

○ 小松知章(東京工業大学)

三宅美博(〃)

**Three Agents Model with the Mutual Adaptive Mechanism
under Incomplete Informations Problem**

○Tomoaki KOMATSU, Tokyo Institute of Technology

Yoshihiro MIYAKE, Tokyo Institute of Technology

We propose an autonomous agent which is adaptive to nonlinear dynamic environment. In our model, agent which has incomplete information on environment can perform a co-operative working. The method consist of three factors; <1> mutual entrainment among rhythms of three agent's pulse, <2> adiabatic approximation of inseparable interaction and <3> internal models which observe mutual interaction, guess condition of both, and constrain own body. Computer simulations of coupled agents showed validity of proposed system.

Key Words: Autonomous Agent, Incomplete Informations Problem, Entrainment, Dynamic Environment, Mutual Adaptation, Cooperation, Mutual Interference

1. 緒言

実世界に存在するシステムを複数のサブシステムに切り分けてエージェントとし、そのマルチエージェント系として記述することを考えてみる。系のなかで自律的に行動するエージェントを考えた場合、そこにはいくつかの問題が存在している。

まず、エージェント各々の行動はたがいに影響・干渉しあうこと (Fig.1) が挙げられる。従来の閉ループ制御では被制御器 (エージェント自身) と環境とは明確に分離されており、基本的に外乱である環境へエージェント側から作用がおよぼされることはない。しかし環境のなかには本来協調すべき“仲間”が含まれており、それらと相互に作用しあっている本来の状態は、この枠組みでは取り扱いきれていない。

さらに、観測の局所性 (Fig.2) も問題の一つである。個々のエージェントはそれぞれ自身の視点から局所的な観測しか行えず、獲得情報も限られたものとなるということだ。その不足を補完するべく通信によって他のエージェントから情報を受け取ったところで、その伝達速度も有限であるため、結局は遅れの発生により局所情報にしかなりえない。

そういった作用の相互性 (自他の非分離性) および観測の局所性などにより、個々のエージェントはそれぞれ異なる不完全情報をもとに系を解釈・再構築しなければならない。そのため、システム全体からエージェントへの切り分けかたが、エージェント毎に異なる可能性が導かれる。エージェントによって、他のエージェントが幾つどう見えているかという世界描像が異なってしまうのである (Fig.3)。

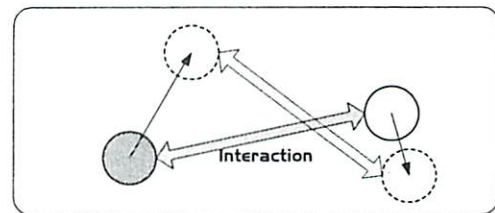


Fig.1 Mutual Interference

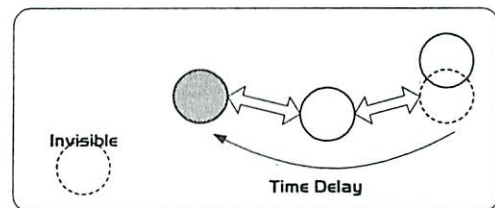


Fig.2 Local Observation

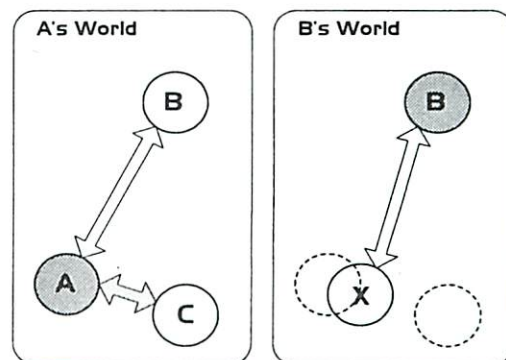


Fig.3 Difference of World Model

このような不完全情報に起因する問題を回避する方法が、無いわけではない。系のすべてを観測できる視点に制御器を設け、そこからすべてのエージェントを一括制御してやればいい。しかしそれが可能なのは注意深く設計された限定的な系 (たとえば小規模プラントなど) においてであって、系が実世界

