

イベント空間における人の群のモデル化と空間設計

Human Swarm Modeling in Exhibition Space and Space Design

学 茂木 祐一 (東工大) 正 岡田 昌史 (東工大)

Yuichi MOTEKI, Tokyo TECH, motegi.y.ac@m.titech.ac.jp
Masafumi OKADA, Tokyo TECH, okada@mep.titech.ac.jp

In exhibition space, it is possible to control human flow implicitly by changing the layout of exhibits. The objectives of this paper are optimization of exhibit layout to reduce the congestion and amenity space design. For these purposes, macro modeling of human swarm behavior and optimization method of exhibit layout are required. So far, human swarm behavior has been modeled by two-dimensional vector field and individual behavior is represented by dynamics including collision avoidance vector of individuals. In this paper, we extend the human model to multi-dimensional dynamics to represent visitors' stopping to view exhibits, and the layout of exhibits is optimized based on the proposed model by minimizing the collision avoidance vector. The proposed method is verified by simulation and experiment using swarm robots which consist of autonomous mobile robots and radio controlled robots.

Key Words: human swarm model, layout optimization, congestion reduction, amenity space design

1. はじめに

美術館や博物館などのイベント空間では混雑が起こり、人々の不快感や重大な事故の原因となる。この問題を解決することは快適空間(アメニティ)を設計する課題につながり、これに解法を与えることはイベント空間の魅力向上に貢献できる。混雑は空間内の人の流れに依存することから、そのメカニズムを考えるために人の流れを定量的に扱いマクロにモデル化する必要がある。人の群のモデル化手法はこれまで様々なものが提案されてきた。山本ら [1] はセルラオートマトンを用いたモデル化手法を提案した。しかし、このモデルは人や障害物がセルによるグリッドに近似されることや人の移動方向に制限があることなど、現実性に問題がある。また、勝山ら [2] はエージェントシステム概念を応用して、人の動きをモデル化した。しかし、経路の自律探索が必要な場合、計算に膨大な時間がかかることが予想される。一方、本間ら [3] は人の群の意思をベクトル場でモデル化し、定常的な人の流れの中に障害物を置くことによる混雑緩和手法を提案した。ここでは、個人の挙動は人と人の反発を加えた力学系で表されるものの、2次元ベクトル場で展示品の前で立ち止まる動作を表現することは難しい。

そこで本研究では、2次元ベクトル場に加え、歩き方の癖による人の個性と展示品の前で立ち止まり時間を表すために力学系の次元を拡張する。また、このモデルをもとに展示品の配置最適化手法を提案する。すなわち、Fig.1のように展示品位置を変えるこ

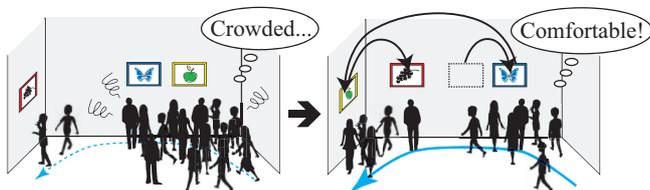


Fig.1 Congestion reduction by layout optimization of exhibits

とで混雑を減らし、快適空間を設計することを目的とする。特に、立ち止まり時間を表す次元は閲覧の満足度を表しており、これを大きくすることに加え、空間内の混雑は他人との距離が近いときに感じる人と人の反発に起因することに注目し、これを最小化する評価関数を設定し最適化を行う。まず、モデル化の手法を示し、シミュレーションによって有効性を検証する。さらに、提案する配置最適化手法の有効性を群ロボットを用いた実験で示す。実際のイベント空間を想定した模擬的な小型の空間を設定し、モデルの移動規則をもとに群ロボットを人に見立てて自律移動させ、その中に人間がラジコン操作するロボットを混ぜることで検証を行う。

