

自動運転車が歩行者の挙動に与える影響の実証分析

広島大学大学院	学生会員	○藤原 啓示
広島大学大学院	非会員	Zafirah Abdul Gani
広島大学大学院	非会員	Canh Do
広島大学大学院	正会員	力石 真
広島大学大学院	正会員	藤原 章正

1. 背景

デジタル技術をフル活用し、様々な次世代モビリティと人が自由に移動または交流できる公共空間を実現することがモビリティの向上及び都市の活性化において重要であると考えられる。そのような公共空間では、歩行者や車両の数や挙動に応じて、円滑で安全な移動を支援する機能（Link 機能）と賑わいなど魅力的な滞在空間を創出する機能（Place 機能）を動的に調整する空間の利用が肝要となる。この動的な空間利用を自動的／半自動的に行うためには、(1)移動体の動きを把握する観測・データ処理の枠組み、(2)空間機能を評価するためのモデリング手法、(3)最適な空間利用の制御方法を探索するシミュレーションの3つの方法論的検討が求められる。

本研究では、上記検討課題のうち、Link 機能を評価するための様々な移動体の挙動のモデリングに着目する。行動モデルは2つに大別される。1つ目は広域の空間における群単位の挙動を分析するマクロモデルである。例えば、Zachariadis et al. (2005)は、マクロな歩行者挙動モデルを構築し、シミュレーションにより都市空間の土地利用や建物環境の影響による歩行者のフローを分析した。Tang et al. (2008)は、マクロな車両挙動をモデル化し、歩行者が横断する際の車両のフローを分析した。2つ目は、個々の移動体の局所的な空間上の挙動をモデル化するミクロモデルである。例えば、Anvari et al. (2014)やSchonauer et al. (2012)は、力学的に表現する Social Force Model を用いて歩行者や様々なモビリティの共存する空間における移動体の挙動をモデリングし、Pascucci et al. (2017) や Dazh et al. (2003)は効用最大化理論に基づく離散選択モデルを用いて車両との衝突可能性がある状況下における歩行者の意思決定をモデル化した。また、可児ら (2020) は自動運転車の挙動に対する歩行者の横断の意思決定をモデル化した。

本研究では、後者の立場から様々なモビリティが共存するエリアにおける歩行者のミクロな挙動をモデル化する。具体的には自動運転車と人間が運転する車両の周りの歩行者の周りの歩行者の挙動を観測・モデル化し、自動運転車と人間が運転する車両に対する歩行者の挙動の意思決定の差異を明らかにする。モデルは、Antonini et al. (2006)が提案した離散選択モデルに車両との衝突可能性を表現する項を導入した歩行者モデルを用いる。データは、2021年3月から広島大学・東広島キャンパス内で走行している自動運転車(HIROMOBI)と歩行者が交差するエリアのカメラ観測データを用いる。

以降の章では、まず用いた歩行者モデルについて述べ、次に観測データについて説明する。そして、推定結果について述べ、最後に結論と今後の課題を述べる。

2. モデル

本研究ではAntonini et al. (2006)らが提案した歩行者モデルを参考にし、自動運転車と人間が運転する車両との衝突の影響を考慮した項をそれぞれ追加した改良モデルを構築する。このモデルでは、選択肢は速度方向と角度方向に、33個に離散化される(図1)。また、各選択肢の効用関数は5つ行動要因の項、1)直線性、2)目的地指向性、3)加速度、4)衝突回避、5)密度を含む。以下にそれぞれの項について説明する。

キーワード 離散選択モデル, 歩行者モデル, 自動運転車, 衝突回避

連絡先 〒739-8529 東広島市鏡山1-5-1 広島大学大学院先進理工系科学研究科 TEL 082-424-6905

1) 直線性（現在の進行方向を維持）

$$\beta_{dir_{central}} dir_{dn} I_{d,central} + \beta_{dir_{ncentral}} dir_{dn} I_{d,ncentral} \quad (1)$$

