

# 通過情報を活用した移動経路分析・応用手法の評価

永田 吉輝<sup>1,2,a)</sup> 浦野 健太<sup>1</sup> 米澤 拓郎<sup>1</sup> 河口 信夫<sup>3,1</sup>

**概要：**移動データは運輸や施設運用、災害対策など多くの分野で活用が進んでいるが、プライバシーへの懸念や広域かつ詳細な移動データ収集にかかるコストなど、様々な課題が存在する。本研究では、完全に個人を特定しない通過情報を用いた計算コストが低い移動経路分析手法の評価を行った。実証実験では、中部国際空港にて入退推定用の通過情報と正解用の人のトラッキングデータを収集した。結果、入退推定結果とトラッキングデータによる正解入退情報のコサイン類似度は 0.93 となり、統計的手法によるコサイン類似度 0.83 より高精度となった。また、移動時間を含めた入退情報の正解率は 68% となった。

## 1. はじめに

スマートフォンや IoT 機器が普及するにつれ、様々な手法で移動データを収集する技術が普及してきた。日本では、1990 年代頃から携帯電話の普及が急速に進み、現在は国民全体で 8 割以上の人々がモバイル端末を所有している [1]。この高いモバイル端末の普及率を背景に、GPS や携帯電話基地局、Wi-Fi、Bluetooth を用いた位置情報の取得方法が数多く研究され、実用化されてきた。また、カメラや Light Detection And Ranging センサ (LiDAR) を用いた移動データ収集も、画像処理技術の発展に伴い実用化が進んでいる。

移動データへの関心は、運輸や交通、マーケティング、災害、感染症対策、施設管理など、様々な分野で高まっている。例えば、交通の分野では交通量調査や人の滞留情報に基づく混雑分析、マーケティングでは商品・広告の配置戦略、施設管理では来訪者の効率的な誘導や災害対策などに移動データの活用が進んでいる [2], [3], [4]。このように、移動データは様々な分野で現在活用されており、今後もその活用分野は拡大していくと考えられる。

一方、世界各国でプライバシー保護について見直す動きが活発化し、私たちのプライバシーと密接な関わりのある移動データの取り扱い方も見直す必要が出てきた。欧州連合 (EU) においては、2016 年に個人が各々のデータをコントロールする権利を取り戻すため、EU 一般データ保護規則 (GDPR) が定められた [5]。フランスの情報処理・自由全

国委員会は、Google による個人情報利用の説明方法を問題視し、GDPR に基づき 5 千万ユーロの制裁金を課した [6]。日本においても、人流計測実験におけるカメラの使用が問題視された例がある [7]。さらに、最近のスマートフォンや PC のオペレーティングシステム (OS) には、移動データ収集を困難にする仕組みが取り入れられている。例えば、スマートフォンに搭載された Global Positioning System (GPS) をアプリケーションから使用する場合、ユーザーによる明示的な位置情報取得の許可が必要なため、ユーザーがこれを拒否すれば移動データを収集できなくなる [8]。さらに、Wi-Fi アクセスポイント (AP) へ接続する際の MAC アドレスをランダムに変更する機能が取り入れられている端末もある [9], [10]。この機能により、接続する AP が変わる度に端末の MAC アドレスが変わるため、端末の移動を観測できず、端末のユーザーの移動経路を推定できない。ゆえに、移動データを収集する際は、ユーザーに利用目的を説明し同意を得た上で収集し、移動データ収集後は厳重に管理するなど、プライバシーへの配慮が欠かせなくなった。

移動データを収集する方法は、データの種類や収集範囲により様々な存在するが、一般に詳細かつ広域な移動データを収集しようとするほど、必要なコストも高くなる。赤外線センサを用いた手法 [11] では、ある定点における人の通過を比較的安価に観測できるが、取得できるデータはあくまで定点の通過情報であるため、個別の人がどのような経路で移動したかという情報は得られない。カメラや LiDAR を用いた手法 [12], [13], [14], [15] では、一度に多くの人の移動を観測できる。しかし、画像処理にコストがかかるためランニングコストは比較的高く、観測できる範囲がセンサの視野に限られるため、広域な移動データを収集するためには多額のコストがかかる。Global

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院 工学研究科  
Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>2</sup> 株式会社 ExData  
ExData, Inc.

<sup>3</sup> 名古屋大学 未来社会創造機構  
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University

a) teru@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

Positioning System (GPS) を使用して移動データを収集する場合、GPS データを収集する端末を個人に配るか、個人が所有するスマートフォンにアプリケーションをインストールしてデータを収集する方法が一般的である。ゆえに、これまでに述べてきたセンサ類よりも広域な移動データが収集できる反面、データ収集のための端末代やアプリケーションの開発費が必要になる。携帯電話やスマートフォンが発する電波を用いて、移動データを収集する研究 [16], [17], [18], [19], [20], [21] や実用例 [22] も存在する。Wi-Fi パケットを収集する手法では、既存の AP の流用も可能なため、ほとんど追加費用をかけずに、移動データを収集できる場合がある。しかし、これらの手法では、AP やビーコンの位置と電波強度を用いて位置推定を行うため、位置測定の精度は他の手法より低い。つまり、詳細かつ広域な移動データを、より安価に収集できる仕組みの実現が望まれる。

