

オープンプラン型展示場における混雑緩和のための展示品配置最適化*

 岡田 昌史^{*1}, 茂木 祐一^{*2}

Optimal layout of exhibits for congestion reduction in open-plan exhibition

 Masafumi OKADA^{*1} and Yuichi MOTEGI

^{*1} Dept. of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology
 2-12-1 Oookayama Meguro-ku Tokyo 152-8552, JAPAN

Received 9 July 2013

Abstract

The congestion in an exhibition space might make us uncomfortable and cause an accident. In this paper, we design an amenity space with safety and comfort by optimizing the layout of exhibits. A human flow in an open-plan exhibition space is modeled by a vector field that is calculated by a coordinates transformation and projection of a virtual vector field. Based on the model, the layout of the exhibits is optimized. The simulation results show that the proposed method reduces the congestion, and the visitors view the exhibits in a short time with large satisfaction. The experimental results using swarm of mobile robots controlled autonomously or by human, shows the validity of the human model and the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Human flow modeling, Human swarm control, Congestion reduction, Amenity space design, Swarm robot

1. はじめに

美術館や博物館などのイベント空間における混雑は、我々を不快に感じさせたり重大な事故の原因となったりする。そのため、混雑の少ない安全な空間（アメニティ空間）を設計することはイベント空間の快適性と魅力の向上へつながる。イベント空間における混雑は人の流れに依存し、人の流れは空間内の展示品の配置に依存する（坪山, 佐藤, 1998）。そこで、図1のように空間内の展示品配置を変化させ閲覧者の流れを制御することで混雑を緩和させることが可能であると考えられる。そのための課題は、人の流れのモデルの設計と、それに基づいた配置場所

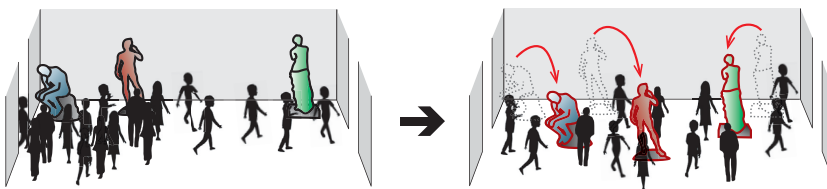


Fig. 1 Congestion reduction by the change of exhibits layout

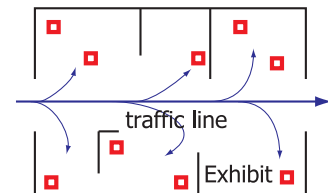


Fig. 2 Open-plan exhibition space

を決定するための体系的な手法を与えることにある。山本ら（山本他, 1998）、柳澤ら（柳澤, 西成, 2007）、Wengら

* 論文 No.13-00548 [DOI: 10.1299/transjsme.2014bms0056]

^{*1} 正員, 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} 学生員, 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理学専攻 (現 (株)東芝)

E-mail: okada@mep.titech.ac.jp

(Weng, et al., 2006) はセルラオートマトンを用いた人の動きの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 (Helbing, et al., 2000)，Pelechano ら (Pelechano and Badler, 2006)，Braun ら (Braun, et al., 2003) は非常時に避難する人の動きを微分方程式でモデル化した．これらのモデルにおいて，人は所望の速度に近づくような加速度をもって移動する．また，織田ら (織田他, 2002)，木村ら (木村他, 2009) 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．さらに，岡田ら (岡田, 安藤, 2011) は避難する人の流れをベクトル場でモデル化し，それに基づいた避難誘導員の配置最適化を行った．これらのモデルでは，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 (立ち止まり) が実現しにくい．一方，アメニティ空間の設計手法に関して，勝山ら (勝山他, 2001) は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アメニティ空間を設計する手法を提案している．また，Lee (Lee, 2011) は蟻コロニー最適化法によって駅構内のサービス施設配置を最適化することで乗客の移動効率を向上させる手法を提案している．しかし，これらの手法は限られた場所のみ展示品や施設を設置できる空間を想定している．

これに対し，著者らは文献 (Okada, et al., 2011) においてベクトル場による人の流れのモデルに，展示品への引き込みと満足度を導入することで，閲覧者が展示品を閲覧する動作をモデル化した．また，モデルに基づいて展示品配置を最適化し，アメニティ空間の設計を行った．この方法で扱った空間は，順路が一方に固定されており展示品の位置を変えても順路は変化しない空間であった．しかし，近年のイベント空間では図 2 のように大まかな動線のみが設定され，各展示品の移動はそこから枝分かれする形態をとり，順路が定まっていないオープンプラン型の空間が多く見られる．強制的に定まった順路がある空間では，閲覧者はしばしば順路上にある展示品よりも順路の終点にたどり着くことに興味を向いてしまい展示品を満足するまで閲覧しない傾向がある (McLean, 1993) が，オープンプラン型の空間では順路の詳細が閲覧者主体で決定されるため，閲覧者は展示品を満足するまで閲覧する．そのため，空間の魅力は大きく向上する．

そこで，本論文では順路が定まっていないオープンプラン型のイベント空間における閲覧者の流れをモデル化し，そのモデルに基づいて展示品配置を変化させることでアメニティ空間を設計する．閲覧者の流れのモデル化には，前述の文献 (Okada, et al., 2011) で提案した展示品の閲覧動作のモデル化手法を応用し，ベクトル場の設計手法を広い空間に対応させるために拡張する．空間内の閲覧者の行動は視覚情報に基づく (Peponis, et al., 2004) ことから，閲覧者が現在位置から近く，混雑していない展示品から閲覧するように展示品閲覧順序を決定するアルゴリズムを構築し，提案したモデルに基づいて展示品配置を変化させることでアメニティ空間を設計する．また，提案する閲覧者の流れのモデル，展示品閲覧順序決定アルゴリズム，空間設計手法の有効性を群ロボットを用いた実験で示す．

2. 閲覧者の流れのモデル化

2.1 従来のモデル

本章では，まず人の移動経路から空間内の閲覧者の流れをモデル化する従来法 (Okada, et al., 2011) について述べ，これをオープンプラン型のイベント空間へ拡張する．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ようなベクトル場 $f(x)$ ($x \in R^2$) を設計し，個体 i の移動を以下で定義する．

$$\mathbf{x}_i[k+1] = \mathbf{x}_i[k] + f(\mathbf{x}_i[k]) + \sum_{i \neq j} v_{ij} + \sum_w \mathbf{v}_w \quad (2)$$

\mathbf{x}_i は個体 i の位置ベクトルを表し， ξ はその計測データである． v_{ij} は他人 j との反発ベクトルであり，以下のシグモイド関数を用いて定義する．

$$\mathbf{v}_{ij} = \frac{\gamma_r}{1 + \exp\{\alpha_r(|\mathbf{r}_{ij}| - \beta_r)\}} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|}, \quad \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{x}_i[k] - \mathbf{x}_j[k] \quad (3)$$

x_j は個体 j (他人) の位置ベクトル, $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$ は定数である. v_w は個体 i と壁との反発ベクトルであり, 壁との距離を用いて v_{ij} と同様に定義される. Fruin (Fruin, 1971) は歩行者のパーソナルスペースの大きさと, 他人と衝突する確率の関係を実験から求めており, この実験値をカーブフィッティングすることで $\alpha_r = 8.9, \beta_r = 0.87, \gamma_r = 1.5$ とした. 図 3 は f を設計した例である. 図 3(a) の青線のように Ξ が与えられたとき, その周りに緑線で表される

