分散制御によるロボットマスゲーム*

東 俊一[†]・泉 晋作[†]・杉江 俊治[†]

Halftone Mass Games by Fixed Number of Mobile Robots*

Shun-ichi AZUMA[†], Shinsaku IZUMI[†] and Toshiharu SUGIE[†]

This paper presents a distributed control method of multi-robot systems for performing the mass games, i.e., to display a given image as a formation of mobile robots. The proposed method is based on the combination of a coverage control method and halftone image processing. The performance is demonstrated by numerical simulations with several standard images.

1. はじめに

複数のロボットによる協調作業においては、個々のロボットが互いの情報を交換しながら自律的に動作し、グループ全体の目的達成が求められる。このとき、各ロボットは、他のすべてのロボットの情報を得られるわけではなく、近傍のロボットの情報だけが得られるような状況が想定される。このような、ロボット群の分散制御は、交通システム、警備・防災システム、宇宙システムなど、幅広い応用が期待されており、近年盛んに研究がなされている [1,2]。

その一方で、先行研究では、おもに、曲線の組合せで構成されるような、幾何学的に単純な図形を表現するフォーメーション形成が考えられていた（たとえば、文献 [3–7]）。したがって、つぎのステップとして、より複雑なものをロボット群のフォーメーションとして実現できるようにすれば、その応用範囲をさらに広げられるものと考えられる。

そこで、本論文では、ロボット群にマスゲームを実現させるような分散制御問題を考える。ここでいうマスゲームとは、Fig. 1 のように、ロボット群を高台から眺めたときに、任意に与えられた濃淡画像に見えるようなフォーメーションを形成することを意味している。このようなマスゲームを実現するためには、与えられた画像

Fig. 1 Mass games by mobile robots

の濃淡情報までもフォーメーションとして表現しなくてはならないため、これまでに得られている手法に比べて、より高度な分散制御技術が必要とされる。

本論文では、この目的のために、分散型被覆制御 [6] とハーフトーン画像処理 [8] を組み合わせた制御器を提案する。前者は、ある空間内にロボットを均一に配置する分散制御法であり、後者は、与えられた濃淡画像を見た目を保存したまま 2 値化する画像処理法であるが、これら一見違った手法を適切に組み合わせることで、マスゲームのための分散制御器が得られる。提案法の有効性は、いくつかの標準画像に対する数値実験を通して検証される。

本章の最後に、つぎの点を強調しておく。まず、ロボット群の分散制御の研究において、マスゲームの実現を目的としたものは、著者らの知る限り、これまでに考えられてはならず、本論文が初めての取り組みとなる。また、提案制御法は、制御工学と画像処理という異なる分野で

* 原稿受付 2011 年 9 月 12 日

[†] 京都大学 大学院 情報学研究科 Graduate School of Informatics, Kyoto University; Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, JAPAN

Key Words: multi-agent system, mobile robot, distributed control, halftone image processing.

得られた手法を融合させたものであるが、従来研究においては、そのような画像処理の手法を導入したものは見当たらない．この点においても、本論文の成果は、従来のものとは大きく異なっている．

【表記法】 $\mathcal{R}, \mathcal{R}_{0+}$ は、それぞれ実数、非負の実数の集合を表す．ベクトル x に対し、 $\|x\|$ で x の 2 ノルムを表すが、別の種類のノルムを用いる場合は $\|x\|_p$ のように記す．集合 $\mathcal{I}$ の冪集合を $\mathcal{P}(\mathcal{I})$ で表す．たとえば、 $\mathcal{P}(\{1,2,3\}) = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{2,3\}, \{1,2,3\}\}$ であり、冪集合は、集合の集合という点に注意する．つぎに、 $\mathcal{R}^2$ 内の有界な凸集合 $\mathcal{Q}$ を考える． $\mathcal{Q}$ に含まれる異なった座標を持つ点 $i = 1, 2, \dots, n$ に対し、その座標の集合を $\mathcal{X} := \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ と記す．このとき、集合 $\mathcal{V}_i(\mathcal{X}) := \{q \in \mathcal{Q} \mid \|q - x_i\| \leq \|q - x_j\| \text{ for all } j \text{ s.t. } j \neq i\}$ を、 $\mathcal{X}$ における点 i のボロノイ領域とよぶ．また、 $\{1, 2, \dots, n\}$ を頂点集合とし、 $\{(i, j) \in \{1, 2, \dots, n\}^2 \mid \mathcal{V}_i(\mathcal{X}) \cap \mathcal{V}_j(\mathcal{X}) \neq \emptyset\}$ を辺集合とするグラフを、 $\mathcal{X}$ のドロネーグラフとよび、 $G(\mathcal{X})$ で表す．頂点 i に対し、 $\mathcal{V}_i(\mathcal{X}) \cap \mathcal{V}_j(\mathcal{X}) \neq \emptyset$ を満たす頂点 j ($G(\mathcal{X})$ において頂点 i と隣接する頂点) を、 i の近傍とよぶ．

