CMACを用いたオンライン学習による 全方向移動ロボットの経路追従制御

正 員 藤 澤 正一郎 (高松高専)

学生員 黒 住 亮 太 (広島大学)

学生員 大 西 諒 (高松高専)

学生員 川 田 和 男 (広島大学)

正 員 山 本 透 (広島大学)

Path Tracking Control by Online Learning using CMAC for an Omnidirectional Mobile Robots

Shoichiro Fujisawa, Member (Takamatsu National College of Technology), Ryota Kurozumi, Student Member (Hiroshima University), Ryo Onishi, Student Member (Takamatsu National College of Technology), Kazuo Kawada, Student Member, Toru Yamamoto, Member (Hiroshima University)

In this study, we configured a path tracing control system that incorporated online learning using CMACs. The system has excellent performance for applying learning to general purposes, such as for omnidirectional mobile robots. Though CMAC has already been applied to process control and control of articulated robots, we adapted it for controlling mobile robots in this study. Generally speaking, traveling bodies must have high mobility in a narrow environment. An omnidirectional mobile robot with excellent traveling performance was used as the actual machine. The robot performed online learning using CMAC, a kind of neural network. In this paper, we propose an adaptive learning control system to implement path tracking control of mobile robots that travel with online input of the target value and that use the result of learning as the output value. A visual servoing system is used for this path tracking control system. We also report the results of various experiments on traveling by online learning. During the experiments on traveling, we were able to obtain excellent results from online learning and anticipate that teleoperation technology combining CMAC online learning and a visual servoing system will be applied to care-taking devices and other systems.

キーワード：CMAC, オンライン学習, ビジュアルサーボ, 全方向移動ロボット, 経路追従制御

Keywords: CMAC, Online learning, Visual servoing, Omnidirectional mobile robot, Path tracking control

1. はじめに

今日のコンピュータの処理速度の高速化や画像処理技術の急速な発達にともなう、画像認識によるロボットの遠隔操縦などのテレオペレーションの研究^{(1)~(5)}が盛んであり、今後益々発展すると思われる。テレオペレーションにおいて、すべてを操縦者のスキルに頼る遠隔操縦から、その一部を学習機能を付加したシステムが受け持つ遠隔操縦とすることで、操縦者の負担を軽減することができる。適応学習制御において、ニューラルネットワーク (Neural Network: NN) の一種である小脳演算モデル (Cerebellar Model Articulation Controller: CMAC)^{(6) (7)}がプロセス制御⁽⁸⁾や多関節ロボット⁽⁹⁾の制御に適用されている。本論文ではCMACを全方向移動ロボットなどの移動体の制御に用いる

ことの有用性を示すことを主眼におく。CMACの特長として汎化能力が高く、従来の階層型 NN を用いたコントローラと比較して学習が早い点が挙げられる。その代わり、学習後に得られる制御誤差の精度が階層型 NN ほど高くないという問題点が存在する。理想的には環境の変化に対して即応性の高い学習を行い、最終的に精度の高い制御を実現するコントローラを提案することが望まれるが、全方向移動ロボット^{(10)~(14)}の経路追従制御などにおいては、制御精度よりもむしろ環境の変化に対する適応性の高い学習の実現が望まれる。そこで本論文では、CMACを用いたコントローラを提案し、これを利用した全方向移動ロボットの経路追従制御システム⁽¹⁵⁾の構築を行った。この経路追従制御システムにはビジュアルサーボシステム^{(16) (17)}を組み合わせている。全方向移動ロボットは機構上車輪の接地面積

図1 実験のシステム構成図

Fig. 1. Diagram of the experiment system

が小さく路面とのすべりが生じやすく、これによりシステムは非線形性を示す。システムの特徴は路面状態によって変化し、オンライン学習⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾による非線形制御が必要となる。そこで、CMACを用いたオンライン学習による非線形制御コントローラを構築した。従来の階層型NNコントローラとの学習速度の比較からCMACの環境への即応性を示し、入力の変定やメモリの割り当てを工夫することで学習速度の向上および制御精度の向上を図った。今後はテレオペレーション分野における人間の操作と学習制御を組み合わせた半自律機能を持つ実システムへの応用が期待される。

