

## 平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな（ローマ字）		NAKAMURA YOSHIHIKO					
①研究代表者氏名		中村 仁彦		②所属研究機関・部局・職		東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授	
③研究課題名	和文	知能の力学的情報処理モデルの展開					
	英文	Deployment of Dynamics-Based Information Processing Model of Intelligence					
④研究経費		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
17年度以降は内約額 金額単位：千円		14,700	27,900	23,300	14,000	14,000	93,900
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名		所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担（研究実施計画に対する分担事項）	
中村 仁彦		東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授		ロボティクス・筋骨格情報論		人間の行動情報の計算理論、ミラーニューロンの数学モデル、研究の統括	
山根 克		東京大学・大学院情報理工学系研究科・助手		力学計算・CGアニメーション		モーションキャプチャデータに基づく筋骨格系力学計算	
大武 美保子		東京大学・大学院情報理工学系研究科・COE 特任教員（助手）		筋骨格情報論		ビヘイビアキャプチャのよる人間の体性感覚情報の計算	
岡田 昌史		東京工業大学・大学院理工学系研究科・助教授		ロボティクス・非線形制御		力学的情報処理、ヒューマノイドロボットによる行為の受容と生成	
関口 暁宣		弘前大学・理工学部・助手		ロボティクス・非線形力学		物理力学系を基礎力学系とする力学的情報処理	
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>身体の力学系と脳神経系が多重階層的、連続的に構造化された複雑系が示す非線形力学系の挙動の中に、人の知能や心の情報処理の本質があると考えられている。このような視点は脳科学、生理学、物理学、哲学、認知心理学、発達心理学などの広い分野において、多くの研究者たちに共有されている世界観である。本研究では、機械知能を力学的情報処理によって実現するためのモデル仮説を構築することを目的とする。機械知能とはシンボルの操作、及びそこから発展する言語的な世界理解や自己内省、それらを用いた他者とのコミュニケーションなどの特徴をもつ認知機能を、機械が自分の体のセンサリ・モータ・マップを多重階層的に発達させることにより獲得するための基本原理である。この基本原理を構成論的に明らかにし、ヒューマノイドロボットの実験と詳細人間モデルを用いたシミュレーションによって実証することを目標とする。具体的な研究項目は以下のようになる。</p> <p>(1)センサリ・モータ・マップの内部状態変化を連続的な力学現象としてモデル化。  (2)ミラーニューロンの数学モデルの確立とその多重階層構造によって記号獲得と抽象化。  (3)独自の計算論と計測法をもちいた実証実験。1つはヒューマノイドロボットを用いる実験、もう1つは詳細な人体の筋・骨格モデルを用いた大規模センサリ・モータ系のシミュレーション。</p> <p>本研究の独創的な点は、ヒューマノイドロボットの規模の複雑さを持つ機械に対して、連続的な力学現象を情報処理機構とするシステムを設計し、構成論的に知能発現のメカニズムの原理を探求しようとするところにある。</p>							

⑦これまでの研究経過 (研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。)

本研究では、ヒューマノイドロボットの規模の複雑さを持つ機械に対して、連続的な力学現象を情報処理機構とするシステムを設計し、構成論的に智能発現のメカニズムの原理を探索することを目的として、3つの研究項目を設けている。これに沿ってこれまでの研究経過を報告する。

(1)センサリ・モータ・マップの内部状態変化を連続的な力学現象としてモデル化

ヒューマノイドの全身運動を低次元化し、低次元化された空間での閉軌道として運動パターンをモデル化する。そのうえで閉軌道をアトラクタとする力学場を多項式で近似的に設計する方法を与えた(雑誌論文 6)。その上で複数の与えられた閉軌道の間の力学場を変化させることで、運動パターンを遷移する情報処理機構を設計した(雑誌論文 8)。力学場の変化はセンサによって決定されるため、動的なセンサリ・モータ・マップとなっている(雑誌論文 10,11)。(雑誌論文 9)ではロボットのダイナミクスを考慮した力学場の生成法を議論した。力学的情報処理とよばれるこの方法は、アトラクタとして表された離散記号とヒューマノイドの連続的な運動を力学現象をモデルとした情報処理によって結び付けている。ここで用いた力学場を多項式で表現する方法は、計算量が少なく、最適化計算が簡単にできることが特長である。

