

# オープンプラン型のイベント空間における展示品の最適配置

## Optimal Layout of Exhibits in Open-plan Exhibition Space

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 this research, comfortable open-plan exhibition space is designed by optimizing a space layout. In an open-plan exhibition space, because human flow lines depend on the layout of exhibits, congestion can be reduced by changing the positions of exhibits. In addition, visitors are more satisfied with viewing exhibits in the designed exhibition space because changing only arrangement of exhibits leads to an implicit induction. When congestion exists in an exhibition space, a visitor intends to avoid collisions with others. Thus, the positions of exhibits is optimized by minimizing collision avoidance vector. The proposed method is verified by simulations and experiments using swarm robots which consist of autonomous mobile robots and human controlled robots.

**Key Words:** human flow, 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、展示品の位置を Fig.1 のように変化させることで空間内の混雑が緩和され、快適空間(アメニティ空間)を設計できると考えられる。

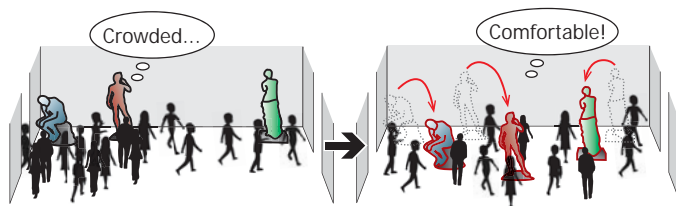


Fig.1 Congestion reduction by changing a space layout

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] においてベクトル場と他人との反発により人の流れをモデル化し、それ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。さらに、文献 [2] においてオープンプラン型の空間の人の流れをモデル化するため、仮想空間場の導入によりベクトル場の設計手法を拡張した。オープンプラン型の空間とは順路が定まっていない空間を指し、動線の詳細が閲覧者主体で決定するため、空間の魅力は順路を定めた空間よりも向上する。

本研究では、文献 [2] で提案したモデルを基に、オープンプラン型のイベント空間における展示品配置を最適化し、アメニティ空間を設計することを目的とする。アメニティ空間の設計手法に関して、勝山ら [3] 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[4] 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。そこで、本研究では任意の場所に設置可能な展示品の位置を最適化する。

最適化の計算に用いる評価関数は、混雑時に感じる他人との反発の大きさとする。他人との反発の大きさが最小になるような展示品配置を求める、また、周囲が混雑した展示品を他の展示品から遠ざけ、空いている展示品を他の展示品と近づけることによって、空いている展示品を閲覧者が先に閲覧できるようにする。これらの効果により混雑を緩和し、閲覧者の展示品への満足度を向上さ

せる。さらに、展示品同士がなるべく直線状に並ぶようにすることによって、閲覧者の空間内の移動時間を減らし、短い時間で満足に展示品を閲覧できる空間を設計する。このように展示品配置を変化させることのみによってアメニティ空間を設計することで、暗黙のスムーズな動線が形成され、オープンプラン型のイベント空間の魅力を失わずに閲覧者を誘導することができる。

提案する空間設計手法の有効性は群ロボットを用いた実験で示す。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実験を行う。ラジコン操作ロボットを使用することで、実際の人の行動と同じ動きを観測することができ、展示品閲覧時間や空間滞在時間などが容易に定量化できる。最適化前後それぞれの配置に展示品を設置した空間に対して実験を行い、ロボットの空間内移動軌跡、滞在時間、展示品への満足度を計測する。ロボットの滞在時間と展示品への満足度を最適化前後で比較し、空間の快適性が向上したことを示すことで、空間設計手法の有効性を示す。

### 2. 閲覧者の流れのモデル化

#### 2.1 仮想空間場を用いた人の流れのモデル化

本章では文献 [2] で提案した仮想空間場を用いた人の流れのモデルと、新たに提案する展示品閲覧順序決定アルゴリズムについて述べる。文献 [2] では仮想空間場  $f$  と写像  $T$  を用いて、人の移動規則を以下のように定めた。

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

$$F = \Delta v \frac{(Tf)(x[k])}{\|(Tf)(x[k])\|} + h + \sum_j v_j + \sum_w v_w \quad (2)$$

