

共創インタフェースとしての歩行介助

武藤 剛* 三宅 美博*

本稿では、共創インタフェースの1例である歩行介助ロボットWalk-Mateの開発に関連した人間の協調歩行実験の結果を紹介する。Walk-Mateとは人間と足音を介して協調歩行を実現し、歩行介助を行なうバーチャルロボットである。まず、Walk-Mateを高齢障害者の歩行訓練へ適用し、歩行運動のリハビリテーションが実現された例を紹介する。また、そのメカニズムを明らかにするため、共創プロセスという視点から人間の協調歩行運動の発展プロセスを解析し、それが人間の協調動作における仮説である二重性に基づくダイナミクスを相互に同調させあう形式で実現されていたことを示す結果も紹介する。

Walk-support Technology as Co-creation Interface

Takeshi MUTO* and Yoshihiro MIYAKE*

Walk support robot "Walk-Mate" is an application of the Co-creative interface. It realizes the cooperative walk by the interaction of the footsteps between the human and the virtual robot. We have applied it to the walk support of the elderly people, and the validity of the rehabilitation for the walk training was found. Additionally, by the analysis of the temporal development of the human's cooperative walk as Co-creation process, it was found the results that the process were realized by the synchronization of the dynamics based on the hypothesis "Duality".

1. はじめに

福祉施設では単独歩行が困難な高齢障害者が介護士と歩調を相互に適応させあう協調歩行によって歩行訓練が行なわれている。このような訓練方法の特長は、協調歩行によって状況に応じた適切な歩行介助機能をリアルタイムで創り出していることにある。本研究は、このような人間と人間の介助関係において実現される歩行運動リハビリテーションの共創(Co-creation) [1][2]プロセスに着目し、それを人間-機械系において実現できる共創インタフェースとしての歩行介助装置の構築を目的としている。

従来、歩行介助装置は、あらかじめ機械側に組み込まれている機能集合から、必要な機能が人間側へ選択的に供給される形式がとられている。このような形式の介助装置の具体例としては、電動車椅子[3]や、インテリジェント義足[4]、多機能動力義足[5]などを挙げることができる。このような場合、実現できる介助機能は、機械側に組み込まれている機能のみに限定されてしまうため、人間同士の介助関係でみられる共創プロセスとしてのリハビリテーションを実現することは困難となっている。

このような問題へのアプローチとして、我々の研究グループでは共創インタフェースとしての歩行介助装置として二重性モデル(Dual-Dynamics model) [2][6]を活用した歩行介助ロボットWalk-Mate[2][7]を提案してきた。そして、その有効性を明らかにするため、それを実際の高齢障

害者の歩行介助に適用する実験を行なっている[8]。さらに、実際の共創プロセスを解析するため、人間の協調歩行における歩行運動の相互適応プロセスを計測する実験も行なっている[9][10]。本稿では、歩行介助ロボットWalk-Mateの説明とともに、これら2種類の実験結果の解析例を紹介する。

2. Walk-Mate

歩行介助ロボットWalk-Mateは仮想ロボットであり、

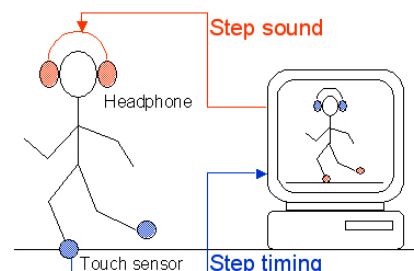
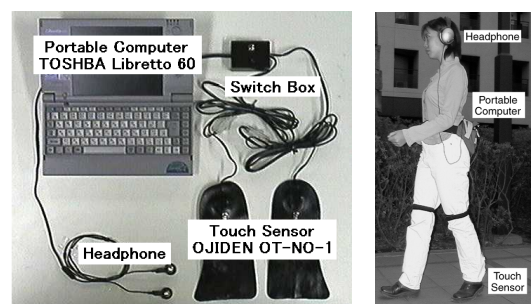


Fig.1 Walk-Mate[2][7].

