

他者誘導のための人間の行動モデルについての基礎検討

○田村 雄介 (東京大学), 人見 謙太郎, Chandrasiri, Naiwara P. (トヨタ IT 開発センター),
坂東 誉司 (デンソー), 浅間 一 (東京大学)

Basic Consideration of Human Behavior Model for Maneuvering Others

○Yusuke TAMURA (Univ. of Tokyo), Kentaro HITOMI, Naiwara P. CHANDRASIRI (Toyota ITC),
Takashi BANDO (DENSO CORP.), and Hajime ASAMA (Univ. of Tokyo)

Abstract: It is inevitable that our behavior is influenced by others' behaviors in our daily environments. Therefore prediction of others' behaviors is a vital technology for moving vehicles taking appropriate actions. In this study, we develop a human behavior model considering prediction and maneuvering of others' behaviors. This paper discusses a basic model of human behavior based on a literature survey.

1. はじめに

近年, 自動運転システムのように, 自動車を智能化する試みが盛んに行われている。一方で, 自動車を一とする移動体にとっては, 安全性は避けて通ることの出来ない重要な課題である。例えば, プリクラッシュブレーキアシストのように, 周囲環境のセンシングに基づき衝突の危険を予測してそれを防ぐシステムは既に実現されている。しかしながら, このようなシステムにおいては移動体の周囲に存在する人間や他の移動体の動作の仕方についてはほとんど考慮されていない。また, このような緊急回避的な方法ではなく, 事故の可能性を未然に防ぐことが望ましい。

一方, 人間や人間が操縦する移動体が複数存在する環境においては, 各々の存在や動作が相互に影響を及ぼし合うことは不可避である。双方が受動的に相手の動作を観察しているだけでは円滑な相互回避はできず, 一方が先に自分の意図を表す動作をとることで意思表示をし, 相手に自分の動作を考慮した予測・行動をさせることが重要となる。このように自己の動作が他者の動作に与える影響を積極的に利用し, 他者の動作を緩やかに誘導することで, 相互にとって安全かつ円滑な動作が実現できると期待される。これを実現するためには, 「自分がこう動けば相手はこう動くはずである」という相手の行動モデルが必要となる。

本研究では, 移動体の行動を予測すること, および自分の動作によって他の移動体の動作を誘導することを目指す。本稿では, そのために必要な人間歩行者の行動モデルについて, 関連研究の調査に基づいて基礎的な検討をしたので, これについて報告する。

2. 関連研究

歩行者のモデル化に関する研究は 1970 年代頃から盛

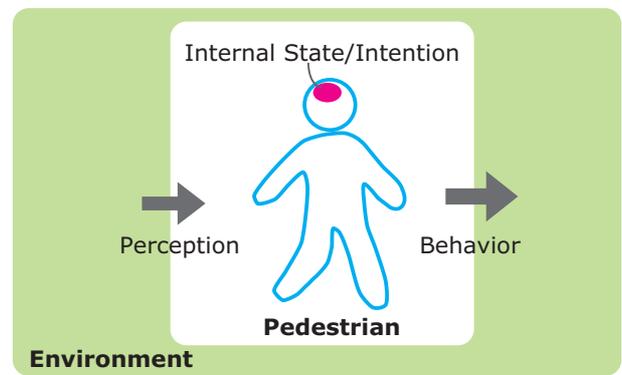


Fig. 1 Conceptual Diagram of Pedestrian Model

んに行われており¹⁾, そのほとんどが公共空間における群集流動のシミュレーションを目的としたものである。歩行者は周囲の環境を知覚し, 知覚された環境からの刺激と, 自己の内部状態や意図に基づいて行動を生成する (Fig. 1)。このような歩行者のモデル化を考えるにあたっては, 以下の 3 要素が重要である。

- 歩行者の目的地
- 歩行者の意図・状態
- 生成される歩行軌跡の自然さ (滑らかさ)

これまでに提案されている歩行者のモデル化に対するアプローチは, セルオートマトンを用いたもの, 歩行者に対して仮想的な力がかかるとしたもの, その他, に大別できる。以下では, 各アプローチについて上記の 3 要素に留意しつつ関連研究を概観する。

