階層行動アーキテクチャ (適応と学習によるシステムの最適化)

柴 田 崇 徳* 福 田 敏 男**

1. は じ め に

様々な環境で、目的に応じて複雑な行動、作業を行う能力を持つ知的なロボットが広く求められている。そのため、ロボットの知的制御は、人間の思考、感覚、運動を模倣し、同様の制御アーキテクチャを与えることによって達成されると考えられ研究されてきた^{1)~12)}。個別には、作業に関する知識、作業の計画、センサ情報の理解、運動システムのスキルや制御、さらに、環境モデルや操作者である人間との情報交換のためのマン・マシンインタフェースの研究等がある^{13)~16)}。知的制御のためには、これらを統一的に扱うことが必要である。本稿では、知的制御方法として階層的な制御アーキテクチャについて述べる。

ロボットが行動する実際の環境は不確かさを含むため、人間が与える知識や行動規範には限界がある¹⁷⁾。したがって制御のアーキテクチャとあらかじめ与えられた知識を先天的な知能とすると、ロボット自身が様々な環境での行動から経験的に後天的知能を獲得する能力が必要である。このような知識獲得のためには、トップダウン的な人間の教示と、ボトムアップ的なロボットの自律的行動による適応と学習が人工生命(Artificial Life)とも言える知的ロボットに必要である^{64), 65), 71), 72)}。

ニューラルネットワーク(Neural Network: NN)、ファジィ、遺伝アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)は、後天的知能のために有効な技術である。これらの技術は特徴に応じて適用するレベルが異なるが、得意とする所へ個別に適用するだけでなく、融合化、統合化によりそれぞれの短所を相補い長所を生かし、

新たに、より高度な情報処理を行うための研究がなされている。本稿では、知的ロボットのための階層的な制御アーキテクチャの構成、特徴などを概説する。

2. 階層制御アーキテクチャ

ロボットの知的制御は、始めは人工知能(Artificial Intelligence: AI)、特にエキスパートシステムの応用として研究されるようになった。そこでは、記号化された情報の推論、知識獲得とその利用等、主に論理情報処理が研究された。しかし、ロボットに必要な知能と知識は、ロボットが働く現実の世界の物理的特性、幾何学的特徴を含まなければならない。例えば、組立て作業時の作業計画や運動制御に関する知能や部品の寸法、形状、重量、精度、つかみ位置等に関する知識である。これらの知識を用いて知的制御を行うために、制御アーキテクチャの中に、記号を扱うレベルと数値を扱うレベルを含むシステムを構築する必要がある。これらのシステムを統合し知的制御を行うために、人間を規範とした階層型の制御アーキテクチャが提案されてきた。

人間を規範とする上で、Rasmussenは人間の行動を、知識に基づくレベル、ルールに基づくレベル、そしてスキルに基づくレベルの3つの階層構造にカテゴリを分けた(図1)³⁾。そして、スキルに基づくレベルはシグナル、ルールに基づくレベルはサイン、知識に基づくレベルはシンボルを扱うことを述べている。このモデルは低レベルの運動の制御までは含まれていないが、ロボットの知的制御のための階層的な制御構造を与える指針と言える。

人工知能と学習制御を階層的に統合することをFuが提唱し、Saridisは、ロボットの知的制御のために階層的な知的制御として、組織レベル、調整レベル、ハードウェア制御レベルの3つに分けて提案した(図2)^{1), 3), 4)}。組織レベルは外部(人間)からの入力コマンドを受け付け解釈し、またシステムのフィードバック

原稿受付 1993年9月7日

Hierarchical Control Architecture for Intelligent Behavior
-Sophistication of System by Adaptation and Learning

*機械技術研究所

**名古屋大学工学部

図1 Rasmussenの階層モデル

図2 Saridisの階層制御のモデル

情報を解釈する。そして、タスクを定義し、プランニングによって実行順にサブタスクに割り振りする。調整レベルは、上位の組織レベルからの指示を受け、また実行されているそれぞれのサブタスクのプロセスからのフィードバック情報を受ける。そして、最下層でのタスクの実行を調整する。その最下層のハードウェア制御レベルは、プロセスの数学モデルとともに、調整レベルによって定義されるサブタスクと評価関数に基づいて作業を実行するものである。

