

川人学習動態脳プロジェクトの研究成果

目次

1. 視覚認知のダイナミクス	2
2. 小脳の内部モデル学習のメカニズム	3
3. 小脳, 大脳基底核, 大脳皮質の機能分化と統合	4
4. 並列的, 階層的な強化学習方式	5
5. 小脳に獲得される道具の内部モデル	7
6. 運動技能の獲得とそれに伴う柔軟性の変化	10
7. 道具使用の学習に関する大脳-小脳機能的結合	12
8. 内部モデルの統計学習	13
9. 見真似学習	15
10. 運動プリミティブ	16
11. 眼球運動の学習制御	18

1. 視覚認知のダイナミクス

研究成果の概要

人間は、複雑な風景を多数の物体に相当する領域に分割して理解することができます。これはどのような脳のしくみによるもののでしょうか？当プロジェクトでは、画像の各領域が「どの物体に属するか」と、色、動きなど「どういう性質を持つか」を同時に分割する偏微分方程式モデルを提案し、それが人間の視覚応答特性と一致することを実験的に示した。また、このようなダイナミクスが、神経細胞の発火頻度と位相情報により効率良く実現可能なことを示した。

将来への展望、展開可能なシーズ等

- 1) 画像の領域分割に基づく動画像圧縮
- 2) 運動予測に基づくビデオカメラ制御

特許出願

なし

報告書他

- 1) Okada, M., Nishina, S., Kawato, M.: Continuous dynamics of visual computation in the brain: evidence of an iterative process in the aperture problem (submitted).
- 2) Nishina, S., Okada, M., Kawato, M.: Spatio-temporal dynamics of depth filling-in. Vision Research (submitted).
- 3) 田端宏充, 柴田智広, 田口進也, 銅谷賢治, 河野憲二, 川人光男: 円滑性追跡眼球運動の視標予測のための MST 野神経場モデル. 日本神経回路学会第 11 回全国大会 (2001).

〔研究者名〕 岡田 真人

2. 小脳の内部モデル学習のメカニズム

研究成果の概要

人間の運動学習には小脳の内部モデルの獲得が大きな役割を果たしているが、その効率良い学習を可能にしている神経メカニズムはどのようなものだろうか？当プロジェクトでは、生理学データに基づいた小脳の神経回路モデルを構築し、細胞内の分子機構、拡散物質による信号伝達や、下オリーブ核神経回路のカオス的な振る舞いが効率良い学習において果たす役割を明らかにした。

成果展開可能なシーズ、用途等 1) 自己適応型の制御用 LSI 2) 小脳疾患治療への応用
特許出願 なし

報告書他

- 1) Schweighofer N., Doya K., Lay F.: Unsupervised learning of granule cell sparse codes enhances cerebellar adaptive control. *Neuroscience*, 103, :35-50 (2001).
- 2) Schweighofer N.: A model of activity-dependent formation of cerebellar microzones. *Biological Cybernetics*, 79, 97-107 (1998).
- 3) Schweighofer N., Arbib M.: A model of cerebellar metaplasticity. *Learning and Memory*, 4, 421-428 (1998).
- 4) Schweighofer N., Ferriol G.: Diffusion of nitric oxide can facilitate cerebellar learning: A simulation study. *Proceedings of National Academy of Sciences of USA*, 97, 10661-5 (2000).
- 5) Kuroda S., Schweighofer N., Kawato M.: Exploration of signal transduction pathways in cerebellar long-term depression by kinetic simulation. *Journal of Neuroscience*, 21, 5693-5702 (2001).
- 6) Kuroda, S., Yamamoto, K., Miyamoto, H., Doya, K., Kawato, M.: Statistical characteristics of climbing fiber spikes necessary for efficient cerebellar learning. *Biological Cybernetics*, 84, 183-192 (2001).
- 7) Schweighofer N., Doya K., Kawato M.: Electrophysiological properties of inferior olive neurons: A compartmental model. *Journal of Neurophysiology*, 82, 804-817 (1999)
- 8) Schweighofer N., Doya K., Kawato M.: Chaotic resonance induced by electrical coupling enhanced information transmission in a model of inferior olive neurons (submitted).
- 9) 田端宏充, 山本憲司, 川人光男: 小脳皮質のシナプス可塑性モデルに基づくサルの水平方向 VOR 適応のシミュレーション. *電子情報通信学会誌*, J84-D-II, 822-829 (2001).

