

パーソナルモビリティと歩行者の 混在交通における危険度評価指標の提案

菱川 貴之¹・井料 美帆²

¹学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町）

E-mail: hishikawa.takayuki@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院准教授 環境学研究科都市環境学専攻（同上）

E-mail: iryo@nagoya-u.jp

一人乗りの電動の乗り物であるパーソナルモビリティ（PMV）は、低速から中速域で安定して走行可能で、比較的高密な歩行者交通と混在する状況も想定される。この環境が歩行者に受容されるためには、歩行者が主観的に感じる PMV との交錯の危険性を適切に評価する必要がある。しかし従来の指標の多くは、歩行者と PMV の混在交通で特徴的な、歩行者等の移動軌跡の自由度や、他の歩行者等の存在による自分の移動制約を考慮していない。本研究はこれら混合交通の特性を踏まえた、PMV に対する歩行者の主観的な危険度評価指標の提案を行う。バーチャルリアリティ実験による挙動データとリスク評価データを用いた分析の結果、PMV に対する歩行者のリスク認知には、両者の衝突確率と衝突強度に加えて、対向歩行者や幅員による移動制約が影響することが示された。

Key Words: *personal mobility vehicles, social acceptance, risk perception, pedestrian, subjective index*

1. はじめに

一人乗りの電動の乗り物であるパーソナルモビリティ（PMV）として、近年多様な車両が開発されてきている。多くの PMV に共通してみられる特徴として、低速から中速域で安定して走行可能であることがあげられる。これらの PMV の中には、既に欧米や中国、シンガポール等では、歩行者と混在する形での公道走行が認められているものもあり、日本においても社会実験が行われている。

歩道や自転車歩行者道での走行が認められる場合、PMV は比較的高密な歩行者交通と混在する状況も想定される。しかし、重量や走行速度、挙動特性の異なる多様な車種がある中で、歩行者と安全に共存して走行できる車種や走行空間の条件については、十分に検討されていないのが現状である。上述した導入国においても、PMV が開発されるたびにその特徴に応じた走行区分の検討・変更が必要となるなど、一般化できる基準が得られているとはいえない。

世界各国の PMV に対する走行区分、制限速度等の規制に関する調査報告書¹⁾によると、法的規制においては、多くの国で最高速度や駆動力（ワット数）に応じて車種区分をし、それに応じた通行規制を設けている。特に、

PMV の速度によって歩道の走行可否が決められる事例が多い。しかしながら、駆動力や速度で判断することに限界があり、リスク評価指標による評価が必要であるということが当該報告書により指摘されている。

リスク評価指標とは、一般的に危険事象の発生確率およびその強度により説明されるものであり、車両特性、歩行者・車両双方の挙動を考慮して導出される客観的な指標である。この客観的評価指標にて安全性が担保できることが PMV 導入の前提となる。さらに、客観的指標で安全性が確認されたとしても、新たなモビリティが社会に受容されるためには、混在する歩行者の主観的視点に基づく評価が必要と考えられる。

しかし、既存の主観的なリスク評価指標を歩行者と PMV との混在した交通に適用するには、各種の課題がある。まず、多くの指標は自身と対象車両の 1 対 1 に対象を限定しており、複数の歩行者が交錯する状況を適切に評価できるとは言えない。また、歩行者と PMV の双方ともに空間的な移動の自由度が大きいことから、空間的な軌跡がほぼ画一的に決まる自動車の評価指標をそのまま使用することは難しい。さらに、既存の主観的指標では歩行者の行動に一定の制約を設けたうえでリスク評価を行った研究があるが、実際の道路においては歩行者が拘束されることなく自由に歩いており、適当といえな

い。このように、既存のリスク評価指標では、複数の歩行者を考慮し、対面コンフリクトの扱いや自分自身が自由に歩ける条件での評価を行った評価指標は存在しない。

そこで本研究では、周辺歩行者の存在による移動の制約が歩行者の主観的危険度に与える影響を考慮した、PMV に対する歩行者の危険度評価指標の提案を目的とする。歩道単路部を対象とし、バーチャルリアリティ (VR) 実験を通じて得られた PMV と歩行者の挙動データとその際のリスク評価データを用いて、PMV に対する歩行者のリスク認知を、PMV や歩行者の挙動により説明するモデルを構築する。

このモデルを用いることで、歩行者が認知するリスクを軽減し、社会的受容性を高めるための PMV の挙動の制約条件や、歩道の設計要件の検討を行うことができると期待される。

2. 既往研究のレビュー

(1) 危険度の構成要素とリスク認知

交通安全における客観的な危険度 (リスク) は衝突発生確率と衝突強度 (被害の大きさ) の積 (式(1)) で表される²⁾。

$$\text{危険度} = \text{衝突発生確率} \times \text{衝突強度} \quad (1)$$

主観的な指標であるリスク認知指標についても、同様に確率と強度が説明要因になると考えられている。Slovic³⁾は、人間の活動や技術における 90 個のハザードに対して、アンケート調査を通じてリスク認知構造を分析し、リスクは未知性(unknown risk)、脅威性(dread risk)、被害曝露人口(degree of exposure to the hazard)の 3 つの次元に分類されることを明らかにしており、このうちの未知性、脅威性はそれぞれ確率、強度に対応する。

(2) 客観的な危険度の評価

衝突の発生確率と強度を直接計測することは困難であるため、利用者挙動の分布に基づき、確率や強度に相当する代替指標が導出される。客観的な危険度を説明する代替指標には、自動車対自動車 (自動車対歩行者) の交錯に対して一般的に用いられる衝突余裕時間⁴⁾ (Time to Collision, TTC) や交錯点通過時間差⁵⁾ (Post Encroachment Time, PET)、交錯時の走行速度などが挙げられる。TTC や PET は衝突発生確率、走行速度は衝突強度を間接的に表現するものと考えられる。

