

避難誘導のための人員配置最適化と群ロボットへの応用

Optimization of Personal Distribution for Evacuation Guidance and Its Application for Swarm Robot

学 安藤 輝尚 (東工大), 正 岡田昌史 (東工大)

Teruhisa ANDO, Tokyo TECH, ando.t.ac@m.titech.ac.jp

Masafumi OKADA, Tokyo TECH, okada@mep.titech.ac.jp

It is an important issue to make a disaster reduction plans. In this paper, we focus on evacuation guidance and propose a modeling and control method of swarm based on vector field. The model reflects some features of evacuee for example field of view and evacuee group. By giving the desired vector field that indicates the safe route for evacuation, the guidance operators are optimally distributed. The number of guidance operators is minimized by the degree of contribution. The proposed modeling and control method of swarm for evacuation guidance is applied to swarm robots and the effectiveness is evaluated by the guide experiments using swarm robots.

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」のふたつがある [1]。しかし、多くのコストを費やしても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る [2][3]。本研究では、減災のひとつとして、建造物内で大人数に対して避難誘導を行うことを考える。大人数を避難させる場合には、個別に誘導を行うことは難しい。そこで、明示的に個別の誘導を行うのではなく、人々の避難しようとする意思の特性を捉え、その特性を利用した暗示的な誘導を行うことで人々の流れそのものを変化させる。そのために、人の意思のモデル化及び暗示的な誘導を行う。原料ら [4] は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、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。伊藤ら [5] は携帯電話での会話によって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、それぞれの対象に個別の情報を提示するという構造上、多くの操作対象がいるケースでは適用が難しい。一方、群制御として、Vaughan ら [6] は牧羊犬システムを用いて、実際にアヒルを用いて群を追い込む実験を行った。牧羊犬は、羊が犬から逃げようとする意思の特性を利用して、所望の誘導を行うものであり、人々の流れそのものを変化させることで誘導を行うという本研究の意図に近いものであるが、誘導のためのアルゴリズムが発見的な要素を多く含む。この観点から、我々はこれまでに避難しようとする意思を場として捉え、速度ベクトル場でモデル化し、誘導員を適切な場所に配置することによって、避難者の意思を制御する方法を提案してきた [7]。本研究ではこれに (1) 避難者行動の特性を導入し、(2) 貢献度に基づいた誘導員数の最適化及び (3) 自律移動ロボットを用いた誘導実験検証を行う。

2. 群意思のマクロモデル

2.1 空間の設定と群の意思

ここでは、図 1 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ようになっているが、一方が火災その他の要因によって最終的に出口まで辿り着

けないように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によって、出口まで繋がる正しい避難経路に人の流れを誘導することを目的とする。

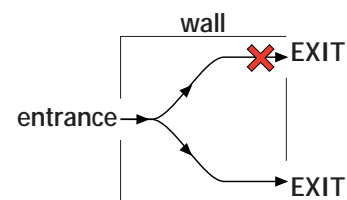


Fig.1 Evacuation routes

まず、人の意思をモデル化する。人の群意思のモデル化に際し、大人数の避難時には、人の流れはマクロに捉えれば、定常的な流れになると考えられる。そこで、この流れをベクトル場で表すものとする。Reynolds の boid model [8] における群の行動の 3 つの規則

- (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)

が知られており、ベクトル場でのモデル化は (b) に相当する。また、(a)、(c) に関しては後述する。

2.2 避難ベクトル場の関数表現

群の意思を表すベクトル場を座標の関数として表す。岡田ら [9] のベクトル場の多項式近似手法を用いて、

$$v_i^f(x_i^p) = a_0 + a_1 x_i^p + a_2 x_i^{p2} + \dots = \Theta \phi(x_i^p) \quad (1)$$

$$x_i^p = \begin{bmatrix} x_i & y_i \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