一方、Albusは、人間の脳と体性感覚情報、運動機能との関係を述べ、小脳のモデルであるCMACを提案し、その学習能力を生かし、マニピュレータの制御方法を提案した^{6),25)}。さらに、人間の思考、感覚、運動の階層性からロボットの階層制御を提案し、これをベースとして、Real-Time Control System (RCS)としてNASREMを提案した^{6),69)}。図3にその概念図を示す。Meystelも、このNASREMのアーキテクチャを用いてロボットの知的制御のためにMulti-

図3 NASREMのアーキテクチャ

resolutional Control Architectureを提案している⁷⁰⁾。NASREMは大きく分けてタスク分解、ワールドモデリング、そしてセンサプロセッシングの3つのモジュールから成り立っている。それぞれのモジュールは階層的なネットワーク構造を持つ。グローバルメモリはデータベースであり、外界の状態を推定したモデルを蓄えておくことができ、各モジュールを助ける役割を果たす。タスク分解モジュールは、上位レベルのタスクの目標を下位レベルでの行動に時間的にも空間的にも分割するよう計画する。各階層のそれぞれのレベルでタスク分割モジュールは、タスク割当て、計画、実行を行う。ワールドモデリングモジュールは、内界、外界の状態をモデル化し評価を行う。ワールドモデルは過去の推移、現在の状態、将来起こり得ることが予想される状態のモデルをそれぞれ持つ。ワールドモデリングのモジュールとともに、状態変数や、マップ、対象物や事象のリストや属性などがグローバルメモリの知識ベースに蓄えられている。ワールドモデルは、センサシステムの情報に基づくグローバルメモリ知識ベースを維持し、タスクや外界の状態に応じたセンサ入力予測値を対応するセンサモジュールに与え、対応するタスク分解モジュールの実行システムからの外界情報に関する質問に答え、またタスク分解モジュールの計画システムによる仮定的な質問に対しても返答する。センサプロセッシングモジュールはパターンを認識し、事象を検出し、時間や空間を超えてセンサ情報のフィルタリングや、統合を行う。センサプロセッシングモジュールは、ワールドモデルの予測と、観測された結果を比較し、相関や違いを計算する。新しく検出された事象や対象物や関係をワールド

モデリングモジュールを用いてグローバルメモリデータベースに記憶する。一方存在しない事象や対象物や関係は消去される。それぞれのレベルにはオペレータのインタフェースを備える。したがって、ロボットは必ずしも自律型である必要はなく、テレオペレーションなどの機能を有することができる。時間の概念では、1つのタスクの長さが異なり、下位になるほど短く、上位レベルが計画して下位レベルが実行する。フィードバック情報で、下位レベルの失敗を検出したとき、すぐにサブタスクを再計画する。

NASREMの機能的構成は非常に優れていると考えられるが、実際には下位のサーボレベルとプリミティブレベルだけでシステムが構成され、実験によって有効性が示されている。更に上位を構成するためには、具体的な方法を検討する必要がある。NASREMのシステム構成は人間が設計し、その知識を人間が与えるトップダウン的なシステムであると言える。上位レベルでの外界モデルの表現方法、各レベルをリンクするためのインタフェース、知識の獲得方法が問題である。

Brooksは、自律ロボットが行動する実世界の環境を記号化することが困難であること、AIの問題解決能力の不十分さ、記号的に計画された解に基づく行動への低い信頼性を問題であるとし、昆虫などの自律システムを模倣したサブサンクションアーキテクチャを提案した¹⁷⁾。従来のAI的手法とはまったく異なるが、階層的なモジュールの構成で、上位レベルが下位レベルを包括し、優先順位を持っている(図4)。その構造は最下層から順に上位レベルにボトムアップで構成される。しかし、学習能力はなく固定的であり、上位レベルを構成しようとする高度な設計技術を必要とする。また内界、外界のモデルがない場合、推論やコミュニケーションを必要とするような複雑な作業を行うことはできない。したがって、一台のロボットが自律的に行動することができても、複数台で分散的に協調動作を行うような作業を行うことが不可能である。それでも、従来のAI的手法に対するインパクトは大きく、多くの研究者が応用している。

近年は、ロボットマニピュレータによって組立てなどの高度な作業を行わせることを目的とする、階層的な制御方法の研究が多い。産業用ロボットにおいては、動作教示方式を基礎としている。しかし知能ロボットは、教示なしに環境や作業の変化に適応することが望まれる。そこで、そのような環境モデルの変化や誤差に対しても、器用に動作し作業を達成する能力、

