

歩行者と車両の共存空間における 交通流動シミュレーション

歩行者と車両の共存空間における
交通流動シミュレーションに関する研究プロジェクト

2024 年 12 月

公益社団法人 日本交通政策研究会

1. “日交研シリーズ”は、公益社団法人 日本交通政策研究会の実施するプロジェクトの研究
成果、本研究会の行う講演、座談会の記録、交通問題に関する内外文献の紹介、等々を印
刷に付して順次刊行するものである。
2. シリーズはAよりEに至る5つの系列に分かれる。
シリーズAは、本研究会のプロジェクトの成果である書き下ろし論文を収める。
シリーズBは、シリーズAに対比して、より時論的、啓蒙的な視点に立つものであり、
折にふれ、重要な問題を積極的にとりあげ、講演、座談会、討論会、その他の方法によっ
てとりまとめたものを収める。
シリーズCは、交通問題に関する内外の資料、文献の翻訳、紹介を内容とする。
シリーズDは、本研究会会員が他の雑誌等に公けにした論文にして、本研究会の研究調査
活動との関連において復刻の価値ありと認められるもののリプリントシリーズである。
シリーズEは、本研究会が発表する政策上の諸提言を内容とする。
3. 論文等の内容についての責任はそれぞれの著者に存し、本研究会は責任を負わない。
4. 令和2年度以前のシリーズは印刷及び送料実費をもって希望の向きに頒布するものとする。

公益社団法人日本交通政策研究会

代表理事 山 内 弘 隆
同 原 田 昇

令和2年度以前のシリーズの入手をご希望の向きは系列番号
を明記の上、下記へお申し込み下さい。

〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-12-6

守住ビル 4階

公益社団法人日本交通政策研究会

電 話 (03) 3263-1945 (代表)

F a x (03) 3234-4593

E-Mail:office@nikkoken.or.jp

日交研シリーズ A-895

令和 5 年度自主研究プロジェクト

「歩行者と車両の共存空間における交通流動シミュレーション」

刊行：2024 年 12 月

歩行者と車両の共存空間における交通流動シミュレーション
Traffic Flow Simulation in Shared Spaces between Pedestrians and Vehicles

主査：藤原 章正（広島大学）

Akimasa Fujiwara

要 旨

本研究では、(1) 歩行者-車両の相互作用のモデル化、(2) 歩行者間（とりわけ移動者-滞在者間）の相互作用のモデル化と評価枠組みの検討、(3) 歩行者の時空間ダイナミクスを把握する調査枠組みの検討、について研究を行った。具体的には以下の通りである。

第一に、歩行者-車両の相互作用を取り入れた歩行者モデルを提案し、歩行者が AV、自動車、自転車、バイクが接近時にとる回避行動をモデル化した。モデル推定の結果、車両の存在が歩行者に与える有意な影響は把握できなかったものの、(1) 横断歩道が歩行者優先区域に指定されているにもかかわらず、歩行者は自動車が優先して通過できるように振る舞う傾向があること、(2) 一方、AV は歩行者に優先して停止するよう設定されているため、AV との衝突を避ける必要性は低いと認識している可能性があるなど、歩行者の挙動を観測することから幾つかの知見を得られた。

第二に、移動者と滞在者の競合をモデル化し、定量的に評価するための枠組みを提案した。具体的には、歩行者の移動と滞在が混在する状況を、動的離散選択モデルを用いて記述する歩行者モデルを構築し、提案モデルから算出されるログサム値を評価指標として用いることを提案した。これまで広く使用されてきた消費者余剰に基づく評価枠組みと整合する枠組みで評価することにより、政策決定の場で機能する指標を提案する点が、本研究の大きな特徴である。さらに、提案した評価指標の有効性を確かめるために数値シミュレーションを行い、オブジェクトの配置の違いが与える影響を評価した。

第三に、街路空間を整備・運用すべきスポットの特定の基礎データとして、歩行者の時空間ダイナミクスを把握するための調査枠組みを提案、試行的に提案調査を実施した。

最後に、研究成果を踏まえ、街路空間設計・運用に関する幾つかの研究課題を整理した。

キーワード：歩行者行動、自動運転車、自転車、移動・滞在機能

Keywords : pedestrian behavior, autonomous vehicle, bicycle, travel and place functions

目 次

1 章	はじめに	1
2 章	車両接近時における歩行者行動のモデル化	3
2.1	背景	3
2.2	既存研究整理と本研究の位置づけ	4
2.2.1	歩行者の自動運転車に対する反応を分析する研究	4
2.2.2	歩行者モデルによる歩行者と車両の相互作用	5
2.3	データ	7
2.3.1	歩行者と車両の行動に関する測定	7
2.3.2	データ処理	7
2.4	モデリングフレームワーク	11
2.4.1	行動の仮定	11
2.4.2	効用関数	12
2.4.3	モデル構造	21
2.5	基礎集計	21
2.6	モデル推定結果	24
2.7	まとめ	28
3 章	滞在行動を考慮した歩行者モデルへの拡張	30
3.1	はじめに	30
3.2	文献レビュー	32
3.3	方法論	33
3.3.1	動的離散選択歩行者モデルの定式化	34
3.3.2	相互作用の取り入れ方	35
3.4	数値シミュレーション	36
3.4.1	シミュレーション条件	36
3.4.2	効用関数	36
3.4.3	シミュレーション手順	37
3.4.4	シミュレーション結果	38
3.5	まとめ	39
4 章	歩行者の時空間ダイナミクスを把握する調査枠組みの検討	41
4.1	はじめに	41
4.2	調査枠組み	41
4.3	調査試行結果	41
5 章	おわりに	44
	参考文献	46

研究メンバーおよび執筆者（敬称略・順不同）

- 主査 藤原章正（広島大学・教授）
- メンバー 伊藤 雅（広島工業大学・教授）
- 小倉亜紗美（呉工業高等専門学校・講師）
- 神田佑亮（呉工業高等専門学校・教授）
- 清家美帆（広島大学・助教）
- バルン・バギス（広島大学・助教）
- 楠橋康広（西日本高速道路エンジニアリング中国(株)・土木事業部上級主幹）
- 桑野将司（鳥取大学・教授）
- 小笹俊成（(株)福山コンサルタント・中四国支社長）
- 嶋本 寛（宮崎大学・准教授）
- 瀬谷 創（神戸大学・准教授）
- 力石 真（広島大学・教授）
- 張 峻屹（広島大学・教授）
- 塚井誠人（広島大学・准教授）
- ザフィラ・ガニ（広島大学・研究員）
- 福井のり子（(株)バイタルリード・課長）
- 布施正暁（広島大学・准教授）
- 宮崎耕輔（香川高等専門学校・准教授）
- 森山昌幸（(株)バイタルリード・代表取締役）
- 吉野大介（復建調査設計(株)・係長）
- 渡邊一成（福山市立大学・教授）
- 岡英紀（計量計画研究所・データサイエンス室 室長代理兼 GM）
- 学生メンバー
- 藤原啓示（広島大学・博士課程学生）

1 章 はじめに

自動運転車や電動スクーターをはじめとした新しいモビリティ車両が歩行者と共存する状況を想定した道路空間の設計・運用について検討すべき段階にきている。この検討を進めるための基礎として、共存空間においてどの車両タイプの流入を規制すべきか、最高速度の規制はどうあるべきか、自動運転車両に事前に実装しておくべき制御アルゴリズムは何か、などの問いに適切に答えられる分析枠組みを構築しておくことが重要と考えられる。

以上の背景から、2022 年度の共同研究においては、広島大学東広島キャンパス内を走行する自動運転シャトルサービス（HIROMOBI）が歩行者挙動に及ぼす影響を把握するため、歩行者と自動運転車が交錯するエリアにカメラ・LiDAR を設置し、自動運転車と通常の車に対する歩行者の反応の違いを把握するための歩行者挙動のモデル化を行い、その結果、自動運転車と車に対する歩行者の反応に有意な差異があることを確認した。本年度は、昨年度の研究成果をもとに、以下の 3 点について研究を進め、今後の道路空間の設計・運用に資する知見を得ることを目指す。

1. 歩行者モデルの改良

昨年度構築した歩行者モデルは適合度が著しく低いことから、データの再クリーニングを行うとともに、歩行者と他の車両との相互作用の発生パターンを再整理し、自転車、バイクの影響を反映する。ただし、2 章において詳述するように、適合度は上がったものの歩行者と他の車両との相互作用をうまく捉えるモデル構築に至らず、更に次の 2 つの研究テーマについて追加の検討を実施することとした。

2. 滞在行動を考慮した歩行者モデルへの拡張

歩行者モデル改良の過程において、滞在者の行動を考慮する重要性を確認（滞在者の存在が移動者の挙動に影響）したことから、滞在者、移動者双方の行動への影響のトレードオフを考慮するために動的離散選択モデルの枠組みに拡張したモデルを構築する。

3. 歩行者の時空間ダイナミクスを把握する調査枠組みの検討

加えて、歩行者街路空間の改善を検討すべきスポット／時間帯を効率的に抽出することを念頭に、公共交通のアクセス・イグレス等を含む、都市全域の歩行者発生場所を捉える調査枠組みを提案する。

2 章では，歩行者モデルの改良結果について述べる．3 章では，滞在行動を考慮した歩行者モデルの開発ならびに数値シミュレーション結果を報告する．4 章では，歩行者発生場所を捉えるための調査枠組みを提案し，東広島市を対象に実施したプレ調査結果を報告する．5 章にて本研究の成果を整理する．

2 章 車両接近時における歩行者行動のモデル化

2.1 背景

自動運転車 (AV) の広範な利用により、車両所有のパターンやビジネスモデルの変化 (例：シェアリング)、都市設計や移動パターン、交通渋滞、道路安全など、多岐にわたる分野で顕著な変化がもたらされると予想される。具体的には、交通渋滞に関しては、V2V (車両間通信) や V2I (車両とインフラの通信) を利用した動的流量制御により、道路容量 (例：取り扱い車両数) が増加し (Noori and Valkama, 2013; Darbh ら, 2017; 2018)、AV 専用道路の整備により移動時間が短縮されることが期待される。また、都市設計においては、専用駐車施設からの自動呼び出し・返却やシェアリングサービスの普及により、必要な駐車スペースの数が減少することが期待される (Nourinejad ら, 2018; Okeke, 2020; Xia ら, 2021)。移動パターンに関しては、運転作業の排除が高齢者や障害者、その他の脆弱なグループに独立した移動手段を提供し、彼らがより自由に移動できるようになることが期待される (Harper ら, 2016)。

本章では道路安全に焦点を当てる。道路安全に関して、AV は、自動ブレーキや V2X (歩行者、インフラ、及び車両との通信) などのセンサーベースの安全技術を用いることで安全性を担保しようとしている。このような技術革新に安全性の向上は、歩行者と車両が共存する空間 (shared space) を実現する上で非常に効果的といえる。Hans Monderman が提唱するように、信号や標識が大幅に削減された歩行者と車両の共存空間では、歩行者、運転者、およびその他の道路利用者間のコミュニケーションを促進するために最小限の交通規則が必要である (Monderman, 2008)。すなわち、AV と歩行者が互いに考慮しあう行動が期待されるため、ストリートの設計においては、歩行者が AV にどのように反応するかを分析することが重要である。

そこで研究は、上記の共存空間実現に向けた一助として、信号のない横断歩道での歩行者の AV に対する反応を行動面から分析する。特に、行動面からの分析として、歩行者モデルは効果的なツールである。例えば、歩行者間の複雑な相互作用や歩行者と車両の相互作用を記述する歩行者モデルは、歩行者の速度と密度に基づいて、その空間の安全性と便利さを評価することができる。

本研究では、歩行者、AV、その他の車両 (例：バイク、自転車、自動車) 間の相互作用を記述するための歩行者モデルを提案する。このモデルは、歩行者の AV および他の車両への反応のメカニズムを分析するために使用される。広島大学の東広島キャンパスで信号のない横断歩道で歩行者と車両の軌跡を測定し、そのデータを基に Robin ら (2009) が提案した離

散選択歩行者モデルを、歩行者と車両の相互作用を記述するモデルへと拡張し、提案モデルのパラメータを推定する。本モデルは効用最大化理論に基づいており、unconstrained な行動要因：(1) 進行方向を保つ、(2) 目的地に向かう、(3) 速度の加減速、および、constrained な行動要因：(4) リーダー・フォロワー、(5) 歩行者との衝突回避、(6) 車両（AV、従来の車両、自転車）との衝突回避といった変数で規定される効用関数に従い速度と角度を選択すると考える。特に車両との衝突回避に関して、歩行者と車両の現在の速度と角度を使用して、2 つの衝突パターンについて検討する：(1) 現在の潜在的な衝突である車両回避、(2) 将来の衝突（すなわち将来の位置の予測）である主観的予測位置。AV と従来の車両との衝突回避に関連するパラメータの差異に関する考察を通じて、AV およびその他の車両（車、自転車）に対する歩行者の反応の違いを分析する。

2.2 既存研究整理と本研究の位置づけ

2.2.1 歩行者の自動運転車に対する反応を分析する研究

AV に対する歩行者の反応を分析する既存の研究は多数存在し、これらは心理学および行動学的視点を用いて行われている。これらの研究は主に二つの方法で実施される：(1) シナリオベースの研究、(2) 実証的研究。

シナリオベースの研究については、主に SP 調査(Deb ら, 2017; Hulse ら, 2018; Hafeez ら, 2022) や VR (Deb ら, 2018; Velasco ら, 2019; Jayaraman ら, 2019; Camara ら, 2021), またはエージェントベースのシミュレーション (Gupha ら, 2019; Predhumeau ら, 2022; Trumpp ら, 2022; Rashid ら, 2024) を使用した研究が多い。SP 調査を使用した既存の研究は、自動運転車 (AV) に対する歩行者のリスク認識に焦点を当てている。Deb ら (2017) や Hulse ら (2018) によると、歩行者は AV を安全だと認識しがちであるが、AV に対する反応に異質性があることを指摘している。具体的には、保守的（他の道路利用者と協調する）な反応と攻撃的（即ち、注意を払わずに道を渡る）な反応が存在すること、また、女性は男性に比べて高いリスクを認識することなどが指摘されている。VR を使用した研究では AV 前での歩行者の横断行動に焦点を当てている。Velasco ら (2019) によると、歩行者は横断時に車種よりも大きな時間差とゼブラゾーンの存在を好むと述べている。同様に、Jayaraman ら (2019) は、交通信号の存在が AV への信頼に影響を与えると示している。Deb ら (2018) も、eHMI（車両と歩行者間の通信ツール）の使用が横断時の AV に対する歩行者の受容性を向上させることを示している。まとめると、SP 調査では歩行者は AV を安全だと考え、VR 実験では横断時の AV のインフラとサインによって外的に歩行者の AV への信頼に影響を受けること

が示唆されている。

シミュレーションを用いた既往研究では、AV に対する行動的観点に焦点を当てたものが多い。Rashid ら (2024) は、異なる歩行者タイプ (例: リスクを取る, 慎重, 気が散る) と異なる車両センサータイプ (例: 歩行者検出の誤差率が異なる) などの異なるパラメータに基づいて、AV との歩行者の相互作用のシミュレーションを行っている。このシミュレーションは、道路横断シナリオ中に歩行者が受け入れる最小距離を分析している。Predhumeau ら (2022) も、知覚サイズや速度などの異なる要因を考慮して、共有空間での AV との歩行者の相互作用のシミュレーションを行っている。

一方、シナリオベースの研究に比べて実証研究は少ない。実証研究は、外部のビデオカメラまたは AV を使用して、AV に対する歩行者の反応の分析に焦点を当てている。Madigan ら (2019) はフランスとギリシャで AV デモンストレーションを行い、AV に対する歩行者の行動についての要因を分析し、適切なインフラ (例: 道路幅, 交通信号) の導入が AV の安全な導入を支援することを指摘している (即ち、一部のインフラは危険な行動の発生を引き起こす)。Rothenbucher ら (2016) はカリフォルニアで AV の走行実験 (座席のコスチュームで運転手なしの状況を作り出す実験) を行い、運転手なしの影響を歩行者の行動に対して分析した。この研究は、期待に矛盾がない限り、歩行者は AV とスムーズに相互作用すると結論付けた。しかし、我々の知る限り、実際の空間で歩行者モデルを使用して歩行者と AV の相互作用を分析する研究はほとんどない。

上述のように、多くの研究が仮想シナリオにおける AV に対する歩行者の反応を分析しているが、実環境に似た仮想シナリオを作成することは困難であり、これが実際の反応との乖離を引き起こす原因となる。したがって、AV アルゴリズムや街路設計の改善に役立つ知見を提供するためには、実際の AV に対する歩行者の行動を観察し、分析することが必要である。

2.2.2 歩行者モデルによる歩行者と車両の相互作用

Feng ら (2021) は、図 2.1 に示されるように、活動選択、目的地選択、経路選択、歩行者の速度や角度の選択など、歩行者の行動レベルを戦略的、戦術的、作業的レベルに分類した。特に、作業レベルの行動は、歩行者間の相互作用、歩行者と車両の相互作用、及び物体との相互作用に焦点を当てている。この研究は、作業レベルでの歩行者モデルに関する既存研究を例示している。

