

歩行者の持つ階層的意図の推定に基づくロボットの譲道行動の生成

Generation of Give-way Behavior of Mobile Robots
Based on Estimation of Pedestrians' Hierarchical Intention

○ 伊部直樹 (東京大) 正 山下 淳 (東京大) 正 浅間 一 (東京大)

Naoki IBE, the University of Tokyo, ibe@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Atsushi YAMASHITA, the University of Tokyo, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Hajime ASAMA, the University of Tokyo, asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

In daily life, there are many bottlenecks such as narrow passages, gaps between objects and entrances to rooms. At the bottlenecks, humans go through by giving-way mutually, and it is necessary for robots working in daily life to give way. The purpose of this research is to develop the model capable of generating the give-way behavior by estimating a pedestrian intention. In this research, we introduce hierarchical intention to Social Force Model using quantum information theory.

Key Words: Mobile Robot, Hierarchical Intention, Give-way, Pedestrian

1 序論

1.1 研究背景

我々が日常生活を送る空間は、多くの障害物が存在する複雑な環境である。その中には狭い通路や物と物の間、部屋の出入り口など人が1人ずつしか通れないような環境(ボトルネック)が多く存在する。そのような環境において人間は、直前までの相手の動作の観測情報の履歴から相手の意図を推定し、推定した意図に基づいて自身の行動戦略を決定する。以上の一連のプロセスによってボトルネックにおいても停留を生じない譲り合い行動が実現されると考えられる。したがって、安全かつ効率的な移動を実現するために、人間の生活空間で活動するサービスロボットには道を譲るという機能が必要不可欠であると考えられる。そこで本研究では、道を譲る(譲道行動をとる)モデルを構築し、それをもとにロボットの運動を生成する。ロボットが道を譲る機能を実現するためには、1) 歩行者の意図を推定し、2) 推定した歩行者意図に応じて自身の行動を選択する、ということが必要となる。そこで本研究では、ロボットが歩行者意図を推定し、推定結果に基づき譲道行動を生成するロボットの行動モデルの構築を目的とする。

1.2 先行研究

Helbingらが提唱したSocial Force Model (SFM) [1]では、ある時刻での歩行者と環境の間に働く仮想的な力により歩行者の挙動がモデル化されている。このモデルは各歩行者が独立して連続的な軌道を生成できるが、能動的な行動を生成できず2人以上の歩行者が同時にボトルネックに進入するとデッドロックが生じてしまう。

そこでSFMにおいて、歩行者の軌道を予測して軌道生成に用いられる仮想的な力を修正する手法が提案され、他の歩行者の軌道を考慮した、より人間らしい衝突回避が実

現された[2][3]。しかし、軌道予測だけでは歩行者の能動的な行動に対応することができず、このモデルではボトルネックにおける譲り合い行動を生成することはできない。

またShaoらは、歩行者に内部状態を導入し、サブモデルを含む階層的行動モデルを提案した[4]。このモデルでは、内部状態が変化することで、トップダウンに与えられた基本行動の中から、その状況に対応した行動を選択することで大規模な群集シミュレーションを実現した。しかしこのモデルでは、行動予測の際に周囲の空間を格子状のセルに区切って離散化し計算を行っている。その結果、離散化誤差によりボトルネック等の狭い空間では、誤った軌道を生成する場合がある。その後、Pelechanoら[5]はSFMに列に並ぶルールや前方が詰まっているときは立ち止まるというルールを加え、他の歩行者のために動きを止めるという動きを実現した。しかしこのモデルは、災害時の避難や映画館や劇場などからの退出といった全ての歩行者が同じ方向に向かって歩く状況を想定しており、狭い通路を譲り合って通り抜ける動きは実現することができない。

歩行者の意図に関する研究については、Hoogendoornらが歩行者の行動決定過程を3層の階層構造で表現し、これをもとに歩行者の軌道生成を実現している[6]。このモデルでは、軌道生成の上位階層に行動選択の階層を導入することで能動的な行動の生成を実現しているが、予測をすることなく現在の情報のみで意図決定を行うため、歩行者が複数存在する環境ではデッドロックを生ずることがある。

Tamuraら[7]の研究ではSFMに意図を導入し、将来の動きを予測して多様な行動を生成する行動モデルが提案されている。しかし、将来の動きを予測する手法もボトルネックには対応していないため、道を譲る行動は生成されない。

