

歩行介助における共創出プロセスの解析

武藤 剛* · 三宅 美博*

Analysis of Co-emergence process in Walking Support

Takeshi Muro* and Yoshihiro Miyake*

We analyzed the Co-emergence process of cooperative walk between the handicapped person and the walking support robot "Walk-Mate". From the results, we suggested a relation between the mechanisms that characterize the Co-emergence process and those that improve handicapped gait motion.

Key Words : Co-emergence, mutual constraint, walking support, entrainment, cooperative walk

1. はじめに

人間は運動を相互に適応させあうことで、状況に応じたさまざまな協調機能を創り出すことができる。われわれは、このような人間同士の協調運動の共創出(Co-emergence)プロセス^{1,2)}の一例として、障害者の歩行訓練の現場で広く用いられる協調歩行に注目し、その解析と制御機構のモデル化を進めてきた。そして、人間2人の協調歩行過程における相互拘束プロセスの存在と、その同調現象について初めて明らかにした³⁾。

歩行運動における相互拘束プロセスは、腕運動と脚運動の間での作用関係として観察されるが、それは能動的注意を必要とする随意的な運動制御が強く関与する腕運動と、脊髄レベルの自動的な運動制御が主として関与する脚運動の間で循環的な相互作用である。しかも、この循環的な過程が協調歩行をしている人間の間で同調することが示され、このプロセスが人間同士の協調運動の共創出に重要な役割を担っている可能性が明らかになった³⁾。

また、この現象のモデルとして二重ダイナミクスモデル⁴⁾を提案し、それをを用いて人間-機械系における共創出過程の再構成も進めてきた。これが人間と機械の間で足音の交換を介して協調歩行を実現する歩行介助ロボット Walk-Mate⁵⁾である。すでに、人間と Walk-Mate の間で相互拘束プロセスとその同調を再現できることを示し⁶⁾、また、Walk-Mate との協調歩行が障害者の歩行介助に有効であることも明らかにしてきた⁷⁾。しかし、相互拘束プロセスとその同調が、歩行介助という機能の共創出過程とどのような関係にあるのかという問題については、これまで全く手をつけられていなかった。

本研究は、このような現状を踏まえてなされたものであり、Walk-Mate と障害者の協調歩行において、相互拘束プロセスと

歩行障害の緩和過程の相互関係を解析することを目的としている。これによって共創出プロセスとしての歩行介助の実現へ向けた研究基盤を築くものである。

2. 実験

2.1 実験装置

Walk-Mateは、人間の歩行運動における相互拘束過程をモデルとして構成されたものである。ここで採用されている二重ダイナミクスモデルは、身体モデルと内部モデルという2つのサブモデルから構成され、両者の循環的な作用関係によって相互拘束プロセスを再現するものである。非線形振動子として構成される身体モデルは、脚リズムの生成機構CPG(Central Pattern Generator)による自動的な運動制御を表現したもので、人間の脚運動との間に相互引き込みを実現し、安定(コヒーレント)な位相関係を自己組織する。また、内部モデルは、身体モデルにおいて生成した位相関係を目標位相差に接近させるように身体モデルの固有振動数を修正する。なお、このモデルの詳細に関しては参考文献⁸⁾を参照していただきたい。また、ハードウェアとしては、靴の中敷に装着した圧力センサによって人間の足裏の接地タイミングを検出し Walk-Mate 側に送るとともに、Walk-Mate 側では身体モデルのリズムを足音として人間側にヘッドフォンを介して提示する。

2.2 実験設定

本実験では、運動機能障害を有する患者8名(A,B,C,D,E,F,G,H)が、Walk-Mate とともに240secの歩行を行なった。なお、最初の60secは、Walk-Mate の発するリズム音は被験者に提示されない自由歩行である。いずれの被験者もBrunnstrom stage III から V の段階にあり、不安定ながらも240sec程度ならば単独での歩行は可能であった。また、その疾患は、頭部外傷(A,C,G,H)、脳血管性疾患(B,D,E)、脳炎後遺症(F)の3種類に分類され、すべての患者で錐体路系障害に基づく片側性麻痺としての歩行障害を有することが医師の所見から示されて