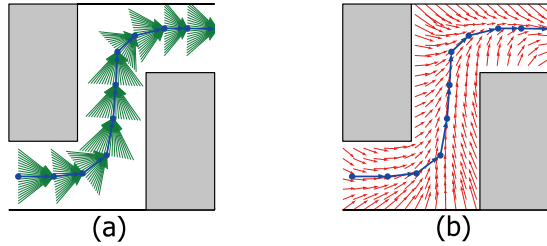


Fig. 3 Human trajectory and vector field

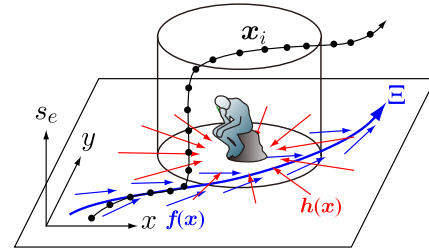


Fig. 4 Motion of an individual that realizes stopping behavior

ベクトル場を定義し, これを関数近似することで図 3(b) の f が得られる. なお, ここでは f を x のべき乗多項式

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_\ell x^\ell \tag{4}$$

$$x = [x \ y]^T, \quad x^n = [x^n \ x^{n-1}y \ \dots \ xy^{n-1} \ y^n]^T \tag{5}$$

として関数近似した.

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に図 4 のように x 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 Ξ に引き込まれるように移動し, その後, h によって展示品へと引きつけられる. 展示品に近づくと s_e 軸に沿って動き, s_e がある値まで達するとベクトル場 f に従った動きに戻る. この動きを x 平面に射影することで立ち止まりが表現できる. 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.

$$\begin{cases} x_i[k+1] = x_i[k] + aF \\ s_e[k+1] = s_e[k] + g_e(x_i[k], s_e[k]) \end{cases}, \quad F = f(x_i[k]) + \sum_{i \neq j} v_{ij} + \sum_w v_w + h(x_i[k], s_e[k]) \tag{6}$$

ただし, $g_e(x, s_e), h(x, s_e)$ は, 空間内の展示品数を E として

$$\begin{cases} g_e(x, s_e) = \frac{\gamma_g S_e}{1 + \exp\{-\alpha_g (|r_e| - \beta_g)\}} \\ h(x, s_e) = \sum_{e=1}^E \gamma_h S_e \exp(-\alpha_h |r_e|^2) \frac{r_e}{|r_e|} \end{cases}, \quad \begin{cases} S_e = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha_e (s_e - 1)\}} \\ r_e = x_e - x \end{cases} \tag{7}$$

で定義される. $\alpha_g, \beta_g, \gamma_g, \alpha_h, \gamma_h, \alpha_e$ は定数である. 各展示品を閲覧する時間は 2 秒 ($\gamma_g = 2.0$) とし, 閲覧者が展示品を閲覧するとき 1.5 m 離れるように ($\beta_g = 1.5$) 設定した. α_h, γ_h については文献 (茂木他, 2011) において人の動線を計測した結果から定めた. すなわち, 展示品がある場合とない場合の人の動線を計測し, それらの比較から求めた. また, α_g, α_e は h, s_e が滑らかになるように設定した. x_i が展示品の位置 x_e に近づいたときに g_e は値を持ち, s_e が動き始める. s_e が 1 を越えると S_e は小さくなり s_e の動きが止まる. また, h は s_e が 1 より小さいときのみ値を持つ, すなわち, 閲覧に満足した後は展示品への引き込みは働かない. a は

$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{|F|^2 - |G|^2}{|F|^2}} (|F| \geq |G|) \\ 0 (|F| < |G|) \end{cases}, \quad G = [g_1(x, s_1) \ g_2(x, s_2) \ \dots \ g_E(x, s_E)]^T \tag{8}$$

とする. すなわち, s_e の変化 (g_e の大きさ) が大きい場合に $a = 0$ となり x_i は停止する. さらに, F は h を含むた

め, x_i の移動量 $|F|$ が大きくなるように,

$$F \leftarrow \begin{cases} F \frac{|f(x)|}{|F|} & (|F| \geq |f(x)|) \\ F & (|F| < |f(x)|) \end{cases} \quad (9)$$

の制限を加える. このモデルにおいて, 展示品の周りに混雑が発生し近づけない場合, 個体 i は十分な s_e の値を得ることができずに f に戻る. これは閲覧をあきらめる動作を表しており, 展示品の周りで f が連続であることにより実現できる.

2.2 仮想空間場の導入

上述のモデルでは, 経路 Ξ が先に得られており f が固定されていた. しかし, オープンプラン型のイベント空間では展示品の配置によって経路が変化するため, 時々刻々と変化する f を求める必要があり, そのために仮想空間場を導入する. まず, f に求められる条件を列挙する.

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. 経路の交差やUターンを表現できなければならない.
3. 展示品配置の変化に対して, f の再設計が容易でなければならない.

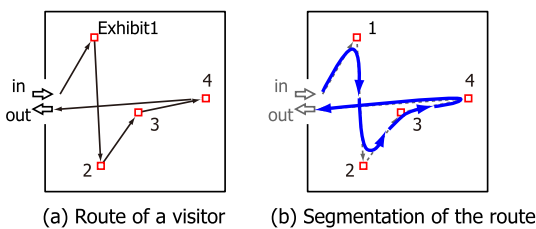


Fig. 5 Route of a visitor and its segmentation

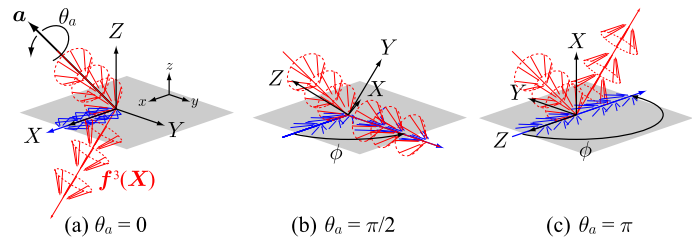


Fig. 6 Virtual space and projection

この条件のもと, 以下のように f を定める. まず, 図 5(a) の順路を (b) のように角度の異なる V 字の経路に分割し, それぞれにベクトル場を設定する. これにより, 条件 1, 2 が可能となる. 次に, 条件 3 を可能とするために V 字の経路それぞれに f を以下の方法によって定める. 図 6(a) の赤色で示されるように, XYZ 仮想空間に 3 次元ベクトル場 (仮想空間場) f^3 を設定する. その xy 平面 (図のグレーの面) への射影は青色のベクトル場で表され, これは現実の空間での f に相当する. f^3 を $a = [1 \ 0 \ 1]^T$ を軸として $0 \leq \theta_a \leq \pi$ で回転させることで図 6(a) \rightarrow (b) \rightarrow (c) へと移り, xy 平面での経路のなす角 ϕ が $0 \leq \phi \leq \pi$ で変化する. なお, (a) は $\phi = 0$ であり, これは U ターンを表す. これらの変化は座標変換と射影によって容易に得られる. 正確には, 個体は XYZ 空間の点 X_i に存在し, これより $f^3(X_i)$ を求め, さらに, 展示品の配置から θ_a (V 字の角度 ϕ に合わせる) および原点の平行移動 ℓ (V 字の頂点を展示品位置に一致させる), z 軸周りの回転 θ_z (V 字の向きを変える) を求め, これらより得られる座標変換行列 T を用いて xy 平面に射影することでこれを f とする. これらをまとめると, 個体 i が展示品 $(j-1) \rightarrow j \rightarrow (j+1)$ と巡回するとき, これは