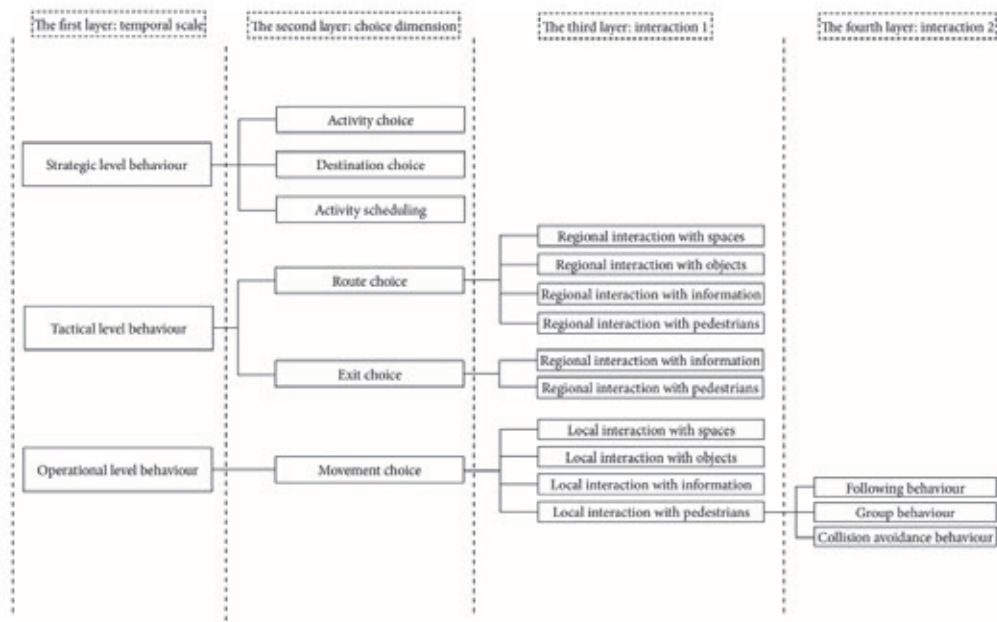


図 2.1 歩行者の意思決定レベルの分類

Operational level の歩行者モデルには、運動方程式の枠組み内で歩行者を斥力と誘発力を用いて記述する social force model (Helbing and Molnár, 1995), cellular automata model (Blue and Adler, 2001), および効用最大化理論に基づいて速度と角度の順次選択を記述する離散選択歩行者モデル (Robin, 2009) が含まれる。これらの歩行者モデルを使用して、信号の有無にかかわらず歩行者車両共存空間や歩行者横断道での歩行者-車両相互作用（例：衝突回避）の解析がなされてきた。

歩行者-車両共存空間のために提案されたモデルには、複雑な問題を伴う状況での歩行者-車両相互作用を想定したものがある (Anvari, 2015; Dias, 2018ab; Yang, 2020)。例えば, Dias (2018a) および Dias (2018b) は, social force model を使用して, 歩行者, パーソナルモビリティ, 自転車の相互作用を記述している。これらのモデルは, 歩行者-車両共存空間を対象としており, しばしば制御された実験空間やシミュレーション内の仮想空間での行動を記述して安全性を確保していることに注意が必要である。一方, 横断歩道に関しては, 特定の方向で移動する歩行者と車両との相互作用を記述するモデル (Li, 2012; Zeng, 2017; Chen, 2018) が提案されている。Zeng et al. (2017) は, 信号サイクルの制約を加えながら, 右折する車両との歩行者の相互作用をソーシャルフォースモデルで記述している。しかしながら, AV を使用した相互作用を記述するモデルは少ない。前述のように, Rashid (2024) は, 様々な種類のセンサーを想定して AV と歩行者の相互作用を記述し, Predhumeau (2022) は, 歩行者が従来の車両と同様に反応すると仮定し, social force model に基づいて歩行者との相互作用を記述しているが, これらの研究は実際の AV の軌跡データを使用して

いない。

本研究は、信号のない横断歩道での歩行者と車両（自動運転車、従来の車両、自転車、バイク）の相互作用に焦点を当てている。実際の状況において離散選択歩行者モデルを使用して歩行者と車両の相互作用を記述する点に特徴がある。

2.3 データ

2.3.1 歩行者と車両の行動に関する測定

2021 年 3 月から 2022 年 5 月までの約 1 年間、広島大学で AV の実証実験が行われた。これらの AV は「HIROMOBI」と名付けられ、東広島キャンパス内の道路空間（約 3.5km）を運行している。HIROMOBI はほぼレベル 3 の自動運転（予期しない状況が発生した場合、機械の代わりにドライバーが制御する）である。この機会を利用して、私たちは広島大学の理学部 2 階（地上から約 5.2m の高さ）にビデオカメラを設置し、AV、歩行者、その他の車両の行動を観察した。交差点エリアは、車両と歩行者が衝突する可能性がある測定エリアとして選ばれており、図 2.2 で示されている。



図 2.2 測定エリア

2.3.2 データ処理

この測定の後、図 2.3 に示されるいくつかのプロセスを使用して軌跡データを作成した。

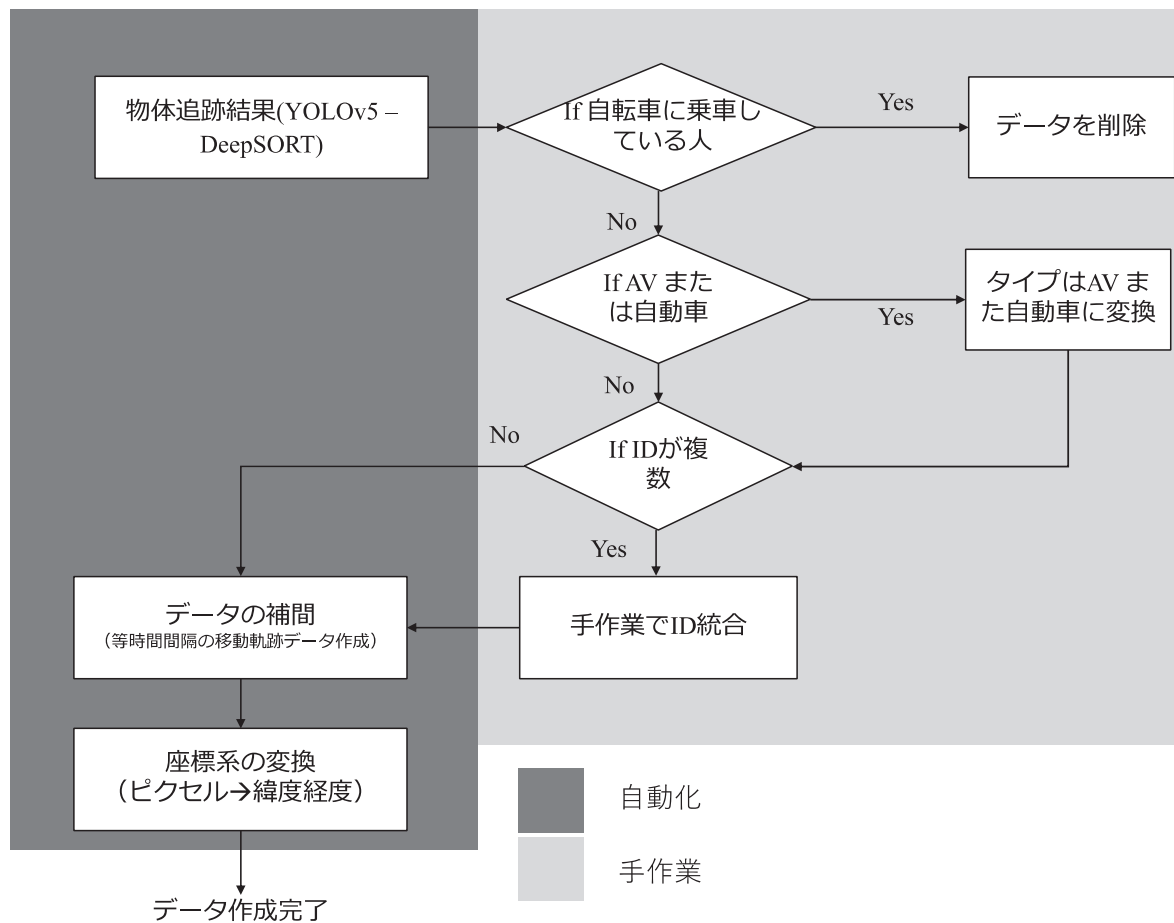


図 2.3 データ処理のフローチャート

PyTorch deep learning ライブラリのトラッカーを使用し、COCO データセット（歩行者，自転車，バイク，自動車，トラック，バスが抽出される）を使用する．オブジェクト検出の出力は (1) ビデオデータと (2) テキストデータである．ビデオデータには物体の ID，ラベル，信頼スコア（0 から 1 の範囲）が含まれている（図 2.4 を参照）．信頼スコアは 1 に近いほど検出が良好であることを示す．テキストファイルにはフレーム，物体の ID，トラベル，バウンディングボックスの中心のピクセル座標，バウンディングボックスのサイズ（高さ と 幅）が含まれる．さらに，物体のピクセル座標はバウンディングボックスの底中心として計算される．しかし，このテキストデータには二つの問題がある：(1) 重複した物体ラベル，(2) 物体の複数 ID．これらの問題を解決するために，次の手動処理を実施した．

第一に，バイクと自転車，および AV と自動車に対する重複したオブジェクトラベルの問題に対処する．バイクと自転車については，YOLOv5 は車両と乗車している人を別々の物体として検出する．バイクと自転車に関するデータを保持し，乗車している人のデータは削除した．第二に，AV について，COCO データセットには HIROMOBI の画像がなく，同じ AV

が「トラック」、「自動車」、「バス」といった複数のオブジェクトラベルに分類される（図 2.4 を参照）。同様に、自動車についても、同じ自動車が「トラック」、「自動車」、「バス」といった複数のオブジェクトラベルに分類される。この問題はトラックと自動車のバウンディングボックスの重複が大きいにもかかわらず発生する。このような場合、検出された物体は正しいカテゴリー（「AV」と「自動車」）に再分類される。さらに、物体の複数 ID については、これらの ID を手動で単一の ID に統合する。

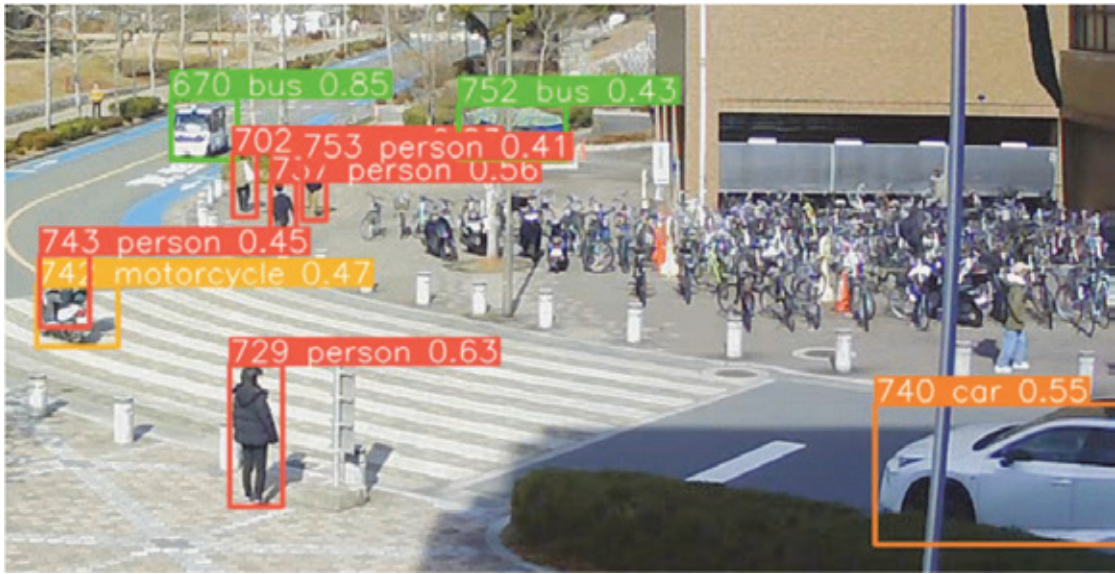


図 2.4 YOLOv5 処理後に抽出されたフレーム

また、遠くの物体や木や他の歩行者などの障害物によって隠された物体を検出するのは困難である。私たちは、0.5 秒の同じ時間間隔でデータ補間を行い、軌跡データを作成する。まず、研究の目的から、AV と歩行者の衝突可能性のある黄色の点線で囲まれた部分（青い部分は除く）に分析対象を限定した（図 2.5 参照）。また、ピクセル座標を緯度経度に変換するために、図内の白線交点各々に対して、経度緯度を取得し、ピクセル座標から緯度経度への変換を線形補間を用いて実施した（図 2.6 参照）。対応する式は以下の通りである：

$$z_i = \frac{y_2 - y_i}{y_2 - y_1} \left(z_{11} \frac{x_2 - x_i}{x_2 - x_1} + z_{21} \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} \right) + \frac{y_i - y_1}{y_2 - y_1} \left(z_{12} \frac{x_2 - x_i}{x_2 - x_1} + z_{22} \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 x_i と y_i は対象地点 i のピクセル座標を表す。 $x = (x_1, x_2)$ および $y = (y_1, y_2)$ は、対象地点を持つ各ボックスのピクセル座標を表す。 $z = (z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22})$ はボックスの角に応じた地理座標を表す。ピクセル座標から地理座標への変換が完了した後、軌跡データが完成する。

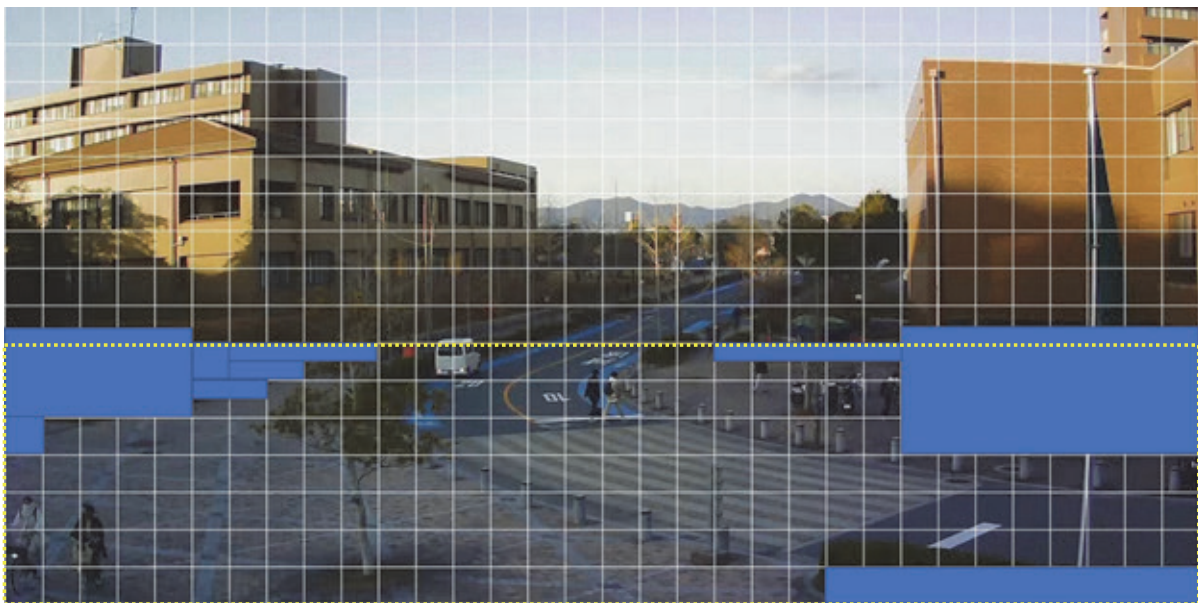


図 2.5 線形補間用ボックス

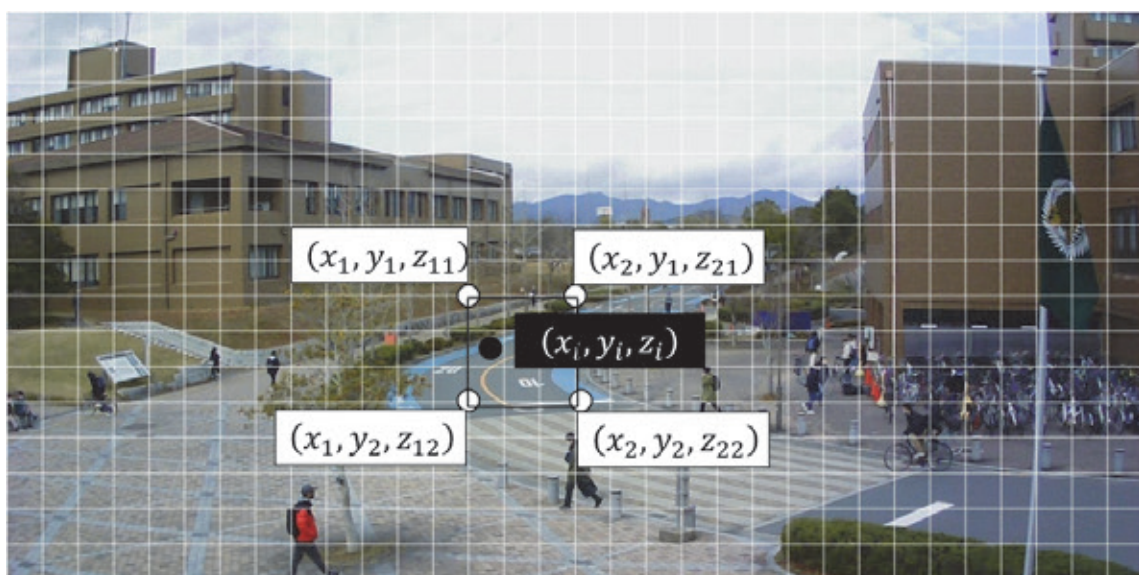


図 2.6 線形補間の説明

2.4 モデリングフレームワーク

2.4.1 行動の仮定

本研究は、歩行者と車両（自動運転車、自動車、バイク、自転車）との相互作用に関する要因を含むように、離散選択歩行者モデル（Antonini et al., 2006; Robin et al., 2009）を拡張する．モデルは時間ステップ Δt 間の歩行者の連続的な行動を仮定する．具体的には、現在の時間 t_k における意思決定者 n は、次の時間 $t_{k+1}(= t_k + \Delta t)$ での離散化された空間（選択セット）から次の点を選択する．選択セットは 33 であり、これは歩行者の現在の速度 v_n と角度 θ_{d_n} に基づいて視覚角と到達可能な最大距離($1.75 v_n \Delta t$)を考慮している(図 2.7 参照)．ここで、 θ_{d_n} は意思決定者のベクトル d_n と($|d_n| = 1$)と北ベクトルとの間の角度である．本研究は、歩行者の視覚角度を 170° と仮定する．視覚角度に基づいて、中心に 10° の角度を持つ 11 のコーンに分けられ (図 2.8a 参照)，それぞれの側に $10^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ のコーンが続く．次に、本研究は三つの速度を考慮する (図 2.8b 参照)，(1) decelerate regime ($0.25 v_n \Delta t$ から $0.75 v_n \Delta t$ まで)，(2) constant speed regime ($0.75 v_n \Delta t$ から $1.25 v_n \Delta t$ まで)，(3) accelerate regime ($1.25 v_n \Delta t$ から $1.75 v_n \Delta t$ まで)．Stop regime (0 から $0.25 v_n \Delta t$ まで) は速度及び方向の複雑な区分のため考慮しないことに注意する．