〔研究者名〕 Nicolas Schweighofer、田端 宏充（技術員）、黒田 真也（研究推進委員）、
深井 英和（研究推進委員）

3. 小脳, 大脳基底核, 大脳皮質の機能分化と統合

研究成果の概要

小脳, 大脳基底核, 大脳皮質など脳の異なる部位は, それぞれ特徴的な回路構造と可塑性のメカニズムを持っている. これら異なる部位における計算の違いを特徴づけるものは何なのだろうか? 当プロジェクトは, 学習の方式の違いにより脳の機能分化が起きているという考え方を提案した. すなわち, 小脳は誤差信号をもとにした教師あり学習に, 大脳基底核は報酬信号をもとにした強化学習に, 大脳皮質は, 信号の統計的性質をもとにした教師無し学習に, それぞれ特化したシステムである.

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 脳疾患と機能回復のメカニズムの理解
- 2) 運動と知的行動のトレーニング方の開発

特許出願

なし

報告書他

- 1) Doya K.: What are the computations in the cerebellum, the basal ganglia, and the cerebral cortex. Neural Networks, 12, 961-974 (1999).
- 2) Doya, K.: Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control. Current Opinion in Neurobiology, 10, 732-739 (2000).
- 3) Doya, K., Kimura, H., Kawato, M.: Neural mechanisms of learning can control. IEEE Control Systems Magazine, 21, 42-54 (2001).

〔研究者名〕 銅谷 賢治

4. 並列的, 階層的な強化学習方式

研究成果の概要

脳は, 新しい行動のすみやかな獲得と, 学習した行動の確実な記憶と再現を, いかにして両立しているのだろうか? われわれは, 脳が視覚座標と身体座標など, 異なる複数の表現を用いることにより, それらを両立しているという仮説を立て, その実験的検証を行った. また, 複雑な制御課題を, 並列的, 階層的な学習モジュールにより効率良く学習する方式を開発し, 起立運動学習ロボット等に応用した.



成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 人間型ロボットの学習制御
- 2) 人間の行動の分節化と見まね

特許出願

- 1) エージェント学習装置. 特許第 3086206 号
(Agent Learning Machine. PCT/JP99/03689).
- 2) ロバスト強化学習方式. 特願 2000-386265.

報告書他

- 1) Hikosaka O., Nakahara H., Rand M. K., Sakai K., Lu, X., Nakamura K., Miyachi S., Doya K.: Parallel neural networks for learning sequential procedures. Trends in Neurosciences, 22, 464-471 (1999).
- 2) Nakahara, H., Doya, K., Hikosaka, O.: Parallel cortico-basal ganglia mechanisms for acquisition and execution of visuo-motor sequences - A computational approach. Journal of Cognitive Neuroscience, 13, 626-647 (2001).
- 3) Bapi R. S., Doya K., Harner A. M., Evidence for effector independent and dependent components and their differential time course of acquisition during motor sequence learning. Experimental Brain Research, 132, 149-162 (1999).
- 4) Morimoto, J., Doya, K.: Acquisition of stand-up behavior by a real robot using hierarchical reinforcement learning. 17th International Conference on Machine Learning, 1, 623-630 (2000).

- 5) Morimoto, J., Doya, K.: Acquisition of stand-up behavior by a real robot using hierarchical reinforcement learning. *Robotics and Autonomous Systems*, 36, 37-51 (2001).
- 6) Morimoto, J., Doya, K.: Robust reinforcement learning. V. Tresp et al. (eds.) *Advances in Neural Information Processing Systems 13*, 1061-1067. MIT Press (2001).
- 7) 鮫島和行, 片桐憲一, 銅谷賢治, 川人光男: 複数の予測モデルを用いた強化学習による非線形制御. *電子情報通信学会論文誌, D-II*, 2092-2106 (2001).
- 8) 鮫島和行, 銅谷賢治, 川人光男: モジュール競合による運動パターンのシンボル化と見まね学習. *電子情報通信学会論文誌, D-II* (in press).

〔研究者名〕 Raju S. Bapi、鮫島 和之、森本 淳（技術員）

5. 小脳に獲得される道具の内部モデル

外界の操作対象物の内部モデルが、人間の小脳に学習によって獲得される様子を脳機能画像で解明.

