

# 人の回避行動を考慮した移動ロボットの経路計画法の検討

浅井 悠佑<sup>1</sup> 廣井 慧<sup>2</sup> 米澤 拓郎<sup>2</sup> 河口 信夫<sup>1,2</sup>

**概要：**現在、人とロボットが身近に触れ合う機会が増えており、人に対してロボットが安全な制御をすること、つまり、Human First なロボットが求められている。人に対して安全な移動ロボットを開発する上で重要なことの1つとして、人の回避行動をモデル化、予測をして、事前に人との衝突を防止することである。本研究では、人の回避行動を4つに分類し、それぞれの回避行動に合わせた、効率的かつ安全な局所的経路計画法を提案する。実験ではシミュレーションを用いて、既存手法と提案手法の比較を行った。シミュレーションの結果、提案手法は、既存手法に比べて、早くかつスムーズに人を回避しながら目的地に到達することが確認できた。

## Towards Adaptive Local Planning with Human Behavior Model for Mobile Robots

Yusuke Asai<sup>1</sup> Kei Hiroi<sup>2</sup> Takuro Yonezawa<sup>2</sup> Nobuo Kawaguchi<sup>1,2</sup>

### 1. 本研究の目的

本研究では、人間の回避行動をいくつかに分類し、その回避行動に最適な移動ロボットの局所的経路計画法を検討する。近年、ロボットが私達の生活に登場する場面が増えており、ロボットと人が共存する時代へと近づいている。その要因として、コンピュータの小型化や低下価格化、ロボティクスの発達、制御技術の向上などが挙げられる。最近ではPepperやaiboなど人々の生活に身近に関わるロボットが登場してきており、ルンバなどの自走式掃除ロボットは生活に欠かせない日用品として重宝している家庭も多く存在する。ロボットと人が絡んだ事故はセンセーショナルに報道されることもあり、人との事故を減らすことが今後のロボットの普及に大きく寄与すると考える。2018年3月、アメリカのアリゾナ州で実験走行中の自動運転車が歩行者と衝突事故を起こし、歩行者が死亡する事故が起きた。この事故は自動運転車が起こした初めての死亡事故ということで、世界的に大きく報道された。事故を受けて自動運転技術に対する疑問の声が高まり、各地で自動運転車

の研究、開発を自粛する動きが見られた。このようなことから、人に対して特に安全な制御、経路計画法を開発することは、自動運転車のみならず、人々の生活に密接に関わるロボット全般においてとても重要である。

制御技術の安全を向上する技術の一つとして、現在実用化されているものの中に自動車の自動緊急ブレーキシステムがあるが、これは進行方向に障害物がある時に自動でブレーキがかかるシステムである。自動ブレーキシステムを含め、多くの既存手法[1]では、人やその他障害物の特性をほとんど考慮せずに障害物を一括りにして経路計画の作成や制御をしているものが多い。そのような制御方法だと、制御の際に無駄な経路計画を作成したり、人間では起こしえないような事故につながる可能性がある。

人同士のすれ違いや回避は、人同士が視線のやり取りなどをして進行方向をお互いにさり気なく伝えたり、話しかけたりしてスムーズに回避することが多い。また、犬などの動物や静的、動的な障害物に対峙したときは、人を避ける際にとる行動と異なることが多い。

本研究では、人の回避行動を4つに分類して、その動きに合わせてロボットが回避行動をとる新たな経路計画手法を開発、検証する。既存手法では、人やその他障害物の特性をほとんど考慮せずに経路計画を作成しているものが多い。そこで提案手法として、障害物としての人の回避行動

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>2</sup> 名古屋大学未来社会創造機構 Institut of Innovation for Future Society, Nagoya University



(a) 名古屋大学河口研究室で  
開発している AGV

(b) 電動車いす

図 1 本研究で制御を想定しているロボット

をモデル化し、その動きに最適化した経路計画を作成、検証した結果、既存手法に比べて効率性や制御面において優位性が見られた。また、本研究では図 1 のようなロボットの制御を想定している。AGV(Automated guided vehicle)は無人搬送車のことをいい、この AGV を用いて物の運搬等をするをねらいにしている。

## 2. 関連研究

動的な障害物に対する局所的な経路計画法、動的な物体同士が衝突を回避するためのアルゴリズムや人の動きをモデル化して、フレーム毎の人の姿勢を予測する先行研究がある。本研究では、人の動きのモデル化をして、そのモデルに基づいて局所的な経路計画をするというアプローチについて説明をする。