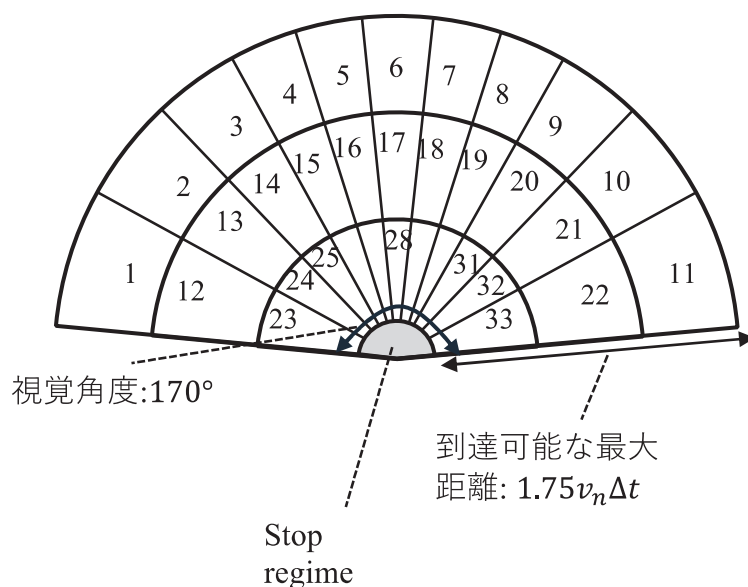


図 2.7 選択肢セットの概観

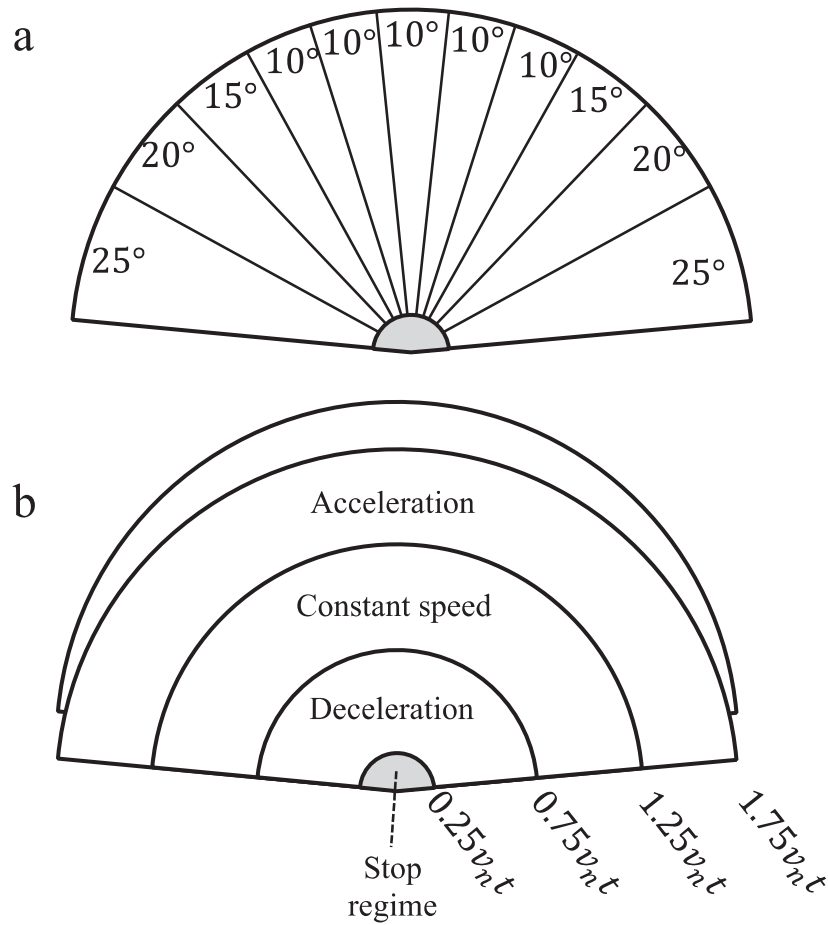


図 2.8 空間の離散化 a: 方向 ; b: 速度

2.4.2 効用関数

意思決定者 n は、効用関数 V_{ijn} を最大化する選択肢 ij (i は角度, j は速度)を選ぶ。効用関数 V_{ijn} には主に二つの行動要因がある：(1) *unconstrained* な要因, (2) *constrained* な要因 (図 2.9 参照)。前者は他の歩行者の存在に依存しない行動要因であり、主観的または未観測の要因によって生成される：(a) 現在の方向を保つ傾向を表す「進行方向を保つ」、(b) 個人の目的地を表す「目的地に向かう」、(c) 個人の希望速度に対する制約のない加速および減速を表す「速度の加減速」。後者は近くの他の個体および車両との相互作用によって引き起こされる要因である。Robin et al. (2009) の既存の研究では、次の二つの要因を考慮している：(d) リーダーフォロワー: これは群衆の中で他の個人を追従する人々の傾向を捉えるものである。(e) 歩行者との衝突回避: これは意思決定者の現在の軌跡に対する他の歩行者との可能な衝突の影響を設計するものである。本研究ではさらに、(f) 車両との衝突回避を追加する。これは、意思決定者の現在の軌跡に対する車両との可能な衝突の影響を設計するものである。

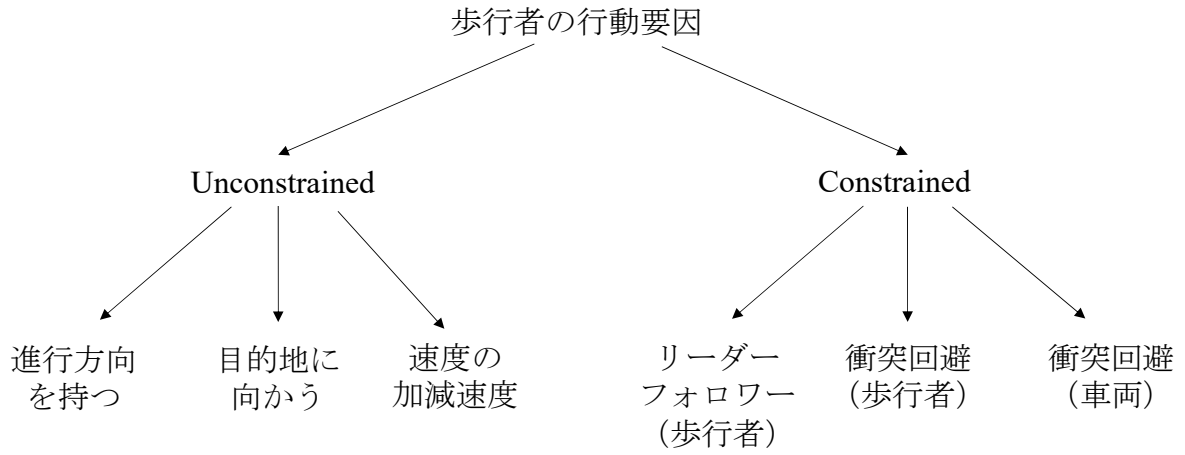


図 2.9 歩行者の歩行における行動要因

効用関数 V_{ijn} は次の式 (2.2) に従う :

$$\begin{aligned}
 V_{ijn} = & \beta^{cent} \exp(\rho^{cent} \theta_{d_{ij} d_n}) I_{ij}^{cent} + \beta^{ncent} \exp(\rho^{ncent} \theta_{d_{ij} d_n}) I_{ij}^{ncent} \\
 & + \beta^{ddist} |d_{ijdest}| \\
 & + \beta^{dec} I_{ij}^{dec} (v_n / v_{max})^{\lambda_{dec}} + \beta^{acc} I_{ij}^{acc} (v_n / v_{max})^{\lambda_{acc}} \\
 & + I_i^L \alpha^L (1 / (D_L + 1)) \\
 & + I_i^{CP} \alpha_{CP} (1 / (D_{CP} + 1)) \\
 & + \sum_{q \in \{\text{cars, AVs, bicycles, motorcycles}\}} I_{ij,q}^D \beta_q^{VA} \left(1 / (D_{ij,q}^{VA} + 1) \right) \\
 & \text{あるいは} \\
 & + \sum_{q \in \{\text{cars, AVs, bicycles, motorcycles}\}} I_{ij,q}^D \beta_q^{SPL} \left(1 / (D_{ij,q}^{SPL} + 1) \right)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

(a) 進行方向を保つ

「進行方向を保つ」は、歩行者が角度の変位を最小限に抑えることにより現在の方向を保持する傾向を示す。方向は二つのグループに分類される：(1) 中心グループは 10° の角度のコーンを表し、(2) 非中心グループは 15° , 20° , および 25° の角度のコーンを表す。歩行者は現在の方向を維持するため、中心グループを選択する傾向にあることが知られている。具体的には、効用関数の部分が該当する。

$$\beta^{cent} \exp(\rho^{cent} \theta_{d_{ij}d_n}) I_{ij}^{cent} + \beta^{ncent} \exp(\rho^{ncent} \theta_{d_{ij}d_n}) I_{ij}^{ncent} \quad (2.3)$$

ここで、ダミー変数 I_{ij}^{cent} は、 ij が中心グループにある場合は 1、それ以外の場合は 0 となる。また、ダミー変数 I_{ij}^{ncent} は、 ij が非中心グループにある場合は 1、それ以外の場合は 0 となる。 β^{cent} , ρ_i^{cent} および β^{ncent} , ρ_i^{ncent} は中心グループと非中心グループに関する未知のパラメータである。 $\theta_{d_{ij}d_n}$ は、選択肢 ij の中心点と意思決定者を結ぶベクトル d_{ij} とベクトル d_n との間の角度であり、図 2.10 に示されている。 d_{ij} は j に関わらず同じ方向を持つ。歩行者は中心を選択する傾向がある（すなわち現在の方向を保持する）ことから、 β^{cent} と ρ^{ncent} は正であると期待され、 β^{ncent} と ρ^{cent} は負であると期待される。

(b) 目的地に向かう

「目的地に向かう」は、歩行者が目的地までの距離を最小限に抑える傾向を示す。効用関数のうち以下の項が該当する。

$$\beta^{ddist} |d_{ijdest}| \quad (2.4)$$

ここで、 $|d_{ijdest}|$ は選択肢 ij の中心点と目的地 ($dest$) との間の距離を表し、選択肢 ij の中心点と目的地 ($dest$) を結ぶベクトルの長さとして図 2.10 で示される。未知のパラメータ β^{ddist} は、意思決定者の目的地に向かう歩行行動の傾向を表す。歩行者は目的地に直接向かう選択肢を選ぶ傾向にあるため、 β^{ddist} の符号は負であると予想される。

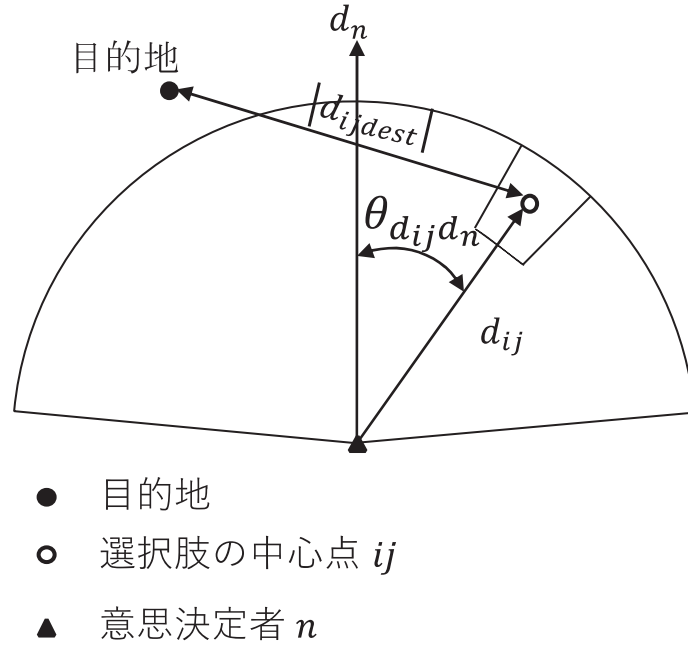


図 2.10 進行方向を保つ，目的地に向かうための用語の説明

(c) 速度の加減速

「速度の加減速」は，歩行者が希望する速度で歩く傾向を示す．自由流れの効用は現在の速度に比例すると仮定される．効用関数のうち以下の項が該当する．

$$\beta^{dec} I_{ij}^{dec} (v_n/v_{max})^{\lambda_{dec}} + \beta^{acc} I_{ij}^{acc} (v_n/v_{max})^{\lambda_{acc}} \quad (2.5)$$

ここで，用語の最初の部分は減速に，二番目の部分は加速に対応する．ダミー変数 $I_{ij}^{dec}(I_{ij}^{acc})$ は， ij が加速（減速）体制にある場合は 1，それ以外の場合は 0 となる．未知のパラメータ β^{dec} と β^{acc} はそれぞれ自由流れの減速と加速に対応する． v_{max} はデータ内の最大速度である． λ_{dec} と λ_{acc} は非線形を考慮した弾性である．現在の速度が最大速度に近づくにつれて，減速（または加速）の効用は増加（または減少）すると予想される． β^{dec} （または β^{acc} ）の符号は正（または負）であると期待される．

(d) リーダーフォロワー

「リーダーフォロワー」は，混雑したエリアを通るための道を作ってくれるリーダーを持つことに対する歩行者の傾向を表す．具体的には，各コーンで潜在的なリーダーを探索し，次のステップを用いてその中で最も近い人をリーダーとして選ぶ．以下のステップでは， j に

関わらず同じ潜在的なリーダーとリーダーが得られるため、コーン*i*に焦点を当てる．まず，図 2.11 に示されるように，半径 (D_{th}) が最大半径 ($D_{max} = 1.75v_n\Delta t$) の 5 倍である拡張扇形を設定する．拡張扇形の各コーン内で，潜在的なリーダーのセットを特定する．潜在的なリーダーの選択は，以下の基準に基づいて行われると仮定する：

$$I_i^\mu = \begin{cases} 1 & \text{if } d_{n\mu} = s_1 d_i^l + s_2 d_i^r \\ & \text{and } s_1, s_2 \geq 0 \\ & \text{and } 0 < |d_{n\mu}| \leq D_{th} \\ & \text{and } 0 < |\theta_\mu| \leq 10^\circ \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.6)$$

ここで， d_i^l と d_i^r はコーン(*i*)の左右のベクトルを表し， $d_{n\mu}$ は歩行者 μ と意思決定者 n を結ぶベクトルである． θ_μ は，コーン*i*の中心の方向を表すベクトル d_i と歩行者 μ のベクトル d_μ との間の角度である．もし I_i^μ が 1 であれば，歩行者 μ は潜在的リーダーの一人となる．

