

仮想空間場の写像を利用したイベント空間における動線のモデル化と混雑評価

Human Flow Modeling in Exhibition Space Utilizing Mapping on Virtual Vector Field and Congestion Assessment

学 茂木 祐一 (東工大) 正 岡田 昌史 (東工大)

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

The congestion in an exhibition space depends on the flow of visitors. Because the flow of visitors depends on the space layout, it is possible to reduce the congestion by changing the positions of exhibits and partitions. Therefore, to reduce the congestion, a macro model of the visitors' flow is required. In this paper, we propose the model of human flow in an exhibition space. The flow of visitors is modeled by vector field. The vector field in the virtual space is mapped to the real space to match the positions of exhibits and partitions. In addition, the congestion in the space is assessed by using the proposed model. Comparing the satisfaction levels with exhibits in two types of space layouts, we discuss amenity space design.

Key Words: human flow, human macro modeling, 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る。このために訪問者は不快に感じたり、ときにはそれが重大な事故の要因となる。混雑は人の流れ(動線)に依存しており、さらに動線は展示品やパーティションなどの空間内のものの配置に依存する。このことから、展示品やパーティションの位置を Fig.1 のように変化させることで空間内の混雑緩和が可能であると考えられる。

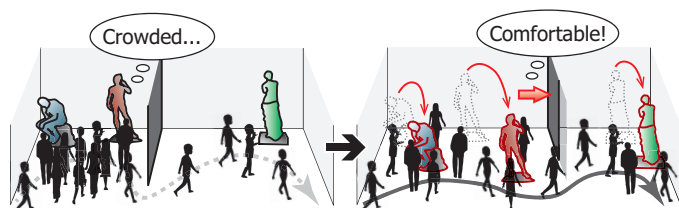


Fig.1 Congestion reduction by changing a space layout

この混雑緩和手法を考える上で、まず人の流れを定量的にモデル化する必要がある。これまで著者らは文献 [1] において、展示品が存在しない空間で人の移動経路を計測し、それを基に設計したベクトル場を用いてクラク状の空間内の動線をモデル化した。さらに、展示品への引き込みと立ち止まり時間を導入することで展示品の閲覧動作をモデル化した。しかし、このモデルで対象とした空間は、展示品の位置によって動線が変化しない空間であった。近年のイベント空間には Fig.2 のように、各展示室に廊下から入って展示品を閲覧するようなものが多い。このような空間では、大

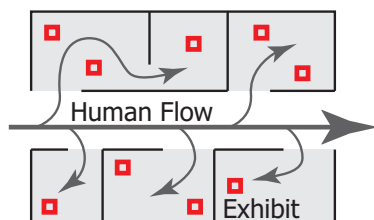


Fig.2 Exhibition space in which human flow depends on a space layout

まかな動線のみが考慮され、展示品やパーティションで構成される各展示室の動線はそこから枝分かれする形態をとる。このとき、各展示室の動線の詳細は閲覧者主体で決定されるため、イベント空間の魅力は大きく向上する。展示品やパーティションの配置は

展示テーマの魅せ方に基づいて学芸員の嗜好により決定されるが、これが大きな混雑を引き起こす場合も少なくない。そこで本研究では、展示品やパーティションの配置から決定される動線をモデル化する。

人の流れのモデル化手法は著者らの研究以外にも様々なものがある。山本ら [2]、柳澤ら [3]、Weng ら [4] 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。セルラオートマトンは人や障害物をセルによるグリッドに近似し、人の移動を確率によって表すモデルである。また、Helbing ら [5]、Pelechano ら [6]、Braun ら [7] は非常時に避ける人の動きを微分方程式でモデル化した。このモデルにおいて、人は希望の速度に近づくように加速度をもって移動する。また、織田ら [8] は空間内に点在する目標地点を逐次切り替えながら移動するエージェントで、人の動きをモデル化した。これらのモデルはどのような広さの空間でも適用可能なモデルであるが、イベント空間内の人の動きにおいて重要な要素である展示品の閲覧動作は、これらのモデルでは表現しにくい。