研究成果の概要

人間は多くの道具を身体の延長のように自在に使いこなすことができる. 本研究では, そのような道具の使用を可能にした脳のメカニズムを, 機能的核磁気共鳴画像装置 (fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging) を用いて明らかにした. 人間が新しい道具の使い方を学習しているときの小脳活動を fMRI で撮像すると, 道具が上手に使えるようになるにつれて広い範囲で血流量が下がり, 最終的には小脳の狭い範囲に活動が限定されることを発見した (図 1). この結果は, 誤差の情報が広い範囲に入力されることで学習が進行し, 小脳の一部分に操作対象物の入出力特性を反映する内部モデルが獲得されることを示唆している. さらに, 異なる道具の内部モデルが, 小脳の異なる場所に獲得される様子を捉え (図 2), 内部モデルがモジュール的に構成されていることを確認した. これらの結果は, 小脳に多重の内部モデルが獲得されるという計算理論の妥当性を示している.

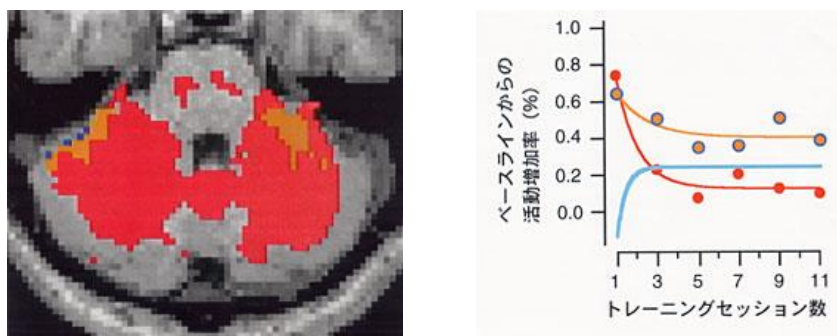


図 1 赤い領域は, 学習とともに行動誤差が少なくなるに連れて, 活動が急激に減少した領域. オレンジと青 (左上の数点) の領域は, 学習後, 誤差を統制しても活動が残った領域. 右のグラフは, それぞれの領域で, トレーニング中に活動がどのように変化したかを示す. オレンジの曲線から赤い曲線を差し引くことで, 獲得された内部モデルの活動が上昇している様子がわかる (水色の曲線)

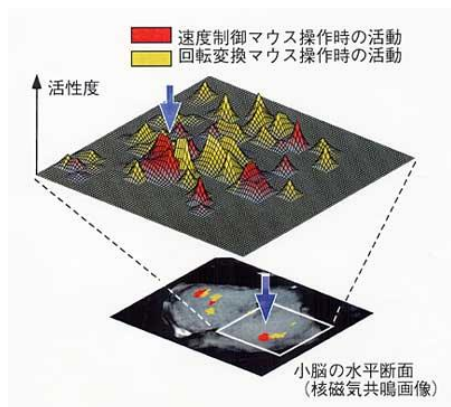


図 2 2 種類の異なる道具 (回転変換コンピュータマウス, 速度制御マウス) を使う時の小脳活動の違い.

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 高次脳機能・人間知性の解明
- 2) 使いやすいヒューマンインターフェイスの開発

特許出願

なし

報告書他

- 1) Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshioka, T., and Kawato, M. (2000) Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a novel tool. *Nature*, 403, 192-195.
- 2) Tamada, T., Miyauchi, S., Imamizu, H., Yoshioka, T., and Kawato, M. (1999) Cerebro-cerebellar functional connectivity revealed by the laterality index in tool-use learning. *NeuroReport*, 10, 325-331.
- 3) 今水寛, 宮内哲, 玉田朋枝, 川人光男 (2000) 道具使用の学習と小脳. *神経研究の進歩*, 44, 760-769
- 4) Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Yoshioka, T., Kawato, M. (1999) Cerebellar activity related to acquisition of internal models of a novel tool: Implications from an fMRI study on human subjects using a computer mouse for the first time. 29th Annual Meeting Society for Neuroscience, Miami, Florida, 101.
- 5) Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshika, T., Kawato, M. (1998) Multiple representations for visuomotor learning in the cerebellum: A functional MRI study. 4th International Conference on Functional Mapping of Human Brain, Montreal, Canada, S819.
- 6) Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshika, T., Kawato, M. (1998) Modular organization of multiple internal models for visuomotor learning: a functional MRI study. 28th Annual Meeting, Society for Neuroscience, Los Angeles, 166.
- 7) Imamizu, H., Miyauchi, S., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., and Kawato, M. (1997) Cerebellar activities related to acquisition of the internal models for a new tool . 27th Annual Meeting, Society for Neuroscience, New Orleans, USA, 1053.
- 8) Imamizu, H., Miyauchi, S., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., and Kawato, M. (1997) Cerebellar activities related to acquisition of the internal models for a new tool . Minnesota Conference on Vision for Reaching and Grasping, Minnesota, 27.
- 9) Imamizu, H., Miyauchi, S., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., and Kawato, M. (1997) Separated modules for visuomotor control and learning in the cerebellum: A functional MRI

