

「脳を創る」

平成 10 年度採択研究代表者

中村 仁彦

(東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)

## 「自律的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

本研究の目的は、力学構造を持つ脳型情報処理系の構築によってヒューマノイドロボットの自律的な行動発現を行い、人間の脳のメカニズムを表現・解明することにある。これを達成するため、人間の意識行動のキャプチャシステムを構築し、構造を明確化した力学的ネットワークの設計、人間の動作データに基づいたリアルタイム行動生成のためのソフトウェア環境の開発を行なう。

### 2. 研究実施内容

#### 目的

本プロジェクトでは、ロボットのセンサ処理系とモータ制御系をつなぐ部分(これをセンサリ・モータ・マップと呼ぶ)に非線形力学系を設計する方法を取ることを目的とする。ただし、センサ処理系とモータ制御系には従来から蓄積されてきたステレオビジョン・アクティブビジョンの理論、腕の制御理論、指の把持や操りの制御理論、動的歩行制御理論、接触や衝突の制御理論などの技術を積極的に利用する。これらの要素技術をプリミティブ(自律行動単位)とよび、プリミティブを荒い粒度のノードとしてネットワークを構築する。このネットワークに非線形力学構造を設計し、カオスや引き込みを用いた情報処理の実現を目指す。特に、ネットワークの構造を明確化することで、並列化、階層化を可能にし、多くの機能を埋め込むことを可能なものにする。プリミティブの設計では人間の行動をキャプチャし、これをベースにする。ロボットと人間はその構造や力学特性が異なるため人間の動きを変換する必要がある。これらの問題を以下のテーマに分けて取り組む。

- (1) ヒューマノイドのプリミティブの開発
- (2) 実時間アルゴリズムやソフトウェアの開発
- (3) プリミティブをノードとするネットワークの開発とその非線形力学系の設計
- (4) 力学的情報処理による知能の理論の構築

#### 研究実施方法

##### (1) ヒューマノイドのプリミティブの開発

ヒューマノイドの運動パターン生成法や歩行コントローラ的设计理論を構築して富士通のヒューマノイドロボットに実装して検証を行った。ヒューマノイドのより高度なコントローラ的设计において人

間のデータに基づく設計が重要になる。この考えから、**①**高速度カメラとダイレクトドライブ式のパンチルト機構を用いた光学的モーションキャプチャシステムとそのデータからの運動再構築計算法の開発を行った。さらに、床反力計とアイマークレコーダ、無線脳波計測、筋電計測器、3次元画像提示を統合した同時・実時間計測環境(ビヘイビアキャプチャスタジオ)を構築した。人間の運動の実空間パターンと力情報、さらに運動のきっかけになる視覚情報等を同時・実時間で計測することが出来る。これにより、人間の運動の時空間パターンに基づいてヒューマノイドの運動を生成することで人間と共存する状況で人間に違和感の無い親和的運動を行せることが出来る。この手法については、三次元画像の他にも二次元画像から全関節の構造を推定する手法の開発も行った。

また、ヒューマノイドロボットにおける歩行パターン、走行パターンなど、自然な動きを実現するため、シミュレーターを用いたパラメータの設定法、計算量を少なく抑えることのできるモーションプランナなどを開発し、様々な行動パターンを生成した。

## (2) 実時間アルゴリズムやソフトウェアの開発

ヒューマノイドのような大自由度系に力学的な情報処理を実装する前提として、**②**運動学や動力学の計算を着実に効率的に行う事が求められる。ヒューマノイドや人間を剛体リンク系として扱い、**③**運動学や順・逆動力学を効率的に計算するアルゴリズムとソフトウェアを開発した。このアルゴリズムは運動の途中で任意の拘束の変化を許し、閉リンクになったり開リンクになったりした場合でも同じように計算することが出来るという特徴をもつ。また、順動力学計算をリンク数(N)に比例した計算量で行う方法、さらに並列計算によってこれを $\log(N)$ のオーダーにまで効率化する方法を開発した。

また、CPGを用いて四足ロボットの行動をリアルタイムに変化させて行く研究を行っていたが、これを拡張し、四足ロボットが内部状態を変化させ、次第に二足歩行へとスイッチしていくモデルを構築し、リアルタイムに、かつスムーズに行動を遷移させる行動を実現した。