に拡張された場合にはどこにも観測点を設けることが不可能となる。

またそのような中央集権的方式をもちいて制御できている事例——半導体製造プラント内における搬送ロボット群など——においても、運用上さまざまな問題がみられている。製造ラインをつくりかえた時（環境が変化したとき）に中央制御システムのルール再構築が煩雑できわめて時間と労力を要するなどである。

さて、ここまで述べてきたような情報の不完全性がうみだす問題の典型として、エージェントに人間をふくむ系が考えられる。

我々はこれまでとくに自他の非分離性に注目し、その一例として人間と歩行ロボットから構成される2体系において、両者の協調歩行というタスクを達成しうる適応メカニズムへとアプローチしてきた。その機構とは、エージェント上に設定され両者間の関係同定をおこなう“内部モデル”である。内部モデルは、身体間の関係にもとづいて他エージェントの内部状態を近似的に推定し、自らの行動結果が環境（この場合は相手）におよぼす影響を勘案したうえで望ましい自身の状態を予測する。

内部モデルを組み込んだシステムについてはこれまで、人間-ロボット系をさらに模倣・単純化したシミュレータ上の2エージェント系をもちいて、挙動や安定領域の解析を行ってきた。[1]

一方、そのエージェントを実地に人間と結合した、人間-モデルエージェント系でも有効な結果が得られている。両者の身体間に相互作用性があることを前提として稼動するエージェントは、人間と柔軟に協調歩行可能であることが、これまで検証されてきた。[2]

しかしこれまでの2エージェントに単純化された系は、たしかに相互干渉について取り扱ってはきたが、内部モデルにはすべてのエージェントとその関係が含まれていた。パラメータの違いこそあったものの、さきに述べた局所観測などをもふくんだ不完全情報に起因するエージェントへの切り分けの違いなどの不完全性、つまり“エージェント毎の世界描像の違い”についてはほとんど扱いきれていない。よってそうした要素を盛り込んだ状況下で、いままで設定してきた内部モデルの枠組みがうまく機能するか確認する必要がある。

そこで今回、これまでえられた有効な結果をうけて、3エージェント系への拡張を行った。3つのエー

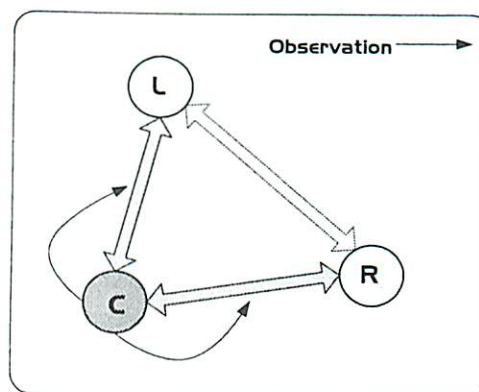


Fig.4 Three Agents System

ジェントは、どれもそれぞれ他の2つと結合している。ただし、互いの関係を観測できているのは自他間のみであり、あるエージェントから他2体のエージェント同士の関係を直接観測する枠組みは存在しない(Fig.4)。つまりどのエージェントにとっても、系は自分を中央においた直列3体として把握されていることになる。

ここまで扱ってきた2エージェント系は人間-人工システムに対応させて考えてきたが、3エージェントへもっとも直接に対応する実際の描像としては、機間通信によりネットワークされた協調作業ロボットなどが挙げられるだろう。また3体のうち2つが人間、1つが人工システムと考えると、協調作業支援ツールあるいはゲーム機やある種のアミューズメント施設などへも対比できよう。さらに3体の結合強度に極端な差があるケース（実質的に直列3体結合）を考えると、電話・テレビ・コンピュータネットワークを介したコミュニケーションなどもその範疇にふくまれるであろう。その場合、両端を人間とした中間のエージェントは、文字どおりエージェント（代理人）として働くことになる。つまり“人間-人工システム-人間系”のモデル化ともなっている。

