

平成 17 年度研究成果報告書

「身体・脳・環境の相互作用による
適応的運動機能の発現
移動知の構成論的理解」

領域代表者 浅間 一（東京大学）



平成 18 年 4 月

文部科学省科学研究費補助金
（特定領域研究）

領域番号 454

略称：移動知

研究設定期間：平成 17 年度～平成 21 年度

目次

第1部 概要・総括班報告

特定領域研究「移動知」の概要 身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現 - 移動知の構成論的理解 -	浅間 一	1
身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現に関する総括研究	浅間 一, 土屋和雄, 伊藤宏司, 矢野雅文, 大須賀公一, 高草木 薫, 神崎亮平, 青沼仁志, 石黒章夫, 太田 順	3

第2部 A班報告

A班：環境適応 研究報告	伊藤宏司	5
大脳皮質運動関連領野が創る「見なし情報」による随意運動制御	矢野雅文	7
未知環境下における随意運動発現・調節の脳内機構の解明	伊藤宏司, 近藤敏之	11

第3部 B班報告

B班：研究活動報告	土屋和雄	15
大脳基底核と歩行の制御 - 脊髄運動細胞に誘発されるシナプス機構 -	高草木 薫	17
基底核 - 脳幹 - 脊髄系神経回路網と身体筋骨格構造の力学的秩序形成による歩行運動生成	荻原直道, 杉本靖博, 青井伸也, 辻田勝吉, 土屋和雄	21
脳・環境・身体の動的相互作用による適応的口コモーションの工学的実現	細田耕, 木村浩, 井上康介	25

第4部 C班報告

C班：社会適応のメカニズム解明	青沼仁志	29
環境に適応するための高次行動を制御する神経生理機構のシステムの理解	青沼仁志，神崎亮平	31
昆虫間相互作用のモデル化と群ロボット設計	太田 順，浅間 一，川端邦明	35
生体の適応的行動発現に対するネットワーク機能構造からの理解	倉林大輔，船戸徹郎	39

第5部 D班報告

D班：移動知共通原理の活動報告	大須賀公一，石黒章夫，鄭心知	43
-----------------	----------------	----

第6部 付録

メンバーリスト	47
研究業績・受賞・特許	48
活動記録	58
評価班メンバーによる内部評価	62

特定領域研究「移動知」の概要

身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現

- 移動知の構成論的理解 -

東京大学 浅間 一

1. はじめに

平成 17 年度よりスタートした、文部科学省科学技術研究補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現 - 移動知の構成論的理解 -」は、5 年間のプロジェクトである[1]。平成 17 年度は計画班で研究が開始されたが、平成 18 年度および平成 20 年度から 2 年間行う研究を公募する。すでに本研究領域に関連した計測自動制御学会誌「計測と制御」の特集号が発刊されたが[2]。ここではまず、本特定領域研究の背景・目的と移動知の概念、特定領域研究の概要などについて述べる。

2. 移動知研究の目指すもの

われわれ人間は、未知の環境においても適応的に行動することができる。すべての動物は、様々な形態の移動行動(遊泳, 飛翔, 歩行など), リーチング, 捕獲などの腕・手の動作行動, 他の個体に対する社会性行動などを, 多様で複雑な環境において適応的に行動することができる。これらの機能は, 動物が生存する上で最も基本的で, 必須な知的機能(生存脳機能[3])である。

このような適応的行動は, 脳疾患によって損なわれることが知られている。パーキンソン病は, 典型的な適応的運動機能障害の例であるし, うつ病や自閉症も社会的な適応機能障害であると考えられることができる。

近年, 高齢化や社会環境の変化によって, このような適応的行動障害を持つ人の割合が急激に増加しており[4], それに対する取り組みが急務となっている。しかしながら, このような適応行動がどのようなメカニズムで発現するかについてはほとんど明らかになっていない。移動知研究は, まさにこのような生物の適応的行動がどのようなメカニズムで発現するのかを解明することを目的としている。

3. これまでの取り組み

移動知研究は, 北村新三先生(神戸大学副学長)が領域代表をされた, 科学技術研究補助金重点領域研究「創発的機能形成システムのシステム理論」(平成 7~9 年度)[5]に端を発する。生物が有する創発的機能を人工的に実現するにはどうすればよいか, その設計論に関しては, 重点領域研究期間内に十分

な成果を得ることが必ずしもできなかったのではないかとその思いがあり, 同重点領域研究に参画していたロボティクス関連研究者が中心となって, 重点領域終了後も議論を続けていた。

その後, 東北大学電気通信研究所での研究プロジェクト(代表: 矢野雅文(東北大), 他)や, 平成 14 年度日産科学技術振興財団「移動知の発現システムの構築と制御メカニズムに関するワークショップ」(代表: 太田 順(東大))などで議論を重ね, 平成 15 年 1 月からは, 計測自動制御学会システム・情報部門調査研究会「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現に関する調査研究会」を発足させ, 動物が有する適応機能のメカニズム解明に向け, 生物学と工学の研究者が一緒に議論を行ってきた。その成果に関しては, これまでの国内外の学会での OS などを通じて発表を行っている。

4. 移動知研究のコンセプトと概要

我々は, 動物が有する適応的行動能力は, 「動く」ことによって得られると考えている。静止している状態では, 「脳」と「身体」と「環境」の相互作用は比較的少ないが, 一旦動きはじめると, 身体を動かすための信号が, 脳から身体に活発に出力され, また身体と環境との相互作用が生まれ, 身体を通じて大量の感覚情報が脳に入ってくる。

従来のロボティクスは, まず知覚(センシング), 次にそれに基づく行動計画, 行動(アクチュエーション)という流ればかりが目立ってきたが, そもそも行動しなければ, 知覚情報はほとんど得られない。行動によって知覚, 認知し, それが行動を生むという連関で適応的行動の知を捉える必要がある。我々は, このように, 動くことで「脳」と「身体」と「環境」の動的な相互作用が生じ, それによって適応的行動能力が発現するのではないかと考えており, このような考え方を, 移動知(Mobiligence)と呼んでいる。

これまでの神経生理学などの生物学の研究によって, 神経回路や, そこで働く神経修飾物質などに関して, 多くことが明らかになってきた。その知見の多くは, 動物実験など, 解析的手法によって得られたものであるが, 生物学における既存のアプローチでは, 動物が静止した状態での脳単体の機能しか観

測することはできない。すなわち、このアプローチでは、我々が注目している、動いている状態での脳と身体と環境の相互作用に関して観測することはできない。パーキンソン病の例では、これまでの脳生理学の研究によって、黒質緻密部の異常、ドーパミンの低下などの生理学的知見が得られているものの、それがどのようなメカニズムで歩行運動障害を引き起こしているのかについてはいまだ謎となっている。

我々はそのような問題に対し、生物学の研究者と工学の研究者が一体となり、生物学で得られた神経生理学モデルに基づき、工学の動的なシステムのモデリング手法を応用することで生体システムモデルを構成するという、構成論的・システム論的アプローチによって移動知発現のメカニズムを明らかにしていきたいと考えている。具体的には、生理学的解明(生物学)、モデル生成と人工システムによる実験(工学)、モデルの検証(生物学)、原理の解明・応用(工学)という、生物学と工学の融合プロセスによって研究を推進する。ここで、構成論的アプローチとは、対象をモデル化し、それをシミュレータやロボットなど、システムとして人工的に構成して、実験的に動作させその挙動を解析することで、対象を理解したり、仮説を生成、検証するアプローチを言う。

移動知研究では、適応的行動能力の中でも、(1) 環境の変化に適応させ、認知するメカニズム、(2) 環境に対して身体を適応させるメカニズム、(3) 他者ならびにその集合体としての社会に適応させるメカニズム、という三つの適応機能に注目して研究を行うとともに、移動知生成の普遍的な共通原理の解明に迫りたいと考えている。計画班においては、具体的な例題として、腕のリーチング動作における環境認知・適応メカニズムの解明、歩行動作における身

体適応メカニズムの解明、昆虫における社会性行動の適応メカニズムの解明などに取り組むとともに、力学的な観点から移動知の共通原理を探る。また公募によって、さらに多様な対象に関する適応メカニズムを取り上げつつ、その普遍的な基本原理を明らかにしたいと考えている。図1に移動知研究の枠組みを示す。

5. 期待される効果

移動知研究は、生物学分野の研究として、生物の持つ様々な適応的行動のメカニズムを解明することのみならず、医療分野における運動障害の新治療法の発見、リハビリ支援システムの開発などにおいて、また工学分野における知的人工システムの設計原理の導出において、大きな貢献を果たすと考えている。さらには「移動知」という新しい研究分野を開拓し、生工融合型の研究組織を立ち上げ、生物学研究を行える工学研究者、工学研究を行える生物学研究者の育成を図りたいと考えている(図2)。

参考文献

- [1] <http://www.arai.pe.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>
- [2] 計測と制御「特集：移動知：能動的な移動機能がもたらす創発的知能」,計測自動制御学会,vol. 44, no. 9, (2005).
- [3] 高草木 薫, 浅間 一：移動知：行動からの知能理解 - 構成論的観点と生物学的観点から, 計測と制御, vol. 44, no. 9, pp. 580-589, (2005).
- [4] 厚生労働省 HP.
- [5] 北村新三：文部省科学研究費補助金研究の成果の概要と評価「創発的機能形成のシステム理論」, (1998).

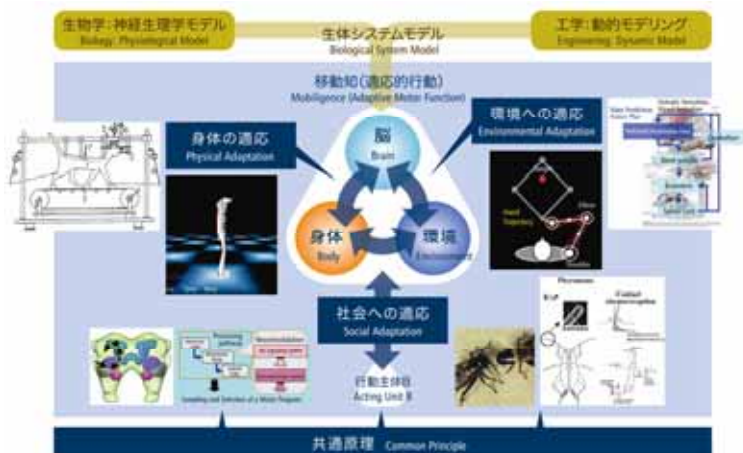


図1 移動知研究の枠組み



図2 期待される効果

身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現に関する総括研究

浅間 一，土屋和雄，伊藤宏司，矢野雅文，大須賀公一，
高草木 薫，神崎亮平，青沼仁志，石黒章夫，太田 順

1. 目的

本特定領域研究全体の研究方針の策定，研究項目間の企画調整，研究成果に対する評価・助言を行うとともに，公募方針の決定などを行う。また，関連研究分野の活性化を目的としたシンポジウムや研究会を企画し，研究成果の一般への広報活動を行うとともに，研究者間の密な情報交換，相互理解と交流を推進する。中間評価，事後評価のみならず，定期的に国際研究集会や国際会議・国内学会学術講演会のオーガナイズドセッションを企画し，研究成果の国際的評価を実施する。さらに，生工連携研究に取り組める人材の育成のための教育・研究プログラムを設計し，本特定領域の研究拠点や研究組織の設置を図る。

2. 総括班会議の実施

以下の総括班会議を実施し，研究課題に関する企画・調整，研究方針策定に関する議論を行った。

(1) 第1回総括班会議

日時：2005年10月14日(金)16:00-19:30

場所：東京大学工学部14号館

(2) 第2回総括班会議

日時：2005年12月5日(月)13:00-15:30

場所：北海道大学電子科学研究所

(3) 第3回総括班会議

日時：2006年3月6日(月)14:00-17:30

場所：東京大学柏総合研究棟

3. 研究課題に関する調整・方針策定

特定領域研究全体の研究方針を策定した。計画班に関しては，本領域の特徴とする生工連携がスムーズにかつ効果的に行えるように，班ごとのテーマの調整を行うとともに，合同班会議，公開班会議など，班間の連携を促進した。また，公募において補充すべき課題として，研究計画班研究でカバーしきれない研究課題などを明らかにし，公募班も含めた領域全体の整合性を図るべく，研究課題の調整を行った。

また，国際・国内シンポジウムの開催，チュートリアルの実施などを含んだ研究拠点の形成，内部評価の実施，国際会議・国内学会講演会などでのオーガナイズドセッションの企画，ホームページの構築，研究成果・活動記録に関するデータベースの作成と広報，報告書の作成などを行った。

4. 国際シンポジウムの開催

2005年12月4日(日)に，公開国際シンポジウムを実施した。領域代表である浅間が本特定領域研究の概要について講演を行うとともに，A, B, C, D班の代表である，伊藤，土屋，青沼，大須賀が，各班における研究の目的，計画研究の内容について講演を行った。また，総括班の評価メンバーである，Prof. Sten Grillner (Karolinska Institute, Sweden), Prof. Rolf Pfeifer (University of Zurich, Switzerland), Prof. Avis H. Cohen (University of Maryland, USA)による招待講演が行われた。移動知研究に関する活発な議論が行われ，移動知研究の概念が共有された。また，移動知研究の重要性が再認識された。参加者数は約80名であった。シンポジウムの様子を図1に示す。



図1 第1回移動知国際シンポジウムの様子

5. 研究拠点，チュートリアルの企画，策定

生工融合研究としての移動知研究を行うための人材を育成するために，以下の実験実習プログラムおよびチュートリアルを企画し，開催した。

(1) 第1回実験実習プログラム

日時：2005年11月22日(火)13:00~16:00

場所：東京大学神崎・高橋研究室

神経行動学研究法の紹介，生理ブースにおけるデモンストレーションを行った。

(2) 第1回チュートリアル

日時：2006年3月14日(火)~17日(金)

場所：北海道大学電子科学研究所青沼研究室および旭川医科大学高草木研究室

工学研究者のための生物学チュートリアルを実施した。

6. 内部評価

前述の国際シンポジウムにおいて、3名の海外の招待講演者、および総括班の評価メンバーである、北村新三先生(神戸大)、森 茂美先生(生理学研)、鈴木木次先生(金沢工大)の合計6名の評価委員による内部評価を行った。今年度は研究の初年度であることから、主に領域研究の構想と計画に関する評価を行った。その結果、本プロジェクト研究の重要性が指摘され、非常に高い評価を得た。各評価メンバーのコメントを巻末の付録に記載する。

また、年度末に領域代表および幹事による班ごとのヒアリングを各班代表に対して行い、計画班の研究進捗および各班内の生工連携に関する評価を行い、研究が順調に進捗していることを確認した。

7. 特集号及びオーガナイズドセッションの実施

計測自動制御学会の学会誌「計測と制御」において本プロジェクトの特集号を企画し、本プロジェクトの概要および計画班の研究について解説した[1]。

また、以下の国内学会学術講演会および国際会議において、オーガナイズドセッションを企画した。

- (1) 計測自動制御学会システム・情報部門講演会 (SSI2005)

日時：2005年11月28日(月)～30日(水)

場所：九州大学医学部百年記念講堂

- (2) 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2005)

日時：2005年12月16日(金)～18日(日)

場所：熊本電波工業高等専門学校

- (3) 計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム

日時：2006年1月26日(木)～27日(金)

場所：福井県国際交流会館

- (4) 9th International Conference on Intelligent Autonomous Systems 9 (IAS-9)

日時：2006年3月7日(火)～9日(木)

場所：東京大学柏キャンパス総合研究棟

8. 広報活動、その他

広報活動の一環としてホームページ(図2)を作成するとともに[2]、本特定領域研究の活動をまとめたデータベース化を行い、ホームページ上に「活動記録」として掲載した[3]。また、公募を行うにあたり、その募集に関する広報活動を行った。本特定領域の国内外向けパンフレットを製作し、配布した。また、報告書の取りまとめ、製作を行った。

参考文献

- [1] 計測と制御「特集：移動知：能動的な移動機能をもたらず創発的知能」、計測自動制御学会, vol. 44, no. 9, (2005).

[2]<http://www.arai.pe.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>

[3]<http://www.arai.pe.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/act/index.html>



図2 特定領域研究(移動知)のホームページ(日本語)

A班:環境適応 研究報告

東京工業大学大学院総合理工学研究科 伊藤宏司

1. はじめに

生物の運動制御系は、行動を出力し、情報を受け取る<身体>、制御中枢である<脳>および<外部環境>から構成される。身体は多数のセンサ、アクチュエータ(効果器)群から構成され、環境との相互作用を媒介する。身体・環境の相互結合は、環境を規定するとともに、自由度に制約を与える。したがって、脳にとっては、身体および環境は制御すべき対象であり、外部ダイナミクスに相当する。一方、身体はまた、脳と結合して、内部ダイナミクスを形成する。この脳—身体—環境の動的関係を目的・タスクに適合した特性に自ら調節することが、運動・行動制御の本質である。言い換えれば、脳—身体—環境からなる冗長多自由度系に対して、身体を媒介とする内部ダイナミクスと外部ダイナミクスの動的相互作用のもとで得られる時間的・空間的文脈性の中から適切な拘束条件を見出し、環境に適合した内部ダイナミクスを生成することが「環境適応」における最も重要な課題である。

A班では、これらの課題を明らかにするため、随意運動制御に関する2つの研究班を構成した。

2. 研究報告

A01班:大脳皮質運動関連領野が創る「見なし情報」による随意運動制御(東北大学電気通信研究所 矢野雅文)

環境の状態をすべて知ることは不可能であり、生物は自分自身と環境の関係を仮設せざるを得ない(Fig.1参照)。本研究では、システムが仮設する環境との予測的な関係を「見なし情報」と呼ぶ。ある環境における運動目的は、仮設された見なし情報によって具体的に設定される。従って、見なし情報は随意運動に必要な最上位の拘束条件と考えることができる。この結果、運動遂行に必要なさまざまなレベルの拘束条件は仮設された見なし情報に基づいて設定されるべきものとなる。さらに、環境変動に対応するためには、見なし情報を時々刻々生成し、それを実時間で充足する必要がある。これらの過程こそが随意運動を実行するために大脳皮質運動関連領野に求められる計算論的課題である。このスキームを実現するためには、生理学的知見をもとに、構成論的に随意運動モデルを作成し、その環境適応能力を評価する必要がある。

本年度は、随意運動としてリーチング運動と歩行運動を取り上げた。

(1) リーチング運動

リーチング運動において最上位の拘束条件は、どの目標点にいつ到達するかという運動目的である。運動目的はシステム自らが作り出す必要があり、制御の見なし情報となる。リーチング運動では、この見なし情報に基づいて、手先の速度ベクトルが下位の拘束条件として設定され、この



Fig.1 “Mi-Nashi” information

拘束条件を充足することによって運動制御が遂行される。本年度は、見なし情報があらかじめ与えられているとして、その情報に基づいて、環境ダイナミクスの変化に対応する手先目標速度をリアルタイムに生成する手法を提案した。

(2) 2足歩行

歩行は地面と脚の力学的な接触が不連続に繰り返される運動であり、重力場内で行われる。従って、身体に加わる瞬間的な外力、荷物などの定常的な負荷、あるいは路面状況による負荷変化にリアルタイムに対応する必要がある。このためには、環境変化に応じて、自分自身の神経生理学的・身体学的特性を変化させる機構が必要不可欠である。身体特性を決定づけるのは、各筋の動的粘弾性特性であり、その特性は筋がどの動作点(筋緊張レベル)で活動しているかによって変化する。この筋活動レベルは、大脳基底核からの下降性投射路によって調節されていることが生理学的に明らかにされている。

この意味から、本研究では、身体特性を決定づける筋緊張レベルが歩行制御系に対する見なし情報となり得ると考えた。そのうえで、環境と身体との力学的相互作用項である床反力情報を用いて、筋緊張レベルをリアルタイムで適切に調節し続けることで、歩行運動における環境適応能力が得られることを動力学シミュレーションにより示した。

A02班:未知環境下における随意運動発現・調節の脳内機構の解明(東京工業大学 伊藤宏司・近藤敏之)

生物の感覚・運動統合をその適応性によって分類すると、少なくとも3つのレベルが考えられる(Fig.2参照)。

第1は、遺伝によって生得的に拘束される感覚・運動連関である。屈曲反射、伸張反射、あるいは周期運動に関与するセントラルパターン生成器(CPG)がこれに当たる。これらの生得的な感覚・運動連関は、脊髄に分散して存在し、より複雑な運動を生成する際の基盤回路を形成している。

第2は、後天的な学習によって自動化される感覚・運動連関である。たとえば、歩行運動は、反射系や CPG を選択的に顕在化する時空間パターンが脳幹などで生成され、身体を統合的に制御することで実現されている。このような運動は自動運動と呼ばれている。

第3は、まだ自動化されていない随意運動であり、大脳皮質、大脳基底核、小脳などの高次脳機能が複雑に関与していると考えられている。

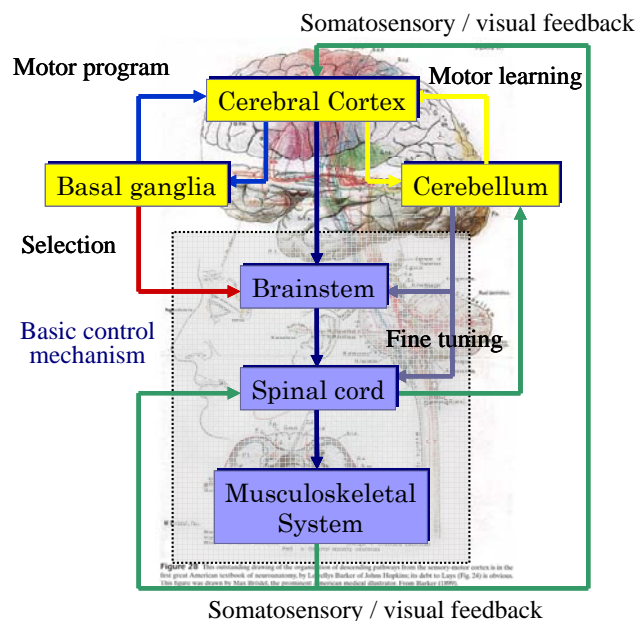


Fig.2 Motor control systems.

以上のように、生物の運動・行動適応では、生得的な感覚・運動連関の拘束のもとで、随意的に運動を繰り返すうちに、基盤回路の顕在化パターンと運動の文脈が適切に連合され、その結果として運動が自動化されると考えることができる。本研究では、このような適応的運動機能の学習過程をモデル化するとともに、この適応機能がどのような脳内神経機構によって実現され得るかについて構成論的に明らかにすることを試みる。

従来から、自身の運動指令とその結果得られる感覚フィードバックの文脈から、感覚・運動マッピングを選択的に切り換えるモデルがいくつか提案されている。しかしながら、無限定な環境下で生じる感覚運動マッピングを内部表現としてすべて保存しているとは考え難い。本研究では、感覚・運動マッピングではなく、環境との相互作用から体得した拘束条件を記憶・選択・想起することで、身体・環境ダイナミクスを実時間拘束するという運動生成方を提案する。

本年度は、クランク回転運動を例として、要素ダイナミクスのパラメータを時系列パターン識別器のアトラクタとして記憶させることで運動パターンを実時間で生成する CPG-CM(Central Pattern Generators with Constraints Modulation)を提案し、シミュレーション実験を実施した

(Fig.3 参照)。その結果、運動軌道の時空間パターンから外部環境の変化が自立的に認識され、運動パターンが適応的に調節されることを確認した。

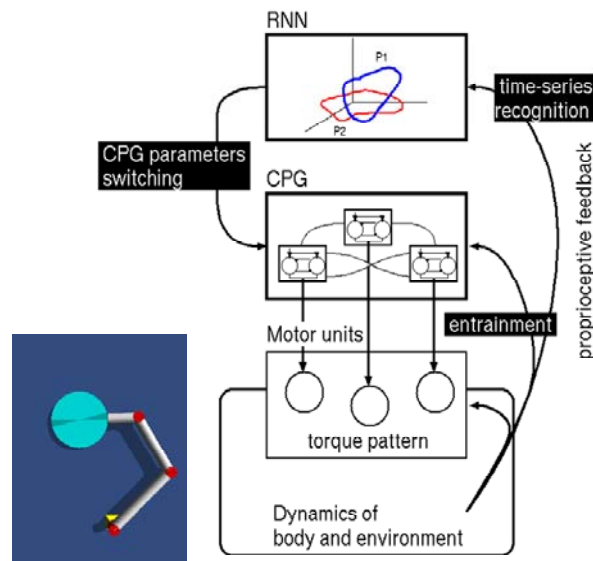


Fig.3 CPG-CM (Central Pattern Generators with Constraints Modulation)

3. 班会議他

・ AB 班 合同班会議

日時：2006年2月11日 10:00-16:30

会場：京都大学理学2号館315セミナー室

出席者：伊藤、近藤、矢野、富田、吉原、中俣、土屋、岸本、荻原、青井、杉本、木村、細田、井上、大須賀、鄭

A班メンバーの研究計画、進捗状況を報告するとともに、「みなし情報」に関する総合討論を行った。

・ 招待講演 1

日時：2006年3月14日(木) 15:30-17:00

会場：カターニア大学電子制御工学専攻 (イタリア)

出席者：学部、PhD 学生、研究者 (約 80 名)

講演者：伊藤宏司

講演タイトル：Adaptive Motor Functions through Dynamic Interactions among the Body, Brain and Environment

Prof. Paolo Arena の招待により、移動知プロジェクトの紹介を中心に講演。

・ 招待講演 2

日時：2006年3月21日(火) 16:30-17:45

会場：ナポリ大学情報システム専攻 (イタリア)

講演者：伊藤宏司

出席者：学部、PhD 学生、研究者 (約 15 名)

講演タイトル：Adaptive Motor Functions through Dynamic Interactions among the Body, Brain and Environment -Understanding of Motor Intelligence by Constructive Approaches -

Prof. Bruno Siciliano の招待により、移動知プロジェクトの紹介を中心に講演。

大脳皮質運動関連領域が創る「見なし情報」による随意運動制御

東北大学電気通信研究所 矢野雅文

1 はじめに

生命システムを取り囲む環境は常に変化しつづけるが、どのような環境であっても運動は適切かつ柔軟に実行される。これまで、生命システムにおける運動制御の問題は、環境とシステムを分離し、環境をあらかじめ限定しモデル化することで解かれてきた。しかしながら、運動遂行中においても環境及びシステムの状態は予測不可能に変化するため、全ての環境変化をモデル化することは事実上不可能である。実世界における多様かつ柔軟な運動制御の実現には、「生命システムの認知機能や運動機能は環境との調和的關係を創り出すための機能である」と捉え、環境とシステムの相互作用を取り扱う新しい方法論が必要となる。

環境の状態を全て知ることは不可能であるから、生命システムは自分自身と環境の關係を仮設せざるを得ない。我々は、このシステムが仮設する環境との關係を「見なし情報」と呼ぶ。ある環境における運動目的は、生命システムが仮設する「見なし情報」によって具体的に設定される。環境に応じて目的を達成する行為は随意運動であり、この制御は一般的に不良設定問題となるが、「見なし情報」は随意運動に必要な最上位の拘束条件といえることができる。また、運動遂行に必要な様々なレベルでの拘束条件は、仮設された「見なし情報」に依存して設定されるべきものとなる。さらに、環境及びシステムの状態の予測不可能な変化に対応するためには、「見なし情報」を環境との相互作用から時々刻々生成し、それをリアルタイムで充足する必要がある。これらの過程こそが、随意運動を実行するために運動制御系すなわち大脳皮質運動関連領域に求められる計算論的課題となる。このスキームを実現するためには、生理学的知見を基に構成論的に随意運動モデルを構成し、その環境適応能力を評価する必要がある。

2 腕到達運動における拘束条件生成充足機構

随意運動であるリーチング運動において最上位の拘束条件はどの目標点にいつ到着するかという運動目的である。運動目的はシステムが自ら作り出す必要があり、制御の「見なし情報」となる。生理学/心理学的研究 [1, 2, 3] に基づき、我々はこの「見なし情報」に依存して手先の速度ベクトルが下位の拘束条件として設定され、さらにこの拘束条件を充足することによって随意運動が遂行されると考える。本年度は「見なし情報」は与えられたものとしその情報に依存して運動を遂行する随意運動制御

系を構築した。

2.1 拘束条件としての手先速度ベクトル

様々な状況下で運動を遂行するために腕は冗長な関節を持たなくてはならずその制御には拘束条件を必要とする。そしてその拘束条件は腕に加わる外力や腕の動力学特性（慣性質量・関節粘性）の想定外の変化に対応できるものでなければならない。手先速度ベクトルは状況の変化に対して即座に再設定できるのでこの条件を満たしている。この拘束を充足する各関節角速度を自律分散的に決定することで、様々な環境変化に対してロバストな随意運動制御系が実現できる。

2.1.1 手先速度ベクトルの設定

「見なし情報」である x_d （目標点）と t_d （運動の速さを調節する運動時間ゲイン）に依存して手先速度ベクトル v_d は

$$v_d = (x_d - x_h)/t_d \quad (1)$$

のように設定される。

2.1.2 関節レベルの拘束条件生成，関節間相互作用

関節間では運動効率を自律的に評価しながら評価値の高い関節が主導的となるよう相互作用を行う。

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{d1} &= (1 - k_2)v_{d1}^l + k_2v_{d1}^{c2} \\ \tilde{v}_{d2} &= (1 - k_1)(1 - k_3)v_{d2}^l + k_1v_{d2}^{c1} + k_3v_{d2}^{c3} \\ \tilde{v}_{d3} &= (1 - k_2)v_{d3}^l + k_2v_{d3}^{c2} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $v_{di}^l, v_{di}^r, v_{di}^{cj}$ はそれぞれ各関節の局所目標、残差目標、隣接間相互作用である (Fig.1)

2.1.3 運動効率の自律的評価

各関節は運動効率の評価を次式により自律的に行う。

$$k_i = \exp[-\ln 2 \|v_{di}^l - v_i\|^2 / (\|a_i\|/2)^2] \quad (3)$$

ここで、 v_i は関節 i の回転によって生じる手先速度、 a_i は手先までのモーメントアームである。

2.1.4 トルクレベルの拘束条件生成

式 (2) で関節目標速度 \tilde{v}_d が決まると、これは次式により関節目標角速度、関節目標トルクに変換される。

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{di} &= \text{Dir}(e_{x_i}, \tilde{v}_{di}) \cdot \|\tilde{v}_{di}\| / \|a_i\| \\ \tau_{di} &= \tilde{I}_i(\theta) \cdot (\ddot{\theta}_{di} - \dot{\theta}_i) / T_n \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\tilde{I}_i(\theta)$ は関節 i の慣性質量の推定値、 T_n は神経系の時定数である。

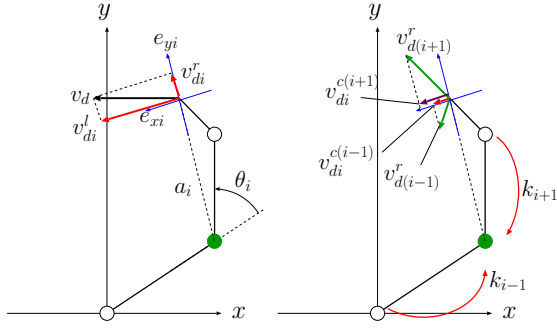
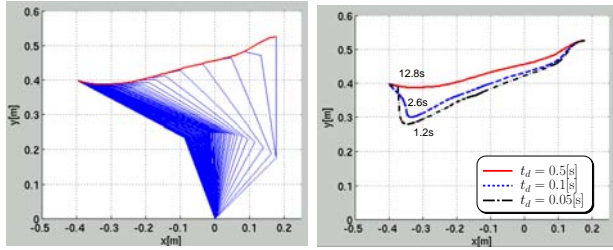


Fig. 1 A local purpose v_{di}^l and its residual v_{di}^r for joint i (left). A coupling term $v_{di}^{c(j)}$ (right)



(a) $t_d = 0.5[s]$

(b) t_d changed.

Fig. 2 Typical reaching trajectory. In the left, sticks are traced every $0.1[s]$, and in the right, values represent convergence time(when a hand reaches $1[cm]$ around the end point).

2.2 結果

2.2.1 典型的なリーチング例

初期姿勢 $\theta(0) = (45, 45, 0)^T[deg]$, 目標位置 $X_d = (-0.4, 0.4)[m]$ までのリーチング結果を Fig.2 に示す . 結果から自然な手先軌道で目標位置まで収束することが確認できる .

2.2.2 運動途中の腕質量の変化

運動開始 $0.2[s]$ 後に , リンク 1 の質量を $m_1 = 0.9$ から $10[kg]$ に変化させた (Fig.3) . リンク 1 の質量増加に伴い , 収束時間はやや増加するものの , 軌道から大きく逸脱せず目標位置に到達することが分かる .

2.2.3 運動途中の関節粘性の変化

運動開始 $0.2[s]$ 後に , 関節 3 の粘性を $B_3 = 0.4$ から $10.0[kgm^2/s]$ に変化させた (Fig.4) . 粘性増加後は , 効率の悪い第 3 関節を用いない腕姿勢が自律的に選ばれることが分かる .

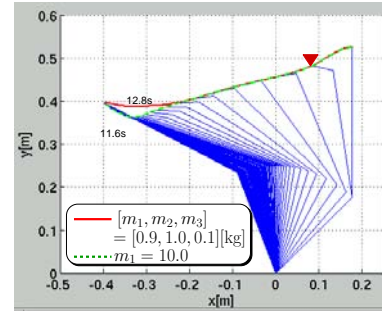


Fig. 3 Reaching trajectory($t_d = 0.5[s]$) when the mass of link 1 changed after $t = 0.2[s]$ (depicted by filled triangle). Other notations are same as in Fig.2.

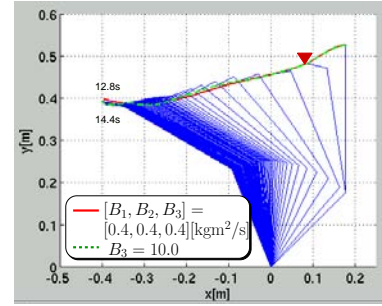


Fig. 4 Reaching trajectory($t_d = 0.5[s]$) when stiffness in joint 3 changed after $t = 0.2[s]$.

3 2足歩行モデルにおける拘束条件生成充足機構

歩行は地面と脚の力学的な接触が不連続に繰り返される運動であり , 重力場内で行われるので , 身体に加わる瞬間的な外力や荷物などの定常的負荷 , 路面状況による負荷の変化にリアルタイムに対応する必要がある . そのため , 歩行系がリアルタイムに環境に適応するためには , 歩くことにより自分自身の神経生理学的/ 身体力学的な特性を変化させる機構が必要不可欠である .

しかしながら適切な身体特性は実際に「歩く」ことでしかわからない . 歩く前に適切な身体特性を決めることは不可能であるために , なんらかの「見なし情報」が必要になる .

身体特性を決定づけるのは各筋肉の動的粘弾性特性である . 筋肉は収縮力/収縮速度に対して非線形特性を持っているため , 外力に対する粘弾性特性は各筋肉がどの動作点で活動しているかによって変化する . 身体全体の筋肉の動作点を調整することは環境依存的に身体特性を変化させることに対応する . 身体の筋活動レベルは脳基底核以下の下行性投射路で調節されていることが生理学的に知られている [4, 5] .

