

人の動線計測による展示品の閲覧者モデル同定と快適空間設計

茂木祐一 山本江 岡田昌史 (東京工業大学)

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る。このために我々は不快に感じたり、ときにはそれが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を設計する課題につながり、これに解法を与えることでイベント空間の魅力が向上する。

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]、Wang ら [2] はセルラオートマトンを用いたモデル化手法を提案している。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再現性に問題がある。織田ら [3] 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ている。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。そこで、著者らはこれまで本間ら [4] の提案した2次元ベクトル場によるモデルに新たに力学系の次元拡張を導入することで、人の個性と立ち止まりが表現可能な展示品の閲覧者モデルを開発した [5]。このモデルにおけるパラメータは実際のイベント空間内の人の動きをもとに同定されるべきであるが、これまでは著者らが選定したパラメータによってモデルの検証を行ってきた。

また、著者らはこのモデルをもとに図1のように混雑が少なくなるよう空間内の展示品配置を最適化することで人の流れを制御し、快適空間を設計する手法を提案した [6]。空間内の混雑は他人との距離が近いとき

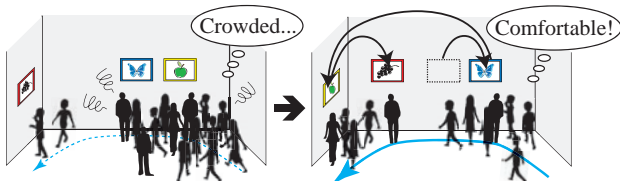


図1 展示品配置の最適化による混雑の緩和

に感じる人と人の反発に起因することから、これを最小化するように展示品配置を最適化する手法を提案した。勝山ら [7] が遺伝的アルゴリズムによって絵画の配置を最適化することで快適な空間を設計する手法を提案しているが、遺伝的アルゴリズムは計算量は膨大となることから著者らは提案したモデルに基づき勾配法を用いてオンラインで展示品位置を最適化した。文献 [6] では空間のどこにでも配置可能な展示品を想定して提案手法の検証を行ったが、絵画などその位置に拘束条件が与えられる展示品も存在する。

そこで、本研究では以下の2つを目的とする。

1. 閲覧者モデルのパラメータを人の動線計測によ

て同定し、モデルの妥当性を検証する。イベント空間を想定した部屋における人の動線を赤外線カメラを用いて計測し、展示品閲覧者モデルにおける関数のパラメータを関数の用途に応じて最小二乗法で順番に同定する。

2. 提案した最適化手法が展示品の位置に拘束があるものについても適用可能であることを示す。閲覧者モデルは上記の動線計測から同定したパラメータをもとに壁に設置する展示品配置の最適化を行う。

2. 閲覧者モデルのパラメータ同定

2-1 イベント空間における閲覧者モデル

計測した経路をもとに人の挙動をベクトル場と力学系の次元拡張によってモデル化し、空間内の人の移動と立ち止まり時間 t_e を次のように定義する [5]。

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{x}[k] + a\mathbf{F} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, t_e) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{i \neq j} v^{ij} + \sum_w v_w + \delta + \mathbf{h} \quad (2)$$

$$t_e[k+1] = t_e[k] + g_e \quad (3)$$

v^{ij} は個体と個体の反発、 v_w は壁からの反発を表す。 δ は人の動線計測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)である。 a は展示品数 m として

$$\left\| \begin{bmatrix} a\mathbf{F}^T & \mathbf{G}^T \end{bmatrix} \right\|^T = \|\mathbf{F}\| \quad (4)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(\mathbf{x}, t_1) & \cdots & g_m(\mathbf{x}, t_m) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

を満たす数で

$$a = \begin{cases} \sqrt{(\|\mathbf{F}\|^2 - \|\mathbf{G}\|^2) / \|\mathbf{F}\|^2} & (\|\mathbf{F}\| \geq \|\mathbf{G}\|) \\ 0 & (\|\mathbf{F}\| < \|\mathbf{G}\|) \end{cases} \quad (6)$$

で定義する。また、関数 g_e と h は次のように定める。

$$g_e(\mathbf{x}, t_e) = \gamma_g S_e / (1 + \exp\{-\alpha_g (\|\mathbf{r}_e\| - \beta_g)\}) \quad (7)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, t_e) = \sum_{e=1}^M \gamma_h S_e \exp(-\alpha_h \|\mathbf{r}_e\|^2) \mathbf{r}_e / \|\mathbf{r}_e\| \quad (8)$$

$$S_e = 1 / (1 + \exp\{\alpha_e (t_e - \beta_e)\}) \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_e = \mathbf{x}_e - \mathbf{x} \quad (10)$$

