

商業空間における人の列の動的制御

Dynamic Control of People Queue Formation in Commercial Facility

山本江 大神康寛 岡田昌史 (東工大)

Ko YAMAMOTO, Yasuhiro OHGAMI and Masafumi OKADA (Tokyo Tech.)

There are a lot of pedestrian flows in the commercial facility. These flows often cross each other, and change goals, e.g. reception desk or ticket-vending machine. Moreover, too long people queue at a goal sometimes blocks up other flows. This phenomenon makes us uncomfortable. In order to reduce the congestion and realize the amenity space the environmental design considering the swarm behavior of people is required. In this paper, the authors focus on the formation control of people queue at a goal and propose the formation control method by optimizing the location of guide robots. The effectiveness of the proposed method is verified with simulations.

Key Words: Amenity Space Design, Inverse Kinematics, Constrained Optimization

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し、しばしば混雑が生じる。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・順路計画といった環境設計が重要になる。従来、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することもある。例えば、図 1(a) のように右側の入口から利用者が入場し、左側に設置されているカウンタに並んだ後、出口へと進んでいく環境を考える。このとき、単位時間当たりの入場者数が多くな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や他の入場者への妨げになることが予想される。この場合、図 1(b) のような設定領域内に列全体が収まるように列を並ばせることで不快感を軽減することが期待できる。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必要となる。

そこで、本研究では案内ロボットによって列の形状を動的に制御することで快適空間の実現を目指す。著者ら [8] は、これまでに列を形成している人の行動をリンク系の運動としてモデル化し、その列に対し案内ロボットを配置することで列の最後尾の位置を制御する方法を提案した。最後尾の目標位置を実現する形状をリンク系の逆運動学計算により求めたが、何台のロボットを列のどの位置に配置するかは発見的に決められていた。また、実際の場面へ応用するには、ある設定領域内に収まるように列を制御することも求められる。本稿では、凸多角形領域に収まる列の目標形状を最適計算する。その際、列の目標形状の長さは実際の人の列の長さに等しくなるようにする必要があり、これを拘束条件とした最適化を行う方法を示す。次に、得られた目標形状に基づき案内ロボットの配置を求め、動的に変化する人数に応じて列を制御でき

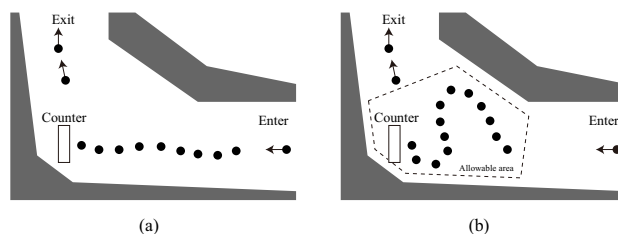


Fig.1 People queue in a commercial space

ることをシミュレーションにより示す。

2. 列に並ぶ人の行動のモデル化

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 $p_i, v_i \in \mathbb{R}^2$ とする。まず、図 2 のように人物 i がカウンタなどの目的地 a へ向かう状況を考える。このときの速度は次式のような放射状の速度ベクトル場によって与える。

$$f(p_i, p_{i-1}) = -\frac{r_i}{\|r_i\|} v_0 \quad (1)$$

$$r_i = p_i - p_{i-1} \quad (2)$$

$$p_0 = a \quad (3)$$

ただし、 v_0 は一般的な人の歩行速度を表す。 r_i は人物 i と $i-1$ との相対位置ベクトルである。図 2(a) のように目的地に列が形成されている場合、式 (1) は最後尾の人物 $i-1$ を中心としたベクトル場を与える。一方、図 2(b) のように目的地に列が形成されていない場合には、式 (1) で $i=1$ として目的地 a へ引き込まれるベクトル場を与える。目的地にある程度近づいた場合は速度ベクトル場の項を 0 として停止し、列を形成する。

列に並んでいる人の移動は文献 [8] と同様にリンク系の運動によりモデル化する。図 3 のように i 番目の人物と前方に並んでいる $i-1$ 番目の人のなす角を θ_i として、 $\theta_i \simeq 0$ となるように位置を変化させると仮定する。そこで、 θ_i に以下のような角速度を与える。

$$\dot{\theta}_i = q(\theta_i) := \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta\theta_i)} - \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

