

# 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

長谷川 悠<sup>1</sup>・井料 美帆<sup>2</sup>・Charitha DIAS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)  
E-mail: haseyu@iis.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 准教授 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)  
E-mail: m-iryu@urban.env.nagoya-u.ac.jp

<sup>3</sup>東京大学生産技術研究所 特任研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)  
E-mail: cdias@iis.u-tokyo.ac.jp

本研究は、観測可能な外的要因からパーソナルモビリティ(PMV)に対する歩行者の主観的危険度を推定するモデルを提案することを目的とした。まず歩行者の認知の特性を把握するための実験を行い「歩行者は自身の前方において距離に対する高い感度を示すが後方では低い感度を示す」「歩行者とPMVsの距離が近いとき、歩行者は前方にいるPMVsを後方にいるそれよりも危険視するのに対して、歩行者とPMVsの距離が遠くなるとその関係は逆転する」という2点を明らかにした。さらに歩行行動の説明に良く用いられるSocial Forceモデルを応用した危険度インデックスモデルを構築し、実験結果を利用してパラメタ推定を行った。このモデルでは歩行者とPMVsの位置関係や相対速度をインプットとし、実験で明らかになった歩行者の認知特性を表現することができる。

**Key Words :** パーソナルモビリティ、歩行者、危険度インデックス、認知

## 1. はじめに

### (1) 背景と目的

近年、パーソナルモビリティ(Personal Mobility Vehicles, PMVs)と呼ばれる一人乗りの移動支援機が注目を浴び、技術の進展により多数の新機種が現れている。環境負荷が低いこと、高齢者・身体障がい者等のいわゆる交通弱者の交通権の確保の助けになること、高速にも低速にも対応可能であるために歩行者との混在が容易であること等が利点として挙げられ、次世代の交通手段として普及が期待されている<sup>1)</sup>。

しかし現状日本では、PMVsの普及が進んでいるとは言いがたい。PMVs搭乗者の安全のみならず、周囲の歩行者への安全性の確保に懸念が抱かれているからである。特に日本を含むアジア諸国では街中の歩行者密度が高く、その中でPMVsと歩行者が混在することが想定されていることもあり、歩行者の安全性が確保されることが重要である。

歩行者を考慮した安全性は大きく客観的(物理的)安全性と主観的(心理的)安全性に分けることができる。

もちろん大前提として、事故を起こさない、仮に事故が起きたとしてもその被害を軽減する、といった客観的安全性が担保されなくてはPMVsの普及を望むことはできない。これに対しDiasら<sup>2)</sup>はSocial Force(SF)モデルを応用し、PMVsの挙動をモデル化することによって、PMVsの挙動特性を把握した。また、伊藤ら<sup>3)</sup>は、Potential FieldとTime To Collisionの概念を応用して、低速モビリティの安全評価指標を提案した。

しかしそういった客観的安全性が確保された上で、さらに歩行者自身が安全と感じるかどうか、歩行者のサービスレベルは適切かといった主観的安全性がどう確保されるのかという観点も必要になる。客観的安全性に加えて主観的安全性も評価に入れることでより事故を回避できる確率が上がるとともに、安全を超えて安心できる乗り物であることがPMVsの社会的な受容可能性を高めることにつながるからである。こういった歩行者のPMVsに対する主観的安全性に関する研究は限られてはいるものの、いくつか先行研究は存在する。西内ら<sup>4)</sup>は歩行者に接近するPMVを危険だと歩行者が思った瞬間に歩行者がPMVを避けるという実験を行い、自転車の安全性

評価でも使われた確率楕円の概念を導入して歩行者と PMV の間の安全距離を算出した。また、中川ら<sup>56)</sup>は個人の空間的位置関係の心理的影響を表したパーソナルスペースを応用して PMVs の行動特性を分析し、歩行者の密度や PMV の速度が大きくなるにつれて PMV が歩行者のパーソナルスペースに侵入する率が高くなり歩行者の PMVs に対する恐れや不快が大きくなることを報告した。

