

# 場に基づいた避難誘導のための人員配置最適化

岡田昌史\* 安藤輝尚\*

## Optimization of Personal Distribution for Evacuation Guidance based on Vector Field

Masafumi Okada\* and Teruhisa Ando\*

It is an important issue to make a disaster reduction plans for overcrowded population in urban cities. In this paper, we focus on evacuation guidance to prevent the damage from spreading. The personal navigation system cannot deal with evacuation guidance for the human crowd with large numbers of individuals because of time constrain and extraordinary communication error. An implicit guidance based on dynamical characteristic of swarm behavior is efficient and effective by a few guidance operators. We propose a modeling and control method of swarm based on vector field. The evacuee behavior model contains intention of evacuation, field of view, collision avoidance and evacuee group, which are represented by vector field. The guidance operator model contains indicating direction. By giving the desired vector field that indicates the safe route for evacuation, the position of guidance operators are optimally distributed. Moreover, the number of guidance operators is minimized based on the contribution index. The proposed modeling and control method is applied to the swarm robot and the effectiveness is evaluated by the experiments.

**Key Words:** Disaster Reduction, Evacuation Guidance, Vector Field, Swarm Robot

### 1. はじめに

災害対策として、災害の発生を未然に防ぐ防災と災害発生時の被害を減らすことを目的とした減災がある [1]。しかし、防災により完全に災害を防ぐことは難しく、減災を重視する考え方が広まりつつあり [2] [3]。特に、建造物内で大人数に対して適切な避難誘導を行うことは災害による被害を最小限に抑えるために重要な課題であると言えよう。避難誘導において、速やかに安全を確保するために人々を適切な経路に誘導することが重要なことであるが、どのように誘導すべきか（誘導の伝達）が課題として挙げられる。伊藤ら [4] は高所から人の動きを観察する鳥瞰を用い、情報提供者と歩行者が携帯電話によって会話をすることで誘導を伝達するナビゲーションシステムを開発した。しかし、大人数を避難させる場合に各個人に個別の誘導を行うには時間がかかること、動揺する人々に明示的な細かい指示は伝わりにくいことなどから、ナビゲーションの手法をそのまま避難誘導に用いることは難しい。そこで、避難する人々をマクロな群としてとらえ、その特性を利用して暗示的な誘導を行うことが有効であろう。

暗示的な方法として、避難訓練の場で最も広く用いられているように出口の方向を声と上半身を使って指し示しながら誘導者自身も出口の方へ避難する指差誘導法や、誘導者が近辺にいる少数の避難者を引き連れて避難することで人々の流れを生み出す吸着誘導法 [5] がある。これらの方法では誘導員も同時に避難するため、比較的小規模な群の誘導に適している。原科ら [6] は避難者が直接自己の行動では得ることのできない周囲の特定の情報を経路指示パネルに表示することで、所望の誘導を行うシミュレーションを行った。しかし、これは避難経路の提示であり、火災によって避難経路が利用不可になるなど、動的に変化する環境への対応は難しい。一方、群の誘導法として群ロボットの制御がある。Fink ら [7] はポテンシャル場に基づいて複数のロボットで協調物体搬送を行った。Kerr ら [8] は気体の拡散を模倣させた効率的な探索アルゴリズムを提案した。Shimizu ら [9] は分子動力学とナビエ・ストークスの式に基づいた群の編隊制御を行った。Pimenta ら [10] [11] は群を非圧縮性流体として扱い、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた制御法を提案した。これらはタスク実行のために群内の個体の移動アルゴリズムを設計するものであり、意思をもった群の誘導に利用するのは難しい。Vaughan ら [12] は牧羊犬を模したロボットを用いてアヒルの群の追い込み実験を行った。この方法はアヒルがロボットから逃げようとする群の特性を利用して暗示的な誘導を行うものであるが誘導のためのアルゴリズムが

原稿受付 2010年8月31日

\*東京工業大学

\*Tokyo TECH

■ 本論文は提案性で評価されました。

発見的な要素を多く含む。

本研究では、誘導員を適切な場所に配置することで人の群を暗示的に誘導する方法を提案する。人の避難しようとする意思を群のマクロな特性としてベクトル場でモデル化し、同様に誘導員の指示方向とその大きさをベクトル場でモデル化する。群内の個体の動きはベクトル場と個体どうしの相互作用によって決定されるため、誘導員が空間内の一部のベクトル場を変化させることで、群全体を暗示的に誘導することが可能である。誘導員の配置については場の重ね合わせを利用することで最適化を行い、このとき近傍の情報のみを用いることで、膨大であると予想される群全体の情報を得る必要がなくなる。また、オンライン最適化法を適用することで、動的に変化する環境への対応を可能とする。さらに、提案方法の有効性を示すために、自律移動ロボットを用いた誘導実験を行う。