われわれは今回、そういった3エージェント系のモデル構築・解析を通して、これまでの2エージェント系モデルが扱いきれていなかった不完全情報に起因する問題へのさらなるアプローチを行うものである。

2. エージェント系の概略

2.1 身体モデルと内部モデル

問題の単純化された一局面として、異なる固有振動数をもつ3体の歩行エージェントが同期同調するというタスクを設定した。前述した2体のケースと同様に3体（たとえば人工システムを仲介とした人

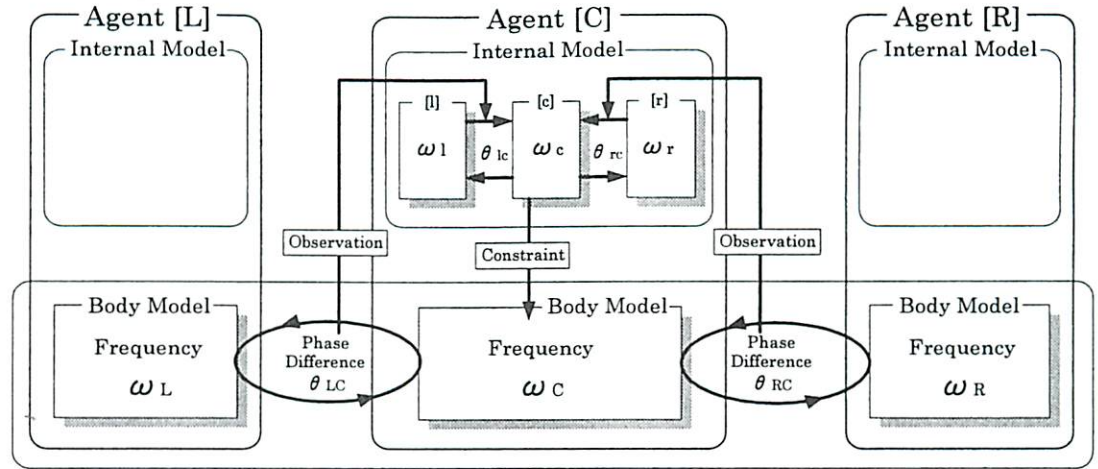


Fig.5 Mutual Adaptive System (on Agent "C")

間同士)が協調歩行するというのは、あまり実際の応用局面としては考えられないが、現段階ではこれまでの結果と比較対照するためにおなじ枠組みを用いている。

Fig.4に示したとおりにエージェントは全結合されているが、便宜上ここではエージェント左・中央・右と呼ぶことにする。

個々のエージェントが得られる情報はエージェント間の接地リズム位相差のみであり、それをして特定位相差に一致させることをタスク目標とする。ま

た、相互作用と関係性の体現として、そのリズムの相互引き込み——固有振動数の異なる非線形振動子間の相互作用によって見かけ上の周期が一致する現象[3]——をそなえた3つの身体モデルを用意した。

歩行エージェントの身体モデルはVan der Pol方程式で記述する。以下の各式が個々のエージェント分であり、(1)から順にそれぞれ中央・左・右に相当する。 χ の符号が正から負へ変化する時点を各エージェントの接地とみなし、式の右辺が両者の相互作用として与えられる(それぞれ2つの隣接エージェントと結合しているため相互作用項は2つずつある)。 ω はモデルの固有振動数であり、身体モデルへの内部状態の反映として取り扱う。