2.1 セルオートマトンを用いたモデル

Fukui らは, セルオートマトンを用いて歩行者の行動をモデル化した²⁾。また, Was らは, 各エージェントに隣接セルの混雑度合いに応じた有限の内部状態を持たせ, それに基づいて戦略的に行動を決定するモデルを

提案している³⁾。Burstedde らは、セルオートマトンをもとにしたフロアフィールドモデルを提案している⁴⁾。各セルには、人の存在情報の他に、セルから出口までの距離情報と、そのセルを踏んだ足跡数の情報を記録する。これにより、最短経路を通るという行動と、人に追従するという行動が確率的に選ばれるモデルになっている。また、このモデルに摩擦の効果⁵⁾や視野・向き⁶⁾などの概念を導入し、より実際の人間の行動に近づける試みがなされている。

セルオートマトンに基づいたモデルでは、環境を格子状のセルに離散化し、行動もそれに応じてムーア近傍のセルへの移動としてモデル化される。このようなモデル化を行うことで、簡単なルールで群集の挙動を表現することが可能になっている。一方で、行動がセル間の移動として表現されてしまうため、個々の人間の行動としては不自然であり、現実⁷⁾に即しているとは言えない。また、歩行者の目的地は既知のものとして与えられており、歩行者の属する集団や各歩行者の意図については考慮されていない。

2.2 仮想的な力を用いたモデル

Helbing らは、人と人や、人と環境の間に“Social Force”という仮想的な力を考え、これらの相互作用を微分方程式で記述する Social Force Model を提案した⁷⁾。Social Force Model は、歩行者を粒子として捉え、その粒子に以下のような 4 種類の力が働くと仮定したモデルで、これらの合力によって歩行者は移動する。

- 理想速度に近づけるための加速力
- 他者からの斥力
- 壁などの環境からの斥力
- 他者や物体などからの引力

Helbing らは、このモデルを基にして、パニック時の群集のマクロな挙動を再現することにも成功している⁸⁾⁹⁾。

Social Force Model は数学的にも取り扱いやすく、その後¹⁰⁾に提案されたモデルの多くがこのモデルの考え方を継承している。一方、Social Force Model は通常¹¹⁾の環境での歩行者のモデルとしては、しばしば自然ではない行動を生成する。これは、Social Force Model が無意識的な行動に近いレベルのモデル化になっており、上位の意図や内部状態などをモデル化できてはいないからであると考えられる。

これに対して柳沢¹²⁾らは、歩行者の視線計測実験の結果に基づき、サブゴールを適切に設定するモデルを提案した¹⁰⁾。これらのモデルは上述した Social Force Model の問題を部分的には解決することを指向したものであるが、十分とは言えない。

2.3 その他のモデル

セルオートマトンや Social Force Model ほど取り扱いやすくはないが、本章の冒頭で述べた歩行者モデルに重要な 3 要素を取り扱った研究を中心にその他のモデルについて述べる。

Hoogendoorn ら¹¹⁾や、Shao ら¹²⁾は、歩行者の内部状態を考慮したモデルを提案している。Hoogendoorn らは、歩行行動は strategic, tactical, operational の 3 階層の決定の結果として生成されていると仮定し、それに基づいた歩行者モデルを提案している。Shao らのモデルでは、歩行者は内部心理状態を表すいくつかの変数を持っており、それらの値がある閾値を超えるとそれに応じた振る舞いが選択されるようになっている。これらの研究のように、行動生成をいくつかの階層に分けたモデル化を行うことで、Social Force Model のような下位のレベルの行動だけでなく、人間の意図や状態をうまく取り入れることができると考えられる。

Sakuma らのモデルでは、歩行者は基本的には環境に張られたベクトル場に従って行動する。他者との衝突回避については、いくつかのルールに基づいた状態遷移によって表現している¹³⁾。このモデルのように、いくつかの行動パターンに応じて歩様を生成することによって、自然な歩行動作の生成が可能になると考えられる。

浅野¹⁴⁾らは、他者の行動の先読みをし、コストを最小化するような行動を選択するモデルを提案した¹⁴⁾。ただし、ここでの先読みとは、周辺歩行者が一定速度で歩き続けるという極めて単純な予測である。

