

視線に基づくサブゴールを用いた歩行者の行動モデル

柳沢 豊 山田 辰美 平田 圭二 佐藤 哲司

日本電信電話株式会社, NTT コミュニケーション科学基礎研究所

Pedestrian Dynamics based on Eye-gaze Subgoal Model

Yutaka Yanagisawa Tatsumi Yamada Keiji Hirata Tetsuji Satoh

NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation

1 はじめに

近年, 商業複合施設や地下商店街など, 多数の人間が集まる施設はその規模をより一層拡大する方向にある. 施設が巨大化するに伴い, 効率的な利用や災害時の避難路の確保といった目的から, 設計段階における歩行者の動線シミュレーションの重要性が高まっている. さらに, センサ等の計測技術の発展に伴い, 実際の歩行者の動線 (筆者らはこれを歩行軌跡と呼ぶ) を計測し, 特徴を分析してモデルを得ることも可能となった. これまでに提案されている, 代表的な歩行者モデルとしては, Social Force Model がある [1] [2]. 他にも, 引力や電磁気力などの運動方程式に基づく歩行者モデルや, 目的地への接近戦略や障害物の回避戦略をルール化し, そのルールに基づいて移動する歩行者モデルなど, 数多くのモデルが提案されている. これらの多くの歩行者モデルは, 基本的には目的地へ近づく行動をとり, その移動途上に障害物や他の歩行者などが存在している場合, これを回避するという形でモデル化されている. このため, 目的地が遠い位置にありなおかつ障害物の配置が複雑になると, 回避行動が複雑化してしまい, 次に移動すべき方向の決定が困難になるという問題がある.

実際の歩行者は, ゴール地点までの間に障害物が存在する場合, まずその障害物を回避することを局地的な目標として行動し, 障害物を回避した時点であらためてゴール地点に近づく行動を取ると考えられる. つまり, 障害物を回避するための仮のゴール地点 (サブゴール) を設定するという課程を取り入れることで, 従来モデルの問題点を解決できる. ここで, 歩行者がサブゴールを設定する課程においては, 歩行者の目的地, 視界, 障害物の三者関係が大きく影響するものと考えられる.

本稿では, 従来の Social Force Model に, 視界内の障害物の配置状態に基づいてサブゴールを自動的に設定する課程を組み込み, 行動決定の課程を二段階に階層化した歩行者モデルを提案する, サブゴールを適切に設定することにより, 目的地が視界から遮蔽されたり遠距離にあるような場合でも, 歩行者の行動をシミュレーションすることが可能になる. 筆者らはこのモデルを構築するために, まず歩行者の視線と歩行軌跡を取得する実験を行った. そして取得したデータを分析し, 歩行者の目的地, 視界, および障害物の配置関係から, サブゴールを決定するために必要なパラメータ (サブゴールの位置, サブゴールの有効期間) を求めた.

さらに, 提案する歩行者モデルの妥当性を確認するためのも行った. 具体的には, 筆者らの提案するサブゴールを設定する

課程を取り入れたモデルを用い, 実際に歩行データを取得した空間と同条件の仮想空間上で軌跡の計算を行い, その結果を比較した. この結果, 提案するサブゴールを設定する方法を用いることにより, 実際の歩行者の動きに近い歩行軌跡を算出できることが分かった.

以下 2 章では, ベースとなる歩行者モデルである Social Force Model について概要を述べ, このモデルに必要なパラメータを取得するための実験について説明する. 次に 3 章で, 従来のモデルで発生する問題について述べ, その後に, 視界, 障害物, 目的地の関係に基づいたサブゴールを設定する方法について具体的に述べる. また, サブゴールを設定するために行ったパラメータ取得実験について説明し, これらのパラメータを用いて得られた歩行者モデルについて述べる. さらに, 実際に歩行者の軌跡を計算した結果についても示す. 最後に 4 章でまとめを行う.

2 Social Force Model

2.1 概要

Social Force Model (SFM) [2] は, 局地的な情報に基づき歩行者の行動を決定するモデルの中でも, 代表的なモデルとして知られている. ここでは, このモデルについての概要を示すとともに, いくつかの記号についての定義を行う. まず, SFM では歩行者は次の 4 つの力を受けるものとされている (図 1).

1. ゴール地点から受ける引力 F_1
2. 障害物から受ける斥力 F_2
3. 異なるゴール地点に向かう他の歩行者から受ける斥力 F_3
4. 同じゴール地点に向かう他の歩行者から受ける引力 F_4

これらの力のうち F_3 と F_4 については, 地形 (壁など) から受ける力ではないので, ここでは説明を省略する. 次にこれらの力を定義するために必要なパラメータについて説明する.