(a) 自身の身体と相手の身体との関係を反映している、接地リズムの位相差(θ_{body})を引き込み状態下で観測する。

(b) 内部モデルは自身のリズム振動数(ω_s)を一定と仮定して、観測された位相差を実現する相手のリズム振動数(ω_o)を割り出す(≡相手の内部状態の推定)。

(c) ω_o を固定し、内部モデルの位相差(θ_{inter})をモデルにおけるタスク達成目標値(θ_d)にするような ω_s を導出する。

(d) 自身の身体モデルの振動数(ω_s)は、内部モデルが得た振動数 ω_o に合わせられる。これを我々は内部モデルによる身体系の拘束と呼んでいる。

$$\ddot{\chi}_C - \xi_C(1 - \chi_C^2)\dot{\chi}_C + \omega_C^2\chi_C = \varepsilon_{LC}(\dot{\chi}_L - \dot{\chi}_C) + \varepsilon_{RC}(\dot{\chi}_R - \dot{\chi}_C) \quad (1)$$

$$\ddot{\chi}_L - \xi_L(1 - \chi_L^2)\dot{\chi}_L + \omega_L^2\chi_L = \varepsilon_{CL}(\dot{\chi}_C - \dot{\chi}_L) + \varepsilon_{RL}(\dot{\chi}_R - \dot{\chi}_L) \quad (2)$$

$$\ddot{\chi}_R - \xi_R(1 - \chi_R^2)\dot{\chi}_R + \omega_R^2\chi_R = \varepsilon_{CR}(\dot{\chi}_C - \dot{\chi}_R) + \varepsilon_{LR}(\dot{\chi}_L - \dot{\chi}_R) \quad (3)$$

そして身体モデルより次元の落ちた不完全な状態記述としての内部モデルが、それぞれのエージェントに実装されている。それらは以下のように非線形結合した位相方程式の形で記述される(3式で1エージェント分)。つまりエージェント毎に、自他の状態をその内部で推定して持っていると言える。 ϕ は位相、 ω は内部モデルが想定する自他個々の振動数、 ε は結合強度である。

$$\phi'_c = \omega_c + \varepsilon_{lc}\sin(\phi_l - \phi_c) + \varepsilon_{rc}\sin(\phi_r - \phi_c) \quad (4)$$

$$\phi'_l = \omega_l + \varepsilon_{cl}\sin(\phi_c - \phi_l) + \varepsilon_{rl}\sin(\phi_r - \phi_l) \quad (5)$$

$$\phi'_r = \omega_r + \varepsilon_{cr}\sin(\phi_c - \phi_r) + \varepsilon_{lr}\sin(\phi_l - \phi_r) \quad (6)$$

Table1 Process of Internal Model

2.2 内部モデルの稼働プロセス

実際の内部モデルは、前頁Table1に示されたプロセスで稼働する。

上記ステップ(b)は、 $\theta_{inter} - \theta_{body}$ より与えられる周期的なポテンシャル (2π 毎に同じ状態が現出するので) に対し、それを減少させるように ω を変化させる。具体的には(4)(5)(6)式で与えられた位相方程式を拘束条件とすることで導出される。まったく同様に(c)は、 $\theta_{inter} - \theta_d$ により与えられる周期的ポテンシャルから導かれる。(b),(c)ではそれぞれ内部モデルが持っている自分および相手の状態を仮に固定とみなしているが、これは本来相互干渉によって自他が同時に変位すべきところを、そのままでは処理できないので近似的に切り分けて取り扱ったものである。

Fig.5に見られるような3エージェントを内部モデルに持つ中央エージェントでは、具体的に以下のプロセスに従っている。観測される位相差が2つある ($\theta_{body} = \theta_{LC}, \theta_{RC}$) のでポテンシャルは2つずつ得られるが、それらは重みづけして結合する。位相方程式を拘束条件として ω の更新式を導出するわけだが、(b)では自身 ω'_c および ω'_r がゼロとみなされて(7)式、おなじく ω'_c および ω'_l がゼロとみなされて(8)式が、(c)では相手 ω'_l, ω'_r がゼロとみなされて(9)式が導出される。

$$\omega'_l = -\alpha_l \sqrt{9\epsilon_l^2 - (2\omega_l - \omega_c - \omega_r)^2} \sin(\sin^2(2\omega_l - \omega_c - \omega_r/3\epsilon_l) - \theta_{LC}) \quad (7)$$

$$\omega'_r = -\alpha_r \sqrt{9\epsilon_r^2 - (2\omega_r - \omega_c - \omega_l)^2} \sin(\sin^2(2\omega_r - \omega_c - \omega_l/3\epsilon_r) - \theta_{RC}) \quad (8)$$

