

環境に応じた人間の移動予測に基づく移動ロボットの人物回避*

田村 雄介^{*1}, 濱崎 峻資^{*2}, 山下 淳^{*3}, 浅間 一^{*4}

Collision Avoidance of Mobile Robot Based on Prediction of Human Movement According to Environments

Yusuke TAMURA^{*1}, Shunsuke HAMASAKI, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

^{*1} Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551, Japan

In order for mobile robots to coexist with humans, both safety and efficiency should be satisfied. We propose a method to predict pedestrian movement for collision avoidance of mobile robots and pedestrians. In the proposed method, the pedestrian trajectories are measured and a database of human movement tendencies is generated. The database is applied to the prediction of future pedestrian movement. To decrease the initial time cost for database generation, environmental geometric configuration is considered in the form of virtual forces. To verify the usefulness of the proposed method, we generated the database based on five-hour observation and conducted three types of experiments based on the generated database. The first experiment showed the prediction performance of the proposed method and proved the method guaranteed the safety. The second experiment showed that the proposed method satisfied both the safety and efficiency through the comparative simulations. The third experiment showed the method could apply to the real mobile robot.

Key Words: Collision Avoidance, Prediction of Human Movement, Mobile Robot, Pedestrian Movement Tendency

1. 序 論

人間と共存する環境で動作するロボットにとって、安全性は欠かすことのできない課題である。特に、移動ロボットと障害物や人間との衝突回避については、これまでに数多くの研究がなされてきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。一方で、ロボットには通常、達成すべきタスクが存在するため効率よく動作することが求められる。安全性を重視するあまり効率が低下してしまえば本末転倒であるし、効率を重視するあまり安全性を疎かにするわけにはいかない。人間とロボットが共存する環境では、通常このように安全と効率がトレードオフの関係にある。このため、ロボットには安全性を保ちつつ効率性の高い動作を行うことが求められる。

移動ロボットによる人間の衝突回避においては一般的に、カメラやレーザレンジファインダといったセンサをロボットに搭載し、それらセンサによって人間が検出されたときに回避軌道を生成するということが行われる。しかしながら、ロボットに搭載されたセンサのみでは、壁などの障害物の向こう側にいる人間を計測することは困難である。このように観測が不可能な領域が存在している場合、衝突のリスクが高くなるため、観測不能であるということ考慮した上で安全性を優先して減速やリスクを回避するような軌道の生成⁽⁵⁾を行わざるを得ない。

これに対して、環境側にセンサを設置することで、ロボットに搭載されたセンサのみでは観測できない領域をカバーし、衝突回避に利用するというアプローチが存在する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、センサによって観測された瞬間の情報のみでは安全性と効率性を両立させるには不十分である。例えば図1のような交差点での状況を考えよう。図1-(a)では、人間、ロボットがともに交差点に近づいてきているため、ロボットがそのまま進んでしまうと衝突の

* 原稿受付 2012年11月13日

^{*1} 正員, 中央大学理工学部精密機械工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*3} 正員, 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*4} 正員, フェロー, 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: tamura@mech.chuo-u.ac.jp



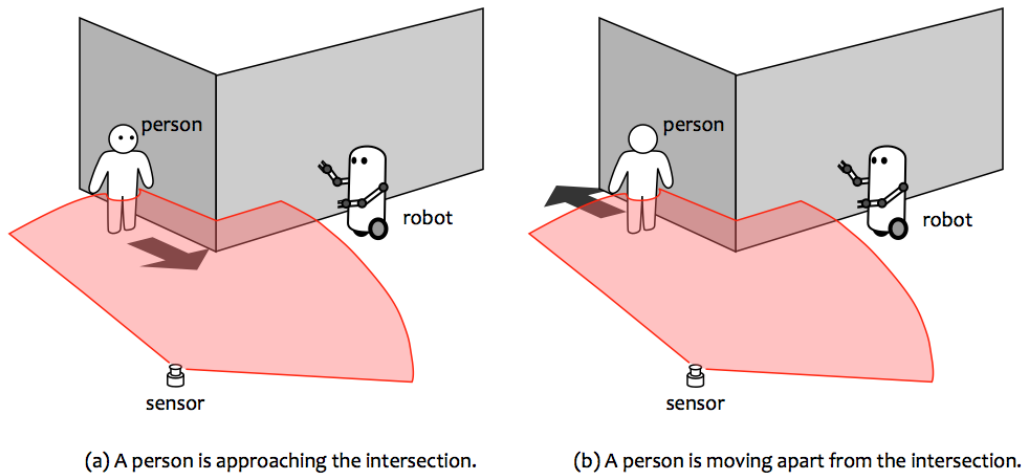


Fig. 1 Necessity of the prediction of pedestrian's movement

危険性が高い．一方，図 1-(b) では，人間の位置は図 1-(a) の場合と同じであるものの進行方向が異なる．すなわちこの状況では人間は交差点から離れて行っているため，ロボットがそのまま進んでも衝突の危険性は低い．ところが，環境に設置されたセンサから，この瞬間の人間の位置情報のみがロボットに与えられたとすると，これらの 2 つの状況を区別することが不可能であるため，ロボットは安全性を優先して減速，停止，リスク回避軌道の生成等を行わなければならない．