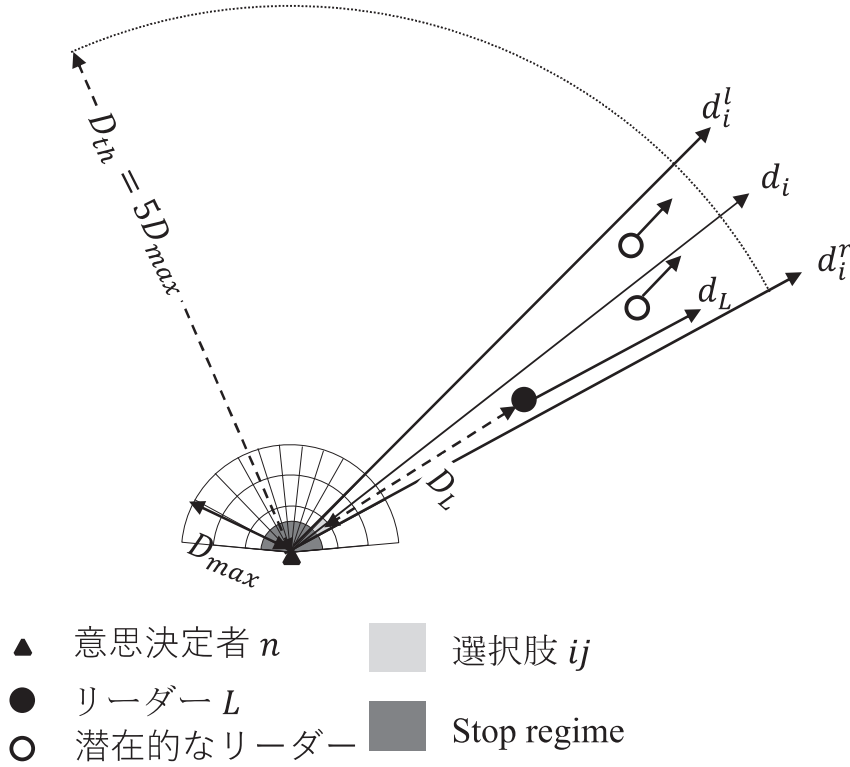


図 2.11 リーダーフォロワー

潜在的リーダー選定のプロセスの後，最も近い人をリーダー*l*として選ぶ．リーダー*l*に関する「リーダーフォロワー」は以下の効用関数が該当する．

$$I_i^l \alpha^L (1/(D_L + 1)) \quad (2.7)$$

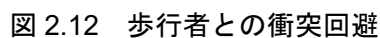
ここで、ダミー変数 I_i^L は、リーダーがコーン i 内にいる場合は 1、それ以外の場合は 0 となる。 D_L は選択肢 ij とリーダーとの間の距離である。 α^L は未知のパラメータである。歩行者はリーダーの行動を追従する傾向があるため、 α^L とは正であると期待される。

(e) 歩行者との衝突回避

歩行者との衝突回避は、意思決定者の進路上にいる他の歩行者の道を避ける傾向を表す。リーダーフォロワーのプロセスと同様に、各コーンで潜在的なコライダーを探索し、次のステップを用いてその中で最も近い人を衝突対象として選ぶ。以下のステップでは、 j に関わらず同じ潜在的コライダーとコライダーが得られるため、コーン i に焦点を当てる。まず、図 2.12 に示されるように、半径 ($D_{max} = 1.75v_n\Delta t$) の 10 倍である拡張扇形を設定する。拡張扇形の各コーン内で、潜在的なコライダーのセットを特定する。潜在的なコライダーの選択は、以下の基準に基づいて行われる：

$$I_c^\mu = \begin{cases} 1 & \text{if } d_{n\mu} = s_1 d_i^l + s_2 d_i^r \\ & \text{and } s_1, s_2 \geq 0 \\ & \text{and } 0 < |d_{n\mu}| \leq D_{th} \\ & \text{and } \pi/2 < |\theta_\mu| \leq \pi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.8)$$

ここで、 d_i^l と d_i^r はコーン i の左右のベクトルを表し、 d_μ は歩行者 μ の位置を示す方向を指す。 $d_{n\mu}$ は歩行者 μ と意思決定者 n を結ぶベクトルであり、 θ_μ は歩行者のベクトル d_μ とベクトル d_n との間の角度である。もし I_c^μ が 1 であれば、歩行者 μ は潜在的なコライダーの一人となる。


$$I_i^{CP} \alpha_{CP} (1/(D_{CP} + 1)) \quad (2.9)$$

(f) 車両との衝突回避

– 18 –

Vehicle Avoidance

「Vehicle Avoidance」は、意思決定者が車両の現在位置を考慮し、車両との潜在的な衝突がある選択肢を避ける傾向を表す。まず、意思決定者 n が車両 q と潜在的な衝突があるかどうかを次の基準に基づいて確認すると考える。

$$I_{ij,q}^D = \begin{cases} 1 & \text{if } d_n \cdot d_q \leq 0 \\ & \text{and } d_{nq} \cdot d_n \geq 0 \\ & \text{and } \delta_1 \geq 0, \delta_2 \geq 0 \\ & \text{where } d_n = \delta_1 d_{ij} + \delta_2 d_{nq} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (2.10)$$

ここで、意思決定者の現在の方向を表すベクトル d_n 、車両の現在の方向を表すベクトル d_q 、意思決定者と車両を結ぶベクトル d_{nq} 、そして選択肢の方向を表すベクトル d_{ij} 、があり、図 2.13 に示されている。 I_d^C は、すべてのベクトルがこの基準を満たす場合は 1、それ以外の場合は 0 となる。 vehicle Avoidance を表現する効用関数を次のように定義する。

$$\sum_{q \in \{\text{cars, AVs, bicycles, motorcycles}\}} I_{ij,q}^D \beta_q^{VA} \left(1 / (D_{ij,q}^{VA} + 1) \right) \quad (2.11)$$

ここで、 $D_{ij,q}^{VA}$ は選択肢の中心から車両 q までの現在の距離を示す。 自転車以外の車両までの距離は 10 メートル未満とされ、自転車の場合は 5 メートルと考えられる。 意思決定者が潜在的な衝突がある選択肢を避けるため、未知のパラメータ β_q は負であると予想される。

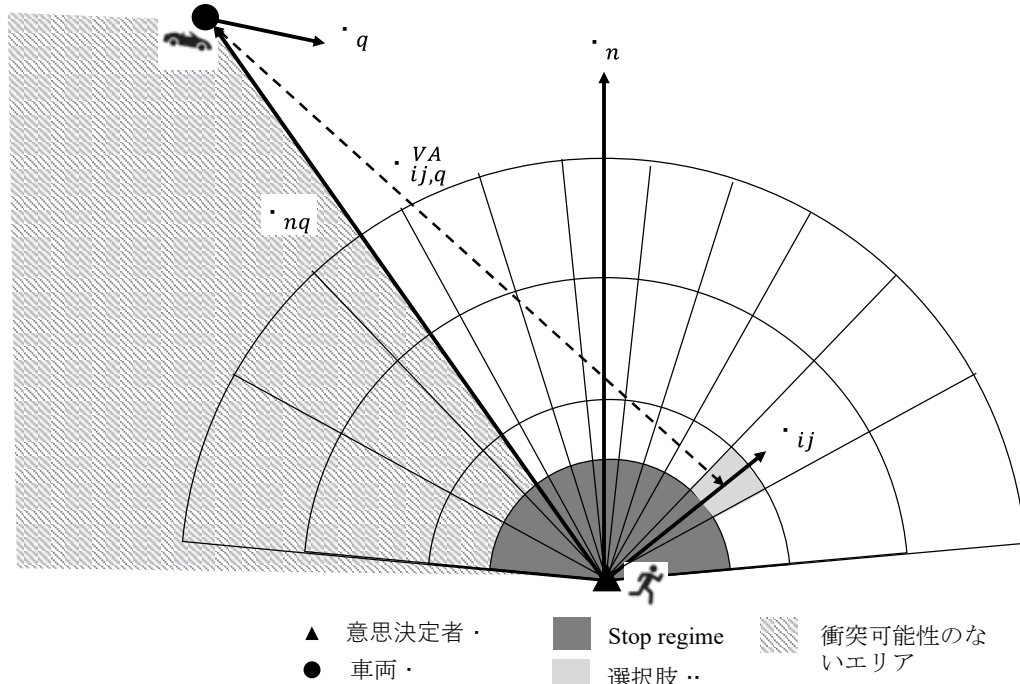


図 2.13 車両との衝突回避

Subjective Predicted Location (SPL)

Subjective Predicted Location (SPL) は、意思決定者が 0.5 秒ごとに車両の位置を予測し、車両の予測到達地点における車両との衝突を回避しようとする行動を表す。Vehicle Avoidance と同様に、式(2.10)を用いて潜在的な衝突を特定する。

もし $I_{ij,q}^D$ が 1 と定義されている場合、 d_q と d_{ij} を用いて交点（衝突エリア）を計算する。エリアが遠い可能性があるため、エリアへの時間と距離を制限する必要がある。図 2.14 は SPL の概観を示している。車両と意思決定者の現在の速度 ($v_{nij\tau}, v_{q\tau}$) を用いて、意思決定者と車両が衝突エリアに到達する時間 ($T_{nij\tau}, T_{q\tau}$) を計算する。最小到着時間は $T_c = \min(T_{nij\tau}, T_{q\tau})$ と定義され、ここで τ はいずれかがエリアに到達するまでの時間を表す。時間は 0 から T_c まで 0.5 ずつ増加する。 T_c における車両と意思決定者の位置間の最小距離 D_{min} が計算される。これらの計算は各種車両に対して実行される。効用関数内では以下の項が該当する。

$$\sum_{q \in \{\text{cars, AVs, bicycles, motorcycles}\}} I_{ij,q}^D \beta_q^{SPL} \left(1 / (D_{ij,q}^{SPL} + 1) \right) \quad (2.12)$$

ここで、 $D_{ij,q}^{SPL}$ は将来における車両 q との最小未来距離(D_{min})を指す. 未知のパラメータ β_q^{SPL} は負であると期待される. これは、意思決定者は車両が選択肢に近づくると予測されるため、車両を避けることを意味する.

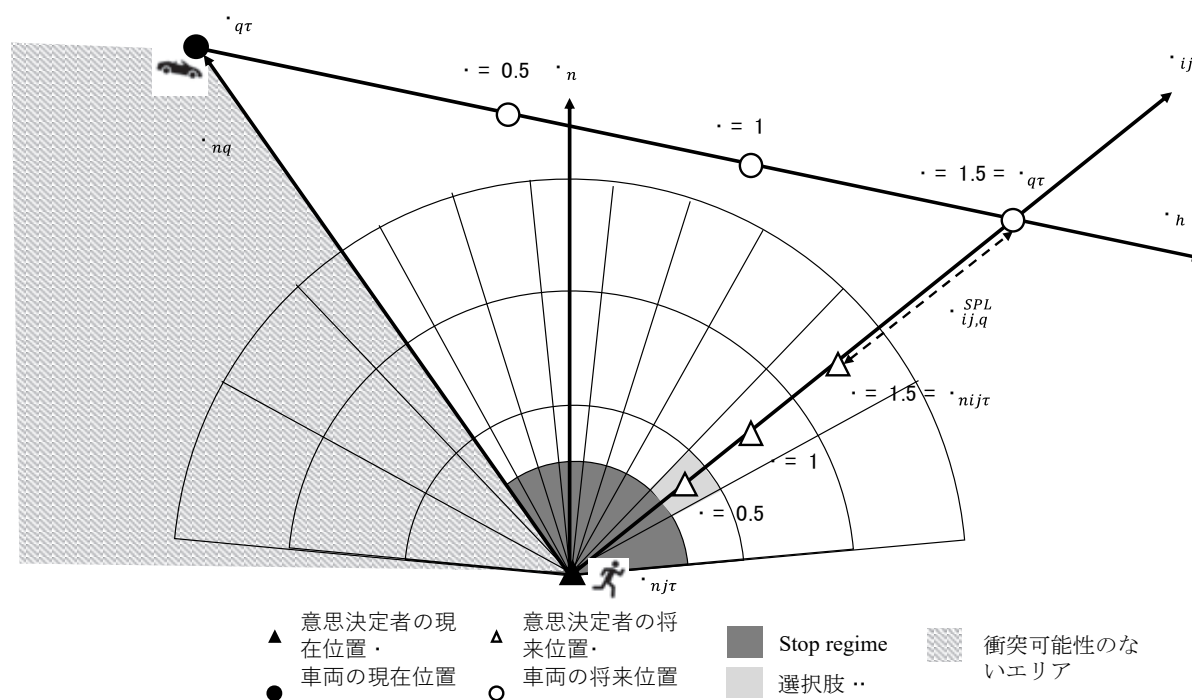


図 2.14 主観的な予測位置 (SPL)

2.4.3 モデル構造

本研究では、先に述べたように、方向と速度に関する 33 の選択肢が 5 つのネストに分けられている。速度方向に関連する 3 つのネストは、「Accelerate」(選択肢 1-11), 「Constant speed」(選択肢 12-22), そして「Decelerate」(選択肢 23-33) として図 2.4b に示されている。方向に関連する 2 つのネストは、「Center」で、これは角度 10° のコーンを表し、「Not Center」で、これは角度 15° , 20° , 25° のコーンを表しており、図 2.4a に示されている。すべての選択肢は、方向のネストと速度のネストの両方に重なりを持つように属性付けされている。

本研究では、選択肢が複数のネストに現れることを許容し、Nested Logit よりも柔軟な相関パターンを可能にする Cross Nested Logit (CNL) モデル (Ben-Akiva and Bierlaire, 1999; Wen and Koppelman, 2001; Papola, 2004) を使用して、相関構造を考慮している。CNL の生成関数は次の通りである:

$$G(v_1, \dots, v_{33}) = \sum_{m=1}^M \left(\sum_{a \in C_m} (\alpha_{a,m} v_a)^{\mu_m} \right)^{\frac{1}{\mu_m}} \quad (2.13)$$

ここで $m = 1, \dots, M$ はネストの数であり、選択肢 a がネスト m に属するかは割り当てパラメータ α_{am} によって定義される。 C_m はネスト m 内の選択肢の集合であり、 μ_m はネスト m のスケールパラメータである。Random Utility 理論と一致させるために、 $\alpha_{am} \geq 0 \forall a, m$ かつ $\sum_{m=1}^M \alpha_{am} = 1 \forall m$ となる。対応する選択確率は以下のように定義される。

$$P(a) = \sum_{m=1}^M \frac{(\alpha_{am} v_a)^{\mu_m} (\sum_{j \in C_m} (\alpha_{jm} v_j)^{\mu_m})^{\frac{1}{\mu_m} - 1}}{\sum_{n=1}^M (\sum_{j \in C_n} (\alpha_{jn} v_j)^{\mu_n})^{\frac{1}{\mu_n}}} \# \quad (2.14)$$

2.5 基礎集計

本研究では基礎集計として、横断歩道エリアでの歩行者の行動に焦点を当てる。2021 年 12 月 3 日と 14 日, 2022 年 5 月 25 日から 27 日の昼食時に取得された観測データを使用する。データには 360 の歩行者軌道が含まれ、合計 8,803 回の観測 (すべての歩行者の総時間ステップ) がある。ヒストグラムの速度は図 2.15 に示され、表 2.1 はデータの速度統計を示している。この平均歩行速度は、歩行者が車両との潜在的な衝突に直面した際に速度を落とす行動により、歩行速度 (Robin et. al., 2009) よりもわずかに遅いことがわかる。標準偏差は、走るなどの複数の行動が含まれているためやや大きい。なお、この研究では、歩行者の速度が 4 [m/s] を超え、扇形の外側および stop regime の内側にあるデータは除外した。

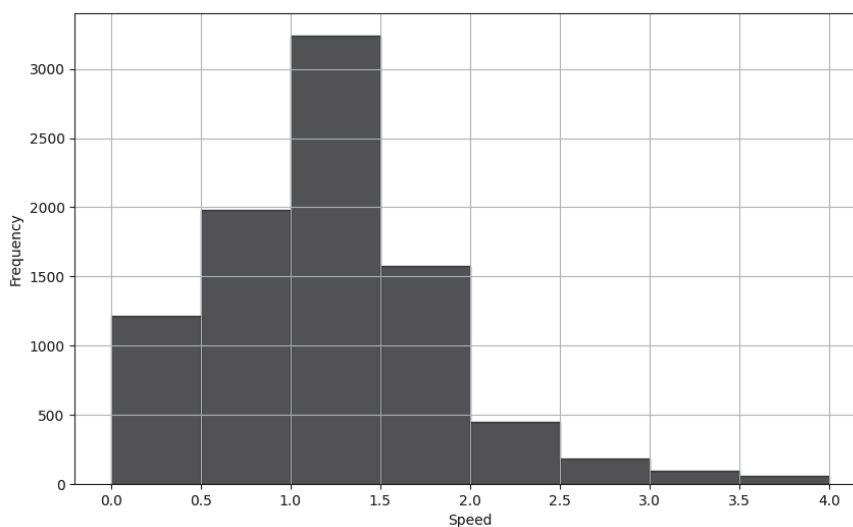


図 2.15 速度のヒストグラム

表 2.1 速度統計 (m/s)

