

セグウェイの走行挙動特性に関する基礎的研究

塩見 康博¹ ・ 西内 裕晶²

¹正会員 京都大学大学院助教 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区桂 京都大学)
E-mail: shiomi@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 日本大学助教 理工学部社会交通工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1-744)
E-mail:nishiuchi.hiroaki@nihon-u.ac.jp

本研究では、セグウェイをはじめとするパーソナルトランスポーターが街中へ導入された際の歩行者流の円滑性ならびに安全性を評価可能なPT走行挙動モデルの構築を目的とする。その目的に資するために本稿では、PT走行挙動モデル構築に必要な走行挙動パラメータ計測のためのセグウェイ実車による走行実験を行った結果を報告する。具体的には、12名の被験者について、加速・減速・スラロームによる旋回・歩行者の追い抜きとすれ違い、急制動に関する各走行実験を行い、実験から得られたセグウェイの走行軌跡をセグウェイの走行経験、走行速度に着目して解析し、セグウェイの走行挙動特性に関する基礎的な知見を整理するものである。

Key Words : *Personal Transporter, Behavior Analysis, Vehicle Trajectory, Video Image Data,*

1. はじめに

近年、体重移動をすることで移動が可能である電動二輪車パーソナルトランスポーター(以下、PT)が、既に市販がなされているセグウェイをはじめとして、新たな近距離移動用の交通手段として注目されている。また、欧米等の諸外国においてPTは、街の警備巡回や観光都市全域を走行する観光ツアーで代表されるように既に公道において利用がなされている。わが国においても「つくばロボット特区」に代表されるように、PTの公道利用に関する議論がなされている。しかしながら、わが国におけるPTの公道での利用は諸外国に比べると、制度面、安全面等の問題から、まだ実現性が乏しいのが実態である。そのような状況において、PTが公道を走行する際にどのような影響が考えられるかを議論している研究はいくつかある。MILLERら¹⁾は、ある見通しが悪い通路において、曲がった先に障害物がある場合のセグウェイの挙動を解析している。江守ら²⁾は、歩行者が混在するセグウェイの走行路を想定したセグウェイの回遊行動特性を解析している。また、Nishiuchiら³⁾は、セグウェイが安全に走行するために必要となる走行領域を自転車と比較しながら解析するとともに、歩行者密度別にセグウェイ運転者の視線について解析している。しかしながら、これらの研究成果では、PTを街に導入した際に、交通

流(歩行者流や車両交通流)への影響を評価するための指針へ必ずしも繋がっていないのが現状である。

そこで本研究では、街にPTを導入した際の交通流の変化を評価可能なPT走行挙動モデルの構築を目指し、それに資するためのパラメータ計測を目的としたPT走行実験をセグウェイ実車により行った。本稿は、そのセグウェイ走行実験から得られたセグウェイの走行軌跡を分析し、セグウェイの基本的な走行特性について知見を整理するものである。

2. セグウェイ走行実験概要

(1) 実験概要

セグウェイ走行実験は、2011年2月21日(月)に、日本大学理工学部船橋キャンパスにある全長680mの交通総合試験路において実施した。実験は、写真1のようにカラーコーンにより分けられた走行コース内を、各実験項目に応じてセグウェイで走行するものである。なお、実験の様子は、隣接する校舎の6階よりビデオ撮影を行い、本稿の分析に使用されたデータは、そのビデオデータからセグウェイの走行軌跡を抽出することにより生成した。

本実験の被験者は、セグウェイ乗車経験のある12名の男性であり、セグウェイ乗車頻度やセグウェイに初めて乗車した時期等は表-1の通りである。

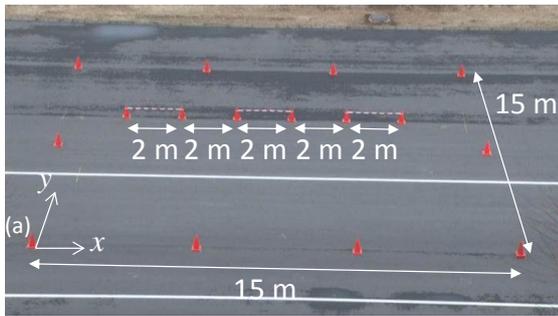


写真-1 セグウェイ走行実験コース

表-1 被験者のセグウェイ乗車経験

		初めて乗車した時期		
		2007年	2009年	2010年
利 用 頻 度	年に数回	0	1	0
	月に1回以下	0	5	3
頻 度	月に1回以上	1	0	1
	月に4回以上	1	0	0

