

制御系理論研究チーム

Laboratory for Bio-Mimetic Control Systems

チームリーダー 細江 繁幸

HOSOE, Shigeyuki

生物の運動機能は、現在の最も進んだロボットと比較しても、遥かに柔軟で多様性に富み、かつ環境への優れた適応性を有している。このような生物の優れた運動能力は、モジュール間での並列的な情報の時空間マッピングおよびそれらを自己組織的に全体としてまとめる機能、すなわち、自己組織化機能により生み出されている。本研究ではこのような観点から、並列分散アーキテクチャおよび自己組織化機能を非線形ダイナミカルシステムとして解析し、自律分散システム設計のための理論的枠組みを追求してきた。また、これらの理論をもとに、歩行運動や上肢動作の時空間運動パターン生成機構を解明し、生体ミメティックロボットへの応用を目指した。さらに、生体の運動制御機構のモデリングについても研究を進めている。

1. 生体運動制御機構のモデル化と解析(細江, Luo, 中山, 太田, 三田, 山田, 藤井^{*1}, 相原^{*1})

ロボットは、操作者からの指示動作を忠実に再現することができる。しかし、人間のように環境の状況変化に順応し適切な行動を随時計画し、動作することは極めて不得意である。環境との相互作用下における生物の順応性を機械系で実現するためには、まず生体の運動制御機構をモデリングし、仕組みを解明することが大変重要である。

本研究では、効率的に環境の状態を推定し、環境との相互作用を安定化できる小脳中枢関連の神経モデル、筋骨格系による運動実現機構の制御モデルを提案した。従来の運動生理学ではセンシング→行動決定→運動実現というシーケンシャルな制御構造を暗黙の内に容認してきたが、提案した神経モデルではセンシングと運動制御は同一の機構により同時に行われる。また、提案した制御モデルでは、 α 繊維入力力は筋の収縮量を、 γ 繊維入力力は筋紡錘両端部の粘弾性を調整する機能を担うものとして定式化した。

一方、実際のタスク遂行における人間の未知環境への適応動作を解析するため、本研究は粘弾性が可変なクランク回転機構を構築し、健常者およびパーキンソン病患者に作業タスクを課すことによって、作業の適応過程の特徴を明らかにし、また、運動の習熟度を安定性解析や最適化の観点から調べた。

2. ロボティックス(細江, Luo, Svinin, 小田島, 伊藤, 湯浅, 成清, 片山, 安藤^{*1}, Huang^{*2})

生物はロボットと比べ遥かに高次の運動自由度を有する。このため、生物の動きを工学的に実現する場合、軌道計画の計算量の指数関数的増大、力の冗長性による不安定化など、多自由度性から生じる諸課題を解決しなければならない。本研究はマニピュレーションと歩行運動に分けて、以下の研究を実施した。

まず、マニピュレーション関係では、本研究で拡散学習理論を構築し、冗長マニピュレータの逆運動学マップの自己組織化や、ロボット最適制御の空間汎化問題に適用した。一般に、最適制御問題は2点境界値問題を解く必要があり、解析的にも数値的にも解を求めることが困難である。本研究では、まず、いくつかの最適解が既知であると仮定し、それらの最適入力のパラメトリゼーションを行うことによって、基底関数と重み行列の積に分解する。そして、拡散学習方式を用いて、有界空間における最適制御の汎化を行った。これによって、最適制御の計算量を大幅に減らすことができ、また局所情報のみで高速の並列分散処理が可能となった。両手協調や多本指のような冗長駆動系をもつ閉リンク機構によるマニピュレーションの研究についても、本研究は数理解析を通して、閉リンク機構の姿勢、内力とシステム全体の剛性特性、安定性との関係を明らかにし、分散協調制御方式を提案した。

一方、歩行運動については、均質モジュールで構成する多脚歩行ロボットを製作し、階層型制御構造で環境変化にすばやく反応して多様な歩行パターンを実現することのできる歩行制御方式を確立した。この方式では、ロボットの上位制御層で環境を認識して、身体全体の運動を計画する。また下位各脚の制御器ではベクトル場を用いてロボット全体における自身の配置に応じて行動をし、結果として協調のとれた目標身体運動を実現できる。