ただし、 α, β は定数であり、 $q(\theta)$ は図 4 のような概形をとる関数である。

以上をまとめて、列に並ぶ人 i の位置と速度を以下のよう

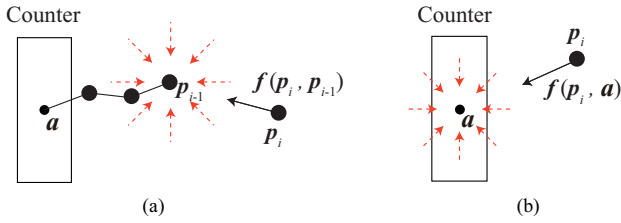


Fig.2 Modeling of moving behavior to a counter

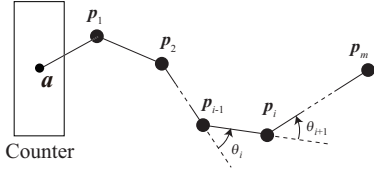


Fig.3 Modeling of waiting behavior in the people queue

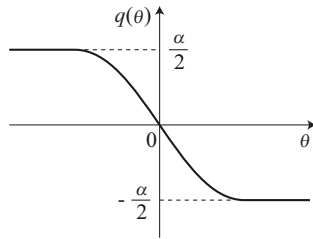


Fig.4 Angle velocity function $q(\theta)$ which represents a pedestrian facing the same direction as the anterior person

に与える .

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

$$v_i = \begin{cases} f(p_i, p_{i-1}) & \text{if } \|p_i - p_{i-1}\| > \epsilon \\ q(\theta_i) n_i & \text{if } \|p_i - p_{i-1}\| \leq \epsilon \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 Δt はサンプリングタイム、 n_i は r_i に対するノルム 1 の法線ベクトル、 ϵ は列に並んでいるか移動しているかを切り替えるパラメータである .

以上の方法を用いて、列に並ぶ人々のシミュレーションを行った . 図 5 にシミュレーションの様子を示す . 図中、赤い四角がカウンタの位置を示し、青丸が列に並んでいる人の位置を示す . 人々は図中青色で示した $x = 7, -1 \leq y \leq 1$ の領域に 7.5[sec] 毎にランダムに追加した . また、列の先頭に来て 25[sec] 経過すると、列から抜け出して出口に向かって移動するものとした . 単位時間当たりの入場者数に比べてカウンタでの待ち時間が長い場合、時間が経過していくにつれて列が長くなっていく様子が確認できる . そこで、次章の方法により、例えば図 5 中の点線で示した領域内に列全体を収める制御を行う .

3. 列の目標形状計算

3.1 人の列の目標形状

図 6(a) のように、人の列に対して案内ロボットを配置し、人々がそのロボット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ことを考える . 本稿では、ロボットの数があらかじめ決められている状況を想定し、そのときに最適な形状を求め、その目標形状に基づいてロボットを配置していく .

案内ロボットの数を n 個とする . このときの列の目標形状を図 6(b) のような n 個の回転関節、 n 個の直動関節からなる $2n$ 自由度のリンク系で表す . ここで、 j 番目のリンクの位置を x_j, x_{j-1} と x_j の間の回転・直動関節の変位をそれ

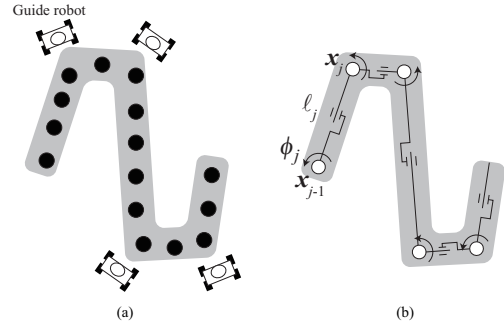


Fig.6 Formation control by mobile guide robots and its referential formation

ぞれ ϕ_j, l_j とする . l_j はリンク間に入る人数を表す . このとき、 ϕ_j, l_j をまとめたベクトルを

$$\phi = [\phi_1 \ l_1 \ \dots \ \phi_n \ l_n]^T \in \mathbb{R}^{2n} \quad (7)$$

とおくと、リンクの位置 x_j は次式のように ϕ の関数として表せる .

$$x_j = x_j(\phi) \quad (8)$$

設定領域内に収まるような目標形状を求めることは、 $x_j (j = 1, \dots, n)$ が領域内に収まるような ϕ を求めることに相当する . ここで、目標形状の長さは実際に並んでいる人の列の長さ L 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 .

$$L = b^T \phi, \quad b = [0 \ 1 \ \dots \ 0 \ 1]^T \in \mathbb{R}^{2n} \quad (9)$$

ただし、 b は直動関節の変位を取り出すベクトルである .

