

商業施設における人の流れのモデル化と 快適空間実現のための環境設計

山本 江^{*1}, 岡田 昌史^{*1}

Modeling of Pedestrian Flows and Environmental Design for Amenity in Commercial Space

Ko YAMAMOTO^{*1} and Masafumi OKADA^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology
Oookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

In the commercial space, there are a lot of pedestrian flows. These flows often cross each other, and change goals, e.g. front desk or ticket machine. Moreover, too long people line at a goal sometimes blocks up other flows. This phenomenon leads us to discomfort feeling. In order to reduce the congestion and realize the amenity, the environmental design considering the swarm behavior of people is required. In this paper, the authors focus on the formation of people line at a goal and propose the formation control of the line by the optimization of guide robots. The validity of proposed control method is verified with simulations.

Key Words : Control of Swarm Behavior, Amenity Space Design, Inverse Kinematics

1. はじめに

大都市では多くの人の流れが存在し、しばしば混雑が生じる。特に、駅構内やイベント会場、食堂などの商業施設では目的地の異なる流れが複数存在し、それらが時々刻々と変化する。例えば、駅構内では電車の発着に伴い人の流れは時間的に変化する。また、時間によって券売機に並ぶ人の列が発生し、他の流れの妨げになる。展示会場などでは、受付カウンターから各ブースへと目的地が変化する流れが存在する。大学の食堂なども同様で、券売機からカウンター、テーブル、食器の返却口へと目的地が変化していく。このように混雑が発生する商業施設において利用者の不快感を軽減するためには、券売機やカウンターなどの配置の設計・順路の計画といった環境設計が重要になる。従来、環境設計への応用を目指して人の流れをモデル化する研究が多く行われてきた。Helbingら⁽¹⁾は Social Force Model を提案し、目的地への引きつけ力、および衝突回避等の他人との相互作用力から成る運動方程式により歩行者の運動をモデル化した。さらに、Social Force Model と同様のモデルに予測による衝突回避行動を取り入れたもの⁽²⁾⁽³⁾や、目的地の選択など高次の意思決定機能を含むモデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾が提案されてきた。これらは局所的な情報に基づいて一人一人に単純な行動

ルールを与えるものだが、多数の歩行者が群を形成したときに見られるマクロな現象（対向流における lane formation⁽⁶⁾や交差流における縞状パターン形成⁽⁷⁾など）も再現されている。

一方、混雑の緩和・不快感の軽減には人の流れを操作するための制御法・環境設計法が必要になる。特に不特定多数の人の群を扱う場合には、個人個人への指示やナビゲーション⁽⁸⁾よりも群全体が持つマクロな挙動を間接的・暗示的に操作する方が望ましい。マルチエージェントシステムや群ロボットの分野では、多数のエージェントを少数の入力によって目的地へ誘導する「牧羊犬システム」⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が提案されている。また、Okadaらは展示会場内の人の流れに対しパーティションの配置によって混雑を緩和する方法⁽¹¹⁾や、展示物の最適配置によって混雑緩和と満足度向上を実現する方法⁽¹²⁾を提案した。著者ら⁽⁷⁾は、交差流現象において平均流速を増加させるような制御法を提案した。提案手法では流れの中に配置した少数の誘導員に移動則を与え、一般の歩行者がこの誘導員との衝突を回避する効果を利用して流れ全体を変化させた。これらは単一の人の流れや混雑度が定常状態に収束するような現象を対象としている。商業施設を対象とする場合は、時間的に変化する複雑な人の流れを扱わなければならない。

本稿では、商業施設内における 1) 複数の目的地を順に移動する人の流れと 2) 目的地において列を形成する人の行動に着目し、そのモデル化と混雑緩和のため

^{*1} 東京工業大学大学院理工学研究科 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2 - 12 - 1) yamamoto@micro.mep.titech.ac.jp

