

特別研究報告書

題目

歩行者グループの社会的関係における個人歩行者の  
振る舞いへの影響の分析とモデル化

指導教員

報告者

丸川 雄也

岡山大学工学部 情報系学科

令和3年2月4日 提出

# 要約

本特別研究では、自然で安全な方法により群衆の中を移動できる自立型移動ロボットの設計に着目する。特に、ロボットと歩行者グループ間の相互作用に着目し、ロボットに自然で安全な衝突回避行動を行わせるための移動モデルを構築することを目的とする。モデルの構築にあたっては、歩行者グループのメンバー間の社会的関係がロボットの回避行動に与える影響を考慮する。

ロボットの行動を自然で安全なものにするためには、その移動モデルが、人間の動きを模倣したものとすることが望ましい。ロボットは個人歩行者とみなすことができるため、本研究では、群衆の中を移動し、衝突を回避する個人歩行者の行動を分析する。群衆は様々な社会的関係にある歩行者グループを多数含むことから、本研究では、個人歩行者と様々な歩行者グループの間の相互作用を実証的に分析する。そのために、大規模な群衆の移動軌跡データセットを使用し、様々な社会関係を持つ歩行者グループに対する個人歩行者の衝突回避パターンに影響し得るいくつかの変数を定義した。定義した変数を用いた分析の結果、特定の変数が回避パターンに影響を与えていることを確認できた。

分析結果に基づいて、これらの変数の分布についてのモデルを構築した。これらのモデルは、移動モデルを構成する基礎となる。続いて、分布から得られる変数値をランダムに生成し、人工の移動軌跡を構築した。得られた合成移動軌跡は、人間の歩行者の実際の移動軌跡に基づいているため、ロボットの自然で安全な移動の実現に貢献できると期待される。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>従来研究</b>	<b>3</b>
2.1	人の移動に関する社会的側面	3
2.2	社会に配慮したロボットナビゲーションの背景と従来研究の結果	4
<b>3</b>	<b>実験とそのデータ及びアノテーション</b>	<b>6</b>
3.1	実験	6
3.2	データセット	6
3.3	アノテーション	7
<b>4</b>	<b>分析</b>	<b>9</b>
4.1	相対運動方向の認識	9
4.2	軌跡の正規化	11
4.3	歩行者グループと個人歩行者間の最小距離	11
4.4	歩行者グループと個人歩行者間の最小距離における速度ベクトルの間の角度	12
4.5	分析結果全体を通しての考察	13
<b>5</b>	<b>モデル化</b>	<b>14</b>
5.1	歩行者グループと個人歩行者間の最小距離のモデル化	14
5.1.1	距離に関するモデルの詳細	15
5.1.2	モデルと実験分布の比較	15
5.2	歩行者グループと個人歩行者間の最小距離における速度ベクトルの間の角度のモデル化	15
5.2.1	フォン・ミーゼス分布	16
5.2.2	歩行者グループと個人歩行者間の角度のモデルと分析結果の比較	16
5.3	人間の移動軌跡データのモデル化	17

6 まとめ	18
謝辞	19
参考文献	20

# 目次

2.1	(a) 歩行者グループ内の両者間の距離, (b) 歩行者グループの移動速度 . . . . .	5
4.1	(a) 同じ方向に移動した場合 と (b) 対面方向に移動した場合のグループと個人間の最小距離のヒストグラム . . . . .	12
4.2	(a) 同じ方向に移動した場合 と (b) 対面方向に移動した場合の歩行者グループと個人歩行者間の最小距離における速度ベクトルの間の角度のヒストグラム	13
5.1	歩行者グループと個人歩行者間の (a) 最小距離と (b) 最小距離における速度ベクトルの間の角度のモデル . . . . .	16
5.2	(a) 同僚と (b) 家族と (c) 友人と (d) 恋人の周りを移動している個人の移動軌跡の実データとモデルの比較 . . . . .	17

# 第 1 章

## はじめに

近年，社会的相互作用ロボットは日常生活でますます一般的になっている．例えば，店員，空港ガイド/ポーターとして振る舞うロボットがある．または特別なニーズ（自閉症スペクトラム障害など）を持つ子供の医療，リハビリテーション，教育に使用される．

この近年の傾向には2つの理由がある．まず第一に，荷物の運搬や掃除などの特定の機械的な仕事は，ロボットによってより効果的かつ低コストで実行できる [1, 2]．2つ目の理由は，社会の人口統計に関連している．つまり，日本を含むほとんどの先進国の社会では，数十年にわたって少子高齢化が進んでいる．これは，市民，特に高齢者の生活を支えるのに十分な若者がいないという問題をもたらす [3]．その点で，介護者や同伴者としてソーシャルロボットを使用することは，解決策になる可能性がある [4, 5]．

また，ほとんどの社会的相互作用ロボットは，他の歩行者の群衆の中で公共スペースを移動する必要がある．つまり，ロボットが公共空間で動く他の人々と調和した動きを実行する必要があり，このとき人々の快適さと安全が確保されてなければならない．これは非常に困難な問題である．なぜなら，それは人間の移動の社会的規範と慣習の理解と模倣を必要とするからである [6]．この現象を「社会認識ナビゲーション」と呼ぶ．

その点で，本研究は社会的に認識されたロボットナビゲーションに焦点を合わせており，特に個々の歩行者に対する社会的関係の影響を分析およびモデル化している．そのために，まず，人間が乱雑に移動できる環境で収集された生態学的データを調べ，実証的な観察を行う．後で，個々の歩行者が社会的関係にある歩行者グループを回避する（つまり，追い抜く，または交差する）ときの注目に値する動きの特性を指摘する．続いて，実際の人間の移動軌跡に似た人工的な移動軌跡パターンを導き出すことができるように，分析的な方法で特定の変数をモデル化する．このモデルを使用することにより，歩行者の相互作用の社会的要素も認識する，安全で自然なロボットナビゲーションの実現が期待される．

