

共創出コミュニケーションとしての人間-機械系^{†,‡}

三宅美博*・宮川 透*・田村 寧健*

Man-Machine Interaction as Co-Emergence Communication^{†,‡}

Yoshihiro MIYAKE*, Tohru MIYAGAWA* and Yasutake TAMURA*

Human-human system can coordinately self-organize relational functions by their mutual communications. In this study, we aimed to establish a design principle of man-machine system to realize such a co-emergence process in human-human interaction. This developmental dynamics is modeled based on duality of human communication which is composed of simultaneous process in open system and causal relationship in closed system. The former is represented by body model and is to organize coherence between human and machine, and the latter is internal model to separate the coherence into two one-sided actions. Through mutual constraint between these two sub-dynamics, relational functions as a whole system is self-organized in the man-machine interaction. Using this duality model, co-emergence process was realized as a mutual-adaptation between human and machine, and its effectiveness was shown in a walk support robot.

Key Words: man-machine interaction, co-emergence, duality, duality model, mutual-adaptation

1. はじめに

人間はコミュニケーションを介してコミュニティとしての関係的機能をリアルタイムに創り上げることができる。本研究では、このような人間-人間系における共に創り上げるはたらきを理想として、人間と人工物の関わり方に関する新たな設計原理を提案することを目的としている。

この背景には、現状において人間-機械系が直面している大きい困難がある。特に、知能的な人工物に顕著であるが、ノーマンも指摘しているように、人工物の中に準備されなければならない機能集合が肥大化し、人工物のブラックボックス化とユーザビリティの低下が急速に進んでいるのである^{1),2)}。そのような人工物では、設計者が前もって機能集合を用意しておき、状況に応じて使用者が機能選択するという形式で構築されている。そして、現状のような「探索」に基づく機能設計にとどまる限り、使用状況が複雑になるにつれて人工物の複雑化が際限なく進行することは必然的である。

われわれは、このような閉じた機能空間における探索という形式の限界を踏まえ、人間と人工物が開かれた相互作用を介してリアルタイムに機能を創出できるための設計原理を提案する。そして、あたかも人間同士であるかのように、人間

と人工物が共に機能を創り上げる「共創出 (co-emergence)」としての人間-機械系をめざす³⁾。これは設計と使用を区別しない設計原理ということでもある。

本論文では、人間のコミュニケーションにおいて共創出を可能にする二重性 (duality) に注目し、それを「二重性モデル (duality model)」として形式化する。さらに、それを人間-機械系のインタフェース領域に埋め込み共創出的なコミュニケーションとして表現する。以下、第2章において共創出と二重性について説明し、第3章で二重性モデルを提案する。第4章ではその動作をシミュレーションで確認し、さらに、歩行介助ロボットを例として共創出過程を構成する。

2. 共創出コミュニケーション

2.1 二重性と共創出

人工物の機能を閉じた空間における探索という形式にとどめる限り、そこに創出という機相が生じ得ないことは明らかであろう。このことは機能の創出を実現するためには閉じた空間だけではなく、それを包摂している開かれた空間を同時に考慮する必要があることを意味している。そして、人間のコミュニケーション活動も、このような2種類の空間から構成される二重性に基づいていると考えられている。

たとえば、ポランニーの暗黙知と形式知の比較⁴⁾からも明らかのように、人間の共創出コミュニケーションにおいては、メッセージのやり取りに加えてコンテキストの共有が重要である。そして、前者のような閉じた領域における一方向的な作用 (因果性) は、後者のような開かれた領域における相互関係 (同時性) に包摂されている。これは、人間の意識に関わる限

[†] IEEE SMC'97, '98, '99 国際会議で発表

[‡] 第10回自律分散システムシンポジウムで発表 (1998.1)

* 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

* Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Yokohama
(Received January 18, 2001)

(Revised July 6, 2001)

定するはたらきと身体に関わる開くはたらきの包摂関係として捉えることも可能であろう。このような二重性は、清水の提案する「場」の概念においては、創出の基本的構造と見なされている^{5)~7)}。

ハイデガーも、人間とは可能性の空間における「現存在」の発現であり、現存在は二重性を持つと考えていたようである。そして、人間の行動における被投性と内省の関係を考察し、配慮的な行動として臨在的なものや実践的なものを捉え、熟慮的な知識としてブレークダウンによる対峙的存在や内省的なものを捉えた⁸⁾。さらに、メルロー＝ポンティは、現存在の二重性を身体の二重性として、触る身体と触られる身体と捉え、言語的コミュニケーションを準備する段階における前言語的な身体レベルでの開かれた「交通」の重要性を想定した^{9), 10)}。

さらに、二重性を支持する実験的な知見も報告されている。たとえば、コンドンは新生児が母親の声に同調して手足を動かすことを発見し、それを引き込み現象 (entrainment) と呼んだ^{11), 12)}。このことは、人間にとって意識化される空間の外側において、開かれた身体的作用関係が存在することを示している。さらに、ベッベルは視覚における図と地の分離過程を観察することによって、意識は持続時間3秒程度の離散状態としてサイクリックに創出されることを発見した^{13), 14)}。さらに彼は、事象の区別とその前後関係の区別が異なることを見出し、前後関係としての一方方向的因果関係を特定できると意識状態が相関することも明らかにした。

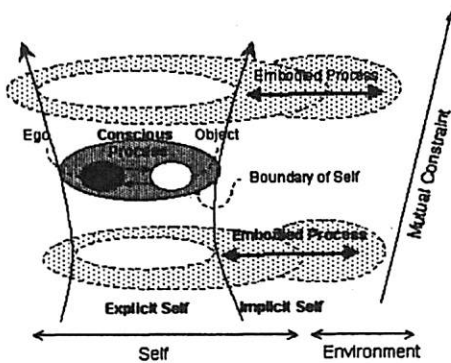


Fig.1 Duality of self

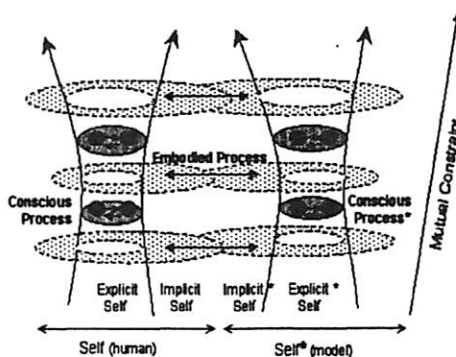


Fig.2 Co-emergence process

われわれは、これらの知見に基づいて、人間における創出の基本構造を Fig.1 のような「自己の二重性 (duality of self)」として捉えている。限定するための顕在的領域 (explicit self) における意識化プロセス (conscious process) と、開くための潜在的領域 (implicit self) における身体化プロセス (embodied process) の相互拘束 (mutual constraint) を通して、自己意識が創出する自己創出サイクルである。そして、このような二重性においては、身体化プロセスの開かれた作用関係によって潜在的領域が共有され、異なる自己創出サイクルがコヒーレントになる可能性がある。われわれは、そのような創出的コヒーレンスを共創出コミュニケーション (co-emergence communication) と呼ぶ。

