

## 背景点隠蔽時間に基づいた人の移動軌跡推定手法の検討

崎 貴幸\*<sup>1</sup> 廣森 聡仁\*<sup>1</sup> 山口 弘純\*<sup>1</sup> 東野 輝夫\*<sup>1</sup> \*<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
 {t-amano, a-hiromori, h-yamagu, higashino}@ist.osaka-u.ac.jp

## 1 はじめに

Society5.0 が目指す社会においては、IoT (Internet of Things) により、すべての人とものが繋がり、今までにない新たな価値を生み出すことが期待されている。その中でも人の移動を継続して把握することが今まで以上に求められており [1,2], 我々の研究グループでは、対象物までの正確な距離を測定することができる測域センサを用いた、屋内歩行者の位置と軌跡をトラッキングする「ひとなび」などのシステムを開発している [2]。本研究では、センサ領域内を移動する人を直接計測するのではなく、人がいない際に観測される背景点が、人の移動により隠蔽される隠蔽時間をもとに、人の移動軌跡を推定する手法を検討する。はじめに人の移動軌跡と背景点の隠蔽時間の関係を数理的に定式化し、複数の背景点の隠蔽時間から人の移動軌跡を推定する手法を示す。最後にシミュレーションで得た歩行者のセンシングデータに対して本手法を適用した結果を示す。

## 2 歩行者の移動軌跡と背景点のオクルージョン

本論文では、センサの目的の計測対象以外にあたる背景の一部である背景点を歩行者が隠蔽する時間 (以下、隠蔽時間と呼ぶ) に基づき、歩行者の存在を把握するとともに、その歩行者の移動軌跡を推定する手法を提案する。歩行者は大きさを持つ剛体とし、センサ領域内の歩行者の移動に際して、背景点が隠蔽され、その隠蔽を背景点のオクルージョンと呼ぶ。このオクルージョンは歩行者の存在そのものを示すものであり、その背景の隠蔽時間は歩行者の移動軌跡や速度に依存するため、この隠蔽時間に基づき、センサ領域内を移動する歩行者の移動軌跡と速度を推定する。

## 2.1 歩行者軌跡と背景点の定義

歩行者は半径  $r$  の円柱として定義し、センサを中心とする  $xy$  平面を移動するものとする。この歩行者がセンサ領域内を移動する時、小さいタイムスロット  $t$  の間は直線的に移動していると考えられる。よってタイムスロット  $t$  の間の歩行者の移動軌跡は直線  $y = a^t x + b^t$  で表現できる。以下では  $N$  人の歩行者の集合を  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$  とし、歩行者  $P_i$  はタイムスロット  $t$  で軌跡  $tra^{P_i,t}: y = a^{P_i,t}x + b^{P_i,t}$  に沿って速度  $v^{P_i,t}$  で移動するものとする。

背景点は大きさを持たない点であるとし、以下では  $M$  個の背景点の集合を  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_M\}$  とする。センサ領域内を移動する歩行者によって、背景点が観測できなくなる時、背景点にオクルージョンが発生していると定義する。また、一回のオクルージョンによってセンサから背景点が観測できない時間を隠蔽時間と定義する。以下ではあるタイムスロット  $t$  で、各背景点  $B_i$  に発生するオクルージョンの集合を  $O^{B_i,t} = \{O_1^{B_i,t}, O_2^{B_i,t}, \dots, O_n^{B_i,t}\}$  とする。

## 2.2 歩行者の移動軌跡と背景点の隠蔽時間の定式化

## 2.2.1 軌跡と1つの背景点の隠蔽時間

ここでは、歩行者が、 $y = mx$  上に位置する背景点とセンサの間を通過することで生じる隠蔽時間について説明する。図1より、歩行者が背景点を隠蔽するのは、歩行者が  $y = mx$  と交点を持つ区間である。この距離より、その移動にかかる時間、すなわち背景点の隠蔽時間  $t$  は、歩行者の速度  $v$  を用いて以下の式で表すことができる。

$$t = \frac{2}{v} \sqrt{\frac{(a^2 + 1)(m^2 + 1)r^2}{a - m^2}} \quad (1)$$

これは背景点の隠蔽時間が歩行者の移動の軌跡の傾きと速度にのみ依存し、切片とは無関係であることを示しているため、背景点の隠蔽時間以外の時間の定式化も検討する。

## 2.2.2 軌跡と2つの背景点間の移動時間

ここでは、 $y = nx$  上に位置する背景点の隠蔽終了位置から、 $y = mx$  上に位置する背景点の隠蔽開始位置までの移動時間について説明する。この移動にかかる時間  $t'$  は、歩行者の移動速度  $v$  を用いて以下の式で表すことができる。

$$t = \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{v} \quad (2)$$

$$dx = \frac{b + r\sqrt{1+m^2}}{m-a} - \frac{b - r\sqrt{1+n^2}}{n-a} \quad (3)$$

$$dy = \frac{mb + ar\sqrt{1+m^2}}{m-a} - \frac{nb - ar\sqrt{1+n^2}}{n-a} \quad (4)$$

