

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

茂木祐一 岡田昌史 (東京工業大学)

Multidimensional Extension of Dynamics for Modeling of Visitor Behavior on Observation Time and Individuality in Exhibition Space

*Yuichi MOTEGI and Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— In exhibition space, it is possible to minimize congestion by optimizing an arrangement of exhibits using human swarm model because congestion depends on human flow. Vector field model is one of the quantitative models. However, this approach is not enough to model visitors stopping to observe exhibits. In addition, congestion is greatly influenced by visitor individuality. In this paper, we propose multidimensional extension of dynamics for modeling of visitor behavior on observation time and individuality in exhibition space. Individuality means a variety of observation time and a difference of actual visitor behavior and macro model behavior. We model people viewing exhibits by the introduction of "stopping time" and "attract vector to exhibition" and individuality by utilizing a variety of "stopping time" and dynamics.

Key Words: human swarm model, vector field, multidimensional extension

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（アメニティ）を設計する課題につながり、この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。

人々の混雑のメカニズムを考えるためには、人の流れを定量的に扱う必要があるが、人の動きをミクロに捉えたと計算が煩雑になるため、ここではマクロに捉えてモデル化する。さらに、混雑は空間内のものの配置に依存していると考えられるので、そのマクロモデルをもとに混雑が少なくなるようにものの配置を最適化すれば、快適なイベント空間の設計が可能となる。人の流れのモデル化手法については、これまでに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ている。セルラオートマトンはメッシュを用いた離散的な数学モデルであるが、このモデル化に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、再現性に多くの問題がある。また織田ら [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ている。しかし、このモデルは平面内に点在する目標地点として逐次切り替えながら移動するという規則を用いていることから、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。

これに対し、安藤ら [3]、本間ら [4] は人の群のマクロモデルをベクトル場で与えた。これにより、個体の行動はベクトル場に基づいた力学系で表され、避難誘導法やアメニティの設計法を提案した。ここではベクトル場は群の意志を表しており、個性を排除した体系的な設計法を与えている。しかし、空間内に定義されたベクトル場では人の立ち止まりを表現することがで

きないうえ、イベント空間の混雑は閲覧者がどの展示品に興味があるかなどの個性も強く影響する。そこで本研究では、イベント空間における閲覧者の展示品閲覧時間と人の個性のモデル化を行うために力学系の次元拡張によって

- イベント空間内の人の群をベクトル場でモデル化する
- 人の個性のうちベクトル場に沿った動きと経路に沿った動きの差を力学系によりモデル化する
- 人が立ち止まって展示品を閲覧するという行為を“立ち止まり時間”と“展示品への引きつけ”の導入によってモデル化する
- 人の個性のうち閲覧時間のばらつきを“立ち止まり時間”の増加量のばらつきによりモデル化することを目的とする。また、モデルの有効性をシミュレーションによって示す。

2. イベント空間における人の群のモデル化

本章では人の群のマクロなモデルについて説明する。イベント空間において、人々はある大まかな順路に沿って展示品を見ているので、そこに人の流れが存在する。その流れを定量的に扱うために、個々の動きを見るのではなく、マクロに捉えてベクトル場でモデル化する。ベクトル場の設計法を以下に記述する。

Step1 まず人々の大まかな流れを座標群

$$\Xi = \left[\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_m \right] \quad (1)$$

で表す。 ξ_k を順番に結んだものを経路とする。

Step2 Fig.1のように任意の座標 x から経路に引き込まれるようなベクトル場 $f(x)$ を設計する。 $f(x)$

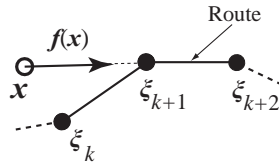


Fig.1 Setting coordinates and vector field

は以下のような多項式で近似する [5] .

$$f(x) = \Theta \phi(x) \quad (2)$$

$$\Theta = [a_{00} \ a_{10} \ a_{01} \ a_{20} \ a_{11} \ \cdots \ a_{0\ell}] \quad (3)$$

$$\phi(x) = [1 \ x \ y \ x^2 \ xy \ \cdots \ y^\ell]^T \quad (4)$$

$$x = [x \ y]^T \quad (5)$$

Step3 シミュレーションにおける個体の移動は次のように定義する .

$$x[k+1] = x[k] + f(x[k]) + v_a \quad (6)$$

v_a は個体同士との反発ベクトルであり, 注目している個体 i の位置 x_i から別の個体 j の位置 x_j までのベクトル r_{ij} と空間内の個体の数 N を用いて

$$v_a = \sum_{j \neq i}^N \frac{\gamma_r}{1 + \exp\{\alpha_r (\|r_{ij}\| - \beta_r)\}} \frac{r_{ij}}{\|r_{ij}\|} \quad (7)$$

$$r_{ij} = x_i - x_j \quad (8)$$

と定義する . ここで $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$ は定数である .