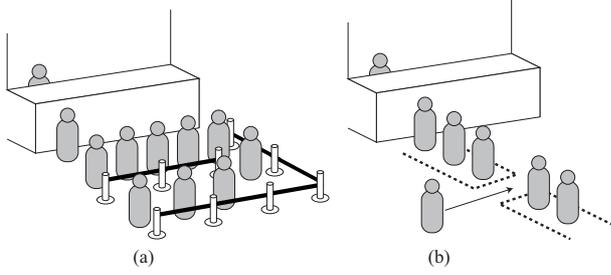


Fig. 1 People line in commercial space

の環境設計を行う．特に，人の列が長蛇になることは他の流れを妨げるなど不快感の要因となる．商業施設によっては Fig. 1(a) のようにパーティションによって整列させたり，(b) のように列を分断させるような目印を床に貼ることで他の人の流れを妨げないようにする方法等が採られている．しかし，これらのパーティションは静的であり，列の増減など時々刻々と変化する環境に対応することは難しい．そこで，本研究では案内ロボットによって列の形状を動的に制御することで快適空間の実現を目指す．まず，列を形成している人の行動を多リンク系の運動としてモデル化し，ある設定された領域内に収まるような列の形状を逆運動学計算により求める．次に，得られた参照形状を実現するような案内ロボットの配置を最適計算する．

2. 商業施設における人の流れのモデル化

2.1 複数の目的地を順次移動する行動モデル 本稿では，人々が複数の目的地に停止しながら順々に移動していく行動をモデル化する．2次元平面内における人の移動を考え，ある人物 i の位置を $x_i \in R^2$ とする．また，各目的地 a_j には以下のような放射状の速度ベクトル場を設定する．

$$f_j(x) = -\frac{x - a_j}{\|x - a_j\|} v_0 \quad (1)$$

ただし， v_0 は一般的な人の歩行速度を表す．例えば，Fig. 2 のように，人物 i が目的地 a_{j-1} を出発し，次の目的地 a_j へ向かって移動している場合，その速度は次式のように与えられる．

$$v_{ij} = f_j(x_i) \quad (2)$$

ここで，人物 i が 1) a_{j-1} から a_j へ移動，2) a_j で一定時間停止，3) a_j から a_{j+1} へ移動，という一連の移動を表すために，文献⁽¹²⁾と同様に a_j において人物 i が停止している時間 z_{ij} を導入する．また，以下のようなパラメータを導入する．

$$\delta_{ij} = 1 - s(\|x_i - a_j\|) \quad (3)$$

$$\epsilon_{ij} = 1 - s(d_{z_j} - z_{ij}) \quad (4)$$

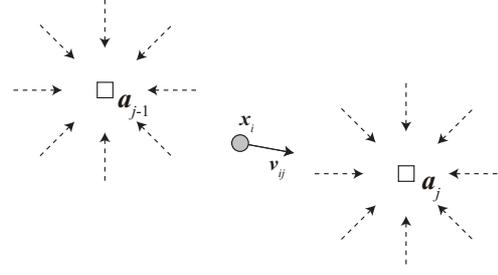


Fig. 2 Modeling of the pedestrian behavior traveling goals

Table 1 Temporal average velocity [m/s] of the particles

Behavior of a person i	δ_{ij}	ϵ_{ij}	v_i	z_{ij}
travel from a_{j-1} to a_j	1	1	v_{ij}	0
stop at a_j	0	1	0	Δt
travel from a_j to a_{j+1}	1	1	v_{ij+1}	0

ただし， $s(x)$ は次式で定義されるシグモイド関数である．

$$s(x) = \frac{c}{1 + \exp\{a(x - b)\}} \quad (5)$$

δ_{ij} はベクトル場を有効にするパラメータであり，人物 i が目的地 a_j から離れていれば 1，十分近ければ 0 の値をとる．また， ϵ_{ij} は停止時間 z_{ij} を増加させるパラメータであり，各目的地 a_j に設定された停止時間 d_{z_j} よりも現在地 z_{ij} が小さければ 1，十分に近い値であれば 0 の値をとる．これらのパラメータを用いて，以下のように人物 i の速度 v_i と目的地 j での停止時間 z_{ij} を更新する．

$$v_i = \sum_j \delta_{ij}(1 - \epsilon_{ij-1})\epsilon_{ij}v_{ij} \quad (6)$$

$$z_{ij}[t + \Delta t] = z_{ij}[t] + \sum_j (1 - \delta_{ij})\epsilon_{ij}\Delta t \quad (7)$$

