

# 人間と内的制御モデルの相互作用過程の解析

武藤 剛<sup>\*1</sup> 三宅 美博<sup>\*1</sup>

## Analysis of the Process of Mutual Interaction between Human and Internal Control Model

Takeshi Muto<sup>\*1</sup>, and Yoshihiro Miyake<sup>\*1</sup>

**Abstract** - This paper suggests 'Internal control model' as the model of human's flexible and cooperative behavior. This is the technology to which applied the phenomenon called 'Entrainment of bodily rhythm' and its dynamics at human's cooperative behavior. To discuss the effectiveness of the model, by using 'Walking support robot' to which applied the model, the process realizing cooperative walk between human and the robot is analyzed. From the results, it is clarified whether or not Internal control model is able to realize flexible and cooperative behavior, which is realized between humans.

**Keywords** : Man-machine system, Human communication, Entrainment, Welfare robot, Cooperative walk

### 1. はじめに

近年、福祉介助ロボットなどに代表されるように、人間同士の柔軟な協調動作を目的とする機械が注目されている。著者らは、このような機械を設計する手法として、人間同士の協調動作で特徴的に見られる「身体リズムの引き込み」<sup>[6-8]</sup>と呼ばれる現象の持つダイナミクスを応用する手法を提案してきた<sup>[5]</sup>。本研究では、その1例である「内的制御モデル」<sup>[5]</sup>を取り上げ、その有効性を検討する。

このモデルの特徴は2つのサブモデル、「内部モデル」と「身体モデル」によって構成されている点である。内部モデルは、人間が積極的に身体動作を相手側により適応させようとする「意識的側面」に相当する機能をモデル化したものである。一方、身体モデルは、意識的ではない、同時的な身体運動の同調を実現させる「身体的側面」に相当する機能をモデル化したものである。そして、この2つの異なる機能の相互拘束 (Fig. 1参照) というプロセスにより実現されるダイナミクスが人間側と相互作用し、人間同士で実現されているような柔軟な協調動作が実現される<sup>[3-4]</sup>。さらに、著者らは、その工学的応用例として人間と仮想的に協調歩行を実現させながら歩行介助を行なう歩行支援ロボットの開発をこれまで進めている<sup>[1]</sup>。

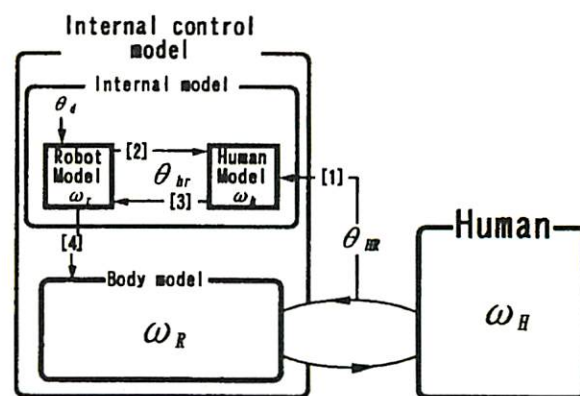
このような協調動作における身体リズムの引き込みに注目した研究として、大人の発話と新生児の動きの同調性を解析したもの<sup>[7-8]</sup>や、会話における対話者同士の呼吸の同調性を解析したもの<sup>[6]</sup>がすでに報告されている。同様に、我々も歩行支援ロボットの有効性を主に身体運動(歩行リズム)の同調性を基に検討してきた<sup>[1]</sup>。しかし、これは主に身体的側面が強い協調動作を評価する上で有効な手法であり、我々の提案する内的制御モデルが目指すよ

うな意識的側面も含んだ協調動作を評価するには不充分であった。そこで、本研究ではこれまでの成果に基づき、身体的な側面だけでなく、意識的な側面をも考慮する形式で歩行支援ロボットが人間と協調歩行を実現させるか否かを新たな解析手法を用いて明らかにする。

### 2. 内的制御モデル

#### 2.1 身体モデル

身体モデルの機能は人間の協調動作の身体的な側面に相当する身体リズムの引き込みの安定な状態を実現させることである。そのため、身体モデルはリズムの相互引き込みを実現しうる、van der Pol方程式<sup>[2][5]</sup>と呼ばれる非線形振動子によって記述されている。



1. Get stable states of phase difference  $\theta_{HR}$
2. Search  $\omega_h$  such as  $\min(\theta_{HR} - \theta_{hr})$  under the fixed  $\omega_r$
3. Search  $\omega_r$  such as  $\min(\theta_{hr} - \theta_{hr})$  under the fixed  $\omega_h$
4. Change  $\omega_r$  corresponding to  $\omega_r$
5. Back to 1.

