



## 人間と人工システムの コミュニケーション

—粘菌から学ぶ歩行介助ロボット—

### 8.1 はじめに

われわれは、機械とはなにか、そして機械にとって機能とはなにかという問題をどのようにとらえているだろうか。例えば、CD プレーヤーは音楽を再生する機械、エアコンは室温を調整する機械というように、機械が人間から独立して、自立的かつ個別的に機能を担っているようにとらえてしまっていないだろうか。しかし、もし機械が人間から独立して存在するものではないとしたら、われわれは、機械を人間との関係の中で共に創り上げられるものとしてとらえなければならないことになるだろう。例えば、それは、本章において取り上げられる介助のような場合である。そのような状況においては、機械が人間と無関係に動作することは許されないのである。さらに、機械のルールを人間に一方的に押しつけることもできない。機械と人間のかかわり合いの中で機能がリアルタイムに創り上げられなければならないのである。

機械とは、本来、道具であった。道具とは、人間との身体的なかかわりのなかで機能を発現し、しかも、われわれの心身にかかわる発達やその社会性さえも支援する機械ということである。ただ、それは身体の外延としての機械であったために、だれもが同じように高度な機能を引き出すということは不可能であった。その意味では、知能の外延としての機械へ移行したことは必然的であったといえる。これによって、機能を人間から切り離して譲渡できるようになり、だれでも、いつでも、どこでも、高度な機能を得られるようになったので

あるから。しかし、このようにして設計者によって与えられる「高度な」機能が、使用者にとって「適切な」機能であったのかということは改めて問い直さなければならないだろう。

このような問題意識の背景には、過剰なまでに複雑化した知的機械が与えている強い閉塞感と、それに起因する人間の疎外感がある。例えば、パソコンのデスクトップ上に散らばっている莫大な数のアイコンを考えてほしい。あるいは、分厚いマニュアル類や、AV 機器や家電製品の山のようなスイッチ群を考えてほしい。それらは人を育ててくれる道具というよりも、そのもの自体として自閉化し、肥大化し、ブラックボックス化しているようにさえ思われるのである。

これが、機械の単なる特徴に終わっているだけならかまわないだろう。しかし、現代を生きるわれわれにとって、このような知的システム群は、われわれの生活を包摂している環境そのものでもある。このことに考え至ったとき、いま問題にしようとしていることは、個別領域に限定されるものではなく、われわれの生活そのものに関する、きわめて切実な問題として受けとめられることになるだろう。

われわれは、このような社会的状況を踏まえたうえで、機械において自閉化した機械というあり方から、人間とのかかわりの中で共に創り上げられる「開かれた機械」というあり方へ移行させることを目標としている。つまり、機械を自己完結したものと見なすのではなく、人間と機械のコミュニケーションに現われる非完結性として特徴づけるのである<sup>(1)</sup>。

本章では、このような背景において、人間と機械の間での機能的関係が共に創り上げられる働きを「共創」と呼ぶことにしよう。そして、粘菌という生物から、そのような共に創り上げる仕組みを学ぶことによって、共に創り上げるインタフェースとしての「共創インタフェース」というあり方を提案する。そして、具体例としての歩行介助ロボットを構築することを通して、その有効性を検討することになる。

## 8.2 粘菌から学ぶ

共に創り上げる働きは、生物の世界においてきわめて普遍的に見られる現象である。例えば、発生のような現象をイメージしてみたい。このとき、卵割によって生じる細胞の機能はあらかじめ決められているのではなく、それらの細胞の相対的な位置関係や時間的關係で決められる。ウニを使った実験では、初期発生において細胞の位置を組み替えると、その新しい位置関係に応じて細胞の役割が変化することが知られている。また、アリのような社会性昆虫でも、その社会編成において興味深い性質が報告されている。アリの社会にも怠け者アリが1割程度いるらしいのだが、その1割を社会から排除しても、残りの9割から新たに1割の怠け者が生まれるという。このように、コミュニケーションを通して、機能を共に創り上げる働きは、生物が最も得意とすることなのである。

このような背景から、人間と機械の共に創り上げる働きを実現するために、生物のコミュニケーションからその仕組みを学ぶことにしよう。そして、いまから注目する生物は粘菌 (physarum) という生物である。これはわたしが20年近く研究を進めてきた生物であり、しかも、その高度な協調性と実験上の扱いやすさにおいて、共に創り上げる働きのメカニズムを調べるための、最適の生物と思われるからである。

まず、粘菌の紹介から始めよう。この生物はカビの一種であり、その生活環の一つのステージに変形体と呼ばれる時期がある。この変形体は、孢子から発芽した微小なアメーバが多数融合した原形質のかたまりであり、一辺が十数cmにも及ぶ巨大なアメーバ状の個体を形成し移動することになる。いうなれば、アメーバが集合し社会のようなものを形成しているのである。しかも、この粘菌変形体 (以下、粘菌と略す) は、その巨大な扇形の形態を維持ながら複雑な環境の中で移動できるのである。非常に柔軟なアメーバ状の生物であり、個体のすべての部分が運動能力をもつことを考えたとき、各部分がコミュニケ

ーションを通して積極的に協調する働きをもたなければ、このようなことは決して起こらない。このように粘菌は高度な統合性をもっており、共に創り上げる働きの問題に接近するには非常に有効なモデルである。

