

場の最適化による避難誘導のための人員配置

安藤輝尚 岡田昌史 (東京工業大学)

Personal Distribution for Evacuation Guidance by the Optimization of Vector Field

*Teruhisa ANDO and Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— It is an important issue to make the 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 behavior of the swarm is represented by the velocity vector field, which is the macro model of the swarm behavior with so large number of individuals. By giving the desired vector field that indicates the safe route for evacuation, the guidance operators are optimally distributed. Because the proposed optimization is an online method, the guidance operator works similarly to a sheep dog. The effectiveness of the proposed modeling and control method of swarm for evacuation guidance are evaluated by the simulations.

Key Words: Disaster reduction, Evacuation guidance, Vector field

1. はじめに

いつ起こるか分からない災害に対して、個人や組織としての対策を講じることは安全・安心な我々の環境を維持するために重要な課題である。災害への対策として、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。減災のひとつとして、建造物内からの大人数の避難を考える。避難において、人々を適切な避難経路に誘導することは、速やかに安全を確保するために重要なことであり、どうやって誘導すべきか (誘導の伝達) と、どのように誘導すべきか (誘導の計画) が課題として挙げられる。

誘導の伝達に関し、伊藤ら [2] 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コミュニケーション環境を用い、ナビゲーションシステムを開発した。また、誘導の計画は複数の対象を同時に誘導する群操作であり、群ロボットの制御が参考になるであろう。久米ら [3] は群ロボットをリーダーとフォロアに分け、フォロアをリーダーからの情報によってリーダーに追従させることで、群による協調搬送制御法を提案している。しかし、これらの研究では、それぞれの対象に個別の情報を提示する必要があり、多くの操作対象がいる災害時のようなケースでは適用が難しい。Finkら [4] はポテンシャル場を利用し、共通のプログラムと近傍の情報のみで群ロボットを制御する方法を提案した。また、Vaughanら [5] は牧羊犬を題材として、実際にアヒルを用いて群を追い込む実験を行った。

本研究では、牧羊犬の考えを利用し、誘導員によって群の挙動を制御する方法を提案する。群の挙動をマクロに捉え、人の流れを速度ベクトル場でモデル化する。さらに、このベクトル場に誘導員が発生するベクトル場を足し合わせることで所望のベクトル場を実現し、人へ所望の誘導を行うものである。ここでは特に、最適化手法に基づく誘導員の配置法アルゴリズム、お

よび、シミュレーションによる誘導の結果について報告する。

2. 群挙動のマクロモデル

2.1 空間の設定と群の挙動

ここでは、Fig.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。

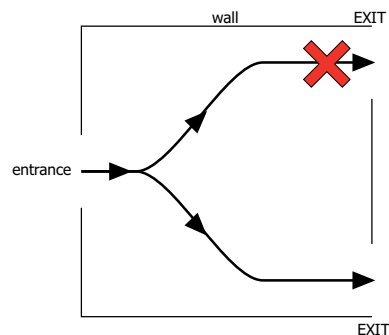


Fig.1 Evacuation routes

まず、人の流れをモデル化する。人の群挙動のモデル化に際し、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 [6] 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) に関しては後述し、(c) に関しては

避難時の人の挙動には当てはまらないと考え除外した。

2.2 速度ベクトル場の関係表現

群の挙動を表すベクトル場を以下の方法により、座標の関数として表す。

Fig.2のように、複数の座標点を順番に指定し、個体の経路を設定する。次に、経路の近傍に多くの代表点を設定し、それぞれの代表点において、経路の中央に向かうベクトルと、経路に沿った進行方向に向かうベクトルの和によって、その空間に設定された速度ベクトル v_i^f を定義する。

