

パーソナルモビリティビークルの 交錯回避行動規範の実験的分析

井料(浅野) 美帆¹・井料 隆雅²・杉森 千恵³

¹正会員 東京大学講師 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
E-mail:m-iryo@iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail:iryo@kobe-u.ac.jp

³正会員 西日本旅客鉄道株式会社 (〒530-8341 大阪市北区芝田2-4-24)
E-mail:chie-sugimori@westjr.co.jp

セグウェイのような倒立振り子のパーソナルモビリティビークル(PMV)を普及させるためには、他の道路利用者との様々な条件下での交錯回避行動を理解し、安全性を確保することが必要である。本研究では、PMVと他の移動体との動線が交錯する状況におけるPMVの回避行動規範を明らかにすることを目的とする。特に他者との交錯領域において、PMVが他者の軌跡の前方・後方のいずれを通過するかという点に着目した。前方回避、後方回避それぞれを仮に行った場合の予測旅行時間を導出し、その旅行時間差と走行実験におけるPMVの回避結果との関係を分析した結果、PMVは予測旅行時間がより小さくなる方を選択しがちであること、同じ予測旅行時間であれば相手との衝突リスクの少ない後方回避を選択する傾向があることが示された。

Key Words : *Personal Mobility Vehicles, collision avoidance, experiment, crossing conflict, anticipated travel time*

1. はじめに

パーソナルモビリティビークルとは、小型で1~2人乗りの電動車両のことをさす。小回りが利き必要なスペースが小さいこと、電力消費が小さいことなどから、自動車からの転換による低炭素社会への寄与が期待される。

しかし、パーソナルモビリティビークルの一形態である、セグウェイに代表される倒立振り子型車両（以下では、このタイプの車両をPMVと呼ぶ）は、日本では道路交通法上公道での通行が認められておらず、また海外でも必ずしも普及しているとは言いがたい。これは、PMVが他の車両・歩行者等と混在するときの行動特性、安全性が十分に明らかになっておらず、車両特性に即した交通運用方法が定まっていないことも要因と考えられる。

PMVの運転挙動に関する既往研究には、歩行者との回避における前方・側方余裕を実験により分析したもの¹⁾がある。また中根ら³⁾は、セグウェイの公道走行を想定した実験を行い、単独走行および歩行者・自転車との混在時の社会的受容を評価した。しかしこれらの分析は単路での行動、すなわち一方向または並行する対向方向

からの交通との交錯分析のみで、本来重要視すべき、交差点や広場空間などの動線が交錯する区間での安全性確保に資する研究はほぼ見られないのが現状である。さらに、これらの実験は運転挙動の計測にとどまっており、PMVの走行挙動モデルの定式化に関する研究はほとんど行われていない。このほか、セグウェイレンタル実験の利用者の運転挙動蓄積データから、急減速等のイベント発生状況を分析した例⁴⁾もあるが、周辺状況に関するデータがなく、回避挙動の詳細を知ることはできない。

本研究は、PMVと他の移動体との動線が交差する状況を再現した実験によりPMVの回避挙動モデル構築に資する基礎的な知見を得ることを目的とする。特に、他者との交錯領域をどちらが先に通行するかという点は、挙動特性の理解や安全性の評価に重要であると考えられる。このため、分析では、PMVが他の移動体の軌跡の前方と後方のどちらを通過するかにもつばら着目した。

以下では、まずPMVの回避挙動についての理論的仮説を整理したうえで、仮説検証に向けた実験の概要を紹介する。その後、実験データと仮説より想定される回避挙動との比較検証を行う。

2. 回避行動に関する理論的仮説

(1) PMVの選択行動仮説

道路利用者同士が一对一で交錯を回避する場合、一般には二者の移動軌跡が時間的・空間的に交わらないよう速度や移動方向を調整することで回避を行う。自動車の交錯回避では、加減速により自車の交錯点通過時刻を調整する時間的回避が主な回避行動である。これに比べてPMVは小回りが利き、歩行者に近い占有スペース・速度での二次元的な移動が可能であるため、自車両の移動方向を変更することで他者との交錯点位置および通過時間差を調整する空間的回避を併用することができる。したがって、PMVの行動分析では、時間・空間的回避の双方を同時に考慮できる枠組みが必要となる。これには、歩行者の行動モデルの考え方を援用する。Asano et al.⁹⁾の歩行者モデルは、「相手の行動を先読みし、近い将来にわたり周辺歩行者に衝突しない」という制約条件下で最も早く目的地に移動できる移動軌跡を選択するもので、交差交通の回避に有効なモデルである。