### 2.1 動的障害物を考慮した局所的経路計画

Rösmann ら [1] は動的な障害物を回避するための手法の 1 つとして teb local planner を提案した。この手法は、Timed Elastic Band(TEB) フレームワークを用いて、障害物回避の経路計画を作成するものである。TEB は、複数の地理的な基準点と移動体の向きからなり、複数の地理的なをそれぞれ場所的な特性を用いた時間的な間隔に分ける手法である。teb local planner は TEB に加え、ロボットの移動可能な方向、障害物の位置等を考慮に入れ経路計画を作成するが、障害物の特性は考慮していない。

### 2.2 動的な物体の相互的な障害物回避アルゴリズム

複数の障害物を考慮した回避行動 [2] はロボットを安全に制御する上で必要不可欠である。Snape ら [3] は複数の移動体が互いにスムーズに回避行動をとれるアルゴリズムの研究を行ってきた。ロボットの制御において衝突回避のみならず、スムーズな速度変化や、回避を確実に行う安定性も必要とされる。RVO2[3] では、スムーズな速度変化やアルゴリズム的に衝突を起こさない設計を実現している。ただ、複数の移動体は全て RVO2 アルゴリズムで動いてい

ることが保証されていないと、衝突の回避が行えない場合がある。

### 2.3 人の骨格情報から次の動きを予測

先行研究 [4], [5] として、3 次元の人の骨格情報を推定して、人の動きを予測する研究がある。人と身近に存在するロボットの制御をする上で、人の次の動作予測はとても大切である。なぜなら、ロボットはその予測をもとに安全な回避行動を取ることが可能となるからだ。Du ら [6] は、人の歩行ペース、手や足の開き具合の対称性、足の配置などの変化を目的関数として組み込んだ、Bio-LSTM を提案している。この手法は自動運転車での利用を想定しており、複数の歩行者の位置を同時に予測することが可能となっている。3 次元的な人の動きの予測が可能となるが、予測を用いての制御への応用がまだ不十分である。

## 3. 人の回避行動をモデル化した局所的経路計画

### 3.1 局所的経路計画と大域的経路計画

ロボットのナビゲーションや経路計画は、主に、大域的経路計画 (global planner) と局所的経路計画 (local planner) に大別される。ロボットはゴールに向かう指令を受けた後に、ゴールまでの経路計画を作成する必要があるが、地図情報を用いたゴールまでの最短経路に加えて、環境の変化や最短経路から外れた場合の修正など、ゴールへ向かっていく最中に当初の経路を変更したり修正する必要がある。つまり、ロボットが当初作成した大域的経路計画に従って進むと、障害物との接触や、周囲の状況の変化などから目的地へ到達ができなかったりするため、局所的経路計画によって大域的経路計画によって作成された経路を修正し、走行することが重要である。地図情報を用いたゴールまでの大まかな最短経路を局的経路計画 (global planner)、ゴールへ向かう際の経路の修正を局所的経路計画 (local planner) という。

### 3.2 人の回避行動モデル

人の回避行動をモデル化 [7] することが、人に対して安全なロボットの局所的経路計画を行う際に不可欠である。人の回避行動はそれぞれの人で異なり、人の性格やロボットの見た目 [8]、回避する際のその場の感情によって左右される [9], [10]。人はロボットと対峙した際に無数の回避行動を取るが、いくつかの基本的な回避行動が大半を占めると考える。本研究では人の回避行動を図 2 のように「停止」「後退」「横移動」「前進しながら回避」の 4 つに分類し、それぞれの挙動をして、人を避ける上でどの局所的経路計画法が有効なのかを検証する。

また、図 3 のように、人が歩行をしていると仮定し、現在の時刻における速度を  $v_p$ 、次フレームにおける速度を

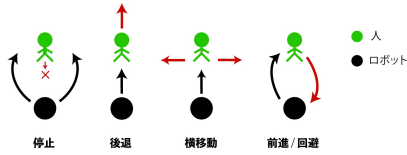


図 2 ロボットに対する人の回避行動

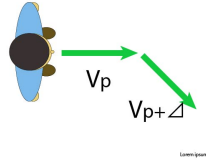


図 3 人の速度変化の推移

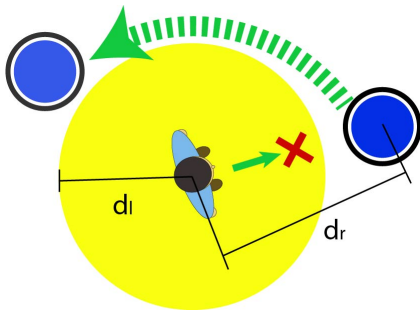


図 4 「停止」の回避行動

$v_{p+\Delta}$  とする。ここで、 $v_{p+\Delta}$  と  $v_p$  の変化量  $v_\Delta$  を以下のように定義する。