* 東京工業大学総合理工学研究科 横浜市緑区長津田町 4259

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

(Received February 13, 2004)

(Revised June 28, 2004)

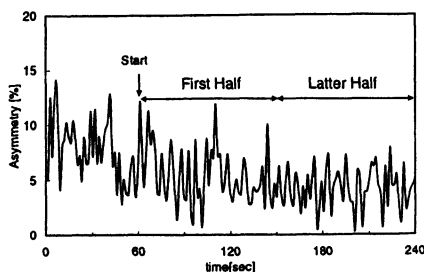


Fig.1 An example of walking support process

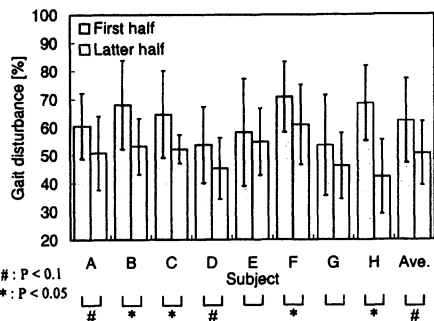


Fig.2 Walking support process

いる。また、被験者には、提示されるリズム音が明瞭に聞き取れることを確認した上で、その音に注意を集中し、そのリズムと歩調を同調させながら歩くことを事前に要求した。

人間側の相互拘束プロセスはすでに報告した手法に基づいて計測する。腕運動としては肘関節角の振幅ゆらぎ成分 $Fluctuation_i$ を用い、脚運動として人間の脚接地リズムと Walk-Mate の身体モデルの位相差の変動量によって定義されるコヒーレンス $Coherence_i$ を計測した。また計測は麻痺の生じていない側の腕と脚を対象とした。これらを以下の (1), (2) 式に示す。

$$Fluctuation_i = \left| \bar{Amp}_i - \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 \bar{Amp}_m \right| \quad (1)$$

$$Coherence_i = \sum_{m=1}^5 \left| \theta_m - \theta_{m-1} \right| \quad (2)$$

なお、 \bar{Amp}_i は、単独歩行の際の腕振り振幅の平均値によって規格化された歩行中の肘角度振動の振幅値である。 θ_i は、脚接地リズムと Walk-Mate の身体モデルの間での位相差に対応する。また、Walk-Mate 側の相互拘束プロセスとしては、既に報告した手法と同様に、内部モデルに関しては、そのダイナミクスの変化を特徴付ける固有振動数の変動量の絶対値を用い、身体モデルでは上記の $Coherence_i$ を用いる。なお、時間 t については離散的に定義されるものであり詳細は参考文献を参照していただきたい。

歩行介助効果の評価に関しては、これもすでに報告した指標の一つである、左右の脚の接地時刻から計算される歩行の非対称性 $Asymmetry_k$ を用いる。これは健常側における脚の接地周期 $Period_k$ と、それに続く連続した左右脚の接地時刻 T_{R_k} 、および T_{L_k} をもとに (3) 式によって求められる。

$$Asymmetry_k = \left(\frac{T_{R_k} - T_{L_k}}{Period_k} - 0.5 \right) \times 100 \quad (3)$$