この問題を解決するためには，人間の瞬間的な位置情報だけではなく将来の軌道がある程度予測できることが必要である．最も単純には，人間の現在の速度に基づいて等速直線運動を仮定する⁽⁸⁾ことが考えられるが，人間は単なる移動物体とは異なり周囲の環境に影響を受けて移動するため，この仮定が成り立つのは非常に限定された環境でかつ極めて短時間に限られる．より現実的な状況での人間の移動を予測するためには，環境に応じた人間の動きをモデル化する必要がある．人間の動きのモデル化の方法としては，仮想的な力を環境や他者から受けることによって動くとした Social Force Model⁽⁹⁾をはじめとして様々な研究が行われており，こういったモデルを用いて人間の動きを予測する方法も提案されている⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾．しかしながら，このようなモデルでは，環境については幾何学的な状況のみが考慮され，各環境に応じた人間の移動傾向については考慮されない．

一方，環境からの影響を設計者が経験的に決定するような方法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾も提案されている．このような枠組みは環境に応じた人間の移動傾向を表現することを可能にするが，環境からの影響を経験のみから適切に決定するのは困難である．前山らは，観測されたデータから人の出現頻度を表す地図を作成し，それに基づいてロボットが通過できる経路の生成および経路計画を行っている⁽¹³⁾が，この研究は大域的な経路計画を扱うものであり，本研究で対象とするようなオンラインでの歩行者の移動予測にそのまま利用することはできない．著者らはこれに対して，観測データに基づいた人間の移動予測手法を提案している⁽¹⁴⁾．また，野口らも，実際に観測された大量の歩行者の移動データに基づいて人間の移動を予測し，移動ロボットの経路計画に利用している⁽¹⁵⁾．このようなアプローチは，実際に適用する環境での観測結果をもとにしているため，人間の移動を非常に良く予測できるものである．しかしながら，ある程度精度の良い予測をするためには，モデルの作成に 1 週間程度の観測が必要となってしまう．

本研究では，人間と共存する環境での移動ロボットの安全性と効率性を両立させるために，環境の影響を考慮した人間の移動予測手法を提案することを研究の目的とする．提案手法では，環境に設置したセンサによって観測された歩行者の移動データを移動傾向データベースとして保持し，これを移動予測に用いる．また，環境の幾何学的形状に基づく仮想的な力を考慮したデータベースの初期化を行うことで，新たな環境への導入コストの低減を図る．

本論文の構成は以下の通りである．第 2 章では，移動傾向データベースを構築する手法について述べる．ここでは，環境の幾何学的形状に基づいた初期データベースの生成方法と，観測された人間の移動データによるデータベースの更新方法について詳述する．第 3 章では，構築された移動傾向データベースに基づいた人間の移動予測

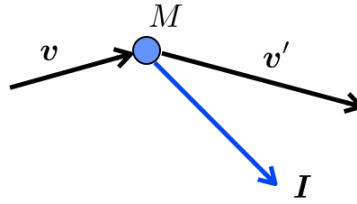


Fig. 2 Schematic view of pedestrian's movement tendency

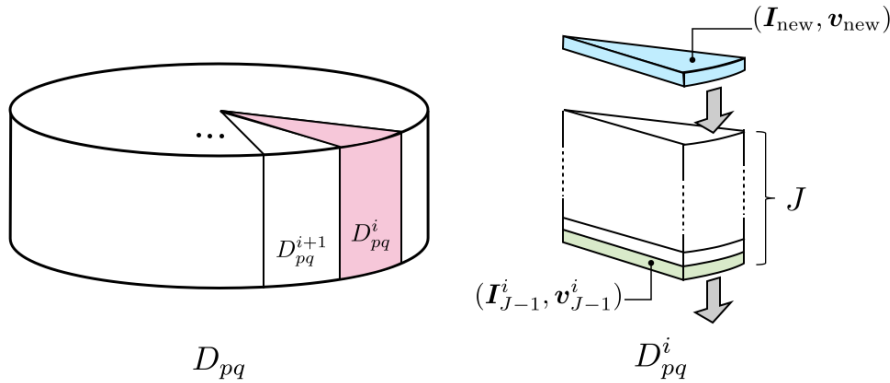


Fig. 3 Updating of the database of pedestrian movement tendency

アルゴリズムについて述べる．これらの提案手法の有効性を評価するための実験について第4章で述べ，第5章では本論文の結論と今後の展望について述べる．

2. 人間の移動傾向データベース

2.1 移動傾向の定式化

ある環境において人間がどのように動くかをモデル化するためには，環境が人間の移動に与える影響を把握する必要がある．本研究では，人間の歩行を観測し，移動速度の変化を環境に紐付けて蓄積することによって，環境が人間の移動に与える影響を間接的に得ることとする．図2に示すように，人間を仮想的な質量 M (kg) をもつ質点とみなすことで，観測された速度変化から以下のように仮想的な力積 I を算出することができる．

$$I = M(v' - v) \quad (1)$$

ここで， v ， v' はそれぞれ，ある位置でのある瞬間における変化前，後の速度である．この仮想的な力積 I が，この位置において環境から受ける影響を表している．速度変化を仮想的な力積によるものと捉えることで，場が与える影響を現実の物理現象に対応付けることができる．

2.2 移動傾向データベース

前節で述べた仮想的な力積と，その力積を受ける前の速度を一組の移動傾向データとしてデータベースに蓄積し，環境が人間の移動に与える影響を統計的に表現する．環境を格子状のセルに区切り，各セルについて，移動傾向データを蓄積していく．各セルは，セル内では環境から受ける影響が大きく変わらない程度に小さくする必要がある．ここでは，人間の環境に占める大きさを考慮し，1辺1mのセルで環境を離散化するものとした．

図3に，観測されたデータに基づいてデータベースを更新する方法についての概念図を示す．

セル C_{pq} において新たに観測されたデータ (I_{new}, v_{new}) は，その進入角，すなわち v_{new} の角度成分に応じたデータベースに蓄積される．つまり，セル C_{pq} に対応したデータベース D_{pq} は，以下の式(2)のように進入角に応じて N 個に区切られた小データベースの集合として表される．

