

単独交差実験におけるマイクロモビリティに対する歩行者の回避挙動からみた回避予兆・回避領域に関する研究

A Study on Avoidance Prediction and Avoidance Regions Based on Pedestrian Avoidance Behavior Toward Micro-mobility in Single-Crossing Experiments.

○須之内 裕人^{*1}, 木原 己人^{*2}, 斉藤 圭^{*3}, 高柳 英明^{*4}
Hiroto SUNOUCHI^{*1}, Tatsuto KIHARA^{*2}, Kei SAITO^{*3}, Hideaki TAKAYANAGI^{*4}

^{*1} 東京都市大学大学院 環境情報学研究科 博士前期課程(都市生活学)

Master's Student, Tokyo City University, B. Urban Life Studies.

^{*2} 東京都市大学大学院 環境情報学研究科 博士後期課程 修士(環境科学)

Dept. of Urban Life Studies, Tokyo City University.

^{*3} 東京都市大学大学院 環境情報学研究科 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof. of Urban Life Studies, Tokyo City University, Dr. of Eng.

^{*4} 東京都市大学大学院 環境情報学研究科 教授・博士(工学)

Assoc. Prof. of Urban Life Studies, Tokyo City University, Dr. of Eng.

キーワード: 歩行者; マイクロモビリティ; 回避挙動; 回避予兆領域; 回避領域

Keywords: Pedestrian; Micro-mobility; Avoidance Behavior; Avoidance Prediction Area; Avoidance Area.

1. 研究背景・目的

近年、交通の MaaS 化^{注1)}が進み、公共交通機関や電動キックスクーターなどといったモビリティのシェアリングサービスと連携をとることで、より快適な方向へ向かうと考えられている。東京都内では、「株式会社 LUUP」^{注2)}が電動キックスクーターをはじめ、マイクロモビリティ(以下 MM)^{注3)}などのシェアリングサービスを実施している。電動キックスクーターは、自動車などの他のモビリティと比べ、シェアリングサービスの設置場所を狭める事や混雑場所を容易に回避することができるなどのメリットがあり、2023 年 7 月 1 日より法改正により 16 歳以上かつ免許不必要に変更されたことにより、社会導入が更に進み、今後より多く人が利用する可能性が高まっている。このような社会背景から、今後都市交通において、MM が普及し、よりスマートモビリティ化が進むことで、各種公共交通の混雑回避や乗り入れアクセスの向上化が進むと期待される。しかし、歩行空間への MM の乗り入れは、快適かつ便利になると同時に、歩行者との接触事故などのリスクが懸念される。その為には、歩行者と MM の混在空間における、それぞれの回避挙動に基づいた群集流動シミュレーションから、歩行負荷を指標とした安全評価の検証が必要である。

このような社会背景から本研究では、歩行者と MM の歩車共存空間を考える上で、群衆流動シミュレーションに組み込む新たな数値基準を定める為、単独交差実験を行

い、座標抽出データを基に予兆・回避領域図を作成することを目的とする。

また単独交差実験に関して、歩行奇跡をモーションキャプチャ・システムにて取得することが出来る東京都市大学内のインテリジェントロボティクスセンターにて行った。その後、取得した歩行奇跡データを分析し、予兆・回避領域図を作成する上で、歩行者と MM がすれ違う際に歩行者がとる回避挙動を「回避予兆行動」、「回避行動」に分け、両者の位置関係を基に、領域図の作成を行った。

2. 実験概要

本研究では、表 1 にて示すように MM および被験者である歩行者が 1 対 1 で交差する単独交差実験において、被験者および MM に装着させた帽子上に無作為に設置した 6 個のマーカーにより形成された剛体の重心からそれぞれの位置座標を取得し、回避挙動を分析した。位置座標の取得は、FL+2.6[m]の位置に設置した 28 台のモーションキャプチャにより、記録間隔 120[fps]にて行った。

また、被験者辺りの実験試行数は、MM と被験者交差角度 ϕ を 7 パタン^{注5)}、回避指示距離 D を 5 パタン^{注6)}の計 35 パタンにおいて実験を行った。同じ回避指示距離による慣れを防止することとして、回避指示距離と交差角度をランダムに行った。本実験を行うに当たり、MM の速度は、安定した姿勢で走行可能な最低速度である 1.6[m/s]

注7)に設定した。また被験者の定常歩行速度は平均をとり約1.1[m/s]であるとした。あらかじめ被験者に指示した回避行動を許可する位置として回避指示点Pを定め、被験者およびMMの交差目標点をTとした際に、その間を回避指示距離Dと定めた。