study. 3rd International Conference for Mapping of the Human Brain, Copenhagen, Denmark, s598.

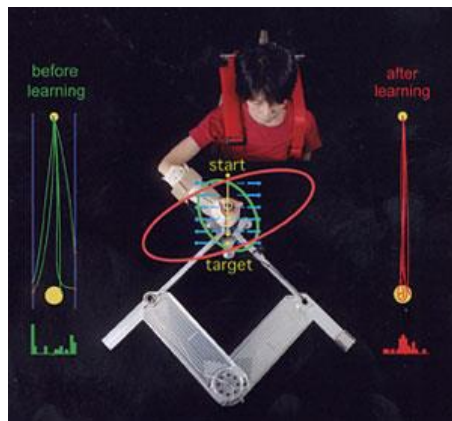
- 10) 今水寛, 宮内哲, 玉田朋枝, 吉岡利福, 川人光男 (1999) 計算理論と fMRI. 第 29 回日本脳波筋電図学会学術大会, 日本大学医学部, 予稿集 159.
- 11) 今水寛, 宮内哲, 玉田朋枝, 吉岡利福, 川人光男 (1999) 小脳外側部に獲得される新奇的な道具の内部モデル. 第 22 回日本神経科学大会, 大阪, 抄録集 160.
- 12) 今水寛, 宮内哲, 玉田朋枝, 佐々木由香, 多喜乃亮介, Benno Puetz, 吉岡利福, 川人光男 (1998) 小脳に構成される多重内部モデル: fMRI による計測. 第 21 回日本神経科学, 第 41 回神経化学合同大会, 東京.
- 13) 今水寛, 宮内哲, 玉田朋枝, 佐々木由香, 多喜乃亮介, Benno Puetz, 吉岡利福, 川人光男 (1998) 小脳に構成される視覚運動学習の内部モデル: fMRI による計測. 第 21 回日本神経科学, 第 41 回神経化学合同大会, 東京, 216.
- 14) 今水寛, 宮内哲, 玉田朋枝, 佐々木由香, 多喜乃亮介, ベノプッツ, 吉岡利福, 川人光男 (1998) 道具使用の習熟と小脳活動の関係. 文部省重点領域研究運動行動班会議, 東京.
- 15) 今水寛, 宮内哲, 玉田朋枝, 佐々木由香, 多喜乃亮介, Benno Puetz, 吉岡利福, 川人光男 (1998) 小脳に構成される視覚運動学習の内部モデル: fMRI による計測. 文部省特定領域研究「高次脳機能のシステムの理解」第 3 回夏のワークショップ[DECISION MAKING], 富士吉田, 9.
- 16) 今水寛, 宮内哲, 佐々木由香, 多喜乃亮介, Benno Puetz, 川人光男 (1997) 視覚運動学習時の小脳活動: fMRI による計測. 第 20 回日本神経科学大会, 仙台, 125.

〔研究者名〕 今水 寛, 黒田 朋枝, 吉岡 利福, ベノプッツ

6. 運動技能の獲得とそれに伴う柔軟性の変化

研究成果の概要

練習を繰り返すことにより運動技能は向上する。身体の柔軟性はこのときどのように変化しているのだろうか。表面筋電図を用いた方法により、学習に伴い剛性が低下すること、また失敗が直後の試行の剛性に影響を与えることがわかった。これは内部モデルを用いた予測的制御と剛性を用いたフィードバック制御がうまく組み合わせられていることを示す。また、不安定な状況では、剛性を予測的、適応的に変化させて対応しており、生体がインピーダンスコントロールを実現していることがわかった。このように、神経系は外界を予測し、巧みに適応している。このような機能に注目したリハビリテーションの可能性を探ることも有用であろう。