のように速度ベクトル v_i^f をある個人 i の座標 x_i^p のべき乗の多項式として表す。ここで、 $a_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ は多項式の係数、 Θ は係数行列、 ϕ は座標 x_i^p の成分 x_i と y_i をべき乗に展開したものを並べたベクトルである。これにより、図 2 のように設定した避難経路は図 3 のような避難ベクトル場として表される。

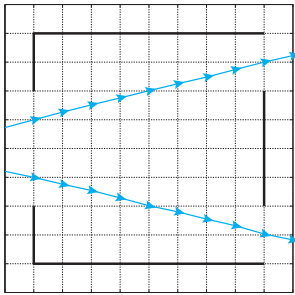


Fig.2 Example of evacuation route

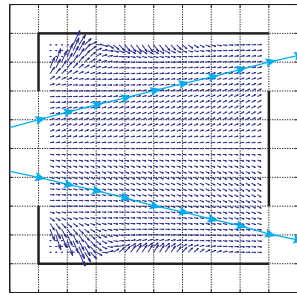


Fig.3 Obtained evacuation vector field

2.3 障害物との衝突を避ける場の設定

衝突を避けるベクトルは他人との衝突を避けるベクトルと壁との衝突を避けるベクトルの和で表され、それぞれ距離が離れると効果が弱くなるとする。これにより、boid modelの規則の(a)衝突を回避する項を表現できる。まず、他人との衝突を避けるベクトルを設定する。前方の他人とのみ衝突を避けようとし、側方・後方から近づく他人は衝突直前になり気がつくまで避けない様子表現する。ある個人*i*が他人*j*との衝突を避けるベクトル v_{ij}^p を、シグモイド関数を用いて、

$$v_{ij}^p = -\frac{c^p}{1 + \exp(a^p(\|r_{ij}^p\| - b^p))} \frac{r_{ij}^p}{\|r_{ij}^p\|} \quad (3)$$

$$r_{ij}^p = x_j^p - x_i^p \quad (4)$$

と表す。ここで、 r_{ij}^p は個人*i*と他人*j*の相対座標を表し、 a^p, c^p は定数である。 b^p は他人*j*がどれだけ近づく衝突を避けようとするかを定めるパラメータであり、

$$b^p(\Delta\theta_{ij}^p) = \frac{\gamma^p}{1 + \exp(\alpha^p(\Delta\theta_{ij}^p - \beta^p))} + \delta^p \quad (5)$$

と定義する。ここで、 $\alpha^p, \beta^p, \gamma^p, \delta^p$ は定数であり、 δ^p は個人の大きさに相当する。 b^p が大きくなると、個人*i*は他人*j*からより距離を取ろうとする。 $\Delta\theta_{ij}^p$ は個人*i*の向き θ_i^p と r_{ij}^p のなす角度の大きさを表し、

$$\Delta\theta_{ij}^p = \left| \arctan\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) - \theta_i^p \right| \quad (6)$$

と定義する。個人*i*の向き θ_i^p は避難ベクトル場 v_i^f の向きとし、 $\arctan\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right)$ は $0 \leq \Delta\theta_{ik}^p \leq \pi$ となるように選択する。式(5)より、 $\Delta\theta_{ij}^p$ が β^p を越えると b^p が急速に小さくなる。そこで、人間が両目で対象を捉え、立体視ができる範囲である前方 120° [10]、つまり左右 60° に合わせ、 $\beta^p = \frac{1}{3}\pi$ とした。これにより、衝突を避けるベクトル v_{ij}^p が前方 120° を越えた辺りで急速に小さくなり、個人*i*から他人*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ベクトルを設定する。壁との衝突を避けるベクトルは個人の向いている向きに依存しないとし、ある個人*i*が壁*h*との衝突を避けるベクトル v_{ih}^w は、

$$v_{ih}^w = -\frac{c^w}{1 + \exp(a^w(\|r_{ih}^w\| - b^w))} \frac{r_{ih}^w}{\|r_{ih}^w\|} \quad (7)$$

