

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14317

研究課題名(和文)歩行者と混在・協調する次世代車両の自動運転

研究課題名(英文)Automated driving of next-generation vehicles cooperating and mixed with pedestrians

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、1人乗りの小型車両であるパーソナルモビリティビークル(PMV)と歩行者が高密度に混合して安全に移動するために必要な、PMVの挙動および道路環境の要件を明らかにすることを目的とする。バーチャルリアリティ(VR)環境に、VR内のPMV・歩行者と被験者がインタラクティブに回避可能な歩行シミュレータを実装し、VR実験を通じてPMVの挙動や歩道幅員、歩行者密度と歩行者がPMVから受ける主観的危険度との関係を定量化した。

研究成果の概要(英文)：Personal mobility vehicle (PMV) is a small vehicle for one person which can move through pedestrian flow. This research aims at clarifying the requirement of PMV maneuver and road environment conditions to achieve safe mixed traffic between PMV and pedestrians. Virtual-reality-based walking simulator in which subjects and virtual PMV or pedestrians can interactively avoid each other is implemented. Through virtual reality experiments, the relationship between subjective danger level of pedestrians from PMV and several influencing factors such as PMV maneuver, sidewalk width, pedestrian density was quantitatively revealed.

研究分野：土木計画学・交通工学

キーワード：パーソナルモビリティ 歩行者 バーチャルリアリティ 混合交通 主観的危険度

1. 研究開始当初の背景

低速～中速域の走行を得意とするセグウェイ等の PMV は、道路等の移動空間を歩行者と混在して走行する。これまで PMV は、歩行者と PMV 双方の安全性を保証するため、回避が容易な低密度の混合交通での利用を前提としていた。しかし、低密度な空間のみでは移動範囲が制限される。PMV の本格的な普及には、高密度交通においても歩行者と混在しつつ、交通の安全性や円滑性を妨げることなく移動できる交通システムであることが求められる。しかし PMV の運転者は歩行者同士の回避に比べて余裕を持ったリスク回避型の行動選択を行うため、移動空間の限られた高密度下では通行が困難となると予想される。

自動運転技術は、運転者の回避行動をサポートするために極めて有用である。PMV における衝突回避は、交通量の少ない状況下での他者の急な飛び出しを回避するといったシナリオを想定しており、高密度下での回避を対象とするものは申請者の知る限りでは見当たらない。特に、高密度では相手の戦略を考慮して譲り合う協調行動が不可欠であることが知られており、自動運転にも歩行者との協調行動の実装が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、PMV と歩行者が高密度に混合して安全に移動するために必要な、協調自動運転および道路環境の要件を提示することを目的とする。その際、PMV 側だけでなく、PMV と相対する歩行者側も違和感なく協調して回避できるシステムが求められる。そのため、1)歩行者-PMV 間の相互回避行動特性のモデル化、および 2)PMV の挙動に応じて歩行者が PMV から受ける主観的な危険度のモデル化を行い、3)安全性・円滑性を担保する PMV の移動ロジックの条件と道路環境条件の導出方法を整理する。

3. 研究の方法

(1)歩行者-PMV 間の相互回避特性の分析

歩行者に比べると PMV は相対的に速度が高く、また加速度が小さい。そのため、PMV には他の歩行者等に急速に接近することができる一方で急な速度変更は難しい。このことから、PMV と歩行者の回避においては、将来の行動をある程度互いに予測していると考えることが自然である。将来の状況を考慮した歩行者行動モデルの 1 つとして、Johansson et al. (2007)の提案するモデルがある。これは、歩行者の加速度を、希望速度ベクトルに合わせようとする力と他の移動体から受ける反発力の合力に基づき説明する Social Force モデルの一種であり、他の移動体からの反発力に自分と他者の相対速度項を

考慮したものである。このモデルでは歩行者 i の時刻 t における加速度は式(1)で表される。

$$\frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \frac{v_i^0 \vec{e}_i - \vec{v}_i}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij}(t) + \sum_l \vec{f}_{il}(t) + \vec{\xi}_i(t) \quad (1)$$

ここで、 \vec{v}_i は歩行者 i の速度、 τ_i は緩和時間を表す定数、 v_i^0 と \vec{e}_i はそれぞれ歩行者 i の望ましい速度と進みたい方向、 $\vec{f}_{ij}(t)$ と $\vec{f}_{il}(t)$ はそれぞれ歩行者 i が他の歩行者 j 、障害物 l から受ける心理的な仮想上の反力 (Social Force)、 $\vec{\xi}_i(t)$ はランダム項を表す。