平均	1.31
標準偏差	0.63
中央値	1.18
最小値	0.0031
最大値	4.00

図 2.16 は選択された選択肢の分布を示している．選択肢 16 から 18 の選択回数が高くなっていることが確認できる．これは，歩行者が一定の速度と方向を維持することを好むことを示しており（つまり，現在の速度と軌道を保持），このパターンは図 2.17a および 2.17b の円グラフにも明らかである．車両とのやり取りがあるにも関わらず，歩行者は速度を大幅に変更しない．この振る舞いの一つの可能な説明は横断エリアの性質であり，歩行者が優先権を持っていると感じ，車両が接近している場合においても変わらず直進できている可能性がある．

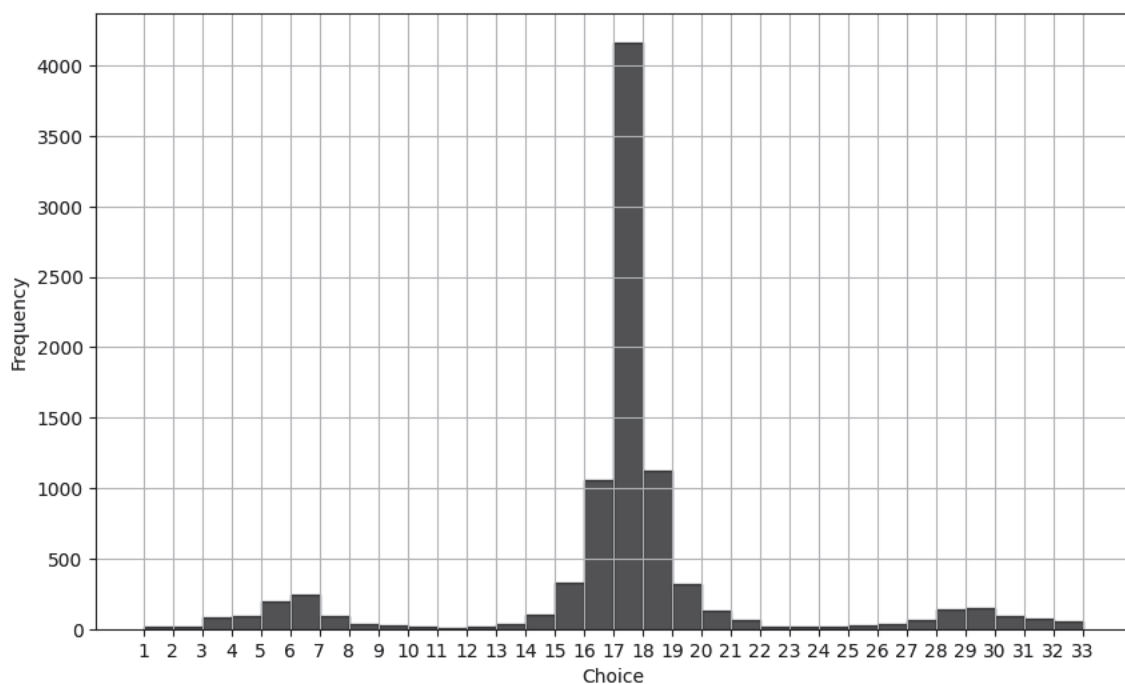
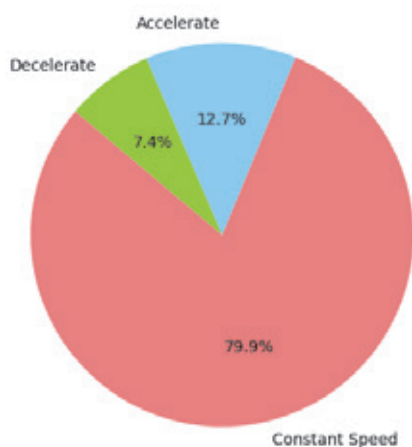
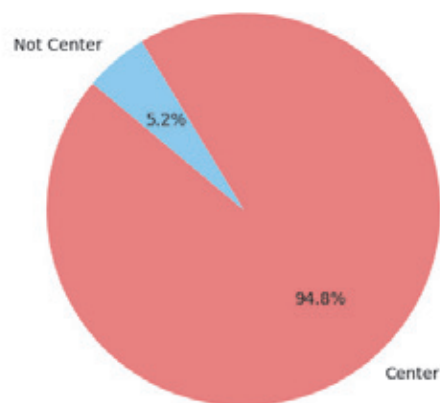


図 2.16 選択肢のヒストグラム



(a)



(b)

図 2.17 (a)速度 (b)方向の確率

表 2.2 は各車両カテゴリーに関する速度統計を示す．全車両の平均速度は，減速期間や停止時 (0 m/s) も考慮に入れるため，予想よりも低くなる．自動運転車は最も低い平均速度 0.95 m/s を示し，慎重な運用が反映されている．対照的に，バイクは 2.23 m/s と最高の平均速度を記録し，交通の中での迅速な移動が見られる．バイクの標準偏差は 1.45 m/s と広範囲にわたる変動が見られるが，自転車は 0.22 m/s と狭い範囲を示し，自転車ユーザーの間で一貫した巡航速度が保たれていることがわかる．加えて，自転車の速度の大きな範囲，最大で 6.45

m/s に達することは、下り坂が存在するエリアでのデータ収集により、時折他の車両の速度を超えることがある。

表 2.2 車両の速度統計 (m/s)

	自動運転車	自動車	自転車	バイク
平均	0.95	1.69	1.67	2.23
標準偏差	1.08	1.40	0.22	1.45
中央値	0.62	1.36	1.26	2.03
最小値	0.00	0.00	0.14	0.07
最大値	4.73	6.17	6.45	5.95

2.6 モデル推定結果

パラメータの推定時には、割り当てパラメータ α_{am} を 0.5 に設定し、各選択肢が速度のネストと方向のネストのいずれかに等しい確率で属することを意味する。5 つのネストパラメータ μ_m 、すなわち「Center」、「Not center」、「Acceleration」、「Constant speed」、「Deceleration」のうち「Not center」と「Acceleration」のネストに 1 を割り当てた。パラメータが 1 を超えたためである。さらに、この研究は衝突対象との距離 D_{CP} を 2m と設定した。SPL に関しては、 T_c を自転車については 3 秒未満、他の車両については 6 秒未満に設定し、 D_{min} を車、AV、バイクについては 20m 未満、自転車については 10m 未満に設定した。

表 2.3 に SPL と Vehicle Avoidance それぞれを採用した歩行者モデルの推定結果を示す。共通変数については、 β_{cent} と ρ_{ncent} は正の符号で β_{ncent} と ρ_{cent} は負の符号で統計的に有意であり、歩行者が現在の進行方向を維持する傾向があることを示している。対照的に、 β_{ddist} は負の符号で統計的に有意であり、歩行者が一般的に目的地へ直行する傾向があることを示す。これらの推定パラメータは期待通りである。

さらに、 β_{acc} は負の符号で統計的に有意であり、 λ_{acc} は 1 未満であることから、歩行者が最大速度に近づくにつれて、一定の速度を維持する傾向があるが、この行動は観測された最大速度によって異なる。逆に、 β_{dec} は正の符号で λ_{dec} が 1 を超えることから、歩行者は減速する傾向があり、 λ_{dec} は最大速度に対する非線形性を考慮した弾性を表すため、最大速度に比べてかなり低い速度を選択することを示す。他の歩行者との相互作用に関しては、 α^L と α_{cp} は正の符号を示す。これらのパラメータはリーダーやコライダーの存在が意思決定に肯定的な影響を与えることを示しており、歩行者は前にいる人を追従する傾向がある。予期せず、

意思決定者はコライダーを避けない。データに基づく、そのエリアは混雑しておらず、歩行者には十分な空間があり、他の歩行者に影響されずに自分の軌道を維持する可能性が高いことを示している。

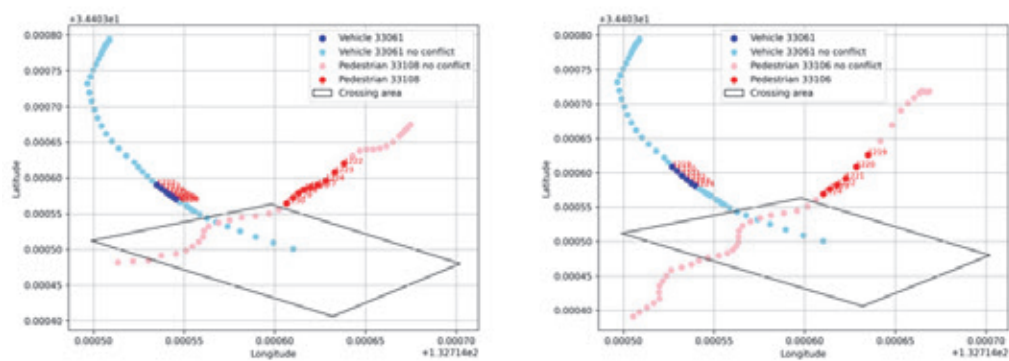
車両関連の変数では β_{AV} , β_{bic} , β_{mot} は SPL で負とされ、歩行者が現在の速度に基づいて車両の未来の位置を予測し、将来的な衝突の可能性を予測することを示している。一方、 β_{car} は SPL で正の係数を示し、自動車に対する異なる動態が示される。Vehicle Avoidance においては、 β_{car} と β_{bic} に負の係数が見られ、これは歩行者が現在の位置や移動方向にある車や AV の経路を積極的に避けることを示している。逆に、 β_{AV} と β_{mot} は Vehicle Avoidance で正の係数を示し、これは AV やバイクの現在の位置が歩行者の経路変更を直接的には促さないが、これらの車両の予測される未来の位置によって影響を受けることを意味している。推定結果は、自動車と AV との衝突を避けるための意思決定が異なることを示している。Vehicle Avoidance の軌道を参照すると (図 2.18 参照)、意思決定者 54 は自動車が通過した後に横断することを示し、意思決定者 825 はまだ距離があり、自動車 545 が衝突エリアに到達するまでに通過することを認識しているため、歩行を続けている。しかし、AV と対した際には、AV は停止し、彼らが先に道を渡ることを許可していることがかくにんできる。これにより、意思決定者 ID 33106 と 33108 は先に道を渡り、AV が視界から消えた後、数ステップ後には衝突可能なくなる (赤のポイントからピンクになる)。図 2.19 は SPL の同じ ID の軌道を示しているが、自動車との衝突は車両回避時よりもはるかに多い。しかし AV の場合は同じである。これは、AV が視界外にあること、また、SPL が車両と意思決定者の現在の速度に基づいて車両の位置を考慮しており、AV が車を停止させる行動で意思決定者が AV と衝突しない原因となっているためである。

β_{bic} に関しては、両モデルで負の係数が示されている。これは、SPL の設定された小さな時間間隔と距離が、自転車意思決定者に否定的な影響を与える原因となり、また自転車が特定のレーンを持たず、自由に移動できるため、歩行者にとって予測不可能であることから、衝突エリアの内外に関わらず自転車に注意する必要がある。 β_{mot} に関しては、SPL に関与する意思決定者が Vehicle Avoidance で 80%減少し、Vehicle Avoidance において各歩行者に対して一つの時間枠のみが関与するため、この結果に貢献していない可能性がある。分析に大きな影響を与えるポイントが少ないためである。

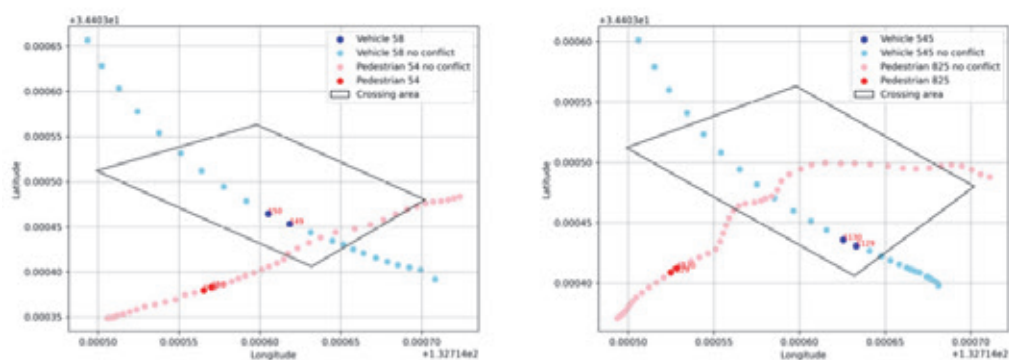
表 2.3 歩行者モデルの推定結果

	SPL		Vehicle Avoidance	
	Estimation	<i>t</i> value	Estimation	<i>t</i> value
β_{cent}	5.019 **	26.548	5.025 **	26.493
ρ_{cent}	-0.038 **	-20.839	-0.038 **	-20.748
β_{ncent}	-0.111 **	-2.803	-0.111 **	-2.805
ρ_{ncent}	0.045 **	9.057	0.045 **	9.057
β_{adist}	-8.380 **	-30.555	-8.387 **	-30.570
β_{dec}	9.962 **	16.850	9.947 **	16.818
β_{acc}	-10.938 **	-36.108	-10.950 **	-36.069
λ_{dec}	2.728 **	27.245	2.729 **	27.264
λ_{acc}	0.505 **	15.280	0.507 **	15.294
α^L	2.229 **	4.023	2.212 **	3.996
α_{cp}	0.986	0.724	0.987	0.725
β_{car}	0.687	0.992	-7.506	-1.595
β_{AV}	-1.017	-0.954	6.144	1.127
β_{bic}	-0.796	-0.576	-6.035	-1.043
β_{mot}	-0.692	-0.552	14.452 *	2.433
μ_{acc}	2.424 **	19.557	2.419 **	19.531
μ_{const}	1.467 **	35.243	1.465 **	35.224
μ_{ncet}	2.390 **	23.566	2.392 **	23.503
Sample size	8803		8803	
Initial likelihood	-30779.76		-30779.76	
Final likelihood	-17830.08		-17828.02	
Adjusted $\bar{\rho}^2$	0.4201		0.4202	

有意水準 *** 1%, ** 5%, + 10%

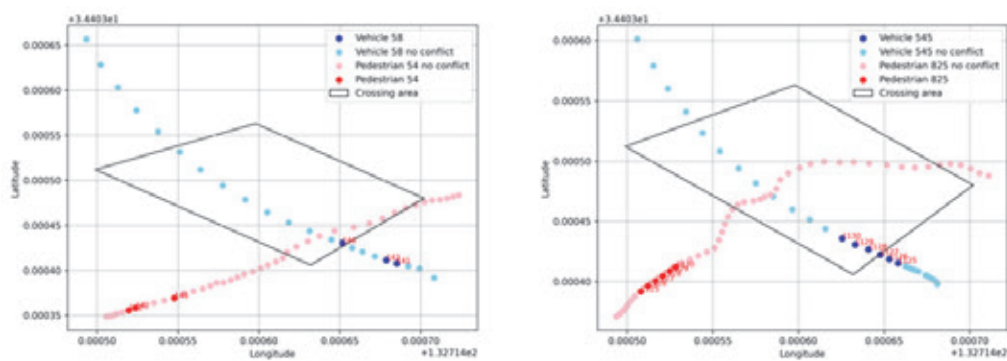


(a) 自動車

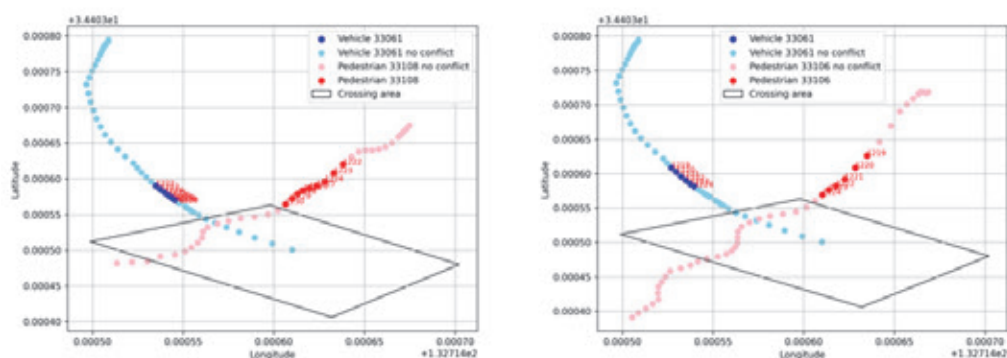


(b) AV

図 2.18 車両の衝突回避, (a)自動車と(b)AV の軌道



(a) 自動車



(b) AV

図 2.19 SPL, (a)自動車と(b) AV の軌道

2.7 まとめ

この研究は、複数モードが交錯する交通環境での歩行者行動をより深く理解することを目指し、歩行者行動モデルを開発した。Robin ら(2009)による離散選択モデルをもとに、AV、自動車、自転車、バイクを含むさまざまな車両との歩行者との相互作用を取り入れた。推定したモデルから、自動車や AV との相互作用が統計的に有意ではないものの、自動車を除くすべての車両に対して将来の衝突を予測する意思決定者の行動が見て取れた。得られた主要な知見は以下の通りである。横断歩道が歩行者優先区域に指定されているにもかかわらず、歩行者は自動車が優先して通過できるように振る舞う傾向がある。一方、AV は歩行者に優先して停止するよう設定されているため、AV との衝突を避ける必要はなく、結果的に意思決定者と AV との間で衝突が起こらない。また、自転車の軌跡を予測することが難しいため、歩行者は自転車との潜在的な衝突を招く可能性のある経路を選択することをためらう傾向が