ただし、共創出は、自己における直接的経験であり、そのままでは人間-機械系の設計原理として普遍化することはできない。少なくとも、二重性を自己の顕在的領域においてモデルとして表現するだけではその空間が閉じてしまい、探索としての機能を超えることはできないであろう。だから、二重性のモデルは自己の二重性において表現される必要がある。つまり、モデル表現を潜在的領域を含めて開かれた形式で作動させ、Fig.2 のように自己とモデルの共創出コミュニケーションとして表現するのである。これによって、設計者はコミュニケーションに参加する内的視点に立つことができ、自己の不完結性を前提とした共創出過程の実現が可能になる。詳細については別論文を参照してほしい^{3), 15)}。このような背景から、われわれは、人間-機械系の設計原理を、自己と機械の間での開かれた共創出的インタフェースの視点から捉え直さなければならないと考えている¹⁶⁾。

2.2 新たな人間-機械系へ向けて

一方、機械側の立場において、共創出的な人間-機械系を実現する上での本質的困難は何であろうか。それは、人間の二重性における身体を介する開かれた作用関係によって、機械と人間のダイナミクスが相互に干渉しあうことであろう。そのような開かれた動的複雑性のもとで、機械は人間という環境の動きを同定し予測することができなくなるからである。つまり設計者にとって機械の動作する状態空間を前もって確定できないことになる。

このような予測できない状況への対応は大きく2つに分類することができる。一つは確率が適用できる場合であり不確定環境と呼ばれる。つまり、状態空間が確定されているが状態遷移を確定できない場合である。もう一つは状態空間の確定さえもできない場合であり「無限定な状況」である⁵⁾。前者は、環境側からの作用が弱く機械側に対して微弱な外乱を与えている場合であり、従来からの制御技術の範疇に入る。しかし、後者は、環境としての人間側からの作用が強く機械側と相互干渉している状況であり、このような開かれた無限定な領域において有効な制御手法は未だ確立されていない。

だからこそ、そのような相互干渉を避けられるような条件のもとで、従来の人間-機械系は構築されてきたと言えるであ

ろう。そして、ウィナーのサイバネティクスにその原型が見られるように、固定された状態空間において、環境からの微弱な外乱のもと、機械はその内部状態を最適化する形式で制御されるようになった¹⁷⁾。この延長上に、閉じた機能空間における探索としての機能設計が確立されたのである。これは、マスタ・スレーブシステムやサーバー・クライアントモデルなどにその典型を見ることができる。

このような人間-機械系は、ダイナミクス上の特徴としては、機械と環境としての人間の時間スケールが大きく異なる場合に対応する。たとえば、機械が環境よりも十分速く変化するときには、環境は近似的に一定と見なせるので状態空間と最適性を機械側だけで定義することができる。同様に、機械が環境よりも十分ゆっくり変化するときも、環境は定常状態と見なされる¹⁸⁾。このような条件のもとでは、機械と環境のダイナミクスは近似的に分離できるので、設計者は機械を閉じた状態空間と見なせばよかったのである。結果的に、このことが機械における機能空間の肥大化とユーザー不在の機能設計を招いてしまった。

われわれが提案しようとしている人間-機械系は、従来技術との対比で言えば、機械と環境の時間スケールがあまり違わない場合に向けて拡張していることになる。このような状況において、相互干渉は支配的となり状態空間を機械側だけで定義できなくなるからである。このことによって機械は人間の身体に対して開かれ、機械のダイナミクスが無限定化されるため、閉じた機能空間における探索という形式が無効化してしまう。そして開かれた作用関係に基づく関係的機能の共創出が必要とされる。

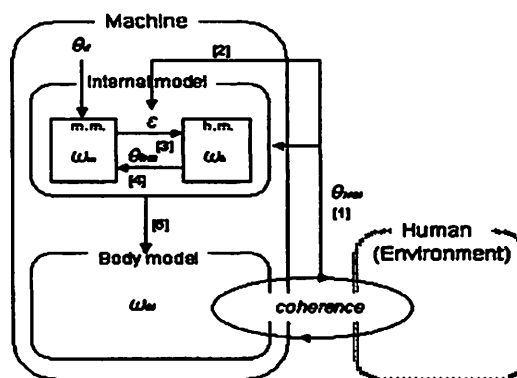
近年、このような身体を介する相互干渉を積極的に利用するコミュニケーション技術も現われ始めた。たとえば、三輪の身体性への取り組み¹⁹⁾や渡辺のバーチャルアクター²⁰⁾である。そこでは開かれた空間における作用関係の一例として身体運動の相互引き込みが注目されている。そして、この方向性においてつぎのステップとして必要なことは、開かれた空間だけではなく、それと閉じた空間の包摂関係としての二重性であろう。これによって機械が人間の二重性に対応することが初めて可能になる。本研究は、このような共創出コミュニケーションとしての人間-機械系の確立をめざす最初のアプローチとして位置づけることができる。

このような構想のもとに、われわれは二重性をモデル化し、それを人間-機械系に適用してきた。特に、人間とロボットが関係的機能としての協調歩行を共に創り上げることでリハビリテーションを実現する、共創出コミュニケーションとしての歩行介助をめざしてきた。たとえば、人と並んで歩くときに自然と歩調が揃ってしまうことがあるが、これは身体運動の相互引き込みであり潜在的領域を含む二重的な作用関係の一例と見なすことができるからである²¹⁾。このような歩行介助ロボットについて、われわれはすでに多くの報告を行っており²²⁾⁻²⁶⁾、本論文では、その設計原理に関わる基礎的モデルを提起する。

3. 二重性モデル

3.1 概要

われわれは、共創出コミュニケーションにおける二重性を参考にして、Fig.3のような二重性モデルを提案してきた^{24),25)}。これは身体モデル (body model) と内部モデル (internal model) から構成されている。特に、身体モデルは潜在的領域に対応し、内部モデルは顕在的領域に対応し、両者の相互拘束プロセスとして自己意識の共創出過程を説明することになる。開かれた空間における作用関係を実現する身体モデルは、コンドンの実験を参考にして、身体運動の相互引き込み (mutual entrainment) によってモデル化する。一方、内部モデルは、ベッペルの実験から、閉じた空間における一方向的作用に基づく探索として表現する。



- (1) In body model, coherent phase relationship (θ_{HM}) is self-organized by mutual entrainment between the machine and its environment.
- (2) In internal model, error measure is calculated by the difference between predicted relationship (θ_{hm}) and organized relationship (θ_{HM}), and parameter of internal model (ϵ) is modified to decrease the measure.
- (3) At coherent phase relationship (θ_{hm}) in internal model, original frequency of environment-side (ω_h) which satisfies the organized phase relationship in body model (θ_{HM}) is searched under fixed original frequency of machine-side (ω_m).
- (4) At coherent phase relationship (θ_{hm}) in internal model, original frequency of machine-side (ω_m) which satisfies the desired phase relationship (θ_d) is searched under fixed original frequency of environment-side (ω_h) obtained in the above step.
- (5) Original frequency of body model (ω_M) is modified based on the searched frequency (ω_m) to realize desired phase relationship.
- (6) Return to the first step.