そこで、前述の文献 [1] で提案した展示品の閲覧動作をモデル化手法をそのまま活用し、ベクトル場の設計手法を広い空間に対応するために拡張する。拡張するに当たって、仮想空間に設計したベクトル場(仮想空間場)の写像を利用する。仮想空間場を現実のものとの位置関係に合うように写像することで閲覧者の動線をモデル化する。また、このモデルに基づいて空間内の混雑を評価する。

2. 従来の動線モデル化手法

本章では、人の移動経路から空間内の動線をモデル化する従来手法 [1] について述べる。空間内に展示品が存在しない状態で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。

$$x[k+1] = x[k] + f(x[k]) + \sum_j v_j + \sum_w v_w \quad (2)$$

v_j は他人との反発、 v_w は壁からの反発を表す。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る。そこで、この動作をモデル化するため、Fig.3 のように 2 次元空間に加えて展示品 e への満足度を表す s_e 軸と展示品への引き込みを表すベクトル h を導入する。式 (2) に基づいて動く個体は、展示品から遠い場所では A のように展示品へと引きつけられ、展示品に近づくにつれて B のように s_e 軸に沿って動き、 s_e がある値まで達すると C のように

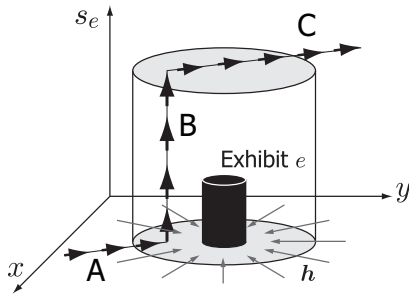


Fig.3 Individual behavior with stopping to view an exhibit

ベクトル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． s_e は展示品付近で増加する値であることから，これが展示品をどれだけじっくり閲覧したかを表しており，展示品への満足度と言える．この動きを実現するために式 (2) を以下のように変形する．

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{x}[k] + a\mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_j \mathbf{v}_j + \sum_w \mathbf{v}_w + \mathbf{h}(\mathbf{x}, s_e) \quad (4)$$

$$s_e[k+1] = s_e[k] + g_e(\mathbf{x}, s_e) \quad (5)$$

ただし， a は空間内の展示品数を E として

$$\left\| \begin{bmatrix} a\mathbf{F}^T & \mathbf{G}^T \end{bmatrix} \right\|^T = \|\mathbf{F}\| \quad (6)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(\mathbf{x}, s_1) & \cdots & g_E(\mathbf{x}, s_E) \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

を満たす数とし，

$$a = \begin{cases} \sqrt{(\|\mathbf{F}\|^2 - \|\mathbf{G}\|^2) / \|\mathbf{F}\|^2} & (\|\mathbf{F}\| \geq \|\mathbf{G}\|) \\ 0 & (\|\mathbf{F}\| < \|\mathbf{G}\|) \end{cases} \quad (8)$$

で定義する．また， g_e と h は次のように定める．

$$g_e(\mathbf{x}, s_e) = \gamma_g S_e / (1 + \exp\{-\alpha_g (\|\mathbf{r}_e\| - \beta_g)\}) \quad (9)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, s_e) = \sum_{e=1}^m \gamma_h S_e \exp(-\alpha_h \|\mathbf{r}_e\|^2) \mathbf{r}_e / \|\mathbf{r}_e\| \quad (10)$$

$$S_e = 1 / (1 + \exp\{\alpha_e (s_e - \beta_e)\}) \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x} \quad (12)$$

ここで \mathbf{x}_e は展示品 e の位置， $\alpha_g, \beta_g, \gamma_g, \alpha_h, \gamma_h, \alpha_e$ は定数である．ただし， h を加えることによって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．

$$\mathbf{F} \rightarrow \begin{cases} \mathbf{F} \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\| / \|\mathbf{F}\| & (\|\mathbf{F}\| \geq \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|) \\ \mathbf{F} & (\|\mathbf{F}\| < \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|) \end{cases} \quad (13)$$