本論文では、PMVも歩行者と同様に、最小旅行時間で目的地にたどり着くことのできる軌跡を選択し回避を行う、という行動規範を設定する。この行動規範を基にした幾何学的計算を行い衝突回避モデルを導出する。具体的には、(2)節で回避時にPMVが取れる軌跡を近似的に設定し、(3)および(4)節でそれを前提とした旅行時間の計算を行い、最小旅行時間を達成する軌跡を特定する。

一方、上述の行動規範は、衝突回避という文脈ではやや理想的すぎるかもしれない。特に、PMVが交錯点を他者よりも先に通行する前方回避では、他者の交錯点の通行を待ってから交錯点に進入する後方回避に比べて、他者と衝突する可能性のあるリスクが生じる。歩行者よりも速度が高く、衝突時の不効用が高いPMVでは、このようなリスクの存在が、実際の回避行動において、最小旅行時間という行動規範からのバイアスを誘発するかもしれない。本研究ではバイアスについては行動規範そのものには含めない。実験結果が行動規範からどれだけずれるかを、2項ロジットモデルにより統計的に評価し、上記で論じたバイアスがどの程度存在するかを調べる。

(2) 分析対象交錯パターンとPMVが取りうる軌跡の仮定

本論文で想定する交錯のパターンは、図-1のように対象とするPMVともう1つの移動体（PMV、歩行者など）の動線が角度 θ で交差する状況である。この状況は θ の大きさにより2つに分類される。すなわち、 θ が鋭角のとき（追従交差と名付ける）、鈍角のとき（対向交差と名付ける）の2つである。対象PMVと相手の移動体は、

ともに一辺の長さ a の正方形の大きさを持つとする。これらの動線が交錯する領域に、同時に二者が到達する場合に衝突の可能性がある。衝突しなければならない状況であれば、二者は何らかの操舵により回避行動をとる。

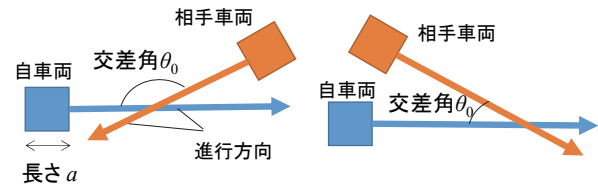


図-1：想定する交錯パターン(左：対向交差の場合、右：追従交差の場合)

本研究では、相手は回避行動を一切行わない（そして、そのことをPMVの操縦者も知っている）際のPMVの回避行動を調べる。実際には相手との間で相互に譲り合うなど、状況に応じて走行の優先順位が変動すると考えられるが、本研究では優先順位の判断のような複雑な意思決定を考慮せず、相手は回避することがない、ということ为前提とした回避行動に着目した。PMVは、等速で移動する相手が交錯領域を通過する時刻を予測し、速さや移動方向を変更することで衝突回避を行うとする。

図-2の交錯状況でPMVが回避時に取る軌跡に対する仮定を設定する。以降では、実際のPMVで実現可能な複雑な曲線や加減速については完全に捨象し、PMVの軌跡を直線的なもので近似する。また、加減速についても、等速進行と停止の2つだけで近似する。PMVは希望する方向へ希望速度 v_p で移動しており、仮に方向を変化させなければ基準交錯中心点を中心とする交錯領域（図の網掛け部分）で相手と動線が交錯する。相手と自車の双方がこの交錯領域に同時に入ると衝突の可能性がある。このとき、仮にPMVが元の希望動線からの変位角 ϕ （希望方向を0とし、右方向を正とする）で移動すれば、相手との交錯点中心は予測交錯中心点に移り、自車両・相手車両の交錯領域通過時刻も変化する。自車両は、この軌跡上にて相手と衝突しないよう必要に応じて停止し、相手の動線との交錯領域を通過する。完全に交錯領域を通過したのち、元の希望動線と並行する方向へと方向転換し、再び希望速度 v_p で移動する。この移動軌跡の前提のもとでは、変位角 ϕ を決めれば自車両が前方回避を行うか、後方回避を行うかは一意に定まり、その時の旅行時間も導出される。前方回避の選択肢を代表する旅行時間は、選択可能な変位角の範囲内で前方回避と判定されるケースのうち、最小の旅行時間となる。後方回避を代表する旅行時間も同様である。

