

歩行者と協調的な自律移動モビリティ -歩行者の顔向きに適応した経路生成-

矢田悠人¹ 道田峻佑¹ 小宮聖司¹ 脇田敏裕¹

概要: 自律移動モビリティは歩行者との混在環境を走行することから歩行者との接触を回避する経路生成機能が必要となる。本研究では歩行者の速度を推定したうえで、画像認識を用いて歩行者の顔向きを認識することにより、モビリティに気づいている歩行者（前向き歩行）に対しては最小限の回避により円滑なすれ違いを行い、歩きながらスマートフォンを注視しているなどでモビリティに気づいていない歩行者（下向き歩行）に対しては大きく回避することにより安全なすれ違いを実現する経路生成を提案した。距離、速度、回避の円滑性、安心感の4項目について官能評価実験を行った結果、前向き歩行の場合も下向き歩行の場合も、全項目で評価が向上した。特に下向き歩行の場合、距離に対する評価が大きく向上し、歩きスマホなどでモビリティに気づいていない歩行者に対して安全に回避することができた。

キーワード: 自律移動モビリティ, 歩行者予測, 画像認識, Yolo [**]

Pedestrian Cooperative Autonomous Mobility -Path planning adapted to pedestrian face direction-

YUTO YADA^{†1} SHUNSUKE MICHITA^{†1}
SEIJI KOMIYA^{†1} TOSHIHIRO WAKITA^{†1}

Abstract: Autonomous mobility vehicles travel in mixed environments with pedestrians, so a path generation function is required to avoid contact with pedestrians. This research estimates the speed of pedestrians and recognizes the direction of their faces using image recognition, so that pedestrians who are aware of mobility (forward walking) can pass each other smoothly with minimal avoidance, and pedestrians who are unaware of mobility (downward walking), such as those who are walking on their phones, can pass each other smoothly with minimal avoidance. Path generation that achieves safe passing each other by largely avoiding each other was proposed. Sensory evaluation experiments were conducted on four items: distance, speed, smoothness of avoidance and sense of security, and the results showed that the evaluation improved for all items except speed, both for forward and downward walking. In particular, when walking downwards, the evaluation of the distance was greatly improved, allowing safe avoidance of pedestrians who were unaware of mobility, such as those walking on their phones.

Keywords: Autonomous Mobility, Pedestrian prediction, Image recognition, Yolo

1. はじめに

近年、オフィスビルの警備や荷物配送などで自律移動モビリティの実用化が世界的に進んでおり、本学でもモビリティリサーチキャンパスと称して自律移動モビリティの試用が開始されている。このような自律移動モビリティは歩行者との混在環境を走行することから、歩行者との接触を回避する経路生成機能が必要となる。人間同士はすれ違いを行うとき、お互いにアイコンタクトなどを無意識に行いながら相手の動きを予測することで、円滑な移動を実現している。そこでこのような動作が可能な自律移動モビリティの実現に取り組んでいる。

従来技術より移動モビリティの静止障害物回避手法として DWA(Dynamic Window Approach)[1]や RRT(Rapidly exploring random tree)[2]などが幅広く用いられている。これらの従来研究の課題として、動的障害物が考慮されておら

ず、歩行者などの動的障害物に対しての回避が間に合わないことが挙げられる。

また、動的障害物の回避に関する従来研究としてカルマンフィルタを用いた歩行者予測や、ポテンシャル法を用いて歩行者の予測と回避を行った例[3]や ORCA(Optimal Reciprocal Collision Avoidance)を複数歩行者の予測と回避に適用した例[4]が挙げられるが、これら従来研究の課題として、歩行者の状態に関わらずすべての歩行者に同じ回避行動を取ることが挙げられる。例えば、スマートフォンを注視しながら歩行している歩行者は歩行が安定しないため予測が困難になり回避が難しいと考える。また、歩行者側ではスマートフォンを注視している際にモビリティが至近距離をすれ違おうと視界に突然モビリティが現れるため驚く可能性も考えられる。このような歩行者に対しては大きく回避する方法が考えられる。一方、このような大きな歩行者回避は前を向いて歩いている歩行者に対しては過剰な回避