## 2. 群のマクロモデルと個体の動き

### 2.1 空間の設定と群の意思のモデル化

ここでは、Fig. 1-(a)のように避難経路の途中に分岐があり、通常はどちらを選択しても避難できるが、Fig. 1-(b)のように一方が火災やその他の要因によって通行不可能となった場合を考える。このとき、誘導員を適切に配置することで人の群を正しい避難経路へ誘導する。なお、入口からは継続的に避難者が入り、出口から出ていくものとする。このとき人が経路に沿って避難しようとする意思をモデル化する。群の中の個体の動きは、ReynoldsのBoid model [13]における三つの行動規則 (a) 近くの仲間との衝突を回避する (Collision Avoidance) (b) 近くの仲間と速度を合わせる (Velocity Matching) (c) 近くの仲間の傍に留まる (Flock Centering) によってモデル化されることが知られている。筆者らはこれまでに快適空間の設計を目的として展示会の順路に沿った人の流れをベクトル場によってモデル化した [14]。本研究でも同様に、Boid modelの (b) の規則として、入口から避難口に向かう群の流れを空間内のベクトル場でモデル化する。(a)、(c)の行動規則については後述する。

### 2.2 避難ベクトル場の設計

群の意思を表すベクトル場を空間における座標  $\mathbf{x}$  の関数として  $\mathbf{v}^f = \mathbf{v}^f(\mathbf{x})$  で表す。ここでは、 $\mathbf{v}^f(\mathbf{x})$  を表す関数として、以下の  $\mathbf{x}$  のべき乗多項式を用いた。

$$\mathbf{v}^f(\mathbf{x}) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1\mathbf{x} + \mathbf{a}_2\mathbf{x}^2 + \mathbf{a}_3\mathbf{x}^3 \dots \quad (1)$$

$$= \Theta\phi(\mathbf{x}) \quad (2)$$

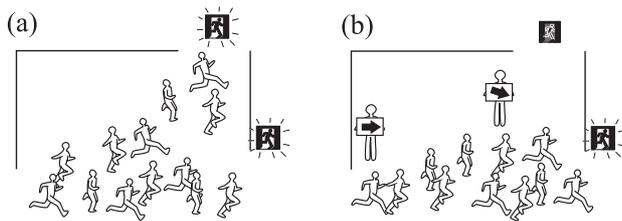


Fig. 1 Evacuation and non-available routes

$$\Theta = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_0 & \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_3 & \dots \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\phi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}^T & \mathbf{x}^{2T} & \mathbf{x}^{3T} & \dots \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{a}_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) はべき乗項の係数であり、ベクトル  $\mathbf{x}$  のべき乗は

$$\mathbf{x}^i = \begin{bmatrix} x^i & x^{i-1}y & x^{i-2}y^2 & \dots & y^i \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

で定義する。実際に  $\mathbf{v}^f$  を求める。まず、Fig. 2に表されるように、入口から二つの出口への経路  $\xi_i^j$  ( $j = 1, 2$ ) ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) を設定する。次に、 $\xi_i^j$  の近傍の点  $\mathbf{x}_i$  を設定し、この点におけるベクトルを

$$\mathbf{v} = \xi_{i+1}^j - \mathbf{x}_i \quad (7)$$

で定義する。空間内に多くの  $\mathbf{x}_i$  を定義することで多くの  $(\mathbf{v}, \mathbf{x}_i)$  の組が得られ、これを式 (2) で最小二乗近似することで  $\Theta$  が得られる。この方法により、Fig. 2で設定した避難経路は Fig. 3の避難ベクトル場として表される。

### 2.3 障害物や相手との衝突を避ける場の設計

群の中の各個体は壁やお互いの衝突を避ける行動をとる。これを方向性を持ち、距離が離れると効果が弱くなる場でモデル化する。これにより、Boid modelの行動規則 (a) を表現する。ある座標  $\mathbf{x}$  において、 $\mathbf{x}_j = [x_j \ y_j]^T$  にいる個体  $j$  から受ける衝突回避の場  $\mathbf{v}_j^p$  を