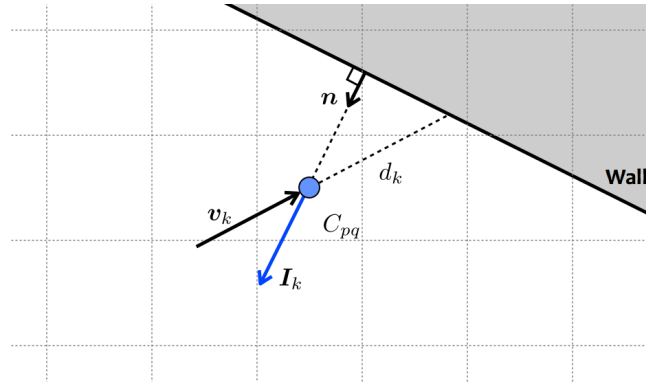


Fig. 4 Initial data for the movement tendency database

$$D_{pq} = \{D_{pq}^i | 0 \leq i < N\} \quad (2)$$

各小データベース D_{pq}^i は以下のように表される .

$$D_{pq}^i = \{(I_j^i, v_j^i) | 0 \leq j < J\} \quad (3)$$

ここで, J は1つの小データベースに記録されるデータ数の上限である . すなわち, 各進入角に対応した小データベースにおいては J 個までの移動傾向データを蓄積し, それ以上観測された場合は, 新しいデータが追加されるたびに古いデータを削除することによって, 新たな障害物が設置されるなどの準静的な環境変化に適応可能になる .

2.3 環境の幾何学的形状に基づく初期データベースの生成

前節で述べたように観測結果に基づいて移動傾向データベースを構成し, 人間の移動の予測に適用する . しかしながら, 第1章で述べたように, 適切な予測を行うために十分な観測データを蓄積するには, 膨大な時間が必要となる . そこで本研究では, 十分なデータが得られない場合でもある程度適切な予測を行うために, 環境の幾何学的形状に基づいて初期データベースを生成する .

例えば両側を壁に挟まれた通路であれば, 通常人間は壁に向かって進むのではなく, 通路の方向に沿って移動する . このように人間の移動は環境の持つ意味だけではなく, その幾何学的形状にも影響を受ける . ここでは, 壁からの仮想的な斥力を想定して, 初期データベースを生成する .

セル C_{pq} に対応したデータベース D_{pq} に蓄積されるべきデータ数は NJ なので, 初期データベースに入力する移動傾向データは, 当該セルへの進入角を $2\pi/NJ$ ずつ変化させたものとし, 進入速度は一定とする . すなわち, 登録される移動傾向データの進入速度成分は,

$$v_k = \left(v_{\text{init}} \cos \left(\frac{2\pi k}{NJ} \right), v_{\text{init}} \sin \left(\frac{2\pi k}{NJ} \right) \right)^T, \quad 0 \leq k < NJ \quad (4)$$

と表される .

初期移動傾向データの力積成分の生成法を図4に示す . 進入速度 v_k に対して, その方向に沿った壁までの長さを d_k とし, その壁の単位法線ベクトルを n としたとき, 初期移動傾向データの力積成分は, 以下の式で計算される .

$$I_k = \frac{\rho_{\text{init}}}{d_k} n \quad (5)$$

ここで, ρ_{init} は定数である .

進行方向に壁が存在しない場合は, d_k が無限大となるため, 力積としては0が登録されることになる . つまり, 壁に沿って通路を進行している場合は壁からの影響は受けず, 壁に近づこうとすると壁から斥力を受けるということになる .

このようにして初期移動傾向データベースを生成することで、環境の幾何学的形状による影響を表現することが可能になる。

3. 移動予測アルゴリズム

ある瞬間において観測された人間の位置 x^o をもとに、観測誤差を考慮したパーティクルの分布として人間の存在可能性を表現し、このパーティクルを移動傾向データベースに基づいて移動させることによって、将来人間が存在する可能性のある位置を予測する。

観測誤差を表す分散共分散行列を Σ としたとき、以下の式 (6) で表される 2 変量正規分布に従って S 個のパーティクルを生成する。

$$f(x; x^o, \Sigma) = \frac{1}{2\pi|\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - x^o)^T \Sigma^{-1}(x - x^o)\right\} \quad (6)$$

移動予測には、パーティクルの位置だけでなく速度も必要となる。そこで、時刻 t において観測された速度 $v_t^o = (r_t^o, \theta_t^o)$ をもとにして、以下の式 (7) に従って生成した速度を各パーティクルに付与する。

$$f(v; v_t^o, \sigma_r, \sigma_\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_\theta} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{(r - r_t^o)^2}{\sigma_r^2} + \frac{(\theta - \theta_t^o)^2}{\sigma_\theta^2}\right)\right\} \quad (7)$$

ここで、 σ_r, σ_θ は観測誤差を表す標準偏差である。また、速度は極座標で表現されるものとする。

このようにして生成されたパーティクルの位置と速度を並べた状態ベクトルを $q_t^s = (x_t^s, v_t^s)^T$ と表す。ここで、 $0 \leq s < S$ である。

次に、各パーティクルに対して移動傾向データベースに基づいた仮想的な力積を与えることで、環境の影響を考慮した形でのパーティクルの移動を行う。パーティクルの位置 x_t^s が含まれるセルに対応したデータベースを参照し、その中から仮想的な力積が確率的に選択される。この際、各データ l に対しては以下の式で示される重みが与えられる。

$$w_l = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{(r_l - r_t^o)^2}{\sigma_{r'}^2} + \frac{(\theta_l - \theta_t^o)^2}{\sigma_{\theta'}^2}\right)\right\} \quad (8)$$

