

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05534

研究課題名(和文)安全で円滑な交差点構造設計のためのミクロ交通流理論

研究課題名(英文)Microscopic Traffic Flow Theory for Safe and Efficient Intersection Design

研究代表者

井料 美帆 (Iryo, Miho)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：80469858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：信号交差点の設計には、信号切り替わり時の損失時間、歩行者最小青時間といった、信号制御パラメータ設計上の制約条件となる変数の適切な設定が必要となるが、適切な設定方法が存在しないのが現状である。

本研究では、信号交差点における構造・制御・他者の行動を踏まえた二次元的な利用者挙動モデルを提案し、交差点設計・運用に適用可能な方法論を構築した。特に、ジャーク最小化原理を用いた二次元車両挙動モデルの構築、横断歩道上での歩行者の急な横断速度選択要因の定量化を行い、これらを用いたモンテカルロシミュレーションにより、交錯安全性を考慮したクリアランス時間や歩行者青点減表示時間の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

交差点内の道路利用者動線および安全性を適切に評価することにより、信号パラメータの最適化に必要な損失時間、青点減時間のより適切な導出が可能となった。本研究の提案モデルはそのロバスト性の高さから、ラウンドアバウトや変形交差点等での適用も可能と考えられる。また、本研究は道路設計・信号制御への適用を目的としていたが、ドライビングシミュレータにおける交差点周辺での車両モデルの現実感向上、自動運転における危険度の高い歩行者の抽出性能の向上など、周辺分野への適用も期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to design signalized intersections, not only the optimization method of signal control parameters, but also settings of variables such as lost time or minimum pedestrian green time which can be constraints of the optimization problem is necessary. The latter is determined by trajectories of road users affected by road geometry and traffic lights and its value affects performance of the intersection. However, existing studies do not fully consider the influence of road geometry upon users' trajectories.

This study proposed user maneuver models which can represent the impact of geometry, traffic control and reaction to other users. Especially, 1) two-dimensional vehicle maneuver model using jerk minimization principle and 2) sudden speed change model of pedestrians on crosswalks are proposed. Monte-Carlo simulation using these models evaluated clearance time and minimum pedestrian green time considering conflict risks between road users.

研究分野：交通工学

キーワード：信号交差点 シミュレーション 利用者挙動

1. 研究開始当初の背景

信号交差点に代表される平面交差点は、自動車、自転車、歩行者といった様々な利用者の動線が交錯する、交通安全上・円滑上重要な地点である。信号交差点の設計には、信号制御パラメータの最適化手法のみならず、信号切り替わり時の損失時間、歩行者最小青時間といった、パラメータ設計上の制約条件となる変数の適切な設定が必要となる。これは、交差点の構造や他の利用者の影響を受けた道路利用者の動線によって決定づけられ、その大小が交差点のパフォーマンスに大きな影響を与える。しかし、既存の設計方法や交通シミュレーションでは、利用者の行動や動線を画一的に設定しており、適切な設定方法が存在しないのが現状である。

既往研究も極めて限られている。建設省土木研究所(1979)は、与えられた旋回半径での車両軌跡の描画方法を提案しているが、交差点の幾何構造によって変化する車両速度と、速度による旋回半径の制約を考慮できていない。Alhajyaseen et al.(2013)は重回帰分析により動線と交差点構造との関係を記述しているが、二次元的な速度・位置の物理的関係の間に不整合が見られ、一般に適用可能なモデルとはなっていない。

2. 研究の目的

本研究は、信号交差点における構造・制御・他者の行動を踏まえた二次元的な利用者挙動モデルを提案し、交差点設計・運用に適用可能な方法論を構築することを目的とする。特に、**1)** 物理的な整合性のとれた二次元車両挙動モデルの構築、**2)** 歩行者の横断速度選択要因の分析・モデル化を通じて、**3)** 交錯安全性を考慮した制御上の制約条件の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 交差点における右左折車両動線の実態分析とモデリング