これで表されたモデルは Fig.3 の動きを実現する．個体は式 (10) の h により A のように引きつけられると式 (12) の $\|\mathbf{r}_e\|$ が小さくなり，式 (9) の g_e が大きくなる．その結果，式 (7) の定義から式 (8) により $a = 0$ となり，式 (3)，(5) から個体は B のように xy 方向には移動せずに s_e 軸に沿って移動する． s_e が 1 に達すると式 (11) から S_e が 0 となり，式 (9) より g_e は小さくなる．これにより $a = 1$ となり，個体は C のようにベクトル場に従った動きに戻る．このモデルに基づいたシミュレーション結果を Fig.4 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ている．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 s_1 を含む個体の動きであり，展示品に近づいた個体は s_1 軸に沿って移動している．その後， s_1 が 1 に達すると s_1 が 0 となり，個体はベクトル場に従った動きに戻る．(b) はその個体の動きを xy 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．

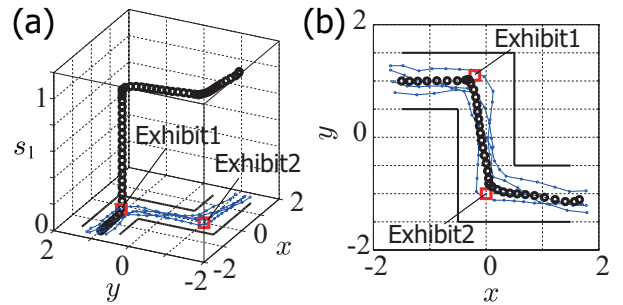


Fig.4 Trajectory of an individual behavior based on the conventional model

3. 仮想空間場の写像を利用した動線のモデル化手法

前章のモデルでは，展示品が存在しない状態で計測した人の移動経路をもとに，2次元ベクトル場を設計した．しかし，イベント空間にはものの配置によって動線が定まるような空間も存在する．例えば，Fig.5-(a) のような入口と出口が同じ場所にあるような広い空間を考える．入口から入って展示品 1, 2, 3 を順番に閲覧し

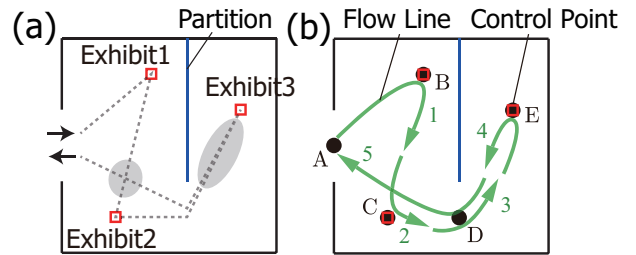


Fig.5 Large exhibition space and divided flow lines based on the control points

て出口へ向かう順路が設定されているとすると，展示品やパーティションの位置によって人の動線が決定する．このような空間では，展示品が存在しない状態での動線計測をモデルに利用することができないため，従来のモデルを拡張する必要がある．拡張するに当たって

1. 展示品閲覧をあきらめる動作をモデル化するために，ベクトル場は展示品周りで連続でなければならない
2. Fig.5-(a) の網掛け部のような動線の交差や U ターンを表現できなければならない
3. 展示品やパーティションの配置変化に対して，モデルの再設計が容易でなければならない

ことが要求される．従来法における式 (4) の $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ は 2次元ベクトル場であることから，上述の要求 2 を満たさない．さらに， $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ は空間の形状に合わせて先に与えられるベクトル場であり，これを再設計することは容易ではないため，要求 3 を満たさない．そこで本章では，これらの要求事項を満たすモデルの拡張方法について述べる．

まず，Fig.5-(b) のように順路を分割し，それぞれに異なるベクトル場を設計する．これにより，要求 2 の動線の交差が表現可能となる．出入口，展示品，パーティションの位置関係を表す点 (制御点) を A から E のように設定し，分割順路を 3 つの制御点の位置から 1 つに決定する．例えば分割順路 1 は制御点 A, B, C を基準にして 1 つに決定する．要求 1 を満たすようベクトル場を展示品周りで連続にするため，分割順路どうしの結合部分は出入口を除き制御点と制御点の間に設ける．