しかし先行研究には、大きく 2 つの不足部分が存在する。一つは現実の歩行者と PMVs の混在状況の現実性の不足、もう一つは PMVs の特徴についての考慮の不足である。1 つ目の混在状況の現実性の問題とは、具体的に実験環境の制限にある。例えば現実には PMVs が普及したら歩行者に対する PMVs の動きは対向・追い越しだけでなくあらゆる方向から相互干渉することが予想される。また、PMVs の速度についても低速 (6km/h 以下) のみで運用されるとは限らない。しかし先行研究の実験ではこういった状況の再現に至っておらず、非常に限られた状況について論じているという問題がある。2 つ目の PMVs の特徴の考慮の不足とは具体的に、PMVs の挙動特性についてである。PMVs は歩行者や自転車とは違う挙動をすることが可能であるとともに走行時に走行音を発生する。このことによって、歩行者の PMVs に対する認知の仕方にも、従来の歩行者や自転車の理論等とは異なる特徴が現れると考えられるが、先行研究では歩行者のパーソナルスペースの理論や自転車の理論がそのまま応用されており、この考慮が十分だとは言えない。

したがってこれらの問題点を解決すること、すなわち①あらゆる配置にある歩行者と PMVs の位置関係や現実的な PMVs の速度を適切に反映し、②PMVs の特性、特に走行音の発生による影響に対して考察をした上で、③歩行者の認知の特性を適切に反映する、ことが歩行者の PMVs に対する主観的安全性評価をする際に求められる。したがって本研究では、以上の問題点を解決しながら、PMVs に対する歩行者の安全性の主観的評価を観測可能な要因から定量的に推定する方法を提案することを目的とする。

## (2) 構成

以下この論文では、2 章で主観的評価の傾向を掴むための実験を行い、3 章で過去に提案された Social Force (SF) モデルを応用した、歩行者の PMVs に対する主観的危険度インデックス (Subjective Danger Index, SDI) モデルの提案とそのパラメータ推定を行う。最後に考察と結論を記す。

## 2. 実験

この章では、歩行者の主観の特徴や傾向を掴むための実験を行う。また、この実験結果は次章で提案されるモデル中のパラメータ推定にも役立てられる。1 節で実験手法を示し、2 節でその結果を記述する。

### (1) 実験手法

外部被験者を対象に歩行者役とし、PMV が横を通り過ぎるシナリオを体験してもらう。以下に説明する条件を変えながら繰り返しシナリオ実験を行い、各シナリオ後には被験者は PMV に対する主観的な危険度をアンケートで答える。以下、a) シナリオとアンケート、b) 実験環境と被験者について示す。

#### a) シナリオとアンケート

実験中の各シナリオは、歩行者役の被験者のそばを PMV に乗った実験者が直線的に近づき通り過ぎることで実施される。このとき、被験者にはシナリオごとに予め決められた地点に決められた向きで動かずに立っていることが指示される。各シナリオは、PMV の速度、PMV の軌跡と被験者の距離、被験者の向きの 3 要素から構成されており、これらを組み合わせることで 15 種類のシナリオを用意した。

PMV の速度には、低速 6km/h / 高速 10km/h の 2 種類を用意した。なお、PMV の搭乗者は速度を一定に保てるように事前に操縦の練習を十分に積んだ。実験実施時には搭乗者はメトロノームの音をイヤホンで聞きながら、一定のタイミングで地面に一定間隔で引かれた線を越えることによって規定速度を守った。実験中の速度は逐一 PMV と Bluetooth 接続した Android アプリのスピードメーターで確認され、規定速度から  $\pm 1\text{km/h}$  以上誤差がある場合には、シナリオをやり直した。

PMV の軌跡と被験者との距離は、PMV の走行軌跡と被験者との最接近距離と定義する (図 1 中の  $l$ )。この距離には、0.6m / 0.8 / 1m の 3 種類を用意した。ただし、