これらの多く指標は基本的に二者の動線が決まっており、交錯点の位置が明確に定義できる場合に使用される。しかし、PMV と歩行者の混在交通では、両者ともに動線の選択肢の自由度が大きいため、衝突パターンを所与

とすることができない。

(3) リスク認知を考慮した 主観的な危険度評価

PMV に対する歩行者のリスク認知に関する研究はいくつかある。菱川ら⁶⁾の研究では、PMV の車両形状が歩行者のリスク認知に与える影響を分析しており、PMV 運転者の乗車スタイルが立位タイプの車両より座位タイプの車両の方が安全・安心であることなどを示している。しかし、あくまで見た目での評価であり、挙動を考慮していない。中川ら⁷⁾は歩行者と PMV との衝突回避行動を実験により評価し、歩行者が自転車を回避するために確保するパーソナルスペースよりも、PMV に対して確保しようとするパーソナルスペースの方が小さいこと、PMV の接近方向によってパーソナルスペースが異なることを明らかにしている。PMV の挙動が歩行者の心理に与える影響について、中川らの一連の研究^{8,9)}では、倒立振子型車両が歩行者の心理に与える影響を分析しており、倒立振子型車両のステップの高さ、歩行者密度、歩行者と車両との距離、速度が影響因子として挙げられることを示した。このことから、リスク認知指標には衝突確率と強度のみでは表現できない影響要因が含まれることが推察できる。

接近する自転車に対する歩行者の主観的な危険度評価指標の構築を試みた山中らの研究¹⁰⁾では、歩行者が衝突リスクを認知した時点における衝突余裕時間から安全に回避を終えるまでの時間を差し引いた余裕時間を用いて、回避幅別のリスク認知確率モデルを構築した。また、Hasegawa et al.¹¹⁾は、静止する歩行者の近傍を PMV が通過する際、その歩行者が感じる危険度を歩行者と PMV の相対位置・速度から説明するモデルを提案した。しかし、これらの研究では、歩行者は自由な移動を許されていない状況であり、実際の道路環境との間には乖離があると考えられる。さらに、車両と歩行者の 1 対 1 に限定した評価であり、複数の歩行者が存在している状況を適切に評価できるとは言えない。

このように既往の主観的な危険度の評価指標には課題があり、複数の歩行者が混在する状況、歩行者や PMV の移動の自由度を考慮した状況を適切に評価できるとは言えない。

3. PMV 混在交通における危険度の評価方法

(1) 主観的な危険度の構成要素に関する仮説

本研究では、主観的な危険度指標 (Subjective Risk Level, SR level) の構成要素を検討するため、2 つの仮説を設定する。

仮説 1: 主観的危険度 (SR level) は PMV との衝突確率 P

や衝突強度 I に対応する指標によって説明される。

仮説 2：主観的危険度 $SR\ level$ は、歩行者自身の移動制約度に影響を受ける。

仮説 1 は、式(1)の危険度の考え方を反映するものである。なお、客観的指標では、危険度は確率と強度の積となるが、主観的指標の場合は必ずしもこの構造になるとは限らないと考えられる。仮説 2 は、歩行者交通の交錯が必ずしも 1 対 1 で発生するものではなく、複数の歩行者が同時に交錯することを考慮したものである。図-1 の下図のように、移動制約度が大きい場合、歩行者は危険な状況に陥ることを事前に回避することができず、結果的に PMV が至近を通過するなど、危険な状況になる場合がある。これに対して、移動制約度が小さいにも関わらず同じように PMV が通過した場合には、歩行者の主観的な危険度は異なると考えられる。このように、回避の選択肢の存在の有無が主観的危険度に影響すると考え、仮説を設定した。

(2) 衝突確率の代替指標

衝突確率 P の候補として、本研究では最接近距離 r_c [m] および回避時衝突余裕時間 $A.TTC$ [s] (Time to Collision at Avoidance) を使用する。以下では、この 2 つの変数の導出方法を説明する。

絶対座標系において、時刻 t における x 座標を $x(t)$ [m]、 y 座標を $y(t)$ [m]、速度の x 成分を $v_x(t)$ [m/s]、 y 成分を $v_y(t)$ [m/s] として記述する。評価対象歩行者 i の目標進行方向を x 軸正方向にとる。PMV j が $x_j > x_i$ の位置から x 軸負方向に移動し、対象歩行者に接近する。PMV 位置ベクトル $\vec{r}_j(t)$ 、歩行者位置ベクトル $\vec{r}_i(t)$ 、PMV 速度ベクトル $\vec{v}_j(t)$ 、歩行者速度ベクトル $\vec{v}_i(t)$ は式(2a)～(2d)のように表される。(図-2)

$$\vec{r}_j(t) = (x_j(t), y_j(t)) \quad (2a)$$

$$\vec{r}_i(t) = (x_i(t), y_i(t)) \quad (2b)$$

$$\vec{v}_j(t) = (v_{jx}(t), v_{jy}(t)) \quad (2c)$$

$$\vec{v}_i(t) = (v_{ix}(t), v_{iy}(t)) \quad (2d)$$

これより、歩行者 i の位置を常に原点とし、移動速度を 0、歩行者の向きを x 軸方向とする相対座標系において、相対位置ベクトル $\vec{r}_{ij}(t)$ 、相対速度ベクトル $\vec{v}_{ij}(t)$ は式(3a)および式(3b)のように表される。(図-3)

$$\begin{aligned} \vec{r}_{ij}(t) &= \vec{r}_j(t) - \vec{r}_i(t) = (x_{ij}(t), y_{ij}(t)) \\ &= (x_j(t) - x_i(t), y_j(t) - y_i(t)) \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_{ij}(t) &= \vec{v}_j(t) - \vec{v}_i(t) = (v_{ijx}(t), v_{ijy}(t)) \\ &= (v_{jx}(t) - v_{ix}(t), v_{jy}(t) - v_{iy}(t)) \end{aligned} \quad (3b)$$