ここで \mathbf{x}_e は展示品 e の位置、 $\alpha_g, \beta_g, \gamma_g, \alpha_h, \gamma_h, \alpha_e, \beta_e$ は定数である。これらのパラメータは実際の空間内の人の動線を計測することで同定される。ただし、 $h(\mathbf{x}, t_e)$ 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。

$$\mathbf{F} \rightarrow \begin{cases} \mathbf{F} \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\| / \|\mathbf{F}\| & (\|\mathbf{F}\| \geq \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|) \\ \mathbf{F} & (\|\mathbf{F}\| < \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|) \end{cases} \quad (11)$$

2.2 パラメータ同定のための人の動線計測

式(7), (8), (9)におけるパラメータを同定するために人の動線計測を行う。図2に計測環境を示す。パーティションを空間に立てることによって幅1.5m, 長さ3.7mの通路をつくり, そこを通る人の動線を計測する。通路は左側が入口, 右側が出口である。計測は以下の

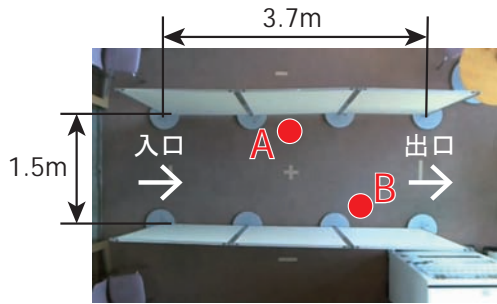


図2 人の動線計測環境

3つのパターンを行う。

- 通路に展示品を置かない場合 (計測1)
- Aの位置に展示品を置いた場合 (計測2)
- Bの位置に展示品を置いた場合 (計測3)

まず, 計測1の結果をもとに空間内にベクトル場を設計する。その後, 計測2の結果からパラメータを同定し, モデルの検証を計測3の結果を用いて行う。また, 人同士の反発を考慮しないようにするため空間には人を1人ずつ入れる。計測には空間の天井に取り付けた赤外線カメラを用いる。赤外線カメラで空間内にいる人を映したときの様子を図3に示す。人の体温は周りの物体の温度より高いため, 赤外線カメラを用いることで人をはっきりと映し出すことができる。

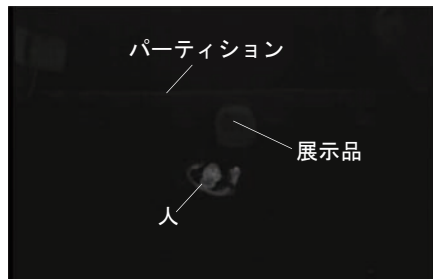


図3 人を赤外線カメラで映したときの様子

2.3 閲覧者モデルのパラメータ同定

2.3.1 展示品への引きつけに関するパラメータの同定

モデルを構成する関数は複雑であることからパラメータをすべて同時に同定することは困難である。図4は展示品近くで個体の動きを表している。モデルを構成する関数はその用途に応じて個体の動きに働きかけるタイミングが異なる。個体が展示品から半径 β_g の中に入るまでは展示品への引きつけ $h(x, t_e)$ がその動きを支配する。展示品から半径 β_g の中に入り, 立ち止まり始めるときは立ち止まり時間の増加量 $g_e(x, t_e)$ が支配する。立ち止まり時間が β_e に達して動き始めるときは関数 S_e が支配し, 最終的にはベクトル場 $f(x)$ に従う

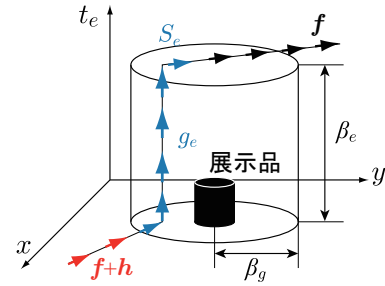


図4 展示品近くで個体の動き

動きになる。そこで, これらを関数の用途に応じて順番にパラメータを最小二乗法により同定する。

まず, 式(8)で定義された展示品への引きつけを表す $h(x, t_e)$ のパラメータ α_h と γ_h を同定する。計測データを座標群 Ξ とそこから得られる進行ベクトル F_i を次のように定義する。

$$\Xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_m] \quad (12)$$

$$F_i = \xi_{i+1} - \xi_i \quad (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (13)$$