2. システム構成

経路追従制御のシステムとして、ビジュアルサーボシステムとCMACを組み合わせたシステムを構成した。本実験の移動ロボットには全方向移動ロボットを使用した。以下にそれらのシステムについて述べる。

〈2・1〉ビジュアルサーボシステム 今回使用したビジュアルサーボシステムは画像処理システムとフィードバック制御システム⁽³⁾から構成されている。そのビジュアルサーボシステムを図1に示す。CCDカメラからの画像を画像処理ボードにより取り込み、その画像データから画像処理プログラムにより座標データを抽出する。生成された座標データはフィードバック制御システムに送られる。

図2にロボットに取り付けられたマーカを画像処理により抽出作業の様子を示す。マーカはロボットの車体中心位置と端の2点に取り付けている。取込まれた画像から画像処理プログラムによりロボットに取り付けられたマーカを認識して、マーカの中心座標の検出を行う。中心座標の検出のためにマーカの重心を計算する。2点のマーカの座標を同時に検出し、この2点の座標からロボットの位置と姿勢角を計算する。画像処理システムによって連続的に取込

図2 CCD画像によるマーカの検出

Fig. 2. Detection of marks using CCD image

まれた画像から毎回画像処理プログラムによって座標データが抽出される。なお、今回使用した画像処理システムでは60Hz程度のサンプリング周期での画像取込みが可能である。カメラがロボットを見失った場合、制御状態が不安定に陥ることがある。これに対しては、カメラがロボットを見失った場合に緊急停止するアルゴリズムを追加するなど工夫が必要となる。

〈2・2〉フィードバック制御システム 画像処理システムによって抽出された座標データは、コンピュータの共有メモリにストアされる。このデータをブロックダイアグラムシミュレーター(Simulink)が読み取り、目標値との偏差を算出する。偏差に基づいた制御量は作成した制御アルゴリズムによって導出される。この制御量はDSP(Digital Signal Processor)ボードから移動ロボットの駆動モータに送られ、各種の制御が行われることになる。制御システムのサンプリング周期は100Hzとした。画像処理システムのサンプリングタイムは約60Hzであり、制御システムのサンプリング周期もこれにより制限されるという問題がある。今回用いた全方向移動ロボットの走行実験においては実用上問題がみられなかった。

〈2・3〉全方向移動ロボット 移動ロボットには全方向移動装置を使用した。使用した全方向移動ロボットを図3に示す。移動ロボットは、狭い環境下等で高度な移動性能が要求されるが、このような高度な移動が可能な全方向移動装置が注目を浴びている⁽¹¹⁾。今回使用した全方向移動装置は、車軸に垂直な多数の軸を車軸の周囲に設け、その各軸にローラを取り付けたローラ付き車輪を、図に示すように車軸が直角に交わるように車体の四辺に取り付けた構造となっている。

〈2・4〉CMAC 経路追従制御用のコントローラにCMACを用いる。CMACは人の小脳皮質内の情報処理機構の数学的モデルである。CMACは、分散共有メモリ構造を持つ表参照方式による非線形関数学習法である。CMACのモデルの概要を図4に示す。CMACは次のように一連

図3 全方向移動ロボットの外観
Fig. 3. Complete view of the omnidirectional mobile robot

図4 CMAC の概念図
Fig. 4. Conceptual figure of CMAC

の写像関係で定義される。

$$\begin{matrix} f_1 & f_2 & f_3 & \dots \\ S \rightarrow M \rightarrow A \rightarrow u \end{matrix} \quad (1)$$

ただし、 S は入力ベクトル、 M は S をコード化するのに用いられる中間値、 A は M に従って参照する表の荷重、 u は A の表の荷重の和によって得られる CMAC の出力であり、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} u &\equiv h(s) \\ h &\equiv f_3 \circ f_2 \circ f_1 \end{aligned} \quad (2)$$