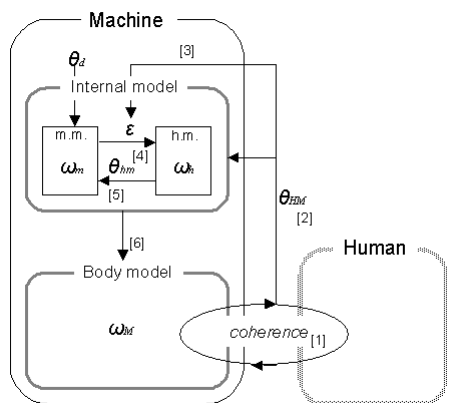
*: 東京工業大学総合理工学研究科
*: Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Fig.1のように構成されている。人間はヘッドフォンを通してロボットの足音に相当するリズム音を聞くことができる。また、ロボットは、タッチセンサを通して人間の足の接地タイミングを計測することで、人間の歩行リズムを観測する。このような相互作用を通し、Walk-Mateは人間との協調歩行を実現することができる。

また、Walk-Mateの歩行リズムは二重性モデル[2][6]によって制御されている。これは、自己の二重性[1][2]と呼ばれる仮説に基づく人間の協調動作の2種類のはたらきをモデル化し、それらの相互拘束プロセスとして表現したものである。二重性モデルとその相互拘束プロセスの概要をFig.2に示す。身体モデルは、協調動作の身体的なはたらきを非線形振動子によってモデル化したものであり、人間側の歩行運動との間に身体リズムの相互引き込み[11]を介する開かれた相互作用関係を実現し、コヒーレントな位相関係を自己組織することができる。内部モデルは、協調動作の意識的なはたらきを位相振動子[12]の結合系によってモデル化したものであり、身体モデルにおいて生成された関係を、閉じた状態空間としての内部モデル中に再構成する。そして、それを一方向的な作用関係として分解して表現することで、人間側との位相関係の変化を予測することを行う。さらに、それぞれのモデルは相互に拘束しあうことで、人間側との位相関係を柔軟に調整し、状況に応じた適切な協調機能をリアルタイムで実現させる。

3. Walk-Mateによる高齢者の歩行介助

ここでは、福祉施設を利用する2名の高齢者（高齢者A、及びB）がそれぞれWalk-Mateとともに協調歩行を行なった例を紹介する。歩行実験は240sec（最初と最後の60sec



1. Self-organize coherence between human motion and body model
2. Get the organized coherence as phase difference θ_{HM}
3. Modify the internal model parameter such as $\min(\theta_{HM} - \theta_d)$
4. Search ω_h such as $\min(\theta_{HM} - \theta_{hm})$ under the fixed ω_m in internal model
5. Search ω_m such as $\min(\theta_d - \theta_{hm})$ under the fixed ω_h in internal model
6. Change ω_M in body model corresponding to searched ω_m
7. Back to 1.

Fig.2 Dual-dynamics model[2][6].

は単独歩行)行われた。また、高齢者への歩行介助は、転倒防止を主たる目標とすることが一般的である。そのため、歩行ダイナミクスの円滑性（歩行周期のゆらぎ量）及び、両脚の運動バランス（足の接地タイミングの非対称性）を評価指標としてその有効性の検討を行った。なお、周期ゆらぎは時間的に連続して定義された2つの歩行周期の差分値として、また、非対称性は、歩行周期に対する左右の足の接地時間差の比率から50%差し引いた値として定義した。

3.1 結果1：高齢者A（身体系障害の場合）

高齢者Aは、転倒事故を原因とする片側性膝関節障害を持つ85歳の女性である。Fig.3に高齢者AとWalk-Mateの歩行周期の時間発展を示す。図中の矢印は協調歩行の開始と終了の時刻を示している。すると、協調歩行が行なわれている領域では、それ以外に比べ、周期ゆらぎが減少し、より円滑な歩行ダイナミクスが実現されている様子がわかる。また、Fig.5の左側のグラフにそれぞれの領域の平均値を示しているが、隣接する領域間の有意差 ($p < 0.05$) も認められ、これらの結果を支持するものとなっている。同様に、高齢者Aの足の接地タイミングの非対称性の時間発展をFig.4に示す。ここでも、60sec以降足の接地タイミングの非対称性が0%へ収束する傾向が見られており、両脚の運動バランスが対称な方向へ改善されていると考えられる。Fig.5の右側のグラフに示す各領域の平均値においても、その有意差 ($p < 0.01$) が認められ、これらの結果を支持するものとなった。