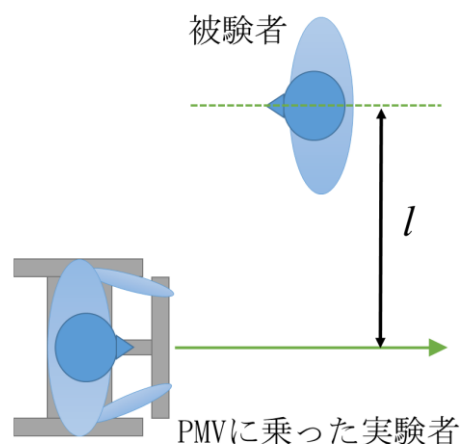


図 1 PMV の軌跡と被験者の距離  $l$

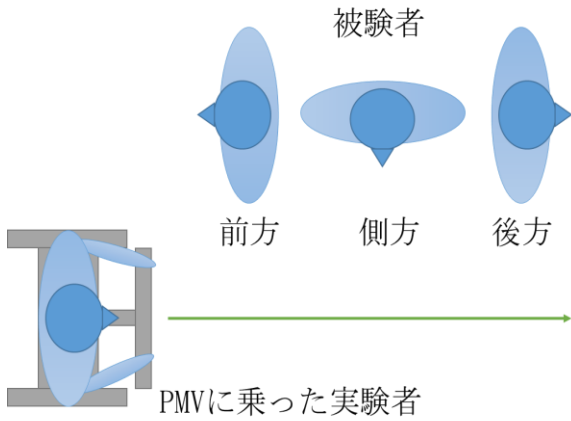


図 2 被験者の向き

安全のために PMV の速度が 10km/h のときは 0.8m/1m の 2 種類のみとした。PMV の走行するルートは常に一定とし、被験者の立つ位置を変える事によってこの距離を調整した。

被験者の向きには図 2 に示すように、前方から PMV が来る向き（前方）/ 右側方から PMV が来る向き（側方）/ 後方から PMV が来る向き（後方）の 3 種類を用意した。被験者には体だけではなく頭部や目も決められた向きを向いたまま、シナリオ実行中は動かないように指示した。以上 3 要素を組み合わせ、表 1 のように 6km/h の場合は 3 種の距離×3 種の向き = 9 種のシナリオ（シナリオ A - I）、10km/h の場合は 2 種の距離×3 種の向き = 6 種のシナリオ（シナリオ J - O）、計 15 種のシナリオを用意した。これらの 15 種のシナリオを、各被験者が 2 回ずつ体験する。実験実施時には被験者の学習効果を避けるためにシナリオの順番をランダムに並び替えた。

被験者は各シナリオに対して、危険度の主観的評価をアンケート形式で答える。危険度の評価は危険ではない（スコア 0）から危険（スコア 6）までの 7 段階評価である。このスコアを SDI 実測値とする。

**b) 実験環境と被験者**

今回の実験では、歩行者との親和性や今までの使用実績等を考慮し、PMV として倒立振子型二輪車両である Segway を想定した。しかし今回の PMV 実験機には



図 3 実験の様子  
（前方シナリオ：上、後方シナリオ：下）

Robstep 社製 Robstep-M1 を用いることとし、両側に柔らかいタイヤを取り付けて Segway 社製 Segway PT i2 SE と同じ大きさにした。このような仕様にしたことにより、Segway と同じ大きさ、外観を保ちながら、万が一実験中に実機と被験者が接触しても被験者に危害が及ばないようにし、実機が非常に近距離を走行した時であっても被験者の安全が確保されるようにした。また、この実験は 2017 年 2 月 27 日から 3 月 13 日にかけて東京大学生産技術研究所内地下アトリウムにて行われた。図 3 は実験の様子を示す。

被験者には、主に大学生と大学院生を対象にして男性 23 名、女性 9 名、計 32 名を集めた。被験者の募集には機縁法とポスターによる一般募集を用いた。被験者には謝金による参加へのインセンティブを付与した。

表 1 シナリオ一覧表

シナリオ名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
PMVの速度 (km/h)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10
PMVと被験者の距離(m)	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	1	1	1	0.8	0.8	0.8	1	1	1
被験者の向き	前	側	後	前	側	後	前	側	後	前	側	後	前	側	後