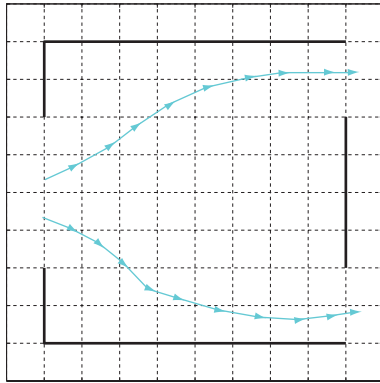


Fig.2 Definition of evacuation routes

このままでは、計算の対象となった座標点以外では、人がどこに向かうべきなのか全く設定されていないことになる。そこで、岡田ら [7] のベクトル場の多項式近似手法を用いて、任意の点において空間に設定された速度ベクトルを求めることができるようにするために、

$$v_i^f(x_i^p) = \Theta \phi(x_i^p) \quad (1)$$

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

ように速度ベクトル v_i^f をある個体 i の座標 x_i^p の関数として表す。ここで、 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。

これらが全ての代表点において表現できるよう、最小二乗法によって、1つの Θ に定める。この方法では代表点以外の点での速度ベクトルが定義されていない。そのため、代表点以外の点での速度ベクトルは計算された Θ によって決定される。実際には、代表点は空間全てを埋めることが必要であるが、計算量の問題、また、実際に人は経路近傍を通るため、この方法はベクトル場を効率よく求める方法であると言える。

べき乗展開の最大次数 $\ell = 8$ として式 (1) を用い、領域内の等間隔な点での速度ベクトルを表すと Fig.3 のようになり、これが誘導前の場となる。

2.3 障害物との衝突を避ける場の設定

障害物との衝突を避ける項は個体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。

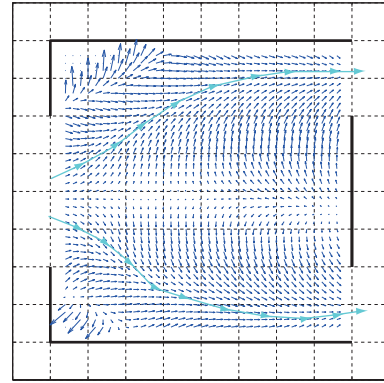


Fig.3 Obtained vector field

ある個体 i が別の個体 j との衝突を避けるベクトル v_{ij}^p を、

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

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

と表す。ある個体 i が壁 h との衝突を避けるベクトル v_{ih}^w も同様の式で表す。また、 r_{ij}^p は個体と個体の座標の差を表す。ただし、個体と壁の場合には r_{ih}^w は壁との距離をとる。

ここで、 $a^p, b^p, c^p, a^w, b^w, c^w$ を現実に則した値にするために実際に人の動きを撮影し、その特徴を再現できるように調整を行った。Fig.4, 5 は東京工業大学大岡山キャンパス正門付近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と、人の密度が低い場合は Fig.4 のように入口と出口をつなぐ直線状に一列に並んでいるが、密度が高くなると Fig.5 のようにほぼ対称に膨らむように移動する。また、コーンのような静止した障害物に対しては、Fig.5 の一番左側の人のように、ほとんど距離を取らない。このことから、人は動かないただの障害物と動いている他人とは、より他人から距離をとろうとすることが分かる。これらの性質を表現するように v_{ij}^p, v_{ih}^w のそれぞれの式において、 $a^p, b^p, c^p, a^w, b^w, c^w$ の各値を設定した。



Fig.4 Human flow with small number of persons

これらをまとめ、ある個体 i が空間に設定した場と l 枚の壁、 $n - 1$ 個の他の個体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

$$v_i(x_i^p) = v_i^f + \sum_{j=1, j \neq i}^n v_{ij}^p + \sum_{h=1}^l v_{ih}^w \quad (5)$$



Fig.5 Human flow with large number of persons

と表せる．

2.4 個体の流れのシミュレーション結果

式 (5) に従い，左側を入口，右側を出口として個体の流れシミュレーションを行った．Fig.6 がその結果であり，小さい \bullet は個体の軌跡を表している．個体の流れが設定した経路に従って分岐していることが確認できる．