他の歩行者から受ける反力 $\vec{f}_{ij}(t)$ は式(2)のように、式(3)で示される異方性項 w と式(4)で示される距離・相対速度項 \vec{V}_{ij} の積で表現される。

$$\vec{f}_{ij} = w(\varphi_{ij}(t), \lambda_i) \vec{V}_{ij}(\vec{d}_{ij}(t), b_{ij}(t), \vec{y}_{ij}(t)) \quad (2)$$

ここで、 λ_i は異方性の大きさを表すパラメータ、 $\varphi_{ij}(t)$ ($0 < \varphi_{ij}(t) < \pi$) は、 $\vec{d}_{ij}(t)$ を歩行者 i, j 間の変位ベクトルとして、歩行者 i の望ましい方向のベクトル \vec{e}_i と $\vec{d}_{ij}(t)$ 間の角を表す。

$$w(\varphi_{ij}(t), \lambda_i) = \left(\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\varphi_{ij}(t))}{2} \right) \quad (3)$$

$$\vec{V}_{ij}(\vec{d}_{ij}(t), b_{ij}(t), \vec{y}_{ij}(t))$$

$$= A_i \exp\left(\frac{-b_{ij}}{B_i}\right) \cdot \frac{\|\vec{d}_{ij}\| + \|\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}\|}{2b_{ij}} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\vec{d}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij}\|} + \frac{\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}\|} \right) \quad (4)$$

ここで、 A_i は歩行者間の影響の強さを表すパラメータ、 B_i は影響の範囲を表すパラメータである。 $\vec{y}_{ij}(t)$ は歩行者 i, j の相対速度を考慮した、歩行に必要なスペースを表しており式(5)で与えられる。

$$\vec{y}_{ij}(t) = (\vec{v}_i(t) - \vec{v}_j(t)) \Delta t \quad (5)$$

ここで、 $\vec{v}_i(t)$ と $\vec{v}_j(t)$ は時刻 t における歩行者 i と j の速度、 Δt は先読み時間を表すパラメータである。また b_{ij} は $\vec{y}_{ij}(t)$ を焦点間距離とした楕円の短径を表し、式(6)で与えられる。

$$2b_{ij}(t) = \sqrt{\left(\|\vec{d}_{ij}\| + \|\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}\|\right)^2 - \|\vec{y}_{ij}\|^2} \quad (6)$$

この式を用いて、セグウェイが歩行者から受ける力、歩行者がセグウェイから受ける力の各々についてパラメータ推定を行った。パラメータ推定には、東京大学(井料ら, 2016)および日本大学で過去に実施したセグウェイ-歩行者回避実験のビデオデータから、各被験者の移動軌跡を抽出したものをを用いた。

(2)バーチャルリアリティ（VR）環境の現実再現性検証

これまでに実験されてきたセグウェイ-歩行者混合交通は、いずれも十分に安全が確保された低密度の状況を対象としている。今回対象とするのはより高密度な歩行者交通流に PMV が混在する状況であるため、その再現に VR システムを利用した。

当初、神戸大学で所持するスクリーン投影型の VR システムにて当該研究を実施する予定であった。しかし、ヘッドマウントディスプレイ(HDM)が安価に入手可能となったことから、より広く立体的な視野を確保することの可能な HDM を使用して研究を実施することを検討した。しかし、HDM 使用時におけるバーチャル環境の現実再現性については知見が不十分と考えられたため、現実空間と VR 空間での歩行者の主観的危険度認知特性について比較実験(実験1, 図1)を行い、まずこのシステムが本研究の実験目的に即した再現性を有するものかを検証した。

実験には、セグウェイ型の PMV の形状モデルを使用し、等速で接近するセグウェイに対して静止した歩行者(被験者)が感じる距離感や危険度を現実と VR とで比較評価した。

現実空間の実験では、東京大学生産技術研究所の地下アトリウムに被験者を立たせ、PMV が被験者の至近を通過する状況を経験させた。その後、同様の状況を VR 空間にて体験させた。VR 実験では、HDM として Oculus Rift を用いた。また、VR 空間構築にフォーラムエイト社の UC-Win/Road Ver 12.0 を使用し、

