

混雑緩和のためのアメニティ設計と移動ロボットへの応用

本間良幸, 岡田昌史 (東京工業大学)

Amenity Design for Congestion Reduction and Its Application to the Mobile Robot

*Yoshiyuki HOMMA and Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— The congestion in our environments is sometimes caused by the mismatch between human flow (human behavior) and environmental configurations. So far, we have proposed the amenity design method for congestion reduction based on the continuum model of swarm and its control with the obstacle placement. The swarm behavior is modeled by the vector field and the congestion is calculated and evaluated by the density of the compressive fluid using continuity equation. However, because the control algorithm is heuristic and the effective solution is not always obtained. Moreover the effectiveness evaluation is only shown by the simulation. In this paper, we propose a new amenity design method based on the calculated density distribution and the effectiveness of the proposed method is evaluated by the experiment using the mobile robots.

Key Words: Amenity design, Congestion reduction, Swarm control, Autonomous mobile robot

1. はじめに

我々を取り巻く環境の中には混雑が発生する場所が数多く存在する．その中では，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たりすることもある．混雑を解消するために，快適空間（アメニティ）の設計手法を確立することが，人口が増加する都市設計においても重要な課題であろう．混雑の原因は，あまりにたくさん人間が集まり過ぎていること以外に，人の流れと環境の構造的な関係に問題を持つ場合が考えられる．例えば，広い部屋に小さな出入り口がひとつしかない場合や，美術館における魅力的な展示物の配置と人の流れの関係に問題がある場合などが相当する．この場合には，ものの配置などを変更し，人の流れを制御することで混雑を緩和させることが可能であろう．人の流れを定性的に扱い，展示物の配置を考慮する考え方はこれまでも試みられている [1] が，空間の設計論を導くためには定量的なモデル化，評価，計画が必要であろう．

人の流れを制御することは群の制御であり，群ロボットの制御法が参考になる．久米ら [2] は各ロボットへの明示的な制御によって，また，Finkら [3] は空間にポテンシャル場を設定することで，ロボットによる物体の協調搬送を実現した．また，倉林ら [4] は神経振動子を用いた暗示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，個体数が増えるとアルゴリズムは複雑化し，場合によっては破綻することも考えられる．特に，混雑時の個体数は極めて多く，個体のひとつひとつに個別な制御指令を与えることは非現実的であり，群をマクロに捉えた制御法が必要であろう．

我々はこれまでに群を連続体としてモデル化し，その挙動をマクロに捉えて空間の流れ場としてモデル化する方法を提案してきた [5]．この方法は与えられた流れ場に基づいて，連続の式（連続体の質量保存則）から圧縮性流体の密度を求め，混雑度合いを評価し，流れ

を妨げる障害物を配置することで混雑緩和を行うものである．しかし，その群制御アルゴリズムは発見的なものであり，必ずしも有効な結果が得られるとは言い難い．また，手法の検証は体積や向きを持たない仮想的な個体からなるシミュレーションによるものであり，実世界での現象としてこの有効性を示す必要があるであろう．

そこで本研究では，混雑緩和のための新たな障害物配置アルゴリズムの提案と，これまでに開発した群ロボット [6] を用いた実験検証を行う．この群ロボットは空間に定義された場に従って移動する自律型車輪移動であり，移動平面内の位置計測装置，CPU，バッテリー，他のロボットとの衝突防止のための距離センサを搭載し，無線 LAN によるサーバとの通信によってデータ転送を行う．まず，群の挙動を空間のベクトル場としモデル化し，連続の式に基づいて密度分布を求める．また，得られた密度に基づいて障害物を配置し，これにより混雑のピーク値が減少することで混雑緩和が達成されることを群ロボットを用いた実験によって検証する．

2. 群ロボットの移動方法

2.1 ロボットの移動アルゴリズム

ロボットの移動アルゴリズムを説明する．各ロボッ

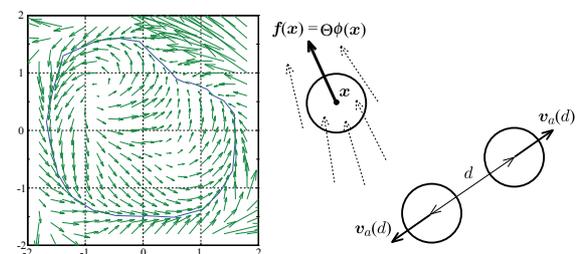


Fig.1 Vector field and robot motion definition

トは，Fig.1 左図に示すような実空間内に定義されたベクトル場に従って移動する．このベクトル場は実線で

示された軌道に引き込まれながら進むように設定されており、美術館などにおける人の移動を想定したものである。このベクトル場に従い、各ロボットは Fig.1 右図のように自己位置 x を計測し、 x の関数として表されるベクトル場