(2) 走行実験項目

本実験では、セグウェイ走行挙動モデル構築のための基礎的なデータ取得を目的としている。よって、実験項目は以下に示す通り、基本的な走行特性データ(加減速、スラローム、追い抜き・すれ違い、急制動)を取得することとした。なお、セグウェイには最高速度をコントロールする機能があり(最高速度を20km/hとした場合を高速モード、最高速度を10km/hに制限した場合を低速モードと呼ぶ)、それぞれについて走行実験を行った。各実験項目の概要については、以下に詳細を述べる。

(a) 加速・減速：セグウェイ走行で最も基本的な動作である加速・減速挙動を対象とする。加速走行では、コース内において各走行速度モードのリミッターによる速度制限が機能するまで加速を続ける。減速走行では、あらかじめ、コース外にて十分な加速をした後、コース内の中心付近にてドライバーの判断にて安全に停止するものである。ここでは、走行速度モードごとに加速・減速それぞれ2回の走行実験を行った。

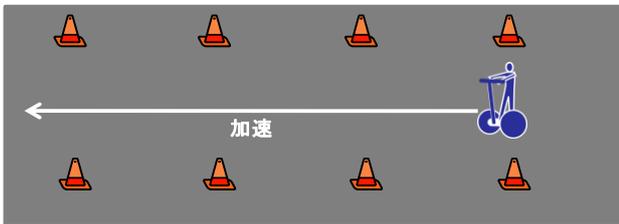


図-1 加速走行実験のイメージ

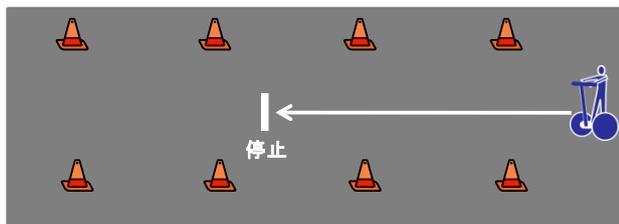


図-2 減速走行実験のイメージ

(b) スラローム：セグウェイでの走行中に、どの程度の旋回角度で障害物をよけながら走行できるかを観測する。速度帯については、高速モードと低速モードの両モードについて走行実験を行った。なお、制限速度の設定別に走行実験を行ったものの、被験者には安全に走行できる範囲内の速度で走行するように指示をしている。また、実験回数は、走行速度モードに対し2往復とした。

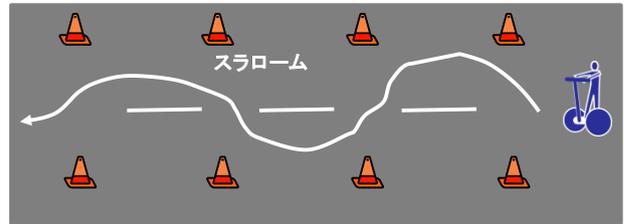


図-3 スラローム走行実験のイメージ

(c) 追い抜き・すれ違い：街中でのセグウェイ導入時のセグウェイ走行挙動モデルを構築する際には、歩行者との錯綜も考慮する必要がある。ここでは、最も単純な状況である歩行者1名との相対速度と追い抜き・すれ違い開始時の相対距離、及び追い抜き・すれ違い時の横方向距離の関係を見る。実験回数は、追い抜きとすれ違いそれぞれ2回の走行を速度モード別に行った。