図4 サブサンクションアーキテクチャ

スキルの研究がなされてきた^{13),14),15)}。スキルは制御の階層構造の中位にあり、上位と下位を円滑に結ぶ役割をする。特定の作業だけでなく各種の作業に関するスキルを蓄積することが望まれる。

1台のロボットで複雑な作業を行うと階層アーキテクチャ内で情報の流れが多く、かつ複雑になるため情報伝達が遅れてしまう。したがって、1台のロボットでなく複数台のロボットによって分散的にタスクを実行することが望まれる。このとき、完全な自律分散型システムであると作業能率を最適にすることは保証されない。したがって、階層的にリーダーが存在し、ある程度集中的にタスクの分割を行い、そのサブタスクを協調しながら複数のロボットで分散的に行うミックス型のシステム形態が望ましい。しかも、その形態はタスクに依存して自己組織的に決定されることが望ましい。このような目的のために、エントロピーを用いてリーダーの数やシステムの効率を評価する方法が研究されている⁶³⁾。

従来の研究では、階層的な制御アーキテクチャを構成することによって、知的制御を行えるとして様々なアーキテクチャが議論されてきた。そこでは、複雑なタスクを扱う場合には、トップダウン的にシステム設計者の能力や、作業に依存した知識を与え、主に特定の既知の環境を扱うことによって、知的な行動をロボットがするようになされてきた。しかし、知識の限界や環境の不確かさを解決するためには、適応と学習の機能をシステムが持つことが必要である。また階層的な制御アーキテクチャを構成する上で、数値を扱う現実の世界と論理的な記号の世界との接点をどのように扱うかが重要である。つまり環境のモデル化方法、センサからの信号を処理し記号に変換する方法、作業に関する知識の表現方法や学習方法等が重要である。これらの機能は後天的な知能として、ソフトウェアに依存する度合いが高い。次章以降にこれらを達成するために有効な方法としてNN・ファジィ・GAを用いる方法を示す。

3. ニューロ、ファジィ、遺伝アルゴリズムの概要

ロボットの知的制御のため、AIとともにNN・ファジィ・GAを階層的制御構造のそれぞれのレベルで、あるいは各レベルを結ぶように、統合、融合化しながら適用する研究がなされている(図5)^{19)~62), 67), 68)}。NNは神経回路網をシンプルにモデル化したものであり、並列処理、学習機能、自己組織化能力など多くの優れた特徴を有している^{18), 19)}。そして、連想記憶、パターン認識、総合的判断などの情報処理を得意としている。ファジィ理論は、曖昧性を取り扱うシステムとして広く使用されている。「やや良い」「やや悪い」といった主観的評価を、メンバーシップ関数と称する特性関数で体系化したものである。従来のIf.., then..ルールはデジタル的評価を下すものであったのに対し、ファジィ理論はその中間値をとり得るものである^{44), 45)}。GAは遺伝子情報を用いた生物の進化の過程を模倣した最適化法の1つである⁵⁵⁾。アルゴリズムは世代と呼ばれるステップで進む。最適化問題では、解を個体で表現し、評価関数を定義する。個体群の中で、評価値の高い個体を次の世代に生き残るように淘汰し、交叉や突然変異の遺伝操作により増殖を行い、その繰り返しによって進化させる。個体は、関数空間のサンプル点と見ることができ、多峯性の解空間に対して、個体群によるグローバルな多点探索を勾配情報を用いずに行えることが特徴と言える。

階層的な制御アーキテクチャは、数値信号と記号を扱う必要があり、その信号変換のためにNN、ファジィを用い、AIで論理的推論を行うための前処理や後処理に用いることができる。これらの信号変換の仕方

や違いについては、参考文献を参照されたい⁷¹⁾。GAは、試行錯誤的な探索を行うので、知識獲得の上でオペレータである人間が、予想しない結果を発現することが期待できる。個体を直接的に記号表現したり、NN、ファジィによって間接的に数値を扱うことも可能である。これらNN、ファジィ、GAを用いた階層的知的制御について次章に述べる。