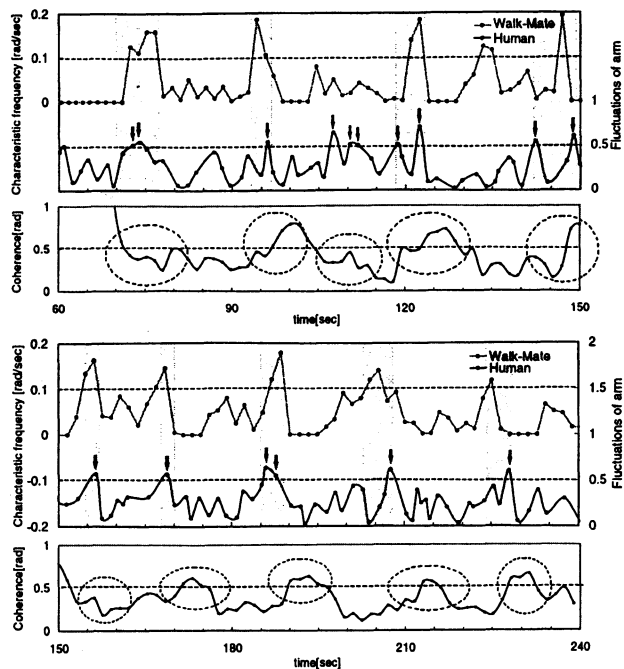


Fig.3 Analysis of mutual constraint process

また、Walk-Mate の目標位相差は、すでに報告した条件と同様に、麻痺側の Walk-Mate の歩行リズムが健常側に比べて、0.1 ~ 0.5rad 位相進みの状態になるように設定した。これは、麻痺側の脚運動を提示リズムによって促進し、その非対称性を緩和させることを目的としたものである。

3. 結果

まず、Fig.1 に被験者 B における歩行の非対称性の時間発展を示す。その結果、自由歩行時に比べ、協調歩行中は、 $Asymmetry_i$ がより 0 に接近しており、歩行の非対称性が緩和されていると考えられる。また、そのような歩行の非対称性の改善は、協調歩行を始めた初期の段階よりも後期の段階において強くなる傾向もこの図から読み取れる。このような傾向を定量的に評価するため、協調歩行の前半 (First half: 60sec ~ 150sec) と後半 (Latter half: 150sec ~ 240sec) における、各被験者の歩行の非対称性の評価を行なった。これを Fig.2 に示す。なお、縦軸の値 Gait disturbance は、協調歩行中の歩行の非対称性の大きさを示しており、自由歩行中の各被験者の歩行の非対称性の平均値で規格化したものである。その結果、8 名中 6 名で協調歩行の後半の値が前半よりも有意に (t -test) 低くなっており、協調歩行とともに歩行運動の非対称性が徐々に緩和されることを示している。

つぎに、相互拘束プロセスとの関係を調べるため、同じ協調歩行の前半と後半で分けて、被験者 B における腕運動の $Fluctuation_i$ 、Walk-Mate 側の内部モデルによる固有振動数の変化量の絶対値、さらに脚運動と身体モデルの間での $Coherence_i$ の時間発展を Fig.3 に示す。ここで上段が前半、下段が後半に対応している。

その結果、人間側においては、前半後半ともに、腕運動のゆ

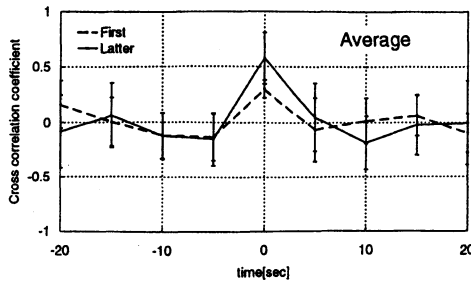


Fig.4 Cross correlation of of mutual constraint process

らぎ $Fluctuation_1$ が大きくなった直後において、脚運動と身体モデルのコヒーレンス $Coherence_1$ がコヒーレントな状態から逸脱する傾向が見られた。この傾向を明確に示すため、 $Fluctuation_1$ に関しては閾値を0.5として、この値以上になったときを顕著な変化とみなし矢印で示した。また、 $Coherence_1$ に関しては、コヒーレント状態からの逸脱に対応する箇所を破線で囲った。さらに、Walk-Mate側においても、内部モデルの固有振動数の変化量が顕著に大きくなった直後に、脚運動と身体モデルのコヒーレンス $Coherence_1$ がコヒーレントな状態から逸脱する傾向が見られた。ほかの被験者でも同様の関係が観察されており、これらのことから、すでにわれわれが観察してきたものと同様の相互拘束プロセスが、人間側でもWalk-Mate側でも実現されていたことを確認できる。

人間側とWalk-Mate側の相互拘束プロセスの関係についても、腕運動の $Fluctuation_1$ が顕著に大きくなるタイミングと、固有振動数変化が顕著に大きくなるタイミングが定性的に一致する傾向が観察された。この同調傾向を明らかにするため、両者の間に対応していると推測される箇所を図中に網掛けで示した。