2. 問題設定

2.1 対象システム

Fig. 2 に示される二次元空間上の群ロボットシステムを考える．これは、 n 個の移動ロボットで構成され、各ロボットのダイナミクスはつぎのように与えられる．

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

ここで、 $x_i(t) \in \mathcal{R}^2$ 、 $u_i(t) \in \mathcal{R}^2$ はロボット i の位置および入力である．

時刻 t におけるすべてのロボットの位置をまとめて、集合 $\mathcal{X}(t) := \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ で記し（時刻 t における）フォーメーションとよぶ．ロボットの行動領域が有界な凸集合 $\mathcal{Q} \subset \mathcal{R}^2$ によって定義されたとき、フォーメーション $\mathcal{X}(t)$ におけるロボット i のボロノイ領域は $\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t))$ 、 $\mathcal{X}(t)$ のドロネーグラフは $G(\mathcal{X}(t))$ で表される．また、初期フォーメーションは $\mathcal{X}(0) := \mathcal{X}_0 \subset \mathcal{Q}^n$ と与えられる．

つぎに、上記のシステムに対し、二つの仮定を設ける．

（仮定 1）すべてのロボット共通の座標系が存在し、各ロボットはその座標系における自己の位置情報を任意の時刻 t で取得できる．

（仮定 2）時刻 t においては、ドロネーグラフ $G(\mathcal{X}(t))$ 上の辺で結ばれたロボット間でのみ、位置情報を交換することができる．

前者は、各ロボットが、GPS 受信機のような、絶対座標系での位置情報を得られる装置を持つことを意味する．後者は、ロボット間の情報交換に関する条件である．

2.2 マスゲーム問題

本論文で考える問題について説明する．

Fig. 2 Multi-robot system to be studied

Fig. 2 のシステムに、あるフォーメーションを分散的な制御器で実現させることを考える．このとき、目標となるフォーメーションは、Fig. 1 に示されるように、Fig. 2 のシステムを高台から見たときに、任意に与えられた濃淡画像を表現するようなものである．その画像は、 $\mathcal{R}^2$ 内の有界な凸集合 $\mathcal{Q}$ 上において定義される可積分関数 $\varphi: \mathcal{Q} \rightarrow [0, 1]$ として与えられる．また、 $\varphi(q)$ で位置 $q \in \mathcal{Q}$ における画素値を表し、 $\varphi(q) = 0$ は白色、 $\varphi(q) = 1$ は黒色、 $\varphi(q) \in (0, 1)$ は中間色（灰色）を意味する．

各ロボットには、分散型のローカル制御器

$$u_i(t) = f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mathcal{N}_i(t)) \quad (2)$$