これらを用いて、PMV j と対象歩行者 i の最接近時刻 t_c は式(4)によって算出される。(図-4)

$$t_c = \arg \min_t \|\vec{r}_{ij}(t)\| \quad (4)$$

最接近距離 r_c [m] は、歩行者 i と PMV j が最も近づいた時点での距離[m]であり、式(5)によって算出される。

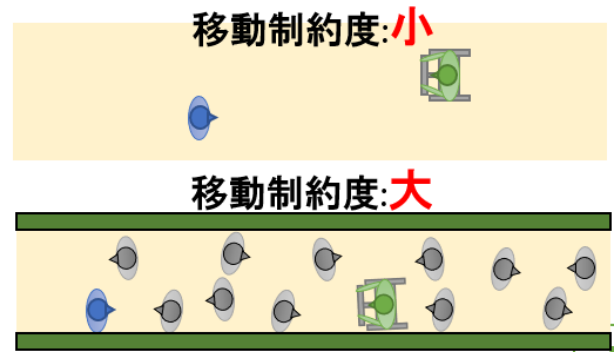


図-1 歩行者の移動制約度

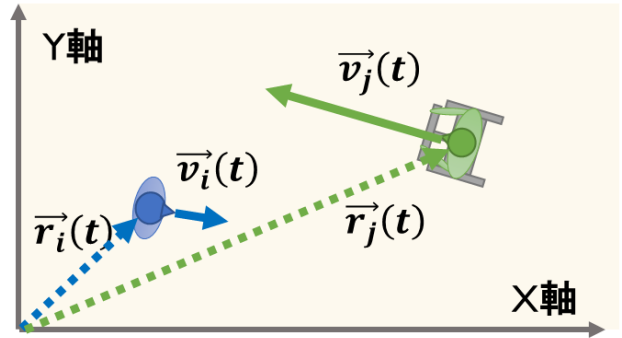


図-2 位置ベクトルと速度ベクトル (絶対座標系)

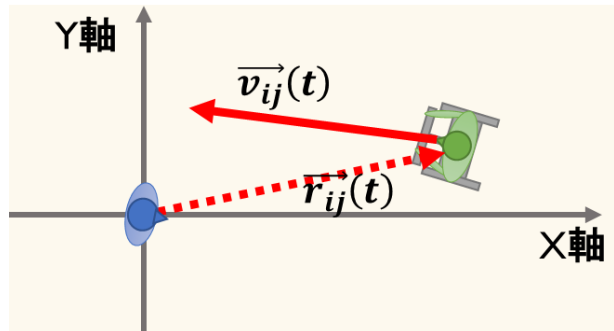


図-3 位置ベクトルと速度ベクトル (相対座標系)

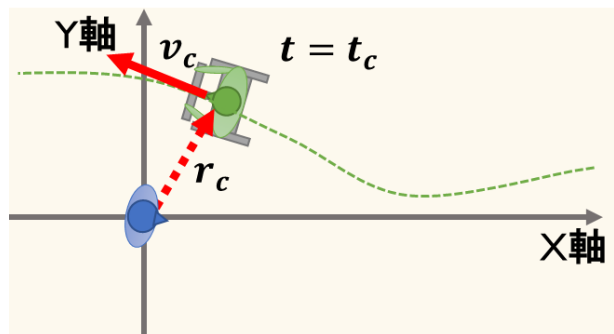


図-4 最接近距離と最接近時相対速度 (相対座標系)

$$r_c = \|\vec{r}_{ij}(t_c)\| \quad (5)$$

さらに、衝突確率 P の 2 つ目の候補として、回避時衝突余裕時間 $A.TTC$ [s] (Time to Collision at Avoidance) を考える。一般的な衝突余裕時間 TTC は、二者が現在の速度を維持した際に衝突するまでの時間で表され、各時刻において導出することができる。歩行者と PMV は空間的に回避することができるため、回避時衝突余裕時間 $A.TTC$ は、歩行者 i と PMV_j とが衝突しうる動線上にいる時刻のうち、最も遅い時刻 (回避完了する直前の時刻) での衝突余裕時間として算出する。

図-5 の相対座標系において、以下の式(6)が満たされる場合、歩行者 i と PMV_j とが衝突する可能性がある。

$$|y_{ij}(t)| \leq w \quad (6)$$

w はパラメータであり、以下の分析では $0.3m$ と設定した。 PMV_j と対象歩行者 i との交錯において、衝突しうる状態のうち、最も遅い時刻を衝突回避時刻 t_a とする。(式(7))

$$t_a = \max(t \mid |y_{ij}(t)| \leq w) \quad (7)$$

このとき、進行方向相対距離 $x_{ij}(t)$ を進行方向相対速度 $v_{ijx}(t)$ で割った値を、回避時衝突余裕時間 $A.TTC$ [s] とする。(式(8), 図-5)

$$A.TTC = \frac{x_{ij}(t)}{v_{ijx}(t)} = \frac{x_j(t_a) - x_i(t_a)}{v_{jx}(t_a) - v_{ix}(t_a)} \quad (8)$$

(3) 衝突強度の代替指標

衝突強度 I の代替指標の候補として、最接近時相対速度 v_c [m/s] を考える。最接近時相対速度は、歩行者 i と PMV_j が最も近づいた時点での相対速度の大きさである。相対速度が大きい場合は、衝突時の運動エネルギーの損失量が大きい状態に対応すると考えられることから、本指標を用いる。最接近時相対速度 v_c [m/s] は式(9)によって算出される。

$$v_c = \|\vec{v}_{ij}(t_c)\| \quad (9)$$

(4) 歩行者の移動制約度

歩行者の移動制約度 (Movement Constraint Level, MCL) を代表する客観的な指標として、侵害率 ($Disturb Rate(t), DR(t)$) を定義する。侵害率とは、何も障害がないときに歩行者が自由に歩ける領域の面積に対して他者によってその歩行を侵害された領域の面積の割合である。