3.2 結果2：高齢者B（脳神経系障害の場合）

高齢者Bは、脳血管出血の治療薬の副作用から、片側性麻痺を有する86歳の男性である。Fig.6に高齢者BとWalk-Mateの歩行周期の時間発展を示す。すると、協調歩行が始まる60sec以降は、高齢者Aの場合と同様、協調歩行前に比べ周期ゆらぎが減少しており、歩行ダイナミクスの円滑化が実現されていると考えられる。しかも、ここではその傾向が協調歩行後においても持続している様子がわかる。Fig.8の左側のグラフにそれぞれの領域の平均値を示しているが、協調歩行前と協調歩行中では有意差 ($p < 0.01$) が認められるが、協調歩行中と協調歩行後の間では優位差は認められておらず、歩行運動の円滑化が協調歩行後も継続して実現されていたことを示している。

同様に、高齢者の足の接地タイミングの非対称性の時間発展をFig.7に示すが、60sec以降、足の接地タイミングの非対称性が0%へ収束し、その傾向が継続する様子も見られており、両脚の運動バランスが対称な方向へ改善され、その効果が協調歩行後も持続していたと考えられる。この傾向は、Fig.8の右側のグラフに示す各領域の平均値においても、有意 ($p < 0.01$) に認められ、これらの結果を支持するものとなっている。

4. 共創プロセスとしての協調歩行過程の解析

ここでは、共創インタフェースとしての歩行介助装置の基となっている人間の協調歩行の解析結果を2種類紹介する。1つは、注意課題を用いた二重課題 (Dual-task method) 実験による協調歩行ダイナミクスの解析結果である。ここでは、協調歩行において重要と考えられる脚のステップリズムと腕振り運動に着目し、個々のダイナミクスの神経機構レベルでの違いを明らかにする。この結果から、Walk-Mateの設計指針となっている二重性との関わりを検討する。もう1つは、協調歩行における二重性の解析結果である。脚のステップリズムが実現するコヒーレンス (位相差のゆらぎ) と腕振り運動のゆらぎに着目し、人間-ロボット (Walk-Mate) 系、及び人間-人間系の2種類の系に関してそれぞれ解析を行なう。

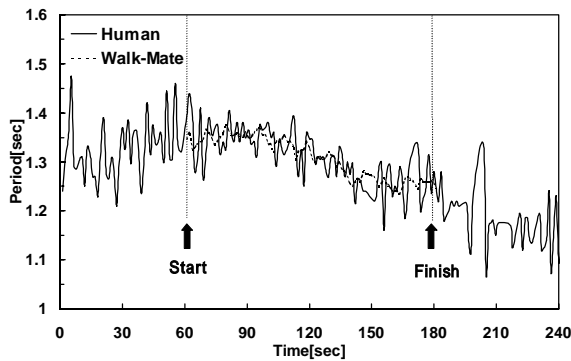


Fig.3 Temporal development of asymmetry (Subject A).

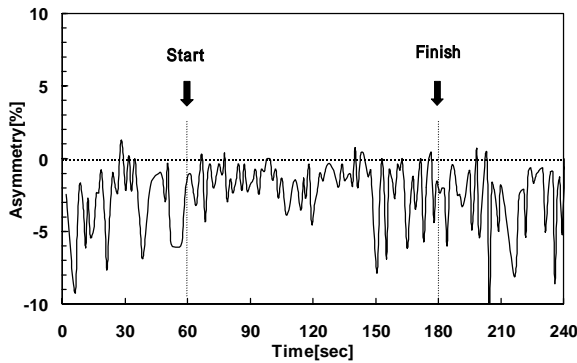


Fig.4 Temporal development of walking period (Subject A).

