

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04306

研究課題名（和文）インド・タイの混合交通の錯綜危険性を表現するモデルの実証的検証

研究課題名（英文）Verification of Collision Prone Model under Mixed Traffic in India and Thailand

研究代表者

石坂 哲宏（ISHIZAKA, Tetsuhiro）

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：60453908

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：インド及びタイにおける非車線遵守型多車種混合交通に関して、UAVから観測した衝突危険性指標やソーシャルフォースモデルから得られる指標から、その交錯・衝突危険性を明らかにすることができた。タイでUターンにおけるUターン車両と複数の対向車との交錯事象は、提案したTDTC指標により、それぞれの車両がお互いの走行判断を誤った場合に生じる衝突の危険性を表すことができた。インドの交差点での交錯事象をソーシャルフォースモデルのパラメータでその危険性を定義することで、車種間の比較において走行性能が良いバイクがオートリキシャに比べ、危険度の高い運転を行っているなどの事象を解明することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海外の新興国で課題となっている交通事故に対する対策を検討するうえで必要となる現況分析に本研究の成果は貢献できるといえる。交通事故の発生に至る車両の詳細な挙動を明らかにし、どのような走行が危険であるかを明らかにすることができた。車線を遵守した走行を促すだけでなく、ドライバーの判断によらない明確な交通制御を行うことの必要性を本研究の成果は示している。

研究成果の概要（英文）：This study clarified the collision hazards from the collision hazard indices observed from UAVs and those obtained from social force models, under the non-lane based heterogeneous mixed traffic flow in India and Thailand. The collision hazards between a U-turn vehicle and multiple oncoming vehicles at a U-turn in Thailand could be represented by the proposed TDTC indicator to show the collision hazard that occurs when each vehicle makes a wrong decision to travel with each other. By defining the risk of collision at intersections in India with the parameters of the social force model, it was remarked to elucidate events such as motorcycles with better driving performance driving more dangerously than autorickshaws in a comparison among vehicle types.

研究分野：交通工学

キーワード：多車種混合交通 Uターン 交錯・衝突危険性指標 ソーシャルフォースモデル TDTC

1. 研究開始当初の背景

インドやタイなどの新興国では、乗用車、三輪車（以下、オート）、自動二輪車（バイク）、バスやトラックなどの多車種の混合交通となっており、車線を遵守せずに走行するケースが多く見られる。このような非車線遵守型多車種混合交通（以下、混合交通）における交通事故の危険性を定量的に分析することは、車線内走行を遵守させる導流化などの対策立案に必要不可欠といえる。

このような新興国における社会的課題を克服するために、学術的なアプローチとして交錯・衝突の危険性を定量的に分析することが求められる。本研究では UAV の上空からの撮影動画を用いて走行軌跡を抽出し、交錯・衝突危険性を定量的に表現することに着目した。一つはソーシャルフォースモデルを用いることである。車両相互間の関係性（相対距離や衝突の危険性などのドライバーが走行判断をするための外的要因）に基づき走行していると仮定すると、ソーシャルフォースモデルのパラメータ推定にこのようなデータを明示的に組み込むことで、衝突の危険性を定量的に表現できると考えた。また、U ターン開始、加減速、走行進路の変更などの判断は、一車両対一車両の状態から判断されるのではなく、一对多の交錯・衝突危険性を考慮して行われているといえる。このような判断を定量的に表す交錯・衝突危険性の指標が必要であるが、U ターン挙動に着目した指標はなく、既存研究を応用して指標を定義する必要があると考えた。

2. 研究の目的

UAV から取得した動画に対して深層学習手法を用いて走行軌跡を抽出し、交錯・衝突危険性を定量的かつ実証的に評価することを目的とする。インドおよびタイにおける UAV 画像の解析を通して、混合交通の現象のシンプルな記述、データセットを用いた学習の強化、交錯・衝突危険性指標の提案と評価を具体的な目的と定めた。

