

# 移動軌跡を用いた歩行者間の人間関係の推定

岡本 宏美<sup>†</sup>, 西尾 修一<sup>††</sup>, 馬場口 登<sup>‡</sup>, 森井 藤樹<sup>†</sup>, 萩田 紀博<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 奈良女子大学大学院人間文化研究科 <sup>††</sup> ATR 知能ロボティクス研究所 <sup>‡</sup> 大阪大学

本研究では、歩行者間の人間関係を移動軌跡から推定する手法を提案する。公共空間で効果的なロボットサービスや異常行動検出を行う上で、人物の位置追跡に加え、環境内の人物間の関係性を把握することは重要である。ここでは人間関係が歩行に与える影響をモデル化し、トラッキング結果への仮説の適合度合いから人間関係を逐次的に推定する。商業施設で取得した実際の人物の軌跡に提案手法を適用し、「他人」「友人・家族」「恋人」の3種類の人間関係の識別についての基礎的実験結果を示す。

## Estimating interpersonal relationship from pedestrian trajectories

Hiromi OKAMOTO<sup>†</sup>, Shuichi NISHIO<sup>††</sup>, Noboru BABAGUCHI<sup>‡</sup>, Fujiki MORII<sup>†</sup>, Norihiro HAGITA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Nara Women's University <sup>††</sup> ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories <sup>‡</sup> Osaka University

In this paper, we present a method for estimating interpersonal relationship from pedestrian trajectories in public space. For robots providing services to people or for detecting anomaly activities in public spaces, it is important to track people and recognize interpersonal relationships. We propose a model to estimate the influence of interpersonal relationships on walking behavior and estimate interpersonal relationships sequentially. Performance of this approach is evaluated using real data obtained in a shopping mall commercial space.

### 1 はじめに

本研究では、公共空間における歩行者間の人間関係を推定する手法を提案する。近年、動線解析、マーケティング調査、効果的な情報サービスの提供など様々な目的で、人間の行動や人間関係を認識する手法について、多くの研究が行われている。

神田ら<sup>1)</sup>は、ロボットの近傍に滞在している無線IDタグシステムを所持した2者に対し、2人が同時にロボットと会話を行った時間を調べて友達関係を推定する手法を提案している。推定した友達関係の結果に応じたサービスを行うことで、より効果的なロボットサービスの提供が可能としている。清水ら<sup>2)</sup>は、会話中に周囲の人が同時に動作する時間を計測することで、当該人物が会話に参加しているのか否かの推定方法を提案している。また公共空間で人間関係の推定を行った研究としては、井上ら<sup>3)</sup>が、人間関係に応じた公共空間向け広告システムを提案している。大型ディスプレ

イ広告の前に立ち止まった複数人の関係を対人距離などから推定、推定結果に対応した広告を提示することで、興味・関心を高められるとの結果を得ている。これらの研究は、ロボットや広告などの特定対象の周辺の狭い空間で停止した人を対象としており、前述の動線解析やロボットサービス提供などでの利用は難しい。

そこで本研究では歩行者間の人間関係を推定する手法を提案する。公共空間に設置したセンサからの人物の位置情報をもとに人間関係の推定を行う。具体的には、人同士の関係を大きく「他人(2者間に人間関係がない)」、「友人・家族」(以下、友人)、「恋人・夫婦」(以下、恋人)の3種類に分け、他者との関係が歩行に与える力学的影響をモデル化する。このモデルを用いて位置、関係の推定を行い、観測結果への適合度合いから人間関係の尤度を求める。またショッピングモールでの実データからモデルの妥当性を検証する。以下、まず人間