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

$x$  は現実空間内の人の位置である。 $Tf$  は仮想空間から写像されたベクトル場を表し、 $h$  は展示品への引き込み、 $v_j$  は他人との反発、 $v_w$  は壁との反発を表す。なお、写像によりベクトル場が歪むことで閲覧者の移動速度が変化することを防ぐため、ベクトル場から計算される速度を  $\Delta v$  に揃える。 $s_e$  は展示品  $e$ (総数  $E$ ) の満足度を表し、 $a$  と以下のような関係を持つ。

$$a = \begin{cases} \sqrt{(\|F\|^2 - \|G\|^2)/\|F\|^2} & (\|F\| \geq \|G\|) \\ 0 & (\|F\| < \|G\|) \end{cases} \quad (4)$$

$$G = [g_1 \quad g_2 \quad \cdots \quad g_E]^T \quad (5)$$

#### 2.2 展示品閲覧順序の決定

閲覧者の行動は視覚情報に基づく [5] ことから、距離が近く、混雑がなく、出口から遠い展示品から閲覧者が閲覧するように閲覧

順序決定アルゴリズムを構築する．閲覧者  $i$  が展示品  $e_2$  の次に  $e_3$  を見に行く確率を

$$P_{e_2}(e_3) = \begin{cases} \frac{w_{e_2,e_3}}{\sum_{e=1}^{E_r} w_{e_2,e}} & (e_3 \in A) \\ 0 & (e_3 \notin A) \end{cases} \quad (6)$$

$$w_{i,j} = \frac{L_j^{n_1}}{\ell_{i,j}^{n_2} N_j^{n_3}} \quad (7)$$

と定める． $E_r$  はまだ閲覧していない展示品の総数， $A$  はその集合， $\ell_{e_2,e_3}$  は展示品  $e_2, e_3$  間の距離， $L_{e_3}$  は出口から展示品  $e_3$  までの距離， $N_{e_3}$  展示品  $e_3$  周りの閲覧者の人数を表す．なお， $A = \phi$  のときは出口に向かう． $n_1, n_2, n_3$  は実際の人の展示品の選び方から求める定数である．

### 3. 展示品の最適配置

#### 3.1 評価関数の設定

本章では，提案したモデルに基づいて展示品配置を最適化することでアメニティ空間を設計する方法を述べる．アメニティ空間を設計するにあたって以下の点に着目する．

1. 混雑の緩和
2. 閲覧者の展示品への満足度向上
3. 閲覧者の空間内の移動時間短縮

まず，着目点 1 と 2 に示した混雑緩和と展示品への満足度向上のための評価関数を設定する．空間内で混雑が発生しているとき，他人との距離が近いときに発生する反発  $v_j$  の大きさが大きくなる．また，Fig.2-(a) の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，Fig.2-(b) のように閲覧者が他人との反発  $v^j$  を受けることであると考えられる．そこで， $v^j$  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ることを考える．個体  $i$  の実際の移動軌跡を座標  $\eta_i$  で表すと，個体の移動ベクトルは Fig.2-(b) に表すように

$$\mathbf{V}^i = \eta_i[k] - \eta_i[k-1] \quad (8)$$

と表せる． $\mathbf{V}^i$  は個体の動きから計測されるものとする．一方， $v_j$  を考慮しない理想的な個体の移動ベクトルは式 (1) から

$$\widehat{\mathbf{V}}^i = a^i \left\{ \Delta v \frac{Tf}{\|Tf\|} + h^i + \sum_w v_w \right\} \quad (9)$$

と表せる．この理想的な動きに個体の現実の動きを近づけるため，それぞれの個体に対して関数  $J_1^i$  を以下のように設定し， $J_1^i = 0$  に近づける．

$$J_1^i = \left\| \mathbf{V}^i - \widehat{\mathbf{V}}^i \right\|^2 \quad (10)$$

また，混雑した展示品にさらに人が集まることを防ぐことを考える．展示品の閲覧順序は式 (6) に基づいて決まることから，展示品周りの混雑を展示品間の距離によって制御することを考える．

