

# 歩行介助システム Walk-Mate の時間的・運動力学的な有効性評価

渥美将利\*・三宅美博\*・國見ゆみ子\*\*・野村進\*\*・別府政敏\*\*

## Temporal and Kinematic Estimation of Walking Support System "Walk-Mate"

Masatoshi ATSUMI\*, Yoshihiro MIYAKE\*, Yumiko KUNIMI\*\*, Susumu NOMURA\*\* and Masatoshi BEPPU\*\*

In this research, to evaluate the effectiveness of walking support system "Walk-Mate" based as a Co-creation system, we applied this system to a hemiparetic stroke patient. We analyzed it from the temporal and kinematic viewpoints. The results revealed the improvement of symmetry between right and left legs and the gaining of walking function by the side of paralysis, suggesting the effectiveness of Walk-Mate system.

**Key Words :** walking support system, Walk-Mate, hemiparetic stroke, co-creation

### 1. はじめに

われわれは共創型の歩行介助システムとして Walk-Mate<sup>1),2)</sup>を提案してきた。これは人間の歩行リズムと仮想ロボットの歩行リズムが、相互に引き込まれる協調歩行システムである。人間側の脚接地タイミングが脚運動センサで検出され Walk-Mate に送られ、Walk-Mate 側の脚接地タイミングが音刺激として人間に戻される。そして両リズムの位相差、つまり音刺激と脚接地のタイミングのズレを制御することで、歩行運動を促進したり抑制したりすることができるものである。これまでは Walk-Mate を歩行障害者に適用し、主として運動の時間的側面から有効性評価を進めてきた<sup>2)</sup>。しかし、歩行運動にはタイミング制御だけではなく筋骨格系の力学的調節も関与していることは明らかである。そこで本研究では、時間的側面に加えて運動力学的側面も同時に考慮し、Walk-Mate の有効性を評価する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 計測システム

本研究では、被験者の身体各部の位置および歩行に伴う床反力の時間発展を計測する。前者は、3次元光学式位置計測装置(VICON MOTION SYSTEM 社,VICON370)を用いる。被験者の左右の肩峰・股関節・膝関節・足関節・第5MP関節に取り付けた計10個の光学反射マーカーの移動を6台のビデオカメラで取り込み、画像処理をすることでマーカー位置を計測する。サンプリング周波数は60Hzである。後者は、床反力装置(アニマ,床反力計 G3100S)を用い、歩行中の接床時に生じる左右(Fx), 進行(Fy), 垂直(Fz)の3次元方向の力成分を計測する。同時に、踵接地と爪先離地のタイミングも計測する。ただし、床反力装置全体の長さが約2.4mなので連続した歩行

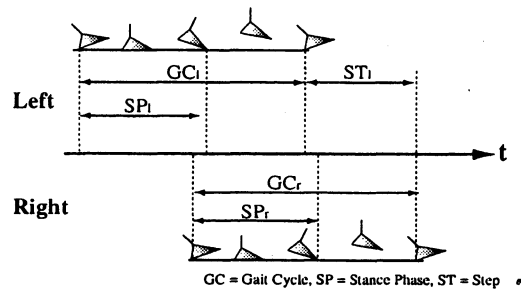
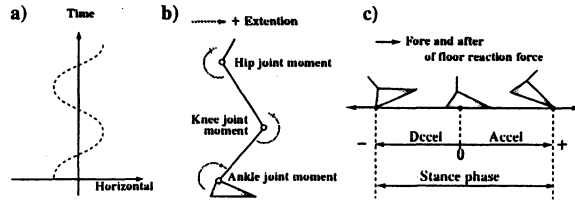


Fig.1 Temporal relationship of gait cycle



a) Center of gravity, b) Joint moment, c) Impulse  
Fig.2 Kinematic index

データは2~3歩が限度である。Walk-Mateについては先行研究と同様のもの<sup>2)</sup>を用いる。

#### 2.2 被験者と課題

被験者は47歳の男性であり、脳出血により右上下肢に麻痺の症状をもつ。麻痺の度合いはBrunnstrom III - V(上肢-下肢)であり、発症から約2年経過している。右足関節にプラスチック短下肢装具を装着して杖による自立歩行が可能である。また、脚の接地感覚は認識可能であり、聴覚にも異常は無い。Walk-Mateの音刺激と脚接地のタイミングのズレの目標値(目標位相差)は、患脚を-0.2radとして歩行運動を促進し、健脚を+0.2radとして抑制するように設定した。実験課題は被験者がWalk-Mateと歩調を合わせながら静かな室内の円形トラック上(5×4m)を歩行することである。このとき健側の手で杖を使用する。ただし運動力学的解析においては、杖を分離処理するため影響しない。初めの60sec(Stage I)はWalk-Mateと相互作用しない状態であり、自律歩行である。続いて120sec(Stage II)間、人間とWalk-Mateがお互いの歩行リズムを交換し協調歩行する。