CMAC は複数の荷重表を参照し、加算することで解を決定する構造をもち、関数を実現するのに必要なメモリ量を低減することが可能である。また、教師信号を用いた学習を行う際、入力点（学習点）の周辺の入力に対しても学習効果を波及させることができる汎化作用のために、階層型 NN と比較して、必要な学習回数を大幅に減らすことが可能である。

図5 CMAC を用いた制御系のブロック線図
Fig. 5. Block diagram of the control system using CMACs

〈2・5〉 全方向移動ロボットに対応したコントローラの設計
図5に全方向移動ロボットに用いた CMAC の制御系のブロック線図を示す。CMAC のコントローラは、入力に誤差、誤差速度（誤差 1 階差分）および目標値を入力する 3 次元入力で構成されている。CMAC は本来、表参照により静的な写像を行い、出力を生成する。そこに、誤差信号に加えて誤差の差分を入力することで、動的な特性を捉えようとしている。さらに入力に目標値をとることで、目標値の変化に応じてそれぞれの平衡点近傍で学習を行うことができ、非線形なシステムに対してより有効な制御が可能となると考える。これらについては実験を行い検証する。

これらの入力を写像して複数の表の荷重 $W_h(t)$ を参照する。各表の荷重の総和が CMAC の出力となる。また学習は、次式によって荷重を更新することで行う。

$$W_h^{new}(t) = W_h^{old}(t) + g(t) \frac{y_m(t) - y(t)}{K} \quad (3)$$

ただし、 $h = 1, 2, \dots, K$ で、 K は参照する荷重の総数を示す。今回は K を 10 とした。さらに、各入力に対して 10 個の変数を割り当て荷重表を構成した。そして CMAC の汎化作用により、各次元において大きさが 40 の入力空間を確保した。 $g(t)$ は荷重修正の割合を決定する学習係数であり、次式のように参照モデルの出力とシステムの出力の差に従って可変とした。可変とすることでより学習速度を速めることが期待できる。 a, b, c は適当な正の定数である。

$$g(t) = \frac{1}{c + a \cdot \exp(-b|y_m(t) - y(t)|)} \quad (4)$$

従来から提案されている CMAC では、コントローラの入力が荷重表に写像可能な範囲を超えると出力を生成できなくなる。そこで、本論文では次式に示すシグモイド関数を用いた。

$$f(x) = \frac{a}{1 + e^{-x}} - \frac{a}{2} \quad (5)$$

ただし、 x は入力、 a は荷重表写像に可能なメモリ範囲とする。シグモイド関数の出力 $f(x)$ をコントローラに入力することで写像範囲を荷重表のメモリ範囲に制限する。また、シグモイド関数を用いることで入力が小さい領域に多くのメモリを割り当てることができる。結果として入力が小さい領域での制御の精度が向上する。今回のコントロー

図 6 駆動系のブロック線図

Fig. 6. Block diagram of the driving unit

ラは 3 次元の入力のうち、誤差および誤差速度 (誤差 1 階差分) については、これを 0 にすることを目標として制御を行うため、シグモイド関数を用いた。

また、全方向移動ロボットは x 軸方向、 y 軸方向、 z 軸回り姿勢角のそれぞれが独立した自由度を有している。この 3 自由度に対して駆動輪は 4 輪で駆動している。そこで、図 6 に示すように、 x 軸方向、 y 軸方向、姿勢角に対応した 3 つの CMAC をコントローラとして用いて、全方向移動ロボットを駆動することを考えた。それぞれの CMAC の入力にはそれぞれ x 軸、 y 軸、 z 軸回り姿勢角に対応して、その変位誤差と変位誤差の差分を用い、それぞれに x 軸、 y 軸方向の速度、姿勢角速度を出力する。CMAC から出力された x 軸、 y 軸方向の速度、姿勢角速度から全方向移動ロボットの各駆動輪の回転速度を計算し、出力する。そして全方向移動ロボットの変位を画像処理によってとらえ、CMAC への入力としてフィードバックすることになる。