群衆の動きの分野では、最近、社会集団運動の分析に対する関心が高まっている。さまざまな実証研究は、グループ運動が社会的関係や相互作用などの社会的要素の複雑な相互作用の結果として形成されるだけでなく、年齢や性別などの個人に関する人間固有の要素の結果として形成されることを実証している。

従来の研究において、社会的関係における歩行者グループの移動の傾向が分析されており、その結果から社会的関係が歩行者グループの振る舞いに影響を与えたため、歩行者グループの社会的関係が個人歩行者にも影響を与えるのではないかと考え、本研究を始めた [7]。従来研究については、2章で詳しく記述する。

そこで、本研究では歩行者グループの社会的関係における個人歩行者の振る舞いへの影響を分析するにあたり、4つの尺度を考えた。その尺度とは、社会的関係、移動方向、歩行者グループと個人歩行者の距離、歩行者グループと個人歩行者の間の角度である。そして、それぞれの結果から人の移動モデルを構築する。

## 第 2 章

# 従来研究

この章では，社会的関係にある歩行者グループの動きに関する過去と最近の研究の概要を説明する．そのために，まず社会科学で行われた研究の概要を説明し，社会関係を分類する重要な研究を列挙する．続いて，社会に配慮したロボットナビゲーションを実装する科学および工学分野の特定の研究を要約する．

### 2.1 人の移動に関する社会的側面

社会心理学の分野では，人間の社会関係の特徴や種類を明確に定義することは一般的に非常に難しいと考えられている．しかしながら，社会的関係の基本的な形態について広く受け入れられている分類が4つある．その4つとは，4人の心理学者が提案した分類方法である．それは，Fiske, Clark と Mills, Foa と Foa と Bugental であり，一般的に参照される研究として登場する [8, 9, 10, 11]．さらに，[11]の作業は，より明確で包括的で相互に排他的な分類を提供するため，コンピュータサイエンスや人工知能でも採用されている．そこで，この4つの分類方法から本研究に採用したのは Bugental の提案方法である．Bugental は区分の仕方を提案し，社会生活を愛着，階層的権力，交配，互惠，連合という5つの重複しない区分に分割する．もちろん，Bugental の提案した定義は，より一般的なケースを分類することを目的とする．つまり，歩行者にだけ焦点を当てた分類方法ではない．それでも，一般的に発生する社会関係についての十分な説明を提供する．そこで本研究では，実現可能性を評価し，この分類方法を採用した．しかし，Bugental の提案した分類方法にある階層関係は，公共空間の歩行者には，完全に適用されないため削除した．

この時点で，歩行者の社会的相互作用に関する研究も検討する価値がある．「歩行者グループ」という用語は，科学文献でいくつかの異なる意味で使用されていることがある [12]．い



くつかの研究では、一緒に移動する人々 (例えば、電車を降りる人々) を「歩行者グループ」と見なしている。ただし、この研究は「歩行者グループ」を 1 人以上の歩行者と社会的関係にあり、共通の目標に向かって一緒に移動する人々として説明する McPhail と Wholestein の定義に基づいている [13]。したがって、[13] の定義に適合する 2 人以上の歩行者の集合を歩行者グループと見なし、[11] で記述された基準に従ってそれらの社会関係を分類する。つまり、歩行者グループの定義は 2 人以上でお互いに知り合いで、かつ同じ目的地に向かって移動しているグループである。識別する方法である歩行者グループとその関係については、3 章で詳しく説明する。

## 2.2 社会に配慮したロボットナビゲーションの背景と従来研究の結果

社会的認識のあるロボットナビゲーションは、主にサービスロボット (店員、美術館のガイドなど) に適用される。これは、人間と密接に相互作用するロボットである [14]。この種のアプリケーションでは、人間が何か操作や行動をしたとき、その操作や行動に対応した反応をする [15]、並んで歩く [16]、または人間の後ろをついて行く [17] などのいくつかの行動が重要なスキルと見なされる。

さらに、これらの個々の相互作用関係 (ロボットと 1 人の歩行者または少数の歩行者グループの間) に加えて、ロボットと群衆の間の一般的な相互作用に関するいくつかの研究もある [18]。

相互作用の範囲に関係なく、社会を意識したロボットナビゲーションでは、生態学的な人間の動きを観察し、観察された動きのパターンをロボットに模倣させようとするのが一般的である [19]。

このようなことから、[7] は非常に関連性の高い研究である。つまり、この研究では、グループの社会的関係に関して、歩行者グループの動きの違いを調査した。いくつかの変数の違いを示した後、彼らは認識方法を構築し、歩行者グループの社会的関係が人間の移動軌跡データから高精度で推定できることを示している。

具体的には、[7] の調査結果には次のものが含まれる。恋人の社会的関係にある歩行者グループは他の社会的関係にある歩行者グループよりも歩行者同士の距離が小さいことが分かる (図 2.1- (a) 参照)。同僚関係にある歩行者グループの移動速度は他の社会的関係にある歩行者グループの移動速度よりも速い (図 2.1- (b) 参照)。したがって、社会的関係の違いが歩行者グループの振る舞いに影響を与えていることが分かる。

