個体への単純な仮想作用力による 自律移動ロボットの群挙動の制御

牧 野 浩 二* 松 尾 芳 樹*

Collective Behavior Control of Autonomous Mobile Robot Herds by Applying Simple Virtual Forces to Individual Robots

Kohji Makino* and Yoshiki Matsuo*

This paper describes a simple method which enables control of shape and internal movements as well as migration of a herd of autonomous mobile robots in a field with various types of obstacles. In order to facilitate such collective behaviors, this paper firstly introduces an individual law of motion for each robot employing simple virtual forces considering realization on actual robots. Then, the authors propose a method where a supervisor can control the collective behaviors of the herd in realtime only by manipulating parameters and a reference position signal which are broadcast to all the robots. The behaviors by the method is analyzed theoretically, and confirmed by simulation and by experiment using Child Machines of Super Mechano Colony Experimental System.

Key Words: Collective Behavior Control, Autonomous Mobile Robots, Virtual Interactive Forces

1. は じ め に

多数の単純な自律移動ロボット（以下、エージェントと呼ぶ）から成るシステムは、1台の高性能なロボットに比べて拡張性、耐故障性、柔軟性において優れるという点で注目を集めている[1]。これらの優位点を損なわずに、群の挙動を単純な方法で制御することは重要な研究課題である。そこで本研究では、群の形状の変化、群内部でのエージェントの動き、様々な形状の障害物が存在する環境下での群の移動といった群のマクロな挙動を、外部の操縦者や特別な個体から群全体に均一な指令を与えてリアルタイムに操作するための制御原理を目標としている。

これまでの群の制御の研究は Formation Control の考え方に基づくものが多い。例えば Sugihara ら [2] は、目標とする各エージェントの配置を指定して、これを実現するように群を制御する方法を提案している。また、Chen ら [3]、Balch ら [4]、Stilwell ら [5] はエージェント同士の相対位置が目標値に従うように群を生成し、その形状を保つように制御することによって群の移動を達成している。しかし、これらの方法では個々のエージェントの運動が拘束され、自由度の低い群となっている。例えば様々な障害物の形状に対応するためには、Desai ら [6] のように各エージェント間の相対位置・姿勢の目標値を明示的に変

更することで群を変形させる必要がある。

これらに対して本研究では、群全体に共通の目標位置だけを与え、各エージェントがそれに引きつけられるような単純な仮想力を基本とする分散制御則を用いて群を形成する [7] [8]。これにより、各エージェントは群の中での相対運動に自由度を残して自律的に移動できるため、多様な形態の障害物に対して、個々のエージェントの動きを意識しないでシステムパラメータを変えずに回避可能な、柔軟な群を実現できると考えられる。さらに、本手法の制御則は、台数に依存しないため拡張性に、個体を識別する必要がないため耐故障性に優れているという群ロボットシステムとして重要な性質を備えている。なお、個体間に仮想的な相互作用力を導入して群の挙動を扱う手法は、早川ら [9]、三宮 [10]、菅原ら [11]、Reynolds [12] らが動物などの群挙動の解析やシミュレーションのためのモデル化に用いているが、本研究は群の制御を目的とし、実ロボットへの実装のために極めて簡単化した相互作用則を用いる点に特徴がある。

以下本稿では、まず2章にて本手法において各エージェントに与える運動法則を導入する。3章ではこの運動法則のもとで群の輪郭を表す方程式を導き、群の形状を制御する手法を提案する。4章では群の形状を保ちながら、群内の個体のマクロな動きを生成する手法を提案する。5章では様々な形態の障害物が存在するフィールド上での群としての移動を、外部から操作する手法について述べる。6章ではこれら提案手法の台数への非依存性を明らかにする。なお、3章から6章では、それぞれシミュレーションによって検証を行う。最後に7章にて、Super

原稿受付 2003 年 9 月 8 日

*東京工業大学大学院理工学研究科

*Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

Mechano Colony (SMC) 実験システム [13] [14] を用いて実験により提案手法の有効性を確認する。

2. 個体の運動制御則

本論文で想定するエージェントは以下の能力を持つものとする。二次元水平面内を自律的に移動しながら、自己の位置を計測し、全方位に一定の視界内にある他のエージェントや障害物を認識することができる。さらに、操縦者または特別な個体からブロードキャストされる指令を受信することができる。

このようなエージェントに対して、本論文では任意のエージェント i が下記 (i), (ii), (iii) に示す 3 種類の仮想的な力に対して運動方程式：

$$M\ddot{p}_i + D\dot{p}_i = f_{ri} + f_{ai} + f_{oi} \quad (1)$$

に従うように分散制御する手法を提案する。各力の関係は **Fig. 1**、各変数・定数は **Table 1** に示すとおりである。

- (i) 目標位置からの変位に基づく力：エージェント i は操縦者または特別な個体から与えられる目標位置 p_r に対して、相対距離に比例した次式で与えられる力を受ける。

$$f_{ri} \equiv K(p_r - p_i), \quad (2)$$

$$K \equiv \left(k_t I + k_r R \left(-\frac{\pi}{2} \right) \right) \times R(\theta) \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi \end{pmatrix} R(-\theta), \quad (3)$$

Fig. 1 Virtual forces for an agent

Table 1 Definition of variables and constants

notation	description
$p_i = (x_i, y_i)^T$	absolute position of agent i
$p_r = (x_r, y_r)^T$	absolute position of the reference point
$p_{oj} = (x_{oj}, y_{oj})^T$	absolute position of obstacle element j
r	radius of sight of an agent
r_a	radius of an agent
r_o	radius of an obstacle element
n	number of agents

$$R(\theta) \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

ただし、 I は単位行列とする。以下では比例係数 K を目標位置係数行列と呼ぶことにする。ここで式 (3) の 2 行目の項は、**Fig. 2** のように、フィールドの基準座標系を θ だけ回転した座標系 $x' - y'$ 上で、 p_r の x' 成分 $p_{rx'}$ を $\cos \phi$ 倍、 y' 成分 $p_{ry'}$ を $\sin \phi$ 倍にスケールリングする変換を意味する。1 行目右辺の項はこの結果にスカラー k_t によるスケールリングを行い、さらに k_r 倍の直交成分を付加することを意味する。 f_{ri} は $p_r - p_i$ に対してこれらの変換を施したものとなる。これにより、ブロードキャストによって各パラメータと目標位置 p_r を操作することで、群の様々な性質を制御できる。まず、 ϕ を操作して群の形状を長短軸比の異なる楕円に変化させ、その主軸の傾きを θ によって操作することが可能になる。これらの効果については 3 章で述べる。一方、4 章で示すように、 k_r によって群の内部にエージェントの流れを生成し制御できる。さらに、5 章で示すように、目標位置 p_r によって群の重心の移動を操作できる。なお、 k_t は目標位置への凝集力を与えるため、3 章で示すように、各エージェントの目標位置方向への挙動を左右するが群全体の形状には影響しない。