が備えられている．ここで、 $\mathcal{N}_i(t) \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ は、ドロネーグラフ $G(\mathcal{X}(t))$ における頂点 i （ロボット i ）の近傍の集合であり、常に $i \in \mathcal{N}_i(t)$ が成り立っている．また、 $f: \mathcal{R}^{2n} \times \mathcal{P}(\{1, 2, \dots, n\}) \rightarrow \mathcal{R}^2$ は、この制御器を記述する関数であり、近傍集合 $\mathcal{N}_i(t)$ に属するロボットの位置だけに依存するようなものと仮定する．たとえば、 $\mathcal{N}_2(t) = \{2, 3, \dots, n\}$ のとき、 $f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mathcal{N}_2(t))$ の値は $x_1(t)$ に依存しない．すなわち、任意の $(x_{11}, x_{12}) \in \mathcal{R}^2 \times \mathcal{R}^2$ に対して、 $f(x_{11}, x_2(t), \dots, x_n(t), \mathcal{N}_2(t)) = f(x_{12}, x_2(t), \dots, x_n(t), \mathcal{N}_2(t))$ が成立する．この意味において、(2) 式は分散制御器となっている．なお、関数 f はロボットの識別子 i に依存しないことに注意する．

このとき、本論文では以下の問題を考える．

【マスゲーム問題】 目標画像 $\varphi: \mathcal{Q} \rightarrow [0, 1]$ と初期フォーメーション $\mathcal{X}_0 \subset \mathcal{Q}^n$ が任意に与えられるものとする．このとき、最終フォーメーション $\mathcal{X}(\infty)$ が、画像 φ を表現するような分散制御器 $f: \mathcal{R}^{2n} \times \mathcal{P}(\{1, 2, \dots, n\}) \rightarrow \mathcal{R}^2$ を求めよ．

つぎの点に注意されたい．まず、この問題では「画像の見た目」という人間の感性に関することが仕様になっている．それゆえ、その仕様を数学的に表現することは一般に難しいが、ここでは「目標画像で表現されている対象物や状況を概ね認識できる」程度のことを想定している．この意味は後ほど明らかになる．つぎに、すべてのロボットは、目標画像 φ に関する情報を持つものと仮定している．したがって、この問題の解は、 φ を用いて定義される．最後に、本論文では、問題の本質部分に絞った議論を行うため、ロボット間の衝突や、ロボットの入力制約などは考慮しない．

3. 提案手法

マスゲーム問題の解を導出する．ここで提案するのは，

(i) Cortés らによって提案された被覆制御器 [6]

(ii) ハーフトーン画像処理 (たとえば, 文献 [8,9])

を組み合わせたものである．以下では, (i) を簡単に紹介したうえで, 問題の解となる分散制御器を与える．

3.1 Cortés らの被覆制御器 [6]

フォーメーション $\mathcal{X} := \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ に関し, つぎの評価関数を考える．

$$J(\mathcal{X}) := \sum_{i=1}^n \int_{\mathcal{V}_i(\mathcal{X})} h(\|q - x_i\|) \phi(q) dq \quad (3)$$

$h: \mathcal{R}_{0+} \rightarrow \mathcal{R}_{0+}$ は, $\mathcal{Q}$ 上で区分的微分可能な単調非減少関数であり, $\phi: \mathcal{Q} \rightarrow \mathcal{R}_{0+}$ は, $\mathcal{Q}$ 上で可積分な関数である．一般に, 集合 S 上のスカラー値関数 ψ の p ノルムが,

$$\|\psi\|_p := \left(\int_S |\psi(q)|^p dq \right)^{\frac{1}{p}}$$

と定義されることに注意すれば, $S = \mathcal{V}_i(\mathcal{X})$, $\psi(q) = \|q - x_i\|$, $h(\|q - x_i\|) = \|q - x_i\|^p$, $\phi(q) \equiv 1$ の対応関係のもとで, (3) 式の中の積分は, q を変数とするスカラー値関数 $\|q - x_i\|$ の p ノルムの p 乗を表している．この際, $\phi(q) \neq 1$ の場合は, 重みが導入されたノルムのようなもの¹を表すことになる．したがって, その積分は, ボロノイ領域 $\mathcal{V}_i(\mathcal{X})$ に含まれるすべての点 q とボロノイ点 x_i の間の (一般化された) 距離に近いもの²となっている．これを, ボロノイ領域の個数分, 足し合わせて, 集合 $\mathcal{Q}$ 上のすべての点 q を考慮したものが $J(\mathcal{X})$ である．