3. 研究の方法

(1) インドとタイにおける UAV による走行状態の観測

インド・アーメダバードの南西部に位置するパルディ交差点など 4 交差点とタイのナコンラチャシマ市における多車線幹線道路の国道 2 号線を対象とした（図 1）。これらを実験による車両走行軌跡の抽出、もしくは、YOLOv8 に新たなデータセット（対象区間で固有な車種などの教師データ）を加えてファインチューニングした物体検出モデルで走行軌跡を抽出した。



図 1 インドとタイの調査地点（UAV での撮影画像）

(2) ソーシャルフォースモデルの構築

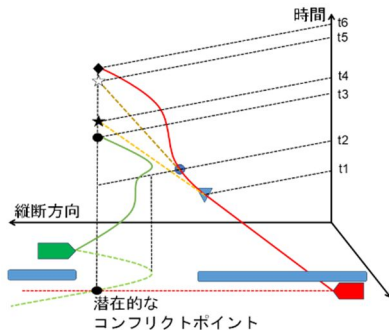
Social Force Model（以下、SFM）は、移動する物体に仮想的な外力を与えることにより、加速度を決定することができることを利用し、移動する物体の挙動を明らかにしようとするモデルである。SFM は Helbing¹⁾らの論文で提案されたことが原型として、様々な要素が考慮されモデルが拡張されている。Robicquet²⁾らは基本的な要素として、移動体自らが希望する速度と他の移動体との速度差を小さくしようとする、他の移動体と衝突しないようにすることなどの 6 つを提案し、SFM の 6 つ目の衝突に関する要因を Social Sensitivity と呼び、式 (1) の通り整理している。これは周囲の歩行者・車両と衝突することを避けることを表現した要因である。本研究では実際の走行環境を考慮してドライバーの視野に含まれる前方の車両との相互関係に着目するデータセットを準備することとした。

$$E_{ss} \left(\mathbf{v}_i^{(t)}; s_i, \mathbf{s}_{j \neq i} | \sigma_d, \sigma_w, \beta \right) = \sum_{j \neq i} w(s_i, s_j) \exp \left(-\frac{d^2(\mathbf{v}_i, s_i, s_j)}{2\sigma_d^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 E_{ss} は Social Sensitivity に関連するエネルギーとして移動体間の影響つまり、車両 i が受ける他の車両 j から衝突を回避しようとするエネルギーを示した値、 σ_d : 衝突を避けるために維持する希望距離、 σ_w : 衝突を避けるために反応する場合の距離、 β : 車両 i の速度によって車両 j への程度近づくかを示す割合に累乗する値（重み関数のピークを制御する値）、 \mathbf{v}_i : 車両 i の速度、 \mathbf{v}_j : 車両 i の周囲にある車両 j の速度とする。

(3) Uターンの交錯・衝突危険性を表す指標の提案

Y.Zhang et al³⁾の三次元における衝突安全性を応用し、Uターン車両と対向車両に適用した。図2に示す通りTDTC(Time difference to collision)をUターン車両の走行開始判断を評価することを意図して、TDTC1、TDTC2の2つの指標として定義した。本研究では対向車両が減速を開始した時刻の場合をTDTC1、Uターン車両が対向車線に進入した時刻の場合をTDTC2とする。そのため、前者は減速をしなかった場合の危険性を表し、後者はUターン車両がUターン開始判断をした時点で対向車両が加減速をしなかった場合の危険性を表す指標である。



$$PET = t_6 - t_3 \quad (1)$$

$$TDTC1 = t_4 - t_3 \quad (2)$$

$$TDTC2 = t_5 - t_3 \quad (3)$$

- t1: 対向車両が減速を開始した時刻
- t2: Uターン車両が対向車線に進入した時刻
- t3: Uターン車両が衝突地点を通過した時刻
- t4: 対向車両が減速せずに衝突地点を通過する時刻
- t5: Uターン車両が対向車線に入った時点で対向車両が減速せずに衝突地点を通過した場合の時刻
- t6: 対向車両が実際に衝突地点を通過した時刻