- (ii) 他のエージェントからの斥力：エージェント i はその視界半径 r 内に他のエージェントが入ったとき、距離に関係なくエージェント 1 台当たり a_a の一定の大きさの反発力を受ける ($a_a > 0$)。

$$f_{ai} \equiv a_a \sum_{j \in S_{aij}} \frac{p_i - p_j}{|p_i - p_j|} \quad (4)$$

ただし、 S_{aij} はエージェント i の視界範囲内に存在するエージェントの集合とする。

- (iii) 障害物からの斥力：本稿では、議論の単純化と実装への配慮のため、障害物は小さな円形障害物を並べて表現する。エージェント i は、視界半径 r の円より内側に障害物要素が存在するとき、距離に関係なく 1 要素当たり a_o の一定の大きさの反発力を受ける ($a_o > 0$)。

$$f_{oi} \equiv a_o \sum_{j \in S_{oij}} \frac{p_i - p_{oj}}{|p_i - p_{oj}|} \quad (5)$$

ただし、 S_{oij} はエージェント i の視界範囲内に存在する障害物要素の集合とする。

Fig. 2 Effect of $R(\theta) \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi \end{pmatrix} R(-\theta)$

エージェントの運動法則を以上のように与えることで、エージェント同士の相対位置・姿勢を確定しない、柔軟な群を生成できると考えられる。本研究では、操縦者または特別な個体が、視界半径 r 、目標位置 p_r 、目標位置係数行列 K を全エージェント共通のパラメータとして操作できるものとする。これにより、群全体の挙動をマクロに制御することが目的である。なお、今回は扱わないが、各エージェントの動きの自由度は、式 (1) に自発的な力を加えることによって実現できる。

なお、簡単のため $M = mI$ 、 $D = dI$ とし、他のエージェントと障害物からの斥力を外乱として扱えば、エージェントの運動 (式 (1)) が目標位置方向について安定となる必要十分条件は、ラウス・フルビッツの安定判別法と目標位置から離れる方向の力の成分が f_{ri} に含まれない条件とから、パラメータを以下のように選ぶことである。

$$m > 0, d > 0, k_t > 0, \frac{\pi}{2} > \phi > 0 \quad (6)$$

3. 群の形状の制御

本章では、2章の運動法則の共通パラメータを用いて群の形状 (輪郭) を単純な方法で制御できることを示す。まず、定常状態におけるエージェントの群内での分布を解析し、次に、群の形状を表す方程式を導く。ただし、本章では $k_r = 0$ の場合について述べる。 $k_r \neq 0$ の場合については4章で扱う。方程式の妥当性はシミュレーションで確認し、各エージェントの自己位置の計測誤差の影響についても調べる。

3.1 群内でのエージェントの定常分布

本研究では他のエージェントからの斥力 f_{ai} と障害物からの斥力 f_{oi} が目標位置に基づく力 f_{ri} に比べて十分大きくなるように設定する。これは、エージェント間や障害物との衝突をできるだけ確実に避けるためである。このとき、式 (4)、(5) は分子動力学でよく用いられる剛体粒子間のポテンシャルによる力と同様の性質を示す。さらに、式 (6) の安定条件を満たすように各パラメータを選べば、各エージェントは目標位置への引力を受け、他の力が適度な揺動を与えるため、十分時間が経過したときエージェントは剛体球を最密充填したような配置となる。このとき、エージェントは一様分布となり、群の重心位置と目標位置が一致した状態となると考えられる。この状態を本研究では定常状態と呼ぶこととする。例として Fig. 3 に、二つのエージェントと半径 r_{obst} の障害物がある場合に推測される定常状態を示す。すなわち、各エージェントは $r + r_a$ だけ離れて分布し、破線で示された半径 $(r + r_a)/2$ の領域を占有する。同様に、半径 r_{obst} の円形障害物は $(r - r_a)/2 + r_{obst}$ の領域を占有すると予想される。

3.2 群の形状

$k_r = 0$ のとき、実際にシミュレーションを行うと、定常状態における群全体の輪郭は Fig. 4 のように楕円の形に近くなる。そこで、これを次の楕円方程式で近似することとし、楕円パラメータ a, b を導こう。

$$\left(\frac{x - x_r}{a}\right)^2 + \left(\frac{y - y_r}{b}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

Fig. 3 Arrangement of two agents and one circle obstacle in a steady-state

Fig. 4 Arrangement of 40 agents and one circle obstacle in a steady-state

まず、各エージェントが占有する領域の面積を S_a とし、障害物のためエージェントが存在できない領域の面積を S_o とする。ただしここでは、障害物は群に囲まれる大きさ、配置のものとする。このとき、群全体の面積を S とすると次式が成り立つはずである。

$$S = \pi ab \approx nS_a + S_o \quad (8)$$

楕円内の任意の位置 p にあるエージェントに対して、目標位置 p_r からの力 $K(p_r - p)$ がもたらす仮想的なポテンシャルを考えよう。それによるエネルギーは $\frac{1}{2}(p_r - p)^T K(p_r - p)$ となる。これを楕円の領域内全域にわたって積分することで、各エージェントの持つエネルギーの総和を得る。ただし、障害物のためにエージェントが存在できない領域は除く。以上から、楕円の領域内のエージェントの密度を ρ とすると、各エージェントの持つエネルギーの総和は次式で表すことができる。

$$E = \oint_{S-S_o} \rho \frac{1}{2} (p_r - p)^T K(p_r - p) ds \quad (9)$$

定常状態において群は E を最小とする形状をとるはずである。このとき、群の重心位置は目標位置と一致する。また、エージェントは一様に分布すると考えられることから ρ は一定である。したがって、式 (7)、(8) より式 (9) を最小にする楕円パラメータ a, b を求めると次式となる。

$$a = \sqrt{\frac{nS_a + S_o}{\pi}} \sqrt[4]{\tan \phi}, \quad b = \sqrt{\frac{nS_a + S_o}{\pi}} \sqrt[4]{\frac{1}{\tan \phi}} \quad (10)$$