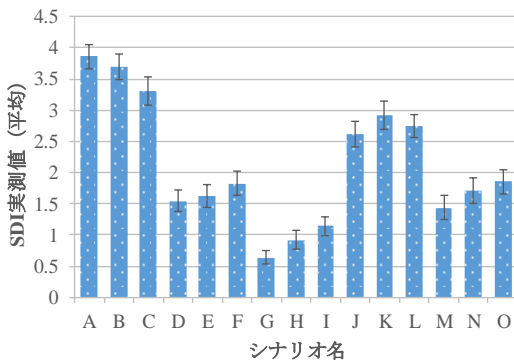


図 4 SDI 実測値平均

注 1: 各シナリオのサンプル数は  $n=64$ 。注 2: エラーバーは標準誤差を示す。

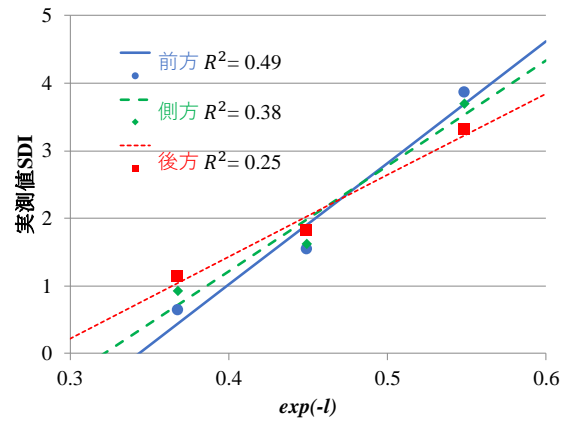


図 5 線形回帰モデルによる傾向分析

注 1: 各方向のサンプル数は  $n=192$ 。注 2: 低速  $6\text{km/h}$  の結果のみを表示。注 3: プロットは各シナリオ平均値

## (2) 結果

### a) 記述統計量による結果表示

シナリオ毎の危険度の評価の平均値を図 4 に示す。低速  $6\text{km/h}$ ・高速  $10\text{km/h}$  のどちらのシナリオでも、前方・側方・後方のすべての方向において、被験者と PMV の軌跡の距離が長くなるほど、主観的な危険度 (SDI) が減少する傾向が観察された。

### b) 線形回帰モデルによる傾向分析結果と仮説

次に、前方・側方・後方の各シナリオにおいて距離に対する感度を調べるために簡単な線形回帰モデルによる分析を行った。図 5 はその結果を示したものである。横軸に被験者と PMV の軌跡の距離  $l$  に負号を付けたものの  $e$  を底とする指数関数を、縦軸に主観的な危険度 (SDI) をとり、単回帰モデルを作成した。結果を見ると前方シナリオでは他シナリオに比べて直線の傾きが急であり、これは距離に対する感度が相対的に高いことを示している。その一方で後方シナリオでは相対的に感度が低い。さらに被験

者と PMV の軌跡の距離  $l$  について、 $l=0.6\text{m}$  ( $\exp(-l)=0.55$ ) のとき SDI は前方で大きく後方で小さいのに対し、 $l=0.8\text{m}$  ( $\exp(-l)=0.45$ ) では前方・側方・後方シナリオ間での SDI の差がほとんどなくなり、 $l=1\text{m}$  ( $\exp(-l)=0.37$ ) になると関係は逆転し SDI は後方で小さく後方で大きくなっていることがわかる。

## 3. モデル提案

ここで提案されるモデルは、SF モデルを応用している。歩行者の挙動を扱う一般的な SF モデルでは、歩行者間や歩行者と障害物との間に SF という仮想上の力を導入して歩行者の歩行軌跡を説明している。ここではそ

の力のうち歩行者間に割り当てられるものを援用し、歩行者の PMVs に対する主観的な危険度を、観察可能なパラメタから推測するモデルを構築する。1 節では従来モデルの概要を示し、2 節で従来モデルを SDI モデルに応用する際の問題点を示したうえで SDI モデルを提案する。さらに前章の実験結果を用いてモデル中のパラメタを推定する。

### (1) 従来モデル

歩行者の挙動を表すモデルには SF モデルの他に Cellular Automaton モデルや Potential Field モデル等が提案されている。この中で SF モデルでは歩行者間もしくは歩行者と障害物の間に、物理的な力の理論を応用した、SF と呼ばれる仮想上の力を用いて歩行者の行動を説明している。この SF の考え方と SDI モデルとの親和性が高いことから、ここでは SDI モデルの基礎として SF モデルを使うこととし、これを詳しく見ていく。

Johansson ら<sup>9)</sup>は、観測データを用いて歩行者行動の SF モデルを詳述した。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、 $\tau_i$  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 (SF)、 $\vec{\xi}_i(t)$  は変動項を表す。

ここで示されたように、SF モデルは歩行者の加速度を説明するために、他の歩行者から受ける心理的な仮想上の力をその中に項として組み込んでいる。特に項

$\vec{f}_{ij}(t)$  は歩行者  $i$  が他の歩行者からある程度の安全距離を保つ働きを説明するために付け加えられている。この歩行者  $i$  が不快な状況や危険な状況を避けながら歩くルートを決めるものだとすれば、この項は歩行者  $i$  が他の歩行者から受ける不快感や危険度の大きさを代表する指標であると解釈することができる。したがってこの研究ではこの項  $\vec{f}_{ij}(t)$  を取り出し、SDI の基礎として用いることを考える。以下、従来モデル<sup>9)</sup>の  $\vec{f}_{ij}(t)$  の項について詳しく見ていく。従来モデルでは、歩行者間の SF 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、 $\lambda_i$  は異方性の大きさを表すパラメタ、 $\varphi_{ij}(t)$  ( $0 < \varphi_{ij}(t) < \pi$ ) は、 $\vec{d}_{ij}(t)$  を歩行者  $ij$  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。