関係が歩行者行動に及ぼす影響について概観したのち、実観測値に基づく力学モデルを提案し、実データに基づく評価結果を示す。

## 2 人間関係推定モデルの生成

歩行者は互いの関係によって快適と感じる対人距離が異なるため、歩行者間の関係に応じて近づいたり、離れたったりして距離を調節しながら歩行する。

本研究では、この調節が2者間の距離と人間関係に応じて発生する引力・斥力により生じると考え、関係の違いに応じて歩行者間に働く力のモデル化を行う。

### 2.1 人間関係と対人距離

Hall は、人が他者と接するとき、人間関係が快適な対人距離を決定する要素であるとし、対人距離を密接距離、個体距離、社会距離、公衆距離の4種類に分類している<sup>5)</sup>。井上らも「恋人」「友人」「ビジネス」「他人」という人間関係によって対人距離の分布が異なるとしている<sup>3)</sup>。また、Fruin は、歩行者についても人間関係に基づき快適な対人距離が異なることを示している<sup>4)</sup>。特に歩行中は無関係な「他人」との衝突を避けるため、停止した状態のときよりも対人距離を大きくとりながら歩行を調整するとしている。藤原は歩行者がグループに出合った場合は高い確率でグループを回避するとしている<sup>8)</sup>。このように歩行者の周辺に他の人物がいる場合、歩行者間の関係が歩行に影響を与える。

このように、人間関係の違いにより歩行中の対人距離に差が生じるかどうかを、後述の実験環境での人々の歩き方から調べた (Fig.1)。実験環境はショッピングモールであり、「ビジネス」の関係をもつグループが見られないため、「恋人」「友人」「他人」の3種類の人間関係の対人距離を調べた結果、2者間の関係性に応じて対人距離の分布に差がみられた。密着する「恋人」を人物追跡器が1人と誤って検出する。相互距離の短い対象がカウントされなかったためと思われる。

### 2.2 歩行者間に働く引力・斥力モデル

歩行者間の人間関係に応じて歩行者間に働く引力・斥力について、安定距離を維持する方向に力が働くものとする。すなわち2者が接近する場合に働く力を引力、遠ざかる場合に働く力を斥力としてモデルを立てる。具体的には対人距離  $d$  を

近似した正規分布を微分し、関係性  $r$  の引力・斥力のモデル  $F_r$  とする (Fig.2)。

ただし「他人」の場合、2者間には引力が働かないと考えられることや、対人距離が短いほど斥力が大きくなることが予想されるため、単に対人距離の正規分布を微分しても2者間に働く力を表現することができない。従って、2者が密着する場合に斥力が最大になり、安定距離より遠ざかっても引力が働かない引力、斥力モデルを正規分布で近似する。この正規分布の平均値は対人距離  $0\text{cm}$  のところとし、標準偏差は正規分布全体の約99.7%が入るように「他人」の対人距離の標準偏差  $\sigma_r$  の3倍 ( $3\sigma_r$ ) とした。

$$F_{(r)} = \begin{cases} cN(d|\mu_r, \sigma_r^2), & (r = \text{others}) \\ c\frac{d-\mu_r}{\sigma_r^2}N(d|\mu_r, \sigma_r^2), & (r = \text{lovers, friends}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $F_{(r)}$  は人物間の関係  $r$  に応じて働く力を表し、 $N(d|\mu, \sigma^2)$  は平均値  $\mu$ 、分散  $\sigma^2$  の対人距離  $d$  の正規分布を表す。ただし「他人」の場合は先に述べた分布に従う。また定数  $c$  は人間関係が親密になるほど斥力が小さく、引力が大きくなるように実測値に基づいて決定する。

### 2.3 人間関係を考慮した歩行モデル

提案する歩行モデルを Fig.3 に示す。図の  $Z^n (n = 1, \dots, 3)$  は歩行者の位置の観測値を表し、 $Z^1$  が他者の位置に関係なく進もうとする本来の進路に向う力を  $F_1$ 、 $Z^2$  から受ける力を  $F_r(1, 2)$ 、 $Z^3$  から受ける力を  $F_r(1, 3)$  とし、次の時刻での歩行者の加速度をそれらの力の和  $F_1 + F_r(1, 3) + F_r(1, 2)$  により決定する。加速度に従い次の時刻での歩行者の位置  $X^1$  を推定する。逆に次の時刻での本来の進路に向う力は、 $Z_{t+1} - Z_t$  から  $F_r(1, 3) + F_r(1, 2)$  を差し引いて求める。

歩行者位置の推定は、同時に観測された他の歩行者との全ての人間関係の組み合わせについて推定を行う。従って、他の歩行者が  $n$  人いる場合、 $n^3$  通りの可能性を考える (Fig.4)。