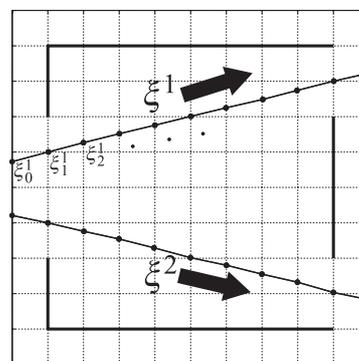


Fig. 2 Defined evacuation route

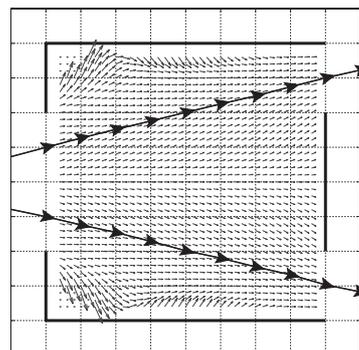


Fig. 3 Obtained evacuation vector field

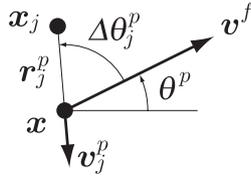


Fig. 4 Parameter definition for collision avoidance

$$v_j^p(x) = -\frac{c^p}{1 + \exp\{\alpha^p(\|r_j\| - b^p)\}} \frac{r_j}{\|r_j\|} \quad (8)$$

$$r_j^p = x_j - x \quad (9)$$

で定義する.  $a^p$ ,  $c^p$  は定数であり,  $b^p$  は方向性を考慮して

$$b^p(\Delta\theta_j^p) = \frac{\gamma^p}{1 + \exp\{\alpha^p(\Delta\theta_j^p - \beta^p)\}} + \delta^p \quad (10)$$

$$\Delta\theta_j^p = \left| \tan^{-1} \left( \frac{y_j - y}{x_j - x} \right) - \theta^p \right| \quad (11)$$

と定義する. ここで,  $\alpha^p$ ,  $\beta^p$ ,  $\gamma^p$ ,  $\delta^p$  は定数であり,  $\delta^p$  は個体の大きさに相当する.  $b^p$  が大きくなると,  $v_j^p$  は大きくなり, 個体  $j$  から離れようとする.  $\Delta\theta_j^p$  は  $x$  にいる個体  $i$  の向き  $v^f$  が水平方向となす角  $\theta^p$  と  $r_j^p$  のなす角度を表しており, これらのパラメータは Fig. 4 のように定義される. 式中の逆正接は  $0 \sim \pi$  で解を持つものとし,  $\beta^p$  は人間が立体視できる視野が前方  $120^\circ$ , すなわち  $\pm 60^\circ$  である [15] ことから,  $\beta^p = \pi/3$  とした. これにより, 衝突を避ける場  $v_j^p$  が前方  $120^\circ$  を越えた辺りで急速に小さくなり, 個人  $i$  から相手  $j$  が見えなくなる様子が表現できる.

次に, 壁との衝突を避ける場を設定する. 壁は静止物体であり, 人のように視野外から接近してくることはないうえ, 後方にある壁も比較的把握が可能と考えられる. そこで, 座標  $x$  の点における, 壁との衝突を避ける場  $v^w$  を

$$v^w(x) = -\frac{c^w}{1 + \exp\{a^w(\|r^w\| - b^w)\}} \frac{r^w}{\|r^w\|} \quad (12)$$

と定義する. ここで,  $a^w$ ,  $b^w$ ,  $c^w$  は定数であり,  $r^w$  は  $x$  と壁との最短点へのベクトルを意味する.

式 (8) における  $a^p$ ,  $c^p$ , 式 (10) における  $\gamma^p$ , 式 (12) における  $a^w$ ,  $b^w$ ,  $c^w$  の値を決定するために, 人の行動の観察を行った. Fig. 5 は東京工業大学大岡山キャンパス正門付近における人の流れを撮影したものである. 写真右上を入口, 左下を出口とする部屋として考える. 人の密度が低いうちは入口と出口をつなぐ直線に一列に並んで進むが, 密度が高くなると Fig. 5 のように直線に対してほぼ対称に膨らむように移動する. また, 図左下のようにコーンのような静止した障害物に対しては, ほとんど距離をあげずに移動する. これらの性質を表現可能なように上記パラメータを適宜設定した.