図1 内的制御モデルとその相互拘束プロセス<sup>†</sup>  
Fig. 1 Internal control model and its mutual constraint process<sup>†</sup>.

<sup>†</sup>: 詳細は参考文献 [5] 参照

\*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

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

## 2.2 内部モデル

内部モデルは、人間の協調動作の意識的な側面に相当するものである。このモデルの機能は2つに分けられる。第1は、前出の身体モデルと人間の身体リズムによって定義される位相差  $\theta_{ik}$  の時間発展に基づき、身体リズムの引き込みの状態を判定することである。そして、第2はモデル自身と人間の関係を一方向的な因果関係として記述し、モデル側の固有振動数  $\omega_i$  を求め、その結果から身体モデルに拘束をかけることである。従って、内部モデルは、身体モデルを縮約した形として記述された位相方程式<sup>[2][5]</sup>の2つ組(人間側とロボット側)によって表現されている。

## 3. 実験装置

### 3.1 歩行支援ロボット

歩行支援ロボット<sup>[11]</sup>はFig. 2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でロボットの身体リズムを観測する。また、ロボットはタッチセンサを通し、人間の足の接地タイミングを計測することで、人間の身体リズムを観測する。このような相互作用を通し、歩行支援ロボットは人間と仮想的に協調歩行を行う。

### 3.2 身体運動計測装置

この計測装置は前述の歩行支援ロボットと人間の協調歩行過程において、人間側の意識的側面と身体的側面を計測することを目的とする。本研究では、脚だけでなく、それとは異なる力学系を持つ腕の運動にも注目し、歩行運動中のそれらの関節運動を肘と膝の角度振動データとして同時に計測する装置を新たに構築した。計測には角度センサ(日本光電 EG511-H)を用いた。これをFig. 3に

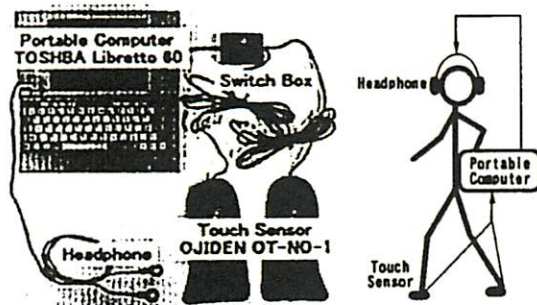


図2 歩行支援ロボット  
Fig. 2 Walking support robot.



図3 角度センサとその装着  
Fig. 3 Angular sensor and its style on use.

示す。これらのデータはトランスミッタ(日本光電 ZB-581Z)によってテレメータ(日本光電 WEB-5000)に送られ、A/Dコンバータ(INTERFACE IBX-3119)によって離散電圧値[V]に変換されPC(EPSON Type-VH)上で記録される。また、これらのデータは100[Hz]でサンプリングされる。Fig. 4に計測されたデータの1例を示す。

## 4. 実験1

ロボット側が人間側へ一方的にあわせる人間側の意識的な側面が現れにくい協調歩行と、人間側がロボット側へあわせる意識的な側面が現れやすい協調歩行を交互に実現させる実験を行った。この実験の結果から、協調歩行における腕と脚の機能の違いを検討する。

### 4.1 実験1の方法

8人の被験者(20歳代、男性)に対し、歩行支援ロボットを装着させ、円形トラックを240[sec]歩行させる実験を行った。その際、以下の時系列変化に従ってロボット側を稼働させ、その前後での変化を観測した。

表1 実験1  
Table 1 Experiment 1.