この手順で設計したベクトル場と, その中での 3 つの個体の動きを Fig.2 に示す . このシミュレーションでは実際のイベント空間を想定した正方形の単純な部屋を考え, 左上を入口, 右下を出口として, 空間内に人々の歩く経路を水色の線のように設定した . 3 つの個体は同時に入口から入り, それらの空間内での動きは黒い丸で示してある . これらの個体の動きから, 人の動きをマクロに捉えてベクトル場でモデル化できたことが分かる .

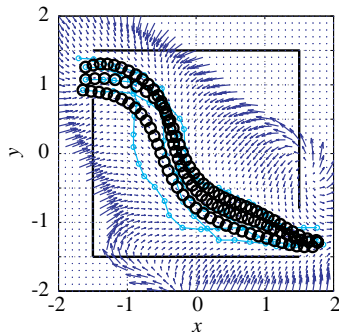


Fig.2 Generated vector field and 3 trajectories of individuals

3. 力学系による個性のモデル化

本章では力学系による個性のモデル化方法を述べる . ベクトル場に沿った動きと経路に沿った動きには差が生じる . これを個性の一つとして力学系で表現する . まずベクトル δ_k を以下のように定義する .

$$\delta_k = (\xi_{k+1} - \xi_k) - f(\xi_k) \quad (9)$$

ここで現在のずれ $\delta[k]$ を現在の位置 $x[k]$ と過去のずれ $\delta[k-1], \dots, \delta[k-n]$ から求める個性のダイナミクスを設計する . これは多項式近似を使って,

$$\delta[k] = \Theta_\delta \phi(\delta[k-1], \dots, \delta[k-n], x[k]) \quad (10)$$

と近似する . Θ_δ は係数行列, ϕ は座標 $\delta[k-1], \dots, \delta[k-n], x[k]$ の成分をべき乗に展開したものを並べたベクトルであり, Θ_δ は最小二乗法により一つに定める . 式 (6) を次のように変形し, 個性をモデルに取り入れる .

$$x[k+1] = x[k] + f(x[k]) + v_p + \delta[k] \quad (11)$$

式 (10) における n は, 誤り近傍点法 [6] を用いて決定する . すなわち次元拡張によって n を求める . まず $u_\ell[k]$ を ℓ 個の δ を並べたベクトルとして以下のように定義する .

$$u_\ell[k] = \begin{bmatrix} \delta[k-\ell+1] \\ \vdots \\ \delta[k-1] \\ \delta[k] \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで $u_\ell[i]$ とその最近傍点 $u_\ell[j]$ との距離

$$R_\ell = \|u_\ell[i] - u_\ell[j]\| \quad (13)$$

が閾値 ϵ より大きくなるまで Fig.3 のように ℓ を増やす . はじめて $R_\ell > \epsilon$ となったときの ℓ を n として決定する .

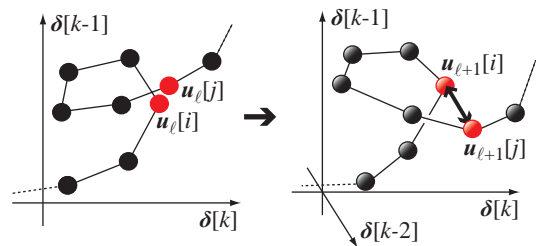


Fig.3 Basic concept of false nearest neighbor method

次にダイナミクスの具体的な設計方法を述べる . 誤り近傍点法を用いて決定した n に対して, 式 (10) は $2n+2$ 次の多項式であり, n が大きすぎると Θ_δ の決定に極めて手間がかかることになる . そこで特異値分解を利用して低次元化を行う . まず以下の $2n+2$ 次元のベクトルを考える .

$$d[k] = \begin{bmatrix} c\delta[k-n] \\ \vdots \\ c\delta[k-1] \\ x[k] \end{bmatrix} \quad (14)$$

c は δ と x のスケーリング要素である．そして

$$X = \begin{bmatrix} d[n+1] & d[n+2] & \cdots & d[m] \end{bmatrix} \quad (15)$$

なる $X \in R^{(2n+2) \times (m-n)}$ を，座標変換行列 $T \in R^{r \times (2n+2)}$ によって

$$\hat{X} = TX \quad (16)$$

$$= \begin{bmatrix} \hat{d}[n+1] & \hat{d}[n+2] & \cdots & \hat{d}[m] \end{bmatrix} \quad (17)$$