2. イベント空間における人の群のモデル化

計測した経路をもとに群の挙動をベクトル場でモデル化する手法 [4] について述べる。展示品のない空間において計測した人の移動経路 Ξ

$$\Xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_n] \quad (1)$$

からこれに引き込まれるベクトル場 $f(x)$ ($x \in R^2$) を設計し、個体の移動を以下のように定義する。

$$x[k+1] = x[k] + f(x[k]) + \sum_{i \neq j} v^{ij} + \sum_w v_w + \delta[k] \quad (2)$$

v^{ij} は個体と個体の反発、 v_w は壁からの反発を表す。 $\delta[k]$ は計測された Ξ に基づいて設計した個性を表す移動(個性のダイナミクス)であり、現在の位置 x と δ の経歴によって

$$\delta[k] = c_{x0} + c_{x1}x[k] + c_{x2}x^2[k] + \cdots + c_{x\ell}x^\ell[k] + c_{d0} + c_{d1}d[k] + c_{d2}d^2[k] + \cdots + c_{d\ell}d^\ell[k] \quad (3)$$

$$d[k] = [\delta^T[k-1] \quad \cdots \quad \delta^T[k-m]]^T \in R^{2m} \quad (4)$$

と表される。この求め方は文献 [4] に詳しい。イベント空間では閲覧者は展示品を閲覧するために立ち止まり、これが混雑を引き起こす。そこで、2次元空間に加えて展示品 e の前で立ち止まり時間を表す t_e 軸と展示品への引きつけを表すベクトル $h(x, t_e)$ を導入し、式 (2) を以下のように変形する。

$$x[k+1] = x[k] + aF \quad (5)$$

$$F(x, t_e) = f(x) + \sum_{i \neq j} v^{ij} + \sum_w v_w + \delta[k] + h(x, t_e) \quad (6)$$

$$t_e[k+1] = t_e[k] + g_e(x, t_e) \quad (7)$$

ただし、 a は空間内の展示品数 m として

$$\| [aF^T \quad G^T]^T \| = \| F \| \quad (8)$$

$$G = [g_1(x, t_1) \quad \cdots \quad g_m(x, t_m)]^T \quad (9)$$

を満たす数で

$$a = \begin{cases} \sqrt{(\|F\|^2 - \|G\|^2)/\|F\|^2} & (\|F\| \geq \|G\|) \\ 0 & (\|F\| < \|G\|) \end{cases} \quad (10)$$

で定義する。また、関数 $g_e(x, t_e)$ は次のように定める。

$$g_e(x, t_e) = \gamma_g S_e / (1 + \exp\{-\alpha_g(\|r_e\| - \beta_g)\}) \quad (11)$$

$$S_e = 1 / (1 + \exp\{\alpha_e(t_e - \beta_e)\}) \quad (12)$$

$$r_e = x_e - x \quad (13)$$

ここで $\alpha_g, \beta_g, \gamma_g, \alpha_e, \beta_e$ は定数である。 x_e は展示品 e の位置であり、 $h(x, t_e)$ を次のように定義する。

$$h(x, t_e) = \sum_{e=1}^M \gamma_h S_e \exp(-\alpha_h \|r_e\|^2) r_e / \|r_e\| \quad (14)$$

α_h, γ_h は定数である。ただし、 $h(x, t_e)$ を加えることによって個体の移動量が大きくなりすぎることを防ぐため、以下のように制限を設ける。

$$F \rightarrow \begin{cases} F \|f(x)\| / \|F\| & (\|F\| \geq \|f(x)\|) \\ F & (\|F\| < \|f(x)\|) \end{cases} \quad (15)$$

これらで表されたモデルに基づいて、個体は展示品付近で Fig.2 のように移動する。 h により引きつけられた個体は、 g_e によって $a = 0$ となり t_e 軸に沿って移動する。 t_e が β_e に達すると再び

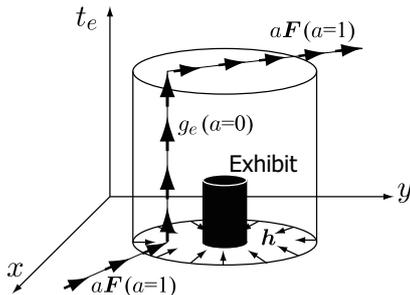


Fig.2 Individual behavior based on the proposed model

$a = 1$ となり場に従った動きに戻る。この動きを xy 平面に射影することで立ち止まりを表現する。 t_e は展示品付近で増加する値であることからこれが展示品への満足度を表す。モデルに基づいたシミュレーション結果を Fig.3 に示す。空間に2つの展示品を設置し、1つの個体が空間内でたどった軌跡を黒い丸で示したものであり、太い実線が壁、細い実線が設定した経路、四角形が展示品位置を示している。(a) は t_1 の動きを取り入れたもの、(b) はその個体の動きを x 平面に射影したものである。(b) において左上が入口で右下が出口である。この結果から、人が立ち止まって展示品を見るという動作がモデル化できたことが分かる。