$$f(x_i) = T(\theta_a, \theta_z, \ell) f^3(X_i) \quad (10)$$

に従って動くとする. なお, θ_a, θ_z, ℓ は展示品 $(j-1), j, (j+1)$ の位置の関数となる. 仮想空間場は変化せず座標変換行列のみが変化的ことから f の再設計が容易となり条件 3 を満たす.

仮想空間は 3 次元であるが現実空間は 2 次元であることから, 分割された V 字の経路を移るとき仮想空間における初期位置 X_i の座標が定まらないが, これは図 7 のように仮想空間における赤の経路を含み y 軸と平行な平面上の点として定めた. さらに, 射影により f の大きさは θ_a に依存して変化する. そこで, 人の歩行速度は一定であるとして定数 Δ_v を用いて

$$f(x_i) = \Delta_v \frac{T f^3(X_i)}{|T f^3(X_i)|} \quad (11)$$

とした. Δ_v は山本ら (山本, 岡田, 2011) の歩行速度の計測結果から $\Delta_v = 1.64$ とした.

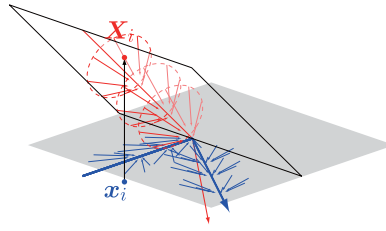


Fig. 7 Determination of X

2.3 展示品閲覧順序の決定

図5では閲覧の順路が決定しているが、実際は、人は視覚情報に基づいて順路を決定する (Peponis, et al., 2004) .そこで、閲覧順序を各展示品の状況から確率によってオンラインで決定することとする。2.2節で求めた f は2つ先に閲覧する展示品の情報を必要とする。そこで、個体 i が展示品 e_1 を閲覧し、次に展示品 e_2 を閲覧することが決まっているとき、さらに次の展示品を決定するアルゴリズムを導く。閲覧する展示品を決定するためのルールを以下に定める。

1. 近い展示品から順番に閲覧する。
2. 混雑していない展示品から順番に閲覧する。
3. 全ての展示品を閲覧後に出口から出やすくするために、出口から遠いものから順番に閲覧する。

このルールから、展示品 e_3 を見に行く確率を

$$P(e_3|e_2) = \begin{cases} \frac{w_{e_2,e_3}}{\sum_{e=1}^{E_r} w_{e_2,e}} & (e_3 \in A) \\ 0 & (e_3 \notin A) \end{cases}, \quad w_{i,j} = \frac{L_j^{n_1}}{\ell_{i,j}^{n_2} N_j^{n_3}} \quad (12)$$

とした。ただし、 E_r はまだ閲覧していない展示品の総数で A はその集合、 $\ell_{i,j}$ は展示品 e_i, e_j 間の距離、 L_j は出口から展示品 e_j までの距離、 N_j は展示品 e_j の周りにいる閲覧者の人数をである。 n_1, n_2, n_3 は定数である。式(12)より、 $w_{i,j}$ が大きいものが選ばれる確率が高くなるが、 $w_{i,j}$ は距離 $\ell_{i,j}$ が小さければ大きくなり (ルール1)、閲覧者の人数 N_j が少なければ大きくなり (ルール2)、出口からの距離 L_j が大きければ大きくなる (ルール3)。

2.4 閲覧者の流れのシミュレーション

これらのモデルに基づいて、オープンプラン型のイベント空間を想定した $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ の正方形の空間に展示品を5つ設置し、閲覧者がある一定の時間間隔で入ってくるシミュレーションを行った様子を図8に示す。(a)から(d)の順に時間は流れており、左側の入口から入室し下から退室する。黒丸が個体、黒の矢印がその瞬間の速度ベクトル、赤の四角形と星形が展示品を表している。星形の展示品は他の4つよりも魅力のある展示品を想定しており、展示品への引き込みを大きく、閲覧者が展示品を閲覧する時間を長く設定した。(a)より入口から入った個体は、入口に近い展示品のうちで空いているものから閲覧し、その後、魅力のある展示品付近に閲覧者が集中して混雑がではじめ、その混雑が徐々に全体に広がっていることが分かる。

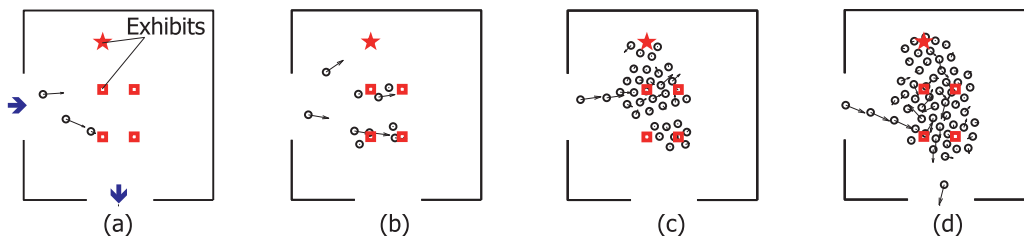


Fig. 8 Simulation results of human behavior

3. 展示品の配置最適化

3.1 最適化のための評価関数

アメニティ空間を設計するための、空間内の改善すべき事項として以下のものを考える．

1. 空間全体における混雑を緩和させる．
2. 閲覧者の展示品への満足度を向上させる．
3. 閲覧者の空間内の移動時間を短縮させる．

これらの改善事項を満たすような評価関数を決定し、展示品の配置最適化を行う．

式 (6) から (11) をまとめると個体の移動規則は次式で表される．

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i[k+1] = \mathbf{x}_i[k] + a\mathbf{F}_i \\ s_e[k+1] = s_e[k] + g_e \end{cases}, \quad \mathbf{F}_i = \Delta_v \frac{T\mathbf{f}^3(\mathbf{X}_i)}{|T\mathbf{f}^3(\mathbf{X}_i)|} + \sum_{i \neq j} \mathbf{v}_{ij} + \sum_w \mathbf{v}_w + \mathbf{h} \quad (13)$$

