

商業空間における複数の人の列の衝突回避を考慮した動的形状制御

山本江 (名古屋大学) 岡田昌史 (東京工業大学)

1. はじめに

駅構内やイベント会場，食堂などの商業施設では多くの人の流れが存在する．これらの流れは施設内のカウンタや券売機などの物体の配置によって変化し，配置方法によっては混雑の発生や利用者に不快感を与える要因となる．このように混雑する商業施設において利用者の不快感を軽減するためには，券売機やカウンタなどの配置・順路計画が重要になる．従来，このような環境設計への応用を目指して人の流れをモデル化する研究が多く行われてきた [1][2][3]．また，それらのモデルに基づき施設内の配置を行う研究もなされている．織田ら [4] はテーブル等の物体の配置を変更したときの施設内の混雑度の変化をシミュレーションした．阿部ら [5] はマルチエージェントモデルを使用して施設内の配置を支援するシステムを提案した．また，Okadaらは展示会場内の人の流れに対しパーティションの配置によって混雑を緩和する方法 [6] や，展示物の最適配置によって混雑緩和と満足度向上を実現する方法 [7] を提案した．これらの研究は，施設内の人の流れの定常状態における混雑度を評価し，物体配置を求めるものである．

一方で，実際の商業施設では人の流れが時間的に変化していく．例えば，図 1(a) のように右側の入口から利用者が入場し，施設内に設置されているカウンタに順に並んだ後，出口へと進んでいくような状況を考える．このとき，単位時間当たりの入場者数が増加するとカウンタに並ぶ人の列の長さが増加し，施設外へ列が出ることも他のカウンタに並ぶ人々への妨げになることが予想される．これを防ぐためには，図 1(b) のようにそれぞれの列を施設領域内で整列させることが望ましい．静的な配置計算のみではこのような流れの変化を考慮することは難しく，状況に応じて人の流れや列の形状を動的に制御することが求められる．

そこで，本研究では移動可能なパーティションや案内ロボットを効果的に配置することによって列の形状を動的に制御し，快適空間の実現を目指す．これまでに著者ら [8] は，列を形成している人の行動をモデル化し，その列をある許容領域内に収めるためのパーティションの配置方法を提案した．ここでは，1つの列を対象としてその目標形状を計算していたが，実際の商業施設内では多数の人の流れや列が存在し，それらが時々刻々と変化していく．本稿では，複数の人の列の衝突回避を考慮した列の目標形状の計算法を提案する．まず，文献 [8] と同様に人の列の形状を多リンク系の運動として表す．次に，1) 全ての列があらかじめ設定された許容領域内に収まる，2) それぞれの列同士が干渉しない，の2点を考慮した逆運動学計算により目標形状を計算する．得られた形状に基づいてパーティショ

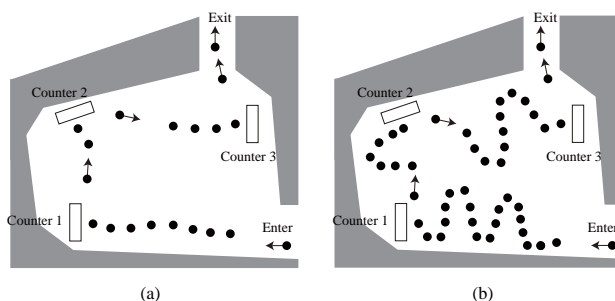


図 1 商業施設内における人の流れと列の整列

ンを配置することにより，人数が時々刻々と変化するような動的な状況においても適切に列を変形できることをシミュレーションにより示す．

2. 商業施設内の人列

2.1 列に並ぶ人の移動則

2次元平面内における人の移動を考え，ある人物 i の位置と速度をそれぞれ p_i, v_i とする．まず，図 2 のように人々がカウンタなどの目的地 A へ向かう状況を考える．目的地 A の位置を a とおき， $p_0 = a$ とする．ここで，図 2 のように，人物 i とその前方に並んでいる人 $i-1$ の相対位置ベクトルを r_i とおく．

$$r_i = p_i - p_{i-1} \quad (1)$$

また， r_i に垂直な単位ベクトルを n_i, r_{i-1} に対する r_i の回転角を θ_i とおく．このとき，人は 1) 前方の人と一定距離を保って並ぼうとする，2) 前方の人と向きを合わせて並ぼうとする，と仮定し，速度 v_i を次式で与える．

$$v_i = -\frac{r_i}{\|r_i\|} \alpha_r(\|r_i\|) - n_i \frac{\theta_i}{|\theta_i|} \frac{\alpha_\theta(|\theta_i|)}{\|r_i\|} \quad (2)$$