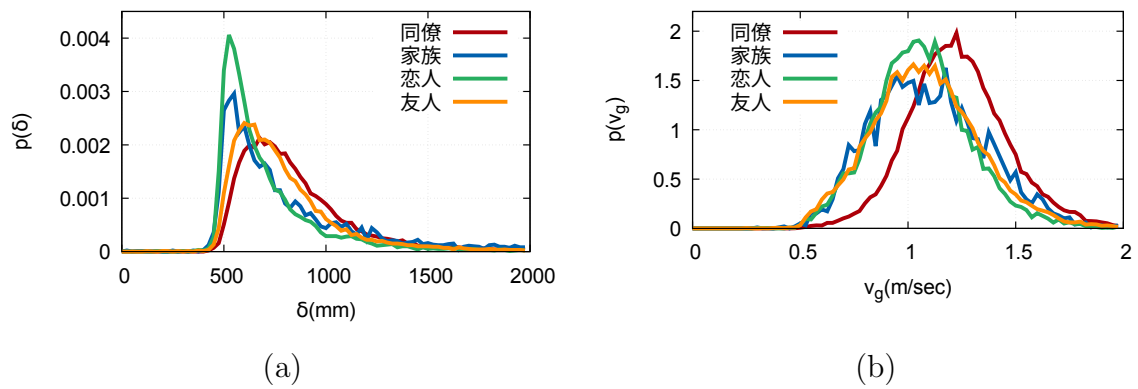


図 2.1 (a) 歩行者グループ内の両者間の距離, (b) 歩行者グループの移動速度

## 第 3 章

# 実験とそのデータ及びアノテーション

この章では，分析とモデリングに使用されるデータセットの詳細を要約する．まず，実験の詳細について説明する．その後で，実験で収集されたデータの特徴と分析で使用されたデータのサブセットについて説明する．最後に，データの注釈について詳しく説明する．

### 3.1 実験

まず，実験は，大阪のアジア太平洋トレードセンター (ATC) という多目的公共施設で行われた．その施設には，フェリーターミナル，鉄道駅，ビジネスセンター，ショッピングモールがあり，日常的に多くの人を訪れる．したがって，多くの歩行者を観察することができ，彼らの年齢，性別，社会的関係などのデータは非常に多様である．

そして，実験は主にアトリウムエリアとそのエリアがある建物の出口の1つに接続する廊下で行われる．このエリアは，建物のさまざまな場所 (駅，フェリーターミナルなど) に繋がっており，この施設の中で最も混雑している場所である．

また，実験は1年中実施される．毎週，2回の実験が行われる．1回目は平日 (水曜日) で，2回目は休日 (日曜日) である．これにより，データ構成の多様性が高まることが期待したとおりのものであった．具体的には，平日にはより多くの従業員や学生が見られるのに対し，週末にはより多くの旅行客や家族が見られた．

### 3.2 データセット

実験データの一部は，Microsoft Kinect，Asus Xtion などの 3D 範囲センサーを使用して収集される．[20] で導入されたアルゴリズムを 3D 範囲サンプルに適用することにより，歩

行者の移動の軌跡と身長が抽出される。合計で 200 万人以上の歩行者が追跡されている。

実験データの別の部分は、ビデオ録画で構成されている。つまり、16 台の異なるカメラがアトリウムと廊下の異なる部分に設置されている。データセットのこの部分は、主に検証と注釈の目的で使用される。録画全体の長さは 800 時間以上である。

大量のビデオデータがあると、録画全体を見るのが非常に難しくなる。3.3 で詳細に説明するように、注釈プロセスではビデオ録画を見る必要がある。注釈プロセスを人間のコーダーにとって難易度を下げるために、分析ではデータのサブセットに焦点を合わせた。

つまり、特定の日を選択し、その日に収集されたデータに注釈を付けるように複数の人間のコーダーに依頼した。具体的には、ビデオカメラ 4 台で撮影された 6 日分のデータを分析してもらう。その 6 日間は、平日から 3 日間被らないように選択し、同じく休日から 3 日間選択し、各日 4 時間分のデータがあり、合計 96 時間のビデオ録画が分析される。これによって、人間の移動に関して、様々な動作パターンと人間の密集度が分析できる。

### 3.3 アノテーション

この研究の主な目的は、歩行者グループの社会的関係が個人歩行者に与える影響を分析してモデル化することであるため、歩行者グループと個人歩行者はすでに特定されていると仮定した。私たちの研究では、この識別は人間のコーダーによって実行された。それにもかかわらず、それはグループ認識アルゴリズムによっても行うことができる。明らかに、2 人 (またはそれ以上) の歩行者がグループの一部であるかどうかを認識することは、興味深いですが、[21, 22, 23] などのさまざまな研究ですでに研究されている。同様の実験条件、歩行者情報、および感覚情報を使用して、90% を超える精度で問題を解決できることが実証されている。

まず、人間のコーダー (プライマリコーダー) は、グループメンバーとしてラベル付けされた歩行者を確認した後、いくつかの固有のグループに関するビデオと軌跡データに基づいて別の注釈を付けた。その注釈とは、選択可能な社会的関係を決めることである。可能な選択肢は、同僚、家族、恋人、または友人である。これらは、Bugental の提案した分類手法 [11] で定義されているように、それぞれ連合、愛着、交配、相互の区分に対応している。

このコーディングプロセスの信頼性をテストするために、他の 2 人の人間のコーダー (セカンダリコーダー) に、データ全体の一部にラベルを付けるように依頼した。この部分は任意に選択され、2 人のセカンダリコーダーで同じである (これは、データの同じサブセット上の 3 人のコーダーすべてのラベルに基づいて評価者間合意分析が実行されることを意味する)。このラベリングプロセスの評価者間の信頼性は、いくつかの著名な統計的尺度 (つま

り, Cohen の  $\kappa$ , Krippendorf の  $\alpha$ ) を使用して評価された [24, 25]. これらはすべて, コーダーがかなり一致していることを示している.