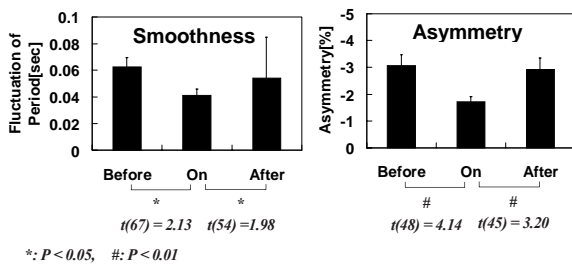


Fig.5 Comparison of the walking motion between before, on, and after the interaction (Subject A).

4.1 脚と腕のダイナミクスの役割の検討

実験は2種類 (Normal 条件, Memory 条件) の設定で行なわれた。Normal 条件では、被験者は、2名1組となり、別々の場所からコンピュータネットワークを用いたリアルタイムの足音のやり取りを実現する協調歩行システムを介して60sec 協調歩行する。なお、計測は、その間の足の接地時刻、及び腕の角度振動を対象として行われた。

一方、Memory 条件は、Normal 条件と同じ設定に加え、短期記憶に基づく5単語の単語記憶課題を2次課題として被験者に課した。これは、一般に二重課題法と呼ばれる手法で、被験者が、対象とする課題 (1次課題) を遂行中に他の課題 (2次課題) を課すことで、1次課題の遂行に必要な特定の処理能力を減少させる実験手法である。

一般に、60sec 程度の単語記憶は、維持リハーサルと呼ばれる心的な処理によって実現されていると考えられている [13]。また、この処理は、自己意識や注意に関連する高

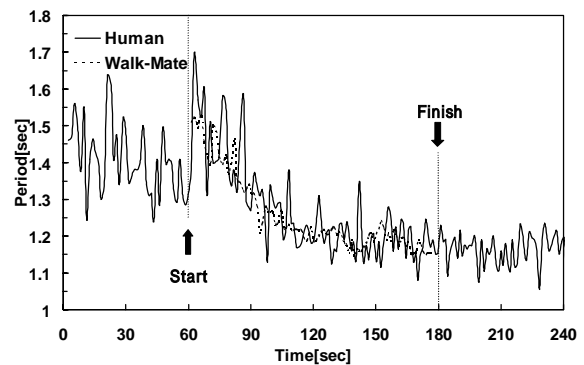


Fig.6 Temporal development of asymmetry (Subject B).

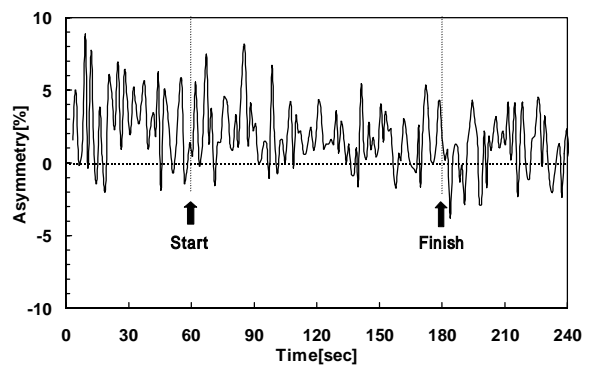


Fig.7 Temporal development of walking period (Subject B).

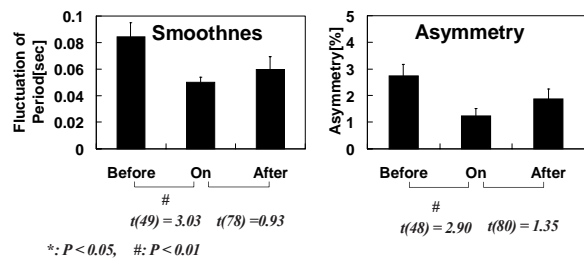


Fig.8 Comparison of the walking motion between before, on, and after the interaction (Subject B).