本研究では、信号交差点における右左折車両の動線データをビデオ映像から取得したうえで、ジャーク（加速度の時間微分）最小化原則に基づいて、右左折車両の軌跡のモデリングを行った。この考え方は、元々曲線を描く際の腕の移動軌跡を説明するために提案されたもの（Flash and Hogan(1985)）であり、ジャーク最小化を満たすことと以下の連立方程式が等価であることが示されている。

$$x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \tag{2a}$$

$$y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 \tag{2b}$$

ここに、 $x(t)$ 、 $y(t)$ はそれぞれ時刻 t における車両位置の x 、 y 座標、 a_j と b_j ($j = \{0, \dots, 5\}$) は未知パラメータである。なお交差点流入時刻を $t = 0$ とする。これら 12 個のパラメータに、交差点流出時刻 t_f 、交差点内で車両が最小速度を取る時刻 t_m を加えた 14 の未知変数の同定を考える。制約条件として、交差点流入・流出時の車両の位置、速度、加速度（それぞれ x 、 y 成分）と、交差点内での車両の最小速度およびその際の加速度に関する計 14 条件を与えることにより、パラメータの決定を行うことができる。交差点流入・流入時の車両情報は、それぞれ流入・流出リンクの構造を踏まえて決定する。また、交差点構造に応じた車両の最小速度の平均・分散には、Wolferrmann(2011)の推定式を援用する。

(2) 横断歩行者の横断判断・速度変更判断分析とモデリング

信号の切り替わり時には、急な歩行者の駆け込み挙動により、右左折車両との交錯危険性が発生しうる。信号灯火の状況に応じた歩行者の挙動について、実態分析とモデリングを行った。本研究では特に、横断歩行者の急な速度変更に着目した。横断歩行者が信号その他の周辺環境に反応して急な加減速を行うと、車両側がそれに十分対応できないおそれがある。図 1 のように歩行者の速度が時系列中で有意に変化する点を抽出し、その影響要因および発生確率を導出した。

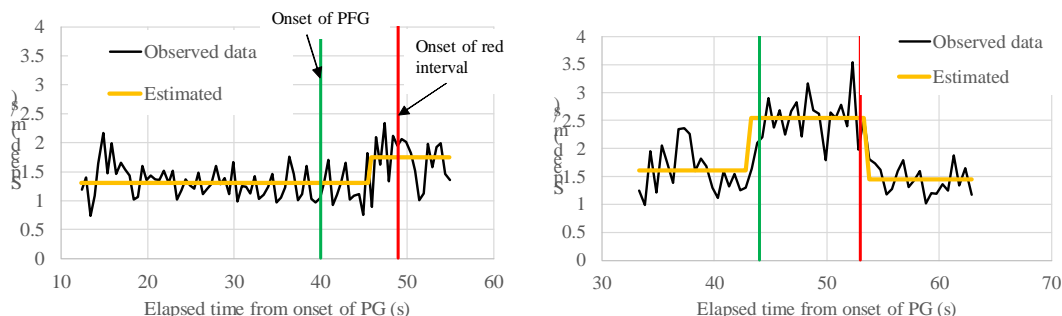


図 1：速度変更イベントの例

発生確率のモデルは以下の通りである。まず、歩行者はある時間間隔 Δt ごとに、速度維持、

加速・減速の選択肢の中から1つを選ぶと仮定する。時刻ごとにある状況 θ が与えられたとき、歩行者の行動にかかる尤度関数 L は以下のように表される。

$$L = \prod_{i=1}^N \prod_{t=1}^{T_i} P_{acc,i}(t|\theta)^{\delta_{acc}} \cdot P_{dec,i}(t|\theta)^{\delta_{dec}} \cdot P_{cur,i}(t|\theta)^{1-\delta_{acc}-\delta_{dec}} \quad (2)$$