ここで、

$$a^2 : b^2 = \sin \phi : \cos \phi \quad (11)$$

となることに注意されたい。

以上より、定常状態における群の形状は式 (7), (10) で表される。そして、Fig.3 より $S_a = \pi((r+r_a)/2)^2$ と推測されるため、 ϕ によって楕円の長短径の比を、視界半径 r によって楕円の大きさを制御できるはずである。さらに、Fig.2 に示すように、係数行列 K 中の $R(\theta)$, $R(-\theta)$ により ϕ によるスクエリングの方向を θ だけ変えられるので、群全体の輪郭の軸を θ だけ傾けることができる。

3.3 シミュレーションによる検証

シミュレーションによって、まず、定常状態でのエージェント群の分布が一様分布になることを確認する。さらに、パラメータ r , ϕ , θ を変化させ、上述の形状制御原理の妥当性を確認する。

3.3.1 シミュレーションの基本設定

以下では議論を単純化するため、 $M = mI$, $D = dI$ とする。本論文の制御則を適用するとき、5 章で述べるように、群の重心の運動は M , D による 1 次系の運動方程式に従う。これを考慮して、まず、 M , D は 7 章の実験で用いる SMC 子機の駆動系の仕様で無理なく運動が実現できる値に設定する。一方、各エージェントの目標位置方向の挙動は 2 次系の運動方程式に支配される。そこで、その応答が過減衰となるように K のパラメータを決める。さらに、エージェント間や障害物との衝突を確実に避けるために、他のエージェントからの斥力と障害物からの斥力を目標位置に基づく力より十分大きく設定する。すなわち、群が定常状態にあるときに、目標位置から最も遠いエージェントにおいて、エージェント同士の衝突が起こらないように a_a , a_o を設定する。以上のように決定した、本論文の基準設定とするパラメータの値を Table 2 に示す。本節のシミュレーションでは、これらに加えて目標位置 p_r を $(0, 0)^T$ に固定している。また、6 章においてエージェントの台数と群挙動の関係を確認するため、エージェントの台数を 10, 20, 30, 40, 50 台について検討する。

例として、Fig. 5 に 40 台のエージェントを用いて基準設定でシミュレーションを行った結果を示す。ただし、点はエージェ

Table 2 Reference values

$m = 1.0[\text{kg}]$	$d = 20[\text{kg/s}]$	$a_a = 16[\text{N}]$	$a_o = 16[\text{N}]$
$k_t = 0.1[\text{kg/s}^2]$	$k_r = 0[\text{kg/s}^2]$	$\phi = 0$	$\theta = 0$
$r = 1.3[\text{m}]$	$r_a = 0.3[\text{m}]$	$r_o = 0.02[\text{m}]$

$$(r, \tan \phi, k_r, \theta) = (1.3, 1, 0, 0)$$

Fig. 5 Steady-state distribution of 40 agents using the reference values

$$(r, \tan \phi, k_r, \theta) = (1.3, 1, 0, 0)$$

Fig. 6 Behaviors of 40 agents for $d = 0.1$

ントの位置を、実線は式 (7), (10) より得た群の輪郭を表す。また、減衰率の低いパラメータ ($d = 0.1$) を用いてシミュレーションを行った結果を Fig. 6 に示す。エージェントに付した線は各エージェントの移動軌跡である。振動的な挙動が見られるが、これは単に運動方程式が振動系となるためだけではなく、本手法では群が凝縮する際に他のエージェントが視界の境界付近にあるとき、斥力が不連続に変化して揺動を起こすことによる。

3.3.2 視界半径 r を変化させた場合

Fig. 7 は基準設定から視界半径 r を変えたシミュレーションの結果で、隣接するエージェントの間隔の平均値を示している。Fig. 3 で予測したとおり、ほぼ視界半径とエージェントの半径の和 $r+r_a$ だけ各エージェントが離れて分布していることが分かる。

Fig. 8 は Fig. 7 と同じシミュレーションについて群の半径の実測値 (印) と式 (7), (10) から得られる理論値 (実線) を表しており、両者がよく一致していることが分かる。ただし、この図で内部を塗りつぶした印はエージェントの自己位置計測に誤差がないとしたときの結果である。これに対して、誤差の影響を把握するために、初期状態で全エージェントに対して x 方向、 y 方向それぞれ ± 1 [m] 以内の範囲で一様分布のランダムな誤差を加えた場合についても調べた。ただし、エージェントの移動による誤差は無視できるものとした。Fig. 8 において白抜き印が誤差のある場合の結果を表している。平均化の効果により個体の誤差に比べて群の大きさの影響は非常に小さな誤差となっている。以下、他のシミュレーション結果を示す図でも塗り印と白抜き印はこの図と同様の意味を表す。

3.3.3 ϕ を変化させた場合

基準設定から $\tan \phi = 4$, 16 に変えた場合のシミュレーション

Fig. 7 Average distance between 2 neighboring agents vs. the sight radius for various numbers of agents

Fig. 8 Radius of the herd vs. the sight radius for various numbers of agents

ン結果を **Fig. 9** (a), (b) に示す. さらに, **Fig. 10** に ϕ を変化させたときの群の輪郭の楕円の軸 (Fig. 4 中の l_a , l_b) の比を示す. 図中の実線は式 (11) から得られる楕円の軸の比の理論値 $a/b = \sqrt{\tan \phi}$ を表している. なお, $\tan \phi < 0$ の範囲では式 (6) の安定条件には当てはまらず, 3.2 節の議論が成り立たない. このとき, 群は Fig. 11 に示すように発散する.

3.3.4 θ を変化させた場合

Fig. 12 (a), (b) は, Fig. 9 (a) の設定から θ をそれぞれ $\pi/6$, $-\pi/3$ に変化させたときの様子である. 群の輪郭の形状を保ちながらその主軸を θ だけ傾けられることが分かる.