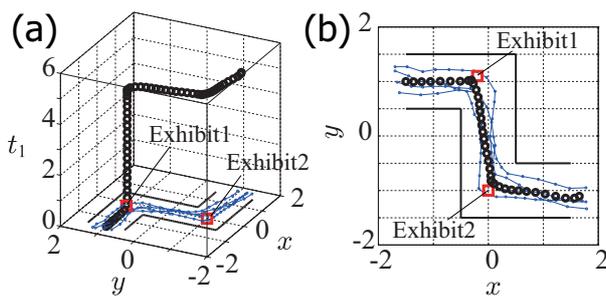


Fig.3 Trajectory of individual based on the proposed model

3. 展示品配置の最適化

空間内の人々が展示品に満足できない大きな要因は混雑であり、それは他人との距離が近いときに発生する反発 v^{ij} が存在するためである。そこで、 v^{ij} を最小化することで展示品配置を最適化することを考える。これにより、イベント空間内の個体の移動が一人で移動する状態に近づくことになる。まず、評価関数を設定する。個体 i の移動軌跡を座標 η^i で表すと、移動ベクトルは

$$V^i = \eta^i[k] - \eta^i[k-1] \quad (16)$$

と表せる。 V^i は個体の動きから計測されるものであり、展示品位置 x_e には依存しないものとする。一方、 v^{ij} を考慮しない理想的な個体の移動ベクトルは次のようになる。

$$\hat{V}^i = a^i \left\{ f(x^i[k]) + \sum_w v_w + h^i(x^i[k], t_e^i[k]) \right\} \quad (17)$$

この理想的な動きに個体の現実の動きを近づけるため、空間内の個体総数 N を用いて評価関数 J を

$$J = \sum_{i=1}^N |V^i - \hat{V}^i|^2 \quad (18)$$

と設定し、これを最小化する。次に、展示品位置の更新について述べる。 \hat{V}^i に含まれる h^i は式 (14)、(13) より x_e の関数であることから、 J の展示品位置 x_e での偏微分は次式で表される。

$$\frac{\partial J}{\partial x_e} = \sum_{i=1}^N \frac{2a^i H}{\|r_e^i\|} J^{iT} \left\{ \left(2\alpha_h + \frac{1}{\|r_e^i\|^2} \right) r_e^i r_e^{iT} - I \right\} \quad (19)$$

$$H = \gamma_h S_e \exp(-\alpha_h \|r_e^i\|^2) \quad (20)$$

また、 J の時間的な変化を

$$\frac{\partial J}{\partial t} = J[k] - J[k-1] \quad (21)$$

で定義する。これらを用いて展示品位置を勾配法を用いた次式によりオンラインで更新する。

$$x_e[k+1] = x_e[k] - \frac{\partial J}{\partial t} \left(\frac{\partial J}{\partial x_e} \right)^T \Delta x \quad (22)$$

ここで Δx は定数である。実際のイベント空間を想定した Fig.3 と同様の空間で、個体を入力から次々と入れながら最適化シミュ

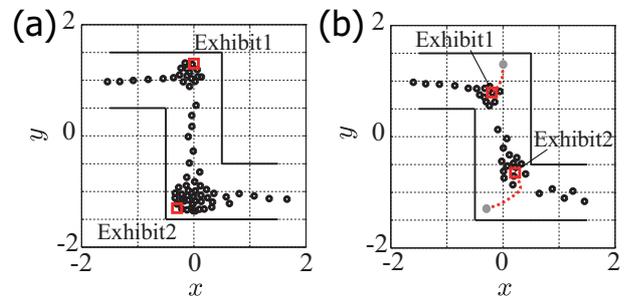


Fig.4 Simulation result of layout optimization of exhibits

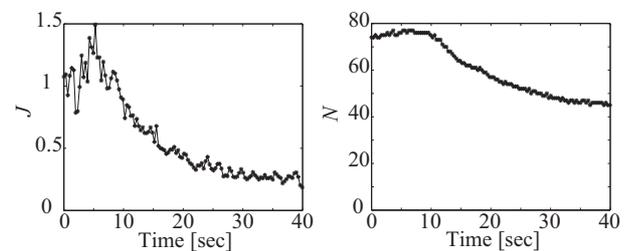


Fig.5 Value of evaluation function and number of individuals in exhibition space

レーションを行った結果を Fig.4 に示す。(a) が最適化前、(b) が最適化後の状態である。(b) では破線が展示品の移動軌跡、四角形が展示品の最終的な収束位置を示している。このときの評価関数 J と空間内の個体数 N の最適化中の時間変化を、最適化開始時を