と定義する。ここで、 a^w, b^w, c^w は定数であり、 r_{ih}^w は個人*i*と壁*h*との距離とする。また、 $a^p, c^p, \gamma^p, a^w, b^w, c^w$

は実際に人の動きを撮影し、その特徴を再現できるように定めた。

2.4 避難者のグループ形成

Mawson[11]は緊急時の行動モデルとして、affiliative modelを提案している。affiliative modelは避難者は危険があっても親しい人や場所に近づくとするものである。この考えに従うと、boid modelの規則の(c)近くの仲間の傍に留まる項はある特定の避難者同士において適用され、避難グループが形成される。ある個人*i*が避難グループ*o*に引き寄せられるベクトル v_{io}^a は、

$$v_{io}^a = c^a r_{io}^a \quad (8)$$

$$r_{io}^a = x_j^p - x_o^a \quad (9)$$

と表す。ここで、 r_{io}^a は個人*i*と避難グループ*o*の相対座標を表し、 c^a は定数である。

以上をまとめ、ある個人*i*が避難ベクトル場と*l*枚の壁、*n*-1人の他人、避難グループ*o*から受ける影響を重ね合わせると、最終的に得られる速度ベクトル v_i は

$$v_i(x_i^p) = v_i^f + \sum_{j=1, j \neq i}^n v_{ij}^p + \sum_{h=1}^l v_{ih}^w + v_{io}^a \quad (10)$$

と表せる。

2.5 個人の流れのシミュレーション

正方形の部屋を用意し、左側に1つの入口、右側に2つの出口を設定し、個人の流れシミュレーションを行う。一定周期ごとに入口に個人を出現させ、式(10)に従いながら、すべての個人を移動させる。出口に到達した個人及び入口から溢れた個人は順次計算から除外するようにしている。図4に個人の流れシミュレーションの様子を示す。は個人、矢印は個人の向きである。小さいは個人の軌跡を表す。また、同じ色のは同じ避難グループに属しており、黒いは個別に避難している。個人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. 群意思の操作

3.1 誘導員の指示によって与えられる場の設定

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、誘導員を速度ベクトル場としてモデル化し、その配置を最適化する。

ある個人*i*が誘導員*k*から受ける指示 v_{ik}^g を

$$v_{ik}^g = \frac{c^g}{1 + \exp(a^g(\|r_{ik}^g\| - b^g))} R(\theta_k^g) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$r_{ik}^g = x_k^g - x_i^p \quad (12)$$

とする。ここでは、 a^g, c^g は適当な値を使用しており、障害物との衝突を避ける時の値とは異なる。 r_{ik}^g は個人*i*と誘導員*k*の相対座標を表す。 x_i^p は個人*i*、 x_k^g は誘導員*k*の座標である。 b^g は誘導員*k*の距離と指示の効果の大きさを定めるパラメータであり、

$$b^g(\Delta\theta_{ik}^g) = \frac{\gamma^g}{1 + \exp(\alpha^g(\Delta\theta_{ik}^g - \beta^g))} \quad (13)$$

と定義する。 $\Delta\theta_{ik}^g$ は個人*i*の向き θ_i^p と r_{ik}^g のなす角度の大きさを表す。ここで、 γ^g は適当な値を使用しており、 a^g

