

# ペア歩行者の間の相互作用とダイナミクス：実験および観測の結果と最適相対速度モデル

金井 政宏<sup>1</sup>, 柳澤 大地<sup>2</sup>, 西 遼佑<sup>3</sup>, 西成 活裕<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院数理科学研究科

<sup>2</sup> 茨城大学理学部

<sup>3</sup> 東京大学大学院工学系研究科, 日本学術振興会

<sup>4</sup> 東京大学先端科学技術研究センター

## 概要

本研究では, ペアの歩行者の間に働く相互作用を研究する. 実験および観測のデータによると, ペア歩行者の平均速度は一人の歩行者のそれよりも遅いことが確認される. これは, 経験による予想とも一致する. この結果から, 歩行者の間に自らの速度を低下させる何らかの心理的な作用が働くと考えられる. 我々は, このような作用が相対距離および相対速度に依存して働くものとして, 最適速度モデルを基礎とした最適相対速度モデルを提案する. 今回, このモデルを使ったシミュレーションにより, 一人歩行の速度からペア歩行の速度への変化を示した.

## Dynamical Interaction between a Pair of Pedestrian: Experiment, Observation and the Optimal Relative-Velocity Model

Masahiro Kanai<sup>1</sup>, Daichi Yanagisawa<sup>2</sup>, Ryosuke Nishi<sup>3</sup>, and Katsuhiko Nishinari<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Mathematical Sciences, The University of Tokyo

<sup>2</sup>College of Science, Ibaraki University

<sup>3</sup>School of Engineering, The University of Tokyo and  
Japan Society for the Promotion of Science

<sup>4</sup>Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

## Abstract

In this work, we study dynamical interaction between a pair of pedestrian walking side by side. From our experiments and observations of a real-life pedestrian flow, we confirm that the general anticipation that pairs of pedestrian walk slower than single ones. This concludes that pair pedestrians should have some interaction that causes a decrease in speed. We consider that such a mental interaction appears depending on the relative distance and relative velocity of pair pedestrians, and then propose the optimal relative-velocity model based on the optimal velocity model.

# 1 はじめに

人は、徒歩で移動する際にしばしば一つの集団を形成するが、このような状態での歩行は、各自が一人で歩く場合と大きく異なる。集団の中では、ほとんどの人が先頭を歩く数人に付き従うように歩き、先頭の人には集団から遅れる人が出ないように歩行速度を遅くする傾向がある。このように先頭の人々の速度が決まり、そしてそれが集団全体の速度となっている。これは、人ごみの中の歩行者の流れや避難などの典型的な集団現象である。そして、このような歩行者の集団が結果的には人通りの流れの速度を決めることにもなっている。

特に、ペア歩行者に関しては、お互いかなりの精度で横一列になり、速度を合わせて歩く。このとき、前方を歩く人がいない場合であっても、彼らの歩行速度は一人で歩く時より明らかに遅くなっている。そして、この速度低下の原因は、車の場合に見られる車間距離が小さくなることによる流れの不安定化や、集団を形成することにより前を歩く人に速度を決められてしまう場合とは異なると、やや心理的な効果によるものと容易に推察される。

本研究で、我々はペア歩行者のこのようなメカニズムを、実験、観測およびモデル化によって考察する。特に、観測結果を定量的に再現するようなモデルを提案する。

## 2 実験および観測データ

我々は、予備実験としてペア歩行時の速度を計測した。その結果を表 1 に示す。被験者は 20 代の男性 7 人で、室内で 5m の直線を歩かせてその時間を測定した。一人歩行の場合は 35 のサンプルを取り、ペア歩行の場合は適宜ペアを作って 42 のサンプルを取った。ここで、F 検定を行うと非等分散であると検定されるので、非等分散の場合の両側 t 検定を行うと、 $p$  値が 0.05 より小さくなるので、有意差があると検定される。よって、統計的に一人歩行よりペア歩行の方が速度が遅くなっていることが分かる。