展示品から十分離れた場所では立ち止まり時間は増加しないので式(6)より $a = 1$ であることから, 壁との反発と個体同士の反発を考慮しない場合, 式(1)は式(11)を考慮すれば

$$x[k+1] = x[k] + F \|f(x)\| / \|F\| \quad (14)$$

$$F = f(x) + h(x, t_e) \quad (15)$$

となる。そこで評価関数 J_h を

$$J_h = \sum_i \|F_i - \{f(\xi_i) + h(\xi_i, 0)\}\|^2 \quad (16)$$

と設定し, これを最小化するパラメータ α_h, γ_h を求める。パラメータの同定には勾配法を用い, 以下の式で更新する。

$$\alpha_h^{k+1} = \alpha_h^k - \frac{\partial J_h}{\partial \alpha_h} \Delta_h \quad (17)$$

$$\gamma_h^{k+1} = \gamma_h^k - \frac{\partial J_h}{\partial \gamma_h} \Delta_h \quad (18)$$

ただし, Δ_h は定数である。

2.3.2 立ち止まり時間に関するパラメータの同定

立ち止まり時間は展示品近くで増加する量であるため, 関数 $g_e(x, t_e)$ と S_e のパラメータは展示品近くの計測データから求める。まず, 式(7)で定義された関数 $g_e(x, t_e)$ のパラメータ $\alpha_g, \beta_g, \gamma_g$ を求める。 β_g は図4のように人が展示品からどれくらい離れて立ち止まるかを決定するパラメータであることから, 実際に人が立ち止まった位置から展示品までの平均距離を算出し β_g の値とする。 α_g, γ_g の同定は式(16)と同様に評価関数 J_g を

$$J_g = \sum_i \left| \|F_i\|^2 - a^2 \|F\|^2 \right|^2 \quad (19)$$

$$a = \sqrt{(\|F\|^2 - |g_e|^2) / \|F\|^2} \quad (20)$$

$$F = f(\xi_i) + h(\xi_i, 0) \quad (21)$$

と設定し、これを最小化する α_g, γ_g を求める。ただし、計測データから求められる F_i は人が展示品の前で立ち止まり始める部分のみを用いる。パラメータの同定には勾配法を用い、式 (17)、式 (18) と同様に更新する。

次に、式 (9) で定義された関数 S_e のパラメータ α_e, β_e を求める。 β_e は展示品の前で立ち止まってから動き始めるまでの時間を決定するパラメータであることから、動線計測から求められる実際に展示品の前で人が立ち止まっていた時間 \bar{T} とサンプリングタイム T_s を使って

$$\beta_e = (\bar{T}\gamma_g)/T_s \quad (22)$$

α_e の同定は式 (16) と同様に評価関数 J_s を

$$J_s = \sum_i \left| \|F_i\|^2 - a^2 \|F\|^2 \right|^2 \quad (23)$$

$$a = \sqrt{(\|F\|^2 - |S\gamma_g|^2)/\|F\|^2} \quad (24)$$

$$F = f(\xi_i) + h(\xi_i, 0) \quad (25)$$

と設定し、これを最小化する α_e を求める。ただし、計測データから求められる F_i は人が展示品の前で立ち止まったあとの部分のみを用いる。パラメータの同定には勾配法を用い、式 (17) と同様に更新する。

2.4 動線計測結果と同定したパラメータの検証

計測 1 の結果と前節で求めたパラメータを用いて個体を式 (1) の規則に従って動かしたときの移動軌跡の比較を図 5 に示す。さらに、計測 2 の結果と図 5 と同様のパラメータを用いて個体を式 (1) の規則に従って動かしたときの移動軌跡の比較を図 6 に示す。赤い四