図-4 追い抜き・すれ違い走行実験のイメージ

(d) 急制動：街中において歩行者や自転車・自動車の飛び出しにより、セグウェイでの走行中に突発的な事象による危険な状況が発生することが懸念される。そこで本実験では、カメラのフラッシュを用いた急制動実験を行う。具体的には、セグウェイが十分な速度でコース内に進入した際に、コース脇に準備したカメラのフラッシュを光らせ、そのフラッシュに気付いた時にセグウェイ運転者がその場で停止を試みるものである。なお、急制動実験も、走行速度モードごとに2回行った。

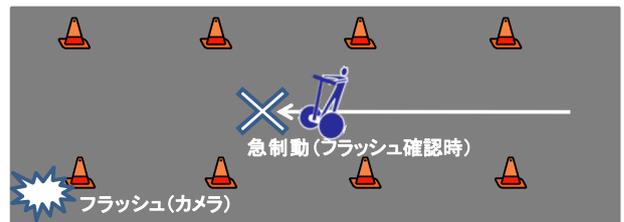


図-5 急制動実験のイメージ

(3) セグウェイ走行軌跡データ取得方法

本実験で得られたセグウェイの走行データは、ビデオ観測より抽出された走行軌跡により生成する。具体的に

は、ビデオデータを1/10秒単位の画像データに分け、各画像におけるセグウェイ(追い抜き・すれ違い時は歩行者)の位置(座標)を抽出するものである。座標を抽出する際には、セグウェイについてはタイヤと地面が設置する点を抽出し、歩行者については歩行者の重心から地面に接する点を各瞬間の存在位置とした。取得した座標は射影変換により画面座標系から現地平面座標系へと変換し、さらに座標取得の際の誤差を修正するため、平滑化スプラインによる近似を行った。これにより、各瞬間において抽出された座標データを基に、速度[m/s]、加速度[m/s²]、方向転換角度[度]を推計したものを本稿で行う分析で用いた。ただし、現地平面座標系として、写真1に示す(a)のコーン設置地点を原点とし、右方向をx軸方向、上方向をy軸正方向とした。

本稿では、被験者12名の内、最もセグウェイの乗車経験・頻度がある被験者とそうでない被験者2名と2009年よりセグウェイ乗車体験のある被験者3名の合計5名のデータを用いる。



図-6 セグウェイ・歩行者の軌跡抽出例

3. セグウェイ走行挙動特性の解析

(1) 加速・減速

セグウェイ走行時の加速・減速について走行時刻と速度の関係を見る。図-7には、高速モードでの加速走行実験の実験結果を、図-8には、低速モードでの加速走行の実験結果を示す。両図より、走行速度帯別に大きな加速性能に違いは見当たらないが、セグウェイ乗車体験度合いによる加速のスムーズさには違いが見られる。また図-9と図-10には、減速走行実験の結果を示す。これらの実験結果においても、走行速度帯別に減速走行特性に顕著な違いは見られないものの、セグウェイ乗車経験の少ない被験者(2010年初乗)の1回目の走行時は、速度の変化がスムーズでない。これは、加速時において、体重移動を前向きに掛け続けることができず、加速・減速を繰り返した結果であると想像できる。よって、セグウェイ乗車経験が少ない被験者は、加速・減速がスムーズに行われていない場合がある。