ここに、 $P_{cur,i}(t|\theta)$ 、 $P_{acc,i}(t|\theta)$ 、 $P_{dec,i}(t|\theta)$ はそれぞれ、周辺環境 θ が与えられた際の時刻 t における速度維持、加速、減速確率、 δ_{acc} と δ_{dec} はそれぞれ加速、減速のときに1、それ以外の時に0となる。この選択確率が多項ロジットモデルで表現できると仮定し、最尤法によりそのパラメータを推定した。

(3) 車両と横断歩行者の挙動の組合せによる安全評価と信号パラメータ検討

(1),(2)と、横断歩行者に対する右左折車両のギャップ選択モデルとを組合せ、歩行者と車両の到着パターンに応じた交差点の安全性を評価した。モデルのフローは図2の通りである。幾何構造や信号制御タイミングを入力情報として、歩行者や車両の位置・速度を求め、そこから Post Encroachment Time 等の安全性評価指標を導出する。上記のモデルを用いて、信号パラメータ設定において必要となる、損失時間や歩行者最小青時間に関して検討を行った。

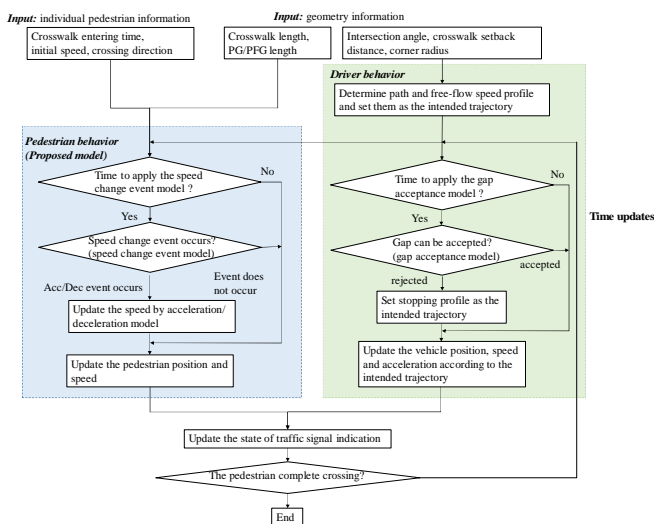


図2：横断歩行者 車両間コンフリクト分析

4. 研究成果

(1) 交差点における右左折車両動線の実態分析とモデリング

図3はそれぞれ、名古屋市内の西大須、植田一本松交差点における左折車両の軌跡と速度推移の観測結果と推定結果を比較したものである。観測値はある1台の移動軌跡であり、その流入・流出時の位置・速度を入力値として、モンテカルロシミュレーションによる150回の試行における軌跡を描画したものである。いずれの交差点においても、実測と推定値の平均の間に有意な差はみられない。

