

# “人間 - 機械 - 人間系”における相互補償にもとづく コミュニケーション支援

## Mutual Compensation based Communication Support Agent in "Man-Machine-Man System"

○ 小松知章, 三宅美博  
(東京工業大学)

○Tomoaki KOMATSU, Yoshihiro MIYAKE  
Tokyo Institute of Technology

**Abstract:** We have already propose the mutual adaptive system which support man-machine co-operation. In this paper, we extend the framework toward the condition with incomplete information in "man-machine-man system". We construct a three agents model equivalent to two humans and one support system. The support-agent which is based on mutual compensation supports to the communication between two humans. In our model, agent which has incomplete information toward other's condition can perform a co-operative working. Computer simulations of coupled agents showed effectiveness of our proposed system.

### 1. 緒言

実世界において、人工物は人間と複雑に結合し作用しているが、その顕在化指向で大別すると、2つに分けられる。人間のタスクのパートナーとして表に出てくる方向性と、人間同士のコミュニケーションを形成するメディアとして裏方へまわる方向性である。本研究では後者、人間同士のコミュニケーションを人工物が介助・仲介する、いわば“人間-機械-人間系”に注目した。

これはモデルとしては人間2人と人工物という3エージェント系に対応し、身近なところでは電話・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がその範疇にふくまれる。この場合、3体は実質的に直列結合であり、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。また全結合3体系ならば、協調作業支援ツールあるいはある種のアミューズメント施設などが考えられよう。

3体は相互に作用しあっており、人工物はその間の関係を手がかりに、自身の状態を変位させて人間の関係を支援する。たとえば2人の人間が協調状態に達し得ていないとき、人工物はその関係にたいして相互補償的に介入することにより、望ましい状態を人間・人工物双方が歩み寄るかたちで形成することができれば、介入プロセスによる益が得られたと考える。

また、これまではユーザであるはずの人間が人工物の方法論にあわせて使用するか、あるいは人工物が一方的に人間へ追従するのが一般的であった。前者はユーザに苦渋を強い、後者は理論的にはどうあれ問題空間が爆発的拡大をすることで実装ささまざまな実現困難性を招いてしまう。それらについても、人工物がユーザと相互作用を前提として補償的に動作することで、解消がはかれるのではない

かと期待できる。

ここで相互作用と書いたが、多くの人工システムはユーザと相互に影響・干渉しあうこと(Fig.1)を前提としていなかった。従来の閉ループ制御では被制御器(エージェント)と環境とは明確に分離されており、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ユーザが含まれており、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。

このような相互干渉に起因する問題を回避する方法が、無いわけではない。エージェントに人間を含まない多体系ならば、系をすべて観測できる視点に制御器を設け、そこから全エージェントを一括制御してやれば、ある程度までなら解消できなくはない。しかし人間を集中制御の皿にのせることは不可能である。