ただし今回のモデルでは、身体モデルの引き込み状態からステップ(a)を開始するにあたって、両隣のエージェント双方と引き込みが成立しているときのみ行った。一方のみと引き込んでいる時は従来の2エージェントと同じ枠組みで適応動作させる、ということは今回検討しなかった。

$$\omega'_c = \beta_c \sqrt{9\epsilon_c^2 - (2\omega_c - \omega_l - \omega_r)^2} \sin(\sin^2(2\omega_c - \omega_l - \omega_r/3\epsilon_c) - \theta_{dLC}) + \beta_r \sqrt{9\epsilon_r^2 - (2\omega_r - \omega_c - \omega_l)^2} \sin(\sin^2(2\omega_r - \omega_c - \omega_l/3\epsilon_r) - \theta_{dRC}) \quad (9)$$

3. 計算機による実験結果

以上のモデルを用いて現在おこなっているシミュレーションの結果を示す。

Fig.6からFig.9まですべて同じ並びになっており、aがエージェント身体モデル間の位相差、bが身

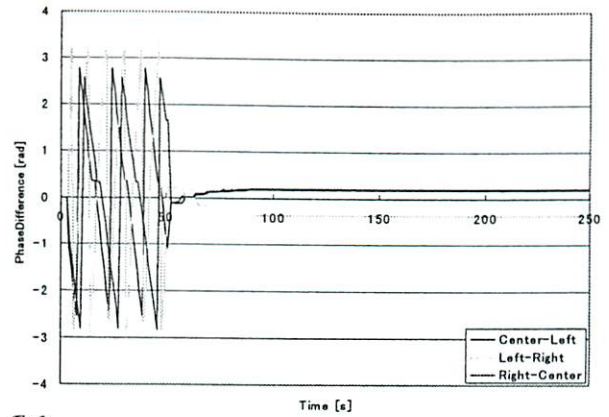


Fig.6a

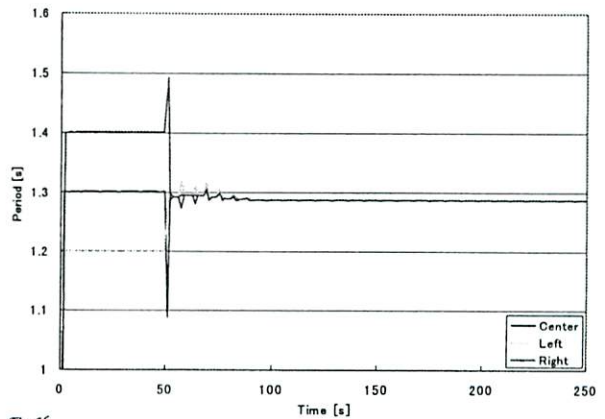


Fig.6b

Fig.6 Temporal Development of Mutual Adaptation (Three Agents / Adjusted Target)

体モデルの振動周期である。Fig.6のみ、c,d,eはそれぞれが順に中央・左・右エージェントへ搭載された内部モデルが想定している、3体のエージェントの振動数を示す。3つの身体モデルの初期周期はそれぞれ1.2・1.3・1.4であり、60秒までは身体モデル同士がカップリングせず独自に動いている(1),(2),(3)において $\epsilon = 0$)。