次の脳神経機構が関与していると考えられているワーキングメモリ [13] 上での処理によって行われているとされている。したがって、記憶課題と共存させる場合とそうでない場合に違いが見られるならば、それが異なった神経機構に基づくダイナミクスであることが考えられる。なお、この記憶課題は、コンピュータのディスプレイを介してひらがなもしくはカタカナのみで構成される3~5モーラの単語5つを3sec提示し、その記憶を保持した状態で60sec協調歩行する形式で行われる。そして、課題終了後、被験者にはすぐに5つの単語を口頭で復唱することを要求した。

脚のダイナミクスを解析するため、全ての被験者の足の接地周期の自己相関係数を $lag0$ から $lag10$ まで計算した。その平均値と標準誤差を Fig.9 に示す。なお、協調歩行中の歩行周期平均が 1.07sec (Normal 条件: 平均 1.06sec, 標準偏差 0.03sec, Memory 条件: 平均 1.08sec, 標準偏差 0.03sec) であることから、 $lag1$ の時間スケールはおよそ 1sec 程度となっている。双方とも解析対象は、歩行運動が安定化する 10sec 後から 60sec までの 50sec とした。すると、どちらの条件とも $lag1$ 以降、顕著な相関が見られなかった。また、両条件間に有意な違い ($p < 0.05$) が見られる箇所は存在しなかった。一方、腕のダイナミクスも全ての被験者の腕振り運動の角度振幅の自己相関係数を $lag0$ から $lag10$ まで計算した。その平均値と標準誤差を Fig.10 に示す。その結果、注意条件に比べ、ノーマル条件の相関係数が相対的に高い値を示し、特に $lag1$ から $lag3$ の間において両条件の間に有意な違い ($p < 0.05$) がみられた。

これらの結果を Table.1 に示す。なお、有意差が見られた箇所は * で示されている。以上より、脚のダイナミク

スは記憶課題の影響を受けないが、腕のダイナミクスはその影響を顕著に受けるという傾向が明らかになった。このことから、脚に比べ、腕のダイナミクスが、ワーキングメモリのような自己意識や注意に関連する高次の脳神経機構に関わっていることが考えられる。さらに、二重性との関連から考察すると、この結果は、脚のステップ動作が身体的インタラクションを実現する身体的はたらきに対応し、腕振り運動は自己意識の創出に関わる意識的はたらきと関わっていることを示唆している。

4.2 協調歩行における二重性の解析

前節の結果から、協調歩行における腕と脚のダイナミクスが二重性に関わっていることが示された。ここでは、その腕と脚のダイナミクスの相互関係を計測することを通して、協調歩行における二重性の解析を行なう。

4.2.1 人間-ロボット (Walk-Mate) 系

Fig.11 に、人間-ロボット系における協調歩行の時間発展の解析結果の1例を示す。グラフの下部には、協調歩行の身体的はたらきに対応する人間とロボットの身体モデルのステップリズムのコヒーレンスが示されている。また、上部には、腕振り運動の特徴量である肘の角度振動のゆらぎと、ロボットの内部モデルの変化を示す固有振動数の変化が示されている。これらは、いずれも協調歩行の意識的はたらきに対応するものである。なお、コヒーレンスは、時間的に連続した2つの位相差の差を求め、その絶対値の連続した3回分の総和として定義した。また、腕振りゆらぎは、各時刻における肘の角度振動の振幅比とその過去10サイクルの移動平均を計算し、その差の絶対値として定義した。なお、この振幅比は、予備的実験として単独歩行を

Table.1 Comparison of Auto-correlation coefficients.

Arm	lag 2	lag 4	lag 6	lag 8	lag 10	lag 12	lag 14	lag 16	lag 18
	$t(22)$	$t(22)$	$t(22)$	$t(21)$	$t(22)$	$t(19)$	$t(20)$	$t(19)$	$t(20)$
	= 3.27	= 2.63	= 2.61	= 1.42	= 0.88	= 0.58	= 0.70	= 0.94	= 0.12
$P < 0.05$	*	*	*						

Leg	lag 1	lag 2	lag 3	lag 4	lag 5	lag 6	lag 7	lag 8	lag 9
	$t(22)$	$t(22)$	$t(22)$	$t(22)$	$t(17)$	$t(22)$	$t(22)$	$t(20)$	$t(22)$
	= -0.42	= -0.25	= 1.19	= 1.39	= -0.19	= 0.58	= -0.81	= -0.64	= -1.44
$P < 0.05$									

