

7.8図 運転情報との関連づけ

の時系列との関係が明示的になり、意味の付加された運転情報を得ることができる。運転情報は、ここではプロセスコンピュータや、分散制御システムから得られるプロセス変数データ（トレンドデータ）と、操作やアラームの履歴が記録されたログ（ヒストリカルメッセージ）を用い、7.8図に示すように、この運転情報に上記操作知識のうちの定性因果モデルに基づいて生成した操作を関連づける。この関連づけは、J. T.-Y. Cheung らが提唱するプロセストレンドの表現法 Triangular Representation⁽⁴⁾⁽⁵⁾に基づいたプロセス変数認識システム SIMPLE⁽⁶⁾を用いて、トレンドデータからオペレータが実際に行った操作を抽出し、これと定性因果モデルに基づいて生成した操作列を関連づけることによって実現する。

7.3 人間と人工システムの相互適応インタフェース^{(7)~(16)}

シナジェティクスという観点からみたとき、ヒューマン・インタフェース技術における最も興味深い問題は、人間と人工システムの相互作用（インタラクション）にあるように思われる。通常の意味でのサイバネティクスに基づく設計論の範囲では、この双方向の作用関係の問題は陽には扱われてこなかった。むしろ、線形化によって相互作用そのものを捨象したり、断熱化によって一方向作用のみで近似することが広く行われてきた。しかし、そのような設計論に基づく人工システムがどのような社会的弊害をもたらすかについて、今さら説明の必要はないであろう。ハイテク機の墜落という不幸な事態を迎えるまでもなく、身近な家電製品から計算機ネットワーク、さらに、社会

システムにいたるまで類似した構造はきわめて普遍的に観察される。そこで、本節では、従来型の設計論において無批判に用いられてきた人間と人工システムの相互作用の捨象という考え方を問題にする。そして、その問題に対処するうえで、相互作用を指向する技術への期待と可能性についてコメントしたい。具体的には、人間と協調しながら人間の歩行運動を支援する介助ロボットの構築に関する具体例を踏まえて説明する。

7.3.1 はじめに

上述したように、本節では、ヒューマン・インタフェースにおける人間と人工システムの相互作用の問題を取り上げる。ただし、いわゆる表層的な意味でのインタフェースに限定するのではなく、むしろ、「機能」というものを人間と人工システムの「関係」としてとらえ直すことを前提とした、広い意味でのインタフェースとして問題設定を行う。その意味で、本節において提案されることは、人工システム的设计論の変更ということになり、サイバネティクス以来、広く用いられてきた設計論の前提条件を吟味し直すことから始めることになる。その切り口が「相互作用」の問題を再考することである。しかし、相互作用という状況は別段に新しいことではない。むしろ、われわれが日常生活において体験するきわめて普通なことのはずである。その意味では、人工システム的设计における現状が人間の生活から遊離しつつあるという方が適切な表現になるだろう。そして、インタフェースにおける相互作用がなぜ捨象されなければならないのか、そこから考えてみよう。

一言でいえば、これまでの設計論を支えてきたシステム論においては、最適化原理が前提になっていたように思われる。しかし、この考え方が適用できるためには、システムの境界が固定されなければならない。つまり、システムとその周りとの相互作用が残されているのは、この前提が成立しないのである。そこで、人工システム的设计を考える場合には、人工システムだけで閉じた系を構成するか、あるいは、人間の行動を限定することによって近似的に閉じるか、いずれかの方法がとられることになる。おそらく、このような近似で

十分だとは誰も考えていないと思われるが、結果的には、相互作用を包含可能な理論的な枠組みが欠如していたこともあり、積極的な解決方法がみつからなかったのであろう。その意味で、シナジェティクスのように、相互作用を積極的に扱おうとする理論的枠組みが注目され始めたということは必然的な流れであるように思われる。シナジェティクスそのものは物理学者であるハーケンの研究に由来し、それ自体としては、まだまだ多くの問題を残している。しかし、この延長上に、相互作用を指向するシステム論における、理論的枠組みがさらに整備されることと、それに基づく人工システムと人間の関係の設計論が提案されることが続くとすれば、これはきわめて重要な研究上の流れということになるであろう。