最後に、MMは回避を行わず直進し、被験者のみが指示した位置にて回避行動をとるものとした。被験者側の歩行開始位置は固定し、MM側の被験者Sに対する走行開始位置^{注8)}を変更することで、交差角度 ϕ を設定した。ただし、交差は常に交差目標T上に行われるものとした。

3. 予兆・回避領域図作成

3.1 回避挙動の分類

回避挙動の分類を行うに当たり、被験者およびMMの位置座標をそれぞれ $\{X_s, Y_s\}$, $\{X_e, Y_e\}$ とし、式1から被験者の歩行速度 V [m/s]、式2より被験者の角速度 Ω [rad/s]を $t=0.1$ [sec.]毎に算出した。各時刻における回避挙動の分類は、算出した歩行速度 V [m/s]および角速度 Ω [rad/s]に対して表1に示す閾値を基に行う。その際、表2にて示すように、歩行速度 V [m/s]および角速度 Ω [rad/s]のいずれかが「回避行動」を示したものは、「回避行動」、どちらとも「回避なし」の場合は、「回避なし」、それ以外を「回避予兆行動」として分類した。また、MMと被験者との相対座標を $(x, y) = \{(X_e - X_s), (Y_e - Y_s)\}$ とすると、図1に示すMMと被験者との相対距離 L [m]および相対角度 θ [deg.]をそれぞれ式3,4より算出し、図2のように回避挙動毎にMMを中心とした極座標上に相対位置座標をプロットした。

$$V[\text{m/s}] = \frac{\sqrt{\Delta X_s^2 + \Delta Y_s^2}}{\Delta t} \quad \dots (\text{式 } 1)$$

$$\Omega[\text{rad/s}] = \frac{\tan^{-1} \frac{\Delta Y_s}{\Delta X_s} \times \left(\frac{\pi}{180} \right)}{\Delta t} \quad \dots (\text{式 } 2)$$

$$L[\text{m}] = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \dots (\text{式 } 3)$$

$$\theta[\text{deg.}] = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \dots (\text{式 } 4)$$

3.2 回避指示距離における予兆・回避領域図

各回避指示距離において、3.1で分類した回避挙動毎に予兆領域図および回避領域図を図3に示すプロセスによって作成する。

まず、回避予兆行動、回避行動毎に位置座標を極座標上にプロットする。次に、極座標における30[deg.]毎の線を中心に ± 15 [deg.]の範囲内にプロットされた各点を結び、剛体を作成する。最後に作成した剛体の中心を取り、それらを結ぶことにより、それぞれの領域図を作成する。

4. 結果・考察

前章の手法を用い、回避指示距離D毎に作成した予兆・回避領域図を表3に示す。作成した全ての予兆領域図において、MMの前方が広がり、側面に近づくほど狭まる「う

表1：実験概要図

図		回避指示距離D[m]					
		2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	
試行回数	45	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	
	90	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₂₅	
	135	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	P ₃₄	P ₃₅	
	180	P ₄₁	P ₄₂	P ₄₃	P ₄₄	P ₄₅	
	225	P ₅₁	P ₅₂	P ₅₃	P ₅₄	P ₅₅	
	270	P ₆₁	P ₆₂	P ₆₃	P ₆₄	P ₆₅	
	315	P ₇₁	P ₇₂	P ₇₃	P ₇₄	P ₇₅	

表2：回避挙動の分類

		被験者歩行速度 V [m/s]		
		$V_s - 1 < V$	$V_s - 1 \leq V < V_s$	$V_s \leq V$
角速度 Ω [rad.]	$\Omega \leq 0.6$	回避行動	回避行動	回避行動
	$0.4 \leq \Omega < 0.6$	回避行動	回避予兆行動	回避予兆行動
	$0.4 < \Omega$	回避行動	回避予兆行動	回避なし