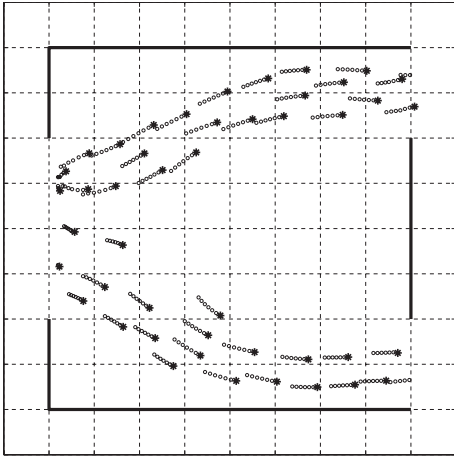


Fig.6 Simulation result of swarm behavior

3. 群挙動の操作

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，誘導員を設定し，その配置を最適化することで操作する．

誘導員の指示をある方向の速度ベクトルを人に加えるものとし，ある個体 i が誘導員 k から受ける誘導員の指示 v_{ik}^g を

$$v_{ik}^g(x_i^p) = - \frac{c^g}{1 + \exp(a^g \|r_{ik}^g\| - b^g)} R(\theta_k^g) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r_{ik}^g = x_k^g - x_i^p \quad (7)$$

とする．ここでは， a^g, b^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 は個体と誘導員の座標の差分ベクトルを表しており， θ_k^g は誘導員の向きを表す．また， $R(\theta_k^g)$ は 2 次元の回転行列であり，

$$R(\theta_k^g) = \begin{bmatrix} \cos \theta_k^g & -\sin \theta_k^g \\ \sin \theta_k^g & \cos \theta_k^g \end{bmatrix} \quad (8)$$

で定義される．

誘導員の影響も含めた，ある個体 i が最終的に得られる速度ベクトル v_i は，式 (5) に式 (6) を加え，

$$v_i(x_i^p) = v_i^f + \sum_{j=1, j \neq i}^n v_{ij}^p + \sum_{h=1}^l v_{ih}^w + \sum_{k=1}^m v_{ik}^g \quad (9)$$

と表せる．

3.2 誘導員の配置の最適化

目標の場を 2 章のときと同様に，Fig.7 のように設定し，これを，

$$\hat{v}_i = \hat{\Theta} \phi(x_i^p) \quad (10)$$

と表す．

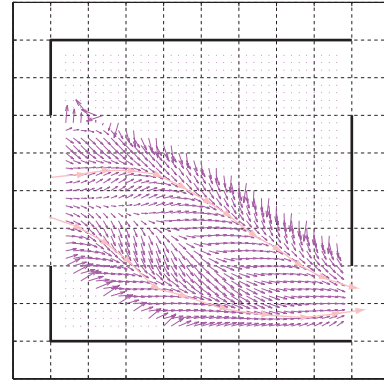


Fig.7 Definition of modified evacuation routes

ここで，最適化前の場と目標の場の差を空間内で積分し，評価関数 J を

$$J = \int_S \|\hat{v}_i - v_i\|^2 dS \quad (11)$$

と設定し，これを最小化する誘導員の位置と向きを求める．しかし，個体は空間内の経路近傍にしか存在しないために，空間全域に対して評価することは余計な計算を多く含むことになる．そこで，シミュレーション上での個体の位置を代表点として，評価関数 J を

$$J = \sum_i^n \|\hat{v}_i - v_i\|^2 \quad (12)$$

と設定しなおす．式 (6), (7), (8), (9) より，式 (12) の極小値を誘導員の位置・向きを変数として，最急降下法によって求める．誘導員 k の座標 x_k^g と向き θ_k^g の更新の式は，

$$x_k^g = x_k^g - \left(\frac{\partial J}{\partial x_k^g} \right)^T \delta \quad (13)$$

$$\theta_k^g = \theta_k^g - \left(\frac{\partial J}{\partial \theta_k^g} \right) \delta \quad (14)$$