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

により移動速度を決定する。ただし、 $f(x)$ は x の要素のべき多項式

$$f(x) = a_0 + a_{11}x + a_{12}y + a_{21}x^2 + a_{22}xy + \dots + a_\ell y^\ell \quad (2)$$

で表されるベクトルであり、 Θ 、 $\phi(x)$ は、

$$\Theta = \begin{bmatrix} a_0 & a_{11} & a_{12} & a_{21} & a_{22} & \dots & a_\ell \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

で定義される。さらに、個体どうしの衝突を避けるため、他のロボットとの距離 d に基づいた速度 v_a を付加するが、これについては次節で述べる。

2.2 自律移動群ロボット

ロボットは、Fig.2 に示すものであり、各機能を以下に示す。

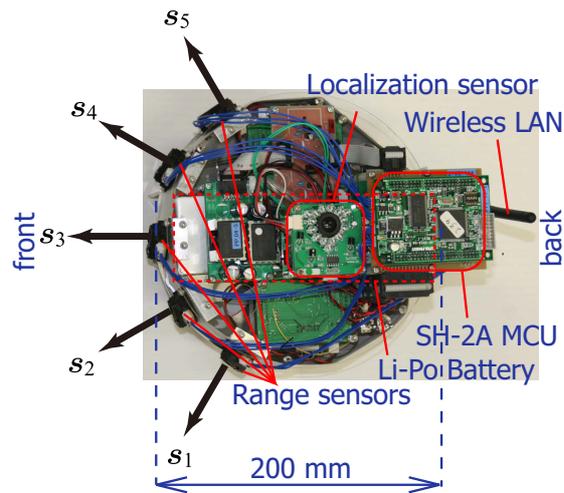


Fig.2 Sensor configuration of the autonomous wheeled robot

位置センサ 流れ場に従って自己の移動速度を決定するために、移動平面における絶対位置、角度を測定する。

距離センサ ロボット前方にある障害物や他のロボットとの衝突を避けるため Fig.2 のようにロボット前方部に 5 つの距離センサを持つ。センサの距離測定値 d_i ($i = 1 \sim 5$) から、他のロボットあるいは障害物から離れるための速度 v_a を

$$v_a = -k_a \sum_{i=1}^5 \frac{1}{d_i + \delta} s_i \quad (5)$$

で定める。ここで、 k_a は定数、 s_i はセンサ i の取付方向を表す単位ベクトル、 δ ($\ll 1$) は定数である。

SH-2A マイコン ロボットの移動速度、衝突回避を自律的に処理する。

無線 LAN 実験データの収集のためホスト PC と通信する。

全方向移動車輪 Fig.3 に示すように 3 つのオムニホイールを均等配置し、ロボットの姿勢に関係なく流れ場に従った方向に移動可能となっている。

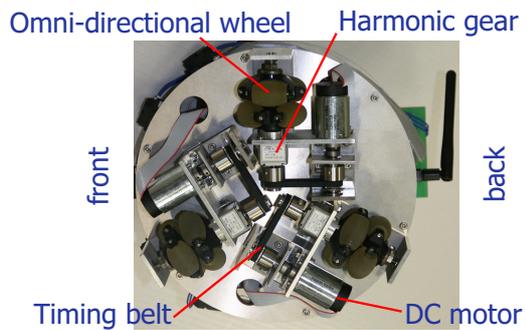


Fig.3 Actuator distribution with omni-wheel

3. 群の連続体モデルと混雑評価

参考文献 [5] と同様に、群を連続体として表し、混雑の度合を密度として表す。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。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$v_x = v_x(t, x) = \Theta_x \phi(x) - k \frac{\partial \rho(t, x)}{\partial x} \quad (7)$$

$$v_y = v_y(t, x) = \Theta_y \phi(x) - k \frac{\partial \rho(t, x)}{\partial y} \quad (8)$$

$$x = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$$

ここで、 $\rho = \rho(t, x)$ は時刻 t における位置 x の密度であり、式 (7), (8) 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。また、混雑の評価対象とする場の個体の挙動を Fig.4 に示すベクトル場によって与えると、混雑密度分布は連続の式 (6) から Fig.5 のように計算できる。この結果は、 $x = (0.48, -1.36)$ に密度の最大値を持ち、混雑が生じていることを示している。次に、ロボットを用いた実験から密度分布を測定する。8 台のロボットを用いて Fig.4 のベクトル場に従う移動実験を行った。その様子を Fig.6 に示す。図の A の部分においてロボットの密度が高いことがうかがえる。ロボットの位置をホスト PC に送信し、全てのロボットの位置を時間で平均化することでロボットの密度の近似値を求めた。この結果を Fig.7 に示す。ここで、Fig.5 と Fig.7 は、同様の密度分布を示していることから、群の挙動をベクトル場として定義し、混雑密度を連続体の密度としてモデル化することは妥当であると言える。