Fig.6aに見られるように、カップリング開始から身体モデルの相互引き込みが成立して内部モデルが作動し、エージェントはこれまでの2エージェント系同様、目標の位相差を達成している。この場合は、左から右へと0.2ずつの位相差を実現させた。そして目標位相差が達成されている状態(位相差一定つまり同一周期)であるにも関わらず次頁6c,6d,6eを見ると、それぞれが個々のエージェント身体モデルの ω について異なった描像に達していることが分かる。つまり、各エージェントが自身の視点から関係を“解釈”している、とする定性的な捉えかたにある程度対応しているわけである。

また、左・右エージェント間にもみ矛盾した目標

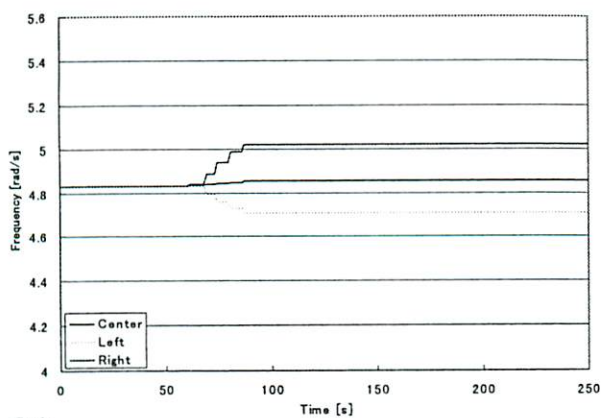


Fig.6c

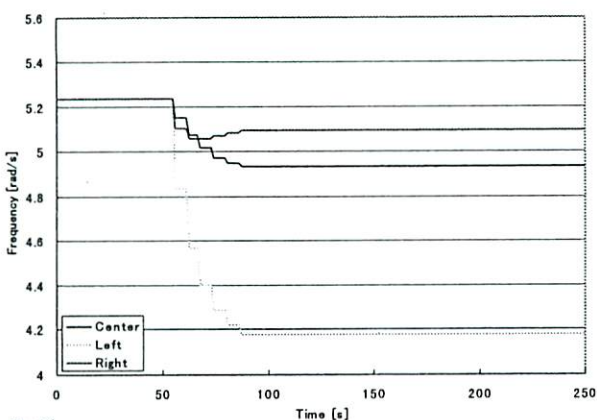


Fig.6d

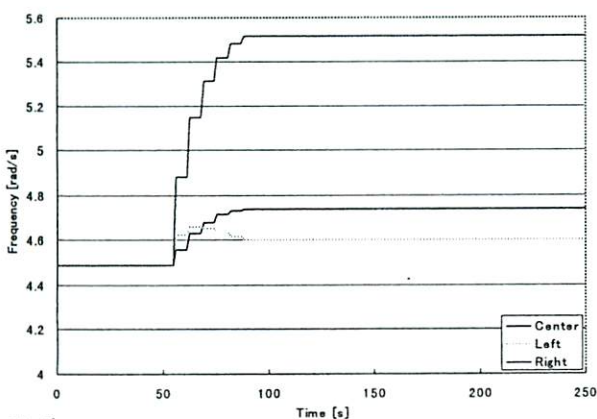


Fig.6d

を与えてのシミュレーションも行った。さきの Fig.6では左が位相進み、右が位相遅れと、状態に矛盾がなかった。しかし同7,8では、左右どちらにも位相進みの目標が与えられており、矛盾となっている。

ちなみに2エージェントでそのような矛盾を設定した場合、Fig.9に示されるようにどちらも目標を達成しようとした結果、振動周期が際限なく短縮されて破綻をきたしている(250秒以降の位相差が見かけ上ゼロなのは、 ω の身体モデルリミッターに引っかかって双方とも値が頭打ちになっているため