次に，要求 2 の動線の U ターンへの対応を考える．U ターンは 2次元ベクトル場ではモデル化できないため，空間を 3次元に拡張

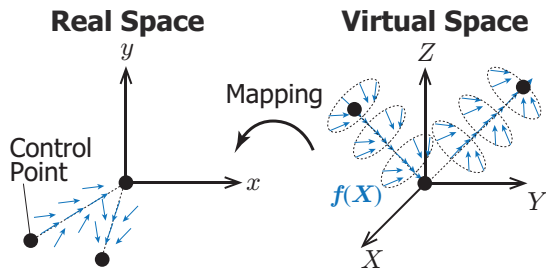


Fig.6 Mapping on virtual vector field to the real space

する．しかし，動線最適化の際，配置を変化させるごとに3次元ベクトル場を設計し直すすと計算が煩雑になる．そこで，Fig.6のように仮想空間に設計された3次元ベクトル場（仮想空間場） $f(X)$ を現実のものの位置関係に合うように現実空間へと写像することで人の動線をモデル化する．仮想空間場は3つの制御点の間のみ設計し，分割順序それぞれには異なる写像を適用する．動線最適化の際，展示品位置が変更された場合には写像を変更する．仮想空間場自体は変化させないことから，モデルの再設計が容易となり，要求3を満たす．

仮想空間場の各分割順序への写像は次のように定める．仮想空間の座標 $X \in R^3$ から現実空間の座標 $x \in R^2$ の関係を以下のように定義する．

$$x = TI_kRX \quad (14)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} R(\theta, \phi, \psi)X \quad (15)$$

R は θ, ϕ, ψ の3自由度の回転行列， I_k はベクトルを k 倍に拡大縮小する行列， T は3次元から2次元への射影行列である．これらの行列は Fig.7 のような仮想空間と現実空間に設定したベクトルから求める．仮想空間上で1つの制御点から順序上で隣接する

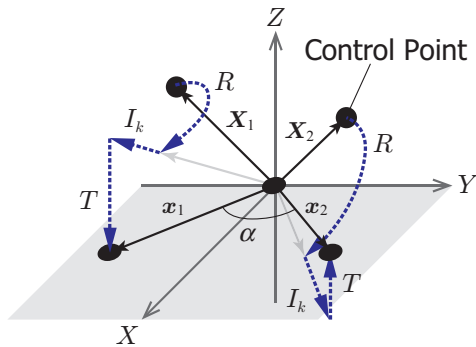


Fig.7 Vectors defined between control points to obtain the mapping

2つの制御点を結んだベクトルを X_1, X_2 ，同様に現実空間上でのベクトルを x_1, x_2 とする．それぞれを式 (14) の関係で結びつけて

$$x_1 = TI_kRX_1 \quad (16)$$

$$x_2 = TI_kRX_2 \quad (17)$$

とする．写像は θ, ϕ, ψ, k の4自由度を持つことから4元連立方程式となり， X_1, X_2, x_1, x_2 を定めることで写像を決めることができる．この連立方程式は回転行列 R を含むことから非線形であるが，要求3を満たすために収束計算を使わずに解を求めることを考える．Fig.7に示すように， I_k はベクトルの長さの調節を， R はベクトルのなす角 α と向きを調節を行っている．そこで R にお

いて，ベクトルの向きを Z 軸まわりの回転角 ψ ， α を X 軸または Y 軸まわりの回転角 θ または ϕ によって調整し，それぞれの変数に対応する役割を定める． X_1, X_2 のなす角は $\pi/2$ に設定し，

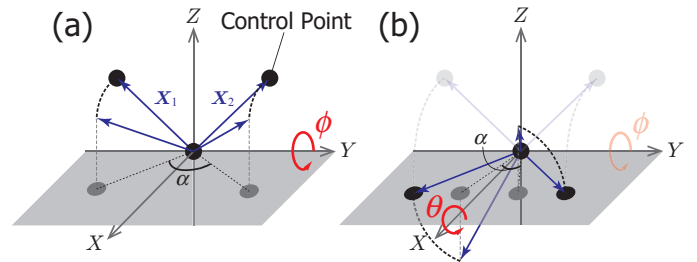


Fig.8 Coordinate rotation with Y axis and X axis

$0 \leq \alpha \leq \pi/2$ のときは Fig.8-(a) のように Y 軸まわりの回転のみで， $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ のときは Fig.8-(b) のように Y 軸まわりに $\pi/2$ 回転を行った上で， X 軸まわりの回転に対応する．このように役割を分担することで，収束計算を使わずに写像を定める．