3. 時空間環境情報認識と同定(細江, Luo, 上山, 佐野)

生物は多様な外界センサー機構を能動的に活用することによって、未知環境の時空間情報を認識し、身体の運動制御に生かしている。これに関して本研究では、視覚情報による運動物体の認識や、未知システムの構造を能動的に同定するための刺激信号の設計問題を考察した。まず、運動物体の認識については、本研究は非線形偏微分方程式を導出して並列分散方式で動画像における運動物体の境界を高速に抽出する方式を検討した。また、未知システムの同定について、線形システムを対象とし、外乱およびモデル化できないダイナミクスが存在する状況下で、その未知パラメータを同定するための最適な時系列信号の設計理論を与えた。

^{*1} ジュニア・リサーチ・アソシエイト, ^{*2} 訪問研究員

誌上発表 Publications

(原著論文) *印は査読制度がある論文誌

Nakagaki T., Yamada H., and Ueda T.: "Interaction between cell shape and contraction pattern in the *Physarum plasmodium*", Biophys. Chem. **84**, 195-204

(2000). *

Fuwa K., Narikiyo T., and Funahashi Y.: “Construction of an inverse model with cutoff filter and its application to a model feedback control system”, *Electr. Eng. Jpn.* **133**, No. 4, pp. 79–90 (2000). *

Nonaka H., Mita K., Akataki K., Watakabe M., and Yabe K.: “Mechanomyographic investigation of muscle contractile properties in preadolescent boys”, *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.* **40**, 287–293 (2000). *

Akataki K., Mita K., Watakabe M., and Itoh K.: “Mechanomyogram and force relationship during voluntary isometric ramp contractions of the biceps brachii muscle”, *Eur. J. Appl. Physiol.* **84**, 19–25 (2001). *

Nakagaki T., Yamada H., and Toth A.: “Maze-solving by an amoeboid organism”, *Nature* **407**, 470 (2000). *

佐野滋則, 尾形和哉, 早川義一: “最小二乗評価関数に基づく非構造的な不確かさを考慮したパラメータ推定誤差の上界を用いた入力信号の設計”, *計測自動制御学会論文集* **36**, 575–582 (2000). *

成清辰生, 岡田 進, Tuan H. D., Hung V. Q.: “遠隔操作による宇宙ロボットのベース姿勢安定化制御”, *計測自動制御学会論文集* **37**, 73–82 (2001). *

不破勝彦, 成清辰生, 舟橋康行: “デュアルオブザーバによる外乱除去制御系の一構成法”, *電気学会論文誌 C* **121**, 333–341 (2001). *

伊東保志, 渡壁誠, 赤滝久美, 三田勝己: “筋音図計測に用いるトランスデューサの物理的特性”, *電子情報通信学会論文誌 D-II* **84**, 408–416 (2001). *

(単行本)

湯浅秀男: “みんなの動きが自然にまとまる?: 並列, 拡散, 流れ”, 知の創発: ロボットは知恵を獲得できるか, 伊藤宏司(編), NTT 出版, pp. 14–30 (2000).

(その他)

伊藤聡: “運動の適応制御の数理的・工学的理解”, *運動の神経科学*, 西野仁雄, 柳原大(編), NAP, 東京, pp. 165–176 (2000).

口頭発表 Oral Presentations

(国際会議等)

Nakagaki T. and Yamada H.: “Rhythmic contraction and its fluctuations in an amoeboid organism of the *Physarum plasmodium*”, 2nd Int. Conf. on Quantum Information II, Nagoya, Mar. (1999).

Svinin M. M., Yamada K., Ushio S., and Ueda K.: “A minimal simulation model for evolving periodical gaits for multi-legged walking robots”, *Intelligent Autonomous Systems 6 (IAS-6)*, Venice, Italy, July (2000).

Yamada K., Svinin M. M., and Ueda K.: “Reinforcement learning with autonomous state space construction using unsupervised clustering method”, *Intelligent Autonomous Systems 6 (IAS-6)*, Venice, Italy, July (2000).