ただし， Δt はサンプリングタイムであり， $\epsilon_{i0} = 0$ とする．パラメータ δ_{ij} ， ϵ_{ij} と v_i ， z_{ij} の関係を Table. 1 に示す．式 (6)，式 (7) により，ベクトル場を自動的に切り替えながら順々に目的地を移動することができる．

目的地 a_j において別の人物 $k(k \neq i)$ が停止している場合，その人物の後方に並ぶことで列が形成される．人物 k の位置を x_k とすると，このような行動は人物 i の目的地を x_k に切り替えることで x_j の前で一時的に停止する行動をモデル化できる．次節では，列を形成している人々の行動のモデル化について述べる．

2.2 列を形成する行動のモデル化 ある目的地に m 人の人が列を作って並んでいる状況を想定する．Fig. 3 のように，ある目的地に並んでいる人の位置を

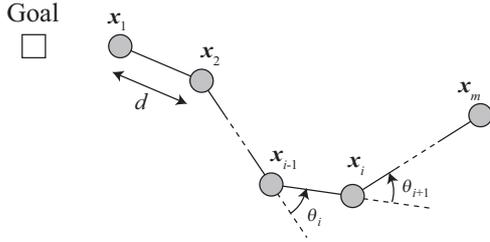


Fig. 3 Modeling of people line formation

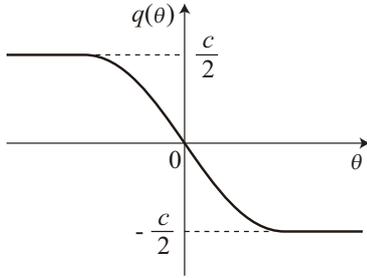


Fig. 4 Angle velocity function $q(\theta)$ which represents a pedestrian facing the same direction as the anterior person

x_i ($i = 1, \dots, m$) とする．また， i 番目の人と前方に並んでいる $i-1$ 番目の人の相対角度を θ_i とおく．ここで，各人物は前方の人と一定距離 d を保って並ぶものとする．このとき， x_i と x_{i-1} の関係は次式のように書ける．

$$x_i = x_{i-1} + R(\theta_i) \cdots R(\theta_1) d \quad (8)$$

ただし， $R(\theta_i) \in SO(2)$ は 2 次元の回転行列である．また， $d = [d \ 0]^T$ とした． x_1 を既知として，最後尾の人物の位置 $x_e = x_m$ は式 (8) から漸次的に計算できる．結果， x_e は以下のように角度をまとめたベクトル $\theta = [\theta_1 \cdots \theta_m]^T \in R^m$ の関数となる．

$$x_e = f(\theta) \quad (9)$$

これは列を形成している人々を多リンク系の運動としてモデル化することを意味する．

実際に列に並ぶ人は前方の人と同じ方向を向くように並ぼうとする．これは， x_{i+1} は前方の人 x_i との角度 θ_i が 0 となるように並ぶことに相当する．そこで， θ_i に以下のような角速度を与える．

$$\dot{\theta}_i = q(\theta_i) \equiv \frac{c}{1 + \exp(a\theta_i)} - \frac{c}{2} \quad (10)$$

ただし， $q(\theta)$ は Fig. 4 のような概形をとる関数である．ここで， c は $q(\theta)$ の値域を指定するパラメータ， a は $\theta = 0$ での $q(\theta)$ の傾きを決めるパラメータである．また， $q(-\theta) = -q(\theta)$ である．各時刻の角度を

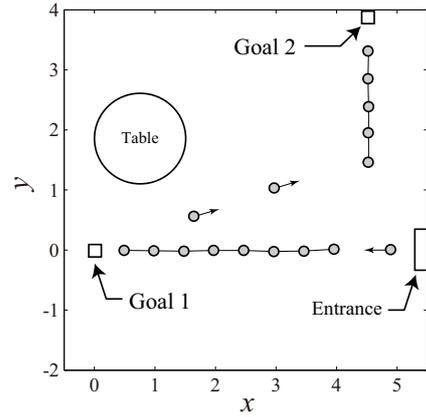


Fig. 5 Simulation of human behavior in a commercial space

$\theta_i[t + \Delta t] = \theta_i[t] + \dot{\theta}_i \Delta t$ と更新することで，列が直線状になるように並ぶ．