7.3.2 相互的であること

相互作用を包含するということは、どのような困難を生じさせるのであろうか。それは、システムの境界を前もって固定できないということであり、システムにとって生じうる状態の範囲をあらかじめ限定できないということである。ただし、従来のシステム論のなかでもノイズは扱われているが、ここで問題にすることは、それよりも大きい作用量的である。そうであるとすれば、システムにとって予測できない状況に対応することが不可欠になり、そこではリアルタイムに情報を生成できる能力が必要になる。このようなことは原理的には人間しかできないのかもしれないが、擬似的にでも人工システムにおいて実現できればきわめて有効なインタフェースを構成可能であろう。

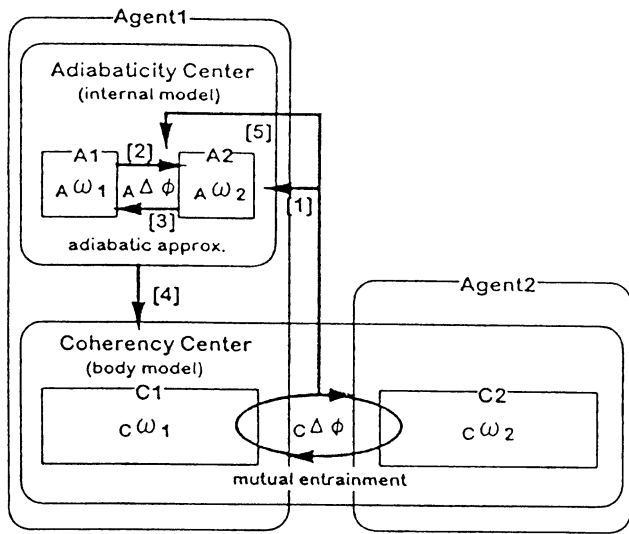
そこで、以下に、このような問題を取り扱ううえでの枠組みとして、エージェント間相互作用における内的観測という状況をモデル化する。ただし、ここでいう「内的」とは限定された意味で用いられており、エージェントが、そのエージェント自身を一部分として含む相互作用の内側から観測するという状況を想定している。このような場合、エージェントの観測はそのエージェントにとっての環境であるほかのエージェントとの相互作用に基づいて必然的に相互干渉しあうことになる。そして、それらのダイナミクスの非分離性に起因して、個々のエージェントにとっての情報の

不完全性が避けられなくなる。そして、この問題に対しては、最適性や確率性に基づくアプローチにも限界があり、有効な理論的枠組みがないというのが現状である。そこで本節では、相互干渉を排除するのではなく積極的に利用することを想定した内的観測プロセスのモデル化を紹介する。具体的には、相互作用の内側から相互干渉を共時的関係としてとらえる視点と、それを因果的關係に分解する視点の相互拘束を通して、エージェント間相互作用を相補的かつ生成的にとらえる枠組みとして構成される。さらに、それを相互適応インタフェースとして表現しその有効性が検討される。

7.3.3 内的観測とそのモデル化

エージェントにとって観測とはどのような形式であろうか？ 普通は観測される環境を静的とみなし、それを制約としてエージェントが環境モデルの最適化を行うことになる。これはポテンシャルをあらかじめ固定し、その中で極小点へ向かって状態の探索を進めることに対応する。これは、エージェントと環境のダイナミクスの時間スケールが分離可能であり、環境を静的と近似できる場合に有効である。ここでは、そのような制約をはずし、エージェントと環境の時間スケールが近く相互干渉する場合にも観測を拡張することを目指している。これは状態の変化がポテンシャルの形成を変化させてしまうことに対応し、実質的にポテンシャルが存在しないことに等しい。つまり、内的観測という状況は、エージェントにとって観測可能なものが、対象化された静的環境ではなく、エージェント自身との動的な共時的関係そのものでしかないということによって特徴づけられる。そのため、エージェントはその関係を環境とエージェントに擬似的に分離し、それらの因果的關係を事後的に生成しなければならない。したがって、環境同定という枠組みは、ここでは前提できず、むしろ、共時的関係から因果的關係が逆構成され続ける生成プロセスとして観測プロセスはとらえなければならない。

内的観測モデルにおいて、エージェントは二つの異なる視点をもつ。一つは、エージェントと環境のダイナミクスの時間スケールが比較的近いと



1. Get coherent phase difference $c\Delta\phi$.
2. Search $A\omega_2$ such as $\min(c\Delta\phi - A\Delta\phi)$ under the fixed $A\omega_1$.
3. Search $A\omega_1$ such as $\min(d\Delta\phi - A\Delta\phi)$ under the fixed $A\omega_2$.
4. Change $c\omega_1$ corresponding to $A\omega_1$.
5. Modify the internal model based on $E=(c\Delta\phi - A\Delta\phi)^2$.
6. Back to 1.

