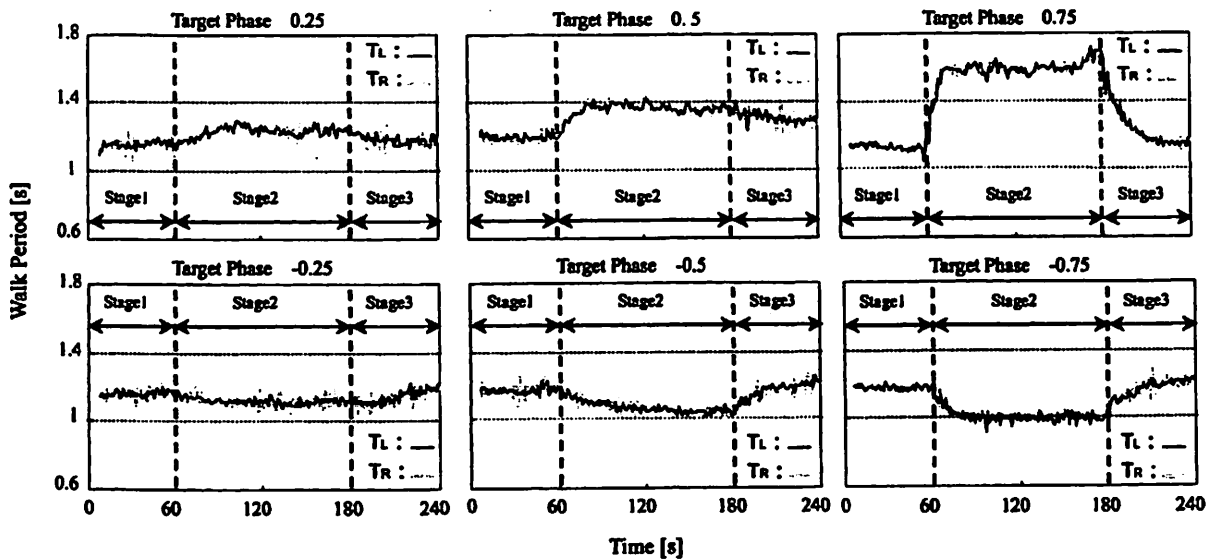


Fig.5 Temporal development of walk period at each target phase

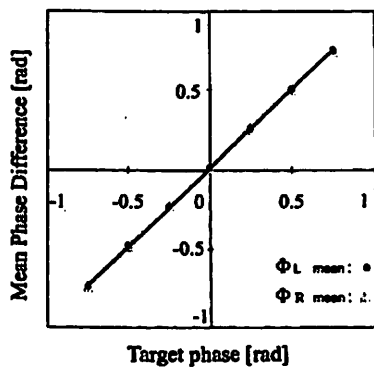


Fig.6 Mean Phase Difference

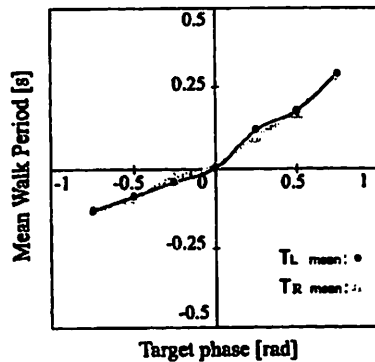


Fig.7 Mean Walk Period

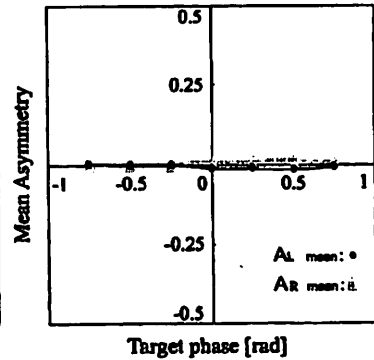


Fig.8 Mean Asymmetry

3.2 目標位相差が左右脚非対称の場合

ここでは目標位相差が左右脚で非対称の場合について検討する。stage2での目標位相差を左右非対称(左脚 $-0.25[\text{rad}]$ 右脚 $+0.25[\text{rad}]$ 、左脚 $-0.5[\text{rad}]$ 右脚 $+0.5[\text{rad}]$)に設定ときの位相差を Fig.9、歩行周期を Fig.10、非対称性を Fig.11 に示す。stage2での目標位相差と平均位相差の関係を Fig.12、平均歩行周期との関係を Fig.13、平均非対称性との関係を Fig.14 に示す。特に Fig.12-14 は前節の Fig.6-8 と対応している。