Fig. 9 Steady-state distribution of 40 agents using the reference values but ϕ

Fig. 10 Ratio of l_a and l_b vs. θ for various numbers of agents

Fig. 11 Behaviors of 40 agents for $\tan \phi < 0$

Fig. 12 Distribution of 40 agents for the reference values but θ

以上, 3.1 節で述べたとおり定常状態で群が一様分布になること, および 3.2 節で導いた原理により群の形状が制御できること, また, 位置計測の初期値にランダムな誤差が含まれる場合も, 群の形状は大きな影響を受けないことが確認できた. なお, デッドレコニングなどによる蓄積型の位置計測誤差はすでに提案している手法 COMPASS [15] [16] を用いることで, 本検証で用いた値よりも小さくできると考えられる. このような群の変形は, 狭い通路に沿って群を誘導するときに抵抗の少ない滑らかな移動を実現するなどの用途が期待できる.

4. 群内挙動の生成

3 章で群の形状の制御に用いなかった目標位置係数行列 K 中のパラメータ k_r を用いると, 以下に示すように群の形状を変えずに各エージェントに動きを与えることができる. このような挙動を群内挙動と呼ぶことにする.

4.1 k_r による群内挙動

3 章で確認したように, 式 (1) が安定となるようパラメータを選ぶとき, $k_r = 0$ とすると各エージェントは目標位置 p_r に引き付けられて定常状態において視界が接するような状態ではば静止し, 群全体は式 (7), (10) で表される楕円形となる. 以下では, この状態から $k_r \neq 0$ としたときの効果について考える. ただし, ここでは障害物がない場合を扱う. また, 簡単のため $\theta = 0$ とするが, $\theta \neq 0$ の場合はこの楕円を θ だけ傾けて考えればよい. さて, このとき k_r による f_{ri} の成分は式 (3) より

$$k_r R \left(-\frac{\pi}{2} \right) \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi \end{pmatrix} (p_r - p_i) \quad (12)$$

となるが, 式 (11) より, この力の方向は, p_r を中心として p_i を通る群の輪郭 (式 (7), (10)) に相似な楕円の p_i における接線と一致する. 全エージェントに同様な力が加わるので, これにより各エージェントが群の輪郭に沿って周回する運動が生じると考えられる. そして, 式 (1) で個体に働く粘性力により, 一定の速度パターンの周回運動に収束することが推測できる. このとき, エージェント i の定常周回速度 v_i は式 (1), (12) より,

$$|v_i| \approx \frac{k_r}{d} \sqrt{(x_r - x_i)^2 \sin^2 \phi + (y_r - y_i)^2 \cos^2 \phi} \quad (13)$$

となるはずである.

特に, $\tan \phi = 1$, すなわち, 群の輪郭が円のとき, エージェント i の周回角速度は

$$\omega_i = \frac{|v_i|}{|p_r - p_i|} = \frac{k_r}{\sqrt{2}d} \quad (14)$$

となり, 全エージェントについて等しくなる. すなわち, このとき全エージェントが等しい角速度 ω_i で p_r を中心に群の輪郭を崩さずに周回する.

なお, 厳密には周回運動による遠心力が働くが, 3 章の設定では $k_r = 0$ のときエージェントは互いに視界が接するまで引きつけられていて引力には余裕があるので, 周回速度や個体の質量が小さければ遠心力の影響は無視できると考えられる.

Fig. 13 Distribution of 40 agents for the reference values but k_r

Fig. 14 Average angular velocities of 40 agents for k_r of various values

Fig. 15 Average angular velocities for various numbers of agents

4.2 シミュレーションによる検証

基準設定 Fig. 9 (a) から k_r だけをそれぞれ $0.2\sqrt{2} [\text{kg/s}^2]$, $0.2\sqrt{17} [\text{kg/s}^2]$ へ変えたときのエージェントの 50 [s] 間の移動軌跡を Fig. 13 (a), (b) に示す. 各エージェントが群全体の形状を保ちながら内部で移動することが分かる.

Fig. 14 は 40 台のエージェントからなる群に対して k_r を 180 [s] まで $0 [\text{kg/s}^2]$ とし, 180 [s] において様々な値にステップ状に変化させたときの全エージェントの平均角速度を表している. Fig. 15 はエージェントの台数 10, 20, 30, 40, 50 台に対して, $k_r = 0.2\sqrt{2} [\text{kg/s}^2]$ としたときの結果である. いずれも, 図中の破線は $t \geq 180$ において設定した k_r に対して式 (14) から得られる角速度の理論値を表している. 定常角速度が理論値とよく合っている.

また, Fig. 16 は Fig. 13 (b) に対して θ を変化させたときの様子である. 群の形状と群内挙動を保ちながら主軸が θ だけ傾けられている.

以上によって, k_r を用いることで群全体の形状を保ちながら群内のエージェントの周回挙動を生成できることが分かった.

Fig. 16 Distribution of 40 agents using the reference values but k_r and θ

このような挙動は, 例えば本論文で扱うものより大きな非凸の障害物に対したときなどに, 停留を避けるのに役立つ可能性がある.

5. 群の重心の移動

本章では同一のパラメータ値あるいは信号を群全体にブロードキャストすることによって, 個々のエージェントに個別の目標を与えずに群の移動を実現する手法を提案する. まず, 群の重心の運動を表す方程式を導き, 次に, この運動方程式をモデルとしたオブザーバを構築して群の重心を操作する手法を提案する. これにより, 形状や群内挙動とは独立に群の重心の移動を操作できる. さらに, シミュレーションを行い, 3 種類の異なるタイプの障害物に対して, 同一の制御則で回避しながらの移動を実現できることを確認する.

5.1 群の重心の操作原理

5.1.1 群の重心の運動方程式

群の重心の運動方程式は各エージェントの運動方程式 (1) の平均をとることで,

$$M\ddot{p}_c + D\dot{p}_c = K(p_r - p_c) + \bar{f}_o, \quad (15)$$

$$p_c \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_i, \quad \bar{f}_o \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} f_{oi}$$

となる. 以後, この式を重心方程式と呼ぶ.