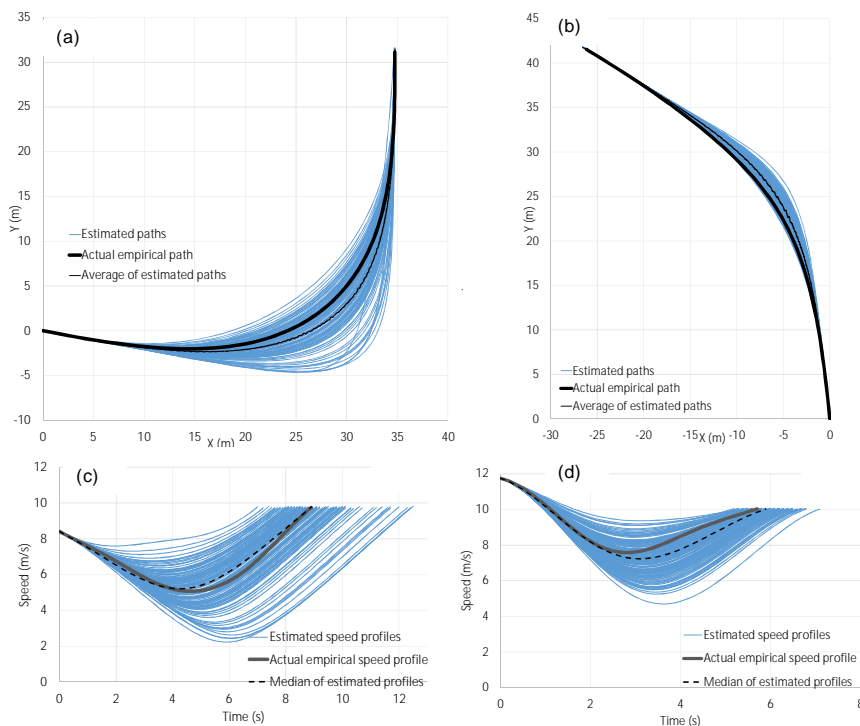


図3：左折車両軌跡の推定結果と観測値 (a)西大須交差点軌跡, (b)植田一本松交差点軌跡, (c)西大須交差点速度推移, (d)植田一本松交差点速度推移

また、図4は車両ごとの流入と流出の位置・速度分布を考慮して、確率的な走行軌跡分布を

モンテカルロシミュレーションにより求めたものである。複数の車両の走行分布を比較しても、車両の速度プロファイル、移動軌跡双方について実測と推定結果に差異は見られない。このことから、本手法が車両軌跡の再現に有効であることが示された。

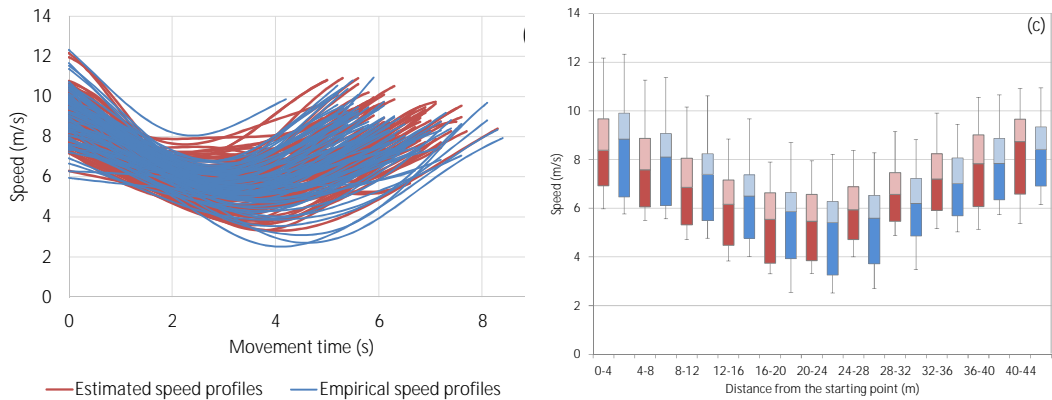
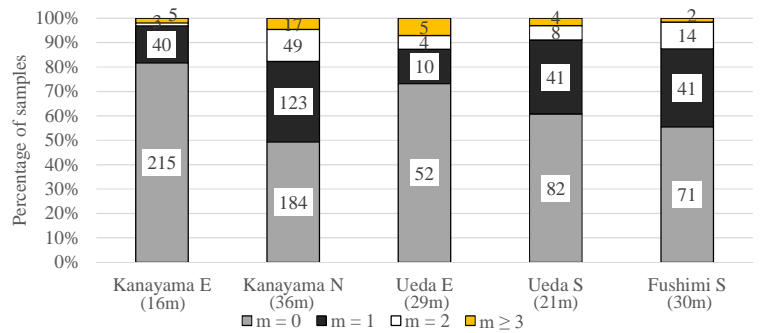