人数	データ数	平均速度	分散	標準偏差
1	35	1.23	0.114	0.337
2	42	1.12	0.048	0.220

表 1: 実験データ。集団の構成人数、データ数、歩行者の平均速度 [m/s]、および標準偏差。

次に、我々は東京大学駒場キャンパスの銀杏並木にて人の流れの観測を行った。この場所を選んだ理由は、道幅が適度にある十分に長い直線の道であること、歩行者の密度が小さいこと、およびペア歩行者が多いことにある。また、歩行者の年齢が極めて均一に近いことも良いデータを取るためには重要であると考えた。(実際、歩行者のほとんどは大学 1, 2 年生である。)



図 1: 観測の様子 (東京大学駒場キャンパスの銀杏並木, 2009 年 12 月)

図 2 に観測データから得られた結果を示す。室内で行った実験に比べ、屋外であるためか全体的に平均速度が大きくなっていて、一人歩行とペア歩行の平均速度の差が顕著である。これに比べ、3 人あるいは 4 人の集団歩行者の平均速度がペア歩行者と差が見られないが、これによって一人であるか否かが平均速度を支配していると考えられる。

この結果に対し F 検定を行うと、等分散であると検定される。そこで、等分散の場合の F 検定を行うと、 $p$  値が 0.05 より小さくなるので、有意差があると検定される。従って、観測データの統計からも一人歩行よりペア歩行の方が速度が遅くなっていることが分かる。

人数	データ数	平均速度	分散	標準偏差
1	61	1.54	0.493	0.220
2	14	1.26	0.033	0.175
3	3	1.32	0.169	0.335
4	2	1.26	0.003	0.037
5	0	-	-	-

表 2: 観測データ。集団の構成人数、データ数、歩行者の平均速度、その分散、および標準偏差。

### 3 最適相対速度 (Optimal Relative-Velocity) モデル

#### 3.1 ORV モデルの定義

ペア歩行者を A, B とし, 各々の位置, 速度をそれぞれ  $x_A, x_B, v_A = dx_A/dt, v_B = dx_B/dt$  とする. そして, 歩行者は次の微分方程式に従って時間発展するものとする:

$$\frac{dv_A}{dt} = a[V(x_A - x_B) - (v_A - v_B)],$$

$$\frac{dv_B}{dt} = a[V(x_B - x_A) - (v_B - v_A)].$$

ただし,

$$V(h) = \begin{cases} -\beta_+ h^3 & (h > 0) \\ 0 & (h = 0), \\ \beta_- h^2 & (h < 0) \end{cases},$$

とする.  $a > 0$  は反応速度パラメータ,  $V(h)$  は相対位置  $h$  に対して最適な相対速度を返す**最適相対速度 (ORV) 関数**である. (関数形の取り方については §3.2 を参照.)  $\beta_{\pm} > 0$  はパラメータで,  $h = 0$  近傍での ORV 関数の形状を決めている. (図 2(a) を参照.)

相対位置  $h$  はペア歩行の相手の位置を基準とした自分の相対位置であり, 値は正にも負にもなりうる.  $h > 0$  の場合は自分が相手より前に出ていることになるので, 並走するためには減速するべきと判断する. 従って, このとき最適相対速度は負とする. 逆に,  $h < 0$  の場合は自分が相手より後ろにいることになり, 加速するべきと判断する. よって, このときは最適速度を正とする. いずれの場合にも相対位置の絶対値が小さくなる方向に変化する.

#### 3.2 ORV 関数の決定

実験および観測のデータからペア歩行者の平均速度は一人歩行の場合よりも小さくなる. この結果に合致するように ORV 関数を選ぶことにする.

