展 望

プロジェクトの概要とロボット研究

Overview and Robotics Research of the Project

川 人 光 男^{*1*2} 柴 田 智 広^{*2}

^{*1}国際電気通信基礎技術研究所先端情報科学研究部 ^{*2}科学技術振興事業団 ERATO 川人学習動態脳プロジェクト

Mitsuo Kawato^{*1*2} and Tomohiro Shibata^{*2} ^{*1}Information Science Division, ATR ^{*2}Kawato Dynamic Brain Project, ERATO, JST

1. は じ め に

川人学習動態脳プロジェクトは、ヒト脳の高次機構を感覚運動変換を基本として解明することを主眼に研究を進めている。計算論的アプローチ、心理学・行動学の実験、神経生理学的研究、ロボティクスの実験の四つの研究手法を有機的に組み合わせ、ヒトの高次脳機能のなかでも、学習、思考、言語、意識、注意、コミュニケーションなどの機能を計算論的に明らかにしていくことを目指している。プロジェクトの詳細な説明は、日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8, pp.1074-1080, 2000 の解説論文を参照していただくとして、本稿では、当プロジェクトの簡単な概要と、ロボット研究の意義と成果について述べることにする。

2. 各研究グループの概要

従来の知能の研究はそれが自然の知能に関してにせよ、人工の知能に関してにせよ、機能を入力から出力について縦割りに分割して、モジュールごとの研究を行ってきた。例えば、視覚入力の前処理、特徴抽出、パターン認識、記憶システムでの照合、行動の計画、運動系列の決定、運動の軌道の計画、座標変換、運動制御などである。このように問題を細分化することにより、一つ一つのモジュールの機能を切り出してきて、問題を取り扱える範囲に制限したのである。これが例えば David Marr [1] の、「視覚の目的は二次元の画像から三次元世界を再構築することである」というような成功した計算理論を生み出す前提条件となったのである。しかしこれは同時にこれまでの計算理論の大きな欠点にもなっている。新しい計算理論と神経回路モデルはこのような過去の研究の欠点をふまえて複数のモジュールの統合の研究でなくてはならない [2]。また、脳が自然な環境の中で入力から出力までを首尾一貫して、どのように情

報処理を行っているかを生態学的アプローチに基づいて明らかにすることが必要である。

本プロジェクトでは、(A) 計算論的アプローチ、(B) 心理学・行動学の実験、(C) 神経生理学的研究、(D) ロボティクスの実験の四つの研究手法を有機的に組み合わせ、3 研究グループに分かれ研究を進めている。3 グループはそれぞれ、(A) と (C)、(A) と (B)、(A) と (D) の研究手法を重点としたものになっている。おのおののグループの主な研究テーマを以下に記す。

2.1 計算神経生理グループ

大脳基底核学習モデルを提案し、生理実験と心理・行動実験、非侵襲脳活動計測によって検証・証明することを目指している。従来の理論モデルは眼球運動や手の到達運動など限られた機能の説明しか行えなかったが、最近の知見によれば大脳基底核など運動制御だけにかかわると思われてきた脳部位も、運動と直接関係のない思考・言語・連想にも重要な役割を果たしていることが明らかになってきた。そこで従来の理論をこのような高次機能に拡張することを目指している。特に高次認知機能（手続き学習）の計算・神経回路モデルを、強化学習計算モデルと系列の学習に着目し、研究を進めている。

2.2 計算心理グループ

視覚運動変換に関する様々の計算理論やモデルを検証するための心理行動実験、fMRI などの脳機能非侵襲計測法を有機的に組み合わせた研究を進めている。小脳の新しい部分の計算原理として外界の（道具、視覚刺激、刺激の時間関係、他人の心、脳の他の部位）内部モデルの学習による獲得が考えられる。その内部モデルの存在、活動および、小脳大脳の機能的結合を研究している。