Takamatsu A., Fujii T., Tanaka R., Yamada H., Nakagaki T., and Endo I.: “A multiple coupled oscillator system of the true slime mold”, *Gordon Research Conf. on Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems*,

Bristol, USA, Aug. (2000).

Luo Z.-W., Ando H., Watabe K., and Kato A.: “Spatial generalization of optimal control for robot manipulators”, 2000 IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON-2000), Nagoya, Oct. (2000).

Katada Y., Svinin M. M., Matsumura Y., Ohkura K., and Ueda K.: “Stable grasp planning by evolutionary programming”, 2000 IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON-2000), Nagoya, Oct. (2000).

Svinin M. M., Kojima F., Katada Y., and Ueda K.: “Initial experiments on reinforcement learning control of cooperative manipulations”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Oct. (2000).

Ito S. and Kawasaki H.: “A standing posture control based on ground reaction force”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Oct. (2000).

Svinin M. M., Hosoe S., Ushio S., and Ueda K.: “Experiments on decentralized reinforcement learning of periodical gaits for locomotion robots”, *Int. Symp. on Robotics and Automation*, Monterrey, Mexico, Nov. (2000).

Yamada K., Ohkura K., Svinin M. M., and Ueda K.: “Adaptive segmentation of the state space based on bayesian discrimination in reinforcement learning”, 6th Int. Symp. on Artificial Life and Robotic (AROB 6th '01), Tokyo, Jan. (2001).

Ushio S., Svinin M. M., Ueda K., and Hosoe S.: “An evolutionary approach to decentralized reinforcement learning for walking robots”, 6th Int. Symp. on Artificial Life and Robotic (AROB 6th '01), Tokyo, Jan. (2001).

Odashima T., Luo Z.-W., and Hosoe S.: “A hierarchical approach for environmental adaptive locomotion control of multi-legged robot”, 6th Int. Symp. on Artificial Life and Robotic (AROB 6th '01), Tokyo, Jan. (2001).

(国内会議)

保田俊行, Svinin M. M., 上田完次: “階層型強化学習を用いた自律歩行ロボットの行動学習”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00*, (日本機械学会), 熊本, 5月 (2000).

児島史周, 片田喜章, Svinin M. M., 上田完次: “学習を用いた複数アーム型ロボットによる物体の協調持ち上げ作業”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00*, (日本機械学会), 熊本, 5月 (2000).

山田和明, Svinin M. M., 上田完次: “教師なしクラスタリング手法を用いた状態空間の自律的構成”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00*, (日本機械学会), 熊本, 5月 (2000).

片田喜章, 松村嘉之, Svinin M. M., 大倉和博, 上田完次: “進化した計算を用いた多指ロボットハンドによる安定把持計画”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00*, (日本機械学会), 熊本, 5月 (2000).

佐野滋則, 尾形和哉, 早川義一: “非構造的な不確かさを考慮した同定入力信号と周波数重みの同時最適化”, 第29回制御理論シンポジウム, (SICE), 刈谷, 5月 (2000).