## 第 4 章

# 分析

この章では，歩行者グループ (以下、単にグループと呼ぶ) の社会的関係が個々の歩行者 (以下、単に個人と呼ぶ) の振る舞いに影響を反映する変数の識別と導出について説明する。次にそれぞれの尺度によって分析された結果と考察を示す。

まず，分析するにあたって4つの尺度を考えた。それは社会的関係，移動方向，グループと個人間の最小距離，最小距離におけるグループと個人間の速度ベクトルの間の角度である。

社会的関係は，3.3節で説明されているように決定される。相対運動方向の認識については，4.1節で説明する。社会関係と相対運動方向の組み合わせ (4種類の社会関係  $\times$  2種類の相対運動方向) について，(i) 最小距離，(ii) 最小距離における速度ベクトル間の角度の分布を調べる。

### 4.1 相対運動方向の認識

具体的には，グループに対する個人の回避動作を調べる。そこで，回避行動を考慮するので，互いに接近するときの軌道の部分を考慮する必要がある。この実験では，グループの中心を原点とし， $x$  軸， $y$  軸方向で  $4\text{m} \times 4\text{m}$  の領域を調べることにする。

また，追い越しと交差 (すれ違う) による回避を2つのケースと考えている。これは，交差した場合に，個人がグループの社会的関係の特徴を正面から認識できるので，多くの情報を得ることができるためである。一方で，追い越した場合，個人はグループの社会的関係の特徴について得られる情報が少ない可能性があるためである。

追い越すまたは交差を自動的に検出するには，速度の  $x$  または  $y$  成分の符号を確認するだけでは不十分である。なぜなら歩行者は必ずしも直線に沿って歩くとは限らないからである。つまり，歩行者は曲線のある軌道をたどることがあるということである。

その理由から、速度ベクトルの内積を使用する。グループには 2 人の歩行者が含まれるため、グループの速度を表すために、グループの 2 人のメンバーの平均速度を考慮する。グループメンバーに ID をつけ、それぞれの ID が  $A$  と  $B$  であり、それぞれの速度が  $v_A$  と  $v_B$  であるとする。この場合、グループの速度  $v_G$  は

$$v_G = \frac{v_A + v_B}{2} \quad (4.1)$$

4m 以下の距離でグループに接近する個人の ID が  $N$  であると仮定する。さらに、 $N$  の速度が  $v_N$  で表されているとする。

次に、時間  $t$  での  $v_G$  と  $v_N$  の内積は次の式で与えられる。

$$\langle v_G(t), v_N(t) \rangle = v_{Gx}(t) \cdot v_{Nx}(t) + v_{Gy}(t) \cdot v_{Ny}(t) \quad (4.2)$$

ここで、内積  $v_{Gx}(t)$  および  $v_{Gy}(t)$  は  $v_G(t)$  の  $x$  および  $y$  成分である (および同様の定義が  $N$  に適用される)。 $\langle v_G(t), v_N(t) \rangle$  は、実際には  $v_G(t)$  と  $v_N(t)$  の間の角度の余弦であることに注意しなければならない。この角度が  $\theta$  で表されているとする。

$$\cos \theta(t) = \frac{\langle v_G(t), v_N(t) \rangle}{|v_G(t)| \cdot |v_N(t)|} \quad (4.3)$$

ここで、逆変換を行うと、 $\theta \in [-\pi, \pi]$  のような  $\theta$  の値を実現できる。

さらに、 $\theta = 0$  の値は、完全に「同じ方向に移動」を示す。また、 $\theta = \pi$  の値は、完全に「対面方向に移動」を示す。しかし、これら 2 つの値だけを期待するのは現実的ではない。したがって、「同じ」方向と「対面」の方向に対して、 $\theta$  の現実的な許容範囲を構築する必要がある。

そこで、 $\pi/4$  を 0 と  $\pi$  の周りの妥当な許容範囲と見なす。言い換えると、 $\theta \in [-\pi/4, \pi/4]$  の場合、グループと個人は同じ方向に移動していると思なされる。さらに、 $\theta \in [3\pi/4, 5\pi/4]$  の場合は、対面方向に移動していると思なされる。 $\theta$  がこれら 2 つの範囲のいずれにも属していない場合、相対運動方向を決定するのに十分な証拠がないと考えられる。

式 4.2 は、グループと個人の軌道に沿ったすべての時点  $t$  に対して計算されることに注意しなければならない。したがって、 $\theta(t)$  の値の中には、「同じ」方向を示すものもあれば、「対面」方向を示すものもあれば、どちらも示さないものもある。このような複雑な状況を解決するには、しきい値  $p_\theta$  を使用して、 $\theta(t)$  の値の  $p_\theta\%$  以上であれば、「同じ」または「対面」の方向に沿って、相対的な動きの方向について決定できると仮定する。

## 4.2 軌跡の正規化

衝突回避の研究では、特定の変換を軌跡に適用するのが一般的である。具体的には、2つの軌跡の1つが0 m/秒の速度で位置(0,0)に平行移動するように、軌道の1つを正規化するのが一般的である。

この研究では、個人の動きの行動の変化を調査するため、グループが原点に変換され、その速度と位置が0m/秒と0mに調整されるように正規化を適用することは理にかなっている。このようにして、グループの動きを表す値が不変であるように変換される。一方、すべての変動は、個人の動きを表す値に吸収される。

時間  $t$  で、グループの中心が  $(p_{Gx}(t), p_{Gy}(t))$  にあり、個人（つまり、非グループ）が  $(p_{Nx}(t), p_{Ny}(t))$  にあるとする。さらに、同時に、グループおよび個人の速度が  $v_G(t) = (v_{Gx}(t), v_{Gy}(t))$  と  $v_N(t) = (v_{Nx}(t), v_{Ny}(t))$  である。

上記のプロセスは、個人の正規化された位置と速度が

$$(p'_{Nx}(t), p'_{Ny}(t)) = (p_{Nx}(t), p_{Ny}(t)) - (p_{Gx}(t), p_{Gy}(t)) \quad (4.4)$$

$$(v'_{Nx}(t), v'_{Ny}(t)) = (v_{Nx}(t), v_{Ny}(t)) - (v_{Gx}(t), v_{Gy}(t)) \quad (4.5)$$

と表される。もちろん、グループの軌跡にも同じ操作を適用する。次に、グループの正規化された位置は  $(p'_{Gx}(t), p'_{Gy}(t)) = (0, 0)$  になり、その正規化された速度は、 $(v'_{Gx}(t), v'_{Gy}(t)) = (0, 0)$  である。つまり、この操作は、同じ方向または対面方向に移動するグループと個人のペアの両方に対して実行される。