¹ 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

となってしまうため、歩行者の顔向きに応じて回避量を変化させる必要があると考えた。

本研究では、自律移動モビリティに気づいている歩行者に対しては最小限の回避により円滑なすれ違いを行い、スマートフォンを見ながら歩いているなど自律移動モビリティに気づいていない歩行者に対しては大きく回避することにより安全なすれ違いを実現する経路生成を提案する。

2. 方法および実験装置

2.1 方法

下向き歩行者に対しても安全に回避を行うには、まず最初に歩行者の顔向き認識による顔向きの判定が必要となる。次に、顔向き判定の結果が下向き歩行者だった場合は大幅な回避経路の生成が必要となる。この二つが歩行者回避の要件であると考えた。

本手法は以下の手順で行う。

- Step1 3D LiDAR を用いて歩行者の計測・物体認識・トラッキング、歩行者行動予測を行う。
- Step2 画像認識により歩行者の顔向き認識を行う。
- Step3 予測位置と顔向き認識結果に基づき、衝突危険領域を求める。
- Step4 経路生成を行う。

提案アルゴリズムの概要図を示す。(図 1)

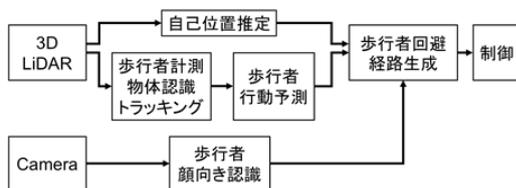


図 1 提案アルゴリズムの概要

Figure 1 Method of pedestrian cooperative path planning.

歩行者認識と歩行者行動予測には先行研究[5]同様、3D LiDAR 情報とカルマンフィルタを用いた。

2.2 システム構成

今回実験に使用した自律移動モビリティを示す(図 2)。歩行者の顔向き検出用のカメラ(図 3)と自律走行および障害物検出用の全方位レーザーセンサを搭載した(図 4)。これらの搭載機器から得られたデータは小型コンピュータの DH310(Shuttle 製)と Jetson Xavier NX (NVIDIA 製)(図 5)で処理・制御する。



図 2 モビリティ
Figure 2 Mobility



図 3 カメラ
Figure 3 Camera



図 4 LiDAR
Figure 4 LiDAR



図 5 コンピュータ
Figure 5 Computers

2.3 顔向き認識

歩行者が自律移動モビリティに気づいているかどうかを推定するため、本研究では顔が前を向いている歩行者は自

自律移動モビリティに気づいており、下を向いている歩行者は気づいていないと仮定した。歩行者顔向き認識は yolo[6] による深層学習を用いた。最初に、顔が前を向いている歩行者及び下を向いている歩行者それぞれ 300 枚の画像を撮影した。次に収集した画像を用いて yolo により深層学習を 4000 エポック行った。学習したモデルを用いて前向き歩行時 1548 枚の画像、下向き歩行時 1159 枚の画像で歩行者顔向き認識を行ったところ前向き歩行の認識率は約 99%、下向きの認識率は約 77%であった。



図 6 歩行者顔向き認識結果
Figure 6 Recognize result.

表 1 認識結果

Table 1 Recognize result.

| | | 認識結果 | |
|--------|-----|------|-----|
| | | 前向き | 下向き |
| 歩 行 | 前向き | 99% | 1% |
| | 下向き | 23% | 77% |

2.4 経路生成

経路生成は占有グリッドマップを基に RRT*[7]で行った。歩行者顔向き認識と歩行者行動予測の結果をもとに経路生成で用いる占有グリッドマップ上に衝突危険領域を設定した(図 7)。歩行者行動予測ではカルマンフィルタを用いてトラッキングした歩行者の歩行速度を求め、求めた歩行速度を基に予測位置を求めた。

衝突危険領域の幅は、前向き歩行者を想定した回避（以下小回避と呼ぶ）は身幅と同程度とし、下向き歩行者を想定した回避（以下大回避と呼ぶ）は幅を広げ歩行者と安全な距離を保つようにする。衝突危険領域は経路生成において障害物と同様に扱った。