となる．ここで， δ は定数である．

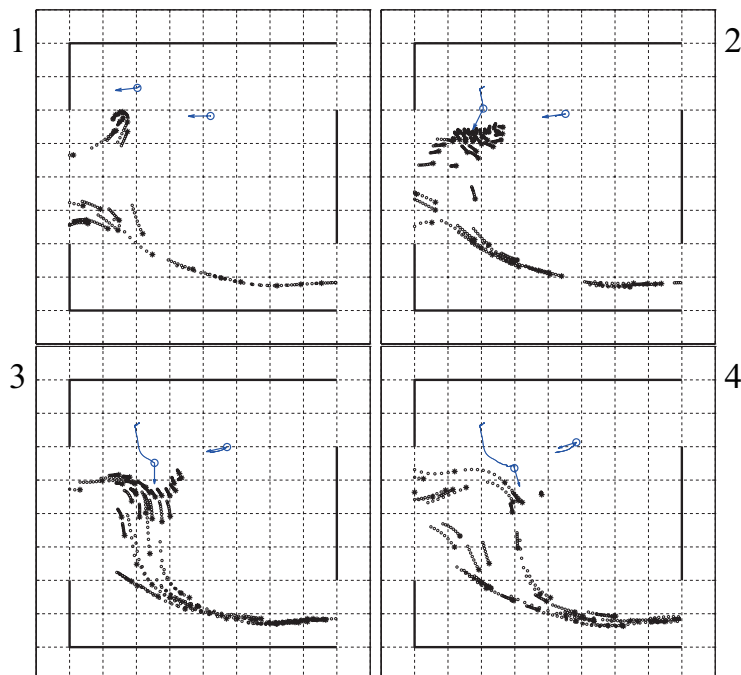


Fig.8 Positional and directional optimization of guidance operators

3.3 誘導員の配置の最適化シミュレーション

式(9), (13), (14)に従い, 誘導員の配置の最適化シミュレーションを行った. Fig.8は最適化されていく様子を表したものであり, 青い は誘導員, 矢印は誘導員の指示方向である. 初期は上の出口を目指す個体が停滞しているが, 最適化が進むにつれて誘導員が適切に移動し, 滑らかに個体が誘導される様子が確認できる. Fig.9は得られた誘導員の最適配置を用いて個体の流れのシミュレーションを行った様子であり, 全ての個体が下の出口に向かっている.

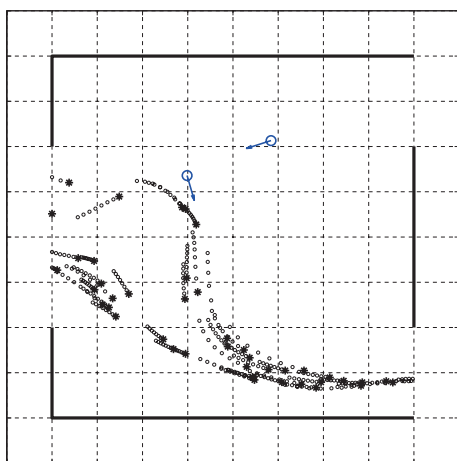


Fig.9 Optimized personal distribution

4. おわりに

本研究では, 避難誘導時の人の流れの操作を目的とし, ベクトル場を用いた群操作について述べた. 以下に得られた成果を示す.

- 個体の流れをベクトル場でモデル化し, 多数の個体を扱えるシミュレーションを製作した.

- 誘導員を配置し, 個体の流れをベクトル場を介して変化させた.
- 誘導員の配置に対し最適化を行い, 個体の流れを目的の流れにした.

本研究では, 誘導員の最適配置を求めたが, オンラインで各個体の位置と速度を得ることが出来れば, 変化する環境の中でも対応が可能である.

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.

参考文献

- [1] 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, 4B-i7, 2006.
- [2] 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.
- [3] 久米, 平田, 小菅, 浅間, 嘉悦, 川端: “力センサを用いない複数移動ロボットによる物体の協調搬送”, 日本機械学会論文 (C 編), 68, 673, pp.179-185, 2002.
- [4] 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.
- [5] R.Vaughan, N.Sumptner, J.Henderson, A.Frost, S.Cameron: “Robot Control of Animal Flocks”, Proc. of the 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference Gaithersburg, MD September 14-17, 1998.
- [6] Craig W. Reynolds: “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model”, Computer Graphics, 21(4), pp.25-34, July 1987.
- [7] 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.