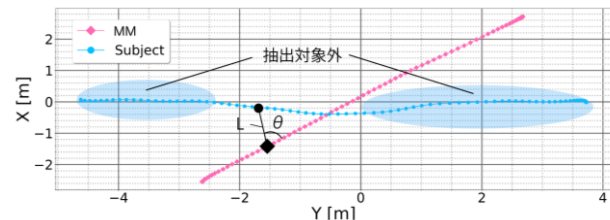


図1：抽出対象外範囲と相対距離および相対角度

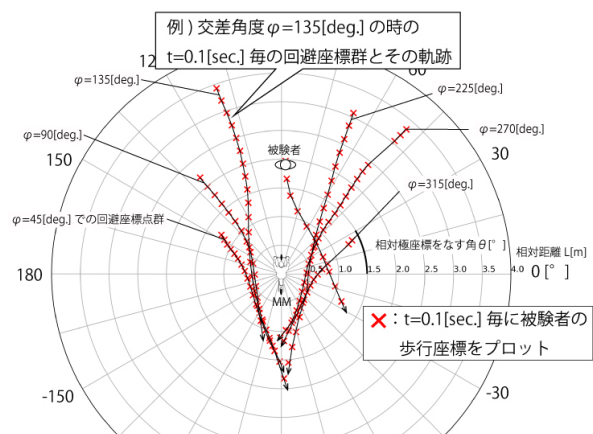


図2：MMを中心とした極座標上の相対座標点群

ちわ型」の形状となり、回避領域図でも同じく MM の前方は広がり、後方はすぼまった流線形を取ることがわかった。また、この回避領域においては、回避指示距離 D が長くなるにつれ、より前方に広がる傾向がみられるが、これは回避可能な状況下であれば可能な限り迅速に回避行動を取っていると考えられることから、MM 前方の $45 \sim 135[\text{deg.}]$ で交差する際に危険性をより敏感に感じ取っていると考えられる。

特に、回避指示距離 $D=0.5[\text{m}]$ において、MM の前方 $45 \sim 135[\text{deg.}]$ では、回避領域が回避指示距離 D の 2 倍以上となっており、通常、各回避指示距離 D を通過後に回避行動を行ったとすると回避領域が回避指示距離 D の 2 倍以下となることから、回避指示距離 D に到達する以前に交差することが危険と判断した為、緊急的に回避が行われたと考えられる。さらに、回避領域においては左右対称とはならず、MM の右前方においてやや広がる傾向がみられる。特に回避指示距離 $D=1.0[\text{m}]$ 以上においては、この回避領域が広がっていることに加え、予兆領域と回避領域の差が一般的な歩幅である $0.5[\text{m}]$ 以下となっていることから、ほとんど予兆行動が取られることなく回避行動が取られており、危険性が高いと判断できる。逆に、MM 側面においては、予兆・回避領域の差はわずかではあるものの、その領域には広がりがみられないことから、可能な限り接近した上で、比較的余裕を持って安全に回避行動を取ることができたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、歩行軌跡をモーションキャプチャ・システムによって取得することが可能な専用実験室において、交差角度および回避行動の制限の異なった条件下で、歩行者が MM に対してどのような回避挙動を取るのかについて明らかにするため、歩行者と MM との単独交差実験を行った。本研究により得られた成果は以下の通りである。
○実験により得られた歩行軌跡から、歩行速度、角速度を算出し、既往の閾値を用いた回避挙動の分類を基に、