Fig.3 Duality model

3.2 構造とアルゴリズム

こうして、二重性モデルは、以下のような2つのサブモデルとその相互拘束プロセスから構成されることになる。ただし、このモデル化に際しては、身体モデルと内部モデルの時間的階層性が仮定されている。つまり、身体モデルのダイナ

ミクスは、環境変動と時間スケールが近いことによって環境との相互干渉の中に埋め込まれており、このことが系が環境に開かれていることに対応する。一方、内部モデルは環境よりも速い時間スケールで変化することによって、環境から閉じた系を構成できると考える。これは意識状態が環境変動に対する予測の働きを担っていることから裏付けられる²⁷⁾。なお、本研究では、Fig.2のように、自己とモデルの共創出コミュニケーションとして二重性モデルを表現するので、このモデルは人間-機械系における機械側に対応づける。

(1) 身体モデルは環境変動に近い時間スケールのダイナミクスを持ち、環境に対して開かれた空間を構成する。特に、環境(人間)との作用関係を介してコヒーレントな関係を生成する可能性をもっている。そのようなダイナミクスの一例として相互引き込みが用いられ、身体モデルは非線形振動子の一種として構成される。

(2) 内部モデルは環境変動よりも十分速いダイナミクスを持つことによって、環境に対して閉じた空間を構成する。特に、身体モデルに対応する機械側モデルと、環境に対応する環境(人間)側モデルを表現する非線形振動子の結合系として実現される。そして、身体モデルにおいて生成するコヒーレントな関係を、内部モデルにおいて一方向的な作用関係に分解することで、身体モデルと環境の内部状態を探索的に予測する。これは一種の逆問題であり、内部モデルは、そのような不良設定性を克服するための仮説的拘束条件と見なすことも可能である。

つぎに、これら2つのモデル間での相互拘束が必要となる。両ダイナミクスはその時間スケールの違いに基づいて近似的に分離されているので、相互拘束は交互拘束として構成される。ただし、ここでは歩行介助ロボットを具体例として取り上げているので、その目的は介助としての協調的歩行運動の共創出とする。具体的には、人間と機械の間での歩行リズムのコヒーレント状態を生成し、それに基づいて両者が分化し、その位相関係を目標値に保つことである。

(1) 身体モデルにおいて、相互引き込みを介して環境(人間)との間にコヒーレントな関係が生成される。そして、その関係を解釈するために以下の手順が開始される。

(2) 最初に、内部モデルのための状態空間が確定される。これは、内部モデルにおいて予測されたコヒーレントな関係と身体モデルにおいて実際に観測された関係の差を減少させるように構成される。

(3) 内部モデルにおいて、機械側モデルのパラメータの時間発展を固定し、観測されたコヒーレントな関係を再現できる環境(人間)側モデルのパラメータが探索される。

(4) 内部モデルにおいて、環境(人間)側モデルのパラメータの時間発展を上記の探索値に固定し、目標とする関係を実現できる機械側モデルのパラメータが探索される。

(5) これら2つの一方向化された関係に基づいて、機械とその環境(人間)の内部状態が予測され、その予測に基づ

いて身体モデルが変更を受ける。

(6) 最初のステップに戻る。

このとき身体モデルと内部モデルには時間的階層性が仮定されているので、それぞれのダイナミクスは異なる時間座標によって表現される。さらに、その両者を関連づける時間も含めて、上記の相互拘束プロセスを記述するために3つの時間座標が用いられる。

(1) t_{ec} : time to describe body model

(2) t_{ic} : time to describe internal model

(3) t_{md} : time to describe mutual constraint

最初の座標である t_{ec} は身体モデルを記述する連続的な時間であり、いわゆる物理的時間に対応する。この時間座標は環境変動に近い時間スケールをもち環境との作用関係に埋め込まれている。これは二重性との関係においては、潜在的領域における身体化された時間に対応する。つぎの座標である t_{ic} は内部モデルを記述する連続的な時間であり、環境と身体モデルの作用関係をシミュレートするために用いられるものである。この時間は物理的時間から分離され仮想的に定義される時間であり、それは内部モデルの時間スケールが身体モデルよりも十分速いという前提に基づいている。これは二重性との関連では、顕在的領域における意識化された時間に対応する。最後の t_{md} は内部モデルと身体モデルの相互拘束プロセスを記述するための時間である。相互拘束は交互拘束として近似的に構成されているので、両者の関係を表現するこの時間座標は離散的となる。

3.3 身体モデル

身体モデルは、開かれた空間を構成することから非自律系として構成し、その相互作用の対象を明示しないものとする。さらにダイナミクスとしては、相互引き込みを仮定したので非線形振動子として構成する。このとき、その最も一般的な形式は以下のようなものである。

$$\dot{x}_M(t_{ec}) = y_M(t_{ec}), \quad (1)$$

$$\dot{y}_M(t_{ec}) = -\omega_M^2(t_{md})x_M(t_{ec}) + \xi f(x_M(t_{ec}), y_M(t_{ec})). \quad (2)$$

ここで x_M と y_M は t_{ec} 上で記述される状態変数である。 ξ は非線形性を表わし、 ω_M は身体モデルの固有振動数を規定する t_{md} 上で記述されるパラメータである。特に、動物の歩行運動はセントラル・パターン・ジェネレータによって制御されており、それは van der Pol 振動子によって近似的にモデル化できる²⁸⁾。こうして以下の関係を導入する。

$$f(x_M(t_{ec}), y_M(t_{ec})) = (1 - x_M^2(t_{ec}))y_M(t_{ec}). \quad (3)$$

van der Pol 振動子は $\xi > 0$ のとき安定なリミットサイクルをもつので、これを用いて身体モデルを構成する。ただし、 x_M が負のときは歩行運動における支持脚相とみなし、 x_M が正のときは遊脚相とみなす。足の接地タイミングは、 x_M の符号が正から負に変化する時刻として定義する。

つぎに、身体モデルとその環境としての人間の歩行リズムの間に実現される作用関係をモデル化することになる。

$$\dot{x}_M(t_{ec}) = y_M(t_{ec}), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y_M(t_{ec}) = & -\omega_M^2(t_{md})x_M(t_{ec}) \\ & + \xi(1 - x_M^2(t_{ec}))y_M(t_{ec}) \\ & + g(x_M(t_{ec}), x_H(t_{ec})). \end{aligned} \quad (5)$$