3. 経路追従走行の実験

オンライン学習による各種の走行実験を行った。実機の制御に必要な目標値信号 (経路) は、 x 軸・ y 軸方向の走行制御信号および本体の z 軸回りの姿勢角制御信号の 3 種類である。例えば円周上の経路をを走行させる場合、目標値として x 軸走行制御信号には余弦波を、 y 軸走行制御には正弦波を入力し、姿勢制御にはロボット姿勢角を保つため定数を目標値とした。これらの目標値に従って、CMAC または階層型 NN を学習させ、その出力により制御された結果が CCD カメラにロボットの位置及び姿勢角の情報として取込まれ、実機の経路追従結果として出力される。実験では初期設定として、姿勢角はゼロ、走行開始位置は円の中心 (原点) 付近とした。

〈3・1〉 各 手 法 従来法としてニューラルネットワークコントローラによる制御実験を行い比較対象とした。また、次に示す各種の CMAC を用いて実験を行った。

NN コントローラ 今回は直接型のニューラルネットワークコントローラを用いた。入力は誤差、速度誤差をとり、中間層に 10 個のシグモイド型のニューロンを、出力層に一つの線形ニューロンを 1 つ用いた。荷重調整はバック

図 7 NN コントローラにより生成されたロボットの走行軌跡 (4×10^3 秒経過後)

Fig. 7. Trace of traveling after learning using NN controller

プロパゲーションにより逐次行った。

CMAC1 誤差および誤差の 1 回差分を入力とする CMAC を CMAC1 とする。

CMAC2 CMAC1 の入力にシグモイド関数を用いたコントローラを CMAC2 とする。

CMAC3 誤差および誤差の 1 回差分、目標値を CMAC の入力とし、シグモイド関数を用いたコントローラを CMAC3 とする。

〈3・2〉 NN コントローラによる走行実験結果 まず、NN コントローラによる走行実験を行う。実験の結果得られた走行軌跡を図 7 に示す。破線が目標とする走行経路であり、実線が実機の走行経路である。また、学習による円の半径方向の誤差の変化を図 8 に示す。最終的な誤差の振幅が約 13cm となった。図 7、図 8 からわかるように、 4×10^3 秒間の学習では誤差が十分に収束せず、きれいな円を描く経路が得られない。しかし十分に時間をかけて学習を行うと次に述べる CMAC よりもより精度の高い制御結果が得られる。

〈3・3〉 CMAC による走行実験結果 次に CMAC による走行実験を行う。

CMAC1 による制御実験の結果得られた、学習による円の半径方向の誤差の変化を図 9 に示す。100 秒後には誤差の振幅が約 10cm まで収束し、その後の学習により 1.2×10^3 秒後には誤差の振幅が約 4.2cm となった。

CMAC2 による制御実験の結果得られた、学習による円の半径方向の誤差の変化を図 10 に示す。シグモイド関数を使用し、誤差および誤差速度の小さな領域の CMAC のメモリの割り当てを増やし、大きな領域の CMAC のメモリの割り当てを減らした結果、CMAC1 と比較して学習初期

図 8 半径方向の位置の誤差
(NN コントローラ)

Fig. 8. Errors in the radial directions using NN controller

図 9 半径方向の位置の誤差
(CMAC1)

Fig. 9. Errors in the radial directions using CMAC controller 1

図 10 半径方向の位置の誤差
(CMAC2)

Fig. 10. Errors in the radial directions using CMAC controller 2

図 11 半径方向の位置の誤差
(CMAC3)

Fig. 11. Errors in the radial directions CMAC controller 3

の誤差の収束が遅くなっているが、その代わり学習精度が向上し、最終的な誤差の振幅が約 3.2cm となった。

CMAC3 による制御実験の結果得られた、学習による円の半径方向の誤差の変化を図 11 に示す。CMAC1,2 の半分以下の学習時間 (600 秒) で誤差の振幅が約 2.5cm となった。非線形の制御対象については、CMAC の入力に目標値を加えることで学習速度の向上および制御精度の向上が実現できると考える。