以下、侵害率 $DR(t)$ の算出方法を説明する。まず、何も障害がないときに歩行者 i が自由に歩ける領域を自由歩行領域とする。自由歩行領域の面積 S_{free} [m²] は式(10)によって算出される。(図-6)

$$S_{free} = 2 * SR * FR \quad (10)$$

ここで、 SR は側方余裕距離 [m]、 FR は前方余裕距離

[m] である。後述するデータを用いた感度分析結果を踏まえ、本研究ではそれぞれ $1.5m$ 、 $5m$ とした。

次に、図-7 のように、歩行者 i の目標進行方向に対して左側の領域 (y 軸正の領域) において、自由歩行領域中に存在する物体 p を相対座標系において x 座標が小さい順に $p = 1, 2, \dots, P$ とする。ここでの物体には、 PMV 、周辺歩行者、および歩車道境界や建物との境界といった、歩道外との境界が想定される。物体 p よりも左上の領域に対象歩行者が移動することは困難であることから、物体 p と自由歩行領域に囲まれた長方形領域を左側侵害領域とした。各物体による左側侵害領域をそれぞれ導出し、各物体のいずれかにより侵害される部分の総面積 $S_L(t)$ [m²] を、図-8 のフローチャートに従って算出した。右側領域の侵害面積 $S_R(t)$ [m²] も同様の考えによって算出した。これにより、総侵害面積 $S_{disturb}(t)$ [m²] を式(11)によって求めた。

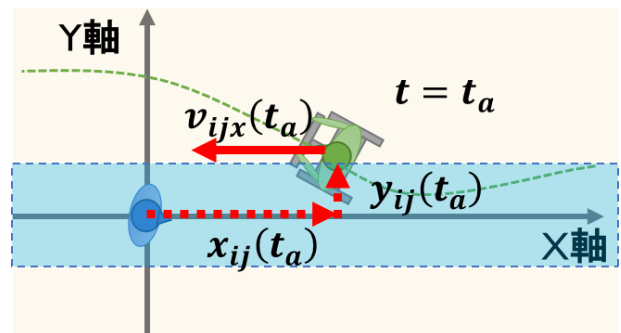


図-5 衝突回避時刻における諸元 (相対座標系)

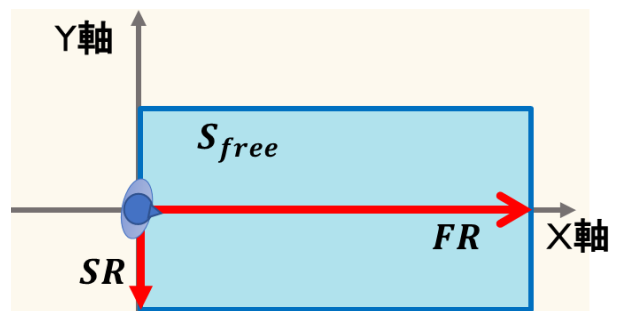


図-6 自由歩行領域 (相対座標系)

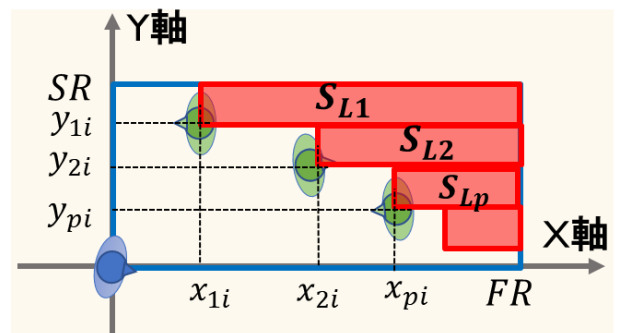


図-7 左側侵害領域 (相対座標系)

$$S_{disturb}(t) = S_L(t) + S_R(t) \quad (11)$$

そして、侵害率 $DR(t)$ を式(12)によって求めた。

$$DR(t) = \frac{S_{disturb}(t)}{S_{free}} \quad (12)$$

被験者が移動を開始 ($t = t_{start}$) し、PMV が側方通過するまで ($t = t_{end}$) の各時刻で、侵害率 $DR(t)$ を計算し、その時間平均値である侵害率平均値 \overline{DR} を式(13)のように算出した。

$$\overline{DR} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{end}} DR(t) dt}{t_{end} - t_{start}} \quad (13)$$

図-9 および図-10 のように歩行者が自由な通行を阻害される対象物体 p' として、順方向者（評価対象歩行者 i と同じ方向に歩く歩行者）、対向者（対向方向から接近する歩行者および PMV j ）、壁（車道、沿道部などの歩道外部）の 3 種類が考えられる。それぞれが移動制約度 MCL や主観的危険度 SR level に与える影響は異なると考えられる。よって、侵害率算出の対象となる物体 p' を順方向者、対向者、壁とした場合のそれぞれの侵害率平均値を順方向者侵害率平均値 $Forward.\overline{DR}$ 、対向者侵害率平均値 $Backward.\overline{DR}$ 、壁侵害率平均値 $Wall.\overline{DR}$ とし、式(14a)～式(14c)のように求めた。

$$Forward.\overline{DR} = \overline{DR} (p' = \text{順方向者}) \quad (14a)$$

$$Backward.\overline{DR} = \overline{DR} (p' = \text{対向者}) \quad (14b)$$

$$Wall.\overline{DR} = \overline{DR} (p' = \text{壁}) \quad (14c)$$

4. バーチャルリアリティ実験と分析に使用するデータ

(1) バーチャルリアリティ実験の概要

本研究において分析に用いるデータは、2017年に実施されたバーチャルリアリティ(VR)実験のものを使用する。これは、40名の被験者にVRヘッドセットを装着してもらい、仮想空間上において歩行・回避する実験である。被験者は、20-23歳の大学生・大学院生であり、その内訳は、男性36名、女性4名であった。このうち、9名がPMVの乗車経験があった。