4. 階層的知的制御

人間に近い動作ができる知的ロボットには、センサシステム、アクチュエータの制御、環境に適合した制御戦略のための論理判断が必要である。これらの要素を統合して制御系を構成するための、階層的知的制御システムについて述べる^{10), 11), 12), 47), 72)}。

システムは、学習レベル、スキルレベル、適応レベルの3つの制御のレベルから構成されている(図6)。学習レベルは認識と計画によって制御戦略を生成する。認識レベルは、If.., then..ルール、NN、ファジィを様々なセンサモジュールで数値を記号化するためのセンサシステムとのインタフェースとして用い、戦略決定のための決定木の節として用いる。知識に基づき必要なセンシングを能動的に行い、細かな認識を行う。複数のセンサ情報に基づく推論によりセンサフュージョンやメタ知識を形成する。NNを用いてセンサ情報を分類する場合、新たな知識として未学習のパターンを追加する必要があることが多い。この場合、構造化したNNが有効であり、システムの可変性を高める⁴³⁾。認識後、計画レベルは、タスク、軌道等をデータベースにあるモデルや知識を用いて計画する。制御戦略決定後は、データベースから適応レベルに対して、制御目標や制御ゲイン、コントローラにあるNNに対する学習済み結合荷重等を与える。このように、

図5 インテリジェントシステムのためのAI、ニューロ、ファジィ、GAの統合と融合

図6 ニューロ、ファジィ、GAを用いた階層的知的制御システム

学習レベルはフィードフォワード制御として、下位のレベルに環境特性に合わせた制御戦略を与え、同時に下位レベルの制御結果を評価する。評価には、人間オペレータとのインタフェースとしてファジィを用いることも有効である⁶²⁾。

スキルレベルは、環境変化に対し適応レベルの制御の目標値を修正するだけでよい場合に、時間のかかる論理的推論を行わずに作業のやり方を与える。人間のスキルをファジィで表現する方法や、複数の既知データから学習するファジィ NN による方法が有効である⁴⁷⁾。獲得されたファジィ NN の内部ルールは人間のスキルを表現し、メンバーシップ関数は記号情報として上位レベルで用いる。

適応レベルは、制御ゲインを調節、あるいは補償するものである。特に非線形なシステムやその補償は NN が得意である。ダイナミックな NN を用いたコントローラは、非線形性が強く、不確かさを含むダイナミックな系の制御には有効である^{36)~41)}。学習レベルから与えられる制御戦略は、データベース上の記号的な 1 点であるため、大まかであり実際の環境特性とは若干異なっている可能性が高い。そのような記号から数値への変換によって生じる不確かさを NN による適応によって補償する。

学習レベルにおける推論のための知識を獲得するための長時間の学習プロセスとして、まずボトムアップ的に下位レベルにおいて、試行錯誤によって環境に適応する。その結果に対するトップダウン的な人間による教示や評価を用い、学習レベルは知識を獲得、更新する。試行錯誤の振り方を決めるには GA が有効である。

階層的知的制御は、複数ロボットシステムにおいても有効である。複数ロボット間で作業空間、作業道具等の資源を共有する場合、競合により衝突やデッドロックが生じ得る。この競合の解消のため、待ち動作等を行うと作業効率が落ちる。資源を有効利用するため、全体で最適な計画を立てることが必要である。このような、大規模な計画には複数ロボットシステムを階層化し、分散と集中をミックスし最適化を行うことが有効である。このとき、組合せの爆発などの問題が生じるが、最適化法の 1 つとして GA が有効である^{56), 57)}。また、各ロボットが自律的行動の中で、作業の繰り返しからほかのロボットの動作を予測できるように学習し、協調的動作によりシステムの効率を上げることができる。このとき、学習によって獲得された経験や環境を表現するには、ファジィや NN を用

いることが有効であり、そのような表現を用いながら最適化を行うには、勾配情報を用いない GA が有効である⁵⁸⁾。

以上のように、階層的な制御アーキテクチャの中で、AI、ファジィ、ニューロ、GA を統合、融合することによって、先天的知能を備え、後天的にボトムアップとトップダウンの統合によって学習する知的システムを構築することが可能である^{71), 72)}。