また著者らは、これまでSFMの逆計算による歩行者の

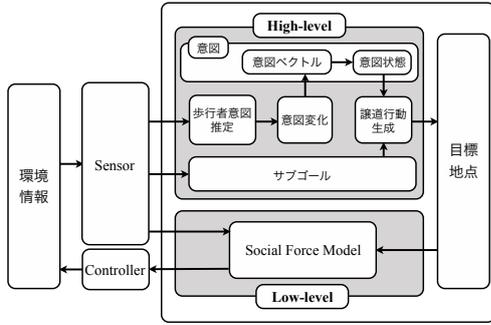


Fig.1 提案モデル概要

行動予測に基づくロボット行動モデルを開発した [8]. このモデルでは、ロボットは歩行者の軌跡から行動を推定し、それに対応した行動を生成することで、譲り合いを実現している. しかしこのモデルでは、歩行者意図は「道を譲る」か「譲らない」という離散的な状態で表現されており、現実世界の人が持つ意図の曖昧さが考慮されていない. その結果、例えば、歩行者が道を譲るか迷う、という曖昧な行動をとった場合に対応することができない.

2 提案モデル

本研究では歩行者の意図の導入によって SFM を拡張した新たなモデル (Fig. 1) を提案する. 人やロボットなど移動するものをエージェント、壁や障害物など静止して環境を決定づけるものをオブジェクトと呼ぶ. モデルは大きく分けて High-level モジュールと Low-level モジュールの2つに分かれている. High-level モジュールでは推定対象エージェントの位置から意図を推定し、自身の意図を変化させることで目標地点の設定を行う. Low-level モジュールでは、環境情報、目標地点の位置から SFM で制御入力を生成する. さらにそれぞれのモジュールがいくつかのサブモジュールに分かれており、Fig.1 のような構成のモデルになっている. Low-level モジュールでは SFM[1] に基づき、時刻 n での歩行者と環境の間に働く仮想的な力 $\mathbf{F}(n)$ により歩行者の挙動がモデル化されている.

$$\mathbf{F}(n) = \mathbf{F}^{Goal}(n) + \sum_i \mathbf{F}_i^{Obj}(n) + \sum_i \mathbf{F}_i^{Agent}(n) \quad (1)$$

ここで $\mathbf{F}^{Goal}(n)$ はゴールからの仮想的な引力、 $\mathbf{F}_i^{Obj}(n)$ は壁などの障害物からの仮想的な斥力、 $\mathbf{F}_i^{Agent}(n)$ は他の歩行者からの仮想的な斥力である.

2.1 不確定性を含む意図の導入

本研究では、状態ベクトルというアプローチを用いて不確定性を含む意図を導入する. 互いに排反な選択肢に対応する状態を意図状態として定義し、意図状態に対応する基底ベクトルを重ね合わせた状態ベクトルを用いて意図を表し、この状態ベクトルを意図ベクトルとする. 本研究で想定する環境では、エージェントがそのままボトルネックに進入しようとする意図である状態に対応する基底ベクトルを $|Proceed\rangle$ 、道を譲ろうという意図である状態に対応する基底ベクトルを $|Giveaway\rangle$ とする. したがって意図ベクトル $|\psi\rangle$ は重み付け係数を $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ として、

$$|\psi\rangle = \alpha |Proceed\rangle + \beta |Giveaway\rangle \quad (2)$$

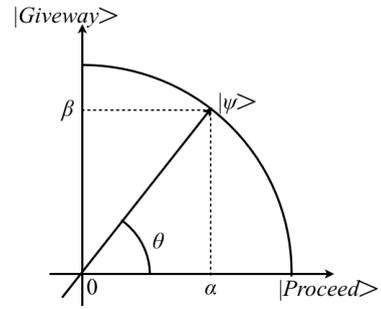


Fig.2 意図ベクトル

と表すことができる. 意図ベクトルは、それぞれの意図状態がどの程度の頻度で表出するか、ということを表すベクトルで、その値によって定められた確率に従ってそれぞれの意図状態が表出する. 本研究では、意図状態を2種類に限定しているので、二次元平面上に意図ベクトルを記述することができる (Fig.2). ここで、意図ベクトルの特徴を表すために位相 θ というパラメータを導入する. θ は Fig.2 のように意図ベクトル $|\psi\rangle$ と $|Proceed\rangle$ のなす角として定義する.