## 4.3 歩行者グループと個人歩行者間の最小距離

4.2節と同様にグループの位置を正規化し、社会的関係と移動方向によって分けた個人の軌跡データを5m秒毎に区切りをつけて、各エリアにおいて歩行者グループと個人歩行者間の距離が最小になるものを取り出す。そしてその取り出した距離の中で最小となるものをその個人の軌跡データにおける歩行者グループとの距離とした。この方法で計算された最小距離の分布を、社会関係の相対的な動きの方向の組み合わせごとに示す。

社会的関係と相対的な方向の各組み合わせに対する最小距離の実験的観測の分布は、図4.1に示す。最小距離はすべての時点  $\forall t$  にわたって計算されるため、各グループと個人のペアから1つのデータポイントを取得することに注意しなければならない。その点で、図4.1に見られる曲線は、図2.1に見られる曲線ほど滑らかではない。



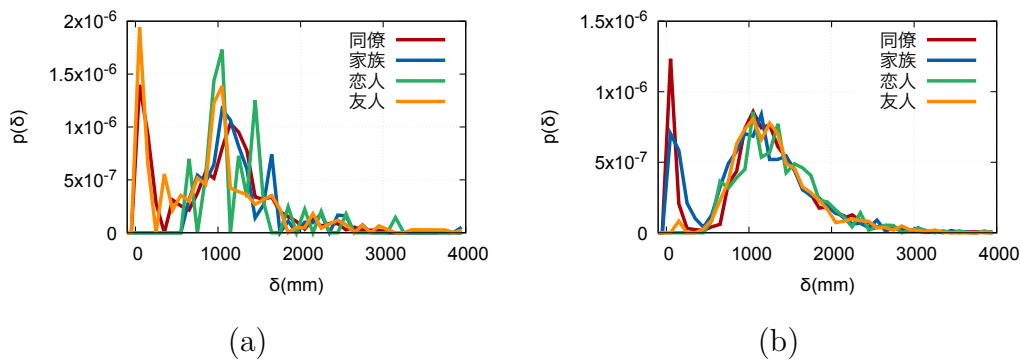


図 4.1: (a) 同じ方向に移動した場合 と (b) 対面方向に移動した場合のグループと個人間の最小距離のヒストグラム

さらに、同じ方向に移動する場合の分布は区別が非常に難しく、明確なパターンを示していないことがわかる。これは、歩行者が軌跡に沿って対面方向に移動する他の多くの歩行者に出会う可能性があるという事実によるものである。ただし、通常、同じ方向に移動する少数の歩行者の周りに留まる。したがって、対面方向に移動する場合、同じ方向に移動する場合よりも (図 4.1- (a)) データポイントの数が多くなる (図 4.1- (b))。

図 4.1- (b) から個人は、同僚と家族についてのみグループに非常に接近している (つまり、0-0.1 m)。実際、このような低い値は、個人がグループメンバー間を通過する可能性があることを意味する。特に、恋人に関しては、個人は恋人関係にあるグループに近づくのは気が引けるためか、彼らはそれほど近づいていない。

#### 4.4 歩行者グループと個人歩行者間の最小距離における速度ベクトルの間の角度

4.3 節より、グループと個人の距離を計算した。そこで、その距離となるときの個人の座標と逆三角関数を用いて、グループと個人の角度を計算する。

グループと個人間の最短距離における速度ベクトルの間の角度に関する実験的観察は、社会関係と相対運動方向の各組み合わせの図 4.2 により示されている。前の節と同様に、前述と同じ理由により、角度分布が「同じ方向に移動」ケースの明確なパターンを示さないことがわかる。さらに、「対面方向に移動」の場合、 $\pm\pi/2$  の周りに 2 つの明確なピークがある。恋人の場合、 $\pi/2$  にあるピークの周りに大きな差があることがわかる。

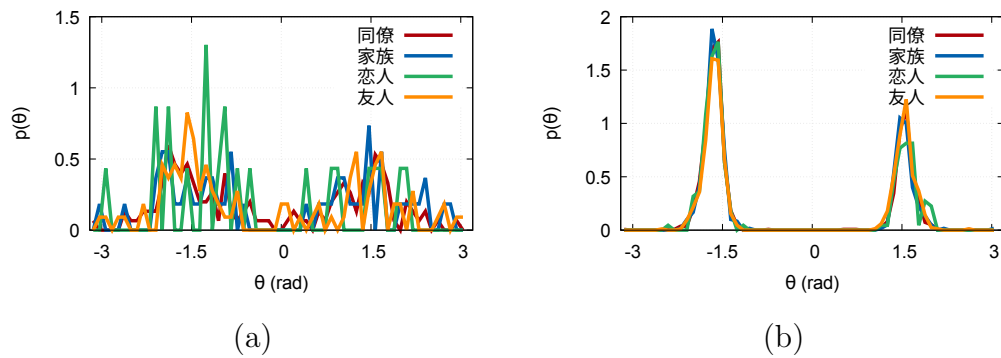


図 4.2: (a) 同じ方向に移動した場合 と (b) 対面方向に移動した場合の歩行者グループと個人歩行者間の最小距離における速度ベクトルの間の角度のヒストグラム

## 4.5 分析結果全体を通しての考察

最初に考えた4つの尺度, 全てにおいて歩行者グループの社会的関係が個人歩行者の振る舞いに限定的ではあるが影響を与えていると言える. ただ, 歩行者グループと個人歩行者間の最小距離と最小距離における速度ベクトル間の角度に関して, グループと個人が「同じ」方向に移動場合はデータ数が少なかったため, 結果から何かを得ることはできなかった.