2.3 複数の目的地を移動する人の流れのシミュレーション 以上のようなモデルに基づいて，複数の目的地を順次移動しながら移動する人の行動をシミュレーションした．Fig. 5 のような単純な環境において入口から入場した人が目的地 1 へ向かって移動し，一定時間停止した後，次の目的地 2 へ向かって移動を開始する状況を想定している．図中，矢印付の丸が移動中の人物を，直線で結ばれた丸が目的地の前方で列を作って並んでいる人々を表す．式 (10) の効果によって，目的地 1 の前で直線状の列が形成されている様子が確認できる．

Fig. 5 のシミュレーションでは，人々の入場頻度に比べて目的地 1 での停止時間 d_{z1} が長く設定しているため，時間が経過するにつれて列が長蛇になっていく．そのため，目的地 1 で形成された列と目的地 2 の列と交差する等，人の列が複雑になって行くことが考えられる．そこで，列がその他の人の流れを阻害しないように列の形状を動的に変えることで快適な空間を実現する．

3. 人数に応じた列形状の制御

3.1 逆運動学による目標形状の計算 前節で提案したモデルのように，人の列に対して障害物やパーティション等がない場合には各個人の意思により自然と直線状の列が形成される．本稿ではこの列形成の現象に対し，案内ロボットを用いて列を動的に変形させることを考える．しかし，どの程度の数の案内ロボットを列のどの位置に配置するかを決めることは一般的に難しい．そこで，1) 列の目標形状を多リンク系の逆運動学計算により求め，2) それに基づき案内ロボット

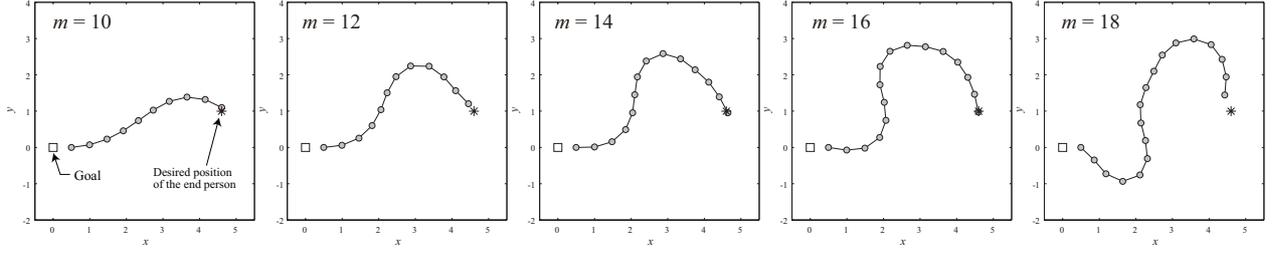


Fig. 6 Referential formations of people line obtained by solving the inverse kinematics

の位置を決定する。

目標形状は、空間内の他の物体や人の列を妨げないように、ある一定領域に収まるものが望ましい。本稿では簡単な例として、ある領域内に収まる形状を計算する代わりに最後尾の人の位置 x_e をある目標値 ${}^d x_e$ にするような形状 θ を求める。 ${}^d x_e$ を目的地 x_0 の近くに設定することで列が長蛇になることを防ぐことができる。これは多リンク系の逆運動学計算に相当する。また、1) 得られる形状の中にループが含まれない、2) 他の流れや物体の妨げとならないように形状全体を x_0 と ${}^d x_e$ の間の領域に収まる、という二点を満たす形状が得られるように次式のような評価関数 J_1 を設定する。

$$J_1 = \frac{1}{2} \left(\|{}^d x_e - x_e\|^2 + \left\| \sum_i \theta_i \right\|^2 + \|{}^d \bar{x} - \bar{x}\|^2 \right) \quad (11)$$

右辺第2項は角度の総和を最小化することを意味し、これにより形状の中にループが発生することを防ぐ。また、右辺第3項中の \bar{x} は次式のような人々の位置の平均値である。