5. ま と め

人間の思考、感覚、運動を模倣し知的なシステムを構築することを目的とした、階層的な制御アーキテクチャの研究の歴史は古く、様々な手法が研究されてきている。しかし、トップダウンに知識を与えるだけでは、真に知的なシステムを構築することができず、ロボットの自律的な行動を基本としたボトムアップ的な知識獲得行動、つまり適応と学習が重要である。そのような後天的知能のために、NN、ファジィ、GA は非常に有効である。階層的な制御アーキテクチャに適用することによって、自律ロボット、自律分散システム、自己組織化システム、そして進化型ロボットシステム研究への発展が期待される。

参 考 文 献

- 1) K. S. Fu, "Learning Control System and Intelligent Control Systems: An Intersection of Artificial Intelligence and Automatic Control," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-16-1, pp. 70-72 (1971)
- 2) A. Freedy et al., "A Computer-Based Learning System for Remote Manipulator Control," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-1-4, pp. 356-363 (1971)
- 3) J. Rasmussen, "Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models," IEEE Trans. on SMC, Vol. 13, pp. 257-266 (1983)
- 4) G. N. Saridis, "Toward the Realization of Intelligent Controls," Proc. of the IEEE, Vol. 67-8, pp. 1115-1133 (1979)
- 5) G. Saridis, "Intelligent Robotic Control," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 28-5, pp. 311-321 (1983)
- 6) J. S. Albus, "Brains, Behavior, and Robotics," McGraw-Hill (1981)
- 7) 福田, "極限作業用知能ロボット", マグロウヒル (1986)
- 8) 白井, 井上, "知能ロボット研究の展望—モデルベース・ロボティクス—", 日本ロボット学会誌, Vol. 5-6, pp. 462-469 (1991)
- 9) 辻, "知的ロボティクスの幾つかの問題", 日本ロボット学会誌, Vol. 9-1, pp. 79-84 (1991)
- 10) 柴田他, "神経回路モデルによるロボット・マニピュレータの位置・力制御の研究(第5報)", 機論, C 編, Vol. 57-540, pp. 2659-2666 (1991)