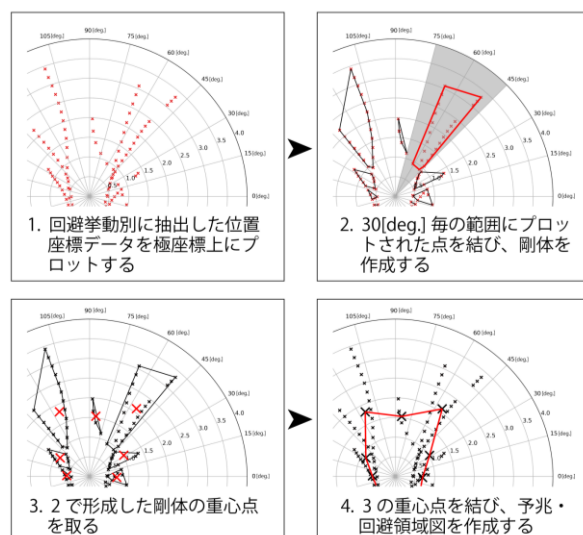
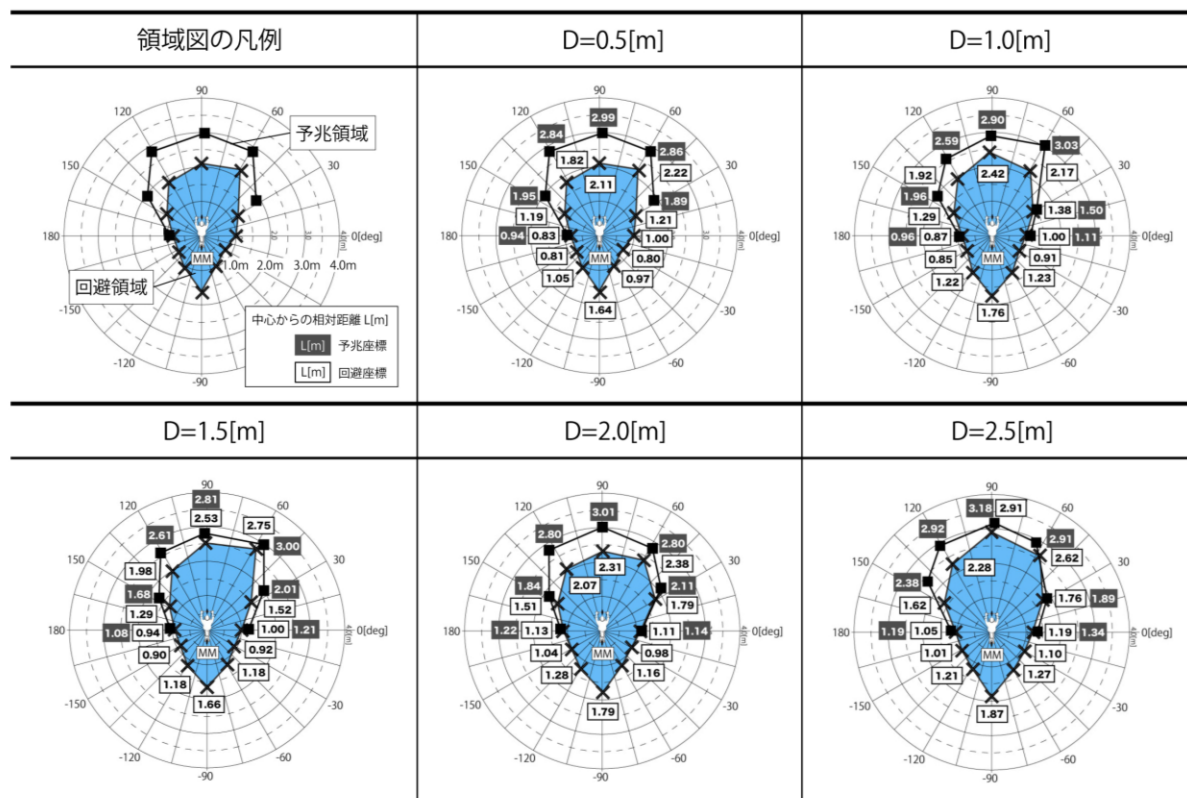


図 3：予兆・回避領域図作成プロセス

表 3：回避開始指示距離における予兆・回避領域図



歩行者の MM に対する予兆領域と回避領域を作成す手法を構築できた。

○作成した予兆・回避領域図から群集密度 $\rho=1.0$ [人/m²] 未満では、接触の危険性が高く、歩行者と MM との同速度における共存は難しいということがわかった。

○予兆・回避領域図は左右対称とはならず、回避指示距離 $D=1.5$ [m] 以上の際に、MM 右前方において回避領域が広がっており、回避予兆行動がほとんど取られることがなく、回避行動に至っていることから MM の右前方からの交差に対し危険を感じやすいといった特徴がみられた。

○先行研究²⁾において歩行者同士における回避予兆行動の研究では、回避指示距離 $D=0.5$ [m] 群衆密度換算で 4.0 [人/m²] の際に、歩行負荷が大きく歩行空間として危険であると明らかにしている。しかし、歩行者対 MM の場合では、 $D=1.5$ [m] 群衆密度換算で 0.4 [人/m²] の際に歩行負荷が大きくなり、両者が共存する空間として危険であるということが分かり、歩行者同士と歩行者対 MM における歩行空間の危険度を示す具体的な指標の差を明らかにできた。今後マイクロモビリティなどのモビリティが歩行者と共存した際の空間設計に活用し、モビリティと歩行者の両者が快適かつ安全に歩行・走行できる環境設計が重要である。

今後は、作成した領域図を数理基準として、既存の群集シミュレーションに反映させることにより、歩行空間への MM の導入を想定した安全で快適なスマートモビリティの実現に資する数理モデルの構築を目指す。

また、本研究では、歩行者と MM の速度を等速として実験を行ったが、MM の速度が低速の際の歩行者における追い越しを想定した回避挙動における全周囲での予兆・回避領域、さらに、MM の速度が高速の際の回避挙動における予兆・回避領域についても同様の実験を行うことで、より多様な条件下に対応可能な数理基準の構築が必要であると考えられる。