そこで、わたしは粘菌の一部分に刺激を与え、その刺激に対する個体としての判断過程に注目してきた<sup>(2)</sup>。特に、そのような判断に伴って、その形態が再構築されるプロセスを詳細に調べてきた。図8.1は一例であるが、えさ(△)を粘菌の末尾に与えた後、1時間ごとの形態変化の様子が示されている。図からも明らかであるが、それまでの先端部分が尾部化し、逆に尾部が先端化していることがわかるであろう。このプロセスで特に注目してほしいことは、個体の各部分の形態はあらかじめ固定されていないことである。しかも、リアルタイムに定まってくる各部分の形態は、その局所的な状況だけでは規定されておらず、部分間の相互関係に依存して共に創り上げられている。えさとしての刺激が直接与えられている部分だけではなく、それ以外の部分も同時に形態を再分化させているのである。

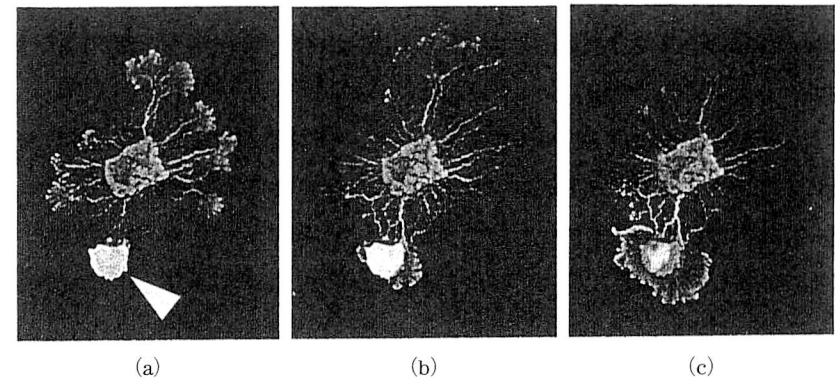


図8.1 粘菌

このように個体としての形態は、粘菌のおかれた状況に応じて融通無碍<sup>びつうむげ</sup>に変化するのだが、ただ一つ保存される構造上の特徴がある。それは、図8.2に示されるように、形態の構成要素となるひも状原形質であり、それ自身はゲル状原形質からなるチューブ状の構造とその中を往復流動するゾル状原形質の2領

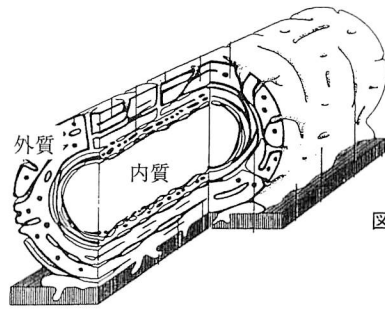


図8.2 粘菌の構造 (Fleischer & Wohlfarth-Bottermann (1975)より改変)

域から構成されている。前者が外質、後者が内質と呼ばれる。このチューブ状の構造は軸方向に相似形であることから、これを部分系の集合とみなせば、各部分系は外質系と内質系から構成されていることになる。外質系はゲル状であることから、空間的には相互作用しにくく独立性が高いことが予想される。しかし、ゲル状であるために、その形態は保存されやすく時間的な履歴性は高いものと思われる。一方、内質系はゾル状であることから、外質とは逆に、空間的に相互作用しやすいことが期待される。そして、このような2領域から構成される部分系の間での細胞内コミュニケーションとして、粘菌の判断機構をとらえることが可能である。

そこで、粘菌の判断過程において、これらの外質系と内質系の作用関係を実験的に解析してみたのである。その結果、外質と内質は交互に拘束し合う形で、それらのダイナミクスにおける可能性を相互限定していることが明らかになった。そして、それに基づいて発展的に一団体としての統合された形態を形成していることが示されたのである。そこで、このような形式でなされる粘菌の判断過程について以下説明しよう。

まず、内質系には周期2~3分の $\text{Ca}^{2+}$ やATPなどの濃度振動としての化学リズムが観察され、それは隣接する部分系との間でたがいに同調しコヒーレントな振動状態を自己組織していた。これは非線形リズムの相互引き込みと呼ばれる現象であるが、そのような相互作用によって化学リズム間での位相関係が形成されることになる。特に、えさとしての刺激を受けた部分系では化学リズ

ムの周期が短くなるように変調され、逆の場合は長くなるように変調される。そして、そのような周期変調は、リズムの相互引き込みを介して、個体内の広い領域にわたって空間的コヒーレンスを形成することになる。そして、その中の位相勾配に表現された部分系間の位置関係に従って、原形質の空間分布が変動することになる。それが外質系における形態変化の過程を拘束しているのである。これによって、個体内での相対的な位置に応じた形態が、各部分系に生成されることになる。

一方、外質系に固定された形態は、内質系における化学リズムの相互引き込み過程に対する境界条件として作用することによって、そのコヒーレンス形成過程を逆に拘束していた。これは、個体としての形態を人為的に操作することで、同一の刺激に対しても、内質系に形成される空間的コヒーレンスが異なってくることから示された。つまり、同一の環境におかれた場合でも、その粘菌がどのような形態をしているかによって判断の仕方が異なるのである。

