

「脳を創る」

平成10年度採択研究代表者

中村 仁彦

(東京大学 教授)

「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」

1. 研究実施の概要

ハードウェアとして実現されたヒューマノイドロボットの「脳を創る」ためには従来の技術還元論に基づくロボティクスの工学的的方法論では、解決されそうにない多くの本質的な問題があることが明らかになってきたことが本研究の背景である。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、などのロボティクスに要求される知能の本質的な問題に近づくことを本研究の目的としてきた。現在までの成果を以下にまとめる。

[1] 身体行動に結びついたシンボル獲得論

ミラーニューロンの機能的数学モデルを提案した。統計的情報処理によって行動パターンの時系列を力学系として獲得する。この力学系を用いれば類似の行動パターンの類似度を確率として計算することができる。同じ力学系を用いて行動の生成を確率的に行なうことができる。

[2] 非線形力学系を原理とする情報処理系設計論

人間やヒューマノイドの運動パターンを全て周期軌道とし、これを引き込み軌道とする力学系を多項式を用いて設計する方法論を確立した。この論文は2002年のIEEE International Conference on Robotics and Automationの最優秀論文のfinalist 5件に選ばれた。

[3] ヒューマノイドや人体の大自由度系の運動計算論

次の2点を開発した。(A) 任意な閉リンク系だけでなくリンク系の連鎖構造が時間的に変化するものを統一的に計算することのできる構造可変力学系の計算アルゴリズム、(B) 構造可変系を1CPUの計算機システムでは自由度数 N に比例した $O(N)$ 時間で実行でき、 $O(N)$ 台のCPUでは $O(\log N)$ にまで高速化できるアルゴリズム。(A)の論文はIEEE Transactions of Robotics and Automationの2001年度の最優秀論文(1編)に選ばれた。

[4] 人間行動情報の経時的マルチモーダル計測環境の開発

人間の光学式モーションキャプチャーシステムを高速度カメラとクラスター計算機を用いて開発した。床反力計、アイマークレコーダ、無拘束脳波・筋電計などと同期したり

アルタイム計測環境であるビヘイビア・キャプチャスタジオを整備した。

[5] 環境との力学的相互干渉を許すヒューマノイドロボットの身体

環境が相互干渉として身体運動を変化させることを情報ととらえ行動生成に利用することになる。本研究では、このため独自の関節駆動機構を提案し、これをもつ全身型ヒューマノイドロボットを開発した。

本研究は基礎科学技術として人間の情報処理、知能の問題に構成論的に迫った研究である。応用技術としても人間の情報処理を機能的に模擬することによって、人間と自然な対話をするヒューマノイドロボットに繋がる。学術論文だけでなく特許についてもすでに9件申請した。また人間の計算に関わる総合的なソフトウェアを蓄積しつつあり、特許と同様に知的財産となる。開発した動力学計算ソフトウェアの一部はすでに世界中の300名ほどの研究者に使用されている。運動生成計算のアルゴリズムはアニメーション制作ソフトとして利用されている。人間の筋骨格系の計算は、医療分野へ直接の応用が可能である。ヒューマノイドロボットのセンサや電子装置も独自の開発を行なった。これらが製品化される可能性もある。

2. 研究実施内容

目 的

平成10年秋から実施してきたプロジェクト「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」の背景には、ハードウェアとして実現されたヒューマノイドロボットの「脳を創る」ためには従来の技術還元論に基づくロボティクスの工学的的方法論では、解決されそうにない多くの本質的な問題があることが、それまでに明らかになってきたことがある。これを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、などのロボティクスに要求される知能の本質的な問題に近づくことを研究の目的としてきた。

方 法

平成14年度は以下のような研究項目にそって研究を実施した。

- (1) 脳型情報処理の情報学的研究 (I) : 力学的情報処理
- (2) 脳型情報処理の情報学的研究 (II) : ミメシスの計算モデル
- (3) 脳型情報処理の情報学的研究 (III) : シンボルと言語の操作
- (4) 人間行動の観察・計測・計算
- (5) ヒューマノイドを用いた実証実験

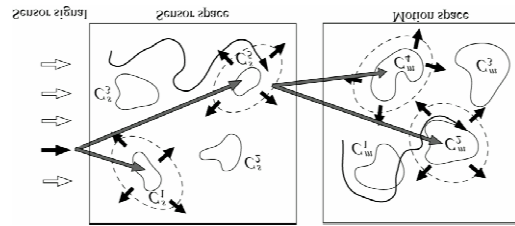
成果と結論

- (1) 脳型情報処理の情報学的研究 (I) : 力学的情報処理

力学的情報処理系によるロボットの運動生成 (東京大学大学院情報理工学系研究科)