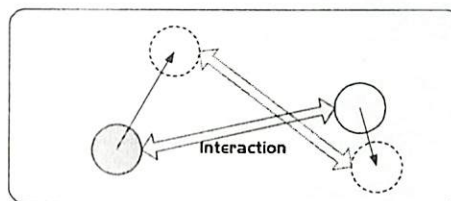


Fig.1 Mutual Interference

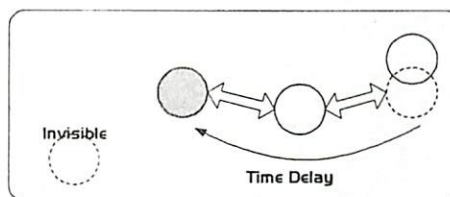


Fig.2 Local Observation

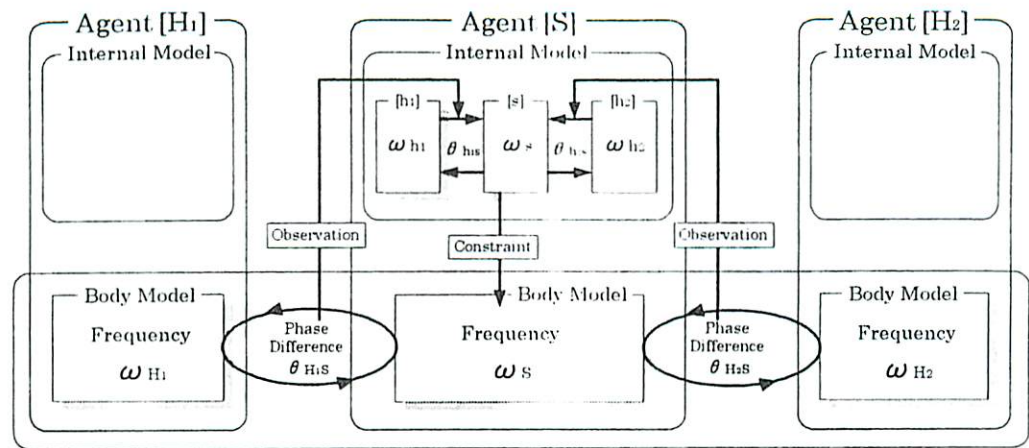


Fig.4 Mutual Compensation System (on Agent "S")

さらに、観測の局所性も問題の一つである。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 (Fig.2) という事だ。

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、人間を含む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が、エージェント毎に異なりうる。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違ってしまう (Fig.3) ののである。

我々はそれらの問題のうち、これまでとくに相互干渉性に注目し [1]、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 [2]。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相手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——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。

この内部モデルを組み込んだことにより相互補償的に動作することを期待されたシステムについては、これまで“人間・機械系”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。 [3]

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、歩行リズムに揺らぎや偏りのある実際の人間と柔軟かつ相互補償的に対処し、歩行リズムを誘導可能であることが、これまで検証されてきた [4]。

これらエージェントは、相互の関係性の指標・体現としてリズムの相互引き込みをもちい、相手にあたえる影響を近似的に考慮したうえで自身ののぞましい状態を導き出すという、相互干渉を考慮した枠組みをもっている。

この、相互干渉を前提として人間と相互補償的に協調できる枠組みを、今回の人間・機械・人間系にも持ち込んだ。系の構成エージェントが2から3へと増えることにより自由度が向上するが、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点、新たな困難さとなる。これはとりもなおさず、前述の局所観測性をふくんだ不完全情報に相当する問題である。

そういった3エージェント系 (Fig.4) のモデルは、実機 (および実際の人間) をもちいたそれらコミュニケーション支援ツール実現の前段階として、構築・解析を行った。たしかに実際の応用局面としては、2体のように歩行介助といったことは考えにくい。しかしこれまで歩行であったリズムを、別の身体運動テンポや音の高低 (周波数) へとおきかえてみれば、それらは前述のとおり協調作業支援ツールや、もっと近いスパンでみればマルチメディア・アミューズメント方面への利用が期待できるであろう。

## 2. エージェント系の概略

### 2.1 身体モデルと内部モデル

現時点では人間・機械系のころと同様、身体はリズムをもちいて表現しており、今回のモデルでも3体 (2人と1

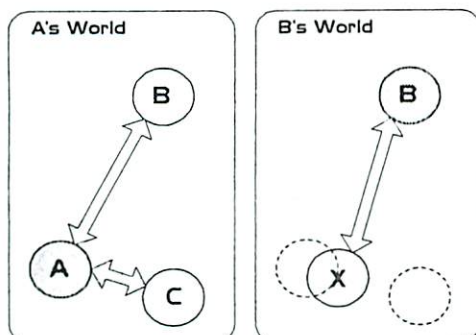


Fig.3 Difference of World Model



体) がリズムで関係を形成している。

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調するというタスクを設定した。3体（人工システムを仲介とした人間同士）が協調歩行するというのは、たしかに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2体系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.5に示したとおり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S・H<sub>1</sub>・H<sub>2</sub>と呼ぶことにする。Sが協調支援システム、Hが人間である。

個々のエージェントが得られる情報は身体モデル間の脚の着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 [5] ——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。これはCPGの現象論的代替であり、歩行運動のリズムパルスを比較的良好に記述できることが知られている。

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S・H<sub>1</sub>・H<sub>2</sub>に相当する。 $\chi$ の符号が正から負へ変化する時点を各身体モデルの着地パルスとみなし、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