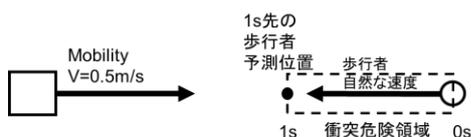


図 7 衝突危険領域
Figure 7 Collision risk area

3. 実験結果

提案した経路生成法を用いて、本学の先進技術研究所内

で歩行者回避の被験者実験を行った。図 8 のようなコースを作成し、自律移動モビリティを速度 0.5m/s で走行させ、歩行者には自然な歩行速度で歩行してもらい自律移動ロボットが歩行者を回避できるのかを評価した。

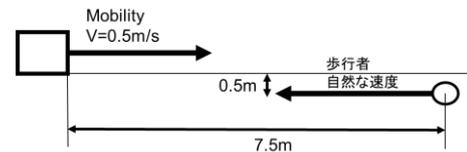


図 8 実験レイアウト

Figure 8 layout of pedestrian avoidance experiment.

3.1 経路生成結果

以下に、経路生成結果を示す。比較のため、歩行者行動予測を行わず衝突危険領域を設定しない経路生成条件でも同様の実験を行った。経路生成の種類は衝突危険領域無し（図 9）、小回避（図 10）、大回避（図 11）の三種類である。太線が選択経路であり、枝分かれしているのが候補経路である。前向きの歩行者に比して下向きの歩行者の場合は大きく回避する経路を生成していることが確認できた。



図 9 衝突危険領域なし 経路生成

Figure 9 Result of not available collision risk area path planning.

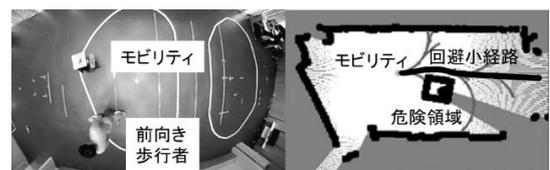


図 10 小回避 経路生成

Figure 10 Result of minimum avoidance cooperative path planning.

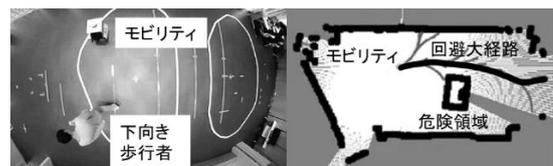


図 11 大回避 経路生成

Figure 11 Result of large avoidance cooperative path planning.

衝突危険領域無し、小回避、大回避、それぞれの走行経

路について示す (図 12, 図 13, 図 14)。

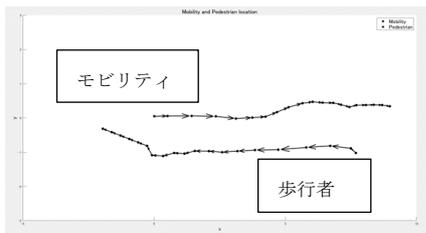


図 12 衝突危険領域なし 走行経路

Figure 12 Result of not available collision risk area path planning.

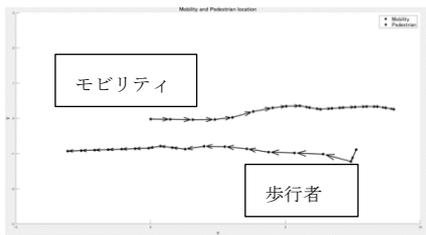


図 13 小回避 走行経路

Figure 13 Result of minimum avoidance cooperative path planning.

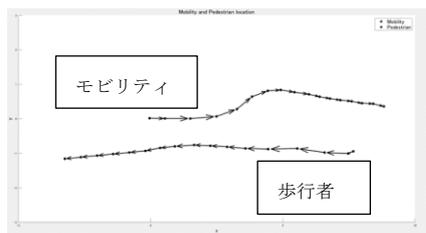


図 14 大回避 走行経路

Figure 14 Result of large avoidance cooperative path planning.