## 第 5 章

# モデル化

この章では、グループ周辺の個人の衝突回避パターンをモデル化する原理について説明する。モデルの構築では、4.3 節と 4.4 節で紹介されている 2 つの変数を使用する。モデルは、分布の性質を表す分析関数に基づいている。

さらに、追い越す行動と交差行動はまったく異なる特性を示すため、それらは献身的なモデルに値する。しかしながら、実験分布から得られた観察に基づいて、グループと「同じ」方向に歩く個人にとって、効果的なモデルを構築することは非常に難しいと考えられる。これは、4.3 節で説明されている理由から、この種の移動の特性を表すのに十分なデータポイントがないという事実によるものである。したがって、グループと「対面」方向に歩く個人の行動のみのモデルを構築する（つまり、交差行動のモデル）。

具体的には、5.1 節では、距離の関係に焦点を当て、モデルとして選択された関数の詳細を説明する。つまり、モデルのキャリブレーションと距離とそのモデルの実験的分布の比較に関する議論をする。5.2 節では、角度関係について同様の流れがある。

### 5.1 歩行者グループと個人歩行者間の最小距離のモデル化

4.3 節で説明し、4.1- (b) で示すように、グループが同僚または家族の社会的関係を持っている場合、個人がグループメンバー間を通過する可能性がある。これは、友人でもほとんど見られないが、恋人では、個人がグループメンバー間を通過することは確かではない。その点で、(1m を中心とする) 希釈の大部分は非常に類似しており、0 に近い部分のみが異なる。したがって、これら 2 つの範囲の組み合わせを 2 つのガウス分布の混合としてモデル化することにした。

### 5.1.1 距離に関するモデルの詳細

ガウス分布とは、確率論や統計学で用いられる連続的な変数に関する確率分布の一つであり、データが平均値の付近に集積するような分布を表す。ガウス分布は統計学や自然科学、社会科学の様々な場面で複雑な現象を簡単に表すモデルとして用いられる。式は以下のよう

一般的に、ガウス分布は次のように表される

$$N(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.1)$$

ここで、 $\mu$  と  $\sigma$  は、変数  $x$  の平均値 (または期待値) と標準偏差を表す。2つの値は、モデルのハイパーパラメーターである。

したがって、最小距離  $\delta$  の確率密度関数は2つのガウス分布の混合としてモデル化できる。

$$p(\delta) = c_1 \cdot N(\delta|\mu_1, \sigma_1) + c_2 \cdot N(\delta|\mu_2, \sigma_2) \quad (5.2)$$

ここで、 $N(\delta|\mu_1, \sigma_1)$  と  $N(\delta|\mu_2, \sigma_2)$  は、図 4.1 に示されている2つのピークの周りの  $\delta$  の範囲に対応すると予想される。各社会関係に対応する4つの分布に2つのガウス分布の混合を当てはめることに注意しなければならない。

### 5.1.2 モデルと実験分布の比較

ガウス混合モデルから、確率変数を生成し、それらの確率密度関数を計算した。結果を図 5.1- (a) に示す。この図を図 4.1- (b) と比較すると、分布の大部分 (つまり、1.2 m 付近にあるピーク) が明確に再現されていることがわかる。ただし、図 4.1- (b) に示すように、同僚と家族では0に近い小さなピークがある。モデルでは、このピークは両方の社会関係について過小評価されている。しかし、家族の社会的関係を持つグループに関してはまだ確認できる。この過小評価は、おそらく、右のピークと比較して左のピークの標準偏差が非常に小さいことが原因だと考えられる。実験分布の右ピークのこの優位性がモデルで増幅されることは驚くべきことではない。

## 5.2 歩行者グループと個人歩行者間の最小距離における速度ベクトルの間の角度のモデル化

4.4 節で提示された議論および図 4.2- (b) から、フォンミーゼス分布を使用してモデル化することにした。フォンミーゼス分布を使用した  $\theta$  の動作については [26] で示す。

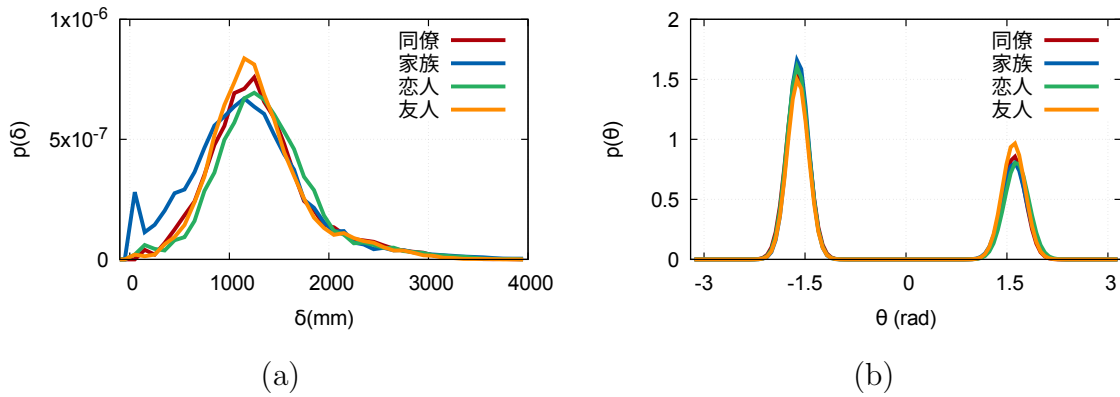


図 5.1: 歩行者グループと個人歩行者間の (a) 最小距離と (b) 最小距離における速度ベクトルの間の角度のモデル

### 5.2.1 フォン・ミーゼス分布

フォンミーゼス分布は、ガウス分布の循環アナログである。  $\theta$  は角度であるため、範囲  $[-\pi, \pi]$  に制限された円形確率変数である。したがって、図 4.2- (b) で与えられる分布をモデル化できる。

以下は、フォンミーゼス分布の明示的な形式である。

$$f(\theta) = \frac{\exp\{\kappa \cos(\theta - \mu)\}}{2\pi I_0(\kappa)} \quad (5.3)$$