\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 横浜市緑区長津田町 4259  
\* Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori, Yokohama  
\*\* 神奈川県総合リハビリテーションセンター 厚木市七沢 516-1  
\*\* The Kanagawa Rehabilitation Center, 516-1 Nanasawa, Atsugi  
(Received February 26, 2004)  
(Revised November 24, 2004)

### 2.3 時間的側面からの評価

時間的側面からの評価として、これまでは左右脚の踵接地タイミングの非対称性を、位相差  $180^\circ$  のずれを0%とし、それからのズレとして評価してきた<sup>2)</sup>。これらはWalk-Mateシステムの脚運動センサを用いて計測することができる。さらに、本研究では床反力計を用いて踵接地タイミングと爪先離地タイミングを同時に計測することで、立脚期(足が床に接地している時間)や遊脚期(足が床から離れている時間)という歩行運動の支持性に関わる指標も導入する<sup>3)</sup>。Fig.1のように踵接地と爪先離地タイミングから、歩行周期(Gait cycle)と立脚期(Stance phase)を定義する。そして、立脚時間率(立脚期/歩行周期)を導出しこれを支持性の指標として用いる。立脚期は体重を支持する時期であり、立脚時間率が大きいほど支持能力の高さに対応する。さらに左右脚の立脚期の対称性は、患脚の立脚時間を健脚の立脚時間で除したものであり、その値が100%に近づくほど左右対称で安定な歩行であることを示す。

### 2.4 運動力学的側面からの評価

運動力学的側面からの評価としては、左右方向の重心軌跡と下肢の関節モーメント、前後方向の床反力の力積を用いる。Fig.2にその概略図を示す。左右方向の重心軌跡は、左右の非対称性を大域的な力学的側面から評価することに対応する。一方、局所的な評価としては、各関節モーメントと立脚期における前後方向の力積を用いる。関節モーメントは関節軸周りの筋張力の総和である。これによって被験者が行なおうとする努力を筋活動の発現という形で理解することができる。ただし、関節モーメントは身体を剛体リンクモデルとして構成し、各関節位置と床反力の値、各個人の各体節における質量・重心位置等の値(生体力学定数)を使って導出している<sup>4)</sup>。前後方向の立脚期における力積は床反力( $F_y$ )の符号が負から正に切り替わる時期を基準に、前半を制動成分、後半を駆動成分に分け、おのおの成分を脚の制動性(Deccel)、駆動性(Accel)として表わし、評価指標として用いる<sup>5)</sup>。

## 3. 結果と考察

### 3.1 時間的側面

Fig.3aに患脚と健脚における人間の踵接地タイミングとWalk-Mate側の音刺激タイミングの位相差に関する時間発展を示す。このときStage IIにおいて、若干のゆらぎはあるものの、患脚と健脚はそれぞれ目標位相差  $-0.2\text{rad}$ ,  $+0.2\text{rad}$  に徐々に接近しており、Walk-Mateシステムが正常に動作していることがわかる。Fig.3bに人間側の左右脚における踵接地タイミングの非対称性の時間発展を示す。Stage IIにおいて、歩行運動の非対称性が徐々に緩和し改善されていることが確認できる( $p < 0.01$ )。これらの2つの指標はWalk-Mateに実装されている人間の脚運動センサからのデータに基づいており、その時間変動もこれまでのわれわれの報告と極めてよく一致している<sup>2)</sup>。

従来は、ここまでしか評価していなかったのであるが、本研究では、さらに以下の解析を加えた。まず、Fig.3cに患脚と健脚の立脚時間率の時間発展を示す。ただし、被験者の歩行する