この項は、歩行者はできるだけ現在の角度を維持する傾向を表現する。

dir_{dn} と $ddir_{v_{dn}}$ は各選択肢との角度差であり、 $I_{d,central}$ と $I_{d,ncentral}$ は中央かどうかを表すダミー項、 $\beta_{dir_{central}}$ と $\beta_{dir_{ncentral}}$ は未知パラメータである。



図1 選択肢集合

2) 目的地指向性

$$\beta_{dist} ddist_{v_{dn}} + \beta_{dir} ddir_{v_{dn}} \quad (2)$$

この項は、目的地との方向（目的地との角度差と距離を最小限にする方向）に向かう傾向を表現する。 $ddir_{v_{dn}}$ と $ddist_{v_{dn}}$ はそれぞれ、目的地と選択肢との角度差と距離を表し、 β_{dist} と β_{dir} は未知パラメータである。

3) 加速度

$$\beta_{dec} I_{v,dec} (v_n/v_{max})^{\lambda_{dec}} + \beta_{acc} I_{v,acc} (v_n/v_{max})^{\lambda_{acc}} \quad (3)$$

この項は、個人が望ましいと感じる速度で歩く傾向を表現する。 $I_{v,dec}$ と $I_{v,acc}$ は減速と加速に関するダミー項を表し、 β_{dec} と β_{acc} は未知パラメータであり、 λ_{dec} と λ_{acc} は速度に対するパラメータ β の弾力性を表す。 v_n は歩行者 n の現在の速度、 v_{max} は観測された全歩行者の最大速度である。

4) 衝突回避

この項は車両と衝突回避の性向を表現する。図2に衝突回避の概要図を示す。選択肢 j の方向 i と車両 h との到達地点を予測し、衝突可能性があればその影響を効用関数に反映させる。具体的には以下の通り。

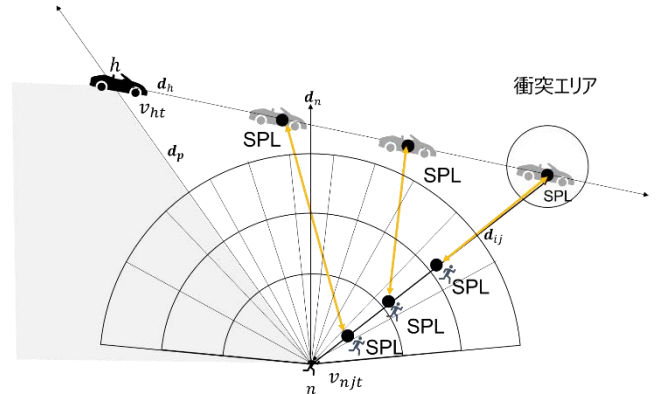


図2 車両との衝突回避に関する概要図

(a) 意思決定者 n の現在の方向のベクトル \mathbf{d}_n 、車両の進む方向のベクトル \mathbf{d}_h と 2 つの移動体（意思決定者 n と車両 h ）を結んだベクトル \mathbf{d}_p と選択肢 j の方向 i とのベクトル \mathbf{d}_{ij} の 4 つのベクトルの関係が以下の条件を満たす場合 ($I_d^p = 1$ の場合) は、衝突可能性がある と判断する。

$$I_d^p = \begin{cases} 1 & \text{if } \mathbf{d}_n \cdot \mathbf{d}_h \leq 0 \\ & \text{and } \mathbf{d}_p \cdot \mathbf{d}_n \geq 0 \\ & \text{and } \delta_1 \geq 0, \delta_2 \geq 0 \\ & \text{where } \mathbf{d}_{ij} = \delta_1 \mathbf{d}_h + \delta_2 \mathbf{d}_p \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