Fig.9、Fig.12 より stage2での位相差は、設定した目標位相差と平均位相差が非常に近い値をとっていることがわかる。また、Fig.10、Fig.13 より、stage2での歩行周期は左右脚対称(目標位相差の場合)に比べて、いずれも遅くなっており、目標位相差の非対称性によって歩行周期は遅くなることもわかった。さらに、Fig.11、Fig.14 より目標位相差で設定した

とおり stage2 では非対称性が現れていることも確認できた。ここでは左右脚の目標位相差の幅を大きくすることで、非対称性への影響も大きくなっていった。以上より、Walk-Mate システムは人間とロボットの歩行リズムの非対称性を目標位相差の非対称性に基づいて制御できることが確認された。

4. 考察

本研究では、Walk-Mate の基本的機能として、人間と仮想ロボットの歩行リズムの相互引き込み状態におけるタイミング制御(位相差制御)に注目し、その基礎的データの収集を行なった。特に、左右脚で対称および非対称の位相差制御を行い、そのときの人間の歩行リズムの変化を時間的側面から定量的に解析した。この結果、以下のことが明らかにされた。

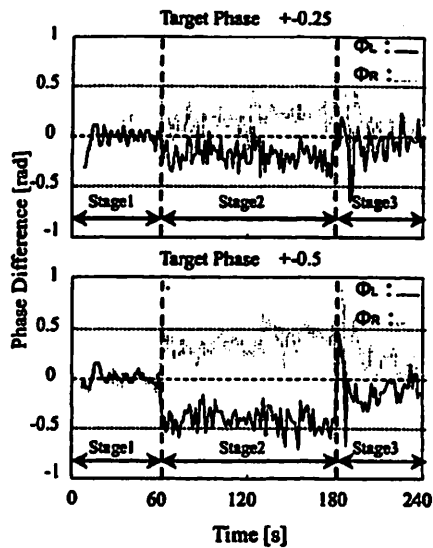


Fig.9 Temporal development of phase difference at each target phase

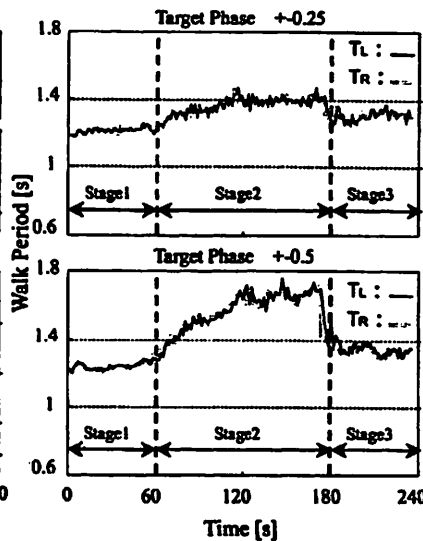


Fig.10 Temporal development of walk period at each target phase

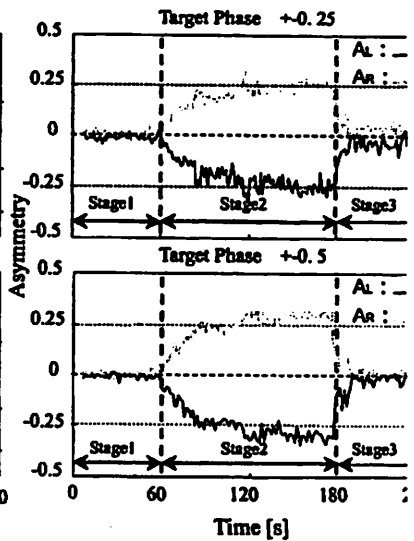


Fig.11 Temporal development of asymmetry at each target phase

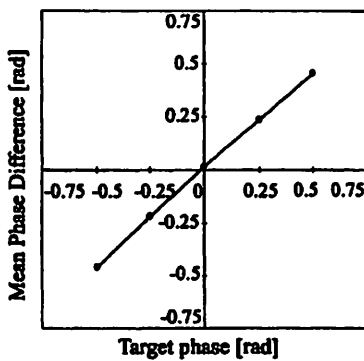


Fig.12 Mean Phase Difference

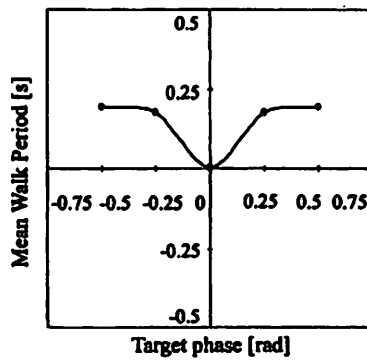


Fig.13 Mean Walk Period

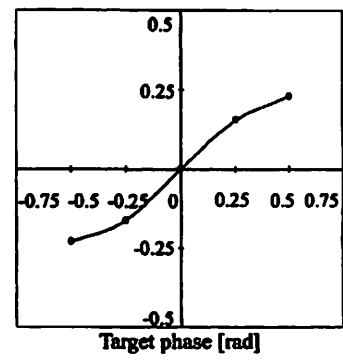


Fig.14 Mean Asymmetry

1) 目標位相差が左右脚で対称な場合、目標位相差が負であれば両脚とも位相差が負となり歩行周期が減少した。目標位相差が正の場合には位相差も正となり歩行周期が増加した。ただし周期減少の幅は増加幅よりも小さかった。

2) 目標位相差が左右脚非対称な場合、位相差にも非対称性が生じ、目標位相差が負である左脚の左右脚間歩行周期が減少し、逆の右左脚間歩行周期が増加して、歩行リズムに左右非対称性が生じた。

以上の結果から、Walk-Mate のタイミング制御による歩行リズムの制御能力が確認された。さらに、その定量的な関係も明らかにされた。これによって人間の歩行リズムを調整することが可能になり、特に、歩行周期の促進と抑制、および、