このときのVR実験の詳細を示す。VR実験は、大学の室内で実施し、VRヘッドセットはOculus Riftを使用した。映し出した映像はUCwin-roadを用いて生成した空間内をセグウェイと歩行者が移動するようになっている(図-10、図-11)。被験者は3m×3mの空間において、あたかもその一人として動くことができ、他の歩行者やPMVともインタラクティブに影響を与える。

(2) キャラクターの挙動設定

キャラクターの移動軌跡の計算には、歩行者が他の歩行

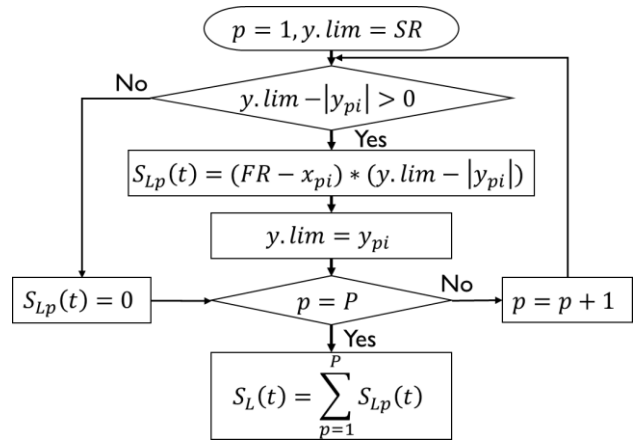


図-8 左側領域の侵害面積の計算フロー

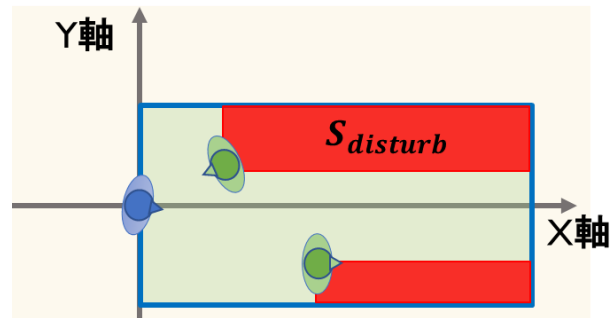


図-9 侵害領域のイメージ例1 (相対座標系)

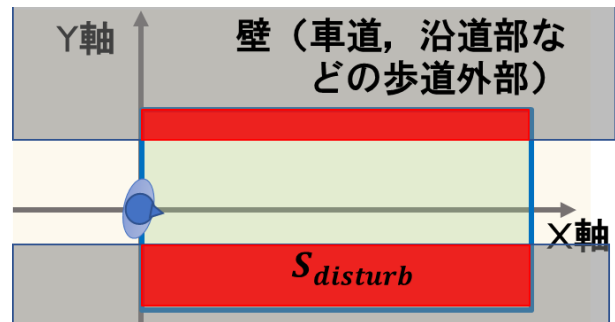


図-10 侵害領域のイメージ例2 (相対座標系)



図-10 VR装置と実験の様子

者や障害物から受ける心理的な仮想上の反力(Social Force)を用いた歩行モデル¹²⁾を基本に、これを修正した

モデル¹³⁾を使用した。セグウェイのモデルパラメータは走行実験に基づき推定したもの¹⁴⁾を用いた。

(3) シナリオの設定

各シナリオは、歩道幅・歩行者密度・対象となる車両の種類・対象となる車両の希望速度・対象となる車両の挙動の組み合わせで構成される。これらのシナリオはすべて単路の歩道で実行される。また、歩行者は双方向に歩いているが、セグウェイや自転車は全て前方から向かってきて被験者とすれ違うようにした。歩道幅には2m, 2.5m, 3m, 4mの4種類、歩行者密度は低密(0.1人/m²)と高密(0.3人/m²)の2種類、対象となる車両の希望速度は5m/sと10m/sの2種類、PMVの挙動特性は歩行者を大きく回避する場合と直線的に走行する場合の2種類を用意した。

(4) 実験の進め方

習熟歩行ののち、88回の試行を行った。各試行では、周りの歩行者やセグウェイの様子を見ながら約4m前方の地点まで、被験者は前に向かって歩く。ゴールラインに到達することで1回の試行が完了する。各試行はシナリオを44種類用意し、それぞれのシナリオは2回行われるように設計した。

なおこのVR環境において、前方から来るPMVへの被験者の危険度認知や周辺歩行者に対する回避挙動は、現実環境での実験と概ね差がないことが示されている¹⁵⁾。

(5) 取得したデータ

各試行において、各時刻の対象車両・被験者・周辺歩行者の位置、速度、ヨー角の情報を記録した。データ取得間隔は実験時のフレームレートに依存するため完全に一定の間隔ではないが、およそ0.9秒である。また、主観的危険度SR Level(安全:1~危険:7)と主観的制約度SC Level(歩きやすい:1~歩きにくい:5)を尋ねた。

5. 実験結果の分析と新たな危険度評価指標の提案

(1) 主観的危険度 SR Level と主観的制約度 SC Level の分布

本実験で得られた、主観的危険度SR Levelと主観的制約度SC Levelの分布を表-1に示す。相関係数の値はr=0.73であり、主観的危険度SR Levelと主観的制約度SC Levelの相関が高い。主観的制約度SC Levelに対する相関の値は、衝突確率Pに相当する最接近距離では0.42, ATTCでは-0.35, 衝突強度Iに相当する最接近時相対速度では0.10であった。このことから、主観的制約度