time[sec]	mode
0 ~ 120	mode1
120 ~ 240	mode2
240 ~ 360	mode1

**mode1:**人間とまったく同じ歩行を行う。すなわち、人間の接地検出と同時にリズム音を発生する。(ロボットが人間に一方的にあわせる協調歩行)

**mode2:**人間の歩行状態に関わらず、一定の周期(0.75[sec])で歩行する。(人間がロボットに一方的にあわせる協調歩行)

mode2の0.75[sec]は人間の歩行周期としては比較的速い周期である。これは、人間側がロボット側の歩行リズムにあわせていく過程で、意識的側面を強めさせるための設定である。

### 4.2 実験1の結果と考察

人間の歩行運動はほぼ左右対称の運動であることから、片側(右側)の運動の計測データに対し解析を行った。Fig. 4からもわかるように、人間の腕と脚のデータは非常

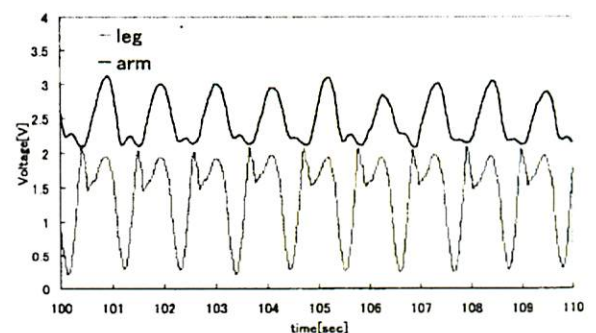


図4 計測されたデータの一例  
Fig. 4 An example of measured data.

## 5. 実験2

実験1の結果を踏まえ、意識的側面を考慮する形式で人間とロボットの協調歩行が実現されているのかを腕と脚の運動の計測により明らかにする。特に、ロボット側の相互拘束によって実現されるダイナミクスが人間側の腕と脚のダイナミクスと同調しうるのかを明らかにすることにより、意識的側面も考慮する形式での相互作用が実現されているのかを検討する。

### 5.2 実験2の方法

実験1と同一の被験者全てに対し、歩行支援ロボットを装着させ、円形トラックを480 [sec] 歩行させる実験を行った。その際、以下の時系列変化に従ってロボット側を稼働させ、その時間発展を観測した。

表2 実験2  
Table 2 Experiment 2.

time [sec]	mode
0 ~ 60	mode3
60 ~ 480	mode4

**mode3:**人間の歩行状態に関わらず、一定の周期 (1.0 [sec]) で歩行する。(内的制御モデル稼働せず)

**mode4:**目標位相差  $\theta_{ij}$  を (0 [rad]) と設定し、内的制御モデルを稼働させながら歩行する。これは、ロボット側と人間側の歩行リズムの位相差  $\theta_{HR}$  を0にすることを目標としている。

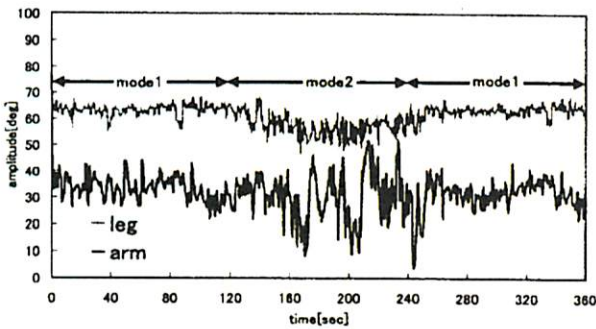


図5 脚と腕の角度振動の振幅

Fig. 5 Amplitude of leg and knee's angular oscillations.

に周期的で、その波形の形状もほぼ一定である。従って、その波形の微妙な変化を見ることで歩行運動中のダイナミクスの変化を観測できると考え、特にその振幅成分に注目した。解析の有効性を明らかにするため、ここではそのデータの典型的な1例をFig. 5に示す。なお、図中の角度値 [deg] は、計測値 [V] から換算された値である。すると意識的側面の現れにくいmode1の領域では腕と脚の変動に大きな違いが見られないが、意識的な側面の現れやすいmode2の領域では、脚に比べ腕の変動がとて大きくなっている。この結果から、意識的な側面の強い協調歩行を行う際、脚に比べ腕の変動が大きくなる傾向が推測される。従って、人間側が意識的に協調歩行を行っているかを腕と脚の運動を通し、計測できうることが示唆される。