このような内質系と外質系の間での交互拘束を通して、周期1~2時間程度のコヒーレンス生成崩壊サイクルが観察された。このような内質と外質の間での交互拘束サイクルは歴史的に発展するリズムであることに注意しよう。それは外質ゲルに保存される形態が一種の記憶のように働くからである。そのため、交互拘束サイクルとして生成されるこのリズムを、通常化学リズムと区別するために創出サイクルと呼ぶことにする。図8.3に粘菌の引き込みの一例を示しているが、白黒の帯のようなパターンで表示されているのが化学リズムに対応する。このグラフでは横軸が時間で縦軸が空間に対応しており、各部分のリズムがおおむね同調しコヒーレントな状態を形成していることがわかるだろう。さらに、そのような、コヒーレント状態の生成と崩壊が交互に生じ創出サイクルを構成していることも見られるであろう。

さらに、このような創出サイクルは、おのおのの部分系において観察されるが、それらが個体内の広い領域において同調することも観察された。これは歴史的节奏としての創出サイクルが相互に引き込む現象であり、共創的引き込みと呼ぶものである。そして、これら一連の細胞内コミュニケーションの

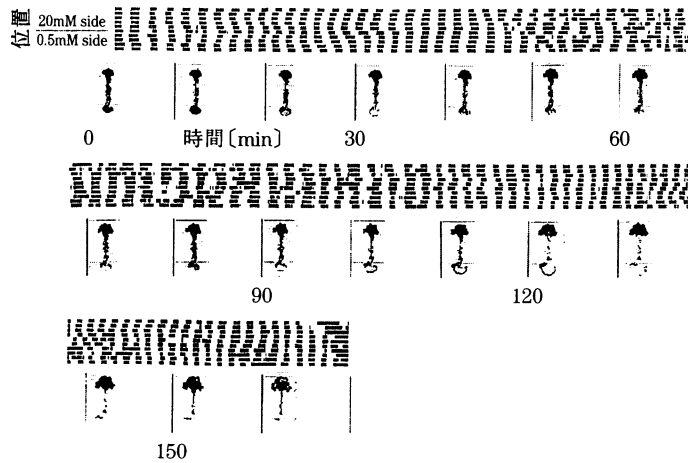


図 8.3 リズムと形態の時間発展

結果、粘菌における個体全体としての統合性が維持され、しかも一個体として協調できるように各部分の多様な役割が共に創り上げられるのである。このとき、内質系は引き込みを通してほかの部分系との相互作用に開かれており、空間的な関係の形成にかかわっていることになる。さらに、外質系はその部分系の中に比較的閉じており、その部分系における歴史的なプロセスの形成にかかわっていることとなる。そして、このような空間的な関係と時間的な関係の交互拘束を通して、共に創り上げるコミュニケーションが実現されているのである。

### 8.3 共創インタフェース

人間においても粘菌と類似した現象が観察されている。粘菌における引き込みに対応させられる現象としては、コミュニケーション過程における身体運動の相互引き込みが挙げられる。例えば、コンドン (W. S. Condon) は、生後2日の新生児の身体運動を観察し、手や足や肩など体の多くの部分が母親の話しかけた声に同調して運動することを見いだしている。また、彼は、成人の対面

コミュニケーション過程も解析し、無意識のうちに実現されている発話と身体運動の同期関係について明らかにした。これらの結果は、身体運動が環境との相互作用に開かれていることを示すものであり、おそらく、みなさんの身近な体験とも一致するものであろう。このことは、粘菌に観察された内質リズムの引き込みを介する相互作用が、人と人の身体的コミュニケーションにかかわる、身体運動の引き込みに対応させられることを示唆している。

また、人間にも、粘菌の創出サイクルに類似した現象を見いだすことができる。コミュニケーションにおいては、身体的な領域だけではなく意識化された領域も重要であるが、人間の意識化状態のダイナミクスとして興味深い現象が報告されている。図 8.4 は多義図形として有名なネッカーキューブであり、2通りの立方体が見えるはずである。ここでその一方に注目していただきたい。そして注目し始めたら、そのまま意識的に注目しつづけていただきたい。どのくらい持続できるであろうか。普通の人は3秒くらいが限度だそうである。それ以降はもう一方の見え方に移ってしまう。そして両方の見え方が交互に現れ振動が生じるのである。ペッペル (E. Pöppel) は、このような実験を通して、人間の意識状態は一定の持続的なものではなく、それが意識外の領域のダイナミクスとかかわりながら、周期3秒程度の創出サイクルを生み出していると考えている。この結果は、人間において、意識生成と身体運動のダイナミクスが交互拘束し、創出サイクルを構成していることを示唆しているように思われる。詳細については、文献を参照してほしい。

少し荒っぽい対応付けではあるが、このような仮説のもとで、粘菌における

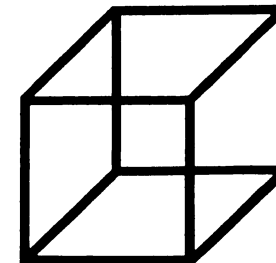


図 8.4 ネッカーキューブ

細胞内コミュニケーションを人と人のコミュニケーションと対比してみるといろいろの共通性が見えてくる。このような前提のもとで、粘菌全体を人と人のコミュニケーションの場と見なせば、人間は内質と外質に対応した二つの領域から構成される一つの部分系としてとらえることが可能であろう。このとき、内質系は、引き込みとそれに基づく空間的コヒーレンス生成として実現されることから、人間の身体的ダイナミクスに対応付けることができる。一方、外質系は、空間的な独立性と形態分化における記憶的な作用を担っており、人間の意識生成にかかわるダイナミクスと対応付けることが可能であろう。