そこで我々は、移動データを収集する際のプライバシーとコストの課題解決を目的として、通過情報を活用した移動経路分析と応用手法を提案した [23]。通過情報とは、「出入口や通路の断面における人の通過を、完全には個人を特定できないセンサで継続的に観測した際のデータ」を指し、例えばタイムスタンプと何らかの個人の特徴（身長や体温、髪や服の色など）を組として時系列的に記録したデータのことをいう。対象とする環境は、空港やショッピングモールなどの大規模施設であり、カメラ等のセンサを用いて施設内の人の移動データを収集するには多大なコストがかかる環境である。提案手法では、大規模施設内の複数地点で収集した通過情報間の関係性を用いて、各個人の移動経路を分析する。これにより、大規模施設における移動データの収集を、より低いコストで実現することを目指すとともに、移動経路データを用いた応用手法について検討した。

提案手法を実証するため、本論文ではステレオカメラを搭載した天井設置型の通過センサを用いた実験を、中部国際空港にて行った。中部国際空港は、敷地面積が約 473ha である中部地方最大の国際空港であり、空港島に計 66 台の通過センサを設置し、通過情報を収集した。使用した通過センサは、天井から見下ろすタイプのセンサであるため、人の顔がはっきりと映り込む可能性は低い。さらに、センサ内で人の認識を行った後、映像データは破棄し、通過情報（人の通過時刻、通過方向、身長、歩行速度）のみを出力する。よって、本論文で提案する通過情報の要件に合った情報を得られる。さらに、中部国際空港に施設内の人の移動経路を継続的にトラッキングするセンサを設置・データ収集を行い、提案手法の評価を行った。

## 2. 関連研究

### 2.1 移動経路分析に関する研究や実用例

移動経路分析の手法、さらにその応用については過去に

数多く研究・実用化されており、それぞれの手法に異なる特徴や課題が存在する。

GPS は一般に、複数の GPS 衛星から受信した電波を用いて、電波の伝搬時間より位置を推定するため、空が開けた屋外であれば地球上のどこにいても数メートル以内の誤差で位置推定できる [24]。一方で、屋内では微弱な GPS 衛星の電波を受信できない場合が多く、位置推定が困難になる。また、継続的に位置情報を取得する場合、常に衛星電波を受信し位置を計算する必要があり、消費電力が増大し端末の稼働可能時間が短くなる。

モバイルネットワークを用いた手法では、主にどの基地局にモバイル端末が接続されているかや、送受信時の信号強度を用いて位置情報を取得する。Ratti らの研究 [16] では、都市における携帯電話の使用状況を基地局ごとに時系列でヒートマップとして可視化し、その都市における 1 日の人の流れを分析した。Caceres らの研究 [17] では、携帯電話が 1 つの基地局がカバーする範囲（セル）を出入りするときは基地局と通信するという特性を利用し、自動車の交通量調査をより低コストに行えると示した。また、モバイルネットワークを用いて収集し統計処理したデータを提供するサービスとして、株式会社 NTT ドコモの「モバイル空間統計」が挙げられる [25]。一方、モバイルネットワークから得られるデータは個人情報を含む場合が多いため、これらの研究・実用例では匿名化や秘匿処理が行われている。

Wi-Fi パケットや Bluetooth パケットを用いる手法は、

- 移動経路の測定対象となる人が所持する端末が発するパケットを、固定のパケットセンサで収集する
- AP やビーコンが発する電波を、移動経路の測定対象となる人が持つ端末で収集する

の 2 つに大別される。前者は、主に空港や駅、商店、公園などの施設において、その施設内の人の動きを把握したい場合に用いられ、これまでに様々な環境で研究 [18], [19], [20], [21] や実証 [22] が行われてきた。ただし、この手法では、施設を訪れるすべての人がパケットを送出する端末を所持するとは限らない上に、パケットロスが発生する場合もあるため、全数を把握するのは困難である。そのため、上述の研究では収集できたパケットから全数を把握するために、他の手法を併用するなど、様々な工夫が行われている。後者は、主に端末の利用者が現在位置を知りたい場合や、広告主が特定のエリアに滞在するユーザーに対して、プッシュ通知を通じて広告を配信したい場合等に用いられる。この手法を用いた例として、クウジット株式会社の「PlaceEngine」では、AP の MAC アドレスと位置情報のデータベースを有しており、観測データと組み合わせで位置を推定・ユーザーに提供している [26]。

カメラを用いた手法では、画像内の人をフレーム間で追跡する人物再同定の深層学習モデルについて幅広く研究されている [12]。川下らの研究 [13] では、ステレオカメラを

用いた簡便な人流計測手法を実現するため、カメラの設置条件によるパラメータの自動推定や混雑度に応じた移動経路分析手法の選択について評価が行われた。

Light Detection And Ranging センサ (LiDAR) を用いた人位置検出・トラッキングに関する研究や実用例も存在する。Taipalus らの研究 [27] では、人の膝の高さの位置に 2 次元 LiDAR を搭載した移動ロボットを用いてセンシングを行い、人の 2 本の足を検出するアルゴリズムを基に人位置検出を行った。実用化例として、株式会社 ATR-Promotions の人位置計測システム「ATRacker」[28] があり、本研究では ATRacker で評価用データを収集した。Shackleton らの研究 [14] では、3 次元 LiDAR を用いた人のトラッキングを、カルマンフィルタやクラスタリング手法を組み合わせで実現した。下里らの研究 [15] では、一般に高価な 3 次元 LiDAR の使用台数を削減するため、自律移動ロボットに 3 次元 LiDAR を搭載し人流推定する手法を開発した。