従って人物  $i$  が本来の進路へ向う力  $\hat{F}_{i(t)}$  は、前回の加速度  $\hat{a}$  から、観測値に対する位置推定の尤度が最も高い組み合わせ  $F_{max} \hat{r}_{(t-1)}$  の場合の他者から受ける力を差し引いて算出する (式2)。加速度については上述の通り、歩行者が他者を受け

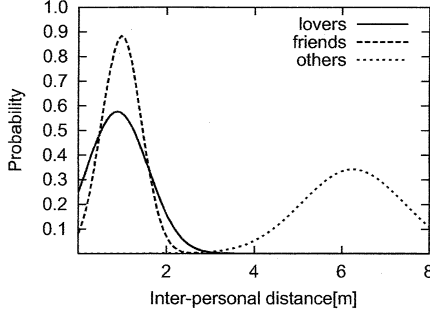


Fig. 1 人間関係と対人距離の分布

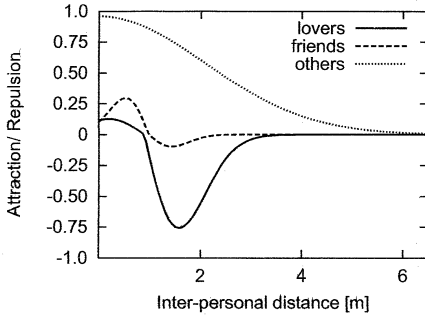


Fig. 2 引力, 斥力モデル

る全ての力  $\sum_{k=1}^n F_{max}(\hat{r}_{(t-1)})$  と本人の力  $F$  の和とする (式 3). 速度  $\hat{v}$  は前回の速度  $v_{(t+1)}^i$  と加速度の推定値の和とする (式 4). 状態ベクトルは歩行者の位置座標  $x, y$  の推定値と, 同時に観測された  $n$  人の人物との関係性の集合からなり,  $\hat{X}_{t+1}^i = (\hat{x}_{t+1}^i, \hat{y}_{t+1}^i, \hat{r}_{t+1}^{i,k} (k=1, \dots, n))$  で表し, 位置座標の推定値は前回の観測位置  $Z_{(t+1)}^i$  と速度の推定値の和とする (式 5). 観測ベクトルとしては歩行者の観測位置  $x, y$  を用い,  $Z_t^i = (x_t^i, y_t^i)$  とする.  $\delta t$  は単位時間を表す.

$$\hat{F}_{(t)}^i = \hat{a}_{(t-1)} - \sum_{k=1}^n F_{max}(\hat{r}_{(t-1)}^{i,k}) \quad (2)$$

$$\hat{a}_{(t+1)}^i = \sum_{k=1}^n F(\hat{r}_{relation(t)}^{i,k}) + F_{(t)}^i \quad (3)$$

$$\hat{v}_{(t+1)}^i = v_t^i + \hat{a}_{(t+1)}^i \delta t \quad (4)$$

$$\hat{X}_{(t+1)}^i = Z_{(t)}^i + \hat{v}_{(t+1)}^i \delta t \quad (5)$$

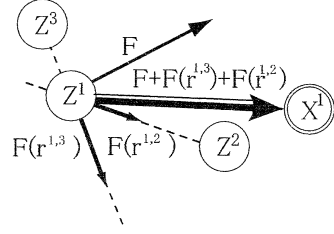


Fig. 3 歩行モデル (1)

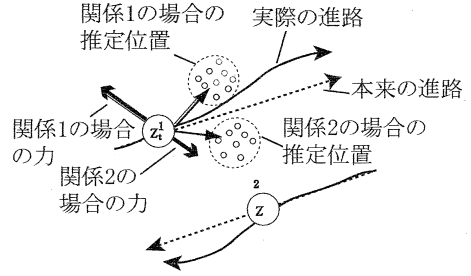


Fig. 4 歩行モデル (2)

ただし, 人物  $i$  が最初に観測された時刻  $t=0$  では本来の進路へ進む力を求めることができないため  $F_{i(t=0)} = 0$  とする. また時刻  $t$  で人物  $i$  以外に  $n$  人が同時に観測された場合, 人物  $i$  との人間関係の可能性としては, 「恋人」は  $n$  人中 1 人のみとし,  $i$  の「恋人」が 2 人以上の組み合わせについては計算に含めない.

