

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

本間良幸, 岡田昌史 (東京工業大学)

Amenity Design for Congestion Reduction based on Continuum Model of Swarm

*Yoshiyuki HOMMA, Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— To control the swarm is effective for a cooperative work, congestion reduction and evacuation guidance. In this paper, we propose a modeling and control method of swarm based on the flow field for amenity design of our environments. The swarm is modeled by a continuum fluid and its behavior is represented by a flow field with an orbit attractor. The congestion is analyzed based on the fluid density which is calculated as a steady solution of the continuity equation of compressive fluid. Based on the obtained density, a space design method is proposed to reduce the congestion using static elements that changes the flow field. The effectiveness of the proposed modeling and space design method are evaluated by the simulations.

Key Words: swarm, amenity design, continuity equation

1. はじめに

駅構内、建物の出入り口、階段など、我々を取り巻く環境には混雑が引き起こされる場所が数多く存在する。このような場所において、我々は不快を感じたり、場合によっては重大な事故が引き起こされることもある。この問題を解決すること、または混雑を緩和させることは、我々の快適空間(アメニティ)を設計するという課題につながり、人口が増加する都市設計においても重要な課題であると考えられる。

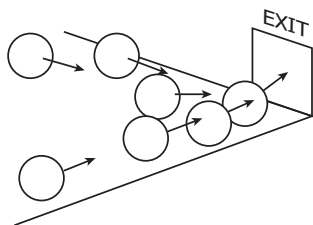


Fig.1 Swarm behavior

この混雑発生のメカニズムは、Fig.1にあるように個体の挙動とその数(空間における密度)にある。そのため、この混雑を緩和させるためには、各個体に対してその挙動を全て制御する必要があるであろう。これまでに行われてきた群ロボット制御法においても、このコンセプトがとられてきた。久米ら[1]、Finkら[2]は各ロボットの明示的な制御によって、協調しながら物体の搬送を行い、倉林ら[3]は神経振動子を用いた暗黙的な制御系構築により群の編隊制御を行っている。しかし、これらの方法では各個体の直接的な制御を行うため、少数の個体からなる群であれば可能であるが、数が増えれば制御アルゴリズムは複雑化し、場合によっては破綻する場合も考えられる。

そこで、本研究では群を連続体として扱い、その挙動を空間の流れ場としてモデル化する方法を提案する。ここでは、圧縮性流体の連続の式(流体の質量保存則)に基づいて挙動を解析し、その密度によって混雑度合

いを評価する。また、その結果に基づいて空間の流れ場を変化させる要素を用い、混雑を緩和させるような空間の設計法についてその一例を示す。さらに、モデル化の手法、空間の設計法の有効性をシミュレーションによって示す。これまでも群を連続体として扱い、ナビエ-ストークス方程式(流体の運動方程式)に基づいて挙動を解析・制御する方法も提案されている[4]。しかし、流体の挙動は極めて複雑であることから、非圧縮性の仮定が設けられる場合が多い。これに対し、本研究の手法は混雑度合いに注目することから、圧縮性流体を扱い、さらに、比較的容易な連続の式に基づくものである。

2. 群のモデル化

2.1 環境の設定と流れ場の表現

Fig.2のように4辺が壁で囲まれた閉じた領域を考え、この中で多くの個体が、ある軌道に沿って循環する状況を考える。ただし、この軌道は交点を持たないものとする。ここで、軌道上の点と点の距離は速度を表している。この軌道に沿った群の動きから生じた混雑を扱う。これは美術館などにおける人の流れを想定したもので、展示物を閲覧しながら移動するときの軌道を表す。次に、群の中の個体の挙動を流れ場として表すことを考える。そこで設定した軌道に引き込まれるような流れ場を多項式近似によってもとめる。これは文献[5]の方法を用いる。速度場 $f(x)$ を最大次数 ℓ の多項式で近似する。 $f(x)$ は多項式の項を並べたベクトル $\phi(x)$ とその係数ベクトル Θ を使って、

$$f(x) = \Theta \phi(x) \quad (1)$$

と表記できる。Fig.3は、 $\ell=7$ として速度場を多項式で表現した例である。個体の動きが場で表され、更に目標の軌道への引き込みが達成している様子が理解できる。