## (3) ネットワークの非線形力学系の設計

人間やヒューマノイドの歩行のような他事尤度の全身運動パターンを低次元化して記憶し、再生するネットワークを設計した。これにはいわゆる砂時計が多ニューラルネットワークを用いる。さらに、低次元化された運動パターンの周辺に引き込みなどの力学系を構築する方法として、力学系を多項式で近似する方法を提案した。これによって任意の運動パターンに力学系を設計することが出来る。股複数この運動パターンの引き込み領域を設計、**④**それを変形したり、**⑤**さらにはトリガー信号によって領域の遷移を生じさせたりすることが出来る。これにより、様々な直方情報処理のアルゴリズムへの展開が可能になるように考えている。また非圧縮完全流体の運動を表すオイラー方程式の3次元トーラスの定常解であるArnold方程式を非線形挙動のモデルとして用い、**⑥**力学的情報処理を設計することを試みた。同期、**⑦**引き込みを生じるような一対のArnold方程式の結合形を設計し、**⑧**その結合系の一方を線左傾、**⑨**他方をモータ系と考え、モータ系から線左傾へと向かう結合を切断し環境に開放することによりロボットの運動の制御を行う情報処理の例を提案した。

また、ペトリネットを軸として、現象の連続的な表現と離散的な表現を統合し、ロボットの行動決定を環境に対して柔軟に行うことのできるモデルを提案した。

#### (4) 力学的情報処理による知能の理論の構築

ミラーニューロンの発見が最近の脳科学における一つの注目すべき話題になっている。これは霊長類以上において、他人の運動を観察したときと、自分で同様の運動を行うときの両方において活動するニューロンがあるという事実である。これを運動の需要(観察)と運動の生成(行動)が同じ一つの情報処理で結びついていることを示唆している。ミラーニューロンが発見された霊長類以上というのはシンボル操作を行うといわれる動物に対応しているように思われる。T.W.Deacon が「言語と脳の共信化」と呼んだようにシンボルの操作とそれによるコミュニケーションが我々の脳の特徴であることを考えると、ミラーニューロンの情報処理を一つのきっかけにしてヒューマノイドの脳型情報処理のパラダイムをくみ上げることが考えられる。この観点から、ミメシス(模倣)を実現するための情報処理機構を、隠れマルコフモデルやリカレントニューラルネットを用いて構築し、実際のヒューマノイドにおいて模倣行動を実現させた。

また、環境に適応して行動するロボットの知能構築のために有効であると考えられる強化学習のうち、自由度が多くなると学習に必要な計算量が爆発する問題に対処するため、階層型の強化学習モデルを提案した。実際に実機ロボットにおける強化学習を行い、環境に適応する行動をすばやく獲得することに成功した。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 東京大学 大学院工学系研究科グループ

- ① 中村仁彦(東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授)
- ② 自律行動機械の脳型情報処理

#### (2) 東京大学 大学院教育学研究科グループ

- ① 佐々木正人(東京大学 大学院教育学系研究科 教授)
- ② 自律行動機械の学習・発達の観察

#### (3) 京都大学 大学院工学研究科グループ

- ① 土屋和雄(京都大学 大学院工学研究科 教授)
- ② 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

#### (4) 大阪大学 大学院工学研究科グループ

- ① 浅田稔(大阪大学 大学院工学研究科学 教授)
- ② 言語獲得の認知発達モデル

#### (5) 大阪大学 大学院基礎工学研究科グループ

- ① 潮俊光(大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授)
- ② 離散事象システムの力学的状態遷移モデル

#### (6) 埼玉大学 工学部グループ

- ① 吉澤修治(埼玉大学工学部 教授)
- ② 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

(7) 産業技術総合研究所 知能システム部門グループ

- ① 荒井裕彦(独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム部門技能・力学研究グループ グループ長)
- ② 幾何情報、運動計画、技能学習