式 (2) 右辺第一項は一定距離を保って並ぶ効果を，第二項は θ_i を 0 にして前方の人と向きをそろえて並ぼうとする効果を表す．ここで， $\alpha_r(x), \alpha_\theta(x)$ はそれぞれ次式で定義されるシグモイド関数である．

$$\alpha_r(x) = \frac{c_r}{1 + \exp\{-a_r(x - b_r)\}} \quad (3)$$

$$\alpha_\theta(x) = \frac{c_\theta}{1 + \exp(-a_\theta x)} \quad (4)$$

ただし， $a_r, b_r, c_r, a_\theta, c_\theta$ は正の定数である．特に式 (3) において， b_r は列に並ぶ人々の間隔を， c_r は一般的な人の歩行速度を表すパラメータである．

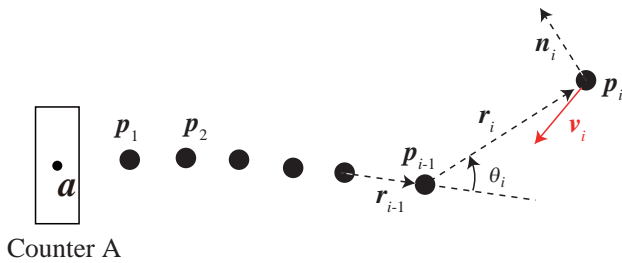


図 2 列に並ぶ人々の移動モデル

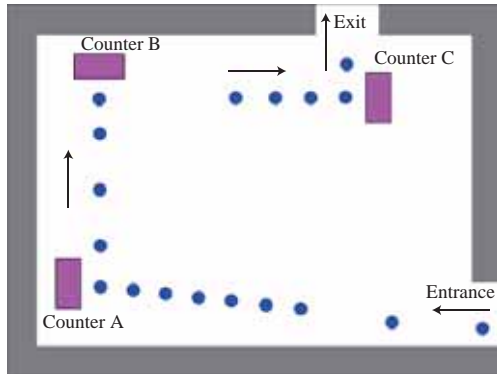


図 3 列に並びながら目的地を順に移動するシミュレーション

以上から、人物 i の位置を次式のように更新していく。

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) + v_i \Delta t \quad (5)$$

Δt はサンプリングタイムである。このとき、列の先頭の人物 p_1 は目的地 $a = p_0$ からある一定距離だけ離れたところで $v_1 \simeq 0$ となって停止する。停止後、 T_A 秒経過後に別の目的地 B へ切り替えることで、異なる目的地を順に巡る人の移動を表現できる。

2.2 列に並ぶ人の移動シミュレーション

図 3 のような空間に目的地 A, B, C を設定し、入口 A, B, C 、出口と順に列に並びながら移動する様子をシミュレーションした。図中、青丸が人々の位置を表す。各列における先頭の待ち時間は $T_A = T_B = T_C = 5[\text{sec}]$ に設定した。図 3 から分かるように、 A に比較的最長い列が形成されており、時間が経過するにつれ、徐々に長さが増加していく。ある列が他の列の妨げになることや、列自体が空間から出ること防ぐために、列を変形する制御を行う。

3. 複数の人の列の形状制御

3.1 パーティションによる列の形状制御

図 4(a) のように、人の列に対して移動可能なパーティションを配置し、人々がパーティションから一定距離を保って並ぼうとする効果を利用して列を変形させる。

ある列 A に配置するパーティションの数を n_A 個とする。このとき、列の形状を図 4(b) のような n_A 個の回転関節と n_A 個の直動関節からなる $2n_A$ 自由度のリンク系で表す。 j_A 番目のリンクの位置を x_{j_A}, x_{j_A-1} と x_{j_A} の間の回転・直動関節の変位をそれぞれ ϕ_{j_A}, ℓ_{j_A}