実際に、多くの個体を空間内に設置し、場に沿った動きをシミュレーションすると、定常状態での個体の状況はFig.4に表される結果となる。ただし、各個体が

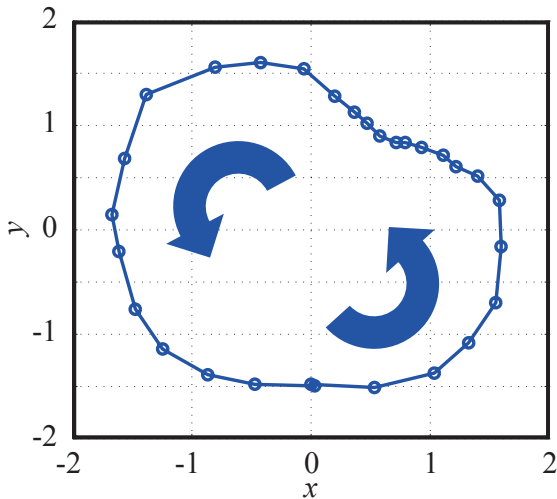


Fig.2 Configuration of trajectory in the closed space

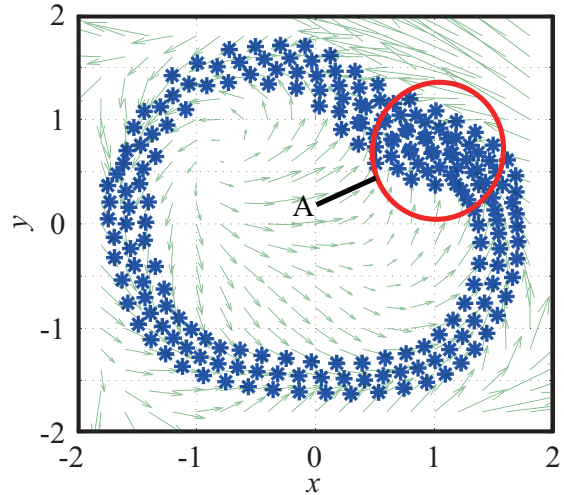


Fig.4 Behavior of swarm on flow field (201 agents)

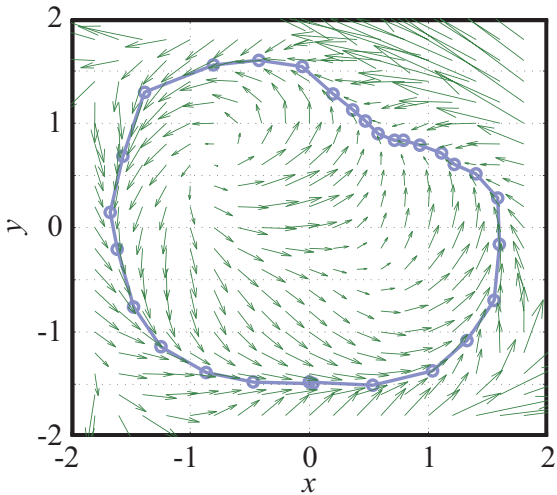


Fig.3 Flow field based on trajectory of swarm behavior

衝突しないよう反発する速度成分を設定した．速度が小さいAの領域で混雑が生じている様子がうかがえる．

2.2 連続の式による群のモデル化

群の中の個体数が増加すると，その挙動を求めるためには多くの計算を要する．そこで，本研究では，群を連続体として表し，混雑の割合を密度として表すことにする．圧縮性流体における質量保存則は以下の連続の式によって表される．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$v_x = v_x(t, \mathbf{x}) = \Theta_x \phi(\mathbf{x}) - k \frac{\partial \rho(t, \mathbf{x})}{\partial x} \quad (3)$$

$$v_y = v_y(t, \mathbf{x}) = \Theta_y \phi(\mathbf{x}) - k \frac{\partial \rho(t, \mathbf{x})}{\partial y} \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = (x, y)^T$$