(2)ミラーニューロンの数学モデルの確立とその多重階層構造による記号獲得と抽象化

ミラーニューロンは他者運動の認識と、自己運動の生成がひとつのメカニズムでなされる点で、記号化、抽象化、言語に結びつくヒトの高度知能の起源を指し示しているのではないかと考えられている。ここでは隠れマルコフモデルを用いて運動パターンの認識と生成において双方向の計算をする計算モデルを構築している。(雑誌論文 3,5)ではヒトのモーションキャプチャデータを用いて各運動パターンを隠れマルコフモデルのパラメータの集合で記号化して表す。いくつかの運動パターンの隠れマルコフの統計パラメータ間の非類似度を距離データとして用いることで、隠れマルコフモデル間に位相構造を導入した。これによって外挿、内挿が可能になり、中間的な運動パターンの認識・生成が可能になった。

ここでは運動パターンの切り出しは教師が行うことを前提にしていたが、現在はこの分節化を自動的に行うことを検討している。また、隠れマルコフモデルの記号列を生成する上位の隠れマルコフモデルの導入などによって記号の抽象化の問題に取り組んでいる。

(3)独自の計算論と計測法をもちいた実証実験

実証実験の1つはヒューマノイドロボットを用いた実験である。このために全身 20 関節をもつヒューマノイドを開発した。これは代表者らが独自に開発した、バックラッシュクラッチと二重球面関節などの特徴をもつヒューマノイドである。このための全身運動制御法を研究してきた(国際会議 21,23)。また力学的情報処理に基づくヒトと機械のコミュニケーションの問題に接近しようとしている(口頭発表 38)。このために車輪移動をする上半身型ヒューマノイドを開発している(口頭発表 43,51)。

実証実験のもう1つは詳細な人体の筋・骨格モデルを用いた大規模センサリ・モータ系のシミュレーションを行うことを進めている。モーションキャプチャデータからリアルタイムで骨格の運動を計算することができる。これを用いてヒトの筋肉の緊張を剛体力学系としての計算から推定できないだろうか。研究代表者らが以前開発した剛体リンク系のダイナミクスの並列計算法などを用いながら、筋張力の計算を二次計画法、線形計画法の問題として定式化することができた(雑誌論文 7)。これを用いると床反力計、および筋活動の目安としての EMG 信号を用いることで拮抗筋の利用の様子を知ることができる。これを反映させた解を計算することにも成功した(国際会議 25)。これらの情報はヒトが身体で感じている情報を機械が知るすべを与えている。このような情報を利用できるロボットのみが、人間と共存する資格を持つロボットとなるであろう。

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

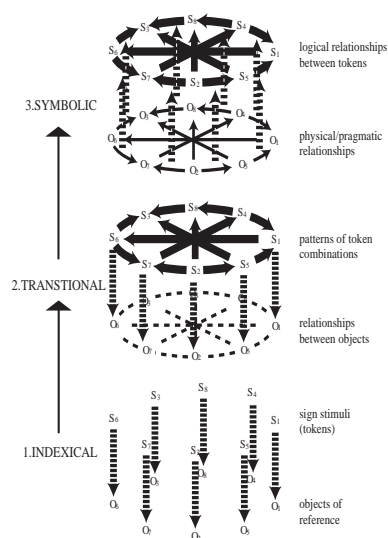
(1) センサリ・モータ・マップの内部状態変化を連続的な力学現象としてモデル化

この研究では現在は人間と機械が人間と相互に引き込みを行ってコミュニケーションが成立するモデルを研究へと展開している。16年度はこれに関して予め記憶しておいた物語を、人間の反応を見ながら読んで聞かせるストーリーテラー・ロボットの研究を始めた。これは道案内や、受付を行うロボットだけでなく、アルツハイマー患者に家族史を聞かせる治療があるが将来はこのような役割を担うことができるかもしれない。多項式表現を用いてセンサリ・モータ系を構成することは独創的なアイデアであり、高い評価を得ている。またこれに関する研究の成果が固まって出ようとしているところである。