$$v_\Delta = v_{p+\Delta} - v_p$$

### 3.2.1 「停止」の回避行動

ロボットと対峙した時の人の回避行動として図 4 に示すように「停止」がある。また、以降の図では青色の円で示しているものをロボット、黄色の円で示しているものを人が回避行動を行う範囲であり、その閾値を  $d_l$  とし、人とロボットの距離を  $d_r$  とする。この回避行動モデルではロボットが人と一定以内の距離  $d_l$  に近づいた際に、人は止まると想定する。この回避行動では人はロボットに対して受動的な回避行動を行うと考えられ、ロボットが率先して人を回避しながら進行方向に進むような経路計画を立てる必要がある。また、回避行動を行う人の速度を  $v_{p+\Delta}$  とすると、以下の式で表せる。

$$v_{p+\Delta} = \begin{cases} v_p + v_\Delta & (d_r > d_l) \\ 0 & (d_r \leq d_l) \end{cases}$$

### 3.2.2 「後退」の回避行動

ロボットと対峙した時の人の回避行動として図 5 に示すように「後退」がある。この回避行動モデルではロボットが人と一定以内の距離  $d_l$  に近づいた際に、人は後退する

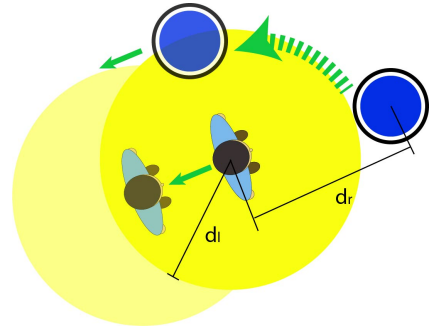


図 5 「後退」の回避行動

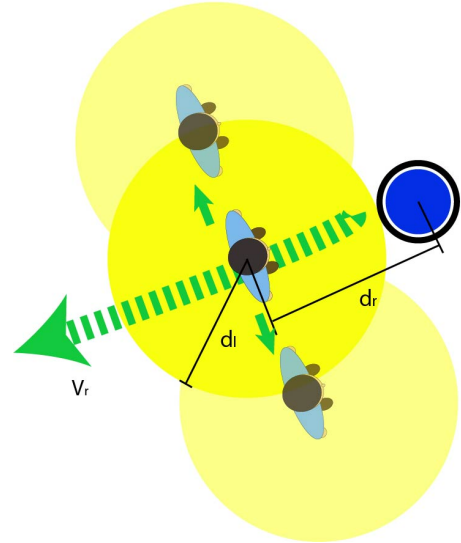


図 6 「横移動」の回避行動

と想定する。この回避行動は人がロボットと対峙して近づいた際に、後退を行う。その後、ロボットはコースを変えて、人と正面に対峙しないように回避行動を取る。ここでロボットの速度を  $v_r$  と定義すると、人の次フレームの速度  $v_{p+\Delta}$  は以下になる。

$$v_{p+\Delta} = \begin{cases} v_p + v_\Delta & (d_r > d_l) \\ v_p + v_r + v_\Delta & (d_r \leq d_l) \end{cases}$$

### 3.2.3 「横移動」の回避行動

ロボットと対峙した時の人の回避行動として図 6 に示すように「横移動」がある。この回避行動モデルではロボットが人と一定以内の距離  $d_l$  に近づいた際に、人はロボットの進行方向と垂直な方向に移動すると想定する。この回避行動は人がロボットに道を譲るという回避行動であり、ロボットは受動的にそのまま進行方向の通りに進むことで人を回避することができる。ここでロボットの速度を  $v_r$  と定義すると、人の次フレームの速度  $v_{p+\Delta}$  は以下になる。また、 $x_r$ ,  $y_r$  はそれぞれロボットの速度の x 成分, y 成分を表している。

$$v_r = (x_r, y_r)$$

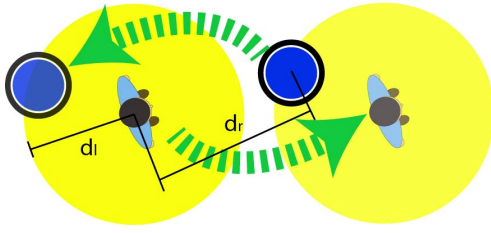


図 7 「前進/回避」の回避行動

$$v_{p+\Delta} = \begin{cases} v_p + v_{\Delta} & (d_r > d_l) \\ v_p + (y_r, -x_r) + v_{\Delta} \text{ or } v_p + (-y_r, x_r) + v_{\Delta} & (d_r \leq d_l) \end{cases}$$