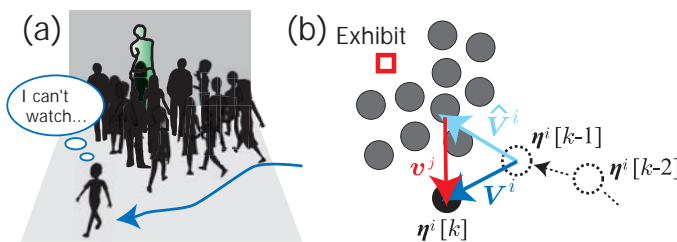


Fig.2 A visitor who isn't satisfied with an exhibit due to congestion

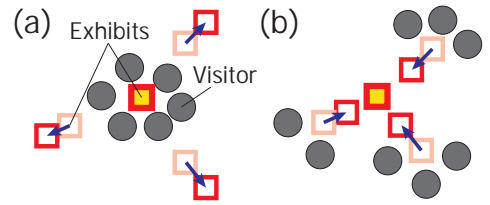


Fig.3 Changing the distance between exhibits

すなわち，周囲が混雑した展示品を Fig.3-(a) のように他の展示品から遠ざけ，空いている展示品を Fig.3-(b) のように他の展示品と近づける．これにより，閲覧者が周囲が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する．そこで，各展示品について評価関数  $J_2^e$  を以下のように設定し， $J_2^e = 0$  に近づける．

$$J_2^e = (N_e - \widehat{N}) \sum_{k=1, k \neq e}^E \frac{1}{\|x_e - x_k\|^2} \quad (11)$$

$x_e, x_n$  は展示品位置， $N_e$  は展示品  $e$  周辺の閲覧者数， $\widehat{N}$  は展示品周辺の最適閲覧者数である． $\widehat{N}$  は展示品閲覧範囲の面積を閲覧者の停止時のパーソナルスペースの面積で割ったものと定義する．

次に，着目点 3 に示した空間内の移動時間を短縮するための評価関数を設定する．Fig.4-(a) のように空間内の動線が直線に近くなるように展示品配置を変更すれば，空間内の移動時間を減らすことができる．そこで，Fig.4-(b) のように 3 つの展示品  $n, e, m$  のなす角  $\alpha_{n,e,m}$  を  $\pi$  に近づけることを考える．各展示品について評価関数  $J_3^e$  を以下のように設定し， $J_3^e = 0$  に近づける．

$$J_3^e = N_{n,e,m} \sum_m \sum_n (|\alpha_{n,e,m}| - \pi) \quad (12)$$

$N_{n,e,m}$  は  $x_n, x_e, x_m$  間を移動している閲覧者の人数である．

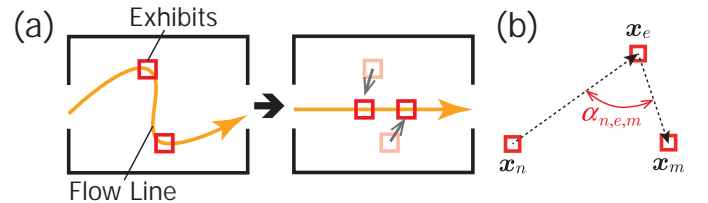


Fig.4 Changing the distance between exhibits

#### 3.2 展示品位置の更新

式 (10), (11), (12) の勾配を用いて，展示品位置  $x_e$  をすべて並べたベクトル  $\mathbf{E}$  を

$$\mathbf{E} \leftarrow \mathbf{E} - \sum_{n=1}^3 \widehat{\omega}_n \left( \frac{\partial \mathbf{J}_n}{\partial \mathbf{E}} \right)^{\#} \mathbf{J}_n^T \quad (13)$$

$$\mathbf{E} = [x_1^T \ x_2^T \ \cdots \ x_E^T]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{J}_1 = [J_k^1 \ J_k^2 \ \cdots \ J_k^N]^T \quad (k = 1, 2, 3) \quad (15)$$

とオンラインで更新して，評価関数を 0 に近づける． $\widehat{\omega}$  は定数， $E$  は展示品の総数である．なお，勾配に含まれる閲覧者数は整数であることから，以下のように各勾配は過去の重み付き平均をとる．

$$\frac{\partial \widehat{\mathbf{J}}_n}{\partial \mathbf{E}} = \sum_{\ell} \omega_{k-\ell} \left( \frac{\partial \mathbf{J}_n}{\partial \mathbf{E}} [k-\ell] \right) \quad (16)$$