図2 UターンにおけるTDTC指標の定義

4. 研究成果

(1) 混合交通における車両間の相互関係性

インド・パルディ交差点において、車両間の相互関係を明らかにするために、車種組合せ別の車間距離を画像処理より図3に示した。進行方向の先行車両との関係を左図に、左右方向の車両との関係を右図に示した。ただしautoはオートリキシャ(自動3輪車)を表す。安全確保のための最小車間距離を25パーセンタイル値と仮定すると、車種組合せ別に安全のために確保する距離に違いがあることがわかる。車種間の距離が車種の組み合わせで異なることから、SFMでも車種間でパラメータの違いに関して考察する必要があるといえる。

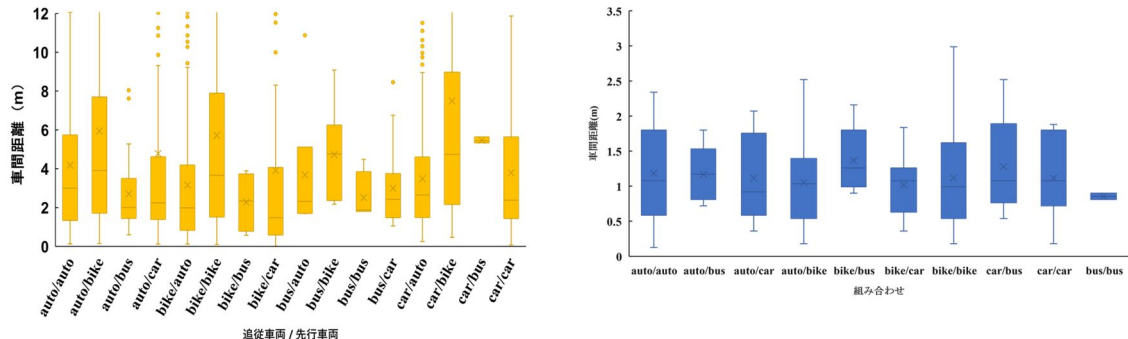


図3 車種組合せ別車間距離(左図:進行方向、右図:左右方向)

(2) ソーシャルフォースモデルによる交錯・衝突危険性の評価

ドローンの画像データから、SFMのSocial Sensitivityで表現される3つのパラメータを交差点ごとに特定の車種対全車種の関係として、図4にプロットした。プロット数は特定車種の車両数分となる。

σ_d に関しては、バイクとオートリキシャはそれぞれ他の車両に対して希望する距離として車両間隔を十分に空けて走行している挙動を示しているデータが多くみられる。一方、 σ_w に関しては、 σ_w は σ_d より小さくなっており、回避挙動を起こす距離と希望する車間距離ではギャップがあることが分かる。 β は個々の車両によってばらつきが大きい、車両の運転手から見えない車両への影響が大きいということを示している側面もあるといえる。しかし、その多くが σ_d と σ_w のゼロ近辺に分布していることから、パラメータ推定の妥当性に関しては最小車間距離を考慮して確認が必要であることは課題である。

左上の図のネルー橋交差点では、バイク・オートリキシャとともに類似した分布になり、3つのパラメータの値が小さく集中しているケース、 $\sigma_d \cdot \sigma_w$ が小さく β が大きいケースに大別できるといえる。右上のスワミビベカナダ橋交差点、左下のパルディ交差点もネルー橋交差点と同様に2つのケースに大まかに分類できる分布が得られた。右下のAPMC交差点はバイクの図においてパルディ交差点と類似した分布がみられ、オートリキシャの図においては、ネルー橋交差点に類似した図に分かれていることがわかった。オートリキシャから見た場合との異なる点として β 値のばらつきが多いことがみられる。