ただし $g(x_M, x_H)$ は相互作用を表わしており、 x_H は人間の歩行運動に関する状態変数である。具体的には足音を介する相互作用としてパルス的な作用を仮定する。

$$g(x_M(t_{ec}), x_H(t_{ec})) = \begin{cases} -height, & \text{if } (t_{ec} - last_H(t_{ec})) \leq length \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

ここでパルスの高さと持続時間はそれぞれ $height$ と $length$ である。また、 $last_H$ は人間側の足の接地タイミングのうち最新の時刻を表わしている。

なお、身体モデルは、理想的には人間の身体構造を踏まえてモデル化されるべきであるが、ここではその第1次近似として非線形振動子としてのモデル化にとどめている。その理由は、本研究においては身体のダイナミクスにおける最も重要な特性を、その相互引き込みに基づく開かれた作用関係にあると考えているためである。

3.4 内部モデル

内部モデルは、身体モデルを介する開かれた空間に対する仮説としてのモデルであり、非線形振動子の結合系を用いて閉じた自律系として構成する。特に、身体モデルと人間の歩行リズムは近似的にリミットサイクルとみなせるので、位相振動子²⁹⁾の結合系によって、以下のように表現することになる。

$$\dot{\varphi}_m(t_{ic1}) = \omega_m(t_{ic2}) + m(\varphi_h(t_{ic1}) - \varphi_m(t_{ic1})), \quad (7)$$

$$\dot{\varphi}_h(t_{ic1}) = \omega_h(t_{ic2}) + h(\varphi_m(t_{ic1}) - \varphi_h(t_{ic1})). \quad (8)$$

このとき φ_m と φ_h は機械側モデルと環境(人間)側モデルの位相としての状態変数を表わし、 ω_m と ω_h はそれぞれの固有振動数としてのパラメータである。 $m(\varphi_h - \varphi_m)$ と $h(\varphi_m - \varphi_h)$ はカップリング関数であり、最も単純な場合としての対称結合を用いている。なお、以下の $\varepsilon (> 0)$ は結合パラメータである。

$$\begin{aligned} m(\varphi_h(t_{ic1}) - \varphi_m(t_{ic1})) \\ = \varepsilon(t_{md}) \sin(\varphi_h(t_{ic1}) - \varphi_m(t_{ic1})), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} h(\varphi_m(t_{ic1}) - \varphi_h(t_{ic1})) \\ = \varepsilon(t_{md}) \sin(\varphi_m(t_{ic1}) - \varphi_h(t_{ic1})). \end{aligned} \quad (10)$$

このとき内部モデルは、固有振動数パラメータを探索することによって、身体モデルとその環境の内部状態を予測することになる。そのためダイナミクスは複数の時間スケールによって記述されている。一つは身体モデルにおける位相的コヒーレンス生成を内部モデルにおいてシミュレートするため

の時間 t_{ic1} であり、もう一つは固有振動数パラメータの時間発展をシミュレートするための時間 t_{ic2} である。 t_{ic2} は t_{ic1} よりも十分ゆっくり変化するものとみなす。さらに、内部モデルの生成に対応する結合パラメータ変化は、身体モデルと内部モデルの相互拘束に依存して t_{md} の時間スケールにおいて実現される。

以上のような背景の下で、 t_{ic1} の時間スケールにおいて、位相変数に関する相互引き込みのダイナミクスが記述される²⁹⁾。このとき、内部モデルにおける機械側モデルと環境(人間)側モデルの位相関係を以下のように定義する。

$$\theta_{hm}(t_{ic1}) = \varphi_h(t_{ic1}) - \varphi_m(t_{ic1}). \quad (11)$$

これによって、つぎのような位相関係の時間発展に関するダイナミクスを得る。

$$\dot{\theta}_{hm}(t_{ic1}) = \omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2}) - 2\varepsilon(t_{md}) \sin(\theta_{hm}(t_{ic1})). \quad (12)$$

これは以下のようなポテンシャル関数 V_1 を持つので、

$$\begin{aligned} V_1 = & (\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2}))\theta_{hm}(t_{ic1}) \\ & - \int_0^{\theta_{hm}(t_{ic1})} (-2\varepsilon(t_{md}) \sin(\theta')) d\theta', \end{aligned} \quad (13)$$

相互引き込みの安定状態としてのコヒーレントな位相関係 $\theta_{hm}(t_{ic2})$ は、以下のように得られる。

$$\theta_{hm}(t_{ic2}) = \sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2})}{2\varepsilon(t_{md})}. \quad (14)$$

ただし $-2\varepsilon(t_{md}) < \omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2}) < 2\varepsilon(t_{md})$ である。この(14)は、次節において、時間スケール t_{ic2} で進む固有振動数パラメータの探索過程に用いられる。

3.5 相互拘束プロセス

3.5.1 身体モデルから内部モデルへ

アルゴリズムとしては、内部モデルの確定、身体モデルから内部モデルへの拘束、そして、内部モデルから身体モデルへの拘束という順序で進むことになる。しかし、ここでは理解の容易さを考慮して、身体モデルから内部モデルへの拘束関係から始め、最後に内部モデルの確定へとつながるように説明を進める。

まず、身体モデルとその環境としての人間側の歩行リズムの関係は、位相関係 $\theta_{HM}(t_{ec})$ を用いて以下のように定義される。

$$\theta_{HM}(t_{ec}) = 2\pi \frac{\Delta t_{HM}(t_{ec})}{\text{period}_M(t_{ec})}. \quad (15)$$

ここで $\Delta t_{HM}(t_{ec})$ は、身体モデルと人間の関係において相互に対応する事象の時間差である。歩行運動の場合であれば足の接地タイミングの差などが考えられる。また $\text{period}_M(t_{ec})$ は身体モデルの見かけの振動周期であり、ここでみかけの周期を用いている理由は、非線形振動は相互作用によって固有振動数と異なる振動数で振動するためである。このような条件のもとで、位相関係の変化速度があるしきい値 Ω_{th} を下回ったとき、つまり、

$$|\dot{\theta}_{HM}(t_{ec})| < \Omega_{th}, \quad (16)$$

のとき、その位相関係はコヒーレント状態にあるものとみなす。そして内部モデルに対して以下のような拘束を与えるものとする。

$$\theta_{HM}(t_{md}) = \theta_{HM}(t_{ec})|_{\text{coherence}}. \quad (17)$$

つぎに、内部モデルにおいては、Fig.4のように、身体モデルにおいて実現された位相的コヒーレンスを分離し、一方向化された関係に基づいて解釈することで、そのような位相関係を再現できるような固有振動数パラメータを探索する。このとき、その探索ダイナミクスを規定するために、以下のようなポテンシャル関数 V_2 を導入する。