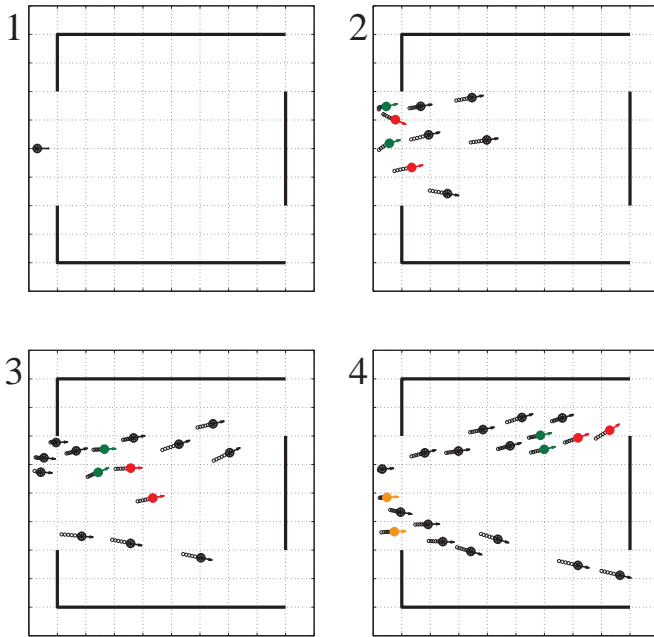


Fig.4 Simulation result of swarm behavior

, c^g 同様, 障害物との衝突を避ける時の値とは異なる. α^g, β^g は式 (5) と同様の値である. また, $R(\theta_k^g)$ は 2 次元の回転行列であり,

$$R(\theta_k^g) = \begin{bmatrix} \cos \theta_k^g & -\sin \theta_k^g \\ \sin \theta_k^g & \cos \theta_k^g \end{bmatrix} \quad (14)$$

で定義される. θ_k^g は誘導員の指示方向であり, この回転行列 $R(\theta_k^g)$ によりベクトルが指示方向を向くことになる. 誘導員の影響も含めた, ある個人 i が最終的に得られる速度ベクトル v_i は, 式 (10) に式 (11) を加え,

$$v_i(x_i^p) = v_i^f + \sum_{j=1, j \neq i}^n v_{ij}^p + \sum_{h=1}^{\ell} v_{ih}^w + v_{io}^a + \sum_{k=1}^m v_{ik}^g \quad (15)$$

と表せる.

3.2 誘導員の配置の最適化

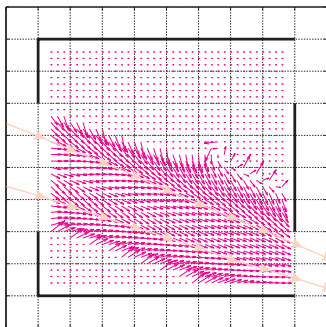


Fig.5 Definition of modified evacuation routes

正しい避難経路へ人の流れを誘導するための誘導員の配置を求めるために, 目標の場を定義する. 目標の場を 2.1 節のときと同様に, 図 5 のように設定し, これを,

$$\hat{v}_i = \hat{\Theta} \phi(x_i^p) \quad (16)$$

と表す. シミュレーション上での個人の位置を代表点として, 評価関数 J を

$$J = \sum_{i=1}^n \|\hat{v}_i - v_i\|^2 \quad (17)$$

と設定する. J を小さくするように誘導員 k の座標 x_k と向き θ_k をシミュレーションの繰り返し計算の中で少しずつ動かしていくことで誘導員の配置を最適化する. それぞれの更新の式は,

$$x_k^g = x_k^g - \left(\frac{\partial J}{\partial x_k^g} \right)^T \delta x \quad (18)$$

$$\theta_k^g = \theta_k^g - \left(\frac{\partial J}{\partial \theta_k^g} \right) \delta \theta \quad (19)$$

となる. ここで, $\delta x, \delta \theta$ は定数である.

3.3 誘導員の人数の最適化

複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していき, 全員が一定以上誘導に貢献するように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 k が避難者をどれだけ誘導しているかを, 誘導員 k の指示ベクトルの大きさの総和をとって,

$$W_k = \sum_{i=1}^n \frac{c^g}{1 + \exp(a^g(\|r_{ik}^p\| - b^g))} \quad (20)$$

と定義する. 次に, 避難誘導を行う空間内に多くの誘導員を配置し, 最適配置を計算する. そして, 貢献度が一番低い誘導員を除外し, 再びその減った人数で最適配置を求める. 全ての誘導員の貢献度がある閾値を超えるまでこの工程を繰り返すことにより, 誘導員の人数を避難誘導が失敗しない限界まで少なくする. ただし, W_k は避難者の人数に依存するため, 閾値は実験的に求めた.