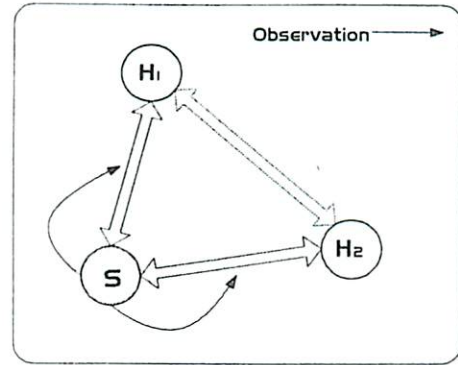


Fig.5 Three Agents System

つある)。 $\omega$ 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。

$$\dot{\chi}_S - \xi_S(1 - \chi_S^2)\dot{\chi}_S + \omega_S^2\chi_S = \varepsilon_{HS}(\dot{\chi}_H - \dot{\chi}_S) + \varepsilon_{HS}(\dot{\chi}_H - \dot{\chi}_S) \quad (1)$$

$$\dot{\chi}_{H1} - \xi_{H1}(1 - \chi_{H1}^2)\dot{\chi}_{H1} + \omega_{H1}^2\chi_{H1} = \varepsilon_{SH}(\dot{\chi}_S - \dot{\chi}_{H1}) + \varepsilon_{H2H1}(\dot{\chi}_{H2} - \dot{\chi}_{H1}) \quad (2)$$

$$\dot{\chi}_{H2} - \xi_{H2}(1 - \chi_{H2}^2)\dot{\chi}_{H2} + \omega_{H2}^2\chi_{H2} = \varepsilon_{SH}(\dot{\chi}_S - \dot{\chi}_{H2}) + \varepsilon_{H1H2}(\dot{\chi}_{H1} - \dot{\chi}_{H2}) \quad (3)$$

そして身体モデルより次元の落ちた記述——不完全情報を制約とする内部モデルが、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。 $\phi$ は位相、 $\omega$ は内部モデルが想定する自他個々の振動数、 $\varepsilon$ は結合強度である。

内部モデルが観測できるのは、自他間の位相差のみであるため、他者間の関係についてはなにも得る手段を持たない(Fig.5)。よって内部モデルにおける系の描像は、直列3体ということになる。

$$\dot{\phi}_S = \omega_S + \varepsilon_{H1S}\sin(\phi_{H1} - \phi_S) + \varepsilon_{H2S}\sin(\phi_{H2} - \phi_S) \quad (4)$$

$$\dot{\phi}_{H1} = \omega_{H1} + \varepsilon_{SH1}\sin(\phi_S - \phi_{H1}) \quad (5)$$

$$\dot{\phi}_{H2} = \omega_{H2} + \varepsilon_{SH2}\sin(\phi_S - \phi_{H2}) \quad (6)$$

## 2.2 内部モデルの稼働プロセス

実際の内部モデルは、Table1にしめ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 ( $2\pi$ 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 $\omega$ 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

(a) 自身の身体と相手の身体との関係を反映している、歩行の着地リズム位相差 ( $\theta_{body}$ ) 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 ( $\omega_s$ ) 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 ( $\omega_o$ ) を割り出す (≒相手の内部状態の推定)。
(c) $\omega_o$ を固定し、内部モデルの位相差 ( $\theta_{inter}$ ) をモデルにおけるタスク達成目標値 ( $\theta_d$ ) にするような $\omega_s$ を導出する (≒自身の望ましい状態の予測)。
(d) 自身の身体モデルの振動数 ( $\omega_s$ ) は、内部モデルが得た振動数 $\omega_o$ に合わせられる (≒内部モデルによる身体系の拘束)。

Table1 Process of Internal Model

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。

ただし切り分けてしまった時点で、ここでいう推定が正しいものである保証はなくなってしまう。そのため、身体モデルに反映して実地に確かめるのである。

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エージェント(S)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( $\theta_{\text{body}} = \theta_{\text{H1S}}, \theta_{\text{H2S}}$ )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 $\omega$ の更新式を導出するわけだが、(b)では自身 $\omega_s$ および $\omega_{h1}$ の時間変化がゼロとみなされて(7)式、おなじく $\omega_s$ および $\omega_{h2}$ の時間変化がゼロとみなされて(8)式が、(c)では相手 $\omega_{h1}, \omega_{h2}$ が $\omega_s$ の時間変化がゼロとみなされて(9)式が導出される。

$$\dot{\omega}_s = -\kappa\alpha_n \sqrt{9\epsilon_n^2 - (2\omega_n - \omega_i - \omega_{h1})^2} \sin(\sin^{-1}(\frac{2\omega_n - \omega_i - \omega_{h1}}{3\epsilon_n}) - \theta_{H1S}) \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_s = -\kappa\alpha_n \sqrt{9\epsilon_n^2 - (2\omega_n - \omega_i - \omega_{h2})^2} \sin(\sin^{-1}(\frac{2\omega_n - \omega_i - \omega_{h2}}{3\epsilon_n}) - \theta_{H2S}) \quad (8)$$