意図は不確定性を含むため、実際の行動は意図状態が表出することで決定する. ここで、意図状態 *intention* は意図ベクトルをの意図状態に対応する基底ベクトルへの正射影の長さの二乗の比で表出する. 本研究では基本状態が2つであり、ボトルネックに進入する行動に対応する意図状態を *Proceed*、道を譲る行動に対応する意図状態を *Giveaway* と定義する. したがって $intention = \{Proceed, Giveaway\}$ であり、 $Proceed : Giveaway = \alpha^2 : \beta^2$ という比率で表出する.

2.2 階層的な意図の推定

エージェントは以下のように様々な意図推定を行う. ここで自分を A, 他者を B とすると、A は

1. B の意図を推定する.
2. 「A の意図を推定する B」の意図を推定する.
3. 「『B の意図を推定する A』の意図を推定する B」の意図を推定する

という意図推定を行うと考えられる. ここで上記 2. の意図推定は推定対象が 1. の意図推定を行っているとは想定している. また、3. の意図推定は推定対象が 2. の意図推定を行っているとは想定している. すなわち 2. は 1. に対し

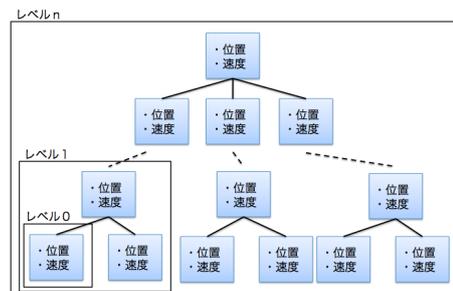


Fig.3 階層的意図

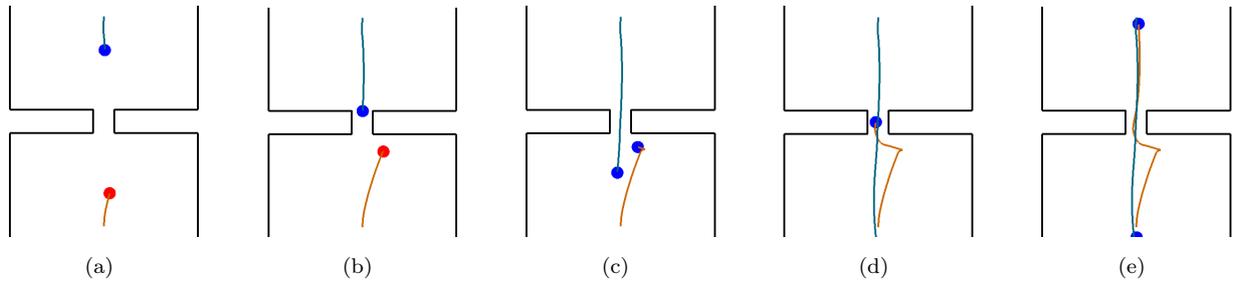


Fig.4 譲り合い行動の一例. (a), (b): エージェント A (下側) は反対側から来るエージェント B (上側) が通路に進入する行動をとると推定したため, (b) 道を譲る行動を生成する. (c): A は B が通路を通過するまで道を譲り, 待機する. (d), (e): A は B が通路を通過した後, 通路に進入する.

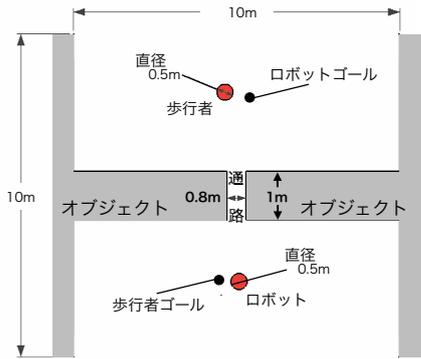


Fig.5 シミュレーション環境

て, 3. は 2. に対して, 1 段階深い推定を行っていると考えられる. ここで, この推定の段階を意図推定の深さと定義する. 意図推定の深さ n のエージェントは, 推定対象を意図推定の深さ $n-1$ のエージェントと仮定して意図推定を行う. ここで「意図推定を行わず移動を行う」エージェントを意図推定の深さ 0 のエージェントとすると, 前述の意図推定はそれぞれ以下のようになり, 深さ n の意図推定を定義することができる.

1. 深さ 1 の意図推定
2. 深さ 2 の意図推定
3. 深さ 3 の意図推定

これを図に表すと Fig.3 のようになる. 各エージェントは状況に合わせて, 意図推定の深さを変化させ, 推定を行う.