赤外線センサには主に、自ら赤外線を発してその反射光を測定する反射型と、人が発する赤外線を検知する焦電型があるが、どちらも人の移動や存在を検知するために用いられている。反射型のものは、自動ドアや自動水栓など、人の検出において既に多くの場所で利用されている。秦らの研究では [11]、焦電型赤外線センサを用いたゲートにおける通行判定が試みられている。また、焦電センサアレイとフーリエ変換を用いて測位する特許技術 [29] や、CNN を用いて人位置推定を行う研究 [30] も存在する。

## 2.2 関連研究と比較した本研究の位置づけ

前節で述べた関連研究と本研究の関係を整理すると図 1 のようになり、それぞれの手法に長所と短所が存在する。そこで、本研究では、これら様々な移動経路分析手段の間を埋める手法として、大規模施設における通過情報を活用した移動経路分析と応用手法を提案する。本手法で収集する「通過情報」は、センサ設置場所における人の通過を観測した際のデータを指し、使用するセンサは完全には個人を特定できない情報（身長や体温、髪や服の色など）を収集するセンサを使用できる。また、パケットセンサのような個人のモバイル端末の所有状況に依存するセンサを使用しなければ、全数把握しやすい。さらに、通過情報を基にセンサ間の通過情報の関連付けを行い、移動経路も推定可能としつつ、他の手法よりコストを抑えられると期待できる。

## 3. 移動経路分析手法

本節では、我々が開発してきた通過情報を用いた移動経路分析手法について説明する。

### 3.1 対象とする環境

本研究で対象とする環境は、駅や空港、ショッピングモールのような大規模施設である。大規模施設とは、いく

手法 比較 ポイント	カメラ型	赤外線(通過)型	パケット収集型	GPS/基地局型	本研究
プライバシー	映像の取得・ 使用方法に依存		必要に応じて匿名化	匿名化が必須	個人を完全に識別 できない情報を使用
全数把握					(使用センサに依存)
移動経路	カメラの画角・ 設置台数等に依存		IDの匿名化状況・ 環境条件等に依存		通過情報から推定
コスト	空間を網羅する機材・ 画像処理コスト	センサ自体が安価	既存設備を 活用可能な場合も	アプリ開発コストや データ入手法性が課題	少ないセンサ数で 軽量の計算

図 1 関連研究と本研究の比較

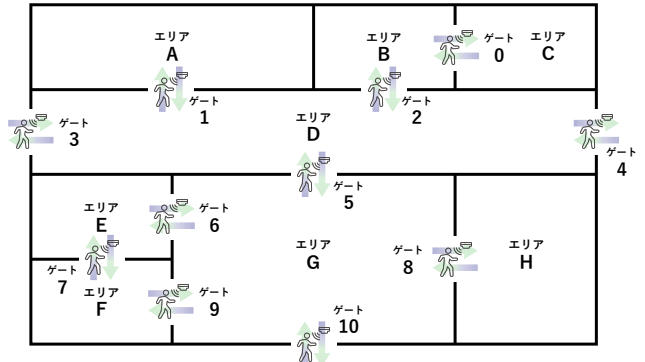


図 2 大規模施設とセンサ設置の概念図

つかの小さなエリアに仕切られた広いエリアで、ゲートを通じて小さなエリア間を人が往来できる環境である。また、ゲートとは、出入口や通路上のとある断面の総称であり、改札やエレベーターの前、ドア、廊下と部屋の境界等がゲートにあたる。本研究では、図 2 のようにゲートにセンサを設置し、通過情報の収集を行う。

また、後述する移動経路分析において、大規模施設内に設置したゲートの位置関係を基に、ゲート間の平均所要時間を計算しておく。ゲート  $a$  からゲート  $b$  への距離（あるいは、最短ルート）を  $dist_{a,b}$  とすると、ゲート  $a$  からゲート  $b$  への平均所要時間  $d_m(a,b)$  は、

$$d_m(a,b) = \frac{dist_{a,b}}{v_m} \quad (1)$$

と計算できる。ただし、 $v_m$  は人の平均歩行速度であり、この値は対象とする大規模施設に訪れる人の性別や年齢層等から、文献 [31] や実測値を参考に決定する。

### 3.2 使用する通過情報

本研究で使用する通過情報とは、前節のセンサ設置場所において、センサが人の通過を記録した情報である。通過情報は、1 人の人が通過するごとに 1 回ずつ出力され、少なくとも下記の 4 つの情報を含むものとする。

- センサの識別情報 (ID, MAC アドレス等)
- センサが人の通過を観測した時刻
- センサが観測した人の通過方向
- センサが観測した通過補助情報

表 1 使用する通過情報の例

センサ	通過時刻	通過方向	体温 (°C)
2	2023-01-27 16:58:30	Forward	36.54
5	2023-01-27 16:58:46	Backward	36.52
6	2023-01-27 16:59:14	Forward	36.55