よって身体特性を決定づける筋緊張レベルが制御系に

対する「見なし情報」となりえる．環境と身体との力学的相互作用項である床反力情報を用いて筋緊張レベルを適切に設定し続けることで，歩行運動におけるロバストな環境適応能力が得られることを報告する．

3.1 モデル

脊椎動物の運動制御に関係する下行性投射路は大きく2つのパスに分かれていることが知られており，それぞれ位相調節系・筋緊張調節系と捉えることができる．即時的に得られる床反力情報を用いて身体の筋緊張レベルを調節し，位相特性/力学的特性を変化させることで受動的な安定性が増加し，様々な外乱に対する環境適応能力が得られる．本報告で取り扱う歩行モデルは，Fig.5に示すとおり，片脚5筋，腰部4筋の計14筋をもち，体重60kgに対する各部位の質量比，長さ比は日本人アスリートの平均値を用いている．

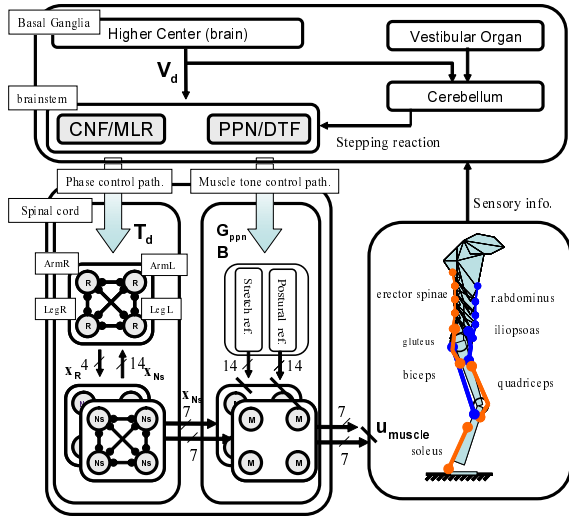


Fig. 5 Information flow diagram

3.1.1 筋モデル

骨格筋の非線形収縮特性は Hill の P-V (発生張力 - 収縮速度曲線) 関係 [6] で与えられる．ここでは真島らの研究を元に次式の一般化特性方程式を用いる．

$$P(u, v(t)) = \begin{cases} \frac{bP_0 - av}{v+b} u, & v \geq 0 \\ \frac{P_0 v + av - bP_0}{27v^3 - b} u, & v < 0. \end{cases} \quad (6)$$

v は筋収縮速度， $P_0, a, b, u(t)$ はそれぞれ，最大筋収縮力，エネルギー遊離定数，等尺性比例定数，筋賦活度 (MotoNeuron の出力信号) であり， L_n を筋の自然長とすると $a = 0.25, P_0, b = 0.9L_n$ となる．

3.1.2 筋緊張制御系

歩行は重力場で行われるので，身体に加わる瞬間的な外力や荷物などの定常的負荷，路面状況による負荷の変化にリアルタイムで対応することが必要になる．そのために筋緊張を調節することは不可欠である．これには (a) 環境/状況変化に即した身体剛性の調節，(b) 外部負荷に応じた筋緊張レベルの

調節がある．前者 (a) は遊脚が接地する瞬間に姿勢を保ち，且つ路面との接地に伴うエネルギーロスが少ない適切な剛性が望まれる．調節は相動的に行われる．片脚の床反力情報の総和を $grf_k(t)$ とし，左右側の身体剛性を $B_k(t)$ として表せば，

$$B_k(t) = St(grf_k(t), GW(grf_k(t), \gamma_m)), \quad (7)$$

St は飽和関数で，

$$St(x, x_s) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x}{x_s} \pi\right), & 0 \leq x < x_s \\ 1, & x \geq x_s. \end{cases} \quad (8)$$

GW はガウシアン関数 GF を用いたローパスフィルタで，

$$GW(f(t), \sigma) = \frac{2}{5\sigma} \int_{t-\sigma}^t GF(\tau, \sigma) f(t-\tau) d\tau, \quad (9)$$

$$GF(x, \sigma) = \frac{e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}. \quad (10)$$

γ_m は機械受容体の反応時間であり，50ms とおいた． $B(t)$ は相動性伸張反射 (psr) のゲインとして働く．

次に，(b) 筋緊張レベルの制御について述べる．床反力は身体と環境との力学的関係を端的に示す．自分の体重はあらかじめわかっているが，背負った荷物の重さや突発的に加わる外力，路面の変化による必要推力の変化などは予め知ることができない．床反力を筋緊張制御系にフィードバックすることで状況に応じた筋緊張レベルを決定し，様々な外部負荷に応じた身体運動量を決定する．PPN からの下降性投射路のゲインを $G_{ppn}(t)$ で表すと，

$$G_{ppn}(t) = \frac{GW(\sum_k^2 grf_k(t), \gamma_m)}{GW(\sum_k^2 grf(T_{stride}^0)_k, T_{stride}^0)}. \quad (11)$$

T_{stride}^0 は歩行開始時の重複歩周期である．分子は左右脚の床反力の総和を，分母はシミュレーション開始時の身体の実質的な体重を表す．通常 $G_{ppn}(t)$ は直立静止状態で 1 であり，運動細胞が出力する筋賦活度のゲインとして働く．また，前後方向のバランス調節も筋緊張系を通して行われる．左右脚の床反力が前後方向に釣り合うように背側・腹側の筋緊張を調節する．前脚の床反力が大きい場合，背側のトーヌスが増加する．次に環境との力学的相互作用による姿勢維持について述べる．剛性調節や筋緊張レベルの調節機構だけでは定常的な姿勢維持を実現することは出来ない．しかしながら抗重力に最適な姿勢は状況依存的に変化するため，予め設定した腰の高さを維持するような位置制御系は運動の多様性を阻害する．ここでは，抗重力筋の外部仕事率の総和が 0 となるように抗重力筋群を制御する．重力と筋収縮力による反力とが釣り合うことで姿勢維持反応が自動的に行われる．正規化外部仕事率の時間平均を \bar{W} で表すと，

$$\bar{W} = GW\left(\frac{P(v(t))v(t)}{P(v_{Wmax})v_{Wmax}}, \gamma_{tsr}\right), \quad (12)$$

$$v_{Wmax} = \frac{-\sqrt{ab} + b\sqrt{a+P_0}}{\sqrt{a}}, \quad (13)$$

となる． γ_{tsr} は緊張性伸張反射 (tsr) の反応時間， v_{Wmax} は外部仕事率が最大となる筋収縮速度．

3.1.3 運動細胞群による筋賦活度の調節

CPG の N_s 細胞と運動細胞，筋肉とは一対一で結合している． N_s 細胞からの出力信号は閾値関数により 1 か 0 かの位相パターン情報として運動細胞に作用する．運動細胞からは筋賦活度を表す信号 $u_i(t)$: ($0 \leq u \leq 1$) が出力される．身体全体の筋緊張レベルは床反力情報を元に大脳基底核の PPN により統合的に決定され， $G_{ppn}(t)$, $B_k(t)$ として筋肉全体に作用する．運動細胞の出力 (筋賦活度) は以下の式で表される．

$$u_i(t) = k_{N_s} G_{ppn}(t) H(x_{N_s}^i) - k_{v1} H(x_{N_s}^i) v_i - k_{psr} G_{ppn}(t) B_k(t) v_i - k_{tsr} G_{ppn}(t) \overline{W}_i + G_{ppn}(t) \sum_c k_i^c Cont_c(t). \quad (14)$$

v_i は運動細胞と結合する筋肉の収縮速度 (収縮方向に正)， H はヘヴィサイドの単位階段関数， k は各項のゲイン．右辺の 1 ~ 5 項はそれぞれ，位相出力，筋の動的粘性，相動性伸張反射，緊張性伸張反射，バランス・速度制御出力．最終的なモデルのネットワークを Fig.5 に示す．

3.2 結果

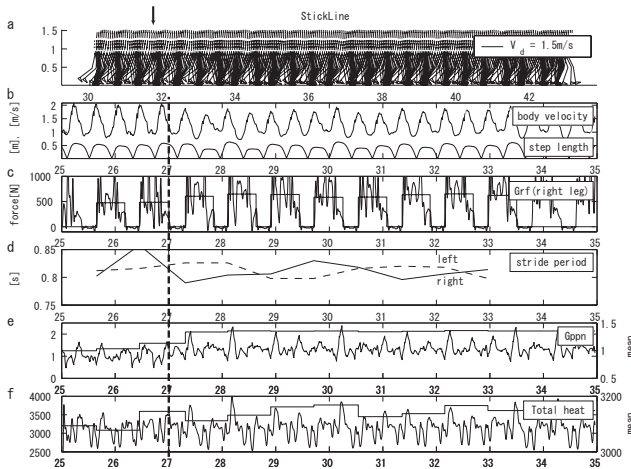


Fig. 6 Result : 20kg weight is added to the waist during a walk.

結果を Fig.6 に示す．図上からスティック線図，歩行速度と歩幅，右脚の床反力とその 1step での平均，左右脚の重複歩周期， G_{ppn} とその 1step 平均，総熱量とその 1step 平均．目標速度 1.5m/s で定常歩行中に腰部に 20kg の重りを追加した．オンセットを矢印と破線で示す． G_{ppn} は静止中は 1.0，定常歩行中は 1.1 程度であるが，荷重が加わった直後 1.5 程度まで増加し，目標歩行速度が維持されている．さらに，モデルの体重 60kg と同じ重さの荷重が加わっても歩行自体は維持し続けた．このように，床反力情報を用いて環境に適した身体力学特性をリアルタイムに決定することで，陽な姿勢制御を必要とせず幅広い負荷に対する適応力を得ることができた．

4 おわりに

随意運動であるリーチング運動の拘束条件は目標に何時到着するかであり，これを達成する拘束条件を生理的知見を元に「手先目標速度」をしてモデル化を行った．「手先目標速度」は幾何学的拘束条件であり，モデルではトルクなどのダイナミカルな情報を使用していないにもかかわらず，環境・身体変化に対して柔軟に対応した．2 足歩行問題では，「歩く」事では得られない環境との相互作用項を「筋緊張レベル」という見なし情報を用いて表現することで身体性を最大限に利用でき，環境の変化に柔軟に対応できることを示した．

随意運動には，一般的に知られている意志が介在し能動的に行われる運動 (随意運動) と，随意運動に伴って起こる自動的運動 (自動的随意運動) とに分けて考えることができる．リーチングタスクでは運動目的を下位制御系が充足する形で随意運動が行われ，歩行運動問題では，筋緊張レベルの設定によって環境・状況に即した適切な身体姿勢が設定されることで自動的随意運動が行われたことを意味する．これらの結果は，大脳皮質の運動関連領域が「運動目的」という最上位の見なし情報を創り出したという前提の元で，皮質以下小脳，大脳基底核，脳幹及び脊髄の随意運動制御モデルを構築した事に対応する．

今後は，「運動目的」が大脳皮質の視覚 - 運動系連関により如何にして創られるのかを行動学的・生理学的実験から明らかにし，さらにそれら実験から得られたデータを元に「運動目的」生成の数理モデル構築を目指す．

参考文献

- [1] D. Pellisson, C. Prablanc, M. A. Goodale, "Visual control of reaching movements without vision of the limb. I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand.", *Exp. Brain. Res.*, 62, pp.293-302, 1986.
- [2] M. S. A. Graziano, C. S. R. Taylor, and T. Moore, "Complex Movements Evoked by Microstimulation of Precentral Cortex," *Neuron*, vol. 34, pp.841-851, May 30, 2002.
- [3] J. D. Coltz, M. T. V. Johnson, and T. J. Ebner, "Cerebellar Purkinje Cell Simple Spike Discharge Encodes Movement Velocity in Primates during Visuomotor Arm Tracking," *J. Neurosci.*, 19(5), pp.1782-1803, March 1, 1999.
- [4] K. Takakusaki et al., "Medullary Reticulospinal Tract Mediating the Generalized Motor Inhibition in Gats: Parallel Inhibitory Mechanisms Action in Motoneurons and on Interneuronal Transmission in Reflex Pathways", *Neuroscience.*, 103, 511-527, 2001.
- [5] K. Takakusaki et al., "Basal Ganglia Efferents to the Brainstem Centers controlling Postural Muscle Tone and Locomotion: A New Concept for Understanding Motor Disorders in Basal Ganglia Dysfunction", *Neuroscience.*, 119(1), pp.293-308, 2003.
- [6] A.V. Hill, "The heat of shortening and the dynamic constants of muscle", *Proc.R.Soc.London Ser.B*, Vol.126, pp.136, 1938.

A02班 研究報告

「未知環境下における随意運動発現・調節の脳内機構の解明」

伊藤 宏司 近藤 敏之

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

Abstract—Regardless of complex, diverse, unknown, and dynamically-changing environments, animals can recognize situated environments and behave adaptively by themselves. In research group A02, we aim to clarify the adaptation mechanism to recognize unknown environments and generate suitable motor behaviors through constructive and synthetic approaches. The key concept for realizing environmental cognition and motor adaptation is a context-based elicitation of sensorimotor constraints which are canalizing suitable motions. In the present paper, we report a preliminary result of our conceptual motor adaptation model and describe ongoing works.

I. A02班の研究背景および目的

生物は膨大な数のセンサ、アクチュエータを持った情報処理システムである。たとえば生物の感覚系では、視覚・触覚・体性感覚などをつかさどる無数の神経活動の時空間統合の結果として外界が知覚されている。一方、我々の身体を構成する筋骨格系には100以上の自由度があり、外部環境の状態や作業目的に合わせて筋の収縮レベルを調節することで、しなやかな運動・行動適応を実現している[1]。このように、生物が人工物と比べて本質的に有する「知」は、動的かつ予測不可能に変化する環境においても、膨大な身体自由度を実時間で適切に構造化する拘束条件 (constraints) を自律的に生成する能力にあると考えられる。この「知」の創成原理の解明は、生物のシステム論的理解に役立つだけでなく、日々複雑・大規模化する人工物設計においても有益であると思われる。

それでは、この能力はいかにして獲得されるのであろうか？我々は、昆虫からヒトに至るすべての動物に普遍的に見られるこの「知」の創成過程には、これらが享有する能動的な移動機能が大きく寄与していると考え、次のような仮説を立てた。

第1に、環境との絶え間ない身体的 (力学的) 相互作用を通じて、感覚・運動自由度を制約する拘束条件を発見的に獲得する。第2に、獲得された拘束条件を、獲得した文脈と連合させて連想記憶に記録していく (ここでは感覚情報の観測時系列を文脈と呼ぶものとする)。これにより、将来、類似した文脈では同じ拘束条件が選択的に想起され、すみやかに運動を生成することが期待できる。そして第3に、生成される運動が適切でない場合には、新たな拘束条件を学習によって自律的に追加する。この場合、すでに記憶している拘束条件を破壊することなく、現在の文脈に基づいて正しく分岐が起こるように、連想記憶の内部構造を修正できることが重要となる。

先にも述べたように、生物は未知なる環境においても、膨大な身体自由度を実時間で適切に構造化するための拘束条件を自律的に生成する能力を体現している。では、生物に

おける感覚・運動統合は、どのようにして実現されているのであろうか？

生物の感覚・運動統合をその適応性によって分類すると、少なくとも3つのレベルが考えられる[2], [3]。

第1は、遺伝によって生得的に拘束される感覚・運動連関である。たとえば、熱いものに触れると手を引っ込めたり (屈曲反射)、外乱に対して倒れないように姿勢を保つ (伸長反射) などの脊髄反射 (spinal reflex) [4] や、呼吸・咀嚼 (そしゃく) などの周期運動に関与するパターン生成器 (central pattern generators: CPG) がこれにあたる。これら生得的な感覚・運動連関は、主に脊髄に分散して存在し、より複雑な運動を生成する際の運動プリミティブ (motor primitive) として機能することが、Bizzi らによる脊髄ガエルの電気刺激実験の結果などからも示唆されている[6]。

第2のレベルは、後天的な学習によって自動化される感覚・運動連関である。たとえば我々は、特に意識しなくても歩行することができるが、これは反射系やCPGを選択的に顕在化する時空間パターンが脳幹などで生成され、身体を統合的にコントロールすることで実現されている。このような運動は自動運動 (automatic movement) と呼ばれている。また、環境に適した運動パターンの発現は、CPGユニットを選択的に活性化・不活性化することにより制御されると考えている[5]。

そして、第3のレベルはまだ自動化されていない随意運動 (voluntary movement) である。このレベルの運動制御には、大脳皮質、大脳基底核、小脳などの高次脳機能が複雑に関与していると考えられている。

以上から、生物の行動・運動適応の発達過程では、生得的な感覚・運動連関の拘束のもとで随意的に運動を繰り返すうちに、運動の文脈と運動プリミティブの顕在化パターンが適切に連合され、その結果として運動が自動化されるというシナリオが考えられる。本研究項目では、上記の適応的運動機能の発達・学習過程のモデル化を試みるとともに、この適応機能がどのような神経機構によって実現され得るかについて構成論的に明らかにすることを目的とする。

II. 拘束条件の選択想起による運動の実時間生成モデル

これまでに、自身の運動指令とその結果得られる感覚フィードバックの文脈からマッピングを選択的に切り替える、さまざまな運動・行動発現モデルが提案されている[7], [8]。しかしながら、限られた計算資源で対処しなければならない生物が、多様な時系列運動パターンを内部モデルとしてナイーブに保存しているとは考え難い。これに対し、マッピングではなく、環境との相互作用から体得した拘束条件を記憶・選択想起することで身体自由度を実時間拘束するという運動生成の方策も考えられる。本節では、この概念に基づ

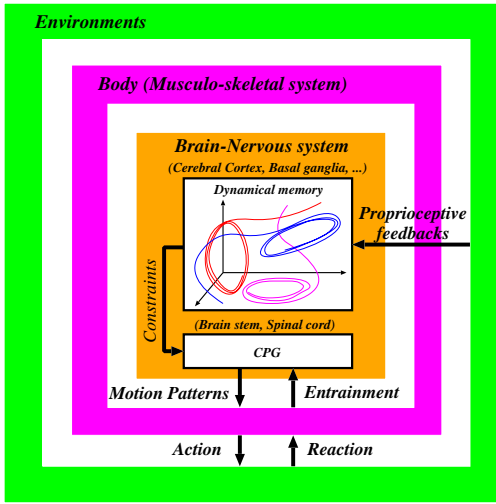


Fig. 1. CPG-CM

いて筆者らが提案した CPG-CM (central pattern generators with constraints modulation) モデル (Fig.1) について説明する [9] .

同図に示すように, CPG-CM は, トルクパターンの生成要素である振動子 (CPG) と, 感覚・運動入出力の時空間パターンから現在の文脈を推定するための動的記憶 (Dynamical memory) で構成される. たとえば歩行のような周期運動を考えた場合, 脚の軌道は多次元の状態空間内でリミットサイクルを描くが, この体性感覚軌道と周期運動を実現する CPG パラメータを連合して動的記憶モデルに記憶させる. このように, 運動パターンをマッピングとして記憶するのではなく, 要素ダイナミクスのパラメータとその顕在化ダイナミクスとして記憶させることで, 記憶容量を大幅に削減する運動・行動発現の計算モデルとなることが期待できる. ここで要素ダイナミクスとして CPG モデルを採用しているのはあくまでも一例であり, 提案モデルは決して CPG を用いることに限定されたものではないことに注意されたい.

A. 振動子層

振動子層の実装には, たとえば, 松岡によって提案された神経振動子モデル [10] を用いることなどが考えられる. この振動子は, 式 (1) ~ (3) に示される順応的なダイナミクスを持ったニューロンを相互抑制的に結合することで構成される.

$$\tau \dot{u}_i^{[k]} = -u_i^{[k]} - w_{[k, \bar{k}]} y_i^{[\bar{k}]} - \sum_{j=1(\neq i)}^n w_{ij} y_j^{[k]} - \beta v_i^{[k]} + u_0 + F_i^{[k]} \quad (1)$$

$$\tau' \dot{v}_i^{[k]} = -v_i^{[k]} + y_i^{[k]} \quad (2)$$

$$y_i^{[k]}(u_i^{[k]}) = \max(0, u_i^{[k]}) \quad (3)$$

$$\text{torque} = T_r \cdot [-\mathbf{y}^{[e]} + \mathbf{y}^{[f]}] \quad (4)$$

ここで, u_i と v_i はニューロンの内部状態, τ と τ' は時定数, $w_{[k, \bar{k}]}$ は, ニューロン間の相互抑制係数, w_{ij} は振動子間の結合係数, β はニューロンの疲労係数, u_0 は定常入力, y_i は CPG 出力に相当する. T_r はトルクの大きさを決定する対角係数行列である. なお, 添字 $k \in \{e, f\}$ は, 各々伸筋 (e : extensor) と屈筋 (f : flexor) を意味している. また, F_i は自己受容感覚フィードバック項である. このように, 制御対象の状態を CPG のダイナミクスにフィードバックすることで, 引き込みにより安定な周期運動を実現できる [11].

B. 動的記憶層

一方, 動的記憶層は状態評価器 (Evaluation module), CPG パラメータの学習器 (Learning module) および観測状態の文脈に基づいて振動子層のパラメータを予測的に切替える時系列パターン識別器からなる. ここでは, リカレント・ニューラルネットワーク (RNN) を用いて時系列パターン識別器を実装した例を用いて説明する.

まず, 状態評価器において現在の運動状態があらかじめ設定された評価規範を満足しているかを確認する. ここで評価が基準を満たさない場合には, 学習器によって最適な CPG パラメータ p^* ($= [\tau, u_0, \dots]^T$) の探索が行われる. パラメータの同定には, たとえば次のように焼き鈍し法 (simulated annealing: SA) などを用いることができる [13].

$$\hat{p}_n = p_{n-1} + \alpha \cdot N(0, \sigma^2 \mathbf{I}) \quad (5)$$

ここで α は学習率, $N(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ は分散 σ^2 の正規乱数である. n 試行目の運動の評価を E_n とすると, 探索中のパラメータ \hat{p}_n は, 次次の受容確率 P_{accept} にしたがって更新される. また G_n は, 探索ノイズの大きさを調節する温度パラメータである.

$$P_{accept} = \begin{cases} 1 & \dots \text{ if } E_n < E_{n-1} \\ \exp\left[-\frac{(E_n - E_{n-1})}{G_n}\right] & \dots \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

学習器によってひとたび最適化された CPG パラメータ p^* は, 将来同じような状況に遭遇したときに再び想起され, 即時的に運動を生成できる必要がある. そこで, 次のリカレント・ニューラルネットワーク (RNN) に, 観測時系列 ($X = [q, \dot{q}, \dots]^T$) と関連づけて記憶させる.

$$\tau_r \frac{ds_k(t)}{dt} = -s_k(t) + \sum_{l \in H \cup O} w_{kl} z_l(t) + \sum_{l \in I} w_{kl} X_l(t) \quad (7)$$

$$z_k(t) = g(s_k(t)) \quad (8)$$

$$\tilde{z}(t) = \{z_k(t) \mid k \in O\} \quad (9)$$

ここで, τ_r は時定数, w_{kl} は結合荷重, $s_k(t)$ はユニット k の内部状態 ($k \in H \cup O$, ただし H, O は中間層, 出力層の集合を意味する), $z_k(t)$ は RNN の出力, $g(\cdot)$ はシグモイド関数を表す. また, RNN の結合荷重 w_{kl} は, BPPT (backpropagation through time) 法 [12] により学習させる.

III. クランク回転運動への適用

本節では、先に述べた CPG-CM モデルを、平面 3 リンクの冗長マニピュレータによるクランク回転運動制御に適用した事例を紹介する [9] .

A. クランク回転運動

マニピュレータの関節角度を q_i とすると、運動方程式は次式のように表せる .

$$M(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \text{torque} - \mathbf{b}\dot{q} - J(q)^T F_h \quad (10)$$

ここで、 $M(q)$ はマニピュレータの慣性行列、 $h(q, \dot{q})$ は遠心力・コリオリ力、 \mathbf{b} は関節の粘性係数行列、 F_h は手先力、 $J(q)$ はヤコビ行列である . マニピュレータの各関節には、振動子層において生成されるトルクパターン (**torque**) が印加される . なお、本実験では、CPG への感覚フィードバック F_i を、人腕の関節可動域を考慮して次のように定めた .

$$F_i^{[k]} = \begin{cases} \kappa(q_i - q_i^e) & (k = \text{extensor}) \\ -\kappa(q_i - q_i^e) & (k = \text{flexor}) \end{cases} \quad (11)$$

$$q^e = [0.25\pi, 0.42\pi, \pi]^T \quad (12)$$

また、マニピュレータのリンクパラメータは、人間の四肢を参考にして、表 I のように設定した .

TABLE I
リンクパラメータ

m_1	1.59 [kg]	l_1	0.30 [m]
m_2	0.90 [kg]	l_2	0.24 [m]
m_3	0.54 [kg]	l_3	0.11 [m]

B. 運動の評価規範

本実験では、運動の評価 E_n を (1) クランク回転速度の最大化 (E_{n_1}) (2) 全関節で消費される運動エネルギーの最小化 (E_{n_2})、ならびに (3) 全トルクがなす仕事量の最小化 (E_{n_3})、を考慮して次式のように定めた .

$$E_n = \sum_{i=1}^3 \eta_i E_{n_i} \quad (\eta_1 < 0, \eta_2, \eta_3 > 0) \quad (13)$$

$$E_{n_1} = \frac{1}{T} \int_T \dot{\phi} dt \quad (14)$$

$$E_{n_2} = \frac{1}{T} \int_T \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T D \dot{\mathbf{q}} dt \quad (15)$$

$$E_{n_3} = \frac{1}{T} \int_T \max([\text{torque}]^T C \dot{\mathbf{q}}, 0) dt \quad (16)$$

$$C = \text{diag} [0.001, 0.03856, 34.15]$$

$$D = \text{diag} [0.1, 0.1, 0.1]$$

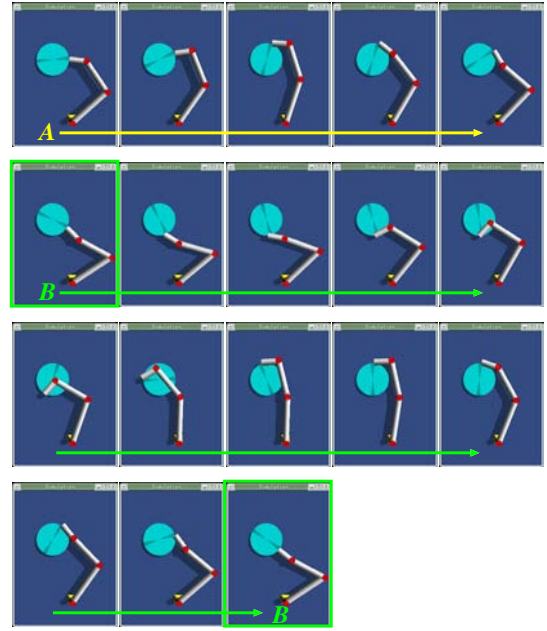


Fig. 2. Snapshots of an optimized trajectory for a crank rotation.

C. 実験結果

環境変化に対する適応性の評価を行うため、回転運動の途中で、クランクの回転粘性摩擦係数 B [Nm/(rad/s)] を断続的に変化させる実験を行った . 上記の評価規範を常に満足するためには、手先負荷の変化に対し、冗長自由度を積極的に利用して、関節トルクの振幅と位相を適切に変更する運動制御が期待される .

実験開始直後は動的記憶層に最適な CPG パラメータが存在しないため、学習器による CPG パラメータの探索が行われる . 本実験では、手先負荷が異なる次の 2 つの場合 ((a) $B=0.1$ [Nm/(rad/s)], (b) $B=0.2$ [Nm/(rad/s)]) について、クランク回転作業を実現する CPG パラメータを同定した . 評価規範 E_n に基づいて最適化されたクランク回転運動の様子を Fig.2 に示す . なお、このスナップショットは、200[ms] ごとにサンプリングしたものである .

また、Fig.3 に運動の途中で手先負荷を変更した場合の、各関節軌道とトルクの推移を示す . ここで、前半の 10 秒間は手先負荷 B が 0.10 [Nm/(rad/s)]、後半は 0.15 [Nm/(rad/s)] の場合に相当する . 同図から、手先負荷変更の前後で、回転運動の周期に明確な変化が見取れる . また、手先負荷が増加したことを受けて、手首関節の振幅の増大、および肩・肘関節で生成されるトルクの増大が確認できる .

以上より、提案モデルは観測時系列の状態軌道の変化から環境変化を認識でき、かつこれに基づいて CPG パラメータを切り替えることで迅速に適応できることが示された .

IV. まとめと今後の課題

本稿では、要素ダイナミクスのパラメータを、時系列パターン識別器のアトラクタとして記憶させることで運動パターンの実時間生成を実現する CPG-CM モデルを紹介した . 提案手法を平面 3 リンクマニピュレータを用いたクランク回転運動制御に適用した実験結果から、同モデルは観測さ

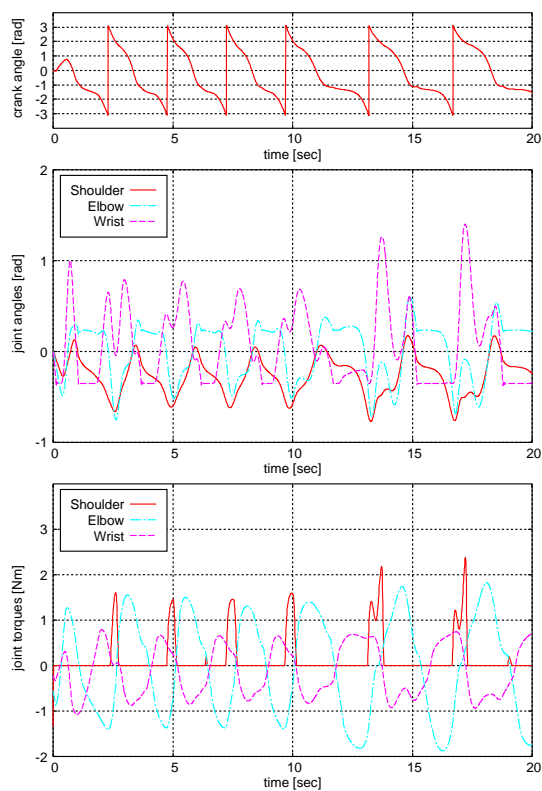


Fig. 3. A real-time joint angles/torques adaptation to environmental change.

れる運動軌道の時空間パターンから外部環境の変化（ここでは手先粘性の変化）を自律的に認識し、運動・行動適応を実現できることを確認した。ここで CPG-CM モデルにおける拘束条件（CPG パラメータ）は、時系列運動パターンを低次元化したシンボルと考えることができる。学習によって下位 RNN との対応関係が自己組織的に変化する RNNPB モデルの PB とは異なり、提案モデルの下位層は固定構造の CPG モデルで構成されるため、拘束条件はそれ自身、普遍的な意味を持つ。このため、複数の時系列運動パターンを少ない記憶容量で保存することが可能である。しかしその反面、下位層で規定された周期運動しか表現できないという限界もある。下位層の要素ダイナミクス・モジュールを自己組織的に追加・修正する手法を今後検討する必要がある。

また現在は、上位の動的記憶層のモデルとしてリカレント・ニューラルネットワーク（RNN）を採用しているが、先にも述べたように追加学習の安定性の面で課題が残る。これに対しては、ウサギの嗅球の EEG パターンが、未知の匂い刺激に対してカオス状態になるという Freeman[14] の先駆的な実験報告に基づいて小島ら [15] が提案した、動的連想記憶モデルが有効であると考えている。同モデルは、未知/既知の判定をカオス結合系のダイナミクスの安定/不安定性から導き出すことが可能であるのみならず、すでに記録されている記憶パターンを破壊することなく、新しいパターンを追加学習する機能を実現している。

ところで、生物が環境に適応する様子を眺めていると、数回ないし数十回の試行錯誤によって、未知環境を同定し、適切な運動を生成することができるようである。これは、口

ボットに強化学習を行わせる枠組とは明らかに異なる知の創成メカニズムの存在を示唆している。仮にこの適応性が生得的でない（遺伝的に決定されていない）とすれば、生物は、環境との能動的な相互作用に基づいた学習を繰り返すうちに、未知環境への適応性を向上させるためのコツとも言えるメタレベルの学習知識を獲得していることになる。

今後は、生物が既学習の環境に対する知をどのように脳内表現しているか（あるいは脊髄などの下位神経系でも高度な運動情報処理をしているのか？）というような疑問に対し、計算論的に解明して行きたいと考えている。具体的には、未知の粘性力場におけるリーチング運動学習実験を通して、人間の未知環境適応についての運動解析をはじめたところである。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現—移動知の構成論的理解—」（課題番号 454）によるものである。ここに謝意を表す。

REFERENCES

- [1] 伊藤：身体知システム論，共立出版（2005）
- [2] 彦坂：脳と行動の重層性とその調節機構，計測と制御，33-4（1994）
- [3] 高草木，浅間：構成論的観点と生物学的観点による行動からの知能理解，計測と制御，44-9（2005）
- [4] 丹治：脳と運動—アクションを実行させる脳，ブレインサイエンス・シリーズ 17，共立出版（1999）
- [5] S. Grillner: Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates, *Science*, **228**, 143/149（1985）
- [6] E. Bizzi, F. A. Mussa-Ivaldi and S. F. Giszter: Computations underlying the execution of movement: a biological perspective. *Science*, **253** 287/291,（1991）
- [7] Wolpert, D. M. and Kawato, M.: Multiple paired forward and inverse models for motor control, *Neural Networks* **11**（1998）pp.1317-1329.
- [8] J. Tani, M. Ito and Y. Sugita: Self-organization of distributedly represented multiple behavior schemata in a mirror system: review of robot experiments using RNNPB, *Neural Networks*, **17**, 1273/1289（2004）
- [9] Kondo, T., Somei, T. and Ito, K.: A predictive constraints selection model for periodic motion pattern generation, *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'04)*（2004）pp.975-980.
- [10] Matsuoka, K.: Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators, *Biological Cybernetics* **56**（1987）pp.345-353.
- [11] Taga, G.: A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion, *Biological Cybernetics* **73**-1（1995）pp.97-111.
- [12] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J.: *Parallel Distributed Processing*, 1 The MIT Press（1988）.
- [13] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P.: Optimization by simulated annealing, *Science* **220**-4598（1983）pp.671-680.
- [14] Freeman, W. J.: Simulation of Chaotic EEG Patterns with a Dynamic Model of the Olfactory System, *Biological Cybernetics* **56**（1987）pp.139-150.
- [15] Kojima, K. and Ito, K.: Autonomous Learning Algorithm and Associative Memory for Intelligent Robots, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'01)*（2001）pp.505-510.
- [16] J. Tani: An Interpretation of the 'Self' from the Dynamical Systems Perspective: A Constructivist Approach, *Journal of Consciousness Studies*, **5**, 5/6（1998）

B 班研究活動報告

京都大学工学研究科 航空宇宙工学専攻 土屋和雄

I. 研究計画

B 班は動物の歩行運動を研究対象とし、特に、環境変動に対応した適応的歩行運動パターンの選択と実時間形成のメカニズムの解明に焦点を当てて研究を行う。研究計画（研究課題、研究内容）は次のとおりである。

A. 歩行運動の運動生理学研究

本研究では、適応的歩行運動を発現する神経機構の解明を行う。研究にはサル、ネコ、マウスという3種類の哺乳動物を用いる。まず、歩行行動の始動に先行する自動的な姿勢調節の神経機構を解析する。この解析では、姿勢や歩行に関与する基本的な神経機構が存在する脳幹に対して、大脳皮質、大脳辺縁系、小脳からの情報がどのような機能的意義を持つのかについて焦点を当てる。次に、合目的な目標達成型の歩行行動の発現を可能にする大脳皮質内の行動戦略（行動計画とプログラム）に関する解析を行う。特に、動物が四足歩行から二足歩行へ歩行戦略を変更する際に大脳皮質ニューロンがどのように姿勢と歩行の統合に関与するのかについての集中的な解析を行う。これらの研究成果を踏まえた上で、意識下における随意運動と情動行動の選択に関する神経機構の解析を行う。この解析では、大脳皮質と、皮質下構造としての大脳辺縁系・大脳基底核・小脳、そして脳幹との相互作用の解析に焦点を置く。

B. 歩行運動のバイオメカニクス

歩行運動は多数の筋骨格系に形成される秩序だった動的パターンである。骨格系は筋群によって形状が形成・維持されると共に、その運動が駆動される。本研究では、ニホンザルの新鮮屍体から採取した骨格系に関する X 線 CT データおよび筋群に関する解剖データをもとに、全身筋骨格系の数理モデル（身体力学モデル）を構築する。

C. 歩行運動のシステム研究

脊椎の運動ニューロンとその支配を受けている筋繊維群は運動の基本要素で運動単位と呼ばれる。これらの運動単位は感覚受容器の発生する感覚信号によって反射と呼ばれる運動を引き起こす。要素的な反射がいくつも複合したフィードバック制御系によって複雑な運動が制御されている。歩行運動はセントラルパターン発生器を組み込んだ複合的な制御系によって制御されている。基底核 大脳皮質 視床ループおよび基底核 脳幹経路からの上位指令は、脊髄における下降路群を介して制御系へ投射され歩行運動を制御している。本研究では、反射を土台として歩行運動の階層的制御機構の数理モデル（歩行制御神経回路網モデル）を導出する。そして、歩行制御神経回路網モデルと身体力学モデルと組み合わせた歩行運動の数理モデル（歩行運動システムモデル）を構築する。また、本研究では、二足歩行の訓練を受けたニホンザルに対して、四足歩行から二足起立歩行時の四股、体幹の運動学データ、エネルギー

消費量などの生理学データおよび骨格の解剖学的データを収集して、上記歩行運動システムモデルに基づくシミュレーション結果と比較分析して、歩行様式の切り替えにおける制御機構のシステム論的な検討を行う。

歩行運動機能の本質を表現する原理的な構造をつかみ出すためには、機能論的な視点に基づく構成論的な検討も必要である。そこで、リズム信号で駆動される歩行運動の単純化された数理モデルを用いて歩行運動の力学原理を明らかにする数理解析研究を行う。

D. バイオロボティクス研究

歩行ロボットは現在盛んに研究が行われているが、多くの歩行ロボットでは制御理論にもとづく歩行制御が行われている。すなわち、運動学モデル、動力学モデルに基づくモデルベース制御である。この歩行制御では環境に対して適応した歩行を実現することができない。本研究では、二足歩行ロボット、四足歩行ロボット、ヘビ形ロボットなど多種類のロボットを開発し、工学的に適応的歩行機能の設計原理を明らかにする。

II. 研究成果

本年度の研究成果は、各研究班の報告に詳しく纏められているが、主たる研究成果は次のとおりである。

A. 歩行運動の神経生理学研究

本年度は、姿勢制御の最も基本的な神経機構である脳幹 脊髄の姿勢筋緊張レベルの調節メカニズムを、除脳ネコ標本を用いて解析した。最初に橋と延髄に存在する網様体脊髄路ニューロンの発射活動と下部腰髄に存在する介在ニューロンの発射活動を解析し、次に、筋緊張亢進と筋緊張消失の各々の状態において、これらの脳幹と脊髄の筋緊張制御系がどのように脊髄反射弓の興奮性を修飾するのかを解析した。その結果、筋緊張抑制系は、1) 感覚性入力を減少させ、2) 歩行リズムを誘発する CPG を構成する介在ニューロン群の神経回路の活動や、3) 最終共通路である運動ニューロンの興奮性を抑制することが明らかとなった (Fig. 1)。

B. 歩行運動のバイオメカニクス

本年度は、ニホンザルの筋骨格モデルの構築を行った。具体的には、ニホンザル新鮮屍体を、X 線 CT を用いてスキャンし、その3次元体表面形状と骨形状を抽出した。そして、各関節面形状を二次曲面で近似し、骨座標系に対する二次曲面の向きから関節面座標系を、この座標軸から関節の回転軸を、二次曲面頂点の曲率から回転中心を決定した。こうして求めた関節面の形状情報に基づき、隣接する骨を関節させることによって、全身骨格を体幹部4節、前肢5節、後肢3節の計20節から成る直鎖リンク系として表現した (Fig. 2)。また、筋系の解剖学的に精密なモデル

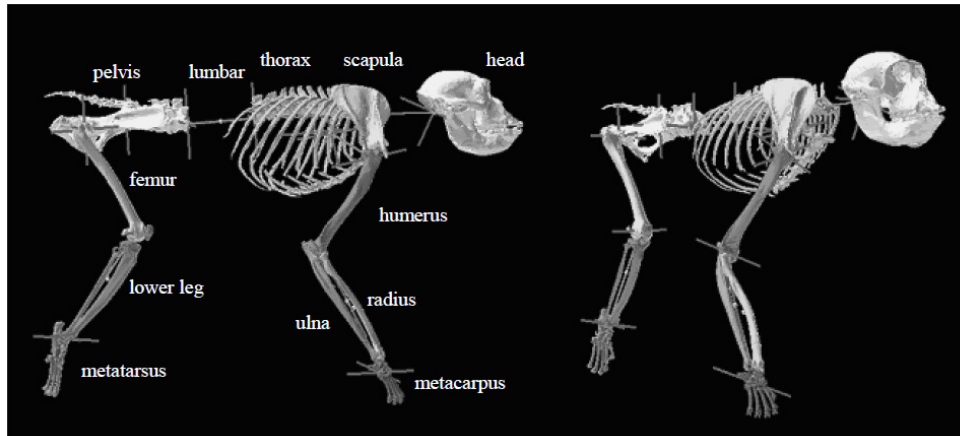


Fig. 2. Kinematic description of the whole body skeleton of a Japanese monkey as a chain of links. Only right fore- and hindlimb are shown.