空間内で混雑が発生しているとき、他人との距離が近くなり反発のベクトル \mathbf{v}_{ij} が大きくなる．さらに、図 9(a) の

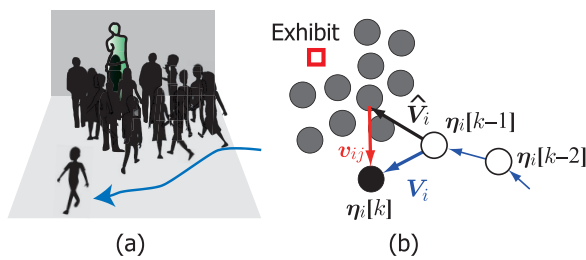
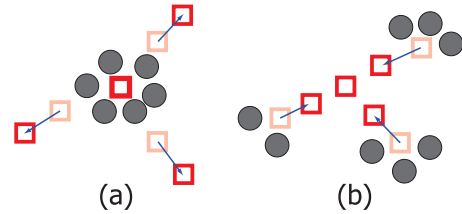
Fig. 9 Definition of $\hat{\mathbf{V}}_i$ and \mathbf{V}_i 

Fig. 10 Motion of exhibits with/without visitors

ように閲覧者が展示品を満足して見ることができずに展示品から離れてしまう大きな要因は、図 9(b) のように閲覧者が他人との反発 \mathbf{v}_{ij} を受けることであると考えられる．そこで、 \mathbf{v}_{ij} を小さくするように展示品配置を最適化することで、混雑を減らして閲覧者の展示品に対する満足度を上げようとする．展示品を 1 人で閲覧する (他人がいない) 行動を理想の動きと考えると、理想的な移動ベクトル $\hat{\mathbf{V}}_i$ と、実際の移動ベクトル \mathbf{V}_i との差は、他人との反発 \mathbf{v}_{ij} で表すことができる．個体 i の実際の移動軌跡を座標 $\boldsymbol{\eta}_i$ で表すと、移動ベクトル \mathbf{V}_i は

$$\mathbf{V}_i = \boldsymbol{\eta}_i[k] - \boldsymbol{\eta}_i[k-1] \quad (14)$$

と表せる． \mathbf{V}_i は個体の動きから計測されるものである．一方、式 (13) から $\hat{\mathbf{V}}_i$ は

$$\hat{\mathbf{V}}_i = a \left\{ \Delta_v \frac{T\mathbf{f}^3}{|T\mathbf{f}^3|} + \sum_w \mathbf{v}_w + \mathbf{h} \right\} \quad (15)$$

で表される．これらを等しいものとさせるよう、それぞれの個体に対して関数 J_i^1

$$J_i^1 = \left| \mathbf{V}_i - \hat{\mathbf{V}}_i \right|^2 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (16)$$

を設定しこれを最小化する．これが零となると、個体は他人がいない (混雑がない) のと同じ状況で閲覧が可能となる．

一方、展示品周辺は混雑が集中するため、混雑を緩和するためには閲覧者が空いている展示品から順路を形成するように誘導する必要がある．展示品の閲覧順序は式 (12) に基づくことから、展示品周りの閲覧者の人数を、展示品間の距離によって制御することを考える．具体的には、混雑した展示品に関しては図 10(a) のように他の展示品を遠ざけ、空いている展示品に関しては図 10(b) のように他の展示品を近づける．これにより、閲覧者は混雑した展示品を選びにくく、空いている展示品を選びやすくなり、展示品周辺の閲覧者数の均一化を図ることができる．これを実現するため、各展示品について評価関数 J_j^2 を以下のように定義し、

$$J_j^2 = (N_j - \hat{N}) \sum_{k=1, k \neq j}^E \frac{1}{|\mathbf{x}_{ek} - \mathbf{x}_{ej}|^2} \quad (17)$$

これを最小化する．なお， N_j は展示品 j 周辺の閲覧者数， \hat{N} は展示品周辺の最適閲覧者数とし， \hat{N} は展示品を中心として半径 β_g の円の面積を閲覧者のパーソナルスペースの面積で割った値とした．

さらに，改善すべき事項 3 のために展示品が直線上に並び評価を行う．図 11 のように 3 つの展示品のなす角を α_j とする．展示品を直線上に並ばせるために，図 12 のように α_j を π に近づけるように動かせばよい．そこで，

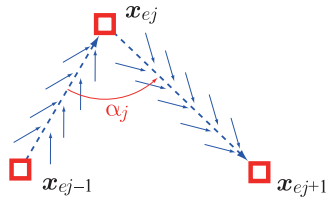


Fig. 11 Definition of α_j

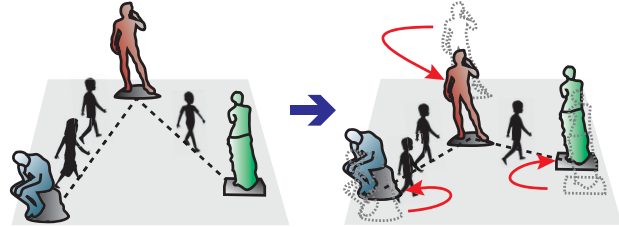


Fig. 12 Change of the exhibit's position

各展示品について以下の評価関数 J_j^3 を定義し，

$$J_j^3 = N(|\alpha_j| - \pi) \tag{18}$$

これを最小化する．ただし， N は x_{ej-1} ， x_{ej} ， x_{ej+1} 間を移動している閲覧者の人数である．

3.2 最適化手法

設定した 3 つの評価関数 J_i^1 ， J_j^2 ， J_j^3 に基づいて展示品の位置を最適化する．展示品の総数を E として展示品位置をすべて並べたベクトル

$$\mathbf{X}_E = [x_{e1}^T \ x_{e2}^T \ \cdots \ x_{eE}^T]^T \tag{19}$$

を定義する．また，評価関数から \mathbf{J}^j

$$\mathbf{J}^1 = [J_1^1 \ J_2^1 \ \cdots \ J_N^1]^T, \quad \mathbf{J}^2 = [J_1^2 \ J_2^2 \ \cdots \ J_E^2]^T, \quad \mathbf{J}^3 = [J_1^3 \ J_2^3 \ \cdots \ J_E^3]^T \tag{20}$$

を定義する． J_i^j は最小化されれば良いので，

$$\Delta \mathbf{X}_E = - \sum_{j=1}^3 w_j \left(\frac{\partial \mathbf{J}^j}{\partial \mathbf{X}_E} \right)^{\#} \mathbf{J}^j \tag{21}$$

より，

$$\mathbf{X}_E \leftarrow \mathbf{X}_E + \Delta \mathbf{X}_E + \mathbf{V}_e + \mathbf{V}_w \tag{22}$$

によって展示品の位置をオンラインで更新する．ただし， w_j は重み定数， \mathbf{V}_e ， \mathbf{V}_w は式 (2) と同様，展示品が重なることを防ぐ要素 (展示品どうしの反発ベクトル)，壁との衝突を防ぐ要素 (壁との反発ベクトル) である．さらに，展示品位置が激しく変化することを防ぐため，

$$\Delta \mathbf{X}_E[k] \leftarrow \sum_{\ell} \omega_{k-\ell} \Delta \mathbf{X}_E[k-\ell] \tag{23}$$