図-11 VR空間の映像例

表-1 主観的危険度と主観的制約度の分布

		主観的制約度 SC level				
		1	2	3	4	5
主観的危険度 SR level	1	496	73	10	2	0
	2	185	138	49	16	2
	3	68	197	95	21	5
	4	22	111	94	27	2
	5	35	167	224	86	24
	6	3	28	101	128	39
	7	0	6	8	26	58

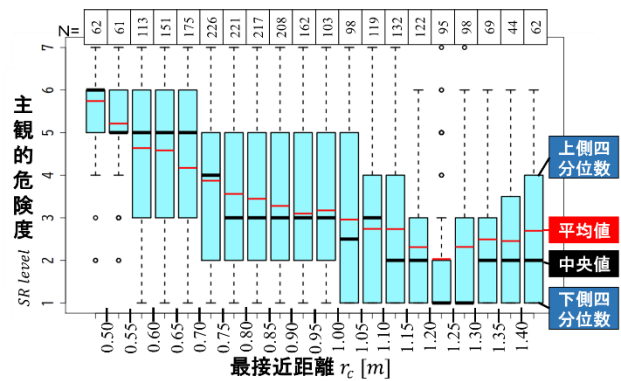


図-12 最接近距離別の主観的危険度分布

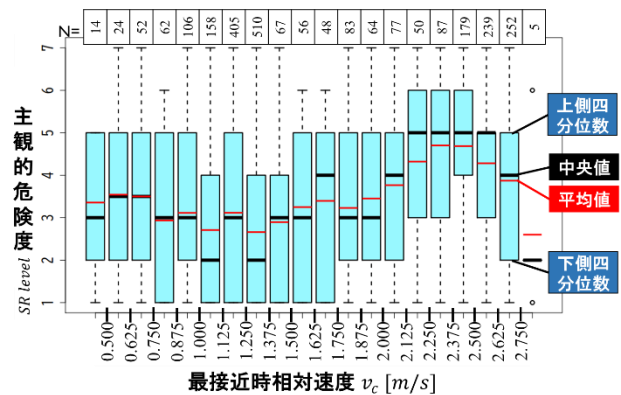


図-13 最接近時相対速度別の主観的危険度分布

SC Levelは衝突確率Pや衝突強度Iとは独立した変数として検討することが望ましいと考えられる。

(2) 仮説 1 の基礎分析

3章において、仮説1の衝突確率Pや衝突強度Iの変数候補として、3つの変数を挙げた。この、最接近距離 r_c [m]、最接近時相対速度 v_c [m/s]、回避時衝突余裕時間A.TTC [s]別の主観的危険度SR Level分布ヒストグラムを図-12 から図-14 に示す。箱の上端は上側四分位数、箱の下端は下側四分位数、赤線は平均値、黒線は中央値を示す。

図-12 を見ると、最接近距離 r_c [m] が小さいほど、主観的危険度SR Levelが大きい傾向にある。また、図-13 を見ると、最接近時相対速度 v_c [m/s] が大きいほど、主観的危険度SR Levelが大きい傾向にある。

回避時衝突余裕時間A.TTC [s]は、観測値が得られない状況（全時間帯で衝突の可能性がない試行）を 10 秒として扱った。図-14 を見ると、回避時衝突余裕時間A.TTC [s]が大きいほど、主観的危険度SR Levelが小さい傾向にあるが、回避時衝突余裕時間A.TTC [s]が 3s より大きいところでは、低減傾向が強くは見られなかった。

さらに、衝突確率Pの候補として挙げた、最接近距離 r_c [m]と回避時衝突余裕時間A.TTC [s]の2つの変数の相関があまり大きくなかった ($r=0.45$)。このため、それぞれ別に作用する衝突確率Pと考えることができる。

(3) 仮説 2 の基礎分析

3章において、仮説2の移動制約度MCLの変数候補として、3つの侵害率平均値を挙げた。この、順方向者侵害率平均値Forward.DR、対向者侵害率平均値Backward.DR、壁侵害率平均値Wall.DR別の主観的制約度SC Level分布ヒストグラムを図-15 から図-17 にしめす。箱の上端は上側四分位数、箱の下端は下側四分位数、赤線は平均値、黒線は中央値を示す。

図-15 を見ると、順方向者侵害率平均値Forward.DR が大きいほど、主観的制約度SC Levelが大きい傾向が僅かにみられる。これは、同じ方向に進む歩行者に追従している際には歩きにくいとは思わず、主観的制約度SC Levelは小さく保たれ、移動制約度MCLは小さいままである可能性がある。

図-16 を見ると、対向者侵害率平均値Backward.DR が大きいほど、主観的制約度SC Levelが大きい傾向にある。対向者による影響は大きいと考えられる。また、図-17 を見ると、壁侵害率平均値Wall.DRが大きいほど、主観的制約度SC Levelが大きい傾向にある。これは、道幅の狭いシナリオにおいて、壁侵害率平均値Wall.DRが大きくなるので、常に移動制約を受け歩きにくいと感じていると考えられる。