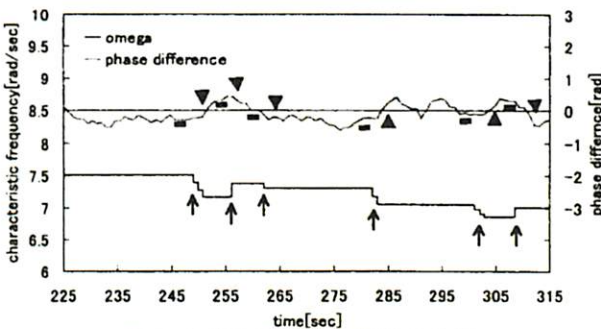


図6 内部モデルと位相差の比較

Fig. 6 Correlation of internal model and phase difference.

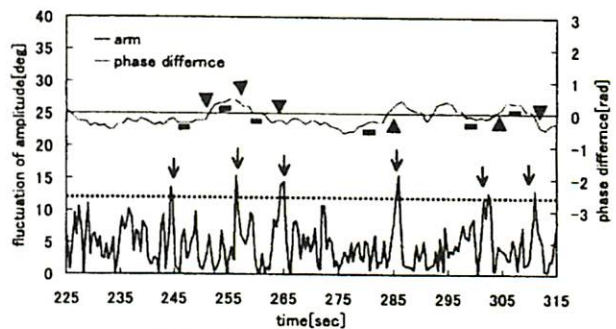


図7 腕の変動と位相差の比較

Fig. 7 Correlation of arm's fluctuation and phase difference.

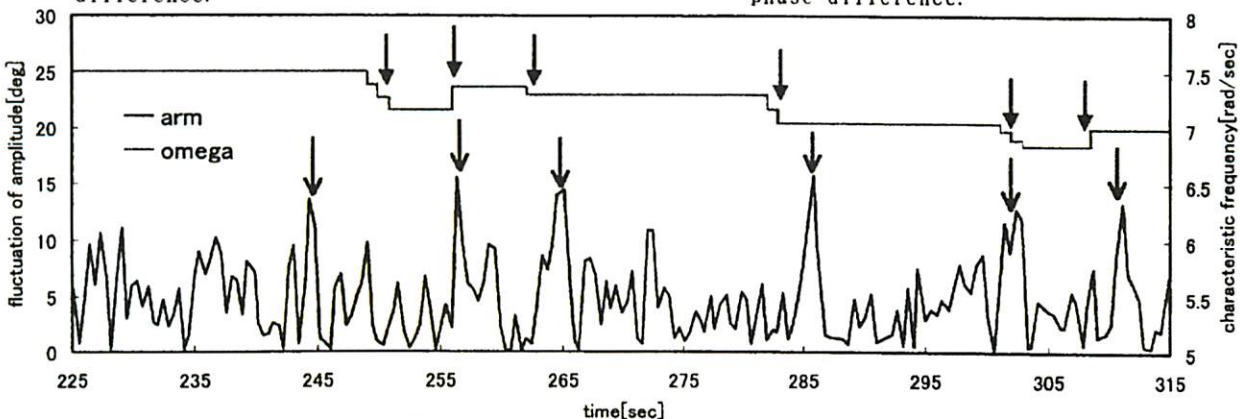


図8 人間側とモデル側の同調性の検討

Fig. 8 Examination of synchronous degree of human side and robot side.

解析は実験1から得られた結果に基づいて行うため、実験1の例と同一被験者から得られた結果を解析例として用いる。また、本実験では、225 [sec] ~ 315 [sec] の領域を解析対象とした。

#### 5.4 ロボット側の解析結果

ロボット側において、内部モデルにおける固有振動数  $\omega_r$  と人間とロボットとの間の歩行リズムの位相差  $\theta_{RR}$  (Fig. 1参照) の変化を比較した。これをFig. 6に示す。なお、時間発展の特徴を示すため、内部モデルが稼動した時刻である  $\omega_r$  が変化した個所を矢印で示した。さらに、その時刻の前後における位相差  $\theta_{RR}$  の変化を見るため、その時刻の前後を横線と三角印で示した。すると、内部モデルが変化した時刻を境に、位相差が安定な状態から位相差が急激に変化したり、小刻みに変動するような変動が不安定になる状態へ移行する傾向が確認できる。この結果から、ロボット側において相互拘束のプロセスが実現されていることを確認できる。