各交差点で共通して述べられる点として、 σ_d が20から30の範囲で集中しているケース、 $\sigma_d \cdot \sigma_w$ が小さく β が大きいケースに大別できるといえる。車群が作る密度に依存することになるが、前者のケースの場合は、車間距離を大きく維持でき衝突を回避する挙動を開始する距離までに余裕があることから、走行状態としての危険に至るリスクは低いといえる。一方、後者のケースは維持している車間距離と衝突を回避する挙動を開始する距離が近く密集した車群であり、且つ、 β が大きく異なることから個々の車両で回避に関する反応する感度も意味することから、比較的衝突に対するリスクが高いといえる。オートリキシャ対全車種の図では、大きな σ_d の値でばらつきがバイクより比較的大きくなっていることから、オートリキシャは維持しようとする車間距離が個々の車両によって異なることが見て取れる。加えて、 σ_d の値が大きくと β の値が小さいと危険性は低くなり、 σ_d の値が小さくと β の値が大きくと危険性が高くなると考えられる。このことから、交差点にもよるが、危険性の低い分布のオートリキシャの数が全体的に多いことからバイクに比べオートリキシャの方が安全な走行をしていることがわかる。

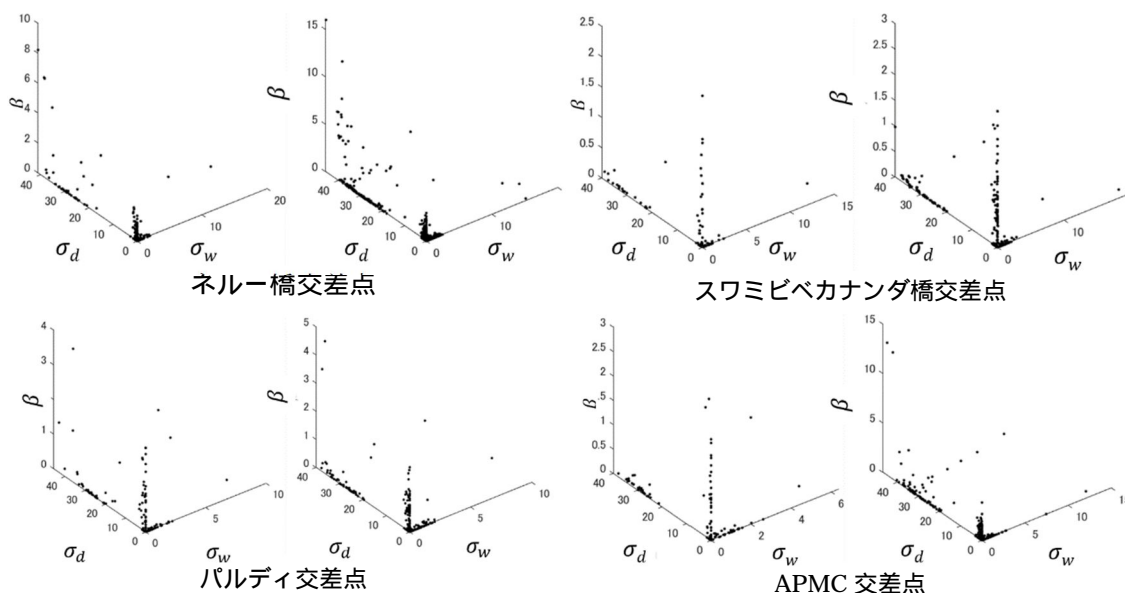


図 4 各交差点のパラメータ (左: 全車種 vs バイク, 右: 全車種 vs オートリキシャ)