#### 2.4 避難者のグループ形成

Mawson [16] は緊急時の行動モデルとして, Affiliative model を提案している. これは動揺する避難者が親しい人や場所に近づくものである. 本研究では, Boid model の行動規則 (c) にこのモデルを適用し, ある避難グループが形成されるよう, 以下の速度項  $v_i^a$

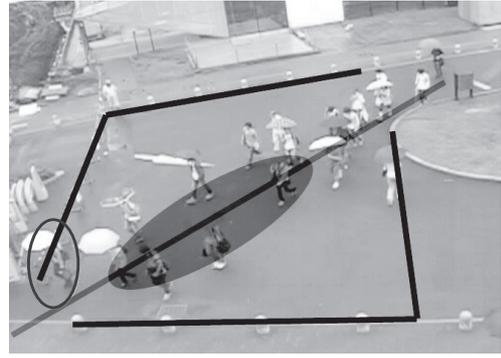


Fig. 5 Human flow with large number of persons

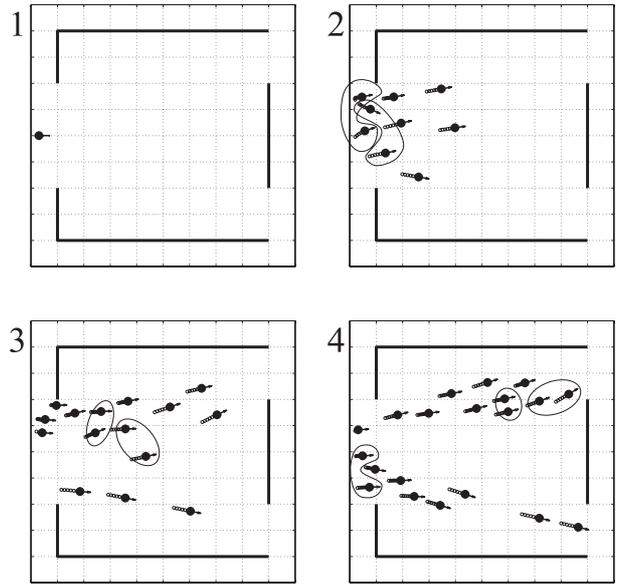


Fig. 6 Simulation result of swarm behavior

$$v_i^a(x) = c^a r^a \quad (13)$$

$$r^a = x^a - x \quad (14)$$

を導入する. ここで,  $x^a$  は  $x$  にいる個体の属するグループの中心座標を表し,  $c^a$  は定数である.

#### 2.5 個体の動きのシミュレーション

上述の内容をまとめ, 座標  $x_i$  にいる個体  $i$  の行動規則は

$$x_i[k+1] = x_i[k] + v_i(x_i[k])T \quad (15)$$

$$v_i = v^f + \sum_{j \neq i} v_j^p + \sum_{j=1}^{\ell} v_j^w + v_i^a \quad (16)$$

で表される. ただし,  $T$  はサンプリングタイム,  $n$  は群内の個体数,  $\ell$  は壁の数を表す. これを利用して, 人の避難シミュレーションを行った. Fig. 6-1 にあるように正方形の部屋を用意し, 左側に一つの入口, 右側に二つの出口を設定し, 一定周期ごとに入口に個体を出現させる. 各個体は式 (15) に従い移動する. Fig. 6 に個体の動きのシミュレーションの様子を示す. ● は個体, 矢印は個体の向き (速度  $v_i$ ) であり, 小さい○は個体の軌跡を表す. また, 線で囲われた個体は同じ避難グループに属し

ている。個体の流れが設定した経路に従って分岐し、同じ避難グループに属するものは離れることなく避難していることが確認できる。

### 3. 群の誘導

#### 3.1 誘導員の指示のモデル化

避難誘導時に、正しい避難経路への人の流れの誘導を達成するために、誘導員をベクトル場としてモデル化し、その配置を最適化する。誘導員は避難者に正しい避難経路の方向を指差するものとする。すなわち、誘導員は式 (15) にある方向のベクトル  $\mathbf{v}^g$  を加える。ある座標  $\mathbf{x}$  に対して誘導員が与える指示を

$$\mathbf{v}^g(\mathbf{x}) = \frac{c^g}{1 + \exp\{a^g(\|\mathbf{r}^g\| - b^g)\}} R(\theta^g) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{r}^g = \mathbf{x}^g - \mathbf{x} \quad (18)$$

とする。ここで  $a^g$ ,  $c^g$  は定数であり、 $\mathbf{x}^g$  は誘導員の座標を表す。 $b^g$  は相手との衝突回避のとき同様、視野と方向を考慮して

$$b^g(\Delta\theta^g) = \frac{\gamma^g}{1 + \exp\{\alpha^g(\Delta\theta^g - \beta^g)\}} \quad (19)$$