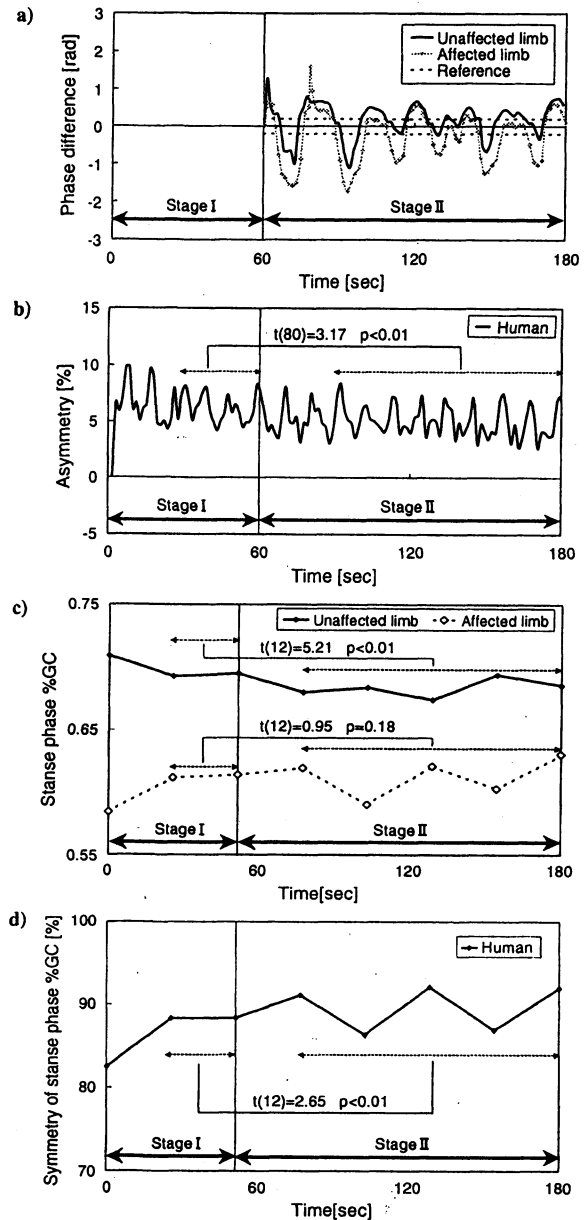


Fig.3 Temporal development of gait parameter

円形トラックの一部分しか床反力装置と重ならないため、計測タイミングが離散的になっている。このときStage IIにおいて、患脚の立脚時間率は弱い増加傾向にあり( $p=0.18$ )、健脚の立脚時間率では有意な減少が観察されている( $p < 0.01$ )。これは健脚に片寄っていた体重支持が患脚に移行しつつあることを意味している。Fig.3dに患脚と健脚における立脚時間率の対称性の時間発展を示す。Stage Iに比して、Stage IIにおいて有意に増加傾向にあり( $p < 0.01$ )、後半では90%を越えてより対称な歩行に近づいている。これは体重支持の時期において左右脚のアンバランスが改善されたことを意味している。