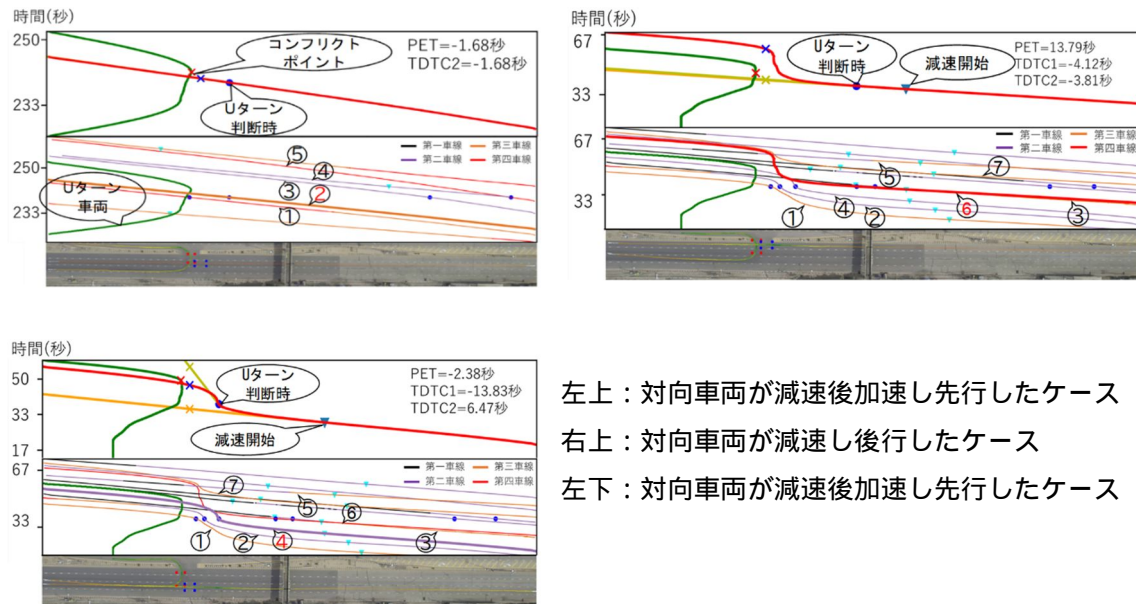
(3) タイのUターンにおける交錯・衝突危険性の評価

Uターン車両の走行挙動を明らかにするため、上部にUターン車両と対向車両、中部にUターン車両と対向車両群の走行軌跡を表す時間距離線図を作成した。X軸は距離、Y軸は時間を表し、△で減速を、○でUターン車両が対向車線へ進入した時点での対向車両の位置を表している。また、下部で空間上の走行軌跡を表した。

図5の左上の図は対向車両が減速せず先行した例である。Uターン車両は対向車線を認識し、その後ろを目標にUターンを開始している。そのため、PET指標とTDTC2指標が0に近い負の値であった場合でも必ずしも危険であるとは言えない。この例の場合は対向車両のPET指標は6.21秒、TDTC2指標は7.54秒と対向車両が加速しているが指標の値は大きく、衝突リスクの低い安全なUターンの例と言える。

図5の右上の図はUターン車両が対向車線に約50cmはみ出して停車し、対向車両が大きく減速しているのを確認してUターンを開始した例である。TDTC2指標が図5左上の図よりも負に大きい、Uターン車両が先行した危険な状態だといえる。図の中央部から、Uターン開始判断と対向車両の加速がほぼ同時であった結果、Uターン車両がUターン開始判断直後に衝突の危険性があると判断したため減速し、このような走行軌跡となったことが分かる。

図5の左下の図は対向車両が他のUターン車両に影響されて減速し、Uターン開始時にはUターン車両が先行できたが対向車両が加速し先行した例である。PET指標とTDTC1指標が負、TDTC2指標が正の値となっている。互いが車両を認知しているが、どちらが先行するかの判断を誤れば衝突の可能性がある危険な状態である。対向車線進入後に第二車線に対して合流を試みており、その過程で第四車線の車両に減速させている。この例に限らず、第四車線に對向車両がおらず第三車線や第二車線に對向車両がいる場合などでは、手前の對向車線を遮りつつ目標の對向車線への合流を行う挙動が見られた。また、對向車両や對向車両など、減速をせずに第四車線側から第一車線側へ車線変更することによってUターン車両を避ける動きが見られた。