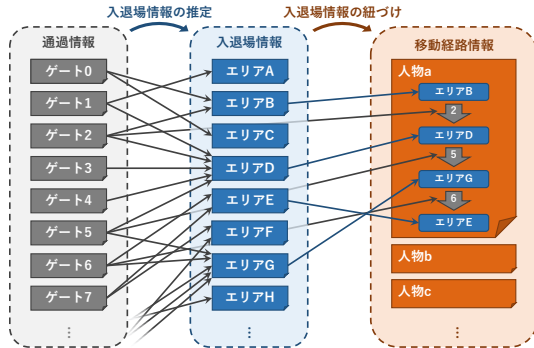


図 3 移動経路分析における情報の相互関係 (図 2 の場合)

なお、通過補助情報とは、身長や服の色、体温等の、完全に個人を識別できないが人の識別に役立つ情報である。また、通過補助情報は数値化できる情報とし、2つの異なる通過情報に含まれる通過補助情報の数値が近いほど、同一人物による通過情報の可能性が高いとする。表 1 に、通過情報の例を示す。

### 3.3 推定手法の概要

大規模施設における移動経路分析を行うため、まず大規模施設内の全ての小さなエリアにおいて、エリアに接続するゲートにおける通過情報の同一人物判定を行う。これにより、ある人物が「そのエリアにどのゲートから入場し、どのゲートから退場したか」が推定できる（以下、この情報を入退場情報と呼ぶ）。次に、隣接エリア間で入退場情報の紐づけを行い、「ある人物が大規模施設内でどのような移動経路をとったか」を推定する（以下、この情報を移動経路情報と呼ぶ）。ここまでの移動経路分析における情報の相互関係の概略を、図 3 に示す。以降の 2 項で、通過情報に基づく入退場情報の推定と隣接エリア間の入退場情報の紐づけについて、それぞれ詳しく説明する。

#### 3.3.1 通過情報に基づく入退場情報の推定

通過情報から入退場情報を推定するため、本手法では、ある通過情報の組が同一人物の入退場の情報としてどれだけ相応しいかを表すスコア（以下、同一人物度スコア）を、全ての入場の通過情報  $p_i$  と退場の通過情報  $p_o$  のペアに対して計算する。ただし、入場よりも前に退場は起こりえないので、入場時刻 < 退場時刻となるペアに絞ってスコア計算を行い、計算を高速化する。

次に、エリア内の入退場情報の同一人物判定を行うため、同一人物度スコア  $s(p_i, p_o)$  を計算する方法を説明する。ここでは、次の 3 つの観点でそれぞれスコアを計算する。以降、 $p_i$  及び  $p_o$  に含まれる情報は、 $p_i$  または  $p_o$  にドット

(.) を繋いで表現する。例えば、 $p_o.\text{gate}$  は、 $p_i$  が記録されたゲートを表す。

#### 移動時間によるスコア $s_{dur}$

移動時間によるスコア  $s_{dur}$  は、ある入場情報  $p_i$  とある退場情報  $p_o$  が記録されたゲート  $p_i.\text{gate}$ ,  $p_o.\text{gate}$  の間の平均所要時間  $d_m(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate})$  と、 $p_i$  と  $p_o$  の記録時間の差  $p_o.\text{time} - p_i.\text{time}$  で評価する。まず、ゲート間の所要時間  $d_m(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate})$  に対して、定数  $m_f$ ,  $m_s$  を用いて、式 (2) により、それぞれ最小所要時間  $d_f(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate})$  及び最長所要時間  $d_s(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate})$  を計算する。

$$\begin{aligned} d_f(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate}) &= m_f d_m(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate}) \\ d_s(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate}) &= m_s d_m(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate}) \end{aligned} \quad (2)$$

なお、定数  $m_f$ ,  $m_s$  は、エリア内で発生する移動時間のばらつきを想定して決定する定数で、 $0 < m_f < 1$ ,  $1 < m_s$  とする。例えば、廊下のように人があまり立ち止まらないエリアでは、移動時間のばらつきが小さいと考えられるため  $m_f, m_s \approx 1$  とし、駅のホームやスーパーの陳列棚の間の通路などの、人がよく立ち止まるエリアでは、移動時間のばらつきが大きいと考えられるため  $m_f \ll 1, m_s \gg 1$  とする。以降、本節では、 $d_x = d_x(p_i.\text{gate}, p_o.\text{gate})$  とする。

次に、移動時間によるスコア  $s_{dur}$  を、 $d_m$  からの誤差として、式 (3) の通り計算する。 $s_{dur}$  の値は、 $t_d = p_o.\text{time} - p_i.\text{time}$  が  $d_m$  に近い値をとると  $s_{dur} \approx 1$ 、逆に  $t_d$  が  $d_f$  や  $d_s$  に近い値をとると  $s_{dur} \approx 0$  となる。また、 $t_d$  が  $d_f$  未満あるいは  $d_s$  より大きい値を取ると、 $s_{dur} = 0$  となる。ゆえに、入退場間の時間差が許容範囲内であれば  $s_{dur} > 0$ 、平均所要時間に近いほど  $s_{dur} \approx 1$  となる。

$$s_{dur}(p_i, p_o) = \begin{cases} 1 - \left( \frac{d_m - t_d}{d_m - d_f} \right)^2 & (d_f \leq t_d \leq d_m) \\ 1 - \left( \frac{d_m - t_d}{d_m - d_s} \right)^2 & (d_m \leq t_d \leq d_s) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

