

# サービスロボット： 人間・ロボット共存環境における サービスロボットの振る舞い\*

Service Robot : Behavior of Service Robot in Human-Robot Coexisting Environment

田村雄介\*\* 浅間 一\*\*\*  
Yusuke TAMURA and Hajime ASAMA

**Key words** service robot, human-robot coexisting environment, intelligent environment, pedestrian model

## 1. はじめに

一般にサービスロボットという場合、製造業における産業用ロボットを除いたさまざまなロボットが含まれる。サービスロボットは、産業用ロボットに比べるとまだまだ実用化が進んでいるとはいえないが、近年では掃除ロボットや搬送用ロボットなど徐々にわれわれ人間社会に入ってきてつつある。

サービスロボットは、医療、介護、警備、掃除、案内、教育、娯楽といったパーソナルサービスのためのロボットと災害対応、建設、農業、地雷除去などのパブリックサービスのためのロボットに分けることができる<sup>1)</sup>。特に前者のようなパーソナルサービスのためのロボットにおいては、人間と共存する環境で働くことが要求される。本稿では、このような人間と共存する環境で移動を伴うサービスを行うロボットについて扱う。

人間とロボットが共存する環境においては、工場などのように、人間とロボットの存在する領域が明確に分けられている環境で動作する場合は異なり、さまざまな問題が生じうる。中でも特に、安全の確保というは避けては通れない問題である。また、人間とロボットの衝突を避けなければいけないのはもちろん、ロボットと同じ空間に存在する人間に対して不快感や戸惑いを与えるような振る舞いをするのは好ましいとはいえない。一方、必要以上に安全性を重視するあまり、ロボットを常に低速で動作させてしまうのでは、作業の効率が著しく低下してしまう。これでは、人間を支援するべきサービスロボットとしては本末転倒になってしまう。したがって、人間・ロボット共存環境で動作するサービスロボットにとっては、安全性を担保した上で効率的な動作をすることが求められる。

本稿では、サービスロボット研究の中でも特に、人間と共存する環境で移動を伴うサービスを行うロボットの安全

性と効率性を両立するための方法について解説する。安全性と効率性の両立のためには、環境認識技術や、制御技術など、ロボット動作の基礎となる技術は不可欠であるが、本稿では、それらの基礎技術の存在は前提とした上で、特に人間・ロボット共存環境でのサービスロボットに必要なと考えられる技術について述べる。また、これに加えて今後の人間共存型サービスロボット研究の進むべき方向性について述べる。

## 2. 環境の知能化による人間・ロボット共存の形

ロボットに搭載されたセンサによって人間との衝突を回避するための研究は20年以上にわたって数多く行われてきた。しかしながら、見通しの悪い交差点などでは、ロボットに搭載されたセンサのみで安全に動作しようとする、動作速度を低下させざるを得ない。一方で、環境側にセンサを配置し、環境中の人間や物体の位置を管理するといった環境の知能化・情報構造化に関する研究が行われている<sup>2)3)</sup>。環境中に設置されたセンサ情報を利用することによって、ロボット自身からは検出できない範囲に存在する歩行者等の位置を知ることができるため、安全に動作することが可能になる。

このようなセンサによる計測から得られるものは、ロボットの周囲の人間やその他の物体の、ある瞬間における位置情報である。ところが、図1のように、ロボットに対して人間が同じ位置に存在している場合でも、ロボットのとるべき行動を考えたとき、人間の移動方向や移動スピードなどによって全く意味が異なってくる。図1(a)の場合、交差点に人間が向かってきているので、ロボットがそのまま進んでしまうと衝突する可能性が高い。したがって、安全のためには、ロボットはいったん停止して人間をやり過ごす必要があるだろう。一方、図1(b)の場合は、人間は交差点から離れていくので、ロボットはそのまま進んでも問題がない。ここで、図1(a)の場合と同じように、人間の位置だけを考えていったん停止を行ってしまうと、安全性という観点からは問題ないが、非効率的な動作になってしまう。このように、ロボットが人間と共存する

\*原稿受付 平成24年5月25日

\*\*中央大学理工学部(東京都文京区春日1-13-27)