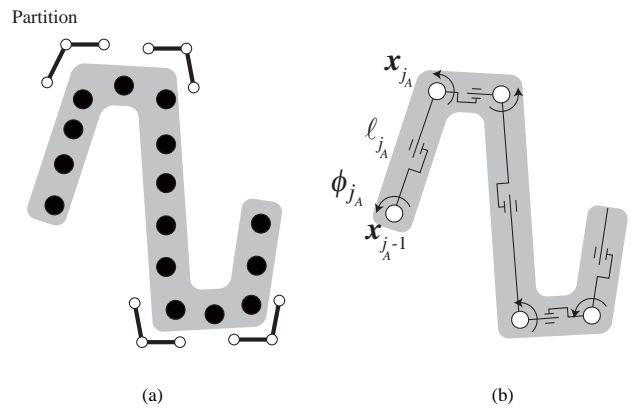


図 4 移動可能なパーティションの配置による整理とその目標形状の多リンク系による表現

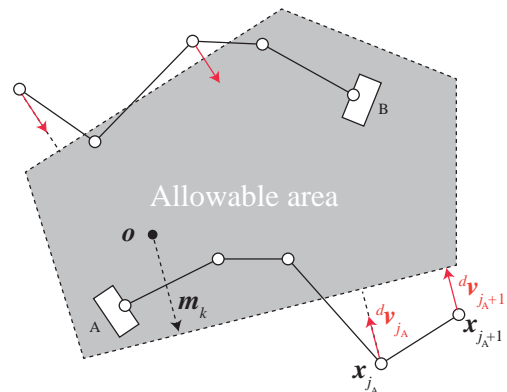


図 5 ある許容領域内に列を収めるための目標速度の設定

とおき、これらをまとめた関節変位ベクトルを ϕ_A とおく。

$$\phi_A = [\phi_1 \quad \ell_1 \quad \dots \quad \phi_{n_A} \quad \ell_{n_A}]^T \in \mathbb{R}^{2n} \quad (6)$$

3.2 複数の列を考慮した目標形状

ある空間内に複数の人の列が存在する場合を考える。このとき、1) 全ての列があらかじめ設定された許容領域内に収まる、2) それぞれの列同士が干渉しない、の 2 点を実現する形状を求める。

まず、文献 [8] と同様に図 5 のように許容領域を凸多角形で設定する。ある列 A を許容領域内に収めるために、各リンクに凸多角形の内部へ向かうような目標速度 $d v_{j_A}$ を与える。

$$d v_{j_A} = - \sum_k \frac{c_p}{1 + \exp(a_p e_{j_A k})} \frac{m_k}{\|m_k\|} \quad (7)$$

$$e_{j_A k} = \|m_k\| - \frac{1}{\|m_k\|} (m_k^T x_{j_A}) \quad (8)$$

ただし、 a_p, c_p は正の定数である。また、 m_k は凸多角形内部の原点から k 番目の辺に下した法線ベクトルである。 $e_{j_A k}$ はリンク位置 x_{j_A} から辺 k までの符号付の距離であり、 $e_{j_A k} > 0$ ならば x_{j_A} は凸多角形内部に、 $e_{j_A k} < 0$ ならば外部にあることを意味する。式 (7) の

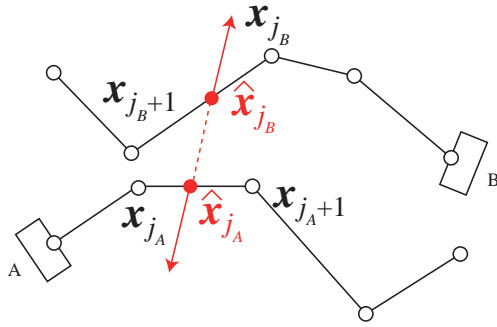


図6 列同士の衝突回避のための目標速度の設定

ように ${}^d v_{j_A}$ を与えることで、図5のように領域外部にあるリンクに対して領域内部へ向かうような速度を設定できる。

次に、列同士の衝突を回避するための目標速度を設定する。図6のように列Aのリンク位置 x_{j_A} と x_{j_A+1} の間に代表点 \hat{x}_{j_A} を設定する。別の列Bに対しても同様に代表点 \hat{x}_{j_B} を設定する。この代表点の間に反発の影響を加えることで、列同士の衝突を回避させることを考え、目標速度 ${}^d \hat{v}_{j_A}$ を次式のように与える。

$${}^d \hat{v}_{j_A} = - \sum_{j_B} s(\|r_{j_A j_B}\|) \frac{r_{j_A j_B}}{\|r_{j_A j_B}\|} \quad (9)$$

$$r_{j_A j_B} = \hat{x}_{j_B} - \hat{x}_{j_A} \quad (10)$$

ここで、 $s(x)$ は次式で与えられるシグモイド関数である。

$$s(x) = \frac{c}{1 + \exp\{a(x-b)\}} \quad (11)$$

ただし、 a, b, c は正の定数である。代表点として、リンク位置 x_{j_A}, x_{j_A+1} とその間の複数個の点を取ることで、異なる列と列との間に交差が起こることを防ぐ。

