パーソナルモビリティの安全・安心な自律回避法

Safe and secure autonomous collision avoidance strategy of personal mobility

○ 城代 志野 (東大) 岡部 康平 (東大)
正 小竹 元基 (東大) 正 鎌田 実 (東大)

Yukino JODAI, The University of Tokyo, jodai@sl.t.u-tokyo.ac.jp

Kohei OKABE, The University of Tokyo

Motoki SHINO, The University of Tokyo

Minoru KAMATA, The University of Tokyo

Personal Mobility (PM) is required to avoid pedestrians considering the impact on both rider and pedestrians in order to move autonomously on sidewalks. The objective of this study is to propose and evaluate a new strategy of safe and secure autonomous collision avoidance based on risk evaluation. Subjective evaluations of autonomous pedestrian avoidance show that a pedestrian, walking in front of the PM, can mentally influence on a rider. This result leads the strategy to calculate risk more highly when pedestrians are in front of the PM. The safety of the locomotion based on this proposed strategy is evaluated by theoretical simulation. The validity of the proposed strategy is verified by subjective evaluations through the experiment, using a powered wheelchair simulator.

Key Words: Personal Mobility, Autonomous robot, Avoiding behavior, Personal Space, Risk evaluation

1. 序論

1.1 背景と目的

近年、パーソナルモビリティ (PM) と総称される一人乗り移動体の開発が行われている。PM は快適な移動を実現する次世代移動体として期待されており、その機能や形状は利用目的に応じてさまざまである。本研究では、運転が困難な高齢者や身体障がい者の自立・自律移動を支援する機器としてのPMの利用に着目する。そこで、電動車いすの機能に加え、自律移動機能をPMに搭載することを提案し、利用者の移動の負担を軽減することを目指す。自律移動機能は、走行環境を認識・理解し外部からの支援を受けずに移動する機能^[1]とする。

歩行空間において安全な自律移動を行うためには、移動中に変化する環境を認識・理解することにより、進路変更や停止等の移動方策を選択し、安全確保を行わなくてはならない。しかし、安全性の過剰な追求は、移動体の本質的な機能である移動を妨げる可能性があり、搭乗者と歩行者が安心して移動できる程度に衝突のリスクを許容する必要がある。したがって、本研究は、安全と安心を両立する自律移動の実現を目指した衝突回避法を、リスク評価の観点から提案する。

1.2 本研究の位置づけ

人と共存して自律移動するロボットに関して、人のすれ違い行動時の軌跡を多量のビデオデータから算出し、その行動特性に基づき人とすれ違うロボットを開発した研究^[2]がある。この研究にて、対面してすれ違う場合の人の平均的な行動軌跡が定量的に示されているが、これらの行動特性を自律移動ロボットに適用した際の心理的効果は明らかにされていない。

確率的に予測される人間の行動に基づく回避計画の研究^[3]では、格子状に分割されたロボットの移動領域の“危険度”を、障害物との衝突確率と自車の運動エネルギーを用いて算出することが提案されている。“危険度”を用いることにより、障害物と衝突することなく目的地に到達できることがシミュレーションから示されているが、実環境における有効性は検証されていない。さらに、上記の研究においては、いずれも、搭乗者の存在を考慮していない問題点がある。

本研究では、PMの移動が人に及ぼす心理的作用を把握した上で、回避法を提案する。また、回避法に基づく移動を人の主観で評価することにより、実環境における人と親和性の高い自律移動の実現を目指す。

2. 心理的作用の調査実験

PMの搭乗者と歩行者が、PMの自律移動から受ける影響を調査するため、実機を用いた被験者実験を行う。PMの搭乗者と歩行者に心理的影響を及ぼす要因となり得るPMの移動の状態量を影響要素と定義し、影響要素を抽出することを、実験の目的とする。

2.1 実験方法

影響要素の候補として、

- ① PMの速度
- ② PMと歩行者の回避距離
- ③ PMと歩行者のすれ違い距離

を仮定し、それぞれがPMの搭乗者と歩行者に及ぼす影響を調査する。ここで、回避距離は、回避行動開始時のPMと歩行者の距離を、すれ違い距離は、最接近時のPMと歩行者の距離を表す。

心理的作用の計測に関して、心拍の生体指標を用いる手法^[4]が提案されている。本研究もこれを参考にすが、生体指標と心理的作用との直接的な関係を示すことが困難であるため、本実験では、聞き取り調査による主観評価を主に述べる。