3.2 設定領域に収まる目標形状の計算

本稿では、設定領域を凸 m 角形で与えるものとする . 凸多角形は内部に原点を含むものとし、 k 番目の頂点を $c_k (k = 1, \dots, m)$ とおく . c_k と c_{k+1} から成るエッジ k に対して、図 7 のように原点から伸ばした法線ベクトル m_k は次式のように表される .

$$m_k = \frac{1}{\|d_k\|^2} \left\{ -(c_{k+1}^T d_k) c_k + (c_k^T d_k) c_{k+1} \right\} \quad (10)$$

$$d_k = c_{k+1} - c_k \quad (11)$$

このとき、リンクの位置 x_j からエッジ k までの距離 e_{jk} は次式のように計算できる .

$$e_{jk} = \|m_k\| - \frac{1}{\|m_k\|} (m_j^T x_j) \quad (12)$$

これは符号付の距離であり、以下のように e_{jk} の符号によって点 x_j がエッジ k に対して原点と同じ側にあるか否かを判定できる .

- $e_{jk} > 0$ のとき、 x_j はエッジ k に対して原点と同じ側にある .
- $e_{jk} < 0$ のとき、 x_j はエッジ k に対して原点と反対側にある .

どの k に対しても $e_{jk} > 0$ ならば、 x_j は凸多角形内部にある . したがって、凸多角形内に収まる形状を求めるには、全ての j, k について $e_{jk} > 0$ となるような ϕ を求めればよい . ここで、 e_{jk} と ϕ の関係は非線形であるため、その時間微分を考えることで線形な問題に帰着させる . まず、リンク j を凸多角形内部に収めるための目標速度として次式のような速度 ${}^d v_j$ を与える .

$${}^d v_j = - \sum_k s(e_{jk}) \frac{m_k}{\|m_k\|} \quad (13)$$

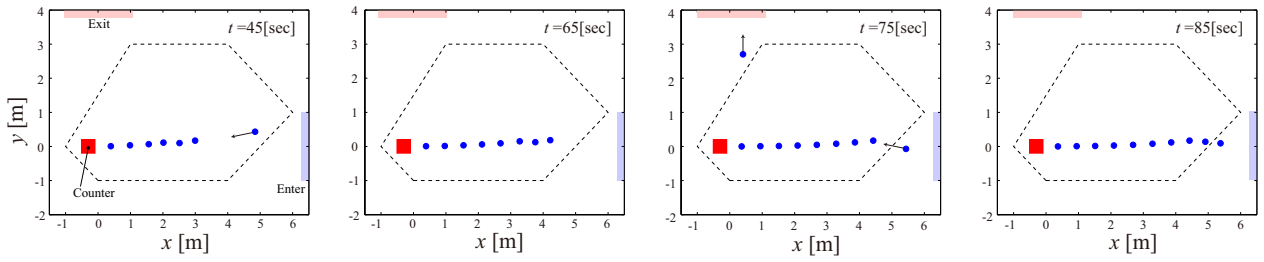


Fig.5 Simulation of human behavior in a commercial space

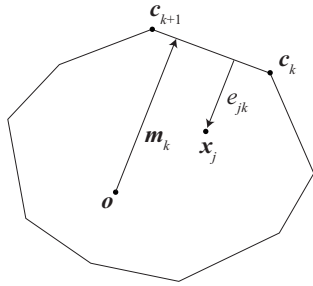


Fig.7 Distance from x_j to the k -th edge of the convex polygon region

ただし, $s(x)$ は次式で表されるシグモイド関数である.

$$s(x) = \frac{\gamma}{1 + \exp(\delta x)} \quad (14)$$

ただし, γ, δ は定数である. 一方, リンクの数 \dot{x}_j と関節速度 $\dot{\phi}$ の関係は次式のように与えられる.

$$\dot{x}_j = J_j \dot{\phi}, \quad J_j = \frac{\partial x_j}{\partial \phi} \quad (15)$$

J_j はヤコビ行列である. いま, $\dot{x} = [x_1^T \dots x_n^T]^T \in \mathbb{R}^{2n}$, $J = [J_1^T \dots J_n^T]^T \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ とおけば, 式 (15) は次式のようにまとめられる.

$$\dot{x} = J \dot{\phi} \quad (16)$$

同様に, 各リンクの目標速度をまとめたベクトルを ${}^d v = [{}^d v_1^T \dots {}^d v_n^T]^T \in \mathbb{R}^{2n}$ とすると, $\dot{\phi}$ は以下のような最適化問題を解くことで求めることができる.