で定義する。 $\Delta\theta^g$  は座標  $\mathbf{x}$  にいる個体の向き  $\mathbf{v}_i$  と  $\mathbf{r}^g$  のなす角度の大きさを表す。人を避けようとする意思よりも誘導員の指示のほうがより強制力があると考え、式 (8) より式 (17) のほうが強く、広範囲に影響を与えるように、式 (17) (19) における定数  $a^g$ ,  $c^g$ ,  $\alpha^g$ ,  $\gamma^g$  を設定した。また、 $\beta^g$  は  $\beta^p$  と同様に  $\pi/3$  とした。 $R(\theta)$  は回転行列であり、

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (20)$$

で定義される。 $\theta^g$  は誘導員の指示方向であり、回転行列  $R(\theta^g)$  によりベクトルを指示方向に向ける。誘導員の指示によるベクトル場を Fig. 7 に示す。この結果、誘導員の影響も含めた個体  $i$  の速度ベクトル  $\mathbf{v}_i$  は、式 (16) に式 (17) を加え、

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}^f + \sum_{j \neq i} \mathbf{v}_j^p + \sum_{j=1}^{\ell} \mathbf{v}_j^w + \sum_{j=1}^m \mathbf{v}_j^g + \mathbf{v}_i^a \quad (21)$$

と表せる。ただし、 $m$  は誘導員の数である。

#### 3.2 誘導員の配置最適化

正しい避難経路へ人を誘導するための、目標のベクトル場  $\hat{\mathbf{v}}^f$  を設定する。正しい避難経路を 2.1 節と同様に Fig. 8 のように設定し、これを、

$$\hat{\mathbf{v}}^f(\mathbf{x}) = \hat{\Theta}\phi(\mathbf{x}) \quad (22)$$

と表す。避難者が  $\hat{\mathbf{v}}^f$  に従って移動すれば、正しい避難経路に誘導されるので、式 (21) と  $\hat{\mathbf{v}}^f$  の差を評価関数  $J$  とし、空間内に複数の代表点  $\mathbf{x}^r$  を設定することで

$$J = \sum_{j=1}^k \left\| \hat{\mathbf{v}}^f(\mathbf{x}_j^r) - \mathbf{v}_i(\mathbf{x}_j^r) \right\|^2 \quad (23)$$

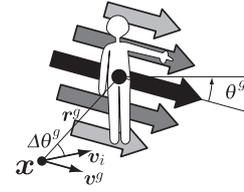


Fig. 7 Vector field via guidance operator

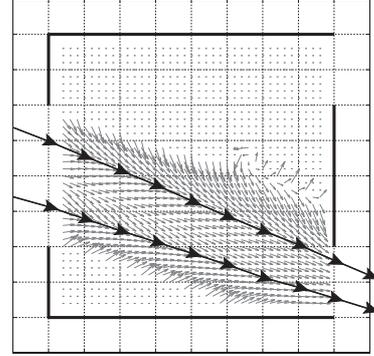


Fig. 8 Definition of modified evacuation routes

と定める。実際には、 $J$  は空間全体に対して最適化されるべきであるが、ここでは (a) 避難者が居ない場所における計算をなくし計算量を減らす、(b) 避難の様子全体を観測するセンサを必要としないよう、各誘導員は自分の周りの情報のみから行動を決定する、(c) 避難者の一部の誘導により、全体誘導へ広がる効果を用いる、ことを目的とし、これを最小化しよう誘導員の座標  $\mathbf{x}^g$  と指示方向  $\theta^g$  を以下の式に従い勾配法によって逐次的に最小化する。

$$\mathbf{x}^g \leftarrow \mathbf{x}^g - \left( \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}^g} \right)^T \delta x \quad (24)$$

$$\theta^g \leftarrow \theta^g - \left( \frac{\partial J}{\partial \theta^g} \right) \delta \theta \quad (25)$$

ここで、 $\delta x$ ,  $\delta \theta$  は定数である。なお、代表点  $\mathbf{x}^r$  は実際の避難者の位置とする。このとき、誘導員の行動は誘導員の影響の及ぼす範囲、すなわち、誘導員の周りの避難者情報のみに基づいて決定されることとなる。

#### 3.3 誘導員配置最適化シミュレーション

2.5 節と同様の一つの入口に対し出口が二つある環境で、誘導員の配置の最適化シミュレーションを行う。誘導員の人数・初期配置を適当に与え、一定周期ごとに入口から個体を入れる。個体はそれぞれ式 (15) と式 (21) に従って動き、誘導員の移動・指示方向を式 (24) (25) を用いて最適化する。また、複数の誘導員が同じ位置にならないよう衝突を回避する式 (8) と同様のものを誘導員どうしに適用した。Fig. 9 に個体の挙動と軌跡、誘導員の配置と指示方向を示す。●は個体の位置、矢印はその向き、小さい○は個体の軌跡を表す。また、○は誘導員の位置、矢印は誘導員の指示方向を表す。最適化が進むにつれて誘導員が適切に移動し、個体が誘導される様子が確認できる。