#### 通過補助情報によるスコア $s_{sup}$

通過補助情報によるスコア  $s_{sup}$  は、入退場間の通過補助情報の誤差閾値  $sup_{th}$  を設定し、ある入場情報  $p_i$  とある退場情報  $p_o$  の通過補助情報 ( $p_i.\text{sup}$ ,  $p_o.\text{sup}$ ) の差  $|p_o.\text{sup} - p_i.\text{sup}|$  と比較して評価する。計算は式 (4) の通り行い、 $|p_o.\text{sup} - p_i.\text{sup}|$  が 0 に近いほど  $s_{sup} \approx 1$ 、 $sup_{th}$  に近づくほど  $s_{sup} \approx 0$  となる。

$$s_{sup}(p_i, p_o) = 1 - \left( \frac{\min(|p_o.\text{sup} - p_i.\text{sup}|, sup_{th})}{sup_{th}} \right)^2 \quad (4)$$

ただし、 $\min(a, b)$  を  $a$  と  $b$  のうち最小となる値と定義する。

なお、誤差閾値  $sup_{th}$  は、通過補助情報の精度に基づき決定する。例えば、通過補助情報として体温を測定し、同一人物であれば誤差が  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  に収まるなら、 $sup_{th} = 0.2$  とする。また、通過補助情報を複数用いる場合、それぞれの通過補



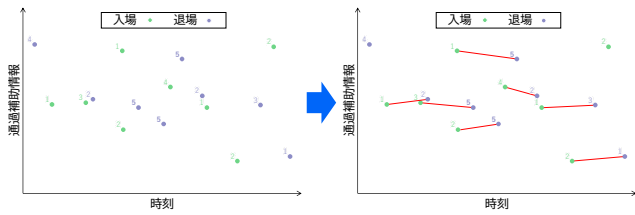


図4 入退場の紐づけの概念図

助情報のスコアを計算し ( $s_{sup1}(p_i, p_o), s_{sup2}(p_i, p_o), \dots$ ), それらの値を式5の通り乗算した値を用いる.

$$s_{sup}(p_i, p_o) = s_{sup1}(p_i, p_o) s_{sup2}(p_i, p_o) \dots \quad (5)$$

#### ゲートの組み合わせによるスコア $s_{cmb}$

本研究で扱う大規模施設では、一般にあるゲートから入場してきた人がまた同じゲートから退場する可能性は低い. しかし、収集した通過情報を用いて、これまでに述べた2つのスコアを乗算して同一人物度スコアを計算すると、想定以上に同じゲートから入退場を行うという推定結果が得られる場合があった. これを防ぐため、入場情報  $p_i$  と退場情報  $p_o$  のゲートの組み合わせに応じて、入退場の起こりやすさ  $s_{cmb}(p_i, p_o)$  を事前に定義できるようにした.  $s_{cmb}$  の各値は、人がよく移動するゲート間では1に近い値、同一のゲート間や施設の設計上（一方通行などで）人の入退が起こりにくいゲート間では0に近い値とする.

#### 3.3.2 同一人物度スコアに基づく入退場情報の推定

ある入場情報  $p_i$  と退場情報  $p_o$  の組の同一人物度スコア  $s(p_i, p_o)$  は、先述の3つのスコアと式(6)より計算する.

$$s(p_i, p_o) = s_{dur}(p_i, p_o) s_{sup}(p_i, p_o) s_{cmb}(p_i, p_o) \quad (6)$$

次に、同一人物度スコアを用いて、入退場情報の推定を行う. ここでは、より早い時刻の入場情報かつ同一人物度スコア  $s(p_i, p_o)$  が高い入場情報と退場情報のペアを優先して、一人の人の入退場情報とみなしていき、あるエリアにおける入退場情報を推定する. これまでの操作を図4に示す. 図4の左図は、時刻軸と通過補助情報軸のグラフに通過情報をプロットしたもので、左上の数字はセンサ識別情報である. また右図は、入退場情報を推定した結果を表し、赤線が1件の入退場情報と対応する.

#### 3.3.3 隣接エリア間入退場情報の紐づけ

通過情報と前項で得られた入退場情報を基に、隣接エリア間入退場情報の紐づけを行い、大規模施設における一人の人の移動経路を推定する. 紐づけは図5のように、2つの異なるエリアが接続するゲートにおいて、片側のエリアにおける入・退場情報を、対応するもう一方のエリアの退・入場情報に紐づけて行う. 例えば、図2のゲート5において、エリアGへの入場情報は、同時にエリアDからの退場情報になる. ゆえに、表1の通過情報から、表2の入退場情報が得られたとすると、ある人がエリアB → D → G → Eの順で移動したと判定する.