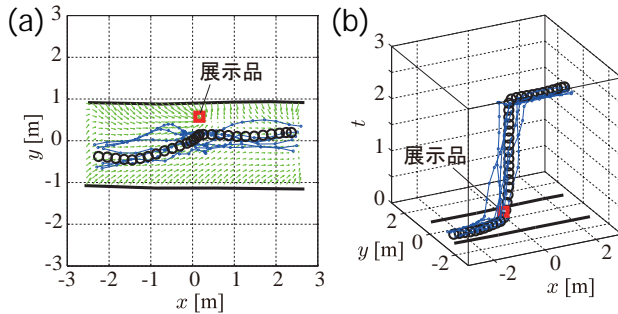


図 5 動線計測結果と個体によるシミュレーション結果の比較その 1

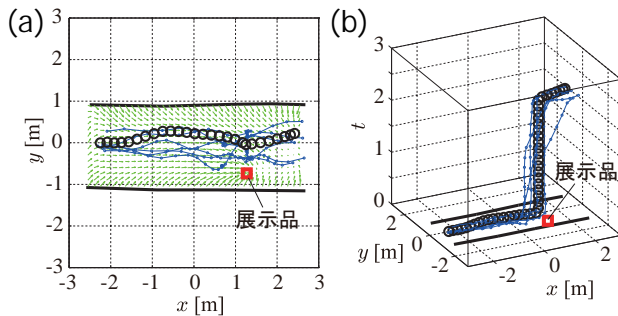


図 6 動線計測結果と個体によるシミュレーション結果の比較その 2

角形が展示品位置、青い実線が動線計測結果、黒い丸が個体の移動軌跡を表す。(a) の緑の矢印は計測 3 の結果から求めたベクトル場 $f(x)$ に展示品への引きつけ h を加えたものを表す。(b) は立ち止まり時間を同時にプロットしたものであり、計測データの立ち止まり時間は 0 から β_e に正規化してある。図 5, 6 どちらも計測結果と個体の移動軌跡はほぼ一致しており、図 5 から同定したパラメータの値が妥当であること、図 6 から提案した閲覧者モデルが妥当であることが分かる。

3. 展示品配置の最適化による快適空間設計

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、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ける。 v^{ij} を考慮しない理想的な個体の移動ベクトル \hat{V}^i と実際の個体 i の移動ベクトル V^i を用いて評価関数 J を

$$J = \sum_{i=1}^N |V^i - \hat{V}^i|^2 \quad (26)$$

と設定し、これを最小化する。展示品位置は勾配法を用いた次式によりオンラインで更新する。

$$x_e[k+1] = x_e[k] - \frac{\partial J}{\partial t} \left(\frac{\partial J}{\partial x_e} \right)^T \Delta x \quad (27)$$

ここで Δx は定数である。この最適化手法については文献 [6] に詳しい。

本研究では前章で同定したパラメータをもとに図 7(a) のような空間の壁に展示品を設置する場合を考える。左上が入口、右下が出口であり、緑の矢印は青い線で示した経路をもとに設計したベクトル場である。展示品

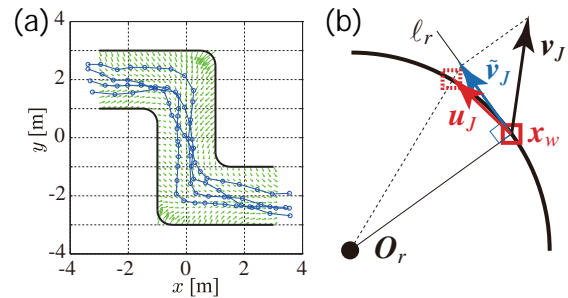


図 7 壁に展示品を設置する空間と部屋の角における展示品移動ベクトルの射影

位置の更新は式 (27) の

$$v_J = - \frac{\partial J}{\partial t} \left(\frac{\partial J}{\partial x_e} \right)^T \Delta x \quad (28)$$

を壁に射影することで壁に拘束した移動を実現する。また、部屋の角の部分は円弧状に設定し、図 7(b) のように一度接線 ℓ_r に射影したベクトル \tilde{v}_J を考え、その終点と円の中心 O_r とを結んだ直線と円との交点に向かうベクトル u_J を使って展示品を動かす。展示品を壁に 4 つ設置し、個体を入口から空間内に次々と入れな

から最適化シミュレーションを行った結果を図 8 に示す。(a) が最適化前, (b) が最適化後の状態である。(b) では桃色の線が展示品の移動軌跡, 赤い四角形が展示品の最終的な収束位置を示している。また, 図 8 の (a)