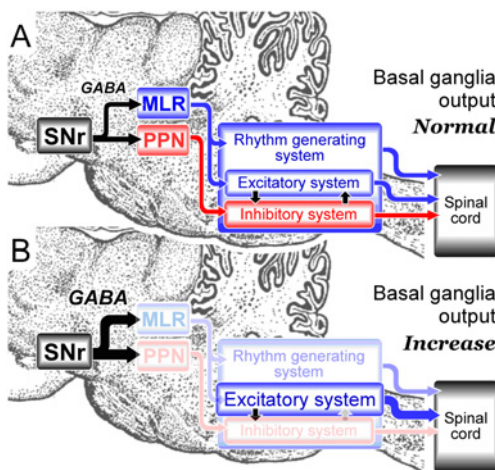


Fig. 1. Summary of the present findings.

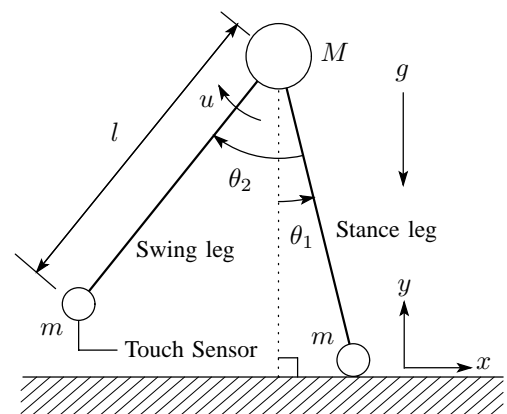


Fig. 3. Schematic model of a simple walking model.

化のために、新鮮屍体の解剖を行い、特に四肢の筋について起始点、停止点、筋走行を確認するとともに、筋重量と平均筋線維長を計測した。現在、この身体力学系の運動方程式を導出し、そのダイナミクスを仮想空間内で再現するシミュレーションプログラムの開発を進めている。

C. 歩行運動のシステム研究

本年度は、二足歩行の単純な2次元モデルを用いて、リズム信号によって駆動される歩行運動の基本特性を解析した。モデルは、胴体部分と1リンクの2本の脚から構成されている (Fig. 3)。各脚は非線形振動子の位相を指令値として駆動され周期的な往復運動を行う。このモデルは、適当な条件の下で定常的な歩行運動を実現し、その周期運動は微小摂動に対して自己安定性を持っていることを明らかにした。さらに、各脚先の床面に対する接地信号を非線形振動子にフィードバックすることによって、安定度が高くなることがわかった。

大脳基底核と歩行の制御 - 脊髄運動細胞に誘発されるシナプス機構 -

高草木 薫

要旨—歩行運動の発現には適切な筋緊張レベルが必要である。歩行障害や筋固縮（持続的な筋緊張の亢進）は大脳基底核疾患の一つであるパーキンソン病の重要な徴候である。最近の研究により大脳基底核の出力は視床大脳投射ループを經由して大脳皮質に作用すると共に、脳幹にも作用することが明らかとなってきた。歩行運動の発現や筋緊張の設定に関与する基本的な神経構造は脳幹に存在する。従って本研究では、大脳基底核から脳幹への出力系がどの様に歩行運動の制御に関与するかの解明を試みた。実験には除脳ネコ歩行標本を用い、脊髄 α 運動細胞に誘発されるシナプス電位の解析を試みた。中脳歩行誘発野 (Midbrain locomotor region ; MLR) に加えた電気刺激は運動細胞にはリズムカルな膜電位のオシレーションを誘発した。大脳基底核の出力核の一つである黒質網様部 (Substantia nigra pars reticulata; SNr) に電気刺激を加えると、オシレーションは停止すると共に、後肢の伸筋及び屈筋を支配する運動細胞の発射活動は亢進した。また、黒質網様部への刺激を停止すると、運動細胞のオシレーションは再開した。これらの成績は、大脳基底核から脳幹への抑制出力は、歩行リズムと姿勢筋緊張の双方を協調的に調節することにより歩行を制御すると考えられる。

I. はじめに

大脳基底核（以下基底核）は随意運動の発現に関与する [1]。歩行障害は基底核疾患であるパーキンソン病の主要症状である。典型的な症例では、すくみ足（歩行の開始の遅延）、歩行速度の低下、小刻み歩行などが観察される。また体幹は前方に屈曲（前屈姿勢）し、上肢の振り幅も極めて乏しい。病状の進行に伴い、姿勢は不安定で歩行も困難となり、これらの運動障害は医学的にも社会的にも深刻な問題となってきている。

パーキンソン病における運動減少症のメカニズムについては“基底核から視床への抑制性投射系の活動が亢進するため視床—大脳投射系の活動が低下し、これが大脳皮質運動領域の活動を低下させる”というのが基本的な考え方である [2, 3]。一方、基底核からは脳幹へ直接投射する経路が存在する。動物を用いた研究により、この経路が脳幹の神経機構を介して歩行と姿勢筋緊張の調節に関与することが明らかになった [4, 5]。中脳と呼ばれる脳幹の吻側部には、中脳歩行誘発野 (midbrain locomotor region ; MLR) と筋緊張抑制野とが存在する。後者は脚橋被蓋核 (pedunculo-pontine tegmental nucleus; PPN) の腹外側部に相当する。中脳吻側部で上位脳を離断した除脳ネコ標本において、MLR或いはPPNに連続微小電気刺激を加えると、各々歩行運動と筋緊張の消失を誘発することができる。また、基底核の出力の一つである黒質網様部に存在するGABA作動性ニューロンを賦活すると、この歩行運動と筋緊張の消失をブロックすることができる [4, 5]。

高草木 薫・旭川医科大学・生理学第二講座・078-8510 旭川市緑ヶ丘東 2-1,1-1 (phone: 0166-68-2331; fax: 81-166-68-2339; e-mail: kusaki@asahikawa-med.ac.jp).

これらの研究成績から、我々は「パーキンソン病の歩行障害には、基底核から脳幹の神経機構に対する過剰な抑制作用が関与する」という、もう一つの作業仮説を提案した。

本研究の目的は、後者の作業仮説の妥当性を評価することである。脳幹から脊髄への下行系の作用は、全て脊髄 α 運動細胞の活動に反映される。そこで、本研究では除脳ネコ標本を用い、後肢筋を支配する脊髄運動細胞の細胞内活動を記録・解析した。そして“大脳基底核から脳幹への抑制性投射が、歩行リズム生成機構と筋緊張の調節神経機構とをどの様に相互作用させて歩行を制御するのか？”解明を試みた。

II. 研究の方法

研究には11頭の雄あるいは雌の成ネコ（体重 2.8 - 3.5 kg）を用いた。全ての研究手順は Guide for the Care and Use of Laboratory Animals (NIH Guide ; 1996年改定) に基づき、使用する動物数や動物への負担を最小限にした。

A. 手術手技・手順

ハロセンと笑気の混合ガス麻酔環境下にて、上丘前縁と乳頭体後縁とを結ぶ面においてネコの脳幹を切断し、かつ上位脳を離断・除去した。腰椎～仙骨レベルで椎弓切除を施行し、第6腰椎から第1仙髄までを露出した。その後、頭部と腰椎を脳定位固定装置に固定した。

B. 刺激と記録

中脳～橋移行部の脳幹に微小電極を刺入し、SNr, MLR, PPN, そして青斑核 (Locus coeruleus; LC) に 5-10 s の連続微小電気刺激 (20-50 μ A, 50 Hz) を加え、運動細胞の細胞内膜電位の変化を誘発した。また、各々の領域に短矩形波刺激 (20 - 50 μ A, 3 連発, 5 ms 間隔) を加え、運動細胞に誘発されるシナプス後電位 (postsynaptic potentials; PSPs) を誘発した。

第6腰椎～第1仙髄のレベルから、後肢の伸筋および屈筋を支配する運動細胞の細胞内活動を導出・記録した。運動細胞は、末梢神経へ加えた電気刺激によって誘発される逆行性応答を基に同定、分類した。

C. フレームワーク (研究の枠組み)

本研究のフレームワークを図1に示した。MLR と PPN の筋緊張抑制野とは中脳外側被蓋に近接している [4]。MLR への電気刺激は、延髄網様体脊髄路細胞を介して脊髄のパターン発生器を駆動して歩行リズムを誘発すると共に、青斑核脊髄路や縫線核脊髄路などの筋緊張促通系 (興奮系) を賦活させて筋緊張を増加させる。一方、PPN の筋緊張抑制野の神経細胞の興奮は抑制性網様体脊髄路系を介して姿勢筋緊張を抑制する (抑制系)。さらに MLR と PPN の神経細胞の活動は SNr からの GABA 作動性の抑制性投射により調節されている [4, 5]。除脳ネコでは基底核の神経核群の中で唯一 SNr が温存されているので、SNr の神経細胞の興奮性を電気刺激や薬物注入により変えることにより MLR や PPN を介して誘発される歩行パターンや筋緊張の変化を解析することができる。

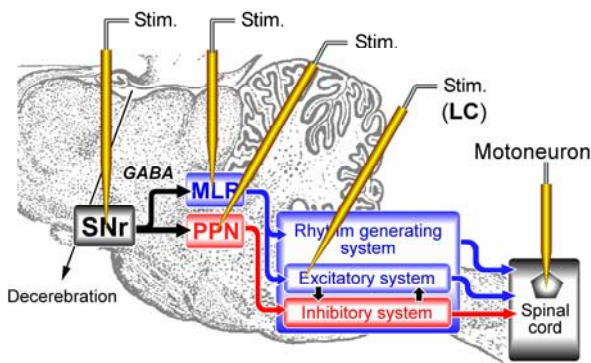


図1 研究の枠組み。

後肢の伸筋あるいは屈筋を支配する運動細胞から細胞内活動を導出・記録する。中脳歩行誘発野 (MLR) に加えた電気刺激はリズム生成系と筋緊張促進系を活動させる。また、筋緊張抑制野 (PPN) への電気刺激は抑制性網様体脊髄路系を活動させる。青斑核 (LC) に電気刺激を加え促進系を賦活させる。これらの下行系を賦活させた状態で、SNrへ電気刺激を加えることにより運動細胞に誘発される活動を解析することにより、基底核から脳幹への出力系がどのように歩行と筋緊張の制御に関与するのかを解析することが可能になる。

III. 研究成績

A. 脳幹の電気刺激により脊髄運動細胞に誘発される興奮性の変化

脳幹の各々の領域に加えた電気刺激の効果を47個の運動細胞で解析した。図2は後肢の踵関節伸筋群である外側腓腹ヒラメ筋 (lateral gastrocnemius-soleus; LG-S) を支配する運動細胞から記録した代表例である。連続微小電気刺激をMLRに加えると膜電位は脱分極側に移行し運動細胞のリズミカルな発射活動を伴う膜電位のオシレーションが誘発された (図2Ba)。脱分極には促進系の活動が、そしてオシレーションの生成には Central Pattern Generator; CPG を含むリズム誘発系が関与する。また青斑核への刺激により持続的な発射活動を伴う膜電位の脱分極が誘発された (図2Bb)。

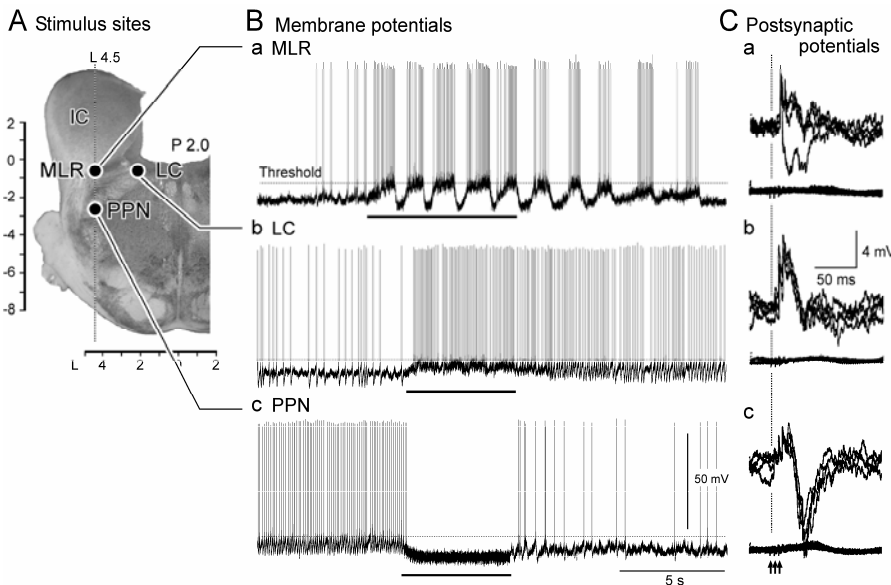


図2 歩行誘発系と筋緊張抑制系の活動により誘発される外側腓腹ヒラメ筋支配運動細胞の興奮性変化

A: 脳幹の前額断面上における刺激部位。B: 中脳歩行誘発野への刺激による律動的な膜電位のオシレーション (a)。青斑核への刺激による膜電位の脱分極 (b)。脚橋被蓋核への刺激により誘発された過分極電位 (c)。破線は運動細胞の発射閾値を、実線は刺激期間 (50 Hz, 40 μ A, 持続時間 4・7 秒間) を各々示している。C: 各々の領域への刺激により誘発されるシナプス後電位。歩行誘発野 (a) と青斑核 (b) への刺激は主に興奮性電位を、脚橋被蓋核への刺激 (c) は主に抑制電位を誘発する。刺激のパラメータは3連発, 40 μ A, 5 ms 間隔。IC: 下丘。

運動細胞の発射頻度の増加は筋緊張の増加を反映する。一方、PPN への電気刺激により発射活動は停止し膜電位は過分極側に移行した (図2Bc)。この現象は筋緊張が減少することを反映する。

短矩形波刺激を各々の領域に加えると、シナプス後電位が誘発される (図2C)。MLR と LC への刺激は主に興奮性シナプス後電位 (Excitatory postsynaptic potentials; EPSPs) を誘発するが、EPSP の衰退相には、小振幅の抑制性シナプス後電位 (Inhibitory postsynaptic potentials; IPSPs) がオーバーラップしている (図2 Ca and Cb)。一方 PPN の刺激は小振幅の EPSP に続いて大振幅の IPSPs を誘発した (図2Cc)。LC や PPN への連続刺激により誘発される膜電位の脱分極や過分極はこれらシナプス後電位の時間的-空間的加算効果によるものである。従って、これらの EPSP や IPSP は各々、筋緊張促進系と抑制系の興奮性を反映すると考えられる。

B. SNrへの電気刺激はどのように中脳歩行誘発野で誘発される運動細胞の歩行リズム活動を修飾するのか?

次に、基底核の出力が歩行リズムにどのような影響を及ぼすのかを解析した。図3は足底筋 (Plantaris; Pl; 踵関節伸筋群) と後大腿二頭筋 (Posterior Biceps Semitendinosus; PBSt; 膝関節屈筋群) から得られた細胞内記録である。

双方の運動細胞において SNr への刺激は MLR の刺激により誘発された律動的オシレーションの発生を抑制した。特にオシレーションの過分極相の振幅減少が著名であった (図3A と 3C, 表1)。この変化は、MLR の刺激により生じたシナプス後電位に反映されている。即ち、オシレーションが明瞭な時 (図3Aa) には、MLR 刺激により EPSP と IPSP とが交互に出現した (図3Ba) が、SNr 刺激中には IPSP の発現が抑制され、EPSP のみが誘発された (図3Bb)。しかしながら、SNr 刺激単独では運動細胞の発射活動には変化が誘発されなかった (図3Ac)。これらの成績は SNr 刺激が、運動細胞に対する抑制効果を取り除くことにより歩行運動の律動性を抑制したことを示唆する。

また、SNr 刺激と MLR 刺激とを組み合わせさせた場合、伸筋

運動細胞と屈筋運動細胞の双方を脱分極させたことから、伸筋と屈筋の筋緊張は共に増加したと考えられる。

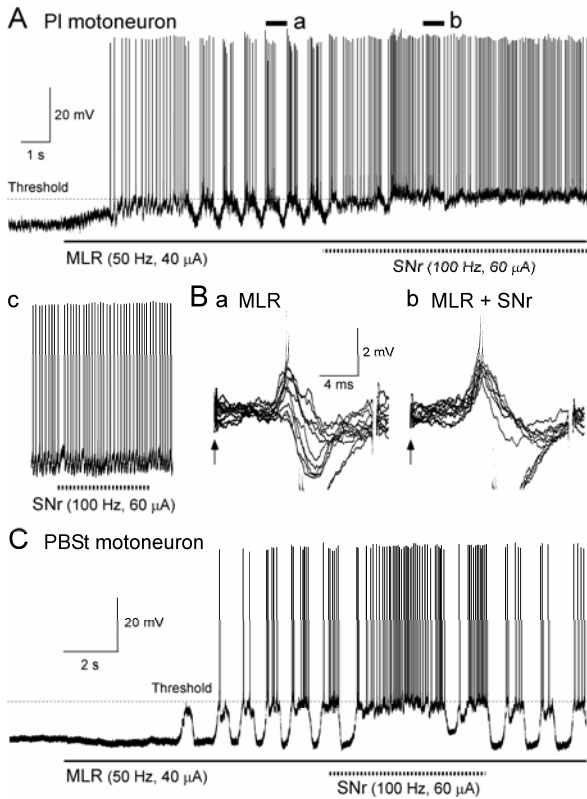


図3 歩行リズムに対する黒質網様部への刺激効果。

A; 足底筋運動細胞の細胞内記録。中脳歩行誘発野 (MLR) への電気刺激により誘発された膜電位のオシレーションと律動的発射活動は黒質網様部 (SNr) への刺激によりブロックされた。黒質網様部の刺激は、運動細胞内への脱分極電流 (5 nA) により誘発された自発発射活動に影響を与えなかった (c)。B; 歩行誘発野刺激により誘発されたシナプス後電位(a)。膜電位がオシレーションの際 (Aa), 興奮性電位と抑制性電位が観察される。黒質網様部の刺激を加えた場合 (Ab), 抑制電位は抑制され、興奮性電位のみが観察される (b)。C; 後大腿二頭筋支配運動細胞に誘発された律動的な発射活動も黒質網様部刺激により抑制された。網様部への刺激を停止後、膜電位のオシレーションが再開した。

C. 筋緊張調節系の活動に対する黒質網様部への刺激効果

基底核の出力は筋緊張制御系にも作用する (図1) 従って、筋緊張制御系を賦活し、運動細胞に誘発されるシナプス後電位に対する SNr 刺激の効果を解析した。そこで LC や PPN に刺激を加え、各々促通系と抑制系の活動に対応する EPSP と IPSP とを誘発した。

図4 はその一例である。SNr への刺激を単独に加えた場合、運動の膜抵抗は変化しなかった (図4A) が、同じ刺激は PPN 刺激で誘発される IPSP の振幅を著名に減少させた (図4B)。さらに、同一の SNr 刺激は LC 刺激により誘発される EPSP の振幅には影響を与えなかったが、EPSP の減衰相に重なる抑制電位の振幅を減少させた。従って SNr への刺激は筋緊張抑制系により誘発されるシナプス後抑制を取り除いた (脱抑制) と考えられる。表1には SNr の刺激により誘発される膜抵抗への作用とともに、筋緊張の促通系や抑制系の活動によ

り誘発される EPSP や IPSP に対する SNr 刺激の効果をまとめた。筋緊張は抑制系と促通系のバランスで維持されるので、SNr への刺激が抑制系の活動を低下させることは、基底核の出力亢進は、相対的に筋緊張を亢進させると考えられる。

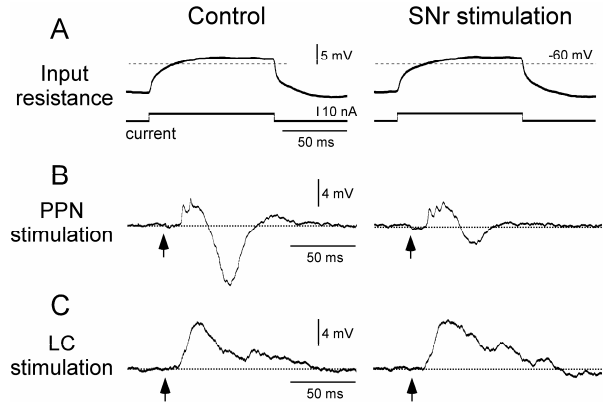


図4 黒質網様部の出力による筋緊張制御系の調節

外側腓腹ヒラメ筋運動細胞からの細胞内記録。A; 黒質網様部への刺激は運動細胞の膜抵抗を変化させなかった。運動細胞に振幅 10 nA, 持続 100 ms の脱分極電流を注入した。B; 脚橋被蓋核への刺激 (3 pulses, 40 μA, 5 ms 間隔) により誘発された抑制性シナプス後電位の振幅は黒質網様部の刺激により著明に減少した。C; 黒質網様部の刺激は、青斑核への刺激 (3 pulses, 40 μA, 5 ms 間隔) により誘発された興奮性シナプス後電位の振幅は変化させなかったが、減衰相の傾きは緩徐になった。各々の刺激時点は上向き矢印で示した。左のパネルはコントロール、右のパネルは黒質網様部の刺激による効果を示している。黒質網様部への刺激には 100 Hz, 60 μA の連続微小電気刺激を用いた。

表1 黒質網様部刺激の効果

	Control (n)	SNr effect (n)
N-oscillations/10s (cycles)	10.2 ± 2.7 (43)	3.5 ± 1.2 (20)*
V-oscillations (mV)	9.1 ± 3.9 (43)	4.6 ± 1.9 (20)*
Input resistance (MΩ)	1.4 ± 0.4 (7)	1.4 ± 0.4 (7)
Brainstem EPSPs (mV)	2.4 ± 1.0 (37)	2.8 ± 1.0 (30)
Brainstem IPSPs (mV)	2.8 ± 1.0 (37)	1.6 ± 0.9 (30)*

歩行誘発野への刺激で誘発される膜電位オシレーションの数 (N) 振幅 (V), 運動細胞の膜抵抗, 促通系や抑制系の賦活により誘発される興奮性および抑制性シナプス後電位に対して、黒質網様部の刺激効果を解析した。数字は、平均値, 標準偏差, サンプル個数を示している。*印は黒質網様部の刺激により有意 (p < 0.05) に変化したパラメータを示している。

IV. 考察

A. 基底核による歩行制御のメカニズム

この研究成績は、基底核から脳幹への投射系を介して歩行を制御する [5] というこれまでの研究結果を支持するものである。さらに、この投射系がリズム生成機構と筋緊張調節系の双方の活動を調節することで歩行運動を制御することも明らかとなった。また、SNr の単独刺激では運動細胞の興奮性が変化させないにも関わらず、MLR への刺激で誘発される歩行

リズムを抑制した。その際、SNrの刺激は運動細胞に対する興奮性作用を抑制せず、抑制性作用を抑制することが明らかとなった。このメカニズムは次の2点において極めて重要である。第一点は、オシレーションの過分極電位を生成する抑制神経機構をブロックすることで歩行リズムを抑制することである。これにより MLR 刺激は運動細胞に興奮作用のみを誘発することになり、その結果、伸筋および屈筋運動細胞の膜電位は双方ともに脱分極することになる。第二点は、筋緊張抑制系の活動も低下させたことである。筋緊張の促通系と抑制系との間には相互抑制作用が存在する [4] ので、青斑核脊髄路などの筋緊張促通系の活動は脱抑制を受けることになる。結果として、基底核から脳幹への抑制出力の増加は、歩行を停止させると共に、筋緊張を増加させると考えられる。その際、伸筋と屈筋の双方の筋緊張が増加することは関節を固定し、重力に対して身体のバランスを定常的に維持する様に働く上で有用であると考えられる。

これらの考え方に基くと、本研究の成績は図5様にまとめることができる。歩行運動はリズム生成機構に加えて筋緊張の促通系と抑制系の双方の活動を必要とする(図5A)。しかし、基底核から脳幹への抑制出力が増加すると、リズム生成機構と筋緊張抑制系の活動が低下するが、筋緊張促通系の活動は相対的に増加すると考えられる。その結果、筋緊張レベルが高い状態で歩行は停止する(図5B)。そして、基底核からの出力が低下すると、歩行が開始する。結果として、基底核は複数の下行系の活動性を並列的に修飾することにより歩行を制御するのであろう。

B. 基底核の持つ抑制メカニズムの機能的意義

パーキンソン病では、筋緊張の亢進に加えて歩行障害が出現する。従って基底核は姿勢と歩行の制御に重要な役割を果たしている [4, 6]。随意運動は基底核-視床大脳投射系(大脳皮質-基底核ループ)を介して制御される [2] が、一方、姿勢筋緊張と歩行は基底核から脳幹の投射系を介して制御されるであろう [4, 5]。

大脳皮質や脳幹の活動は基底核からの持続的な抑制作用で、その興奮性が常に抑制されている [1]。この基底核が持つ抑制作用によるシステム制御メカニズムの一つとして“空間的-時間的コントラスト”の強調が上げられる [1]。この機能は、抑制の強化と脱抑制の順序を組み合わせるにより発揮される。例えば、何時、歩行を開始するのか、或いは、歩行をとめるのか、はこのプロセスにより制御されるのであろう。

基底核の持つ抑制作用による第二の運動制御メカニズムは、持続的な抑制作用を強調したり、あるいは低下したりすることにより、標的とする運動システムの活動自由度を規定することである。この制御過程は標的とする運動システムの活動性を定常的に維持する上で重要であろう。例としては、歩行時におけるリズムカルな上下肢の歩行動作やそれに随伴する筋緊張レベルの定常的制御などであろう [4]。

従って基底核は、標的とする運動システムに対して“時間的-空間的なコントラスト”とその“活動自由度”という2つの鋳型(Template)を与えるのであろう。基底核は大脳皮質から認知情報や随意情報を、辺縁系から情動の情報を受ける。従って基底核は随意性、或いは情動性の信号を、状況(文脈)に依存した適応を可能にする行動発現へと変換する働きを持つと考えられる。

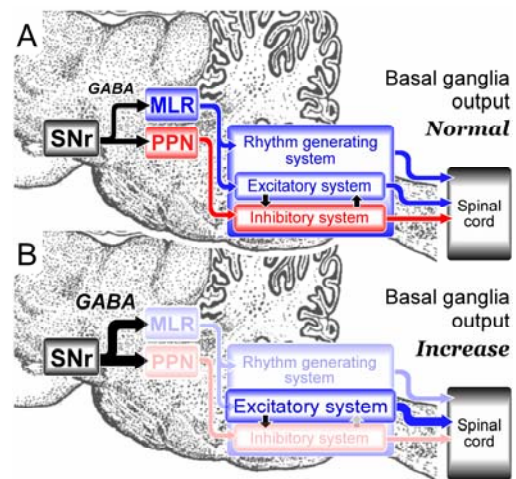


図5 本研究のまとめ.

V. 結論

基底核から脳幹への出力は歩行リズム誘発系と共に筋緊張制御系の活動を修飾することにより歩行を制御することが明らかとなった。基底核からの抑制出力の亢進は歩行を停止させ、同時に筋緊張レベルを増加させる。基底核からの出力が異常に増加した場合、このメカニズムの機能破綻がパーキンソン病における歩行障害と筋緊張の亢進(固縮)の背景に存在すると思われる。

引用文献

- [1] O.Hikosaka, Y.Takikawa, R.Kawagoe: "Role of the basal ganglia in the control of purposive saccadic eye movements", *Physiol. Rev.*, vol. 80, pp.954-978, (2000).
- [2] T.Hanakawa, Y.Katsumi, H.Fukuyama, M.Honda, T. Hayashi, J.Kimura and H.Shibasaki: "Mechanisms of underlying gait disturbance in Parkinson's disease: a single photon emission computed tomography study", *Bain*, vol.122, pp.1271-1281, (1999).
- [3] G.E.Alexander, M.R.Delong and P.E.Strick: "Parallel organization of functionally segregated circuits linking basal ganglia and cortex," *Ann. Rev. Neurosci.*, vol.9, pp.357-381, (1986).
- [4] K.Takakusaki, K.Saitoh, H.Harada and M.Kashiwayanagi: "Role of basal ganglia - brainstem pathways in the control of motor behaviors", *Neurosci. Res.*, vol. 50, pp.137-151, (2004)..
- [5] K.Takakusaki, T.Habaguchi, J.Ohtinata-Sugimoto, K.Saitoh and T.Sakamoto: "Basal ganglia efferents to the brainstem centers controlling postural muscle tone and locomotion; A new concept for understanding motor disorders in basal ganglia dysfunction", *Neurosci.*, vol.119, pp.293-308, (2003).
- [6] P.A.Pahapill and A.M.Lozano: "The pedunculo-pontine nucleus and Parkinson's disease", *Brain*, vol.123, pp.1767-1783, (2000).

基底核－脳幹－脊髄系神経回路網と身体筋骨格構造の 力学的秩序形成による歩行運動生成

荻原直道¹，杉本靖博²，青井伸也²，辻田勝吉³，土屋和雄²

¹京都大学大学院理学研究科動物学教室

²京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

³大阪工業大学工学部電気電子システム工学科

1. はじめに

動物は、その冗長で複雑な筋骨格構造を巧みに協調させ、多様な環境に適応的に変化した歩行運動を生成することができる。こうした動物の優れた歩行生成知能の解明に向けて、従来、歩行神経回路網の形態や活動を直接的に計測する神経生理学的研究と、シミュレーションモデルやロボットを用いて運動を再現する工学的研究がそれぞれ独立に行われてきた。しかし、歩行運動は神経系と筋骨格系の力学的相互作用によって形成される秩序だった運動であり、神経活動記録のみから歩行の支配原理を理解するには限界がある。一方、ロボットの運動制御は生体のそれと直接対応がつかうものではなく、ロボットが歩くという事実は必ずしも生体の運動原理の理解につながってはいない。動物の歩行生成原理を真に理解するためには、生物学的データに基づく要素論的方法と、力学に基づく構成論的方法の両アプローチを融合した新しい研究パラダイムを構築することが不可欠となっている。

本研究では、動物の筋骨格構造の解剖学的数理モデルと、神経生理学的知見に基づく歩行神経制御系の数理モデルを構築し、両力学系の機能的な統合により発現する歩行運動を計算機内にシミュレートすることを通して、動物の適応的歩行運動の生成原理を解明することを目指している。特に本研究では、ニホンザル(*Macaca fuscata*)の四足・二足歩行を対象として研究を進める。これは、(1)ニホンザルが歩行神経生理学の実験動物として用いられているため[1-3]、生理学的実験とシミュレーション実験の対比が可能となること、(2)ニホンザルの四足歩行から二足歩行への遷移が、二足歩行の起源を探

る上で人類学的に興味深い研究対象となっていること[4-8]、(3)ヒトと系統的に近い霊長類の解析によって得られる知見は、ヒトにも直接応用可能であると期待されること[9,10]、による。

本年度は、ニホンザルの全身筋骨格モデルの構築と、神経生理学的知見に基づく歩行制御機構の基礎的検討を行った。以下にその概要を示す。

2. ニホンザル身体力学系のモデル化

筋骨格系の構造が規定する運動学的・生体力学的拘束を正確に再現するために、本研究ではニホンザル新鮮屍体(オトナオス)を、X線CTを用いてスキャンし、得られた0.5mm間隔、計1935枚の連続断層画像から、ニホンザルの全身3次元体表面形状と骨形状を抽出した(図1)。断層画像のピクセルサイズは0.75mmである。ただし、詳細な形状情報を必要とする関節部や手・足部節については、各部位ごとに高解像度(0.2mm)でスキャンし直し、そのデータを合成した。CT画像および3次元形状データの処理にはAnalyze5.0とRapidForm2004を用いた。

取得した各骨の形態情報から、まず主軸を計算し、部材座標系(骨座標系)を定義した。そして、各関節面形状を二次曲面で近似し、骨座標系に対する二次曲面の向きから関節面座標系を、この座標軸から関節の回転軸を、二次曲面頂点の曲率から回転中心を決定した(図2)。こうして求めた関節面の形状情報に基づき、隣接する骨を関節させることによって、関節運動の幾何学的拘束を表現した。

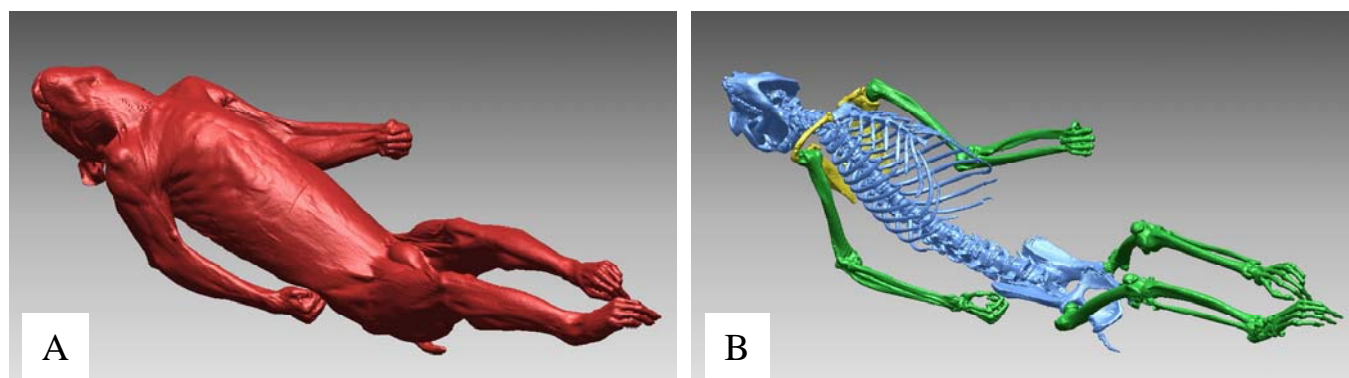


図1 ニホンザルの全身3次元体表面形状(A)と骨形状(B)

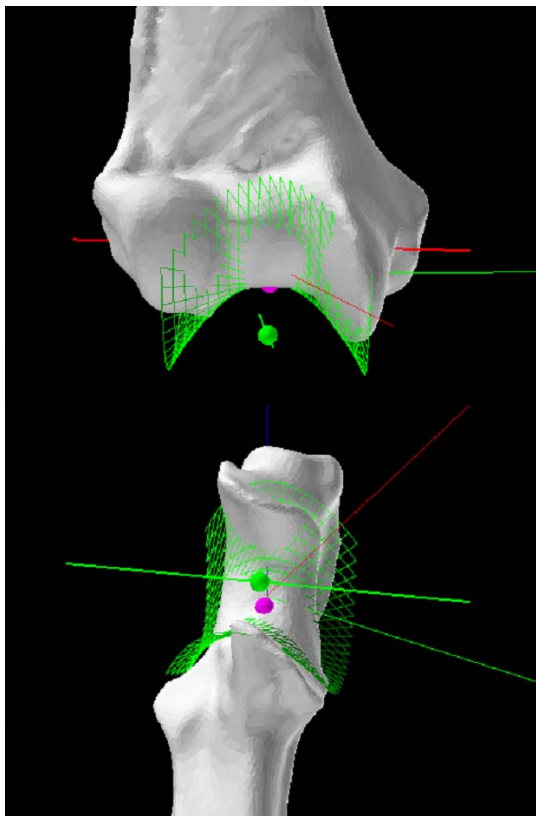


図2 二次曲面による肘部関節面形状の近似。上腕骨遠位部と尺骨近位部はそれぞれ双曲放物面により近似される。その近似結果を元に関節軸と回転中心を推定し、それらが一致するように両者を関節させている。

図3に構築した全身骨格モデルを示す。本研究では、ニホンザルの全身骨格を、体幹部4節（頭部、胸部、腰部、骨盤）、前肢左右各5節（肩甲骨、上腕骨、尺骨、橈骨、手部）、後肢左右各3節（大腿骨、脛骨、足部）の計20節から成る直鎖リンク系として表現した。体幹の関節は、それぞれ3軸の関節としてモデル化した。肩甲骨の運動は、モデル化の困難さから従来ほとんど考慮されて来なかったが、実際には歩行の推進力の生成にとって重要な要素であることが指摘されている

[11,12]。このため本研究では、胸部面に沿って並進し、その面に垂直な軸まわりに回転する肩甲骨の自由度を3軸の回転関節でモデル化した。ここに鎖骨や筋が付着することによって、実際の肩関節の構造制約を再現することができる。前肢の肩甲骨上腕関節は2軸、肘関節と橈尺連結は1軸、手首（橈骨手根関節）は2軸の関節で表現した。後肢の股関節、膝関節、足首（距腿関節）は、それぞれ3、1、2軸の関節でモデル化した。したがってモデルの自由度は計45となる。骨格系の構造制約をその形状情報に基づいて正確に記述した結果、関節の回転軸が部材座標系の軸と必ずしも一致していないことが分かる。

各節の剛体特性（重心位置、慣性テンソル）は、体表面データを各関節の回転中心で分割して算出した。算出には3次元CADソフトウェアAutodesk Inventor 10を用いた。身体材料の密度は組成の違いによらず 1.0 g/cm^3 とした。この結果、本モデルの体重は 10.0 kg と推定された。これはニホンザルオトナオスの平均的な体サイズとほぼ一致する。

本身体力学モデルの運動方程式は、式(1)のように表される。

$$M\ddot{q} + h(\dot{q}, q) + g - \alpha(q) + \beta(\dot{q}) = T + \Phi \quad (1)$$