初期時刻としてプロットしたものを Fig.5 に示す．時間とともに J の値は減少しており，式 (22) の更新則によって個体と個体の反発が小さくなったことが分かる．また，評価関数の減少と共に空間内の個体数が減少し，混雑緩和が実現されていることが分かる．さらに，Fig.4 の (a) と (b) の展示品位置において，式 (5) に基づいたシミュレーションを行った．このときの定常状態における出口から出た個体 100 個の空間滞在時間の分布と平均をそれぞれ Fig.6 に示す．(a) が最適化前，(b) が最適化後である．さらに，最適化前後の展示品前での立ち止まり時間の分布と平均をそれぞれ Fig.7 と Fig.8 に示す．これらの結果から，(1) Fig.5 より，展示場内の個体数が少なくなった，(2) Fig.6 より，各個体の展示場の滞在時間が短くなったにも関わらず，(3) Fig.7, 8 より展示品の閲覧時間は長くなったことが分かり，短い時間で満足に展示品を閲覧できると言える．

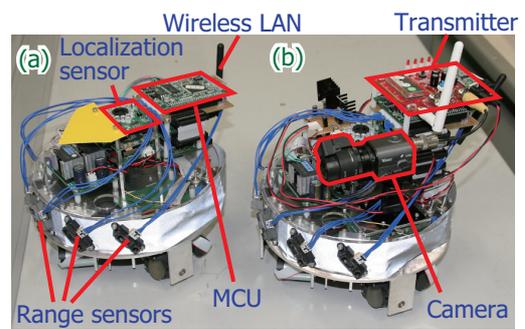


Fig.9 Autonomous mobile robot and radio control robot

搭載し，無線 LAN によってサーバと通信する．また，3 つのオムニホイールにより全方向移動が可能である．さらに，既存のロボットを改造して，今回新たに製作したラジコン操作するロボットを Fig.9-(b) に示す．既存のロボットに小型カメラを載せ，無線で映像情報を送り，操作者は受信機で受信した映像をモニターで見ながら，Pad を用いてロボットをラジコン操作する．

4.2 実験方法

まず，空間内に展示品を置かずロボット 1 台をラジコン操作によって入口から出口まで動かし，その間の位置情報を逐次取得する．操作者を数回変えてこれを繰り返す行い，空間内の経路とそれに基づいたベクトル場を設計する．次に，展示品を用意し 3 章のアルゴリズムに基づき，展示品配置の最適化を行う．最後に，空間内に展示品を置いた状態で設計したベクトル場をもとに自律移動するロボットとラジコン操作するロボットを混ぜ，空間設計手法の有効性を検証する．

自律移動するロボットは式 (5) の規則で移動させるが，立ち止まり時間や個性のダイナミクスに関しても同時に計算する必要があり，マイコンで計算するには計算コストが高い．そこで

- 設計したベクトル場に基づいた移動速度
- 個性のダイナミクス
- 立ち止まり時間
- 展示品への引きつけ
- 壁との衝突回避

の計算はサーバで行い，この情報を無線 LAN によって各ロボットに送信する．他のロボットとの衝突回避のみロボットに搭載した距離センサとマイコンを用いて計算を行う．壁との衝突回避は仮想の壁を点列データで用意して，それを避けるようにする．

4.3 実験結果

まず，ラジコン操作するロボット 1 台を用いて設計したベクトル場を Fig.10 に示す．青色の実線が経路，緑色の矢印がベクトル場を表す．次に，3 章のアルゴリズムに基づき展示品 2 つの配置を