$$h(\dot{\phi}) = \frac{1}{2} \|{}^d v - J \dot{\phi}\|^2 + \frac{1}{2} \dot{\phi}^T W \dot{\phi} \rightarrow \min. \quad (17)$$

式 (17) の評価関数 $h(\dot{\phi})$ の第 2 項目は過大な $\dot{\phi}$ を防ぐ効果を持ち, W は重み行列である. ここで, 上記の最適化問題には式 (9) で表される拘束条件が存在する. この拘束条件を以下のような速度に関する拘束条件で置き換えることで解法を容易にする.

$${}^d v_\ell - b^T \dot{\phi} = 0 \quad (18)$$

$${}^d v_\ell = \kappa_1 (L - b^T \phi) \quad (19)$$

ただし, κ_1 は定数であり, 式 (19) は位置の拘束を満たすためのフィードバック項である.

本稿では式 (17)(18) で与えられる拘束条件付き最適化問題をラグランジュの未定乗数法により解く. 未定乗数を λ として

$$\mathcal{L} = h(\dot{\phi}) + \lambda ({}^d \ell - b^T \dot{\phi}) \quad (20)$$

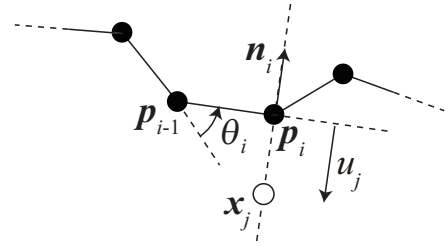


Fig.8 Effect of a guide robot to the people queue

を定義する. このとき, 評価関数が最小値をとるための必要条件は以下のようなになる.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\phi}} = -({}^d v - J \dot{\phi})^T J + \dot{\phi}^T W - \lambda b^T = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = {}^d \ell - b^T \dot{\phi} = 0 \quad (22)$$

式 (21) (22) から $\dot{\phi}$ を消去すると未定乗数 λ は次式のように求まる.

$$\lambda = (b^T J^* b)^{-1} ({}^d \ell - b^T J^* J^T {}^d v) \quad (23)$$

ただし, $J^* = (W^T + J^T J)^{-1}$ とおいた. 式 (21) に代入すると $\dot{\phi}$ は次式のように求まる.

$$\dot{\phi} = J^* \{ J^T {}^d v + b (b^T J^* b)^{-1} ({}^d \ell - b^T J^* J^T {}^d v) \} \quad (24)$$

ϕ に適当な初期値を設定し, 式 (24) から求まる $\dot{\phi}$ を用いて各時刻の ϕ を次式で更新することで目標形状が求まる.

$$\phi(t + \Delta t) = \phi(t) + \dot{\phi} \Delta t \quad (25)$$

4. 目標形状を実現するための案内ロボットの配置

前章の方法により求めた目標形状 ϕ によって, 何番目の人物に案内ロボットを作用させればよいかを決定できる. すなわち, \hat{j} 番目のロボットは

$$\left| \sum_{j=1}^{\hat{j}} \ell_j - \sum_{i=1}^{\hat{i}} \|r_i\| \right| \rightarrow \min. \quad (26)$$

を満たす \hat{i} 番目の人物に作用させればよい. これらの人々は案内ロボットから一定距離を保とうとすると考えられる. この効果によって, 図 8 のように i 番目と $i-1$ 番目の人物のなす角 θ_i を目標形状の角度 ϕ_j に変化させる.

図 8 のように, 人物 i に対して案内ロボット j を r_i に垂直に配置する. このとき, 案内ロボットの位置 x_j は次式のように表せる.