ここで、 $v_l = (r_l, \theta_l)$ であり、 $\sigma_{r'}, \sigma_{\theta'}$ はデータベースに蓄積されたデータのばらつきを表す標準偏差である。

したがって、データベースに蓄積されたデータのうち、観測データである v_t^o に近い速度を持つデータほど高い確率で選択されることになる。このようにして選択された力積 I_{selected} を与えることで、パーティクルの速度は以下のように変化する。

$$v_{t+1}^s = v_t^s + \frac{I_{\text{selected}}}{M} \quad (9)$$

この速度に従い、パーティクルは以下の式に従って移動する。

$$x_{t+1}^s = x_t^s + v_{t+1}^s \Delta t \quad (10)$$

式 (8) ~ (10) を繰り返すことによって、人間が将来存在する可能性のある位置を予測することができる。したがって、本手法での人間の予測位置は一意に定まるものではなく、パーティクルの分布によって表現される。

4. 検証実験

提案手法の有効性を検証するために実験を行った。まず、実環境において観測を行い、人間の移動傾向データベースを生成した。その後、生成されたデータベースを用いて、以下の 3 つの検証実験を行った。

- 予測性能検証: 提案手法を用いて、ある時点までの観測から将来の人間の位置を予測した際の、予測的中率について検証し、安全性を確認する。
- シミュレーション実験: 提案手法が安全性を維持しつつ効率的な動作に寄与しているかどうかをシミュレーションによって検証する。
- 実機実験: 実環境においても提案手法が有効に働くかどうかを、実ロボットを用いた実験により検証する。

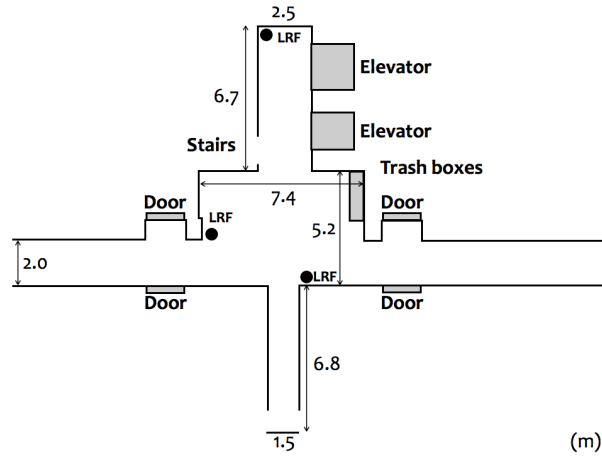


Fig. 5 Experimental environment for generation of the movement tendency database

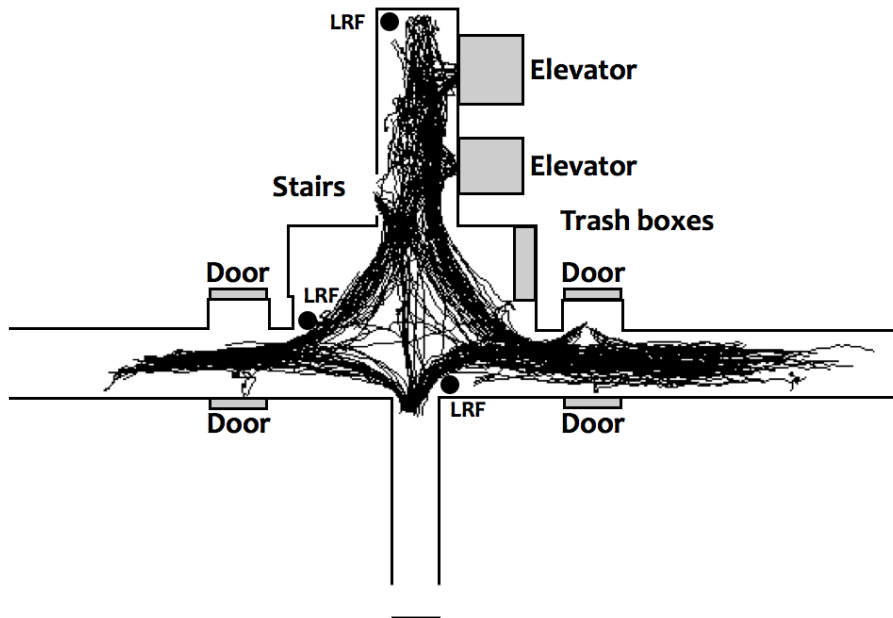


Fig. 6 Observed pedestrian trajectories

4.1 移動傾向データベースの生成

東京大学工学部 14 号館 8 階の廊下において、3ヶ所にレーザレンジファインダ (UTM-30LX, 北陽電機) を設置して人間の移動を観測した。計測した環境を図 5 に示す。レーザレンジファインダは床から 0.83m の高さに設置し、人間の検出・トラッキングには、帷子らの手法⁽¹⁶⁾を用いた。

5 時間の計測によって計 281 本の移動軌跡データを取得し、データベースの生成を行った。

取得した移動軌跡の一部を図 6 に示す。通路の形状のみから考えると、紙面左右方向への歩行者の行き来が予想されるが、実際に取得したデータからは、この環境においてはこのような行き来は存在しないということがわかる。このことから、環境に応じた歩行者の移動傾向を考慮することは、歩行者の移動予測において非常に重要だということが確認できる。