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

研究グループ名:東京大学 大学院工学系研究科

- Yoshihiko Nakamura, Hideaki Ezaki, Yuegang Tan and Woojin Chung, “Design of Steering Mecanism and Control of the Nonholonomic Trailer System,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.17, No.3, pp.367-374, June, 2001.
- Yoshihiko Nakamura and Akinori Sekiguchi, “The Chaotic Mobile Robot,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.17, No.6, pp.898-904, December, 2001.
- 中村仁彦, 比留川博久, 山根克, 梶田秀司, 横井一仁, 藤江正克, 高西淳夫, 藤原清司, 永嶋史朗, 村瀬有一, 稲葉雅幸, 井上博允, “仮想ロボットプラットフォーム,” 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp.28-36, 2001.
- 中村仁彦, 下田真吾, “磁気浮上を利用した微小重力ローバ,” 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, pp.485-491, 2001.
- 鈴木高宏, 三好渉, 中村仁彦, “非ホロノミック自由関節マニピュレータの制御,” 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, pp.499-509, 2001.
- 岡田昌史, 中村仁彦, “人間と共存するロボットのための肩機構,” 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.7, pp.818-821, October, 2001.
- 岡田昌史, 中村仁彦, 星野慎一郎, “周波数特性の上限・加減を与えるハイブリッドコンプライアンス  $H_{\infty}$  設計法,” 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.8, pp.974-982, 2001.
- 中村仁彦, “非線形力学系として統合されたロボットの情報処理と制御—運動の制御理論から知能の制御理論へ,” 計測と制御, 第40巻, 第6号, pp.426-432, 2001.
- 中村仁彦, “行動から知能への力学的設計論にむけて,” システム/制御/情報, Vol.46, No.1, pp3-8, 2002.
- Yoshihiko Nakamura, Hirohisa Hirukawa, Katsu Yamane, Shuuji Kajita, Kiyoshi Fujiwara, Fumio Kanehiro, Fumio Nagashima, Yuichi Murease and Masayuki Inaba, “Humanoid Robot Simulator for the MITI HRP Project,” Prpc. of the 32th International Symposium on Robotics, SA4-4, Seoul, Korea, April, 2001.
- Zvi Shiller, Katsu Yamane and Yoshihiko Nakamura, “Planning Motion Patterns of Human Figures Using a Multi-layered Grid and the Dynamics Filter,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.1-8, Seoul, Korea, May, 2001.
- Akinori Sekiguchi and Yoshihiok Nakamura, “Behavior Control of Robot Using Orbits of

Nonlinear Dynamics,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1647-1652, Seoul, Korea, May, 2001.

- Karl F. MacDorman, Koji Tatani, Yoji Miyazaki, Masanao Koeda, Yoshihiko Nakamura, “Protosymbol emergence based on its embodiment: Robot experiments,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1968-1974, Seoul, Korea, May, 2001.
- Tetsunari Inamura, Yoshihiko Nakamura, Hideaki Ezaki and Iwaki Toshima, “Imitation and Primitive Symbol Acquisition of Humanoids by the Integrated Mimesis Loop,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.4, pp.4208-4213, Seoul, Korea, May, 2001.
- Katsu Yamane and Yoshihiko Nakamura, “O(N) Forward Dynamics Computation of Open Kinematic Chains Based on the Principle of Virtual Work,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3, pp.2824-2831, Seoul, Korea, May, 2001.
- Huang Qiang, Yoshihiko Nakamura and Tetsunari Inamura, “Humanoids Walk with Feedforward Dynamic Pattern and Feedback Sensory Reflection,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.4, pp.4220-4225, Seoul, Korea, May, 2001.
- Tetsunari Inamura, Yoshihiko Nakamura, Iwaki Toshima, “Mimesis Embodiment and Proto-symbol Acquisition for Humanoid,” Proc. of 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.159-164, Como, Italy, July, 2001.
- Tetsunari Inamura, Ken Naka, Masayuki Inaba, Hirochika Inoue “Human-Centered Adaptive Mobile Robot based on On-line Dialogue and Stochastic Experience Representation,” The 4<sup>th</sup> IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicle, Sapporo, Japan, 2001.

研究グループ名:東京大学 大学院教育学研究科

- 鈴木健太郎, 佐々木正人, “行為の潜在的なユニット選択に働くタスク制約: 日常タスクに観察されるマイクロスリップの分析,” 認知科学 Vol.8, No.2, pp.121-138, 2001.
- 佐々木正人, “ナビゲーションと遮蔽,” 現代思想 臨時増刊: システム生命論の未来, pp.254-280, 2001.
- 佐々木正人, 三嶋博之編, “アフォーダンスと行為,” 金子書房, 2001年11月.
- Emi Miyamoto, Koji Arita, Takuya Koike, Masao Sasaki, “How does a patient with cerebral infarction get a path to goal? —A case study of Ideational Apraxia —,” 11<sup>th</sup> International Conference on Perception and Action, コネチカット大学, アメリカ合衆国.
- Takuya Koike, “How do dancers move? : Multiple components as antipersistence in action process,” 11<sup>th</sup> International Conference on Perception and Action, コネチカット大学, アメリカ合衆国.