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

$$\begin{aligned} & \vec{V}_{ij}(\vec{d}_{ij}(t), b_{ij}(t), \vec{y}_{ij}(t)) \\ &= A_i \exp\left(\frac{-b_{ij}}{B_i}\right) \cdot \frac{\|\vec{d}_{ij}\| + \|\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}\|}{2b_{ij}} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{\vec{d}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij}\|} + \frac{\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}}{\|\vec{d}_{ij} - \vec{y}_{ij}\|} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $A_i$  は歩行者間の影響の強さを表すパラメタ、 $B_i$  は影響の範囲を表すパラメタである。 $\vec{y}_{ij}(t)$  は歩行者  $ij$  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、 $\Delta t$  は歩幅時間を表す定数である。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。

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

## (2) モデル提案

### a) 従来モデルを提案モデルに応用する際の問題点

従来モデルの歩行者間 SF において、歩行者  $i$  に影響を及ぼす歩行者  $j$  を PMV $j$  とし、そのまま PMVs に関する SDI に応用すると、前章の実験の結果分析で確認されたような歩行者の認知及び主観的危険度の傾向をうまく表現できない。その問題を整理すると、以下 2 つの問題点に纏めることができる。一つは式(4)で表される歩行者間の影響の範囲を表すパラメタ  $B_i$  が定数である点、

もう一つは式(2)で表されるように、異方性項  $w$  と距離・相対速度項  $\vec{V}_{ij}$  が互いに独立である点である。

まず歩行者間の影響の範囲を表すパラメタ  $B_i$  が定数であることの問題点を述べる。パラメタ  $B_i$  が定数であることは、PMVs の向かってくる角  $\varphi_{ij}(t)$  に関わらず、歩行者が同じ感度で自身と PMVs の距離を認識できることを意味する。しかし前章の実験で確認したように、歩行者は自身の前方で自身と PMVs の距離に対する感度が高く、後方で低かった。歩行者の前方に関しては歩行者は視覚と聴覚の両方を使って対象物を認識できるのに対し、後方では聴覚のみに頼らざるを得ない。さらに視覚や聴覚それぞれに対しても前方において情報受容能力が高いことを考慮すれば角  $\varphi_{ij}(t)$  によって距離に対する感度が異なるのは妥当であるといえるが、従来モデルではパラメタ  $B_i$  が定数であるためにこれが表現できない。これを問題点 1 とする。

次に、異方性項と距離・相対速度項が互いに独立であることの問題点を述べる。異方性項が距離から独立であることは、歩行者と PMV の距離に関わらず、一様に歩行者の前方 ( $\varphi_{ij}(t) = 0$ ) において後方 ( $\varphi_{ij}(t) = \pi$ ) よりも他歩行者から受ける影響が大きいことを意味している。しかし、前章で見たように角  $\varphi_{ij}$  の影響は歩行者と PMV の距離から独立ではない。確かに、歩行者との相互関係から歩行者の「歩行軌跡を決定する」従来モデル中においては、歩行者は主に自身の前方に向かって歩くためにこの設定は妥当であったと思われるが、SDI に応用する際にはこの異方性項を修正する必要がある。歩行者が他者としての存在を認知する上で PMVs と歩行者の最も大きな違いは、歩行者はほぼ歩行音 (足音) を発生しないのに対して PMVs は大きな走行音を発生することにある。自動車に対する歩行者の危険察知に関しては走行音が大きな役割を果たすことが知られており、PMVs に関してもこれを捨象することはできない。つまり PMVs が歩行者の前方にいるときだけではなく後方にいるときにも、歩行者は PMVs の走行音からその存在を察知できることを考慮すれば、歩行者は後方の PMV を危険視しないとはいえ切れない。実際に実験でも「歩行者と PMVs の距離が近いとき、歩行者は前方にいる PMVs を後方にいるそれよりも危険視するのに対して、歩行者と PMVs の距離が遠くなるとその関係は逆転し後方にいる PMVs を前方のそれよりも危険視する」という傾向が観察されているが、従来モデルではこれが表現できていない。これを問題点 2 とする。