このようにして取得されたデータから生成されるデータベースには、例えば交差点付近のセルに対して紙面左側から進入する場合、上方向ないし下方向への速度変化を生じさせるような力積が蓄積されることになる。

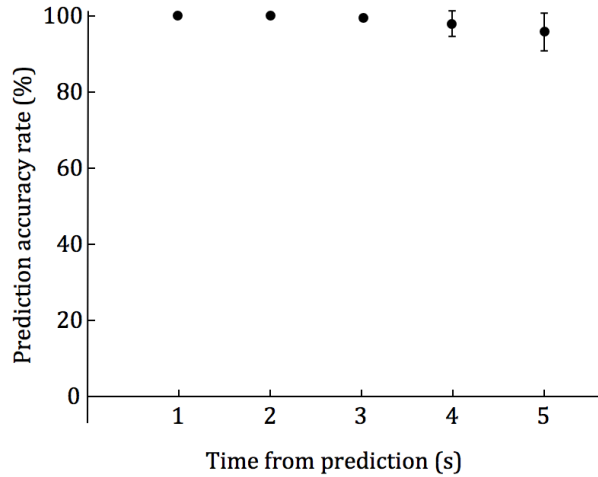


Fig. 7 Prediction accuracy rate

4.2 予測性能検証

提案手法の予測性能を検証するために、データベース生成に用いたデータとは別に観測された10本の移動軌跡データを用いて評価を行った。ここで、10本の移動軌跡とは、前節で観測された歩行者の移動傾向を考慮して、紙面上から右、上から下、下から上、下から右、下から左、右から上、右から下、左から上、左から下、に歩行者が移動したものである。

本性能検証においては、軌跡が観測され始めてから1秒後の時点で予測を行い、その後1秒毎、予測時点から5秒後までの性能を評価した。

前章で述べたように、提案手法による予測位置はパーティクルの分布によって表される。ここでは、環境中で人間の占める大きさを考慮して、各パーティクルの位置を中心とした半径0.5mの円領域の集まりを予測領域と定義し、この予測領域内に実際の観測値が存在した場合、予測が的中したと評価した。予測に用いたパーティクルの数は $S = 100$ とし、各移動軌跡につき100回ずつの検証を行った。

図7に、予測を行った瞬間から5秒後までの予測的中率を示す。

ここからわかるように、予測時点から2秒後までは100%、5秒後でも95.2%と高い予測的中率が得られた。このことから、提案手法による予測の性能は、安全性という観点からは十分なものであると言える。

4.3 シミュレーション実験

前節で示した予測領域とは、人間が将来存在する可能性のある領域を表している。したがって、ロボットはこの領域に入らないように動作を生成することが望ましい。予測領域を広くとればとほどロボットを安全に動作させることはできるが、効率が低下してしまう。本節では、提案手法を効率面から評価するために行ったシミュレーション実験について述べる。

図8にシミュレーション実験におけるロボットの移動経路を示す。ロボットは、図に示された環境中の廊下を20m直進する。本実験では提案した移動予測手法の有効性に焦点を絞るため、ロボットは回避軌道を生成せず、通常速度(2.0m/s)、徐行速度(0.5m/s)、停止(0.0m/s)、の3つの速度から選択する速度変化のみによって衝突回避を行うものとした。ロボットの加速度は 1.5m/s^2 とし、ロボット自身には半径3mの範囲を計測することのできるレーザレンジファインダが搭載されているものとした。

提案手法の有効性を検証するため、提案手法を含む以下の5つの手法に従ってロボットを動作させた場合について比較を行った。

- 手法A(効率優先): ロボット自身に搭載されたセンサによる情報のみを用い、センサによって人間が検出されない限りでできる限り通常速度で移動する。自らのセンサ範囲内に人間が検出された場合、その場で停止しようと試みる。
- 手法B(安全優先): ロボット自身に搭載されたセンサによる情報のみを用い、センサによって人間が検出

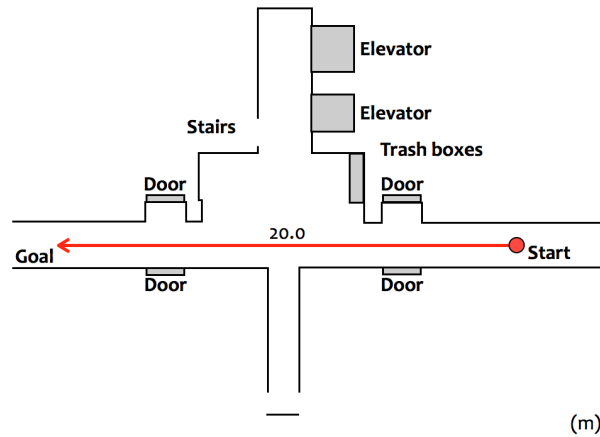


Fig. 8 Simulation setting

された場合は停止する。また、遮蔽による死角が生じる場合は徐行速度で移動する。どちらにも当てはまらない場合は通常速度で移動する。

- 手法 C (環境センサ単純利用): 環境に設置されたセンサを用い、環境内に人間が存在するという情報が入った場合は徐行速度で移動する。また、自らのセンサによって人間を検出した場合は停止する。どちらにも当てはまらない場合は通常速度で移動する。
- 手法 D (単純予測): 環境に設置されたセンサを用いる。検出された人間が等速直線運動を行うと仮定して、1~3秒後の人間の移動予測を行う。まず、ロボットが通常速度で動作した場合の衝突判定を行い、衝突が予測されなければ、通常速度で移動する。衝突が予測された場合は、徐行速度での衝突判定を行い、衝突が予測されなければ徐行速度で移動する。徐行でも衝突が予測される場合は停止する。
- 提案手法: 環境に設置されたセンサを用いて、提案手法に基づいて1~3秒後の人間の移動予測を行う。衝突判定と速度選択については、手法 D と同様に行う。