(2) スラローム

PTを街中で走行させる際には、様々な障害物をよけ

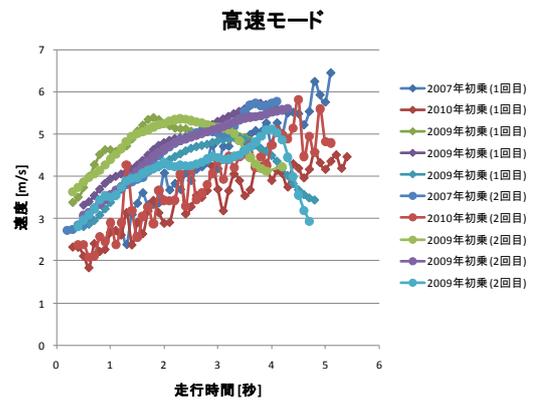


図-7 高速モードでの速度(加速)の推移

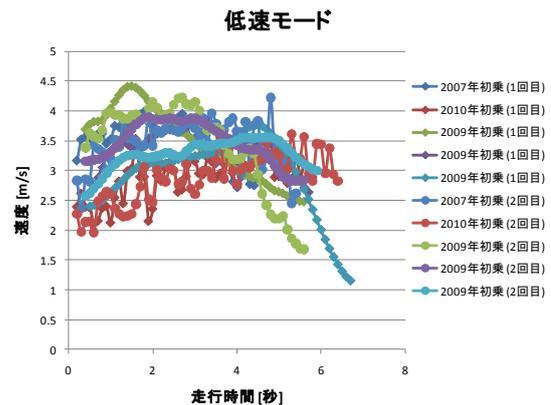


図-8 低速モードでの速度(加速)の推移

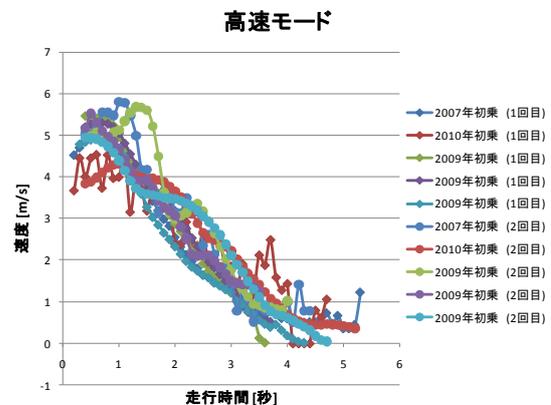


図-9 高速モードでの速度(減速)の推移

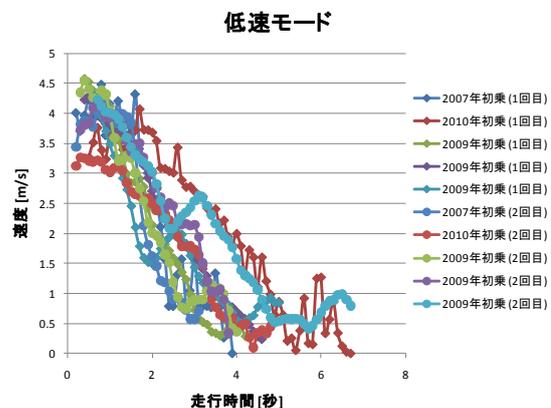


図-10 低速モードでの速度(減速)の推移

ながら走行しなければならない状況が容易に想像され、PT走行挙動モデルでは再現すべき挙動である。図-11と図-12では、高速モードならびに低速モードのそれぞれで実施したスラローム走行実験から得られた実験結果を示す。具体的には、走行区間の各時刻(1/10秒)ごとの走行速度と旋回角度の関係を示したものである。ただし、旋回角度は時刻 t [s]における速度ベクトルと時刻 $t+0.1$ [s]における速度ベクトルのなす角度として定義し、右方向への旋回を正としている。両図より、2007年初乗の被験者は、どちらの走行速度モードにおいても、2010年初乗ならびに2009年初乗の被験者によりも高速でスラロームを通過している。また、旋回角度のバラツキも小さく、スムーズに障害物を回避していることが分かる。

ここで、図-13と図-14には、速度と旋回角度の関係に差が見られた被験者のスラローム走行時の速度分布をセグウェイの初乗タイミング別に示している。図より、いずれの走行速度モードにおいても、セグウェイの経験度合いにより、その走行速度域に違いが見られることが分かる。また、特に速度で差が生じている2007年度初乗の被験者と2010年初乗の被験者の走行軌跡を図-15と図-16に示す。ここでも、Y方向の走行位置に両被験者でわずかに差があることが分かる。すなわち、セグウェイの走行経験により、障害物を回避する走行特性について差が見られることが分かった。