Oculus Rift および付属のセンサーと接続することで、HDM を装着した被験者のヘッドセットの 3 次元の位置座標や方向が VR 空間にリアルタイムに反映されるようにした。

被験者には「被験者と PMV との距離が 1m になったと思った時点でボタンを押す」「通過時に危険と感じたかどうかを 7 段階評価する」の 2 つのタスクを与えた。被験者の向き、PMV の接近速度、PMV と被験者の最接近距離を変化させて計 15 種類のシナリオを作成し、現実と VR で各 2 回実施した。

(3)PMV に対する歩行者の主観的危険度の影響要因評価実験

歩行者が PMV から受ける主観的危険度には、歩道幅員や歩行者密度等の周辺環境や、PMV そのものの挙動が影響していると考えられる。そこで、これらの影響要因を変化させた VR 環境を設定し、その中を被験者に歩かせる実験を行うことにより、主観的危険度の影響要因分析を行った。

実験は、VR 空間に表現した歩行者-PMV 混在交通において、被験者が歩行者として他の歩行者や PMV を回避しながら移動するものである(実験2, 図2)。実験1では PMV は決められた走行軌跡にて走行するのみであったが、実験2の PMV や周辺歩行者は被験者を含む周辺他者の情報から Johansson モデルに基づいてリアルタイムに加速度を決定するものであり、被験者とインタラクティブに回避をすることが可能である。

実験のシナリオは(2)の実験結果を踏まえつつ設計し、歩道幅員(2m, 3m, 3.5m, 4m)、



図1 現実再現性検証実験の様子
(上: 現実環境, 下: VR 環境)



図2 歩行シミュレータの様子
(上)ヘッドセットを被る被験者(下)被験者が見ている VR 空間

PMV の挙動特性、歩行者密度(0.1 人/m², 0.3 人/m²)の異なる計 44 シナリオを作成した。PMV の挙動特性の表現には 2 種のパラメータを用いた。1 つは希望速度 v_i^0 であり、5km/h と 6km/h の 2 ケースを実施した。もう 1 つはセグウェイの歩行者に対する force の感度を示す新たなパラメータ R である。このパラメータ R は、式(4)の距離・相対速度項に乗じる重みづけパラメータであり、通常は 1 である。シナリオでは、セグウェイが歩行者から受ける force に対してのみ、 $R = 1, 0.2$ の 2 種類のケースを設定した。歩行者が歩行者またはセグウェイから受ける force は全て $R = 1$ とした。

これらを 2 回ずつ、40 名の被験者に対して実施した。個々のシナリオの実施後に、被験者に対して毎回口述によるアンケートを行った。アンケートでは、PMV に対する危険度(7 段階評価)、危険と感じた場合にはその理由、シナリオ内での歩行の自由度(5 段階評価)を問うた。シナリオの実施順序は、被験者ごとにランダムに組み替えた。

(4)主観的危険度評価に基づく、歩行者と共存可能な PMV の要件導出方法の整理

(3)で得られた知見をもとに、歩行者が安心して移動するために必要な PMV の挙動要件・周辺環境要件を導出する方法を整理した。

4. 研究成果

(1)歩行者-PMV 間の相互回避特性の分析

Cross-entropy 法(De Boer et al, 2005)を用いて、実験データからセグウェイから歩行者(セグウェイ 歩行者)、歩行者からセグウェイ(歩行者 セグウェイ)に与える force パラメータの推定をそれぞれ行った。その結果を表 1 に示す。歩行者がセグウェイから受ける力では、力全体にかかるパラメータ A は大きく、距離に対する感度パラメータ B は小さくなっていることが分かる。したがって、歩行者はセグウェイに対して比較的距離によらず force を受けるのに対し、セグウェイは歩行者までの距離に高い感度を持って force を受けていることがわかる。

表 1 Force パラメータの推定結果

パラメータ	交錯の種類	
	セグウェイ 歩行者	歩行者 セグウェイ
A (m/s ²)	1.72 (± 0.54 SD)	1.35 (± 0.39 SD)
B (m)	0.69 (± 0.19 SD)	1.77 (± 0.88 SD)
Δt (s)	2.47 (± 1.08 SD)	2.85 (± 0.86 SD)