シミュレーションにおける人間の歩行については、実際に計測された8本の特徴的な移動軌跡を用い、各試行においてその中からランダムに1本を選択することとした。また、仮想的な人間の歩行開始タイミングは、ロボットの移動開始を $t=0$ としたとき、 $-3 < t < 3$ (s) からランダムに生成した。

本シミュレーション実験においては、人間・ロボットともに、衝突を回避するための軌道生成は行わない。そこで、ここでは「ロボットが動いている状態で人間と干渉すること」を、衝突と定義する。実際にはロボットが静止している状態での衝突も安全とは言い切れないが、提案手法の有効性検証という観点からはこのような定義でも手法間の比較は十分に可能である。

以上のような条件で、各手法についてそれぞれ100回の試行を行い、衝突回数と所要時間について比較を行った。実験の結果、衝突については手法 A でのみ発生した(17回)。この衝突は、ロボット自身に搭載されたセンサの死角から人間が突然現れた際に停止が間に合わなかったことによるものである。このことから、手法 A は安全性に問題があることがわかる。

図9に、ロボットがゴールに到達するまでの所要時間を示す。

衝突の発生しなかった比較手法 B, C, D と、提案手法の間で所要時間の比較を行ったところ、平均すると提案手法が最も短い時間でゴールに到達していた。平均値の差について Holm 法による補正を施した t 検定を行ったところ、提案手法と比較手法 B, C, D それぞれについて有意差が確認された ($p < 0.05$)。

以上のことから、提案手法を適用することで、安全性を保ちつつ効率的な動作の実現が可能であることが示された。

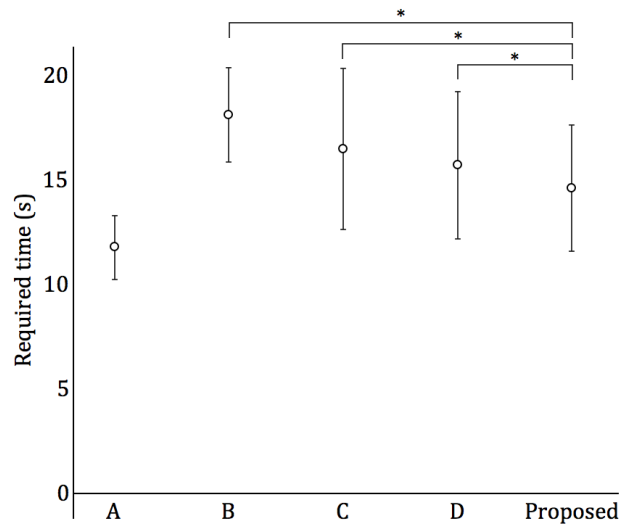


Fig. 9 Required time for the robot movement

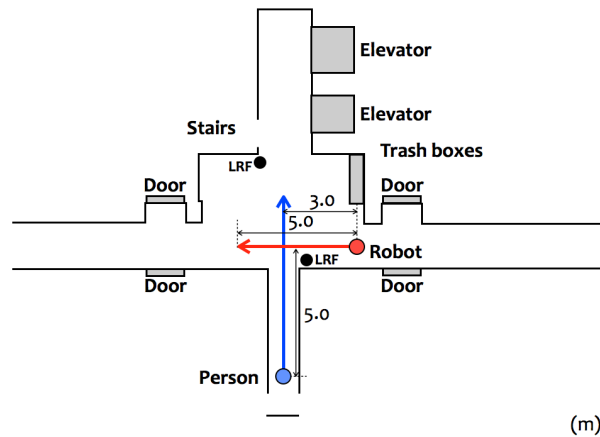


Fig. 10 Experimental environment for variation of the proposed method

4.4 実機実験

提案手法が実環境においても適用可能であることを検証するために、全方向移動ロボット ZEN (Ritecs Inc.) を用いた実機実験を行った。本実験におけるロボットおよび人間の移動経路を図 10 に示す。シミュレーション実験と同様、ロボットはスタートからゴールまで回避軌道生成は行わずに速度変更のみを行う。本実験では通常速度を 0.7m/s、徐行速度を 0.2m/s と設定した。

本実験においては、移動ロボットに搭載したセンサは使用せず、センサとしては環境中に設置された 2 つのレーザレンジファインダ (UTM-30LX, 北陽電機) のみを用い、データベース生成の時と同様に歩行者の検出を行った。本実験における移動予測およびそれに基づく速度変更の方法については、シミュレーション実験と同様である。

ロボットの移動開始を $t = 0$ とし、人間が移動し始めるタイミングについて $t = -3.0, -1.5, 0, 1.5, 3.0$ (s) の 5 つの条件で各 10 回、計 50 回の試行を行った。

図 11, 図 13 にロボットと人間の移動軌跡の例を、これらに対応してロボットに与えられた速度指令値の変化を図 12, 図 14 に示す。図 11, 図 12 は人間の移動開始が $t = 0$ のときであり (ケース 1), 図 13, 図 14 は人間の移動開始が $t = 3.0$ のとき (ケース 2) である。

図 11 の状況では、図 12 からわかるように、 $t = 3.0$ の少し手前から、約 3 秒間にわたって、ロボットに対して徐行ないし停止命令が出ている。これにより通過する歩行者をやり過ごし、再度加速することによって安全な移動を実現している。一方、図 13 においては、ロボットの方が早くスタートしているため、交差点付近で人間との