こうして、粘菌において共に創り上げられる働きは、一種のメタファーとして、人間において共に創り上げる働きに関連付けられることになる。このことによって、図8.5のような、身体モデル、内部モデル、そして、創出サイクルとして相互拘束プロセスから構成される、共創に関するモデルが得られるのである。そして、このような共創のモデルに基づいて機械を構築し、それが人間とかかわり合うなかで共に創り上げられるであろう機能的関係こそが、共創インタフェースということになる。このような立場から粘菌をとらえることによって、共創インタフェースを構成するうえで必要とされる構造が明らかになる

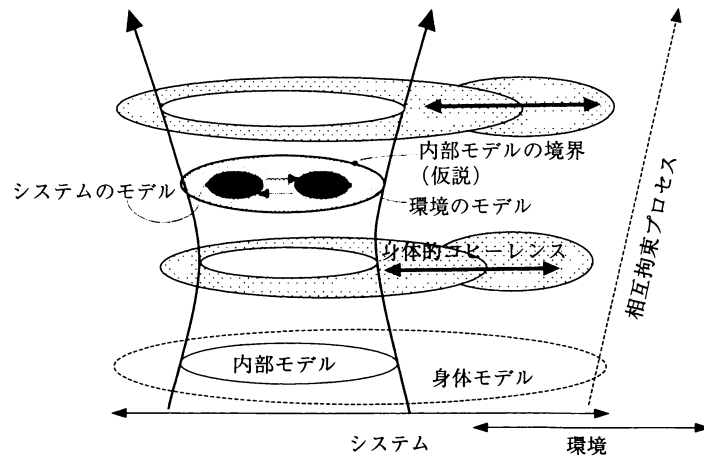


図8.5 共創のモデル

ものと期待される。このとき、モデルは身体モデルと内部モデルから構成されるシステムと、それを取り巻いている環境から構成されることになる。このモデルを人間のモデルとしてとらえれば、システムが人間であり環境が機械として解釈することができる。機械側のモデルと見なせば、システムが機械であり環境が人間ということになる。ここでは人間のモデルという立場から説明しよう。このような背景のもとで以下のモデルをとらえてほしい。

身体モデルは、人間の身体運動のダイナミクスにかかわるモデルであり、引き込み現象を生じさせる非線形リズムから構成されることになる。リズムは環境との相互作用に開かれており、その引き込みを通してコヒーレントな関係をリアルタイムに生成することが可能になるからである。これは、システムが環境に開かれるという意味での非完結性の具体的な表現になるであろう。一方、内部モデルは、人間の意識生成のダイナミクスにかかわるモデルであり、外質系における空間的相互作用の局所性から、閉じた状態空間として表現されている。そして、その内部モデルの空間内には、身体モデルとその作用対象の相互作用に関する仮説的なモデルが表現されることになる。これはシステムが、身体モデルと環境との間に生成するコヒーレントな関係を解釈するためのものである。ここには身体モデルとの対応に基づいて結合振動子系が仮設され、一方のリズムが身体モデルに対応し他方が環境のモデルに対応することになる。

さらに、上記の二つのモデル間での相互拘束プロセスを通して、内部モデルの境界が規定されていくのである。創出サイクルとして相互拘束プロセスとしては、粘菌との対応から交互拘束サイクルが用いられる。具体的には、以下のように仮設される。まず、身体モデルにおいて環境との間にコヒーレンスが生成されることを契機として内部モデルが動作を開始する。内部モデルでは、この身体的コヒーレンスを拘束条件としてシステムと環境の関係を推測し予測する。これが、身体モデルに対する新たな拘束条件となり、それに伴って新たな身体的コヒーレンスの生成が試みられるのである。そして、このような交互拘束サイクルから内部モデルの境界が更新されシステムが歴史的に発展することになる。このようなプロセスの具体的な構成方法については、次節の介助ロボ

ットの構築において説明する。

#### 8.4 歩行介助ロボット

人間と機械のかかわりにおいて、このような共創インタフェースが有効に機能する領域としてはさまざまな場合が考えられる。特に、身体的ダイナミクスが関与することによって生じる環境との非分離な関係を無視できず、機械だけに限定した設計が不可能な問題が、本手法のカバーする主たる領域になるであろう。例えば、高齢者の運動介助など福祉の領域、音楽やゲームなどのアミューズメント、スポーツやダンスなど身体技法の領域など多岐に及ぶ可能性がある。そして、そのような領域においてこそ、人間が機械に一方的に合わせるのではなく、また、機械が一方的に人間に合わせるのではなく、両者が共に機能を創り上げるといったことの重要性が顕現するものと思われる。

われわれは、このような領域の一例として、歩行運動の介助を取り上げている。特に、人間とロボットと一緒に歩調をそろえて歩くことによって実現される、人間の心身にかかわる介助としての有効性に関して検討を進めている<sup>(3)</sup>。それは、歩行運動が人間にとって最も基本的な運動機能の一つであるというだけでなく、社会参加するうえでも欠くことのできない機能だからである。また、人と共に歩くことによって、無意識に歩行リズムが引き込む現象も知られており、身体モデルを表現するダイナミクスとしても対応させやすいという理由もある。