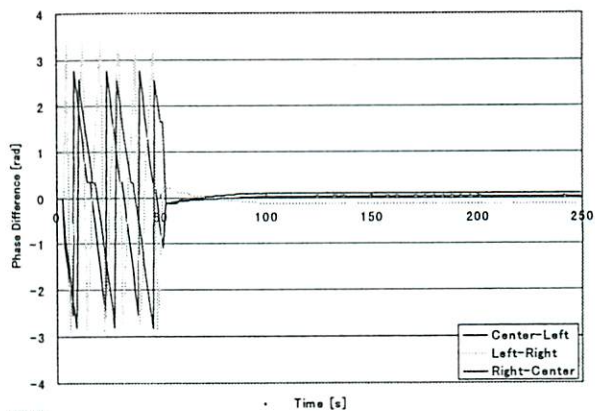


Fig.7a

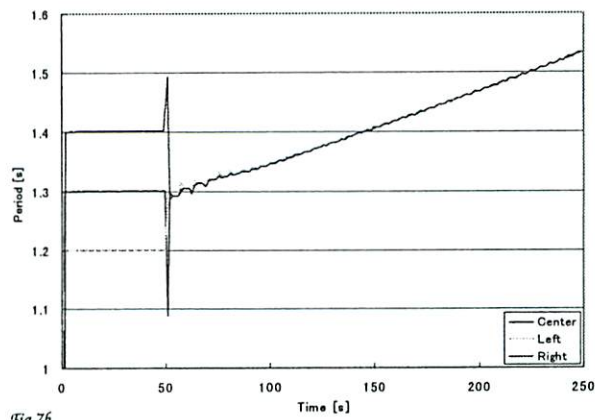


Fig.7b

Fig.7 Temporal Development of Mutual Adaptation (Three Agents / Conflicted Target)

である)。

今回の3エージェント系では、Fig.7aに見られるように破綻するケースと、同8aにみられるように破綻しないケースとがある。その違いは、内部モデルが想定する自他身体モデルの変動しやすさ((7),(8),(9)式における α , β)にある。Fig.7では、それらがどれも同じ値をとっている。他方、Fig.8ではそれらがゼロでない適切な値を得ることにより、破綻が回避されているのである。

実際の身体系はどれも等しい結合強度を与えられているため、一方から他方へのみ作用が強いということはない。しかしエージェントによって系の解釈、とくに結合強度の想定が異なるということが、矛盾目標による系の破綻を防ぎ得ている。

4. 結言

今回は、内部モデルが現実のエージェントのもつ関係をすべて含んでいた従前の2エージェント系から、観測の局所性をくわえた3エージェント系へと拡張した。エージェントの身体モデルは3体とも結