図4 速度プロファイルの観測値と推定値の比較(a)個別車両の速度推移、(b)車両位置ごとの速度分布

(2)横断歩行者の横断判断・速度変更判断分析とモデリング

名古屋市内の3交差点5横断歩道における歩行者の挙動データから、横断歩道上における歩行者の0.5m/s以上の速度変化を行った頻度を抽出したのが図5である。20~50%の割合の歩行者が少なくとも一度速度変化を行っていることがわかる。この速度変化確率の影響要因について、多項ロジットモデルにより推定を行ったのが表1である。ここで、 V_{nec} は青点滅終了までに渡り切るのに必要な速度、 V_{cur} は現在の速度である。 V_{nec} と V_{cur} の差分が特に加速選択で有意となっている。これは、歩行者は周辺の歩行者等の位置や交差点の規模から、経験的に青点滅終了までの時間が分かっており、それに応じて速度調整を行うためと考えられる。また、右左折車両との交錯地点とそれ以外でも速度変更確率が異なることが分かる。

また図6は、表1の結果をもとに、歩行速度1.5m/s、交錯領域の反対側から横断を開始する歩行者の速度変化確率を時空間上に示したものである。このように、速度変



m: number of speed change events per pedestrian. Crosswalk length is shown in the parentheses.

図5 横断歩道ごとの歩行者速度変更頻度

表1 速度変更確率モデル推定結果

		係数 (t値)	
青点滅開始前	加速	定数項	-0.969 (-4.17)
		$V_{nec}-V_{cur}$ (m/s)	1.65 (6.18)
		交錯領域ダミー	-0.597 (-2.94)
	減速	定数項	-2.05 (-11.7)
		$V_{nec}-V_{cur}$ (m/s)	-0.190 (-1.37)
		加速経験ダミー	1.45 (6.82)
	交錯領域ダミー	-1.12 (-3.89)	
青点滅開始後	加速	定数項	-0.529 (-4.91)
		$V_{nec}-V_{cur}$ (m/s)	0.0571 (2.39)
		交錯領域ダミー	0.911 (3.05)
	減速	定数項	-1.53 (-5.00)
		V_{cur} (m/s)	0.371 (2.69)
		加速経験ダミー	3.12 (15.0)
	交錯領域ダミー	-0.67 (-4.92)	
サンプル数	4009		
初期尤度	-2442		
最終尤度	-1379		
疑似決定係数	0.431		

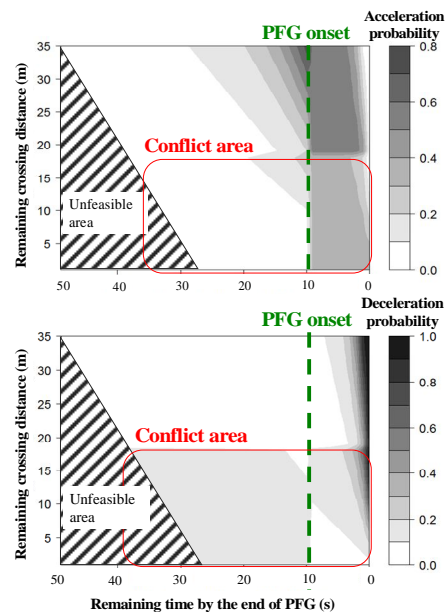


図6 加減速確率の時空間図(現在の歩行速度を1.5m/sと仮定した場合)

更の確率を歩行者の位置・時刻別に導出することができる。さらに、別途構築した加減速イベント後の速度モデルと組合せることで、速度変更行動を考慮して時々刻々の横断歩行者の位置・速度を求めることが可能となった。

(3) 車両と横断歩行者の挙動の組合せによる交差点安全評価と信号パラメータ検討

横断歩行者と車両の挙動モデルを組合せ、信号制御パターンごとの安全性検証をモンテカルロシミュレーションにより実施した。歩行者、車両の到着分布はそれぞれポアソン到着を仮定し、交差点への進入速度は実測値に基づく確率分布とした。

停止線位置から IP 点（流入車線と流出車線をそれぞれ交差点方向に延長した直線の交点）までの距離、および交差角別の右折車両の平均クリアランス時間を図 7 に示す。ここで、交差点への進入速度はいずれも 40km/h とした。交差点規模のみならず、交差角に応じて、クリアランス時間が変化することがわかる。