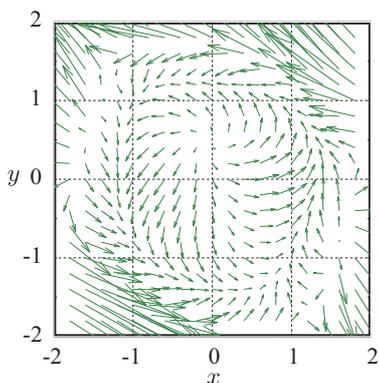


Fig.4 Given flow field

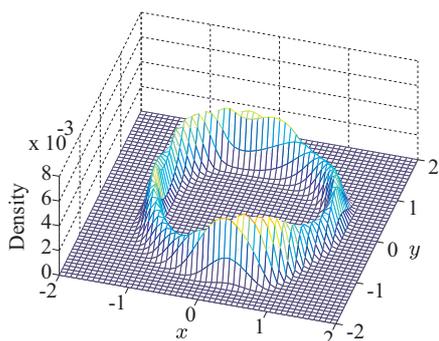


Fig.5 Density map calculated from the flow field

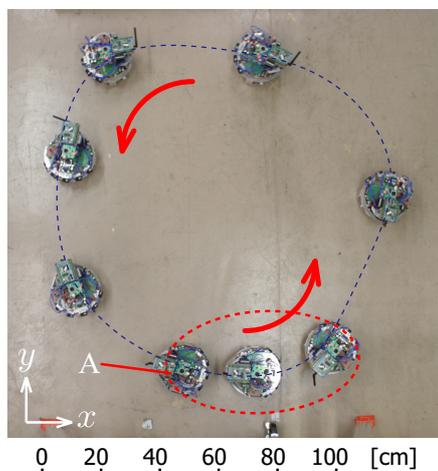


Fig.6 Eight robots motion based on the flow field

4. 混雑緩和のための空間設計

連続体の密度計算によって得られた密度分布 Fig.5 に対して、混雑緩和をするための空間設計を行う。ここでは、障害物（ポール）を適切に配置することで個体の流れを妨げることによって制御し混雑緩和を実現することにする。個体が移動する軌道付近に障害物を配置すれば、個体の移動を制御できる。そこで、まず Fig.5 における密度分布の稜線を計算する。稜線を Fig.9 に示す。この稜線に沿った線 ℓ における密度を $d(\ell)$ とし

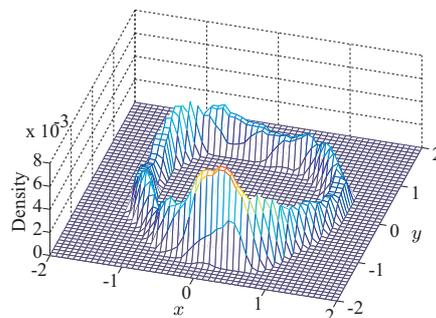


Fig.7 Robot distribution with time average

て、拡張密度 $D(\ell)$ を

$$D(\ell) = \int_{\ell}^{\ell+\ell_0} d(s) ds - \int_{\ell-\ell_0}^{\ell} d(s) ds \quad (9)$$

と定義する。なお、 ℓ_0 は積分距離を表す定数である。ポールによって連続体の流れを妨げると、Fig.8 のように進行方向の密度を下げ、後方の密度を上げる作用がある。また、ある点 ℓ_p における $D(\ell_p)$ 値は、点 ℓ_p の連続体の進行方向の密度が高く、後方の密度が低い時に大きな値をとる。以上のことから、 $D(\ell)$ が最大値をとる点 ℓ に障害物を置くことが、混雑密度の最大値を下げることになる。Fig.10 に ℓ に対する $d(\ell)$ 、 $D(\ell)$ の値を示す。これより、点 α に障害物を配置すればよい。今回は、障害物として1組のポールを設置する。混雑を緩和するポールの配置を Fig.9 に示す。