$J(\mathcal{X})$ を小さくするフォーメーション $\mathcal{X} := \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ は, 関数 h によって定義される “ある種の距離的な意味” において, 集合 $\mathcal{Q}$ 上のすべての点 q の近くに x_i が存在するものであり, それは被覆とよばれている．この際, ϕ は, 集合 $\mathcal{Q}$ 上の各点の重要度を表す重み関数であり, 大雑把に言えば, 所望の場所に, より多くのロボットを配置させるものである．

各ロボットが 2.1 のように与えられ, 評価関数 $J(\mathcal{X})$ が $h(\|q - x_i\|) := \|q - x_i\|^2$ によって定義される場合は, ある分散型の制御器が存在し,

- それに対する閉ループ系が, $J(\mathcal{X}(t))$ の時間微分を準負定にすること
- 閉ループ系の最大の不变集合は, $J(\mathcal{X})$ の局所最小値を与えるフォーメーションの集合に等しいこと

が知られている [6]．この事実とラサールの不変性原理より, そのような分散型制御器を用いれば, 任意の初期フォーメーション $\mathcal{X}_0$ から, $J(\mathcal{X})$ の局所最小値を与えるフォーメーションに遷移できることになる．そのような

制御器のひとつは,

$$u_i(t) = -K(x_i(t) - c(\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t)))) \quad (4)$$

で与えられる．ここで, $K \in \mathcal{R}_{0+} \setminus \{0\}$ は, この制御器のゲイン (K はスカラー) であり, $c(\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t))) \in \mathcal{R}^2$ は, ボロノイ領域 $\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t))$ の重み付き重心

$$c(\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t))) := \frac{\int_{\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t))} q \phi(q) dq}{\int_{\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t))} \phi(q) dq}$$

である．また, ボロノイ領域 $\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t))$ は, ドロネーグラフ $G(\mathcal{X}(t))$ における頂点 i の近傍の位置 ($j \in \mathcal{N}_i(t)$ に対する x_j) だけに依存するため, $c(\mathcal{V}_i(\mathcal{X}(t)))$ は近傍のロボットの位置から計算することができる, すなわち (4) 式は (2) 式の形の分散制御器である．

3.2 提案制御器

続いて, マスゲーム問題の解となる制御器を与えよう．

まず, 前節で述べた通り, (3) 式の $J(\mathcal{X})$ を最小にするような制御器を用いると, $\phi(q)$ の値が大きい点 q の近くには, 比較的多くのロボットが集まることが期待される．すなわち, ϕ は, 最終フォーメーションにおけるロボットの「密度分布」に対応している．

その一方で, 画像処理の分野では, 与えられた濃淡画像を, 白と黒の画素だけを持つ 2 値画像に, 見た目を保存したまま変換する「ハーフトーン画像処理」が知られている．これは, 広く知られている単純 2 値化処理³とは異なり, 黒と白の中間色 (灰色) を, 黒の画素をまばらに配置することで疑似的に表現するものである．言い換えれば, 元の画像の持つ濃淡情報を, 黒の画素の「密度分布」として表現するものである．そのような 2 値画像はハーフトーン画像とよばれ, その一例は Fig. 3 のように与えられる．元の画像で濃い灰色になっている部分には, ハーフトーン画像の対応箇所で, 黒の画素が多く配置されていることが確認できるであろう．

以上の二つの事実に着目すると, 与えられた画像 φ の濃淡情報をロボットの密度分布 ϕ に対応させる, すなわち, 画像の濃い部分には多数のロボットを配置し, 淡い部分には少数のロボットを配置するようにすれば, マスゲーム問題の解になりそうである．この考えに基づき, 本論文では, その解として, (4) 式において, $\mathcal{Q}$ を画像の定義域とし,

$$\phi(q) := e^{30(\varphi(q)-1)} \quad (5)$$

としたものを提案する．ここで ϕ は, 目標画像 φ の関数であり, 結果として得られる (4) 式の制御器は, 目標画像 φ と近傍のロボットの位置を変数とする関数になる．