高齢者においては歩行に障害が現れやすく、ある調査によると、1 km 歩けない人の割合が70歳代前半で約2割、後半で3割となり、80歳代になると4割を大きく超えてしまうといわれている。このような実態に対して、歩行介助装置の現状はどのようなものであろうか。例えば、杖、歩行器、車椅子、義足などは、共になにかを創り上げるといった介助装置ではなく、むしろ、いわゆる昔ながらの道具と呼ぶものである。これほどに技術の高度化が進んだ現代において不思議なくらいに思われる。こうした実情からも推察されるように、

人間と人工物が共に機能を創り上げるといった問題は、これからの技術が展開すべき方向性として非常に期待される領域なのである。

このような背景から、ここでは歩行支援を取り上げる。そして、人間と機械が相互に運動機能を補い合うことで、歩行運動を共に創り上げる一種の共創過程を実現することになる。そして、その第一歩として、人間と機械が相互に歩調を合わせて歩くこと（同一の周期で一定の位相関係で歩行すること）の実現可能性を検討している。たかが一緒に歩くだけで、なにが共に創り上げられるのかと思われるかもしれないが、これだけでも意外にいろいろな介助が可能になるのである。

このようなアプローチは、実際に介助ロボットを構築することを通して進められている。ここで、ロボットというインタフェース形式に注目している理由は、ロボットの身体系において身体モデルが、表象系において内部モデルが、それぞれ表現できる可能性があるからである。ただし、ここでは実機としてのロボットを構築するのではなく、コンピュータの内部にロボットモデルをシミュレートし、その歩行に伴う足音を介して人間と身体的に相互作用させている。具体的には、図8.6のように、ロボットモデルの足の接地を音として合成し人間にヘッドフォンを通して聞かせ、一方、人間の足の接地をセンサで検出しコンピュータに送ることになる。こうして仮想空間の中に構成されるロボットと実空間の人間が相互作用するのである。

ここでは歩行介助という目的との関係から、可搬性を考慮して図8.7のような構造のコンパクトな介助システムを構築している。コンピュータとしては小

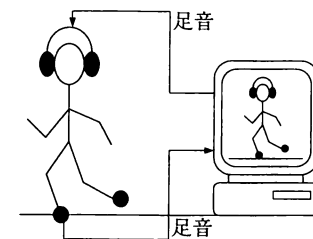


図8.6 歩行介助ロボット

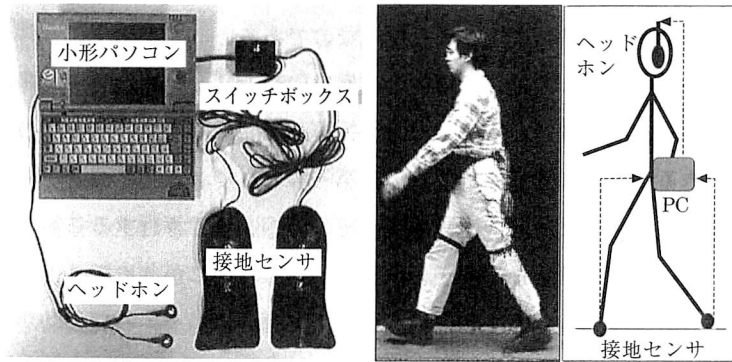


図 8.7 歩行介助ロボット

形のポータブルタイプのものを用い、また、足の接地センサとしてはテープタイプの圧力センサを靴の内面のかかとのところに装着した。さらに、ヘッドフォンとしては開放型のものを用い、ロボットの足音以外の環境からの音も聞こえるようにして、安全に歩行できるようにした。これらは合わせて1 kg 程度になるように構成されており、ウェストバックあるいはリュックサックなどに容易に入れられるサイズとした。これによって、実験室だけではなく、屋外においての使用も可能になっている。ただし、このシステムは専用機として構築すれば、万歩計程度の大きさにスケールダウンできる可能性は高いように思われる。

このとき、ロボット側における共創モデルとしては、図 8.8 のような構成とした。まず、身体モデルについては、ロボットの身体系に非線形リズムとしての性質を与え、人間の歩行リズムとの間で相互引き込みさせることで実現している。具体的には、歩行運動におけるセントラルパターンジェネレーター (CPG) のモデルとして適切といわれるファン・デル・ポール振動子を用いている。一方、内部モデルについては、ロボットの表象系に二つの非線形振動子からなる結合系を用い、それぞれをロボットと人間の歩行リズムに対応させることで実現している。これは、非線形リズムの位相変数に注目して縮約した、位相振動子の対称結合系を用いて構成されている。