(2) VR 環境の現実再現性検証

現実(RS)と VR 空間両方の実験において、「被験者がボタンを押した」=「PMV との距離が 1m になったと認識した」時点での実際の被験者と PMV との距離を図 3 に示す。凡例中の「前方」「後方」等は、被験者の向きに対する PMV の接近方向を示している。ま

た、60~100cm の距離は、PMV が被験者に最接近したときの被験者と PMV との距離を示す。RS でも VR でも、全体的に 1m よりも長い距離でボタンを押す傾向がみられるが、特に PMV が被験者の後方から接近する場合に、VR と RS とのボタン押下タイミングが有意に異なる。

図 4 は、PMV の接近に対する主観的な危険度を 7 段階で評価してもらったものである。ここからは、側方から PMV が接近した際には VR では RS に比べて全体的に有意に危険と評価していることがわかる。また、RS に比べて、VR では側方余裕の変更に対する危険度の感度が小さいことも分かる。

これらの結果からは、VR においても、特に前方から車両が接近する限りにおいては、距離感や危険度が RS と変わらないことが明らかになった。

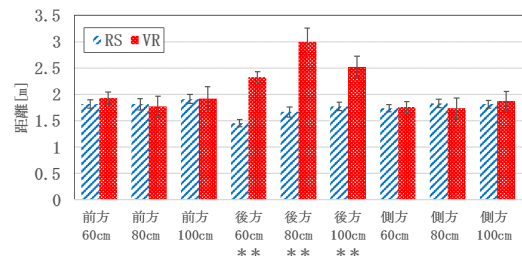


図 3 ボタンを押した時の実際の距離の平均

注 1: シナリオ名下方の記号は RS・VR 間の有意差を示す。*: 5%, **: 1%の水準で有意差有り。
注 2: 低速 6km/h シナリオのみの結果である。
注 3: 各シナリオ、RS・VR それぞれのサンプル数は n = 64。

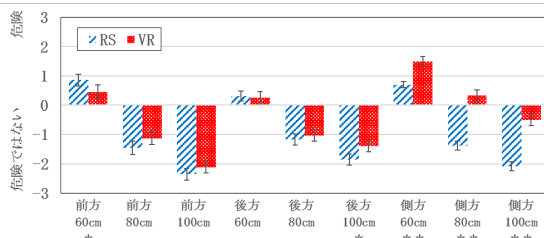


図 4 危険度に対する主観的評価の平均

(3)PMV に対する歩行者の主観的危険度の影響要因分析

実験 2 におけるシナリオの要素と、各シナリオで回避の結果実際に実現した PMV の挙動、そして被験者の危険度・移動制約度の評価点との関連性を共分散構造分析によって検証した。図 5 にその結果を示す。この図から、歩道幅が狭い場合、最接近距離が短くなり主観的な危険度が大きくなる、という基本的なメカニズムが示唆される。しかしその一方で、歩道幅・最接近距離以外に危険度に影響を与える指標として、「実際の速度」が挙げられることもわかる。また図を見ると、実際の速度は歩道幅によらず、ほぼ希望速度と挙動パラメータ R によって決まることが分かる。つまり外的環境によらず実際の速度をコントロールすることが可能だということだ

ある．このことから，最接近距離が近い場合でも，実際の速度を十分に低く抑えることができれば，主観的危険度を小さくすることができる可能性が示唆される．

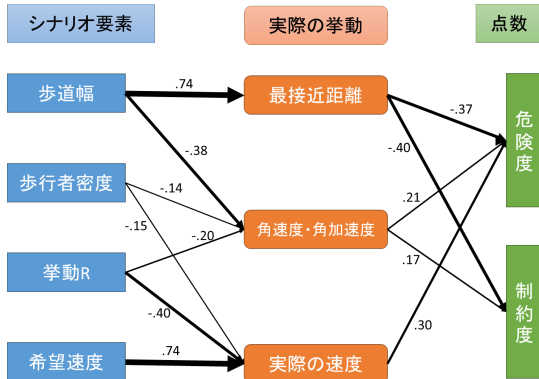


図5 共分散構造分析

また，より詳細に歩行者とPMVの回避挙動と主観的危険度を関連付けるモデルとして，Social Forceモデルに着想を得た主観的危険度インデックス(SDI)モデルを提案した．これは，歩行者のPMVに対する主観的危険度をPMVとの相対速度，相対距離と方向により記述するものである．