7.9図 内的観測モデル

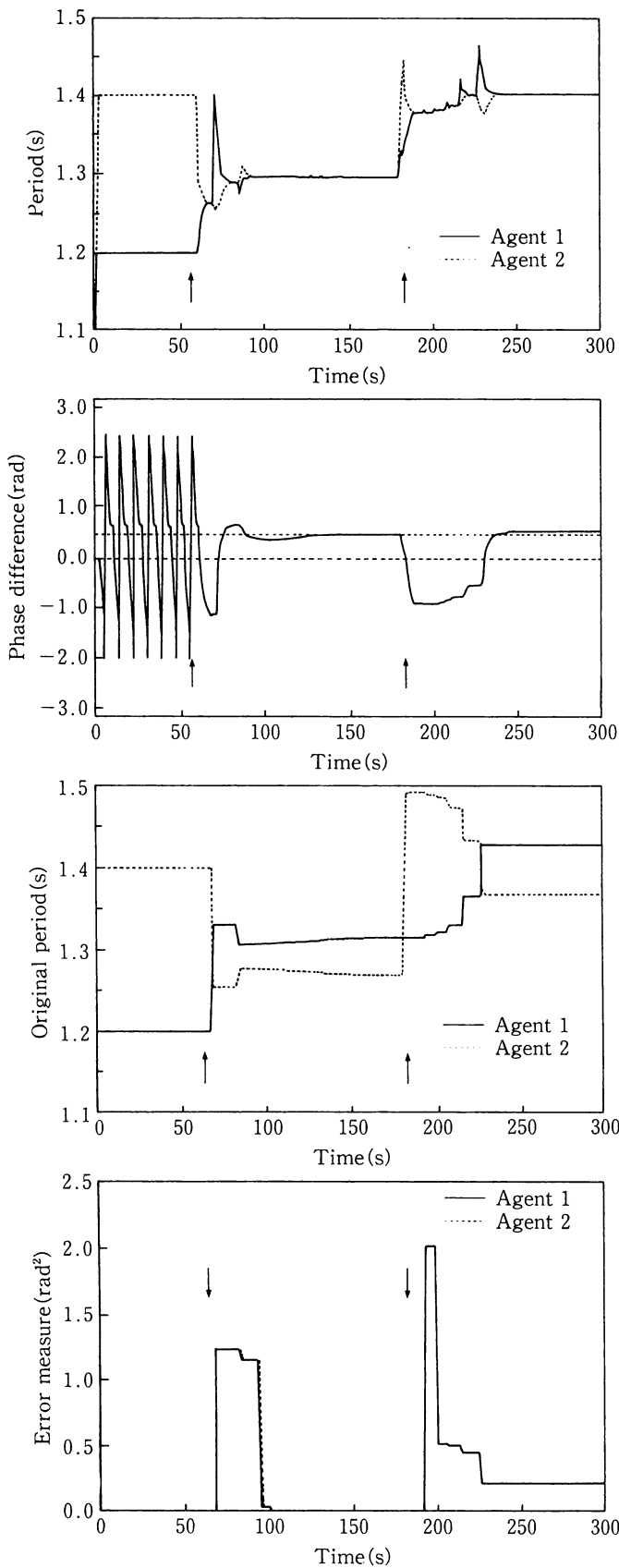
考え、相互干渉を共時性に基づく関係そのものとしてとらえる視点である。もう一方は、その関係に基づいて、エージェントと環境の分離をエージェント内部で行う視点である。これは両者の時間スケールが大きく異なると考え、断熱性に基づいて相互干渉を分解して因果関係としてとらえることである。そして、これら二つの視点の間での相互拘束プロセスを通して、相互干渉を相補的に扱う理論的枠組みが構成される(7.9図)。このとき、まず共時性の領域においてコヒーレントな関係が生成され、それが断熱性の領域において擬似的に分解される。当然、これは一種の逆問題であり、そこにはなんらかの先行的な知識としての内部モデルが必要とされる。このとき、内部モデルはエージェントと環境に対応する二つの部分系から構成され、エージェント側の部分系の状態を断熱的に定常状態におき環境側の状態を予測する。このときコヒーレントな関係を制約として用いる。次に、環境側に対応する部分系の状態を断熱的に定常状態におき、与えられた目標を制約としてエージェント側の状態を予測する。その結果を共時性の領域に戻し再びコヒーレントな関係を生成する。そして、予測との差に基づいて内部モデル