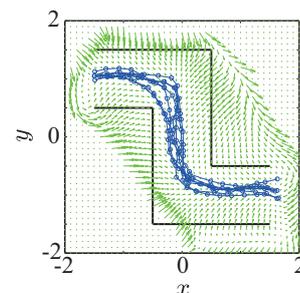


Fig.10 Designed vector field based on experimental data

最適化し，群ロボットを用いて最適化前後の比較を行い検証した様子を Fig.11 と添付の動画に示す．実験は自律移動するロボット

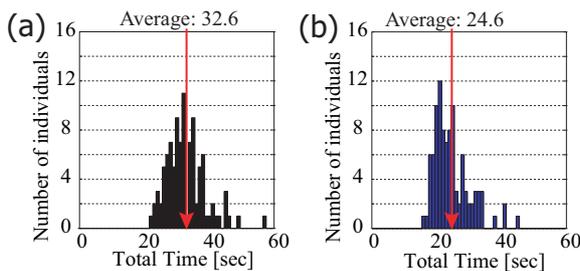


Fig.6 Distribution of total time (100 individuals)

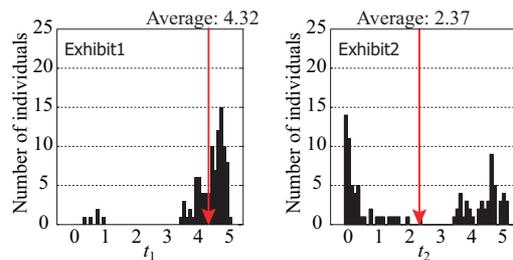


Fig.7 Distribution of viewing time BEFORE layout optimization of exhibits (100 individuals)

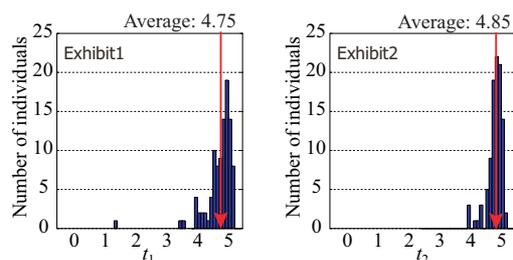


Fig.8 Distribution of viewing time AFTER layout optimization of exhibits (100 individuals)

4. 群ロボットによる実験検証

4.1 実験概要と群ロボットの仕様

本研究の空間設計手法の有効性を示すために，群ロボット [3] を用いて検証を行う．群ロボットを式 (5) の規則のもとに自律移動させ，その空間内に人間がラジコン操作するロボットを人に見立てて混ぜることで検証を行う．これにより実際の人の個性が強く反映され，現実のイベント空間における人の流れに近い状態が再現できる．Fig.9-(a) に使用した群ロボットを示す．ロボットはバッテリー駆動であり，マイコン，位置・姿勢計測装置，距離センサを

11 台とラジコン操作するロボット 1 台の計 12 台を用いた．四角形が展示品位置を示しており，(a) が最適化前，(b) が最適化後の位置に置いた場合である．この実験におけるロボット操作者とし

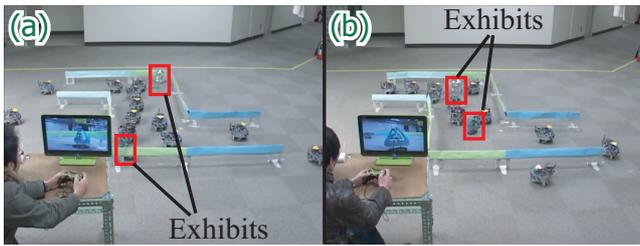


Fig.11 Overhead view of experiment using swarm robots

て 7 人のデータを取得し，そのうち位置情報として有用なものを選び，自律移動したロボットの軌跡と重ね合わせたものを Fig.12 に示す．緑色の実線が自律移動したロボットの軌跡，青色の実線がラジコン操作したロボットの軌跡である．この結果から，提案する移動規則に従ったロボットの動きと人に操作されたロボットの動きがほぼ一致しており，モデル化の妥当性が示される．また，