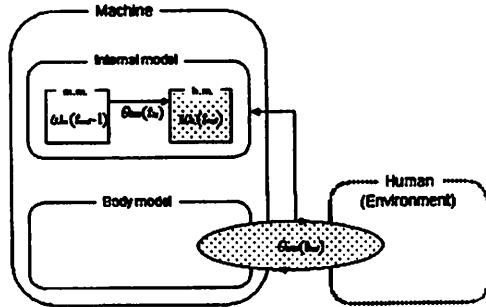


Fig.4 Constraint from body model to internal model

$$V_2 = -\alpha \cos(\theta_{hm}(t_{ic2}) - \theta_{HM}(t_{md})). \quad (18)$$

ここで $\theta_{HM}(t_{md})$ は (17) によって定義されている。また、 $\alpha(> 0)$ はポテンシャルの形状を規定し、探索速度を定めることになる。こうして固有振動数の探索過程は以下のように得られる。

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{hm}(t_{ic2}) &= -\frac{\partial V_2}{\partial \theta_{hm}(t_{ic2})} \\ &= -\alpha \sin(\theta_{hm}(t_{ic2}) - \theta_{HM}(t_{md})). \end{aligned} \quad (19)$$

このとき (14) を (19) に代入することで、内部モデルにおける位相変数に関するダイナミクスは消去される。それによって、 t_{ic2} の時間スケールにおける固有振動数パラメータの時間発展は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_h(t_{ic2}) - \dot{\omega}_m(t_{ic2}) &= -\alpha \sqrt{4\epsilon^2(t_{md}) - (\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2}))^2} \\ &\times \sin(\sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2})}{2\epsilon(t_{md})} - \theta_{HM}(t_{md})). \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、2つの固有振動数の時間発展を1つの方程式から一義的に決定することはできないから、両者のダイナミクスを分離し、機械側モデルから環境(人間)側モデルへの一方向化された作用関係、

$$\omega_m(t_{ic2}) = \omega_m(t_{md} - 1) = \text{const.}, \quad (21)$$

を仮定することで、以下のダイナミクスを得る。

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_h(t_{ic2}) &= -\alpha \sqrt{4\epsilon^2(t_{md}) - (\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{md} - 1))^2} \\ &\times \sin(\sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{md} - 1)}{2\epsilon(t_{md})} - \theta_{HM}(t_{md})). \end{aligned} \quad (22)$$

この表現は、身体モデルを介する開かれた相互関係が、閉じた内部モデルにおいて機械から人間への一方向化された因果的関係として解釈されることを意味している。こうして人間側の歩行リズムの固有振動数は以下のように予測される。

$$\begin{aligned} \omega_h(t_{md}) &= -\alpha \int_{t_{ic2(0)}}^{t_{ic2(max)}} \sqrt{4\epsilon^2(t_{md}) - (\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{md} - 1))^2} \\ &\times \sin(\sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{md} - 1)}{2\epsilon(t_{md})} - \theta_{HM}(t_{md})) dt_{ic2}, \end{aligned} \quad (23)$$

ここで探索の時間幅は $t_{ic2(0)}$ から $t_{ic2(max)}$ とし、 $\omega_h(t_{ic2})$ の初期条件としては $\omega_h(t_{md} - 1)$ が用いられる。

上記のように、身体モデルから内部モデルへの拘束関係においては、機械側に対応する振動子の固有振動数を固定して、人間側に対応する振動子の固有振動数パラメータを探索することになる。これは身体モデルを介して生成する位相関係を埋め込まれた人間の内部状態が、内部モデルにおける一方向化された関係に基づいて予測されていることに対応する。

3.5.2 内部モデルから身体モデルへ

つぎに、内部モデルから身体モデルへの拘束関係について説明する。このとき内部モデルは、Fig.5のように、目標とするコヒーレントな位相関係を実現できるような固有振動数パラメータを探索することになる。そして、固有振動数の探索ダイナミクスは、ポテンシャル関数 V_3 を導入することによって、 t_{ic2} の時間スケールで実現される。

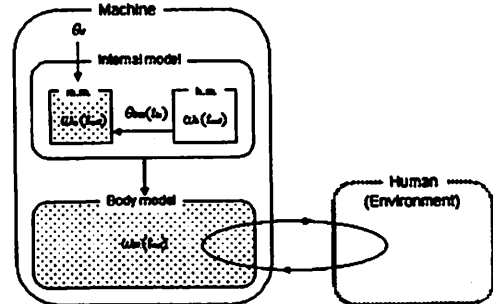


Fig.5 Constraint from internal model to body model

$$V_3 = -\beta \cos(\theta_{hm}(t_{ic2}) - \theta_d). \quad (24)$$

ここで θ_d は目標とする位相関係である。また、 $\beta(> 0)$ はポテンシャルの形状を規定し、探索速度を定めることになる。こうして以下のような探索過程が得られる。

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_{hm}(t_{ic2}) &= -\frac{\partial V_3}{\partial \theta_{hm}(t_{ic2})} \\ &= -\beta \sin(\theta_{hm}(t_{ic2}) - \theta_d).\end{aligned}\quad (25)$$

このとき(14)を(25)に代入することで、 t_{ic2} の時間スケールにおける固有振動数パラメータの時間発展を得る。

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_h(t_{ic2}) - \dot{\omega}_m(t_{ic2}) &= -\beta \sqrt{4\epsilon^2(t_{md}) - (\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2}))^2} \\ &\quad \times \sin(\sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{ic2}) - \omega_m(t_{ic2})}{2\epsilon(t_{md})} - \theta_d).\end{aligned}\quad (26)$$

ただし、先と同様に、2つの固有振動数の時間発展を1つの方程式から一義的に決定することはできないから、環境(人間)側モデルから機械側モデルへの一方向化された作用関係、

$$\omega_h(t_{ic2}) = \omega_h(t_{md}) = const.,\quad (27)$$

を仮定することで、以下のダイナミクスを得る。

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_m(t_{ic2}) &= \beta \sqrt{4\epsilon^2(t_{md}) - (\omega_h(t_{md}) - \omega_m(t_{ic2}))^2} \\ &\quad \times \sin(\sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{md}) - \omega_m(t_{ic2})}{2\epsilon(t_{md})} - \theta_d).\end{aligned}\quad (28)$$

この表現は、身体モデルを介する相互関係が、内部モデルにおいて人間から機械への一方向化された因果的關係として解釈されることに対応している。こうして、機械側の身体モデルの固有振動数は以下のように予測される。

$$\begin{aligned}\omega_m(t_{md}) &= \beta \int_{t_{ic2(0)}}^{t_{ic2(max)}} \sqrt{4\epsilon^2(t_{md}) - (\omega_h(t_{md}) - \omega_m(t_{ic2}))^2} \\ &\quad \times \sin(\sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{md}) - \omega_m(t_{ic2})}{2\epsilon(t_{md})} - \theta_d) dt_{ic2}.\end{aligned}\quad (29)$$