以上 2 つの問題点を解決できる定式化をすることが、SDI モデル提案の上で重要になる。

### b) 提案モデル

以上前項で確認した従来モデル応用の際の 2 つの問題

点を受けて、式(7)のように歩行者間の SF の式を時刻ごとの SDI モデルに改良する。さらに、この時刻ごとの SDI としては一人の歩行者に対して 1 台の PMV が近づき通過することを想定している。このモデルでは、歩行者  $i$  が PMV から受ける影響の影響の範囲を表すパラメタ  $B_i$  を、歩行者  $i$  と PMV  $j$  の変位ベクトルと歩行者の方向ベクトルがなす角  $\varphi_{ij}$  の関数としている。こうすることで、角  $\varphi_{ij}$  によって距離に対する感度が異なることが表現でき、前項で述べた問題点 1 が解決できる。また、距離・相対速度項から独立な異方性項を廃し、その代わりにパラメタ  $A_i$  と  $B_i$  を  $\varphi_{ij}$  の関数としたことで、角  $\varphi_{ij}$  の効果は距離・相対速度項から独立ではなくなり、前項で述べた問題点 2 も解決することができる。

$$SDI_{ij}(t) = A_i(\varphi_{ij}) \exp\left(\frac{-b_{ij}}{B_i(\varphi_{ij})}\right) \quad (7)$$

ここで  $A_i(\varphi_{ij})$  が満たすべき性質を考える。  $B_i(\varphi_{ij})$  が  $\varphi_{ij}$  の関数になり PMV が歩行者から離れたときの影響の感度の違いを表現できるようになったことで、  $A_i(\varphi_{ij})$  は歩行者と PMV 間のあらゆる距離に支配的な影響の大きさの指標ではなく、距離が 0 (もしくは非常に近い) ときの影響の大きさの指標と考えることができるようになった。その場合に限れば実験結果より、従来モデルの異方性項と同様に歩行者の前方にいる PMV に対し歩行者は危険と感じ、相対的に後方にいるときは危険と感じないといえる。したがって、  $A_i(\varphi_{ij})$  には  $\varphi_{ij}$  の減少関数が適している。ここでは歩行者に関する左右の対称性を考慮して  $\varphi_{ij}$  の関数に  $\cos(\varphi_{ij})$  を用いることとし、  $A_i(\varphi_{ij})$  に式(8)を仮定する。

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

ここで、  $C_A$  と  $\lambda_A$  は推定すべきパラメタである。また、個人間のパラメタの差はないと仮定して、全ての個人に共通なパラメタを当てはめている。

次に  $B_i(\varphi_{ij})$  が満たすべき性質を考える。前節での議論を考慮すると、歩行者の前方において歩行者の PMVs に対する距離認識精度が高く、歩行者の後方においてその精度が低い状況を表現できることが望ましい。したがって、  $B_i(\varphi_{ij})$  には  $\varphi_{ij}$  の増加関数が適している。ここでも  $A_i(\varphi_{ij})$  と同様に  $\varphi_{ij}$  の関数に  $\cos(\varphi_{ij})$  を用いることとし、  $B_i(\varphi_{ij})$  に式(9)を仮定する。

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

ここで、  $C_B$  と  $\lambda_B$  は推定すべきパラメタである。

さらに、推定値 SDI として時刻ごとの SDI の最大値を式(10)のようにとる。この推定値 SDI の数値の意味するところは、実験アンケートと同様に、SDI=0 であれば被験者が主観的に危険ではないと感じている状態、SDI=6 で危険だと感じている状態、SDI=3 でどちらでもないと感じている状態である。

$$SDI = \max_t SDI(t) \quad (10)$$

### (3) 提案モデルのパラメタ推定

この節では 2 章の実験結果を用いて前節で提案したモデルの各パラメタ  $C_A, \lambda_A, C_B, \lambda_B$  及び  $\Delta t$  について推定を行う。実験では 32 人の被験者が 15 種のシナリオを 2 回ずつ行っているため、各シナリオが含む SDI 実測値のサンプル数は 64 となり、15 種のシナリオを考えると全サンプル数は 960 である。これらの SDI 実測値を使い、最小二乗法を用いてパラメタ推定を行った。表 2 はその結果である。