ある。

歩行者は、異なる車両の振る舞いに対して繊細な理解と反応を示す。彼らはその即時の存在によって自動車に注意し、予測可能で安全に振る舞う AV を信頼することで回避行動の必要性を減らす。しかし、予測不可能な動きをする自転車は課題となり、自転車の軌道と交差する可能性のある経路を避けるよう歩行者を促す。モデルではバイクとの相互作用を正確に捉えることができない可能性があり、これはデータ不足が原因と考えられる。

現行モデルには限界がある。停止する意思決定者の相互作用を効果的に捉えることができない。また、横断歩道の外にある木などの障害物の存在が相互作用に頻繁に影響を与えるが、考慮されていない。将来の研究では、これらの課題を克服し、障害物をモデリングフレームワークに統合して、現実の歩行者行動をより正確に反映することが求められる。これにより、障害物の存在によって特定の選択肢を選べない状況を考慮することで、モデルの有用性を高めることができるだろう。

SPL モデルの重要な制限は、交通事故の位置を予測するために現在の速度に依存していることである。実際には、歩行者とドライバーが、誰が先に進むかを決めるために交流する場合、相互作用が生じる可能性がある。また、このモデルは歩行者が同じ選択肢を続けるという前提で未来のステップを予測するが、初期の選択後に異なる選択肢に変更する可能性を考慮していないため、都市環境における歩行者の振る舞いをシミュレートする際のモデルの精度に影響を与える。

今後の課題として、このモデルに適したデータの種類の選別することが重要である。先に触れたように、いくつかの歩行者は車両を先に通過させるために停止を選択するが、現在のモデルではこの行動を捉えることができない。したがって、関連するシナリオを含めてデータ選択プロセスを洗練させることが、モデルの精度と適用性を向上させるために不可欠である。また、他の歩行者や車両との相互作用に関連するデータ量を増やすことも将来的な課題である。

3 章 滞在行動を考慮した歩行者モデルへの拡張

3.1 はじめに

2 章では、歩行者と車両との衝突回避行動に着目したモデリングを実施した。一方、実際の歩行環境においては、滞在行動を含めた行動を歩行者は行っており、衝突回避行動は、歩行空間の設計において考慮すべき要因の一つに過ぎない。とりわけ歩行空間の設計においては、歩行者の移動の利便性や安全性（移動機能）を高めるだけでなく、利用の多様性や居心地の良さ（滞在機能）を高める空間づくりが求められる。この双方の機能を充実する空間設計が理想ではあるものの、わが国やアジアの高密度都市においては、双方の需要を同時に満たさせない可能性がある。例えば、渋谷駅構内に設置されている岡本太郎の壁画や名古屋駅構内に設置されている「金時計」といったオブジェクトは、人々が滞在する（人々が待ち合わせをする、絵を見る、写真をとるなど）空間を生み、オブジェクトの周囲に滞在する人々のまとまりを形成する。一方で、図 3.1、図 3.2 のように、滞在者が移動者の利便性を低下させる可能性がある。このような移動機能と滞在機能の競合は、屋内の空間だけでなく、屋外の街路空間においてもみられる。移動者と滞在者の双方が快適に利用できる必要があるが、そのためには、移動者と滞在者両方の視点から、その空間がどのように利用されるか（利用者ニーズ）を正しく把握しなければならない。移動者と滞在者は相互に作用しながら空間の利用が決定されるため、移動と滞在の競合性の評価は容易ではない。また、エスカレータの右通行／左通行問題のような単純な問題からも、上記の相互作用は複数均衡を発生させるといえ、解の安定性などについても合わせて議論する必要がある。

以上のような移動者と歩行者の競合性を考慮した空間評価手法の開発には、滞在者と移動者の双方を含む歩行者の軌跡を高解像度に観測する必要がある。近年、Yolo といった機械学習を用いた画像解析技術の発達や、GPS や Wi-Fi などによる位置情報の取得が可能になり、移動者と滞在者の双方の行動を常時観測できるようになってきている。本研究では、それらの歩行者データが利用できる前提に立ち、街路空間における移動と滞在の競合性を定量的に評価する枠組みを構築する。具体的には、動的離散選択モデル²⁾を用いた歩行者モデルを構築し、提案モデルから算出されるログサム値を評価指標として利用する。さらに、移動者と滞在者の競合を考慮するために、(1)移動者内相互作用、(2)滞在者内相互作用、(3)移動者-滞在者間相互作用を導入する。また、図 3.1 と図 3.2 を模倣した移動と滞在が可能な街路空間を想定した数値シミュレーション分析を行い、オブジェクトの配置の違いによるログサム値の変化について考察する。

本研究の主な学術的貢献は以下の通りである：(1) 移動行動と滞在行動を同一の動的離散選択モデルの枠組みで記述する点，(2) 動的離散選択モデルの構造を維持しつつ，連続空間上において発生する移動者内／滞行者内／移動者-滞行者間相互作用を記述する方法を提案する点，(3) 提案モデルから算出されるログサム値を街路空間の評価指標として用いることを提案，移動者と滞行者の競合を定量評価する点．

本論文は以下の通り構成される．3.2 では，文献レビューを行い，3.3 では方法論について述べる．3.4 数値シミュレーション分析を行い，3.5 で結論と今後の展望を整理する．



図 3.1 渋谷駅の岡本太郎の壁画付近の歩行者の行動



図 3.2 名古屋駅の「金時計」付近の歩行者の行動

3.2 文献レビュー

歩行者の行動レベルは、Hoogendoorn, et. al. (2004) では Strategic level, Tactical level, Operational level の3つに分類される。本研究のモデルは、連続空間上における歩行者同士の相互作用を扱うモデルを開発するため、Operational level のモデルに該当する。これまで、セル単位で個人の行動を記述する Cellular Automata (CA) や運動方程式を用いて歩行者間の反発力と吸引力をモデル化する Helbing and Molnár (1995) や Kwak, et. al. (2013) の Social force model などが Operational level のモデルとして構築されてきている。

表 3.1 は(1) 滞在者と移動者の双方を考慮したモデルかどうか、(2) 経路選択レベルにおける効用最大化理論と整合したモデルかどうか(ログサム値を用いた評価が可能かどうか)、(3) 他の歩行者との相互作用を考慮したモデルかどうか、の3つの観点から従来の歩行者行動モデルを分類した表である。Fosgerau et. al. (2013) は、physical ネットワーク上のドライバーの経路選択行動を記述する Recursive logit (RL) model を提案した。このモデルは歩行者の行動も容易にモデル化でき、さらに経路選択レベルで効用最大化理論と整合しているため、ログサム値を算出し、その値を評価に適用できる。一方、元々の RL モデルは、滞在を誘発する正の瞬間効用(緑地面積など)を扱えないため、本質的に滞在行动を記述することが難しい⁸⁾。大山・羽藤(2016)は、RL モデルを physical ネットワークから時間構造化ネットワークに拡張した Prism-constrained RL モデル(Prism-RL)を提案した。このモデルは、単一ネットワークにおいて移動者と滞在者の両方の行動を記述できる。しかし、このモデルは離散化した歩行空間上の行動を記述するため、連続空間における移動者と滞在者の物理的な相互作用を表現できない。一方で、連続空間上の他の歩行者との相互作用を記述できる歩行者モデルは多く提案されている。例えば、離散選択モデルの枠組みで各時刻における速度と角度の選択行動をモデル化した Robin. et. al. (2009) の離散選択歩行者モデルや、Social force model などがある。しかしながら、以上の連続空間上のモデルは歩行者の逐次的な行動を記述するが、経路選択レベルにおける効用最大化理論との整合性がとれず、ログサム値を用いた評価ができない。これに対し Hoogendoorn, et. al. (2004) は、効用最大化理論と整合的な枠組みの中で移動車間の連続空間上の相互作用を記述する歩行者モデルを提案している。しかしながら、このモデルでは滞在行动を記述できない。

本研究では、大山・羽藤(2016)のモデルを拡張し、連続空間における移動者内／滞在内／移動者-滞在内相互作用をモデルに導入することを試みる。具体的には、まず、RL モデルや Prism-RL モデルにおいて仮定される決定論的な状態遷移ではなく、確率論的な状態遷移を仮定する。この確率論的な状態遷移の仮定により、連続的な物理空間における歩行者同士の相互作用(衝突回避行動など)をモデル化する。

まとめると、本研究では、確率的な状態遷移を記述する動的離散選択モデルの枠組みを構築し、街路空間における移動者と滞在者の競合性を記述し、移動者と滞在者が混在する街路空間を評価するためにログサム値を用いるフレームワークを提案する。

3.3 方法論

本研究では 移動行動と滞在行动の両方をとる可能性がある歩行者を対象とする。

多くの既存の歩行者モデルは、(1)連続時間・連続空間 (Helbing and Molnár, 1995 など)、(2) 離散時間・離散空間 (大山・羽藤, 2016 など)、(3) 離散時間・連続空間 (Robin et al., 2009 など) のいずれかの行動を対象としてきた。上述したように、歩行者間の相互作用を適切に扱うには、歩行者の行動を連続空間で記述する必要がある。本研究では、離散時間・連続空間を扱う(3)のモデリングアプローチを適用する。以下に本研究で扱うモデリングアプローチの概要を説明する。

まず、大山・羽藤(2016)のモデルで用いられている決定論的な状態遷移を確率論的な状態遷移へ変更し、離散的な場所(リンクやノードなど)選択を連続空間上の選択に拡張させる。これにより、各時点における各歩行者の位置を正確に特定でき、例えば、空間上の歩行者同士の衝突可能性を記述できるようになる。提案モデルの枠組みにおける歩行者の行動が、時間構造化ネットワーク(離散時間・離散空間)における歩行者の行動とどのように乖離しているかを図 3.3 に示す。従来の時間構造化ネットワークでは、歩行者は離散点(濃い緑色の点=選択された場所、オレンジ色の点=選択集合の候補地)を選択するが、本手法では、歩行者は薄い緑色とオレンジ色の斜線部分の連続的な空間内から点を選択すると仮定する。

次に、連続空間上の価値関数(後に詳細に記述する)の計算は容易ではないため、従来の時間構造化ネットワークの価値関数を用いて価値関数の計算を近似する。

表 3.1 3つの観点に対応する歩行者モデル

	滞在者と移動者の双方の考慮	経路選択レベルにおける効用最大化理論との整合性	他の歩行者との相互作用の考慮
Fosgerau et. al. (2013)	-	○	-
大山・羽藤 (2016)	○	○	-
Robin et. al. (2009)	-	-	○
Helbing and Molnár (1995)	-	-	○
Kwak et. al. (2013)	-	-	○
Hoogendoorn et. al. (2004)	-	○	○

3.3.1 動的離散選択歩行者モデルの定式化

離散時間-連続空間上の歩行者行動を記述するために、 $j \in J$ を意思決定段階（離散時間）、 s_j を意思決定段階 j における状態空間とし、以下のように定義する。

$$s_j = l \in L \quad (3.1)$$

ここで、 l は連続空間上の s_j の場所であり、 L は対象エリアである。個人 n の経路 σ は、離散化された意思決定段階時点 $0 \sim J$ までの状態系列 $[s_0, \dots, s_j, \dots, s_J]$ として定義される。 σ と J は個人間で異なるが、個人を表す添字 n は簡便化のため省略する。また、初期状態 s_0 と吸収状態 s_J は、街路空間の流入地点と流出地点である。個人 n が状態 s_j において選択する行動を a とし、以下のように定義する。

$$a \in A(s_j) \quad (3.2)$$

$A(s_j)$ は状態 s_j における選択肢集合である。本モデルでは、Robin et al. (2009)を参考に、歩行者が離散化された薄い緑色の斜線部分（図 3.3）を選択し、次の状態 s_{j+1} は斜線エリア内（状態 s_j により決まる）から確率的に決まると仮定する。具体的には、状態 s_j で行動 a を選択した際に状態 s_{j+1} に遷移する確率 $q_j(s_{j+1}|s_j, a)$ は、斜線エリア内に一様分布すると仮定する。確率的に状態遷移を扱うことで、歩行者の正確な位置を記述でき、例えば、物理空間上の他の歩行者との衝突可能性を算出できる。

状態 s_j にいる個人 n は、瞬時効用 $u_j(a|s_j)$ と吸収状態 s_J （目的地）までの価値関数 $EV_{j+1}(s_j, a)$ の期待値の和を最大にする行動 a を選択すると仮定する。また、 $V_j(s_j)$ は期待価値関数（期待最大効用）であり、以下の Bellman 方程式で定式化できる。

$$V_j(s_j) = \max_{a \in A(s_j)} \left(v_j(a|s_j) + EV_j(s_j, a) + \mu \varepsilon_j(a) \right) \quad (3.3)$$

$\varepsilon_j(a)$ は標準ガンベル分布に従う誤差項であり、 μ はスケールパラメータである。 $EV_j(s_j, a)$ は以下となる。

$$EV_j(s_j, a) = \int_{\mathcal{S}} \left(q_j(\check{s}|s_j, a) \bar{V}_{j+1}(\check{s}) \right) dq_j(\check{s}|s_j, a) \quad (3.4)$$

ここで、 $\bar{V}_j(s_j)$ は期待最大効用である。 $\varepsilon_j(a)$ はガンベル分布に従うことから、 $\bar{V}_j(s_j)$ は以下のログサム値で定義される。

$$\bar{V}_j(s_j) = \log \left(\sum_{a \in A(s_j)} e^{(v_j(a|s_j) + EV_j(s_j, a))} \right) \quad (3.5)$$

そして、状態 s_j で行動 a を選択する確率は以下の Multinomial Logit (MNL)モデルで定式化される。

$$P_j(a|s_j) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}(v_j(a|s_j) + EV_j(s_j, a))}}{\sum_{a \in A(s_j)} e^{\frac{1}{\mu}(v_j(a|s_j) + EV_j(s_j, a))}} \quad (3.6)$$

式(3.5)は、移動と滞在内／間の相互作用を考慮したログサム値であるため、移動者と滞在者の競合を定量的に評価するために直接適用できる。

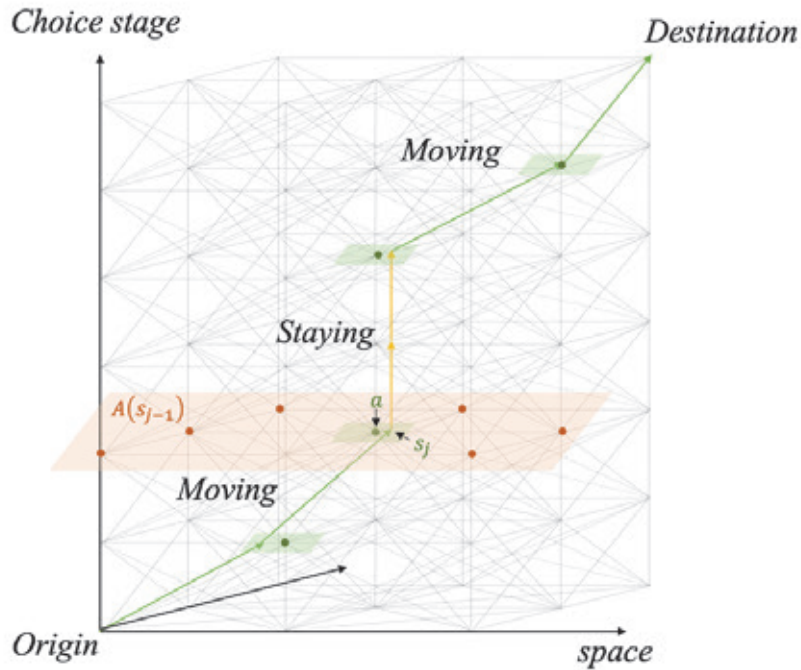


図 3.3 提案モデルが対象とする歩行者の行動

3.3.2 相互作用の取り入れ方

本モデルの瞬時効用を以下のように定義する。

$$v_j(a|s_j) = \begin{cases} \beta^{mo} x_j^{mo}(a|s_j) + \gamma^{mo} w_j^{mo}(a|s_j) & \text{if } a = \text{move action} \\ \beta^{st} x_j^{st}(a|s_j) + \gamma^{st} w_j^{st}(a|s_j) & \text{if } a = \text{stay action} \end{cases} \quad (3.7)$$

添字 mo, st は、それぞれ移動と滞在を表す。状態 s_j で行動 a を選択する際に、滞在行动をとる場合は、滞在効用 $\beta^{st} x_j^{st}(a|s_j) + \gamma^{st} w_j^{st}(a|s_j)$ ，移動行動をとる場合は移動効用 $\beta^{mo} x_j^{mo}(a|s_j) + \gamma^{mo} w_j^{mo}(a|s_j)$ を得る。 $\beta^{st}, \gamma^{st}, \beta^{mo}, w_j^{mo}$ は、未知パラメータベクトルであり、 $x_j^{mo}(a|s_j), x_j^{st}(a|s_j)$ は外生変数ベクトル、 $w_j^{mo}(a|s_j), w_j^{st}(a|s_j)$ は内生変数ベクトルである。

本モデルでは、オブジェクトの配置による行動への影響として、(1) オブジェクトに近づくまたは避けるといった直接的な影響、(2) 周囲の歩行者の行動変化による 間接的な影響の 2 つを考慮する。前者は外生変数、後者は内生変数としてモデルに導入される。間接的な影響は、歩行者内／間の相互作用（例えば、移動者はオブジェクト周辺の滞在者を避けるように挙動する／滞在者は、既存の滞在者の周辺に滞在するように挙動する）により記述される。