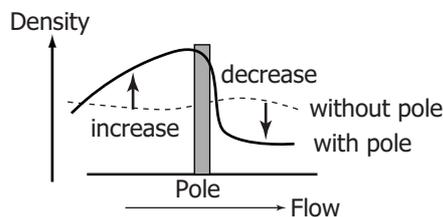


Fig.8 Effect of pole for density

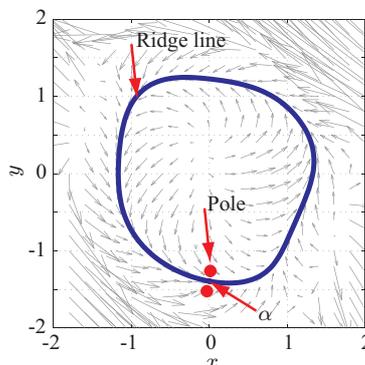


Fig.9 Designed pole position

ポールは、設置した位置からの湧き出しの場として定義して、連続体の密度分布を計算したところ Fig.11

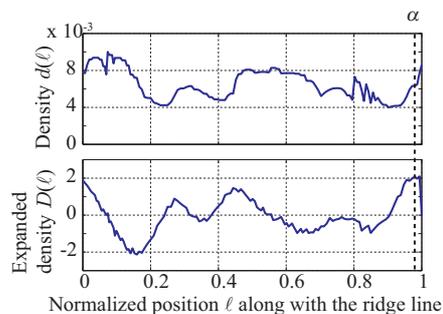


Fig.10 Density and expanded density along with the ridge line

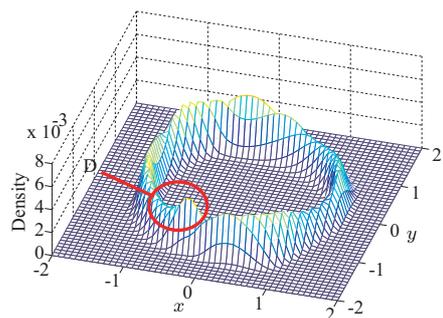


Fig.11 Density map calculated from flow field with pole

のような密度分布が得られた。同様に, Fig.9のように実空間に, ポールを配置して, ロボット8台の移動実験を行った。実験の様子を, Fig.12に示す。Bの場所に障害物を配置した結果, もともと混雑が生じていた, Cの場所の混雑が解消されていることが分かる。そこで, Fig.7と同様にロボットの混雑密度平均を求めると, Fig.13となる。Fig.11とFig.13は, 特にポール付近の点Dに注目すれば密度分布が同様であることは明らかであり, ポール設置時においても群を連続体でモデル化することは, 有効であることが分かる。また, Fig.7とFig.13を比較すると, 混雑密度のピークが9.1%減少しており, ポールの配置の設計による混雑緩和が実現できた。ただし, ここでは, ロボットの数が多くはなく, また, 密度も近似値であるためであり, Fig.5とFig.11の比較では, 8.8%の減少が得られている。以上のことから, 今回提案したポールの配置方法が群ロボットを使った実験によってその有効性が確認された。

5. おわりに

本研究では, 連続体の密度から障害物の配置を決定する混雑緩和アルゴリズムを提案し, 群ロボットによる実験検証を行った。以下に得られた成果を示す。

- 群ロボットによる検証によって, 群を連続体モデルとして扱う手法の有効性を示した。
- 連続体の密度分布から障害物の配置を決定する混雑緩和アルゴリズムを提案し, シミュレーションにより, その有効性を確認した。
- 提案した混雑緩和アルゴリズムを群ロボットを使った実験に適用した結果, 混雑緩和を実現し, アル

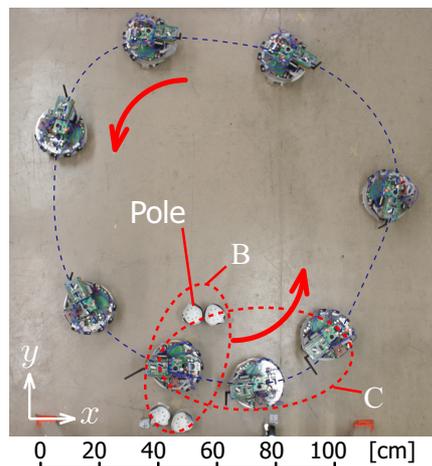


Fig.12 Eight robots motion based on the flow field with pole set

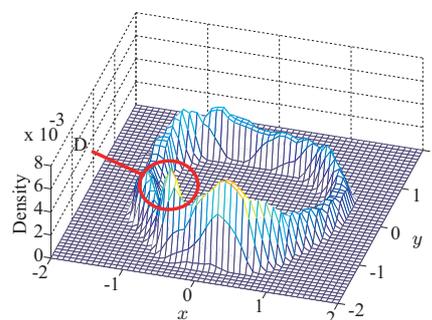


Fig.13 Normalized average number of the robots with pole set

ゴリズムの有効性を示した。

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] K. マックリー (著), 井島, 芦谷 (翻訳): “博物館をみせる”, 玉川大学出版, 2003.
- [2] 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), Vol.68, No.673, pp.179-185, 2002.
- [3] 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.
- [4] 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, Vol.23, No.3, pp.376-382, 2005.
- [5] 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, 3O1-06(CD-ROM), 2008.
- [6] 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(CD-ROM), 2009.