Antonini らのモデルでは個々のエージェントの局所的な行動の選択肢を動的に離散化し、その中から最も効用の高いものを選択することにより、計算量の低減を可能にしている¹⁵⁾。

複数の人が存在する環境においては、パーソナルスペースという考え方が一般的に用いられている。パーソナルスペースとは、自分の周りの心理学的に自分のものとみなしている空間のことであり、それを侵害されると人は不快感、怒り、不安などを感じると言われる¹⁶⁾¹⁷⁾。これまで紹介したモデルはどれも何らかの形でパーソナルスペースの概念を反映させていると言えるが、劉¹⁸⁾らはこれを陽に考慮し、それを維持するような動作を生成する歩行者モデルを提案している¹⁸⁾。ただし、このモデルでは各歩行者の組合せに対して、パーソナルスペースの干渉判定を行う必要があり、計算量が膨大になると考えられる。

2.4 モデルを用いた歩行者誘導に関する研究

前述したように、数学的な取り扱いやすさという観

点から、Social Force Model を用いて歩行者を誘導することを指向した研究がいくつか行われている。

著者らは、ロボットの動作が歩行者にどのような影響を与えるのかを Social Force Model に基づいて計算し、歩行者に所望の動作をさせるような行動を選択するロボットの開発を行ってきた¹⁹⁾。

Kirkland らは、ロボットの動作によって歩行者群の流れをコントロールすることを試みている²⁰⁾²¹⁾。この研究では、ロボットが特定の周期運動を行うことによって群集を整流したり、ロボットに粘着性の仮想的な力を持たせることによって流れをコントロールしたりできる可能性が示されている。ただし、この研究はシミュレーションにとどまっており、具体的にロボットが歩行者に対してどのような影響を与えるかについては議論されていない。

3. モデル化の基礎検討

3.1 モデル化の方針

Fig. 1 に示したように、歩行者は環境からの刺激と、自己の内部状態や意図に基づいて行動する。行動の誘導を考えたとき、このうち直接的に操作可能なのは、環境の一部（移動体の存在・動作）のみである。つまり、直接的には操作不可能な環境要因や歩行者の意図・状態がある中で、直接操作可能な環境要因を適切に操作することによって歩行者の行動を誘導するということになる。ここで、誘導の対象は、長期的な目的地や歩行ルートを選択といったレベルではなく、比較的短期的な歩行動作のレベルとする。

他者の行動誘導という目的に対しては、数学的に取り扱いやすかつ、モデルから生成される歩行が現実 に即した自然なものであることが求められる。このためには、少なくとも環境を連続的なものとして取り扱う必要がある。また、行動に関しても極端な離散化は望ましくない。Social Force Model はこのような条件を満たしているが、前章に述べたように、歩行者の意図や状態について考慮されておらず、状況によっては生成される行動が不自然なものになってしまう。したがって、これらの課題を解決しつつ、数学的に取り扱いやすいモデルが望ましいと言える。

3.2 モデルの基礎検討

これまでの議論をふまえ、本研究では Fig. 2 のようなモデル化を考える。このモデルは、現在生成される行動は、現在歩行者にかかっている仮想的な Social Force と歩行者の現在の内部状態および意図に起因するというものである。また、現在の状態は 1 ステップ前の状態と、現在の Social Force に依存する。すなわち Social Force

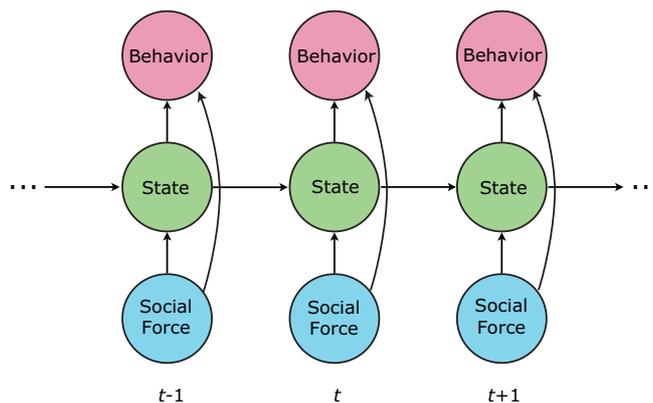


Fig. 2 Proposed Basic Model of Pedestrian Behavior

Model のように仮想的な力がそのまま加速度となって行動を生成するのではなく、Social Force によって内部状態が変化し、そこから行動が生成されるというモデルとなっている。