3.4 数値シミュレーション

オブジェクトの配置により、歩行者のログサム値がどのように変化するかを分析するために本シミュレーションを実施した。本シミュレーションにおけるオブジェクトとは、滞在者のまとまりを形成するものとする。本シミュレーションで図 3.4 に示すような 2 つの状況：(1)オブジェクトを中央に配置する場合、(2)オブジェクトを上下に配置する場合を設定した。灰色の長方形は、オブジェクトを表し、緑点は歩行者を表す。

3.4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件は以下とする。

- 街路空間の大きさは、 $10m \times 20m$ とする。
- 歩行者は両側から街路空間に流入・流出する。歩行者は途中で止まることができる。
- 歩行者の出発時間と人数は以下とする。
0 秒から 74 秒、各秒、4 人ずつ出発
- 意思決定段階は 1 秒間隔とする。
- 事前の滞在者は、オブジェクト周り 3m 以内に一様分布に従い、20 人配置される。
- 意思決定段階の間隔は 1.0 秒とする。
- 目的地までの意思決定段階数は 30 とする。

3.4.2 効用関数

瞬時効用は以下の式で記述される。また、各モデルのパラメータと説明変数の定義と値は、表 3.2 に示す。

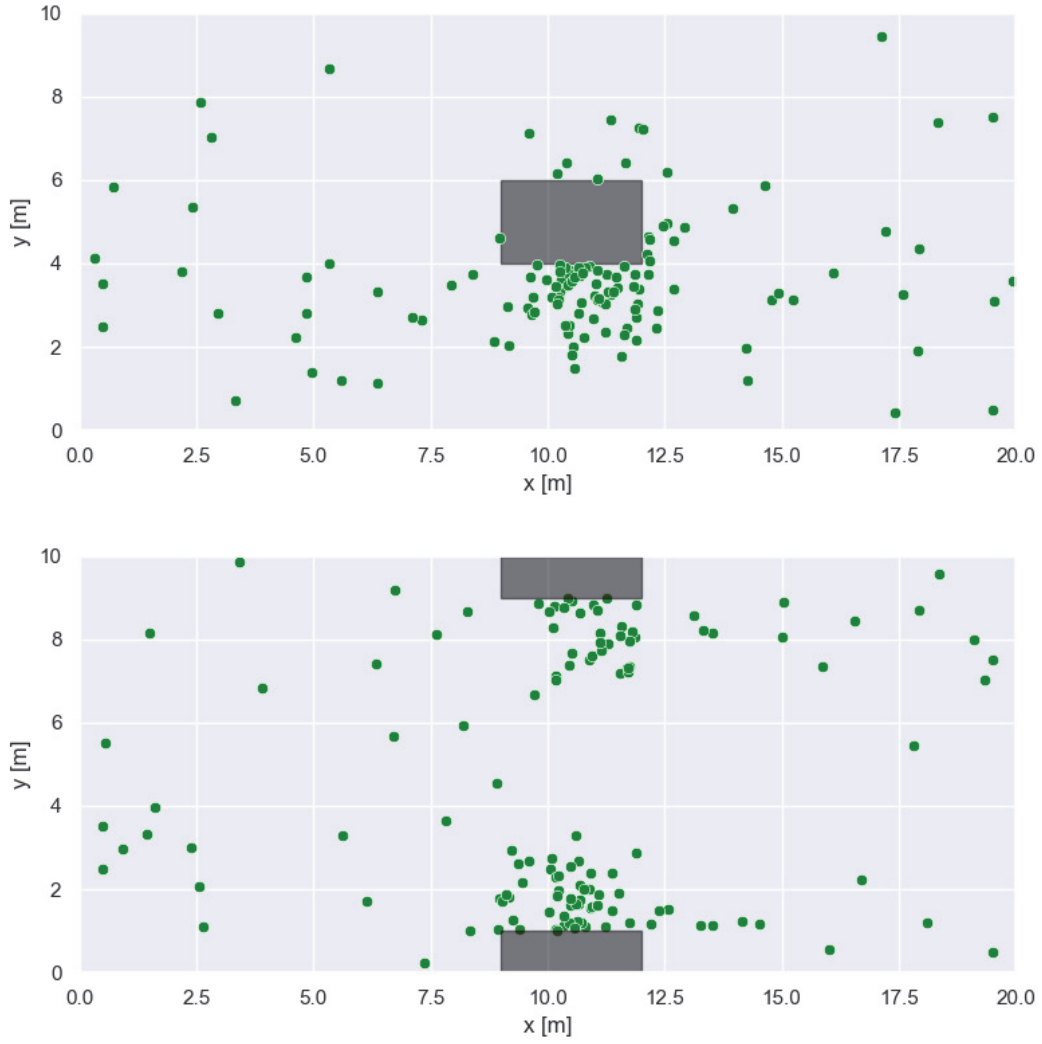


図 3.4 シミュレーション上のオブジェクトの配置

$$v_j(a|s_j) = \begin{cases} \gamma^{ca}w^{ca}(a|s_j) + \gamma^{st}w^{st}(a|s_j) + \beta^{ob}x^{ob}(a|s_j) \\ \quad + \beta^{tt}x^{tt}(a|s_j) + \beta^{tts}x^{tts}(a|s_j) & a = \text{move action} \\ \gamma^{stp}w^{stp}(a|s_j) + \beta^{att}x^{att}(a|s_j) + \beta^{pts}x^{pts}(a|s_j) & a = \text{stay action} \end{cases} \quad (3.8)$$

移動者と滞在者の相互作用を考慮するため，内生変数に移動者との回避，滞在場所の回避・近寄りに関する変数を導入した．また，外生変数として，オブジェクトの回避・近寄り，移動時間，遷移コストに関する変数を導入した．

3.4.3 シミュレーション手順

歩行者の行動は以下の手順でシミュレーションする．

- STEP1. 意思決定段階 j で全ての内生変数を計算する.
- STEP2. 説明変数を用いて瞬時効用 $v_j(a|s_j)$ と期待最大効用 $V_j(a)$ を計算する.
- STEP3. 各選択肢の選択確率を計算する. 選択肢集合の中から, 求めた選択確率に従いランダムに行動 a を選択する. そして, 一様分布に従い, 行動 a の部分空間の中の次の状態 s_{j+1} に遷移し, 歩行者の位置を更新する.
- STEP4. もし, 歩行者が目的地に到着したら, 上記の手順を終了する. そうでなければ, $j = j + 1$ とし, STEP1 に戻る.

表 3.2 シミュレーションで用いたパラメータと説明変数

	パラメータ	説明変数
移動者との衝突回避	$\gamma^{ca} = -0.1$	$w^{ca}(a_n s_{n,j}) := \min_{-n_m} D(\dot{a}_n, \dot{a}_{-n_m}; -n_m \in H_n)$ $\dot{a}$: リンク a の終点の位置 D : 距離関数 $-n_m$: 意思決定者以外の移動者 H_n : 前方半径3m以内の逆方向に進む移動者の集合
滞在場所の回避	$\gamma^{stt} = -0.1$	$w^{st}(a_n s_{n,j}) := H'_n $ H_n : 2m以内の滞在者の集合
オブジェクトの回避	$\beta^{ob} = -0.1$	$x^{ob}(a_n s_{n,j}) := \min_{-n} D(\dot{a}_n, O_k; k \in K_n)$ O_k : オブジェクト k の位置 K_n : オブジェクトの集合
移動時間	$\beta^{tt} = -0.1$	$x^{tt}(a_n s_{n,j}) := D(s_{n,j}, \dot{a}_n), a_n \in A(s_{n,j})$
遷移コスト (滞在から移動)	$\beta^{tts} = -0.1$	$x^{tts}(a_n s_{n,j})$: 滞在から移動であれば1, そうでなければ0
滞在場所への近寄り	$\gamma^{stp} = 1.0$	$w^{stp}(a_n s_{n,j}) := \log(H'_n + 1)$
オブジェクトへの近寄り	$\beta^{att} = 1.0$	$x^{att}(a_n s_{n,j}) := \min_{-n} D(\dot{a}_n, O_k; k \in K_n)$
遷移コスト (移動から滞在)	$\beta^{pts} = -0.1$	$x^{pts}(a_n s_{n,j})$: 移動から滞在であれば1, そうでなければ0

3.4.4 シミュレーション結果

本シミュレーションは, 歩行者の確率的な行動/複数均衡の影響を確認するため, オブジェクトを上下と中央に配置して5回行った. ログサム値は, 各時刻の各方向の10個の出発点のログサム値の期待値とする. 5回分のログサム値の変動を図3.5, 図3.6に示す. なお, 初期の20ステップと71以降の意思決定段階は, 十分な量の歩行者が空間に放たれていない状態であることから, 図から削除している.

シミュレーション結果より, 空間の混雑が進むと滞在者が増加したことにより, ログサム値は上昇した. さらに, 混雑が激しい時間帯は, どちらの場合もログサム値がある値付近で安定した. つまり, 空間はある一定の混雑度に達し, それに応じてログサム値が安定したと考えられる. さらに, オブジェクトを上下に配置した場合, 歩行者のログサム値が高くなっ

た．また，中央に配置するよりも上下に配置した方がログサム値は安定する（分散が低下する）ことが確認された．考えられる理由として，(1) 上下に配置されているケースの方が歩行者の経路が明確であり，歩行空間と滞在空間の空間的な分離が自然に形成されやすいこと，(2) 中央に配置されているケースの場合，滞在者の集団が別の均衡状態に頻繁に移動する可能性があること（例えば，オブジェクトの上側に集まっていた滞在者が，徐々に左右／下側に移動するなど）が考えられるが，詳細な考察については，今後の課題である．ただし，以上の分析から，オブジェクトの配置がログサム値に影響を及ぼす点は明らかと思われ，移動者と滞在者双方への影響を考慮した上でオブジェクトを配置することの重要性は示唆されたといえる．

本シミュレーション結果より，中央に配置した場合よりも上下に配置した場合の方がログサム値は高いため，上下に配置した場合の方が良いこといえる．しかしながら，結果はパラメータの初期条件などに依存するため，今後，追加の検討を行う必要がある．

3.5 まとめ

本研究では，移動者と滞在者の競合を定量的に評価するための枠組みを構築した．具体的には，歩行者の移動と滞在を，動的離散選択モデルを用いて記述する動的離散選択歩行者モデルし，提案モデルから算出されるログサム値を用いて評価する方法を提案した．本研究の学術的な貢献は以下の 3 つである：(1) 移動と滞在を同一の動的離散選択モデルの枠組みで記述した点，(2) 動的離散選択モデルの枠組みを維持しながら，連続空間上の移動者内／滞在者内／移動者-滞在者間の相互作用を記述する方法を提案した点，(3) 提案モデルから算出されたログサム値を，街路空間を評価する指標として用いることを提案した点．さらに，数値シミュレーションを行い，オブジェクトの配置の違いによるログサム値の変化を分析した．本数値シミュレーションの結果，オブジェクトの配置がログサム値に影響を及ぼすことが示された．

今後の展望は以下の通りである．第一に，特に内生変数について，説明変数の設定を変えた場合のシミュレーション分析を行う．第二に，シミュレーションのパラメータ変化に対するログサム値の感度を分析する．第三に，街路空間をより大きなネットワークの一部として見た場合に，移動者は滞在者が多く存在する経路を選択しない可能性があり，ネットワークレベルでは移動者と滞在者の間にも相補関係が発生する可能性がある．提案モデルをネットワークレベルの経路選択モデルと組み合わせることで，このような相補関係に関するシミュレーション分析を行う．

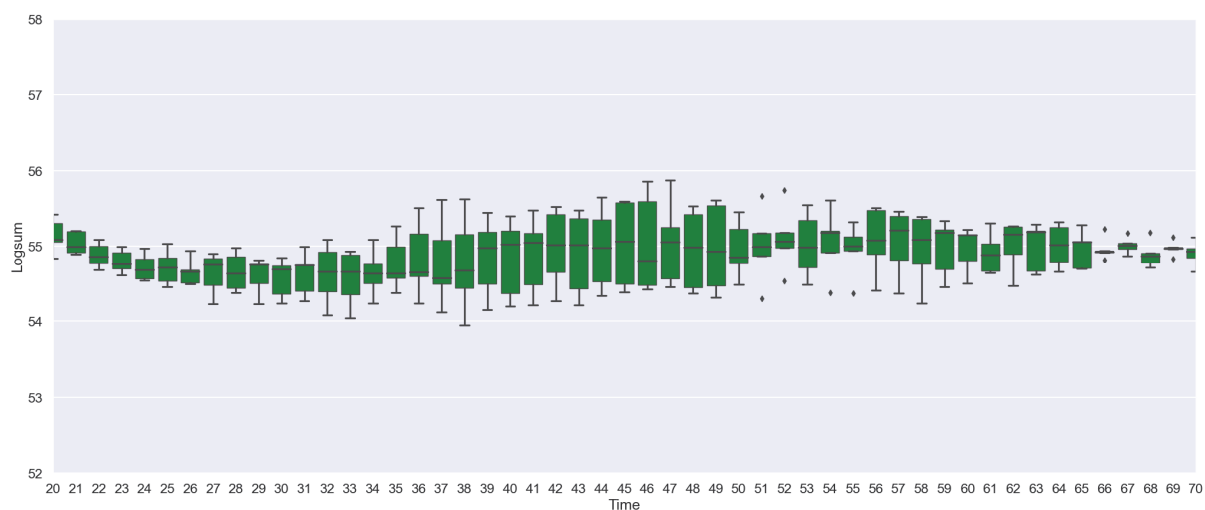


図 3.5 オブジェクトを中央に配置した場合のログサム値の変動

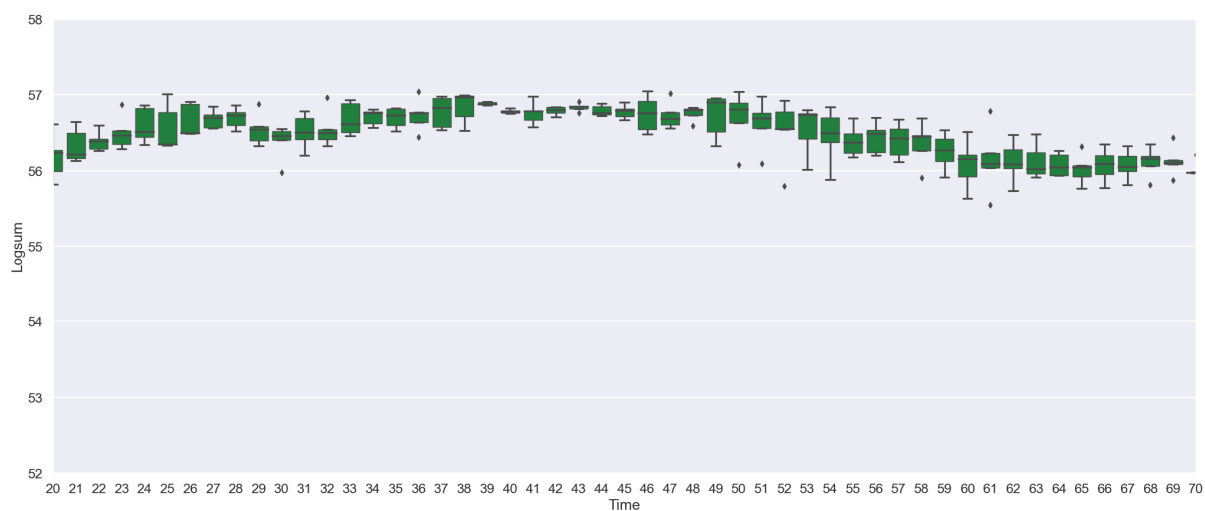


図 3.6 オブジェクトを上下に配置した場合のログサム値の変動

4 章 歩行者の時空間ダイナミクスを把握する調査枠組みの検討

4.1 はじめに

2 章では歩行者と車両とが混在する空間における安全面について、3 章では滞在する歩行者と移動する歩行者とが混在する空間の評価枠組みについて検討を行ってきた。実都市において、安全面を優先的に検討すべきエリア／時間帯もあれば、移動者と滞在者とのバランスについて検討すべきエリア／時間帯も存在する。また、そうした歩行者-車両の相互作用や移動者-滞在者の相互作用は、時間的にも空間的にもダイナミックに変化するものであるといえ、適切な場所に適切なタイミングでより安全で快適な街路空間を創出するための施策を実施する必要がある。本研究では、そうした時空間ダイナミクスを捉えるための歩行者行動調査の枠組みを検討する。

4.2 調査枠組み

ここで考案した調査枠組みは以下の通りである。まず、一日の交通日誌調査の実施を前提とする。交通日誌調査は、地図上で活動場所を指定した上で、時刻、交通手段、トリップ目的を選択してもらう仕様とした。また、バスで移動する際のアクセス・イグレス行動を詳細に捉えることを企図して、全バス停情報を地上に配置し、ワンクリックで頻繁に利用するバス停場所／鉄道駅を選択できるユーザーインターフェイスを開発した(図 4.1, 図 4.2)。このインターフェイスは、もちろん活動日誌の中において活用することも可能であるが、調査負荷を下げる必要があるなど、目的に応じてカスタマイズすべきものといえる。次節では、現在東広島市で検討が進んでいる BRT のアクセス・イグレスモードとして徒歩やシェアリング等を利用する際の街路空間に着目した調査を念頭に、試行的に実施した調査結果の概要を紹介する。