2.3 計算学習グループ

脳神経系の学習能力を理論的に明らかにする学習計算理論の研究を行う。また視覚・聴覚・体性感覚と腕・体幹・眼球運動能力を持つ人間型ロボット（ヒューマノイドロボット）をテストベッドとした脳研究を進めている。特に視覚運動学習の強力な表現・アルゴリズム・ハードウェアを提供するノンパラメトリック・ネットワーク・モデルを研究する。またヒューマノイドロボットの入力から出力への並

原稿受付 2001 年 4 月 19 日

キーワード: Computational Neuroscience, Internal Model, Motor Control, Robotics, Humanoid

^{*1}〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2

^{*2}〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2

^{*1}Soraku-gun, Kyoto

^{*2}Soraku-gun, Kyoto

列重層モジュールをどう学習的に統合するかを研究している。研究実施場所の一部は南カリフォルニア大学で、他はすべて ATR 内にある。

3. ロボット研究の意義と成果

理論を計算の観点から実証するためには、ロボット実験が最終的には不可決であるとの信念から、ロボット研究グループと他の二つのグループの相互作用も深化させてきた。ロボットは、研究の求心力として、様々な理論的な努力、実験データを統合する役目を果たすことが期待される。当プロジェクトではヒトのような柔らかさ、動き、重さ、大きさを持つ全身型ヒューマノイド・ロボット“DB”[3] (図 1 参照)、および 3 リンクの起き上がりロボット[4] (図 2 参照)を開発し、それぞれ研究成果を上げると共に、対外的なデモンストレーションに成功を収めてきた。またプロジェクト期間の後半になって、工学的側面の強い成果にとどまらず、前述のグループ間相互作用がうまく機能し、脳の計算理論により深く踏み込んだ研究が大きく進展した。例えば、DB では脳科学の知見に基づいた眼球運動制御研究が行われている(本特集号「脳科学と眼球運動とヒューマノイド」参照のこと)。最近、霊長類の円滑性追跡眼球運動のモデルが、DB での検証実験を通じて計算学習グループと計算神経生理グループの相互作用によって大きく進歩した[5][6]。また、起き上がりロボットの研究で、現実世界の連続的制御課題という困難に立ち向かうことによって、階層強化学習やロボスト強化学習[7]という系統だった理論が構築できた。

4. お わ り に

プロジェクト立ち上げから 4 年半が経過し、成果の一部が Nature, Proceedings of the National Academy of Sciences, Trends in Cognitive Sciences, Trends in Neurosciences, Journal of Neuroscience, Journal of Neurophysiology, Experimental Brain Research, Neural Computation, Physical Review Letter 等に論文として掲載された。主な掲載論文リストを添付する[8]~[27]。代表的な進歩・発見としては、ヒト小脳内部モデルの存在証明、平衡位置制御仮説と内部モデル仮説の統合、大脳皮質・大脳基底核・小脳の統一学習モデル、階層多重順逆モデル対によるコミュニケーションの研究、下オリブ核のカオスによる低発火頻度符号化、視覚の繰り返し演算とニューロンの情報キャリアー、ロボットの見まね学習、ヒューマノイドロボットの完成と 14 を越える技の獲得などである。詳しくは <http://www.erato.atr.co.jp/> をご参照頂きたい。感覚運動学習の理論とデータを基礎にして、言語を含むコミュニケーションなどヒトの高次認知機能を解き明かす理論的な枠組が構築できた。具体的には、運動制御器官に限らない

図 1 ヒューマノイド・ロボット“DB” (copyright 2000, Peter Menzel/from Robo sapiens: Evolution of a New Species/ The MIT Press)

図 2 起き上がりロボット (合成連続写真)