3.4 誘導員の配置と人数の最適化シミュレーション

図 6 は避難グループが形成されない場合の誘導員の配置と人数の最適化の様子を表したものである. 青い で示された誘導員の右上の数値が W_k である. 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, 初期配置が悪く誘導に失敗する場合は除いては, 避難者の流れに対して右上側に 2 人の誘導員が残るパターンが多く確認された.

4. 群ロボットによる実験検証

4.1 実験システムの構成

提案した誘導員配置アルゴリズムの有効性を示すために誘導実験を行う. 避難者及び誘導員の役割を担うものとして, 群ロボットを用いる. 図 7 に今回使用した群ロボットを示す [12]. 群ロボットはマイコン, バッテリ, 移動平面内の位置計測装置, 距離センサを搭載し, 無線 LAN によってサーバと通信する. また, 群ロボットの位置データなどを取得するためにサーバを用いる. 避難者ロボットは位置計測装置 (StarGazer) により自己位置を計測し, マイコンで場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° に取り付けることで, 人間の視野と同じ範囲内で他のロボットとの衝突を防止する. これにより自律的に運動を行う. ただし, 避難者ロボットは誘導員ロボットからの指示方向をセンサで認識できないので, 誘導指示

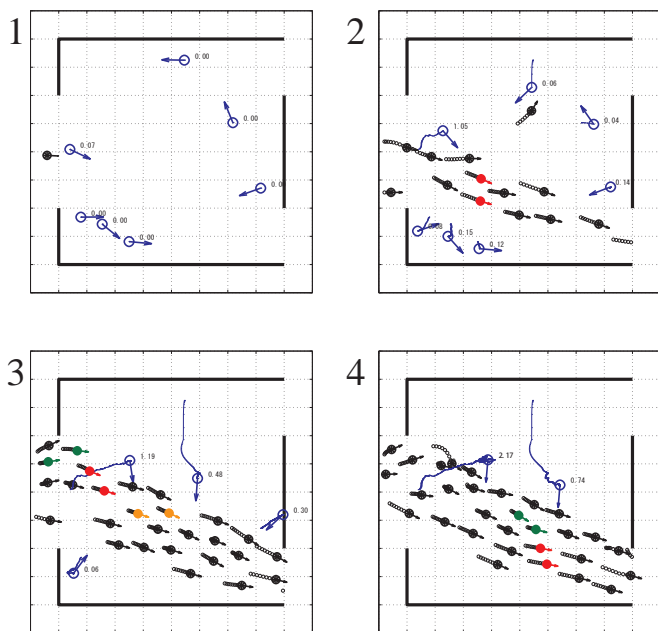


Fig.6 Optimization of position, direction, number of guidance operators

についてはサーバから受け取る．誘導員ロボットは式 (17) の評価関数を小さくする方向に移動する．評価関数を計算するためにはすべての避難者ロボットの位置を知る必要があるが、マイコンで計算するには計算コストが高い．そこで、速度の計算はサーバで行い、無線 LAN を通して誘導員ロボットに送る．