4.3 調査試行結果

調査は、主に広島大学に務める学生・教職員を対象に試行的に実施した。この調査では、特にライドシェアに注目した。構成員同士でライドシェアを実施する場合、それぞれの自宅

に迎えに来てもらう形式ではなく、ミーティングポイント（乗車地、降車地）を設定し、ミーティングポイントにライダーに来てもらいドライバーが運転するライドシェアの車両に同乗する仕組みが環境負荷低減の観点からもドライバーの負荷低減の観点からも望ましいと考えられる。一方、こうしたミーティングポイントの設定を前提としたライドシェアは、ミーティングポイントがダイナミックに変わりうることから、歩行環境を改善すべき道路区間の特定は用意ではない。以上のような文脈における歩行者環境改善道路区間を特定することを念頭に、図 4.3 に示す内容の調査を実施した。



図 4.1 自宅から職場に向かう際に使用するバス停を地図上で選択する画面



図 4.2 職場に行く際に使用するバス停を地図上で選択する画面

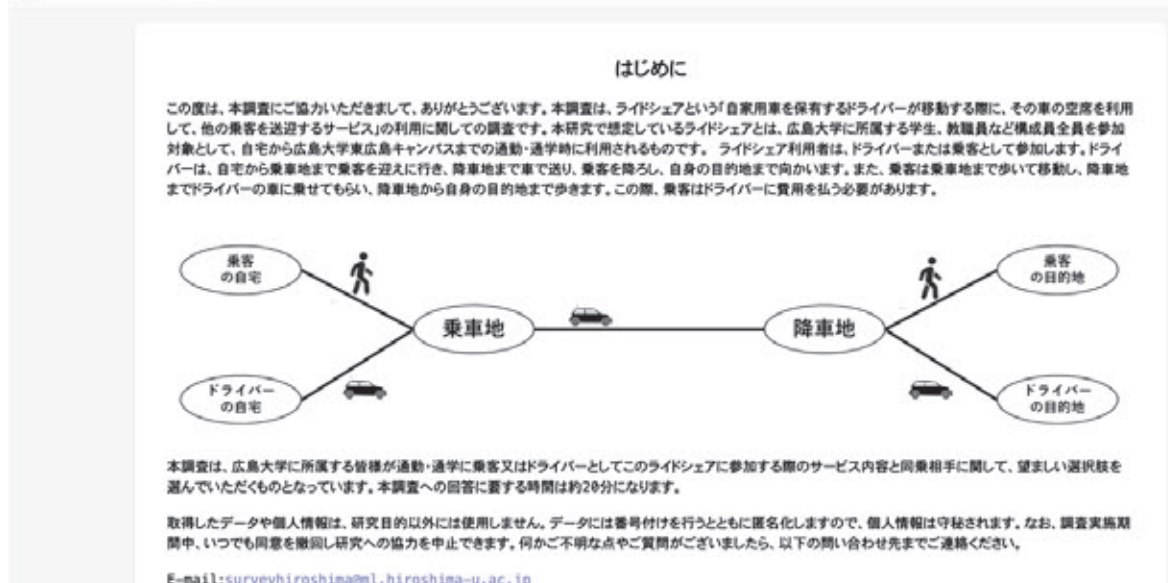


図 4.3 調査概要説明場面

図 4.4 に調査実施結果の例を示す。図より、自宅から被験者が使用する最寄りのバス停までの経路、並びに、バス停から通勤／通学先までの経路が捉えられていること、また、被験者は必ずしも最寄りのバス停を選ぶわけではなく、目的地やバス停の選好によって使用するバス停は異なることが確認できる。今後、ここで開発した調査の規模を拡大し、都市県全域で歩行が発生している箇所を面的に捉える予定である。

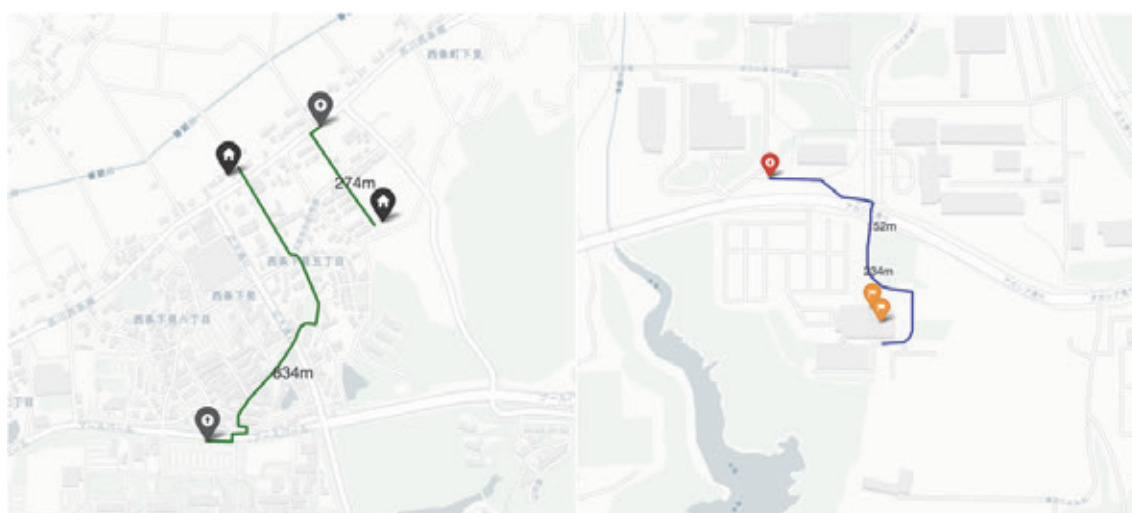


図 4.4 調査結果の例

5章 おわりに

本研究では、(1) 歩行者-車両の相互作用のモデル化、(2) 歩行者間（とりわけ移動者-滞在者間）の相互作用のモデル化と評価枠組みの検討、(3) 歩行者の時空間ダイナミクスを把握する調査枠組みの検討、について研究を行った。

一点目については、歩行者-車両の相互作用を取り入れた歩行者モデルを提案し、歩行者がAV、自動車、自転車、バイクが接近した際にとる回避行動をモデル化した。モデル推定の結果、車両の存在が歩行者に与える有意な影響は把握できなかったものの、(1) 横断歩道が歩行者優先区域に指定されているにもかかわらず、歩行者は自動車が優先して通過できるように振る舞う傾向があること、(2) 一方、AVは歩行者に優先して停止するよう設定されているため、AVとの衝突を避ける必要性は低いと認識している可能性があるなど、歩行者挙動の観測から幾つかの知見を得ることができた。

二点目については、移動者と滞在者の競合をモデル化し、定量的に評価するための枠組みを提案した。具体的には、歩行者の移動と滞在が混在する状況を、動的離散選択モデルを用いて記述する歩行者モデルを構築し、提案モデルから算出されるログサム値を評価指標として用いることを提案した。当然のことながら、実際の歩行環境の良し悪しは行動結果のみから推論できるものではないものの、これまで広く使用されてきた消費者余剰に基づく評価枠組みと整合する枠組みで評価することにより、政策決定の場で機能する指標を提案している点に本研究の大きな特徴がある。また、提案評価指標の有効性を確認するための数値シミュレーションを行い、オブジェクトの配置の違いの影響を評価可能であることを確認した。

三点目については、街路空間を整備・運用すべきスポットの特定の基礎データとして、歩行者の時空間ダイナミクスを把握するための調査枠組みを提案し、試行的に提案調査を実施した。今後、歩行だけでなくマイクロモビリティなどの多様なモードを利用して公共交通結節点にアクセスする状況が出現する可能性が高いことから、多様なモードが混在する空間の発生箇所等の特定が可能な調査枠組みの試案を提示した点に意義があると考ええる。

今後検討すべき課題は各々の章において議論したように多岐に渡るが、全体としての今後の課題は次のとおりである。第一に、滞在者と移動者の双方が存在し、かつ、歩行者だけでなくマイクロモビリティなどの多様なモードが混在する空間のデザインや運用が今後ますます重要になっていくものと思われる。本研究において提案した分析枠組み、評価枠組みは、このような場面を念頭に構築したものであるが、他の車両が接近してきた際の歩行者の挙動の再現性の向上、滞在行動の実データを用いたモデル化など、幾つかの根本的な研究課題が残っている。第二に、本研究では、移動機能と滞在機能の2つの観点から街路空間の良し悪

しを議論してきたが、街路空間の存在は、都市の心象風景にも大きな影響を与えることから、都市のシンボルとしての機能を果たす可能性が高い。この観点から見れば、行動的側面に限定した本研究のモデル化・評価枠組みは、街路空間がもたらす社会的影響の一部のみを捉えたものであるといえる。今後、街路空間がもたらす社会への影響をより包括的に整理するとともに、本研究において議論した行動論的評価枠組みが実践のどのような場面で特に有効に機能しうるのか、見通しを良くしておく必要がある。

参考文献

1. Adler, J. L., Blue V. J. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(3), 293-312.
2. Anvari, B., Bell, M. G., Sivakumar, A., Ochieng, W. Y. (2015). Modelling shared space users via rule-based social force model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 51, 83-103.
3. Ben-Akiva, M., & Bierlaire, M. (1999). Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. In *Handbook of transportation science* (pp. 5-33). Boston, MA: Springer US.
4. Bovy PHL, Hoogendoorn SP. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.38, No.2, pp.169-190.
5. Camara, F., Dickinson, P., Fox, C. (2021). Evaluating pedestrian interaction preferences with a game theoretic autonomous vehicle in virtual reality. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 78, 410-423.
6. Chen, P., Zeng, W., Yu, G. (2019). Assessing right-turning vehicle-pedestrian conflicts at intersections using an integrated microscopic simulation model. *Accident Analysis & Prevention*, 129, 211-224.
7. Darbha, S., Konduri, S., Pagilla, P. R. (2017). Effects of V2V communication on time headway for autonomous vehicles. In *2017 American control conference (ACC)*, 2002-2007.
8. Darbha, S., Konduri, S., Pagilla, P. R. (2018). Benefits of V2V communication for autonomous and connected vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(5), 1954-1963.
9. Deb, S., Strawderman, L. J., Carruth, D. W. (2018). Investigating pedestrian suggestions for external features on fully autonomous vehicles: A virtual reality experiment. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 59, 135-149.
10. Deb, S., Strawderman, L., Carruth, D. W., DuBien, J., Smith, B., Garrison, T. M. (2017). Development and validation of a questionnaire to assess pedestrian receptivity toward fully autonomous vehicles. *Transportation research part C: emerging technologies*, 84, 178-195.
11. Dias, C., Iryo-Asano, M., Nishiuchi, H., Todoroki, T. (2018a). Calibrating a social force based model for simulating personal mobility vehicles and pedestrian mixed traffic. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 87, 395-411.
12. Dias, C., Nishiuchi, H., Hyoudo, S., Todoroki, T. (2018b). Simulating interactions between pedestrians, Segway riders and cyclists in shared spaces using social force model. *Transportation research procedia*, 34, 91-98.
13. Feng, Y., Duives, D., Daamen, W., Hoogendoorn, S. (2021). Data collection methods for studying pedestrian behaviour: A systematic review. *Building and Environment*, 187, 107329.
14. Fosgerau, M., Frejinger, E., Karlstrom, A. (2013). A Link Based Network Route Choice Model with Unrestricted Choice Set. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.56, pp.70-80.
15. Hafeez, F., Ullah Sheikh, U., Mas'ud, A. A., Al-Shammari, S., Hamid, M., Azhar, A. (2022). Application of the theory of planned behavior in autonomous vehicle-pedestrian interaction. *Applied Sciences*, 12(5), 2574.
16. Hamilton-Baillie, B. (2008). Shared space: Reconciling people, places and traffic. *Built environment*, 34(2), 161-181.
17. Harper, C. D., Hendrickson, C. T., Mangones, S., Samaras, C. (2016). Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions. *Transportation research part C: emerging technologies*, 72, 1-9.
18. Helbing, D., Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5), 4282.
19. Hoogendoorn SP, Bovy PHL. (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.38, No.2, pp.169-190.

20. Jayaraman, S. K., Tilbury, D. M., Yang, X. J., Pradhan, A. K., Robert, L. P. (2020). Analysis and prediction of pedestrian crosswalk behavior during automated vehicle interactions. In 2020 IEEE International Conference on robotics and automation (ICRA). 6426-6432.
21. Jones, P., and Boujenko, N. (2009). "Link" and "Place": A new approach to street planning and design. Road and Transport Research, Vol. 18, No.4, pp.38-48.
22. Kirchner, A., Nishinari, K., Schadschneider, A. (2003). Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics. Physical review E, 67(5), 056122.
23. Kwak J, Jo. H-H., Luttinen T., Kosonen I. (2013). Collective dynamics of pedestrians interacting with attractions. Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics, 88, 062810-1-6.
24. Liu, M., Zeng, W., Chen, P., Wu, X. (2017). A microscopic simulation model for pedestrian-pedestrian and pedestrian-vehicle interactions at crosswalks. PLoS one, 12(7), e0180992.
25. Madigan, R., Nordhoff, S., Fox, C., Amini, R. E., Louw, T., Wilbrink, M., Schieben, A., Merat, N. (2019). Understanding interactions between Automated Road Transport Systems and other road users: A video analysis. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 66, 196-213.
26. Nourinejad, M., Bahrami, S., Roorda, M. J. (2018). Designing parking facilities for autonomous vehicles. Transportation Research Part B: Methodological, 109, 110-127.
27. Noori, H., Valkama, M. (2013). Impact of VANET-based V2X communication using IEEE 802.11 p on reducing vehicles traveling time in realistic large scale urban area. In 2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 654-661.
28. Okeke, O. B. (2020). The impacts of shared autonomous vehicles on car parking space. Case Studies on Transport Policy, 8(4), 1307-1318.
29. Oyama, Y. (2023) Capturing positive network attributes during the estimation of recursive logit models: A prism-based approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 147, 104014.
30. Papola, A. (2004). Some developments on the cross-nested logit model. Transportation Research Part B: Methodological, 38(9), 833-851.
31. Prédhumeau, M., Mancheva, L., Dugdale, J., Spalanzani, A. (2022). Agent-based modeling for predicting pedestrian trajectories around an autonomous vehicle. Journal of Artificial Intelligence Research, 73, 1385-1433.
32. Rashid, M. M., Seyedi, M., Jung, S. (2024). Simulation of pedestrian interaction with autonomous vehicles via social force model. Simulation Modelling Practice and Theory, 132, 102901.
33. Robin, T., Antonini, G., Bierlaire, M., Cruz, J. (2009). Specification, Estimation and Validation of a Pedestrian Walking Behavior Model. Transportation Research Part B: Methodological, 43(1), 36-56.
34. Rothenbücher, D., Li, J., Sirkin, D., Mok, B., Ju, W. (2016). Ghost driver: A field study investigating the interaction between pedestrians and driverless vehicles. In 2016 25th IEEE international symposium on robot and human interactive communication (RO-MAN), 795-802.
35. Rust, J. (1987). Optimal Replacement of GMC Bus Engines: An Empirical Model of Harold Zurcher. Econometrica: journal of the Econometric Society, 55, 999-1033.
36. Trumpp, R., Bayerlein, H., Gesbert, D. (2022). Modeling interactions of autonomous vehicles and pedestrians with deep multi-agent reinforcement learning for collision avoidance. In 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 331-336.
37. Velasco, J. P. N., Farah, H., Van Arem, B., Hagenzieker, M. P. (2019). Studying pedestrians' crossing behavior when interacting with automated vehicles using virtual reality. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 66, 1-14.
38. Wen, C. H., & Koppelman, F. S. (2001). The generalized nested logit model. Transportation Research Part B: Methodological, 35(7), 627-641.
39. Xia, B., Wu, J., Wang, J., Fang, Y., Shen, H., Shen, J. (2021). Sustainable renewal methods of urban public parking spaces under the scenario of shared autonomous vehicles (SAV): A review and a proposal.

- Sustainability, 13(7), 3629.
40. Yang, D., Özgüner, Ü., Redmill, K. (2020). A social force based pedestrian motion model considering multi-pedestrian interaction with a vehicle. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (TSAS)*, 6(2), 1-27.
 41. Zeng, W., Chen, P., Yu, G., Wang, Y. (2017). Specification and calibration of a microscopic model for pedestrian dynamic simulation at signalized intersections: A hybrid approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 37-70.
 42. 大山, 羽藤. (2016). 時空間制約と経路相関を考慮した歩行者の活動経路配分問題, 都市計画論文集, 51(3), 680-687.
 43. 警察庁「令和4年における交通事故の発生状況について」
<https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/bunseki/nenkan/050302R04nenkan.pdf> (2024年5月13日閲覧)

日交研シリーズ目録は、日交研ホームページ

http://www.nikkoken.or.jp/publication_A.html を参照してください

A-895 「歩行者と車両の共存空間における
交通流動シミュレーション」

歩行者と車両の共存空間における
交通流動シミュレーションに関する
研究プロジェクト

2024 年 12 月 発行

公益社団法人日本交通政策研究会