$$x_j = p_i + u_j n_i \quad (27)$$

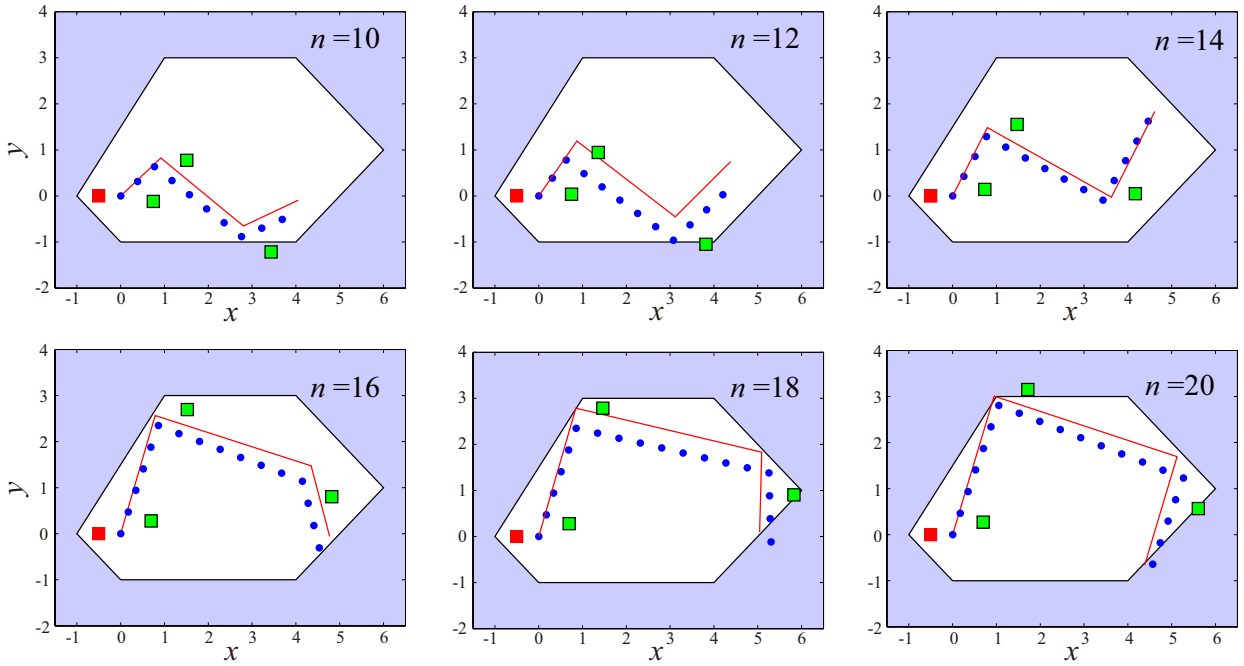


Fig.9 Simulation results of the formation control

ここで、 u_j は法線ベクトル n_i 方向の変位である．さらに、人物 i は案内ロボットとの距離 u_j に応じて反発の速度項を受けるものとしてモデル化する．式 (4) にこの影響を考慮して、人物 j の持つ角速度 $\dot{\phi}_j$ を次式のように与える．

$$\dot{\theta}_i = q(\theta_i) - \frac{\text{sgn}(u_j)}{\|r_i\|} s(|u_j|) \quad (28)$$

u_j を入力として $\theta_i \simeq \phi_j$ となる u_j を求めれば案内ロボットの位置を決定できる．本稿では、 θ_i の目標速度を定数 κ_2 を用いて

$${}^d\dot{\theta}_i = \kappa_2(\phi_j - \theta_i) \quad (29)$$

と与えて、

$$\frac{1}{2}({}^d\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_i)^2 \longrightarrow \min. \quad (30)$$

とする u_i を勾配法により求める．

5. 目標形状制御シミュレーション

以上のような方法により、人数に応じて人の列形状を変化させるシミュレーションを行った．シミュレーション結果を図 9 に示す．図中、赤の四角形がカウンタの位置、白色の凸多角形が設定領域、赤線が列の目標形状、緑の四角形が案内ロボットの位置、青丸が列に並ぶ人々の位置を示す．案内ロボットの数は 3 個とし、列に並ぶ人数 n を 10 から 20 まで変化させてそれぞれの場合の目標形状を計算した．図 9 から、1) 全体の長さが実際の列の長さと同しく、2) 凸多角形内に収まる列の目標形状が計算できていることが分かる．

なお、3. 章で示した目標形状の計算法は大域的な最適化ではなく初期値に依存する．特に、 $n = 10$ から 14 の場合は人数が少なく初期状態において各節点は概ね凸領域内にあるため、式 (13) で与えられる各節点への目標速度は小さく、得られる形状もほぼ初期形状を保った結果が得られる．一方、 $n = 16$ 以上では列が領域内に収まるよう形状が変形され、特に 3 番目の回転関節の角度が変化していることが分かる．

6. おわりに

本稿では、商業施設における快適空間の実現を目指し、ある設定領域内に人の列を収めるための案内ロボットの配置法を提案した．案内ロボットの台数があらかじめ決まっている場合において、列に並ぶ人数に応じた最適な目標形状を計算し、それをもとに配置を決めることで、列の人数が時間的に変化する動的な状況へも対応することができる．

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．

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, 岡田. 商業施設における人の流れのモデル化と快適空間実現のための環境設計. 第 17 回ロボティクスシンポジウム, 2012.