ここで q は状態変数ベクトル（頭部6自由度+関節角度）、 T は関節トルク、 M は慣性項、 h は遠心力、コリオリ力を表す項、 g は重力項、 Φ は床反力項、 $\alpha(q) + \beta(\dot{q})$ は関節の可動特性を表現する粘弾性要素が発揮するトルクを表している。床面との接触により作用する力は、線形粘弾性要素によりモデル化する。

3. 筋系のモデル化

ニホンザルの筋の解剖学的情報を定量的に示した研究報告は、一部の筋群については存在するものの、そのすべてを体系的に計測した試みは著者の知る限り存在しない。そこで本研究ではニホンザル新鮮屍体（オトナメス）の解剖を行い、

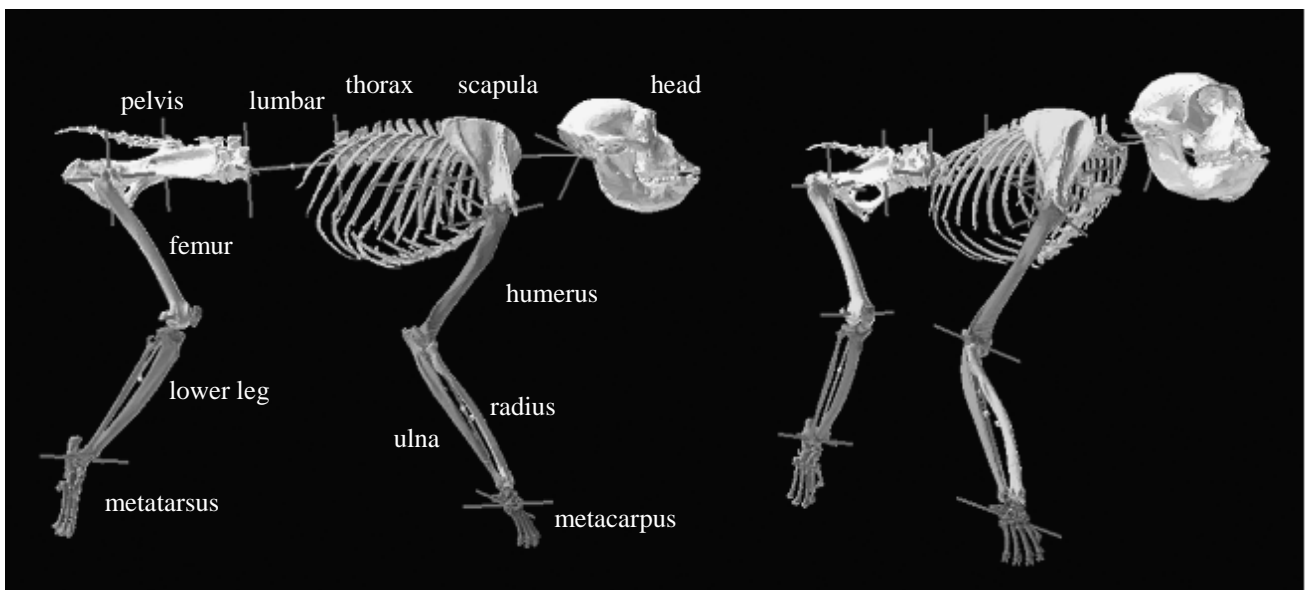


図3 ニホンザルの全身骨格モデル。前後肢は右側のみ表示している。



図4 ニホンザル前肢の解剖。

特に四肢の筋について起始点，停止点，筋走行を確認するとともに，筋重量と平均筋線維長を計測した(図4)。その観察・計測結果を元に，骨格系に対する筋の幾何学的配置の数理モデル化を行った。筋走行は起始点から停止点までを必要に応じて経由点を介して結ぶ線分として定義した。これより筋力の作用方向を定義することができる。

筋が発揮する収縮力 f によって生じる関節トルク T は

$$T = G^T f \quad (2)$$

で与えられる。ここで G はモーメントアーム行列であり，各要素は回転軸と筋力の作用方向の幾何学的関係によって決まる。各筋が発揮する最大筋力は，その生理学的断面積に比例するものとした。生理学的断面積は，筋容積を平均筋線維長で除することによって求められる。各筋は神経系からの活動指令によって収縮力を発揮するが，その変換機構には筋長と収縮速度が関係する。Wagner と Blickhan は，こうした筋の機械的な特性がフィードバック系として自律的に働くことによって，筋骨格系の周期運動を自律的に安定化する仕組みを内在することを示している[13]。したがって本研究では筋の力学特性も数理モデルによって組み込む。

4. 歩行制御神経回路網のモデル化

歩行運動のような生体の基本的なリズム運動は，脊髄に存在するリズム生成神経回路網(CPG)が，MLR からの持続的な刺激により発生する，各筋への交代性の運動指令により生成されると考えられている(図5)[14-16]。しかし，CPG 単独で環境や外乱に対して自律的に適応する歩行を生成することはできないわけではなく，自己受容器など様々な感覚器からの情報に基づいて CPG の発生する歩行パターンが協調的に変化することによって，適応性の高い歩行運動が形成されることが明らかとなっている[17]。

近年，脊髄から小脳に感覚情報を投射する神経の生理学的研究から，自己受容器からの局所的感覚情報は，介在ニューロンにより脊髄レベルで統合され，脚全体の大域的な運動状態，すなわち脚の最近位関節から接地点をむすぶ軸(脚軸)

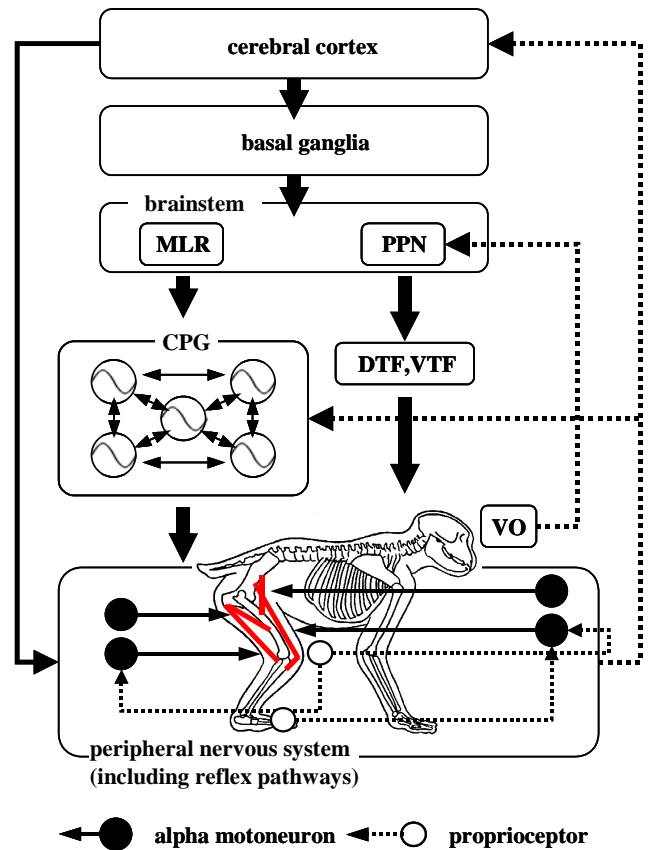


図5 歩行制御神経回路網の全体図。MLR=中脳歩行誘発野，PPN=脚橋被蓋核，DTF/VTF=橋中心被蓋野背側部/腹側部，VO=前庭器官。実線：遠心性信号，破線：求心性信号。

の向きと長さに変換されてコードされていることが明らかになってきた[18-20]。このことは，脚の運動パターンを適応的に変化させるための求心性信号として，個々の筋や関節といった多数の局所的感覚信号ではなく，脚のキネマティクスを表現する少数の大域的信号が用いられていることを示唆している。一方，動物の運動生成もキネマティクスに基づいて行われていることを示唆する報告がある。Grasso らは，ヒトの前進2足歩行と後進2足歩行では，筋活動パターンは大きく異なるものの，関節角度変化パターンはほとんど変化しないことを示した[21]。

これらの知見は，(1)CPG の状態変数が，脚の運動，すなわち脚の中心軸の向きと長さを表現しており，それに基づいて各筋への運動指令が作られていること，(2)CPG 間の相互作用と脚からの大域的感覚信号により，CPG の位相差がダイナミックに変化することによって環境や外乱に対して適応的な歩行が生成されていること，を示唆している。したがって本研究では，CPG は脚軸の向きと長さを生成する振動子として構成され，脊髄介在ニューロンがその指令を目標値として筋の運動指令を生成すると仮定し，モデル化を進める予定である。

ただし，歩行運動は上述のリズム制御系のみによって生成されるわけではなく，姿勢制御系も大きく寄与している。身体の姿勢や平衡は，基本的に脚の筋緊張によって制御されているが，この筋緊張は DTF や VTF を介して PPN によって制御されている。本研究ではこの経路も，脚の大域的パラメータによって制御されている，すなわち DTF/VTF は脚軸のコン

プライアンスを表現し、脊髄介在ニューロンがその指令を目標値として筋の運動指令を生成すると仮定してモデル化することを考えている。

歩行運動の開始・持続・停止は、大脳基底核が MLR を介して歩行の位相制御系を、PPN を介して筋緊張制御系を調節し、状況に依存した歩行と姿勢の統合的制御を行うことによって生成されている[22,23]。また、前庭器官や自己受容器など様々な感覚器からの信号が統合される小脳も、この過程に大きく寄与していると予想される[24]。今後さらなる生理学的知見の検証を進め、最終的には基底核-脳幹-小脳-脊髄系全体のモデルを構築することを目指している。

5. 今後の方針

CT および屍体解剖により取得した解剖学的情報をベースに、ニホンザル身体筋骨格構造の運動学的・生体力学的制約をできる限り精密に再現した筋骨格モデルの開発を進めた。また、生理学的知見に基づき、神経制御系の具体的なモデル化について検討を行った。

筋骨格系の形態情報とその動きを支配する物理学的法則を詳細に記述した本モデルによるシミュレーションは、計測が困難な生体内の力学現象を再現することができると思われる。今後、歩行神経系の数理モデルを筋骨格モデルに実装し、コンピュータ内で神経筋骨格系全体の振る舞いをシステム論的に考察することを通して、動物の適応的歩行運動の発現メカニズムに迫っていきたいと考えている。

謝辞

ニホンザルを解剖する機会を与えてくださった京都大学霊長類研究所の遠藤秀紀教授に深謝いたします。

参考文献

- [1] S. Mori, E. Miyashita, K. Nakajima and M. Asanome, "Quadrupedal locomotor movements in monkeys (*M-fuscata*) on a treadmill: Kinematic analyses", *Neuroreport*, vol. 7, pp.2277-2285, 1996.
- [2] F. Mori, K. Nakajima, A. Tachibana, C. Takasu, M. Mori, T. Tsujimoto, H. Tsukada and S. Mori, "Reactive and anticipatory control of posture and bipedal locomotion in a nonhuman primate", *Progress in Brain Research*, vol. 143, pp.191-198, 2004.
- [3] K. Nakajima, F. Mori, C. Takasu, M. Mori, K. Matsuyama and S. Mori, "Biomechanical constraints in hindlimb joints during the quadrupedal versus bipedal locomotion of *M-fuscata*", *Progress in Brain Research*, vol. 143, pp.183-190, 2004.
- [4] S. Hayama, M. Nakatsukasa and Y. Kunimatsu, "Monkey performance: The development of bipedalism in trained Japanese monkeys", *Acta Anatomica Nipponica*, vol. 67, pp.169-185, 1992.
- [5] E. Hirasaki, N. Ogihara, Y. Hamada, H. Kumakura and M. Nakatsukasa, "Do highly trained monkeys walk like humans? A kinematic study of bipedal locomotion in bipedally trained Japanese macaques", *Journal of Human Evolution*, vol. 46, pp.739-750, 2004.
- [6] M. Nakatsukasa, N. Ogihara, Y. Hamada, Y. Goto, M. Yamada, T. Hirakawa and E. Hirasaki, "Energetic costs of bipedal and

- quadrupedal walking in Japanese Macaques", *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 124, pp.248-256, 2004.
- [7] N. Ogihara, H. Usui, E. Hirasaki, Y. Hamada and M. Nakatsukasa, "Kinematic analysis of bipedal locomotion of a Japanese macaque that lost its forearms due to congenital malformation", *Primates*, vol. 46, pp.11-19, 2005.
- [8] M. Nakatsukasa, E. Hirasaki, and N. Ogihara, "Energy expenditure of bipedal walking is higher than that of quadrupedal walking in Japanese macaques", *American Journal of Physical Anthropology*, in press.
- [9] G. Courtine, R.R. Roy, J. Hodgson, H. McKay, J. Raven, H. Zhong, H. Yang, M.H. Tuszynski and V.R. Edgerton, "Kinematic and EMG determinants in quadrupedal locomotion of a non-human primate (Rhesus)", *Journal of Neurophysiology*, vol. 93, pp.3127-3145, 2005.
- [10] G. Courtine, R.R. Roy, J. Raven, J. Hodgson, H. Mckay, H. Yang, H. Zhong, M.H. Tuszynski and V.R. Edgerton, "Performance of locomotion and foot grasping following a unilateral thoracic corticospinal tract lesion in monkeys (*Macaca mulatta*)", *Brain*, vol. 128, pp.2338-2358, 2005.
- [11] M.S. Fischer, "Locomotory organs of mammals: New mechanics and feed-back pathways but conservative central control", *Zoology*, vol. 103, pp.230-239, 2001.
- [12] M.S. Fischer and H.F. Witte, "Evolution of vertebrate locomotory systems", in *Walking: Biological and Technological Aspects (CISM Courses and Lecture Notes No.467)*, F. Pfeiffer and T. Zielinska, Eds., Wien: Springer-Verlag, 2004, pp.51-79.
- [13] H. Wagner and R. Blickhan, "Stabilizing function of skeletal muscles: an analytical investigation", *Journal of Theoretical Biology*, vol. 199, pp.163-179, 1999.
- [14] S. Grillner, "Locomotion in vertebrates: central mechanisms and reflex interaction", *Physiological Reviews*, vol. 55, pp.274-304, 1975.
- [15] M.L. Shik and G.N. Orlovsky, "Neurophysiology of locomotor automatism", *Physiological Reviews*, vol. 56, pp.465-501, 1976.
- [16] E. Eidelberg, J.G. Walden and L.H. Nguyen, "Locomotor control in macaque monkeys", *Brain*, vol. 104, pp.647-663, 1981.
- [17] V. Dietz, "Proprioception and locomotor disorders", *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 3, pp.781-790, 2002.
- [18] G. Bosco and R.E. Poppele, "Proprioception from a spinocerebellar perspective", *Physiological Reviews*, vol. 81, pp.539-568, 2001.
- [19] R.E. Poppele, G. Bosco and A.M. Rankin, "Independent representations of limb axis length and orientation in spinocerebellar response components", *Journal of Neurophysiology*, vol. 87, pp.409-422, 2002.
- [20] R. Poppele and G. Bosco, "Sophisticated spinal contributions to motor control", *Trends in Neurosciences*, vol. 26, pp.269-276, 2003.
- [21] R. Grasso, L. Bianchi and F. Lacquaniti, "Motor patterns for human gait: Backward versus forward locomotion", *Journal of Neurophysiology*, vol. 80, pp.1868-1885, 1998.
- [22] K. Takakusaki, T. Habaguchi, J. Ohtinata-Sugimoto, K. Saitoh and T. Sakamoto, "Basal ganglia efferents to the brainstem centers controlling postural muscle tone and locomotion: A new concept for understanding motor disorders in basal ganglia dysfunction", *Neuroscience*, vol. 119, pp.293-308, 2003.
- [23] K. Takakusaki, K. Saitoh, H. Harada and M. Kashiwayanagi, "Role of basal ganglia-brainstem pathways in the control of motor behaviors", *Neuroscience Research*, vol. 50, pp.137-151, 2004.
- [24] G.N. Orlovsky, "Influence of the cerebellum on the reticulo-spinal neurons during locomotion", *Biophysics*, vol. 15, pp.928-936, 1970.

B-3班:脳・環境・身体の動的相互作用による適応的ロコモーションの工学的実現

細田耕, 木村浩, 井上康介

Abstract—ロボットの行動は、制御則、環境そして身体の相互作用によって生み出される。B-3班では、このような相互作用を利用し、ヘビ型、四足、二足ロボットについて適応的ロコモーションを工学的に実現する手法について研究することを目的としている。本報告では、各移動モードについて、ロボットの身体設計と適応的ロコモーションのための下位の制御系の実現について述べる。

I. はじめに

文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現 - 移動知の構成論的理解」は、2005年より5年間の計画で始まった。本プロジェクトの主な目的のひとつに、適応的ロコモーション創発のための設計原理の解明がある。適応的ロコモーションは、制御則、環境、そして進退の相互作用から創発するが、B-3班はさまざまな移動モードについて、この問題に構成論的な立場から取り組むことを目的としている。

ここで対象とするロボットは、多自由度を有するヘビ型ロボット、四足歩行ロボットおよび二足歩行ロボットである。本研究班では制御アーキテクチャとして、リズム発生機構やフィードバックからなる下位の制御層と視覚などの外界センサに基づいて志向性を有する上位の制御層の二層からなるアーキテクチャが運動発現に効率的でないかと考えている (Fig. 1)。そしてこのようなアーキテクチャのうち、どの部分までが身体構造や移動モードに依存性が強く、どの部分が移動モードにかかわらず普遍的に用いることができるかについての調査を行う。

2005年度は、ハードウェアの実装と、適応的なロコモーションを生み出すための、リズム発生機構やフィードバックからなる下位の制御層の開発を、各移動モードについて行ったのでその成果を報告する。

II. ヘビ式移動様式

ヘビは細長い索状の身体を有する動物であり、その身体をくねらせることで身体の底面、側面における環境との間の摩擦・押しつけ等の力学的相互作用を作り出しながら運動を行う。生物のヘビでは、この移動様式を活かして凹凸のある地面上、砂上、水中や木の枝の上などの多様な環境での運動が見られる (Fig. 2)。この運動のメカニズムは、脚型の動物とは本質的に異なるものであり、その運動様式における移動知が歩行運動におけるそれと共通している部分、そうではない部分を明らかにすることにより、運動様式に依存する移動知とそうではない移動知についての知見が得られることが期待される。

細田耕, 大阪大学大学院工学研究科
hosoda@ams.eng.osaka-u.ac.jp
木村浩, 電気通信大学情報システム学研究科
hiroshi@kimura.is.uec.ac.jp
井上康介, 茨城大学工学部 k.inoue@mx.ibaraki.ac.jp

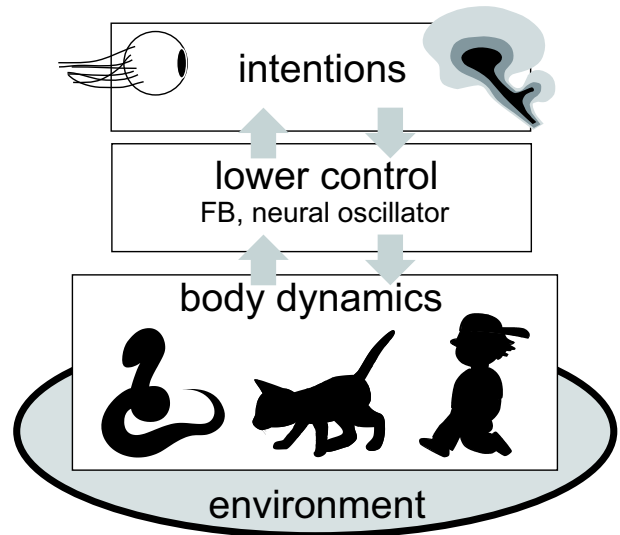


Fig. 1. Overall architecture for adaptive locomotive agents



Fig. 2. Locomotion in various environments in living snakes

A. CPGによる適応的蛇行運動生成

これまでに、既存のヘビ型移動ロボット (Fig. 3) に対して、生物の脊髄におけるCPGによる運動パターン生成を模倣した自律分散制御システム (Fig. 4) を実装して蛇行運動の自律分散制御を実現してきた。これに対して、本年度の研究では、このCPG制御器に対して与えるセンサ情報として、ロボット底面と環境 (接地面) との力学的相互作用に着目し、これを計測するセンサ (Fig. 5) を開発するとともに、センサから得られる力情報によりCPG制御器による運動の適応を目指して研究を行った [1]。

現状までに、蛇行運動時のセンサ入力を測定し、得られるセンサ値がクーロン摩擦モデルに基づいて行ったシミュレーションとは異なる特性を持っていることが明らかとなった (Fig. 6)。現在このモデル化を行い、実際的なセンサモデルに基づく適応的な制御器パラメータ導出を行っている。

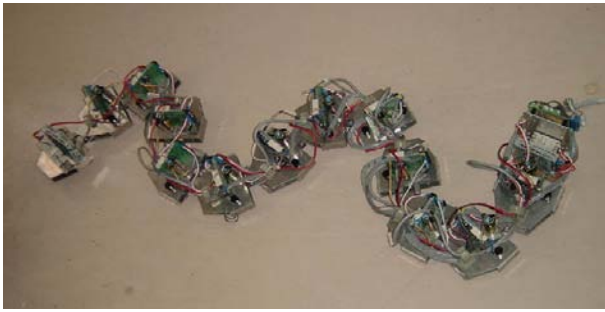


Fig. 3. Snake-like robot

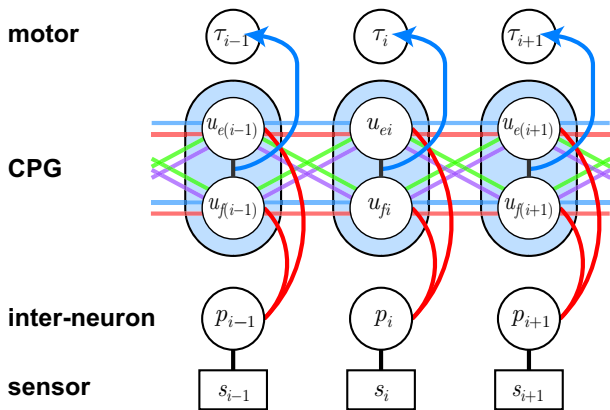


Fig. 4. Decentralized controller based on CPG

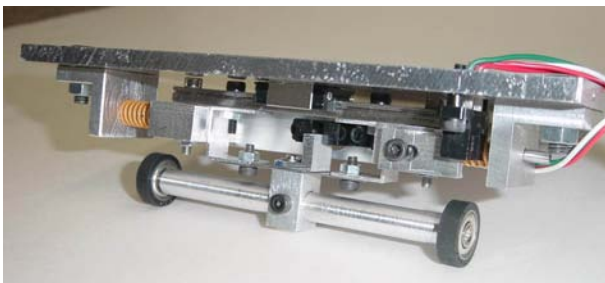


Fig. 5. Sensor to measure friction and normal force

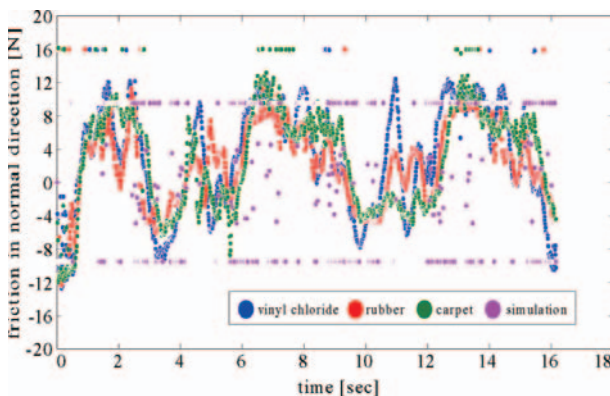


Fig. 6. Sensor pattern during meandering locomotion



Fig. 7. Tekken 4: a dog-type service robot exhibited at Aichi expo

B. ヘビに関する生理学的調査

今年度から次年度にかけてヘビの運動に関わる解剖学・神経生理学的知見について調査を行う。今年度は、本領域の主催する生物学セミナーへの参加などを通じて、動物全般にわたる基本的な生理学的研究の状況を調査した。今後、爬虫類を専門とする研究者・研究室等の訪問などによる、ヘビに関する調査を実施する。

C. ヘビの筋骨格系を模倣したロボットの概念設計

次年度、生物のヘビの筋骨格系構造・筋肉特性を模倣したヘビ型ロボットの開発を行う予定である。今年度は、購入した並列計算機を用いた物理学シミュレーション、および購入したアクチュエータによる予備実験などに基づき、機構の概念設計を行っている。

III. 四足移動様式

四足ロコモーションは哺乳類で一般的である。ヘビ式ロコモーションに比べると、摩擦によるところが少なく、より身体の持つダイナミクスが支配的となっている。二足ロコモーションに比べると安定性について寛容であり、移動速度に伴ってさまざまなモードを発現する。

A. 四脚ロボットの自律不整地歩行

将来活躍が期待される犬型のサービスロボットとして、完全自立型の四脚ロボット「鉄犬3」および「鉄犬4」を開発した (Fig. 7 に鉄犬4 の写真を示す)。特に鉄犬4は、愛知万博で11日間のデモンストレーションに耐えうるよう、信頼性の高いメカニズムを採用している [2]。これらのロボットにはレーザレンジセンサと CCD カメラが装備されており、従来の CPG と反応・反射を組み合わせた歩行生成に、これらのセンサを用いた旋回アルゴリズムを組み合わせ、情報によるナビゲーションの実験を行った。

B. 四脚ロボットの自律不整地走行

エネルギー効率がよく、不整地からもたらされる外乱を押さえることのできる定常走行を自律的に実現できる四脚走行制御を設計し、安定性について調べた。まず四脚ロボットの矢状面内の準受動的な走行について安定な周期解を求め、摩擦や衝突を外乱とみなして、これらを抑えるような制御則を提案する。

ロボットのエネルギーを実測することは困難であるため、接触センサにより実用的な精度で計測可能な支持脚期間を

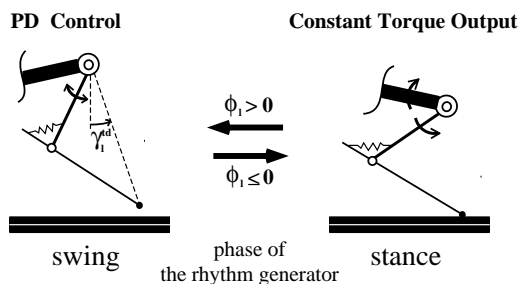


Fig. 8. Control diagram for running. ϕ_i means the output phase of the rhythm generator of the i -th leg.

遅延フィードバック (DFC) に用いた。リズム発生器は位相 (支持脚期・遊脚期) を生成し、トルク発生部の状態を変化させる (Fig.8) が、DFCはこの両方に適用される。これによって、安定な周期解周りの走行だけでなく、過渡状態や不整地適応などの非定常状態も安定化することが可能となった。

提案する制御則の有効性は、四脚ロボット“Ruch”のシミュレーションおよび実験によって検証された。比較的低速で移動する場合にはリズム発生器が支配的となり、たとえば静止状態からバウンディングを生成することができる。速度が速くなるにつれ、リズムの発生器の影響は小さくなり、代わってロボット自身のばね・質量系としてのダイナミクスによって定常走行が実現される。このような遷移が切り換えを必要とせずの一つのシステムで構成できる。

IV. 二脚移動様式

二脚移動様式は、ヒトと特定の生物にのみ観測される移動様式であり、他の様式に比べダイナミクスがより支配的であると考えられる。また、動的安定性の歩行に対する寄与が他の移動様式に比べて大きい。生物の場合、関節が拮抗筋によって駆動されているが、このような拮抗駆動が歩行、走行、跳躍といったさまざまなモードを実現するために本質的であると考えられる。このような考えに基づき、我々はマッキベン型人工筋肉を拮抗に配置した関節によって駆動されるロボットを設計した。ロボットの動特性が歩行のために都合のよいように設計されているため、驚くほど簡素な制御則によって、歩行を実現することができる [5], [3], [4]。

A. 環境変化に対する空気圧駆動型二足歩行の安定性

ヒトは滑らかで適応的な歩行の実現のために、関節の柔軟性を有効に活用していると考えられる。このような柔軟な歩行の場合、環境すなわち地面のダイナミクスの影響を大きく受けるが、これを形式的にモデル化することはきわめて困難である。このようなダイナミクスを形式的にモデル化することなしに適応的な歩行を実現するために、我々は制御パラメータとロボットの行動的な特徴の間に存在する関係を実際の歩行を通して獲得し、これを利用して適応的な歩行を実現するという方法を提案する。ここでは、ロボットの行動的な特徴として接触センサで測ることのできる歩行周期を、制御パラメータとして空気圧アクチュエータに空気を供給するバルブの開閉時間を採用し、これらの間の関係を調べた。Fig. 9 に、実験に用いた二脚ロボットを示す。腰部に 1 自由度、各膝に 1 自由度の合計 3 自由度

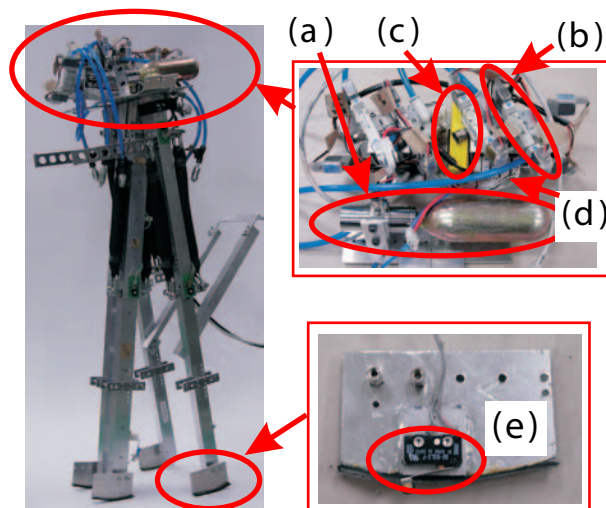


Fig. 9. A biped robot “Que-Kaku” driven by McKibben artificial muscles. (a) CO2 bottles, (b) electromagnetic valves, (c) electric cell, (d) micro computer with amplifier, and (e) round foot and touch sensor

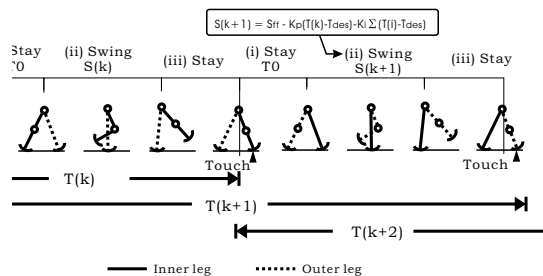


Fig. 10. Walking pattern and basic idea of a controller

を持ち、これらのすべての関節はマッキベン型人工筋肉によって拮抗駆動されている。Fig. 10 に、ここで用いた弾道学的歩行制御の手続きを示す。Fig. 11 に、床面の材質によって歩行がどのように変化するかをロボットを実際に歩行させることによって調べた関係を示す。このグラフからわかるように、床面の材質にかかわらずバルブの開閉時間と歩行周期の間には線形の関係があるが、床面の材質によってその直線は異なる。つまり、ロボットの振る舞いは床面の材質の影響を強く受けており、その意味で、振る舞いが、身体・制御則・環境の相互作用から生まれていることを示している。従来のように高い減速比を持つ電気モータによって実現される二足歩行ロボットでは、このような振る舞いの影響が出にくいと考えられる。

B. 3次元二足歩行機械の設計

身体がうまく設計されている場合、歩行のために必要な制御のコストは、計算時間だけではなく、質的な意味でも単純にすることができる。Fig. 12 に我々が設計した 3次元二足歩行機械を示す。そのおおよその大きさと長さに関するパラメータを Fig. 13 に示す。このロボットは上体を持ち、各脚には 4 自由度、各腕に 1 自由度の合計 10 自由度を持つ。腕は胴体の側方に開くことができるが、前後方向には反対側の脚と同位相に動くように機械的に固定されている。脚部は腰に 1 自由度、膝に 1 自由度、足首に 2 自

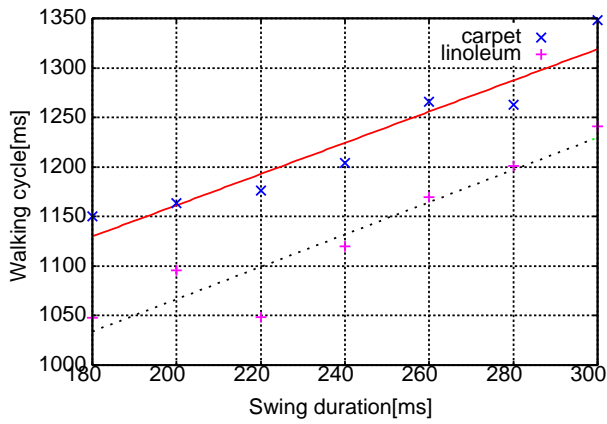


Fig. 11. Relation between the valve opening duration and swing duration observed by the touch sensor information

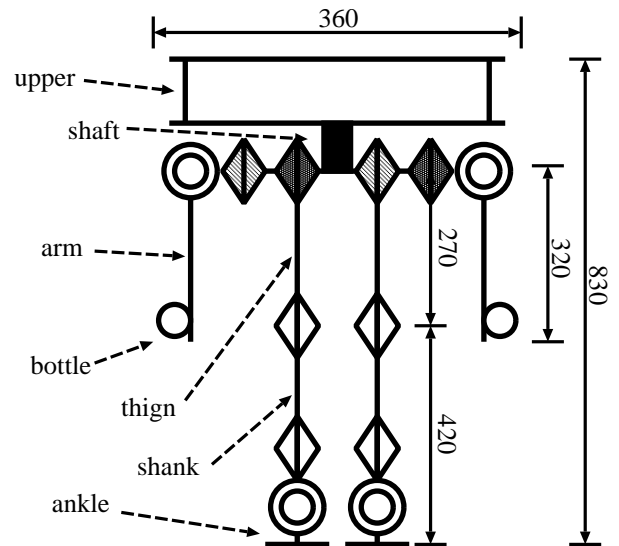


Fig. 13. A sketch of the 3D walker "Pneu-Man". The swing joint of left arm is physically connected to the right hip joint, and that of right arm to the left hip joint.

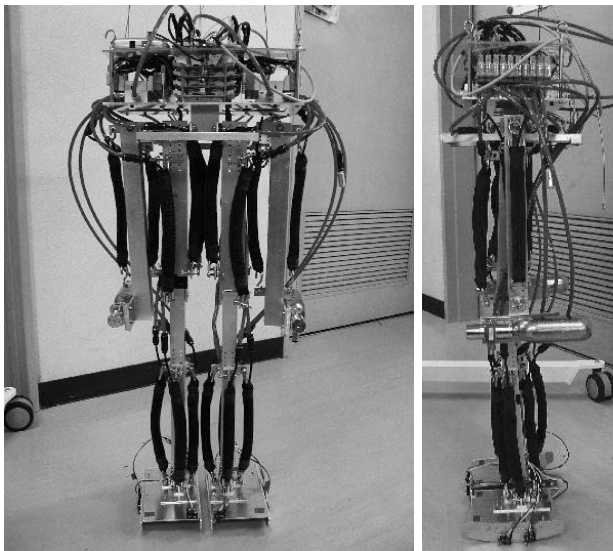


Fig. 12. A 3D pneumatic actuated walker "Pneu-Man". It has 10 joints with 10 pairs of McKibben artificial muscles, totally 20 muscles. CO₂ bottles are attached to tips of arms for balancing.

由度を持つ。足首部はボール関節になっており、二組の拮抗人工筋肉によってロール・ピッチ軸周りの回転が可能である。

ロボットの高さと同重量はそれぞれおよそ 0.83[m], 7.0[kg] であり、ロボットを制御するマイクロプロセッサ、人工筋を駆動する 40 個のバルブ、これらの駆動に必要な電池、および人工筋を駆動するための日本の CO₂ ボトルを含む。このロボットは基本的に自立歩行が可能のように設計されている。

V. 今後の研究展開

本レポートに示したように、当該研究班では、適応的ロコモーションについて調査するために、ヘビ型、四脚、二脚の各移動様式についてのハードウェアを設計、製作し、その一部については、リズム発生器や反射など下位の制御則の考察と実験的検証を進めている。今後、さらに安定な移動のための下位の制御則についての工学的な知見を、シ

ミュレーションおよび実験を通して得るだけでなく、これを駆動する上位の志向制御系をどのように構成するかを考える必要がある。このような考察を通して、移動様式に強く依存する部分と、様式に依存せず普遍的に用いることのできる制御アーキテクチャについての知見を得られるのではないかと考えられる。

REFERENCES

- [1] K. Inoue, S. Ma, C. Jin: Optimization of CPG-Network for Decentralized Control of a Snake-Like Robot, Proc. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2005), 730/735 (2005.7)
- [2] Kimura, H., Fukuoka, Y., and Katabuti, H., 2005. Mechanical Design of a Quadruped "Tekken3&4" and Navigation System Using Laser Range Sensor. *Proc. of Int. Symp. on Robotics*.
- [3] K. Hosoda, T. Takuma, and M. Ishikawa, "Design and Control of a 3D Biped Robot Actuated by Antagonistic Pairs of Pneumatic Muscles", Proceedings of 3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines, CD-ROM, Sep. 2005.
- [4] K. Hosoda and T. Takuma, "Ballistic Control for 2D/3D Pneumatic Actuated Walking Robots", Proceedings of Workshop on Morphology, Control and Passive Dynamics (held in conjunction with IROS 2005), CD-ROM, Aug. 2005.
- [5] Takashi Takuma, Koh Hosoda, and Minoru Asada, "Walking Stabilization of Biped with Pneumatic Actuators against Terrain Changes", Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2775-2780, Aug. 2005.