ここでは, 相手より自分が前にいる場合と後ろにいる場合とでは加速 (あるいは減速) の特性が異なり, その結果としてペア歩行者の速度低下が起こるものとする. すなわち, 前方にいる歩行者は相対距離に対して敏感に反応して相対速度を大きく下げようとするが, これに対して後方にいる歩行者は, 相対距離に対する相対速度を上昇させようとする度合いがやや小さいように設定する. また, 経験上,  $h \approx 0$

では加速度は十分小さくなると考えられるので, このとき  $V(h) \propto h^\gamma$  ( $\gamma > 1$ ) となるようにする. 以上の考察によって, 今回の ORV 関数の形は決められている.

### 4 シミュレーションの結果

図 2 に ORV モデルを用いたシミュレーションの結果と考察を示す. パラメータの設定は以下の通りに行われた.

反射速度パラメータは  $a = 1$  とする. ORV 関数のパラメータ  $\beta_{\pm}$  は  $\beta_+ = 2.5$  および  $\beta_- = 1$  と取ることとする. 初期位置は  $x_A = 0, x_B = 1$  とする. すなわち, A が 1m 後方から B を追いかける. 初速度としては観測データから一人の歩行者の速度を使い,  $v_A(0) = v_B(0) = 1.54[\text{m/s}]$  とした. 数値計算上の時間間隔は  $dt = 0.01\text{s}$  とし, 500 ステップ (5 秒) の時間発展を計算した. (経験上, 1m の距離の差は 5 秒以内に縮められるという事実による.)

#### 4.1 結果の考察

- (a) ORV 関数と, 各歩行者から見た相対位置および相対速度の時間発展の様子を示した. 図中で, 橙色の点は歩行者 A の B に対する相対位置を表し, 点  $(-1, 0)$  から原点へ向かって時間発展している. 緑色の点は歩行者 B の A に対する相対位置を表し,  $(1, 0)$  から原点へ向かって時間発展している. ここで, ORV モデルの定義により相対位置に対する相対速度のグラフは, ORV 関数の形に依らず原点に対して対称になる.
- (b) ペア歩行者の位置の時間に対するプロット. 開始からおよそ 2 秒後に A が B に追いついているように見える. その後は並んで歩行しているように見えるが, (a) のグラフを見ると, 相対速度が 0 に十分近くなっても若干の相対距離を保っていることが分かる. これは, ORV 関数が  $h \approx 0$  で  $V(h) \propto h^2$  または  $\propto h^3$  であるために相対距離が 0 に近づくより早く相対速度が 0 に近づいてしまったことによる.
- (c) ペア歩行者の速度の時間に対するプロット. A は最初の一瞬で速度を上げるが, すぐに減速に転じている. また, B は最初に速度を大きく下げてから徐々に加速している. これが ORV モデルの示す特徴的な現象である.
- (d) ペア歩行者の各時刻における平均速度をプロットした. 最初の 1 秒間で平均速度は最初の値