実験は図1に示す自律移動機能を有する電動車いすを用い、十分広い半屋外に片側をコーンで区切った通路を実験環境として実施する。実験条件は、実験環境において、

実験A: 対面して停止する歩行者のいる場合

実験B: 対面して歩行する歩行者のいる場合

の2条件とする。各実験条件下で実験機は、速度をパラメータとして自律走行する。各試行終了後に、搭乗者と歩行者は、互いに衝突しそうだと感じたかについて、

項目1: 十分な余裕があった

項目2: 余裕があった

項目3: 普通だった

項目4: もう少し余裕を持つべきだった

項目5: 衝突するかと思った

の1から5の範囲で主観評価を行う。ただし、全く衝突しそうでなかったため評価できないという回答を0として扱う。

2.2 実験結果

下記の実験結果では、主観評価のみに注目する。

【実験A】PMは、進行方向正面に停止する歩行者に向かって直進し、歩行者から一定の距離で停止した。なお、加速

度は一定で 0.08 [G]であった。

横軸に停止時における PM と歩行者の距離を、縦軸に主観評価をとったグラフを図 2 に示す。被験者保護のため、本実験では最接近距離を 1.7 [m]に設定したところ、項目 5 の評価を得ることはなかった。よって、本実験条件において、走行速度に関わらず 1.7 [m]以上の距離を保って停止することで、人に差し迫った衝突の危険を感じさせることなく移動できることが分かった。

【実験 B】 PM と歩行者は対面して移動し、さまざまな回避距離及びすれ違い距離ですれ違った。PM は直進、又は進路を変更する自律走行を行い、歩行者は自らの判断に基づき進路変更による回避を行った。

回避距離とすれ違い距離を PM の車体に取り付けた測域センサ（北陽電機 UTM 30-X）のデータから読み取り、それぞれの主観評価との相関関係を調査した。なお、PM の走行速度として 2 [km/h]と 4 [km/h]を設定したが、回避距離やすれ違い距離、及び、主観評価に特徴的な差異は見られなかったため、全てのデータを分類せずに解析を行った。

結果、すれ違い距離に関しては、搭乗者（相関係数 -0.13）、歩行者（相関係数 0.03）共に相関関係は確認できなかった。一方、回避距離に関しては、歩行者の主観評価との相関係数は -0.39 となり、強い相関関係は確認できなかったが、図 3 に示すように、搭乗者の主観評価との相関係数は -0.58 となり、負の相関関係にあることが分かった。この結果から、搭乗者は回避距離により衝突を評価していると考えられる。したがって、回避距離が影響要素であり、前方の歩行者に対して距離を長く保って回避することが、搭乗者の安心感の向上に有効である可能性がある。

Fig. 1 Powered wheelchair used in the experiment

Fig. 2 Subjective evaluations of potential collision in experiment A

Fig. 3 Subjective evaluation of potential collision in experiment B

3. 自律回避方策の決定

移動環境の情報から人と衝突するリスクを評価し、回避方策を選択するアルゴリズムを提案する。本研究では、環境の情報として歩行者の存在位置と瞬時速度ベクトルが、PM に取り付けた測域センサから相対的に得られると仮定する。また、PM が人を乗せた状態で移動する際、とり得る移動方策は、搭乗者の受容する方策、及び、車両性能により実現可能な方策に限定されると仮定する。

3.1 リスクの概念の導入

人と共存する機械の安全性評価の際、負の結果をもたらす事象の生起確率と生起時の被害の大きさの組み合わせとして定義されるリスクの概念が用いられる。歩行空間を移動する PM は、衝突のリスク評価を行い、歩行者との衝突を防ぐと同時に衝突時の被害を抑える必要があると考えられる。よって、本研究では、各移動方策を選択した際の歩行者に衝突するリスクを定量化した、リスク値を算出する。

3.2 衝突距離の定義

ある移動方策を選択した場合に歩行者と衝突する確率の定量化指標として、衝突距離 P を用いる。衝突距離 P は、図 4 に示すように、歩行者の PM に対する相対座標を (x_0, y_0) 、歩行者の PM に対する相対速度ベクトル上の半直線と座標軸の交点を $(P_x, 0)$ 、 $(0, P_y)$ として、次式により表される値である。

$$P = \begin{cases} |P_x| & \left(\sqrt{x_0^2 + (y_0 - P_x)^2} < \sqrt{(x_0 - P_x)^2 + y_0^2} \right) \\ \frac{1}{\alpha} |P_y| & \left(\sqrt{x_0^2 + (y_0 - P_x)^2} \geq \sqrt{(x_0 - P_x)^2 + y_0^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 α は、前方で衝突する可能性のある歩行者のリスクを高く算出するための係数である。衝突距離 P の値が大きい移動方策を選択することで、衝突を回避することができる。