- 時刻 t の歩行者の速度ベクトル $v(t)$
- 歩行者にとって望ましい移動速度 (スカラー値) V
- ゴール地点の位置ベクトル p_G
- 緩衝時間定数 (スカラー値) τ

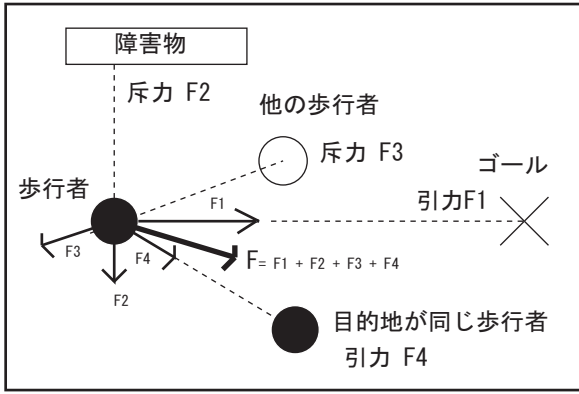


図 1: Social Force Model における 4 つの力

- 歩行者の位置からゴール方向へむかう単位ベクトル $e(t)$
この $e(t)$ は、歩行者の時刻 t の位置 $p(t)$ とゴールの位置 p_G を使って、次の式で与えられる。

$$e(t) = \frac{1}{|p_G - p(t)|} (p_G - p(t))$$

- 時刻 t に障害物 i について歩行者から最も近い点 $r_i(t)$
- 障害物 i に関する緩衝定数 U_i, R_i

F_1 と F_2 は、上記のパラメータを用いて次のように記述される（ここでは障害物は k 個存在するものとする）。

$$F_1 = \frac{1}{\tau} (V e(t) - v(t)) \quad (1)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \frac{p(t) - r_i(t)}{|p(t) - r_i(t)|} U_i e^{-|r_i(t) - p(t)|/R_i} \quad (2)$$

F_1 は、歩行者が目的地の方向に歩行者が望む速度で近づこうとする力を表している。一方 F_2 は、歩行者が障害物のもっとも近い点から遠ざかろうとする力を現している。 $e^{-|r_i(t) - p(t)|/R_i}$ で表される項は、障害物から遠くに位置するほど、障害物から遠ざかろうとする力が急速に低下することを表している¹

実際に、これらの式を用いて軌跡の計算を行った結果を図 2 に示す。この図からも分かるように、SFM における歩行者に働く最も大きな力は、ゴールに対して直線的に向かおうとする力である。障害物がある場合は、緩やかにこれ避けるように動く。

2.2 パラメータ取得実験

SFM では、 F_1 と F_2 を計算する上で用いられるいくつかのパラメータのうち、実際に歩行者を観察しないと求められないパラメータがいくつかある。これらについて、筆者らはまず実験を行って実測値を求めた。求めたパラメータは、歩行者の望む移動速度 V 、緩衝時間定数 τ である。

実験は、屋内に図 3 に示すように障害物を配置した空間を用意し、この中を移動する歩行者 10 人の軌跡を取得した。軌跡の取得には、ドイツ SICK 社のレーザセンサ 3 台と、画像カ