研究グループ名:京都大学 大学院工学研究科

- K.Tsuchiya, K.Tsujita, M.kawakami and S.Aoi, An Emergent Control of Gait Patterns of Legged Locomotion Robots, Preprints of the Fourth IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, pp.271-276, September , 2001
- Takehiro Nishiyama, Kazuo Tsuchiya and Katsuyoshi Tsujita: A Markov Chain Monte Carlo Algorithm for the Quadratic Assignment Problem Based on Replicator Equations, Proc. of International Conference on Artificial Neural Networks, 148-155, August, 2001.

研究グループ名:大阪大学 大学院工学研究科

- 光永法明, 浅田稔, “移動体の意思決定のための情報量基準に基づく観測対象選択戦略,” 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 6, pp. 793-800, 2001.
- Takahashi and M. Asada: Multi-Controller Fusion in Multi-Layered Reinforcement Learning, International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp. 7-12, 2001.
- Noriaki Mitsunaga and Minoru Asada. Sensor space segmentation for visual attention control of a mobile robot based on information criterion. In Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1714-1719. 2001.

研究グループ名:大阪大学 大学院基礎工学研究科

- Shigeru Yamamoto, Toru Hino, and Toshimitsu Ushio, “Delayed feedback control with minimal-order observers for chaotic discrete-time systems,” First Asia-Pacific Workshop on Chaos Control and Synchronization, Shanghai, China, 2001.
- Shigemasa Takai and Toshimitsu Ushio, “Strong co-observability for decentralized supervisory control of discrete event systems,” Proc. 9th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Application, Bucharest, Romania, pp. 102-107, 2001.
- Shigemasa Takai and Toshimitsu Ushio, “A modified normality condition for decentralized supervisory control of discrete event systems,” Proc. American Control Conference, Arlington, VA, pp. 973-974, 2001.
- Shigemasa Takai and Toshimitsu Ushio, “Weak normality for supervisory control of discrete event systems under partial observation,” Proc. European Control Conference 2001, pp. 1589-1594, 2001.
- K. Kobayashi, K. Inoue, and T. Ushio: LLP Supervisory Control with Timed Petri Net Models in Mobile Robots, Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, pp. 3229-3234, 2001.

研究グループ名:埼玉大学 工学部

- S. Morishita, K. Hiraoka, H. Mizoguchi and T. Mishima, “Robust Online LDA by Adaptive Tuning of Learning Coefficient,” Pro. of The 2001 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications, pp. 945-948, 2001.

- Yutaka Sakai, Shuji Yoshizawa, Hiroshi Ohno, “Interpretation on Inter-spike Interval Statistics Through the Markov Switching Poisson Process,” The 8<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing, Shanghai, China, 2001.
- K. HIRAOKA, et al., “Fast algorithm for online linear discriminant analysis”, IEICE Transactions Fundamental of Electronics, Communications and Computer Science, Vol. E84-A, pp.1431-1434, 2001.
- Sakai Y , “Spike independency in feed-forward networks,” Proceedings of 4th International Workshop Neural Coding’2001, p.43, September, 2001.
- Sakai Y, “Neuronal integration mechanisms have little effect on spike auto-correlations of cortical neurons,” Neural Networks, Vol.14, No.9, pp.1145-1152, 2001.

研究グループ名:産業技術総合研究所

- Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie, “Planning Walking Patterns for a Biped Robot,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.17, No.3, pp.280-281, 2001.
- E. Oyama, K. F. MacDorman, A. Agah, T. Maeda and S. Tachi, “Coordinate transformation learning of hand position feedback controller with time delay,” Neurocomputing, Vol.38-40, pp.1503-1509, 2001.
- E. Oyama, A. Agah, K. F. MacDorman, T. Maeda, and S. Tachi, “A modular neural network architecture for inverse kinematics model learning,” Neurocomputing, Vol.38-40, pp.797-805, 2001.
- E. Oyama, N. Y. Chong, A. Agah, T. Maeda and S. Tachi, K. F. MacDorman, “Learning a Coordinate Transformation for a Human Visual Feedback Controller based on Disturbance Noise and the Feedback Error Signal,” Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp.4186-4193, Seoul, Korea, 2001.
- E. Oyama, N. Y. Chong, Arvin Agah, T. Maeda and S. Tachi, “Inverse Kinematics Learning by Modular Architecture Neural Networks with Performance Prediction Networks,” Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1006-1012, Seoul, Korea, 2001.

(2) 特許出願

なし