3.3 被害指数の定義

歩行者の PM に対する相対速度 $(v_x, v_y)^T$ の大きさを、衝突時の被害の大きさの指標として考え、被害指数 D を式(2)により算出する。被害指数 D は 0 から 1 の範囲で、被害が大きいほど 0 に近くなる値である。

$$D = \frac{1}{1 + (v_x^2 + v_y^2)} \quad (2)$$

3.4 リスク値の定義

衝突距離 P と被害指数 D の積をリスクの指標として、式(3)から N 人の歩行者存在下における移動方策のリスク値 R を算出する。リスク値は大きいほど危険であることを表す値である。

$$R = \sum_{i=1}^N \frac{100}{1 + P_i D_i} \quad (3)$$

3.5 移動方策の決定

リスク値の小さい移動方策を選択し、歩行者との衝突のリスクが小さい移動を行うため、図 5 に示すアルゴリズムを提案する。歩行者を検知すると、まず、図 4 に示す衝突領域と、歩行者との関係に基づく衝突判定を行う。PM の占有領域を近似する円の半径を r [m]、人の占有領域を近似する円の直径を d [m]とすると、衝突領域は、PM を原点とする相対座標系 xy において、原点を中心として半径 $r + d$ [m]の円内の領域と、原点から y 軸正方向沿って長さ L [m]の直線である。

不要な回避行動を防ぐため、回避の必要性に応じて 3 段階に分類した衝突モードを定義する。衝突判定の結果、衝突モードが出力として得られる。衝突モードの分類を下記に示す。

衝突モード 1: 衝突領域内に歩行者が存在する場合

衝突モード 2: 衝突モード 1 に該当せず、かつ、衝突領域と

歩行者の PM に対する相対速度ベクトル上の半直線との交点が存在する場合

衝突モード 0: 衝突モード 1 にも衝突モード 2 にも該当しない場合

次に、優先回避対象を決定する。優先回避対象の決定は、複数の回避対象が存在する場合に、最も優先的に回避する対象を選定するプロセスであり、時間的に差し迫った衝突を優先回避対象とすると良いと考えた。なお、衝突までの時間は、歩行者が衝突領域に進入するまでの時間として算出する。

最後に、優先回避対象のみに対して算出したリスク値が減少する方策を方策候補としてリスト化する。そして、方策候補のなかから、リスク値が最も低くなる方策を選択する。PM の移動中は、常にこのアルゴリズムに基づく移動方策の選択が行われる。

4. 回避法の妥当性検証

4.1 安全性の評価

4.1.1 環境設定

回避法の安全性を評価するため、シミュレーションによる解析を行う。シミュレーション空間は、幅 2.5 [m]、全長 10.2 [m] の通路とする。また、PM の占有領域を近似する円の半径 r を 0.5 [m]、歩行者の占有領域を近似する円の直径 d を 0.5 [m] と仮定し、衝突領域を設定した。影響調査実験の結果を踏まえ、パラメータは $\alpha=1.7$ 、 $L=2.0$ に設定した。さらに、PM の

Fig. 4 Collision area and collision distance

Fig. 5 Algorithm of deciding locomotion plan

移動方策は、左右 45 [deg]以下の範囲における進路変更と設定速度以下での直進とする。

衝突の可能性が高い歩行者に対する移動を評価するため、該当する歩行者を、PM を原点とする相対座標系 xy における存在位置と相対速度ベクトルに基づく定性的分類により抽出した。衝突の可能性が高い歩行者の存在位置と相対速度ベクトルを図 6 に実線で示す。シミュレーション空間は y 軸について対称であるため、表 1 に示す計 9 条件についてシミュレーションを行った。また、シミュレーションにおいては、歩行者は同じ速度ベクトルを維持して移動すると仮定した。

4.1.2 シミュレーション結果

速度 4.0 [km/h]で加速を許容しない場合と、6.0 [km/h]までの加速を許容する場合を実験条件として設定した結果、PM の前方から接近する歩行者、すなわち、F の位置に存在する歩行者に対しては、衝突せずに移動できることが確認できた。また、PM の側方と後方から接近する歩行者、すなわち、R と B の位置に存在する歩行者との衝突事象が両方の条件で確認できた。

衝突せずに移動できた条件 F-6 において、PM は通路端に寄り歩行者を回避した。条件 F-6 におけるリスク値の推移を図 7 に示す。すれ違うまでのリスク値は高く算出されているが、すれ違った後のリスク値は低いことが分かる。

条件 B-1 では、後方から接近する歩行者に対するリスクを低減させるため、PM は初め、歩行者と同方向の速度ベクトルを持って通路の端に寄る行動をとった。PM が通路の端に到達したため同方向の速度ベクトルを持つことが不可能になると直進し、その結果、衝突した。条件 B-1 の歩行者に関して、歩行者と PM の距離を横軸に、リスク値を縦軸にとったグラフを図 8 に示す。図より、6 [km/h]までの加速を許可することで、同距離にある歩行者に対するリスク値が減っていることが分かる。また、接近距離の最小値も大きくなっており、高い速度まで加速を許容することで、衝突のリスクを抑えることができる可能性が示された。しかし、接近距離は衝突の目安となる 0.75 [m]を依然として下回っていることから、衝突を防ぐことはできていない。これは、歩行者の速度を、PM の 6 [km/h]を上回る 10 [km/h]に設定したためと考えられる。このような高速での背後からの追突は、主に歩行者の前方不確認による不安全行動として実際に存在し得る。安全性向上のため、警報器等による注意喚起を行うことが有効である可能性があり、さらなる検討が必要である。