さらに、これらの相互拘束プロセス間の同調性を定量的に評価するために、すでにわれわれが確立している解析手法を適用した。それは、Walk-Mateの内部モデルの固有振動数の変化量に関しては0.1rad/secを、脚運動の $Fluctuation_1$ に関しては0.5を閾値として、この値以上になったときを顕著な変化とみなし5sec刻みで2値化し相関を調べるものである。そして、双方における顕著な変化の有無を2列のビット列{0,1}に対応付け、両ビット列間の相互相関関数を求める。その結果、Fig.4に示すように、協調歩行の前半後半ともに、そのピークの平均は0secにあり両時系列が同調傾向にあることが示された。また、その同調性の高さに対応する0secにおける相関係数の値に関しては、協調歩行の前半に比べ、後半のほうが有意に高い値 ($p < 0.05$, t -test) をとっており、協調歩行の後半において、両者の相互拘束プロセスの同調性が向上する傾向が示された。

以上の結果から、協調歩行の前半では歩行の非対称性はあまり緩和されておらず、双方の相互拘束プロセスの同調性も相対的に低かったが、協調歩行の後半では歩行の非対称性が改善され、相互拘束プロセスもより同調した状態になっていたと考えられる。

4. 考察

Walk-Mateによる障害者の歩行介助実験を行ない、歩行の非

対称性の緩和と相互拘束プロセスの関係を解析した。その結果、歩行の非対称性の緩和と相互拘束プロセスの同調性が、実験前半よりも後半で上昇する傾向にあった。このことから、歩行の非対称性の緩和過程と人間とWalk-Mateの相互拘束の同調性は共に時間発展するプロセスであり、その時間発展の間に相関があることが示された。したがって、相互拘束プロセスの同調性が向上するメカニズムと歩行の非対称性が緩和するメカニズムの間に関係があることが示唆される。すでに、われわれは人間側での相互拘束過程の解析から、協調歩行において自動的な運動制御と随意的な運動制御の連関が重要であることを示してきたが、この結果は、歩行介助という運動機能の共創出機構の解明に道を拓くものである。

なお、リズム刺激を用いた歩行介助手法としては、神経筋同調法⁹⁾が知られており、パーキンソン病患者や片麻痺患者の歩行パターンの改善に有効であることが報告されている⁹⁾。しかし、それは一定リズムを人間に提示する手法であり、運動の共創出としての相互適応を基盤とするわれわれの介助手法とは異なっている。すでに述べたように、このWalk-Mateの相互拘束プロセスは、Walk-Mate特有のメカニズムに基づくものであり、本結果はWalk-Mateに用いられている二重ダイナミクスモデルの妥当性を示すだけでなく、Walk-Mateの歩行介助ロボットとしての有効性を支持するものである。

ただし、ここで示された関係性は、短時間の協調歩行の解析結果に基づくもので、即効的な介助効果を観察したに過ぎない。一般に、運動機能の回復を目的とした歩行介助は、その数倍の時間を長期にわたって行なわれるため、今後より長時間の歩行介助プロセスの解析を行なうことが必要と考えられる。

謝辞

本実験は、B.Herzberger博士およびE.Pöppel教授(ミュンヘン大学)の支援により以下の施設(Klinikum Lenggreis, Rehabilitation center Isarwinkel, Clinic of Right of Isar, Clinic of Großhadern)において行なわれた。ここに謝意を表する。

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) 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, 40-5, 554/562 (2004)
- 3) 田村, 三宅: 相互適応的な歩行介助システム, 第10回自律分散シンポジウム資料, 247/250 (1998)
- 4) 武藤, 三宅: 歩行介助を目的とする人間-ロボット協調系における共創出過程の解析, 計測自動制御学会論文集, 38-3, 316/323 (2002)
- 5) 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, 計測自動制御学会論文集, 39-1, 74/81 (2003)
- 6) M.H.Thaut: Rhythmic intervention techniques in music therapy with gross motor dysfunction, Arts in Psychotherapy, 15, 127/137 (1988)