また、横断歩行者と左折車両との交錯危険性について、歩行者の横断開始時刻ごとに Post Encroachment Time の絶対値が 2 秒以下の歩行者の割合を描画したものが図 8 である。横断歩道長は 30m とし、歩行者青時間(PG)と青点滅時間(PFG)について、それぞれ 30 秒・10 秒の場合と 10 秒・30 秒の場合のシミュレーションを実施している。青点滅時間を延長することにより、PET が小さい歩行者の割合が減少している。歩行者が急な速度変更を行うことなく横断を行う結果、車両側が歩行者の行動を判断しやすくなり、適切に停止・通過の判断ができるようになった結果と考えられる。

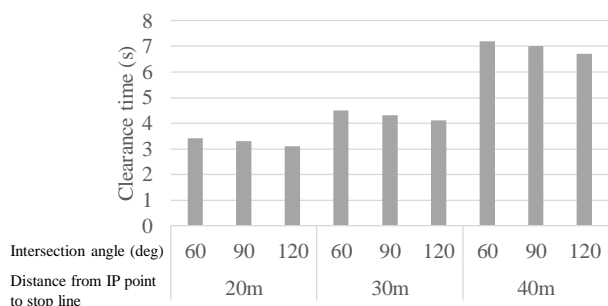


図 7：交差点構造別右折クリアランス時間の平均値

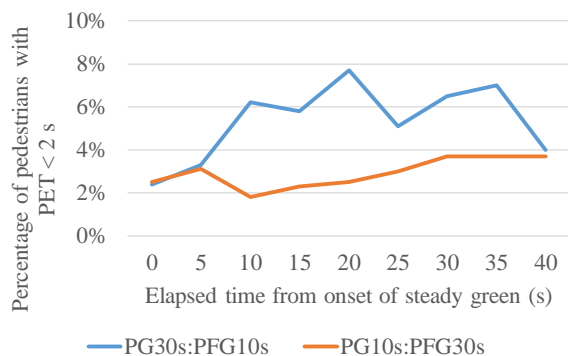


図 8：青点滅時間割合別・横断開始時刻別の Post Encroachment Time

(4) 成果のまとめ

本研究の成果は以下の通りである。

- ・ ジャック最小化原則を車両挙動モデルに適用し、幾何構造の影響を考慮した二次元的な車両の確率的挙動を物理法則との整合を保ちつつ表現することに成功した。
- ・ 信号表示の状況に応じた歩行者の急な加減速挙動に着目し、その発生確率を考慮した速度推移モデルを構築した。
- ・ これらを統合することにより、安全性を考慮した信号パラメータ設定の方法を提案した。

動線および安全性を適切に評価することにより、信号パラメータの最適化に必要な損失時間、青点滅時間のより適切な導出が可能となった。本研究の提案モデルはそのロバスト性の高さから、ラウンドアバウトや変形交差点等での適用も可能と考えられる。また、本研究は道路設計・信号制御への適用を目的としていたが、ドライビングシミュレータにおける交差点周辺での車両モデルの現実感向上、自動運転における危険度の高い歩行者の抽出性能の向上など、周辺分野への適用も期待される。