のように， $\Delta \mathbf{X}_E$ は過去の値の重み付き平均をとった．なお，式 (15)，(16) より J_i^1 は T を含み，さらに， T は \mathbf{X}_E を含むため， J_i^1 の \mathbf{X}_E に関する勾配は

$$\frac{\partial J_i^1}{\partial \mathbf{X}_E} = -2a [\mathbf{v}_i - \hat{\mathbf{v}}_i]^T \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{f}}}{\partial \mathbf{X}_E} + \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{X}_E} \right), \quad \hat{\mathbf{f}} = \Delta_v \frac{T \mathbf{f}^3(\mathbf{X}_i)}{|T \mathbf{f}^3(\mathbf{X}_i)|} \tag{24}$$

で与えられる．また，式 (17) より， J_j^2 は x_{ej} ， x_{ek} を直接に含み，式 (18) では α_j が x_{ej-1} ， x_{ej} ， x_{ej+1} の関数となるため， $\partial J_j^2 / \partial \mathbf{X}_E$ ， $\partial J_j^3 / \partial \mathbf{X}_E$ は容易に計算される．さらに，展示品位置が移動してから空間内の閲覧者の分布が変化するまで時間がかかることから，展示品位置の更新は個体の移動計算複数回に 1 回の割合で行うこととした．

3.3 最適化シミュレーション

提案手法によって展示品位置の最適化を行った．図 8(d) の状態から最適化を開始したところ，図 13 の結果を得た．なお，青線は展示品が移動した軌跡を表している．図 13(d) では緑線で表される暗黙の経路が形成されている．

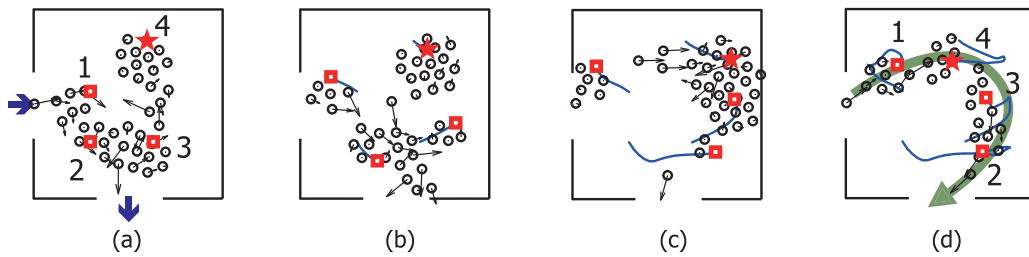


Fig. 13 Optimization of visitors flow in the exhibition space

すなわち，個体は展示品の配置により暗黙の順路へ誘導されていると言える．この結果の詳細に見る．図 14 に最

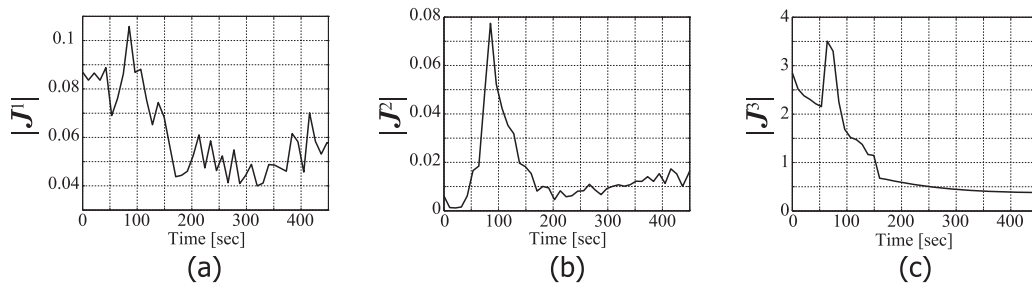


Fig. 14 Value of the objective functions during the optimization

適化中の評価関数の変化を示す．ただし， $|J^1|$ の値は閲覧者数に依存するため，閲覧者数で正規化した．最適化が進むにつれて評価関数の値が小さくなっている様子が理解できる．また，図 15 は空間内に存在する個体の数を表しており，最適化が進むにつれて空間内の人数が減少することを表している．さらに，図 16 は図 13(a)，(d) の配

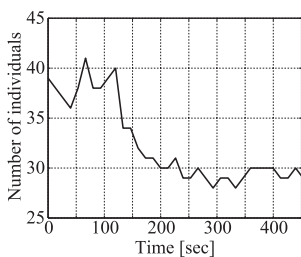


Fig. 15 Number of individuals

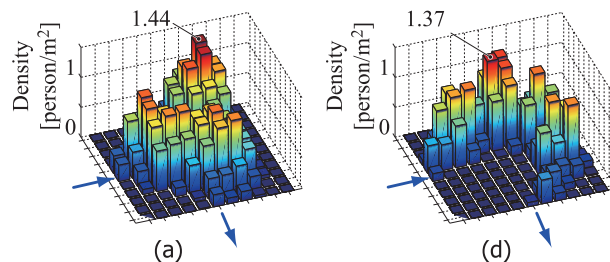


Fig. 16 Density distribution of visitors in Fig.13(a), (d)

置における閲覧者の密度分布 (人/m²) を表し，最大値が 1.44 から 1.37 へ，平均密度が 0.32 から 0.20 へ減少した．これらの結果より，混雑が緩和されていることが理解できる．

次に，個体 200 個に関して，空間内を移動していた時間 (空間を滞在していた時間から展示品を閲覧していた時間を除いたもの) の分布と平均，および，各展示品への満足度の分布 (s_e の値) をそれぞれ図 17，18 に示す．いずれも，青が最適化前，赤が最適化後の値を示す．図 17 より，最適化により閲覧者は短い時間で全ての展示品を閲覧できたことが分かる．一方，図 18 から，閲覧者の満足度が大きくなっていることが理解できる．特に，最適化前では混雑のため閲覧をあきらめる者 (s の値が零の者) が数多く存在したのに対し，最適化後ではこれがほとんどいない．これらの結果に対して t 検定を行ったところ，空間内移動時間の平均では最適化前後で有意差 (99% の信

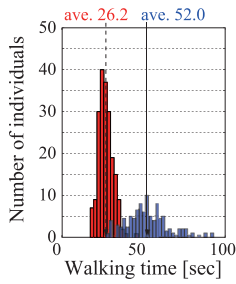


Fig. 17 Distribution of walking time

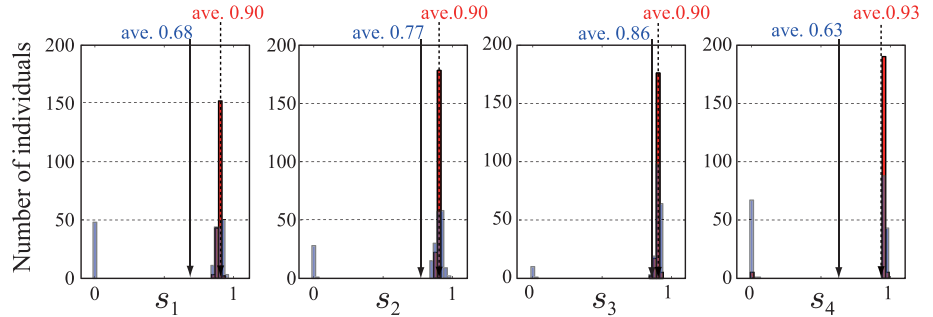


Fig. 18 Distribution of visitors' satisfaction level

頼度)があり, 展示品への満足度の平均でも最適化前後で有意差(すべての展示品に対して99%の信頼度)があった。これらの結果から, 短い時間でじっくり閲覧できる空間が設計できたことが分かる。