(2) ミラーニューロンの数学モデルの確立とその多重階層構造による記号獲得と抽象化

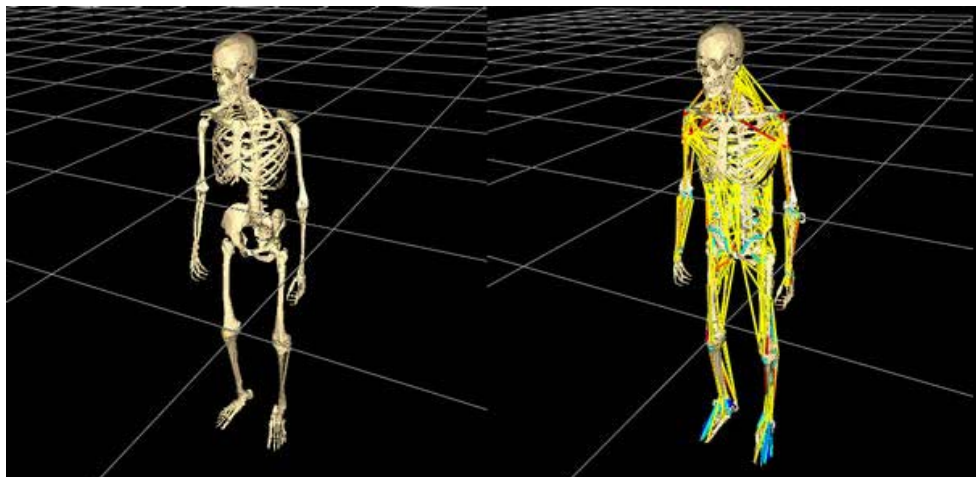
この研究については特に大きな注目を集めており 2003年度の人工知能学会の優秀論文賞を受賞している。2004年末にはロボット分野で最も歴史のある国際雑誌に論文が掲載された。2005年4月に行われたIEEE International Conference on Robotics and Automationでも代表者らの一連の研究に触発されたとして、スイスのローザンヌ大学の研究者の関連する研究の発表があった。現在は、代表者らの研究室において3名の博士課程の学生が隠れマルコフモデルを用いた連続情報の記号化と、記号の抽象化の研究を行っている。

この研究はヒューマノイドロボットや人工知能への応用のみならず、脳科学のパラダイムを情報学的に探求する研究としても代表者は高い関心を持っているところである。運動パターンに1対1に繋がった記号を以下に抽象的な記号に進化させるかが現在もっとも注目している問題である。右の図はテレンス・ディーコンが記号の抽象化について説明した概念図である。このような性質も持たすためにはどのような情報処理のメカニズムが必要か大きな挑戦的な課題である。



(3) 神経筋骨格モデルの計算法の構築

実証実験のうちモーションキャプチャーデータから骨格の運動を計算し、それからダイナミクスと床反力計、筋電計などを用いて筋肉の活動を経時的に計算することができるようになりつつある。これについては世界でも独創的な研究であり、幾つかの学会での招待講演を依頼された。また、神経内科、整形外科などの医学分野あるいはスポーツ科学の分野の研究者から共同研究をしたいとの希望がいくつも来ている。この研究については最近では筋肉の情報から神経系の情報を計算する方向へ研究が大きく展開してきている。今後は応用も視野に入れ研究を発展させる。



⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

● 雑誌論文 (11 編)

1. K. Yamane and Y. Nakamura: "Natural Motion Animation through Constraining and Deconstraining at Will," IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, vol.9, no.3, pp.352-360, 2003.
2. K. Yamane and Y. Nakamura: "Dynamics Filter---Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.19, no.3, pp.421-432, 2003.
- ③ T. Inamura, I. TOSHIMA, H. Tanie, and Y. Nakamura: "Embodied Symbol Emergence based on Mimesis Theory," International Journal of Robotics Research, vol.23, no.4, 2004.
4. K. Yamane, J. Kuffner, and J.K. Hodgins: "Synthesizing Animations of Human Manipulation Tasks," ACM Transactions on Graphics, vol.23, no.3, (Proceedings of SIGGRAPH), pp.532-539, 2004.
5. 稲邑, 中村, 戸嶋, 江崎: "ミメシス理論に基づく見まね学習とシンボル創発の統合モデル," 日本ロボット学会誌, vol.22, no.2, pp.256-263, 2004.
- ⑥ 岡田, 中村: "脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用," 日本ロボット学会誌, vol.22, no.8, pp.1050-1060, 2004.
- ⑦ Y. Nakamura, K. Yamane, Y. Fujita, and I. Suzuki: "Somatosensory Computation for Man-Machine Interface from Motion Capture Data and Musculoskeletal Human Model," IEEE Transactions on Robotics, vol.21, no.1, pp.58-66, 2005.
8. 岡田, 中村: 力学的情報処理による連続的記号空間の設計と全身運動の生成, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.7, 2005 (to appear).
9. 岡田, 大里, 中村: 非線形力学系のアトラクタ設計によるヒューマノイドロボットの運動創発, 計測自動制御学会論文誌, Vol.41, No.6, 2005 (to appear).
10. 岡田, 中村, 中村: 力学的情報処理を用いた自己組織的記号獲得と運動生成, 人工知能学会誌, Vol.20, No.3, pp.177-187, 2005 (to appear).
11. 岡田, 中村, 門根, 梶山, 中村: 力学的情報処理におけるアトラクタ設計法に関する研究 - 逐次設計による可塑性の導入と階層化設計による大規模化 -, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.4, 2005 (to appear).