< 引用文献 >

- 1) 建設省土木研究所 (1979) 先回軌跡による隅角部の設計について、土木研究所資料。

- 2) Alhajyaseen W.K.M. et al. (2013) Stochastic approach for modeling the effects of intersection geometry on turning vehicle paths, Transportation Research Part C, vol.32, pp.179-192.
- 3) Flash, T. and Hogan, N. (1985) The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. Journal of neuroscience, 5(7), pp.1688-1703.
- 4) Wolfermann, A., Alhajyaseen, W.K. and Nakamura, H. (2011) Modeling speed profiles of turning vehicles at signalized intersections. In 3rd International Conference on Road Safety and Simulation RSS2011, Transportation Research Board, Indianapolis.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- 1) Iryo-Asano, M. and Alhajyaseen, W.K.M.: Modeling pedestrian crossing speed profiles considering speed change behavior for the safety assessment of signalized intersections, Accident Analysis & Prevention, Vol.108, pp.332-342, 2017. (DOI: 10.1016/j.aap.2017.08.028) 査読有
- 2) Dias, C., Iryo-Asano, M. and Oguchi, T.: Predicting Optimal Trajectories for Left Turning Vehicles at Signalized Intersections, Transportation Research Procedia, Vol. 21, pp.240-250 (International Symposium of of Transport Simulation International Workshop on Traffic Data Collection and its Standardisation (ISTS&IWTDCS)), 2017. (DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.093) 査読有
- 3) Iryo-Asano, M. and Alhajyaseen, W.: Consideration of Pedestrian Speed Change Model in the Pedestrian Vehicle Safety Assessment at Signalized Crosswalks, Transportation Research Procedia, Vol.21, pp.87-97 (International Symposium of of Transport Simulation International Workshop on Traffic Data Collection and its Standardisation (ISTS&IWTDCS)), 2017. (DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.080) 査読有
- 4) Gu, Y., Hashimoto, Y., Hsu, L.T., Iryo-Asano, M. and Kamijo, S.: Human-like motion planning model for driving in signalized intersections, IATSS Research, Vol.41, Issue 3, pp.129-139, 2017. (DOI: 10.1016/j.iatssr.2016.11.002) 査読有
- 5) Alhajyaseen W.K.M. and Iryo-Asano, M.: Studying critical pedestrian behavioral changes for the safety assessment at signalized crosswalks, Safety Science, Vol.91, pp. 351-360, 2017. (DOI: 10.1016/j.ssci.2016.09.002) 査読有
- 6) Hashimoto, Y., Gu, Y., Hsu, L.T., Iryo-Asano, M. and Kamijo, S.: A probabilistic model of pedestrian crossing behavior at signalized intersections for connected vehicles, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.71, pp. 164-181, 2016. (DOI: 10.1016/j.trc.2016.07.011) 査読有
- 7) Iryo-Asano, M., Alhajyaseen W.K.M. and Nakamura, H.: Analysis and Modeling of Pedestrian Crossing Behavior during Pedestrian Flashing Green Interval, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.16, No.2, pp.958-969, 2015. (DOI: 10.1109/TITS.2014.2346154) 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- 1) Dias, C., Iryo-Asano, M., Abdullah, M. and Oguchi, T.: A Method for Estimating Trajectories of Turning Vehicles at Signalized Intersections, 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2019. 査読有
- 2) Dias, C., Iryo-Asano, M. and T. Oguchi: Concurrent prediction of location, velocity and acceleration profiles for left turning vehicles at signalized intersections. 土木計画学研究・講演集, No.53, 2016. 査読なし
- 3) Park, H.J., Li, S., Yu, W., Alhajyaseen, W. and Iryo-Asano, M.: Pedestrian crossing behavior and compliance at signalized intersections, 17th International Conference Road Safety On Five Continents (RS5C 2016), Rio de Janeiro, Brazil, 12 pages, 2016. 査読なし
- 4) Iryo-Asano, M., Alhajyaseen, W.K.M., Zhang, X. and Nakamura, H.: Analysis of Pedestrian Speed Change Behavior at Signalized Crosswalks, 2015 Road Safety & Simulation International Conference, Orlando, USA, 13 pages, 2015. 査読有
- 5) Park, H.J., Alhajyaseen, W. and Iryo-Asano, M.: Comparative Analysis on the Maneuver of Turning Vehicles at Crosswalks in United States and Japan, 2015 Road Safety & Simulation International Conference, Orlando, USA, 14 pages, 2015. 査読有

6 . 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : Wael Alhajyaseen , Park H.Joon, Charitha Dias