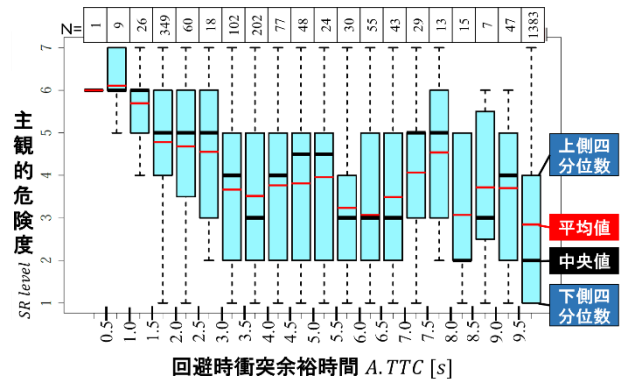


図-14 回避時衝突余裕時間別の主観的危険度分布

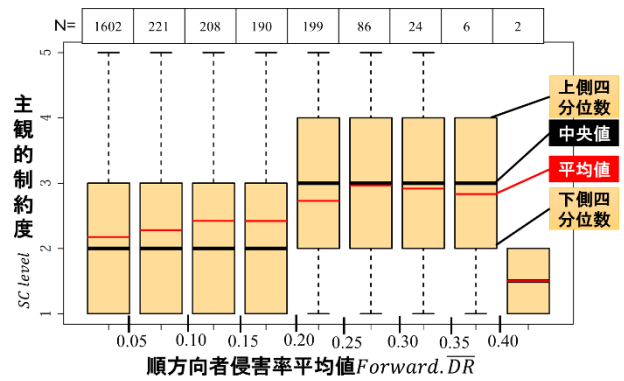


図-15 順方向者侵害率平均値別の主観的制約度分布

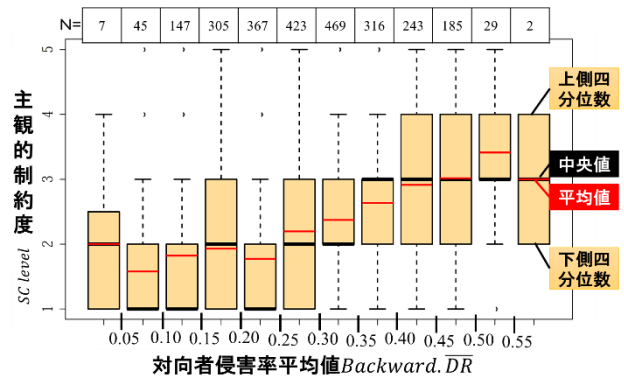


図-16 対向者侵害率平均値別の主観的制約度分布

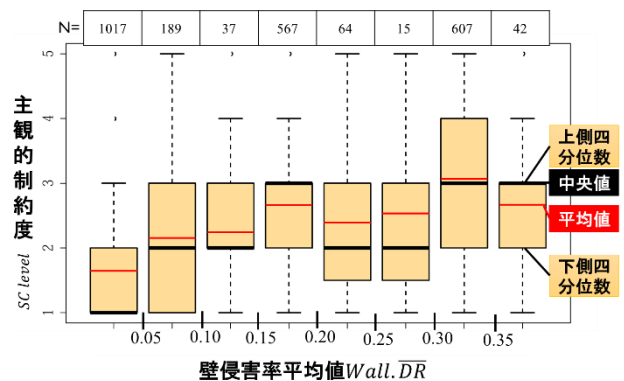


図-17 壁侵害率平均値別の主観的制約度分布

表-2 重回帰分析の結果

	説明変数		Unit	偏回帰係数
	(Intercept)	定数項		0.508*
衝突確率P	$\exp(-r_c)$	$\exp(-\text{最接近距離})$		3.24***
	<i>A. TTC</i>	回避時衝突余裕時間	[s]	-0.0834***
衝突強度I	v_c	最接近時相対速度	[m/s]	0.767***
移動制約MCL	<i>Wall. DR</i>	壁侵害率平均値	[-]	3.46***
	<i>Backward. DR</i>	対向者侵害率平均値	[-]	1.25**
	adj. R-squared	自由度調整済み決定係数		0.328
	N	サンプル数		2538

Significance: *** = $p < 0.001$; ** = $p < 0.01$; * = $p < 0.05$

(4) 線形重回帰分析による危険度評価指標モデルの提案

線形重回帰分析を用いて、主観的危険度 *SR Level* と衝突確率 *P*、衝突強度 *I*、移動制約度 *MCL* の関係の定量化を行った。線形重回帰分析による危険度評価指標モデルは式(15)によって説明される。

$$SR\ level_i = \alpha + \sum \beta_i x_i \quad (15)$$

ここで、 α : 定数、 β_i : 係数、 x_i : 説明変数である。目的変数である主観的危険度 *SR Level* に対して、説明変数として表-2 の変数を考慮した。

まず、5.2 節の結果から、説明変数の候補に、衝突確率 *P* として、最接近距離 r_c [m] と回避時衝突余裕時間 *A. TTC* [s] の 2 つの変数の両方を説明変数として採用する。最接近距離 r_c [m] は、近傍ほど感度が強くなることを考慮すると、小さな値であるほど変動が大きくなる $\exp(-r_c)$ とすることが考えられる。また、衝突強度 *I* として、最接近時相対速度 v_c [m/s] を用いる。移動制約度 *MCL* として、壁侵害率平均値 *Wall. DR*、対向者侵害率平均値 *Backward. DR*、順方向者侵害率平均値 *Forward. DR* が説明変数の候補である。

線形重回帰分析の結果、説明変数として、衝突確率 *P* では最接近距離の \exp 項である $\exp(-r_c)$ および回避時衝突余裕時間 *A. TTC* が有意水準 99.9% で有意となった。衝突強度 *I* として最接近時相対速度 v_c [m/s] が有意水準 99.9% で有意となった。移動制約度 *MCL* として壁侵害率平均値 *Wall. DR* が有意水準 99.9% で有意に、対向者侵害率平均値 *Backward. DR* が有意水準 99% で有意となった。なおこれらの変数の多重共線性は見られなかった。

各項の主観的危険度 *SR Level* に対する寄与度を考える。 $\exp(-r_c)$ の値の変化をみると、(観測データ $\exp(-r_c)$ の 15 パーセンタイル値 ~ 85 パーセンタイル値) = (0.323 ~ 0.523) であり、 $\exp(-r_c)$ の 15 パーセンタイル値と 85 パーセンタイル値を入力としたときの *SR Level* の差は約 0.6 である (以下同様に示す)。 *A. TTC* の値の変化は (1.98 ~ 10.0) であり、 *SR Level* の差は同程度の約 0.6 である。また、 v_c [m/s] の値の変化は (1.08 ~ 2.55)