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \quad (12)$$

右辺第3項は \bar{x} を目標値 ${}^d \bar{x}$ に近づける効果を持つ。 ${}^d \bar{x}$ は、例えば次式のように目的地 x_0 と最後尾の目標位置 ${}^d x_e$ の中点に設定することで、列全体を x_0 と ${}^d x_e$ の間の空間に収めることができる。

$${}^d \bar{x} = \frac{x_0 + {}^d x_e}{2} \quad (13)$$

本稿では、評価関数 (11) を最小にする θ を以下のように勾配法によって計算する。

$$\theta \leftarrow \theta - \alpha \left(\frac{\partial J_1}{\partial \theta} \right)^T \quad (14)$$

ただし、 α は定数である。勾配ベクトル $\frac{\partial J_1}{\partial \theta}$ は以下

のように変形できる。

$$\frac{\partial J_1}{\partial \theta} = -({}^d x_e - x_e)^T \frac{\partial x_e}{\partial \theta} + \left(\sum_i \theta_i \right) [1 \cdots 1] - ({}^d \bar{x} - \bar{x})^T \frac{\partial \bar{x}}{\partial \theta} \quad (15)$$

ここで、 $\frac{\partial x_e}{\partial \theta}$ は θ と x_e を関連付ける多リンク系のヤコビ行列である。また、 $\frac{\partial \bar{x}}{\partial \theta}$ は式 (12) は次式のように各リンクの位置へのヤコビ行列 $\frac{\partial x_i}{\partial \theta}$ から計算できる。

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial \theta} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\partial x_i}{\partial \theta} \quad (16)$$

3.2 列の目標形状のシミュレーション 列に並んでいる人数 m に応じて列の目標形状がどのように変化するかをシミュレーションした。例として、 m を 10 から 18 まで変化させたときの逆運動学計算の結果を Fig. 6 に示す。□が目的地 x_0 を、*が最後尾の目標位置 ${}^d x_e$ を、灰色の丸が列に並んでいる人々の位置を表す。 $m = 10$ の場合、列の形状は比較的直線に近いが、人数が増えるにしたがって蛇行する形状に変化していることがわかる。さらに、式 (11) の評価関数の最適化によりループのない列が得られ、また、 x_0 と ${}^d x_e$ の間の空間に収まる形状が計算されている。

4. 案内ロボット配置による列の形状制御

4.1 列に対する案内ロボットの効果のモデル化 Fig. 6 のような目標形状を実現するには人物一人一人への指示が必要である。本稿では、式 (10) で表されるような前方の人と方向を合わせて並ぶ性質を利用し、可能な限り少数の案内ロボットを配置することで列の形状を変化させる。

例として $m = 20$ の場合の参照形状を Fig. 7 に示す。 $i = 1, 4, 6, 13, 16$ の角度に対して案内ロボットを作用させて角度を変えることを考える。このとき、図中の点線で示したその他の人々は式 (10) に従って直線状に整列したとしても最後尾の位置を目標値 ${}^d x_e$ に近づけることができると考えられる。

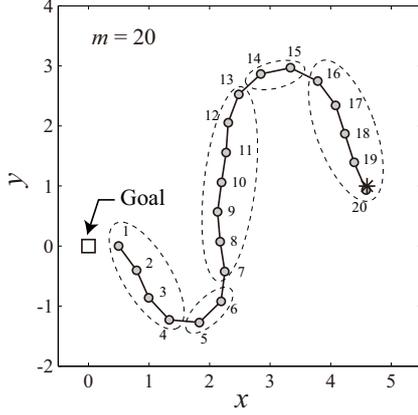


Fig. 7 Referential formation of people line where $m = 20$

Fig. 8 のように i 番目の人に対して案内ロボットを配置し, θ_i を変化させることを考える. 案内ロボットの位置を p_i とする. i 番目の人は案内ロボットとの相対位置に応じて次式のような反発の速度項の影響を受けるものとしてモデル化する.

$$\mathbf{v}_{r_i} = s(\|\mathbf{r}_i\|) \frac{\mathbf{r}_i}{\|\mathbf{r}_i\|} \quad (17)$$