\*\*\*正会員 東京大学大学院工学系研究科(東京都文京区本郷7-3-1)

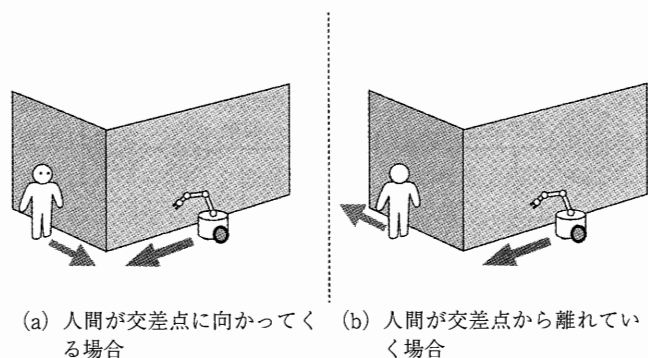


図1 見通しの悪い交差点でのロボットと人間の相対関係の違いによるロボットのとるべき行動の変化

環境で安全かつ効率的に動作するためには、周囲の人間の現在の位置だけでなく、その将来の位置を予測することが重要となる。

ある特定の環境において人間の移動を予測するためには、環境の意味を考慮することが有効である<sup>4)</sup>。つまり、人間が出現または消失する可能性のある場所（例えば部屋のドア）や、立ち止まることが多い場所（例えば掲示板の前）などがわかれば、その周囲の人間がどのように移動するかが予想しやすくなるであろう。ただし、このようなアプローチでは、設計者が環境についてあらかじめよく知っていなければならず、さまざまな環境に適用することはあまり現実的ではない。

これに対して、近年では環境中に設置したセンサによって人間の移動軌跡を計測・蓄積し、蓄積されたデータをもとに生成された人間の移動モデルを予測に用いるというアプローチが提案されてきている<sup>5)6)</sup>。このようなアプローチにおいては人間の移動をモデル化しているのだが、裏を返すと環境のモデル化をしているともいえる。すなわち、長時間にわたる計測データの蓄積によって、人間が出現ないし消失する場所や、人間がよく立ち止まる場所など、環境の情報が人間の移動軌跡を通じてモデル化されていることになる。実際に計測されたデータを用いるため、さまざまな環境に適用することが可能である。

著者らの手法<sup>6)</sup>では、環境に設置したレーザレンジファインダによる計測に基づいて、離散化された空間での歩行者の移動傾向をデータベース化し、そのデータベースから生成される仮想的な力積によって歩行者の移動を予測する。歩行者の位置を複数のパーティクルの分布によって表現しているため、図2に示すように、環境によっては複数の主要な仮説を支持するような予測が可能となっている。この例は、右側の廊下から歩き始めた歩行者の将来位置を予測したものである。ここでは、エレベータの方に進む可能性と、歩行者の進行方向右手側にある部屋に入る可能性の2つをともに予測することができているのがわかる。

このように、知能化された環境での計測結果に基づいて人間の移動予測を行うことで、人間とロボットの衝突可能

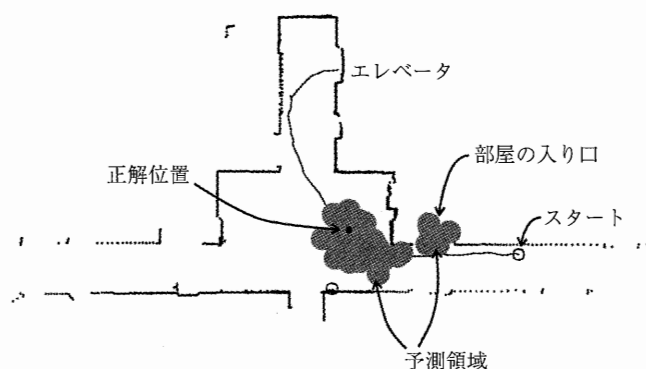


図2 レーザレンジファインダによる計測から得られた移動傾向データベースに基づいた人間の移動予測結果の一例

性を予測することが可能になる。著者らは、平成20年度から平成23年度まで4年間にわたって行われたNEDO次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトにおいて、上述した人間の移動予測技術に基づき、安全情報提供モジュールというソフトウェアモジュールを開発し<sup>7)</sup>、公開している\*。