走行経路からも大回避は小回避と比して大きく回避しており、危険領域無しでは回避タイミングが遅れていることが確認できた。

3.2 被験者主観評価結果

被験者 9 名に対して歩行者回避性能に関する被験者主観評価を行った。被験者実験は本学のヒト倫理審査委員会の承認を基に行った。

今回は、「すれ違い時の自律移動モビリティとの距離」「すれ違い時のロボットの速度」「すれ違いの円滑性(回避性能)」「すれ違い時の安心感」がすれ違いに関係すると考え、この 4 項目について主観評価を実施した。

4 項目とも評価は 5 段階であり「良い」「少し良い」「どちらともいえない」「少し悪い」「悪い」での評価を求めた。その結果、前向き歩行の場合、衝突危険領域なしと小回避の比較で全項目の評価が向上し、下向き歩行の場合も、衝

突危険領域なしと大回避の比較で全項目の評価値が向上した(図 15, 図 16)。特に下向きの場合、距離の評価が大きく向上した。速度に関しては、三条件とも同じ速度で走行させたこともあり、評価に変化は見られなかった。

前向き歩行時に小回避の比較として大回避の実験を行った際に数名の被験者から「円滑性が悪いと感じた」「人間だったら自分が大きく避けられているかのような違和感を感じた」といった大回避に対する円滑性の悪さを指摘する意見が得られ、その結果が被験者主観評価結果のグラフにも表れている。

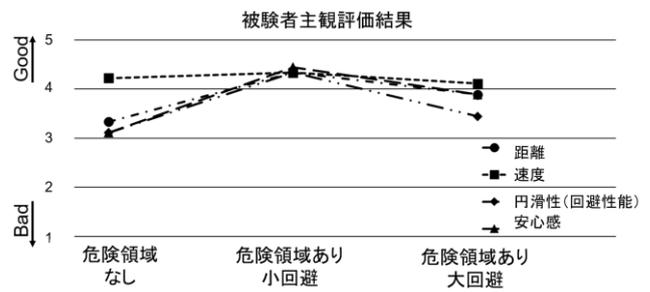


図 15 前向き歩行 主観評価結果

Figure 15 Subjective evaluation results for conscious pedestrian.

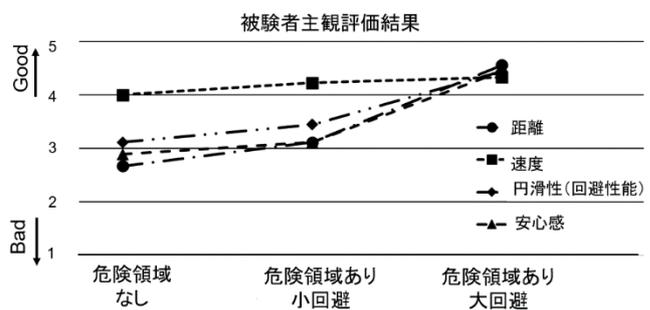


図 16 下向き歩行 主観評価結果

Figure 16 Subjective evaluation results for unconscious pedestrian.

全評価項目に対して有意水準を 0.05, 帰無仮説を「2 群間の平均値に差が無いこと」として有意差検定を行った。前向き歩行では危険領域なしと小回避を、下向き歩行では危険領域なしと大回避を比較した。各項目の p 値を以下に示す (表 2, 表 3)。

表 2 前向き歩行 有意差検定結果

Table 2 Result of significance test for conscious pedestrian.

| 項目 | P 値 |
|-----|------------|
| 距離 | 0.04 有意差あり |
| 速度 | 0.35 |
| 円滑性 | 0.09 |
| 安心感 | 0.04 有意差あり |

表 3 下向き歩行 有意差検定結果

Table 3 Result of significance test for unconscious pedestrian.

| 項目 | P 値 |
|-----|------------|
| 距離 | 0.00 有意差あり |
| 速度 | 0.08 |
| 円滑性 | 0.03 有意差あり |
| 安心感 | 0.01 有意差あり |

前向き歩行では距離、安心感について有意差が得られる結果となり、下向き歩行では距離、円滑性、安心感について有意差が得られる結果となった。

4. 評価項目に相当する物理指標の検討

4.1 距離・速度・円滑性の検討

すれ違いに関係すると考えた4つの評価項目「距離・速度・円滑性・安心感」に相当する物理量についてどのようなものがあるか検討を行った。

最初にすれ違い時の「距離」の項目について考えた。今回はすれ違い時の最近接距離を被験者が感じ取る距離とした。最近接距離の一例として小回避の場合が1.05m、大回避の場合が1.45m、危険領域無しの場合が0.83mとなった。