2.3 他エージェントの意図推定と自身の行動生成

著者らは, これまで SFM の逆計算による歩行者の行動予測手法を開発した [8]. この手法では, 歩行者は SFM に従って軌道を生成する, と仮定し, 歩行者の運動と周囲の環境情報から歩行者の目標地点方向を推定する手法である. この手法を用いて, エージェントは推定対象エージェントの意図, 環境情報に基づき, 自身の意図を変化させ, 表出した意図状態をもとに目標地点を設定することで, 譲道行動を生成する.

Table 1 実験結果

	成功 (100 回中)	失敗 (100 回中)	
		デッドロック	時間切れ
提案モデル (SFM)	77.8 ± 5.0	5.5 ± 1.8	16.7 ± 4.0
	0	100	0

3 譲り合い行動に関する実験

3.1 実験環境とパラメータ設定

提案モデルによりボトルネックの両側から来たエージェントがデッドロックを回避して通行できることを検証するために Fig.5 のような環境でシミュレーションを行った. 中央にあるオブジェクトは, エージェントが通路を挟んで反対側が見えるようになっており, 反対側にいるエージェントの位置は常に観測することができるものとする. また各パラメータは, シミュレーションの 1 ステップ当たりの時間 $\Delta = 0.025s$, $\tau = 3$, エージェントの理想スピード $V_{free} = 1m/s$, $N = 60$ ステップ (1.5s) とした.

3.2 実験手法・結果

実験空間の中央を原点として, 初期位置として Fig. 5 のようにロボットを $(0, -4.5m)$ を中心とした半径 50cm の円の中, 歩行者を $(0, 4.5m)$ を中心とした半径 50cm の円の中にランダムに配置し, それぞれの最終目標地点を $(0, 5m)$, $(0, -5m)$ とする. 両者を同時にスタートさせ, 両者が最終目標地点に到達するか開始から 800 ステップ経過したら終了し, これを 1 回の試行とする. 両者が最終目標地点に到達していればその試行は成功, そうでない場合は失敗として数える. 100 回の試行を 1 セットとして, 10 セット行い成功回数を検証する.

譲り合い行動の一例を図 4 に示す. 下側から進んでくるエージェントをエージェント A, 上側から進んでくるエージェントをエージェント B とする. この試行では, 「B が通路に進入する」と A が推定し, 譲道行動をとって譲り合いを実現している.

また, 実験結果を表 1 に示す. ここで, 両者がボトルネックを越えていない場合はデッドロックによる失敗として, そうでない場合は時間切れによる失敗として数える. SFM では実現されなかったボトルネックでの譲り合い行動が提案モデルでは 80% 近い確率で実現されることが示された.

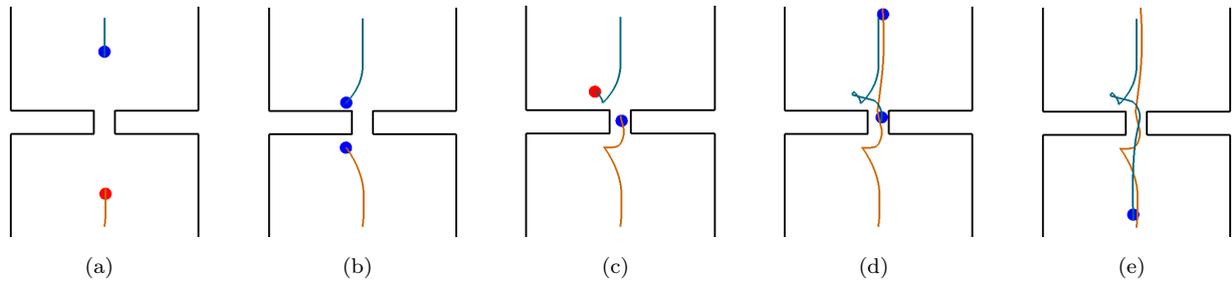


Fig.7 見合い状態の一例. (a), (b): エージェント A (下側) は反対側から来るエージェント B (上側) と意図が同調したため, (a) 通路に向かう行動と (b) 道を譲る行動を交互に行う, 見合い状態になる. (c): 時間が経過すると意図変化の揺らぎによって, A のみが通路に進入する. (d), (e): B は A が通過するまで待機し, その後通路に進入する.