左上：対向車両が減速後加速し先行したケース
 右上：対向車両が減速し後行したケース
 左下：対向車両が減速後加速し先行したケース

図5 TDCI 指標と時間距離線図

(4) 本研究の成果のまとめ

インドの混合交通の解析の成果として、車種間で安全を確保するための距離が異なり、更に進行方向と左右方向で異なることを定量的に明らかにした。また、SFM のパラメータの解釈の結果からも車種による走行特性の結果が異なることが示された。両者の結果ともにバイクの走行危険性は、オートリキシャなどの他の車種より高いことを示すことができた。SFM では交差点ごとに 3 つのパラメータの出現傾向が違ってくることを示され、衝突の危険性に関して異なる走行状態であることが示された。

タイの U ターンの解析の成果として、TDCI1/TDCI2 の指標を定義して U ターンの走行状態に即した衝突危険性の定量的な評価ができたといえる。U ターン車両と対向車両がそれぞれ相手方の車両の発進・停止判断を誤ると衝突リスクが高まることを、TDCI1 と TDCI2 が正負となるケースであるとして、そのような走行パターンを抽出することができた。

(5) 今後の展望

本研究を踏まえて、SFM に TDCI などの衝突・危険性指標を直接、組み入れて表現することが可能かどうか検討すること、ラウンドアバウトや合流区間、形状の異なる U ターンなどに関する定量的な分析を追加すること、UAV の画像処理の効率化することなど、今後取り組むべき課題が挙げられる。

参考文献

- 1) Dirk Helbing and Péter Molnár: Social force model for pedestrian dynamics, PHYSICAL REVIEW E, Vol.51, No.5, pp.4282-4286, 1995.
- 2) Alexandre Robicquet, Amir Sadeghian, Alexandre Alahi, Silvio Savarese: Learning Social Etiquette: Human Trajectory Understanding In Crowded Scenes, European Conference on Computer Vision, ECCV 2016, pp.549-565, 2016.
- 3) Yingying Zhang, Danya Yao, Tony Z. Qiu: Pedestrian Safety Analysis in Mixed Traffic Conditions Using Video Data, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, Vol.13, No.4, pp.1832-1844, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tetsuhiro Ishizaka, Kazu Fujieda, Mohammed Asif Nawaz Shaik and Digvijay Sampath Pawar	4. 巻 15
2. 論文標題 Traffic Performance Influenced by Motorbikes and Autorickshaws Under Heterogeneous Traffic Using UAVs	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tetsuhiro Ishizaka, Kazu Fujieda, Mohammed Asif Nawaz Shaik and Digvijay Sampath Pawar
2. 発表標題 Traffic Performance Influenced by Motorbikes and Autorickshaws Under Heterogeneous Traffic Using UAVs
3. 学会等名 The 15th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中田吉紀、石坂哲宏
2. 発表標題 UAV 動画を用いた U タ - ン車両と対向車の走行軌跡抽出による衝突リスク評価
3. 学会等名 （公社）土木学会第51回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 石坂哲宏、Roy Debaditya、松野下翔
2. 発表標題 ソーシャルフォースモデルを用いたインド混合交通の走行状態の評価
3. 学会等名 （公社）土木学会第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤枝和津、田中康介、石坂哲宏
2. 発表標題 インドにおける混合交通下での交差点飽和交通流率解析とその低下要因の分析
3. 学会等名 (公社)土木学会関東支部第49回技術研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	福田 敦 (FUKUDA Atsushi)	日本大学・理工学部・教授 (32665)	
研究協力者	枝藤 和津 (FUJIEDA Kazu)		
研究協力者	松野下 翔 (MATSUNOSHITA Syo)		
研究協力者	中田 吉紀 (NAKADA Yoshiki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
インド	Indian Institute of Technology Hyderabad			
タイ	Kasetsart University	Suranaree University of Technology		