表 2 において、  $\lambda_A$  と  $\lambda_B$  は正の数になった。これは式(8)と式(9)での仮定が正しかったことを示唆する。また、  $\lambda_A = 4.73$  は  $C_A = 16.49$  の 28.7%、  $\lambda_B = 0.07$  は  $C_B = 0.41$  の 17.1% であり、どちらの場合も  $\lambda$  が  $C$  に比べて無視できないと言える。つまり  $A_i$  と  $B_i$  が定数ではなく  $\varphi_{ij}$  の関数だとする仮定の妥当性が示唆される。また、  $\Delta t = 2.27$  は 2 から 3 の間に収まっており、先行研究と照らし合わせても妥当な値だと言える。

また、15 種のシナリオそれぞれについてアンケートのスコアの平均値をとり、それを各シナリオの SDI 実測代表値とする。この SDI 実測代表値とモデルによる推定結果を示したのが図 6 の散布図である。

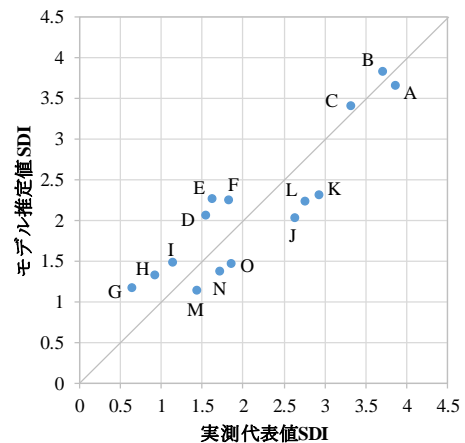


図 6 モデル適合性

注：実測代表値とモデル推定値の決定係数は  $R^2 = 0.68$

表 2 パラメタ推定値

パラメタ	$C_A$	$\lambda_A$	$C_B$	$\lambda_B$	$\Delta t$
推定値	16.49	4.73	0.41	0.07	2.27

注：実測値とモデル推定値の決定係数は  $R^2 = 0.20$

#### 4. 考察

実験の章(2章)の線形回帰モデルによる傾向分析では、歩行者は自身の前方において、PMVsと自身の距離に関する高い感度を持ち、後方では低い感度をもつことが示唆された。これはモデル応用の問題点(3章2節)で述べた人間の特徴を考へても、妥当であるといえるだろう。その一方で、アンケートで得られたデータのばらつきが大きいために、線形回帰モデルの相関係数は特に強いとは言えない結果となっている。したがって、ここで確認された傾向が一般的なものであると言うためにはさらに多くのデータを集める必要があるだろう。さらに実験の問題として、前方・側方・後方の3方向のシナリオしか用意できなかったことが挙げられる。特に向き(角度)に関する関数形の決定のためには、より多くの向きを含むより多くのシナリオの実施が必要になるだろう。しかしながら、この実験で得られた歩行者のPMVsに対する認知の特徴は、他の種類のPMVsや、走行音を発生させながら走る全ての乗り物に適用できる可能性を持つ。

モデルの章(3章)では、推定されたモデルの決定係数は低いものの、モデル適合性を調べた散布図(図6)のようにSDI推定値とSDI実測代表値に着目すると、モデルはシナリオ間の平均的な傾向を表していることがわかった。したがってモデルを構築する上で想定した仮定がある程度妥当であったといえるだろう。しかし図6を見ると、低速シナリオと高速シナリオの2つにクラスタ分けができることが分かる。これは提案したSDIモデルは歩行者とPMVsの距離や角度といった空間的配置については良く表現できている一方で、相対速度の表現に改善の余地があることを示している。相対速度を考慮した歩行スペース項  $\bar{y}_{ij}(t) = (\bar{v}_i(t) - \bar{v}_j(t))\Delta t$  には相対速度の線形な関数を想定しているが、この仮定が適切ではない恐れがある。しかし今回の実験では低速6km/hと高速10km/hの2種の速度しか用意しておらず、相対速度に関する関数形の特定には至らなかった。これらは今後改善されるべきであろう。

また、他の問題として、提案したモデルではSDIとして6以上の値を提示することが理論上あり得るが、SDIの定義上それは改善されなければならないということが挙げられる。例えば6以上のSDIがモデルから提示された場合にはすべて「危険」とする、またはSDIの定義自体に変更を加える等が考えられるが、その基準の考慮には更なるケーススタディが必要とされるだろう。