このとき探索の時間幅は、 $t_{ic2(0)}$ から $t_{ic2(max)}$ とし、 $\omega_m(t_{ic2})$ の初期条件としては $\omega_m(t_{md} - 1)$ が用いられる。

上記のように、内部モデルから身体モデルへの拘束関係においては、人間側に対応する振動子の固有振動数が固定された条件のもとで、機械側に対応する振動子の固有振動数パラメータが探索される。これによって、目標とする位相関係を実現するために必要とされる身体モデルの固有振動数が予測される。こうして、身体モデルは以下の関係に基づいて内部モデルから拘束を受けることになる。

$$\omega_M(t_{md}) = \omega_m(t_{md}).\quad (30)$$

この結果として、身体モデルと人間の歩行リズムの間に生成していたコヒーレント状態はいったん崩壊し、新しいコヒーレント状態が再生成される。

3.5.3 内部モデルの確定

最後に、このような相互拘束プロセスにとっての拘束条件に相当する内部モデルの更新過程について説明をする。このとき、二重性モデルの前提条件として、相互拘束プロセスは

環境との開かれた作用関係の中に埋め込まれていることに注意しなければいけない。つまり、内部モデルは、身体モデルを介する開かれた空間に関する仮想的モデルであり、その妥当性は、内部モデルと身体モデルの相互拘束プロセスに再び求められなければならないのである。したがって、Fig.6に示すように、内部モデルにおいて予測された位相関係と身体モデルを介して人間の歩行リズムとの間に再生成されたコヒーレントな位相関係の差を減少させるように、内部モデルは構成される必要がある。そして、その誤差測度を以下のように定義する。

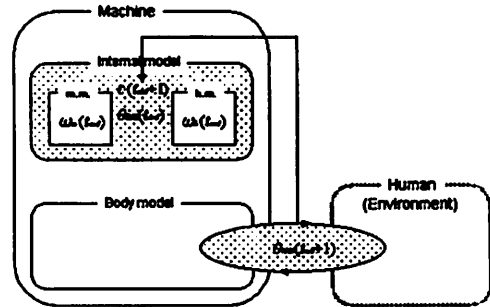


Fig.6 Generation of internal model

$$E(t_{md} + 1) = \frac{1}{2}(\theta_{HM}(t_{md} + 1) - \theta_{hm}(t_{md}))^2.\quad (31)$$

ここで $\theta_{hm}(t_{md})$ は、内部モデルによって予測される身体モデルのコヒーレントな位相関係であり、それは以下のように求められる。

$$\theta_{hm}(t_{md}) = \sin^{-1} \frac{\omega_h(t_{md}) - \omega_m(t_{md})}{2\epsilon(t_{md})}.\quad (32)$$

このような条件のもとで、上記の誤差測度を減少させるように内部モデルを更新しなければならない。ここでは、一例として勾配法を用いることによって、内部モデルの結合パラメータ $\epsilon(t_{md})$ を更新している。このとき、 $\eta(> 0)$ は内部モデルの変化速度を規定している。

$$\epsilon(t_{md} + 1) - \epsilon(t_{md}) = -\eta \frac{\Delta E(t_{md})}{\Delta \epsilon(t_{md})}.\quad (33)$$

しかしながら、この誤差測度の変化は予測的には求められないため、その相互拘束プロセスに伴う時間発展に沿って評価しなければならない。この過程において誤差測度はパラメータ ϵ の変化に対して時間遅れを伴って変化するから、(33)は以下のように書き換えられる。

$$\epsilon(t_{md} + 1) = \epsilon(t_{md}) - \eta \frac{E(t_{md} + 1) - E(t_{md})}{\epsilon(t_{md}) - \epsilon(t_{md} - 1)}.\quad (34)$$

これは閉じた空間における最適性を前提にした探索過程ではなく、開かれた空間において多様性を生み出す履歴的な過程である。したがって、内部モデルは、そのモデルに固有の時間発展においてのみ妥当性を有する、歴史的な観点から捉えられなければならないだろう。

4. 共創出過程の構成

4.1 シミュレーション

このような二重性モデルの共創出過程を調べるために2エージェント系としてシミュレートしてみた。そのようなプロセスの一例を Fig.7a-e に示す。まず, Fig.7a ではおのおののエージェントにおける身体モデルのみかけの振動数 (apparent frequency) とその固有振動数 (original frequency), Fig.7b では身体モデルにおける2エージェント間での位相関係, 以下同様, Fig.7c は内部モデルにおいて予測された両エージェントの固有振動数パラメータ, Fig.7d は誤差測定, Fig.7e は内部モデルにおける結合パラメータの時間発展である。各図において, 左側の矢印はエージェント間での相互作用の開始を, 右側の矢印は外乱を意味している。また時間軸は t_{ec} に対応している。

相互作用前には, Fig.7a のように, 両エージェントの身体モデルはそれぞれの固有振動数で振動し, みかけの振動数もそれに一致していた。相互作用の開始後, みかけの振動数は相互に接近し時刻 30sec 付近で同調した。このような相互引き込みによって, Fig.7b のように, 身体モデル間での位相関係が時間的に変動しないコヒーレント状態が生成した。それに基づいて, Fig.7c のように, 個々のエージェントの内部モデルは目標とする位相関係 (この例ではエージェント1は位相差 $-0.5rad$, エージェント2は位相差 $0.5rad$) を実現するために両エージェントの固有振動数を予測した。これに基づいて, Fig.7a のように身体モデルの固有振動数が変更され, 身体モデルにおけるコヒーレント状態は一時的に崩壊した。しかし, そのような状態は相互引き込みによって徐々に回復し, 再び時刻 40sec 付近で身体モデルに同調状態が生成する。そして同様のプロセスを繰り返すのである。たとえば Fig.7a において身体モデルの固有振動数の変化に注目すれば, このようなプロセスが約5~6回繰り返されて80sec 付近で安定していることがわかる。この過程においては, Fig.7d,e のように, 誤差測定が減少するように内部モデルの結合パラメータも変化している。これらは二重性モデルにおける相互拘束プロセスに対応する現象である。

さらに, このようなサイクル的な相互拘束プロセスは, 2体のエージェント間において相互に同調することも観察された。たとえば Fig.7a において, 身体モデルの固有振動数が変化するタイミングに注目すれば, それが両エージェント間で徐々に揃ってくるのがわかるであろう。しかも, それらの固有振動数は2体間で相互に調整されながら相互適応的に変化している。さらに, Fig.7e では, 内部モデルの更新タイミングも両エージェント間で揃っている。これらのダイナミクスは関係的機能の共創出過程に対応する現象と考えられる。