### 3. ロボットが人間に与える影響の考慮

前章で述べたような環境知能化による効果が特に発揮されるのは、ロボットと人間が同じ環境に存在しているものの、互いを検出できていないような状況である。一方、ロボットと人間が互いの存在を認識している状況では別の問題が発生すると考えられる。

移動ロボットによる人間との衝突回避を扱った研究は数多存在するが、これらの研究のほとんどは人間を単なる移動障害物と捉え、等速直線運動する障害物との衝突回避の問題へと単純化している。しかしながら、人間は転がっているボールなどとは異なり、自分の周囲に存在する他者や環境からの影響を不可避免的に受けてしまう。したがって、人間がロボットの存在を認識している場合、心理的な影響<sup>8)</sup>だけにとどまらず、その行動にもロボットから受ける影響が反映されることになる。

著者らは、通路環境において人間とロボットがすれ違う際に、ロボットの位置や動作が人間の歩行にどのような影響を与えるのかを調査した<sup>9)</sup>。実験の結果、静止したロボットの位置が、約2m幅の通路の中心から10cm片側にずれるだけで、歩行者は通路の広い側を通過することが確認された。このことから、人間は自分の周囲のわずかな環境の変化にも敏感に影響を受けることがわかる。一方、ロボットが通路方向に対して垂直な向きに移動する条件では、人間が回避する方向は、回避方向を決定する瞬間のロボットの位置と動作方向が影響していることが示唆された。このことから、人間はロボットの移動をある程度予測して、それに応じて自らの動作を決定するということがわかる。この実験の場合でいえば、ロボットとすれ違う際に

\*[http://openrtm.org/openrtm/ja/project/NEDO\\_Intelligent\\_PRJ\\_ID395](http://openrtm.org/openrtm/ja/project/NEDO_Intelligent_PRJ_ID395)

広く空いているであろう側を予測し、そちらの方向を選択して回避していると考えられる。このような相手の動作の予測に基づいた回避行動は、人間対ロボットに限った話ではなく、当然、人間対人間でも同様に行われている。

他者の行動を予測するためには、他者の周囲の環境と、その際にどのような行動をとるか、という入力と出力の間をつなぐモデルが必要である。

歩行者のモデル化に関する研究は、1970年代ごろから盛んに行われているが、そのほとんどが公共空間における群衆の流れをシミュレーションすることを目的としたものである。これらの研究は、セルオートマトンのように環境や歩行者の行動を離散化するもの<sup>10)</sup>と、連続的な空間での連続的な行動のモデル化の2つに大きく分けることができる。

前者のモデルは、簡単なルールで群衆の挙動を良く再現できるが、個々の人間の行動として見た場合、環境・行動が離散化されているために不自然なものになってしまうのは避けられない。

後者のモデルの代表的なものとしては、HelbingらによるSocial Force Model<sup>11)</sup>がある。このモデルは、歩行者を粒子として捉え、その粒子に対して、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、の4つの仮想的な力が働くことと仮定したものである。これら4つの合力によって歩行者は移動することになる。このような歩行者モデルが十分に適切なものであれば、周囲の環境とロボット自身の存在・行動を入力とすることで、ロボットの周囲に存在する人間の行動を予測することができるはずである。

通路でのすれ違い等の状況を考えてとき、対向者が自分のことを避けてくれるのであれば、自分は回避行動をとる必要がない。逆に、対向者が回避行動をとらない場合は自分が避ける必要がある。ロボットと人間のすれ違いにおいても、ロボットの効率的な動作という観点からは、人間が先に避けてくれる場合は、ロボットが回避行動をする必要はないはずである。