CMAC を用いた場合の走行軌跡を図 12 と図 13 に示す。図 12 は約 200 秒後の学習途中の走行の軌跡を示す。まだ学習が不十分で、真円に対して偏心している。それに対して図 13 の学習後では、ほぼ真円で走行していることが分かる。ここで、半径は 65cm である。破線が目標値信号、実線が追従結果 (学習結果) を示す。この結果より、システムに入力された信号は CMAC を介し、ほぼ円に近い経路を走行する出力を学習によって得られていることが分かる。また同時に姿勢制御も行っており、その姿勢角に対する誤

差の結果を図 14 に示す。同様に学習が進み、一定な姿勢を保つことができていることが分かる。一般的に移動ロボットは機構上、車輪の接地面積が小さく、またステッピングモータによる駆動により駆動輪が振動するために、路面とのすべりが大きく、非線形性の強いシステムとなるが、オンライン学習の CMAC を用いることで、制御が可能となっていることがわかる。また、今回行った実験では、制御システムのサンプリング周期を 100Hz とし、110mm/s で全方向移動ロボットが走行するような目標値を与えた。サンプリング誤差は画像処理システムのサンプリング周期に依存するとして 1.8mm であり、実際に実験を行った中での最小誤差 2.5cm の 10 分の 1 以下であり、以上のように実験の結果から画像処理のサンプリング周期の約 60Hz に制限されることの問題点は見られなかった。

〈3・4〉 各種走行経路における走行実験結果 楕円形状の経路における追従走行実験も行った。結果を図 15 に示す。先の円と同様にオンライン学習が進み、楕円に沿った経路の学習が行えていることが分かる。開始位置は円と

図 12 経路学習の途中のロボットの走行軌跡
Fig. 12. Trace of robot traveling as it learns

図 14 ロボット姿勢角に対する制御結果
Fig. 14. Control results for the robot attitude angle

図 13 経路学習後のロボットの走行軌跡
Fig. 13. Trace of traveling after learning

図 15 楕円の走行軌跡
Fig. 15. Traces of traveling with ellipse

同様に走行楕円の中心（原点）付近とした。さらに、半径の異なる円に対しても走行実験を行った。その結果を図 16 に示す。円の半径は 30cm である。これらのことから、半径の異なる円や楕円に対してもオンライン学習が行えていることが分かる。

〈3・5〉 走行経路の形状を連続的に変化させた場合の走行実験結果 円で学習した後、学習を継続させつつ四角形の経路走行を行わせた。NN コントローラを用いた場合、図 17 のような経路が得られた。円の学習が十分に行われず、またその後の四角形の経路への適応にも時間がかかっている。CMAC を用いると、図 18 のような経路が得られた。円の学習結果がそのまま四角形の走行に適応され、速やかに経路に追従して走行していることが確認できる。これは CMAC の汎化能力が階層型 NN よりも高く、学習速度が早いために経路形状の変化に対する適応が早いと考える。走行経路の形状が多様に変化する場合においても、一つの

経路形状について学習を行わせることで、以後経路形状が変化しても、すでに学習した経路の学習結果を参照し、また同時に新たな経路についての学習を行うことで、連続的に走行経路への追従走行が可能であることが分かった。また、CMAC が先ほどの異なった円や楕円と同様に矩形や四角形などの形状にも適応する能力があることが分かった。

4. ま と め

従来の階層型 NN を用いたコントローラに対する CMAC の有用性を示すことを主眼におき、CMAC を用いた即応性の高い学習を実現するコントローラを構築した。そして、オンライン学習による CMAC を用いたビジュアルフィードバックによる全方向移動ロボットの経路追従制御システムを構築した。具体的には以下のような成果が得られた。

- 全方向移動ロボットは駆動輪の接地面でのすべりのた

図 16 小さな円の走行軌跡

Fig. 16. Traces of traveling with different radial

図 17 円から四角形への走行軌跡
(NN コントローラ)

Fig. 17. Trace of robot changing course continuously from a circle to a square through online learning using NN controller

