

群としての歩行者の交錯回避行動分析*

Analysis on collision avoiding behaviour of clustered pedestrians *

浅野美帆**・井料隆雅***

By Miho ASANO**・Takamasa IRYO***

1. はじめに

本研究では、歩行者の群衆内における回避行動について分析を行うことを目的とする。

近年歩行空間の設計にあたり、容量やサービスレベルといった交通工学的観点からの評価に関心が寄せられている。歩行者の場合は自動車交通と異なり、複数方向に移動する交通流の影響を考慮することが不可欠である。しかし、このような複数方向に移動する交通流に対して、自動車交通のQ-V曲線のように汎用的に適用できる交通流理論は未だ十分に整理されていないのが現状である。

そのため、交通流のマクロな関係を、個々の歩行者のミクロな行動の積み上げとして記述する手法が有効と考えられる。このミクロな行動とは、混雑による速度低下や交通容量を説明するという観点から、特に複数歩行者間の相互作用や回避行動を指す。

既存の歩行者ミクロ行動モデルの中には、物理的な反発力を援用したモデル¹⁾、セルオートマタのように一定の回避ルールに基づき他の歩行者を回避するモデル²⁾など様々なモデルがある。また、行動分析としても、周辺歩行者の位置や移動方向の情報を元に歩行者の速度選択行動を説明するもの^{3),4)}などが提案されている。

これら既存モデルの多くは、一対一の歩行者回避行動に基づいており、また他者の行動戦略を考慮していない。しかし、実際に歩行者群が錯綜する際には、周辺の多数の歩行者の行動戦略を考慮しつつ各歩行者が行動を選択していると考えられる。また、この選択行動が歩行者群全体としての移動効率性、すなわち交通容量にも影響していると考えられる。

本研究では、実験により観測された個々の歩行者の移動軌跡データを基に、群内における個々の歩行者の回避行動の要因について分析する。

*キーワード：歩行者、回避行動

**正員，博（工），名古屋大学大学院工学研究科
（名古屋市千種区不老町，TEL:052-789-3832，
E-mail: asano@genv.nagoya-u.ac.jp）

***正員，博（工），神戸大学大学院工学研究科

2. 歩行者の回避判断

群衆内の歩行者は、交錯の可能性のある周辺歩行者を避けるか、あるいはその周辺歩行者に避けてもらうことで衝突回避を行っている。Asano et al⁵⁾は自分から能動的に相手を避ける譲り行動と、相手から譲ってもらう行動とについて、複数歩行者間の衝突回避ゲームとして説明する理論モデルを構築し、それによって歩行者が実際の行動と同様に回避行動を行うことを示した。

歩行者の相互作用をゲームとして記述する場合には、どの歩行者が譲り、どの歩行者が譲られるかがどのように決まるかを知ることが重要になる。なぜなら、このようなゲームではそのナッシュ均衡解は「一方が譲り、一方が譲られる」となるためである。譲る／譲られるルールがどのようにになっているかは、歩行者流のマクロ的特性に少なからず影響を与えるものと想定できる。しかし、上述のゲーム理論による定式化では、そのルールは単にランダムに定まるものとしていた。

本研究では、どちらが回避し（＝譲り）、どちらが回避される（＝譲られる）かというルールがどう決まるか、その傾向を実際の歩行者流における移動軌跡が示す歩行者の回避行動を用いて分析する。特に、自分と将来衝突しうる歩行者を単独のものとして評価しているか、それとも群として評価しているか、どちらのほうがよりよく実際の行動を説明できるかについて実証的に調べる。

3. 使用データの概要

(1) 実験の概要

東京大学生産技術研究所にて実施した歩行者流動実験のデータ⁶⁾を用いる。この実験では、図-1に示す幅3mの通路が交差する空間を被験者に歩いてもらい、人為的に様々な交通量状態を再現した。被験者数は94名である。歩行時に、被験者には通勤、通学における歩行を想定してもらった。表-1に、実験時の交通量・交錯角度のパターンのうち、本稿で分析対象としたものを示す。本研究では、歩行者密度が1.0人/m²程度以下の、非混雑時の回避行動を対象とする。また、通路同士が交錯する箇所（図-1のハッチ部分）を、以下交錯領域とよぶ。