ポテンシャルの勾配をきめている $\alpha$ (および $1-\alpha$ )は、それぞれ内部モデルが想定する相手の変動しやすさ、自分の変動しやすさに相当する。従前は独立の変数であったが、注意の配分ということを簡易に実装するため、この形式に変更している。

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。

$$\dot{\omega}_i = \kappa(1-\alpha_n) \sqrt{9\epsilon_n^2 - (2\omega_n - \omega_i - \omega_{h1})^2} \sin(\sin^{-1}(\frac{2\omega_n - \omega_i - \omega_{h1}}{3\epsilon_n}) - \theta_{H1S}) + \kappa(1-\alpha_n) \sqrt{9\epsilon_n^2 - (2\omega_n - \omega_i - \omega_{h2})^2} \sin(\sin^{-1}(\frac{2\omega_n - \omega_i - \omega_{h2}}{3\epsilon_n}) - \theta_{H2S}) \quad (9)$$

### 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が身体モデルの振動周期である。Fig.6のみ、c,dはそれぞれが順に協調支援システム(S)・人間(H<sub>1</sub>)の各エージェントへ搭載された内部モデルが推定している、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異なり、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体系同様、目標とする身体モデル

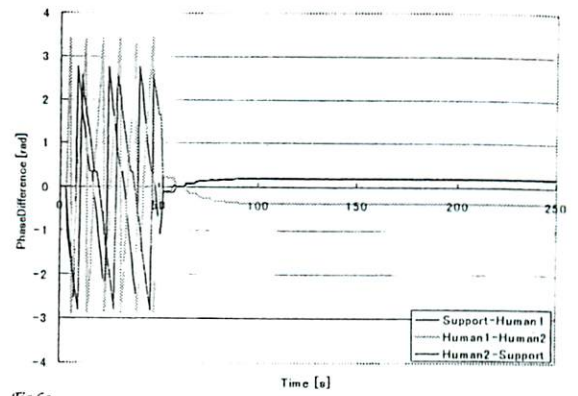


Fig.6a

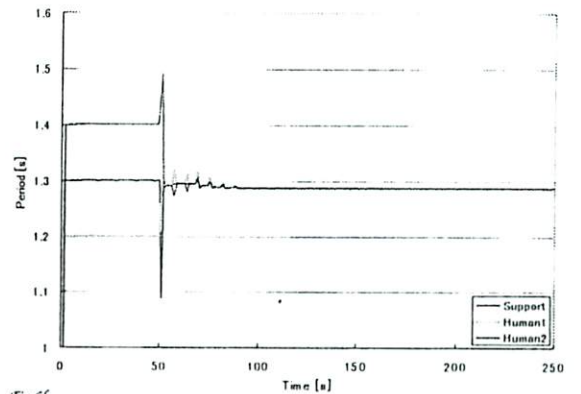


Fig.6b

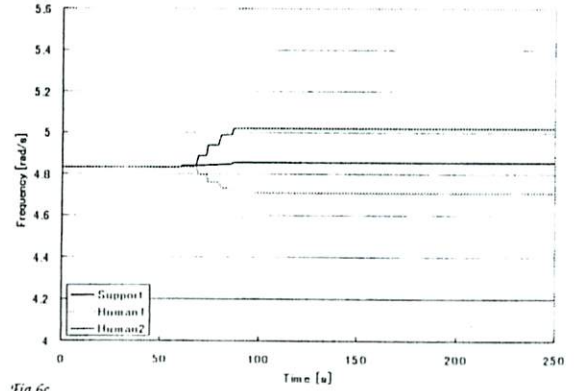


Fig.6c

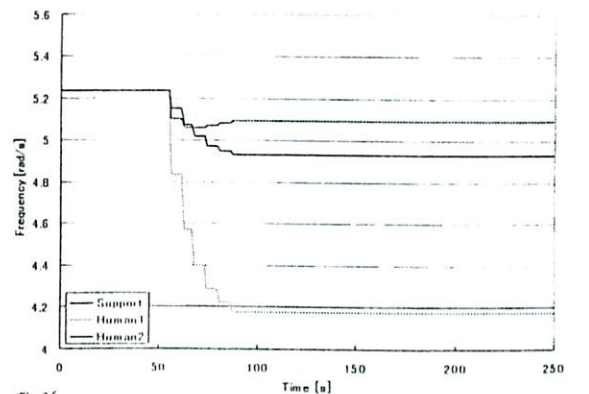


Fig.6d

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



着地リズムの位相差を達成できた。この場合、 $H_1$ から $S$ へ、 $S$ から $H_2$ へと0.2ずつの位相差を実現させている。