めに非線形性の強いシステムとなるが、提案した制御システムによって階層型 NN と比較して学習速度が早く、比較的精度の高い制御が可能であることを確認した。

- メモリの割り当てをシグモイド関数を用いて工夫することで制御精度の向上を実現した。
- CMAC の入力として誤差、速度誤差に目標値を加えることで非線形の制御対象の制御精度および学習速度の向上を実現した。
- 円や楕円、多角形等の様々な形状の走行経路に追従して走行が可能であり、走行経路の形状が変化しても連続的に適応しつつ追従走行が可能であることを確認した。

今後は、学習係数や関数値の最適化を行うことによって、経路追従の精度のさらなる向上が可能であると考えられる。近い将来、オンライン学習による CMAC とビジュアルサー

図 18 円から四角形への走行軌跡
(CMAC)

Fig. 18. Trace of robot changing course continuously from a circle to a square through online learning using CMAC controller

ボシステムを組み合わせたテレオペレーションの技術は宇宙溶接⁽²⁰⁾や福祉支援機器⁽²¹⁾⁽²²⁾などに応用が期待される。

本研究を遂行するにあたり、大阪府立工業高等専門学校吉田丈夫教授には当初からご指導を頂きました。ここに深甚なる謝意を表します。

(平成 13 年 10 月 25 日受付, 同 14 年 4 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 藤本博志、堀洋一: マルチレートサンプリング制御を用いた繰り返し外乱抑圧制御法の提案とビジュアルサーボへの応用, 平成 12 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 1, pp. 503-506 (2000)
- (2) 関 弘和、堀 洋一: カメラ画像系列を用いた産業用ロボットの異常動作検出, 平成 12 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. 1, pp. 507-510 (2000)
- (3) 小田光茂: ETS- のミッション, 日本ロボット学会, Vol. 17, No. 8, pp. 1055-1061 (1999)
- (4) 松本甲太郎: ETS- によるトラス構造物の遠隔操作実験, 日本ロボット学会, Vol. 17, No. 8, pp. 1076-1080 (1999)
- (5) 石川正俊: ビジュアルサーボイングの現状と将来, 計測と制御, Vol. 40, No. 9, pp. 615-617 (2001)
- (6) J.S. Albus: "Data storage in the control cerebellar model articulation control (CMAC)", Trans. on ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 97, No. 9, pp. 228-233 (1975)
- (7) Y. Hirashima, Y. Iiguni and N. Adachi: "An adaptive control system design using a memory based learning system", International Journal of Control, Vol. 68, No. 5, pp. 1085-1102 (1997)
- (8) T. Yamamoto and M. Kaneda: "Intelligent Controller Using CMACs with Self-Organized Structure and Its Application for a Process System", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E82-A, No. 5, pp. 856-860 (1999)
- (9) J.S. Albus: "A new approach to manipulator control cerebellar model articulation control (CMAC)", Trans. on ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 97, no. 9, pp. 220-227 (1975)
- (10) 浅間一、佐藤雅俊、嘉悦早人、尾崎功一、松元明弘、遠藤勲: 3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, vol. 14, no. 2, pp. 249-254 (1996)
- (11) 吉田丈夫、藤沢正一郎: 全方向移動装置, 日本機械学会誌, Vol. 97, No. 910, p. 52 (1994)