#### 2.4 人間関係の推定結果の尤度

人間関係の尤度は, 観測位置に対する推定位置の尤度とする. 実験環境では観測値は  $\pm 6cm$  の範囲で観測誤差を含むため<sup>7)</sup>, 観測誤差を  $N(x, y | \mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2, 0), \sigma_x = \sigma_y = 6$  の 2 次元正規分布で近似する. 推定位置についても観測ベクトルから推定しているため, 同様の誤差を含む 2 次元正規分布で近似する.

人間関係の推定については, 過去の関係性の履歴を考慮する方が精度が向上すると考えられるため, 単純マルコフ過程を仮定する. 従って人間関係の尤度は, 状態ベクトルの尤度  $w$  と過去の人間関係の尤度  $p(r_{(t)})$ , 遷移確率  $p(r_{(t+1)} | r_{(t)})$  との積

の和とする (式6)。

$$P(r_{(t+1)}) = \sum_r w(r_{(t+1)})p(r_{(t+1)}|r_{(t)})p(r_{(t)}) \quad (6)$$

実験では、初期状態確率については、「他人」「恋人」「友人」が等しくなるように設定し、状態遷移確率は同じ関係に遷移する場合は0.8、他の関係に遷移する場合は0.1とした。

#### 2.4.1 人間関係推定アルゴリズム

以下に歩行者モデルを用いた人間関係推定のアルゴリズムを示す。

1. 時刻  $t$  での本人の力を式2に基づいて計算する。
2. 歩行者  $i$  と同時に観測された  $n$  人の歩行者との対人距離を計算し、全ての人間関係の組み合わせ ( $3^n$  通り) を考え、他の人物から受ける力を求める。
3. 式3から5を用いて時刻  $t+1$  の推定値  $X_{t+\delta t}^k$  を計算する。
4. 時刻  $t+1$  での観測値を取得し、観測値に対する推定値の尤度を求め、状態ベクトルの尤度とする。
5. 式(6)に従い、時刻  $t+1$  での人間関係の推定値の尤度とする。

ただし他の歩行者から受ける力を求める際、計算負荷を軽減するため対人距離が300cm以上の場合、「他人」とする。

### 3 評価実験

提案する人間関係推定手法の有効性を検証するために、実際の公共空間で取得した人物の移動軌跡を用いて評価実験を行った。

ショッピングモール内の約20mの通路で、レーザレンジセンサを用いて人物の胴体を追跡した<sup>6)</sup>。ユニバーサル・スタジオ・ジャパンに隣接するショッピングモール内の約20mの通路で、2008年2月4日から11日の土日を除く計6日間、午前11時から午後7時まで取得したものの一部を用いる (Fig.5)。

取得した移動軌跡は密着する人物を1人と数えてしまう、荷物を人と誤って検出する、移動軌跡の

途中で追跡に失敗し途切れてしまうなど検出の誤りを含むため、正しく検出されているもののみを検証に使用した。取得した人物の移動軌跡に提案手法を適用し、「他人」「恋人」「友人」の3種類の人間関係の推定結果を調べ、正解データと比較した。正解データは設置した監視カメラの映像から実験者が目視で人間関係のラベル付けしたものをを用いる。テストデータの内訳は「恋人」53組、「友人」110組、「他人」266組である。人間関係の推定は500msecごとに行い、1組の人間関係な推定結果のうち70%以上を占める推定結果を全体の推定値とし、判別精度を算出した。提案したモデルの有効性を検証するために対人距離の分布に従って各関係性の尤度決定し、人間関係を推定する実験も行い比較する。