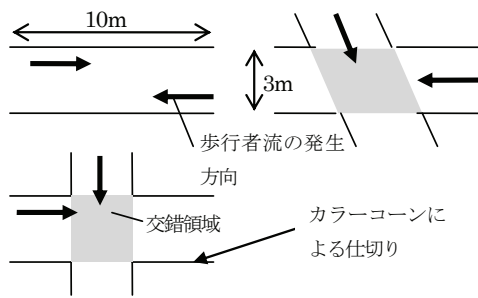


図-1 実験歩行区間の例

表-1 設定交通量, 交錯角度

交差角度 (度)	流入交通量 全方向計 (人/分)	方向別流入交通量比(%)
90	90, 180	50:50, 75:25, 88:12
180	90, 180	50:50, 75:25, 88:12
45	180	50:50, 88:12
135	180	50:50, 88:12



図-2 歩行者流動実験の例⁶⁾

(2) 歩行軌跡の取得

図-2のように真上からビデオ撮影を行い、各歩行者の頭の位置を0.1秒ごとに取得した。各歩行者の身長を一律170cmと仮定した上で、射影変換により画像座標系から床平面上の歩行者の位置座標系へと座標変換を行った。身長の違いなどにより考えられる座標変換時の誤差範囲は10cmであった。歩行者の頭の位置は、歩行中の足の踏み出しに応じて、進行方向に対して直交する方向に振動する。そこで、各歩行者の位置座標について前後1秒間の移動平均をとることでスムージングを行い、直交方向の振動の影響を除去した。

(3) 軌跡の線分近似と回避開始タイミングの同定

次に、歩行者の回避行動開始タイミングを抽出するため、上記で平滑化した移動軌跡を線分に分割する近似を行った。手順は以下の通りである。

- 1) まず、線分の分割数 $N=1$ とする。軌跡の両端点を P_0, P_1 とおく。(ただし、それぞれの点の時刻 $t(P_0) < t(P_1)$ とする。) P_0P_1 間の軌跡の近似直線をそれぞれ最小二乗法により求める。
- 2) 近似直線と移動軌跡の個々の時刻の位置座標との誤差の最大値が一定値(ここでは20cm)以下であれば、処理を完了する。

- 3) そうでない場合、 $N \rightarrow N+1$ とする。最も誤差が大きくなる時刻の点 P' ($t(P_{i-1}) < t(P') < t(P_i), 1 \leq i \leq N$)を含む区間 $P_{i-1}P_i$ について、 $P_{i-1}P_k, P_kP_i$ 間の軌跡の近似直線のうち、誤差が最小となる点 P_k ($t(P_{i-1}) < t(P_k) < t(P_i)$)を求める。
- 4) $P_i \rightarrow P_k, P_{i+1} \rightarrow P_i, \dots, P_{N+1} \rightarrow P_N$ と置き換え、線分の数 $N \rightarrow N+1$ として2)に戻る。

図-3, 4に、移動平均により平滑化した軌跡、線分に分割した軌跡を元データと比較した例を示す。これはy軸方向に移動する歩行者の移動軌跡であるが、移動方向に対しては線分近似と元データとの移動軌跡がほとんど一致していることがわかる。

このように線分近似することで、単純に平滑化した軌跡に比べて少ない情報量で歩行者の行動を記述することができる。また、線分近似した軌跡において、線分の傾きが変化した地点は、歩行者が速度や進行方向を変えたタイミングとみなすことができる。