これにより展示品位置が激しく変わることを防ぐ．

### 3.3 最適化シミュレーション

式 (13) の更新規則に基づき、空間内の展示品配置をオンラインで最適化する。出口と入口の場所が部屋を中心として 90°異なる正方形の空間に展示品を 4 つ設置し、最適化を行った様子を Fig.5 に示す。Fig.5-(a) のような初期配置から最適化を行った結果、Fig.5-(b) のようになった。黒色の実線が壁、黒色の丸が閲覧者に見立てた個体、黒色の矢印がその瞬間の個体の速度、赤色の四角形と星形が展示品、緑色の実線が展示品の移動軌跡を表している。赤色の星形の展示品は他の 3 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。Fig.5-(a) では、展示品 4 の周辺や展示品 2 と 3 の間で混雑が発生しているが、Fig.5-(b) では混雑が解消され、橙色の矢印のような暗示的にスムーズな一方方向の動線が形成されていることが分かる。

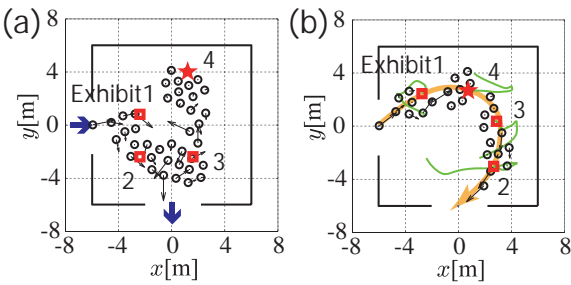


Fig.5 Optimization of space layout in an exhibition space

最適化前後で閲覧者の滞在時間と展示品への満足度がどの程度向上しているかを調べる。Fig.5-(a), (b) それぞれの配置に展示品を固定して、モデルに基づいて移動する個体を入口から次々に入れるシミュレーションを行った。出口から出た個体 200 個の空間内移動時間の分布と平均をそれぞれ Fig.6 のヒストグラムに示す。Fig.6-(a) が最適化前、Fig.6-(b) が最適化後の配置で統計をとったものであり、赤い矢印が平均値を表す。また、各展示品への満足度の分布と平均を最適化前後で比較したものを Fig.7 のヒストグラムに示す。これらの結果を見ると、Fig.6 の結果から、最適化前より最適化後の方が各個体の空間滞在時間が短くなったことが分かり、Fig.7 の結果から、それに関わ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。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に最適化前後で有意差 (99% の信頼度) があり、展示品への満足度の平均に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。したがって、最適化により混雑が少なく、閲覧者が短い時間で展示品を満足に閲覧できるようなアメニティ空間が設計できたことが分かる。

さらに、出口と入口の場所が部屋を中心として 180°異なる空間に展示品を 4 つ設置し、提案手法により同様に最適化を行った様子を Fig.8 に示す。Fig.8-(a) のような初期配置から最適化を行った結果、Fig.8-(b) のようになった。Fig.8-(a) では、展示品 3 と 4 の周辺で混雑が発生しているが、Fig.8-(b) では混雑が解消され、Fig.5

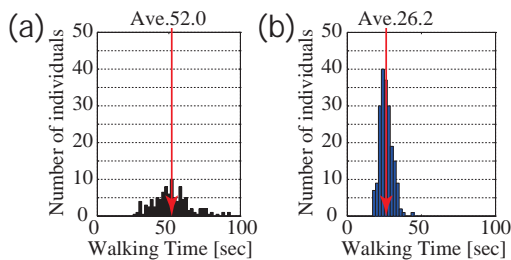


Fig.6 Distribution of walking time before and after the optimization

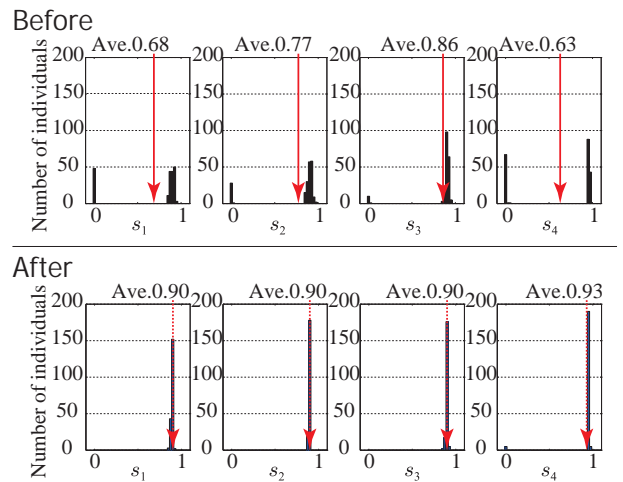


Fig.7 Distribution of visitors' satisfaction level before and after the optimization