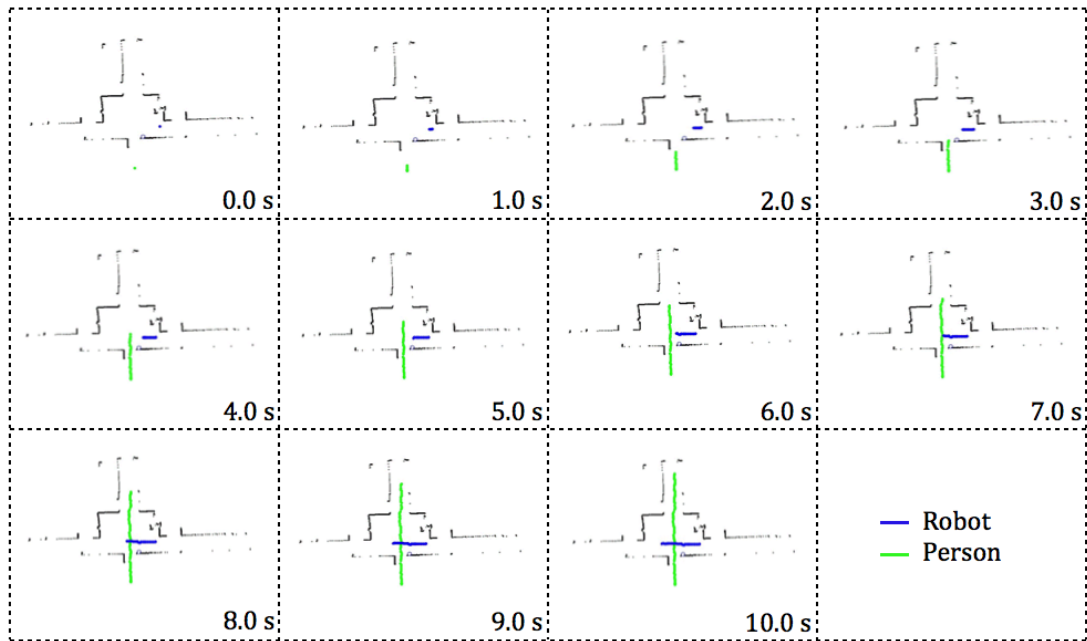


Fig. 11 An example of observed trajectories (Case 1: the person starts at $t = 0$ s)

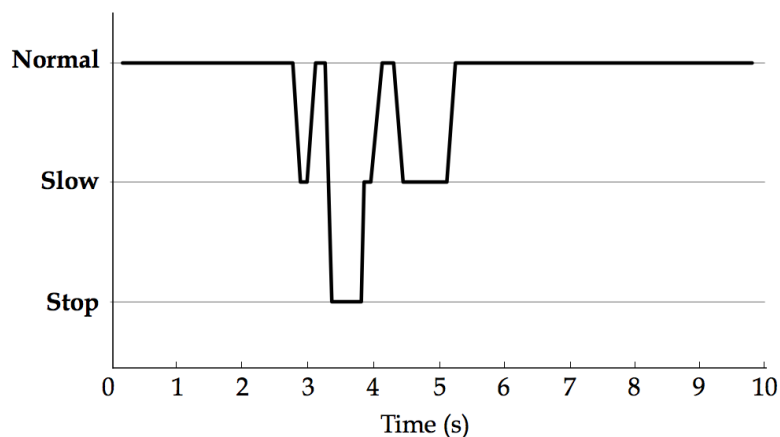


Fig. 12 Speed references in case 1

衝突の危険性がないと判断し、図 14 からわかるように減速せずに通常速度のまま移動することで、安全性を保ちつつ効率的に動作することができていることがわかる。

50 回の試行の全てにおいて、ロボットと人間の衝突は発生しなかった。また、上記の例にもあるように、徐行・停止の必要が無い場合は通常速度で移動し、予測に基づいて徐行や停止が必要と判断された場合は適切な速度選択を行うことにより安全性を保ちつつ効率的な動作が実現できていることが確認された。以上の結果から、提案手法が実環境においても適切に機能することが示された。

5. 結 論

本論文では、環境が人間の歩行に与える影響を観測結果に基づいて移動傾向データベースを生成し、生成されたデータベースに基づいて人間の移動を予測する手法を提案した。また、移動予測のためのモデル作成に要する時間を低減するために、環境の幾何学的形状に基づく仮想的な力を想定してデータベースの初期化を行った。

これらの手法の有効性を検証するために、5 時間というモデル作成にとっては比較的短時間の計測に基づいて作成されたデータベースをもとに、予測性能検証、シミュレーション実験、実機実験を行った。実験の結果、提案