● 査読付国際会議論文 (25 編)

1. T. Sugihara and Y. Nakamura: "Contact Phase Invariant Control for Humanoid Robot Based on Variable Impedant Inverted Pendulum Model," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.51-56, 2003.
2. M. Okada, T. Shinohara, T. Gotoh, S. Ban, and Y. Nakamura: "Double Spherical Joint and Backlash Clutch for Lower Limbs of Humanoids," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.491-496, 2003.
3. K. Tatani and Y. Nakamura: "Dimensionality Reduction and Reproduction with Hierarchical NLPCA Neural Networks Extracting Common Space of Multiple Humanoid Motion Patterns," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1927-1932, 2003.
4. Y. Fujita, Y. Nakamura, and Z. Shiller: "Dual Dijkstra Search for Paths with Different Topologies," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3359-3364, 2003.
5. K. Yamane, J.K. Hodgins, and H.B. Brown: "Controlling a Marionette with Human Motion Capture Data," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3834-3841, 2003.
6. T. Inamura, H. Tanie, and Y. Nakamura: "From Stochastic Motion Generation and Recognition to Geometric Symbol Development and Manipulation," Proceedings of International Conference on Humanoid Robots, 1B-02, 2003.
7. K. Yamane, J.K. Hodgins, and H.B. Brown: "Controlling a Motorized Marionette with Human Motion Capture Data," Proceedings of International Conference on Humanoid Robots, 1B-04, 2003.
8. T. Sugihara and Y. Nakamura: "Variable Impedant Inverted Pendulum Model Control for a Seamless Contact Phase Transition on Humanoid Robot," Proceedings of International Conference on Humanoid Robots, 5B-06, 2003.

9. A. Sekiguchi and Y. Nakamura: "Synthesis of Dynamics Based Information Processing System of Robot Using Synchronization in the Coupled Arnold Equations," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2003.
10. T. Inamura, H. Tanie, I. Toshima, and Y. Nakamura: "An Approach from Motion Generation Recognition to Intelligence based on Mimesis Principle," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, SaA-II-1, 2003.
11. K. Tatani and Y. Nakamura: "Reductive Mapping for Sequential Patterns of Humanoid Body Motion," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2003.
12. M. Okada, T. Shinohara, T. Gotoh, S. Ban, and Y. Nakamura: "Humanoid Robot Mechanisms for Responsive Mobility," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, SaP-III-3, 2003.
13. T. Sugihara and Y. Nakamura: "Whole-body Cooperative COG Control through ZMP Manipulation for Humanoid Robots," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, SaP-III-4, 2003.
14. M. Okada, D. Nakamura, and Y. Nakamura: "Hierarchical Design of Dynamics Based Information Processing System for Humanoid Motion Generation," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, SaP-III-1, 2003.
15. Y. Nakamura, K. Yamane, I. Suzuki, and Y. Fujita: "Dynamic Computation of Musculo-Skeletal Human Model Based on Efficient Algorithm for Closed Kinematic Chains," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, SaP-I-2, 2003.
16. Y. Nakamura and A. Murai: "Constraints and Deformations Analysis for Machining Accuracy Assessment of Closed Kinematic Chains," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1706-1712, 2004.
17. M. Okada, Y. Nakamura: "Design of the Continuous Symbol Space for the Intelligent Robots using the Dynamics-based Information Processing," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3201-3206, 2004.
18. Z. Shiller, Y. Fujita, D. Ophir, Y. Nakamura: "Computing a set of Local Optimal Paths through Cluttered Environments and Over Open Terrain," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4759-4764, 2004.
19. K. Yamane, T. Kuroda, and Y. Nakamura: "High-Precision and High-Speed Motion Capture by Combining Heterogeneous Cameras," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots, pp.279-286, 2004.
20. Masafumi Okada, Daisuke Nakamura and Yoshihiko Nakamura: Self-Organizing Symbol Acquisition and Motion Generation Based on Dynamics-based Information Processing System, Proc. of the second International Workshop on Man-Machine Symbiotic Systems, pp.219-229, 2004
21. Tomomichi Sugihara, Katsu Yamane, Masafumi Okada and Yoshihiko Nakamura: Elements of Humanoid Robot Technology, Proc. of the 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation(TEXCRA 2004), 2004.
22. M. Okada, K. Osato, and Y. Nakamura: "Motion Emergence of Humanoid Robots by an Attractor Design of a Nonlinear Dynamics," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005.
23. T. Sugihara and Y. Nakamura: "A Fast Online Gait Planning with Boundary Condition Relaxation for Humanoid Robots," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005.
24. H. Tanie, K. Yamane, and Y. Nakamura: "High Marker Density Motion Capture by Retroreflective Mesh Suit," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005.
25. K. Yamane, Y. Fujita, and Y. Nakamura: "Estimation of Physically and Physiologically Valid Somatosensory Information," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005.