¹文献 [2] では R_i が式中に含まれていないが、このパラメータを省略してもシミュレーション結果に本質的な違いは生じない。

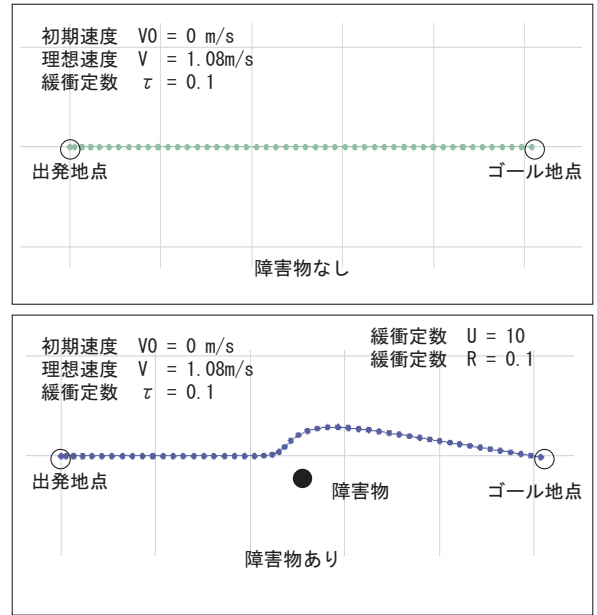


図 2: SFM による歩行者の軌跡の計算結果

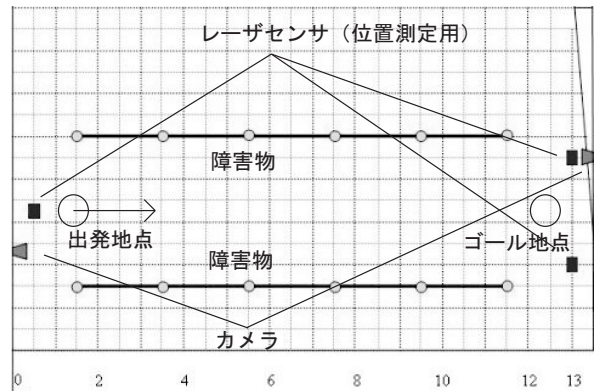


図 3: パラメータ取得実験のセッティング

メラで取得した映像を用いた。このレーザセンサは、歩行者の足の位置を 5mm ~ 1cm 程度の誤差以内で自動的に取得できる。センサからの死角が生じることを防ぐため、実験空間全体をカバーできるように 3 台配置した。カメラは、センサによるデータの取得漏れが生じた場合に、データの補完や修正を画像を見ながら修正できるようにするために配置した。このようにして、実際に取得した歩行者のデータの例を図 4 に示す。

このようにして 10 人分のデータを取得し、パラメータの平均値を求めた結果、 $\tau = 0.1$ 、 $V = 1.08(\text{m/s})$ であることが分かった。以降の軌跡の計算では、これらの値を用いる。なお U と R の値については歩行者ごとの数値のばらつきが非常に大きかったため、軌跡の計算を行ったとき良好な結果が得られる値 $U = 10$ 、 $R = 0.1$ を用いた。

3 サブゴールモデル

実世界中を移動する歩行者モデルについては、これまでもいくつかのモデルが提案されている。こうしたモデルの多くは、

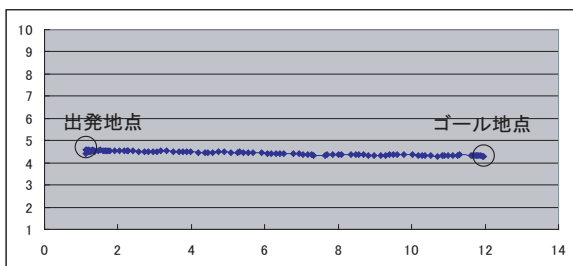


図 4: 直線的に移動する歩行者のデータ

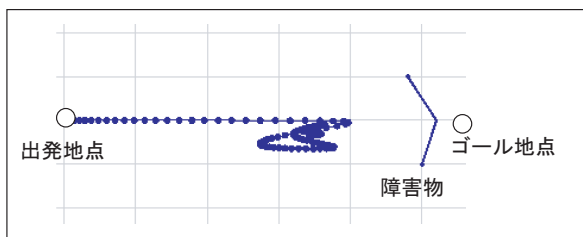


図 5: 従来モデルによるスタックの発生

歩行者の出発する地点（出発地点）から、移動も目標となる地点（ゴール地点）が直接視認できるような、単純な地形上で移動する歩行者が想定されている。

一方で、歩行者がゴール地点に向かって歩こうとするとき、ゴール地点が視界内に存在しない場合は、視界内に暫定的な目的地（サブゴール）を設定し、これを目指して歩くと考えるのが自然である。筆者らは、歩行者がサブゴールを設定するときには、歩行者はゴール地点の位置と、歩行者の視界内に存在する障害物の情報を用いているという仮説を立てた。この仮説を立証するために、まず歩行者の視線情報を実験により取得した。そして、この視線情報に基づきサブゴールを決定する、階層的歩行者モデルを構築した。本章では、この実験とモデルについて説明する。

3.1 視線に基づくサブゴールの設定法

SFM をはじめとする従来の歩行者モデルの多くは、障害物の配置が単純な空間においては、よい軌跡の計算結果が得られることが示されている。しかし、目的地までの間に複数の障害物が存在するような空間においては、歩行者が目的地に辿り着けないケースが増える。例えば、図 5 のようにゴール地点と出発地点の間に完全に遮るような障害物が存在すると、従来のモデルではスタックしてしまう。スタックが起きる原因は、目的地と現在位置との間に障害物が存在する場合、障害物から受ける斥力 F_1 と目的地から受ける引力 F_2 が均衡してしまうことにある。