¹ $\phi(q) \neq 1$ のとき, ノルムの公理を満たさないので「ノルムのようなもの」と表現している．

² 距離の公理を満たすものではない．

³ 各画素の画素値を, あらかじめ定められた閾値と比較し, 白か黒の画素値に量子化していく方法．

Fig. 3 Halftoning

Fig. 4 Lenna

ϕ には, $\phi(q) := \varphi(q)$ のように, 画像 φ を直接設定することも考えられるが, 実際には, (5) 式のように, φ に単調な非線形変換を行ったものを設定している. これは, 画像を直接設定して数値実験を実施したところ, 結果として得られるフォーメーションの見た目のコントラストが, 元の画像 φ に比べて弱くなるため, (5) 式のようにして, 画像の濃淡の差を強調するようにしている. また, (5) 式の e のべきの 30 という値は, さまざまな画像を用いた数値実験を行い, 最終フォーメーションが人間の見た目に適合するようなものとして選んでいる. これを選ぶにあたっての予備実験の結果は付録に示している.

4. 数値実験による検証

数値実験によって, 提案手法を検証する.

Fig. 2 のシステムにおいて, ロボット数を $n := 5000$ と

する. 目標画像 φ は, Fig. 3(a) の標準画像 Lenna[10] である. これは, 画素数が 256×256 で, 画素値の階調数が 256 (8 ビット) のデジタル濃淡画像である. このとき, $Q := [0, 256]^2$, $\varphi(q) \in \{0, 1/255, 2/255, \dots, 1\}$ となる. また, 各ロボットの初期位置は, Q 上の一様分布に従って確率的に選んだ.

$K := 2$ として, (4) 式と (5) 式の提案制御器を用いたときの結果が, Fig. 4 である. (a) の初期フォーメーションからの時間発展が (b)–(d) で示されているが, 時間の経過に伴い, 徐々に目標画像に近づいていくことが確認できる. とくに, 十分な時間が経過した後のフォーメーションを示している (d) では, ロボットの密度分布によって, 与えられた目標画像の濃淡までも表現されている点が観察できる.

(a) Original image

(b) Initial formation

(c) Final formation

Fig. 5 Barbara

(a) Original image

(b) Initial formation

(c) Final formation

Fig. 6 Mandrill

(a) Original image

(b) Initial formation

(c) Final formation

Fig. 7 Pepper

(a) Original image

(b) Initial formation

(c) Final formation

Fig. 8 Boat

同様の検証を、別の4種類の標準画像に対して行った結果が、Fig. 5からFig. 8である。それぞれ、目標画像、初期フォーメーション、 $t=10$ の(ほぼ最終の)フォーメーションを示している。いずれの場合も、良好な結果が得られており、提案制御器がさまざまな種類の画像に対して適用できることがわかる。

(注意1) (4)式の制御器は、 $J(\mathcal{X})$ の局所的な最小化を実現するものであるため、すべての初期フォーメーションに対して、目標画像の表現を理論的に保証するものではない。しかし、画像処理分野でベンチマークとして用いられている標準画像集SIDBA (Standard Image Data-Base) [10] に収録されている12枚すべての画像に対し、上記と同様に確率的に発生させた10種類の初期フォーメーションを用いて数値実験を行ったところ(計120種類の初期フォーメーション)、マスゲームの実現が失敗することは一度もなかった。すなわち、初期フォーメーションに片寄りのない場合には、提案法によってほぼ確実にマスゲームを実現できるものと考えられる。一方、初期フォーメーションに片寄りのある場合($\mathcal{Q}$ 内でロボット群が片寄って配置された場合)には、提案制御器による最終フォーメーションが目標画像 $\varphi(q)$ を表現できないことがある。この場合、ある一定期間、各ロボットにランダムウォークをさせて初期フォーメーションの片寄りを解消し、そこを新たな初期状態として提案制御器を適用すればよい。

(注意2) 本論文では、ロボットの数が固定された条件のもとでのマスゲーム問題を考察している。したがって、提案法は、すべてのロボットが集合 $\mathcal{Q}$ 内に存在しなくてはならない場合の解法として有効である一方、黒画素の数が固定されてしまうため、与えられた画像の明暗が、フォーメーションによって形成される画像の明暗に一致しない。今後、本論文の問題設定とは別のものとして、集合 $\mathcal{Q}$ の外にロボットが存在でき、そして画像の明暗も表現するフォーメーション形成問題の検討も望まれる。