が更新され最初に戻る。具体的には、結合振動子系における相互引込みを用いて共時性を表現し、それに対応する内部モデルで断熱近似を用いることで因果性を表現する。

7.3.4 相互適応インタフェース

このような内的観測という状況は決して特殊なものではなく、マルチエージェントをはじめ、群ロボットと、ヒューマンインタフェースなどきわめて広範にみられる状況である。本節では、最初に説明した背景から、ヒューマンインタフェース、特にロボットと人間のインタフェース領域における内的観測のモデル化の試みを紹介する。このとき、エージェントは身体系と内部モデルから構成され、それぞれ共時性の領域と断熱性の領域に対応すると仮定している。そのうえで、人間とエージェントが歩調をあわせて歩く協調歩調、つまり、同一周期で一定位相差で歩行することを最初の課題とする。これは人間が並んで歩くときに足音などを通して無意識に歩調が干渉しあう現象を踏まえている。

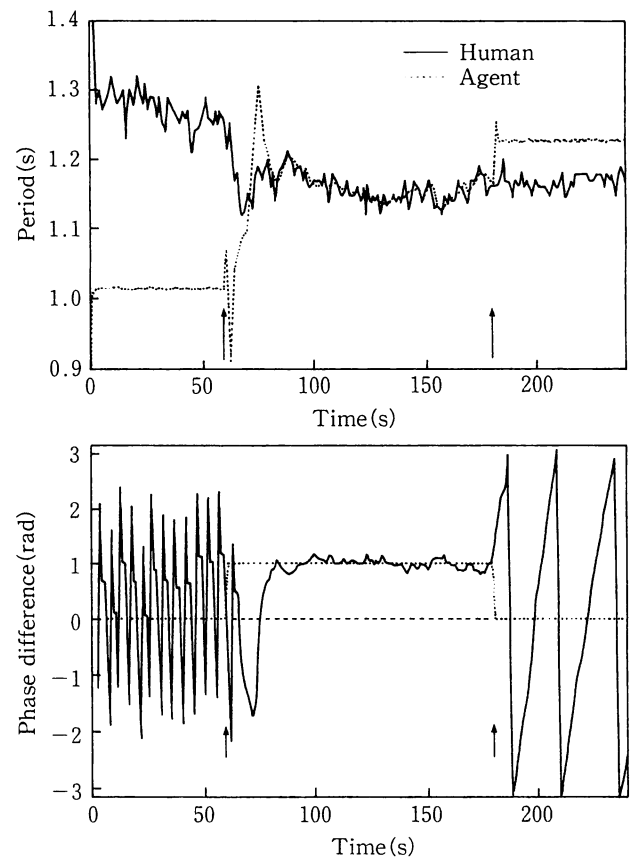
(1) 相互分化と相互補償 (二つのエージェントの場合) まず、二つのロボットエージェント間における内的観測プロセスのシミュレーション結果を示す(7.10図)。エージェントの身体系としては歩行運動に対応した非線形振動を用いてモデル化し、さらに上記の内部モデルももたせている。そのとき、以下のような時間発展が観察される。まず、二つのエージェント間で最初異なっていた身体系の歩行の周期が、相互作用を開始(矢印左)することで相互に接近し一致する。これは身体系の非線形振動の相互引込みを通して生じているもので、周期の一致と対応してコヒーレントな位相関係も生成する。次に、それに基づいて内部モデルが作動し、与えられた目標位相差を実現できるような固有周期が予測され、それに基づいて身体系の固有周期が変更される。これに伴い位相的コヒーレント状態が崩壊し新たなコヒーレント状態へ遷移する。このような身体系と内部モデルの間での相互拘束を何回か経て、二つのエージェントの身体系の固有周期が相互に分化し、両者間での位相関係が収束する。上から順に、見掛けの周期、位相差、固有周期、誤差測度を表している。