5.1.2 目標とする運動

一般的に移動エージェントを操縦するとき, 操作入力として位置指令型, 速度指令型, 力指令型などが考えられるが, 田村ら [14] は人間がエージェントの様子を見ながら操縦するときには速度指令型が最も操作しやすいことを確認している. そこで本研究では群の重心の速度を目標値 v_{ref} に近づけるための操作系の実現を検討する. 目標とする重心の運動を

$$M\ddot{p}_c + D\dot{p}_c = dv_{ref} + \bar{f}_o \quad (16)$$

とすると, 重心方程式 (15) より全エージェントに与える目標位置 p_r を

$$p_r = K^{-1}Dv_{ref} + p_c \quad (17)$$

とすればよい. ただし, 式 (16) は障害物の影響を受ける. そこで, 障害物が存在しない理想的な状況での移動軌跡を参照移動軌跡と呼び, 提案手法の検証に用いる. その運動は次式で表せる.

$$M\ddot{p}_c + D\dot{p}_c = dv_{ref} \quad (18)$$

以下ではまず、群の重心位置 p_c が利用できる場合について考える。しかし、実際には群の重心位置をリアルタイムに得ることは難しいため、次に、重心位置を推定する一種の状態オブザーバを導入し、推定した重心位置を用いて群の移動を制御する手法を提案する。

5.1.3 重心位置実測値を用いた操作系

まず、重心位置がリアルタイムに利用できる場合、目標とする式 (16) の操作系は式 (15), (17) より Fig. 17 のように表すことができる。この操作系を用いて障害物が存在するフィールドを移動させるとき、群の重心位置 p_c と参照移動軌跡 $\tilde{p}_c$ の偏差を $\tilde{p}_e = \tilde{p}_c - p_c$ とすると偏差ダイナミクスは $M\ddot{\tilde{p}}_e + D\dot{\tilde{p}}_e = -\tilde{f}_o$ となる。障害物の影響を受けると重心位置 p_c と参照移動軌跡の重心 $\tilde{p}_c$ との間には位置偏差が生じ、障害物から離れて定常状態になっても解消されないことが分かる。

5.1.4 オブザーバを用いた操作系

実際には多くの場合、重心位置をリアルタイムに利用することは難しいため、重心方程式 (15) に対するオブザーバを用いることを考える。ただし、 $\tilde{f}_o$ も得ることが難しいので、障害物が存在しない理想的な状況を想定し、次式をオブザーバとして用いる。

$$M\ddot{\hat{p}}_c + D\dot{\hat{p}}_c = K(p_r - \hat{p}_c) \quad (19)$$

p_c の代わりにこのオブザーバより得られる重心位置 $\hat{p}_c$ を用いると、Fig. 17 の操作系は Fig. 18 のように構成できる。ただし、 $\hat{p}_c$ は集中処理系において計算し、各エージェントへブロードキャストする p_r の算出だけに用いる。目標位置 p_r は式 (17) の群の重心位置 p_c の代わりに重心の推定値 $\hat{p}_c$ を用いて計算する。したがって、群の移動中は $\hat{p}_c$ が変化するため p_r も時間とともに変化する。このとき、 $\hat{p}_c$ と p_c の誤差を $p_e = \hat{p}_c - p_c$ と

すると、誤差ダイナミクスは式 (15), (19) より次式で表すことができる。

$$M\ddot{p}_e + D\dot{p}_e + Kp_e = -\tilde{f}_o \quad (20)$$

式 (6) より上式を安定となるように設計したとすると、 $t \rightarrow \infty$ で $\tilde{f}_o = 0$ であれば $\dot{p}_e = \ddot{p}_e = p_e = 0$ に収束する。この収束の速さは特性方程式 $Ms^2 + Ds + K = 0$ の根で決まるが、これは人の操作と比較して十分早く設定できると考えられる。したがって、操作者はほぼ式 (16) のとおりの対象を操作するような感覚を得られるはずである。

なお、3 章、4 章の群の形状および群内挙動の制御は重心位置係数行列 K の各パラメータによって行われ、目標位置 p_r には影響されない。一方、本項の群の移動は、重心位置係数行列 K の各パラメータを変えずに目標位置 p_r によって実現できる。目標位置 p_c を用いて式 (2) を展開すると、

$$f_{ri} = K(p_c - p_i) + K(p_r - p_c)$$

となる。第 1 項はエージェントの形状変化や群内挙動を生成するために作用し、第 2 項は全エージェントに等しく作用することから目標位置によらず形状変化や群内挙動を制御する成分となっている。すなわち、群の移動の操作は、 v_{ref} によって形状変化や群内挙動とは互いに独立に操作できる。

5.2 障害物が存在しない場合のシミュレーション

まず、障害物が存在しないフィールド上で、オブザーバを用いて重心を推定した場合についてシミュレーションによる検証を行った。定常状態となるのに十分な時間である 180 [s] まで $|v_{ref}| = 0$ とし、この間は群の重心位置を (0,0) とするために $p_r = (0,0)^T$ を与えた。180 [s] 以降、 $|v_{ref}| = 0.4$ [m/s]、 $\angle v_{ref} = \tan^{-1} 1/2$ を操作入力として与えた。各パラメータは 300 [s] まで基準設定とし、それ以降は $\tan \phi = 4$ とした。さらに、エージェントの台数を 10, 20, 30, 40, 50 台とした場合についてシミュレーションを行った。

結果を Fig. 19 に示す。Fig. 19 (a) はパラメータ ϕ を変化した 300 [s] ($\triangle$ でマーク) 前後の重心の軌跡を表す。Fig. 19 (b) は v_{ref} を加えた 180 [s] 前後の重心の速さを、Fig. 19 (c) は ϕ を変化した 300 [s] 前後の重心の速さを示している。これらの図にはオブザーバの推定した重心の挙動もプロットしてあるが、シミュレーションより得られた重心の挙動とほぼ完全に一致しており、オブザーバにより重心を推定できることが分かる。また、 K を変えても軌跡と速さは影響を受けないこと、つまり、

Fig. 17 Manipulation system using the real value of p_c

Fig. 18 Manipulation system using the observer

Fig. 19 Behavior of the center of the herd using the observer ($|v_{ref}| = 0.4$ [m/s], $\angle v_{ref} = \tan^{-1} 1/2$)

Fig. 20 Migration using the real value of p_c

v_{ref} による群の移動の操作と群の形状の制御は独立に行えることが示されている。3.3.1 項に述べたように、各エージェントの目標位置方向の挙動は 2 次系の運動方程式に支配されるが、目標とする群の重心の運動はほぼ 1 次の運動方程式 (16) に従い、 K に依存しない。なお、群の重心の運動特性とエージェントの運動特性を別に設計することも可能で、これについては操作系を現在検討中である。