(b) 衝突可能性がある場合、選択肢 j の方向 i のベクトルと車両 h の進むベクトルとの交点を衝突エリアとし、歩行者と車両を一定速度 (v_{njt}, v_{ht}) で移動させた場合の衝突エリアへ到達する時間 (T_{nijt}, T_{hit}) を求め、最小到達時間 $T_c = \min(T_{nijt}, T_{hit})$ と定義する。ここで t は現時点を $t = 0$ として定義される衝突までの時間を表す添字である。

(c) $t = 1, 2, \dots, T_c$ における 2 つの移動体の予測到達地点 (SPL) 間の距離を計算し、移動体間が最も近づいたときの距離を D_{min} とする。また、 D_{min} が生じるまでの猶予時間を T_{min} とする。

以上の計算を車両種類及び選択肢毎に行う。本研究では車両との衝突回避性向を以下のように表現する。

$$\beta_{acar} (x_{acar}^p + \beta_{acar} x_{acar}^p)^{\frac{1}{\rho}} + \beta_{ahiro} (x_{ahiro}^p + \beta_{ahiro} x_{ahiro}^p)^{\frac{1}{\rho}} \quad (5)$$

ここで、 (x_{acar}, x_{ahiro}) と (x_{acar}, x_{ahiro}) は D_{min}, T_{min} の逆数とし、それに対する未知パラメータ ($\beta_{acar}, \beta_{ahiro}$) と ($\beta_{acar}, \beta_{ahiro}$) を設定する。 ρ は説明変数間の代替の程度を測るパラメータであり、 $0 - 1$ の範囲で動かし、尤度が一番高いパラメータを採用する。

5) 密度

$$I_{j,ped}\beta_{density} \quad (6)$$

歩行者は混雑している選択肢は避ける傾向がある。 $I_{j,ped}$ は歩行者がいるかどうかを表現するダミー項であり、 $\beta_{density}$ は未知パラメータである。

3. データ

広島大学では 2021 年 3 月からキャンパス内を自動運転車 (HIROMOBI) が走行する社会実験が実施されており、我々の研究グループでは、自動運転車と人や他の車両とのコンフリクトを観測するためのカメラと LiDAR を設置した。本研究では、設置されたカメラ画像データを用いて、車両と歩行者が衝突する可能性があるエリア (図 3) を観測した。観測データは 83 人の歩行者が含まれており、1 秒間に 2 フレームあり、トータルで 1838 の歩行者のサンプル数を得た。



図 3 観測エリア

4. 推定結果

表 1 に MNL を用いて推定したモデル推定結果を示す。 $\rho = 0.2$ と仮定している。それぞれのパラメータの推定結果について説明する。まず、 $\beta_{dir_{central}}$ が正の値、 $\beta_{dir_{ncentral}}$ が負の値となり、歩行者は現在の進行方向を維持する傾向がある。次に、 β_{ddist} と β_{addir} が負の値となり、歩行者は目的地の方向を維持する傾向がある。また、減速に関するパラメータ λ_{dec} が正、 β_{dec} が負の値、加速に関するパラメータ λ_{acc} が負、 β_{acc} が正の値となった。つまり、歩行者は速度が大きくなると減速しない傾向があるが、観測データでは速度が大きい場合に減速、小さい場合に加速する異なる傾向がみられる。理由としてパラメータ間で何か相関が生じたことなどが考えられるため、今後の検討が必要となる。また、 β_{ped} が負の値となり、歩行者がいる選択肢は避ける傾向がある。

自動運転車と人間が運転する車両との衝突に関するパラメータが負の値となり、 $(\beta_{tcar}, \beta_{dhiro})$ が正の値となった。歩行者は距離と時間が小さい、つまり車両との衝突のある可能性が高い選択肢を選ばない傾向がある。また、 β_{dhiro} の値の方が小さいことから、歩行者は人間が運転する車両よりも自動運転車に対して距離を取らない傾向がある。このことは、歩行者は自動運転車の方が安全であると判断している可能性を示唆している。理由として、自動運転車の速度 (約 10km) は人間が運転する車両の速度に比べて遅く、車両が近づいた場合でも安全に停止すると感じている可能性が指摘できる。今後は、このような差異が生じたメカニズムについて追加の検討が必要である。