力学的情報処理系に合目的な動作を生成させるため、力学系を階層的に配置し、各アトラクタへの引き込みの強さのダイナミクスを学習することにより、センサ情報に対応した行動を生成することに成功した。エージェントの対話モデルの発達に力学系情報処理を応

用した。概念を力学系として設計し、シンボル入力から複数の概念を時間に沿って連続的に遷移する過程を意思と定義することで、意思のダイナミクスを力学的処理で扱う枠組みを確立した。



Sensor and Motion Spaces

リアプノフ関数を用いたヒューマノイドロボットの行動生成 (大阪大学大学院基礎工学研究科)

歩行やスクワットなどの周期的な行動パターンは、ヒューマノイドロボットの自由度に対応する高次元空間内で閉軌道をなす。ロボットの全身行動はこれらの行動パターンの遷移によって実現され、周期的な行動パターンの生成とパターン間の遷移を数学的なモデルを用いて表すことは重要である。ヒューマノイドロボットの周期的な行動パターンをリアプノフ関数に基づいてリミットサイクルを持つハイブリッドシステムを構成する方法を提案し、行動パターン間の遷移を対応するリミットサイクルの安定化、不安定化により実現した。

(2) 脳型情報処理の情報学的研究 (II) : ミメシスの計算モデル

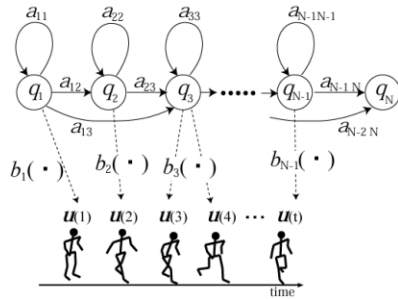
行動学習における模倣と身体図式 (大阪大学大学院工学研究科)

呈示者視点から見たときの呈示軌道を復元することができれば、その軌道を実現することで呈示を再現できる。回転不変特性を有するカメラを用いて、エピポーラ幾何を利用した呈示視野復元に基づく模倣実現手法を拡張し、広範囲の視野にわたる呈示軌道を復元する提案した。ロボットによる身体図式獲得の問題のはじめの課題として、センサ情報のみから注視対象が身体であるか否かを識別する問題を扱った。センサ様式間の変性が身体を表現するという考え方にに基づき、視覚と固有感覚の相互感覚地図を実ロボットに学習させることによって、身体/非身体の識別が可能になることを示した

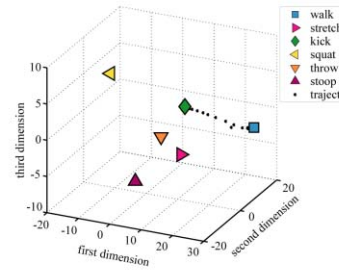
(3) 脳型情報処理の情報学的研究 (III) : シンボルと言語の操作

ミメシスループにおけるシンボル操作からの行動生成 (東京大学大学院情報理工学系研究科)

ミメシスモデルでは、行動に対応した原始シンボルの生成を研究してきた。原始シンボルを言語のように操作することで行動を扱う枠組みはこれまで存在しなかった。隠れマルコフモデル間の距離を定義することで原始シンボルを空間に配置し、原始シンボル同士の類似度や幾何学的な位置関係を表現する手法を開発した。これにより、幾何学的な原始シンボルの操作に基づいて、基本行動を組み合わせ、複雑で多様な行動を生成、認識することが可能となった。モーションキャプチャによって取得された行動からロボットの動作へ適応するモデルとの統合を進めている。



Left-to-right hidden Markov model



The proto-symbol space and symbol transition

(4) 人間行動の観察・計測・計算

行為の獲得における運動-環境の相補性 (東京大学大学院教育学研究科)

一人の脳卒中者を対象として運動障害のリハビリテーションにおける行為の獲得過程を研究した。平成14年度は、患者の非マヒ手の箸による鱒への接触を「身を取る」、「障害物(骨や皮)を取る」、「全体の位置を変える」、「取った身の整理」の4種に分類し、4種の接触の時間上での再帰的構造を検討するための時系列分析を行った。事物を行為に関連させて記述するためには、対象ごとにそれに特殊な分節化を工夫する必要があることが示された。対象を行為で記述際に分析単位ははじめから自明ではない。それは行為の特殊性の観察を通して明らかになる。