成果展開可能なシーズ、用途等

1) リハビリテーション

特許出願

1) フィードフォワード運動訓練装置およびフィードフォワード運動評価システム

特許第 3120065 号

出 願 人：科学技術振興事業団

請求の概要：運動機能改善を目的としたリハビリテーションおよび運動機能改善を目的とした治療、薬物等の効果判定などに有用な、速く正確な運動をリラックスした状態で行うことのできる機能の回復を効果的に実現させることのできる訓練装置および評価システム。

報告書他

- 1) Gomi, H., Osu, R. (1998) Task dependent viscoelasticity of human multijoint arm and its spatial characteristics for interaction with environments, Journal of Neuroscience, 18 (21), 8965-8978.
- 2) Osu, R., Gomi, H. (1999) Multijoint muscle regulation mechanisms examined by measured human-arm stiffness and EMG signals, Journal of Neurophysiology, 81 (4), 1458-1468.
- 3) Nakano E., Imamizu H., Osu R., Uno Y., Gomi H., Yoshioka T., Kawato M. (1999) Quantitative examinations of internal representations for arm trajectory planning: minimum commanded torque change model. Journal of Neurophysiology, 81:2140-2155.

- 4) Flanagan J. R., Nakano E., Imamizu H., Osu R., Yoshioka T., Kawato M. (1999) Composition and decomposition of internal models in motor learning under altered kinematic and dynamic environments. *Journal of Neuroscience*, 19:RC34.
- 5) Burdet, E., Osu, R., Franklin, D., Milner, T.E., Kawato, M. (2000) A method for measuring endpoint stiffness during multi-joint arm movements, *Journal of Biomechanics*, 33, 1705-1709.
- 6) Wada, Y., Kaneko, Y., Nakano, E., Osu, R., Kawato, M. (2001) Quantitative examinations for multi joint arm trajectory planning - using a robust calculation algorithm of the minimum commanded torque change trajectory, *Neural Networks*, 14, 381-393.
- 7) Burdet, E., Osu, R., Franklin, D., Milner, T.E., Kawato, M. (2001) The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance, *Nature*, 414, 446-449.

〔研究者名〕 大須 理英子, 吉岡 利福

7. 道具使用の学習に関係する大脳－小脳機能的結合

道具使用の学習に関して小脳外側部領域と機能的に結合した大脳皮質領域の特定。

研究成果の概要

ヒト小脳外側部は、高次脳機能に関係していると考えられている。われわれは、小脳外側部と大脳皮質との機能的結合を調べるために、機能的核磁気共鳴画像によって計測された神経活動の左右半球差を指標とした方法を提案した。これは、高次脳機能に関わる、解剖学的に投射関係のある可能性が高い大脳領域と小脳領域の結合を非侵襲的に調べることのできる新しい方法である。われわれは、この方法を用いて、道具使用の学習に関わる小脳外側部領域が腹側運動前野と結合している可能性を示唆した。この方法は、様々な他の高次脳機能に関係する大脳－小脳機能的結合の研究にも簡単に適用することができる。

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 高次脳機能に関係する大脳－小脳結合の理解

特許出願

なし

報告書他

- 1) Tamada, T., Miyauchi, S., Imamizu, H., Yoshioka, T., and Kawato, M. A possible output pathway of the cerebellum related to learning to use a new tool. 28th Annual Meeting, Society for Neuroscience, Los Angeles, CA, USA, November 1998, 68.6.
- 2) Tamada, T., Miyauchi, S., Imamizu, H., Yoshioka, T., and Kawato, M. (1999). Cerebro-cerebellar functional connectivity revealed by the laterality index in tool-use learning. NeuroReport, 10, 325-331.