C 班：社会適応のメカニズム解明

青沼仁志 北海道大学・電子科学研究所

1. はじめに

自然界には多様な生物が刻々と変化する環境の中で生活している。これは、生物が長い時間をかけて進化してきた反映といえる。動物は進化の過程で、環境の変化に即座に応答するような適応機構として神経系を獲得した。神経系は、環境を調査する感覚神経系、情報の統合や処理を行う中枢神経系、そして一連の協調的な運動を引き起こす運動神経系からなり、生体内で通信と制御を行う器官とも言える。適応的行動の生成メカニズムを理解することは、生物がいかにして進化してきたのかを理解するうえで重要であり、また、生物が長い時間をかけて獲得した情報処理機構やネットワークの設計原理を解明し応用につなげる上でも重要である。我々は、生物が進化の過程で獲得してきたさまざまな機能を理解することで、その中から共通の設計原理を見つけ出そうとしている。

2. 研究の目的と班の構成

C 班では、社会をひとつの環境と捉えている。動物は、他の個体と相互に作用しあいながら集団という環境の中でも適応的に行動できる機能を有している。すなわち、動物は、程度の差こそあれ他個体との相互作用により社会を形成し、協調・競合しながら生存している。C 班では、このような社会への適応機能を生み出すメカニズムを解明することを目指している。

C01 班：「環境に適応するための高次行動を制御する神経生理機構のシステム的理解」青沼仁志（北海道大学）・神崎亮平（東京大学）

動物の個体認識・個体間相互作用・コミュニケーション・社会性形成などの高次行動の発現にかかわる神経生理機構を解明することを目指している。

C02 班：「フェロモン行動を行う昆虫の社会性発現機構の構成論的理解」太田順（東京大学）・浅間一（東京大学）・川端邦明（理化学研究所）

生物を高度な適応・調整機能を有するマルチエージェント系と捉え、生物の振る舞いを研究対象として、その適応メカニズムの解明を目指している。

C03 班：「生体の適応行動発現に対するネットワーク機能構造からの理解」倉林大輔（東京工業大学）

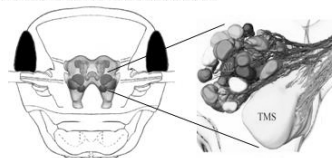
行動の切り替えにかかわる個体間や神経モジュール間の相互作用をネットワークとして捉え、適応的行動の発現をネットワーク構造における特徴量を切り口として理解することを目指している。

3. 研究成果

我々C 班は、生物の社会適応のメカニズム解明を目指している。「社会」という言葉は、非常に広い意味で使われ、生物学の分野で使われる「社会性」という言葉と工学の分野で使われる「社会性」という言葉の意味には多少ギャップが存在するように思えた。そこで、我々は、「社会性」を以下の視点からとらえることから始めた。(a) 他者との相互作用による経験に基づき自身の振る舞い（行動パターン）を変更できる機能（これをここでは社会性と考える）を有する個体が存在する。(b) 複数の個体が共通の場に存在することで相互作用が生じ、各個体が経験を積むことにより振る舞いパターンが異なってくる。(c) その結果、個体群としての大域的秩序が形成される。

この観点から、我々は、動物が社会という環境の中でどのように適応的に振舞えるのかを解明するため、神経系（細胞レベル）の機能解析や、各個体の振るまい（行動レベル）などが比較的容易な昆虫をモデル動物として採用し、研究を進めている（図1）。

Neuronal elements



Interactions among individuals



Organization of a society



図1. 細胞レベルにおけるネットワーク構造の解明、個体間相互作用と行動切り替えによる振る舞いパターン生成のメカニズム、社会性の形成メカニズムの解明。

脊椎動物の神経系は多くの細胞から構成され行動とその基盤となる細胞の機能とを関連付けて議論するのは容易ではない。ヒトの脳は、約 10^{12} 個もの神経細胞から構成されていることを考えても想像がつくであろう。一方、昆虫の神経系は全体でも 10^6 個程度で、脳を構成する神経細胞はさらに少なく、数万個程度の細胞から構成されていることから、行動とその基盤となる

神経細胞の活動や機能などに関連づけて議論しやすい。そこで、計画班では、昆虫をモデル動物として扱い、個体間相互作用と経験に伴う行動切り替えのメカニズムを細胞レベルから行動レベルで調査している。

昆虫の社会性については、たとえば社会性昆虫と呼ばれるアリやミツバチが、社会的階層（カースト）を備えており、個体間ではっきりした分業が見られ、種を維持する社会を構成する。一方、コオロギやカイコガなどは、単独生活をする昆虫で、社会性昆虫とは言えないが、性フェロモンや体表フェロモン等を用いた他個体と相互作用により、種（個体群）を維持している。

C01 班はコオロギやカイコガのフェロモン行動の発現や切り替えにかかわる神経生理機構の解明を進めてきた。特に、他個体との接触経験がいかんして引き起こる行動を切り替えるのかを調査している。コオロギを使った研究では、オス同士の喧嘩行動がフェロモン行動であることを示し、さらに、以前の喧嘩で負けた経験がある個体では、他のオス個体との接触で解発される行動が切り替わることを示した。また、フェロモン情報処理機構や喧嘩経験の記憶の神経機構には一酸化窒素シグナルや生体アミンが重要な役割を担うことがわかってきた。そこで、C02 班と協力して、オスコオロギの振る舞いについてのシミュレーションモデルの構築を進めている（図2）。

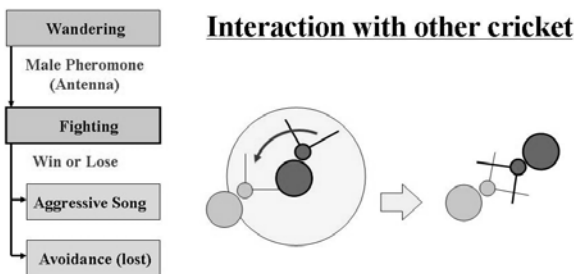


図2. 行動実験の結果をもとにしたモデルの生成。

C02 班は、オスコオロギを用いた行動学実験をもとに、集団におけるコオロギの振る舞いについてモデル生成を進めている。これまでに、コオロギの振る舞いと密度効果の関係についてコンピュータシミュレーションモデルを提案し、修正を加えながら C01 班と生物学的な評価を進めている。一定の空間における密度に応じて、優勢個体が出現することをシミュレーションで再現したが、外乱が入ったときにそれぞれの振る舞いがいかに変化するかについても組み込む必要がある。外乱としては、新規参入のオスやメス個体、食物の存在などを想定している。また、行動レベルでのモデル生成ができたら脳機能のモデル生成を進める予定である。

C03 班は、昆虫をモデルとした社会適応の設計原理について神経ネットワークや個体間の相互作用を相互作用ネットワークとして捉えて研究を進めている（図3）。特に、昆虫の脳の解剖学的特徴から脳の各領域をモジュールと考え、それぞれの要素を振動子として仮定した場合のネットワークモデルの動作について考察した。各振動子をつなげたネットワークにショートカットができると、リミットサイクルから概周期振動へと遷移する。実際の神経ネットワークにおいて、一酸化窒素のような気体状神経伝達物質は、ネットワークにショートカットを作ることのできる機能を持っている。また、C01 班は、脳内の一酸化窒素シグナルが、コオロギの行動切り替えのメカニズムに深く関与することを示している。

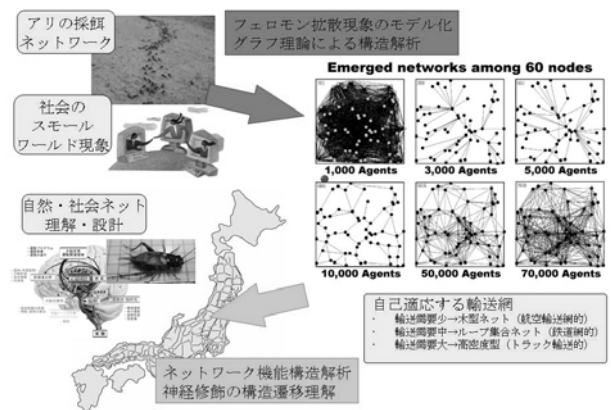


図3. ネットワーク機能構造の構成論的理解

4. おわりに

社会への適応機構を理解するうえでは、他者認識や、他者との相互作用にもとづく行動選択のメカニズムを理解することが重要である。そこで、計画班では、実験系を単純化するために、単独生活をする昆虫をもちいて、個体間相互作用と脳内メカニズムについて生物学的アプローチと工学的アプローチから研究を進めている。しかし、社会適応を理解するためには、社会における各個体間の分業のメカニズム、知識共有のメカニズム、社会形成のメカニズムなども含めて理解する必要がある。そこで、次年度からは公募班とも連携を取り合い、異なる階層からのアプローチを取り入れることにより、社会適応のメカニズムの解明を目指す。

環境に適応するための高次行動を制御する 神経生理機構のシステムの理解

青沼仁志(北海道大学)・神崎亮平(東京大学)

要旨 - 昆虫のフェロモン行動は個体間相互作用による行動発現や行動切り替え, 社会適応のメカニズムを研究する上で有効な実験モデル系となる。コオロギやカイコのフェロモン情報処理機構, 行動発現機構について行動学的な実験と生理学的な実験を行い, その研究結果をもとに工学系のグループと連携してシミュレーションモデルの生成と生物学的評価を進めている。

1. はじめに

生命の誕生以来, 生物はさまざまな環境にさらされながら淘汰される過程で適応機構のひとつとして神経系を獲得した。動物が刻々と変わる環境下において実時間で適応的な行動をとることができるのは, 神経系が環境からの作用を受容し, 逆に環境に働きかけたりするしくみによるものである。

昆虫は, わずか数ミリから数センチ程の小さな体であるにもかかわらず, 優れた感覚受容機構, 情報処理機構, 運動発現機構により刻々とかわる環境に適応している。昆虫のこのような適応機構は, わずか 10^6 個程度の細胞からなる神経系によって制御されている。ヒトをはじめとしたほ乳類の脳は 10^{12} 個もの神経細胞からなり, 「巨大脳」と呼ばれているのに対して, 昆虫の脳は, サイズも小さく, 細胞数も少ないことから「微小脳」とも呼ばれている。我々は, 昆虫の神経系の設計原理を解明し, 行動プログラムの実時間選択の神経機構を明らかにすることで, 動物がいかにして環境の変化に対して適応的な行動を発現するのが理解できると考えている。動物の学習・記憶・知能をはじめ, 動機づけによる行動の修飾, 階層的ルールに基づく行動選択や決定など, 高次行動制御の神経生理学的機序を解明するためには, 従来の行動観察や細胞レベルでの生理学的な解析に加え, 構成論的・システム論的アプローチを取り入れることが有効である。我々は, 実時間における適応行動発現メカニズムを理解するうえで, 特に, 社会をひとつの環境と捉え, 社会適応のメカニズム解明に挑んでいる。そこで, 「社会適応」を, 個体が他個体との相互作用(経験)により発現行動を柔軟に切り替えることのできる適応機構として, その神経機構の解明から取り掛かった。

2. 研究目的

行動の選択・決定, 行動の修飾などの神経機構を解

明すると共に, 生物学実験から得られた結果を, 工学研究者との連携によりシミュレーションモデルを用いて再現することで, 動物の個体認識, 個体間相互作用, コミュニケーションや社会への適応にかかわる高次行動の神経生理機構を理解する。

フェロモンは, 生体で作られる化学物質で, 種特異的に働いて特定の行動パターンや生理現象を引き起す。昆虫のフェロモンに対する応答は生得的で定型的な行動が多いとされているが, 近年, 他個体との相互作用, すなわち接触や交尾などの経験によりフェロモン行動の発現も修飾を受けることがわかってきた。コオロギの闘争行動は以前の喧嘩経験により行動発現パターンが切り替わる行動の一例といえる。我々は, カイコガの雄が雌の出すフェロモンに定位する行動やコオロギの雄が別の雄の体表フェロモンに対して示す闘争行動などのフェロモン行動を実験モデルとして, 適応行動の発現や切替え, 個体間相互作用に基づく社会適応発現の神経機構の解明に取り組んでいる。

昆虫の脳は数万個程度の神経細胞から構成されており, 神経細胞の生理学的特徴, 形態学的な特徴から個々の細胞を同定することが可能である。従って, 中枢におけるフェロモン情報処理から行動発現機序を細胞レベルから行動レベルで研究することができる。中枢には多形回路の中から実時間で適切な行動プログラムを抽出するようなくみがあると考えている。多形回路から実時間で適切な行動プログラムを抽出する神経機構を探ることで動物が環境の変化に適応し, 進化の過程で獲得した脳の情報処理戦略を理解できるに違いない。昆虫のフェロモン行動の発現機構と, 他個体との相互作用や経験に伴う行動パターンの実時間選択の神経機構を生理学的方法と行動薬理学的方法で調査し, その結果を用いて工学系の研究グループと連携してシミュレーションによる内部モデルの再構築と評価, モデル化による機能予測を行う。更に, その結果を生理学実験により検証することで, 動物の行動選択・決定の神経機構, 特に, 個体間相互作用により創発される社会適応の設計原理を探る。

3. 研究成果

昆虫は, 特定の行動を引き起す刺激と行動パターンを比較的容易に特定できるため, 行動の発現機序を神経細胞レベルでの研究と結びつけて議論することができ,

動物の行動選択の仕組みを理解する実験モデルとして扱いやすい。特に、フェロモン行動は刺激源となる物質と解発される行動の特定、その行動発現にかかわる神経回路網の同定などが比較的容易である。

3-1 コオロギの喧嘩行動と回避行動の解発



図 1. コオロギ雄の喧嘩行動

フェロモンは、生体で作られる化学物質で、種特異的に働き特定の行動や生理現象を引き起こす。昆虫のフェロモン行動の多くは hard-wired と言われてきたが、他個体との接触・交尾・闘争など（相互作用）の経験（行動履歴）で行動が変容することも明らかになった。カイコガのフェロモン行動は定型的行動の典型的な例である。一方、コオロギの喧嘩行動（図 1）は雄の体表物質（フェロモン）により解発されるが、喧嘩経験により次の行動の修飾・切替えが起こる。つまり、行動履歴により行動の修飾が起こるひとつの例と言える。

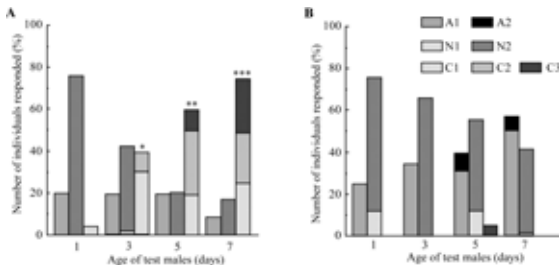


図 2. 雄コオロギの最終脱皮後の日齢と体表物質に対する行動発現応答の変化。A: 雌体表物質に対する応答。B: 雄体表物質に対する応答。A1-A2: 闘争行動, N1-N2: 応答なしまたは回避行動, C1-C2: 求愛行動。Nagamoto et al. (2005)

コオロギのクチクラ表面は、炭化水素を主な構成要素とした物質で覆われている。コオロギは、体表物質を検出して相手の性別や日齢などを識別している（図 2）。体表物質は、触角の受容器で検出され、その情報は触角神経を通過して 1 次中枢である触角葉に入り処理・統合され、より高次のキノコ体や側葉に伝えられる。この情報をもとに、中枢では運動プログラムが選択され一連の行動パターンが発現する（図 3）。雄のコオロギは、雌体表物質に対して口説き鳴き(courtship song)行動を発現する。この口説き鳴きは、より若い成虫の雌に対してより高い割合で発現することもわかった。一方、雄は、別の雄の体表物質に対して威嚇(aggressive)行動を発現する。雄同士が遭遇すると多くの場合、直ちに威嚇し合い、さらには噛みつき合いの喧嘩へと発

展する。この様な求愛行動や威嚇行動の発現機構は、成虫の雄の日齢にもかかわり、日が経つに連れて雌や雄の体表物質に対する応答性が変化する。コオロギのフェロモン情報処理機構についてはまだ不明な点が多く、現在、生化学的な体表物質の成分分析、行動解析、電気生理学的な実験による神経回路網の同定などを進めている。

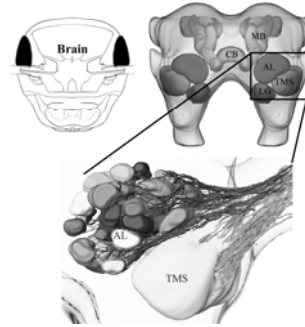


図 3. コオロギの脳の 3 次元再構築。MB: mushroom body, AL: antennal lobe, CB: central body, LG: lobus glomerulatus

3-2 喧嘩経験と記憶

コオロギの喧嘩行動は、一連の階層的な行動パターン構成されている。激しい噛みつき合いにまで発展しなくとも、一度喧嘩に負けた経験をすると、その後しばらくは、同じ相手に出会っても威嚇行動は示さず、相手の雄に気づくと回避行動をとるようになる。この闘争行動から回避行動への行動パターンの切り替えは、最初の喧嘩から 20 分から 30 分程度まで持続すること、また、一定の間隔で同じ相手に繰り返し負けると、12 時間程度まで回避行動を示す時間が伸びる。つまり、これは記憶の強化ともいえ、喧嘩で負けた経験は短期から中期の記憶として保持されることが示唆された。喧嘩の経験前には、雄は他の雄フェロモンに対して闘争行動で応答するが、喧嘩に負けると、敗者は同じ物質に対して回避行動で応答することから、フェロモン行動は、「状況に応じて適切に行動を切替える神経機構」を理解する上で有効な実験モデルとなる。

3-3 昆虫の脳におけるフェロモン情報処理と NO

行動プログラムの抽出と選択にかかわる神経機構には、神経伝達や神経修飾機構が重要な役割を担う。神経回路網においてどのようなタイミングで特定の回路が選択されるかにより行動が決定されると考えている。神経系は、さまざまな神経伝達物質・修飾物質を利用しているが、中でも一酸化窒素(NO)は、多形回路から特定の行動プログラムを抽出する際に重要な役割を担うと考えてきた。NO は生体内の様々な器官で合成酵素(NOS)の働きで合成される拡散性の生理活性物質である。神経系で合成された NO はおよそ 100 μ m/sec の速さで 3 次元的に拡散し、細胞膜を透過して標的細胞内の

可溶性グアニル酸シクラーゼ(sGC)を活性化して細胞内で cGMP を合成する．そして，cGMP はセカンドメッセンジャーとして細胞内 Ca^{2+} 濃度を調節し，神経伝達物質の放出量を制御するように働く．NO が拡散性があり逆行性伝達物質として働く性質をもつことから，学習や記憶の基盤となる神経可塑性にも関与すると考えられている．神経可塑性は，行動プログラムの抽出と選択の神経機構においても重要である．そこで，NO シグナルが中枢神経系において神経修飾物質として働き行動抽出と選択の神経機構に重要な役割を担うことを示すため，コオロギやカイコガなどを実験モデル動物として研究を進めている．

昆虫の触角葉は匂い情報やフェロモン情報を統合・処理する第1次中枢である．カイコガで，NO がフェロモン情報処理にかかわる．カイコガ雄の触角葉には大系球体と呼ばれる性フェロモン情報処理の1次中枢があり，ここから高次中枢のキノコ体や側葉に信号を伝える投射ニューロンが NO の標的細胞となることが示唆された(図4)．

コオロギのSGC α 及びSGC β サブユニットの塩基酸配列もわかってきた(NCBI, AB207897, AB207898)．昆虫の脳における NO シグナルの機能的役割については，まだ不明な点が多く残されているが，少なくとも，NO は，脳内のある特定の領域で定期的に産生されており，特定の入力 came ときに，NO 濃度が変化して，標的細胞の cGMP レベルを調節して特定の生理作用を引き起こすと考えられる．

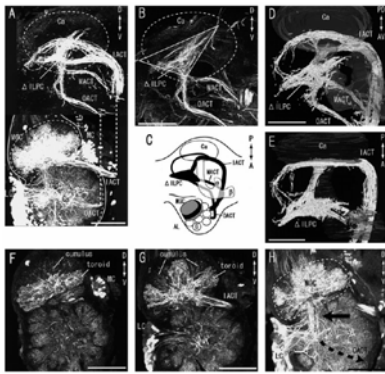


図 4. カイコガの前大脳と触角葉における NO 誘導性 cGMP 抗体染色． Seki et al. (2005)

コオロギ脳にも NO/cGMP シグナル伝達系が存在することが薬理的，組織化学的，生化学的な方法などの実験から確かめられた．コオロギの NOS は約 130kDa のタンパク質で，それをコードする塩基の部分配列も既に決定している(NCBI, AB245472)．免疫組織化学染色や NADPH-diaphorase 組織化学染色法により，脳内の NO 産生細胞の分布も特定でき，触角葉，キノコ体，中心体などで強い染色シグナルが検出された(図5)．また，触角葉の NO 濃度を NO 電極法でリアルタイム計測すると，常に 150nM 程度の NO が放出されていること

が判明した．更に，コオロギの脳を NO 供与剤 NOR3 で刺激すると脳内の cGMP 量は NOR3 の濃度に依存して増加することが示された．また，抗 cGMP 血清を用いた免疫組織化学染色法で NO 標的細胞の分布がわかってきた(図6)．

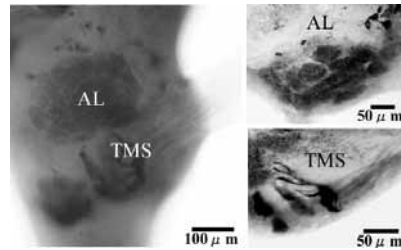


図 5. コオロギの触角葉における NO 産生細胞 .NADPH-diaphorase 組織化学染色陽性細胞．

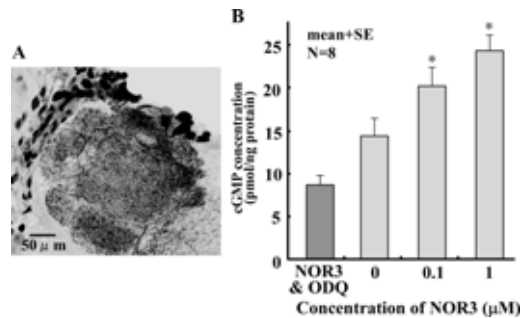


図 6. コオロギ脳の NO/cGMP シグナル .A:触角葉における NO の標的細胞 .NO 誘導性 cGMP 免疫組織化学染色 .B: コオロギの脳内 cGMP 濃度 .NO 供与剤(NOR3)の濃度に依存して脳内の cGMP レベルが上昇．

3-4 社会的順位の形成と NO/cGMP シグナル

生物学的な「社会性」の定義からすれば，コオロギは単独生活をする昆虫である．しかし，個体間の相互作用がいかにして適応的な行動を創発するのかを神経レベルで研究するには扱いやすい動物である．コオロギの雄は，雌や食物や縄張りなどの資源を獲得するために喧嘩をするが，その結果，個体間に優劣の順位が形成される．ここで見られる順位は，条件により一定期間保持されている事から記憶のひとつの形態ともいえる．

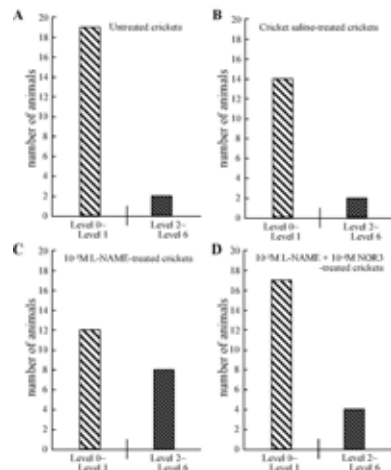


図 7. 喧嘩行動の発現と NO 産生 .A: 頭部に何も注入していないコオロギの応答 .B: 生理塩類溶液を注入したときの応答 .C:L-NAME を注入したときの応答 .D: L-NAME と NOR3 を注入したときの応答 . Aonuma et al. (2004)

神経修飾物質の効果は，アゴニストあるいはアンタ

ゴニストを用いることで生理学的・行動学的に評価できる。喧嘩経験を記憶する脳内の神経生理機構のひとつに、NO/cGMP シグナル系が重要な役割を担うことが明らかになった。最初の試行(喧嘩)の15分前に予めNOS阻害剤L-NAMEを頭部に注入した2匹の雄コオロギを同時に行動観察用の実験容器に入れ、コオロギは直ちに喧嘩を始める。勝敗がついてから両者を一端引き離し、15分隔離して再び両個体を実験容器に入れ、負けたコオロギの闘争行動を発現する割合が対照実験に比べ有意に増加した(図7)。また、sGCの阻害剤ODQを頭部に注入すると、L-NAMEを注入したときと同様に、闘争行動を示す割合が多くなった。これらの結果から、NO/cGMPシグナルが、コオロギの喧嘩行動や社会的順位形成過程と維持に関与することがわかってきた。

3-5 NOによる神経修飾

昆虫の触角葉は構造的にも機能的にもほ乳類の匂い中枢とよく似ていることから、匂い情報処理の研究モデルにもなっている。触角葉では、NO産生細胞と標的細胞のシグナルがともに検出されることから、NOが匂い情報処理の過程で重要であることが示唆される。コオロギでは、図8に示すように、生理学実験から触角葉でNOが神経修飾物質として働いていることがわかってきた。また、昆虫の触角葉やキノコ体は、学習や記憶の中枢だとも考えられており、学習や記憶の形成過程でもNOの重要性が示唆される。今後、より詳細な調査を進めることでNOが行動プログラムの抽出や選択にかかわる働きを理解できるに違いない。

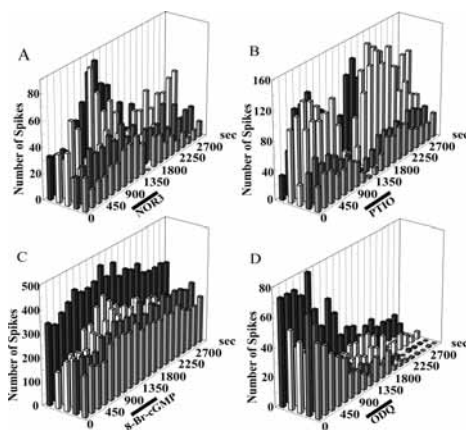


図8. コオロギの脳の触角葉におけるNOの修飾効果。NOは、自発性インパルスの発射頻度を増加させた。A: NO 供与剤(NOR3)の効果。B: 除去剤(PTIO)の効果。C: 細胞膜透過型 cGMP(8-Br-cGMP)の効果。D: sGC 阻害剤(ODQ)の効果。

さまざまな行動発現や行動修飾の神経機構には生体アミンが機能的役割を担うことが知られている。特に、コオロギの闘争行動にはオクトパミンが関与する。で

は、NOによる行動修飾と、生体アミン類による行動修飾は独立して進行するのだろうか。生体アミンは神経修飾物質や神経ホルモンとして機能していることから、NOは神経伝達を直接修飾する機能をもつと同時に、オクトパミンやドーパミンをはじめとしたアミンによる制御を調節していると考えている。脳内の生体アミンレベルは高速液体クロマトグラフィー法により定性・定量的に解析されている。最近、NO 供与剤を用いてコオロギの脳を刺激すると、脳内のオクトパミンやドーパミンなどのアミンレベルが変化することがわかってきた(青沼・村上, 未発表データ)。また、コオロギ以外にも、カイコガのフェロモン行動にモノアミンの働きが関与することが示されているが、やはり、カイコガの脳内アミンレベルもNOにより調節を受けていることがわかってきた(Gatellier・青沼・神崎, 未発表データ)。さらに、セロトニンニューロンやオクトパミンニューロン(青沼未発表データ)の分布とNO標的細胞の分布が重なることが組織化学的にも明らかになってきた。今後、より詳細な研究を進めることで、NOがいかに生体アミン系を制御して行動プログラムの抽出と選択にかかわるのかを明らかにしていく。

4. 今後の研究計画の概要

生物学的な知見をもとに、工学系のグループと密接な連携をとりながら適応機構としての神経系の仕組みを系統的に理解する。特に、個体間の相互作用による行動履歴がどのように行動選択にかかわるのかを明らかにすることで社会適応のメカニズム解明を目指す。

コオロギやカイコなどの昆虫を用いて、実時間行動選択・決定の神経機構を理解する。昆虫のフェロモン行動は個体識別や個体認識などの個体間相互作用の実験モデルとして都合がよく、同定可能な神経回路網におけるNOや生体アミン等の神経修飾物質の機能的役割の解明にむけて生理学実験や行動学実験からアプローチする。我々が得た生物学知見をもとに、個体間相互作用の行動モデルや神経モデルを工学系研究グループと協力して生成し、そのモデルの動作と実際の動物の行動発現や神経回路の動作を比較しながら、繰り返し検証することで適応行動の発現に関わる神経機構の設計原理を理解する。最終的には、動物の個体認識や個体認識など個体間相互作用、コミュニケーションや社会適応にかかわる神経系の設計原理を理解する。

昆虫間相互作用のモデル化と群ロボット設計

東京大学 太田 順, 浅間 一, 理化学研究所 川端邦明

Behavioral modeling of crickets and multi-agent robot system design

○Jun OTA, Hajime ASAMA, The Univ. of Tokyo, Kuniaki KAWABATA, RIKEN

Abstract: Many studies have recently been made in the field of multi-agent robot systems. However, the design methodology of adaptive behavior of the multiple robots in the systems has not been thoroughly understood. In this paper, we discuss how the adaptive behaviors were designed for the multi-agent robot systems in our former studies. Then, we discuss the importance of modeling of group behaviors of insects such as crickets. Finally, we present a plan for modeling of the crickets' behaviors.

Keywords: multi-agent robot systems, crickets, adaptive behavior

1. C02 班の研究計画

群ロボット研究が広く行われている。ここでは、従来型の人工物システムには存在しない、柔軟性や適応性を有したシステム概念が指向されている。しかしながら、そのような柔軟性、適応機能を発現するメカニズムは解明されておらず、真に適応的な群ロボット系の設計原理は今だ解明されていない。

一方、ほとんどの生物が他者とインタラクションしながら生息している。過酷な自然条件下で生きながらえてきた生物は高度な適応・調整機能を有するマルチエージェント系であると言える。そのような生物の振る舞いを研究対象として、その適応メカニズムの解明を目指すことは非常に有用であると考えられる。

本研究では相互に闘争行動（オス同士・メス同士のインタラクション）や交尾行動（オスとメスのインタラクション）を行うコオロギに関する生態学的・神経生理学的モデル化を目指す。ここでモデル化対象としてコオロギを選択した理由としては、以下の四点が挙げられる。(1) 群適応性の基本機能と我々が考えている行動選択メカニズム、具体的には、プログラム行動とその神経修飾メカニズムが各個体内に組み込まれている。(2) 挙動が比較的シンプルであり、振る舞いの解析が容易である。(3) 神経構造の解析が可能な程度に個体サイズが大きい。(4) 飼育が比較的容易である。

本報ではまず2章で群ロボット研究の現状について概観する。3章でコオロギを用いた研究内容について説明する。4章で本報を結論付ける。

2. 群ロボット研究の概要

2.1 総論

単独のロボットでは実現できない/実現に多大なコストがかかる(たとえば非常に時間がかかる)作業を複数台のロボットにより実現する群ロボット系研究がここ数十年の間多く行われている。レスキューシステム、セキュリティシステム、搬送システム、生産システム等様々なアプリケーションが存在することより、群ロボット系の概念は今後更に重要になることが予想できる。これは、ロボットを単体としてではなく、系(システム)として考える必要がある、という意味である。

「与えられた作業を実現する群ロボット系の構築」という問題をここでは群ロボット設計問題と呼ぶ。この設計問題は解決が非常に困難である。なぜなら、(1) まず、設計対象が多様である。作業実現のためにどのような単体ロボットを準備するか、もっと具体的にはどのようなハードウェア(センサ、アクチュエータ等)が必要か、から始まって、ロボットにどのような行動を埋め込めばよいか、学習・適応機能はどの程度必要か、それらのロボットはどのような情報のやりとり(通信)をすればよいか、群ロボット系として均質かまたは異質か、更にそれらは何台必要か、ロボットが円滑に動作するためにどの程度の作業環境の作りこみが必要か、等々の問題をすべて解決する必要がある。(2) また、群ロボット系全体の機能が個々のロボットの機能の線形和として記述できれば単純である。しかしながら実際は、ロボット同士の相互作用により、その対応関係が非線形で複雑である(そもそもその非線形性の発現を期待して群ロボット研究に従事している研究者が大勢を占めている)。ロボットとは3次元実世界空間内で一定体積を有しつつ移動する実体であり、群ロボット系においては相互に衝突を避けながら動き回るため、その挙動を解析的に議論することはそれほどたやすくはない。すなわち、群ロボット系としての機能は、個々のロボットをシミュレーションまたは実世界で動かして見ないとわからないことが多

い。これには通常多大な時間がかかり問題である。ロボットが移動することは可動範囲を広げ大変有効であるが、一方でその挙動解析を困難にするという側面も有している。現状のこの研究分野では、上記の設計問題を全て解決する一般的な方法論を提示できるフェーズには至っていない。その意味から、群ロボット系における適応的行動と協調の発現原理はまだほとんど解明できていない、と言っても差し支えない。

現在行われている研究の具体的な方向性としては、ロボットが遂行する作業等の設計対象を固定して問題を簡便化した際に、ロボット間インタラクションをどうするか、換言すれば、前述の非線形性をどううまく利用するかという、ロボットの適応・学習的な協調行動設計について述べているものが多い。

2.2 群ロボット系の作業

上記の意味から、従来研究を作業毎に分類して議論した方が理解しやすいと考える (Table 1)。ここでは、以下の二項目に基づいて分類している。(a) 作業目標次元: 群ロボットで行う作業目標の次元に関する分類。以下の三種類により構成する。(a-1) 点到達作業、すなわち、目標状態が各ロボットの特定のコンフィグレーション (位置と姿勢) により記述されるもの。(a-2) 面被覆作業、すなわち、目標状態がある領域のロボットによる被覆で記述されるもの。さらに(a-3) 混在作業: 点到達作業と面被覆作業の両者が混在する作業、とする。次の項目は、(b) 作業多様性: 作業回数が何回か? である。これには(b-1) 単発作業、すなわち作業回数が1回であるもの、と(b-2) 繰り返し作業すなわち作業回数がn回であるもの、が存在する。「単発」作業を単純に繰り返すことで「繰り返し」作業が実現できるが、ここでの「繰り返し」とは、数回の試行によるロボットのなんらかの適応、学習を想定していることを意味する。項目が下に行く程、また右に行く程、作業要求は厳しくなる。

一般的に単発作業に対しては、完全なる環境情報の取得を前提としたロボットの事前行動計画・動作計画的側面が強くなる。点到達作業はグラフ探索における最短路問題や人工ポテンシャル法の形でモデル化可能であるし、面被覆作業の場合には、グラフ理論における巡回セールスマン問題解法やスタッカークレーン問題解法、一般化中国人配達人問題解法としてモデル化可能な場合が多い。

本報において我々が興味を持っている群ロボットの適応行

動については、作業の繰り返し性が重要となる。そのような作業を対象とした著者らによる研究の概要を次節に述べる。

2.3 繰り返し作業

繰り返し動作は前述のように適応機能の導入を可能にする。点到達・繰り返し作業の一つとして、特定の場所に置かれた複数個の物体を別の場所まで搬送する繰り返し搬送問題は産業応用も指向した基本的な作業である。吉村らにより搬送対象物の性能が動的に変化しても適応する方法が提案されている¹⁾。これは(a)可視グラフ法を用いて作業環境を双方向移動可能なグラフネットワークでモデル化し、(b)確率学習オートマトンを用いて各ロボットが選択する経路の確率を学習することによって適切な搬送形態を獲得するものである。ここで、搬送対象物を受け渡すコストが小さいときには最短経路上をロボットが物体を受け渡ししながら並ぶリレー型の搬送形態に、逆に大きい時には初期位置と目標位置を結ぶ往復別々の経路を生成するループ型の搬送形態を構成する結果が得られている。井上らは上記アルゴリズムを未知環境に拡張して、グラフネットワークを群ロボット自身が自律的に獲得する枠組みを提案した²⁾。作業環境の構造化とその環境下でのロボットの適応動作生成を分離した上記の二つの研究のアプローチは簡便性と見通しの良さという利点を有する。しかしながら、ロボット同士のインタラクションの有効利用という観点からは問題が残されていると思われる。

面被覆・繰り返し作業の例としては、環境探索、巡回作業等が考えられる (Fig. 2)。この作業は、ハミルトン閉路を複数台のロボットで分担して構成するMTSP (Multiple Traveling Salesmen Problem) 問題としてモデル化できる。Trevaiらは、以下のアルゴリズムを提案している³⁾。(a) 領域の外形が決まっているある特定の作業空間内で、認識された環境地図情報に基づき、その自由空間内に複数個観測点を配置している(それらの各点をすべて観測・巡回することで環境探索が完了する配置)。具体的には、湯浅らのグラフ上の反応拡散方程式⁴⁾を用いて、各観測点周囲の密集度を周囲の観測点との相対距離情報に基づいて評価し、その評価値を減少させる方向に各観測点を移動させることで配置を導出している。この手法は、観測点毎に自律分散的に計算することが可能であるため、計算の高速性と環境の動的変動への適応性が確保できる。(b) それらを巡回する経路を上述のMTSP 解を実時間で計算することで各ロボットの経路を導出し、動作生成する。シミュレーション結果ならびにその後の実験結果により、ロボットの台数効果 (台数が増大すると各ロボットあたりの経路長がほ

Table 1: Task classification of multi-agent robots

	One-time	Many-times
point reaching	- motion planning - cooperative handling of a large object - pattern formation	coming and going between two positions
region sweeping	- sweeping - map generation	- periodical cooperative sweeping
compound	- cooperative transportation in unknown environments	- collecting objects/ foraging - robot soccer