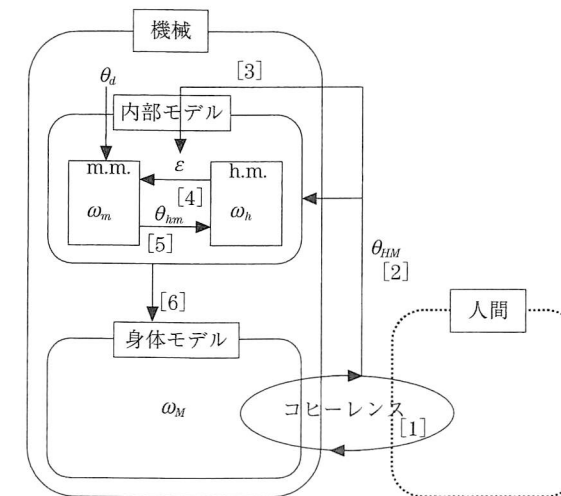


図 8.8 共創モデル

このとき、身体モデルと内部モデルの間での創出サイクルとしての相互拘束プロセスは、表 8.1 のアルゴリズムに従って進められる。まず、身体モデルの領域では実時間と同期してシミュレーションが進められており、つねに人間側の歩行リズムと相互作用している。そして、相互引き込みを通して身体的コヒーレンスが生成したとき、内部モデルが動作し始める。このとき、内部モデルの領域では、その身体的コヒーレンスが位相関係として取り込まれることになる。そして、まずロボット側に対応する振動子の内部状態（固有周期）を近似的に定常状態におき、そのもとで、観測された位相関係を再現するように人間

表 8.1 動作アルゴリズム

1. 人間の運動と身体モデルの間でコヒーレンスを自己組織する
2. 生成されたコヒーレント状態を  $\theta_{HM}$  位相差として観測する
3. 内部モデルのパラメータ  $\varepsilon$  を  $\theta_{HM} - \theta_d$  が最小化するように修正する
4. 内部モデルにおいて  $\omega_m$  を固定した条件下で  $\theta_{HM} - \theta_{hm}$  を最少化する  $\omega_h$  を検索する
5. 内部モデルにおいて  $\omega_h$  を固定した条件下で  $\theta_d - \theta_{hm}$  を最少化する  $\omega_m$  を検索する
6. 検索された  $\omega_m$  に基づいて身体モデルの  $\omega_M$  を修正する
7. ステップ 1 へ戻る

側に対応する振動子の内部状態を探索する。つぎに、その結果に基づいて、人間側の振動子の内部状態を近似的に定常状態におき、そのもとで、目標位相関係を実現するようなロボット側に対応する振動子の内部状態を探索する。その結果に基づいて再び身体モデルの領域を拘束する。これによって身体的コヒーレンスは崩壊し、その後、再び身体的コヒーレンスの再生成が試みられることになる。そして、内部モデルにおいて予測された位相関係と身体モデルにおいて再生成された位相関係との差に基づいて、内部モデルの構造パラメータを修正し、最初にもどるという手順を経る。これらのモデル化およびアルゴリズムの詳細については文献を参照してほしい。

最後に、本インタフェースと従来の人間-機械系との関係をまとめておくことにしよう。従来手法においては、機械のダイナミクスを完全に規定できるということが前提されていたように思われる。これは、機械を全体系と見なせることと等価である。ただ、この前提条件は機械が人間と強く相互作用する場合には必ずしも成立しない。なぜならば、両者が相互干渉してしまい機械が部分系になってしまうからである。しかも、設計者にとって使用者に関する情報を前もって規定することは不可能であるから、これは原理的な制約となってしまう。このような背景から、これまでは使用者と機械のダイナミクスが分離できるものと仮定して、機械だけに限定した設計がなされてきたように思われる。そして、これが機械の自閉化という現象の背景にあったのではないだろうか。このような意味において、われわれのモデルは、従来扱うことができなかった相互干渉系の一例としてリズムの相互引き込み系を設定し、その相互作用の内部から制御する手法を提案していることになる。これは、いわゆるシステム論の範疇に限定したとしても、本インタフェースが新しい視点を提案していることを意味している。

## 8.5 共創プロセスとしての介助

つぎに、このような歩行介助ロボットを用いて実際に介助を行う状況を想定

することになる。本来であれば、高齢者や歩行障害をもつ人々が第一に考慮されるべきであるが、ここでは、それに向けた準備的状況として、ふつうに歩行できる人間の片足に約 10 kg 程度の重りを装着し、さらに、膝にテーピングを施すことによって、歩行を積極的に不安定化させた状態を用いることとした。そして、このような歩行介助ロボットと人間の間での共創インタフェースにおいて、どのように歩行介助としての機能が共に創り上げられるのかを調べることになる。

実際に実現されていることは、先にも説明したように、人間と介助ロボットが足音を介して相互に歩調を合わせて歩行するということである。これは両者が協力して、歩行という運動を創り上げていることになる。このような状況において得られた結果の一例が図 8.9 である。ここには、人間とロボットが一緒に歩行する際の、歩行運動の周期、位相差の時間発展が示されている。ここで周期とは歩行リズムの周期のことである。位相差とは、人間側とロボット側の歩行リズムの間での位相差のことであり、足の接地タイミングの時間差から計算されている。

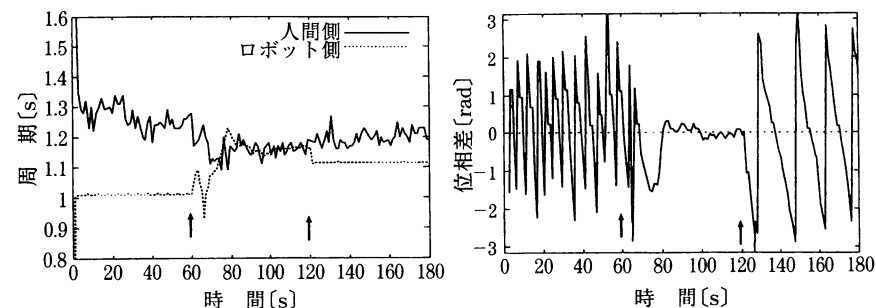


図 8.9 歩行の安定化

図中の左矢印が人間とロボットの相互作用開始に対応している。つまり、ここからおたがいの足音が聞こえ始めるのである。注目してほしいことは、相互作用の開始後、人間の歩行リズムと介助ロボットのリズムが相互に適応し合うプロセスが見られていることである。特に、歩行周期においては、人間側の歩