従来モデルの問題を回避するためには、現在位置とゴール地点との間に障害物が生じないようにする必要がある。そこで、本稿ではスタックが生じそうな場合に、障害物に遮られずに到達可能な、一時的な仮の目的地（サブゴール）を設定する方法を提案する。このサブゴールを設定するために、まず以下のような仮説を置いた。

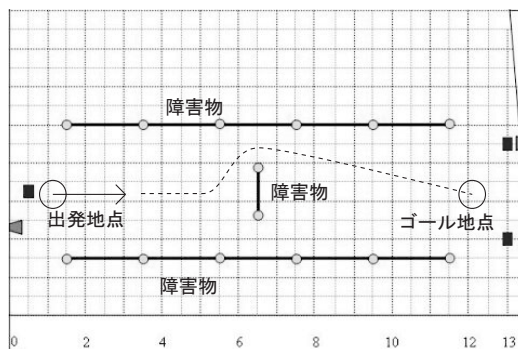


図 6: 視線と軌跡を取得する実験のセッティング

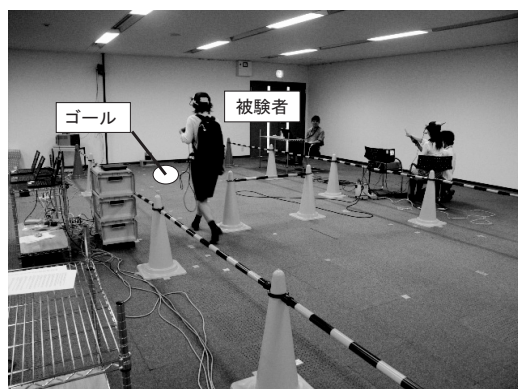


図 7: 視線と軌跡を取得する実験の様子

1. 歩行者は、ゴール地点と現在位置との間を遮っている障害物が移動の妨げになると感じると、サブゴールを設定する地点を探す。この地点としては、障害物を回避でき、なおかつゴールに極力近い地点を（見て）選ぶ。
2. 次に、歩行者はサブゴール地点をきめ、この地点に視線を向けた状態で進む。
3. サブゴールが不要となった時点で、歩行者は視線をサブゴールからゴール地点に移し、これに向かって進む。

筆者らは、まず以上の 1 から 3 の仮説が正しいことを確認するため、障害物がある場合の歩行者の視線の動きと移動した軌跡を取得する実験を行った。そして、2 の状態の歩行者の視点を調べることにより、サブゴールとなる地点を求めた。さらに、2 から 3 に切り替わる地点を調べることで、サブゴールが不要になるタイミングを求めた。

3.2 軌跡と視線の取得実験

実験は、図 6 に示すように、出発地点とゴール地点を遮る障害物を配置し、この状態での歩行者の軌跡を取得した。また軌跡を取得すると同時に、歩行者に視線を取得する装置（アイマレコーダ EMR-8B）を装備させ、歩行中の視線（視点）の変化を取得した。実際に軌跡を取得する実験を実施している様子を図 7 に示す。このようにして、計 10 人の軌跡と視線のデータを収集した。

この実験の結果、図 8 と表 1 に示すような軌跡および視線の推移が得られた。歩行者の軌跡としては、障害物を通過する

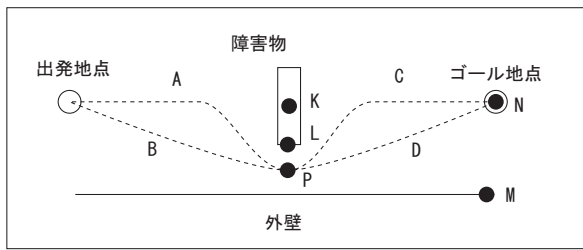


図 8: 観測された軌跡

表 1: 観測された軌跡と視線の関係

移動経路	視線の遷移	観測された被験者数
$B \rightarrow D$	$L \rightarrow N$	2人
$B \rightarrow D$	$L \rightarrow M \rightarrow N$	4人
$A \rightarrow C$	$K \rightarrow L \rightarrow N$	1人
$A \rightarrow D$	$K \rightarrow L \rightarrow N$	1人
$A \rightarrow C$	$K \rightarrow L \rightarrow M \rightarrow N$	2人