ここで、 $I_0$  は次数 0 のベッセル関数である。さらに、 $\mu$  は平均値を示し、 $\kappa$  はガウス分布の  $1/\sigma^2$  に対応している。

その点で、モデルのハイパーパラメータである  $\mu$  と  $\kappa$  は、ガウス分布のハイパーパラメータの対応に基づいて選択できる。

### 5.2.2 歩行者グループと個人歩行者間の角度のモデルと分析結果の比較

作成したモデルと分析結果を比較する。ハイパーパラメータを推定した後、式 5.3 で与えられた関数を  $\theta \in [-\pi, \pi]$  で評価し、図 5.1- (b) で表される分布を取得した。このモデルを図 4.2- (b) に示されている実験分布と比較することにより、結果は満足のいくものであると言える。すなわち、ピークの振幅、位置、および偏差が満足のいく方法で表されている。

### 5.3 人間の移動軌跡データのモデル化

5.1 節と 5.2 節より歩行者グループと個人歩行者間の最小距離のモデルと最小距離における歩行者グループと個人歩行者間の角度のモデルを示した。そこで、この 2 つのモデルを使用して、分析をする際に用いた軌跡データに近い値を出していく。以下に歩行者グループと個人歩行者が逆方向に移動する場合における社会的関係毎の軌跡データとモデルによって作られた軌跡データの比較グラフを示す。

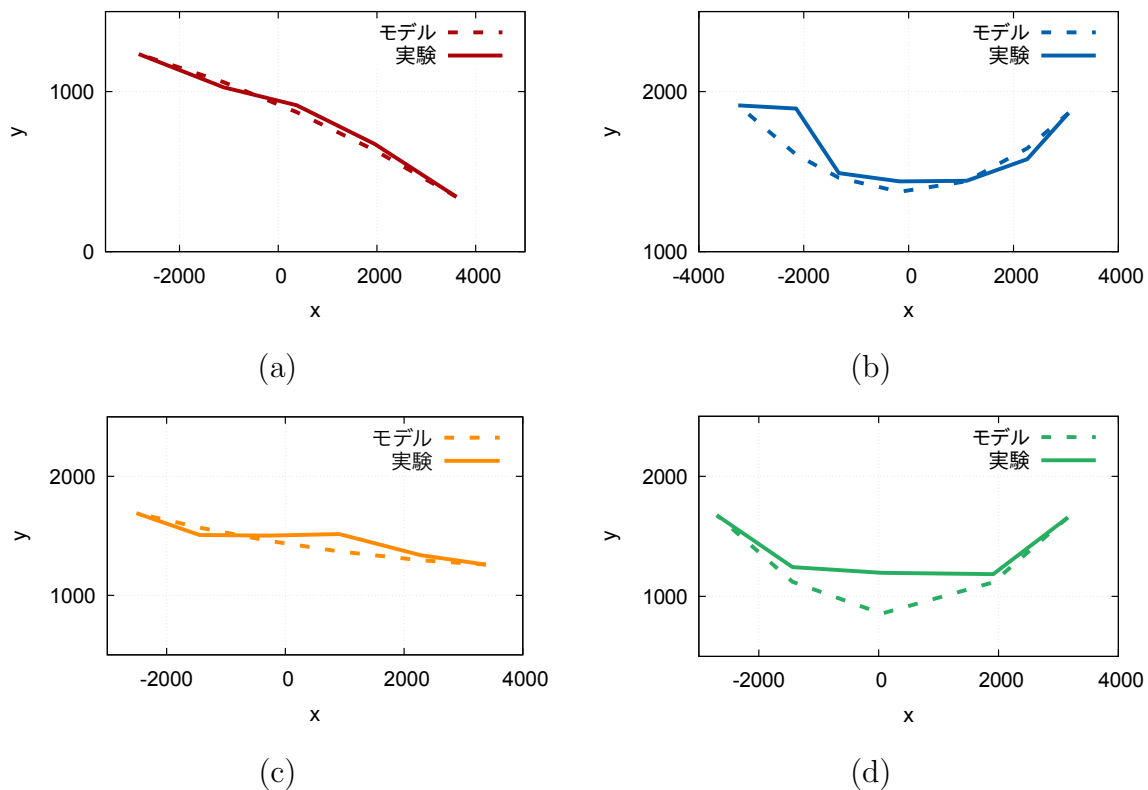


図 5.2: (a) 同僚と (b) 家族と (c) 友人と (d) 恋人の周りを移動している個人の移動軌跡の実データとモデルの比較

基の軌跡データとモデルによって作成した軌跡データを比較すると、モデルによって作成された軌跡データは基の軌跡データに近い値を出していることが分かる。また、恋人や家族、友人関係にある歩行者グループの近くを移動する個人歩行者の基の軌跡データにおいて、急な方向変更がある。しかし、モデルによって作成された軌跡データにはそのような急な方向変更はあまり見られない。そもそもこのモデルの提案は将来的にタイヤのついた自立型移動ロボットの移動モデルの開発に役立てたいと考えているので、むしろ急な方向変更があまりない方が結果として正しいのである。

## 第 6 章

### まとめ

本研究では，社会関係特性の異なるグループを回避した場合の個人の動きの様々な行動を調べた．グループと同じ方向に動く個人の明確なパターンを見るのは非常に難しいことに気づいた．これは主に，データの数が不十分であるためである．グループと対面方向に移動する個人の場合，大きな違いはないことに気づいたが，グループの社会的関係が同僚や家族の場合，グループのメンバー間を通過する可能性があるのは興味深い．しかし，グループの社会的関係が恋人であるなら彼らは避けて通ることが分かった．次に，ガウス分布の混合とフォンミーゼス分布をそれぞれ使用して，最小距離と最小距離における速度ベクトルの間の角度の分布をモデル化した．最後に，人工的なモデルを作成し，実験データと比較した．その結果は，人工軌道が実験的観測と十分に類似していることを示唆している．また，この結果からロボットの自然で安全な移動の実現に貢献できると期待している．