5.3 多様な障害物が存在する場合のシミュレーション

3 種類の障害物が存在するフィールド上で、重心位置がリアルタイムに計測できる場合とオブザーバを用いた場合について群の移動のシミュレーションを行った。3 種類の障害物の特徴は、(1) 大きな円形障害物一つ (中心 (20, 1) [m], 半径 2 [m] の円周上に 0.02 [m] 間隔で障害物を配置)、(2) 小さな円形障害物を等間隔 (x 方向 50 [m] から 60 [m] の間に 5 [m] 間隔で障害物を配置)、(3) 壁状の障害物の中央に通路 ($\{(100, -30), (105, -1)\}$, $\{(100, 30), (105, 31)\}$ [m] を頂点とする四角形上に 0.02 [m] 間隔で障害物を配置)

で、フィールド上の配置は Fig. 22 (a) のとおりである。さらに耐故障性を検証するために、

(4) 4,200 [s] になったとき 40 台中 5 台のエージェントを同時に故障

させた。ここで故障とは移動できなくなる状態である。

群の移動中、各パラメータは基準設定とした。5.2 節と同様に 180 [s] まで $|v_{ref}| = 0$ とし、180 [s] 以降は $|v_{ref}| = 0.04$ [m/s], $\angle v_{ref} = 0$ とした。

5.3.1 重心位置の実測値が利用できる場合

Fig. 20 (a), (b) に群の重心位置 p_c の正確な値がリアルタイムに利用できる場合のシミュレーション結果を示す。Fig. 20 (a) は重心の移動軌跡、Fig. 20 (b) は重心の速さを示している。Fig. 20 (a) では目標とする進行方向と垂直な方向のスケールを 50 倍して移動軌跡の変化を拡大して表している。また両図の破線は式 (18) による障害物が存在しないと仮定した参照移動軌跡である。ただし、故障していないエージェントだけの重心位置を群の重心位置とした。

これらの図には、タイプの異なる障害物に対して、パラメータの値を変えずに回避できることが示されている。また、数台のエージェントが故障しても群全体として大きな影響を受けないことから、耐故障性を有する手法であることが分かる。ただし、5.1.3 項で述べたように、障害物の影響により、参照移動軌跡との間に偏差が生じることが確認できる。

Fig. 21 Migration using the estimated value of $\hat{p}_c$

Fig. 22 Migration on a field with 3 kinds of obstacles and disability of 5 agents

5.3.2 オブザーバを用いた場合

Fig. 21 はオブザーバを用いて群の移動を行ったときのシミュレーション結果で、重心の軌跡と速さを Fig. 20 と同じ形式で示している。このときも同様に異なる障害物に対して同じパラメータ値で移動できることが分かる。さらに、5.1.4 項で示したように、障害物から離れたあとでは、重心位置が参照移動軌跡に収束することが確認できる。

このときの全エージェントの移動軌跡を Fig. 22 (a) に示す。Fig. 22 (b)~(d) はそれぞれの障害物を回避しているとき、Fig. 22 (e) は故障して移動できなくなったエージェントを回避しているときのスナップショットである。Fig. 22 (b) では群は障害物の両側に分かれて、Fig. 22 (c) は小さな障害物を群の内部に取り込みながら、Fig. 22 (d) は障害物の形状に沿って、いずれも回避に成功している。Fig. 22 (e) では故障したエージェントが障害物となるが、Fig. 22 (c) と同様に回避できている。

6. 台数への非依存性

本論文の手法で生成した群挙動の多くは、台数に依存しない。以下にその理由と、シミュレーションによる検証結果をまとめておく。

隣接エージェント間の平均距離：本研究では斥力を目標位置への引力に比べて十分大きく設定しているため、エージェント同士の接触は剛体同士になる。このため、目標位置への引力によって、隣接エージェント間の距離は台数に依存せずに常に一定に保たれるはずである。実際、Fig. 7 のシミュレーションで、台数により隣接エージェント間の平均距離は変化しないことが確認できた。

群の輪郭の主軸の長径と短径の比：群の輪郭の主軸の長径と短径の比は $\tan \phi$ の 2 乗根で与えられ、台数の項 n が含まれていない。このことから台数に依存しないと推測され、Fig. 10 のシミュレーションにより確認できた。

群の輪郭の主軸の傾き：群の輪郭の主軸の傾きは K 中のパラメータ θ のみに依存するため、台数に依存しない群挙動となる。

群内挙動： K 中のパラメータ k_r の影響により全エージェントは群の輪郭の接線方向に力を受け、一定速で形状を保ちながら周回する運動が生じる。このことから、群内挙動は台数に依存しない群挙動である。特に、 $\tan \phi = 1$ のとき、式 (14) よりすべてのエージェントが同じ角速度で回転することが導かれ、Fig. 15 のシミュレーションにより検証されている。

群の移動：本手法では重心方程式 (15) に基づいて群の操作を行っている。この重心方程式は、障害物の影響が平均値となる点を除いて台数に依存しない。シミュレーションの結果 Fig. 19 には台数を変化させたときの軌跡と重心方程式より得られる軌跡をすべて重ねて示しているが、台数の影響は見られない。

7. 実験による検証

以上で提案した手法について、SMC 実験システムの子機を用いて簡単な実験による確認を行った。

7.1 SMC 実験システム [13] [14]

SMC 実験システムとは、移動に優れた多くの子機と処理能力に優れた親機からなる親子型の群ロボットシステムである。本実験ではその子機の群を操作対象とし、親機の代わりに操縦者がホスト PC からワイヤレス LAN (IEEE802.11b) を介してブロードキャスト情報を与える。子機は Fig. 23 に示す差動 2 輪型の自律移動ロボットであり、大きさは $0.50 \times 0.25 \times 0.25$ [m] で最大速度は 0.1 [m/s] である。CopmactPCI 方式の CPU (MMX Pentium 233 MHz) と I/O ボードを搭載している。また、外界センサとして全方位カメラを搭載している。カメラの大きさは $0.10 \times 0.05 \times 0.05$ [m] で有効画素数 640×480 [dot]、CCD 方式で 24 ビット RGB カラー画像を得ることができる。カメラ出力はアナログコンポジットで、CPU への取り込みはフレームグラバカードでメモリに展開して行っている。カメラは子機の上部に、本体の中心から 0.2 [m] 前方にオフセットして、地上

Fig. 23 Agent for the experiments (Child Machine of Super Mechano Colony Experimental System)