### 3.2.4 「前進/回避」の回避行動

ロボットと対峙した時の人の回避行動として図 7 に示すように「前進/回避」がある。この回避行動モデルは人とロボットが正面で対峙した際にスムーズに互いが進行方向に進みつつ左右にそれぞれ回避すると想定する。この回避行動はお互いが進行方向に進みながら回避行動を行えるが、互いに接近しすぎたり、衝突を起こす可能性がある回避行動である。本研究では、この回避行動は後述する RVO2[3] を用いてモデル化をすることで、回避行動「前進/回避」を行う際に人とロボットがスムーズに回避行動をとることを可能としている。

### 3.3 「前進/回避」の回避行動で用いる RVO2

RVO2[3] は複数の速度を持った物体同士が衝突を避けるためのアルゴリズム [11] である。図 8 に示すように、2 つの物体 A, B がそれぞれ半径  $r_A, r_B$  で位置  $p_A, p_B$  にあり、速度  $v_A, v_B$  であるとする。A の速度の集合  $VO_{A|B}^{\tau}$  は、時間  $\tau$  の間に物体 A 自身と物体 B によって求められるもので、現在の時刻から時間  $\tau$  経過するまでに物体 A と物体 B が衝突する速度の集合となっている。式としては以下のように表すことができる。

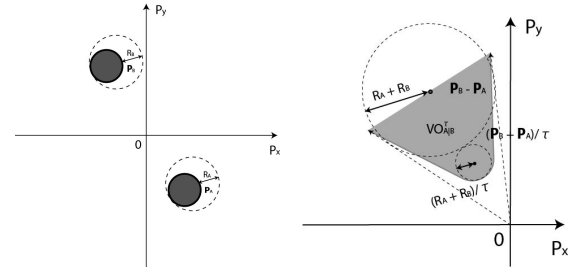
$$VO_{A|B}^{\tau} = \{v | \exists t \in [0, \tau] :: t(v - v_B) \in D(p_A - p_B, r_A + r_B)\}$$

物体 A, B それぞれがともに  $VO_{A|B}^{\tau}, VO_{B|A}^{\tau}$  ではない速度を選択することで現在時刻から  $\tau$  経過までの間、互いに衝突を回避できる。

## 4. 回避行動モデルのシミュレーション手法

### 4.1 ROS Stage シミュレータ

ROS Stage シミュレータは、ロボットの汎用ライブラリである ROS Stage において、図 9 に示すような、移動ロボットのシミュレーションを行うライブラリである。本研究では、この ROS Stage シミュレータを用いて、手法間の比較、検証を行う。なお、実験では 2 次元におけるシミュレーションのみを対象としている。



(a) 2 つの物体 A, B の位置 (b) A の速度の集合  $VO_{A|B}^{\tau}$  は、時間  $\tau$  の間に物体 A 自身と物体 B によって求められる。

図 8 物体 A, B の関係とそれぞれの速度を表した図

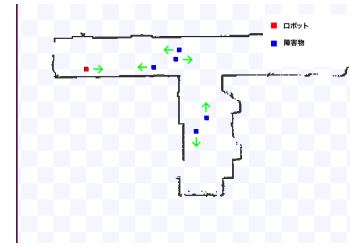


図 9 ROS Stage シミュレータを使ったシミュレーションの様子 (実験経路 2)

### 4.2 ROS Stage におけるソフトウェア構成

図 10 に ROS Stage のソフトウェア構成図を示す。

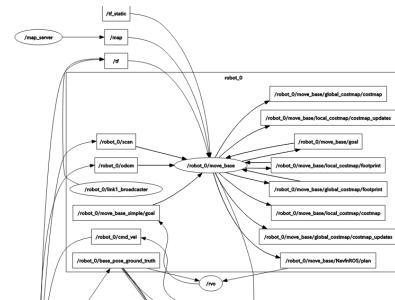


図 10 ROS におけるソフトウェア構成

図 10 に示すように、構成としては、マップを管理するノードやロボットのパラメータを扱うノード等もあるが、大きく分けて「ロボットと障害物の位置を管理」「ロボットの経路計画を行う」という 2 つがある。ロボットが持っている情報としては、マップの情報、現在位置、目的地、個々の障害物の位置と速度が挙げられる。本研究で実装した部分としては、ロボットや、人と見立てた障害物の回避行動である「停止」「後退」「横移動」「前進しながら回避」の局所的経路計画を作成する ROS ノードや、ロボットや障害物の位置を監視し、それぞれの位置関係に応じてロボットや障害物の経路を変更する ROS ノードなどが挙げられる。