前の段階で 2 種類の形状 (図 8 中の A, B) を、また通過後も 2 種類の形状 (図 8 中の C, D) が観測された。経路としては $A \rightarrow C, A \rightarrow D, B \rightarrow D$ は観測されたが、 $B \rightarrow C$ という経路は観測されなかった。また歩行中の視点としては、障害物の中心点 (図 8 中の K)、障害物の端 (同図 L)、外壁の終端点 (同図 M)、ゴール地点 (同図 N) の 4 つの地点があることがわかった。

軌跡との相関性については、表 1 中からいくつか読み取れる。まず、経路 A を通る歩行者は必ず障害物の中心点 K をサブゴールに選び、次に障害物の端点 L を見ている。また経路 C を通る歩行者は、障害物を通過する地点 P に達するまで L を見続けている。経路 $B \rightarrow D$ を通る歩行者は、最初は障害物の端点 L を見ているが、 L に約 2m 程度まで近づくと視点を外壁の終端点 M へうつし、 P を越えて約 1m 程度歩いた後にゴール地点 N を見るという共通の特徴が見られた。

以上のことから、仮説は概ね正しいことは確認された。ただし、厳密には以下の補足項を付け足す必要がある。

- 歩行者は、障害物にある程度 (今回の実験では約 2m まで) 近づくと、障害物の中心部をサブゴールに設定することがある。
- 歩行者は、障害物にある程度 (今回の実験では約 2m まで) 近づくと、進行方向の直線上にある目印をサブゴールとして設定することがある。

3.3 歩行者モデルと軌跡の計算

実験の結果、歩行者の軌跡は全てが必ずしも同一とはならないが、少なくとも障害物の端点 L は必ず見るといふことと、 P の 2m 以内に入った後は必ずゴール地点 N を見ること (すなわち視線推移パターン $L \rightarrow N$) は分かった。これらに基づき、サブゴールの設定ルールを次のように定めた。

- 歩行者は障害物が存在する場合、ゴール地点と現在地点を遮る障害物を避けうる点 (端点から 1m 外側) をサブゴールとする。²

²実際のデータからも、端点から 1m 程度外側がサブゴールとして用いられている。

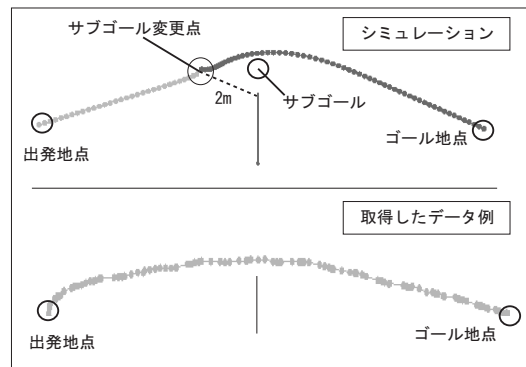


図 9: 軌跡の計算結果と実データ

- 歩行者は、サブゴールから 2m 以内にまで近寄ると、当初のゴール地点をゴールとしなおす。

さらに、ここまでの実験によって求めたパラメータとサブゴール設定方法に基づいて、歩行者の軌跡を計算した。この計算結果を図 9(上) に示す。この軌跡は、実験で得られた軌跡の $B \rightarrow D$ (図 9(下)) に最も近い結果になる。外壁上の点 L については、実際の歩行者はサブゴールとして用いてはいるが、モデル上これを組み込まなくても大きな影響はでていない。

以上の計算結果から、ゴール地点との間に障害物が存在する場合でも、これを避けて移動する歩行者モデルが構築できていることが確認できた。その一方で、実際の歩行者の軌跡にはいくつかのバリエーションがあることも判明した。しかし、このバリエーションが生じる理由については今回の実験では判別できなかった。このため、今後さらに追加実験を行い、その理由について調査を行う予定である。

4 おわりに

本稿では、出発地点とゴール地点の間に障害物が存在する場合でも、サブゴールを設定することにより、スタックすることなくゴール地点に到達することができる歩行者モデルについて述べた。また、実際の歩行者の視線データを用いて、サブゴールを設定する位置や、サブゴールを切り替えるタイミングを求めた。今後は、歩行者による軌跡および視点の違いがどのような理由により生じるのかについて調査を行うことで、より実際の歩行者に近いモデルを構築する必要がある。また同時に、より複雑な地形上で本モデルが有効かどうかを検証していく予定である。

参考文献

- [1] Dirk Helbing, Illes J. Farkas, and Tamas Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* 407, pp. 487–490, 2000.
- [2] Dirk Helbing and Peter Molnar. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E* 51, pp. 4282–4286, 1995.