#### 5.5 人間側の解析結果

実験1の推測に基づき、人間側において、腕の角度振動の変動成分と人間とロボットとの間の歩行リズムの位相差  $\theta_{RR}$  の変化を比較した。腕の変動成分は、任意の時刻より過去20個の振幅データの平均値を求め、その時刻の振幅データとの差の絶対値と定義した。これをFig. 7に示す。まず、ロボット側と同様、時間発展の特徴を示すため、両系列において顕著な変化が起きている個所を矢印で示した。腕の変動に関しては、あらかじめ自由歩行中の腕のデータを計測する実験を行っておき、その変動成分の平均値を求め、その2.5倍の値(この被験者の場合は11.91 [deg])を閾値とし、それより大きく変動している個所を顕著な変化が起きている個所と定義した。それを明確にするため、グラフ中の11.91 [deg]の個所に破線を引いた。さらに、位相差のデータに関してはロボット側と同様の個所を横線と三角印で示した。すると、腕の変動が大きくなった時刻の前後で、ロボット側ほど顕著ではないが、位相差が安定な状態から不安定になる状態へ移行する傾向が見られる。これにより、腕の運動と脚の運動の間にロボット側と同様の相互拘束に相当するプロセスが実現されている可能性が示唆される。

#### 5.6 人間とロボットの同調性の検討

これらの解析結果から、人間側の腕と脚のダイナミクスとロボット側の相互拘束のダイナミクスの同調性の検討を行う。Fig. 8は腕の角度振動の振幅の変化と内部モデルの固有振動数の変化を比較したものである。これまでと同様に顕著な変化が観測された個所を矢印で示す。すると、この2つの系列の間に同調性が見られた。それを明確にするため、特に同調していると推測される個所を網掛けで示した。また、他の被験者についても同様の同調性が概ね観測された<sup>\*)</sup>。これにより、ロボット側が人間の意識

的側面も考慮する形式で、相互作用を実現させている可能性が示唆される。

## 6. 考察

実験1において、腕と脚の運動の計測を通し、人間側の意識的な協調歩行を観測できうることを明らかにした。次に実験2では、実験1の結果に基づき、人間側において腕の運動と脚の運動の間に内的制御モデルと同様の相互拘束に相当するダイナミクスが実現されている可能性を示唆した。そして、それによって実現されるダイナミクスがロボット側のダイナミクスと同調しうることを明らかにした。これにより、人間側に相互拘束に相当するプロセスが存在し、それによって実現されるダイナミクスがロボット側のダイナミクスと身体リズムの引き込みを介し相互作用している可能性が明らかになった。この結果から、我々の提案する内的制御モデルが相互拘束によって実現されるダイナミクスを介し、身体的側面だけでなく、意識的側面をも考慮する形式で人間側との柔軟な協調動作を実現させる可能性が示唆される。

## 7. 参考文献

- [1] 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)
- [2] 宮川透, 三宅美博: 系の非線形性を利用した関係同定に基づく動的環境への適応: 第10回自律分散シンポジウム資料, 251-255 (1998)
- [3] Muto, T. & Miyake, Y., "Analysis of the Process of Mutual Interaction between Human and Internal Control Model," Proc. of 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2000), Nashville, (in Press)
- [4] Muto, T. & Miyake, Y., "Temporal development of mutual constraint cycle in human-robot cooperation," Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99), Tokyo, Japan, pp. IV-7-IV-10 (1999)
- [5] 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)
- [6] 渡辺富夫, 大久保雅史, 稲留将生. "対話コミュニケーションにおける呼吸の引き込み" Proc. of 13th ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp271-276 (1997)
- [7] Condon, W. S. & Sander, L. W. "Neonate Movement is Synchronized with Adult Speech". Science, Vol. 183, pp. 99-101, (1974)
- [8] Kobayasi, N., Ishii, T. and Watanabe, T. "Quantitative Evaluation of Infant Behavior and Mother-Infant Interaction" Early Development and Parenting, Vol. 1, No. 1, pp23-31 (1992)

\*: 詳細は参考文献 [3] 参照