ここで， $\rho = \rho(t, \mathbf{x})$ は時刻 t における位置 \mathbf{x} の密度であり，式 (3), (4) の第一項はロボットの挙動を表す速度場，第二項は個体どうしが近づくことによって働く反発による速度場を密度勾配による拡散項として表したものである．式 (1) を使い作成した速度場において式 (2) の定常解を求めた．十分時間が経った後の定常解における密度分布を Fig.5 に示す．ただし，計算には縦横それぞれ 51 の格子に分割した有限要素法を使って求めた．密度の外周部の境界条件については領域の外に流出はするが外からの流入はしないものとした．

この結果を前節の結果と比較する．Fig.4の結果からある領域に，ある格子で区切った周りを含む9個の格子中に含まれる個体の数を求め，これよりその位置における密度を近似的に求めた．この近似密度分布を Fig.6 に示す．Fig.5 と Fig.6 の密度分布が同様の形状を持つことから，群を連続体として扱う妥当性が理解できる．さらに，連続体の密度として表された群は，極めて多くの個体から構成されたものを表しており，多くの個体の挙動シミュレーションを容易に行う手法となっている．

3. 混雑緩和のための空間設計

3.1 流れの挙動を変化させる要素のモデル

つぎに，計算された密度分布を基に，混雑を緩和させる空間設計を行う．いま，空間は閉じているため，密度の空間積分値（個体の総数に相当）は変化しない．そこで，密度のピーク値（混雑が起きている場所の混雑割合）を下げるために，密度の小さい領域の速度を減少させることで密度を上昇させ，結果としてピーク値を下げることを行う．ここで，流れの挙動を変化させる要素を示す， i 番目の要素は式 (5) に表すような速度場 v_i を式 (1) に加算することで流れの挙動を変化させる．

$$v_i = \beta \frac{r_i}{(\|r_i\| + \alpha)^2} \quad (5)$$

この要素は実世界ではポールを設置し，群の流れを妨げることに相当する．一本のポールが作り出す速度場

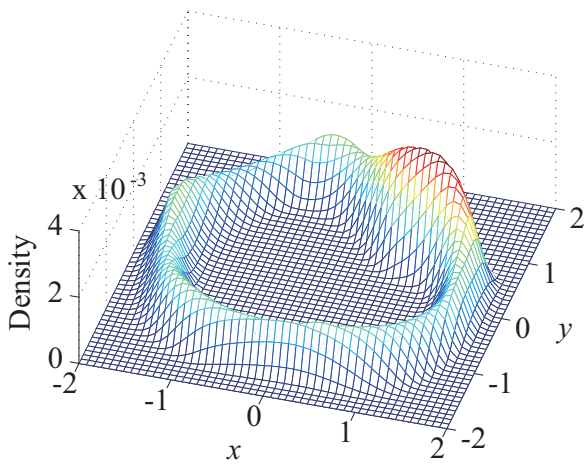


Fig.5 Density map calculated from flow field

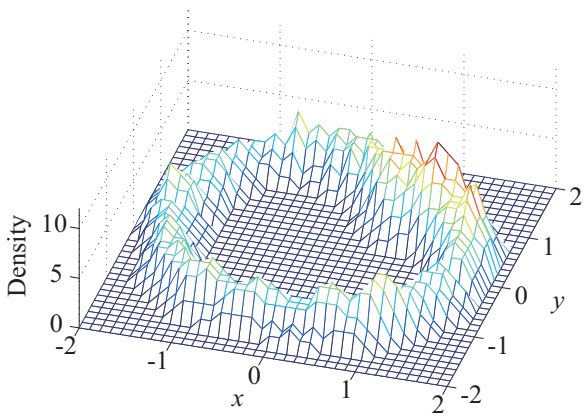


Fig.6 Density map calculated from swarm simulation

の様子を Fig.7 に示す．なお， r_i はこのポールを設置した場所からの位置， β はポールが与える影響の大きさ， $\alpha > 0$ は十分小さい定数を表す．