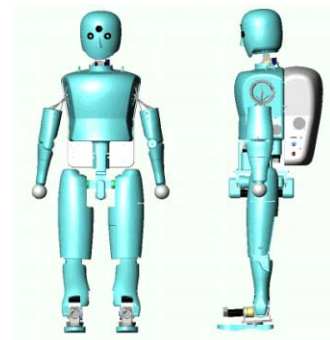
視覚情報からの歩行ピッチの引き込み (埼玉大学工学部)

オンライン線形判別(OLDA)を用いて任意画像パターン認識システムを構築した。前を行く人の脚の踵の部分の連続的に認識・追跡させ、歩行ピッチの抽出をさせた。現在は、ソフト上の神経振動子の振動が、この視覚抽出された歩行ピッチに引き込まれる現象を実現しようとしている。

(5) ヒューマノイドを用いた実証実験

ヒューマノイドロボットの身体 (東京大学大学院情報理工学系研究科)

受動歩行と駆動歩行をリアルタイムに切り替えて歩行制御することによって、環境と力学的に干渉して行動を生成するロボットが実現できる。ヒューマノイドロボットにこのような運動を可能にする新たな身体メカニズムを研究した。バックラッシュクラッチを膝関節に応用し、二重球面ジョイントを股関節に応用したヒューマノイドロボットを開発した。現在、ヒューマノイドの歩行動作の実験に取り組んでいる。



CREST θ

振動子系を用いた2脚歩行ロボットの歩行制御 (京都大学大学院工学研究科)

CPG原理にもとづく2脚歩行ロボットの歩行制御(非随意的歩行運動)の研究を実施した。2脚歩行は歩行制御と姿勢制御の協調が本質的である。本研究では、各脚とともに、各腕

にもその運動を制御する非線形振動子を配置し、感覚センサ信号のフィードバックによって、全体の相互引き込みを形成することにより歩行が成される力学系を構成した。変化する環境の中で、安定な歩行を実現する事をハードウェアモデルにもとづき検証した。

3. 研究実施体制

研究グループ名：東京大学 大学院工学系研究科

- ① 研究分担グループ長：中村 仁彦（東京大学大学院情報理工学系研究科，教授）
- ② 研究項目：自律行動機械の脳型情報処理

研究グループ名：東京大学 大学院教育学研究科

- ① 研究分担グループ長：佐々木 正人（東京大学大学院教育学系研究科，教授）
- ② 研究項目：自律行動機械の学習・発達の観察

研究グループ名：京都大学 大学院工学研究科

- ① 研究分担グループ長：土屋 和雄（京都大学大学院工学研究科，教授）
- ② 研究項目：非線形振動子原理によるヒューマノイドの随意運動生成

研究グループ名：大阪大学 大学院工学研究科

- ① 研究分担グループ長：浅田 稔（大阪大学大学工学研究科，教授）
- ② 研究項目：言語獲得の認知発達モデル

研究グループ名：大阪大学 大学院基礎工学研究科

- ① 研究分担グループ長：潮 俊光（大阪大学大学院基礎工学研究科，教授）
- ② 研究項目：離散事象システムの力学的状態遷移

研究グループ名：埼玉大学 工学部

- ① 研究分担グループ長：吉澤 修治（埼玉大学工学部，教授）
- ② 研究項目：全身運動情報の判別、認知過程におけるトップダウン情報の役割

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- 山根克，中村仁彦，“ヒューマンフィギュアの全身運動生成のための協応構造化インターフェース，” 日本ロボット学会誌，Vol. 20, No. 3, pp. 335-343, 2002.
- S. Takai and T. Ushio, "A modified normality condition for decentralized supervisory control of discrete event systems," Automatica, Vol. 38, No. 1, pp. 185-189, 2002.
- 足立正和，山本茂，潮俊光，対称性を有する区分的アファインシステムにおけるリミットサイクルの解析，電子情報通信学会論文誌，Vol. J86-A, No. 3, 2003.
- 駄竹，酒井，吉澤，両眼競合知覚の神経機構，電子情報通信学会技報 NC2002-20, pp. 7-12, 2002.

(2) 特許出願

H14年度 特許出願件数：2件（研究期間累積件数：9件）