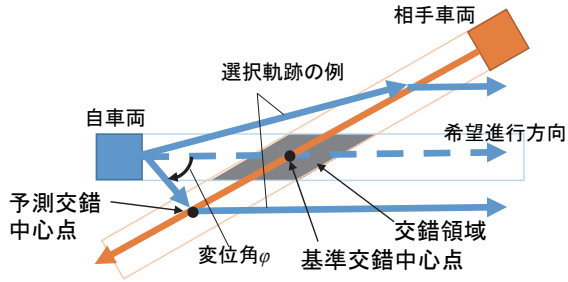


図-2：PMVが選択可能な軌跡の例

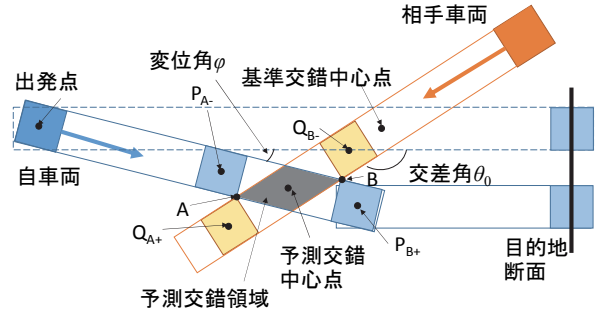


図-3：対向交差の場合

(3) 鈍角（対向）交差の場合の回避行動モデルの導出

希望方向同士の交差角度 θ_0 が鈍角で、自車両が変位角 φ で移動するときの移動軌跡を図-3に示す。自車両の出発点から予測交錯中心点までと、予測交錯中心から目的地断面までの距離をそれぞれ $L_1(\varphi), L_2(\varphi)$ とする。出発点から基準交錯中心点までと、基準交錯中心から目的地断面までの距離 $L_1(0), L_2(0)$ は所与とする。

図-3のように予測交錯領域端の点 A, B をとり、自車両前方端が点 A と接する時刻、自車両後方端が点 B と接する時刻をそれぞれ $t_{PA-}(\varphi), t_{PB+}(\varphi)$ とする。同様に、相手車両前方端が点 B と接する時刻、後方端が点 A と接する時刻をそれぞれ $t_{QB-}(\varphi), t_{QA+}(\varphi)$ とする。

自車両の出発点から目的地断面までの旅行時間 $T(\varphi)$ は、

$$T(\varphi) = t_{free}(\varphi) + t_{wait}(\varphi) \tag{1}$$

である。ただし、 $t_{free}(\varphi)$ は出発点から目的地断面までの自由走行時間、 $t_{wait}(\varphi)$ は相手車両の通過待ちをした場合の待ち時間である。自車両が速度 v_p で移動したとき、相手車両に衝突せず自車両が先に交錯領域を通過する（前方回避）ための条件は、

$$t_{PB+}(\varphi) < t_{QB-}(\varphi) \tag{2}$$

となる。相手車両が先に交錯領域を通過する場合のうち、通過待ちによる停止がない、すなわち $t_{wait}(\varphi) = 0$ となるための必要十分条件は、

$$t_{PA-}(\varphi) > t_{QA+}(\varphi) \tag{3}$$

である。ただし、

$$t_{PB+}(\varphi) = t_0^p(\varphi) + \frac{f(\varphi)}{v_p}, \tag{4}$$

$$t_{PA-}(\varphi) = t_0^p(\varphi) - \frac{f(\varphi)}{v_p}, \tag{5}$$

$$t_{QB-}(\varphi) = t_0^q(\varphi) + \frac{f(\varphi)}{v_q}, \tag{6}$$

$$t_{QA+}(\varphi) = t_0^q(\varphi) + \frac{f(\varphi)}{v_q}, \tag{7}$$

$$f(\varphi) = \frac{a}{2} \left(\frac{1}{\tan(\theta_0 - \varphi)} + \frac{1}{\sin(\theta_0 - \varphi)} + 1 \right). \tag{8}$$

とした。ここで、 $t_0^p(\varphi), t_0^q(\varphi)$ はそれぞれ、自車両と相手車両が希望速度で移動した時の予測交錯中心点通過時刻である。これらの予測通過時刻の差である $t_0^p(\varphi) - t_0^q(\varphi)$ は、自車両と相手車両の基準交錯中心点通過時刻差 $t_{diff} = t_0^p(0) - t_0^q(0)$ を所与とすることで

$$t_0^p(\varphi) - t_0^q(\varphi) = t_{diff} - \frac{L_1(0) - L_1(\varphi)}{v_p} + \frac{L_q(\varphi)}{v_q} \tag{9}$$