## 5. 実験

### 5.1 実験の目的

本研究では、シミュレーションを用いて従来手法と提案



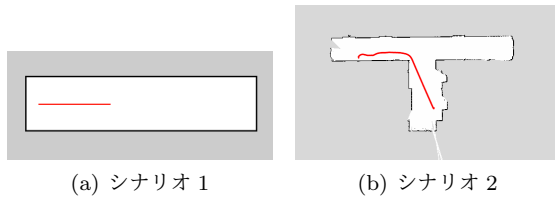


図 11 シミュレーションで用いる実験経路 1, 2

手法の比較を行う。実験の方法としては、仮想的なシミュレーションフィールド上に障害物を配置してスタートとゴールを決め、それぞれの手法について実際の経路と最短経路との距離、速度変化等の比較、評価を行う。本論文では人と仮定した障害物が回避行動「前進/回避」を行うと仮定したシミュレーションの結果を掲載する。

## 5.2 実験の内容

本研究では、ロボットの汎用ライブラリである ROS を用いて、マップの作成、障害物の配置、シミュレーション等を行う。以下の実験において、図 11(a)、図 11(b) のフィールド上で行うシミュレーションをそれぞれ、シナリオ 1、シナリオ 2 と呼ぶ。図中の赤線はスタートとゴールを結ぶ最短経路を表している。

シナリオ 1 では長方形の単純な廊下を想定しており、そこに障害物を複数配置して手法間の違いを観察する。シナリオ 1 では、単純な例を用いて手法間の違いを観察することを目的とする。

シナリオ 2 では、実際に名古屋大学 IB 館北棟 4F の廊下を 2 次元 LIDAR を用いてマップを作成して、そのマップをシミュレーションに用いた。シナリオ 2 では、交差点が存在するため、それぞれの手法間で障害物をどのように回避して交差点を曲がり、目的地に向かうかを比較、観察することをねらいとしている。なお、シミュレーションの開始時刻はすべての手法間で同じとする。

比較の対象として、teb local planner[1] を用いる。teb local planner[1] は、動的な障害物を考慮した経路計画を作成するが、障害物の特性などは一切考慮されていないため、今回の実験での比較対象として最適であると判断した。

## 5.3 実験結果

本研究で提案する手法と既存手法である teb local planner[1] の比較として、図 11 の最短経路との距離、速度変化のグラフを掲載する。シナリオ 1, 2 の最短経路との距離を図 12, 図 14 に、速度変化を図 13, 図 15 にそれぞれ示す。

結果から、手法間による目的地の到達時間は、シナリオ 1 において提案手法で 22.2 秒、既存手法で 23.6 秒、シナリオ 2 において提案手法で 31.2 秒、既存手法で 31.4 秒だった。また、速度変化を比べると、提案手法に比べて既存手法 [1] の方が激しいことが分かる。このことから、提案手法の方が既存手法と比べて早く、かつスムーズに人を回避