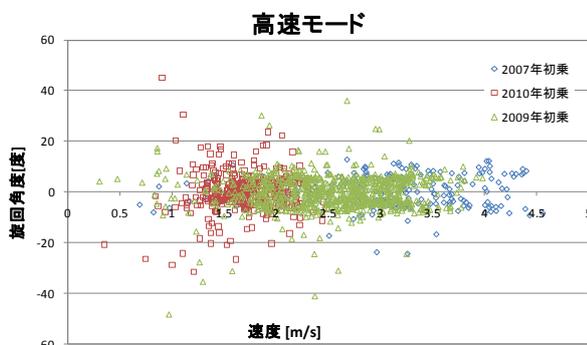


図-11 高速モードでのスラローム走行時の速度と旋回角度の関係

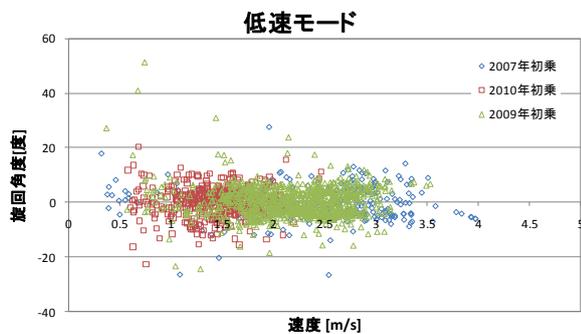


図-12 低速モードでのスラローム走行時の速度と旋回角度の関係

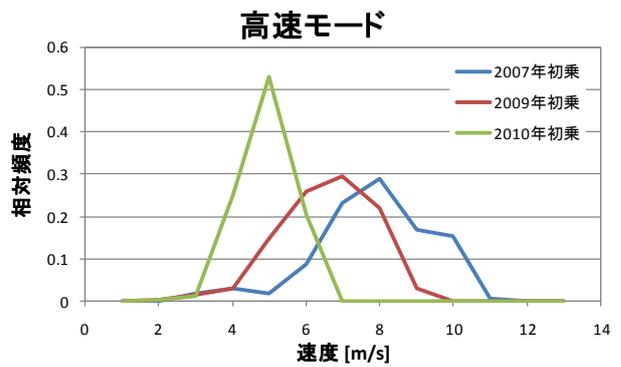


図-13 高速モードでのスラローム走行時の速度分布

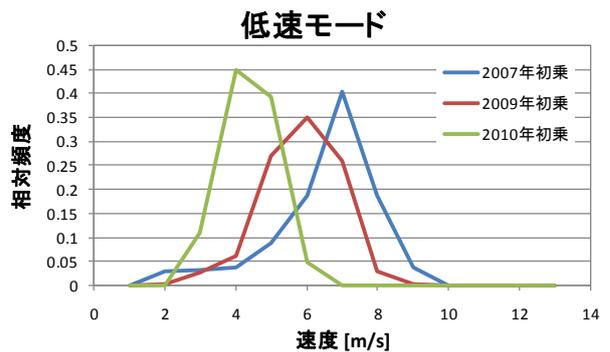


図-14 低速モードでのスラローム走行時の速度分布

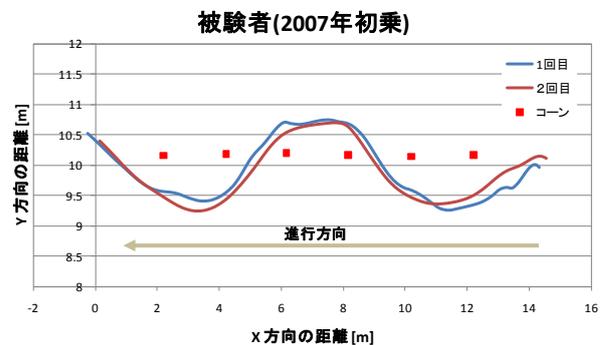


図-15 セグウェイ乗車経験の多い被験者のスラローム走行軌跡

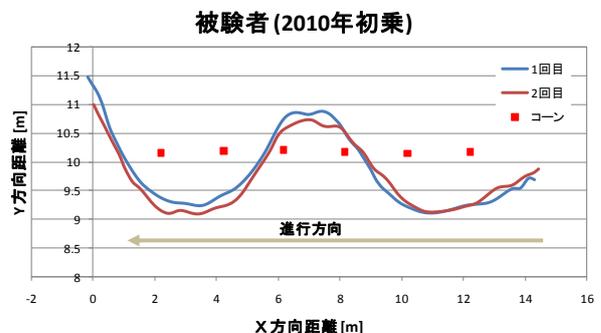


図-16 セグウェイ乗車経験の少ない被験者のスラローム走行軌跡

(3) 追い抜き・すれ違い

セグウェイと歩行者が同一空間上に混在して走行する状況においてその安全性・円滑性をシミュレーションなどで評価するためには、セグウェイと歩行者による追い抜き、すれ違い挙動特性を把握する必要がある。これらの挙動をモデルとして記述するためには、追い抜き挙動を開始する状況、及び追い抜く際の両者の相対関係が重要となる。図-17はセグウェイが歩行者を追い抜いた際の両者の走行軌跡の例を示したものである。