5. 結論

本研究では実際に自動運転車が走行するエリアにおける歩行者や車両の挙動を観測し、そのデータを用いて自動運転車と人間の運転する車両に対する歩行者の挙動の分析を行った。歩行者は車両との衝突の可能性のある選択肢は選ばない傾向があること、自動運転車と人間の運転する車両に対して挙動の違いがあること、特に自動運転車に対して安全・信頼する動きをする傾向があることが確認された。今後、モデルの改良を進めると共に、シミュレーションを通じて車両間の safety margin の差異について定量的な解析を行う必要がある。

今回使用データは コロナ禍における観測データであることから、歩行者数が少なく、多くの人や車両が行き来する状況の解析はできていない。また、観測エリアは歩車分離空間であるため、Shared Space のような歩行者と車両が自由に動く空間での移動体の挙動とは異なる可能性が高い。今後、Shared Space を含めた様々なエリアにおける観測・モデリングを行い、実証分析を重ねることが重要と考えられる。

表 1 歩行者モデルの推定結果

パラメータ	推定値	t 値
$\beta_{dir_{central}}$	8.12×10^{-4}	0.196
$\beta_{dir_{ncentral}}$	-1.10×10^{-3}	-0.819
β_{adist}	-3.85×10^{-2}	-13.3**
β_{addir}	-1.54×10^{-3}	-1.59
β_{dec}	-1.18	-1.74+
β_{acc}	1.36×10^{-2}	0.852
λ_{dec}	2.19	2.55*
λ_{acc}	-9.76×10^{-1}	-3.62**
β_{ped}	-5.85×10^{-1}	-1.02
β_{dcar}	-1.56	-0.597
β_{tcar}	2.61×10^{-1}	0.722
β_{dhiro}	-1.96×10^{-3}	-0.204
β_{thiro}	2.56	0.878
Sample size N	1838	
Initial log-likelihood $LL(0)$	-6426.58	
Final log-likelihood $LL(\beta)$	-6317.976	
Adjusted $\bar{\rho}^2$	0.0149	

Note) **: Significant at the 0.01 confidence level, *: Significant at the 0.05 confidence level, +: significant at the 0.1 confidence level

参考文献

- Jones, P, et al. “Link and Place: a New Approach to Street Planning and Design”, Road and Transport Research, Vol.18, No.4, pp.8-48, 2009.
- Zachairadis, V. “An agent-based approach to the simulation of pedestrian movement and factors that control it.”, Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM), 2009.
- Tang, Q. T, et al. “A new macro model with consideration of the traffic interruption probability”, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol.387, No.27, pp.6845-6856, 2008.
- Anvari, B, et al. “Long-range collision avoidance for shared space simulation based on social forces”, Transportation Research Procedia, Vol. 2, pp. 318-326, 2014.
- Schonauer, R, et al. “Modelling shared space users via rule-based social force model”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 51, pp. 83-103, 2015.
- Pascussi, F, et al. “A discrete choice model for solving conflict situations between pedestrians and vehicles in shared space”, arXiv preprint arXiv:1709.09412, 2017.
- Sun, D, et al. “Modeling of motorist-pedestrian interaction at uncontrolled mid-block crosswalks”, Transportation Research Record, TRB annual meeting CD-ROM, 2003.
- 可児匠, 浅野美帆, “自動運転車の挙動と回遊性能が歩行者の横断判断に与える影響分析”, 交通工学論文集, Vol. 6, No. 2, pp. 87-96, 2020.
- Antonini, G, et al. “Discrete choice models of pedestrian walking behavior”, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 40, No. 8, pp. 667-687, 2006.