以下では、ここで定式化した背景点の隠蔽時間と軌跡の関係および、背景点間の移動時間と軌跡の関係を用いて、歩行者の軌跡の推定を行う。

## 3 移動軌跡の推定手法

本項では、あるタイムスロット  $t$  において、複数の背景点を通過する歩行者の軌跡を、各背景点のオクルージョンの情報のみから間接的に推定する手法を提案する。

3.1 背景点の隠蔽時間を用いた  $a, v$  の推定

タイムスロット  $t$  において、隣接する2つの背景点  $B_i, B_j$  を通過する人数をそれぞれ  $N_{B_i}, N_{B_j}$  とすると、各背景点のオクルージョン集合は  $O^{B_i,t} = \{O_1^{B_i,t}, O_2^{B_i,t}, \dots, O_{N_{B_i}}^{B_i,t}\}$ ,  $O^{B_j,t} = \{O_1^{B_j,t}, O_2^{B_j,t}, \dots, O_{N_{B_j}}^{B_j,t}\}$  となる。  $\forall O_k^{B_i,t} \in O^{B_i,t}, \forall O_l^{B_j,t} \in O^{B_j,t}$  において、以下の連立方程式より、各オクルージョンのペアに対する  $\hat{a}, \hat{v}$  を推定できる。ただし、 $m_i, m_j$  はそれぞれ、背景点  $B_i, B_j$  とセンサを結ぶ直線の傾きとする。これを繰り返して、任意の隣接した2つの背景点から歩行者の軌跡のパラメータ  $a, v$  の推定値を得

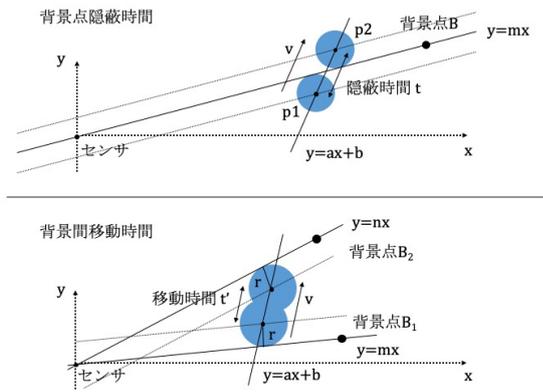


図1 歩行者と背景点の位置関係

る。以下では、それぞれ推定したパラメータ  $AV^{B_i, B_j, t} = \{(\hat{a}_{1,1}^{B_i, B_j, t}, \hat{v}_{1,1}^{B_i, B_j, t}), \dots, (\hat{a}_{N_{B_i}, N_{B_j}}^{B_i, B_j, t}, \hat{v}_{N_{B_i}, N_{B_j}}^{B_i, B_j, t})\}$  のうち、どれが歩行者の正しい軌跡のパラメータであるかを決定する手法について述べる。

$$\begin{cases} O_k^{B_i, t} = \frac{2}{\hat{v}} \sqrt{\frac{(\hat{a}^2 + 1)(m_i^2 + 1)r^2}{\hat{a} - m_i^2}} & (5a) \\ O_k^{B_j, t} = \frac{2}{\hat{v}} \sqrt{\frac{(\hat{a}^2 + 1)(m_j^2 + 1)r^2}{\hat{a} - m_j^2}} & (5b) \end{cases}$$

### 3.2 背景点の間移動時間を用いた $b$ の推定

式 (1) より、歩行者の軌跡と背景点の隠蔽時間には相関があるため、任意の隣接する2つの背景点のオクルージョン集合のうち、同じ歩行者に起因するオクルージョン同士を用いて計算した場合は非常に近い  $a, v$  が推定値として得られる。さらに同じ歩行者に起因するオクルージョン同士を用いて、その  $a, v$  を式 (2) に適用して推定される  $b$  の推定値も、同様に近い値が得られるはずである。これらの事実に基づいて、上で求めた  $AV^t$  から、隣接する3つの背景点を移動する歩行者の軌跡パラメータ  $ABV = \{(\hat{a}_{1,1}^{B_i, B_j, B_k}, \hat{b}_{1,1}^{B_i, B_j, B_k}, \hat{v}_{1,1}^{B_i, B_j, B_k}), \dots\}$  を決定するアルゴリズムを以下に示す。なお、アルゴリズム中では冗長なので  $t$  は省略している。