であり、 *SR Level* の差は約 1.1 である。 *Wall. DR* の値の変化は (0.000 ~ 0.333) であり、 *SR Level* の差は約 1.2 である。 *Backward. DR* の値の変化は (0.181 ~ 0.416) であり、 *SR Level* の差は約 0.3 である。

これらの結果から、移動制約度 *MCL* のうち、侵害率平均値 *Wall. DR* の効果が最も大きいことがわかる。これは、狭い道路であるほど大きな値になり、幅員が危険度の主観的認知に強く影響を与えていることが示唆される。また、衝突確率 *P*、衝突強度 *I*、対向歩行者による移動制約についても、主観的危険度に対してそれぞれ無視できない大きさの影響を与えていることが示された。

重要なポイントとして、順方向者侵害率平均値 *Forward. DR* の項は有意水準 5% で有意にならなかったことを指摘する。これは、順方向者に対して対象歩行者は追従歩行すれば、対向歩行者との交錯を避けることができるためと考えられる。

6. おわりに

本研究では、PMV 混在交通における危険度の評価方法の検討を行い、従来の危険度評価指標に用いられる衝突確率と衝突強度に加えて、移動制約度を考慮した。さらに、移動制約度を表す新たな概念として侵害率を用いた分析を実施した。主観的危険度を目的変数とする線形重回帰分析を実施した結果、移動制約度として侵害率を考慮したモデルが最も妥当であることが明らかになった。これにより、周辺歩行者の存在による移動の制約が歩行者の主観的危険度に与える影響を考慮した、PMV に対する歩行者の危険度評価指標の提案を行った。

今後の課題として次のようなものが考えられる。まず、衝突確率 *P* と衝突強度 *I* の指標を独立に扱っているが、客観的な危険度の評価方法に合わせて、交互作用を考慮したモデルの構造が考えられる。また、間隔尺度をそのまま用いたモデルを今回提案したが、回答者の危険度に

対する尺度の間隔が安全側と危険側とで必ずしも一致するとはいえないことから、順序ロジットモデルを用いた分析を行うことも考えられる。また、移動制約度として、侵害率というものを新たに提案したが、回避挙動の特徴にさらに即した変数なども検討することが考えられる。また、今回は歩道幅と挙動設定を別にせず全ての試行を含めた分析をしたが、歩道幅や挙動設定別に分析を深める必要がある。

さらに、今回の提案指標を用いて、交通シミュレーションを用いた混在交通下の PMV の走行条件の提案を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Lieswyn, J., Fowler, M., Koorey, G., Wilke, A., and Crimp, S.: Regulations and safety for electric bicycles and other low-powered vehicles, *NZ Transportation Agency*, 2017.
- 2) 鈴木弘司, 藤田素弘, 小塚一人, 串原喜之: 利用者のリスクテイキング/回避行動を考慮した信号交差点の運用評価に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, 22 巻, pp.853-862, 2005.
- 3) Slovic, P.: *The Perception of Risk*, Earthscan, pp.137-153, 2000.
- 4) HAYWARD, John C.: Near miss determination through use of a scale of danger. 1972.
- 5) Cooper, P. J.: Experience with Traffic Conflicts in Canada with Emphasis on "Post Encroachment Time" Techniques, *International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques*, pp.75-96, 1984.
- 6) 菱川貴之, 井料美帆, 長谷川悠: パーソナルモビリティの車種が歩行者のリスク認知に与える影響に関する研究. *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, 75 巻 5 号, pp.595-605, 2019.
- 7) 中川智皓, 中野公彦, 古賀誉章, 須田義大, 川原崎由博, 小坂雄介: パーソナルスペースを用いたパーソナルモビリティ・ビークルと歩行者の親和性評価実験, *日本機械学会論文集 C 編*, 76 巻 77 号, pp.2493-2499, 2010.
- 8) 中川智皓, 今村和樹, 新谷篤彦, 伊藤智博: パーソナルモビリティ・ビークルの大きさと歩行者の親和性に関する実験的研究, *日本機械学会論文集 C 編*, 78 巻 794 号, pp. 3332-3342, 2012.
- 9) 中川智皓, 中野公彦, 須田義大, 川原崎由博, 小坂雄介: 歩行空間におけるパーソナルモビリティ・ビークルの安全性と安心感, *自動車技術会論文集*, 41 巻 4 号, pp.941-946, 2010.
- 10) 山中英生, 半田佳孝, 宮城祐貴: ニアミス指標による自転車歩行者混合交通の評価法とサービスレベルの提案, *土木学会論文集*, 59 巻 730 号, pp.27-37, 2003.
- 11) Hasegawa, Y., Dias, C., Iryo-Asano, M. and Nishiuchi, H.: Modeling pedestrians' subjective danger perception toward personal mobility vehicles, *Transportation Research Part F*, vol. 56, pp.256-267, 2018.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Dias, C., Iryo-Asano, M., Nishiuchi, H. and Todoroki, T.: Calibrating a Social Force based Model for Simulating Personal Mobility Vehicles and Pedestrian Mixed Traffic, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.87, pp.395-411, 2018.
- 15) Iryo-Asano, M., Hasegawa, Y. and Dias, C.: Applicability of Virtual Reality Systems for Evaluating Pedestrians' Perception and Behavior, *Transportation Research Procedia*, Vol. 34, pp.67-74, 2018.

0

RISK EVALUATION INDEX IN A MIXED TRAFFIC OF PERSONAL MOBILITY VEHICLE AND PEDESTRIANS

Takayuki HISHIKAWA and Miho IRYO