ある時刻 t における歩行者 i のPMV j に対するSDIは式(7)のように表すことができる．

$$SDI_{ij}(t) = \alpha_i(\phi_{ij}) \exp\left(\frac{-b_{ij}}{\beta_i(\phi_{ij})}\right) \quad (7)$$

ここで α_i は歩行者とPMVs間の影響の強さを， β_i はその影響の範囲を表すパラメータであり，それぞれ式(8)(9)のように書ける．

$$\alpha_i(\phi_{ij}) = C_A + \lambda_A \cos(\phi_{ij}) \quad (\lambda_A > 0) \quad (8)$$

$$\beta_i(\phi_{ij}) = C_B - \lambda_B \cos(\phi_{ij}) \quad (\lambda_B > 0) \quad (9)$$

ここで， $\phi_{ij}(t)$ ($0 < \phi_{ij}(t) < \pi$) は， $\vec{d}_{ij}(t)$ を歩行者 i からPMV j への時刻 t のときの変位ベクトルとして，歩行者 i の望ましい歩行方向のベクトル \vec{e}_i と $\vec{d}_{ij}(t)$ 間の角を表す．また C_A ， λ_A ， C_B ， λ_B は推定すべきパラメータである．

SDIモデル推定においては，実験アンケートの7段階の危険度評価値を0(危険でない)~6(危険)と，最小値が0となるように置き換えて推定した．その結果を表2に示す．

図6は，推定したモデルについて，各シナリオの実測値SDIの平均値とSDIモデルの推定値の平均を散布図としてプロットしたものである．決定係数は0.91となっており，SDIモデルはシナリオ毎の平均的な傾向をよく表していると言える．ただし，歩道幅2mのシナリオでは，SDIモデルは危険度を過大評価し，歩道幅4mのシナリオでは危険度を過小評価する傾向がみられる．実際には，狭幅

表2 SDIモデルパラメータ推定値

パラメータ	C_A	λ_A	C_B	λ_B	Δt
推定値	10.95	7.21	0.77	0.31	2.85

注：実測値とモデル推定値の決定係数は R^2

員の場所ではPMVの移動の自由度も小さく例え接近していてもその車両が急に自分に近づくなどの危険な状況は発生しにくいと認知しているためと考えられる．一方，広幅員ではPMVとの距離があっても移動の自由度が高く，急に近づく可能性が否定できないことから，潜在的な危険性を感じている可能性がある．このような行動の変動可能性に基づく危険度の感じ方については，今後の分析課題としたい．

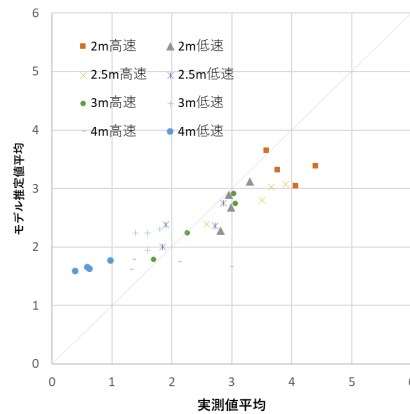


図6 SDIモデル適合度

(4)歩行者と共存可能なPMVの要件導出方法

前節で提案したSDIモデルを逆関数として解くと，SDIを一定値以下に保つためのPMVの速度要件が求められる．PMVに時々刻々の最高速度制約を与えることで，安全性を保ちつつ歩行者・PMVの混在交通の実現ができる．これを交通シミュレーションに実装し，挙動のデモンストレーションを行った．

また，SDIを周辺環境から集計的に説明する線形重回帰モデルを表3の通り推定した．決定係数は小さいものの，PMVの挙動や歩道幅が有意となっている．これを用いて同様に，SDIを一定値以下とするために必要なPMVの最高速度と歩道幅員の制約条件を簡便に求めることが可能となった．

表3 SDI重回帰モデル結果

	係数	t値
歩道幅(m)	-0.67	-35.56
歩行者密度(人/m ²)	0.12	0.89
PMVの最高速度(km/h)	0.35	21.47
切片	3.54	48.12
修正済み決定係数	0.402	