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{p}_i \quad (18)$$

ここで, \mathbf{x}_i の運動は \mathbf{x}_{i-1} を中心とした円運動に拘束されるため, 実際には \mathbf{v}_{r_i} を回転の接線ベクトル \mathbf{n} に射影した成分のみが回転速度 $\dot{\theta}_i$ に影響する. そこで, Fig. 8 のように案内ロボット p_i は回転の接線方向に配置するものとし, \mathbf{x}_i からの相対距離 u_i を設計変数としてパーティションの位置を決定する.

$$u_i = (\mathbf{n}_i^T \mathbf{r}_i) \|\mathbf{r}_i\| \quad (19)$$

ここで, u_i は符号付であり, 相対位置ベクトル \mathbf{r}_i が \mathbf{n}_i と同じ方向のときを正とする. 例えば, Fig. 8 の場合は $u_i < 0$ である. このとき, 式 (17) は次式のように書き換えられる.

$$\mathbf{v}_{r_i} = -u_i s(|u_i|) \mathbf{n}_i \quad (20)$$

以上の影響を考慮すると, 式 (10) と合わせて案内ロボットの作用する人物 i の角速度は次式のように与えられる.

$$\dot{\theta}_i = q(\theta_i) - \frac{u_i}{d} s(|u_i|) \quad (21)$$

4.2 案内ロボットの配置計算 目標形状の算出手順と同様に, 最後尾の人物の位置 \mathbf{x}_e がある目標値 ${}^d\mathbf{x}_e$ となるような案内ロボットの配置 $\mathbf{u} = [u_1 \cdots u_n]^T \in$

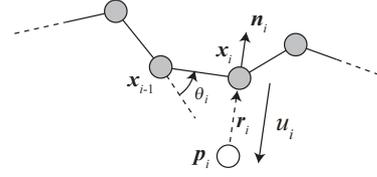


Fig. 8 Effect of a guide robot to the people line

\mathbf{R}^n を求める. ただし, n は使用する案内ロボットの数である.

まず, 最後尾の人物に対して目標速度を以下のように設定する.

$${}^d\mathbf{v}_e = \beta({}^d\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_e) \quad (22)$$

ただし, β は正の定数である. 最後尾の人物の速度 \mathbf{v}_e が目標値 ${}^d\mathbf{v}_e$ を実現するように次式のような評価関数を設定する.

$$J_2 = \frac{1}{2} \|{}^d\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_e\|^2 \quad (23)$$

J_2 を最小にする \mathbf{u} は勾配法により以下のように求められる.

$$\mathbf{u} \leftarrow \mathbf{u} - \gamma \left(\frac{\partial J_2}{\partial \mathbf{u}} \right)^T \quad (24)$$

ただし, γ は正の定数である. 勾配ベクトル $\frac{\partial J_2}{\partial \mathbf{u}}$ は以下のように変形できる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_2}{\partial \mathbf{u}} &= -({}^d\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_e)^T \frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial \mathbf{u}} \\ &= -({}^d\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_e)^T \frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial \dot{\theta}_p} \frac{\partial \dot{\theta}_p}{\partial \mathbf{u}} \end{aligned} \quad (25)$$

ここで, $\theta_p \in \mathbf{R}^n$ は角度ベクトル θ の内, 案内ロボットが作用する成分を取り出したベクトルである. その他の角度は式 (10) の効果によって収束計算中に十分早く 0 へ収束すると仮定する. このとき, 人の列は θ_p を駆動関節とする新たな n 自由度多リンク系とみなせる. この新たな多リンク系の運動が次式のように表せるとする.

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{f}_p(\theta_p) \quad (26)$$

式 (26) の両辺を時間微分すると, 次式が得られる.

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \frac{\partial \mathbf{f}_p}{\partial \theta} \dot{\theta}_p \quad (27)$$

この関係から, 式 (25) の勾配ベクトルの計算に必要な行列 $\frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial \dot{\theta}_p}$ は次式のように多リンク系式 (26) のヤコビ行列に等しくなる.

$$\frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial \dot{\theta}_p} = \frac{\partial \mathbf{f}_p}{\partial \theta} \quad (28)$$