行周期がロボット側へ接近するだけでなく、ロボット側の周期も人間側へ接近している。結果的に、相互作用の開始前に観察されるおのおのの固有周期を基準にすると、それらのほぼ中間的な周期に収束していることがわかる。これは、リズムの相互引き込みと呼ばれる現象で、このような現象が生じるということは、ロボット側に仮設された身体モデルとしての非線形リズムが、人間側の身体運動のダイナミクスと対称的であることを意味している。これは身体モデルの妥当性を示唆するものである。

ただ、ここで生じている現象が、歩行リズムの単純な引き込みではないことには注意する必要がある。図中の右矢印が相互作用の停止に対応しているのだが、それ以降において観察されるおのおのの固有周期が最初に観察された固有周期には戻らないからである。むしろ、このプロセスにおいては、固有周期を含めて相互に適応し合っていると見なすことが可能である。このことは、歩行リズムを生成させる系の内部状態まで含めて、人間とロボットの歩行運動が相互に適応し合うことを示している。そして、その結果として、いま目標としている歩行リズムの位相関係（この場合の目標位相差は0）が実現されているのである。もし、相互引き込みだけであれば、固有周期は変動しないし、このような位相関係も決して実現されないからである。

このように、歩行リズムの相互引き込みを越えて創出的な適応プロセスが観察されることは、ここで観察される現象が、身体モデルだけではなく、内部モデルとの間での相互拘束プロセスに起因していることを強く示唆している。さらに、固有周期が相互に適応する際、人間側とロボット側の変化がほぼ対称に生じることは、人間に想定されている二つのダイナミクスと、その表現としてロボットに組み込まれた共創モデルの間での対称性を意味しており、ここで提案した共創モデルの妥当性を示唆するものでもある。特に、二人の人間で同様の実験を行った場合にも、このような相互に適応し合う現象が観察されることから、このような解釈は強く裏付けられるだろう。

これらの結果は、人間とロボットの共創過程の特徴もよく表している。つまり、ロボットが人間に合わせる、あるいは、人間がロボットに合わせるという

一方向的な適応関係ではなく、相互に適応し合うことによって歩行という機能を協力して創り上げているからである。そして、このような特性は機能の相互補完性をも可能とするであろう。さらに、実験結果として直接的には示されていないが、ここで得られた結果は、人間とロボットの創出サイクルの間での共創的引き込みをも示唆しているように思われる。この詳細については、いま解析を加えている途中であるが、このように、本介助ロボットを用いて、人間と機械の共創インタフェースの実現可能性が示唆されたことは強調されなければならないだろう。

このようなインタフェースの使用によって実現される、共に創り上げられる機能の例としては、歩行運動の安定化が挙げられる。例えば図8.10において、人間の歩行周期のゆらぎを、ロボットとの相互作用開始の前後で比較してみるとよくわかるだろう。このゆらぎは片足に重りを装着したことに起因しており、それが減少するということは、歩行運動そのものが安定化することと対応している。このことは人間とロボットが創出サイクルの引き込みを通して一体化し、より安定な歩行運動を共創したことを意味している。ここでは、特に人間に対して力学的な介助をしているわけではなく、歩行に伴う足音のリズムだけで相互作用しているだけである。しかし、それだけで人間の歩行を安定化できることは非常に興味深い。

さらに、このような共創過程においては、歩行運動の安定化にとどまらず、歩行パターンの時間発展という発達の機能も生み出されている。図8.10に、その一例を示しているが、これは歩行時における人間の膝の軌跡を横方向から記録したものである。介助ロボットを使用しないときの軌跡が一番左に、相互作用中の様子が中央に、そして重りを装着していない自然な状態での軌跡が右端に示されている。これらを比較してみれば明らかだが、介助中の軌跡は、自然な状態での歩行には及ばないが、重りの装着による運動障害を明らかに改善している。このことは、リハビリテーションのような歩行運動の発達過程に対する支援手法としても、共創インタフェースが有効であることを示唆しているように思われる。

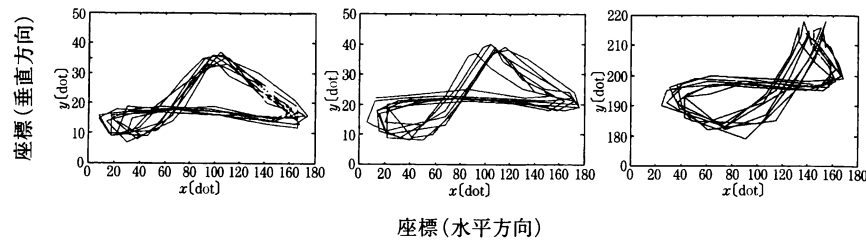


図 8.10 歩行パターンの発達

さらに、このようなインタフェースを用いた歩行介助において、人間の意識状態に変化が生じることも確認されている。以下の介助の状況は、先の実験と少し異なり、坂道を歩く際の介助の可能性について調べた結果である。身近に高齢者がいれば、坂道を上るときに若い人と一緒だと楽に坂を上れたという話を耳にしたことがあるだろう。それに対応した役割をロボットに担わせてみたのである。もしこれが実現できれば、歩行運動の安定化や発達だけではなく、人間のこころの領域も含めて、共に創り上げる働きに基づく介助が可能になるかもしれない。そして、このようなロボットは介助という問題領域を越えて、非常に広いコミュニケーションの世界にも応用できる可能性さえあるように思われる。