#### 5. 結論と今後の課題

この研究では、PMVsに対する歩行者の安全性の主観的評価を観測可能な要因から定量的に推定する方法を提

案することを目的とした。実験の結果から歩行者のPMVsに対する認知の特徴として以下の2つが観察された。一つは、歩行者とPMVsの距離が近いとき、歩行者は前方にいるPMVsを後方にいるそれよりも危険視するのに対して、歩行者とPMVsの距離が遠くなるとその関係は逆転し後方にいるPMVsを前方のそれよりも危険視することである。もう一つは、歩行者は自身の前方において距離に関する高い感度を持ち、後方では比較的低い感度を持つということである。そして従来のSFモデルをベースに、実験で確かめられた特徴を表現できる新しい主観的危険度SDI表現モデルを提案し、実験結果を用いてパラメタ推定を行った。その結果、PMVsと歩行者の位置関係・現実的な相対速度、歩行者の認知特性を表現できるSDIモデルを提案することができた。

しかしながら改善が必要な点もいくつか存在する。まずシナリオの種類が限られている点が挙げられる。これによって方向に関する関数形が決定できない上に、PMVの速度に関して線形の関数を仮定せざるを得なかった。しかしこれらの関数形をより適切なものに置き換えることによってモデルの適合性が上がることが示唆されている。したがってPMVが歩行者に向かってくるときの様々な角度や速度を考慮した追加のシナリオが必要になる。また、今回得られたモデルが今回の実験機だけではなくPMVs一般に当てはまる傾向を示しているかといった問題や、多数の歩行者の中をPMVsが走る環境であっても今回のモデルが使えるのかといった問題もある。これらは今後の課題であり、改善されることが望まれる。

**謝辞:** 本研究は、科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究(16K14317)の助成を受けたものである。また、実験に協力して下さった被験者の皆様、並びに実験の準備と実施に対し協力して下さった研究室のメンバーに心より御礼申し上げます。

#### 参考文献

1. Nakagawa, C., Imamura, K., Shintani, A., and Ito, T. Simulations of the relationship between a personal mobility vehicle and pedestrians. In *IEEE International Systems Conference (Sys-Con), Vancouver, BC, 2012*, pp. 1-6.
2. Segway: Personal Transportation That Simply Moves You. <http://www.segway.com/>, Accessed July 2, 2017.
3. Ando, R. and Li, A., September. An analysis on users' evaluation for self-balancing two-wheeled personal mobility vehicles, In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on* (pp. 1525-1530). IEEE.
4. DIAS Charitha, et al., Calibration of a Social Force-based Shared Space Model for Personal Mobility Vehicle and Pedestrian Mixed Traffic, *TRB Annual Meeting 2017. Transportation*

*Research Board.*

5. NAKAGAWA Chihiro, et al., Simulations of the relationship between a personal mobility vehicle and pedestrians, Systems Conference (SysCon), *IEEE International*, p. 1-6, 2012.
6. PHAM Thai Quoc, et al., Evaluation of the effects of a personal mobility vehicle on multiple pedestrians using personal space, *IEEE Transactions on Intelligent*.
7. NISHIUCHI Hiroaki, et al., An analysis of Segway behavior focusing on safety distance for pedestrians and gaze of riders, *17th ITS World Congress*, 2010. (2017.7.31 受付)
8. ITO Takuma, et al., Risk Evaluation Index of Low-Speed Vehicle Driving on Pedestrian Spaces
9. Johansson, A., Helbing, D., & Shukla, P. K. (2007). Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data. *Advances in complex systems*, 10(supp02), 271-288.

### Proposal of Subjective Danger Perception Model of Pedestrians towards Personal Mobility Vehicles

Yu HASEGAWA, Miho IRYO, and Charitha DIAS

This study aimed to propose a model of safety index called Subjective Danger Index (SDI) of pedestrians toward personal mobility vehicles (PMVs) based on the social-force concept. A series of controlled laboratory experiments are conducted to identify the trend of pedestrians' perception and calibrate the proposed model.

The experiments revealed two important features of pedestrians' perception against PMVs: pedestrians' sensitivity to the distance between a PMV and them is higher when a PMV is in front of them compared to the situation when a PMV is behind them; anisotropy effect is dependent on distance and relative velocity between a PMV and a pedestrian. The proposed model can reflect those features appropriately. The proposed model can reflect the pedestrians' feature appropriately.