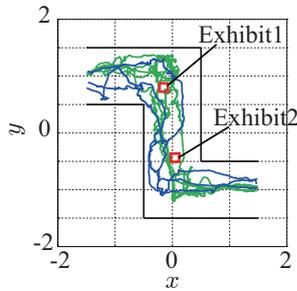


Fig.12 Trajectories of swarm robots

シミュレーションと同様に，自律移動したロボットの空間滞在時間の分布と平均，ラジコン操作したロボットの空間滞在時間の平均を Fig.13 に示す．(a) が最適化前，(b) が最適化後の分布である．赤い矢印は自律移動したロボットの平均値を示しており，青い矢印はラジコン操作したロボットの平均値である．この結果から，最適化後は滞在時間の平均値が下がり，短い時間で閲覧が行われたことが分かる．さらに，自律移動したロボットの立ち止まり時間の分布と平均はそれぞれ Fig.14 と Fig.15 のようになった．この結果から展示品の配置最適化により，閲覧時間が延び，シミュレーション結果と同様，短い時間で空間を移動したにも関わらず，閲覧時間は長くなっていることが分かる．この結果から，混雑の少ない快適空間が設計されており，本手法の有効性が示される．

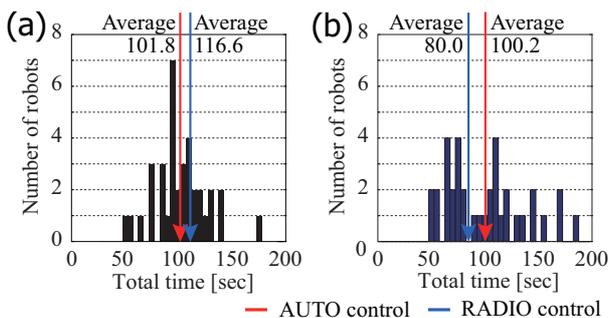


Fig.13 Distribution of total time in experiment

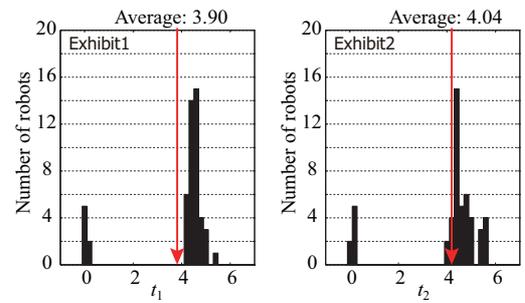


Fig.14 Distribution of viewing time in experiment BEFORE layout optimization of exhibits

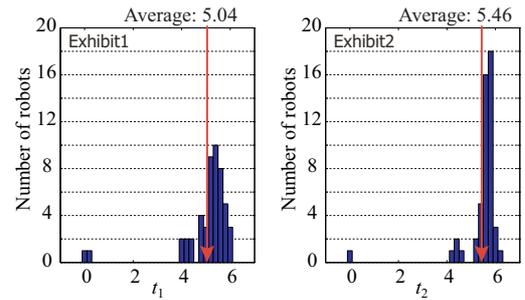


Fig.15 Distribution of viewing time in experiment AFTER layout optimization of exhibits

5. おわりに

本研究ではベクトル場と力学系の次元拡張によってイベント空間における人の群のモデル化を行い，展示品配置の最適化により快適なイベント空間を設計した．本研究の成果を以下に記す．

- イベント空間における人の群の流れをベクトル場でマクロにモデル化し，人が立ち止まって展示品を閲覧する動作を立ち止まり時間と展示品への引きつけの導入によって次元拡張することでモデル化した．
- 人と人の反発が最小になるよう展示品配置をオンラインで最適化し，快適なイベント空間を設計した．
- 設計されたイベント空間について，群ロボットを用いて実験検証を行い，短い時間で満身に展示品が閲覧できる快適空間が設計されたことを示した．

混雑は人が集中する駅の改札口やスタジアムの出入口などでも発生する．このような空間における人の群の流れも，本研究のモデルを用いて定量的に扱うことができる．さらに，それをもとに改札口やスタジアム出入口の設計にも応用できると考えられる．

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] 山本，森下，中野．セルラオートマトンによる人の流れシミュレーション．日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集，Vol.B，No.98-8，pp.261-264，1998．
- [2] 勝山，瀧澤，河村，谷．エージェントモデルと GA を用いた美術館における絵画の最適配置システム．日本建築学会近畿支部研究報告集，計画系 (41)，pp.273-276，2001．
- [3] 本間，岡田．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．第 27 回日本ロボット学会学術講演会，1F2-02(CD-ROM)，2009．
- [4] 茂木，岡田．イベント空間における閲覧者の閲覧時間と個性のモデル化のための力学系次元拡張，第 28 回日本ロボット学会学術講演会，3C3-06(CD-ROM)，2010．