図19に展示品の異なる初期配置から最適化を行った結果を示す。いずれも図13と同様の配置が得られること

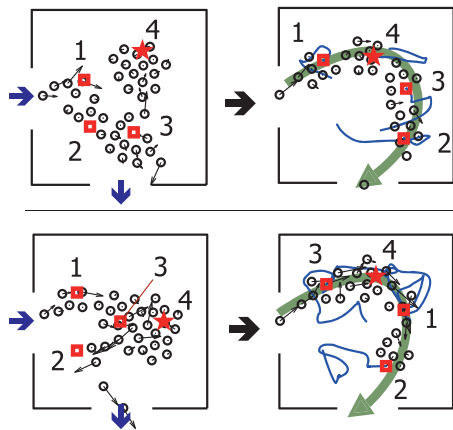


Fig. 19 Optimization results from other initial positions

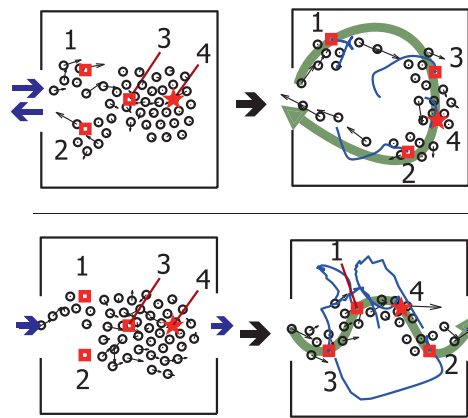


Fig. 20 Optimization results for other space

から, この配置が最適であると判断できる。ただし, 展示物1, 2, 3はその魅力が等しいので場所が入れ替わるケースがみられるが, 最も魅力ある展示品4は同様の位置に来ている。この結果についてはさらに考察する必要がある。図20は出口の位置が異なる場合の最適化結果を示す。いずれの場合も混雑が緩和され, 暗黙の順路が形成されている。

4. 群ロボットを用いた実験検証

4.1 移動ロボット

本章では, 群ロボットを用いた実験により提案手法の有効性を検証する。模擬的な小型のイベント空間内でモデルの移動規則を基に移動する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てその様子を観察する。図21に使用した移動ロボットを示す。このロボットはバッテリー駆動であり, CPU, 移動平面内の位置・姿勢センサ, 距離センサを搭載し, 無線LANによってサーバと通信する。また, ロボット下部に取り付けられた3つのオムニホイールにより全方向移動が可能であるが, ロボットの前後を設定し横への移動はしないこととした。自律移動するロボットは位置センサ, 距離センサの情報をもとに, 式(13)の規則で移動させるが, 満足度や展示品への引き込みに関する計算はサーバで行い, データを通信することとした。ラジコン操作するロボットでは送られたカメラ映像を見ながら操作者が指令を送ることとした。ロボットを用いることで, 人の計測よりも小さな空間での実験が可能となり, また, 個体の位置が正確に計測できる。

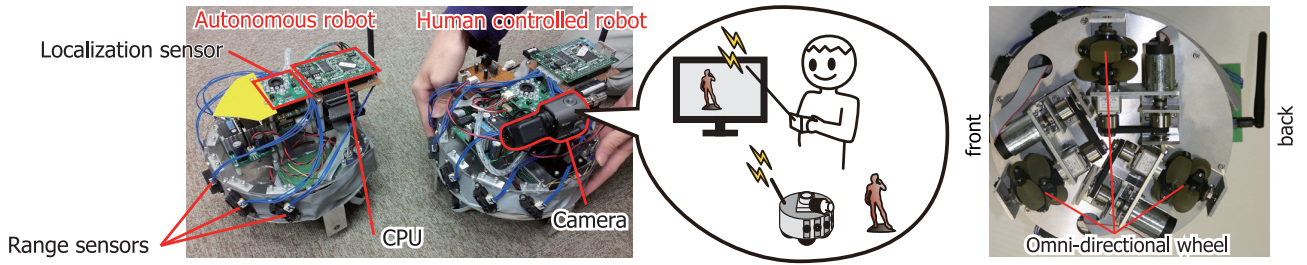


Fig. 21 Autonomous robot and human controlled robot

4.2 人のモデルの検証

まず，式 (12) および (13) の妥当性について検証する．図 22 のように，赤い四角形で表される展示品の周辺に停止したロボットを置き，自律移動またはラジコン操作によって移動するロボット 1 台を空間に入れて動かす．試行

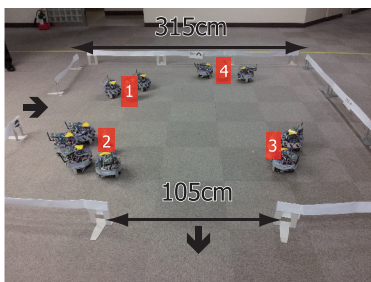


Fig. 22 Arrangement of stopping robots

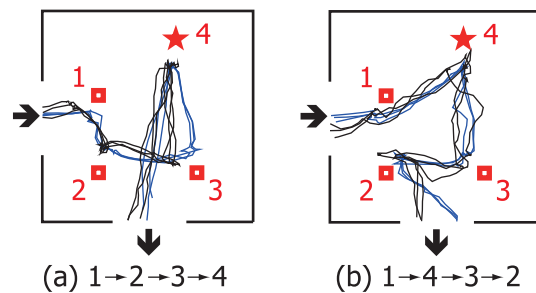


Fig. 23 Comparison of trajectories

をそれぞれ 14 回行い，ラジコン操作ロボットの操作者は 7 人で，1 人 2 回ずつ移動してもらった．操作者にはまず，全体の空間形状と展示品位置を確認してもらい，その後，モニタに映し出されたカメラの映像だけを見ながら，各展示品を好みの順番で閲覧するよう指示した．この結果，主に $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ と $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ の順で閲覧する結果が多く見られた．このときの，自律移動ロボットとラジコン操作されるロボットの軌跡を比較した結果を図 23 に示す．青線は自律移動ロボットの軌跡，黒線はラジコン操作ロボットの軌跡を表す．これらの軌跡が

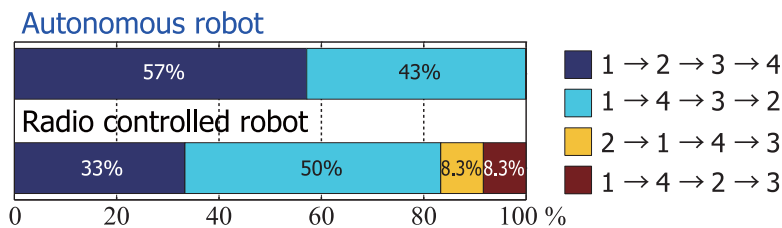


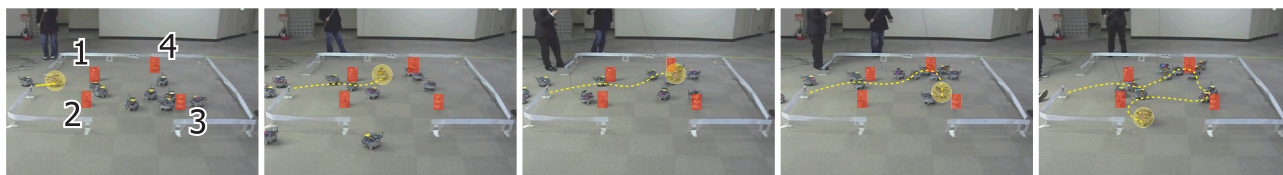
Fig. 24 Comparison of exhibits selection