次に「速度」に関して検討した。速度には相対速度と絶対速度が存在する。今回は歩行者が感じた速度を最近接時の歩行者から見たロボットの相対速度だと定義する。歩行者には三条件とも普段歩く速度での歩行をお願いした。モビリティ側の速度は三条件とも一定である。一例として小回避の場合、相対速度が1.01m/s、大回避の場合の相対速度が0.93m/s、危険領域無しの場合の相対速度が0.87m/s、となった。

さらに「円滑性」について考えた。今回はモビリティが旋回する際の旋回角速度 ω に着目した。今回は0.1rad/s以上の入力があった際に回避中と定義し、回避中のモビリティの旋回角速度の平均値を三条件で比較する。なお危険領域無しの場合は回避を行わないため最近接距離までの旋回角速度の平均値を用いる。一例として、小回避については回避中の旋回角速度の平均値が0.14rad/sである。大回避については回避中の旋回角速度の平均値が0.29rad/sとなった。危険領域無しの場合については最近接距離までの旋回角速

度の平均値が0.00rad/sであった。

4.2 安心感の検討

最後にすれ違い時の「安心感」を表す物理量について検討した。

自動車に搭載されている衝突被害軽減ブレーキ(AEB)で用いられている物理指標として、衝突余裕時間(TTC)がある。この指標は、自車両に対する先行車との現在の相対速度が維持された場合に、先行車と衝突するまでの時間を表したものである。世界座標系における自車両の車体前端、速度を x_e, v_e 、先行車の車体後端、速度を x_l, v_l とする。この場合、自車両の前面に対する先行車との相対距離 d_x 、相対速度 v_x は、 $x_l - x_e, v_l - v_e$ となる(図17)。よって、TTCの値を t_x とすると次式のようになる。

$$t_x = -\frac{d_x}{v_x} = -\frac{x_l - x_e}{v_l - v_e} \quad (1)$$

先行研究[8]では、ほとんどの人がTTC4秒以上で運転していることが示されている。

今回は、このTTCを2次元に拡張することで歩行者とモビリティのすれ違い時に感じる安心感を物理量として表せないか検討した。

TTCを2次元に拡張した指標である2次元TTCの算出法について記す。衝突余裕時間(TTC)として車両進行方向(x方向)の1次元上の位置関係から算出されていた指標を、車両進行方向(x方向)および車両横方向(y方向)の2次元空間における位置関係を考慮し算出する。

世界座標系から車両座標系への座標変換を行う。世界座標系における自律移動モビリティと歩行者の位置および速度を図に示す(図18)。モビリティの位置、速度を $(x_e, y_e), (v_{ex}, v_{ey})$ 、歩行者の位置、速度を $(x_p, y_p), (v_{px}, v_{py})$ とする。また、自車両の重心点から車両前面中心までの距離を h とする。世界座標系における歩行者の位置および速度を、モビリティの重心点を基準とした車両座標系に変換する。この場合、モビリティの車両前面に対する歩行者の相対位置 (x_r, y_r) 、相対速度 v_r は $(x_p - (x_e + h), y_p - y_e), (v_{px} - v_{ex}, v_{py} - v_{ey})$ となる(図19)。

2次元TTC算出に必要な距離を求める。衝突の危険性がある時刻を $t_{collision}$ とする。2次元TTCに用いる距離 d は、各時刻における予測軌跡の2点間距離の総和を算出することで、次式のように求まる。

$$d = \sum_{t=0}^{t_{collision}} \left(\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\sqrt{(x_{r(t+\Delta t)} - x_{r(t)})^2 + (y_{r(t+\Delta t)} - y_{r(t)})^2} \right) \right) \quad (2)$$

また、相対速度は次式のようになる。

$$v_r = \sqrt{(v_{px} - v_{ex})^2 + (v_{py} - v_{ey})^2} \quad (3)$$

よって、2次元 TTC の値を t_c とすると次式のようなになる。

$$t_c = \frac{d}{v_r} \quad (4)$$

衝突しない場合の2次元 TTC の値は無限と定義する。

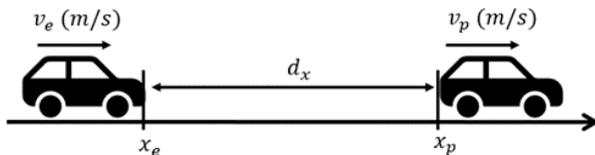


図 17 TTC 概要図

Figure 17 TTC outline figure.