#### 3.4 誘導員の人数最適化

前節のシミュレーションでは 3 人の誘導員を配置したが、複

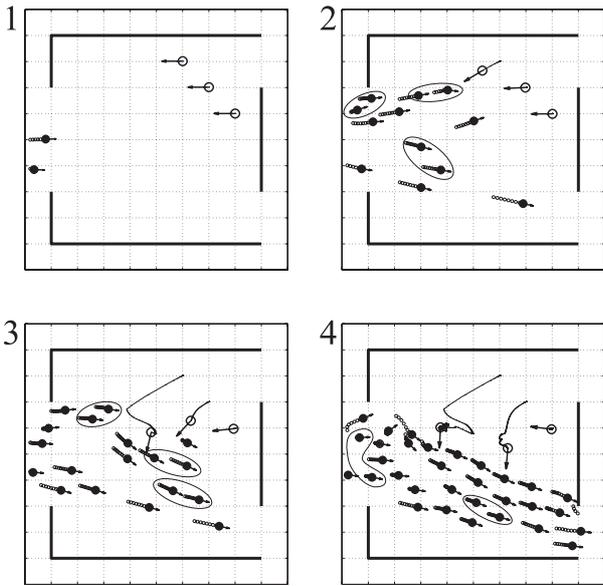


Fig. 9 Positional and directional optimization of guidance operators

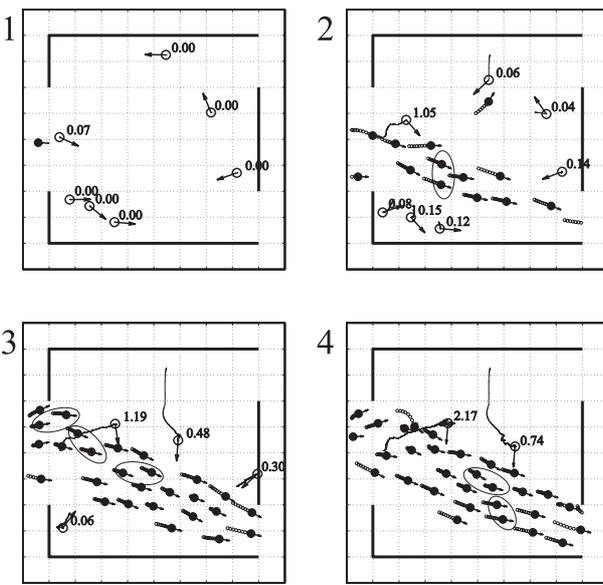


Fig. 10 Optimization of position, direction, number of guidance operators

数の誘導員のうち最も誘導の貢献度の少ないものを順次除外することで人数の最適化を行う。まず、誘導員の貢献度を評価するために誘導員が避難者をどれだけ誘導したかを、誘導員の指示ベクトルの大きさの総和をとって、

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{c^g}{1 + \exp \{a^g(\|r_i^p\| - b^g)\}} \quad (26)$$

と定め、この値が最も小さい誘導員を順次除外する。避難誘導が失敗しない限界まで誘導員の数を少なくする。Fig. 10 にシミュレーション結果を示す。○で示された誘導員の右上の数値が  $W$  を表す。7人の誘導員をランダムな位置・向きで配置し、最適化を行ったところ、複数のシミュレーション結果において

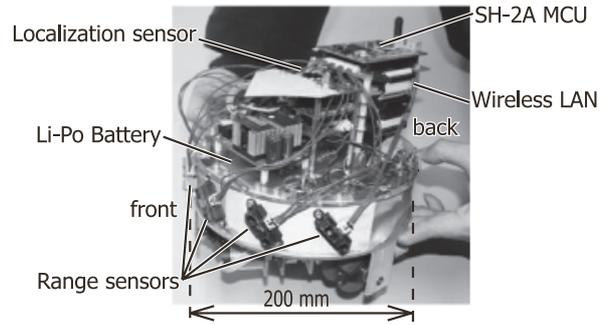


Fig. 11 Appearance of swarm robot

Fig. 10-4 のように避難者の流れに対して右上側に 2 人の誘導員が残る結果が多く確認された。この結果から、Fig. 10-4 に表される誘導員の位置および人数が最適解であると判断できる。ただし、すべての場合において適切に誘導が可能ではない。例えば、初期値ですべての誘導員が Fig. 10-1 の左下の隅に配置されれば、これらが避難者の流れの中を横切り、Fig. 10-4 の位置に来ることはない。すなわち、場に対してトポロジカルに異なる場所への移動は難しいため、誘導員が空間全体に分布する初期値を選択する必要がある。