【付記】

本研究にかかる被験者実験は、東京都市大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査（承認番号：2021-h04）により承認され実施したものである。

【注釈】

- 1) 交通の MaaS 化とは、バス、電車、タクシーからライドシェア、シェアサイクルといったあらゆる公共交通機関を、IT を用いてシームレスに結び、人々が効率よく、便利に使えるようにするシステムのことで
- 2) 株式会社 LUUP（ループ）が 2021 年 4 月 23 日より渋谷区を始め、都内 6 区内走行可能である新事業特例制度を利用した社会実証実験

を行った。また、新事業特例制度とは、新規事業にチャレンジする事業者が、規制の特例措置を提案し、安全性等の確保を条件として企業単位で規制の特例措置の適応を認める制度である。

- 3) マイクロモビリティとは、超小型モビリティ又はマイクロモビリティとは、自動車よりコンパクトで機動性が高く地域の手軽な移動の足となる 1 人または 2 人乗り程度の車両のこと。電動スクーターなど、必ずしも四輪車とは限らない。動力源に電池が利用され環境性能に優れたモビリティである。本研究においてキックスクーターといった歩行者空間において歩行者と同程度の速度で走行するモビリティを MM と定義する。
- 4) 参考文献 2) , 4) における閾値を参考とし、本研究において被験者毎の定常歩行速度 Vs [m/s] を基準に閾値を設定した。 $Vs=1.0$ [m/s] の際には本研究と同様の閾値設定になる。
- 5) 交差角度 ϕ を 7 パタン ($\phi=45, 90, 135, 180, 225, 270, 315$ [°]) とした理由は、参考文献 2) , 4) における $\phi=45$ [°] 刻みの条件設定に準拠した。
- 6) 回避指示距離 D を 5 パタン ($D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ [m]) とした根拠として、実際の歩行群衆流動において観測することが可能な群衆流動密度を想定していること、参考文献 2) において回避指示距離 $=0.5$ [m] 刻みで条件設定を行っていることに準拠した。また、選定理由として、実際の歩行群衆流において観測し得る群集密度域を想定し、それぞれ $\rho=4.0, 1.0, 0.4, 0.3, 0.2$ [人/m²] の際の個体間距離に換算した距離を用いた。なお、一般的な通勤群集密度は、 $0.7 \sim 1.0$ [人/m²] であり、個体悪寒距離に換算すると $D=1.0$ [m] に相当する。
- 7) MM が姿勢を安定させ、走行可能な最低速度 1.6 [m/s] に設定している。
- 8) 本実験を行う上で被験者に対し、正確なデータ取得の為に以下のことを指示し気をつけて実験を行った。
 - ① 回避行動を行った後、設定した目標点を目指すこと
 - ② 基本的に回避行動は、それぞれ指定された回避指示点 P を過ぎてから回避行動を行う
 - ③ 今回の実験において MM は回避行動を取らない為、被験者側が危険な際は指示距離に関わらず随時回避を取っても構わない以上のことを実験開始前に被験者に対し説明し、実験を行った。

【参考文献】

- 1) 菱川貴之, 井料美帆, 長谷川悠: パーソナルモビリティの車種が歩行者のリスク認知に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 75, No. 5(土木計画学研究・論文報告集第 36 巻), I_595-I_605, 2019
- 2) 山田昇吾, 田中文翔, 木原己人, 高柳英明: 歩行者の回避予兆行動に関する研究, 日本インテリア学会論文報告集第 31 号, pp. 1-4, 2021. 3
- 3) 山本龍也, 中井一文, 江崎修: 人間同士の衝突回避における動特性一般化の検討, 第 81 回全国大会講演論文集 2019 巻 1 号 pp. 147-148, 2019. 2
- 4) 田中文翔, 木原己人, 高柳英明, 末繁雄一: 歩行者のパーソナルビークルに対する回避予兆行動に関する研究, 日本インテリア学会論文報告集第 32 号, pp. 31-36, 2022. 3
- 5) 佐野友紀, 志田弘二, 建部謙治: モーションキャプチャを用いた歩行者の群集横断歩行特性の解析, 日本建築学会 22 巻 pp. 253-256, 1999. 12
- 6) 今西美音子, 佐野友紀: 群集流横断における歩行者間の回避強度水準の検討-短時間歩行バス分析をもちいた群集解析その 1, 日本建築学会計画系論文集, No. 698, pp. 917-922, 2014