## ●口頭発表 (52編内1~27番省略)

28. 谷江, 稲邑, 中村: "統計的情報量を用いた原始シンボル空間の構成とそれに基づく原始シンボル系列の記号化," 第21回日本ロボット学会学術講演会, 3K36, 2003.
29. 杉原, 中村: "全身協調反力操作によるヒューマノイドロボットの高機動化制御," 第10回日本IFTtoMM会議シンポジウム, 2004.
30. 大武, 中村: "体性感覚情報処理のための脊髄神経系筋支配モデル," 第10回日本IFTtoMM会議シンポジウム, pp.5-10, 2004.
31. 黒田, 山根, 中村: "異種カメラの相互補完による高精度高速度モーションキャプチャシステム," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-H-18, 2004.
32. 藤田, 山根, 大武, 中村: "筋骨格モデルに基づく人間の体性感覚情報の高速計算," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-H-46, 2004.
33. 大里, 岡田, 中村: "ヒューマノイドロボットの状態空間におけるアトラクタ設計と自律運動の生成・制御," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-L1-18, 2004.
34. 山本, 岡田, 中村: "能動鉗子のための粗動・細動ハイブリッドポジションナの開発," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-H-66, 2004.
35. 大武, 中村: "神経解剖学に基づく人間の体性神経系の筋支配モデル," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-H-60, 2004.
36. 中野, 岡田, 中村: "ワイヤを用いたバックドライブブルな足首駆動機構の設計," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-L1-12, 2004.
37. 山根, 黒田, 中村: "マーカセット定義と被験者キャリブレーションが不要なリアルタイム光学式モーションキャプチャ," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 1A15, 2004.
38. 村井, 山根, 中村: "モーションキャプチャデータに基づく人体の受動的な力のモデル化," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 1A16, 2004.
39. 水川, 中村: "非言語情報を用いて相互作用するStory Tellerロボットのシステムアーキテクチャ," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 1E37, 2004.
40. 山本, 中野, 岡田, 中村: "二重球面肩関節を持つヒューマノイドロボット," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 1L27, 2004.
41. 大武, 中村: "脊髄神経系筋支配に基づく体性感覚情報の類似度と位相差の計算," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 2C18, 2004.
42. 織田村, 中村: "小型内視鏡下手術ロボットシステムの相対キャリブレーション法," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 2H12, 2004.
43. 圓戸, 中村: "球面タイヤを用いた2次元倒立振り子ロボットの開発," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 2I15, 2004.
44. 高野, 中村: "エルゴディック隠れマルコフモデルを用いたミメシスループの構造設計," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 3G26, 2004.
45. 杉原, 中村: "加速度補正によるヒューマノイドロボットの高精度ZMP操作," 第22回日本ロボット学会学術講演会, 3L21, 2004.
46. 大武, 中村: "全身運動時体性神経情報の次元計算に基づく協調度の評価," 第19回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.49-50, 2004.
47. 大武, 中村: "全身協調動作における脊髄神経情報の時間変動計算," 日本神経回路学会第14回全国大会, pp.200-201, 2004.
48. 杉原, 中村: "境界条件緩和による二脚ロボットのオンライン歩容計画法," 第10回ロボティクスシンポジウム, 2A5, 2005.
49. 高野, 谷江, 中村: "統計的情報量に基づく原始シンボル空間の再構成による運動のクラスタリングと特徴付け," 第10回ロボティクスシンポジウム, 5D3, 2005.
50. 門根, 岩城, 中村: "階層的な力学系によるロボットの運動パターンの抽象化," 第10回ロボティクスシンポジウム, 5D4, 2005.
51. 圓戸, 中村: "球面タイヤを用いた移動機構の開発," 第10回ロボティクスシンポジウム, 1B3, 2005.