と導出できる。ただし、 $L_q(\varphi)$ は、自車両の出発時刻における相手車両の位置と予測交錯中心点との距離を表す。

式(2)または(3)を満たさない場合、自車両は相手の交錯区間の通過を待つて走行する。この時の待ち時間は、相手の交錯区間通過完了時刻と自車両の交錯区間到達時刻との差分、すなわち

$$t_{wait}(\varphi) = t_{QA+}(\varphi) - t_{PA-}(\varphi)$$

で表される。

(4) 鋭角（追従）交差の場合の回避行動モデルの導出

同様に、希望方向同士の交差角度 θ_0 が鋭角で、自車両が変位角 φ で移動するときの移動軌跡を図-4に示す。交錯回避の基本的な考え方は鈍角の場合と同様であるが、鋭角の場合は相手が先に交差領域に入る際、相手が通過完了する前に自車両が相手に追従して交差領域に進入することができる点が鈍角とは異なる。

図4のように予測交錯領域端の点 C, D をとり, 自車両前方端と後方端が点 C と接する時刻をそれぞれ $t_{PC-}(\varphi), t_{PC+}(\varphi)$, 自車両前方端と後方端が点 D と接する時刻をそれぞれ $t_{PD-}(\varphi), t_{PD+}(\varphi)$ とする. 同様に, 相手車両前方端, 後方端が点 C と接する時刻をそれぞれ $t_{QC-}(\varphi), t_{QC+}(\varphi)$, 相手車両前方端, 後方端が点 D と接する時刻をそれぞれ $t_{QD-}(\varphi), t_{QD+}(\varphi)$ とする.

自車両が速度 v_p で移動したとき, 相手車両に衝突せず自車両が先に交錯領域を通過するための十分条件は,

$$t_{PC+}(\varphi) < t_{QC-}(\varphi) \text{ かつ } t_{PD+}(\varphi) < t_{QD-}(\varphi) \quad (10)$$

であり, 後方回避で, かつ相手車両の通過待ちをしない場合の条件は,

$$t_{QC+}(\varphi) < t_{PC-}(\varphi) \text{ かつ } t_{QD+}(\varphi) < t_{PD-}(\varphi) \quad (11)$$

ただし,

$$t_{PC-}(\varphi) = t_0^p(\varphi) - \frac{f(\varphi)}{v_p}, \quad t_{PC+}(\varphi) = t_0^p(\varphi) - \frac{g(\varphi)}{v_p},$$

$$t_{PD-}(\varphi) = t_0^p(\varphi) + \frac{g(\varphi)}{v_p}, \quad t_{PD+}(\varphi) = t_0^p(\varphi) + \frac{f(\varphi)}{v_p},$$

$$t_{QC-}(\varphi) = t_0^q(\varphi) - \frac{f(\varphi)}{v_q}, \quad t_{QC+}(\varphi) = t_0^q(\varphi) - \frac{g(\varphi)}{v_q},$$

$$t_{QD-}(\varphi) = t_0^q(\varphi) + \frac{g(\varphi)}{v_q}, \quad t_{QD+}(\varphi) = t_0^q(\varphi) + \frac{f(\varphi)}{v_q},$$

$$g(\varphi) = \frac{a}{2} \left(\frac{1}{\tan(\theta_0 - \varphi)} + \frac{1}{\sin(\theta_0 - \varphi)} - 1 \right) \quad (12)$$

である. 相手車両を待たなければならないとき, 自車両が点 P_C を出発する時刻は, 少なくとも $t_{QC+}(\varphi)$ より後でなければならない. 一方, 相手が交錯領域を通過完了した時点 $t_{QD+}(\varphi)$ において, 自車両は最大で前方端が点 D に接する位置 (点 P_D) まで進むことができる. つまり, 自車両が点 P_C を出発する時刻は, $t_{QD+}(\varphi)$ から点 P_C - 点 P_D 間を希望速度で通行する時間を差し引いた時刻以降となる. したがって, 待ち時間 $t_{wait}(\varphi)$ は, このいずれかの時刻のうち遅い方から自車両の点 P_C 到着時刻を引いた

$$t_{wait}(\varphi) = \max \left(t_{QC+}(\varphi), t_{QD+}(\varphi) - \frac{a}{v_p \tan(\theta_0 - \varphi)} \right) - t_{PC-}(\varphi) \quad (12)$$

となる.