表2 入退場情報の例

エリア	入場センサ	退場センサ	入場時刻	退場時刻
D	2	5	01-27 16:58:30	01-27 16:58:46
G	5	6	01-27 16:58:46	01-27 16:59:14

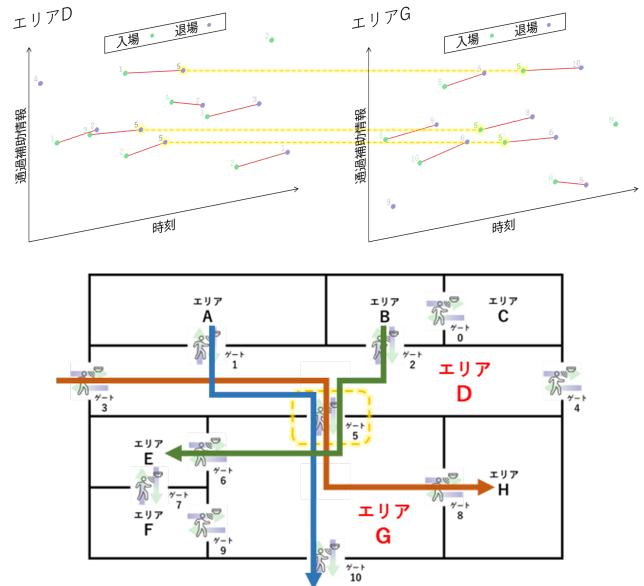


図5 隣接エリア間入退場情報の紐づけの概念図

## 4. 実証実験環境

本章では、移動経路分析手法を検証するために行った実証実験の環境条件について説明する.

### 4.1 通過センサ本体の仕様

実証実験で用いた通過情報を収集するための通過センサは、Vitracom(R) 社製の VC-3D(図6 上部)である. VC-3Dは、搭載されたカメラと解析機能により、人が通過した時刻とその通過方向、その人の身長を測定できる. また、通過情報を出力する際に、VC-3Dから外部の設備に撮影した映像を送信・保存する必要はない. 本実験では、このセンサをゲートの天井に設置し、図6のように人が通過した際に通過時刻と方向、身長を通過情報として収集した.

### 4.2 実証実験の実施場所

実証実験の実施場所は、図7に示す中部国際空港アクセスプラザであり、人の往来が多いエリアである. 中部国際空港は、敷地面積約473haを有する、中部地方最大の国際空港であり、本研究の提案手法を検証するのに相応しい環境と考えられる. 実験では、図7.8のように空港島一帯に計66台(内、アクセスプラザに計23台)の通過センサを設置し、通過情報を収集した.

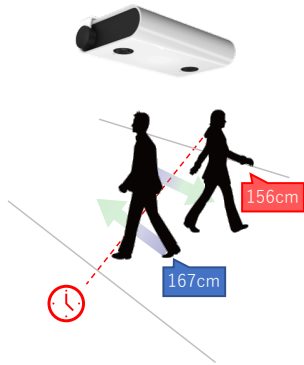


図 6 Vitracom(R) 社製 VC-3D センサ [32] と通過情報収集イメージ

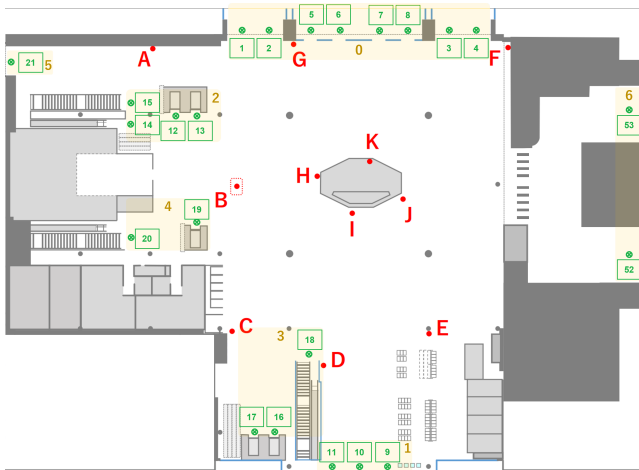


図 7 実証実験環境（緑点：通過センサの設置位置，赤点：LiDAR の設置位置，黄網：ゲートグループ）



図 8 通過センサの設置風景（アクセスプラザ入口）

#### 4.3 評価用のトラッキングデータ収集

提案手法の評価するため，人トラッキングシステム「ATRacker」[28]と「RPLIDAR S2」センサ[33]を使用し，評価用のトラッキングデータを収集する実験を行った。ATRackerは，LiDARを使用してエリア内のスキャンを行い，得られた反射の形状から人を認識し，人の位置をトラッキングするシステムである[28]。RPLIDAR S2センサは，2次元LiDARの一つであり，周囲の物体に赤外線レーザー