Fig. 5 ショッピングモールでの追跡結果

### 4 実験結果

提案手法を用いた「他人」か「恋人または友人」について提案手法を用いて推定した結果を Table 1 に、対人距離のみを用いて推定した結果を推定結果を Table 2 に示す。表の正解の列は正解とする人間関係を表し、推定結果の列は各行の人間関係の推定組数を示している。精度については、正しく推定できている組数を各関係性のテストデータ数で割ったものとする。推定結果の列と正解の行が一致する部分は人間関係を正しく推定出来た組数を表わし、一致しない部分は誤って推定した組数を表す。また不可の列は「他人」か「恋人または友人・家族」を70%以上の割合で推定できなかった組数である。次に、人間関係のあるもののうち「恋人」か「友人・家族」かを提案手法を用いて推定した結果を Table 3 に、対人距離のみを用いて推定した結果を Table 4 に示す。

実験の結果、「恋人または友人」という人間関係の推定において、単に対人距離の分布に従い推定

する手法に比べ提案手法の方が精度が低かったが、「恋人」か「友人」かという推定に関しては「恋人」と推定する精度が向上した。

Table 1 「他人」か「恋人または友人・家族」の推定結果

正解	推定結果(組)			精度(%)
	恋人・友人	他人	不可	
恋人・友人	108	1	54	66.3
他人	8	206	39	77.4

Table 2 対人距離のみを用いた「他人」か「恋人または友人」の推定結果

正解	推定結果(組)			精度(%)
	恋人・友人	他人	不可	
恋人・友人	142	0	21	87.1
他人	11	204	51	76.7

Table 3 「恋人」「友人」の推定結果

正解	推定結果(組)			精度(%)
	恋人	友人	他人	
恋人	31	12	0	58.5
友人	17	48	1	43.6

Table 4 対人距離のみを用いた「恋人」「友人」の推定結果

正解	推定結果(組)			判別精度(%)
	恋人	友人	他人	
恋人	1	50	0	1.9
友人	15	76	0	69.1

## 5 考察

まず「他人」か否かを推定した結果について考察する。「他人」の推定は全体としては成功しているが、他者とすれ違う場合や他者を追い越す際に誤って人間関係があると推定してしまう。2者が観測され始めてからの時間がある程度長くても誤った推定をしていることから、今回使用した過去の関係性の記憶がうまく反映されていないためであると考えられる。従って、正確に関係性を推定するために過去の履歴だけでなく、将来の予測を用いる必要があると考えられる。

次に「恋人」か「友人」かについて推定した結果について考察する。単純に対人距離のみに従って関係性を推定する場合、実験で得られた「恋人」と「友人」の対人距離の分布は重なり合っているため、94.3%の「恋人」を「友人」と誤って推定す

る。従って、「恋人」か「友人」かを推定するうえで、単純に対人距離のみを用いて推定することはできない。しかし提案した手法では対人距離の分布を直接用いるのではなく、2者間に働く力のモデルを立てて位置推定を行ったため、推定率が増加したと考えられる。Fig.6からFig.9に提案手法を用いて正確に「恋人」または「友人」と推定できた例を示す。Fig.8, Fig.7の横軸は時刻を表し、縦軸は2者間の対人距離の推移を表す。またFig.8, Fig.9の横軸は時刻を表し、縦軸は3種類の人間関係の推定結果の尤度を示す。それぞれ対人距離の分布に従い関係性を推定した場合、誤って推定してしまうものだが、提案手法を用いた場合、対人距離の変化にも影響を受けずに関係性の推定に成功した。従って、提案手法が人間関係を推定する一手法として有効であると考えられる。

ただし、提案手法でも推定を誤る割合が高い。これは、密着しているため追跡に失敗する「恋人」をモデルに考慮しなかったため、「恋人」の対人距離の分布を正しく近似できなかったことが原因の一つである。また、同じ関係性に分類されるグループでも個々のグループにより安定距離が異なるため、対人距離以外の要素を考慮する必要があると考えられる。