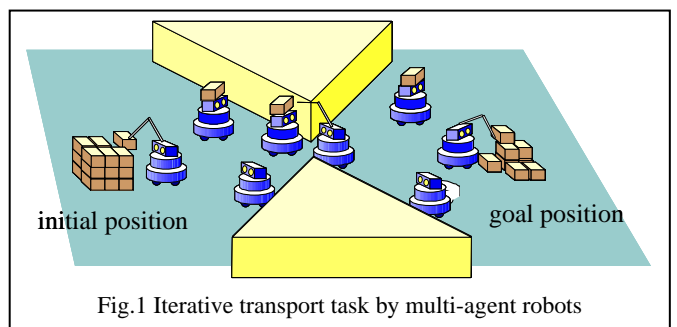


Fig.1 Iterative transport task by multi-agent robots

ば台数比で減少する効果)ならびに障害物環境への適用可能性が示された。この研究では、一般的な自律分散系の設計原理であるグラフ上の反応拡散方程式を環境探索のための単位作業記述に利用することで、作業記述レベルにおいて、ある一定の適応性を付与することが可能となった。今後はそれらを観測レベル、行動レベルとどのように組み合わせる適応性を確保するか、という問題を解決する必要がある。

3. 今後の研究計画

ある一定の領域内に数匹のコオロギを放した状況を想定し、その際のコオロギの挙動をモデル化する。ここでは、コオロギの群適応性の解明を主目的とするため、コオロギの振る舞いの遷移の再現を目指し、より細かいレベルの挙動を例えば歩容の再現を目指すことはしない。

具体的には、

- ・機能を実現する神経回路網、神経回路モジュールのモデル化
 - ・上記の機能を発現する信号伝達ならびに行動生成メカニズムのモデル化
- のそれぞれを行う。

前者については、通常のニューラルネットワークのモデルに素子間の位相の効果を組み入れたニューロモジュレータ(神経修飾物質)モデルの適用が不可欠である。具体的には既に提案されているいくつかの既存モデルの評価を行い、適切なモデル選択を行う。その後実際のコオロギの生理実験結果と比較することでモデルの改良を行っていく(Fig.3)。

特に、コオロギの闘争行動における脳内の代表的なニューロモジュレータであるNOの機能⁹⁾に着目し、モジュール化された行動の選択が、NOの脱抑制という効果により実現されてい

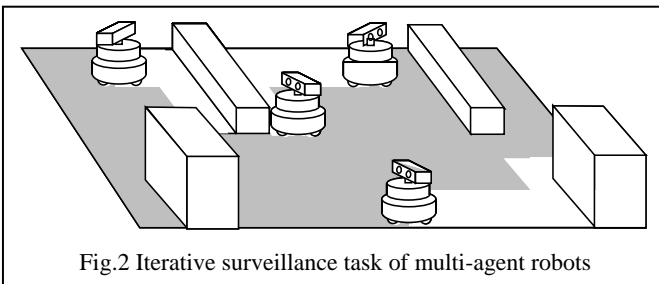


Fig.2 Iterative surveillance task of multi-agent robots

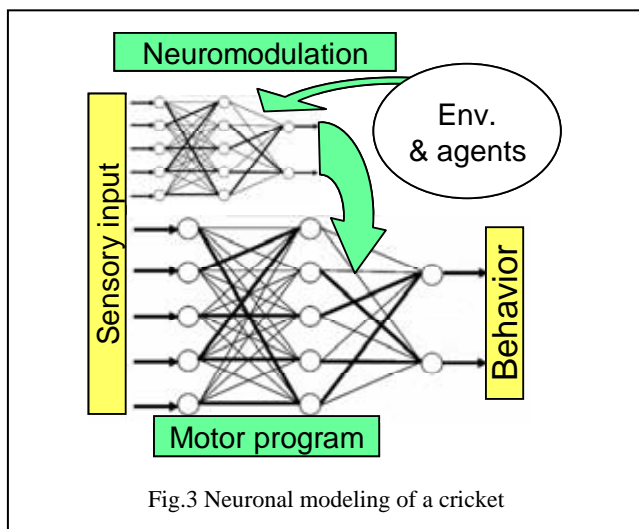


Fig.3 Neuronal modeling of a cricket

るとの仮説を基に、神経回路モデル化の基礎的検討を行っている。ここで、脱抑制とは、抑制性のシナプスを抑制することにより、逆に活性することである。中枢神経では主にGABA(-アミノ酸)が伝達物質として働き、シナプス後細胞を抑制している。NOはこのGABA伝達系を抑制する効果があり、結果としてシナプス後細胞を興奮させることとなる。コオロギの闘争を分類する大きなプログラム行動には、闘争行動、回避行動の2種類がある。この2つの関係性を例に、脱抑制による神経回路モデルの構造に関する基礎的検討を行った(Fig.4)。

後者については、シミュレータを作成し、反射的な振る舞いをする仮想コオロギをその中に放つことでコオロギ間インタラクションモデルの構築ならびに改良を行う。ここで扱っているコオロギを Fig.5, Fig.6 に、観察結果に基づくオスコオロギの振る舞いモデルを Fig.7(a)に、作成したシミュレータのスナップショットを Fig.7(b)(c)に示す。モデル化に際し以下の手順をとる。

1. コオロギの群行動について、再現すべき挙動を複数個列挙する。
2. それぞれの挙動の再現状況についてスカラー値で表現できる評価指標を定める。
3. コオロギの振る舞いモデルを構成する。この際にコオロギに関する生理学的知見や、コオロギの振る舞いに関する観察結果をモデル中に組み入れる。
4. 詳細な振る舞いを規定する行動パラメータを少数個定義する。
5. 2を最適化する4の行動パラメータを何らかの最適化手法を用いて決定する。
6. その内容をシミュレータで再現し、観察し、実際のコオロギとの差異を議論する。その結果を踏まえて1に戻る。場合によってはコオロギの振る舞い観察実験や生理学実験を行うことで挙動計測結果の精度を向上させるべく努める。

このような構成によりコオロギの振る舞いモデルが構成できる。モデルの評価方法としては、現在のところ以下の事柄を考えている。

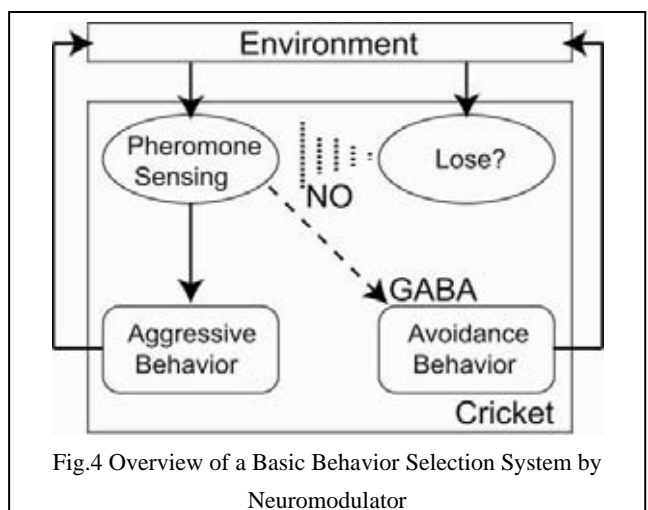


Fig.4 Overview of a Basic Behavior Selection System by Neuromodulator

- そのモデルに基づいて動いた仮想コオロギの振り舞いが、個々にとってある種の合理性を含んでいるかを調べる。それは例えば消費エネルギーの観点からも評価できるし、利用できる環境内のリソースの量と質という観点からも評価可能である。
- そのモデルが環境要因の変動等の外乱に強いものであるかを評価する。例えばコオロギの個体数等が変動しても同様な状態を保つことが可能かを評価する。コオロギに代表される生物群と人工物としての群ロボットの一番の相違点は系のロバスト性に存する。群ロボットの調和状態は外乱によって容易に解消されるが、生物のそれは非常にロバストである。

コオロギの群構成メカニズムの解明が、ロバストな群ロボットシステム構築のための方法論になり得る可能性がある。

4. 結論と今後の展望

本報では、まず C02 班の研究の方向性に関する議論を行い、群ロボット系の適応行動に関する従来研究について述べた。最後に実際の研究計画について述べた。

参考文献

(1) Yoshimura, Y., Ota, J., Inoue, K., Kurabayashi, D. and Arai, T., Iterative Transportation Planning of Multiple Objects by Cooperative Mobile Robots, Distributed Autonomous

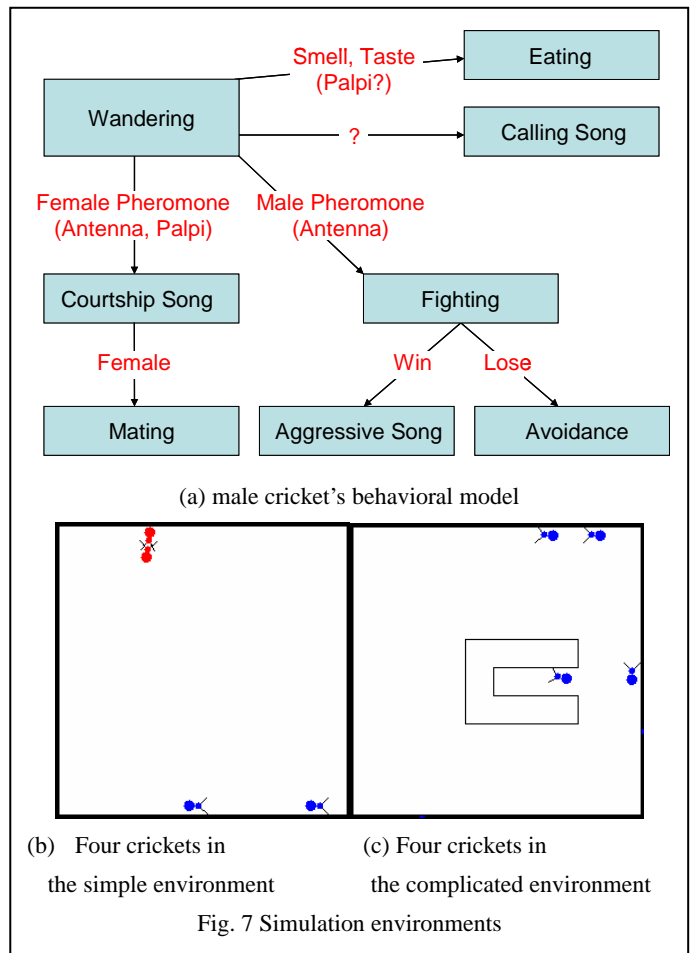
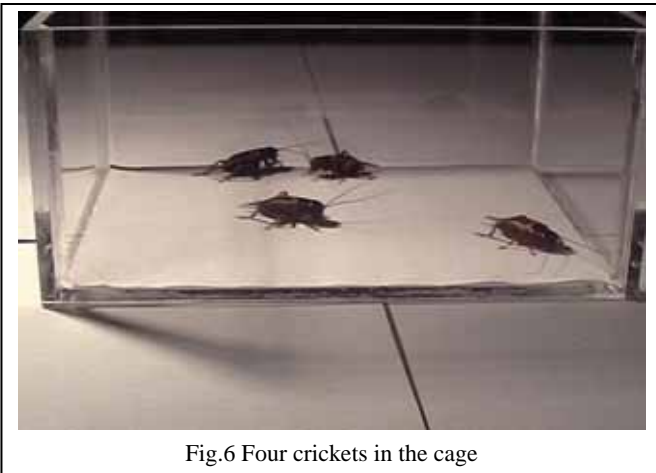
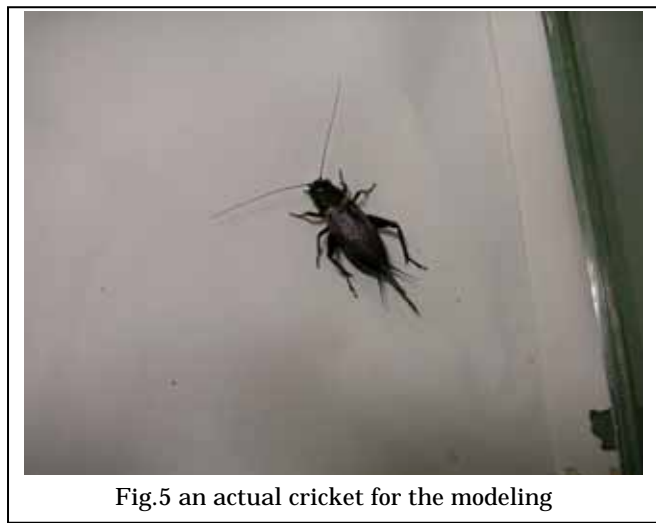
Robotics Systems 2, Eds. Asama, H., Fukuda, T., Arai, T., Endo, I., Springer, 171/182(1996).

(2) Inoue, K., Ota, J., Hirano, T., Kurabayashi, D. and Arai, T., Iterative Transportation by Cooperative Mobile Robots in Unknown Environment, Intelligent Autonomous Systems 5, Eds. Kakazu, Y., Wada, M., Sato, T., IOS, 30/37(1998).

(3) Trevai Chomchana, Yusuke Fukazawa, Hideo Yuasa, Jun Ota, Tamio Arai and Hajime Asama, Exploration path generation for multiple mobile robots using reaction-diffusion equation on a graph, Integrated Computer-Aided Engineering, 11, 3, 195/212 (2004).

(4) 湯浅 秀男, 伊藤 正美, グラフ上の反応拡散方程式と自律分散システム, 計測自動制御学会論文集, 35, 11, 1447/1453 (1999).

(5) Aonuma, H and Niwa K.: "Nitric Oxide Regulates the Levels of cGMP Accumulation in the Cricket Brain," Acta Biologica Hungrica, 55, pp.65--70, 2004.



生体の適応的行動発現に対するネットワーク機能構造からの理解

Analysis of adaptive behaviors emerged by functional structures in interaction networks

倉林大輔 船戸徹郎

Kurabayashi, D. and Funato, T.

東京工業大学大学院

Tokyo Institute of Technology

Abstract: Recent researches in animal brains showed an interesting explanation about transitions in crickets' attitude after fighting with other crickets. The result accounted that the changes in structures of neuron-network at crickets' brains controlled the attitudes. The structures of network have a strong effects for the behaviors like this. In this paper, a network built with nonlinear oscillators was dealt to study the effects of structure. The relationship between the characteristics of convergence about oscillators and the structure of network was confirmed. Then a concrete method for controlling the convergence states of oscillators was proposed.

Keywords: Graph Structure, Nonlinear Oscillator, Quasi-Periodic Oscillation

1. はじめに

生物は周囲の状況やコンテキストに応じて、自己の取るべき行動を適応的に切り替える。さらに、集団として適応するための機能分化や、群れを統率するための環境情報化などを行う。これら事象を生み出す各要素は他の要素との間に相互作用関係を持つ。本研究では、その相互作用をネットワークとして捕らえ、適応的行動の発現をネットワーク構造における特徴量を切り口として理解することを目指す。

適応的行動発現のための相互作用ネットワークとしては(1) 個体内部、すなわち神経細胞や身体部位との相互作用(2) 個体同士、すなわち移動と遭遇による相互作用(3) 個体群と環境の間の相互作用、の3レベルが考えられる。これらに共通する構造上の特徴を見出すことにより、工学システムとしての再構成を可能とするとともに生物における適応的行動発現のメカニズム理解が進むことが期待できる。

本報では(1) 個体内部の相互作用について、基礎的なモデルを用いたパターン切り替えメカニズムのモデルについて考察する。

2. ネットワークモデルと評価

2.1 ネットワーク構造遷移のモデル化

生物において、行動の切り替えや記憶生成のためには、ニューロン同士のシナプス結合だけでなくガス状物質などによる拡散作用が重要な役割を果たしていることが分かってきた¹⁾。この事象を、神経細胞同士のネットワークの構造が、神経伝達物質による新たな結合によって変化することと仮定し、これに工学的な解釈を与えるために、数理モデルとして非線型振動子からなるグラフを作成し、構造と振動子の収束性の関係を考察する。

はじめに構造的性質を表す特徴量を動かしながら、シミュレーションによって構造と収束性に関係があることを示す。つぎに性質の異なる2種類の振動子からなるグラフの挙動を考察し、構造に対する操作によって収束状態を制御する具体的な手法を提案する。

2.2 振動子とそのモデル

あるネットワークにおいて、その構造がシステムの挙動に作用することを確認するために、グラフの各頂点に非線型振動子を配置した系を考え、モデルとする。ここでは、非線型振動子として様々な研究で用いられている van der Pol 振動子(1)を取り上げる。

$$\ddot{x}_1 - \epsilon_1(1 - x_1^2)\dot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = 0. \quad (1)$$

非線型振動子同士は相互に結合すると、互いに同じ振動周期に引き込もうとする力を発生する。この作用は

$$x_i(t+1) = \tilde{x}_i(t) + \epsilon \left\{ \frac{1}{N_i(t)} \sum_{j=1}^{N_i(t)} x_j(t) - x_i(t) \right\} \quad (2)$$

という式で表すことができる。ただし $\tilde{x}_i(t)$ は時刻 t から $t+1$ に式(1)のみによって更新された後の状態を表す。

2.3 概周期振動

また、振動子の収束性を評価する方法として、概周期振動になる振動子の割合(概周期振動率)を用いる。van der Pol 振動子のような非線型振動子の位相は、リミットサイクルと呼ばれる軌道上を安定して周回する(Fig. 1(a))。それに対して、例えば周波数成分の比が無理数であるような振動では、Fig.1(b)のように決まった軌道を持たない周期的運動を示すことが知られている。この運動を概周期振動という。本研究ではこの2種の状態を収束状態の評価とし、これを構造変化によって切り替えることを考える。

2.4 グラフ構造を表す特徴量

振動子ネットワークを表現するグラフの構造を変化させるような操作と、その評価方法について考察する。

CPL グラフ構造を特徴づけるパラメータとして、グラフの大きさ:任意の2頂点間の距離の平均を表すCPLを用いる。 N を頂点数、 \bar{d}_v を頂点 v から他の全ての頂点までの最短距離の平均としたとき、CPLは次の式で表される。

$$CPL = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \bar{d}_v. \quad (3)$$

ショートカット 振動子結合によって構成したグラフの構造的性質を変化させるために、ショートカットという概念を導入する。ショートカットは次のような定義に基づいている。

- 頂点 i, j に対して、その間の辺 ij を除いたときの最短距離が3以上のとき、辺 ij をショートカットという²⁾。

またグラフ上の可能な総ショートカット数に対する現在のショートカット数の割合をショートカット率と呼ぶ。一般に、ショートカットを付与すると、グラフのCPLが減少する。

3. 構造の変化と収束性

3.1 ショートカット追加手順と収束状態

はじめに、ショートカットの割合および追加方法が構造的性質にどのように作用するのかを調べる。Fig.2の左図のような1次のラティスグラフの形に振動子網を構成し、以下の3種類の方法でショートカットを追加する。

- ランダム ランダムにショートカットを追加
- 昇順 CPLの影響が小さい、最短距離の短いショートカットからランダムに追加
- 降順 CPLの影響が大きい、最短距離の長いショートカットからランダムに追加

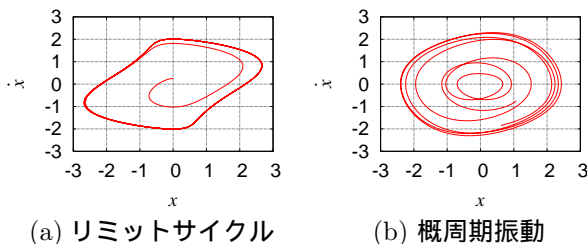


Figure 1: 振動子の収束状態

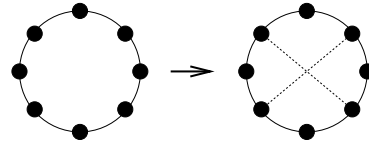


Figure 2: ショートカットの追加 (例)

ショートカットの追加手順の違いによる収束状態の変化を調べるために、以下のようなシミュレーションを行った。

1. 30, 60, 90, 120 個の振動子数を用いて1次のラティスグラフを構成する。
2. 各振動子網に対してランダム、昇順、降順の3種類の方法でショートカットを追加する。
3. できあがった各グラフ構造をもつ振動子の収束状態を調べ、初期状態から一定時間経過後に概周期振動を起こしている振動子の割合を求める。

ここで各振動子は式(1)で ϵ, ω ともに1.0をパラメータとして持つものとし、サンプリングタイム0.01[s]と仮定したシミュレーションを30,000ステップ動かした後の状態を用いて評価を行った。ただし初期位相は x, \dot{x} ともに $-1 \sim 1$ の間からランダムにとった。

Fig.3(a)-(c)に100回シミュレーションを行ったときの、ショートカット率に対する概周期振動率の平均を示した。図に示されるように、同じショートカット率であっても、ショートカットの追加方法の違いによって収束状態が変わっていた。つまり、ショートカットの量だけでなく、具体的なネットワーク構造への寄与が収束性を支配していることが示されている。

3.2 振動子パラメータと収束性

構造に対する操作によって収束状態を制御する手法を考察するにあたり、まず概周期振動となる条件を調べる。

結合振動子網上の i 番目の振動子の運動は、引き込み作用による力: $F(t)$ を用いて次式のように書き表すことができる。

$$\ddot{x}_i - \epsilon_i(1 - x_i^2)\dot{x}_i + \omega_i^2 x_i = F(t). \quad (4)$$

このとき、引き込みによって角周波数が Ω になったと考えると、

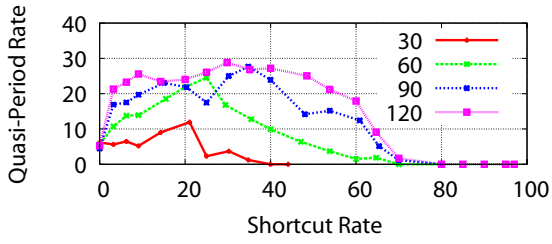
$$F(t) = a(t) \cos \Omega t + b(t) \sin \Omega t \quad (5)$$

となる。複数の振動子が引き込みあっている場合、ひとつの振動子の運動が $F(t)$ にあたる影響は小さいと考えられるので、引き込みが生じたあとの運動は外力として $F(t)$ を持つ強制振動と考えることできる。

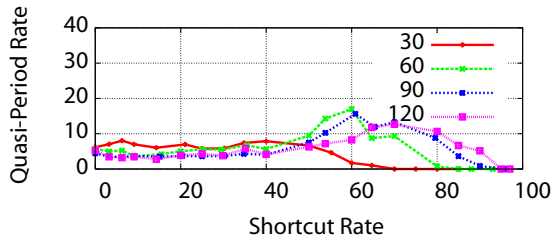
van der Pol 振動子の強制振動の収束条件を考えると³⁾,

$$x_i = c_i(t) \cos \Omega t + d_i(t) \sin \Omega t \quad (6)$$

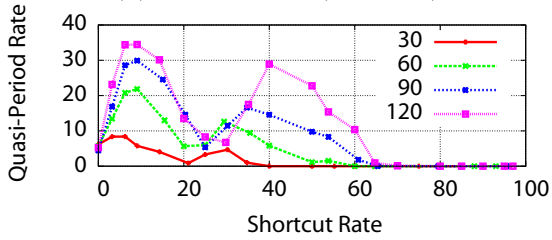
$$r_i^2 = c_i^2 + d_i^2 \quad (7)$$



(a) 概周期振動率 (ランダム追加)



(b) 概周期振動率 (昇順追加)



(c) 概周期振動率 (降順追加)

Figure 3: ショートカット率に対する概周期振動発生割合

に対して,

$$\rho(t) = \frac{r^2}{2} \quad (8)$$

$$\zeta^2(t) = \left(\frac{a}{2\epsilon_i \Omega} \right)^2 + \left(\frac{b}{2\epsilon_i \Omega} \right)^2 \quad (9)$$

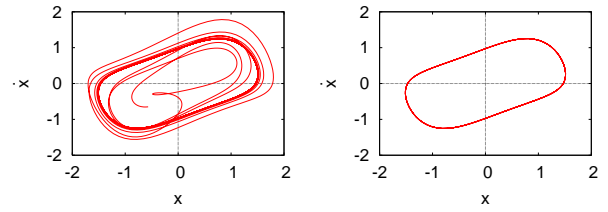
とおいたとき,

$$\begin{cases} \zeta^2 > \frac{8}{27} \\ \rho < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (10)$$

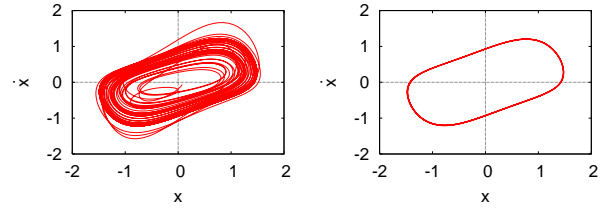
で概周期になる.

このことから, ϵ を固定したとき, 引き込み作用によって収束する角周波数: Ω が収束状態に大きな影響を与えていることが分かる. Ω を決める振動子の主パラメータは各振動子の角周波数: ω である. 例えば Ω の値は各 ω の間の値を持つことが予想される.

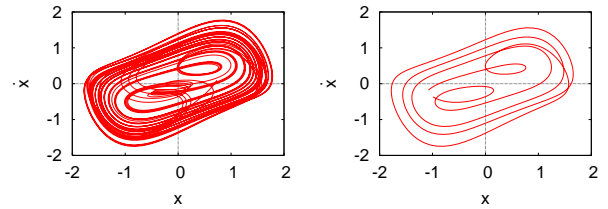
したがって ω として 2 種類の値のみをもつ場合を考えると, それに応じた Ω が比較的容易に定まり, 簡単な関係で収束性に違いを生じさせることができるのではないかと考えられる.



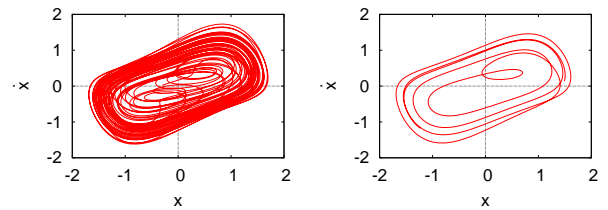
(1a) 0 → 30,000 step (1b) Last 3,000 step
(1) 振動子数 4 : リミットサイクル



(2a) 0 → 30,000 step (2b) Last 3,000 step
(2) 振動子数 50 : リミットサイクル



(3a) 0 → 30,000 step (3b) Last 3,000 step
(3) 振動子数 5 : 概周期振動



(4a) 0 → 30,000 step (4b) Last 3,000 step
(4) 振動子数 51 : 概周期振動

Figure 4: 振動子数と収束状態

3.3 2 種類の ω による収束性の影響

ω の異なる 2 種類の van der Pol 振動子を用い, 1 次のラティスグラフ上で交互に配置した振動子網を作成する. このグラフ上で振動子の数を変化させて収束性にどのような変化が生じるのかを調べる. ただし ϵ は 1.0 で固定とし, 各振動子の初期値は -1.0 から 1.0 までをランダムにとる.

Fig.4 は ω を奇数個目の振動子: 0.8, 偶数個目の振動子: 1.2 とした場合に 30,000 ステップまでシミュレーションをしたときの位相である. 各図において (a) が初期状態から 30,000 ステップまで全ての位相を示したもの, (b) は 27,000 ~ 30,000 ステップ間の様子を抽出したものである.

これらのシミュレーション結果から $\omega = 0.8, 1.2$ のようにとった場合に次のような性質があることが分かった.

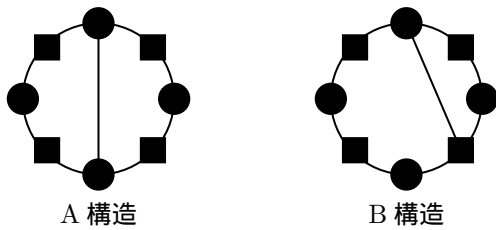


Figure 5: 2種類のショートカット

- 振動子数が偶数 → リミットサイクル (Fig.4(1), (3))
- 振動子数が奇数 → 概周期 (Fig.4(2), (4)).

偶数と奇数では、隣り合う振動子同士で ω が等しい組合せの有無が違っている。偶数個の振動子では、等しい ω を持つ隣接した振動子の結合が1つ存在し、その影響によって概周期振動を起こしていると考えられる。

3.4 構造による収束性の制御

Fig.5のように ω の値が2種類の8個の振動子によるグラフに、ショートカットがひとつだけ加わったような系を考える (Fig.5で円、四角の印は異なる ω を持つ振動子)。この系はショートカットのつなぎ方によって図のA構造、B構造の2種類の構造を持ち、前述の偶数と奇数の振動子の違いと同じように、それぞれ隣接する同じ ω を持った結合の有無に違いが存在する。

このような構造のみが変わった系の収束状態を調べるために以下のような手順でシミュレーションを行った。

1. 0~40,000ステップ: ショートカットなし
2. 40,000~80,000ステップ: A構造
3. 80,000~120,000ステップ: B構造

ただし $\epsilon = 1.0$ とし、初期状態は $-1 \sim 1$ までをランダムにとる。

各構造を持つステップごとに位相状態を表すと Fig.6(1)-(3) のようになった。左側の図が各段階のすべての位相状態を表しており、右側の図は最後4000ステップを表している。図より、A構造を持つときに概周期振動となり、B構造を持つときにリミットサイクルを描いていることが分かる。

これらのことから、ショートカットを用いた構造の操作によって

リミットサイクル → 概周期振動 → リミットサイクル

というように振動子の収束状態を制御することが可能になった。

4. まとめ

本報では、生物の適応的な行動切替について、神経振動子とガス状物質作用にヒントを得て、非線形振動子

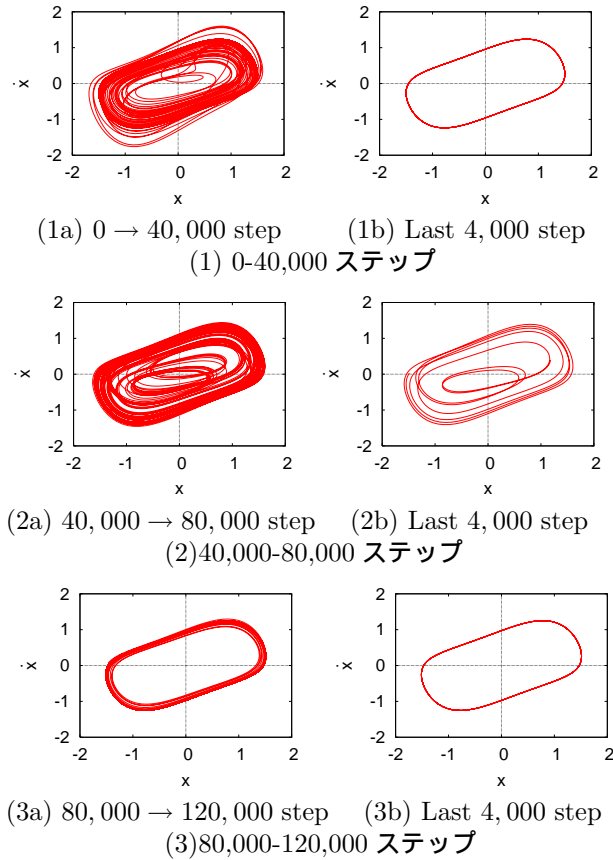


Figure 6: 構造遷移による収束状態切替

の同期現象をそれらが構成するネットワークの構造にのみ着目して切り替える手法について考察した。

振動子を頂点に持ったグラフをモデル化し、グラフに対するショートカットの追加手順を変えながらシミュレーションを行うことによって、振動子の収束状態がグラフの構造に応じて切り替わることを確認した。次に振動子のパラメータから角周波数に対応する項に注目し、2種類の振動子を交互に接続することによって収束状態に対する単純な性質を示した。最後にこの性質を用いてグラフ構造の操作によって収束状態を制御する具体的な方法を示した。

References

- [1] 青沼仁志: 昆虫の行動決定にかかわる神経機構, 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 1, 6/10, 2005.
- [2] D.J. Watts: Small Worlds, Princeton Studies in Complexity, 1999.
- [3] E.A. Jackson: 非線形力学の展望(1) カオスとゆらぎ, 共立出版, 1994.

D班: 移動知共通原理の活動報告

大須賀公一(神戸大学), 石黒章夫(名古屋大学), 鄭心知(京都高度技術研究所)

概要: 本稿では, 移動知の共通原理を探求することを目的として構成されたD班の平成17年度の活動報告をまとめる. 具体的には, A.受動的動歩行における歩行原理, B.大自由度を有するモジュラーロボットの実時間形態変形制御, C.制御と機構の Well-Balance, という3つの観点からの考察を行ったのでそれらについて報告する.

1. はじめに

D班では, 移動知の共通原理として「バランス」をキーワードに考える. すなわち, 種々の場面(A班, B班, C班)における移動知には何らかのバランス, 言い換えれば, フィードバック構造が内在していると考えられる. D班では, 色々な移動知を抽象的にモデリングを行い, そこから共通的な力学構造(何らかのフィードバック構造)を探索する. その結果は, 生物をはじめロボットにおける移動知の設計原理に還元されることを期待している.

今年度は, 以下の3つの方面からのアプローチを試みた.

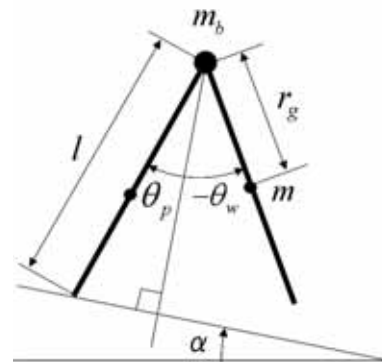
2. 移動知共通原理への具体的接近方策

本章では, 各グループの本年度の成果報告をまとめる.

A. 受動的動歩行における歩行原理

移動知の共通原理を探求するための一つの方策として「要因の削除」という考え方をとる. すなわち, 種々の要因が複雑に絡み合っている現象の理解の方法として, 極限まで要因を取り去ることで「核」を理解使用とするアプローチである. このような方法は「ミニマルデザイン」と呼ばれているが, ここではまず「歩行」に関するミニマルデザインを考えてみる. そして, 歩行の出発点となるモデルの具体例として「受動的動歩行機械」を取り上げる. 図A1 参照(右は受動的動歩行ロボットQuartetII, 右はその等価モ

デルである. m は脚の質量, m_b は胴体の質量, 傾斜角を α とし各脚の角度などは図の通りである). その理由は, 歩行という動作は生物にも存在し, 生物では学習によって獲得されるものである(ある種の初頭的な知能が関わっている)からである. さらに, 受動的動歩行は安定な物理現象であり, その安定性に関する物理的メカニズムが解明されると, それは「移動知」の「核」に成り得ると考えているからでもある.



図A1 受動的動歩行機械
(上:QuartetII, 下:モデル)

我々は生まれて数年経つと全身の関節をフルに制御して歩き始める. それがさらに数年経過すると, 脚を前に降り出して前に倒れようとしながら歩き, できるだけエネルギーを使わない, リラックスした歩行を覚える. この状況のある側面を機械システムで実現したのが「受動的動歩行機械」である. 我々は, 受動的動歩行には二足歩行の本質が隠されていると考えている. このように感じる根拠は, 「受動的動歩行現象

は安定である」という実験的事実である(さらに、「受動的動歩行の歩行周期には分岐現象やカオス現象が見られる(歩行周期:第 k 歩目と第 $k+1$ 歩目までの時間)」という興味深い実験的事実も知られている)。すなわち、そもそも受動的動歩行は(外部からエネルギーを与えないという意味で)エネルギー効率が良く、物理現象として安定であるため、人が歩行を獲得する際に自然にそのような歩行形態に向かってゆくのではないかと考えられる。なぜなら「自然界は楽を好む」という原則があるに違いないと思うからである。

ここでの興味は受動的動歩行が自然物として安定な現象になっていることのメカニズムを理解することである。この点について筆者らは一つの解として、歩行を離散力学系として捉えた際のポアンカレ写像に安定化に寄与しているフィードバック構造が内在していることを発見している。図 A2 参照。本図上は、受動的動歩行において遊脚が着地する瞬間に注目した際の離散力学的表現である。本図下が示していることは、その離散力学モデル(ポアンカレ写像)の中にフィードバック構造が内在していることである。

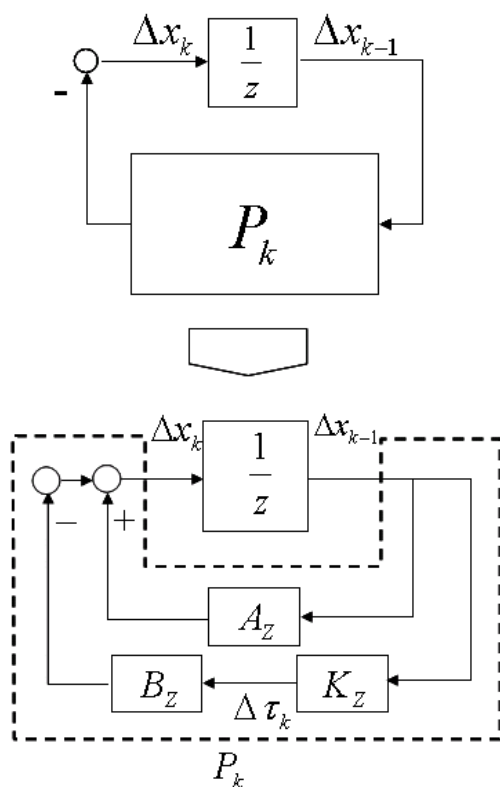


図 A2 受動的動歩行におけるフィードバック構造

現在、4脚受動的動歩行の存在を確認中である。筆者らの期待としては、自然界の4脚動物が進化の過程で4脚を捨て去らなかったということは、4脚歩行にも力学的な安定性が備わっているはずだ、というものである。

B. 大自由度を有するモジュラーロボットの実時間形態変形制御

本事例研究では、多数の構成要素(モジュール)からなるモジュラーロボットの実時間適応的な形態変形制御を事例として採り上げる。行動主体としてモジュラーロボットに着目したのは、主として以下の理由による:

- モジュラーロボットは本質的に大自由度を有するシステムである。この機構系が有する空間的複雑性から、制御系 - 機構系 - 環境間に興味深い相互作用力学が発現することが期待される。
- 受動歩行機械は自由度の少なさによって理論的考察を可能としている。モジュラーロボットのような大自由度システムはその対極に位置することから、別の新しい知見が得られることが期待される。
- 状況に応じてシステム全体の形態を能動的に改変しながら移動するモジュラーロボットは、アメーバ運動のような原始的なロコモーションの様式と合致する。意図的にこのような単純性・原初性に着目することによって、移動知発現のための設計論に関する知見が効果的に抽出できることが期待される。

本事例研究では、「有限な物理的・計算的資源を有する行動主体が無限定環境下で生存脳機能を発現するためには、創発現象を活用する以外に方策はない。そのためには、行動主体の制御系と機構系が有機的に関連させることが必要である」との作業仮説に基づく。しかしながら、どのように制御系と機構系を関連させればよいのかについては、依然として明確な設計指針が存在していないのが現状である。そこ

で、初動段階として、粘菌における情報処理に関する知見を参考にして、(1)機能性素材の有する力学的特性の活用(機構系ダイナミクスの工夫)、(2)非線形振動子間の相互引き込みを通した大域的情報の生成という二つの工夫を主として導入し、前者をモジュール間の結合制御機構として、そして後者をロコモーションパターン生成の中核的な機構として活用することを試みた。

代表的なシミュレーション結果を図 B1 に示す。ここでは、モジュール数が 100 個と 500 個の場合の形態変形のスナップショットを示す。図中の大きな丸は障害物を表している。モジュール数の違いに応じて異なった環境への対処方策が観察されたのは非常に興味深い。さらにわれわれは、本モジュラーロボットが優れた耐故障性や拡張性も併せ有していること、そしてこれらの特性がモジュール数の増大に伴って発現することを確認している。上記結果は、採用した作業仮説の妥当性を強く示唆していると考えられる。

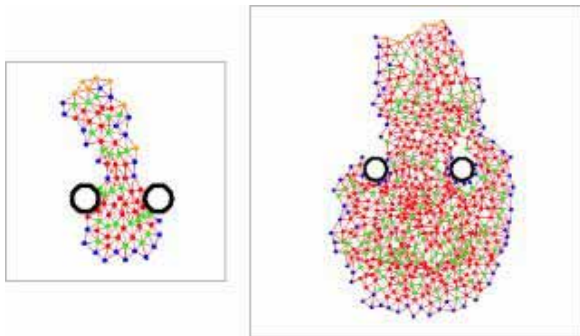


図 B1 シミュレーション結果(左:100 個, 右:500 個)



図 B2 製作したモジュールの試作機.