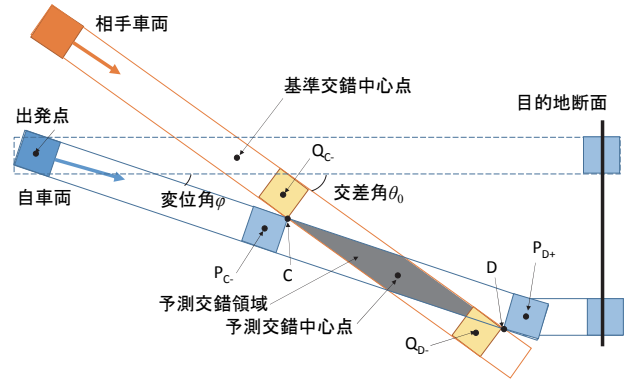


図4: 追従交差の場合

3. PMVの回避行動被験者実験

(1) 実験の概要

前章で導出した回避行動モデルが実際の PMV の走行をどれだけ再現し, どれだけバイアスがあるかを検証するために, PMV の実走行実験を実施した. 実験は東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区) の地下アトリウムで行った. 実験期間は 2014 年 11 月 12 日(水)~12 月 3 日(水)のうち 15 日間, 実験参加者は 30 名(うち女性 6 名)で, いずれも 20 代の学生及び教職員である.

使用した PMV は Robstep 社の Robstep Robin M1 である. 本 PMV の最高時速は 15km/h であるが, 実験では安全性を考慮し, 最高時速 9km/h のビギナーモードに設定した. なお本体の幅は 46.4cm, 車長は 46.7cm である.

相手車両の代替としてラジコンカー (京商 AXXE・無線 LAN バージョン) を用いた. これはワイヤレス LAN 接続によりタブレットやスマートフォンで操作が可能であり, 出力設定を変更することによって走行速度の調整ができる. 相手車両に見立てるため, ラジコンの上部に模造紙と針金で製作した張りぼて (高さ約 160cm, 幅約 30cm) を取り付け付けた(図5).



図5: Robstep Robin M1(左)とラジコンカー(右)

(2) 習熟走行と習熟状況の確認

本実験実施の前に、被験者に PMV の運転に十分慣れてもらうだけの時間をとり、その後走行習熟度テストを実施した。習熟度テストではスラロームコースの走行時間を計測し、一定秒数以内に通行できることを確認した。習熟度テストに合格し、実験実施者と被験者双方の主観的判断によっても十分習熟したと確認された場合のみ本実験を行うこととした。結果的には全ての被験者が問題なく本実験に進むことができた。

(3) シナリオの設定

本実験のレイアウトを図-6に示す。1stEndと2ndEndは被験者の起終点であり、被験者はこのいずれかを出発地、もう一つを目的地として PMV にて走行する。ラジコンカーは地点 R₁~R₄のいずれかを起終点とし、被験者動線を横切るよう斜めに走行する(R₁→R₄, R₂→R₃, R₃→R₂, R₄→R₁の4通り)。被験者には、ラジコンカーが別の人が乗車する PMV を模したものである旨を事前に説明した。ラジコンカーの起点が4通り、被験者の起点が2通りの計8通りのシナリオの組み合わせがある。順序効果を考慮し、それぞれのシナリオの実施順に偏りがないう、被験者ごとに異なる順序で実験を実施した。また、ラジコンカーの出力を変更することで、ラジコンカーの接近速度に一定の分布を与えた。実験回数は、被験者のうち最初の11名が16走行、残りの19名は24走行行った。

この実験では、衝突してもけがの恐れのないラジコンカーを用いているが、現実の交通と同様に回避を行うインセンティブを被験者に対して与えるため、ラジコンカーと PMV の衝突が発生した時にペナルティとしての待機時間を設けた。接触が発生した時は、実験終了後に実験区間に追加的に1回あたり3分間待機をさせることとした。

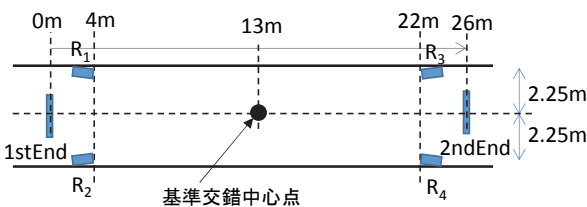


図-6: 実験区間レイアウト

(3) 取得データの概要

3台のビデオカメラを実験区間上部に設置し、実験状況の撮影を行った。車両の位置情報取得には画像処理ソフトウェアを用いた。PMVとラジコンカーの0.1秒毎の位置を手動で取得し、ビデオ画像の座標を実座標に射影変換、