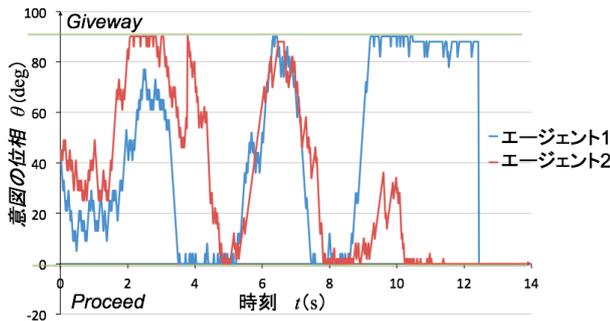


Fig.6 見合い状態における意図変化

3.3 見合い状態と意図の同調

図7は譲り合い行動の一例である. 下側から進んでくるエージェントをエージェント A, 上側から進んでくるエージェントをエージェント B とする. はじめ, A と B は同時に譲道行動を生成し, その結果互いに相手が道を譲ると判断して, 両者とも通路へ進入する行動をとる. しかし, 両者が通路へ進入しようとするため, 再び同時に譲道行動を生成する. このように互いが同時に相手と同じ行動をとりつつ, 相手の意図を推定すると, 2つの行動を交互に行うことになり, 相手と同じ行動をしばらく繰り返す, という状態が生じる. これは, 現実世界の人間でも起こりうる, 一種の“お見合い状態”で, 相手の行動と自身の行動が一致して思うように進めない状態である. 本研究ではこの状態を見合い状態と呼ぶことにする. ここで, この時の見合い状態における意図変化の様子を図6に示す. このとき $t = 8s$ より前では見合い状態が発生しており, 両者の意図変化のグラフの形がほぼ一致していることがわかる. つまり見合い状態は, 両者の意図が同じように変化すること (意図の同調) によって引き起こされると考えられる. 提案モデルでは確率論的アプローチを用いていることにより, 意図の同調が意図変化の揺らぎによって解消するが, 同調度合いによっては解消まで時間がかかる場合がある. 実験における失敗の主な原因は, このような意図の同調の解消までに長時間経過してしまうことであると考えられる.

4 結論および今後の展望

本研究では, ボトルネックなど人が複数通行することができない環境において, 道を譲るといった行動を生成しデッドロックを生じることなく移動するモデル化を実現した.

このモデルでは, 歩行者意図は決定論的に一意に決まるものではなく, 人の曖昧な意図のように確率論的なものとして記述されている. その結果, 意図の同調により見合い状態という, 現実世界でも起こりうる一種のデッドロックに陥った時も, 意図変化の揺らぎにより見合い状態を解消することができる.

今後の展望としては, 以下の4点が挙げられる.

1. 様々な意図推定の深さの検証
2. サブゴール生成の自動化
3. 多数のエージェントが存在する環境への適用
4. オクルージョンへの対応
5. 歩行者のロボットに対する適応の考慮

謝辞

本研究の一部は, 栢森情報科学振興財団の助成を受けた.

参考文献

- [1] D. Helbing and P. Monar: “Social Force model for pedestrian dynamics,” *Physical Review E*, vol.51, no.5, pp.4282-4286, 1995.
- [2] 浅野美帆, 桑原雅夫: “先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション”, 生産研究, vol.59, no.3, pp.184-187, 2007.
- [3] F. Zanlungo, T. Ikeda and T. Kanda: “Social Force Model with Explicit Collision Prediction,” *Europhysics Letters*, Vol.93, No.6, 68005, 2011.
- [4] W. Shao and D. Terzopoulos: “Autonomous pedestrians,” *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 05)*, pp.19-28, 2005.
- [5] N. Pelechano and N. I. Badler: “Controlling individual agents in high-density crowd simulation,” *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 07)*, pp.99-108, 2007.
- [6] S. Hoogendoorn, P. H. L. Bovy and W. Daamme: “Microscopic Pedestrian Wayfinding and Dynamics Modeling,” *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp.123-154, 2002.
- [7] Y. Tamura, D. P. Le, N. P. Chandrasiri, T. Bando, A. Yamashita, and H. Asama: “Development of Pedestrian Behavior Model Taking Account of Intention,” *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012)*, pp.382-387, 2012.
- [8] 伊部直樹, 増山岳人, 山下 淳, 浅間 一: “歩行者の意図推定に基づくロボットの give-way 行動の生成”, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会講演論文集, 2N3-1, pp.1-4 2012.