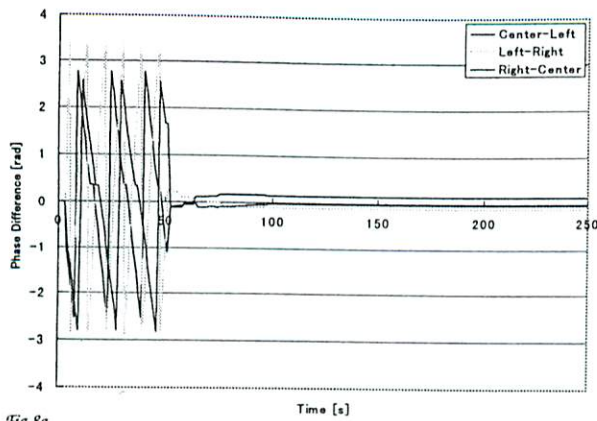


Fig.8a

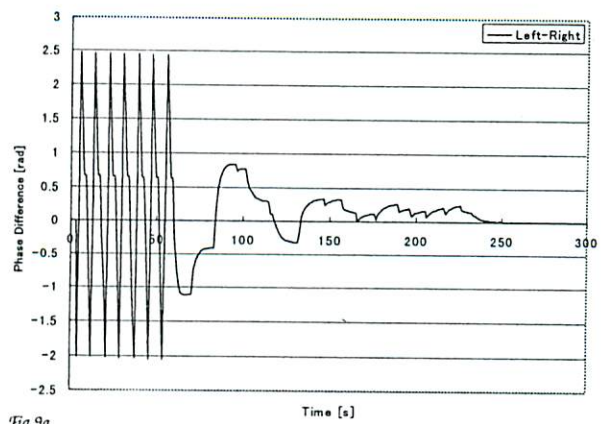


Fig.9a

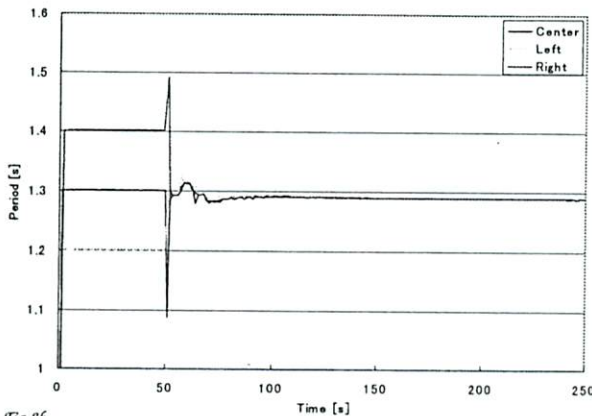


Fig.8b

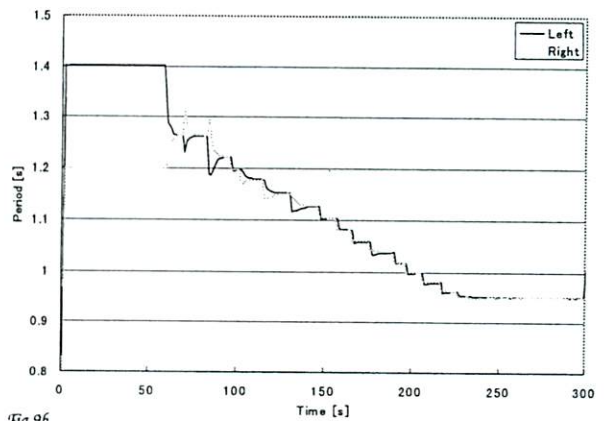


Fig.9b

Fig.8 Temporal Development of Mutual Adaptation
(Three Agents / Conflicted Target)

Fig.9 Temporal Development of Mutual Adaptation
(Two Agents / Conflicted Target)

合している（相互作用している）が、内部モデルは直接観測可能な自他エージェント間の関係のみを扱っており、直列3体結合となっている。そうした場合においても、これまで同様に適切な協調がおこなわれていることをまず確認できた。

また3エージェント系において、2エージェントでは不可避であった矛盾目標による破綻を、回避することが可能となった。ひとつには系を構成するエージェントが増えて自由度が向上したことによると考えられるが、それだけではやはり破綻を避けられない。各々のエージェントが各々の相互作用に異なった解釈を与えることにより、はじめて矛盾を含みながらも抑えこめる可能性が生まれているのである。

今後はまず第一に、現在は同値で固定されている身体モデル間の結合強度がことなる場合や、一部の内部モデルが2つしかエージェントを想定できていない場合など、よりひろい局面で情報の不完全性をあたえた時の挙動をみる必要がある。すでに先行して知見の得られている2エージェント系と同様に、

これらの新しい3エージェント系でも、摂動をくわえたときの挙動や安定領域の解析などを進める予定でいる。

さらに先の展望としては、3体のみであるエージェントをn体を増やす、いわば空間的拡張が考えられる。また、現段階の適応にくわえて履歴性を持たせ学習を行わせるという、いわば時間的拡張も検討中である。

5. 参考文献

- [1] 宮川, 三宅: 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回自律分散システムシンポジウム資料(1998).
- [2] 蔵本, 川崎, 山田, 甲斐, 篠本: パターン形成; 朝倉書房(1991).
- [3] 田村, 三宅: 相互適応的な歩行介助システム; 第10回自律分散システムシンポジウム資料(1998).