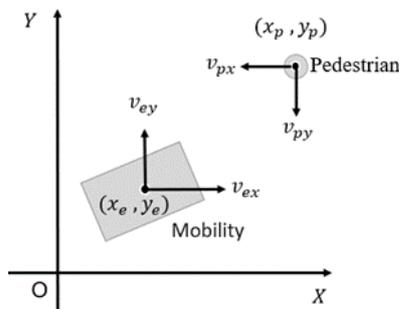


図 18 世界座標系

Figure 18 World coordinate system.

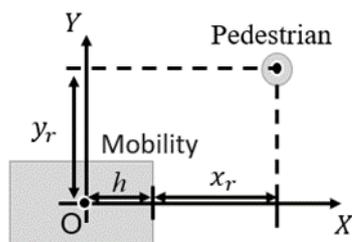
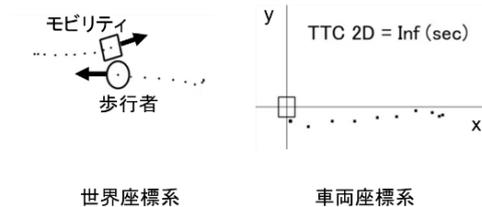


図 19 車両座標系

Figure 19 Vehicle coordinate system.

小回避, 大回避, 危険領域無し の3条件について2次元 TTC を算出した. MATLAB を用いた算出時のモビリティと歩行者の位置, 2次元 TTC の値を示す. (図 20, 図 21, 図 22)

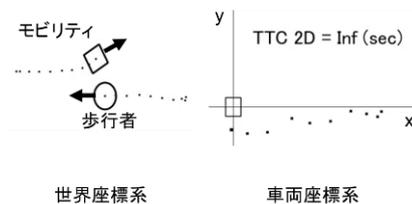


世界座標系

車両座標系

図 20 小回避 2DTTC 算出図

Figure 20 Forward walking 2DTTC calculation diagram.

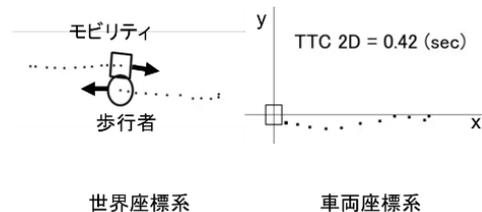


世界座標系

車両座標系

図 21 大回避 2DTTC 算出図

Figure 21 Downward walking 2DTTC calculation diagram.



世界座標系

車両座標系

図 22 衝突危険領域無し 2DTTC 算出図

Figure 22 Not available collision risk area 2DTTC calculation diagram.

図より小回避, 大回避の場合は回避するため TTC 無限大 (Inf) となり, 衝突危険領域なしの場合は衝突直前の TTC が 0.42 秒と算出されている様子が分かる。

4.3 評価項目値の時系列図

前向き歩行時の各評価項目値の一例を時系列で図に示す (図 23)