5. おわりに

本論文では、ロボット群にマスゲームを実現させるための分散制御器を開発した。提案した制御器は、従来の被覆制御器とハーフトーン画像処理の考え方を組み合わせたものであり、そこでの鍵は、与えられた画像の濃淡情報を、ロボットの密度分布に対応させることであった。また、その有効性は、いくつかの異なった性質の標準画像に対する数値実験を通して明らかにした。

提案法は、「ロボット群にマスゲームを実現させる」という目的を掲げたものであるが、さまざまな方向への展開が考えられる。たとえば、提案法を別の角度から見ると、前述したハーフトーン画像処理の一手法になっていることに気付く。このような群ロボットシステムの分散制御法を利用した手法は(著者らの知る限り)これまで

にない新しい発想に基づくものである。その方向で新しい可能性が見いだせるかもしれない。また、これまでの群ロボットシステムの制御では、ノルムでその性能が測れるようなものを主な対象としてきたが、本論文で扱ったものは、そのように簡単には測ることのできない「画像の見た目」であった。このような、人間の感性を規範とする群ロボットシステムの制御への展開も興味深い。

謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラム(FIRST 合原最先端数理モデルプロジェクト)により、日本学術振興会を通して助成されたものである。

参 考 文 献

- [1] R. Olfati-Saber, J. A. Fax and R. M. Murray: Consensus and cooperation in networked multi-agent systems; *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 1, pp. 215–233 (2007)
- [2] M. Mesbahi and M. Egerstedt: *Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks*, Princeton University Press (2010)
- [3] K. Sugihara and I. Suzuki: Distributed algorithms for formation of geometric patterns with many mobile robots; *Journal of Robotic Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 127–139 (1996)
- [4] I. Suzuki and M. Yamashita: Distributed anonymous mobile robots: Formation of geometric patterns; *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal of Computation*, Vol. 28, No. 4, pp. 1347–1363 (1999)
- [5] H. G. Tanner, A. Jadbabaie and G. J. Pappas: Stable Flocking of Mobile Agents, Part I: Fixed Topology; *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2010–2015 (2003)
- [6] J. Cortés, S. Martinez, T. Karatas and F. Bullo: Coverage control for mobile sensing networks; *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 2, pp. 243–255 (2004)
- [7] J. A. Fax and R. M. Murray: Information flow and cooperative control of vehicle formations; *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 49, No. 9, pp. 1465–1476 (2004)
- [8] R. Ulichney (Ed.): *Digital Halftoning*, MIT Press (1987)
- [9] 南, 東, 杉江: ハーフトーン画像処理: 画像の量子化による情報圧縮; 計測と制御, Vol. 49, No. 11, pp. 808–813 (2010)
- [10] http://www.ess.ic.kanagawa-it.ac.jp/app_images_j.html

Fig. A1 Results of preliminary simulations for selecting ϕ

付 録

(5) 式を選択するにあたっての予備実験

Fig. A1 は, (5) 式の右辺において, e のべきを変更した場合の数値実験の結果である. 実験にあたっての諸条件は 4. と同じである. Fig. A1 と Fig. 3 (a) の目標画像を比較して, 今回は, $\phi(q) := e^{30(\varphi(q)-1)}$ を採用した. これは, Fig. 3 (a) のモデルの左頬の濃淡はほぼ均一となっているが, Fig. A1 (c) がこのことを最もよく表現しているためである.

著 者 略 歴

あずま
東しゅん いち
俊 一

(正会員)

論文誌 Vol. 25, No. 3, p. 53 参照

いづみ
泉しん さく
晋 作

(学生会員)

1987 年 10 月 30 日生. 2010 年 3 月香川高等専門学校専攻科修了. 同年 4 月より京都大学大学院情報学研究科修士課程に入学し, 現在に至る. 計測自動制御学会の会員.

すぎ え
杉 江とし はる
俊 治

(正会員)

論文誌 Vol. 25, No. 3, p. 53 参照