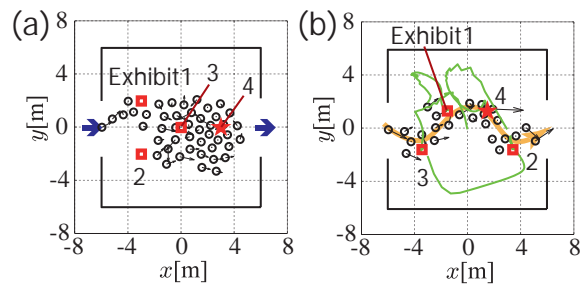


Fig.8 Optimization of space layout in another exhibition space

と同様に橙色の矢印のような暗示的にスムーズな一方方向の動線が形成されていることが分かる。この結果から、提案手法により空間ごとに最適配置を求めることが可能であることが分かる。

## 4. 群ロボットを用いた実験検証

### 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、群ロボットを用いて検証を行う。小型のイベント空間内に Fig.5-(a), (b) それぞれの配置に展示品を置き、モデルを基に自律移動するロボットの中に人間がラジコン操作するロボットを混ぜて移動させ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る。ロボットの空間滞在時間と展示品への満足度を最適化前後で比較し、空間設計手法の有効性を検証する。Fig.9 に使用したロボットを示す。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。Fig.9-(a)

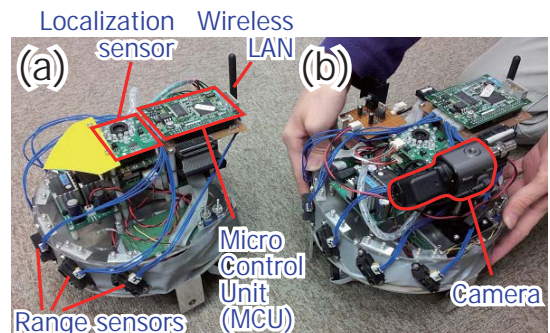


Fig.9 Autonomous mobile robot and radio controlled robot

は自律移動ロボットであり、モデルに基づき移動させる。他のロボットおよび展示品との衝突回避は、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。Fig.9-(b) はラジコン操作ロボットである。ロボットに搭載された小型カメラの映像情報はモニタに送られ、操縦者はそのモニタを見ながらコントローラを用いてロボットをラジコン操作する。ラジコン操作ロボットの操作者は4人で、最適化前後の位置に展示品を設置した空間をそれぞれ1人3回ずつ移動してもらった。

#### 4.2 実験結果

実験の様子を Fig.10 と添付の動画に示す。Fig.10-(a) が最適化前、Fig.10-(b) が最適化後の配置で実験を行った様子である。Fig.10 の上段は空間を俯瞰したものであり、下段は入口付近をラジコン操作ロボットのカメラから見た映像である。赤い四角形が展示品、黄色い丸がラジコン操作ロボットを表している。上段を見ると、最適化前よりも最適化後の方が展示品4周辺のロボットの数が少ないことが分かる。さらに下段を見ると、カメラから見た映像でも最適化前よりも最適化後の方がロボットの台数が少なく、空間内の見通しも良いことが分かる。

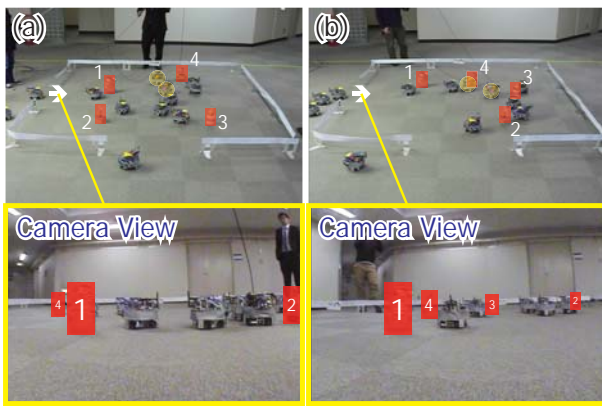


Fig.10 Birds-eye views of the experiment and camera views of the radio controlled robot