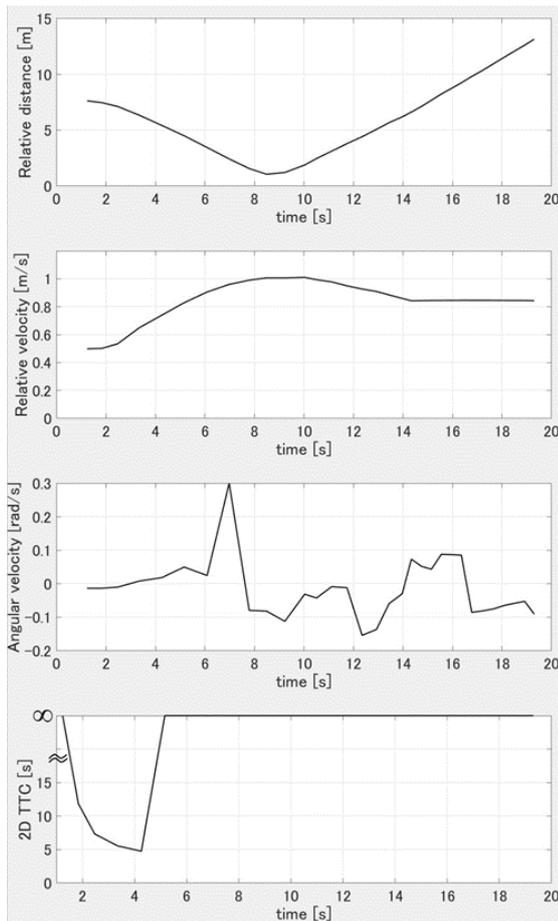


図 23 評価値の時系列グラフ

Figure 23 evaluation value time series graph

4.4 主観評価と物理指標の関係

主観評価値と客観評価値について相関図を作成した。(図 24, 図 25, 図 26, 図 27,)

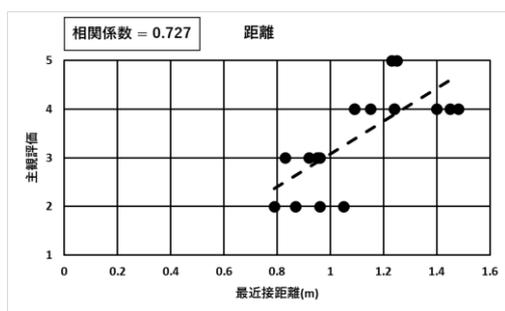


図 24 距離と主観評価の相関図

Figure 24 Correlations between distance and subjective evaluation.

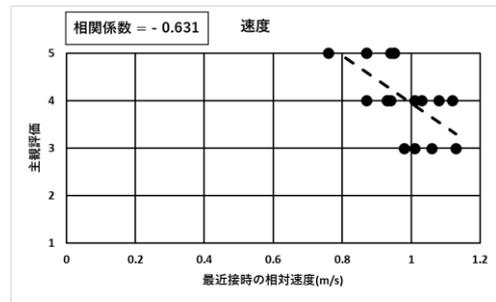


図 25 速度と主観評価の相関図

Figure 25 Correlations between speed and subjective evaluation.

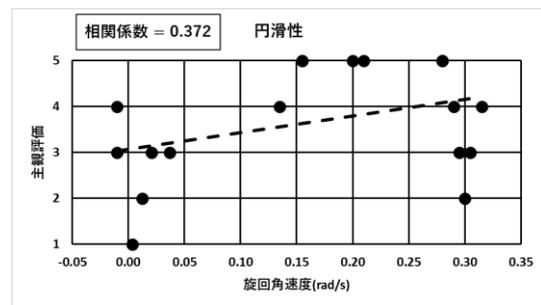


図 26 円滑性と主観評価の相関図

Figure 26 Correlations between smoothness and subjective evaluation.

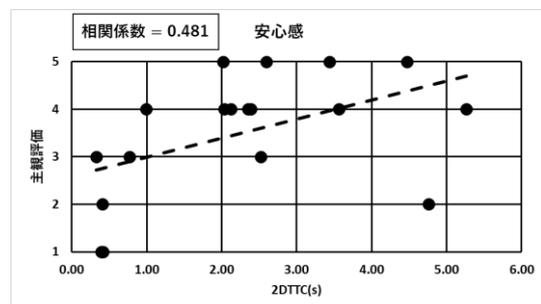


図 27 安心感と主観評価の相関図

Figure 27 Correlation between reliability and subjective evaluation.