から 0.8 [m] の高さに取り付けられている。水平面上でこの位置を仮想中心点と呼ぶこととする。さらに、子機は両車輪のエンコーダによるオドメトリングを用いて自己の位置と方向を計測できる。エンコーダの分解能から、仮想中心点の移動の分解能は、エージェントの直進方向に 2.7×10^{-5} [m]、旋回方向に 3.5×10^{-5} [m] である。本実験では特別にこの点を中心に直径 0.6 [m] の黒い円盤を下部へ取り付け、他の子機から仮想中心点を中心とした半径 0.3 [m] の大きさと認識されるようにしてある。フィールドの床は凹凸のない緑色の平面で、周囲を同色の壁で囲まれていて、床と壁の区別は行わないものとする。子機と障害物の色はいずれも黒であり、これらも区別しない。以下、本章ではこの子機をエージェントと呼ぶ。

7.2 他のエージェントと障害物の認識

他のエージェントと障害物の認識は、各エージェントが自己の全方位カメラを用いて独立して行う。Fig. 24 に 3 台のエージェントと実験に用いた障害物を示す。ここでは、中央のエージェントから他の 2 台のエージェントと障害物は等距離に配置してある。このとき、Fig. 24 の前列中央のエージェントのカメラより得られた画像は Fig. 25 (a) のとおりである。この図にはカメラの中心ピクセルから等距離にあるピクセルを表す円 (100 から 10 ピクセルおきに 190 ピクセルまでの円) を描いてある。カメラの中心ピクセルを原点とし、下方向を X 軸正、右方向を Y 軸正とした座標系 (カメラ座標系) 上でピクセルの位置を $p_{pix} = (x_{pix}, y_{pix})$ のように表す。全方位カメラの特性として、実際のカメラ中心から同一水平面上等距離にある物体はカメラ画像上で原点から等距離にあるピクセルに現れる。そこで本研究では中心ピクセルからの距離が r_{pix} 以下のピクセル集合だけについて認識を行うことで視界を設定する。各ピクセルの

Fig. 24 3 agents and one obstacle for the experiments

(a) Image from a camera on an agent showing 2 other agents and an obstacle (b) Image being processed for recognizing 2 agents and an obstacle

Fig. 25 Sight of an omni-directional camera

RGB 値がすべて閾値（実験では 96）以下で、かつ各色差の絶対値が閾値（実験では 16）以下ならばエージェントまたは障害物と認識する。この方法を用いて処理した画像を Fig. 25 (b) に示す。

次に、式 (1) の個体の運動法則を実現するため、エージェントおよび障害物からの斥力を計算する。視界内のピクセルに対してエージェントまたは障害物と認識されたピクセルの位置の和をとる。ただし、カメラ座標系とフィールド上の座標系は必ずしも一致せず、カメラ座標系の X 軸正の方向はエージェントの向きである。そこで、フィールド座標系に対するエージェントの向きを θ_a とすると、回転行列 $R(\theta_a)$ をかけることで座標系を一致させて、次式により斥力を求める。

$$f_a + f_o = a_{ao} R(\theta_a) \sum_{|p_{pix}| < r_{pix}} \begin{cases} \frac{p_{pix}}{|p_{pix}|} & \text{if } p_{pix} \text{ recognized} \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (21)$$

本実験では、他のエージェントと障害物は同じ性質の力をもたらすため、式 (21) で他のエージェントと障害物からの斥力の和が求まる。ただし、 $a_{ao} = 4 \text{ [N]}$ とした。なお、本実験では、以上の処理をエージェント上の CPU で 5 [fps] のフレームレートで行っている。

7.3 実験

まず、視界半径を変化させ、群の大きさが変わることを確認した。次に、目標位置係数行列 K 中の ϕ , k_r を変化させ、それぞれ楕円形に変形と周回挙動が生じることを確認した。最後に重心位置が利用できる場合について、群の移動操作を行った。ただし、エージェントは初期状態においてフィールド座標系上での自己の位置と方向を既知とした。また、エージェントの移動距離が短いため移動による位置計測誤差は無視できるものとした。

7.3.1 視界半径 r を変化させた場合

目標位置 p_r を $(0,0)$ とし、視界半径 r_{pix} を 160 ピクセルから 5 ピクセルおきに 130 ピクセルまで変化させた。

Fig. 26 は、それぞれの視界半径に対するエージェントの位置の実測値を表す。目標距離およびエージェント間の平均距離を Fig. 27 に示す。視界半径によって群の大きさを制御できることが確認できた。

7.3.2 ϕ を変化させた場合

目標位置 p_r を $(0,0)$ に固定し、目標位置係数行列 K 中の $\tan \phi$ を 1, 4, 8 と変化させたときの定常状態での各エー

Fig. 26 Locations of 3 agents for various sight radiuses

ントの配置 (点) と式 (7), (10) から得られる形状 (実線) および各エージェントの占有する領域 (破線) の理論値を Fig. 28 に示す。図のように、 ϕ によって形状を制御できることが確認できた。

7.3.3 群内挙動

目標位置 p_r を $(0,0)$ とし、目標位置係数行列 K 中の k_r を $0.4\sqrt{2} \text{ [kg/s}^2\text{]}$ としたときの各エージェントの移動軌跡を Fig. 29 に、角速度を Fig. 30 に示す。Fig. 30 の破線は $k_r = 0.4\sqrt{2}$ に対して式 (14) より得られる理論角速度である。各個体が理論値にほぼ等しい均一の角速度で周回している。

また、Fig. 31 に $k_r = 0.2\sqrt{2}, 0.4\sqrt{2}, 0.8\sqrt{2}, -0.2\sqrt{2} \text{ [kg/s}^2\text{]}$ と変化させたときの角速度を示す。実験はエー