そして目標位相差が達成されている状態(同一周期)であるにも関わらず前頁 Fig.6c,6dを見ると、それぞれが個々のエージェントの身体モデルの $\omega$ 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、2人の人間( $H_1, H_2$ )に矛盾した目標を与えてのシミュレーションも行った。さきのFig.6に示したトライアルでは人間( $H_1$ )が位相進み、同( $H_2$ )が位相遅れと、目標に矛盾がなかった。しかしFig.7,8では、2人のどちらにも「相手に対して位相進み」の目標を与えられており、解消不可能な矛盾となっている。

ちなみに2エージェントでそのような状況を設定した場合、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くなってしまい破綻をきたしている。

今回の3エージェント系では、Fig.7bに見られるように破綻するケースと、Fig.8b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 $\alpha$ )にある。Fig.7では、それらがどれも同じ値(0.5)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——3体系で得られた新たな自由度にたいする十分な拘束条件——を得られたため、破綻が回避されているのである。2体系では自由度が不足しているため、相互の関係を無視する以外に回避手段はない。

実際の身体同士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。

今回のケースでは、人間を想定している2つのエージェントの内部モデルが、振動数変化においてお互い同士によりつよく影響されあうという条件設定を行っている。支援システムには相対的に注意を割いていないということで、その場合でも協調支援エージェントが適切な動作をおこなうことにより、十分に系の破綻を防ぐことができた。

また、人間の内部状態が大きく変化しても、支援エージェントはどちらの人間によりセンシティブに反応するか遷移するだけで、簡単に系の破綻を回避している。

これら2点も、今後の応用を考えた場合——むろん最終的には人間をまじえた実機モデルにはからねばなるまいが——まず有望な結果といえるだろう。

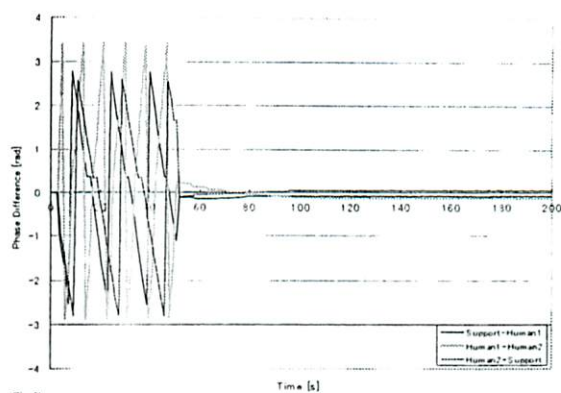


Fig.7a

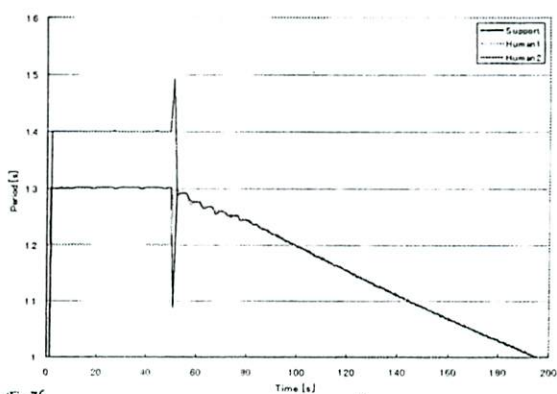


Fig.7b

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

#### 4. 結言

本研究では人間2人と人工システムという3体系のインタフェース問題へとアプローチした。すなわち人間2人のリズムコミュニケーションを協調支援システムが仲介・誘導する“人間・機械・人間系”である。これまでに2エージェント系、つまり“人間・機械系”において得られた成果をふまえて3エージェント系のインタフェース問題へと拡張した。