- (12) 藤沢正一郎, 大久保慶治, 師玉康成, 山浦弘夫: 四輪独立駆動型全方向移動ロボットの運動学と走行特性, 日本機械学会論文集, C 編, 62 巻, 604 号, pp. 4573-4579 (1996)
- (13) 佐藤, 嘉悦, 尾崎, 浅間, 松元, 遠藤: 3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの設計開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演論文集, pp. 1168-1173 (1994)
- (14) T. Arai, E. Nakano: "The Control and Application of Omni-Directional Vehicle (ODV)," Proc. 8th Triennial World Congress of IFAC, pp. 1855-1860 (1981)
- (15) 大西諒, 赤澤高平, 黒住亮太, 川田和男, 藤澤正一郎, 山本透: CMAC を用いた全方向移動ロボットの経路追従制御, 平成 13 年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, p. 117 (2001)
- (16) 藤沢正一郎, 龍満光広, 山本透, 十河宏行, 吉田丈夫: ビジュアルサーボによる全方向移動ロボットの経路追従制御, 第 9 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp. 70-71 (2000)
- (17) S. Fujisawa, M. Ryuman, T. Yamamoto, H. Sogo, Y. Suita, and T. Yoshida: "Development of Path Tracking Control for Omni-Directional Mobile Robot using Visual Servo System," Proc. of the 27rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'01), pp. 2166-2170 (2001)
- (18) 木村元, 小林重信: 確率的傾斜法を用いた強化学習とロボットへの応用, 電気学会, Vol. 119-C, No. 8 (1999)
- (19) 小林重信, 木村元, 小野功: 生物的適応システム: 進化・学習のアルゴリズムと創発システム論, 計測と制御, 40-10, pp. 752-757 (2001)
- (20) 吹田, 黄地, 増淵他: 航空機を使用した模擬宇宙環境下での GHTA 溶接実験, 溶接学会論文集, 18 巻, 2 号, pp. 228-235 (2000)
- (21) S. Fujisawa, T. Kaneda, T. Nishi, N. Satonaka, T. Umemoto, T. Doi and T. Yoshida: "Mechatronics Technology which Assists Human Life from Nursing to Amusement", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 13, No. 1, pp. 42-47 (2001)
- (22) 土井智晴, 梅本敏孝, 藪谷安正, 福祉科学研究会, 藤澤正一郎: 音声入力方式による全方向移動型電動車椅子の製作, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2000), pp. 143-144 (2000)
- (23) J. Agulio, S.: "Kinematics of Vehicles with Directional Sliding Wheels," Mech. Mach. Theory, Vol. 22, No. 4, pp. 295-301 (1987)
- (24) 松本元, : 脳心コンピュータ, 日本物理学会, 丸善 (1999)

藤澤 正一郎 (正員) 1953 年 1 月 27 日生. 1971 年大阪府立工業高等専門学校機械工学科技術職員. 1976 年大阪工業大学工学部機械工学科卒. 1999 年信州大学大学院工科系研究科システム開発工学専攻修了. 1999 年高松工業高等専門学校制御情報工学科講師, 2000 年同助教授, 現在に至る. 工学博士. 機械の知能化, 適応・学習制御, 福祉支援技術, 宇宙溶接などの研究に従事. 日本機械学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会などの会員.

黒住 亮太 (学生員) 1980 年 1 月 12 日生. 2000 年高松工業高等専門学校制御情報工学科卒. 2002 年高松工業高等専門学校専攻科修了, 2002 年広島大学大学院教育学研究科博士前期課程入学, 現在に至る. 適応・学習制御, 福祉支援機器の研究に従事. 日本機械学会, 計測自動制御学会の会員.

大西 諒 (学生員) 1981 年 10 月 13 日生. 2002 年高松工業高等専門学校制御情報工学科卒. 2002 年高松工業高等専門学校専攻科入学, 現在に至る. 適応・学習制御, 移動ロボットの研究に従事.

川田 和男 (正員) 1973 年 3 月 25 日生. 1995 年長岡技術科学大学工学部創造設計工学課程卒. 1996 年長岡技術科学大学工学研究科機械システム工学専攻修士課程退学. 1996 年香川県立多度津工業高等学校機械科教諭. 1997 年高松工業高等専門学校制御情報工学科助手, 2002 年広島大学大学院教育学研究科博士課程後期に入学, 現在に至る. メカニカルシステムにおける制御系設計の高度化と知能化に関する研究に従事. 日本機械学会, 計測自動制御学会などの会員.

山本 透 (正員) 1961 年 8 月 29 日生. 1987 年徳島大学大学院工学研究科修士課程 (情報工学専攻) 修了. 同年高松工業高等専門学校助手. 同講師, 大阪大学基礎工学部助手, 岡山県立大学情報工学部助教授, 広島大学学校教育学部助教授, 同教育学部助教授を経て, 2001 年広島大学大学院教育学研究科技術・情報教育学講座助教授となり現在に至る. 適応・学習制御系設計とその応用, PID 制御系設計の高度化と知能化, ならびに福祉機器の知能化などの研究に従事. 工学博士. 計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEE などの会員.