C. 制御と機構の Well-Balance

移動知理解のもう一つの観点は「制御と機構の Well-Balance」である。たとえば、図 C1 のように「茶筌」と「石臼」を回すというタスクを考えたとき、両者の基本的動作は類似しているが、我々がこれらを実施したときの腕の運動制御方策は異なった物になる。実際、腕の各関節における筋肉の筋緊張を巧みに変えることでタスク(環境)に適した運動を実現する。



図 C1 茶筌と石臼

マニピュレータモデルを用いてシミュレーションによってこのようなことを確認した 1 例が以下になる。すなわち、腕の上腕、前腕、手首を図 C2 のように 3 リンクのマニピュレータでモデル化し、「茶筌立て」と「石臼引き」の 2 種類の作業をともに手先の円周運動としてモデル化する。

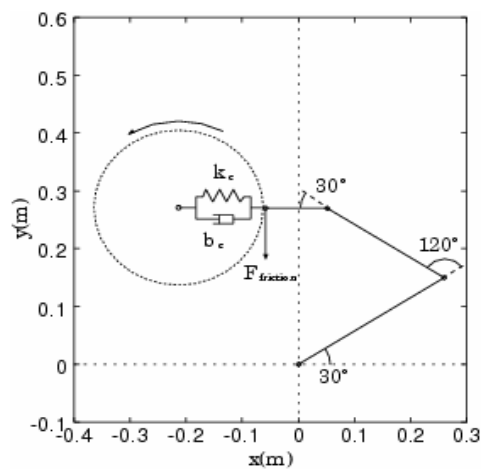
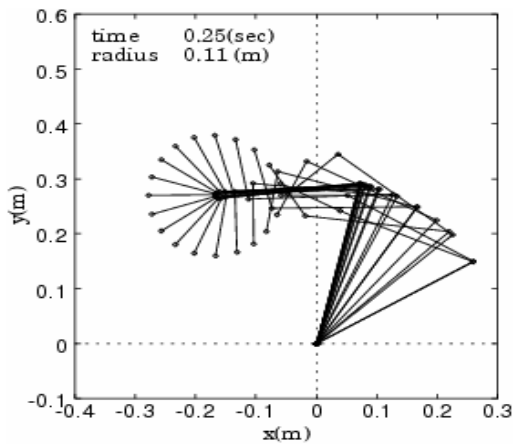
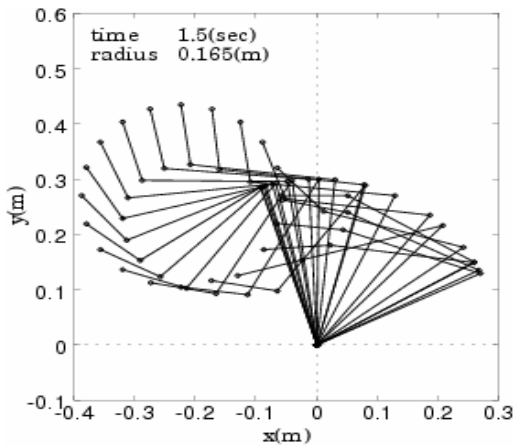


図 C2 作業モデル

すると、2種類の作業においてそれぞれ図 C3(a),(b)のような腕の動作軌跡例が見られる。



(a)



(b)

図 C3 腕動作軌跡

この動作戦略はこれまでは、腕の関節駆動トルクが

$$\tau = K(q_e - q) - B\dot{q} \quad (1)$$

で与えられるとし、関節目標平衡位置 q_e と関節回りの粘弾性 K , B (の各要素) を腕の動力学的特性に基づくエネルギー消費最小の意味でそれぞれのタスクの幾何学的 (円運動半径) や静力学的 (手先力) 相違に応じて得られるものという解釈、すなわち、最適性 (物理学的自然さ) / 身体論的な捉え方をし、このような動作戦略発現の必要条件を示してきたもののみであった。

一方、これは、タスク (環境) と力学的相互作用を通じてそれに適応するように、機構である腕 (身体

系) 固有の物理的特性ともうまくバランスをとりながら、運動 (指令, 制御) に相当する q_e と筋緊張に相当する K , B を変えその両者間のバランスを巧妙に調節することによって、類似しているが異なるタスクへの動作戦略を実現することができ、すなわち (1) 式の筋緊張・運動制御モデルがそのための十分条件をも与えることを示唆していると言える。

3. おわりに

本稿では、D班の平成17年度における活動について報告した。ここでのポイントは以下にまとめられる。

- P1) 極限まで問題を単純化した問題 (受動的動歩行) と対局に極限まで複雑化した問題 (大自由度モジュラーロボット) の両極端を考える。そのことによって実際の問題 (ちょうど中間に位置する) を内挿できることを期待する。また逆に外挿することで新たな「種」を考えることができると期待する。
- P2) 自然界は「自然界は楽を好む」という基本原理を想定する。生物の長い進化で獲得されてきている色々な運動 (歩行など) は力学的に不自然であるはずがないという考えである。これはダイナミクスベース制御の考え方である。
- P3) 「～ため」を考える。すなわち、「制御のための機構」と同時に「機構のための制御」という考え方をを行い、両者の「ため」が整合するときシステムとして最高の性能が発揮できるという考え方をもつ。これが制御と機構の Well-Balance である。

メンバーリスト

■=総括代表 ■=計画班

担当	氏名	所属・役職	
総括代表者	浅間 一	東京大学 人工物工学研究センター・教授	■
A01 代表者	矢野 雅文	東北大学 電気通信研究所・教授	■
A01 分担者	坂本 一寛	東北大学 電気通信研究所・助手	■
A01 分担者	牧野 悌也	東北大学 電気通信研究所・助手	■
A02 代表者	伊藤 宏司	東京工業大学 大学院総合理工学研究科・教授	■
A02 分担者	近藤 敏之	東京工業大学 大学院総合理工学研究科・助手	■
B01 代表者	高草木 薫	旭川医科大学 医学部・助教授	■
B01 分担者	稲瀬 正彦	近畿大学 医学部・教授	■
B01 分担者	北澤 茂	順天堂大学 医学部・教授	■
B01 分担者	斉藤 和也	旭川医科大学 医学部・助手	■
B01 分担者	中里 泰三	順天堂大学 医学部・講師	■
B01 分担者	中崎 克己	近畿大学 医学部・講師	■
B01 分担者	森 大志	山口大学 農学部・助教授	■
B01 分担者	柳原 大	東京大学 大学院総合文化研究科 生命環境科学系・助教授	■
B02 代表者	荻原 直道	京都大学 大学院理学研究科・助手	■
B02 分担者	土屋 和雄	京都大学 大学院工学研究科・教授	■
B02 分担者	杉本 靖博	京都大学 大学院工学研究科・助手	■
B02 協力者	青井 伸也	京都大学 大学院工学研究科・学振特別研究員	■
B03 代表者	細田 耕	大阪大学 大学院工学研究科・助教授	■
B03 分担者	井上 康介	茨城大学 工学部・助手	■
B03 分担者	木村 浩	電気通信大学 大学院情報システム学研究科・助教授	■
B03 分担者	辻田 勝吉	大阪工業大学 工学部 電気電子システム工学科・助教授	■
C01 代表者	青沼 仁志	北海道大学 電子科学研究所・助教授	■
C01 分担者	神崎 亮平	東京大学 大学院情報理工学系研究科・教授	■
C02 代表者	太田 順	東京大学 大学院工学系研究科・助教授	■
C02 分担者	浅間 一	東京大学 人工物工学研究センター・教授	■
C02 分担者	川端 邦明	理化学研究所 分散適応ロボティクス研究ユニット・研究員	■
C03 代表者	倉林 大輔	東京工業大学 大学院理工学研究科・助教授	■
D01 代表者	大須賀 公一	神戸大学 工学部・教授	■
D01 分担者	石黒 章夫	名古屋大学 大学院工学研究科・助教授	■
D01 分担者	鄭 心知	(財)京都高度技術研究所 メカトロニクス研究室・室長	■
評価	北村 新三	神戸大学・理事	■
評価	鈴木 良次	金沢工業大学 人間情報システム研究所・所長	■
評価	森 茂美	生理学研究所・名誉教授	■
評価	Rolf Peifer	チューリッヒ大学 情報工学科・教授	■
評価	Sten Grillner	カロリンスカ研究所・教授	■
評価	Avis H. Cohen	メリーランド大学 生物学科・教授	■

研究業績・受賞・特許

研究業績

1. Naohiro Saito, Hajime Mushiake, Kazuhiro Sakamoto, Yasuto Itoyama, Jun Tanji, Representation of Immediate and Final Behavioral Goals in the Monkey Prefrontal Cortex during an Instructed Delay Period, *Cerebral Cortex*, 15, 10, 1535 - 1546, 2005
2. Yoshinari Makino, Masafumi Yano, Pictorial Cues Constrain Depth in da Vinci Stereopsis, *Vision Research*, 46, 1-2, 91-105, 2006
3. Toshiyuki Kondo, Koji Ito, Periodic Motion Control by Modulating CPG Parameters based on Time-Series Recognition, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 3630 (Proceedings of 8th European Conference, ECAL2005), 3630, , 906-915, 2005
4. Masahiko Inase, Bao-Ming Li, Ichiro Takashima, Toshio Iijima, Cue Familiarity Is Represented in Monkey Medial Prefrontal Cortex during Visuomotor Association Learning., *Experimental Brain Research*, 168, 1-2, 281-286, 2006
5. Oshio Kenichi, Atsushi Chiba, Masahiko Inase, Delay Period Activity of Monkey Prefrontal Neurons during Duration-Discrimination Task., *European Journal of Neuroscience*, 2006
6. Hirohumi Harada, Kaoru Takakusaki, Shinichi Kita, Mitsuyoshi Matsuda, Satoshi Nonaka, Takashi Sakamoto, Effects of Injecting GABAergic Agents into the Medullary Reticular Formation upon Swallowing Induced by the Superior Laryngeal Nerve Stimulation in Decerebrate Cats., *Neuroscience Research*, 51, 395-404, 2005
7. Hiroto Yamada, Nobuhiko Takahashi, Satoshi Tanno, Miho Nagamine, Kaoru Takakusaki, Toshikatsu Okumura , A Selective Orexin-1 Receptor Antagonist, SB334867, blocks 2-DG-Induced Gastric Acid Secretion in Rats, *Neuroscience Letters*, 376, 2, 137-142, 2005
8. Kaoru Takakusaki, Kazumi Takahashi, Kazuya Saitoh, Hirofumi Harada, Toshikatsu Okumura, Yukihiko Kayama, Yoshimasa Koyama, Orexinergic Projections to the Midbrain Mediate Alternation of Emotional Behavioral States from Locomotion to Cataplexy., *Journal of Physiology*, 568, 3, 1003-1020, 2005
9. Kaoru Takakusaki, Kazuya Saitoh, Satoshi Nonaka, Toshikatsu Okumura, Naoyuki, Miyokawa, Yoshimasa Koyama, , Neurobiological Basis of State-Dependent Control of Motor Behaviors, *Sleep and Biological Rhythms*, 2006
10. Futoshi Mori, Katsumi Nakajima, Shigemi Mori, Cortical and subcortical neural mechanisms for controlling bipedal gait in humans and Japanese macaques, *Human Movement Science* , in press
11. Taizo Nakazato, Striatal Dopamine Release in the Rat during a Cued Lever-press Task for Food Reward and the Development of Changes over Time Measured Using High-speed Voltammetry., *Experimental Brain Research*, 166, 1, 137-146, 2005
12. Shigeru Kitazawa, Kenji Kansaku, Sex difference in language lateralization may be task-dependent, *Brain*, 128, 5, E30, 2005
13. Shinya Yamamoto, Shunjiro Moizumi, Shigeru Kitazawa, Referral of tactile sensation to the tips of L-shaped sticks, *Journal of Neurophysiology*, 93, 5, 2856-2863, 2005
14. Kenji Kansaku, Shigeru Muraki, Shinji Umeyama, Yasunori Nishimori, Tomoyuki Kochiyama, Shigeru Yamane, Shigeru Kitazawa, Cortical activity in multiple motor areas during sequential finger movements: an application of independent component analysis, *Neuroimage*, 28, 3, 669-681, 2005
15. Shigeru Kitazawa, Daniel M Wolpert, Rhythmicity, randomness and synchrony in climbing fiber signals, *Trends in Neurosciences*, 28, 11, 611-619, 2005
16. Shigeru Kitazawa, Daniel M Wolpert, Response to Gilbert: Rhythmicity, randomness and synchrony in climbing fiber signals, *Trends in Neurosciences*, 29, 2, 66-67, 2006
17. Sho Kakizawa, Taisuke Miyazaki, Dai Yanagihara, Masamitsu Iino, Masahiko Watanabe, Masanobu Kano, Maintenance of Presynaptic Function by AMPA Receptor-Mediated Excitatory Postsynaptic Activity in Adult Brain, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 52, 19180-19185, 2005

18. Yukihiro Takayasu, Masae Iino, Wataru Kagegawa, Hiroshi Maeno, Kei Watase, Keiji Wada, Dai Yanagihara, Taisuke Miyazaki, Okiru Komine, Masahiko Watanabe, Koichi Tanaka, Seiji Ozawa, Differential Roles of Glial and Neuronal Glutamate Transporters in Purkinje Cell Synapses, *Journal of Neuroscience*, 25, 38, 8788-8793, 2005
19. Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Locomotion Control of a Biped Robot Using Nonlinear Oscillators, *Autonomous Robots*, 19, 3, 219-232, 2005
20. Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Bifurcation and Chaos of a Simple Walking Model Driven by a Rhythmic Signal, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 41, 3, 438-446, 2006
21. Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Self-stability of a Simple Walking Model Driven by a Rhythmic Signal, *Nonlinear Dynamics*, in press
22. Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Stability Analysis of a Simple Walking Model Driven by an Oscillator with a Phase Reset Using Sensory Feedback, *IEEE Transactions on Robotics*, in press
23. Katsuyoshi Tsujita, Hiroomi Toui, Kazuo Tsuchiya, Dynamic Turning Control of a Quadruped Locomotion Robot using Oscillators, *Advanced Robotics*, 19, 10, 1115-1133, 2005
24. Masato Nakatsukasa, Eishi Hirasaki, Naomichi Ogihara, Energy expenditure of bipedal walking is higher than that of quadrupedal walking in Japanese macaques, *American Journal of Physical Anthropology*, in press
25. Y. Matsumoto, S. Unoki, H. Aonuma and M. Mizunami, Nitric oxide-cGMP signaling is critical for cAMP-dependent long-term memory formation, *Learning & Memory*, 13, 1, 35-44, 2006
26. Jun Ota, Multi-agent Robot Systems as Distributed Autonomous Systems, *Advanced Engineering Informatics*, 20, 1, 59-70, 2006
27. Hiroshi Kimura, Kazuo Tsuchiya, Akio Ishiguro, Hartmut Witte (Eds.), , *Adaptive Motion of Animals and Machines*, Springer (2006), 2006
28. Taizo Nakazato, Maki Kagohashi, Kenji Yoshimi, Influence of pH on Voltammetric Measurement of Dopamine., *Bigenic Amines*, 2006
29. Taizo Nakazato, L-DOPA Itself Causes Increased Activity in Rats: the Clinical Implications. , *The Probable Roles of Dopa as a Neurotransmitter*. Eds: Misu Y and Goshima Y, CRC Press, NY, 229-241, 2005
30. K. Niwa, J. Sakai, T. Karino, H. Aonuma, T. Watanabe, T. Ohyama, O. Inanami and M. Kuwabara, Reactive oxygen species mediate shear stress-induced fluid-phase endocytosis in vascular endothelial cells, *Free Radical Research*, 40, 2, 167-174, 2006
31. J. Nagamoto, H. Aonuma and M. Hisada, Discrimination of conspecific individuals via cuticular pheromones by males of the cricket *Gryllus bimaculatus*, *Zool. Sci*, 22, , 1079-1088 , 2005
32. Kanzaki R, Nagasawa S and Shimoyama I, Neural basis of odor-source searching behavior in insect brain systems evaluated with a mobile robot, *Chem Senses*, 30, suppl 1, i285-i286, 2005
33. Wada S and Kanzaki R, Neural control mechanisms of the pheromone-triggered programmed behavior in male silkmoths revealed by double-labeling of descending interneurons and the motor neuron, *J Comp Neurol* , 484, , 168-182, 2005
34. Iwano M and Kanzaki R, Immunocytochemical Identification of Neuroactive Substances in the Antennal Lobe of the Male Silkworm Moth *Bombyx mori*, *Zool Sci*, 22, , 199-211, 2005
35. Namiki S, Kazawa T and Kanzaki R, Basic characteristics of neuronnetwork components in the antennal lobe of the silkworm, *Chem Senses*, 30, , A149-A150, 2005
36. Yamasaki T, Isokawa T, Matsui M, Ikeno H and Kanzaki R, Reconstruction and simulation for three-dimensional morphological structure of insect neurons, *Neurocomputing*, 2006
37. Yoshinari Makino, Hisanori Makinae, Tsukasa Obara, Masafumi Yano, Brain Regions Related to Odor Learning and Memory in Terrestrial Slug, *Inciralia Fruhstorferi*: Two Lobes of the Cerebral Ganglion Show Different Spatiotemporal Activities, *Proceedings of the 11th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, OS7-1, 2006
38. Ikuo Matsuo, and Masafumi Yano, A Computational Model of Echolocation: Restoration of

- an Acoustic Image from a Single-Emission Echo, *The Journal of the Acoustical Society of America* (149th Meeting of the Acoustical Society of America), 117, 4, 2553, 2005
39. Masashi Ito, Masafumi Yano, A Local Vector Coding for High Quality Voice Analysis/Synthesis, *The Journal of the Acoustical Society of America* (150th Meeting of the Acoustical Society of America), 118, 3, 2024, 2005
 40. Koji Ito, Takeshi Sakurada, Makoto Doi, Toshiyuki Kondo, Impedance Adaptation of Arm Movements under Dynamic Environments, *Proceeding of SICE Annual Conference 2005*, WP1-03-02, , 3305-3310, 2005
 41. Koji Ito, Takahiro Shioyama, Toshiyuki Kondo, Lower-limb Joint Torque and Position Controls by Functional Electrical Stimulation (FES), *Proceeding of Complex Medical Engineering (CME2005)*, 559-564, 2005
 42. Tomoaki Nagano, Toshiyuki Kondo, Koji Ito, Motion Pattern Generation for Multi-link System based on Distributed Kinematics and Dynamics with Time Delay, *Proceedings of SICE Annual Conference 2005*, MA2-01-6, 2005
 43. Akira Mura, Masahiko Inase, Self Generated Action Monitoring by Mirror Neurons in the Inferior Parietal Cortex., *Proceedings of Vision Science Society 5th Annual Meeting, Satellite Workshop, From Eye to Hand: The Role of Vision in Grasping*, 2005
 44. Atsushi Chiba, Kenichi Oshio, Masahiko Inase, Neuronal Activity in the Monkey Striatum during a Duration Discrimination Task., *Proceedings of Neuroscience 2005, 35th Annual Meeting of Society for Neuroscience*, 413.5, 2005
 45. Kaoru Takakusaki, The Control of Basal Ganglia on Postural Muscle Tone And Locomotion, *35th International Union of Physiological Science*, 2005
 46. Kaoru Takakusaki, Kazuya Saitoh, A New Category of Spinal Interneurons That Mediate Atonia in Cats, *Proceedings of Neuroscience 2005, 35th Annual Meeting of Society for Neuroscience*, 863.17, 2005
 47. Hirohumi Harada, Kaoru Takakusaki, Yoshio Bando, Satoshi Nonaka, GABAergic Control of Swallowing in Cats, *Proceedings of Neuroscience 2005, 35th Annual Meeting of Society for Neuroscience*, 573.24, 2005
 48. Futoshi Mori, Katsumi Nakajima, Hideo Tsukada, Shigemi Mori, Primary, supplementary and premotor cortices are involved in the execution and control of operant-trained bipedal treadmill walking in Japanese monkey., *Proceedings of the 2006 International Congress on Gait & Mental Function*, 2006
 49. Naomi Wada, Futoshi Mori, Norihiro Kato, Shinji Hirano, Wakana Iwamoto, Go Suzuki, Shigemi Mori, Kinematic and electromyographic studies on rat bipedal-walking model, *International Society for Postural and Gait Research XVIIth Conference*, 2006
 50. Norihiro Kato, Shinji Hirano, Wakana Iwamoto, Go Suzuki, Futoshi Mori, Naomi Wada, Shigemi Mori, Influence of bipedal walking on neural systems: spinal reflexes in the lumbar spinal cords in rat bipedal walking models, *International Society for Postural and Gait Research XVIIth Conference*, 2006
 51. Kenji Yoshimi, Taizo Nakazato, Kazue Takahata, Seiichiro Shimazu, Akira Komatsu, Nobutaka Hattori, Yoshikuni Mizuno, Voltammetric Measurement of Striatal Extracellular Dopamine Changes Induced by Physiological Stimuli and Trace Amine Mimetics, , 2005
 52. Maki Kagohashi, Taizo Nakazato, Shigeru Kitazawa, Yoshikuni Mizuno, Dopamine Release in the Rat Striatum during the Cued Lever-press Task and the Effect of Serotonin Neuron on Its Release., , 2005
 53. Shigeru Kitazawa, Where tactile stimuli are ordered in time, *Neuroscience Semiar Series 2005*, 2005
 54. Shigeru Kitazawa, Frames of reference for tactile perception., *Cognition and Action, JSPS-UCL symposium*, 2005
 55. Shigeru Kitazawa, Where tactile signals are ordered in time, *ESF-EMBO Symposium on Three-Dimensional Sensory and Motor Space: Probabilistic Mechanisms of Learning and Development in Sensorimotor Systems.* , 2005
 56. Shigeru Kitazawa, Inferring the level of language comprehension during story listening.,

- Neuroethics of Nurturing the Brain, Annual Meeting 2005, Japanese Society for Neuroscience, 2005
57. Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Transition from Quadrupedal to Bipedal Locomotion, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada (IROS2005), 3419-3424, 2005
 58. Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Turning of a Biped Robot Driven by Nonlinear Oscillators, Proceedings of the 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Illmenau, Germany (AMAM2005), 2005
 59. Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Feedback Control of a Simple Walking Model Driven by an Oscillator, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, FL (ICRA2006), accepted
 60. Katsuyoshi Tsujita, Manabu Kawakami, Kazuo Tsuchiya, Optimal Gait Pattern of a Quadruped Locomotion Robot, Proceedings of the 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Illmenau, Germany (AMAM2005), 2005
 61. Naomichi Ogihara, Eishi Hirasaki, Masato Nakatsukasa, Energy efficient bipedal locomotor strategy in bipedally-trained Japanese macaques, Proceedings of the 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Illmenau, Germany (AMAM2005), 2005
 62. Takashi Takuma, Koh Hosoda, Minoru Asada, Stabilization of Biped with Pneumatic Actuators against Terrain Changes, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (IROS2005), 2775-2780, 2005
 63. Koh Hosoda, Takashi Takuma, Ballistic Control for 2D/3D Pneumatic Actuated Walking Robots, Proceedings of 3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines, 2005
 64. H. Kimura, Y. Fukuoka, H. Katabuti, Mechanical Design of a Quadruped Tekken3 & 4 and Navigation System Using Laser Range Sensor, Proceedings of International Symposium on Robotics (ISR2005), 2005
 65. Z.G. Zhang, Y. Fukuoka and H. Kimura, Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control, Proceedings of IEEE Robotics and Automation (ICRA2005), 3750-3755, 2005
 66. K. Inoue, S. Ma, C. Jin, Optimization of CPG-Network for Decentralized Control of a Snake-Like Robot, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2005), 730-735, 2005
 67. T. Fujiki, K. Kawabata, H. Asama, Adaptive Action Selection of Body Expansion Behavior in Multi-Robot System using Communication, Intelligent Autonomous Systems 9, 632-639, 2006
 68. Chomchana Trevai, Jun Ota and Tamio Arai, Self-organizing Planner for Multiple Mobile Robot Exploration and Patrol, Intelligent Autonomous Systems 9, 622-631, 2006
 69. Masao Sugi, Yusuke Tamura, Makoto Nikaido, Jun Ota, Tamio Arai et al., Human Supporting Production Cell Attentive Workbench, Intelligent Autonomous Systems 9, 740-747, 2006
 70. Tetsuro Funato, Daisuke Kurabayashi, Masahito Nara, Control of a Nonlinear Oscillator Network via Structural Transition, Distributed Autonomous Robotic Systems, 7, 2006
 71. Gou Nishida, Masaki Yamakita, Formal Distributed Port-Hamiltonian Representation of Field Equation, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Decision and Control, 12-25, 2005
 72. Akio Ishiguro, Hiroaki Matsuba, Tomoki Maegawa, Masahiro Shimizu, A Modular Robot That Self-Assembles, Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-9), 585-594, 2006
 73. Kazuhiro Sakamoto, Toru Onizawa, Masafumi Yano, Competition Between Spatial and Temporal Factors in Simple Apparent Motion is Modulated by Laterality, Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL-05), 175-179, 2005
 74. Kazuhiro Sakamoto, Hajime Mushiake, Naohiro Saito, Jun Tanji, Transient Synchrony and Dynamical Representation of Behavioral Goals of the Prefrontal Cortex, Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL-05), 207-211, 2005

75. D. Hatakeyama, E. Ito, H. Aonuma and K. Elekes, Distribution of glutamate-like immunoreactive neurons in the adult and developing nervous system of gastropod molluscs (*Lymnaea stagnalis* L.), *Clin Neurosci*, 58, S1, 39, 2005
76. Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka, Stability Analysis of Passive-Dynamic-Walking focusing on the Inner Structure of Poincare Map, Proc. of 12th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2005), 2005
77. Yasuhiro Sugimoto, Koichi Osuka, Stability Analysis and Walking Control of Passive-Dynamic-Walking with an approximate analytical Poincare map, Proc. of IROS Workshop on Morphology, Control and Passive Dynamics,, 2005
78. Koichi Osuka, Yasuhiro Sugimoto, A Stability Principle of Passive Dynamic Walk --Feedback Structure Embedded in the Poincare Map--, Proceedings of the 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, Illmenau, Germany (AMAM2005), 2005
79. H. Kimura, Y. Fukuoka and T. Mimura, Dynamics Based Integration of Motion Adaptation for a Quadruped Robot, Adaptive Motion of Animals and Machines, 215-224, 2005
80. Futoshi Mori, Katsumi Nakajima, Shigemi Mori, Control of bipedal walking in the Japanese monkey, *M. fuscata*: Reactive and anticipatory control mechanisms, Adaptive Motion of Animals and Machines , 249-259, 2006
81. Shigemi Mori, Futoshi Mori, Katsumi Nakajima, Higher nervous control of quadrupedal vs bipedal locomotion in non-huma primates; Common and specific properties, Adaptive Motion of Animals and Machines , 53-65, 2006
82. Naomichi Ogihara, Nobutoshi Yamazaki, Computer simulation of bipedal locomotion: Toward elucidating correlations among musculoskeletal morphology, energetics, and the origin of bipedalism, Ishida, H, Tuttle, R, Pickford, M, Ogihara, N, Nakatsukasa, M (eds), Human Origins and Environmental Backgrounds, Springer, New York, 167-174, 2006
83. Masato Nakatsukasa, Eishi Hirasaki, Naomichi Ogihara, Locomotor energetics in nonhuman primates: A review of recent studies on bipedal performing macaques, Ishida, H, Tuttle, R, Pickford, M, Ogihara, N, Nakatsukasa, M (eds), Human Origins and Environmental Backgrounds, Springer, New York, 157-166, 2006
84. Eishi Hirasaki, Naomichi Ogihara, Masato Nakatsukasa, Primates trained for bipedal locomotion as a model for studying the evolution of bipedal locomotion, Ishida, H, Tuttle, R, Pickford, M, Ogihara, N, Nakatsukasa, M (eds), Human Origins and Environmental Backgrounds, Springer, New York, 149-155, 2006
85. 伊藤宏司, 身体知システム論 ヒューマンロボティクスによる運動の学習と制御 , 共立出版, 2005
86. 高草木 薫, 睡眠時における筋緊張制御機構, 睡眠ハンドブック (朝倉書店), 2006
87. Kaoru Takakusaki, Kazuya Saitoh, Makoto Kashiwayanagi, The Pedunculo-pontine Nucleus and the Basal Ganglia in Locomotion, Recent Breakthroughs in Basal Ganglia Research, (ed by E. Bezdard),, 2006
88. 柳原大, 運動の学習・記憶と小脳長期抑圧, 日本運動生理学会・運動生理学シリーズ 7: 運動と高次神経機能 運動の脳内機能を探検する 杏林書院, 180-189, 2005
89. 神崎亮平、安田隆、下山勲, 昆虫の脳からマイクロマシンへ, 「もうひとつの脳~微小脳の研究入門」 山口・富永・桑沢編、培風館, pp.23-54, 2005
90. 安藤規泰、岡田公太郎、神崎亮平, 昆虫の脳による情報処理機能の特性とその利用の展望, 昆虫テクノロジー研究とその産業利用 シーエムシー出版, pp.264-276, 2005
91. 関洋一, 櫻井健志, 神崎亮平, 昆虫の嗅覚, 「匂いと香りの科学」 渋谷・市川編 朝倉書店, 2006
92. 岡田公太郎、神崎亮平, 昆虫, 香りの百科事典 丸善株式会社, pp.477-480, 2005
93. 加沢知毅, 岡田公太郎, 神崎亮平, 昆虫の脳におけるフェロモンと匂いの情報処理と行動発現機構, ブレインテクノニュース, 111., 17-22, 2005
94. 矢野 雅文, 富田 望, 牧野悌也, 実環境における 2 足歩行の創発的リアルタイム制御, 日本ロボット学会誌, 23, 1, 11-16, 2005
95. 矢野 雅文, 富田 望, 随意運動のための「見なし情報」の創発, 計測と制御, 44, 9, 590-595, 2005

96. 杉本靖博, 大須賀公一, 受動的動歩行の安定性に関する一考察 --ポアンカレマップの構造解釈からのアプローチ--, システム制御情報学会論文誌, 18, 7, 255-260, 2005
97. 近藤敏之, 伊藤宏司, 拘束条件の実時間選択による運動生成, 計測と制御, 44, 9, 596-601, 2005
98. 高草木 薫, 浅間 一, 移動知: 行動からの知能理解 - 構成論的観点と生物学的観点から -, 計測と制御, 44, 9, 580-589, 2006
99. 北澤 茂, 和田 真, 時間順序の知覚, 生体の科学, 57, 1, 37-43, 2006
100. 柳原大, Closed loop としての小脳・脳幹・脊髄系と歩行運動の適応制御, 体育の科学, 56, , 28-31, 2006
101. 柳原大, タイミング動作のトレーニング, 体育の科学, 55, , 425-427, 2005
102. 細田耕, 非限定環境に適応する二足歩行ロボット, 計測と制御, 44, 9, 609-614, 2005
103. 細田耕, 動特性を利用した空気圧拮抗駆動二足歩行, システム/制御/情報, 49, 10, 411-416, 2005
104. 木村浩, 張祖光, 脚式移動における CPG(Central Pattern Generator)の役割-適応的な歩行・走行生成の統一的理解に向けて-, 計測と制御, 44, 9, 602-608, 2005
105. 青沼 仁志, 昆虫に見る行動の動的選択機構, 計測と制御, 44, 9, 621-627, 2005
106. 太田 順, 適応的行動と協調の発現原理, 計測と制御, 44, 9, 628-633, 2005
107. 神崎亮平, 昆虫の環境適応行動の発現機構, 計測と制御, 44, 9, 615-620, 2005
108. 池野英利, 西岡拓人, 関洋一, 神崎亮平, コンテンツマネージメントシステムを用いた神経細胞データベースの開発, 日本神経回路学会誌, 13, , 1-8, 2006
109. 櫻井健志, 関洋一, 西岡孝明, 神崎亮平, 昆虫のフェロモン受容と匂い識別の分子・神経基盤, 比較生理生化学, 2006
110. 高草木 薫, 子どもの脳に睡眠, 運動はどの様に影響するのか- 脳のネットワークが発達する仕組み-, 毎日ライフ (毎日新聞社), , 1, 45-47, 2005
111. 矢野雅文, 環境に適応する 2 足歩行のモデル化, 計測自動制御学会第 18 回自律分散システムシンポジウム資料, 211-216, 2006
112. Kazuhiro Sakamoto, Hajime Mushiake, Naohiro Saito, Jun Tanji, Neuronal Synchrony and Representation of Behavioral Goals in the Prefrontal Cortex of the Monkey during a Path-Planning Task, Neuroscience Research(第 28 回日本神経科学大会), 52, suppl. , s148, 2005
113. 坂本一寛, 千葉直輝, 矢野雅文, 視覚野のボトムアップ型物体中心座標系表現の生理モデル, 2005 年日本神経回路学会予稿集, 95-96, 2005
114. 松尾行雄, 矢野雅文, エコー定位に基づいた物体の音響イメージ復元の計算論, 日本音響学会聴覚研究会資料 H-2005-52, 305-310, 2005
115. Yoshinari Makino, Masafumi Yano, ダ・ヴィンチ・ステレオプシスにおける両眼奥行き絵画の手がかりによる拘束, Pictorial Depth Cues Constrain Stereoscopic Depth in da Vinci Stereopsis, Neuroscience Research (第 28 回日本神経科学大会), 52, suppl. , s104, 2005
116. 吉原佑器, 富田望, 浅野智孝, 牧野悌也, 矢野雅文, 拘束条件生成充足による実環境下の随意運動制御 ~ 制御パラメータのリアルタイム調節 ~, Control of Voluntary Movement in Indefinite Environment based on Constraints Self-Emergence/Self-Satisfaction - Real-time Coordination of Control Parameters-, 計測自動制御学会第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, 157-162, 2006
117. 伊藤仁, 矢野雅文, 局所変化率に基づく有声音の分析と合成, 2005 年日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 2-6-3, 2005
118. 安池誠, 牧野悌也, 矢野雅文, 時空間ダイナミクスによる匂い情報コーディング, 信学技報 IEICE Technical Report (NC 研究会), NC, 2005-5, 23-26, 2005
119. 富田 望, 矢野 雅文, 筋緊張調節系による身体力学特性のリアルタイム制御, 計測自動制御学会第 6 回システムインテグレーション部門学術講演会 SI2005, 613-614, 2005
120. 富田 望, 矢野 雅文, 実時間筋緊張制御によるヒト歩行特性の創発的獲得, Emergence of Walking Properties from Real-time Control of Muscle Tone 計測自動制御学会第 18 回自