外界の対象物が小脳内に内部モデルとして獲得されること、複雑な環境や多数の道具に対処するために順モデルと逆モデルの対が多重にしかも階層的に学習されること。順モデルと逆モデルの相互作用は、運動制御、学習、軌道計画に限らず、コミュニケーション一般、さらにはバイオリジカルモーションの認知を含む視覚一般の解決法であることを示した。また、脳の異なる部位の異なる学習法、ニューロンの情報キャリアーなど非常に基本的な問題に正面から取り組んで新しい理論的枠組みを提案している。プロジェクトは残すところ後半年となったが、いよいよこれから理論的枠組みがヒューマノイド・ロボットを媒体として現実世界へ飛び出していくところである。

参 考 文 献

- [1] D. Marr: Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information. Freeman WH and Company, New York, 1982.
- [2] 川人光男: 脳の情報処理モデル, 岩波講座認知科学 第2巻脳と心のモデル, 岩波書店, 1994.
- [3] S. Kotosaka, T. Shibata and S. Schaal: "Humanoid robot 'DB'," In Proc Int Conf on Mach Automat (ICMA2000), pp.21-26, Osaka, Japan, 2000.
- [4] J. Morimoto and K. Doya: "Acquisition of stand-up behavior by a real robot using hierarchical reinforcement learning," In Proc. Int. Conf. Machine Learning, pp.623-630, 2000.
- [5] 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, 第100巻, pp.55-62, 2001.
- [6] 田端宏充, 柴田智広, 川人光男: "MST 野のボビュレーション符合化と神経場モデルによる, 円滑性追跡眼球運動のシミュレーション", 電子情報通信学会技術報告 NC2000, 第100巻, pp.63-70, 2001.
- [7] 森本淳, 銅谷賢治: "ロボスト強化学習", 電子情報通信学会技術報告 NC2000, 第100巻, pp.59-66, 2000.
- [8] C.G. Atkeson, J. Hale, F. Pollick, M. Riley, S. Kotosaka, S. Schaal, T. Shibata, G. Tevatia, S. Vijayakumar, A. Ude and M. Kawato: "Using humanoid robots to study human behavior," IEEE Intelligent Systems Magazine, pp.46-56, 2000.
- [9] E. Burdet, R. Osu, D.W. Franklin, T. Yoshioka, T.E. Milner and M. Kawato: "A method for measuring endpoint stiffness during multi-joint arm movements," J. Biomech., vol.33, no.12, pp.1705-1709, Dec., 2000.
- [10] K. Doya: "What are the computations in the cerebellum, the basal ganglia, and the cerebral cortex?," Neural Networks, vol.12, pp.961-974, 1999.
- [11] K. Doya, H. Kimura and M. Kawato: "Computational approaches to neural mechanisms of learning control," IEEE Control Systems Magazine. (in press).
- [12] S. Kuroda, K. Yamamoto, H. Miyamoto, K. Doya and M. Kawato: "Statistical characteristics of climbing fiber spikes necessary for efficient cerebellar learning," Biol. Cybern., vol.84, pp.183-192, 2001.
- [13] D. Wolpert and M. Kawato: "Multiple paired forward and inverse models for motor control," Neural Networks, vol.11, pp.1317-1329, 1998.
- [14] M. Haruno, D. Wolpert and M. Kawato: "Mosaic model for sensorimotor learning and control," Neural Computation. (in press).
- [15] O. Hikosaka, H. Nakahara, M.K. Rand, K. Sakai, X. Lu, K. Nakamura, S. Miyauchi and K. Doya: "Parallel neural networks for learning sequential procedures," Trends in Neurosciences, vol.22, p.256, 1999.
- [16] R.S. Bapi, K.Doya and A.M. Harner: "Evidence for effector independent and dependent representations and their differential time course of acquisition during motor sequence learning," Experimental Brain Research, vol.132, pp.149-162, 2000.
- [17] M. Okada, T. Fukai and M. Shiino: "Random and systematic dilutions of synaptic connections in a neural network with a nonmonotonic response function," Physical Review E, vol.57, pp.2095-2103, 1998.
- [18] N. Schweighofer, N. Doya and M. Kawato: "Electrophysiological properties of inferior olive neurons: A compartmental model," J Neurophysiol, vol.82, pp.804-817, 1999.
- [19] N. Schweighofer and G. Ferriol: "Diffusion of nitric oxide can facilitate cerebellar learning: A simulation study," Proc. Natl. Acad. Sci. USA, vol.97, pp.10661-10665, 2000.
- [20] H. Imamizu, S. Miyauchi, T. Tamada, Y. Sasaki, R. Takino, B. Putz, T. Yoshioka and M. Kawato: "Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a novel tool," Nature, vol.403, pp.192-195, 2000.
- [21] T. Tamada, S. Miyauchi, H. Imamizu, T. Yoshioka and M. Kawato: "Cerebro-cerebellar functional connectivity revealed by the laterality index in tool-use learning," NeuroReport, vol.10, pp.325-331, 1999.
- [22] R. Osu and H. Gomi: "Multijoint muscle regulation mechanisms examined by measured human-arm stiffness and EMG signals," J Neurophysiol, vol.81, pp.1458-1469, 1999.
- [23] S. Vijayakumar and S. Schaal: "Fast and efficient incremental learning for high dimensional movement systems," In IEEE Int. Conf. on Robot, and Automat., pp.1894-1899, 2000.
- [24] S. Schaal: "Is imitation learning the route to humanoid robots?," Trends in Cognitive Sciences, vol.3, no.6, pp.233-242, 1999.
- [25] H. Miyamoto and M. Kawato: "A tennis serve and upswing learning robot based on bi-directional theory," Neural Networks, vol.11, pp. 1331-1344, 1998.
- [26] T. Shibata and S. Schaal: "Biomimetic gaze stabilization based on feedback-error-learning with nonparametric regression networks," Neural Networks, vol.14, no.2, pp.201-216, 2001.
- [27] A. Ude: "Robust estimation of human body kinematics from video," In Proc IEEE/RSJ Conf on Intelligent Robots and Systems, pp.1489-1494, Oct., 1999.