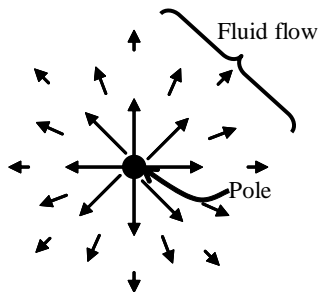


Fig.7 Fluid flow around a pole

3.2 ポールの配置法

ポールを置く場所は Fig.5 の稜線近傍とし，流れを妨げるよう，速度場に垂直に等間隔な 4 本の組とした．

ポールの間隔 d はポールを置く場所の密度 ρ と式 (1) によって求められる速度場 v の関数として次のように与えた．なお， κ は定数である．

$$d = \kappa \rho \|v\| \tag{6}$$

そして，稜線上の密度分布が一定になるように密度が大きい部分の直前にポールを立てることを考える．稜線

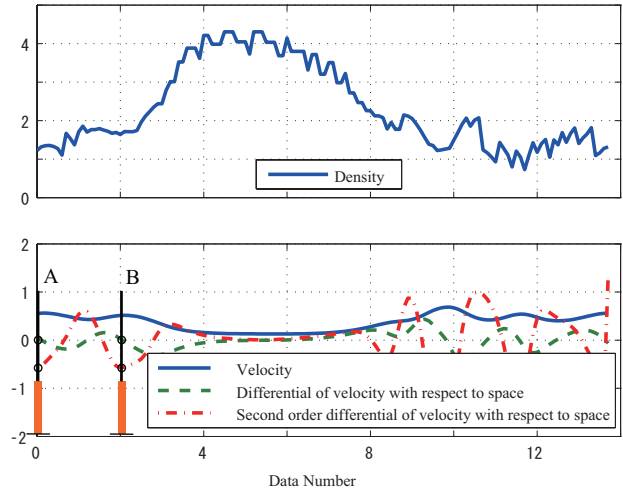


Fig.8 Velocity, Differential of velocity with respect to space, Second order differential of velocity with respect to space of agent and density

における個体が持っている速度，速度の空間微分，速度の空間 2 階微分，およびその場所の流体の密度を Fig.8 に示す．連続の式から，流体密度が大きいところは流速は小さく，逆に流体密度が小さいところでは流速は大きくなっているので速度の 1 階微分値が 0 で 2 階微分値が負の部分（変曲点）に置くことにした．ただし，ここでは 2 セットを置くこととし，いくつかの候補の中からポール位置の速度の 2 階微分値の絶対値が小さいものから順に場所を定めた．これは Fig.8 における A, B の位置に相当する．実際に領域内においたポールの様子を Fig.9 に示す．

3.3 シミュレーションによる空間設計の検証

Fig.9 のようにポールを置いて，前節と同様に連続の式 (2) の定常解を求めた．このときの密度分布を Fig.10 に示す．ポールを置く前 (Fig.5) とポールを置いたとき (Fig.10) の密度のピーク値はそれぞれ 3.392×10^{-3} , 2.640×10^{-3} となっており，ピーク値が下がっていることが分かる．また，ポールを置いて，多くの個体を空間内に設置し，場に沿った動きをシミュレーションすると，定常状態での個体の状況は Fig.11 のようになった．そこで，設計された密度と群のシミュレーションによる混雑度合を比較するため前節と同じ方法を用いて近似的に密度分布を求めた．この近似密度分布を Fig.12 に示す．ポールを置く前 (Fig.6) とポールを置いたとき (Fig.12) のピーク値はそれぞれ 10.8 となり，混雑が緩和されていることが分かる．