続いて、最適化前後の自律移動ロボットの展示品への満足度と、空間内移動時間を比較する。今回は自律移動ロボット85台分、ラジコン操作ロボット12台分のデータを記録した。出口から出たロボットの空間内移動時間の分布と平均をそれぞれ Fig.11 のヒストグラムに示す。Fig.11-(a), (b) が自律移動ロボット、Fig.11-(c), (d) がラジコン操作ロボットのヒストグラムである。また、Fig.11-(a), (c) が最適化前、Fig.11-(b), (d) が最適化後の配置で統計をとったものであり、赤い矢印が平均値を表す。さらに、自律移動ロボットの各展示品への満足度の分布と平均を最適化前後で比較したものを Fig.12 のヒストグラムに示す。これらの結果を見ると、Fig.11 の結果から、自律移動ロボット、ラジコン操作ロボット共に、最適化前より最適化後の方が空間滞在時間が、短くなったことが分かり、Fig.12 の結果から、それに関わ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。これらの結果に対して  $t$  検定を行ったところ、自動操作ロボット、ラジコン操作ロボット共に空間内移動時間の平均に最適化前後で有意差 (99%の信頼度) があり、自律移動ロボットの展示品 2, 3, 4 への満足度の平均にも最適化前後で有意差 (展示品 2 と 4 で 99%, 展示品 3 で 95%の信頼度) があった。したがって、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となっており、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

本研究では、オープンプラン型のイベント空間における展示品配置を最適化し、アメニティ空間を設計した。成果を以下に記す。

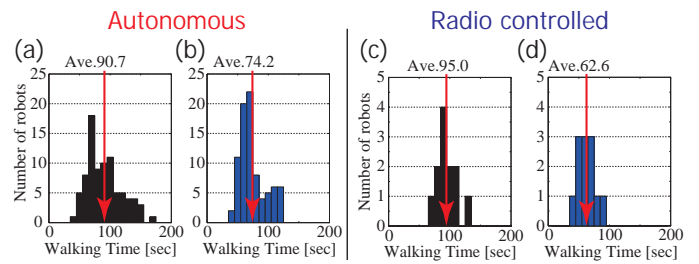


Fig.11 Distribution of walking time of mobile robots before and after the optimization

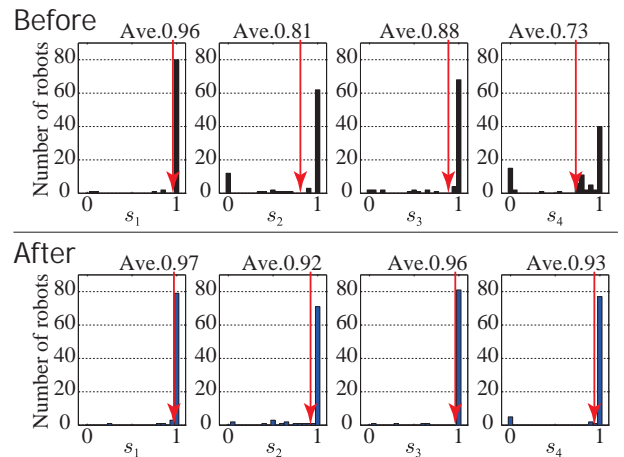


Fig.12 Distribution of satisfaction level of autonomous mobile robots before and after the optimization

- 他人との反発の最小化, 展示品間距離の調節, 展示品を直線状に整列させることによって, 混雑を緩和し, 短い時間で十分に展示品を閲覧できるアメニティ空間を設計した。
- 展示品配置の最適化により, 暗黙のスムーズな動線が形成され, オープンプラン型の魅力を失わずに閲覧者を誘導した。
- 提案した空間設計手法により, 空間ごとに最適配置が求められることを示した。
- 提案した空間設計手法の有効性を, 群ロボットを用いた実験検証により示した。

#### 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。

#### 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] 茂木, 岡田. 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. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 1A2-T09(CD-ROM), 2012.
- [3] 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.
- [4] Hsin-Yun Lee. 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, pp. 259–269, 2011.
- [5] J. Peponis, R.C. Dalton, J. Wineman, and N. Dalton. Measuring the effects of layout upon visitors' spatial behaviors in open plan exhibition settings. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 31, pp. 453–473, 2004.