以上のようにWalk-Mateとの協調歩行によって、患脚と健脚の立脚時間率がバランスされ、体重を支持する時期における歩行の左右対称性が改善されることが示された。

### 3.2 運動力学的側面

Fig.4に健常歩行とStage IとStage IIの左右方向の重心軌跡

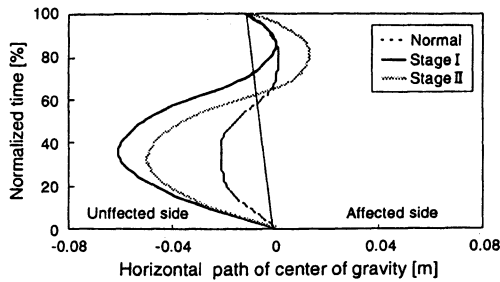


Fig.4 Horizontal path of center of gravity

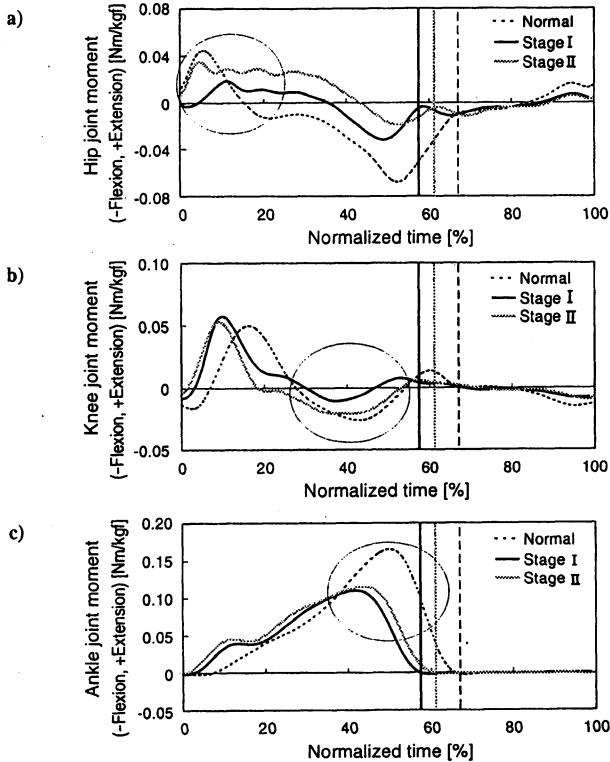


Fig.5 Joint moment of the affected limb

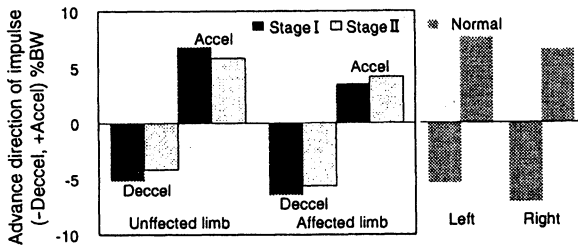


Fig.6 Impulse of the advance direction

を示す。ただし、1歩行周期分を正規化し、図中の直線は歩行の進行方向を示している。健常歩行は左右の最大変動幅がそれぞれ約2cmであるのに対し、Stage Iでは健脚の側では約6cm、患脚の側では約1cmであり非対称である。しかし、Stage IIにおいて健脚での変動幅が約1cm減少し、患脚では約1cm増加し左右対称な状態に近づいていることがわかる。この結果より、重心移動の左右の非対称性の緩和による歩行の安定性の改善効果が認められた。

Fig.5に、1歩行周期で正規化した健常歩行と片麻痺歩行のStage IとStage IIの股関節(Fig.5a)、膝関節(Fig.5b)、足関節(Fig.5c)の関節モーメントを示す。縦線はおおのこの遊脚期間

始時期であり、時間軸の左端が立脚開始時点に相当する。股関節モーメントでは、立脚初期に最大伸展モーメントが生じ、その後、伸展から屈曲に移行して立脚後期には屈曲モーメントが最大になる。片麻痺歩行のStage Iにおいては立脚初期の最大伸展モーメントが消失するが、Stage IIにおいては立脚初期の伸展モーメントが回復し健常歩行に近くなる傾向が観察された。膝関節モーメントを健常歩行と片麻痺歩行で比較すると、最大伸展モーメントに差はないが、最大屈曲モーメントは、Stage IよりStage IIの方が大きく健常歩行に近づいている。足関節モーメントでは、Stage Iに比して、Stage IIにおいて伸展モーメントが若干増加し健常歩行に近づいている。

健常歩行とStage I、Stage IIの患脚と健脚の前後方向の立脚期における力積(平均力)をFig.6に示す。これらは床反力成分(Fy)を積分することにより求めた。ただし、個体差をなくすため体重で除し、立脚時間の変動による影響を無視するため歩行周期で正規化された単位時間あたりの力の大きさとして評価した。Stage IとStage IIを比較すると、患脚は制動成分が12.0%減少し駆動成分は19.1%増加した。健脚は制動成分が19.0%減少し駆動成分も14.5%減少した。このことは健脚が患脚を代償し歩行運動を行っていた状態から、患脚機能の獲得に移行したことを意味しており、歩行運動の左右の非対称性が緩和されたことを示している。

以上のようにWalk-Mateとの協調歩行で、患脚の関節モーメントおよび力積における駆動力が増大し、患脚において歩行機能獲得が促進されることが示された。

4. まとめ

共創型の歩行介助システムWalk-Mateとの協調歩行によって、片麻痺歩行における健脚を患脚が代償する歩行傾向から、患脚機能を新たに獲得し非対称性を緩和する歩行傾向へ移行することが示された。近年まで、歩行リハビリは健脚が患脚を代償する訓練が主体であったが、リハビリ本来の観点からすれば、Walk-Mateが実現する患脚の歩行機能の回復という方法は妥当なものと考えられる。これはTaubらの提案する強制誘発運動療法(CI療法)<sup>6)</sup>とも対応する。なお本報告では被験者が1名であったが、その結果は先行的知見とも整合し、評価方法間でも矛盾は無かった。今後症例数を増やしさらなる解析を進める予定である。

参考文献

- 1)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)
- 2)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)
- 3)土屋和夫: 臨床歩行分析入門, 医歯薬出版 (1995)
- 4)江原, 山本: 関節モーメントによる歩行分析, 医歯薬出版(2001)
- 5)森田, 古屋, 山本, 奥村: 片麻痺歩行の床反力解析, 総合リハビリテーション医学, 17-10, 771/775 (2001)
- 6)Taub E et al: Technique to improve chronic motor deficit after stroke, Arch Phys Med Rehabil 74, 347/354 (1993)