- 11) 柴田他, “神経回路モデルによるロボット・マニピュレータの位置・力制御の研究(第6報)”, 機論, C編, Vol. 58-549, pp. 1442-1449 (1992)
- 12) T. Shibata and T. Fukuda, “Hierarchical Intelligent Control of Robotic Motion,” IEEE Trans. on Neural Networks (1992) (to appear)
- 13) 末広, 高瀬, “スキルに基づくマニピュレーションシステム”, 日本ロボット学会誌, Vol. 8-5, pp. 551-562 (1990)
- 14) 小菅, “テレロボティクスにおけるスキル獲得とその利用”, 第8回日本ロボット学会学術講演会, pp. 585-588 (1990)
- 15) S. Liu and H. Asada, “Transferring Manipulative Skills to Robotics: Representation and Acquisition of Tool Manipulative Skills Using a Process Dynamics Model,” Trans. of the ASME, Journal of DSMC, Vol. 114, pp. 220-228 (1992)
- 16) B. J. McCarragher and H. Asada, “A Discrete Event Approach to the Control of Robotic Assembly Tasks,” Proc. of IEEE Conf. on R & A, Vol. 3, pp. 331-336 (1993)
- 17) R. A. Brooks, “A Robust Layered Control System for a Mobile Robot,” IEEE J. Robotics and Automation, RA-2, pp. 14-23 (1986)
- 18) D. E. Rumelhart et al., “Parallel Distributed Processing,” MIT Press (1987)
- 19) T. Fukuda and T. Shibata, “Theory and Applications for Neural Networks for Industrial Control Systems,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 39-6, pp. 472-489 (1992)
- 20) P. J. Werbos, “Backpropagation Through Time: What It Does and How to Do It,” Proc. of the IEEE, Vol. 78-10, pp. 1550-1560 (1990)
- 21) 福田, “石上画像処理エキスパートシステムによるマイクロキャリア上動物細胞の視覚認識・計測法(第4報, GAによるニューラルネットワーク初期値探索問題)”, 機論, C編, Vol. 59-561, pp. 1482-1488 (1993)
- 22) 福田他, “遺伝アルゴリズムを用いたリカレントニューラルネットワークの学習”, 機論, C編, Vol. 59-564, pp. 2298-2304 (1993)
- 23) 柴田他, “リカレントニューラルネットワークを用いたガタの補償制御—遺伝アルゴリズムによる教師なし学習—”, SICE 93 講演会予稿集 (1993)
- 24) B. Widrow, “Generalization and information Storage in Network of Adaline “Neurons”, In Self-Organizing Systems-1962,” pp. 435-462, Spartan Books (1962)
- 25) J. S. Albus “A New Approach to Manipulator Control: The Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC),” Journal of DSMC, pp. 220-227 (1975)
- 26) S. Grossberg and M. Kuperstein, “Neural Dynamics of Adaptive Sensory-motor Control, Pergamon Press (1989)
- 27) 川人, “随意運動制御における適応と学習”, 日本ロボット学会誌, Vol. 4-2, pp. 184-193 (1986)
- 28) 鶴田他, “神経回路モデルによるロボットの力制御(1 自由度マニピュレータの制御)”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7-1, pp. 47-51 (1989)
- 29) 福田他, “神経回路網によるロボット・マニピュレータの位置・力制御の研究(第1報)”, 機論, C編, Vol. 56-527, pp. 210-216 (1990)
- 30) P. J. Werbos, “A Menu of Designs for Reinforcement Learning Over Time,” in W. T. Miller, R. S. Sutton, and P. J. Werbos (Eds.), Neural Networks for Control, pp. 67-95, MIT Press (1990)
- 31) K. S. Narendra and K. Parthasarathy, Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks,” IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 1-4-27 (1990)
- 32) 橋本他, “視覚情報によるマニピュレータの位置・姿勢制御—ニューラルネットワークの利用—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 8-4, pp. 390-396 (1990)
- 33) T. Fukuda and T. Shibata, “Reserch Trends in Neuromorphic Control,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 2-4, pp. 1-15, (1991)
- 34) 藪田, 山田, “ニューラルネットによるロボットの力制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9-2, pp. 224-231 (1991)
- 35) 橋本他, “ニューラルネットによる最適制御の自己組織化—プランコ漕ぎロボットの学習制御—”, ロボ・メカ'91 講演論文集, pp. 351-354 (1991)
- 36) 福田他, “神経回路モデルによるロボット・マニピュレータの位置・力制御の研究(第2報)”, 機論, C編, Vol. 57-535, pp. 866-873 (1991)
- 37) 福田他, “神経回路モデルによるロボット・マニピュレータの位置・力制御の研究(第3報)”, 機論, C編, Vol. 57-535, pp. 874-881 (1991)
- 38) 柴田他, “神経回路モデルによるロボット・マニピュレータの位置・力制御の研究(第4報)”, 機論, C編, Vol. 57-539, pp. 2305-2312 (1991)
- 39) M. I. Jordan, “Supervised Learning and System with Excess Degree of Freedom,” COINS technical Report, Vol. 88-27, pp. 1-41 (1988)
- 40) 福田, 柴田, “ニューラルネットワークを用いた位置・力の適応制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 6-6, pp. 778-783 (1991)
- 41) T. Fukuda et al., “Neuromorphic Control for Robotic Manipulators, —Adaptation and Learning—,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 39-6, pp. 497-503 (1992)
- 42) 福田他, “センサ・インテグレーション・システムの研究(第1報)”, 機論, C編, Vol. 56-532, pp. 3300-3305 (1990)
- 43) 福田他, “新規パターンを追加学習するための新しいニューロンモデル”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 29-3 (1993)
- 44) L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” Information and Control, Vol. 8, p. 228 (1965)
- 45) 菅野, “ファジィ制御”, 日刊工業新聞社, p. 177 (1988)
- 46) E. H. Mamdani, “Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant,” Proc. of IEEE, Vol. 121-12, pp. 1585-1588 (1974)
- 47) T. Shibata and T. Fukuda, “Skill Based Control by Using Fuzzy Neural Network for Hierarchical Intelligent Control,” Proc. of IJCNN '92-Baltimore, Vol. 2, pp. 81-86 (1992)
- 48) 林, 馬野, “ファジィ・ニューラルネットワークの現状と展望”, 日本ファジィ学会誌, Vol. 5-2, pp. 178-190 (1993)
- 49) 石川, “ファジィ制御を用いた自律型移動ロボットの誘導方式の検討”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9-2, pp. 149-161 (1991)
- 50) 福田他, “遺伝アルゴリズムを用いたファジィモデルの学習”, 電気学会論文誌, Vol. 113-C-7, pp. 495-501 (1993)
- 51) D. A. White and D. A. Sofge (Ed.), “Handbook of Intelligent Control-Neural, Fuzzy, and Adaptive