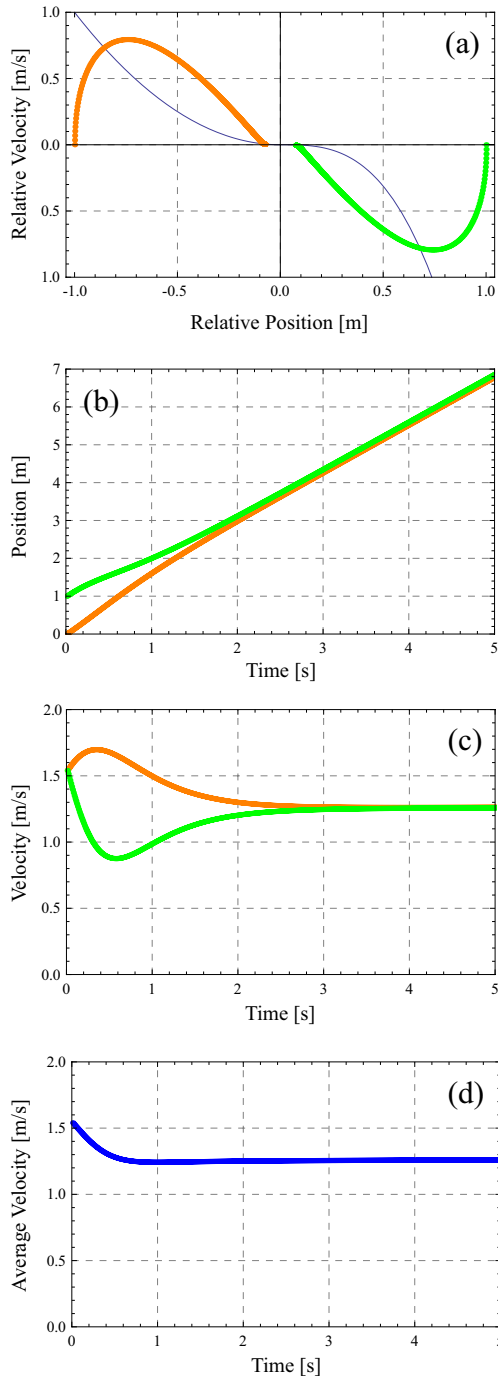


図2: (a) 実線は ORV 関数のグラフ. 歩行者 A の相対位置 (橙色の点) は点  $(-1, 0)$  から原点へ向かっている. 歩行者 B の相対位置 (緑色の点) は,  $(1, 0)$  から原点へ向かっている. (b) ペア歩行者の時間に対する位置のグラフ. 初期位置は  $x_A = 0$ ,  $x_B = 1$  (相対距離  $h = 1\text{m}$ ) である. (c) ペア歩行者の時間に対する速度のグラフ. 初速度は  $v_A = v_B = 1.54[\text{m/s}]$  である. (d) ペア歩行者の平均速度の時間変化. 初期平均速度は  $1.54[\text{m/s}]$  で, 時間の経過によって  $1.26[\text{m/s}]$  に収束している.

1.54m/s からほぼ 1.26m/s まで下がり, その後はこの値を維持し続ける. 1.26m/s は観測データにより得られたペア歩行者の平均速度に一致する. 従って, 一人歩行の状態からペア歩行状態への移行を再現したことになる.

## 5 まとめと展望

本研究で, 我々はペア歩行者の歩行速度の低下に注目し, ペア歩行者の間に働く相互作用を, 実験, 観測およびモデル化によって考察した. 特に, 最適速度モデルをヒントに, 相対位置に対する最適相対速度を導入した最適相対速度モデルを提案した. このモデルによれば, ペア歩行者はお互いの相対距離と相対速度を 0 に近づけるように調整しながら歩行する. そして, 先行する歩行者と追従する歩行者の最適相対速度の特性の違い (ORV 関数の非対称性) によって, 一人歩行の場合よりもペア歩行者の速度が低下する現象が説明される.

今回の研究結果の応用例として, 次のようなものが考えられる. 観測データによれば, 一人歩行者とペア以上の歩行者では歩行速度に明確な差がある. また, 集団歩行者の中ではペア歩行者が大きな割合を占める. 従って, 速度のみのデータから歩行者の人数の見積もりが可能であると考えられる. 実際, 並んで歩いている歩行者を真横からカウントすると, 死角に入っている歩行者がカウントされないことになってしまうが, 歩行速度から良い精度で正しい人数をカウントできると期待される.

今後の発展として, 歩行者の加速あるいは減速の方法を詳しく検証したい. 人が加速する場合, 歩幅を広くするか足の回転数を上げるかのどちらか, あるいは両方が行われている. そこで, 速度と歩幅の関係を計測することによって, より深くペア歩行者の速度低下現象を研究することが可能となると期待できる.

最後に, 今回の研究は平常時に隣を歩く人同士の相互作用をモデル化したものであり, これまで広く行われてきている, 混雑した人の流れや避難の研究とは大きく異なる. しかしながら, 最適速度モデルを応用することによってこのような人間特有の行動のモデル化に成功したことは, 最適速度モデルが生物のダイナミクスを普遍的に捕らえていることの証と考える.