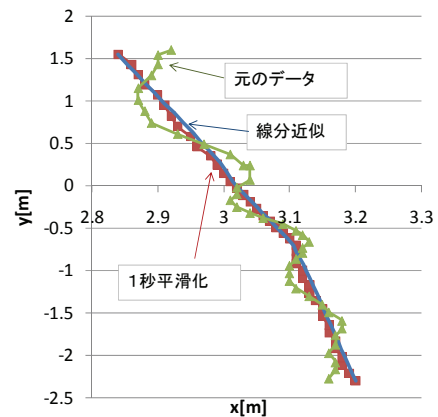


図-3 線分近似した歩行者軌跡の例 (x-y 図)

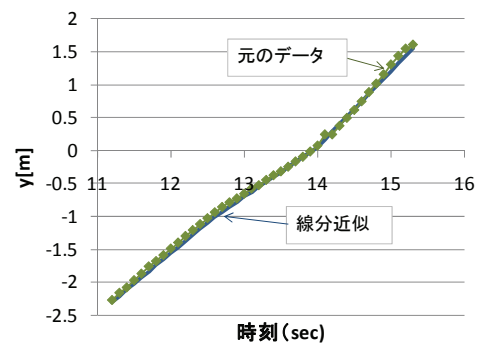


図-4 線分近似した歩行者軌跡の例 (y-t 図)

4. 歩行者間の回避行動パターンの分布

個々の歩行者の回避行動は、速度低下による回避と移動方向を変更することによる回避に分けることができる。歩行者1人が図-1内の交錯領域を1回通過する際の、速度と移動方向の変更頻度を図-5に示す。ここで速度変

化とは、移動軌跡の傾きが 0.1m/s 以上変化したとき、方向変化とは、軌跡の移動方向が角度にして 10 度以上変化したときとした。図より、この実験における歩行者の回避行動の多くは速度変更によるものだということがわかる。また、表-2は速度変更と角度変更を同時に行っているか、あるいはいずれか一方のみかを示したものである。角度変更の多くが速度変更を伴うものとなっている。

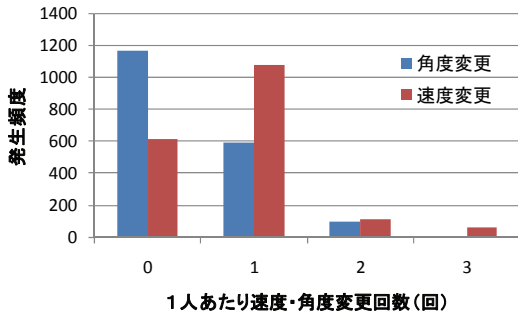


図-5 歩行者1人あたりの速度・角度変更回数

表-2 角度変更と速度変更の関係

	速度変更あり	速度変更なし
角度変更あり	4 6 7	2 2 5
角度変更なし	7 8 7	

5. 回避開始判断モデル

2章で示した歩行者の回避判断は、上記の線分近似した軌跡において速度や移動方向角の変更を行ったタイミングとみなすことができる。ここでは特に、速度が低下した、あるいは移動方向を変更した時を回避行動開始のタイミングとみなし、そのタイミングが周辺歩行者の状況によってどのように決定されるかを分析する。

(1) 周辺歩行者行動の予測

対象とする歩行者は、現在の時刻 t までの周辺状況に元、時刻 $t+T$ までの周辺状況を予想した上で、回避をする(=譲る)かどうかの判断を行っているかと仮定する。もしもこの対象歩行者が回避を行わないとすると、この歩行者は現在と変わらない速度・方向に移動することとなる。また、周辺状況の予測にあたっては、周辺歩行者は時刻 t から $t+T$ までの間に回避行動を開始しない、つまり速度・方向変更をしないと仮定する。例えば仮に、対象歩行者と他の歩行者との位置関係が図-6に示される状況の場合、時刻 t から $t+T$ までの対象歩行者と他の歩行者との中心間距離は図-7のように推移する。この図の歩行者Aは対象歩行者に近づき、その後急速に離れていく。一方、歩行者Bは対象歩行者とほぼ並行に移動しており、その距離は t から $t+T$ までを通じてほとんど