ほぼ等しいことから，式 (13) の移動規則は人の動きを良く表していると言える．なお，自律移動ロボットの移動速度，閲覧時間はラジコン操作ロボットの結果をもとに定めた．次に，閲覧した順序の割合を求めた．この結果を図 24 に示す．自律移動ロボットとラジコン操作ロボットで閲覧順序がほぼ同等の割合で選ばれており，式 (12) の選択確率が人をモデル化していると判断できる．

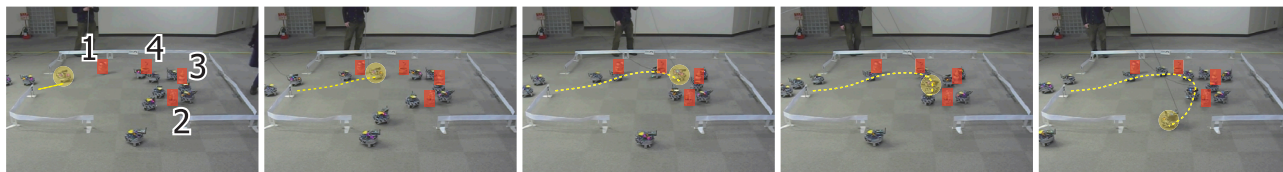
4.3 配置最適化の検証

次に，10 台の自律移動ロボットと 2 台のラジコン操作ロボットを用いて提案手法の有効性を検証する．展示品を図 13 の (a) と (d) のように配置し，閲覧を行ってもらう．ただし，ロボットの台数が有限であることから，自律移動ロボットは出口から出た後に，戻って再び入口から進入することで常に一定間隔で部屋に入る人を実現する．

さらに、空間に進入する時間間隔が等間隔になるよう制御した。ラジコン操作ロボットの操作者は4人で、(a)、(d)の設置でそれぞれ3回ずつ移動してもらった。なお、ラジコン操作の際、目指す展示品や出入口までの途中が混雑しているときは、無理に迂回せずその場で混雑が無くなるのを待つか、隙間を見つけてゆっくり進むよう指示した。実験の様子を図25に示す。黄色の丸が2台のラジコン操作ロボットのうちの1台、黄色の破線がその口



(a) Distribution of exhibits type (a) in Fig.13



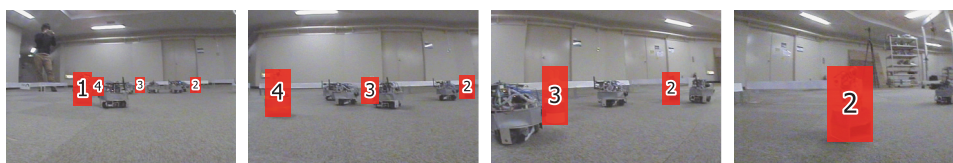
(b) Distribution of exhibits type (d) in Fig.13

Fig. 25 Birds-eye views of the experiment

ロボットの移動軌跡、赤い四角形が展示品位置を表す。(a)の配置では展示品3や4の周辺に混雑が生じているが、(d)の配置では混雑は見られない。また、ラジコン操作ロボットの軌跡を見ると、(a)の配置では他のロボットを避けながら何度も向きを変えて空間内を移動しているが、(d)の配置ではスムーズな軌跡が描かれている。また、これは暗黙の経路と一致する。ラジコン操作ロボットに取り付けられたカメラから見た様子を図26に示す。(a)の配置では、カメラの前に他のロボットがあることにより展示品が見えづらく全体的に空間の見通しが悪い。特に、対向するロボットもあり進みにくい様子が分かる。一方、(d)の配置では先の展示品が見え暗黙に誘導されている様子が理解できる。



(a) Distribution of exhibits type (a) in Fig.13



(b) Distribution of exhibits type (d) in Fig.13

Fig. 26 Camera views from the radio controlled robot

最適化前後の配置でのラジコン操作ロボットの展示品への満足度と、空間内の滞在時間を調べる。ここでは12台分のデータを記録した。なお、操作者には展示品を閲覧している間はボタンを押してもらい、これを閲覧時間として用いた。図17, 18と同様に、出口から出たロボットの空間内を移動していた時間(空間を滞在していた時間から展示品を閲覧していた時間を除いたもの)の分布と平均をそれぞれ図27に示す。また、展示品への満足度を図28を示す。なお、図27は人に操作されたロボットについてのみ、図28は全てのロボットについて数をまとめたものである。シミュレーションと同様に、最適化前より最適化後の方が空間滞在時間が短くなり、それに関

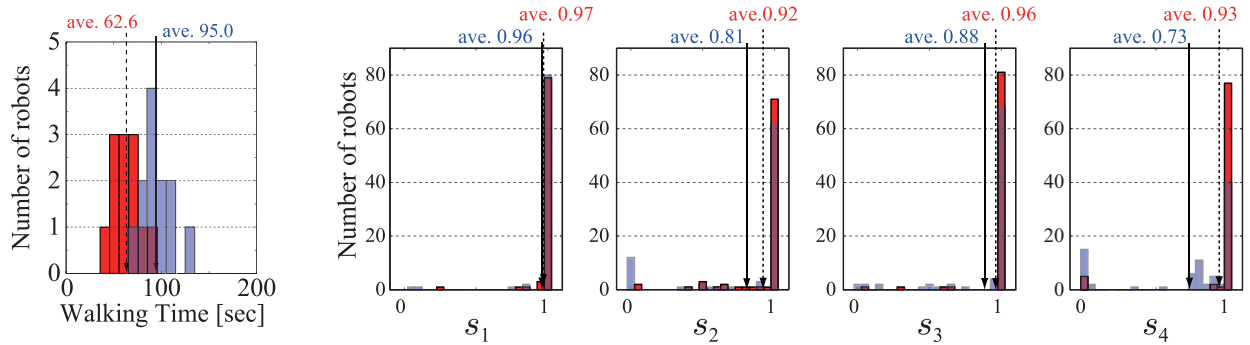


Fig. 28 Visitors' satisfaction level (experiment)

Fig. 27 Walking time (experiment)

ならず展示品への満足度の平均は高くなったことが分かる。また、 t 検定の結果、図 27 では 99% の信頼度で優位さあり、図 28 では展示品 2, 4 について 99% の信頼度、展示品 3 で 95% の信頼度で優位さありとの結果を得た。