4.2 主観評価による妥当性検証実験

提案した安全・安心な回避法により、PM の搭乗者の安心感が向上することを確認するため、電動車いすシミュレータを用いた被験者実験を行う。

Fig. 6 Positions and vectors of pedestrians

Table 1 Conditions in simulation

Condition	Velocity [km/h]	Angle to "8" [deg]
F-6	0	90
F-7	8.2	80
Fr-7	2	60
B-1	10	-70
B-2	10	-90
Br-1	10	-70
R-1	6.3	-45
R-7	2.8	45
R-8	4.5	0

Fig. 7 Risk value in condition F-6

Fig. 8 Difference in risk value relative to speed in B-1

Fig. 9 Powered wheelchair simulator

Fig. 10 Disparity in subjective evaluations by considering security

4.2.1 実験方法

実験は、シミュレータ上に、線と壁により区切った幅 2.5 [m] の通路を作成し、PM の進行方向前方の通路に仮想的な歩行者 14 体 (ID: A~N) をランダムに配置することにより実際の歩行空間を模擬して実施する。使用したシミュレータの概観を図 9 に示す。20 代男性 4 名の被験者は、 $\alpha=1.0$, $L=0.0$ の場合の移動 (安全な移動) と、 $\alpha=1.7$, $L=2.0$ の場合の移動 (安全・安心な移動) を行うシミュレータに搭乗し、シミュレータ上に存在する各歩行者それぞれに対して第 2 章の実験で用いた指標を用い、1 から 5 の範囲で主観評価を行う。

4.2.2 実験結果

安全な移動と安全・安心な移動における歩行者 14 体に対する被験者の評価値の差の平均を図 10 に示す。結果、歩行者 I と歩行者 J に対する評価が低下したが、他の歩行者に対しての評価は維持、又は、向上することが確認できた。

歩行者 I に対する評価が悪化した被験者は 1 名であり、他の被験者の評価に変化は無かった。歩行者 I は、搭乗者の前を横切るように歩行する歩行者であり、安全・安心な移動においては、歩行者 I が横切る間、前方の接近距離を長くするため PM は停止していた。その結果、歩行者が前方に存在する時間が長くなったため、評価が悪化した可能性がある。

また、歩行者 J は、安全・安心な移動において、安全な移動と比較して前方への接近距離が約 0.5 [m] 短くなった。これは、前方から、歩行者 J より高速で対面して接近してくる歩行者 K に対して、大きく回避行動をとったためである。この結果、被験者の歩行者 J に対する評価は悪化したと考えられる。

歩行者 C, D, H, K, L に対しては、全員の被験者が、安全な移動において、項目 3 より良い評価をしており、安全・安心な移動においても評価は低下しなかった。

他の歩行者に関しては、安全・安心な移動において、安全な移動に比べて PM と歩行者の、PM の進行方向前方における接近距離が伸び、その結果、安心感が向上する傾向が確認できた。したがって、提案した回避法により、安全・安心な自律回避を歩行空間において行うことができる可能性がある。

5. 結論

本研究では、PM の歩行空間における衝突のリスク評価に基づく自律回避法を、心理的作用を調査する被験者実験を踏まえて提案した。そして、提案した回避法の論理的な安全性と、パラメータ設定による人に与える安心感への影響を検証した。結果、提案した回避法の適切なパラメータ設定により、人に与える安心感を向上させながら、歩行空間において自律回避を行うことができる可能性が示された。

今後は、提案した自律回避法に基づく移動を行う PM を、実機を用いて試作し、実際の自律移動における PM の搭乗者の心理的評価に加え、PM に対する歩行者の心理的評価についても考察する方針である。

文 献

- [1] 日本工業標準調査会, “移動ロボット-用語,” JIS B 0186, 2003.
- [2] 依田光正, 塩田泰仁, “人間とすれ違い行動を行う移動ロボットの研究,” 日本ロボット学会誌, vol. 17, pp. 202-209, 1999.
- [3] 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), 63 巻 606 号, pp. 499-505, 1997.
- [4] 栗谷川幸代, 景山一郎, “機械操作時における心負担推定に用いる心拍変動モデルの構築,” 日本機械学会論文集 (C 編), 66 巻 643 号, pp. 140-146, 2000.