しかし3体系を扱う場合、エージェントの視点から直接観測できない関係が成立してしまうということが、問題と考えられていた。エージェントの身体モデルは3体とも結合している(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、人間同士(2エージェント系)が矛盾した目標設定をかかえて協調できない場合でも、それを支援システム(3体目のエージェント)が相互補償することで、これまで不可避であった破綻を回避することが可能となった。ひ

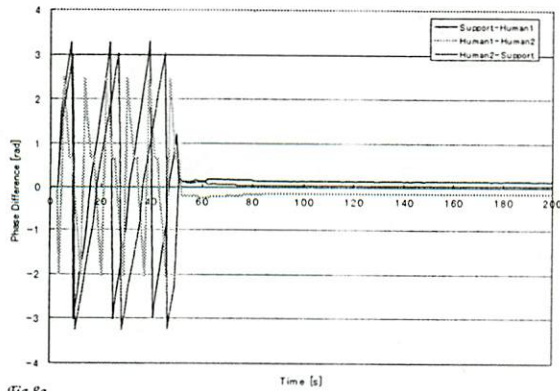


Fig.8a

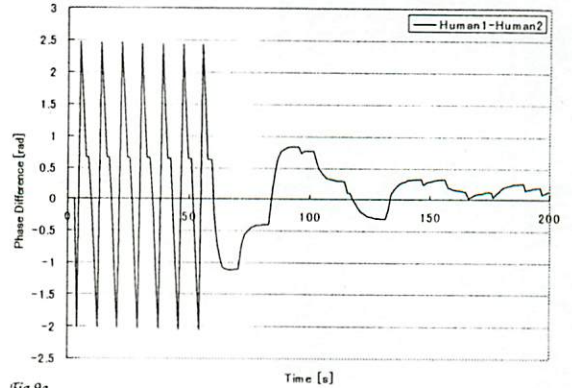


Fig.9a

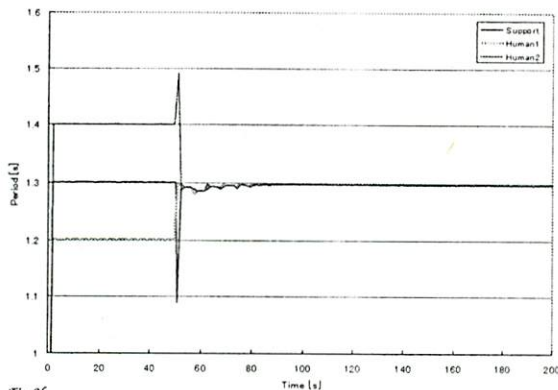


Fig.8b

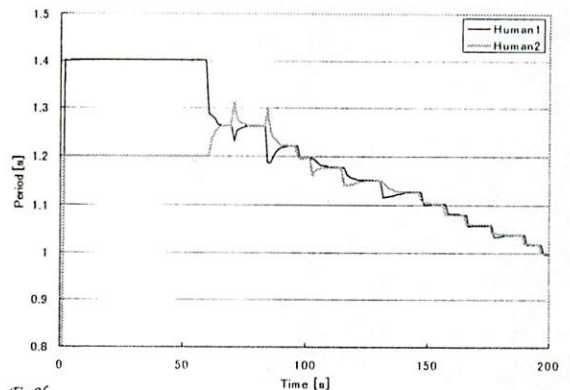


Fig.9b

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

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

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ていない。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。

さらに実機応用を考えた場合、ユーザが人間同士と比較してあまり支援システムに注意をはらっていても充分に関係を調整できる可能性が示唆されている。また人間の多様な内部状態にたいして、わずかな自己変化で相互に補償しあえる可能性も見えてきた。

この先の展望としては、内部モデルの拡張により、対処できる状況をふやすことを検討している。リズムとは異なる関係性指標をもちいて動作するものへと拡張させてゆることが考えられ、これは一気に人間-機械-人間系の応用局面をひろげるものと期待される。

しかしまあ現時点では、まず現在同値で固定されている身体モデル間の結合強度が異なる場合や、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、よりエージェントの獲得できる情報がかざられた状況下で系の挙動を解析する必要がある。また、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、安定性の解析などを進める予定である。

## 5. 参考文献

- [1] 三宅: 「2中心モデル」とインターフェース表現; 日本ファジィ学会誌 Vol.9, No.5, pp.639-647 (1997).
- [2] 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 (1998).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 蔵本, 川崎, 山田, 甲斐, 篠本: パターン形成; 朝倉書房 (1991).