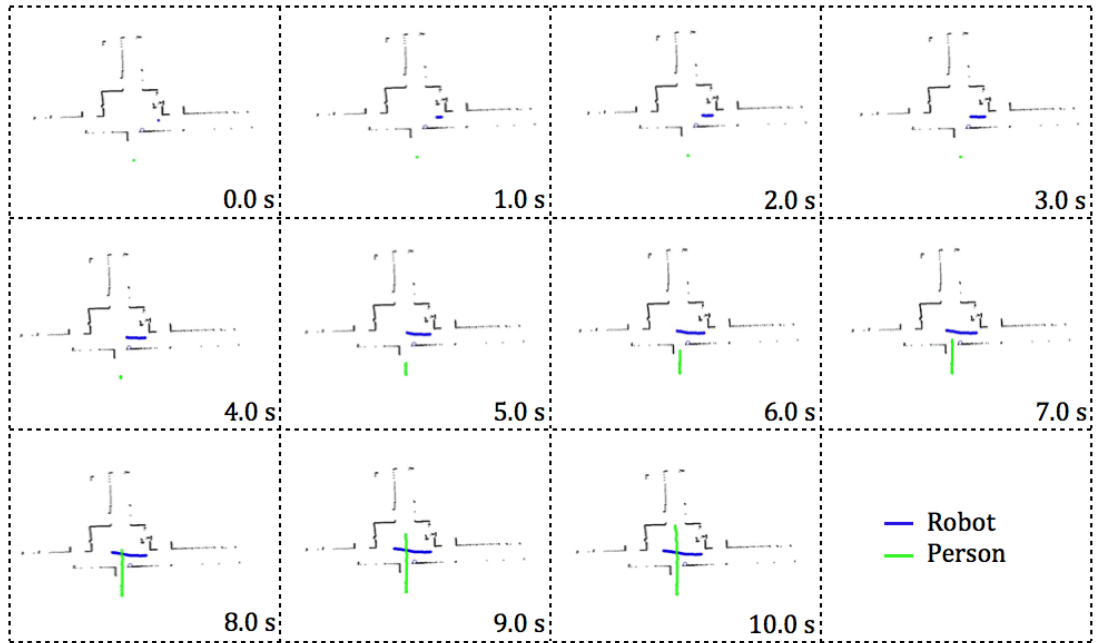


Fig. 13 An example of observed trajectories (Case 2: the person starts at $t = 3.0$ s)

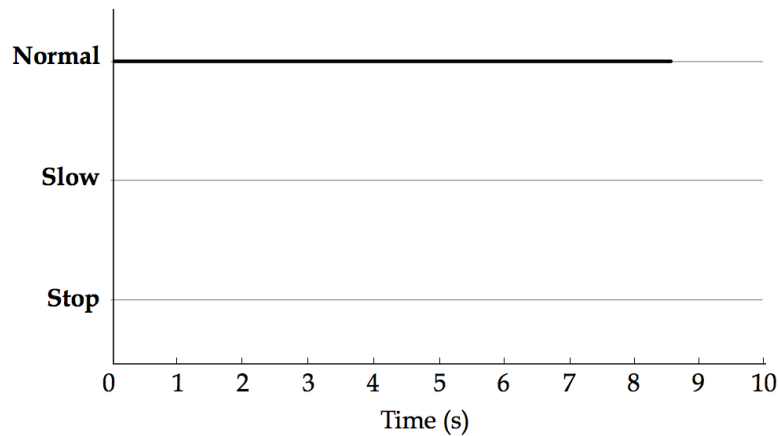


Fig. 14 Speed references in case 2

手法が移動ロボットの安全性を保ちつつ効率的な動作の実現に寄与することが確認された。

現状の提案手法では、データベース生成に用いるデータとしては、ロボットをはじめとする他者の存在しないデータを用いている。今後は、ロボットの存在や動作が人間の歩行に与える影響を考慮して予測手法を改良することが必要であると考えられる。

文 献

- (1) Khatib, O., “Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 1 (1986), pp. 90-98.
- (2) Fox, O., Burgard, W., Thrun, S., “The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 4, No. 1 (1997), pp. 23-33.
- (3) Belkhouche, F., “Reactive Path Planning in a Dynamic Environment”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 4 (2009), pp.902-911.

- (4) Tamura, Y., Fukuzawa, T., Asama, H., “Smooth Collision Avoidance in Human-Robot Coexisting Environment”, *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2010), pp.3887-3892.
 - (5) Chung, W., Kim, S., Choi, M., Choi, J., Kim, H., Moon, C.-b., Song, J.-B., “Safe Navigation of a Mobile Robot Considering Visibility of Environment”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 10 (2009), pp.3941-3950.
 - (6) Hoover, A. and Olsen, B.D., “Sensor Network Perception for Mobile Robotics”, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2000), pp.342-347.
 - (7) 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*, Vol. 26, No. 2 (2008), pp.192-199.
 - (8) 坪内孝司, 浪速智英, 有本卓, “平面を移動する複数の移動障害物とその速度を考慮した移動ロボットのプランニングとナビゲーション”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 12, No. 7 (1994), pp.1029-1037.
 - (9) Helbing, D. and Molnár, P., “Social Force Model for Pedestrian Dynamics”, *Physical Review E*, Vol. 51, No. 5 (1995), pp.4282-4286.
 - (10) Luber, M., Stork, J.A., Tipaldi, G.D., Arras, K.O., “People Tracking with Human Motion Predictions from Social Forces”, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2010), pp.464-469.
 - (11) 田所諭, 林真樹, 真部靖弘, 中見至宏, 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2報, 移動ロボットの移動障害物回避)”, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 63, No. 606 (1997), pp. 499-505.
 - (12) Lee, K.K. and Xu, Y., “Boundary Modeling in Human Walking Trajectory Analysis for Surveillance”, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 5 (2004), pp.5201-5205.
 - (13) 前山祥一, 西本雅規, 渡辺桂吾, “知能化環境における人の位置計測に基づく通路地図生成と移動ロボットの経路計画への適用”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 47, No. 12 (2011), pp.631-639.
 - (14) Hamasaki, S., Tamura, Y., Yamashita, A., Asama, H., “Prediction of Human’s Movement for Collision Avoidance of Mobile Robot”, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (2011), pp.1633-1638.
 - (15) 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”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 7 (2012), pp. 684-694.
 - (16) 帷子京市郎, 鈴木智之, 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介, 仲川ゆり, “レーザスキャナを用いた群衆の追跡および流動の可視化”, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2007, No. 31 (2007), pp.229-236.
-