定めた写像を用いて，式 (3)，(4) を以下のように変形することで，人の移動規則を次のように定義する．

$$x[k] = T\hat{x}[k] \quad (x \in R^2, \hat{x} \in R^3) \quad (18)$$

$$\hat{x}[k+1] = \hat{x}[k] + aF \quad (19)$$

$$F = I_kRf(X[k]) + \begin{bmatrix} \sum_j v_j + \sum_w v_w + h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$X[k] = (I_kR)^{-1}\hat{x}[k] \quad (21)$$

x は現実空間内の位置であり， \hat{x} を T によって射影することで求める． \hat{x} の移動速度は，仮想空間内の位置 X から計算されるベクトル場を行列 I_kR によって写像することで求める．式 (19) の a は式 (8) で定義したものである．他人との反発 v_j と壁との反発 v_w は \hat{x} は，式 (20) のように速度の xy 成分にのみ影響を及ぼす．

4. 人の流れのシミュレーションと空間内の混雑評価

提案したモデルに基づいた人の流れのシミュレーションを行い，その結果から空間内の混雑を評価する．まず，Fig.9のように仮想空間場を設計し，式 (16)，(17) の連立方程式から写像を定め，個体を1つ Fig.5-(a) の空間に入れて，式 (18)，(19)，(20)，(21) に従って動かすシミュレーションを行う．このときの現実空間内での

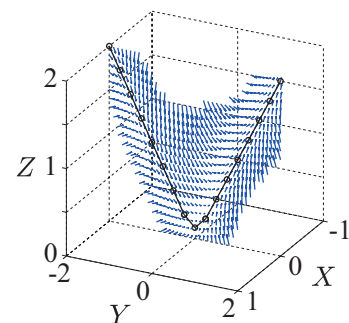


Fig.9 Virtual vector field designed for simulation

個体の移動軌跡を Fig.10-(a) に，移動の様子を添付の動画に示す．色が変化する場所は写像が切り替わる場所であり，次に閲覧する展示品までの距離が前に閲覧した展示品までの距離よりも近くなったときに写像を変更した．この動きを仮想空間上で表すと Fig.10-(b) のようになる．現実空間内のすべての動きは仮想空間内の一方の動きから写像されるため，すべての軌跡が重なる．Fig.10の結果から，このモデルによって動線の交差とUターンが表現できたことが分かる．

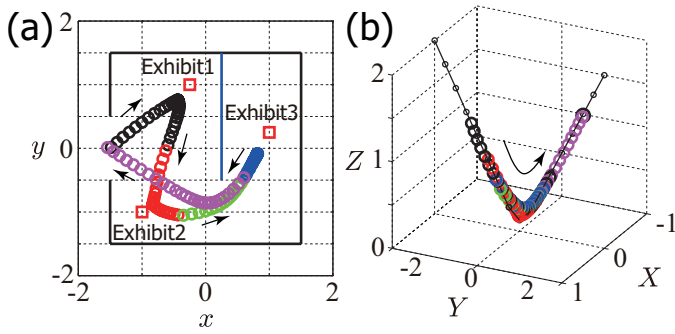


Fig.10 Trajectory of an individual behavior based on the proposed model in the real space and the virtual space

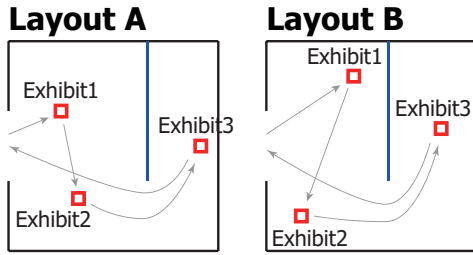


Fig.11 Two types of space layouts

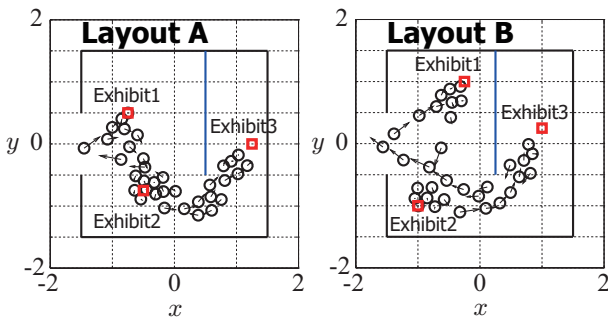


Fig.12 Simulation of human flow in the exhibition space

次に、Fig.11のようなAとBの2つの展示品・パーティションの配置を考える。それぞれの空間にモデルに従って動く個体を入口から次々と入れるシミュレーションを行った結果をFig.12に示す。このとき、それぞれの配置において、出口から出て行く100個の個体の各展示品への満足度の分布と平均をFig.13のヒストグラムに示す。(a)から(e)のすべての分布において展示品への満足度が1に達していない個体が存在する。このことから、展示品の閲覧をあきらめる動作をモデル化できたことが分かる。