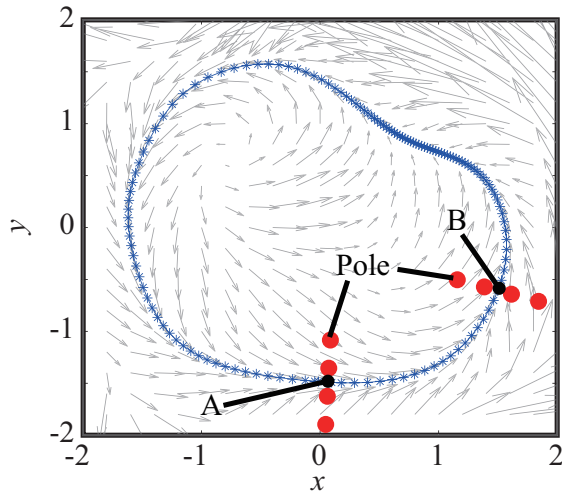


Fig.9 Position of poles based on ridge line

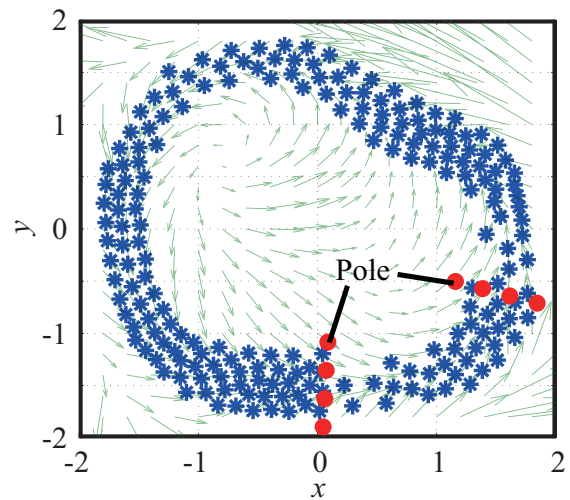


Fig.11 Behavior of swarm on flow field with pole(201 agents)

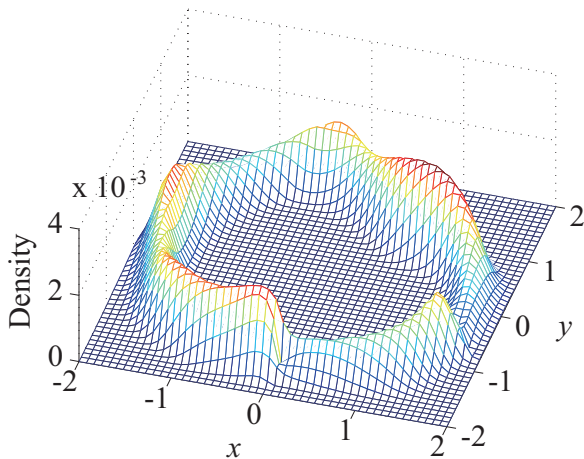


Fig.10 Density map calculated from flow field with poles

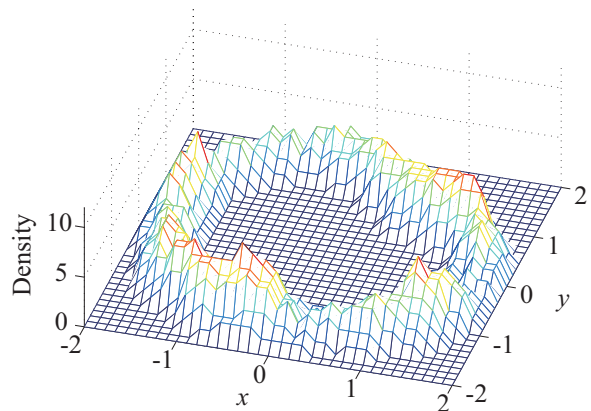


Fig.12 Density map calculated from swarm simulation with pole

4. おわりに

本研究では、混雑緩和のためのアメニティ設計を目的とし、群の挙動をマクロ的に扱う方法、また、その結果に基づく空間の設計法について述べた。以下に得られた成果を示す。

- 群を連続体としてモデル化し、群の挙動を空間の速度場で表した。
- 圧縮性流体の連続の式に基づき混雑度合を密度分布として求めた。
- 得られた密度分布から、流れを妨げるボールの配置法を提案し、混雑を緩和させる方法を提案した。
- 提案手法の有効性をシミュレーションによって検証した。

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。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 倉林, 長川: “幾何条件による自律移動ロボット群の編隊構造遷移”, 日本ロボット学会誌, 23, 3, pp.376-382, 2005.
- [4] 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.1948-1953, 2008.
- [5] 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, 22, 8, pp.1050-1060, 2004.