また提案モデルでは、内部状態の変化に伴って、行動意図が選択される。ここで行動意図とは、例えば「前を行く歩行者を追い抜く」というような戦略のこととする。これは、Hoogendoorn らのモデルにおける tactical レベルに相当する。すなわち、Social Force と内部状態に基づいて tactical な行動戦略が決定され、その上で operational レベルの挙動が生成されるということになる。

このようにモデルを階層化することによって、人間にかかる Social Force のモデルは共通のまま、歩行だけに限らず様々な移動体のモデル化につなげることができると思われる。

4. おわりに

本研究では、他者の行動予測及び行動誘導を目指し、そのために必要な歩行者の行動モデルについて、関連研究の調査に基づいて基礎的な検討を行った。

今後は、提案した基礎モデルをもとにモデルの詳細化および妥当性の検証を行う。また、歩行者だけでなく、多様な移動体の行動をモデル化する予定である。

参考文献

- 1) L.F. Henderson: On The Fluid Mechanics of Human Crowd Motion, *Transportation Research*, **8**, 509/515 (1974)
- 2) M. Fukui and Y. Ishibashi: Self-Organized Phase Transitions in Cellular Automaton Models for Pedestrians, *Journal of the Physical Society of Japan*, **68**, 8, 2861/2863 (1999)
- 3) J. Was: Cellular Automata Model of Pedestrian Dynamics for Normal and Evacuation Conditions, *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications* (2005)
- 4) C. Burstedde, et al.: Simulation of Pedestrian Dynamics using A Two-Dimensional Cellular Automaton, *Physica A*, **295**, 507/525 (2001)

- 5) A. Kirchner, *et al.*: Friction Effects and Clogging in A Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics, *Physical Review E*, **67**, 056122, 1/10 (2003)
- 6) 柳澤, 西成: 群集の集団運動と拡張フロアフィールドモデル, 応用力学研究所研究集会報告, 17ME-S2, 28 (2005)
- 7) D. Helbing and P. Molnár: Social Force Model for Pedestrian Dynamics, *Physical Review E*, **51**, 5, 4282/4286 (1995)
- 8) D. Helbing, *et al.*: Freezing by Heating in A Driven Mesoscopic System, *Physical Review Letters*, **84**, 6, 1240/1243 (2000)
- 9) D. Helbing, *et al.*: Simulating Dynamical Features of Escape Panic, *Nature*, **407**, 487/490 (2000)
- 10) 柳沢, 他: 視線に基づくサブゴール決定過程を取り入れた歩行者モデル, 情報処理学会論文誌, **47**, 7, 2160/2167 (2006)
- 11) S.P. Hoogendoorn, *et al.*: Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modeling, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, M. Schreckenberg and S.D. Sharma (eds.), 123/154, Springer (2002)
- 12) W. Shao and D. Terzopoulos: Autonomous pedestrians, *Graphical Models*, **69**, 246/274 (2007)
- 13) T. Sakuma, *et al.*: Psychological model for animating crowded pedestrians, *Computer Animation and Virtual Worlds*, **16**, 343/351 (2005)
- 14) 浅野, 桑原: 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, **59**, 3, 38/41 (2007)
- 15) G. Antonini, *et al.*: Discrete choice models of pedestrian walking behavior, *Transportation Research Part B*, **40**, 667/687 (2006)
- 16) E.T. Hall: *The Hidden Dimension*, Anchor Books (1966)
- 17) R. Sommer: *Personal Space: The Behavioral Basis of Design*, Prentice Hall (1969)
- 18) 劉, 他: パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群集流動, 土木学会論文集 D, **64**, 4, 513/524 (2008)
- 19) 田村, 浅間: 移動ロボットの動作による人間動作の誘導, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-D18 (2010)
- 20) J.A. Kirkland and A.A. Maciejewski: A simulation of attempts to influence crowd dynamics, *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 4328/4333 (2003)
- 21) B.D. Eldridge and A.A. Maciejewski: Using Genetic Algorithms to Optimize Social Robot Behavior for Improved Pedestrian Flow, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 524/529 (2005)