さらに外乱に対する応答を調べるために, 右側の矢印の時刻において, エージェント1の身体モデルの固有振動数を変

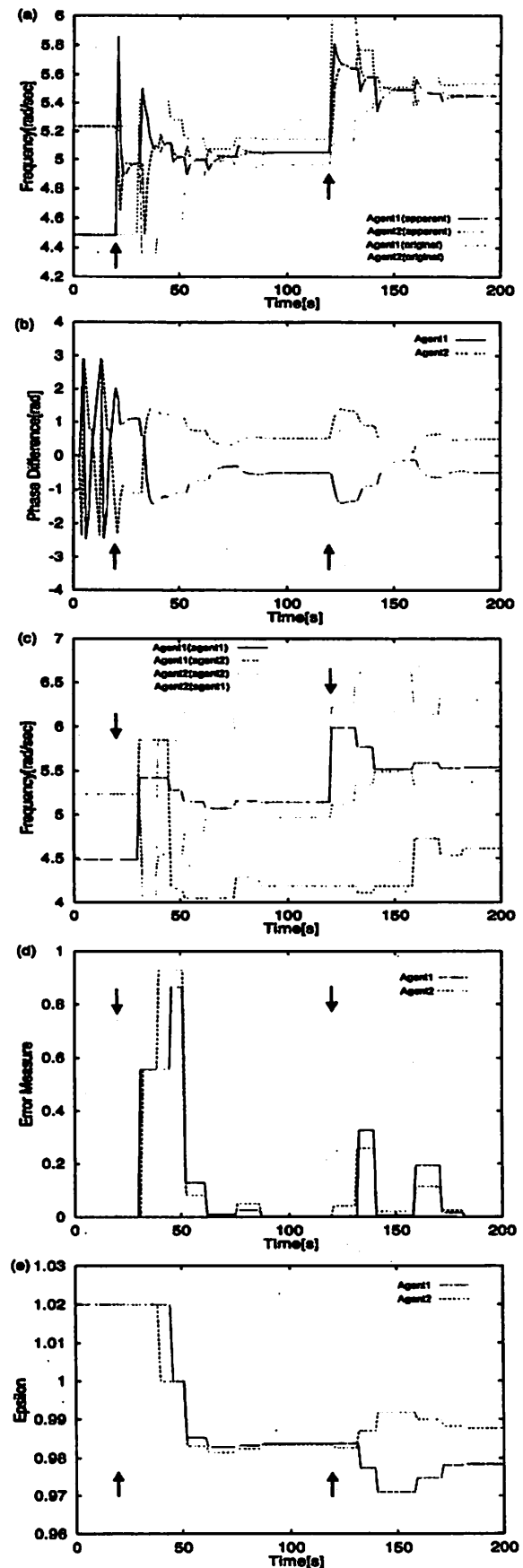


Fig.7 Co-emergence process in two-agents ($\alpha=0.6$, $\beta=0.5$, $\eta=0.02$, $\Delta t=0.0005$)

化させた。その結果として、Fig.7aのように、エージェント1のみならず2においても身体モデルの固有振動数が変化し再び相互適応過程が観察された。そして目標とする位相関係が再生成され安定化した。しかも、このような過程において両エージェントは同一の状況に埋め込まれているにも関わらず、Fig.7eのように、各エージェントの履歴性の違いに依存して内部モデルの結合パラメータが異なる時間発展を示した。このことは両エージェントが同一の状況を異なる内部モデルとして捉えていることを意味しており、共創出過程においてエージェントが分化し多様化される可能性を示唆している。

なお、本シミュレーションにおいて、共創出過程が収束している理由としては、本シミュレーションが2体系として閉じた構成になっていることが考えられる。つまり、モデルの外部からの無限定な影響が排除されているのである。さらに、両エージェントの目標とする位相関係に相互矛盾が存在しないことも重要と考えられ、これらの詳細については別論文にまとめる予定である。

4.2 歩行実験

つぎに、二重性モデルを用いて、実際に人間-機械系を構成する。特に、共創出コミュニケーションに基づく歩行介助の可能性を探るために、二重性モデルとしての歩行ロボットと人間の間での関係の機能の共創出過程を実現することになる。ただし、実機としてのロボットを構成するのではなく、計算機中にシミュレートされる歩行ロボットと人間が足音を介してコヒーレントな協調歩行する状況を用いる。

具体的にはFig.8のような実験装置を作成した。ここでは、人間の足が接地したタイミングを靴に装着した接触センサーによって検出し、その信号をシミュレータに送る。一方、シミュレータにおいては二重性モデルが計算されており、その身体モデルに上記の信号が入力される。さらに、その身体モデルにおける足の接地タイミングを足音として合成し、ヘッドフォンを介して人間に伝える。この装置は小型のパソコンを用いて可搬システムとして構成されている²⁶⁾。

Fig.9a,bは、人間とロボットの歩行周期(身体モデルのみかけの振動数の逆数に対応)およびそれらの間に生成された位相関係(身体モデルの位相関係に対応)を示している。左右の矢印は相互作用の開始と停止を意味している。このとき、相互作用の開始前には、両者はそれぞれの固有周期(身体モデルの固有振動数の逆数に対応)で歩行していたが、相互作用開始後には、それらの歩行周期は相互に接近し一致した。そして位相関係は目標とする値(この例では位相差0rad)に収束した。しかし、相互作用を停止させると、それらの歩行周期は固有周期に戻り、その固有周期は相互作用前と異なる相互に適応した値を示した。このような相互適応過程は前節のシミュレーション結果とも対応しており、二重性モデルが人間側においても実現されている可能性を強く示唆している。さらに、本モデルと人間の間で共創出過程が実現されることを示すものでもある。最近、われわれは人間側の歩行運動も