のような $\hat{X} \in R^{r \times (m-n)}$ へと低次元化する ($r < 2n+2$)．このとき，誤り近傍点法による次元拡張の有効性を残すために

$$J = \min_{i \neq j} \|\hat{d}[i] - \hat{d}[j]\| \quad (18)$$

を最大化する T を求めることを考える．これは以下の特異値分解によって得られる． X の各列ベクトルの差を正規化した

$$\Delta d_{ij} = \frac{d[i] - d[j]}{\|d[i] - d[j]\|} \quad (i \neq j) \quad (19)$$

をすべて並べた行列 Y を定義する．

$$Y = \begin{bmatrix} \Delta d_{12} & \Delta d_{13} & \cdots \end{bmatrix} \quad (20)$$

さらに， Y のバイアス項を取り除いた行列を \bar{Y} とする．このとき， T は \bar{Y} の特異値分解

$$\bar{Y} = USV^T \quad (21)$$

$$= \begin{bmatrix} U_1 & U_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$S_1 = \text{diag}\{s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_r\} \quad (23)$$

$$S_2 = \text{diag}\{s_{r+1} \ s_{r+2} \ \cdots \ s_{m-n}\} \quad (24)$$

を考え， $s_r \gg s_{r+1}$ を仮定して

$$T = U_1^T \quad (25)$$

で得られる．これを用いて $d[k]$ を低次元化し

$$\hat{d}[k] = T\bar{Y} \quad (26)$$

$$\delta[k] = \Theta_{d\phi}(\hat{d}[k]) \quad (27)$$

と近似する．この個性のダイナミクスを用いてシミュレーションを行った結果を Fig.4 に示す．Fig.4 は各経路の最初の座標から 1 つの個体を式 (11) の規則に従って移動させたときの軌跡を黒い丸で示したものである．この結果から，個性のダイナミクスを用いることで経路に沿った動きが実現でき，ベクトル場に沿った動きとの差をモデルに導入可能であることが分かる．

4. 展示品を閲覧する行為のモデル化

4.1 “立ち止まり時間”と“展示品への引きつけ”の導入

式 (6) においてベクトル場は x の関数なので，個体はその場にとどまることができない．しかし，イベン

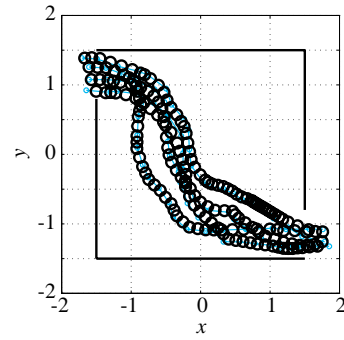


Fig.4 Trajectories based on the model considering dynamics of individuality

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．そのため，立ち止まりのモデル化が必要であり，ここでは xy 空間に加え，展示品 w の前での“立ち止まり時間”を表す z_w 軸を導入する．式 (6) を以下のように変形する．

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{x}[k] + a\{\mathbf{f}(\mathbf{x}[k]) + \mathbf{v}_p\} \quad (28)$$

$$z_w[k+1] = z_w[k] + g_w(\mathbf{x}[k], z_w[k]) \quad (29)$$

ただし a は，空間内の展示品数 M として

$$\left\| \begin{bmatrix} a\{\mathbf{f}(\mathbf{x}[k]) + \mathbf{v}_p\} \\ \mathbf{g} \end{bmatrix} \right\| = \|\mathbf{f}(\mathbf{x}[k]) + \mathbf{v}_p\| \quad (30)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_1(\mathbf{x}[k], z_1[k]) & \cdots & g_M(\mathbf{x}[k], z_M[k]) \end{bmatrix}^T \quad (31)$$

を満たす数で

$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{L^2 - \|\mathbf{g}\|^2}{L^2}} & (\|\mathbf{g}\| \leq L) \\ 0 & (\|\mathbf{g}\| > L) \end{cases} \quad (32)$$

$$L = \|\mathbf{f}(\mathbf{x}[k]) + \mathbf{v}_p\| \quad (33)$$

で求められる．関数 $g_w(\mathbf{x}, z_w)$ は次のように定める．

$$g_w(\mathbf{x}, z_w) = \frac{\gamma_g S_w(z_w)}{1 + \exp\{-\alpha_g(\|\mathbf{r}_w(\mathbf{x})\| - \beta_g)\}} \quad (34)$$

ここで $\alpha_g, \beta_g, \gamma_g$ は定数である．展示品までの距離が β_g を超えると， z_w の増加量 $g_w(\mathbf{x}, z_w)$ が α_g で決められた傾きに従って大きくなる． $S_w(z_w)$ は

$$S_w(z_w) = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha_w(z_w - \beta_w)\}} \quad (35)$$