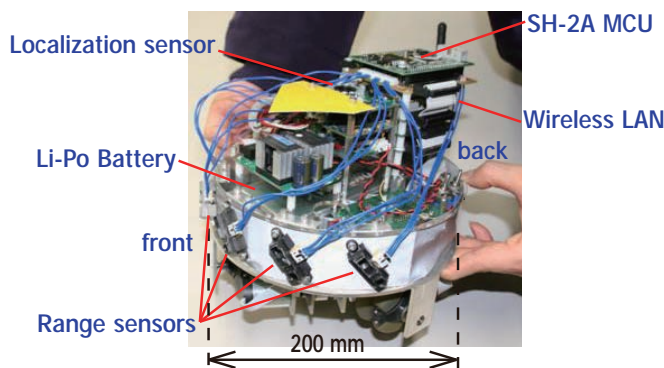


Fig.7 Appearance of swarm robot

4.2 群ロボットによる誘導実験

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．ただし、ロボットの台数の関係から避難グループは設定していない．図 8 にその様子を示す．実験開始直後は上の出口を目指す避難者ロボットもいるが、ある程度誘導員ロボットに近づくとの下の出口への経路に押し戻される形で誘導されていくのが確認できる．また、暫くすると下の出口付近が混み始め、衝突を避けるために上の出口の方へ向かう避難者ロボットが出てくる．上の出口付近に留まっていた誘導員ロボットは、その避難者ロボットを誘導しなおし、下の出口へと向かわせている．

以上の結果より、本実験においては 3.4 節で得られた結果と同様に、誘導員 2 名が避難誘導に適した人数であり、

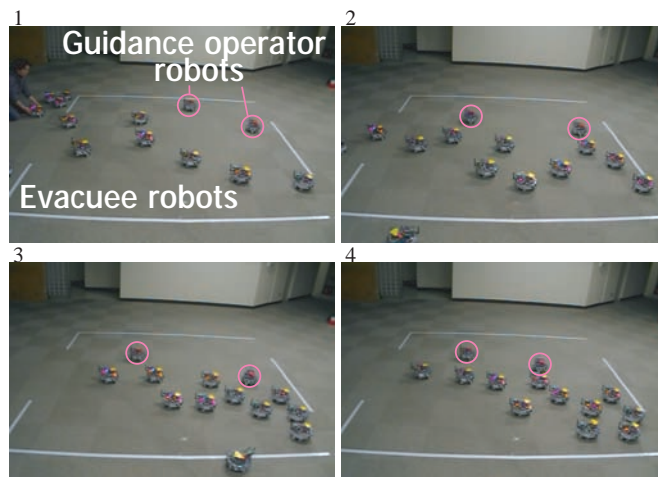


Fig.8 Guidance experiment with 13 evacuees and 2 guidance operators

図 6 と図 8 を見比べるとほぼ同様の配置がなされていることから、この配置が誘導に適していると確認できる．

5. おわりに

本研究では災害発生直後の減災行動に注目し、誘導員が避難誘導を行うための最適な配置を求める方法を提案した．以下に成果を示す．

1. 避難者に視野と避難グループ形成の特徴を導入し、モデル化した．
2. 誘導員の働きを貢献度として評価し、それに基づいて誘導員数の最適化を行った．
3. 群ロボットを用いて実験検証を行い、提案した方法の有効性を確認した．

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．

文献

- [1] 京都大学防災研究所. 防災ハンドブック. 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] 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.
- [5] 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 インタラクシオン 2004, pp. 55-56, 2004.
- [6] R.Vaughan, N.Sumpter, J.Henderson, A.Frost, and S.Cameron. Robot control of animal flocks. In *Proc. of the 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference Gaithersburg*, pp. 277-282, September 1998.
- [7] 安藤, 岡田. 場の最適化による避難誘導のための人員配置. 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1G2-03(CD-ROM), 2009.
- [8] Craig W. Reynolds. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model. *Computer Graphics*, Vol. 21(4), pp. 25-34, July 1987.
- [9] 岡田, 中村. 脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 8, pp. 1050-1060, 2004.
- [10] 奥澤康正. ぎもんしつもん目の辞典. 東山書房, 1993.
- [11] A.R. Mawson. *Mass Panic and Social Attachment: The Dynamics of Human Behavior*. Ashgate Pub Co, 2007.
- [12] 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, pp. 2A2-F13(CD-ROM), 2009.