## 6 まとめ

本研究では、歩行者間では人間関係に応じて引力や斥力のような力が行動に影響を与えると考え、関係性と対人距離に応じた力についての仮説を立て、人物の移動軌跡から人間関係推定のモデルを用いて逐次的に人間関係の推定を行った。実際の公共空間で得られた人物の移動軌跡に対し、提案手法を適用し人間関係の結果、移動軌跡を用いたことで対人距離のみに従う推定手法では見つけることができない人間関係について正確に推定することができた。しかし現状のモデルでは、接近し合う「他人」を「友人」や「恋人」と誤って推定するため、未来の観測値による平滑化などを用いることでさらに効果的に関係性の推定が可能になると考えられるため、今後の課題とする。計算不荷を減らすためにMCMCなどの近似手法の導入も検討する。また人間関係による歩行の調節についての知識を考慮することで、より効果的な人物の追跡が可能になりうる。

## 謝辞

本研究は、文部科学省の平成 18 年度科学技術振興調整費による「科学技術連携施策群の効果的・効率的な推進」の一環として実施したものである。

## 参考文献

- 1) 神田崇行, 石黒浩, “対話型ヒューマノイドロボットからの日常生活の中の友達関係の推定,” 情報処理学会論文誌, vol.45, no.8, pp.2098-2104 (2004)
- 2) 清水敏雄, 松村直宏, 谷内田正彦, “全方位カメラを用いた同調現象の観測に基づく人間関係の推定,” 第 21 回人工知能学会全国大会 (2007)
- 3) 井上智雄, 瓶子和幸, “グループに適応する公共空間向け広告システム GAS,” 情報処理学会論文誌, vol.49, no.6, pp.1962-1971(2008)
- 4) Fruin, J.J (著), 長島正充 (訳), 歩行者の空間=理論とデザイン=, 鹿島出版会, 東京, (1977)
- 5) Hall, E.T (著), 佐藤信行 (訳), かくれた次元, みすず書房, (1970)
- 6) Glas, D.F, Miyashita, T, Ishiguro, H, Hagita, N, “Laser Tracking of Human Body Motion using Adaptive Sape Modeling,” Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.602-608 (2007)
- 7) Takayuki Kanda, Dylan F. Glas, Masahiro Shiomi, Hiroshi Ishiguro and Norihiro Hagita, Who will be the customer?: A social robot that anticipates people's behavior from their trajectories, Tenth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2008), pp.380-389 (2008).
- 8) 藤原大三郎, “群集流動シミュレーションにおけるグループふお項表現導入の有効性,” 東京工業大学卒業論文集 (2003)

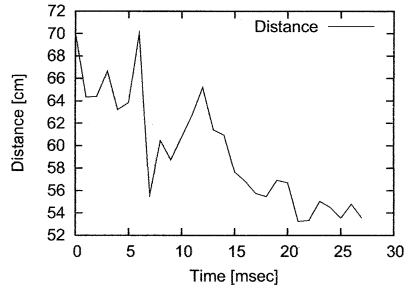


Fig. 6 「友人」関係にある 2 者間の対人距離

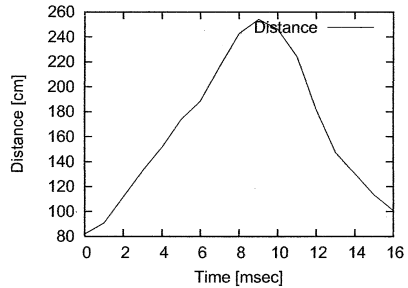


Fig. 7 「友人」関係にある 2 者間の尤度の推移

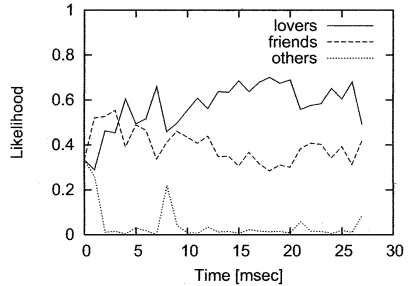


Fig. 8 「恋人」関係にある 2 者間の対人距離

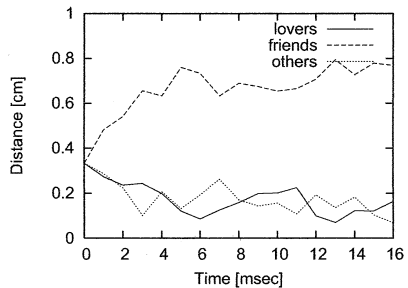


Fig. 9 「恋人」関係にある 2 者間の尤度の推移