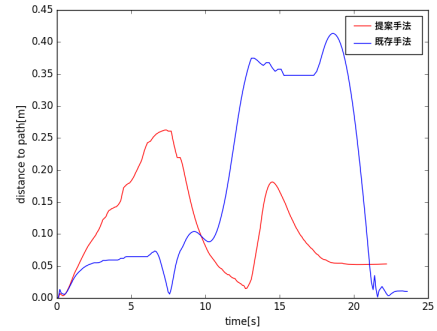


図 12 シナリオ 1 におけるロボットと最短経路との距離

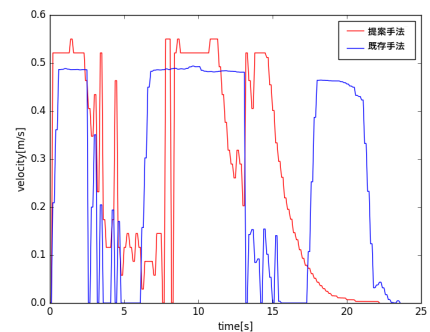


図 13 シナリオ 1 におけるロボットの速さ

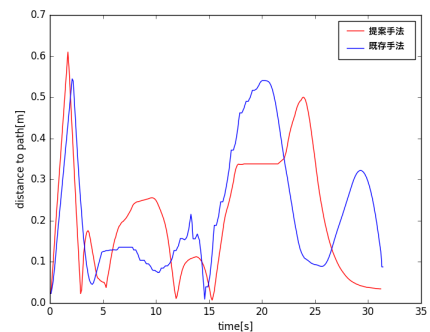


図 14 シナリオ 2 におけるロボットと最短経路との距離

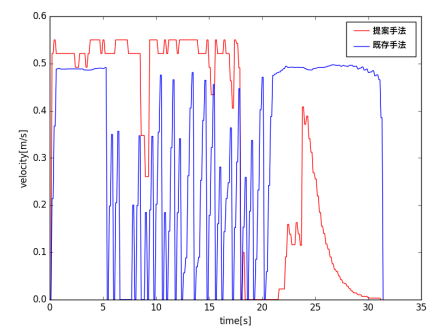


図 15 シナリオ 2 におけるロボットの速さ

しながら目的地に到達しているということが分かる。

## 6. おわりに

ロボットと人が共存する社会では Human-First なロボットが求められると考え、今後ロボットが人々の生活に登場する場面が増えた時により一層、人に対して安全なロボットの制御技術が求められると考える。また、ロボットが人に配慮して制御を行うのは当然だが、さらに人に配慮を促すような仕組みを作ることが、現実世界で人とロボットのコミュニケーションを促し、ロボットの普及を促進する原動力の 1 つになると考える。本研究では、ロボットのナビゲーションにおいて人の回避行動を考慮した経路計画法の提案、検証を行った。提案手法では、人の回避行動を 4 つに分類し、それらの回避行動を行う人と見立てた障害物を回避しながら目的地に向かうシミュレーションを行って提案手法の有効性を検証した。既存手法は、どの障害物でも動的または静的な障害物として扱い経路計画を作成するため、衝突を回避したい人などの障害物を優先的に回避することは困難である。今回の実験では、ロボットは人がどのような回避行動を取るか事前に知っているという前提でシミュレーションを行った。そのため、人の回避行動に応じた最適な経路計画を作成することが可能となったが、現実世界ではセンサー等を用いて人の回避行動を予測することが必要であり、今後の研究の課題の 1 つである。また、今回の研究では人の回避行動を単純化したモデルでロボットの経路計画を作成したが、実際の人の動きにこのモデルを適用できるかの検証が必要である。

謝辞 本研究は、JST OPERA JPMJOP1612 の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Rösman et al. Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots. In *7th German Conference on Robotics*, pp. 74–79, Munich, Germany, 2012.
- [2] Ross Knepper et al. Pedestrian-inspired sampling-based multi-robot collision avoidance. In *The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 94–100, 2012.
- [3] Jamie Snape et al. Smooth and collision-free navigation for multiple robots under differential-drive constraints. In *Intelligent Robots and Systems*, pp. 18–22, Taipei, Taiwan, 2010.
- [4] S. Li and A. B. Chan. 3d human pose estimation from monocular images with deep convolutional neural network. In *Asian Conf. Comput. Vis. (ACCV)*, pp. 332–347, Springer, 2014.
- [5] S. Park et al. 3d human pose estimation using convolutional neural networks with 2d pose information. In *Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV)*, pp. 156–169, Springer, 2016.
- [6] Xiaoxiao Du et al. Bio-lstm: A biomechanically inspired recurrent neural network for 3d pedestrian pose and gait prediction. In *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1501–1508, Taipei, Taiwan, 2019.
- [7] 伊部直樹. 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.
- [8] Karl F. MacDorman. Subjective ratings of robot video clips for human likeness, familiarity, and eeriness: An exploration of the uncanny valley. In *ICCS/CogSci-2006 long symposium: Toward social mechanisms of android science.*, pp. 26–29, 2006.
- [9] Stephen J. Guy et al. Simulating heterogeneous crowd behaviors using personality trait theory. In *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symp. Computer Animation*, pp. 43–52, Vancouver, B.C., Canada, 2011.
- [10] Bera Aniket et al. Pedlearn: Realtime pedestrian tracking, behavior learning, and navigation for autonomous vehicles. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5528–5535, 2016.
- [11] Jamie Snape et al. Independent navigation of multiple robots and virtual agents. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1- Volume 1*, pp. 1645–1646, 2010.