

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名 「自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）
研究代表者 中村 仁彦 （東京大学大学院情報理工学系研究科 教授）
主たる共同研究者
佐々木 正人 （東京大学大学院情報学環 教授）
土屋 和雄 （京都大学大学院工学研究科 教授）
浅田 稔 （大阪大学大学院工学研究科 教授）
潮 俊光 （大阪大学大学院基礎工学研究科 教授）
吉澤 修治 （埼玉大学工学部 教授）

3. 研究内容及び成果：

ヒトは自律行動単位を力学的に結合し、これを脳で統合制御することで優れた運動機能を実現している。本研究はヒトの優れた機能に学び、自律行動単位を統合する情報処理のメカニズムを力学的に構成することでヒューマノイドロボットを開発するものである。脳科学のパラダイムに学ぶことで、大自由度系の全身運動生成、環境との相互干渉、行動に結びついたシンボルの獲得、シンボル操作から知能へのアプローチなど、ロボティクスが解決すべき知能の本質に一步近づくことを目指したものである。

主要な成果は中村の率いる東大グループにおいて得られたものであるが、その他のサブグループはこれを補充し構想を広げるのに有益であった。以下、具体的な研究項目毎に内容と成果をまとめる。

運動パターンの生成と遷移のための力学的情報処理（中村グループ）

生物の記憶や知能を神経系の非線形力学系の挙動として説明するため、本研究では、知覚の情報処理系としての非線形力学系に注目し、ロボットの情報処理系を非線形力学系として設計する方法を開発した。具体的には、ヒューマノイドの全身周期運動を低 N 次元空間内の閉曲線として表現し、これをアトラクタとする力学系の設計を行った。ここでは環境・ロボットの身体・情報処理系の相互作用による引き込みによってロボットの運動が生成され、運動パターンは引き込みの結果として生まれる。

運動のパターンの認識と生成を統一する統計的情報処理（中村グループ）

脳の実メカニクス理論は見まねを通じた行動の獲得が、連続世界を記号化して記憶・認知するシステムの基盤となり、コミュニケーションの抽象化によって記号処理や言語などの高度な知能が発達したと考える。本研究では、隠れマルコフモデルの確率的な情報処理を用いて、運動認識と運動生成の双方向の情報処理を単一のモデルで実現するミラーニューロンの数理モデルを提案した。これは見まねに基づいて世界を記号化する情報処理パラダイムをアルゴリズムとして表現したものである。提案した数理モデルは、運動パターンなどの時系列データを認識・生成するだけでなく、見まねによる行動獲得によって原始的シン

ボルの獲得を実現したと見ることができる。さらに連続分布型隠れマルコフモデルを用いた時系列パターン生成法を開発することで、抽象化された表現からの滑らかな運動パターンの復元を可能とした。

力学的情報処理のリアプノフ設計と運動パターン遷移制御（潮グループ）

非線形システム理論において、所望の安定周期軌道をもつ力学系の設計方法は古くから研究されてきた。本研究は、所望の周期軌道を特定する制約関数の導出方法とその制約関数からリアプノフ関数を構成することで、その周期軌道をもつ力学系の構成方法を示し、この方法を応用して、ヒューマノイドの周期行動の力学的表現方法を提案した。

ヒューマノイドロボットのデザインと運動性進化（中村グループ）

本研究では、ヒューマノイドのメカニズムを高度化するために関節駆動機構の開発を行った。具体的には、関節配置による運動性能の向上をめざした二重球面ジョイントおよび高トルク伝達特性と零トルク伝達を実現するバックラッシュクラッチを新しく開発した。

不連続位相変化をする非線形振動子を用いた歩行制御（土屋グループ）

二脚歩行ロボットの歩行運動は、多自由度機械システムのリズム運動であり、その歩行制御とは、多自由度機械システムのリズム運動の制御である。本研究では、二脚歩行ロボットの動的歩行制御を中心に、運動計画系を運動生成系と軌道生成系から構成した。運動計画系はリミットサイクルを持つ非線形振動子で構成する。非線形振動子を用いた歩行制御系を二足歩行ロボットに実装し、その有効性を数値シミュレーションおよび実験により検証した。

ヒューマンフィギュアの力学計算と行動計測（中村グループ）

ヒューマノイドやヒトの運動を計算する基盤技術を確立した。この技術はヒューマノイドの運動のシミュレーション、実現可能な運動パターンの生成、運動制御などに不可欠である。また、これを用いてヒトの深部体性感覚情報を観察される運動から推定するのにも利用できる。

行為の生態学的記述（佐々木グループ）

ロボットの行動には柔軟性がないと指摘されることが多い。行動の柔軟性とは環境の変化に応じて縦横にその過程を変える行動の性質である。本研究は観察法を用いて、障害を被った身体が新たに適応的な行動を獲得する過程を記述した。また、頸髄損傷者や高次脳機能障害者を対象として彼等の行動の再発達過程を縦断的に観察した。

この他、浅田、吉沢サブグループの学習ロボットと識別の研究がある。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本研究は、人間の情報処理と知能に構成的に迫り、機能的にこれに学ぶことにより、柔

軟性を獲得したロボットを試作設計することを目指した。このために、ロボットを自律力学系の結合と見て、これを統御することで知能情報処理に迫る方式を実現した。ロボットに運動構成要素、センサー系、力学系の特性を与えて、これにより目的とする全体の運動パターンを生成する設計方式を確立し、同時に運動パターンの認識とこれに基づく見真似ができるようにしている。さらに離散的なシンボル系からアナログの運動動作を生成する方式を可能にし、自然言語の利用に道を開いた。

これらの研究成果は、これまでのロボット研究の枠を大胆に破る画期的なものであり、その成果は世界から注目を浴びた。このことは、国内 24 編、海外 11 編の学術論文の発表、92 編の国際会議論文、129 件の学会口頭発表からも明らかである。さらに、国内 9 件、海外 6 件にのぼる特許出願を行うなど知財の確保に精力的に活躍し、国際的にもいくつものワークショップの計画にかかわるなどの活躍を見せている。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

ロボット研究、とくにヒューマノイドロボット研究は日本が最も進んでいる。機構と制御から出発して、困難といわれた安定自立歩行を可能にしたロボット技術は、次は知能の実現を目指す段階に進んでいる。このための新しい試みとして、本研究は人間の知能システムに学ぶとともに、これを自立力学系の結合として捉える視点を提案し、これがうまく働くことを実証して、ロボットの世界に新しい可能性を切り拓いた。本研究の成果は今後のロボットの研究を主導していくものである。

このためには多くの付属した技術開発が必要であった。これらは、隠れマルコフモデルによる運動データの認識・生成方法、リンク系動力学高速計算法、モーションキャプチャデータ処理など多数の特許として出願され、その応用としてのアニメシミュレーション技術は実施段階に入っている。

本研究は人の機能に触発された技術開発として、きわめて高い水準のものを実現し、これからのロボット技術の中核になる独創的な貢献である。しかし、ここから人の脳の機能の解明に迫るにはまだ間があるといわなければならない。

4-3. その他の特記事項

本研究における国際会議その他における受賞は 11 件に上る。この中にはロボットと制御の最も権威ある国際学術誌である IEEE Transactions on Robotics and Automation 誌における最優秀論文賞 (King-Sun Fu Memorial Best Paper Award) を 2 年続けて受賞するという快挙や、ロボット学会誌論文賞の受賞などが含まれる。