伊藤聡, 湯浅秀男, 羅志偉, 伊藤正美, 柳原大: “四足歩行

- パターンの適応モデルとロボットへの実装”, 第 39 回日本 ME 学会大会, 名古屋, 5 月 (2000).
- 林川一史, 北岡久弥, 羅志偉, 細江繁幸, 渡部慶二: “テレマニピュレーションにおける視覚システムの構築と制御”, 第 12 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会), 飯塚, 7 月 (2000).
- 安藤英由樹, 羅志偉, 細江繁幸, 渡部慶二, 加藤厚生: “拡散学習方式によるロボット最適制御の空間汎化に関する考察”, 第 12 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会), 飯塚, 7 月 (2000).
- 伊藤聡, 川崎晴久: “床反力に基づく一脚リンク系の姿勢制御”, 第 12 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会), 飯塚, 7 月 (2000).
- 佐野滋則, 尾形和哉, 早川義一: “非構造的な不確かさを考慮したパラメータ推定誤差の上界の評価に基づく同定実験計画”, 第 12 回電気学会産業応用部門大会, 徳島, 8 月 (2000).
- 湯浅秀男, 稲垣伸吉: “自律分散型多脚歩行ロボット系における歩容生成”, 日本機械学会 2000 年度年次大会, 名古屋, 8 月 (2000).
- 片田嘉章, 松村嘉之, 大倉和博, 上田完次, Svinin M. M.: “Robust-EP を用いた多指ロボットハンドの外乱を考慮した安定把持計画”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, 草津 (滋賀県), 9 月 (2000).
- 伊藤聡, 川崎晴久: “外力に適應する歩行系の姿勢制御”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, 草津 (滋賀県), 9 月 (2000).
- 山田和明, 大倉和博, Svinin M. M., 上田完次: “強化学習における状態空間の分割法: ベイズ識別関数に基づく手法の提案”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, 草津 (滋賀県), 9 月 (2000).
- 天野真輝, 安藤英由樹, 小田島正, 羅志偉, 細江繁幸, 渡部慶二: “時変通信遅れを考慮した双腕協調テレポートシステム制御設計”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, 草津 (滋賀県), 9 月 (2000).
- 小田島正, 羅志偉, 細江繁幸: “多脚歩行ロボットの障害物回避行動に関する考察: 階層型制御構造の提案”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, 草津 (滋賀県), 9 月 (2000).
- 片山正純, Sambuichi E. M., 山崎一男: “力覚提示装置を用いた対象物操作中の把持力解析”, 第 23 回日本神経科学大会・第 10 回日本神経回路学会合同大会, 横浜, 9 月 (2000).
- 山田裕康, 中垣俊之: “粘菌変形体の原形質流路形態と振動パターン”, 日本物理学会第 55 回年次大会, 新潟, 9 月 (2000).
- Sambuichi E. M., 山崎和男, 片山正純: “対象物操作中の把持力生成メカニズムに関する検討”, 平成 12 年度電気関係学会東海支部連合大会, 静岡, 9 月 (2000).
- 山崎建治, 笠嶋秀樹, 片山正純: “到達・把持運動制御メカニズムに関する検討”, 平成 12 年度電気関係学会東海支部連合大会, 静岡, 9 月 (2000).
- 伊藤昌明, 片山正純, 宇野洋二: “腕運動における予測・運動に関する考察”, 平成 12 年度電気関係学会東海支部連合大会, 静岡, 9 月 (2000).
- 伊藤晋彦, 赤滝久美, 渡壁誠, 三田勝己: “MMG 信号に適用した短時間フーリエ解析法の検討”, 第 15 回生体・生理工学シンポジウム, 名古屋, 10 月 (2000).
- 平松誠治, 野中寿子, 渡壁誠, 加藤厚生, 三田勝己: “下肢関節可動域の年齢変容: 幾何学的解析”, 第 15 回生体・生理工学シンポジウム, 名古屋, 10 月 (2000).
- 上山英三, 湯浅秀男, 細江繁幸: “反応拡散波動モデルに基づく運動視知覚のパターン形成”, 第 15 回生体・生理工学シンポジウム, 名古屋, 10 月 (2000).
- 中山学之, 木村英和: “関節角位置・速度の推定値を用いた小脳・中脳の運動制御モデル”, 第 23 回 Dynamical System Theory シンポジウム, (計測自動制御学会), 長岡, 11 月 (2000).
- 羅志偉, 細江繁幸, 渡部慶二: “テレ・マニピュレーションにおける操作者にやさしい視覚システムの制御設計”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, 東京, 12 月 (2000).
- 渡壁誠, 伊東保志, 赤滝久美, 三田勝己: “筋音図法 (Mechanomyography) における技術的要素: トランジューサの物理的特性”, 電子情報通信学会 ME とサイバネティクス研究会, 豊橋, 12 月 (2000).
- 中山学之: “筋・脊髄系の関節角平衡位置-トルクハイブリッド制御モデル”, ME とバイオサイバネティクス研究会 (MBE), (電子情報通信学会, 日本 ME 学会, IEEE 東京支部), 熊本, 1 月 (2001).
- 湯浅秀男, 新井民夫: “グラフの双対性とグラフ上のハミルトン系の双対な変数”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).
- 高松敦子, 田中玲子, 山田裕康, 中垣俊之, 藤井輝夫, 遠藤勲: “リング状に結合した粘菌振動子系における時空間振動パターン”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).
- 上山英三, 湯浅秀男, 細江繁幸: “境界を含む時変な運動ベクトル場の推定に対する一考察”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).
- 山田裕康, 中垣俊之, 田中玲子, 高松敦子: “振動子の結合形態と位相パターン: 粘菌のネットワーク形態ダイナミクスの解析をめざして”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).
- 小林祐一, 湯浅秀男, 新井民夫: “多次元遅延信号に基づく強化学習”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).
- 藤井亮暢, 石黒章夫, 大津啓, 内川嘉樹, 青木猛, Eggenberger P.: “動的再編成ニューラルネットワークによる二脚歩行動作の実現”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).
- 中垣俊之, 山田裕康: “粘菌の経路探索”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).
- 田中玲子, 山田裕康, 高松敦子, 中垣俊之: “粘菌振動子系の解析: 対称系の Hopf 分岐理論の適用”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・