これらより、最適化により、閲覧者が短い時間で展示品を満足に閲覧できるアメニティ空間が設計されており、提案した最適化手法が有効であることが示された。

5. お わ り に

本論文では、オープンプラン型のイベント空間を対象としたアメニティ空間を設計するための展示品配置最適化手法を提案し、その有効性を検証した。以下に成果を示す。

1. オープンプラン型のイベント空間における閲覧者の流れのモデル化を行った。ここでは、仮想空間におけるベクトル場の座標変換と平面への射影を用いることで、経路に沿ったベクトル場を容易に変更する方法を提案した。また、閲覧する展示品を選択する確率を展示品の近さ、閲覧している人数、出口からの遠さに基づいて決定する方法を提案した。
2. 提案した人の動きのモデルに基づいて、他人との反発ベクトルを小さくすること、閲覧者人数の均一化を図ること、経路を短くすることを評価関数とした展示品の配置最適化手法を提案した。
3. シミュレーションによって、提案手法により混雑が緩和すること、短い時間でじっくり閲覧できること、閲覧者は暗黙の順路に誘導されることを示した。
4. 自律移動ロボットと人に操作されるロボットの動きを比較することで、提案した閲覧者の流れのモデル、展示品の選択確率が人のそれらを良く表していることを示した。
5. 自律移動ロボットと人に操作されるロボットが混在する空間を利用し、提案する手法で得られた展示品配置が混雑を緩和させ、展示品を短い時間でじっくり閲覧できる空間が設計されたことを検証した。

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

- Braun A., Musse S. R., de Oliveira L. P. L. and Bodmann B. E. J., Modeling individual behaviors in crowd simulation, Proc. of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents (2003), pp.143–148.
- Fruin, J. J., Pedestrian planning and design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners (1971).
- Helbing D., Farkas I. and Vicsek T., Simulating dynamical features of escape panic, Nature, Vol.407 (2000), pp.487–490.
- 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, No.41 (2001), pp.273–276.

- 木村 謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峯岸良和, 吉田克之, 渡辺仁史, マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現: 歩行者シミュレーションシステム SimTread の構築, 日本建築学会計画系論文集, Vol.636 (2009), pp.371-377.
- Lee H. Y., Integrating simulation and ant colony optimization to improve the service facility layout in a station, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 26, No.2 (2011), pp.259-269.
- McLean K., Planning for people in museum exhibitions, Association of Science-Technology Centers (1993).
- 茂木祐一, 山本 江, 岡田昌史, 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第 29 回日本ロボット学会学術講演会 (2011), 1N1-03(CD-ROM).
- 織田瑞夫, 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, Vol.558 (2002), pp.315-322.
- 岡田昌史, 安藤輝尚, 場に基づいた避難誘導のための人員配置最適化, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.4 (2011), pp.395-401.
- Okada M., Motegi Y. and Yamamoto K., Human swarm modeling in exhibition space and space design, Proc. of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2011) (2011), pp.5021-5026.
- Pelechano N. and Badler N. I., Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.26, No.6 (2006), pp.80-86.
- Peponis J., Dalton R. C., Wineman J. and Dalton N., Measuring the effects of layout upon visitors' spatial behaviors in open plan exhibition settings, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 31 (2004), pp.453-473.
- 坪山幸王, 佐藤信治, 水族館の観覧空間における展示水槽・展示物に対する入館者の観覧行動に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.511 (1998), pp.107-114.
- Weng W. G., Chen T., Yuan H. Y. and Fan. W. C., Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow with different walk velocities, Physical Review E, Vol.74, Issue.3 (2006), pp.036102-1-7.
- 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 (1998), pp.261-264.
- 山本 江, 岡田昌史, 人の歩行軌跡データを用いた歩行者群モデルのパラメータ同定と交差流制御への応用第 29 回日本ロボット学会学術講演会 (2011), 1N1-02(CD-ROM).
- 柳澤大地, 西成活裕, 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, 日本応用数理学会論文誌, Vol.17, No.3 (2007), pp.277-290.

References

- Braun A., Musse S. R., de Oliveira L. P. L. and Bodmann B. E. J., Modeling individual behaviors in crowd simulation, Proc. of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents (2003), pp.143-148.
- Fruin, J. J., Pedestrian planning and design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners (1971).
- Helbing D., Farkas I. and Vicsek T., Simulating dynamical features of escape panic, Nature, Vol.407 (2000), pp.487-490.
- Katsuyama M., Takizawa A., Kawamura H. and Tani A., Optimization of location of pictures in a museum by agent model and genetic algorithms, Proc. of the Annual Conference of Architectural Institute of Japan Kinki Branch, No.41 (2001), pp.273-276 (in Japanese).
- Kimura K., Sano T., Hayashida K, Takeichi N, Minegishi Y, Yoshida Y. and Watanabe H., Representation of crowd in multi-agent model: Development of pedestrian simulation system SimTread, Journal of Architecture and Planning, Vol.636 (2009), pp.371-377 (in Japanese).
- Lee H. Y., Integrating simulation and ant colony optimization to improve the service facility layout in a station, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 26, No.2 (2011), pp.259-269.
- McLean K., Planning for people in museum exhibitions, Association of Science-Technology Centers (1993).
- Motegi Y., Yamamoto K. and Okada M., Amenity space design using visitor modeling in exhibition space based on measurement of human traffic line, Proc. of the 29th Annual Conference of the Robotics Society of Japan (2011), 1N1-03(CD-ROM).

- Oda M., Takizawa A., Kawamura H. and Tani A., Construction of simulator of human behavior in continuously defined space and application for planning of building space using agent model, *Journal of Architecture and Planning*, Vol.558 (2002), pp.315–322 (in Japanese).
- Okada M. and Ando T., Optimization of personal distribution for evacuation guidance based on vector field, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.29, No.4 (2011), pp.395–401 (in Japanese).
- Okada M., Motegi Y. and Yamamoto K., Human swarm modeling in exhibition space and space design, *Proc. of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2011)* (2011), pp.5021–5026.
- Pelechano N. and Badler N. I., Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.26, No.6 (2006), pp.80–86.
- Peponis J., Dalton R. C., Wineman J. and Dalton N., Measuring the effects of layout upon visitors' spatial behaviors in open plan exhibition settings, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 31 (2004), pp.453–473.
- Tsuboyama Y. and Satoh S., A study on the visitor's viewing behavior for exhibition tanks and display in viewing space of aquariums, *Journal of Architecture and Planning*, Vol.511 (1998), pp.107–114 (in Japanese).
- Weng W. G., Chen T., Yuan H. Y. and Fan. W. C., Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow with different walk velocities, *Physical Review E*, Vol.74, Issue.3 (2006), pp.036102-1–7.
- Yamamoto H, Morishita S. and Nakano T., Simulation of pedestrian paths by cellular automata, *Proc. of Dynamics and Design Conference*, Vol.B, No.98-8 (1998), pp.261–264 (in Japanese).
- Yamamoto K. and Okada M., Parameter calibration of pedestrian model based on human trajectory and its application to control of pedestrian crossing flow, *Proc. of the 29th Annual Conference of the Robotics Society of Japan* (2011), 1N1-02(CD-ROM).
- Yanagisawa D. and Nishinari K., Analysis on pedestrian flow through an exit by a cluster approximation, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol.17, No.3 (2007), pp.277–290 (in Japanese).