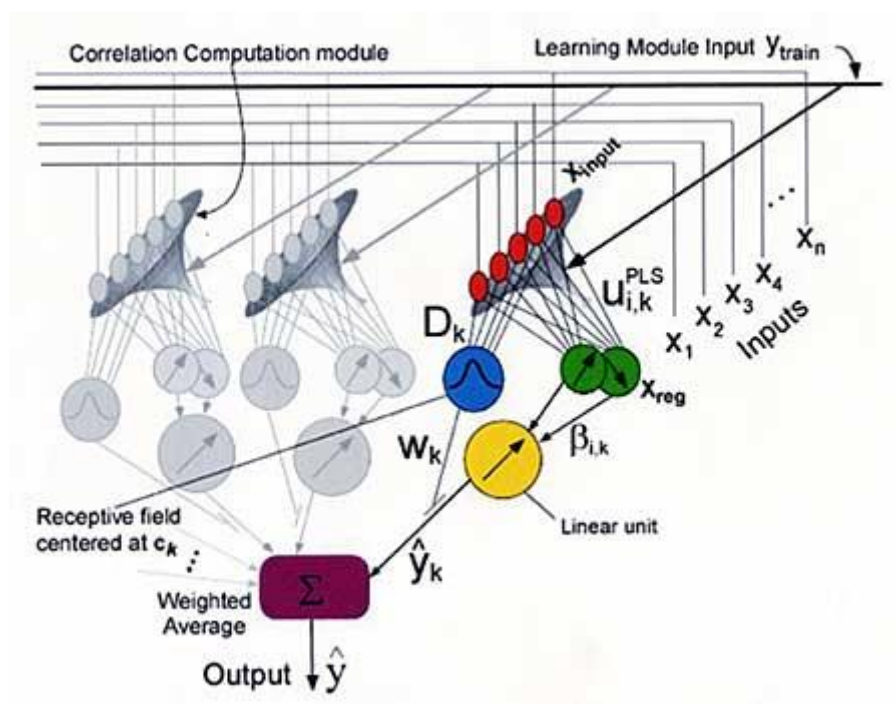
〔研究者名〕 黒田 朋枝, 今水 寛, 吉岡 利福

8. 内部モデルの統計学習

研究成果の概要

非常に柔軟かく多くの非線形要因を持つヒューマノイドロボットをうまく制御するには、順モデルや逆モデル、それから座標変換などの非線形な内部モデルの学習が必須である。Schaal グループリーダーらは、複雑な非線形関数の学習は、大局的で複雑な関数を計算しようと思わなければ、非常に単純に達成可能であること、すなわち、局所的に線形な関数をフィッティングすることで複雑で大局的な関数を効果的に学習可能であることに着目し、新しい神経回路を提案した。

30 自由度を持つ我々のロボットを動かすには、更に大規模データからの学習という問題をクリアする必要がある。Vijayakumar 研究員、D'Souza 研究員、Schaal 研究員らはこの問題に取り組み、大規模非線形関数のための局所線形学習アルゴリズムを新たに提案した。このアルゴリズムにより、100000 次元の入力空間を持つデータにも対応できるようになった。



このアルゴリズムは我々のロボットに大いに応用された。例えば、全身の逆ダイナミクス学習や、眼球運動制御学習などである。一方、このアルゴリズムはロボットや人間の生成したデータの解析にも利用されている。ヒューマノイドロボットなど、高次元空間で、限られたデータでモデルを獲得することは非常に難しかったが、データが、低次元の空間で表現可能なことを発見し、このアルゴリズムが効率良く逆ダイナミクス学習可能であることを示した。

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 大規模非線形関数の高速学習
- 2) 大規模非線形入出力データの次元解析
- 3) ロボットや他の所為 r の実時間制御
- 4) データマイニングの新しい道具

特許出願

なし

報告書他

- 1) Atkeson, C. G., Moore, A. W., and Schaal, S.: Locally weighted learning. Artificial Intelligence Review, 11, 11-73, 1997.
- 2) Atkeson, C. G., Moore, A. W., and Schaal, S.: Locally weighted learning for control. Artificial Intelligence Review, 11, 75-113, 1997.
- 3) Schaal S., Atkeson C. G.: Constructive incremental learning from only local information. Neural Computation 10, 2047-2084, 1998.
- 4) Vijayakumar, S., and Schaal, S.: Local adaptive subspace regression. Neural Processing Letters, 7, 139-149, 1998.
- 5) Sethu, V., D'Souza, A., Shibata, T., Contadt, J., and Schaal, S: Statistical Learning for Humanoid Robots. Autonomous Robotics (in press)
- 6) Vijayakumar, S., & Schaal, S. (2000). Fast and efficient incremental learning for high-dimensional movement systems, International Conference on Robotics and Automation (ICRA2000). San Francisco, April 2000.
- 7) Schaal, S., Atkeson, C.G., and Vijayakumar, S.: Scalable techniques from nonparametric statistics for real-time robot learning. Applied Intelligence (in press).