情報部門), 福岡, 1 月 (2001).

稲垣伸吉, 湯浅秀男, 新井民夫: “波動方程式による自律分散型多脚歩行ロボットの歩行パターン生成に関する研究”, 第 13 回自律分散システム・シンポジウム, (計測自動制御学会システム・情報部門), 福岡, 1 月 (2001).

渡壁誠, 三田勝己, 野中寿子, 平松誠治, 加藤厚生: “幾何学的表記法を用いた下肢関節可動性の分析”, 日本機械学会第 13 回バイオエンジニアリング講演会, 仙台, 1 月 (2001).

伊藤昌明, 片山正純: “手腕運動に関する予測的調節・制御メカニズムの検討”, ME とバイオサイバネティックス研究会 (MBE), 町田, 3 月 (2001).

中山学之: “小脳及び脊髄の計算モデルを連結した小脳-脊髄連関制御系に基づく肢の運動制御”, ME とバイオサイバネティックス研究会 (MBE), 町田, 3 月 (2001).

Sambuichi E. M., 片山正純: “対象物操作における把持力生成メカニズム”, ME とバイオサイバネティックス研究会 (MBE), 町田, 3 月 (2001).

山田裕康, 田中玲子, 中垣俊之: “折り返し対称性の破れによる葉序遷移”, 日本物理学会第 56 回年次大会, 八王子, 3 月 (2001).

Research Subjects and Members of Laboratory for Bio-Mimetic Control Systems

1. Modeling and Analysis of Motor Control Mechanisms in Animals
2. Robotics
3. Pattern Recognition in Spatio-Temporal Environment and Identification

Head

Dr. Shigeyuki HOSOE

Research Scientists

Dr. Mikhail SVININ

Dr. Ken OHTA

Dr. Eizo UEYAMA

Mr. Takayuki NAKAYAMA

Dr. Shigenori SANO

Dr. Tadashi ODASHIMA

Visiting Members and Postdoctoral Fellows

Dr. Zhi-Wei LUO (Fac. Eng., Yamagata Univ.)*

Dr. Hideo YUASA (Grad. Sch. Eng., Nagoya Univ.)*

Dr. Satoshi ITO (Fac. Eng., Gifu Univ.)*

Dr. Hiroyasu YAMADA (Res. Inst. Electr. Sci., Hokkaido Univ.)*

Dr. Katsumi MITA (Inst. Dev. Res., Aichi Human Service Cen.)*

Dr. Masazumi KATAYAMA (Dept. Inf. Comput. Sci., Toyohashi Univ. Technol.)*

Dr. Tatsuo NARIKIYO (Fac. Eng., Toyota Technol. Inst.)*

Dr. Yi HUANG (Jpn. Int. Sci. Technol. Exch. Cen.)

Mr. Akinobu FUJII (Grad. Sch. Eng., Nagoya Univ.)

Mr. Ryouichi AIHARA (Grad. Sch. Human Inf., Nagoya Univ.)

Ms. Hideyuki ANDO (Grad. Sch. Eng., Aichi Inst. Univ.)

(* part time)