図中の(a)はセグウェイが前方歩行者を追い抜くために方向転換を開始した際の歩行者-セグウェイ間の距離、(b)はセグウェイが歩行者を追い抜く瞬間における両者間の横方向の距離を表す。本稿では、追い抜き挙動を特徴付ける指標として、(a)、(b)の2指標に着目し、歩行者とセグウェイとの相対速度との関係を分析する。ただし、追い抜き・すれ違い挙動開始時点は、セグウェイが走行を開始し、直進走行時のy座標値からある一定距離（ここでは30cmとした）以上離れた時点として定義した。

図-18に歩行者・セグウェイの相対速度と追い抜き・すれ違い挙動開始時の距離の相関関係を、図-19には相対速度と、追い抜き・すれ違い時の両者間の距離の相関関係を図示する。まず、図-18に着目すると、多少のばらつきは見られるものの、おおむね線形の相関にあることが読み取れる。各プロットに対する線形近似直線の切片は歩行者に対してセグウェイが最接近可能な距離を、傾きは現在の相対速度が維持された場合に、最接近可能距離に到達するまでに要する時間を表す。セグウェイ乗車時には、この時間を一定に保つように歩行者とのすれ違い、または追い抜き挙動を開始することが伺える。また、被験者のセグウェイ乗車経験と線形近似曲線パラメータの関係に着目すると、乗車経験が高い被験者の方が、より切片値、すなわち歩行者との最接近可能距離が小さいことが読み取れる。これは、乗車経験が高いほど、より小回りのきく乗車が可能であることを示している。