固定区間カルマンスムージングを適用することで0.1秒毎の推定位置を得た。

4. 実験結果の分析と仮説検証

(1) 予測旅行時間の導出に必要な各種パラメータ

2章の仮説に基づく予測旅行時間の導出には、ラジコンカーや PMV の希望走行速度を求める必要がある。観測データからこれらの推定を行う。

図-7に、実験時におけるラジコンカーの走行速度分布を示す。これは、基準交錯点通過時刻の3秒前から基準交錯点通過時刻までの平均速度を各実験ごとに計測したものである。平均1.35m/sと、一般的な歩行者の希望速度分布とほぼ同等であった。

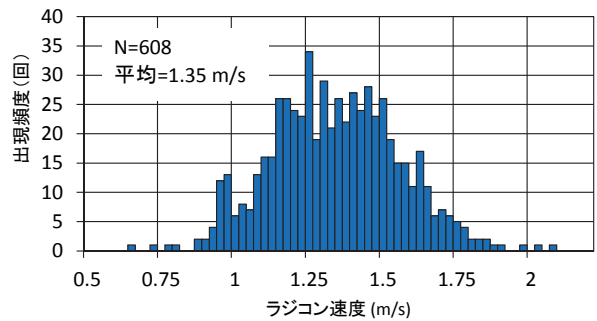


図-7: ラジコンカーの走行速度分布

図-8に PMV の被験者ごとの自由走行速度の推定値の分布を示す。自由走行速度の推定方法は以下の通りとした。まず、PMV が出発地の0.5m下流を通過してから基準交錯中心点に最接近するまでの経過時間を観測し、この間の進行方向距離12.5mを経過時間で除して各実験ケースでの交錯点接近時走行速度を得る。各被験者について、この走行速度の最小値を自由走行速度とした。推定自由走行速度は多くの被験者が2m/s程度となっているが、1.4m/sから2.3m/sの間でばらつきがある。

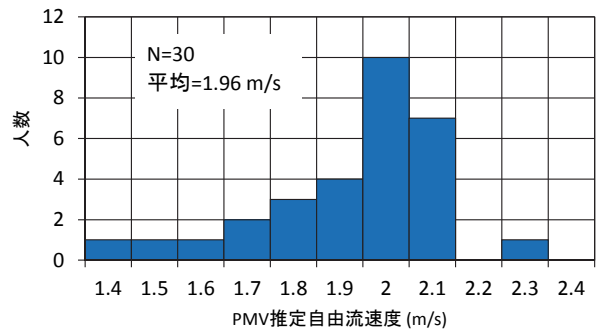


図-8: PMV の推定自由走行速度分布

図-9 は、仮に PMV が希望方向に自由走行速度で走行したと仮定したときの、PMV とラジコンカーの基準交錯中心点通過時刻差の推定値の分布を示す。平均で約 1.3 秒 PMV の方が早く中心点を通過している。

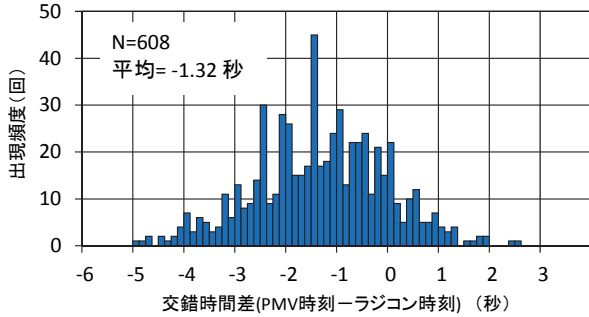


図-9：PMV とラジコンカーの基準交錯中心点通過時間差の推定値分布

(2) 変位角に応じた推定旅行時間の感度分析

2章で示した式に、基礎集計で得られたパラメータの平均値、すなわち $v_p=1.96(m/s)$, $v_q=1.35(m/s)$, $t_{diff} = -1.32(s)$ を代入することで、旅行時間が変位角によってどのように変化するかを調べた。図-10、図-11 に、それぞれ対向交差($\theta_0=166(度)$)と追従交差($\theta_0=14(度)$)の時の変位角 ϕ と推定旅行時間との関係を示す。対向は変位角 6 度以下、追従は 6 度以上するとき、実験区間範囲内でラジコンカーを回避することができない。いずれの場合も、変位角を変化させていくと、前方回避から後方回避へと切り替わる変位角付近で旅行時間が大幅に増加することがわかる。