著者らはこのような考え方に基づいた移動ロボットと人間のスムーズな回避動作生成手法を提案している<sup>12)</sup>。この手法では、人間の回避動作がSocial Force Modelに従うと仮定し、人間がロボットを回避しようとしているか否かを、その歩行軌跡から推定する。すなわち、ロボットを回避対象として考慮している場合は、人間はロボットから斥力を受けるような歩行軌跡をとるはずであり、ロボットに気づいていないか、回避する意志がない場合は、ロボットから斥力を受けずに歩行するはずである、という考え方である。このような考え方にに基づき、ロボットに搭載されたレーザレンジファインダから得られる実際の歩行者の軌跡が、Social Force Modelによって計算される2つの軌跡(ロボットからの斥力有り/無し)のどちらに近いかによって、歩行者がロボットを避けようとしているか否かを判別する。判別結果に基づいて、ロボットは歩行者が避けよう

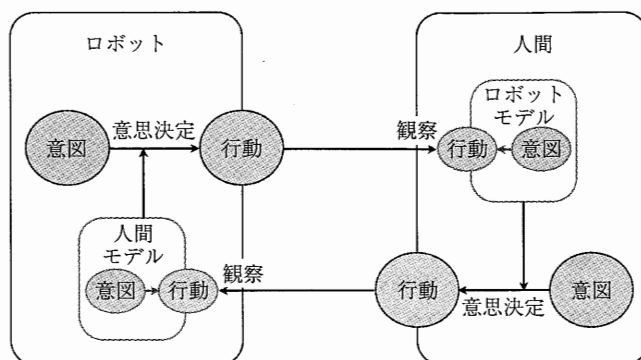


図3 ロボットと人間の相互意図推定

としていないときのみ回避行動を生成することで、不必要な回避動作の生成をすることがなくなり、人間とのスムーズな相互回避を実現することができている。

#### 4. ロボット動作による人間動作の誘導

前章で紹介した研究を含め、従来のほとんどの研究においては、ロボットは基本的に受動的な存在であり、人間の行動の観察に基づいて、自らの行動を決定する。

しかし、相互回避の問題だけ考えても、人間が回避行動を開始するタイミング次第では、必ずしもスムーズに回避することができるとは限らない。すなわち、ロボットが「人間は回避をしない」と判断して自ら回避行動を生成するのとほぼ同時に、人間が回避行動を開始した場合、ロボットと人間が同じ方向に避けようとしてしまうという事態が起こりうる。これは、われわれ人間同士でもしばしば見受けられる事態である。つまり、このような二者の相互回避においては、受動的に相手の行動を観察して、それに基づいて自らの行動に対する意思決定を行うだけでは不十分であるといえる。

図3に、人間とロボットが相互に意図推定する際の過程を簡単に図式化したものを示す。人間は、ロボットの行動を観察し、その観察結果を自らの脳の内にもっているロボットの動作モデルと照らし合わせ、そのロボットの意図を推定する。推定されたロボットの意図と自らの意図に基づいて、自己の行動を決定する。ロボットの知能のレベルにはさまざまなものがあるが、ここでは人間と同様の過程を経て自らの行動を決定するものを考える。すなわち、ロボットは人間の行動を観察し、その観察結果を自らの内にもつ人間の動作モデルと照らし合わせて人間の意図を推定する。推定された人間の意図とロボット自身の意図に基づいて自己の行動を決定する。

このような意図推定においては、心の理論と呼ばれるような、他者の内部状態を再帰的に推定する能力が必要になる<sup>13)14)</sup>。他者の内部状態を再帰的に推定できるということは、すなわち、自分の行動が相手の行動にどのような影響を与えるかを予測し得るということである。これをうまく利用すれば、自らが積極的に行動し、行動によって自身の意図を表出することで、他者の行動を誘導することが可能

になると考えられる。ロボットが人間の行動モデルをもっており、自らの行動が人間に与える影響を予測できるのであれば、ロボット自身の動作によって、ロボット・人間の双方にとって安全かつ円滑な相互回避を行うことができるように人間の動作を誘導することができると期待される。

このようなロボットによる人間の誘導は、相互回避の問題だけにはとどまらず、さまざまな人間とロボットのインタラクションの場面において必要になると考えられる。今後は、こういった誘導という観点からロボットと人間の関係を検討していく必要があるだろう。