距離に関しては最近接距離の値が小さくなるにつれて主観評価値が悪くなり、大きくなるにつれて主観評価値が良くなっている傾向が読み取れる。

速度に関しては、最近接時の相対速度の値が大きくなるにつれて主観評価値が悪化している傾向が読み取れる。

円滑性に関しては旋回角速度が大きい場合に主観評価が悪化している傾向が読み取れる。

安心感に関しては 2 次元 TTC の値が 1 秒以下で主観評価値が悪化しており、2 次元 TTC の値が 2 秒以上であると主観評価値が向上している傾向が読み取れる。

5. 考察

5.1 主観評価結果に対する考察

前向き歩行の場合も下向き歩行の場合も、速度以外の全項目で主観評価結果が向上した。速度については三条件共に高評価を得ており、大きな差は見られなかった。

5.2 客観評価に対する考察

客観評価を行った結果、前向き歩行では距離と安心感に有意差が現れた。衝突危険領域無しの場合にはありの場合に比して歩行者の至近距離ですれ違いを行うのに対し、衝突危険領域ありの場合には一定の距離を保ちつつ回避を行い、2次元 TTC 無限となるためこのような結果になったと考えられる。

下向き歩行では速度以外の項目に有意差が現れた。前向き歩行では、有効視野でモビリティの存在を早くから確認できるのに対し、下向き歩行はスマートフォンを注視しながらの歩行となるため前向き歩行よりも有効視野が狭まり[9]、歩行者はすれ違い直前に周辺視野の中にロボットが入ってきた際に初めてロボットの存在を確認する。そのため、距離に対しての評価、安心感、円滑性が低下したのに対し、衝突危険領域ありの場合には前向き歩行に比して最大限安全な距離を保ちつつ大きめ回避を行い、回避した段階から2次元 TTC 無限となるため安心感も向上する結果になったと考えられる。

円滑性の相関図(図 26)に関しては、旋回角速度の値が0 付近の評価は衝突危険領域なしで回避しない場合についての評価であるため、主観評価値が悪化している傾向もみられる。

安心感の相関図(図 27)に関して 2DTTC の値が大きいにも関わらず、主観評価が悪化している外れ値があるが、これは1名の被験者の「自分から少し避けたので安心感について特段何も感じなかった」という意見が影響していると考えられる。全体として 2DTTC の値が大きくなるにつれ主観評価値が良くなっている傾向が見られた。

6. おわりに

本研究では、歩行者の顔向きに適応した経路生成の提案を行い、歩きスマホの歩行者を安全に回避することができた。

今後はキャンパス内での実証を行い、定量指標を基に経路生成の更なる改善を図り、車両への適用も行いたい。

本研究のようなアルゴリズムが実装されれば、キャンパス内で歩行者と協調性の高い自律移動モビリティの運用が行えると考えられる。

参考文献

- [1] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," IEEE Robot. Autom. Mag., vol. 4, no. 1, pp. 23-33, 1997.
- [2] S. M. LaValle, "Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning," Tech. Rep., 1998.
- [3] Hiroshi Hisahara 他, "Human Avoidance Function for Robotic Vacuum Cleaner Through Use of Environmental Sensors - Roomba® Making Way for Humans" -2166-0662/14 \$31.00 © 2014 IEEE DOI 10.1109/ISMS.2014.19, pp.64-67, (参照 2022-04-12).
- [4] Dongxiang Zhang, Zongjun Xie 他, "Real-Time Navigation in Dynamic Human Environments Using Optimal Reciprocal Collision Avoidance", 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, (参照 2022-04-12).
- [5] 後藤拓海, "カルマンフィルタを用いた歩行者行動予測と予測円の生成", 2019 年度卒業研究, (参照 2022-04-12).
- [6] J.Redmon et al., "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection", 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2016), (参照 2022-04-12).
- [7] "Plan Mobile Robot Paths Using RRT", <https://jp.mathworks.com/help/nav/ug/plan-mobile-robot-paths-using-rrt.html>, (参照 2022-04-12).
- [8] 柴田千里他, "先行車減速時における車両情報指標を用いたドライバ特性の推定", 情報処理学会研究報告(2016),(参照 2022-04-12).
- [9] 斎藤大輔 "歩きスマホによる有効視野の変化", 第 32 回バイオメディカル・ファジィ・システム学会年次大会 講演論文集(2019), (参照 2022-04-12).