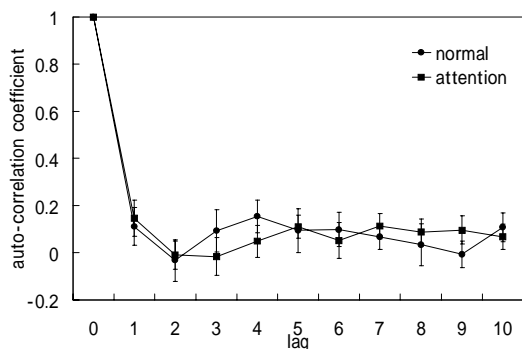


Fig.9 Auto-correlation of walking period.

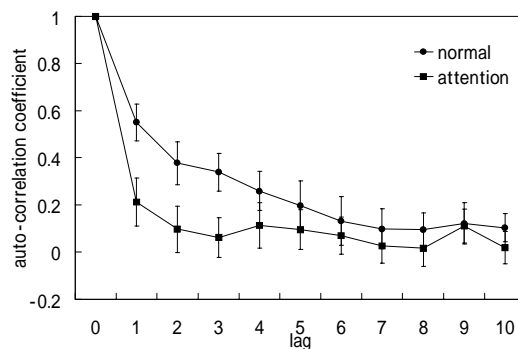


Fig.10 Auto-correlation of arm's amplitude.

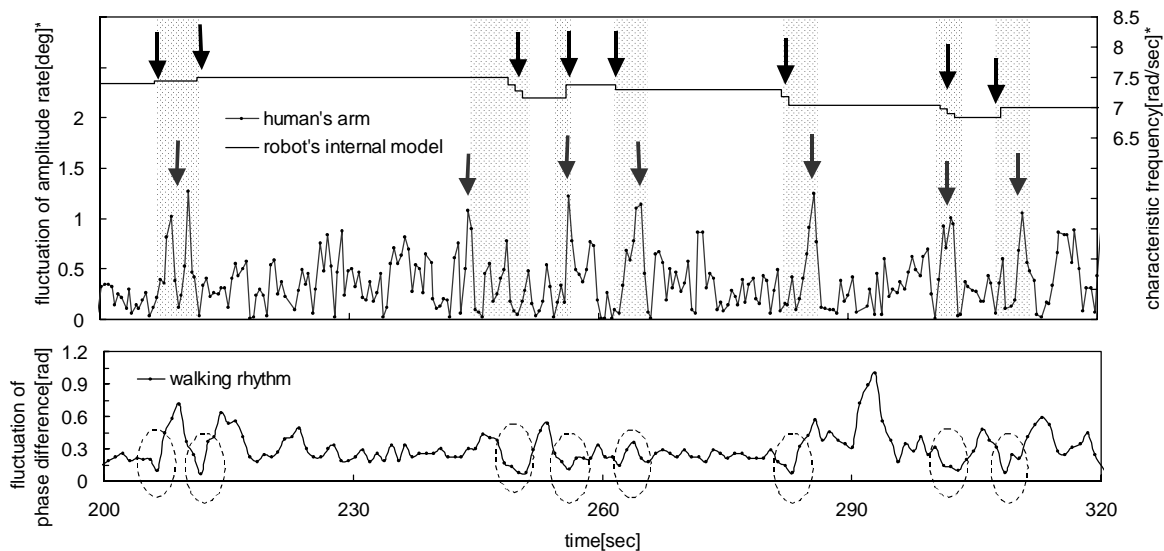


Fig.11 Temporal development of cooperative walk between human and Walk-Mate.