Fig. 27 Average distances for various sight radiuses

Fig. 28 Arrangement of 3 agents for various values of ϕ

Fig. 29 Rotation trajectories of 3 agents for $k_r = 0.4\sqrt{2}$

Fig. 30 Rotation angular velocities of 3 agents for $k_r = 0.4\sqrt{2}$

Fig. 31 Average angular velocities for various k_r values

トがほぼ 1/2 周回するまで行った。それぞれの k_r の値に対して式 (14) より得られる理論角速度 (破線) とよく一致している。

以上、群内挙動を制御できることが実験で示された。

7.3.4 群の移動

$|v_{ref}| = 0.04$ [m/s], $\angle v_{ref} = 0$ を与えることで群の移動させる実験を行った。ただし、群の重心位置は全エージェントから 0.1 [s] 間隔で常々に送信されている各エージェントの位置の平均値を用いた。障害物として (6, 0.5) [m] を中心に半径 0.3 [m] の円盤を配置した。得られた結果として、Fig. 32 にエージェントと重心の移動軌跡、Fig. 33 に重心の速さを示す。また、両図の破線は式 (18) から得られる障害物が存在しないと仮定したときの参照移動軌跡である。両図とも障害物の影響を受けないときは軌跡、速さともに破線とよく一致している。さらに、5.2 節で示したように、移動軌跡と参照軌跡に偏差が生じることも確認できた。以上から、理論どおりに、障害物を考慮して特別な操作をせずに簡便に障害物を回避しての移動を実現できることが実験で確認できた。

Fig. 32 Trajectories of 3 agents migrating using the actual information of p_c on a field with an obstacle

Fig. 33 Velocities of 3 agents migrating using the actual information of p_c on a field with an obstacle

8. おわりに

本論文では多数の均質な自律移動エージェントから成る群に対して、実装が容易な局所的な運動法則を導入することによって、外部から単純な方法で群の形状、群内挙動、群の移動を制御する手法について述べた。

まず個体の制御則を提案し、群の輪郭を表す方程式を導いて、視界半径 r と目標位置係数行列 K のパラメータを用いて群の形状を制御できることを示した。次に、形状の制御に用いないパラメータによって、形状とは独立に群内挙動を制御する原理を提案した。さらに、群の重心の運動を表す運動方程式を導き、群の形状と群内挙動とは独立に群の移動を外部から操作する手法を提案した。そして、シミュレーションによって、群の形状の制御、群内挙動の生成を確認した。また、多様な形状の障害物が存在するフィールド上での群の移動について検討し、同じシステムパラメータで多様な障害物を回避できる柔軟性のある手法であることを検証した。さらに、これらの群挙動は台数に依存しないこと、群の移動において耐故障性を有することを示した。最後に、実験機として SMC 実験システムの子機 3 台を用いて実験を行い、以上本手法の基本的な性質を確認した。

なお、より複雑なフィールド上では形状変化や群内挙動を群の移動時に行うことで効果的な操作が期待できる。一方、本稿では、群を操作する操作者または特別な個体が群全体の位置を大まかに把握できることを前提としているが、その観測の適切な手段については検討を要する。これらの点については今後の課題としたい。

参 考 文 献

- [1] Y.U. Cao, et al.: "Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions," *Autonomous Robots*, vol.4, no.1, pp.7-27, 1997.
- [2] K. Sugihara and I. Suzuki: "Distributed Motion Coordination of Multiple Mobile Robots," *Proc. IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*, pp.138-143, 1990.
- [3] Q. Chen and J.Y.S. Luh: "Distributed Motion Coordination of Multiple Robots," *Proc. IEEE/RSJ IROS 1994*, pp.1493-1500, 1994.
- [4] T. Balch and R.C. Arkin: "Behavior-Based Formation Control for Multirobot Team," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol.14, no.6, pp.926-939, 1998.
- [5] J.D. Stilwell and E.B. Bishop: "Platoons of Underwater Vehicles," *IEEE Control System Magazine*, December, pp.45-52, 2000.
- [6] P.J. Desai, P.J. Ostrowski and V. Kumar: "Modeling and Control of Formations of Nonholonomic Mobile Robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol.17, no.6, pp.905-908, 2001.
- [7] 牧野, 佐久間, 小林, 松尾: "自律移動ロボットの群移動挙動のモデル化と制御", 第13回自律分散シンポジウム 予稿集, pp.305-310, 2001.
- [8] 牧野, 松尾: "自律移動ロボットの群移動挙動", 第14回自律分散シンポジウム予稿集, pp.305-310, 2002.
- [9] 早川, 水口: "群れ運動の数理モデル", *数理学*, vol.424, pp.63-70, 1998.
- [10] 三宮: "魚群行動のモデル", *数理学*, no.432, pp.61-68, 1999.
- [11] 菅原, 中村, 佐野: "アクティブエレメント集合による機能の創発", *計測と制御*, vol.38, no.10, pp.641-645, 2000.
- [12] W.C. Reynolds: "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model," *Computer Graphics* vol.21, no.4, pp.25-34, 1987.
- [13] M. Furuta, H. Kurihara and Y. Matsuo: "Experimental Platform and Collective Performance Analysis of a Super-Mechano Colony," *Procs of TITech COE-SMS Symposium 2001*, 2001.
- [14] 田村, 松尾, 邵, 友納: "実験システムへの実装を考慮した自律移動ロボットの群移動制御原理", 第19回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.1199-1200, 2001.
- [15] 松尾, 小林, 牧野: "COMPASS: 自律移動ロボット群における近接通信を用いた共有座標系の自己組織化手法", *電気学会論文誌*, vol.120-C, no.5, pp.748-756, 2000.
- [16] 牧野, 小林, 松尾: "[COMPASS] を応用した自律移動ロボットの群れ移動と分割行動の自己組織化", 第12回自律分散シンポジウム 予稿集, pp.261-266, 2000.

牧野浩二 (Kohji Makino)

1975年8月16日生。1999年3月東京工業大学工学部制御工学科卒業。2001年3月同大学大学院修士課程修了。同年4月本田技術研究所入社。2002年3月同研究所退社。2002年4月東京工業大学大学院博士後期課程入学。現在に至る。群ロボットシステムに関する研究に従事。計測自動制御学会学生会員 (日本ロボット学会学生会員)

会員。

松尾芳樹 (Yoshiki Matsuo)

1957年1月1日生。1979年3月東京工業大学工学部制御工学科卒業。1984年3月同大学大学院博士課程制御工学専攻修了 (工学博士)。同年4月東京工業大学工学部助手。1990年12月同助教授。2000年4月より組織変更により東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻助教授。現在に至る。メカトロニクスシステム、特に群ロボットシステムや人間—機械協調制御系の制御に関する研究・教育に従事。IEEE, 電気学会, 計測自動制御学会, 日本人間工学会, 日本シミュレーション学会会員 (日本ロボット学会正会員)