3.3 リンク目標速度を実現する形状の計算

各リンクと代表点に設定された目標速度を実現するように列の形状を変形する。次式のように、設定された目標速度をまとめたベクトル ${}^d v_A$ を定義する。

$${}^d v_A = [{}^d v_1 \quad \dots \quad {}^d v_{n_A} \quad {}^d \hat{v}_1 \quad \dots \quad {}^d \hat{v}_{n_A}]^T \quad (12)$$

${}^d v_A$ を実現するような関節速度ベクトル $\dot{\phi}_A$ は次式のような評価関数を最小化する最適化問題を解くことで求めることができる。

$$h(\dot{\phi}_A) = \frac{1}{2} \|{}^d v_A - J_A \dot{\phi}_A\|^2 + \frac{1}{2} \dot{\phi}_A^T W \dot{\phi}_A \quad (13)$$

ただし、 J_A は $\dot{\phi}_A$ を ${}^d v_A$ に写像するヤコビ行列である。また、 W は重み行列であり、評価関数(13)の第二項は特異値低感度運動分解[9]と同様に過大な $\dot{\phi}_A$ を防ぐ項である。

ここで、形状の全体の長さは実際に並んでいる人の列の長さ L_A に等しくならなければならない。この拘束条件は次式のように表せる。

$$L_A = b^T \phi_A \quad (14)$$

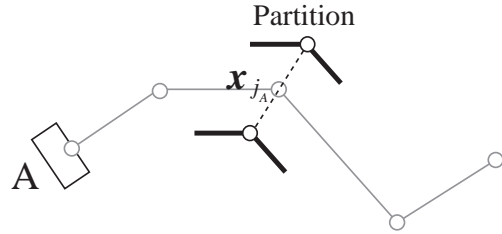


図7 目標形状に対するパーティションの配置

ただし、 b は ϕ_A から直動関節の変位を取り出すベクトルである。

$$b = [0 \quad 1 \quad \dots \quad 0 \quad 1]^T \in \mathbb{R}^{2n_A} \quad (15)$$

この条件が満たされるように、 $\dot{\phi}_A$ に対する次式のようなフィードバック項を考慮する。

$$b^T \dot{\phi}_A = k(L_A - b^T \phi_A) \quad (16)$$

ただし、 k は正の定数である。式(16)の下で式(13)を最小にする $\dot{\phi}_A$ は、文献[8]と同様にLagrangeの未定乗数法を用いて次式のように計算できる。

$$\dot{\phi}_A = J_A^* \left\{ J_A^T {}^d v_A + b(b^T J_A^* b)^{-1} (k(L_A - b^T \phi_A) - b^T J_A^* J_A^T {}^d v_A) \right\} \quad (17)$$

ただし、 $J_A^* = (W^T + J_A^T J_A)^{-1}$ とおいた。式(17)から求まる $\dot{\phi}_A$ を用いて各時刻の ϕ_A を次式で更新することで形状を制御できる。

$$\phi_A(t + \Delta t) = \phi_A(t) + \dot{\phi}_A \Delta t \quad (18)$$

他の列についても同様に形状を制御することができる。

以上のようにして得られた目標形状の各リンクに対して図7のようにパーティションを配置し、人々を整列させる。人々の移動則は、式(2)にパーティションとの衝突を避ける効果を足し合わせて実現する。

4. 複数の人の列の制御シミュレーション

2.2節と同様の設定において、列の長さに応じて目標形状とパーティションの配置を計算するシミュレーションを行った結果を図8に示す。図中、パーティションを赤で示す。図8(a)中、緑で示した領域を許容領域として列を変形させた。(a)、(b)と時間が経つにつれて列Aが長くなり、(c)では列が施設外へ出ることを防ぐために列の形状が変形されていることが分かる。また、(c)の状態以降、目的地Aでの待ち時間を5[sec]から2[sec]に変更し、列Bが長くなるように設定した。図8(d)では、列Bが長くなることに伴って列Aとの干渉を避けるように列Bが変形されていることが確認できる。