変化しない。このとき、歩行者Aのように距離が近く、かつ距離の変化量が大きいものは、対象歩行者にとって特に回避すべき対象になると考えられる。

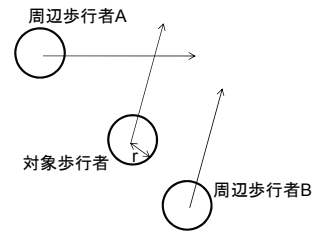


図-6 周辺歩行者との位置関係

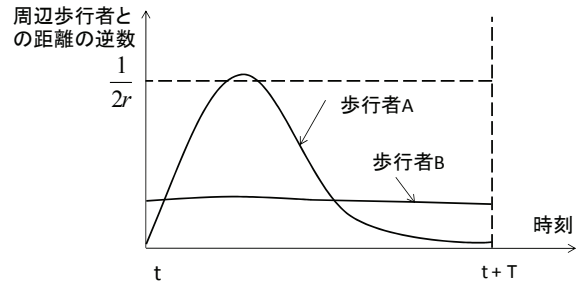


図-7 周辺歩行者との予測距離の推移

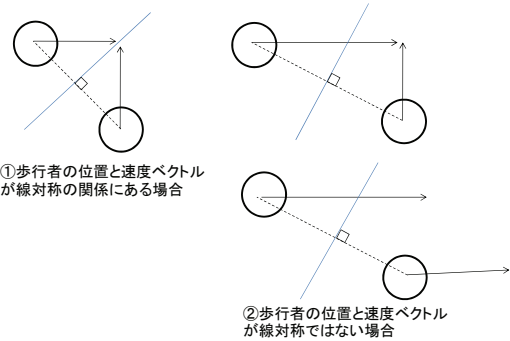


図-8 周辺歩行者との位置関係と対称性

周辺歩行者の位置・方向と回避行動の関係を記述するために、2人の歩行者の幾何的な関係を考える。図-8の①のように、対象歩行者と周辺歩行者の位置・速度ベクトルがある対称軸に対して線対称の関係にある場合には、歩行者同士の優先関係が明確でないため、どちらの歩行者が回避するのかが必ずしも明白ではない。しかし、②のように、歩行者の位置関係が対照とはならない場合には、優先順位に何らかの傾向が出てくると考えられる。例えば、②の下図のように片方の歩行者がほぼもう一人の歩行者に追従している際には、先行している歩行者は追従する歩行者に対しての回避行動を想定しないと考えられる。

(2) 説明変数

提案するモデルの被説明変数は、与えられた時刻において、対象歩行者が回避開始の意思決定を行うか否かである。周辺歩行者 i に対する説明変数は、

$$v_{ji} = \int_{s \in T^+} \frac{ds}{D_i(s)} \cdot \text{Var}_{s \in T^+} \left(\frac{1}{D_i(s)} \right) \cdot \frac{(180 - \theta_{ij} + \theta_{ji})}{c} \quad (1)$$

とした、ただし、 $D_i(t)$ は周辺歩行者*i*との時刻*t*における予測距離(m)、 θ_{ij} は対象歩行者*j*の移動方向ベクトルと、*j*から見た周辺歩行者*i*の相対位置ベクトルとのなす角である。積分記号と分散演算子Varにある $s \in T^+$ は、それぞれ、 s が集合 T^+ に属する時間帯で積分あるいは分散の演算を行うことを意味する。 T^+ は $t \sim t+T$ のうち、 $D_i(t)$ が増加する時間の集合と定義する。各項の詳細を以下に述べる。

a) 周辺歩行者との距離

周辺歩行者*i*との距離 $D_i(t)$ の逆数について、時刻 $t \sim t+T$ の各時刻における値の和をとったものである。ただし、周辺歩行者が遠ざかっている時間は集計の対象外とした。