例えば、上り坂でロボット側の歩行リズムが人間側よりも少し位相進むように設定してみた。つまり、少しだけ歩行のタイミングを進めて歩くように設定してみたのである。そうすると、ロボットが前に引っ張ってくれるかのように楽に坂を上れる。力学的に前に引っ張ったりしているのではなく、ただロボットの足音が聞こえてくるだけである。また下り坂では歩行に勢いがついて危険なことが多いが、ロボット側が少し位相遅れになるように設定してみた。そうするとロボットが後ろに引っ張ってくれるように安心して下れるのである。これらの結果は図 8.11 にまとめている。左図は人間が一人で歩いた場合の坂道における歩行周期の変動である。上りのときに歩行の周期が長くなり、下りのときに早足で歩いている。しかし、右図のようにロボットと共に歩いた場合は、上り坂でも周期があまり遅くならず、下り坂でも早くなりすぎず

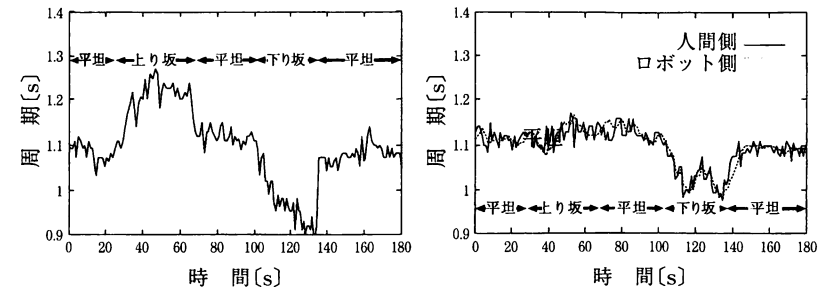


図 8.11 坂道での歩行

歩けていることがわかるだろう。

特に重要なことは、このような手法によって、介助を受ける人間の意識状態が変化していることである。これはアンケート結果からも呼吸状態の変動からも確認された。しかも、これは坂道だけの問題ではなく、人間と介助ロボットの歩行リズムにおける両者の位相関係に主として依存しているようであった。わたしの直接的経験としては、ロボット側が人間側よりも位相遅れの場合には、ロボットが後からついてくるような空間感覚が得られるのである。聞こえてくるロボットの足音には空間的な情報がまったく含まれていないにもかかわらず、空間的な広がりを感じられる。しかも、ゆったりとした時間感覚である。しかし、ロボットのほうが位相進みとなる場合には、ロボットが人間の前にいるような体験がなされる。この場合には時間が相対的に速く流れるような感覚も得られる。散歩のような状況では前者のような位相関係が、ジョギングのような状況では後者のような位相関係が有効であった。

これらの結果は、本インタフェースによって、人間とロボットが運動機能を共に創り上げられること、さらに、そのような身体的ダイナミクスから人間の意識生成のダイナミクスへも関与できることを示唆している。ただし、このようなインタフェースが、介助を必要とする人々にとって真に有効であるか否かは現段階では明らかではない。今後は、そのような人々に実際に使用してもらうことを通して、さらに開かれた共創インタフェースとして実現していかね

ればならない。

## 8.6 おわりに

本章では、人間と機械が相互作用を通して機能を共に創り上げるための枠組みを提案した。この背景には、現代社会において機械がそれ自身として自閉化し、機械が本来もっていた人間と共に機能を創り上げる関係が希薄化しつつあるという現状認識があったからである。そこで、われわれは粘菌という生物に学ぶことによって、共創的あり方を実現するための一つのモデルを構成し、それを共創インタフェースとして提案した。そして、それに基づく新しい人間-機械系の実現をめざした。特に、歩行介助という問題に注目し、人間と歩行介助ロボットが歩調をそろえて歩くことによって実現される歩行機能の共創過程を構成したのである。そして、結果的に、このような枠組みが身体運動の支援だけではなく、こころの支援手法としても有効であることが示唆された。

今後の展開可能性としては、介助という問題を越えて、医療・福祉、アミューズメント、スポーツなどにおける身体技法に関する領域に広い応用可能性が考えられる。また、人と人をつなぐコミュニケーション支援技術への展開も大いに期待される。例えば、インターネットやデータベースにおいて、物理的な空間や時間の制約を超えて共感空間を生成する技術など、非常に広い可能性が広がるものと考えられる。すでに、われわれは、言語的、音楽的コミュニケーションにおいて、さらに、人間-機械-人間系に対して、このような枠組みを拡張しつつある<sup>(4)</sup>。

最後になるが、共創インタフェースというあり方は、まだ研究途上の仮説でしかない<sup>(5)</sup>。しかし、上記のような具体的アプローチの中で、少しずつではあるがその有効性が示されてきていると考えている。今後とも、このようなあり方の重要性にご理解とご関心をいただければ幸いである。