5. おわりに

本稿では、商業施設における人の列の動的制御方法を提案した。特に、施設内に複数の列が存在し、それらが時間的に変化するような状況下において、1) 全て

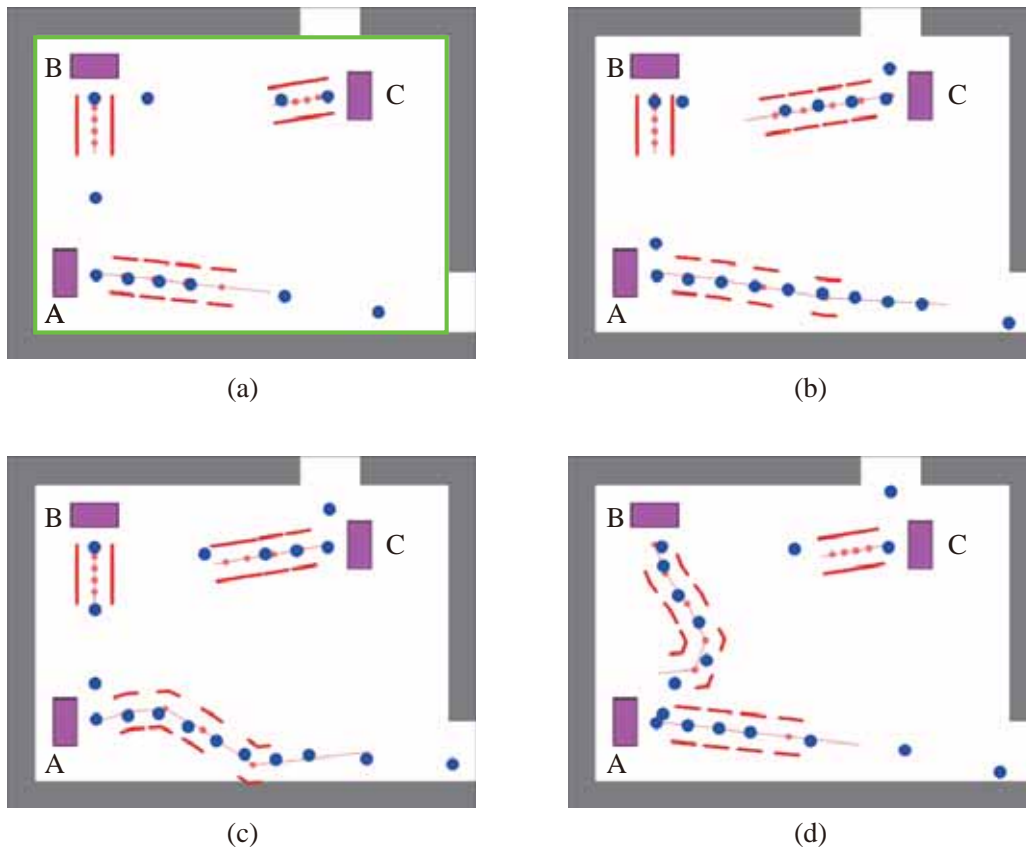


図 8 複数の人の列の制御シミュレーション

の列があらかじめ設定された許容領域内に収まる, 2) それぞれの列同士が衝突しない, の 2 点を考慮して列の形状を計算する手法を示した. 得られた列の目標形状に基づいて移動可能なパーティションを配置することにより, 人数が時々刻々と変化するような動的な状況においても適切に列を変形できることをシミュレーションにより示した.

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] D. Helbing and P. Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, Vol. 51, No. 5, pp. 4282–4286, 1995.
- [2] J. Berg, et al. Reciprocal Velocity Obstacle for Real-Time Multi-Agent Navigation. In *Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008)*, 2008.
- [3] A. Treuille, et al. Continuum Crowds. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, No. 3, 2006.
- [4] 織田, 瀧澤, 河村, 谷. エージェントモデルによる連続空間における人間行動シミュレータの構築及び建築計画への応用. *日本建築学会計画系論文集*, No. 558, pp. 315–322, 2002.
- [5] 阿部, 山田, 石井, 中本, 木村. マルチエージェントを用いた小売店レイアウト支援システム. *電子情報通信学会 2006 年総合大会講演論文集*, p. 89, 2006.
- [6] M. Okada and Y. Homma. Amenity Design for Congestion Reduction based on Continuum Model of Swarm. In *Proc. of the 13th International Conference on Mechatronics Technology*, 2009.
- [7] M. Okada, Y. Motegi, and K. Yamamoto. Human Swarm Modeling in Exhibition Space and Space Design. In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5021–5026, 2011.
- [8] 山本, 大神, 岡田. 商業空間における人の列の動的制御. *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 1A2-T08, 2012.
- [9] Y. Nakamura and H. Hanafusa. Inverse Kinematics Solutions With Singularity Robustness for Robot Manipulator Control. *ASME Transaction, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 108, pp. 163–171, 1986.