- 律分散システム・シンポジウム資料, 175-178, 2006
121. 飯田俊介, 近藤敏之, 伊藤宏司, 位相振動子と軌道生成モデルによる二足歩行制御系の環境適応機構の提案, 第5回計測自動制御学会システム・インテグレーション部門講演会 CD-ROM, 2F1-3, 2005
 122. 千葉惇, 生塩研一, 稲瀬正彦, 時間弁別課題中のサル線条体の応答様式, Phasic Neuronal Activity in the Monkey Striatum during Duration Discrimination Task., 第82回日本生理学会大会 (Proceedings of the 82nd Annual Meeting), 55, Suppl, S181, 2005
 123. 村田哲, 中隋克己, 稲瀬正彦, 頭頂葉ミラーニューロンによる自己動作の視覚フィードバック制御, Visual Feedback Control during Self Generated Action by Parietal Mirror Neurons., 第82回日本生理学会大会 (Proceedings of the 82nd Annual Meeting), 55, Suppl, S180, 2005
 124. 中隋克己, 稲瀬正彦, 森大志, 村田哲, 森茂美, 無拘束サルにおける四足歩行に関連した一次運動野の神経活動, Neuronal Activity in Primary Motor Cortex Related to Quadrupedal Locomotion in a Freely-Moving Monkey., 第82回日本生理学会大会 (Proceedings of the 82nd Annual Meeting), 55, Suppl, S175, 2005
 125. 千葉惇, 梶本禮義, 生塩研一, 稲瀬正彦, 磁気刺激によるラット脊髄損傷部位の検出, 第20回日本生体磁気学会大会論文集 (日本生体磁気学会誌特別号), 18, 1, 174-175, 2005
 126. 千葉惇, 生塩研一, 稲瀬正彦, 時間弁別課題中のサル線条体の神経細胞活動, Neuronal Modulation in the Monkey Striatum Related to Duration Discrimination Task., 第28回日本神経科学大会 (Abstracts of the 28th Annual Meeting of the Japanese Neuroscience Society, Neuroscience Research), 52, Suppl, S220, 2005
 127. 中隋克己, 稲瀬正彦, 森大志, 村田哲, 森茂美, 四足歩行遂行中におけるサル一次運動野の神経活動, Discharge Activity of Neurons in Primary Motor Cortex during Quadrupedal Locomotion in a Freely Moving Monkey., 第28回日本神経科学大会 (Abstracts of the 28th Annual Meeting of the Japanese Neuroscience Society, Neuroscience Research), 52, Suppl, S149, 2005
 128. Kaoru Takakusaki, Spinal Snterurons Mediating Muscular Atonia in Cats, 第82回日本生理学会大会 (Proceedings of the 82nd Annual Meeting), 55, Suppl, S182, 2005
 129. 高草木 薫, 運動系から観た睡眠制御の神経生物学的基盤 (Neurobiological Basis of Sleep Regulation with reference to the Motor Control), 第30回日本睡眠学会学術集会 (シンポジウム),
 130. Kaoru Takakusai, Basal Ganglia Control Brain Function, 第28回日本神経科学大会 (Abstracts of the 28th Annual Meeting of the Japanese Neuroscience Society, Neuroscience Research), 52, Suppl, S32, 2005
 131. Yoshio Bando, Kaoru Takakusaki K, Ryuuji Terayama, Shigetaka Yoshida, Conduction Properties of Corpus Callosum in Mice in Vivo, 第28回日本神経科学大会 (Abstracts of the 28th Annual Meeting of the Japanese Neuroscience Society, Neuroscience Research), 52, Suppl, S67, 2005
 132. 高草木 薫, Locomotion, Postural Muscle Tone And the Basal Ganglia, 第20回日本大脳基底核研究会 (The 20th Annual Meeting of the Japanese Basal Ganglia Society),
 133. 高草木 薫, 行動発現の神経基盤, 第18回自律分散システムシンポジウム,
 134. 籠橋麻紀, 中里 泰三, 北澤 茂, 水野美邦, 線条体ドパミン放出とレバー押し課題行動に与えるセロトニンの影響, 日本神経学会抄録集, 不明, 2005
 135. Maki Kagohashi, Taizo Nakazato, Shigeru Kitazawq, Yoshikuni Mizuno, Development of Wireless Voltammetry for Measuring Dopamine and Serotonin. , Neuroscience Research, S221, 2005
 136. 籠橋麻紀, 中里 泰三, 北澤 茂, 水野美邦, 無線ポルタメトリー装置によるドーパミン、セロトニンの同時測定, Measurement of Dopamine and Serotonin Using Wireless Voltammetry, 日本神経精神薬理学会講演抄録, 53, 2005
 137. 中里 泰三, In Vivo Voltammetry とその応用, 神経科学領域における分子モニタリン

- グシンポジウム・演題要旨集, 12-13, 2005
138. 村田哲, 中隋克己, 稲瀬正彦, 頭頂葉ミラーニューロンによる自己動作の視覚フィードバック制御, Visual Feedback Control during Self Generated Action by Parietal Mirror Neurons., 第 82 回日本生理学会大会(Proceedings of the 82nd Annual Meeting), 55, Suppl, S180, 2005
 139. 中隋克己, 稲瀬正彦, 森大志, 村田哲, 森茂美, 無拘束サルにおける四足歩行に関連した一次運動野の神経活動, Neuronal Activity in Primary Motor Cortex Related to Quadrupedal Locomotion in a Freely-Moving Monkey., 第 82 回日本生理学会大会 (Proceedings of the 82nd Annual Meeting), 55, Suppl, S175, 2005
 140. 中隋克己, 稲瀬正彦, 森大志, 村田哲, 森茂美, 四足歩行遂行中におけるサル一次運動野の神経活動, Discharge Activity of Neurons in Primary Motor Cortex during Quadrupedal Locomotion in a Freely Moving Monkey., 第 28 回日本神経科学大会(Abstracts of the 28th Annual Meeting of the Japanese Neuroscience Society, Neuroscience Research), 52, Suppl, S149, 2005
 141. 石川政行, 田熊隆史, 細田耕, 浅田稔, 拮抗型空気圧人工筋を持つ 3 次元 2 足ロボットの試作と歩行の実現., ロボティクス・メカトロニクス '05 予稿集, 2005
 142. 細田耕, 田熊隆史, 拮抗型空気圧二足歩行における床面の動特性の影響, SICE システム・情報部門講演会予稿集, 2005
 143. 田熊隆史, 細田耕, 空気圧拮抗駆動型歩行ロボットにおける受動性, 第 6 回 計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会, 2005
 144. 張祖光, 木村浩, 福岡泰宏, 遅延フィードバックを用いた四脚走行制御, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム予稿集, 2006
 145. 藤木智久, 川端邦明, 浅間 一, 環境の複雑さを考慮した移動ロボット間通信を含んだ行動獲得, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 627-628, 2005
 146. 藤井 紀輔, 太田 順, Trevai Chomchana, マルチロボットシステムによる複数可動物体搬送作業, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 623-624, 2005
 147. 足利 昌俊, 平口 鉄太郎, 佐倉 緑, 青沼 仁志, 太田 順, コオロギ集団における多様の振るまいのモデル化, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, 189-194, 2006
 148. 田村 雄介, 杉 正夫, 太田 順, 新井 民夫, 人間の手先運動に基づくリーチング検出と把持対象物体の予測, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, 149-152, 2006
 149. 船戸徹郎, 倉林大輔, 奈良維仁, 振動子網制御のための構造的性質の解析, 計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム, 195-200, 2006
 150. 船戸徹郎, 倉林大輔, 栄松良太, 下根孝章, 非線形振動子の構造的性質に基づく挙動の考察, 計測自動制御学会創発システム・シンポジウム予稿集, 10, 2005
 151. 松場弘明, 前川知毅, 清水正宏, 石黒章夫, 制御系と機構系間の相互作用を活用した自己組み立て, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2005 (SSI2005) 講演論文集, 101-106, 2005
 152. 杉本靖博, 大須賀公一, 解析的なポアンカレマップを用いた受動的歩行における分岐現象の解析, 第 11 回 ロボティクスシンポジウム, 2005
 153. 荻原直道, 杉本靖博, 青井伸也, 土屋和雄, 身体筋骨格構造に内在する移動知, 第 18 回自律分散システムシンポジウム, 2006
 154. 長野智晃, 近藤敏之, 伊藤宏司, 情報伝達に時間遅れを伴う分散制御系による多リンク系の運動生成, 第 18 回 自律分散システム・シンポジウム講演論文集, 123-128, 2006
 155. 飯田俊介, 近藤敏之, 伊藤宏司, 位相振動子と軌道生成モデルによる環境適応機構の提案, 第 18 回 自律分散システム・シンポジウム講演論文集, 271-275, 2006
 156. 土井 真, 近藤 敏之, 伊藤 宏司, 上肢到達運動における動的環境に対する筋・関節の協調適応機構, 第 18 回 自律分散システム・シンポジウム講演論文集, 129-134, 2006
 157. 今井 努, 近藤 敏之, 伊藤 宏司, 複数の動的環境に対する人間の運動学習, 第 18 回 自律分散システム・シンポジウム講演論文集, 169-174, 2006

158. 塚本昌克, 近藤敏之, 伊藤宏司, 動作の立ち上がり時に着目した非正常 EMG による筋電義手制御, 電子情報通信学会技術報告, 105, 577, 41-44, 2006
159. 大脇大, 石黒章夫, 非線形バネを活用した安定な二脚受動走行の実現, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2005 (SSI2005) 講演論文集, 95-100, 2005
160. 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, 力学系の時空間構造に基づく移動知理解に向けての一考察 ?モジュラーロボットを用いた事例研究?, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, 217-222, 2006
161. 松場弘明, 前川知毅, 清水正宏, 石黒章夫, 制御系 - 機構系間の有機的連関を通じた自己組み立て・自己修復, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, 61-66, 2006
162. 大脇大, 石黒章夫, 非線形弾性要素を有する二脚受動走行機械の安定性解析, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, 111-116, 2006
163. 山田康武, 渡邊航, 石黒章夫, 可変弾性要素を活用した制御系と機構系の有機的連関に関する一考察 ?ヘビ型ロボットを用いた事例研究?, 第 18 回自律分散システム・シンポジウム資料, 135-138, 2006
164. 大須賀公一, 受動的動歩行のどこがおもしろいの?, 第 6 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2005), 2005
165. 佐藤智紀, 馬書根, 井上康介, 蛇型ロボットの自律分散制御システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, 2005
166. 井上 康介, 馬 書根, 住 孝明, 佐藤 記一, ヘビ型ロボットの自律分散制御 接地面摩擦係数の変動に対する運動の適応 , 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 (SSI2005), 2005
167. 坂本一寛, 虫明元, 斉藤尚宏, 丹治順, 前頭前野神経細胞の同期発火と発火頻度の機能的意義, 電子情報通信学会信学技報 (信学技報), NC2005-4, 105, 82, 4,
168. 伊藤仁, 矢野雅文, 局所変化率に基づく有声音の符号化, 電子情報通信学会信学技報 (信学技報), EA, 2005-2, 7-12, 2005
169. 伊藤仁, 矢野雅文, 同時音声知覚におけるスペクトル遷移の役割, 電子情報通信学会信学技報 (信学技報), EA, 2005-36, 13-18, 2005
170. 山崎貴之, 磯川悌次郎, 松井伸之, 池野英利, 神崎亮平, 共焦点レーザ顕微鏡画像に基づく昆虫神経細胞モデルの再構築, 信学技報 Technical Report of IEICE, NC2004-196, 2005-03, 19-24, 2006

受賞

1. 井澤淳, 近藤敏之, 伊藤宏司: 2005 年度計測自動制御学会賞・論文賞, 2004 年 8 月, 「状態予測機構を用いた強化学習による運動学習モデル」, 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.7, pp.679-687
2. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Best Paper Award: “Don't Try to Control Everything!: An Emergent Morphology Control of a Modular Robot”, Akio Ishiguro, Masahiro Shimizu, and Toshihiro Kawakatsu
3. 杉本靖博, 大須賀公一: 第 11 回ロボティクスシンポジウム, 特別奨励賞, 「解析的なポアンカレマップを用いた受動的歩行における分岐現象の解析」, 2006 年 3 月 16 日, 第 11 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.92-97, 2006
4. Best Paper Award to the IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication 2004 (RO-MAN 2004) in Kurashiki, Japan (2005 年 8 月 14 日受賞): “Deskwork Support System Based on the Estimation of Human Intentions,” Yusuke Tamura, Masao Sugi, Jun Ota and Tamio Arai

特許

1. フレキシブルセンサチューブ, 大須賀公一, 和田貴志, 特願 2005-166558

活動記録

詳細はホームページ (<http://www.arai.pe.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/act/index.html>) 参照のこと。

1 .

[日時] : 2006/3/29 9:30-18:00
[場所] : 金沢工業大学人間情報システム研究所
[名称] : コオロギの振る舞いに関するミーティング

2 .

[日時] : 2006/3/14-17
[場所] : 北海道大学電子科学研究所/旭川医科大学
[名称] : 工学系研究者のための生物学チュートリアル

3 .

[日時] : 2006/3/13 18:00-22:00
[場所] : 北海道大学青沼研究室
[名称] : コオロギの群行動の共同研究に関する打ち合わせ

4 .

[日時] : 2006/3/10-23
[場所] : 北海道大学青沼研究室
[名称] : コオロギの群行動解析に関する共同研究

5 .

[日時] : 2006/3/8
[場所] : 東京大学柏キャンパス総合研究棟
[名称] : IAS-9 オーガナイズドセッション

6 .

[日時] : 2006/2/23 9:30-17:00
[場所] : 北海道大学電子科学研究所 5 階セミナー室
[名称] : C 班企画セミナー「ネットワーク構造と社会性」

7 .

[日時] : 2006/2/11 10:00-16:30
[場所] : 京都大学 理学部 2 号館 3 階 315 セミナー室
[名称] : AB 班 合同班会議

8 .

[日時] : 2006/1/31 9:30-18:00
[場所] : ぎのわんセミナーハウス 中会議室
[名称] : C 班・総括班企画「社会性昆虫セミナー」

9 .

[日時] : 2006/1/28 10:00-17:00
[場所] : 京都大学 理学部 2 号館 3 階 315 セミナー室
[名称] : B 班 班会議

10 .

[日時] : 2006/1/27
[場所] : 福井県国際交流会館

- [名称] : 自律分散システムシンポ移動知オーガナイズドセッション
11 .
- [日時] : 2006/1/13 13:30-17:30
[場所] : 東京工業大学 80周年記念館 2階会議室
[名称] : 第29回 マイクロ/ナノシステム研究専門委員会における講演
12 .
- [日時] : 2006/1/6 10:30-13:00
[場所] : 京都大学大学院工学研究科 11号館土屋研究室
[名称] : B02 班会議
13 .
- [日時] : 2006/1/6 13:00-16:30
[場所] : 名古屋大学 工学部 5号館 5階 508室
[名称] : D班・班会議
14 .
- [日時] : 2005/12/22
[場所] : 旭川医科大学
[名称] : 研究室見学とディスカッション
15 .
- [日時] : 2005/12/20
[場所] : 洞爺サンパレス (北海道)
[名称] : 研究ミーティング
16 .
- [日時] : 2005/12/17
[場所] : 熊本電波高等専門学校
[名称] : システムインテグレーション部門学術講演会移動知オーガナイズドセッション
17 .
- [日時] : 2005/12/9 13:00~17:00
[場所] : 京都大学大学院理学研究科 2号館 315 セミナー室
[名称] : B02 班勉強会
18 .
- [日時] : 2005/12/5
[場所] : 北海道大学学術交流会館第3会議室
[名称] : 総括班会議
19 .
- [日時] : 2005/12/4
[場所] : 北海道大学学術交流会館第1会議室
[名称] : Mobiligence'05 (国際シンポジウム)
20 .
- [日時] : 2005/12/2 9:30-11:30
[場所] : 東京大学工学部 14号館 825号室
[名称] : 日本とイタリアの移動知研究に関するディスカッション
21 .
- [日時] : 2005/12/1 13:30~17:00
[場所] : 京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻土屋研究室
[名称] : B02 班勉強会

22 .

[日時] : 2005/12/1 17:00 ~ 19:30

[場所] : 東京医科歯科大学 D-569

[名称] : 移動知関連広報

23 .

[日時] : 2005/11/28 ~ 12/7

[場所] : 北海道大学青沼研究室

[名称] : コオロギの群行動解析に関する共同研究

24 .

[日時] : 2005/11/28 10:20-12:00

[場所] : 九州大学医学部百年講堂

[名称] : SSI 移動知オーガナイズドセッション

25 .

[日時] : 2005/11/22 13:00 ~ 16:00

[場所] : 東京大学神崎・高橋研究室

[名称] : 神経行動学研究法の紹介とデモ

26 .

[日時] : 2005/11/22 9:00-12:00

[場所] : 東大工 14 号館 7 階会議室

[名称] : C01 班 02 班ミーティング

27 .

[日時] : 2005/11/21

[場所] : 東大工 14 号館 7 階会議室

[名称] : 移動知：研究教育拠点形成 WG

28 .

[日時] : 2005/11/18 14:00 ~ 17:00

[場所] : 神戸大学工学部 4 階多目的会議室

[名称] : D 班班会議

29 .

[日時] : 2005/11/15 13:00-17:00

[場所] : 北海道大学青沼研究室

[名称] : コオロギの群行動の共同研究に関する打ち合わせ

30 .

[日時] : 2005/11/14

[場所] : 京都大学大学院工学研究科 11 号館 2F 会議室

[名称] : H. Geyer, A. Seyfarth 博士講演会と議論

31 .

[日時] : 2005/11/10

[場所] : 大阪大学大学院工学研究科

[名称] : Hartmut Geyer (University of Jena) による歩行・走行モデルに関する講演と議論

32 .

[日時] : 2005/11/7

[場所] : 大阪大学吹田キャンパス 創発ロボティクスグループ

[名称] : 研究打ち合わせ・見学

33 .

[日時] : 2005/11/06 ~ 18
[場所] : 北海道大学青沼研究室
[名称] : コオロギの群行動解析に関する共同研究

34 .

[日時] : 2005/10/24
[場所] : 山口大学 農学部 獣医生理学教室
[名称] : B班 個別班会議

35 .

[日時] : 2005/10/14
[場所] : 東京大学本郷キャンパス工学部 14号館 713号室
[名称] : 総括班会議

36 .

[日時] : 2005/10/3
[場所] : 東京大学本郷キャンパス工学部 14号館 713会議室
[名称] : 運営方針に関する会議

37 .

[日時] : 2005/9/29
[場所] : 旭川医科大学 機器センター会議室
[名称] : B班 班会議

38 .

[日時] : 2005/9/22 10:00 ~ 17:30
[場所] : 北海道大学電子科学研究所N509号会議室
[名称] : C班班会議

39 .

[日時] : 2005/9/15 13:00-17:00
[場所] : 近畿大学 医学部 生理学第一講座
[名称] : B班個別研究検討会

40 .

[日時] : 2005/9/7 14:00-17:00
[場所] : 京都高度技術研究所 9F 会議室
[名称] : D班班会議

41 .

[日時] : 2005/9/5 10:00-12:00
[場所] : 順天堂大学 医学部 生理学第一講座
[名称] : B班個別研究検討会

42 .

[日時] : 2005/8/18-19
[場所] : 富山県大山研修センター
[名称] : 会議 + 講演会

43 .

[日時] : 2005/7/28-29
[場所] : 仙台市岩松旅館
[名称] : 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究とジョイントの講演会

評価班メンバーによる内部評価

Prof. Avis H. Cohen

Prof. Rolf Pfeifer

Prof. Sten Grillner

Prof. Shinzo Kitamura

Prof. Ryoji Suzuki

Prof. Shigemi Mori

Review Comments of
Prof. Avis H. Cohen
(University of Maryland, USA)

Report by Avis H. Cohen:

The ideas of the group are very ambitious and look toward enormous gains by the community over the 5 years. The groups are well conceived, and full of creative individuals who have already proven themselves. In summary, this is an incredibly exciting group, with wonderful ideas, and goals, with a good chance of success.

The group will generate AND will require, as emphasized by Prof. Shimozawa: non-linearity of interaction – they will gain more than the sum of their parts: IF they do what they/he said – have strong collaborations, regular meetings, good educational programs to give everyone the necessary background (don't need to all have the same depth, but should at least know each other's words and meanings and constraints). Need at least one biologist in each group to keep the group "honest" and pointing to problems and bringing up new ideas from the biology. (I recommend he be kept as part of the group, if willing!).

Currently, the group consists of many wonderful ideas, good organization, and already has made substantial progress in many directions. This was clearly exemplified in the presentations. No need to itemize, as all were up to very high standard. All are currently interacting well, apparently, and have clear goals and directions.

One challenge is in the physical distances among the groups. It is necessary to bring a sense of cohesiveness to the whole, and allow all the members to gain from discussing with the others.

Another challenge is in the intellectual development of the individuals, to guarantee that the different disciplines do, in fact, bring the power to each other that is required to achieve what they have set out to accomplish. This will be especially important as the group gets larger.

Recommendation:

1. Set up a regular educational program for their students, so all have common background. Have biology at core, as recommended by Shimozawa, perhaps at some central place, but not necessarily.
 - a. But this must be taken seriously. The students must be aware that this is not fluff, but important component.
 - b. The courses should be taught by individuals who are either part of the program or who share the goals of the project, to guarantee that the spirit of the courses carries the message of Mobiligence.
 - c. Should include in this, seminars with speakers from their campuses, but also outsiders. Students should be required to hear the lectures by everyone, especially those outside their particular fields.
 - d. Students should be encouraged to have a common meeting program to build a sense of comraderie among them. This will give the next generation easy collaborations, and will help them learn a common language. It will also be a source of new ideas, and new collaborations.

2. Have regular meetings of the parts and the whole. Have, perhaps, a regular “retreat” or nice meeting where they report progress and discuss new directions, but also can get help and ideas for their projects, and can share ideas.
3. A challenge will be for all to ask “dumb questions” to learn from each other. This will require the older, more secure members to ask the questions first. They must set the tone. It **MUST** be permissible, indeed, advisable for the group members to be able to show they don’t understand. The ideas **MUST** be understood by the researchers across the disciplines. **THIS IS THE CHALLENGE**, and this is the only way to accomplish this very difficult task.
4. There is clearly the intention of including a social benefit, but there was little in the presentations that emphasized it. I believe this should be enlarged and made more explicit.

Review Comments of
Prof. Rolf Pfeifer
(University of Zurich, Switzerland)

Mobiligence, Sapporo, 5 December 2005

Comments by Rolf Pfeifer

1, Overall project and strategic goals

The project is right on target, both in terms of basic research and potential applications. Targeting medical applications is useful and strategically important to get the support of the funding agencies and the population at large.

The way the program is set up it bears the potential for breakthroughs in two ways: First for understanding the principles underlying motion/locomotion and engineering respective systems. Second, it also represents a first step in a long-term quest for high-level cognition, where cognition is fully grounded in sensory-motor interactions. At this point, this may not be so important, but it shows the long-term strategic potential of the project.

2. A note on the cooperation between biology and engineering

The question is always: “What can you learn?” (e.g. by building a robot)

The transfer should not only be from biology to engineering, but both ways, which can best be achieved in everyday close collaboration. There should not be a “naïve” transfer from biology to engineering. It is important to note that biological systems have their own intrinsic dynamics of the joint neural/body system. That is, the neural systems are matched to their specific body dynamics. Transfer to an engineering system only makes sense at the level of principles since the artificial system, because of its completely different morphology and material properties, will have a very different intrinsic dynamics.

Close cooperation will be beneficial even if it is hard to quantify exactly what is gained. Often it is hard to pin down precisely what the transfer precisely comprises.

3. Materials

One might want to put materials more explicitly onto the research agenda. Recent work in the physiology and biomechanics of locomotion has demonstrated the importance of materials for movement/locomotion. Of particular interest are muscle-tendon systems and artificial skin with haptic sensors.

4. Group C: Social adaptation

Currently, the project is focused on elucidating the brain mechanisms underlying certain types of social interaction. It might be of interest to also look at embodiment, e.g. to experiment with different types of morphologies for the pheromone receptors.

Morphology is an enabler of social interaction and interesting results might be achieved because various morphologies can be studied with robots.

5. International visibility

Achieving visibility not only at the national but at the international level will be very important for the success and the acceptance of the project. If international recognition is given, it will be easy to defend the project and the apply for additional funding.

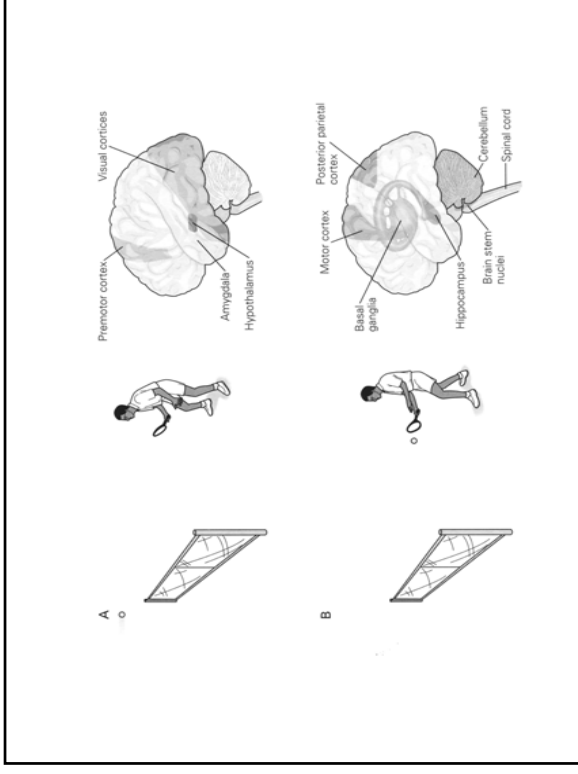
Sapporo, 5 December 2005

Rolf Pfeifer

Review Comments of
Prof. Sten Grillner
(Karolinska Institute, Sweden)

Mobiligence

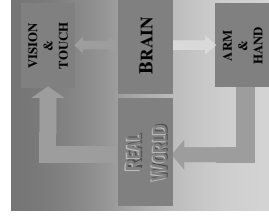
- *adapt to the surrounding world*
- *interpret percepts – match against information stored in memory*
- *priorities - selection of behaviour*
- *motor infrastructure*
 - reaching, grasping, posture, locomotion*
- *motor learning*



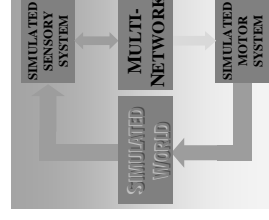
Similar conceptual problems for action in

animals, man and advanced robots

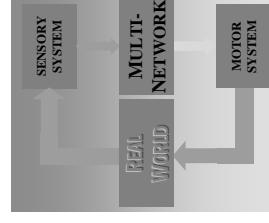
HUMAN



SIMULERING



ROBOT



Courtesy of Roland Johanson

Multidisciplinary expertise required

- *From applied mathematics to cognitive neuroscience*
- *From neurobiology to robotics and brain-like computing*

- need for *close interaction* between researchers with different training, but with a *focus* on the same scientific problem
- need to *bridge the gap* between mathematics – physics and biology

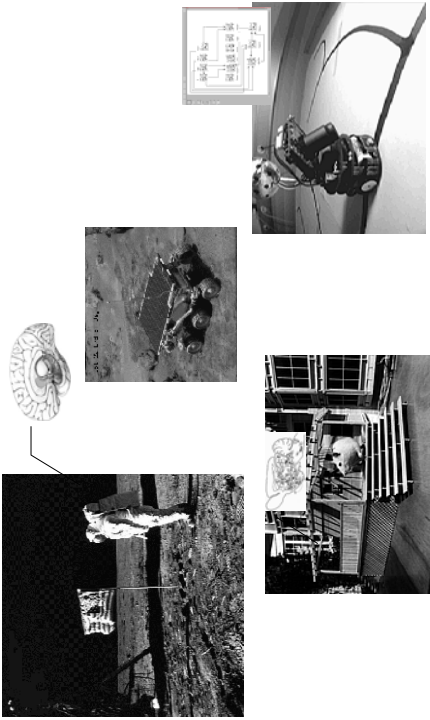
Difficulties?

- *career difficulties* at the border between parent disciplines/faculties
- *lack of understanding* between researchers with different basic training (eg physics/engineering versus neurobiology)

Programs

- *A. Adaptation to environment*
 - *Koji Ito and Masafumi Yano*
- *B. Control Mechanisms of adaptive locomotion*
 - *Kazuo Tsuchiya, Kaoru Takakusaki, Naomich Okihara, Koh Hosoda*
- *C. Mechanisms by which animals adapt to society*
 - *Hifoshi Aonuma, Jun Ota and Daisuke Kurabayashi*
- *D. Common principles of Mobiligence*
 - *Koichi Osuka, Akio Ishiguro*

Conceptual problem: The living
brain in the world



Courtesy of Paul Verschure

Control of Action

*the only thing mankind can do is to move things
..... whether whispering or felling a forest*
(Sherrington)

Review Comments of
Prof. Shinzo Kitamura
(Kobe University, Japan)

December 5, 2005

Comment by S. Kitamura (Kobe University)

The plan of the research initiative of “Mobiligence” is well organized. Herewith I appreciate the efforts done by Professor H. Asama and his colleagues for starting this initiative and also for realizing the meeting in Sapporo.

Although I have scarcely anything to say at this moment, I wish to add a comment:

Attending this meeting, I have reconfirmed the importance of interdisciplinary studies such as the topics here. However, to promote this research initiative actively for next four years, it will be very important to have substantial discussions between young researchers from different fields; in our case, engineering, biology and medicine.

I would like to ask the Steering Committee to prepare such opportunities, especially at the starting stage of the initiative.

Review Comments of
Prof. Ryoji Suzuki
(Kanazawa Institute of Technology, Japan)

Comments on Mobiligence '05 at Sapporo
by Ryoji Suzuki (Kanazawa Institute of Technology)

*Can the brain work without the body,
If it can receive all of information from
Environment ?*

Brain (Mind) and Body Issue has been discussed from the view
point of Philosophy and Religion, but not enough from Science
and Engineering

Isolated brain complex is expected as a final result of the evolution
of human being (by J.D.Banard, History of Science)

Criticism to the idea of isolated brain

M.Miura (philosophy) in his book "Thinking Body" (1999)
Not only behaviors, but language and mind activities
are also supported by body.

Body (Physicality), Sociality and Ecological viewpoint
must be taken in designing artificial environments
such as man-machine Interface, virtual reality system
and robots.

**Transdisciplinary Approach by Brain Science, Biology,
Psychology, Social Science, Physics and Engineering**
is important.

I am expecting for this Mobiligence Project to get a
productive answer to the above mentioned problem.

**Tight collaboration of biological researches and
engineering researches is very important, but is
not so easily realized.**

**The proposed process seems promising, if all of
the member keep the significance of this process
in his mind.**

At stage 3, simulation study may be also utilized.

**At present, this project is focusing to the emergence of
adaptive behavior, but I am expecting to get some breakthrough
to Intelligence as suggested by Prof.Pfeifer.**

**Research on Adaptation Process to Environment is important
for behavior control and the approach by Group A seems
promising, that is to find the constraints adaptively in real
time.**

**My question is what is the essential difference between A01
and A02, if any. Is A01 focused on discrete movement such
as reaching and is A02 on rhythmical movement such as
locomotion? If so, I am expecting for this group to find a way
to connect each other, because the transit process from
rhythmic to discrete movement is very important issue to
understand the mechanisms of voluntary movements.**

**How about the tight cooperation between biology and engineering ?
And how do you cooperate with Group B ?**

Group B
What is differ from Group A?
How to cooperate with Group A?

Group C
Insects show typical example of animal adaptation to society and today talk by Dr.Aonuma was very beautiful. I would like to know how to generalize these results on insect to other animals.
Also, topics C03 and "Adaptive function for organizing society" are very interesting and I would like to know in detail. Especially, the process where the hierarchy of society emerges is very important and interesting from the view point of social science. Results from this study may be a good present to our tax payer.

Group D
Well-Balanced Concept is interesting as a candidate of common principle of mobilgence.
Is this concept acceptable by other groups?
Or not, how do you cooperate with them to find the final answer.

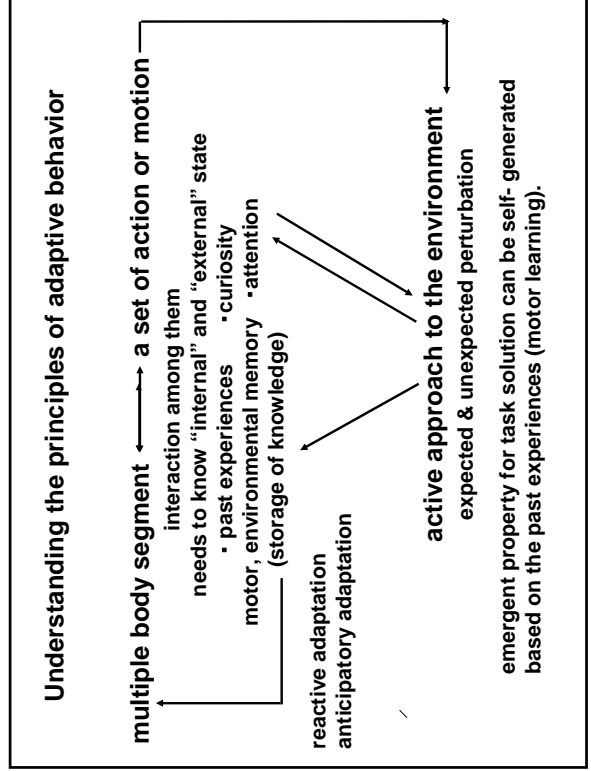
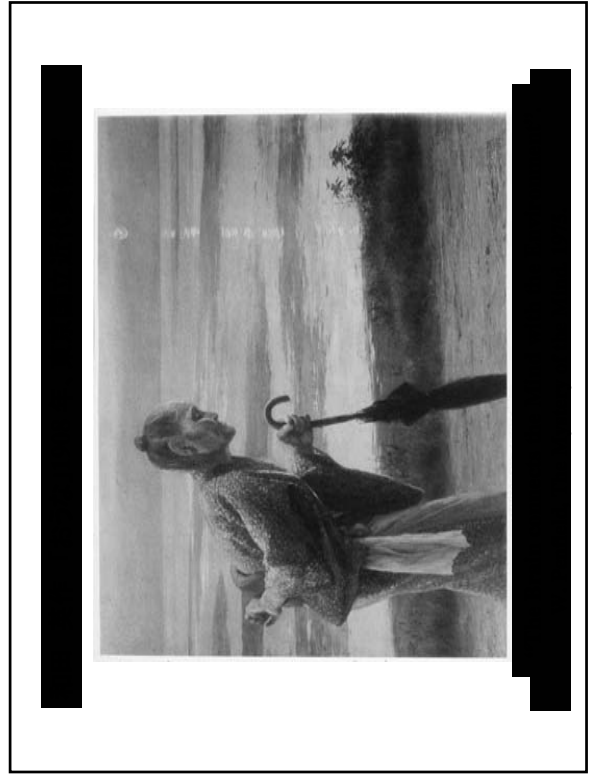
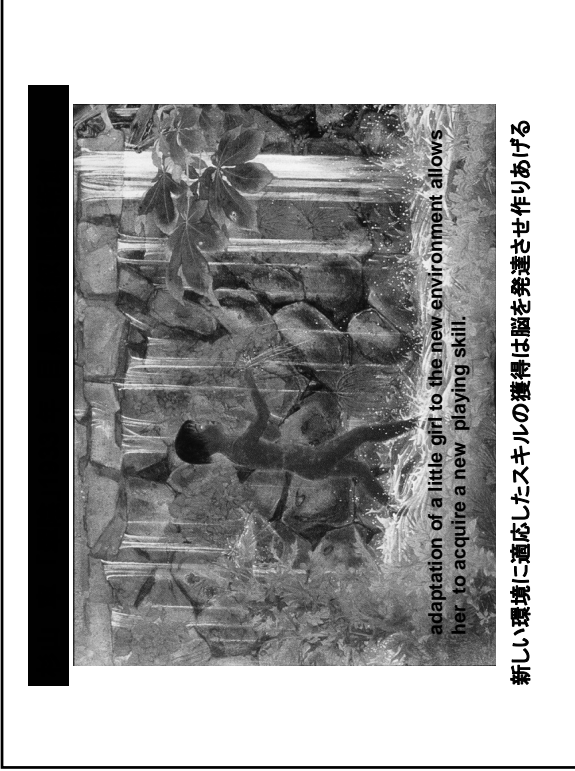
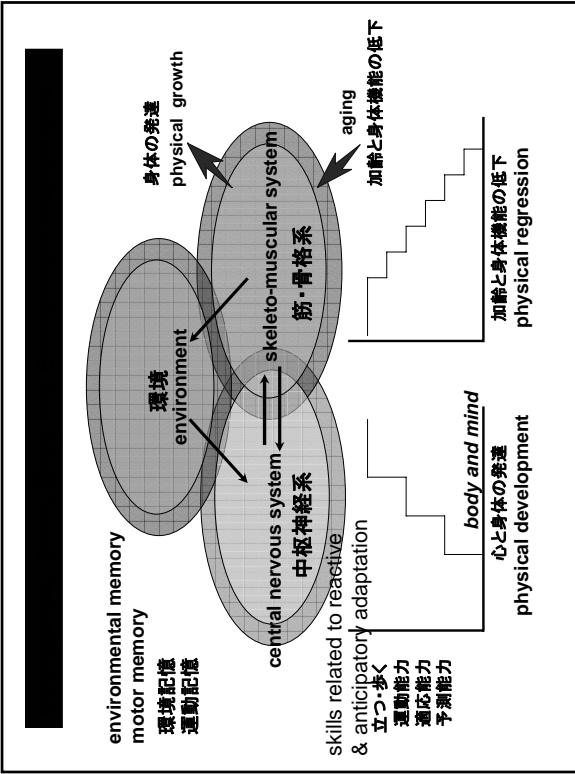
Each group itself is organized very well and is being expected to achieve remarkable results.
However the total strategy of cooperating each other is not so clear.
I found some overlapping on the targets. Making different approach to the same target may be a good strategy. Have you talked each other?

This project is on priority area and has the mission. So, how to invite proposed topics is also important. However, the spirit of "Kakenhi" (curiosity-driven research) should be preserved.

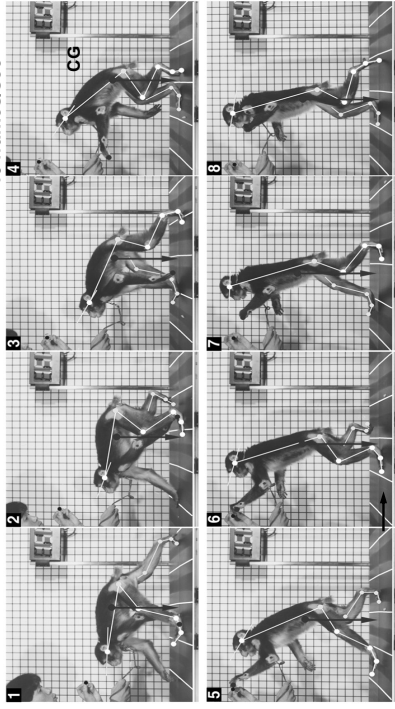
Review Comments of

Prof. Shigemi Mori

(National Institute for Physiological Sciences, Japan)



Once freed from weight bearing constraints, the monkey is able to use the freed forelimb for a skilled hand-finger motion (acquisition of a new motor skill)-10 frames/sec



Treadmill belt speed: 1.5 m/s