- Approaches", Van Nostrand Reinhold (1992)
- 52) M. A. Lee and H. Takagi, "Integrating Design Stage of Fuzzy Systems using Genetic Algorithms," Proc. of IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, pp. 612-617 (1993)
 - 53) J. M. Keller et al., "Interpretation of Nodes in Networks for Fuzzy Logic," Proc. of IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems, pp. 1203-1207 (1993)
 - 54) C. L. Karr and E. J. Gentry, "Fuzzy Control of pH Using Genetic Algorithm," IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 1-1, pp. 46-53 (1993)
 - 55) D. E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley (1989)
 - 56) 柴田他, "Genetic Algorithm を用いた移動ロボットの最適経路計画", 機論, C編, Vol. 58-553, pp. 1442-1449, (1992)
 - 57) 柴田, 福田, "Genetic Algorithm を用いた移動ロボットの最適経路計画(第2報)", 機論, C編, Vol. 59-560, pp. 1134-1141 (1993)
 - 58) 柴田, 福田, "マルチエージェントシステムの遺伝アルゴリズムを用いた学習による進化的協調行動", 日本ロボット学会, Vol. 11-8 pp. 1272-1280 (1993)
 - 59) J. Koza, "Genetic Programming on the Programming of Computers by Means of Natural Selection," MIT Press (1992)
 - 60) J. D. Schaffer et al., "Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks: A Survey of the State of the Art," Proc. of IEEE COGANN-92, pp. 1-37 (1992)
 - 61) R. C. Eberhart, "The Role of Genetic Algorithm in Neural Network Query-Based Learning and Explanation Facilities," Proc. of IEEE COGANN-92, pp. 169-183 (1992)
 - 62) 柴田, 福田, "ファジィ評価を用いた遺伝アルゴリズムによるロボットの行動計画", 計測自動制御学会論文集 (1993) (掲載予定)
 - 63) 植山他, "再構成可能自己組織化システムの研究(第10報)", 機論, Vol. 58-549, pp. 1466-1473 (1992)
 - 64) C. G. Langton (Ed.), "Artificial Life," Addison Wesley (1989)
 - 65) C. G. Langton et al., (Ed.), "Artificial Life II," Addison Wesley (1992)
 - 66) 田野他, "多足歩行機械の学習による歩容獲得", 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1129-1132 (1992)
 - 67) J. J. Grefenstette, "The Evolution of Strategies for Multiagent Environments," Adaptive Behavior, Vol. 1-1, pp. 65-90 (1992)
 - 68) R. D. Beer, "Evolving Dynamical Neural Networks for Adaptive Behavior," Adaptive Behavior, Vol. 1-1, pp. 91-122 (1992)
 - 69) J. A. Albus et al., "NASREM the NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture," Proc. of the 20th ISIR, pp. 1-7 (1989)
 - 70) A. Meystel, "Multiresolutional Recursive Design Operator for Intelligent Machines," Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Intelligent Control, pp. 79-84 (1991)
 - 71) 福田, 柴田, "インテリジェントシステムのためのニューロ・ファジィ・GA の統合・融合化技術の展望", 機論, C編, Vol. 59-564, pp. 2282-2289 (1993)
 - 72) T. Shibata, "Hierarchical Intelligent Control of Robotic Motion," Ph. d. Dissertation, Nagoya University (1992)

柴田崇徳

(Takanori SHIBATA)

1967年2月10日生。1992年名古屋大学大学院電子機械工学専攻博士課程修了。工学博士。日本学術振興会特別研究員，名古屋大学工学部機械情報システム工学科助手を経て，1993年より通産省工業技術院機械技術研究所ロボット工学部バイオロボティクス課研究員。IEEE, JSME, SICE, SOFT 他。の会員。

(日本ロボット学会正会員)

福田敏男 (Toshio FUKUDA)

1948年12月12日生。1971年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1977年東京大学大学院博士課程修了，工学博士。通産省工業技術院機械技術研究所研究官，及び東京理科大学工学部機械工学科助教授を経て，1989年4月より名古屋大学工学部機械情報システム工学科教授。IEEE IES Vice President, IEEE NNC Secretary, IEEE R & A TC 委員長等歴任。

(日本ロボット学会正会員)