b) 周辺歩行者との距離の分散

$D_i(t)$ の逆数の時刻 $t \sim t+T$ での分散をとったものである。図-7で示したように、異なる方向に移動しており、距離の変化量が大きいほど分散も大きくなる。a)と同様、周辺歩行者が遠ざかっている時間帯は集計より除いた。

c) 周辺歩行者との位置関係

c)の項は、*i*が*j*に追従しているときには小さく、逆に*j*が*i*に追従しているときに最大となる。周辺歩行者と対象歩行者の位置関係が線対称になっている場合、 $\theta_{ij} = \theta_{ji}$ となり、中間の値をとる。このように、この項は歩行者の幾何的な位置関係を示す。

式(1)は周辺歩行者 *i* 1人に対する説明変数であり、他の歩行者についても同様に説明変数を求めることができる。ここでは、①周辺歩行者のうち、回避による効用が最も高い者を選択する場合、②全周辺歩行者に対する回避効用を考える場合、の2通りについて未知パラメータの推定を行う。①の場合の効用関数確定項は、

$$V_j^1 = \beta_0 + \beta_1 V_{jm} \quad \text{where } m = \arg \max_i (V_i) \quad (2)$$

②の確定項は

$$V_j^2 = \beta_0 + \beta_1 \sum_i V_{ji} \quad (3)$$

と書ける。ここで β_0, β_1 は未知パラメータである。

(3) 推定結果と考察

それぞれのケースの推計結果を表-3に示す。なお予測時間 $T=3$ 秒とした。周辺歩行者のうち最も衝突による影響が高いクリティカルな歩行者だけを対象とした場合よりも、全周辺歩行者への回避を考慮した場合の方が、推定精度が向上していることがわかる。この結果は、

歩行者は自身の回避行動を決定する際に、単一の歩行者の行動だけではなく、複数の歩行者の行動に影響されること、また、自身と衝突する可能性がある歩行者の数が多いと回避行動を起こしやすくなることを示唆している。

表-3 推定結果

	①最も効用が高い者だけを考慮	②全周辺歩行者に考慮
β_0	-1.18 (-22.44)	-1.34 (-24.57)
β_1	$7.182 \cdot 10^{-4}$ (24.05)	$4.092 \cdot 10^{-4}$ (26.32)
サンプル数	3012	
初期尤度	-10388.0	
最終尤度	-8430.2	-7954.8
修正済 ρ^2 値	0.188	0.234

6. まとめと今後の課題

本研究では、歩行者の集団内における回避行動について分析を行った。基礎的な回避タイミング決定モデルにより、歩行者がある特定の歩行者だけでなく、複数の歩行者がなす集団全体に影響されて回避するかどうかの行動を選択していることが示唆された。

今後は、回避タイミング決定モデルの精査を行うとともに、集団の中で回避時の速度・方向を選択する方法について分析を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Helbing, D. and Molnar, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Physical Review E* 51 (5), 4282-4286, 1995.
- 2) Blue, V.J. and Adler, J. L.: Modeling four-directional pedestrian flows, *Transportation Research Record*, 1710, 20-27, 2000.
- 3) Antonini, G., Bierlaire, M. and Weber, M.: Discrete Choice Models of Pedestrian Walking Behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(8), pp. 667-687, 2006.
- 4) 北川直樹, 羽藤英二, 森博子, 北岡広宣: 歩車動線の錯綜空間における歩行者の速度-角度選択モデルの構築, 第29回交通工学研究発表会論文集, CD-ROM, 2009.
- 5) Asano, M., Iryo, T. and Kuwahara, M.: A Pedestrian Model considering Anticipatory Behaviour for Capacity Evaluation, in *Transportation and Traffic Theory 2009* (W.H.K. Lam, S.C. Wong, and H. K. Lo (Eds.)), Springer, pp. 559-581, 2009.
- 6) 浅野美帆, 桑原雅夫, 田中伸治: 混雑時におけるミクロ歩行者流動モデルの構築, 第5回ITSシンポジウム2006論文集, 2006.