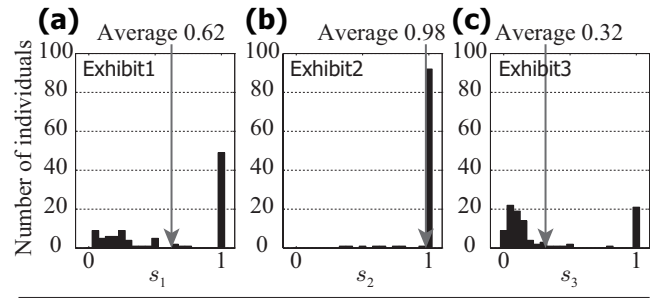
さらに、Fig.13-(a),(d)の分布、Fig.13-(b),(e)の分布を比べると、展示品1,2への満足度の平均は配置Aの方が配置Bよりも高いことが分かる。このことから、展示品・パーティションの配置と動線の位置の関係は配置Aの方が良く、閲覧者の展示品への満足度が高くなるようなものの配置が存在することが分かる。

5. おわりに

本研究では、仮想空間場の写像を利用したイベント空間における動線のモデル化手法として

- 空間内の順路を展示品と展示品の間で分割し、各動線に別のベクトル場を設計する
- 各分割順路に仮想空間に設計したベクトル場(仮想空間場)を現実のものの位置関係に合うように写像する

Layout A



Layout B

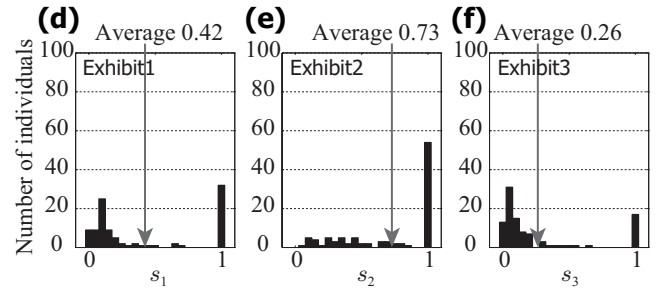


Fig.13 Distribution and average of satisfaction level in two types of space layouts

ことを提案し、展示品の閲覧をあきらめる動作のモデル化と、動線の交差とUターンの表現を可能にした。さらに、ものの配置の異なる2つの空間に対して、提案したモデルに基づいてシミュレーションを行い、展示品への満足度の分布を用いて混雑評価を行った。結果、閲覧者の展示品への満足度が高くなるような展示品・パーティションの配置が存在することが分かった。今後は、空間内の混雑緩和のために評価関数を設け、設計変数を展示品・パーティションの位置にすることで動線の最適化を行う。

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] M. Okada, Y. Motegi, and K. Yamamoto. Human swarm modeling in exhibition space and space design. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5021–5026, 2011.
- [2] 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.
- [3] 柳澤, 西成. クラスタ近似による出口を通過する人の流量の式の導出. 日本応用数学会論文誌, Vol. 17, No. 3, pp. 277–290, 2007.
- [4] W. G. Weng, T. Chen, H. Y. Yuan, and W. C. Fan. Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow with different walk velocities. *Phys. Rev. E*, Vol. 74, No. 3, p. 036102, 2006.
- [5] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Vol. 407, pp. 487–490, 2000.
- [6] N. Pelechano and N.I. Badler. Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 26, pp. 80–86, 2006.
- [7] A. Braun, S.R. Musse, L.P.L. de Oliveira, and B.E.J. Bodmann. Modeling individual behaviors in crowd simulation. In *Proc. of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents, 2003*, pp. 143–148, 2003.
- [8] 織田, 瀧澤, 河村, 谷. 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.