## 5. おわりに

本稿では、人間と共存する環境で移動を伴うサービスを行うロボットの安全性と効率性を両立するためのいくつかの方法について解説するとともに、今後の人間共存型ロボット研究の方向性の1つとしての「誘導」という観点について述べた。

今後、サービスロボットが世に広く普及するためには、本稿で述べたような安全性と効率性の問題を解決することは必要不可欠であると考えられる。ロボットの安全を考える際には、ロボットそのものだけを考えては不十分であり、環境や人間の特性を理解・利用することが必要であろう。

また、今後のサービスロボットの普及にしがたがって、人間とロボットの相互作用の仕方が変化する可能性は非常に高い。現在のところ、サービスロボットはまだまだ普及しているとはいえない。したがって、日常的にロボットと接しているわけではないため、多くの人にとってはロボットの動作は未知のものであり、予測が困難であろう。ロボットが周辺に存在することが日常的になり、ロボットの動作をある程度予測できるようになれば、それに応じて人間の振る舞い方も変化していくと考えられる。

## 謝 辞

本稿で紹介した研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構による次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトの成果である。ここに心から御礼を申し上げる。

## 参 考 文 献

- 1) 浅間一：サービス工学とサービスロボティクス，精密工学会誌，78, 3 (2012) 196.
- 2) 橋本秀紀，秋山尊志：空間知能化—インテリジェント・スパー

- 3) 村上剛司，長谷川勉，木室義彦，千田陽介，家永貴史，有田大作，倉爪亮：情報構造化環境における情報管理の一手法，日本ロボット学会誌，26, 2 (2008) 192.
- 4) 田所諭，石川裕，武部智全，高森年：人間と共存協調するロボットのための回避行動の生成（第1報，人間の運動の確率的予測とマニピュレータの回避計画），日本機械学会論文集C編，62, 598 (1996) 2329.
- 5) 野口博史，山田隆基，森武俊，佐藤知正：大量の人移動計測データに基づく移動ロボットの人回避経路計画，第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集，(2011) RSJ2011AC2I2-7.
- 6) S. Hamasaki, Y. Tamura, A. Yamashita and H. Asama: Prediction of Human's Movement for Collision Avoidance of Mobile Robot, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, (2011) 1633.
- 7) 田村雄介，寺田善貴，濱崎峻資，森下壮一郎，岡本浩幸，浅間一：知能化環境におけるオブジェクトの位置データ解釈とロボットへの安全情報の提供，第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集，(2011) RSJ2011AC3B3-4.
- 8) E. Pacchierotti, H.L. Christensen and P. Jensfelt: Evaluation of Passing Distance for Social Robots, Proc. IEEE Int. Symp. Robot and Human Interactive Communication, (2006) 315.
- 9) 田村雄介，浅間一：ロボットの位置及び動作が歩行者動作に与える影響，第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集，(2009) 1Q1-02.
- 10) C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider and J. Zittartz: Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton, Physica A, 295 (2001) 507.
- 11) D. Helbing and P. Molnár: Social Force Model for Pedestrian Dynamics, Physical Review E, 51, 5 (1995) 4282.
- 12) Y. Tamura, T. Fukuzawa and H. Asama: Smooth Collision Avoidance in Human-Robot Coexisting Environment, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, (2010) 3887.
- 13) D. Premack and G. Woodruff: Does the Chimpanzee Have a Theory of Mind?, The Behavioral and Brain Sciences, 1, 4 (1978) 515.
- 14) R. バーン，A. ホワイトウン：マキャベリの知性と心の理論の進化論，ナカニシヤ出版，(2004).



田村雄介

2008年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。東京大学人工物工学研究センター特任研究員，同大学院工学系研究科特任研究員を経て，2012年より中央大学理工学部助教。ヒューマンロボットインタラクションの研究に従事。博士(工学)。



浅間一

1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。理化学研究所研究員補，同副主任研究員等を経て，2002年東京大学人工物工学研究センター教授。2009年同大学院工学系研究科教授。サービスロボティクス，移動知等の研究に従事。工学博士。