図 9 LiDAR センサ設置風景

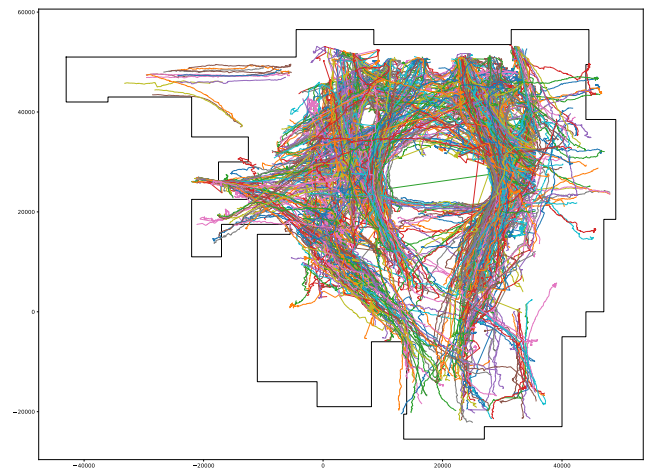


図 10 収集したトラッキングデータ（各軸は mm 単位の座標）

光を照射し，反射光を受信するまでの時間を計測し，周囲の物体との距離を測定する。

## 5. 実験結果

### 5.1 データ収集結果

本実験で収集した通過情報の総数は，入場 3,959 件，退場 4,323 件であった。また，通過情報から推定した入退場情報の総数は，3,166 件であった。次に，正解データとして収集したトラッキングデータを一部抜粋し可視化した図を，図 10 に示す。図 10 内の黒色以外の線が，一人の人のトラッキングデータを表し，黒色の線が図 7 に示す実証実験環境の大まかな輪郭を表す。トラッキングデータの総数は，明らかなノイズデータを除去すると 18,498 件であった。しかし，トラッキング中にトラッキング ID が変化する現象がみられたため，修正後の件数は 3,913 件（内，ゲート間の入退の総数は 2,884 件）であった。

### 5.2 精度評価

図 11 に，図 10 のトラッキングデータから計算したゲー

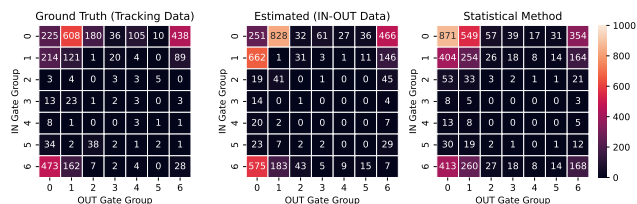


図 11 入退場数の計測結果の比較

ト組毎の入退数（左側，以下，正解データ）と，推定した入退情報によるゲート組毎の入退数（中央，以下，推定データ）を示す．入退数の全体的な傾向を，入退場の総数に依らず比較するため，図 11 に示す入退数の行列を 1 次元ベクトル化し，正解データとのコサイン類似度を計算した．その結果，正解データと推定データのコサイン類似度は 0.93 となった．一方，各ゲートの入場数・退場数のみから統計的にゲート組間の入退数を推定する手法として，長期的な退場数のゲート毎の割合から，各ゲートからの入退数を統計的に計算した結果を図 11 右側（以下，統計的データ）に示す．また，正解データと統計的データのコサイン類似度は，0.83 となった．ゆえに，通過補助情報を用いた提案手法によるゲート組毎の入退数の方が，正解データにより近い結果となった．一方で，時刻情報も含めて正解データと入退情報が一致した割合は 68% となり，特に入退場ゲート間の距離が長い場合において推定精度が低かった．なお，上記の割合は本研究で対象とする比較的滞在時間の短い入退に対する一致率であり，長時間の滞在を含む入退や，コンビニやトイレ等のトラッキングエリア外を含む移動は除外して計算した．

移動経路分析においては，複数エリアの入退情報を繋ぎ合わせて経路を生成していく．そのため，本精度評価の結果のように，各エリアで 68% の精度で入退情報を推定できた場合， $n$  個の閉じたエリアを通過する移動経路のうち，平均的に  $0.68^n$  の割合で正しく移動経路を推定できると期待される．例えば，中部国際空港を訪れる人の経路として，（鉄道駅）→アクセスプラザ→第 1 ターミナル→（保安検査場）などが考えられるが，この場合 2 個の閉じたエリアを通過するため， $0.68^2 = 0.46$  の割合の移動経路を推定できると考えられる．

## 6. まとめ

本論文では，我々が開発した大規模施設における移動経路分析手法の評価を，中部国際空港における実証実験を通して行った．その結果，統計的手法よりも高い精度で人の入退場情報を推定できた．今後の課題として，本研究では通過補助情報として身長を利用したが，実証実験環境においては人の識別に十分な通過補助情報ではなかったと考えられる．一方，使用する通過センサを変更すれば，体温や髪の色，服の色，歩行速度なども利用できる．今後は，

プライバシーに配慮しつつ，別の通過補助情報を利用したり，複数の通過補助情報を用いる手法（3.3.1 目の後半部分）も検討していきたい．また，移動経路分析結果を基にした，大規模施設における案内・誘導の改善や，広告の改善といった施策を実施・評価し，提案手法の実世界における有用性を示していきたい．