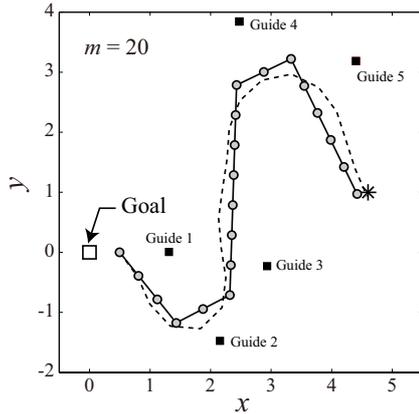


Fig. 9 Result of the optimized location of the guide robots

また, $\frac{\partial \dot{\theta}_p}{\partial \mathbf{u}}$ は式(21)から次式のような対角行列になる.

$$\frac{\partial \dot{\theta}_p}{\partial \mathbf{u}} = \text{diag} \left\{ -\frac{1}{d} \frac{\partial s(|u_i|)}{\partial u_i} \right\} \quad (29)$$

4.3 案内ロボットの配置シミュレーション 例として, $m = 20$ 人の場合の案内ロボットの配置を求めた結果を Fig. 9 に示す. 破線が逆運動学計算によって求めた列の目標形状を, 灰色の丸が列に並んでいる人物を, □ が目的地を, ■ が案内ロボットの配置を示す. 案内ロボットの配置によって列が参照形状に近い形状に変形されていることが分かる.

5. おわりに

本稿では, 商業施設における快適空間実現のための環境設計を目指し, 1) 複数の目的地を順に移動する人の流れと 2) 目的地において列を形成する人の行動の二点に着目してモデル化を行った. さらに, 列における人の行動を多リンク系の運動として表すことで, 目的地付近の空間に収まるような列の形状を多リンク系の逆運動学計算により求めることを提案した. シミュレーションでは, 人数に応じた列の目標形状を計算し, 実際の列を目標形状に近づけるような案内ロボットの位置を最適計算した. これにより, 列を形成しようとする人々の意思を利用して, 少数の案内ロボットにより列全体の形状を間接的・暗示的に操作することができる.

今後は, 実環境において列を作る人の行動計測を行い, 案内ロボットの位置によって人の列がどのように変化のかなどモデルの妥当性を検証していく. また, 環境内に存在する他の物体・壁等の障害物を考慮し, 一定領域内に列が収まるような評価関数を設定することで列形状を最適化する.

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) D. Helbing and P. Molnár, "Social force model for pedestrian dynamics," *Physical Review E*, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286, 1995.
- (2) I. Karamouzas *et al.*, "A Predictive Collision Avoidance Model for Pedestrian Simulation," in *Motion in Games*, vol. 5884, 2009, pp. 41–52.
- (3) J. Berg *et al.*, "Reciprocal Velocity Obstacle for Real-Time Multi-Agent Navigation," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008.
- (4) S. J. Guy *et al.*, "PLEdestrans: A Least-Effort Approach to Crowd Simulation," in *Proc. of Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2002.
- (5) J. Pettre, J.-P. Laumond, and D. Thalmann, "A Navigation Graph for Real-time Crowd Animation on Multilayered and Uneven Terrain," in *Proc. of the First International Workshop on Crowd Simulation (V-CROWD'05)*, 2005, pp. 81–89.
- (6) D. Helbing and P. Molnár, "Self-Organization Phenomena in Pedestrian Crowds," *Statistical Mechanics*, 1997.
- (7) K. Yamamoto and M. Okada, "Continuum Model of Crossing Pedestrian Flows and Swarm Control Based on Temporal/Spatial Frequency," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 3352–3357.
- (8) K. Kurumatani, "Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS," in *Proc. of International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce*, 2003.
- (9) R. Vaughan *et al.*, "Robot Control of Animal Flocks," in *Proc. of IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*, 1998, pp. 277–282.
- (10) J.-M. Lien, O. B. Bayazit, R. T. Sowell, S. Roderiguez, and N. M. Amato, "Shepherding Behaviors," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, pp. 4159–4164.
- (11) M. Okada and Y. Homma, "Amenity Design for Congestion Reduction based on Continuum Model of Swarm," in *Proc. of the 13th International Conference on Mechatronics Technology*, 2009.
- (12) M. Okada, Y. Motegi, and K. Yamamoto, "Human Swarm Modeling in Exhibition Space and Space Design," in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 5021–5026.