予め行い、その際の腕振幅の平均値と協調歩行中に計測された振幅の比として定義されている。解析は、脚のステップリズムのコヒーレンスを指標として、600secの協調歩行のうち、人間とロボットの相互作用が十分実現されている120secに対して行なった。

すると、ロボットの内部モデルが変化した個所、または人間側の腕振りゆらぎが顕著に大きくなる個所で、脚のステップリズムのコヒーレンスが安定な状態から逸脱していく傾向が見られる。そのような個所を、腕と内部モデルの変化に関しては矢印、脚のコヒーレンスに関しては点線の丸印で示した。ロボットの内部モデルが変化した個所でのコヒーレンスの変化はロボット側の相互拘束プロセスに伴う現象と考えられるが、同様の変化が、腕のゆらぎが顕著に起きた個所でも見られたことから、脚のステップリズムと腕振り運動の間にも相互関係が存在することが考えら

れる。さらに、このような特徴的な変化が人間とロボットの間で対称に起こっている傾向も見られた。このような傾向を明確化するため、関係があると考えられる個所を網掛けで示す。

この結果から、ロボットの相互拘束と類似するプロセスが、二重性に関わる腕と脚の運動の間に存在し、それが、人間とロボットの間で対称な時間発展を示していたことが明らかになった。

4.2.2 人間-人間系

Fig.12に、人間-ロボット系と同様の解析方法による人間-人間系における協調歩行の相互適応過程の解析結果の1例を示す。被験者は、2名1組となり、協調歩行システムを介して協調歩行を行なう。グラフの下部には、身体的はたらきに対応する2名の被験者のステップリズムのコ

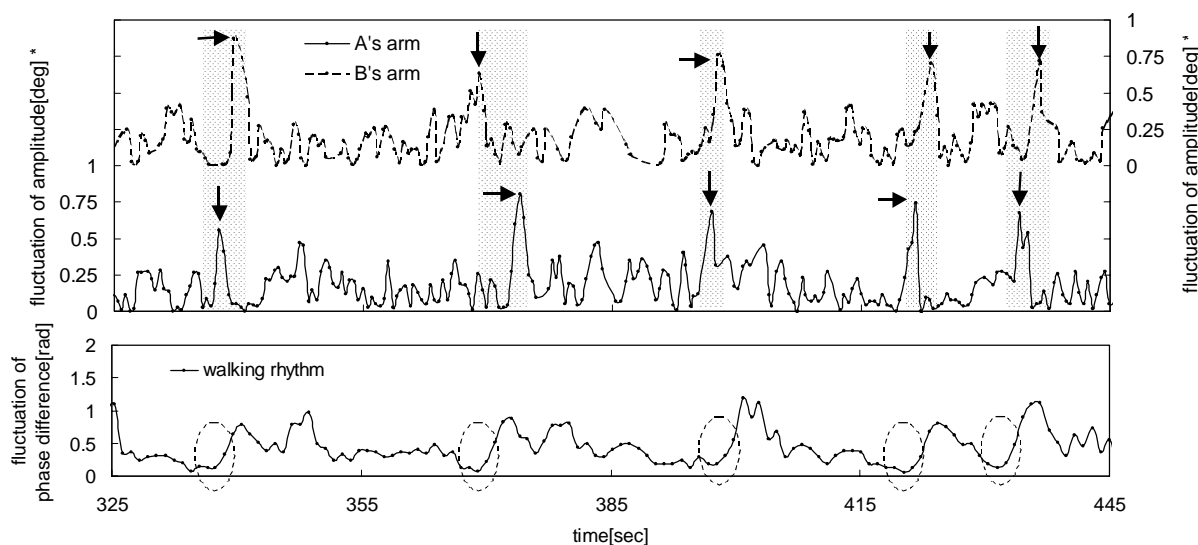


Fig.12 Temporal development of cooperative walk between humans.