#### 4. 群ロボットを用いた実験検証

##### 4.1 実験システムの概略

提案した誘導員配置アルゴリズムの有効性を検証するために、実環境における人の群を擬似的に再現した自律移動ロボットによって群の誘導を行う。Fig. 11 に使用した自律移動ロボットを示す [17]。このロボットはマイコン (SH-2)、バッテリー、移動平面内の位置計測装置 (StarGazer)、赤外線距離センサを搭載し、無線 LAN によってサーバと通信する。ロボットはオムニホイールを持つ三つのアクチュエータによって全方向移動が可能であるが、ここではロボットの前方を定めた。避難ロボットは位置計測装置から得られた座標によりマイコンで  $v^f$  に従った速度の計算を行う。また、距離センサをロボットの前方向  $120^\circ$  に取り付けることで、視野範囲内で他のロボットとの衝突を防止する  $v^p$  を計算する。ただし、誘導ロボットからの指示方向はセンサで検出できないためサーバから受け取ることとした。一方、サーバは避難ロボットの位置から誘導ロボットの移動量・指示方向を計算し、無線 LAN を通じて誘導ロボットに送る。誘導ロボットはその指示に従って移動し向きを変える。

##### 4.2 群ロボットの誘導

群ロボットを避難者として 13 台、誘導員として 2 台用いて誘導実験を行った。シミュレーションでは個体の体積は無視されており、また、移動速度・方向が瞬時に目標のものへと変化することを仮定しているが、実験ではロボットは体積を持ち、速度変化にもハードウェア上の制限がある。同様に、誘導ロボットの速度にも制限がある。Fig. 12 に実験の様子を示す。白線が部屋の境界 (壁) であり、左側に入口が一つ、右側に出口が二つある。シミュレーションと同様、上の出口が利用不可能となり、下の出口へと誘導する。実験開始直後は上の出口を目指し避難ロボットがあるが、誘導ロボットに近づくと下の出口へ

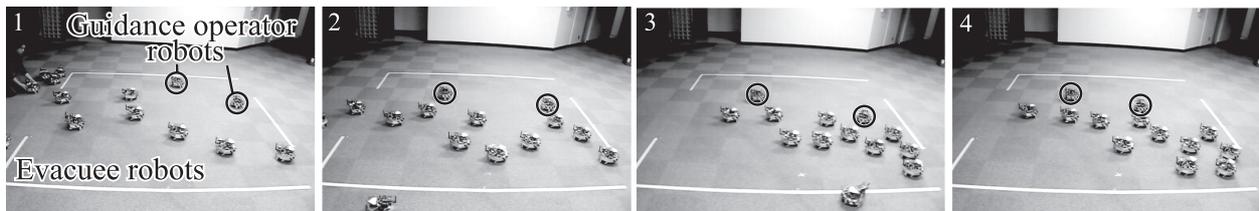


Fig. 12 Guidance experiment with 13 evacuees and 2 guidance operators

の経路に誘導される様子が確認できる。また、時間が経過すると下の出口付近が混み始め、上の出口の方へ向かう避難ロボットが現れるが、誘導ロボットがこれを適切に誘導し、すべての避難ロボットを目的の経路へと誘導する様子が確認できる。なお、各写真の白線の外にロボットが存在する場合があるが、これはロボットの数の問題上、避難し終えたロボットが入口へと向かい、再び避難ロボットとして動くためのものである。

以上の結果より、本実験において 3.4 節で得られた結果と同様に、誘導員 2 名が適切に避難誘導を実現しており、提案する最適化手法の有効性が示されている。また、Fig. 10-4 と Fig. 12-4 を見比べ、ほぼ同様の誘導員配置がなされていることから、配置の最適性が確認できる。

## 5. おわりに

本研究では災害発生直後の減災に注目し、誘導員が避難誘導を行うための最適配置・最適数を求める方法を提案した。以下に成果を示す。

- (1) 避難者の移動経路から避難者の意思を速度ベクトル場でマクロにモデル化した。
- (2) 避難者の相互作用、グループ化、視野など、人間の行動に基づいたモデルを場を用いて表現した。
- (3) 誘導員が避難経路を指示することを、誘導員が発生するベクトル場でモデル化し、これらの足し合わせにより避難者を暗示的に誘導可能であることを示した。
- (4) 場に基づいて誘導員の配置最適化を行い、避難者へ所望の誘導を行った。
- (5) 群ロボットを用いた実験を行い、提案手法の有効性を検証した。