〔研究者名〕 Stefan Schaal、Sethu Vijayakumar

9. 見真似学習

研究成果の概要

見真似学習は、運動学習などにおける経路点などの教師信号を直接与えることができる極めて有効な手段としても考えられる。また人のコミュニケーション能力の中でももっとも基本的な能力としての認知科学的な重要性も忘れてはならない。

Schaal グループリーダ、宮本研究員らは、以前からロボットの見真似学習を研究してきており、腕型ロボットでは、棒立て、テニスサーブなどをすでに成功させてきた。人に近い体を持つヒューマノイド・ロボットでは、Ude 研究員らは、ビデオ画像から、ヒトの動きの関節角情報を再現するアルゴリズムを研究した。画像生成の順オプティクスモデル、最尤推定、ロバスト統計などを組み合わせた手法で、歩行や簡単な踊りについては推定に成功している。これに基づいてヒューマノイドの制御も行った。また、Ijspeert 研究員らが全身運動の模倣学習を研究している。彼らの研究では人間の運動中の関節角情報から、適切な自律非線形力学系を非常に高速に学習し、結果として頑健で一般化が容易になる運動再現アルゴリズムを提案している。このアルゴリズムはまた教師の運動認識や分類にも用いることができる。

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) ヒューマノイド・ロボットへのスキル教示
- 2) 運動認識
- 3) 運動プリミティブに基づいた運動計画
- 4) 人間とロボットとの自然なインタラクション



特許出願 なし

報告書他

- 1) Miyamoto H., Kawato M.: A tennis serve and upswing learning robot based on bi-directional theory. Neural Networks 11, 1331-1344, 1998.
 - 2) Schaal S.: Is imitation learning the route to humanoid robots? Trends in Cognitive Science 3 (6), 233-242, 1999.
 - 3) A. Ude: Filtering in a unit quaternion space for model-based object tracking", Robotics and Autonomous Systems, vol., no. 2-3, pp. 163-172, 1999.
 - 4) Ijspeert, A.J., Nakanishi, J., and Schaal, S.: Trajectory Formation for Imitation with Nonlinear Dynamical Systems. IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems 2001 (in press)
- 〔研究者名〕 宮本 弘之、Stefan Schaal、Ales Ude (STA フェロー)、Auke Ijspeert(USC)、Aude Billard(USC)

10. 運動プリミティブ

研究成果の概要

人間は無限の可能性のある運動パターンのなかで、かなりステレオタイプな振舞いをすると言われている。その運動計画は原始的な運動パターン（運動プリミティブ）を組み合わせることによって生成されると長い間考えられてきた。最も基礎的な運動プリミティブとしては、離散（開始点から終点へ）運動、とリズム運動（周期的）の二つが議論されてきており、このような問題に対して Schaal 研究員らは人間やロボットを対象とした系列的な行動研究を進めている。具体的には、人間が 1 ラケットでボールをバウンドさせ続けるタスクの場合、その運動の性質はリズム運動で最も良く説明された。また、従来は二つの離散運動で説明されてきた人間の腕の運動の例（空間で 8 の字を描く）や従来から行動学で信じられてきた 3 分の 2 乗則が、人間の腕の機構と関節空間における正弦波運動によって生成された結果のある一面を捉えたに過ぎないことを証明した。更に最近では、従来言われてきた離散運動とリズム運動の相互抑制モデルではなく、それらの協調モデルとして見る提案を始めている。

この運動プリミティブというコンセプトに基づき、琴坂研究員らは、ロボットにドラミングなどの周期的運動を適応的に行わせる研究を行った。具体的には、神経振動子をうまく利用することで、人間の叩くドラムのタイミングにロボットが容易かつロボバストに同期してドラムを叩くことができた。Ijspeert 研究員らは、離散運動プリミティブを使用し、テニスのフォアハンドやバックハンドといった教師の複雑なスキルをヒューマノイドに模倣させることに成功した。



成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) ヒューマノイド・ロボットの運動生成
- 2) 人間の運動生成解析
- 3) 運動計画と学習の抽象表現

特許出願 なし

報告書他

- 1) Sternad D., Schaal S.: Segmentation of endpoint trajectories does not imply segmented control. Experimental Brain Research 124,118-136, 1999.
- 2) Sternad, D., Duarte, M., Katsumata, H., and Schaal, S.: Dynamics of a bouncing ball in human performance. Physical Review E, 63, 1-8, 2000.
- 3) Schaal, S., & Sternad, D. Origins and violations of the 2/3 power law in rhythmic 3D movements. Exp. Brain Res., 136, 60-72, 2001.