川人光男 (Mitsuo Kawato)

1953年11月12日生。1976年東京大学理学部物理学科卒業。1981年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年大阪大学助手, 1987年同講師。1988年(株)エイ・ティ・アール視聴覚機構研究所に移る。1992年~2001年(株)エイ・ティ・アール人間情報通信研究所第3研究室長。2000年よりエイ・ティ・アール計算論的神経科学プロジェクト, サイバーヒューマンプロジェクトプロジェクトリーダー。1992年~95年北海道大学電子科学研究所客員教授, 1993年イタリアジェノバ大学客員教授, 1994年より金沢工業大学客員教授, 1996年より科学技術振興事業団川人学習動態脳プロジェクト総括責任者兼任。2000年より奈良先端科学技術大学院大学の連携講座客員教授。計算論的神経科学の研究に従事。米澤賞, 大阪科学賞, 科学技術長官賞, 塚原賞などを受賞。著書に「脳の仕組み」, 「脳の計算理論」等。Neural Networks誌編集長, 国際神経回路学会理事, 日本神経回路学会編集理事・選奨委員, International Association for the Study of Attention and PerformanceのMember of Executive Committee.

柴田智広 (Tomohiro Shibata)

1969年1月19日生。1996年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻修了。工学博士。1996年度日本学術振興会研究員として東京大学大学院に在籍。ロボット視覚の研究に従事。1997年度から科学技術振興事業団 ERATO 川人学習動態脳プロジェクト計算学習グループの研究員となり現在に至る。霊長類に学んだヒューマノイド Eye-Head システムを開発し, 統計学習型神経回路網を応用した運動制御の研究に従事。最近では霊長類の眼球運動制御系の理論モデル構築および開発したヒューマノイド Eye-Head システムによる検証を進めている。日本ロボット学会 1992 年度研究奨励賞受賞。Society for Neuroscience, 電子情報通信学会各会員。(日本ロボット学会正会員)