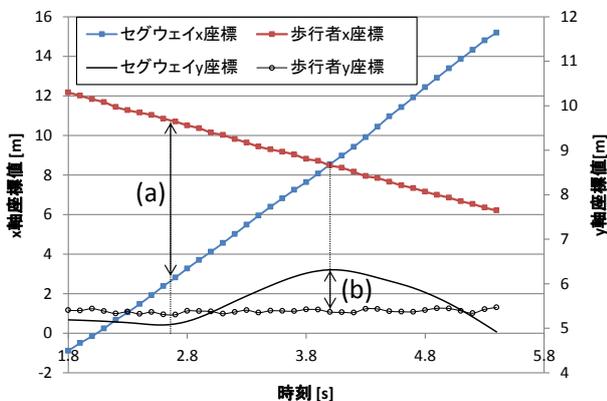


図-17 すれ違い時のセグウェイ・歩行者の走行軌跡例

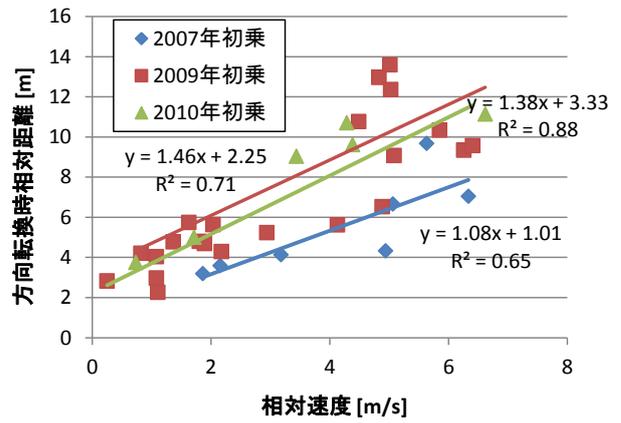


図-18 追い抜き・すれ違い開始時の相対速度-相対距離

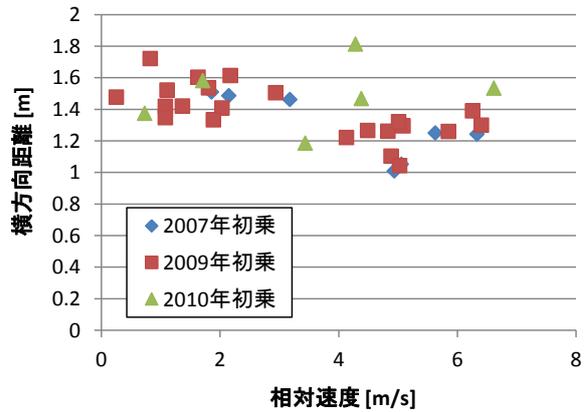


図-19 追い抜き・すれ違い時の相対速度-横方向距離

次に、図-19に着目すると、相対速度の増加に対し、横方向距離は緩やかに減少する傾向にあること、また、乗車経験による差異は顕著ではないことが読み取れる。相対速度が低い状況はセグウェイが歩行者を追い抜く状況に相当する。追い抜きの際には、積極的に加速をする必要があるために、歩行者との横方向距離が大きくなったと考えられる。この傾向は、スポーツ用自転車によるすれ違い、追越しの際にも確認されており、横方向距離についても1.1mから1.4m程度であることが報告されており⁴⁾、セグウェイとスポーツ用自転車の挙動の類似性が指摘される。

(4) 急制動

突発事象に対し、急停止する際の挙動を把握することは、安全性を評価する上で、極めて重要となる。一般に、急制動過程は、ある事象を知覚した後、それに反応してブレーキを掛け減速が開始されるまでの空走距離と、その後、減速して低速するまでの制動距離により構成される。図-20には、時間経過と走行速度の関係の例を示す。図中、破線(a)はフラッシュが点灯された時刻、点線(b)は減速が開始された時刻、直線(c)は停止した時刻を表す。これより、フラッシュ点灯後、一定時間が経過後に減速

が開始され、停止状態(c)に至ることが分かる。そこで、本稿では、図中(a)~(b)に至るまでの時間を反応時間、その間に進んだ距離を空走距離、(b)~(c)に至るまでに進んだ距離を制動距離と定義し、走行速度レベルとそれぞれの関係を把握する。

図-21には走行速度と反応時間の関係を示す。これより、反応時間は0.4秒~0.8秒の範囲で分布していること、走行速度との相関は少ないことが読み取れる。自転車における反応時間はおよそ1.0秒であることが報告⁴⁾されており、それとの比較で小さい値と言えるが、これは、実験環境にあるため、被験者がフラッシュに対して注意しているためであると考えられる。

次に、図-22には走行速度と空走距離・制動距離の合計距離との関係を表す。これより、急減速に関しては乗車経験による差異は顕著ではないことが読み取れる。また、自転車における空走距離・制動距離の合計は15 [km/h] (= 4.2 [m/s]) のときで約6.1 [m]⁴⁾であり、図-21よりセグウェイについても同程度であると言え、自転車とセグウェイの挙動特性の類似性が指摘される。