(5)成果のまとめ

本研究では，PMVが歩行者と安全に共存で

きるための道路環境・PMV 走行要件について検討した。本研究の成果は以下の通りである。

- ・ 歩行者行動モデルを援用した PMV 挙動モデルを提案し、走行実験データから PMV-歩行者間の回避挙動パラメータ推定を行った。
- ・ HMD を用いた VR 実験において、前方から接近する PMV に対する歩行者の距離感には現実との差異はないこと、主観的危険度も現実より感度はやや小さいものの、同様の傾向を示すことを確認した。
- ・ 被験者と周辺歩行者や PMV とがインタラクティブに回避しあうことのできる VR 環境を構築し、PMV の挙動パラメータや歩道幅員、歩行者密度といった要因が歩行者の主観的な移動制約度や危険度に影響を与えることを明らかにした。
- ・ Social force モデルに着想を得て、PMV と歩行者との相対的な位置や速度を説明変数とする、歩行者が PMV から受ける主観的危険度のモデル化を行った。
- ・ 主観的危険度の閾値を満たすための周辺環境・PMV 挙動要件を導出する手法を提案した。

以上、PMV と歩行者が安全に協調するための要件を導出するという当初目標を達成するとともに、VR を用いた実験環境の特性についてもある程度整理することができた。

今後の課題は以下の通りである。まず前述の考察の通り、主観的危険度インデックスモデルの精査・改良が必要である。また最終的な周辺環境要件の導出では、集計的な重回帰モデルを用いているが、同じ環境でも PMV との回避状況によって主観的危険度の値のばらつきが大きい。提案したマイクロな SDI モデルや交通シミュレーションを組み合わせ、より精緻に主観的危険度の分析を行う必要がある。さらに、VR で検証した内容を現実空間でも追加検証することが求められる。

<引用文献>

Johansson, A. et al. (2007) Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data. *Advances in Complex Systems*, 10(02), 271-288.

井料美帆, チャリタディアス, 加藤弘則, 霜野慧亮, 中野公彦 (2016) 歩行者・自転車に反応するパーソナルモビリティ挙動の実験的分析, *生産研究*, Vol.68, No.4, pp.281-284.

De Boer, P. T., Kroese, D. P., Mannor, S., & Rubinstein, R. Y. (2005). A tutorial on the cross-entropy method. *Annals of operations research*, 134(1), 19-67.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

Hasegawa, Y., Dias, C., Iryo-Asano, M. and

Nishiuchi, H.: Modeling Pedestrians' Subjective Danger Perception toward Personal Mobility Vehicles, *Transportation Research Part F* (掲載決定, 査読有)

長谷川悠, 井料美帆: パーソナルモビリティに対する歩行者の認知に着目したヴァーチャルリアリティの適応可能性の検討, *交通工学論文集*, Vol. 4, No.1, p.A_147-A_153, 2018. (査読有)

https://doi.org/10.14954/jste.4.1_A_147

Dias, C., Iryo-Asano, M. and Nishiuchi, H.: Evaluation of Safe Avoidance Distance for Pedestrians in Personal Mobility Vehicles and Pedestrian Mixed Traffic: A Simulation Based Study, *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 12, pp.1994-2005, 2017. (査読有)

<https://doi.org/10.11175/easts.12.1994>

[学会発表](計 4件)

長谷川悠, 井料美帆: ヴァーチャルリアリティ環境での歩行者実験に適した歩行者モデルの開発, 第15回 ITS シンポジウム 2017, 2017.12. (査読なし)

Dias, C. and Iryo-Asano, M.: Evaluating Collision Risk on Personal Mobility Vehicle Involved Shared Spaces, *土木計画学研究・講演集*, Vol.56, 9 pages in CD-ROM, 2017.11. (査読なし)

長谷川悠, 井料美帆, Charitha Dias: パーソナルモビリティに対する歩行者の主観的危険度インデックスモデルの提案, *土木計画学研究・講演集*, Vol.56, 8 pages in CD-ROM, 2017.11. (査読なし)

Dias, C., Iryo-Asano, M., Shimono, K. and Nakano, K.: Calibration of a Social Force-based Shared Space Model for Personal Mobility Vehicle and Pedestrian Mixed Traffic, 96th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., 17 pages, 2017.01. (査読有)

6. 研究組織

(1)研究代表者

井料 美帆 (IRYO, Miho)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号: 80469858

(2)研究分担者

井料 隆雅 (IRYO, Takamasa)

神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10362758

(3)研究協力者

チャリタ ディアス (DIAS, Charitha)

長谷川 悠 (HASEGAWA, Yu)