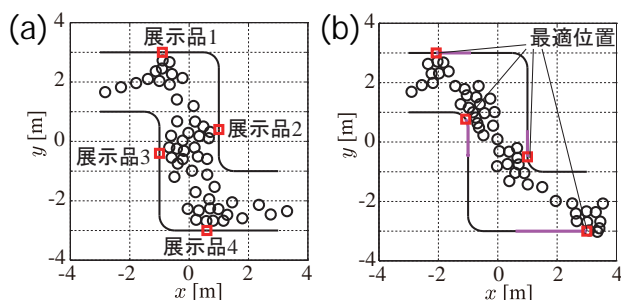


図 8 展示品配置の最適化シミュレーション結果

と (b) の展示品位置において, 式 (1) 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 個の立ち止まり時間を除いた空間滞在時間の分布と平均を図 9 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図 10, 11 に示す。これらの結果から, 各個体の展示場の滞在時間が短くなったにも関わらず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ような快適空間が設計できたとと言える。また, 最適化手法は壁に設置する展示品にも適用可能であることが分かる。

4. おわりに

本研究では, 人の動線計測をもとに展示品閲覧者モデルのパラメータ同定と快適空間の設計を行った。結果を以下に示す。

- 人の動線を赤外線カメラを用いて計測した。
- 計測した人の動線から閲覧者モデルのパラメータを同定した。
- 同定したパラメータをもとにシミュレーションを行い, 計測した動線と比較することでパラメータとモデルの妥当性を検証した。
- 同定したパラメータをもとに壁に設置する展示品配置最適化を行い, 展示品の位置に拘束がある場合でも適用可能であることを示した。

閲覧者モデルのベクトル場は経路近傍でのみ設計されることから, モデル化できる空間は経路がある程度限定される空間に限られる。よって, 最適化手法も経路が一つに定まらない広い部屋などには対応できないことから, 今後はこのような空間にも対応できるモデルを考案することが課題となる。

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。

参考文献

- [1] 山本英臣, 森下信, 中野孝昭. 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

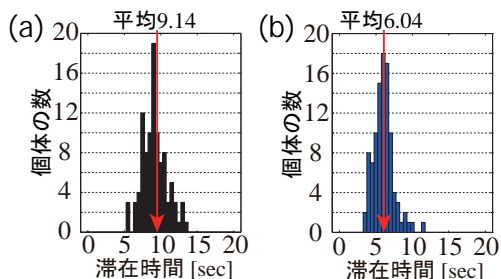


図 9 立ち止まり時間を除いた滞在時間の分布と平均 (最適化前後の比較)

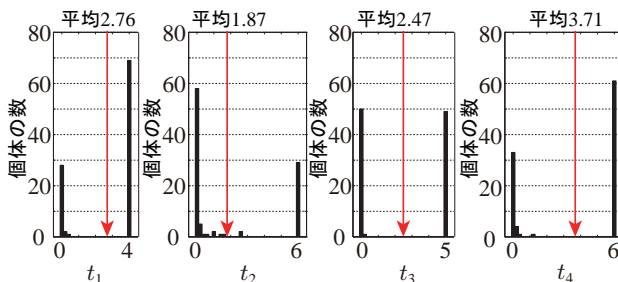


図 10 立ち止まり時間の分布と平均 (最適化前)

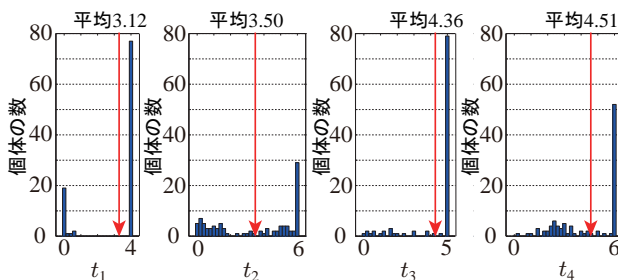


図 11 立ち止まり時間の分布と平均 (最適化後)

制御部門講演会論文集, Vol. B, No. 98-8, pp. 261-264, 1998.

- [2] Peng Wang, Peter B. Luh, Shi-Chung Chang, and Jin Sun. Modeling and optimization of crowd guidance for building emergency evacuation. In *Proceedings of 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 328-334, 2008.
- [3] 織田端夫, 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲. エージェントモデルによる連続的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.
- [4] 本間良幸, 岡田昌史. 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.
- [5] 茂木祐一, 岡田昌史. 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.
- [6] 茂木祐一, 岡田昌史. イベント空間における人の群のモデル化と空間設計. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2011 講演論文集, 1A1-K06(CD-ROM), 2011.
- [7] 勝山道雄, 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲. 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.