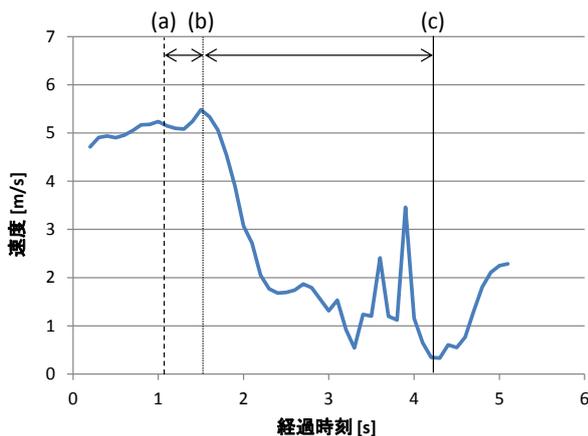


図-20 フラッシュ後の速度変化の例

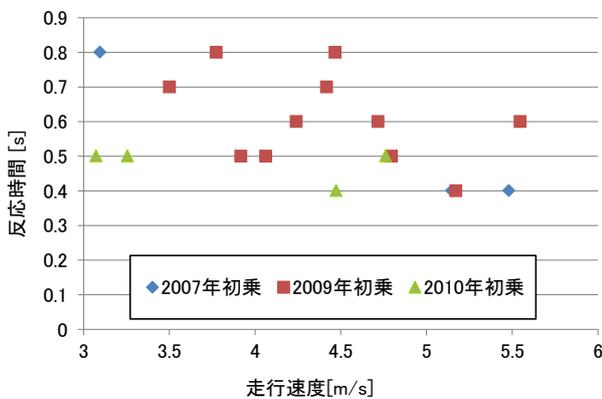


図-21 走行速度と反応時間の関係

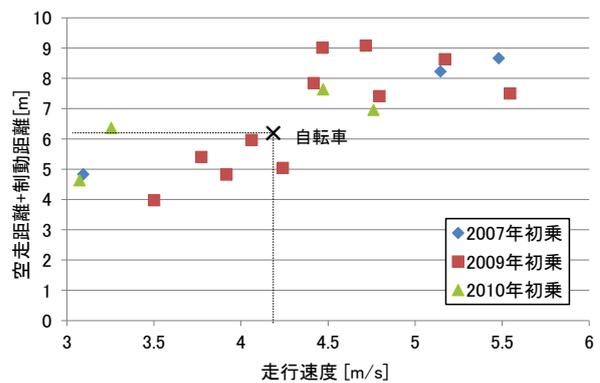


図-22 走行速度と空走距離+制動距離の関係

4. おわりに

本稿では、PT走行挙動モデル構築に資するために、実車走行実験から得られたセグウェイの走行軌跡を用いて、その基本的な走行性能を分析した。加減速性能ならびにスラロームによる旋回性能は、セグウェイ乗車経験の差により特性が異なり、特に旋回性能は、セグウェイ乗車経験が多い被験者ほど、旋回角のバラツキが小さく高速で走行できることが分かった。また、追い越し・すれ違いの走行実験により、乗車経験が高いほど、小回りのきく乗車ができていたことを示した。さらに、急制動実験からは、乗車経験による走行挙動特性に差異は見られないものの、空走距離と制動距離の合計距離について、セグウェイと自転車の走行挙動の類似性を指摘した。

今後は、被験者サンプルを増やすことにより、より確かなPT走行挙動特性に関する知見を整理することが必要である。また、セグウェイの走行特性の自転車との差異の明確化や、それに基づいた、街中における適材適所な移手段配置のあり方について考えていく必要がある。

謝辞

本研究で用いたセグウェイは、セグウェイジャパン株式会社の「セグウェイチャレンジ」に、日本大学大学院理工学研究科社会交通工学専攻交通研究センターが応募し受贈されたものを活用したものである。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) MILLER S., MOLIINO J.A, KENNEDY J.F, EMO A.K, DO A. : Segway Rider Behavior. Speed and Clearance Distance in Passing Sidewalk Objects, Transportation Research Record No.2073, pp.125-132, 2008.
- 2) 江守央, 轟朝幸, 荒谷太郎 : Segway の回避行動特性に関する基礎的研究, 第 29 回交通工学研究発表会論文報告集(CD-ROM), pp.165-169, 2009.
- 3) NISHIUCHI H., SATO T., ARATANI T., TODOROKI T. : An Analysis of Segway Behavior focusing on Safety Distance for Pedestrians and Gaze of Riders, Proceedings of 17th ITS World Congress, CD-ROM, 2010.
- 4) (社) 交通工学研究会: 交通工学ハンドブック 2005, 丸善出版, 2005.