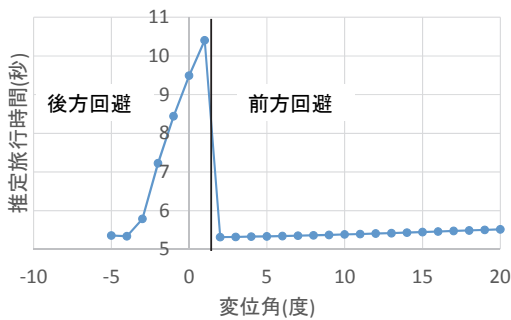


図-10：対向交差における変位角と推定旅行時間の関係

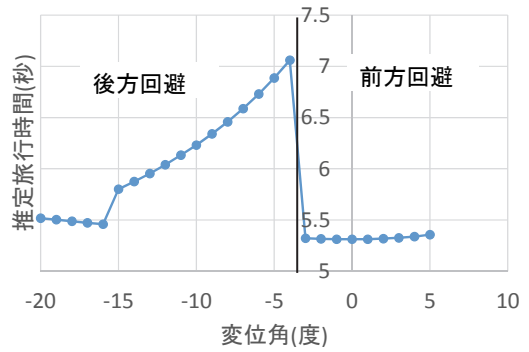


図-11：追従交差における変位角と推定旅行時間の関係

(3) 推定旅行時間と前方・後方回避選択結果との関係

図-12 に、対向交差における前方回避の推定旅行時間と後方回避の推定旅行時間の差と実際の回避選択結果の関係を示す。推定旅行時間差は、 ± 0.05 秒以内と極めて小さい範囲内に分布している。旅行時間差が負、つまり前方回避の旅行時間の方が小さいときに、前方回避の選択確率が高くなる傾向がみられる。

同様に、追従交差の結果を図-13 に示す。対向交差に比べると旅行時間差の分布幅は広い。やはり旅行時間差が小さくなるほど、前方回避の割合が高くなる傾向がみられる。

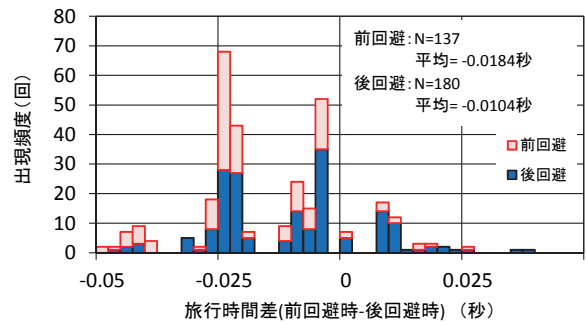


図-12：対向交差における前後回避の推定旅行時間差と回避パターン選択結果

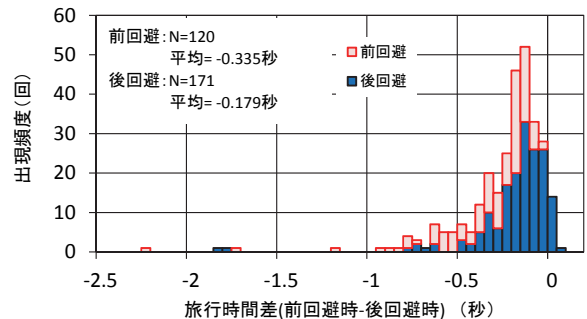


図-13：追従交差における前後回避の推定旅行時間差と回避パターン選択結果

(4) 二項ロジットモデルによる仮説検証

(3)の結果の有意性を定量的に検証するため、PMV の後方回避確率を二項ロジットモデルで推定した。推定に用いた説明変数は、PMV とラジコンカーの基準交錯中心点通過時間差である。

表-1 に対向交差の、表-2 に追従交差の推定結果をそれぞれ示す。いずれの結果も符号条件は問題なく、旅行時間差の影響が有意となっている。追従交差に比べ、対向交差での旅行時間差の感度は低い。これは、今回の実験条件においては、対向交差の旅行時間差の観測範囲が小さいことが理由と考えられる。

また、定数項はいずれも有意に正となった。すなわち、前方・後方回避の推定旅行時間が同じであれば、後方回避を選択する傾向があるといえる。これは、前方回避によるラジコンカーとの衝突リスクによるバイアスと考えられる。このことから、利用者は旅行時間最小化という規範から見ればリスク回避的な行動をとる傾向があることを示唆する。