- 4) Kotosaka, S., & Schaal, S. Synchronized robot drumming by neural oscillator, The International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines. Montreal, Canada, 2001 (electronic proceedings only).
- 5) Sternad, D., Dean, B., and Schaal, S.: Interaction of discrete and rhythmic movement in one-joint movements. Human Movement Science (in press).

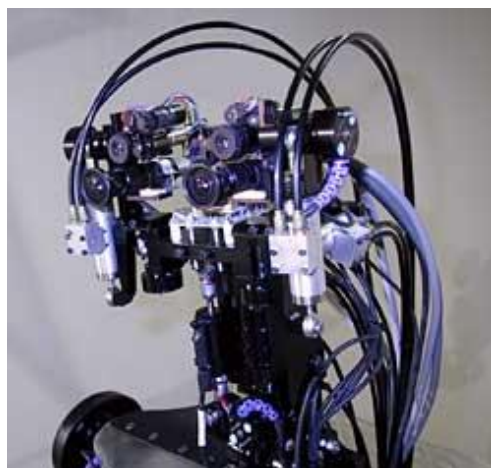
〔研究者名〕 Stefan Schaal、琴坂 信哉、Auke Ijspeert (USC)、Aude Billard (USC)

11. 眼球運動の学習制御

研究成果の概要

柴田研究員らは、ヒューマノイドロボットの頭部、眼球、視覚処理部分を開発し、脳研究で最もシステマ的理解の研究が進んでいる眼球運動の学習制御モデルのロボットへの実装などを進めた。

まず、前庭動眼反射に関し、脳の原理、解剖学的構造、そしてフィードバック誤差学習という学習原理から出発し、フィードバック系および誤差に遅れがあり、外界との関係性において非線形性が本質的であることに言及した上で、工学的に再咀嚼したモデルを提案した。またそのモデルを a. で説明した神経回路と組み合わせることで、高速かつロバストな非線形学習がロボットで可能であることを実証した。



更に柴田研究員らは、円滑性追跡眼球運動の学習制御モデルに関して、ヒューマノイド・ロボットに高性能なモデルを実装した。その制御モデルは、円滑性追跡眼球運動に関する全ての主要な神経生理学や行動学実験の結果を説明することのできる初めてのモデルとなり得るものであり、また現時点での生物の眼球運動の理解を更に押し進めるものである。

Vijayakumar 研究員らは衝動性眼球運動を明白な(overt)注意点の位置変更の一手段として研究しロボットに実装した。大脳の神経場理論と、人間や猿における視覚注意の機構に関する知識、冗長なシステムにおける学習、という要素を組み合わせることにより実現した。

成果展開可能なシーズ、用途等

- 1) 非線形で遅れのある二自由度制御系の頑健で高速な学習制御
- 2) ヒューマノイド・ヘッドのための眼球運動生成
- 3) 脳科学としての計算モデル

特許出願

なし

報告書他

- 1) Shibata, T., and Schaal, S.: Robot gaze stabilization based on mimesis of oculomotor dynamics and vestibulocerebellar learning. *Advanced Robotics*, 13 (3), 351-352, 1999.
- 2) Shibata, T., & Schaal, S.. Biomimetic gaze stabilization based on feedback-error learning with nonparametric regression networks. *Neural Networks*, 14, 201-216. 2001.

- 3) 柴田智広: 脳科学と眼球運動制御とヒューマノイド. 日本ロボット学会誌, vol.19, no.5, pp. 27-31, 2001.
- 4) 柴田智広、田端宏充、川人光男: 視覚ターゲットのダイナミクス学習に基づく円滑性追跡眼球運動とそのヒューマノイドへの実装, 電子情報通信学会技術報告 NC2000, vol. 100, no. 618, 55-62. 2001.
- 5) Ude, A. and Shibata, T. and Atkeson, C.G.: Real-Time Visual System for Interaction with a Humanoid Robot. Robots and Autonomous Systems (in press)
- 6) Vijayakumar, S., Conradt, J., Shibata, T., and Schaal, S.: Overt Visual Attention for a Humanoid Robot. Proc IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems 2001 (in press)
- 7) Shibata, T. and Schaal, S.: Biomimetic Smooth Pursuit Based on Fast Learning of the Target Dynamics. Proc IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems 2001 (in press)

〔研究者名〕 柴田 智広、Stefan Schaal、Sethu Vijayakumar