二重性の観点から解析し、そこに相互拘束プロセスに対応する時間発展が観察されることを明らかにしつつある。

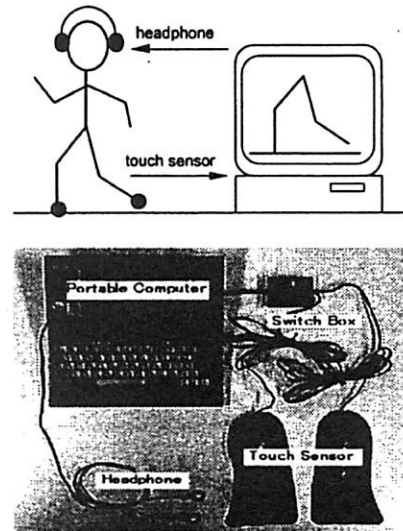


Fig.8 Walk support robot

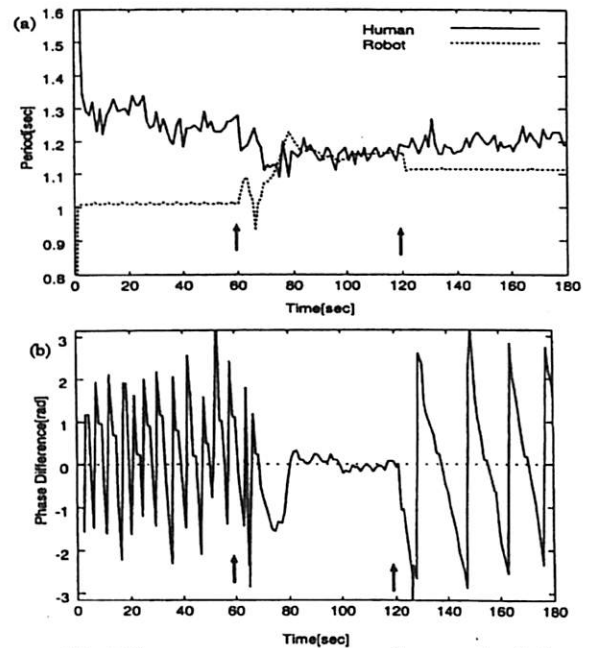


Fig.9 Co-emergence process in walk support robot

この実験においては、人間の一方の足に重り(12kg)を装着することで、その歩行運動を不安定化している。そのため、Fig.9aのように、ロボットとの相互作用前には、人間の歩行周期が大きくゆらいでいる。しかし、相互作用中には協調歩行を共創出することによって、そのような周期ゆらぎは顕著に減衰し歩行が安定化された。特に、この相互適応過程では人間側における歩行パターンの発達も観察されており、二重性モデルに基づく関係の機能の共創出過程を、介助やリハビリに応用できる可能性を示唆するものである。さらに、本装置を使用することによって自己意識における空間感覚や時間感覚が影響を受けたことも補足しておく。このことは、自

己と機械の間での共創出コミュニケーションとして二重性モデルを表現できていることを意味している。この歩行介助ロボットの詳細についても別論文にまとめる予定である。

5. 結 論

本研究においては、人間と人間がコミュニケーションを介してリアルタイムに關係の機能を創り上げる過程を理想として、人間と人工物の関わり方に関する新たな設計原理の確立をめざした。そして、人間と人工物が共に機能を創り上げる共創出コミュニケーションとしての人間-機械系を提案し、それを実現するための二重性モデルを構成した。

その結果、本モデルを用いた2体エージェント系で共創出過程をシミュレートできることを示し、さらに、歩行介助ロボットにおいて、人間の歩行運動の発達の過程を共創的に支援できることも明らかにした。これらの結果は、本モデルが人間における共創出コミュニケーションに適用可能であることを意味しており、その有効性を示唆するものである。このような背景に基づいて、われわれは本枠組みを、人間-機械系のユーザビリティをこえて、人間と人間のコミュニケーションを支援する人間-機械-人間系へ拡張できるものと予想している。

参 考 文 献

- 1) ドナルド・A・ノーマン: 誰のためのデザイン?: 認知科学者のデザイン原論 (野島久雄訳, 新曜社 (1990))
- 2) ドナルド・A・ノーマン: 人を賢くする道具: ソフトテクノロジーの心理学 (岡本明他訳, 新曜社 (1996))
- 3) 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)
- 4) マイケル・ポランニー: 暗黙知の次元 (伊藤敬三訳, 紀伊国屋書店 (1980))
- 5) 清水博: 生命知としての場の論理, 中公新書 (1996)
- 6) 清水博: 新版 生命と場所, NTT出版 (1999)
- 7) 清水博: 共創と場所 (「場と共創」第1章), NTT出版 (2000)
- 8) ハイエガー: 存在と時間 (松尾啓吉訳, 勁草書房 (1960))
- 9) メルロー=ポンティ: 知覚の現象学 (竹内芳郎他訳, みすず書房 (1974))
- 10) メルロー=ポンティ: 眼と精神 (滝浦静雄他訳, みすず書房 (1966))
- 11) W. S. Condon and L. W. Sander: Neonate Movement is Synchronized with Adult Speech, *Science*, 183, 99/101 (1974)
- 12) 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)
- 13) エルンスト・ベッセル: 意識の中の時間 (田山忠行他訳), 岩波書店 (1995)
- 14) E. Poeppel: *Mind Works - Time and Conscious Experience*, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, Orlando (1988)
- 15) 三宅: 「生命」における設計, 現代思想, 25-6, 301/317 (1997)
- 16) 三宅: 2中心モデルとインタフェース表現, ファジィ学会誌, 9-5, 637/647 (1997)
- 17) ノーバート・ウィナー: サイバネティクス (池原止戈夫他訳), 岩波書店 (1962)
- 18) ヘルマン・ハーケン: 協同現象の数理 (牧島邦夫他訳), 東海大学出版会 (1980)
- 19) 三輪, 石引, 荒井, 西嶋: 身体性に着目したエンタテインメント創出過程の計測, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 2-2, 185/191 (2000)
- 20) 渡辺, 大久保, 石井, 中林: バーチャルアクターとバーチャルウェーブを用いた身体的バーチャルコミュニケーションシステム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 2-2, 1/10 (2000)
- 21) Y. Miyake and H. Shimizu: Mutual Entrainment Based Human-Robot Communication Field, Proc. of 3rd. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN'94), Nagoya, Japan, 118/123 (1994)
- 22) Y. Miyake and J. Tanaka: Mutual-Entrainment-Based Internal Control in Adaptive Process of Human-Robot Cooperative Walk, Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'97), Orlando, U.S.A., 293/298 (1997)
- 23) Y. Miyake, T. Miyagawa and Y. Tamura: Internal Observation and Mutual Adaptation in Human-Robot Cooperation, Proc. of 1998 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'98), San Diego, U.S.A., 3685/3690 (1998)
- 24) Y. Miyake and T. Miyagawa: Internal Observation and Co-Generative Interface, Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'99), Tokyo, Japan, I-229/I-237 (1999)
- 25) 三宅, 宮川, 田村: 2中心性に基づく相互適応インターフェース- Complimentality between Adiabaticity and Coherency -, 第10回自律分散システム・シンポジウム資料, 231/234 (1998)
- 26) 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)
- 27) J. Mates, T. Radil, U. Mueller and E. Poeppel: Temporal Integration in Sensorimotor Synchronization, *J. of Cognitive Neuroscience*, 6-4, 332/340 (1994)
- 28) Y. Yamaguchi: Personal Communication (1997)
- 29) Y. Kuramoto: *Chemical Oscillation, Waves and Turbulence*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1984)

[著者紹介]

三宅美博 (正会員)



1989年, 東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了。金沢工業大学情報工学科助手, 講師, 助教授を経て, 96年より東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻助教授。薬学博士。生物物理学会, ロボット学会, IEEEなどの会員。

宮川 透



1998年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻修士課程修了。現在, 野村総研に勤務。

田村 寧 健



1998年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻修士課程修了。現在, NTTソフトウェアに勤務。