ヒーレンスが示されている。また、上部には、意識的はたらきに対応する腕振り運動の特徴量である肘の角度振動のゆらぎが示されている。

すると、両被験者の腕の振りの振幅ゆらぎが、顕著に大きくなる個所において、脚のステップリズムが、コヒーレントな状態から逸脱してゆく傾向が観察された。そのような個所を、腕の変化に関しては矢印、脚のコヒーレンスに関しては点線の丸印で示した。また、そのような個所が両被験者の間で対称に起こる傾向も見られた。このような傾向を明確化するため、関係があると考えられる個所を網掛けで示す。

この結果から、人間-人間系の協調歩行においても二重性と関わる腕と脚の運動の間に相互プロセスが存在し、それが、両被験者の間で対称な時間発展を示していたことが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、人間と人間の介助関係を模範とした、共創インタフェースとしての歩行介助装置の開発に関連する2種類の実験的アプローチを紹介した。

まず、共創インタフェースとしての歩行介助装置の1例として我々がこれまでに提案してきたWalk-Mateを2名の異なる種類の障害を持つ高齢者へ適用する実験を行なった。その結果、両被験者ともWalk-Mateとの協調歩行によって歩行運動が安定化することが確認された。さらに、脳神経系の障害を持つ高齢者に関してはその効果が協調歩行終了後も持続する傾向にあることが示された。このことは、Walk-Mateによる共創的歩行介助が歩行運動のリハビリテーションを実現させていたことを示唆している。

次に、共創インタフェースとしての歩行介助装置の基盤となっている人間の協調歩行ダイナミクスの解析を行なった。その結果、二重課題実験との比較から、協調歩行中の脚のダイナミクスは注意課題の影響を受けないが、腕のダイナミクスはその影響を顕著に受けるという傾向が示された。このことから、脚のステップ動作が身体的インタラクションを実現する身体的はたらきに対応し、腕振り運動は自己意識の創出に関わる意識的はたらきと関わっていることが示唆された。

次に、人間の協調歩行における二重性の解析を人間-ロボット(Walk-Mate)系及び人間-人間系の2種類の系に関して行なった。その結果、脚のステップ動作と腕振り運動の間にWalk-Mateの相互拘束プロセスと類似した相互プロセスが存在し、そのプロセスによって実現されるダイナミクスが、相手側と対称な時間発展をすることが示された。このことは、人間の協調歩行の発展過程が、脚と腕のダイナミクスの相互関係によって実現される二重性に基づくプロセスを相互に同調させあう形式で実現されていたことを示唆している。同時に、この結果は人間の共創プロセスが

二重性に基づくダイナミクスを同調させあうプロセスであることを示唆している。

今後は、実際の歩行介助における協調歩行プロセスを解析することを考えている。特に、リハビリテーションの共創プロセスの解析を、二重性に基づくダイナミクスとの関わりから行なうことで、共創インタフェースとしてのより効果的な歩行介助装置の構築が期待できる。

参考文献

- [1] 三宅美博: コミュニカビリティと共生成, 場と共創 第4章, NTT出版(2000)
- [2] 三宅美博, 宮川透, 田村寧健: 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, vol. 37, No. 11, pp. 1087-1096(2001)
- [3] ロリィ A. クーパー: 車いすのヒューマンデザイン (田中理, 大鍋寿一訳), 医学書院(2000)
- [4] 中川昭夫: 義足開発の現状とメカトロ化の展望, システム/制御/情報, 41-11, 478/483(1997)
- [5] 藤本浩志: 多機能動力義足, 日本ロボット学会誌 14巻, 5号, 632/635(1996)
- [6] Miyake, Y. & Miyagawa, T.: Internal observation and co-generative interface, Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99), Tokyo, Japan, pp. I-229/I-237(1999)
- [7] 田村寧健, 三宅美博: 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)
- [8] 高梨豪也, 三宅美博: 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 (in revision)
- [9] 武藤剛, 三宅美博: 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, Vol. 38 No. 3, pp. 316/323 (2002)
- [10] Muto, T. & Miyake, Y.: Analysis of the Co-emergence Process on the Human-Human Cooperation, Proc. of 2002 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2002), MP1J4, Hammamet, Tunisia(2002)
- [11] Condon, W. S. & Sander, L. W.: Neonate Movement is Synchronized with Adult Speech, Science, Vol. 183, 99-101, (1974)
- [12] Kuramoto, Y.: Chemical oscillation, waves, and turbulence, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo(1984)
- [13] 荻阪直行編著: 脳とワーキングメモリ, 京都大学学術出版会(2000).