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，懇切丁寧なご指導をしていただきました岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻門田暁人教授に心より感謝の意を表します．また，研究活動において，数々のご指導やご助言を与えていただいた岡山大学大学院自然科学研究科 Zeynep Yücel 准教授に心から感謝申し上げます．また，日頃の研究活動において，お世話になりました研究室の皆様に感謝いたします．



## 参考文献

- [1] V. Prabakaran, M. R. Elara, T. Pathmakumar, and S. Nansai, “Floor cleaning robot with reconfigurable mechanism,” *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 155–165, 2018.
- [2] H. Osawa, A. Ema, H. Hattori, N. Akiya, N. Kanzaki, A. Kubo, T. Koyama, and R. Ichise, “Analysis of robot hotel: Reconstruction of works with robots,” in *Proc. IEEE Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 219–223, IEEE, 2017.
- [3] H. Nakatani, “Population aging in Japan: Policy transformation, sustainable development goals, universal health coverage, and social determinates of health,” *Global Health & Medicine*, vol. 1, no. 1, pp. 3–10, 2019.
- [4] A. Vercelli, I. Rainero, L. Ciferri, M. Boido, and F. Pirri, “Robots in elderly care,” *DigitCult-Scientific Journal on Digital Cultures*, vol. 2, no. 2, pp. 37–50, 2018.
- [5] T. Sono, S. Satake, T. Kanda, and M. Imai, “Walking partner robot chatting about scenery,” *Advanced Robotics*, vol. 33, no. 15-16, pp. 742–755, 2019.
- [6] Y. F. Chen, M. Everett, M. Liu, and J. P. How, “Socially aware motion planning with deep reinforcement learning,” in *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1343–1350, IEEE, 2017.
- [7] Z. Yücel, F. Zanlungo, C. Feliciani, A. Gregorj, and T. Kanda, “Identification of social relation within pedestrian dyads,” *PloS One*, vol. 14, no. 10, p. e0223656, 2019.
- [8] A. P. Fiske, “The four elementary forms of sociality: framework for a unified theory of social relations,” *Psychological Review*, vol. 99, no. 4, p. 689, 1992.
- [9] M. S. Clark and J. Mills, “Interpersonal attraction in exchange and communal relationships,” *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 37, no. 1, p. 12, 1979.

- 
- [10] E. B. Foa and U. G. Foa, “Resource theory of social exchange,” in *Handbook of Social Resource Theory*, pp. 15–32, Springer, 2012.
- [11] D. B. Bugental, “Acquisition of the algorithms of social life: A domain-based approach,” *Psychological Bulletin*, vol. 126, no. 2, p. 187, 2000.
- [12] Consortium for the Physics and Psychology of Crowd Dynamics, “A glossary for research on human crowd dynamics,” *Collective Dynamics*, vol. 4, no. A19, pp. 1–13, 2019.
- [13] C. McPhail and R. T. Wohlstein, “Using film to analyze pedestrian behavior,” *Sociological Methods & Research*, vol. 10, no. 3, pp. 347–375, 1982.
- [14] X.-T. Truong, V. N. Yoong, and T.-D. Ngo, “Socially aware robot navigation system in human interactive environments,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 10, no. 4, pp. 287–295, 2017.
- [15] S. Satake, T. Kanda, D. F. Glas, M. Imai, H. Ishiguro, and N. Hagita, “How to approach humans? strategies for social robots to initiate interaction,” in *Proc. Int. Conf. Human Robot Interaction*, pp. 109–116, 2009.
- [16] Y. Morales, T. Kanda, and N. Hagita, “Walking together: Side-by-side walking model for an interacting robot,” *Journal of Human-Robot Interaction*, vol. 3, no. 2, pp. 50–73, 2014.
- [17] M. Kwon, M. Li, A. Bucquet, and D. Sadigh, “Influencing leading and following in human-robot teams,” in *Robotics: Science and Systems*, 2019.
- [18] C. Chen, Y. Liu, S. Kreiss, and A. Alahi, “Crowd-robot interaction: Crowd-aware robot navigation with attention-based deep reinforcement learning,” in *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 6015–6022, IEEE, 2019.
- [19] J. Rios-Martinez, A. Spalanzani, and C. Laugier, “From proxemics theory to socially-aware navigation: A survey,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 7, no. 2, pp. 137–153, 2015.
- [20] D. Bršćić, T. Kanda, T. Ikeda, and T. Miyashita, “Person tracking in large public spaces using 3-d range sensors,” *IEEE Tran. Human-Machine Systems*, vol. 43, no. 6, pp. 522–534, 2013.

- 
- [21] Z. Yücel, F. Zanlungo, T. Ikeda, T. Miyashita, and N. Hagita, “Deciphering the crowd: Modeling and identification of pedestrian group motion,” *Sensors*, vol. 13, no. 1, pp. 875–897, 2013.
- [22] H. Cheng, Y. Li, and M. Sester, “Pedestrian group detection in shared space,” in *Proc. Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1707–1714, IEEE, 2019.
- [23] R. Zhao, M. Li, Y. Wang, Q. Liu, D. Dong, and C. Li, “An improved dynamic pedestrian grouping model in public transport space,” in *Proc. Int. Conf. Computing, Networks and Internet of Things*, pp. 111–116, 2020.
- [24] L. M. Hsu and R. Field, “Interrater agreement measures: Comments on Kappa<sub>n</sub>, Cohen’s  $\kappa$ , Scott’s  $\pi$ , and Aickin’s  $\alpha$ ,” *Understanding Statistics*, vol. 2, no. 3, pp. 205–219, 2003.
- [25] K. Krippendorff, “Agreement and information in the reliability of coding,” *Communication Methods and Measures*, vol. 5, no. 2, pp. 93–112, 2011.
- [26] K. V. Mardia and P. E. Jupp, *Directional statistics*, vol. 494. John Wiley & Sons, 2009.