のような展示品ごとに定められた関数であり， α_w, β_w は展示品によって異なる定数である．

さらに式 (28) を変形して“展示品への引きつけ”を表すベクトル $\mathbf{h}(\mathbf{x}, z_w)$ を次のように導入する．

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{x}[k] + a\{\mathbf{f}(\mathbf{x}[k]) + \mathbf{v}_p + \mathbf{h}(\mathbf{x}, z_w)\} \quad (36)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, z_w) = \sum_{w=1}^M S_w(z_w) \exp(-\alpha_h \|\mathbf{r}_w(\mathbf{x})\|^2) \frac{\mathbf{r}_w(\mathbf{x})}{\|\mathbf{r}_w(\mathbf{x})\|} \quad (37)$$

ここで α_h は定数, $r_w(x)$ は以下のベクトルである.

$$r_w(x) = x_w - x \quad (38)$$

x_w は展示品 w の位置であり, $\|r_w(x)\|$ は位置 x から展示品 w までの距離を表す.

4.2 “立ち止まり時間”の増加量のばらつきによる個性のモデル化

展示品の閲覧時間のばらつきを以下のように式 (29) を変形することによってモデルに導入する.

$$z_w[k+1] = z_w[k] + b_w g_w(x[k], z_w[k]) \quad (39)$$

b_w の値は個体と展示品によって異なる.“立ち止まり時間”の増加量にばらつきを持たせることで個性を表現することが可能である.

式 (36) と式 (39) に基づいたシミュレーション結果を Fig.5 と Fig.6 に示す. 展示品の数は2つであり, 青い四角形がその位置を示している. Fig.5 は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, (a), (b) は z_1, z_2 の動きを取り入れたもの, (c) はその個体の動きを xy 平面に射影したものである. Fig.6 は

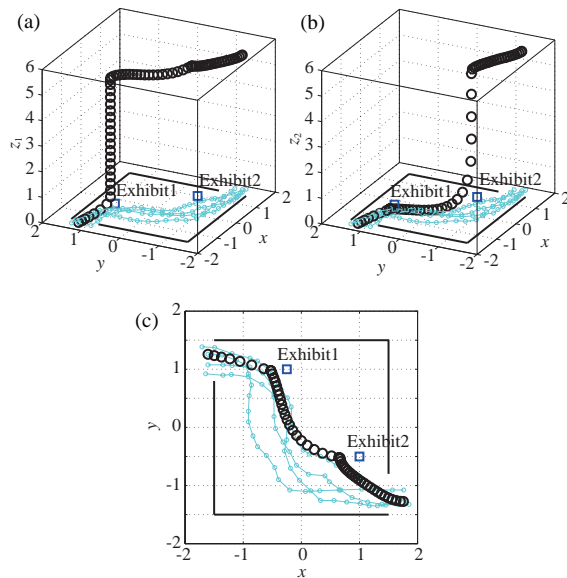


Fig.5 One trajectory based on the model considering observation time

多数の個体を次々に空間内に入れたときの様子である. これらの結果から, 人が立ち止まって展示品を見るという行為がモデル化できたことが分かる.

5. おわりに

本研究では, イベント空間における閲覧者の展示品閲覧時間と人の個性のモデル化を行うために力学系の次元拡張を行った. 結果を以下に示す.

- イベント空間内の人の群をベクトル場でモデル化した.
- 人の個性のうちベクトル場に沿った動きと経路に沿った動きの差を力学系によりモデル化した.

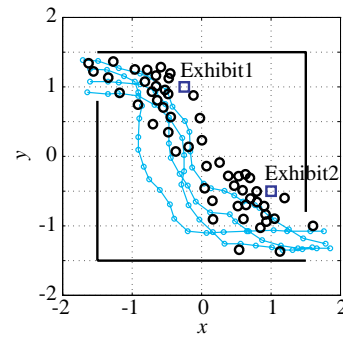


Fig.6 Swarm behavior based on the model considering observation time

- 人が立ち止まって展示品を閲覧するという行為を“立ち止まり時間”と“展示品への引きつけ”の導入によってモデル化した.
- 人の個性のうち閲覧時間のばらつきを“立ち止まり時間”の増加量のばらつきによりモデル化した.

なお, 実際のイベント空間を考える上では設定する経路を実際の人の流れに基づいたものに置き換える必要がある. この経路をもとに“立ち止まり時間”を用いて混雑が少なくなるようなものの配置を最適化することが今後の課題となる.

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・計測制御部門講演会論文集, Vol.B, No.98-8, pp.261-264, 1998.
- [2] 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.
- [3] 安藤輝尚, 岡田昌史. 場の最適化による避難誘導のための人員配置. 第27回日本ロボット学会学術講演会, 1G2-03(CD-ROM), 2009.
- [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] 岡田昌史, 中村仁彦. 脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用. 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.8, pp.1050-1060, 2004.
- [6] 合原一幸. カオス時系列解析の基礎と応用. 産業図書, 2000.