アルゴリズムより得られた  $ABV$  の中で、 $(\hat{a}, \hat{v})$  の差がしきい値  $\epsilon$  よりも小さいものが複数あればそれらは同じ歩行者由来のオクルージョンであると判定し、その平均値である人の軌跡パラメータ  $(a, b, v)$  の推定値とする。

## 4 シミュレーションによる実験と評価

本推定手法の実験を行うため、数値解析ソフトウェア MATLAB 上にシミュレータを実装し、シミュレーションを行った。センサは理想センサであるとし、計測誤差は考慮していない。歩行者の密度別に3パターンの実験を行った。タイムスロットは20秒で、複数の背景点を通過した歩行者を対象に推定を行った。センサ領域内の人口密度が小さい場合には、100秒間に通過した21人中19人の軌跡を、密度が中くらい場合には、100秒間に通過した55人

## Algorithm 1 歩行者の $a, b, v$ を決定するアルゴリズム

**Input:**

$AV$

**Output:**

$ABV$

- 1: **for**  $i \leftarrow 1, n$  **do**
- 2:   **for all**  $(\hat{a}^{B_i, B_j}, \hat{v}^{B_i, B_j}) \in AV^{B_i, B_j}$  **do**
- 3:     最も値に近い  $(\hat{a}^{B_i, B_k}, \hat{v}^{B_i, B_k}) \in AV^{B_i, B_k}$  を決定
- 4:      $\hat{a}^{B_i, B_j, B_k} = \frac{\hat{a}^{B_i, B_j} + \hat{a}^{B_i, B_k}}{2}$
- 5:      $\hat{v}^{B_i, B_j, B_k} = \frac{\hat{v}^{B_i, B_j} + \hat{v}^{B_i, B_k}}{2}$
- 6:      $\hat{a}^{B_i, B_j, B_k}, \hat{v}^{B_i, B_j, B_k}$  を用いて式 (2) より  $\hat{b}_{i,j}, \hat{b}_{j,k}, \hat{b}_{k,l}$  を算出し、その平均を  $\hat{b}^{B_i, B_j, B_k}$  とする
- 7:      $\hat{b}_{i,j}, \hat{b}_{j,k}, \hat{b}_{k,l}$  の分散が最も小さいペアを同じ歩行者由来のペアとして  $ABV[i] \leftarrow (\hat{a}^{B_i, B_j, B_k}, \hat{b}^{B_i, B_j, B_k}, \hat{v}^{B_i, B_j, B_k})$  を推定値とする
- 8:   **end for**
- 9: **end for**

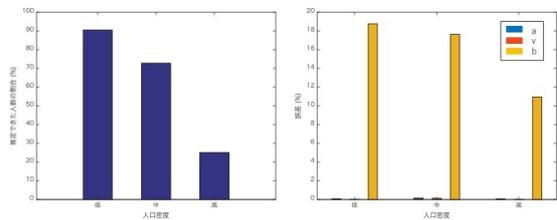


図2 推定結果

40人の軌跡を、密度が大きい場合には、60秒間に通過した80人中20人の軌跡を図2の精度で推定できた。

## 5 まとめと今後の課題

本研究では、センサの目的観測物以外の背景の一部である背景点に発生するオクルージョンに基づき、歩行者の移動軌跡を間接的に推定する手法を検討した。歩行者の軌跡と背景点の隠蔽時間に相関があることを示し、それを利用して背景点のオクルージョンのみから歩行者の移動軌跡を推定する手法を説明した。評価実験では密度が極端に高くない場合、75%以上の歩行者の軌跡を高精度で推定できた。今後の課題として、理想センサではなく計測誤差が発生する実際のセンサにおいても本手法を適用するためのアルゴリズムを考えていきたい。

## 参考文献

- [1] 日経 BigData §展示会来場者を赤外線センサーで計測、人の動きの不思議な法則を見いだす (2014). <http://business.nikkeibp.co.jp/article/bigdata/20141106/273529/?P=2>(参照:2019-1-11).
- [2] 樋口雄大 廣森聡仁 山口純純 東野輝夫 上嶋祐紀 §ひとつがつながるび位置と気持ちと空間の共有マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム論文集 pp. 2105–2115 (2013).