歩行リズムの左右対称性の回復が可能になる。そして様々な歩行支援への技術的な可能性が拓かれるであろう。

しかし Walk-Mate による歩行リズムの制御能力を評価する上で、本実験のように時間的側面からの解析だけでは不十分である。今後は、運動学的側面からの解析も必要とされるであろう。また、ここでは Walk-Mate のタイミング制御のみを調査したが、一定間隔で音を発生するメトロノーム等の従来型のタイミング制御との定量的な比較も不可欠である。この延長上で、より人間-人間系に近い人間-機械系の構築が可能になるものと期待される。

参考文献

- 1) 長谷川, 中島: 寝たきりにさせない介護術, 299/309, 医学芸術社 (2001)
- 2) Carlo Perfetti, 宮本省三, 沖田一彦: 認知運動療法, 協同医書出版社 (1997)
- 3) 三宅, 宮川, 田村: 共創出コミュニケーションとしての人間-機械系, 計測自動制御学会論文集, 37-11, 1087/1096 (2001)
- 4) 田村, 三宅: 相互適応的な歩行介助システム, 第10回自律分散システムシンポジウム資料, 247/250 (1998)
- 5) 武藤, 三宅: 人間-人間協調歩行系における共創出プロセスの解析, 計測自動制御学会論文集, 40-3, 554/562 (2002)
- 6) W.S.Condon and L.W.Sander: Neonate movement is synchronized with adult speech, *Science*, 183, 99/101 (1974)
- 7) エドワード・ホール: 文化としての時間(宇波彰訳), TBSブリタニカ (1983)
- 8) N.kobayasi, T.Ishii and T.Watanabe: Quantitative evaluation of infant behavior and mother-infant interaction, *Early Development and parenting*, 1-1, 23/31 (1992)
- 9) Y.Miyake and H.shimizu: Mutual entrainment based human-robot communication field, *Proc.of 3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN'94)*, Nagoya, Japan, 118/123 (1994)
- 10) 高梨, 三宅: 共創型介助ロボット“Walk-Mate”の歩行障害への適用, 計測自動制御学会論文集, 39-1, 74/81 (2003)
- 11) 栗塚, 三宅, 小林: 音楽的コミュニケーションを用いた歩行介助システム, 計測自動制御学会論文集, 41-10, 866/875 (2005)
- 12) 瀧美, 三宅, 國見, 野村, 別府: 共創介助プロセス Walk-Mate の時間的・運動力学的な有効性評価; 計測自動制御学会論文集, 41-4, 380/382 (2005)