7.10図 ロボットエージェント間の相互適応

矢印左のところが相互作用の開始に対応する。矢印右が、エージェント2の固有周期を一過的に増加させた時刻である。目標位相差が $+0.5\text{rad}$ の場合を示したが、ほかの場合も同様の結果が得られる。また、このプロセスでは内部モデルも更新されており、それに伴って予測誤差も徐々に減少している。このように、エージェントの内的観測プロセスの結果として、エージェント間でのリアルタイムの相互分化を伴った相互適応プロセスが実現される。さらに、一方のエージェントの固有周期を一過的に変動させると(矢印右)、上記と同様の内的観測プロセスを経て両エージェントの固有周期が再び相互に分化し、位相的コヒーレント状態が遷移し、目標位相差が再び実現する。このように内的観測に基づく相互分化はリアルタイムの相互補償性をもつこともわかる。

(2) 相互分化と相互補償 (人間とエージェントの場合) 次に、一方のロボットエージェントに実際に人間をあてはめた場合を示す。具体的には、エージェントの歩行に伴う足の接地音を合成



7.11図 人間とエージェントの相互適応

し人間に聞かせ、人間の歩行に伴う足の接地を検出してエージェントに送ることでヒューマンインタフェースを実現している。その結果、この場合も相互作用の開始(矢印左)とともに両者の相互適応プロセスが観察される(7.11図)。途中で相互作用を切ると(矢印右), 両者の身体系の固有周期が目標位相差に応じて相互分化していることも確認できる。このことは、人間がエージェントに、あるいは、エージェントが人間に一方的にあわせるのではなく、相互適応によってリアルタイムに相互分化し相互補償する生成的ヒューマンインタフェースの実現可能性を示している。さらに、人間も本モデルと類似の内的観測プロセスを内在させることを強く示唆している。

参 考 文 献

- (1) J. Rasmussen: "Skills, Rules, and Knowledge; Signals Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models", IEEE Trans. Syst., Man Cybern., SMC-13, No.3 (1983)
- (2) J. Rasmussen: "Information Processing and Human-Machine Interaction—An Approach to Cognitive Engineering—", Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1986; 邦訳: J. ラスムッセン著, 海保・加藤・赤井・田辺訳: 「インタフェースの認知工学—人と機械の知的かかわり方の科学」, 啓学出版 (1990)
- (3) 古濱・古田・近藤: 「プラント操作員訓練システムのためのメンタルモデル表現」, 第20回教育システム情報学会全国大会論文集, 495 (1995)
- (4) G. Stephanopoulos: "Towards the Intelligent Controller—Formal Integration of Pattern Recognition with Control Theory", Proc. of the 4th International Conference on Chemical Process Control, 615 (1991)
- (5) J. T.-Y. Cheung, G. Stephanopoulos: "Representation of Process Trends PART I / II", Comput. & Chem. Eng., 14, No.4/5, 495 (1990)
- (6) 佐藤・富田・檜物: 「プロセストレンドの表現—エピソード表現に基づくプロセス変数の特徴抽出—」, 電学産業システム情報化研資, IIS-95-2, 9 (1995)
- (7) 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」, 第10回自律分散システムシンポジウム資料, 231 (1998)
- (8) 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, 251 (1998)
- (9) 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 (1998)
- (10) Y. Miyake & J. Tanaka: "Mutual-entrainment-based Internal Control in Adaptive Process of Human-robot Cooperative Walk", Proc. of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'97), 293 (1997)
- (11) Y. Miyake & J. Tanaka: "Mutual Adaptation in Human-robot Cooperative Walk—Mutual-entrainment-based Internal Control—", Proc. of 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN'97), 124 (1997)
- (12) 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, 9, No.5, 637 (1997)
- (13) 三宅: 「「生命」における設計」, 現代思想, 25, No.6, 301 (1997)
- (14) Y. Miyake, S. Tabata, H. Murakami, M. Yano & H. Shimizu: "Environment-dependent Positional Information Field in Chemotaxis of Physarum Plasmodium", J. Theor. Biol., 178, 341 (1996)
- (15) 三宅: 「知的マルチエージェントの機能分散と自己言及」, 計測と制御, 35, No.7, 540 (1996)
- (16) 三宅: 「位置情報「場」と生命的自律性—粘菌の走性における環境適応的パターン形成—」, 数理科学, No.394, 56 (1996)