本研究の最適化手法では、誘導員の動きが近傍の避難者情報のみに基づいているため、歩行者全体を観測する鳥瞰者および誘導員全体を統括する管理者を必要としない。これより、群内の個体の相互作用を利用することで誘導員それぞれのミクロな行動がマクロな群挙動を暗示的に制御していると考えられる。そのため、群の規模には依存せず、大人数を誘導するのに適した手法であると言える。

**謝辞** 本研究は、科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受けた。また、ロボットの制作、制御アルゴリズム実装において、本間良幸氏（東京工業大学）の協力を得た。

## 参考文献

- [1] 京都大学防災研究所, 防災学ハンドブック, 朝倉書店, 2001.
- [2] 仲谷: “大規模災害に対する減災情報システム (前編)”, 情報処理, vol.45, no.11, pp.1164–1174, 2004.
- [3] 仲谷: “大規模災害に対する減災情報システム (後編)”, 情報処理, vol.45, no.12, pp.1255–1265, 2004.
- [4] 伊藤, 中西, 小泉, 石田: “鳥瞰コミュニケーション環境を用いたナビゲーションシステム”, 情報処理学会インタラクティブ 2004, pp.55–56, 2004.
- [5] 安倍, 岡部, 三隅 (編): 自然災害の行動科学 (応用心理学講座). 福村出版, 1988.
- [6] 原科, 三栗, 向, 渡邊: “経路指示パネルによる避難誘導のためのシミュレーション分析”, DEWS2006 論文集, 2006.
- [7] J. Fink, M.A. Hsieh and V. Kumar: “Multi-robot manipulation via caging in environments with obstacles,” Proc. of 2008 International Conference on Robotics and Automation, pp.1471–1476, 2008.
- [8] W. Kerr and D.F. Spears: “Robotic simulation of gases for a surveillance task,” Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2905–2910, 2005.
- [9] M. Shimizu, A. Ishiguro, T. Kawakatsu, Y. Masubuchi and M. Doi: “Coherent swarming from local interaction by exploiting molecular dynamics and stokesian dynamics methods,” Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1614–1619, 2003.
- [10] L.C.A. Pimenta, M.L. Mendes, R.C. Mesquita and G.A.S. Pereira: “Fluids in electrostatic fields: An analogy for multi-robot control,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol.43, no.4, pp.1765–1768, 2007.
- [11] L.C.A. Pimenta, N.Michael, R.C. Mesquita, G.A.S. Pereira and V. Kumar: “Control of swarms based on hydrodynamic models,” Proc. of 2008 International Conference on Robotics and Automation, pp.1–6, 2008.
- [12] R. Vaughan, N. Sumpter, J. Henderson, A. Frost and S. Cameron: “Robot control of animal flocks,” Proc. of the 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference Gaithersburg, pp.277–282, 1998.
- [13] C.W. Reynolds: “Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model,” Computer Graphics, vol.21, no.4, pp.25–34, July 1987.
- [14] 本間, 岡田: “群の連続体モデルに基づく混雑緩和のためのアメニティ設計”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 301–06, 2008.
- [15] 奥澤康正: ぎもんしつもん目の辞典, 東山書房, 1993.
- [16] A.R. Mawson: Mass Panic and Social Attachment: The Dynamics of Human Behavior. Ashgate Pub Co, 2007.
- [17] 本間, 岡田: 自律移動型群ロボットの開発と場に基づく制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2A2–F13, 2009.

**岡田昌史 (Masafumi Okada)**

1992年3月京都大学工学部精密工学科卒業。1996年9月同大学大学院応用システム科学専攻博士課程修了。博士(工学)。1996年10月日本学術振興会特別研究員(PD)。1997年2月東京大学大学院工学系研究科リサーチ・アソシエイト。2000年4月同大学大学院工学系研究科講師。2004年4月東

京工業大学大学院理工学系研究科助教授。2007年4月准教授となり現在に至る。ロボットの機構開発、力学系を用いた情報処理システムの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEEの会員。  
(日本ロボット学会正会員)

**安藤輝尚 (Teruhisa Ando)**

2010年3月東京工業大学工学部機械知能システム学科卒業。2010年4月同大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程入学。現在に至る。

(日本ロボット学会学生会員)