表-1：対向交差における二項ロジットモデル推定結果

	推定値	標準誤差	t値
旅行時間差(秒)	36.000	8.215	4.382
(定数項)	0.795	0.171	4.641
サンプル数	317		
AIC	416.1		
McFadden's Pseudo R ²	0.0495		

表-2：追従交差における二項ロジットモデル推定結果

	推定値	標準誤差	t値
旅行時間差(秒)	2.861	0.666	4.295
(定数項)	1.027	0.194	5.306
サンプル数	291		
AIC	372.2		
McFadden's Pseudo R ²	0.0665		

5. おわりに

本研究では、PMV が他者と交錯するときの回避行動について、前方・後方回避の選択に着目した実証分析を行った。結果、PMV は予測旅行時間差が大きいほど後方回避を選択しやすくなること、同じ予測旅行時間であれば後方回避を選択する傾向があることが定量的に示された。このことから、利用者は基本的には予測旅行時間の最小化という規範に従いつつ、リスク回避も考慮し

つつ行動選択を行っていることが示唆される。

利用者が予測旅行時間の最小化を図るという規範に従うという示唆は、一見すると複雑に見える 2 次元上の PMV の挙動を、旅行時間最小化という簡潔な規範で再現できることの可能性を示すものといえよう。規範が簡潔であれば、それを数理的に定式化することにより、PMV のさまざまな挙動を演繹的に導出することが可能になる。これは、Wardrop の第 1 原理を用いてネットワーク交通流解析を行うことと似ている。そのような規範の存在は、(たとえば分割配分のような) アドホックなルールをこと細かく設定することなく、客観的な結果を統一的に導出できるという意味で有用性が大きい。一方で、リスク回避を原因とすると思われるバイアスの存在は、上述の規範に対して旅行時間以外の要素を加えることの必要性を示唆する。この要素をどのように定式化すべきかは簡単な問題ではない。人がリスク回避的選択をすることはよく言及されることだが、PMV の運転という文脈においてその原因をどう考え、それをどう記述すべきかは、今後検討すべき課題といえる。

本研究では解析を簡単にするために PMV の挙動を単純化して扱っているが、実際の PMV の挙動はより複雑である。そもそも、PMV は曲線的かつ加減速を伴う複雑な軌跡を描くが、本研究で用いたモデルではそのような複雑な軌跡の形状を完全に捨象している。また、PMV 運転者は出発と同時に移動軌跡を決定するとの仮定を置いているが、実際にはラジコンカーとの相対位置・速度を観測しつつ時々刻々と行動を更新していくなど、将来の交錯状況の予測を動的に更新する行動をすると考えられる。このような動的な予測や意思決定の行動が最終的な行動にどう影響を及ぼすかを知ることが求められよう。さらに、本実験は相手が道を譲ることがないという条件で被験者の回避行動を分析しているが、実際には道路利用者同士が互いに譲り合いをしながら通行すると考えられる。相互依存的行動の分析も今後の課題である。

謝辞：本研究は、文部科学省女性研究者養成システム改革加速事業「知の頂点に向かって加速！東大プラン」の支援を受けている。実験の実施にあたり、東京大学生産技術研究所の関連部署・研究室より多大なるご協力をいただいたことをここに深謝します。

参考文献

- 1) Nishiuchi et al. (2010). An Analysis of Segway Behavior focusing on Safety Distance for Pedestrians and Gaze of Riders, 17th World Congress on Intelligent Transportation Systems.

- 2) Chikayama et al. (2014). Examination of Maneuverability of an Inverted Pendulum Vehicle in Terms of Handle Operation, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control.
- 3) 中根優仁, 金利昭(2013) セグウェイの特性分析と共存条件に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.48.
- 4) 山田健太ら(2013) 大学構内での共同利用実験におけるセグウェイ利用状況と運転挙動に関する分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.48.
- 5) Asano et al. (2009). A Pedestrian Model Considering Anticipatory Behaviour for Capacity Evaluation, in Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, W. H. K. Lam, S. C. Wong and H. K. Lo (Eds.), Springer: New York, pp. 559-581.
- 6) 鈴木一史, 中村英樹(2006). 交通流解析のためのビデオ画像処理システム TrafficAnalyzer の開発と性能検証, 土木学会論文集 D, Vol.62, No.3, pp.276-287. (2015. 7. 31 受付)

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PRINCIPLE OF COLLISION AVOIDANCE
BEHAVIOR IN PERSONAL MOBILITY VEHICLES

Miho IRYO-ASANO, Takamasa IRYO, Chie SUGIMORI