**謝辞** 本研究の一部は，NICT 委託研究 (222C01, 22609), JST CREST(JPMJCR21F2,JPMJCR22M4), 科学研究費補助金 (22H03696) に支援いただいています．また，実験場所をご提供いただいた中部国際空港株式会社様にも，厚く御礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] 総務省：通信利用動向調査 令和 3 年通信利用動向調査世帯構成員編令和 3 年世帯構成員編 (2022).
- [2] クロスロケーションズ：Location AI Platform® が西東京バスの新規路線開業に活用される，<https://prt-times.jp/main/html/rd/p/000000060.000037476.html> (2021). (Accessed on 01/05/2023).
- [3] クロスロケーションズ：コロナ禍で苦しむ地域飲食店を救え！位置情報ビッグデータの活用で新商圈を開拓し、ポスティングを最適化，<https://www.advertimes.com/20200602/article315137/> (2020). (Accessed on 01/05/2023).
- [4] 国土交通省：大規模複合施設における人流カウントと建物屋内モデルを用いた可視化 | Use Case | PLATEAU [プラットフォーム]，<https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc20-008/> (2021). (Accessed on 01/05/2023).
- [5] European Union: Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46, *Official Journal of the European Union (OJ)*, Vol. 59, No. 1-88, p. 294 (2016).
- [6] 日本経済新聞：グーグルに制裁金 62 億円 仏当局、個人情報取得めぐり：日本経済新聞 (2019).
- [7] 映像センサー使用大規模実証実験検討委員会：調査報告書，<https://www.nict.go.jp/nrh/iinkai/report.pdf> (2014). (Accessed on 01/26/2023).
- [8] Google: Request location updates | Android Developers, <https://developer.android.com/training/location/request-updates>. (Accessed on 12/16/2022).
- [9] Android Open Source Project: MAC アドレスランダム化の実装 | Android オープンソースプロジェクト，<https://source.android.com/docs/core/connect/wifi-mac-randomization?hl=ja>. (Accessed on 01/14/2023).
- [10] Apple: Wi-Fi のプライバシー - Apple サポート (日本), <https://support.apple.com/ja-jp/guide/security/secb9cb3140c/web>. (Accessed on 01/14/2023).
- [11] 秦 淑彦：焦電型赤外線センサを用いた 1 人用ゲートにおける通行判定，*知能と情報*, Vol. 28, No. 6, pp. 887–898 (2016).
- [12] Ye, M., Shen, J., Lin, G., Xiang, T., Shao, L. and Hoi, S. C. H.: Deep Learning for Person Re-Identification: A Survey and Outlook, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 44, No. 06, pp. 2872–2893 (online), DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3054775 (2022).
- [13] 川下雄大，柴田雅聡，増山岳人，梅田和昇：ステレオカメラを用いた簡易な人流計測システムの構築，*精密工学*



- 会誌, Vol. 81, No. 2, pp. 149–155 (2015).
- [14] Shackleton, J., VanVoorst, B. and Hesch, J.: Tracking People with a 360-Degree Lidar, *2010 7th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, pp. 420–426 (2010).
- [15] 下里浩昇, 片山 晋, 浦野健太, 青木俊介, 米澤拓郎, 河口信夫: 自律移動ロボットのセンサ機器を用いた人流推定手法の提案, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2021 論文集, Vol. 2021, No. 1, pp. 1335–1340 (2021).
- [16] Ratti, C., Frenchman, D., Pulselli, R. M. and Williams, S.: Mobile landscapes: using location data from cell phones for urban analysis, *Environment and planning B: Planning and design*, Vol. 33, No. 5, pp. 727–748 (2006).
- [17] Caceres, N., Wideberg, J. and Benitez, F.: Deriving origin–destination data from a mobile phone network, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 15–26 (2007).
- [18] Xu, Z., Sandrasegaran, K., Kong, X., Zhu, X., Hu, B., Zhao, J. and Lin, C.: Pedestrian monitoring system using Wi-Fi technology and RSSI based localization, *International Journal of Wireless & Mobile Networks* (2013).
- [19] Fukuzaki, Y., Mochizuki, M., Murao, K. and Nishio, N.: Statistical analysis of actual number of pedestrians for Wi-Fi packet-based pedestrian flow sensing, *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 1519–1526 (2015).
- [20] Kawaguchi, N., Hiroi, K., Shionozaki, A., Asukai, M., Nasu, T., Hashimoto, Y., Nakamura, T., Gotou, T. and Ando, S.: Wi-Fi Human Behavior Analysis and BLE Tag Localization: A Case Study at an Underground Shopping Mall, *Proceedings of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*, pp. 151–159 (2016).
- [21] 浦野健太, 廣井 慧, 梶 克彦, 河口信夫ほか: 配布型 BLE タグとタンデムスキャナを用いた屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 1, pp. 58–75 (2019).
- [22] 国土交通省: Wi-Fi パケットセンサーによる地点間移動のモニタリング | Use Case | PLATEAU [プラトール], <https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc20-007/>. (Accessed on 01/05/2023).
- [23] 永田吉輝, 廣井 慧, 米澤拓郎, 河口信夫: 複数の 3D 通過センサによるプライバシーを考慮した人流推定手法, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2168 論文集, Vol. 2020, pp. 1020–1028 (オンライン), 入手先 (<https://cir.nii.ac.jp/crid/1050292572093330048>) (2020).
- [24] Ceruzzi, P. E.: *GPS*, MIT Press (2018).
- [25] 株式会社 NTT ドコモ: 【公式】モバイル空間統計 | 位置情報などのビッグデータを利用した人口統計情報, <https://mobaku.jp/>. (Accessed on 01/13/2023).
- [26] クウジット株式会社: 無線 LAN・位置情報 | PlaceEngine | Koozyt, <http://www.placeengine.com/show/about/>. (Accessed on 01/13/2023).
- [27] Taipalus, T. and Ahtiainen, J.: Human detection and tracking with knee-high mobile 2D LIDAR, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1672–1677 (2011).
- [28] ATR-Promotions: 人位置計測システム「ATRacker」, <http://www.atr-p.com/products/HumanTracker.html>. (Accessed on 01/14/2023).
- [29] 特許庁: 公開特許公報 特開 2011-215027 焦電型赤外線センサアレイを用いた測位システム及び測位方法 (2011).
- [30] 戸出悠太, 片山 晋, 浦野健太, 青木俊介, 米澤拓郎, 河口信夫, 泉 智博, 荻野 淳, 小山信之, 太田智浩: 赤外線グリッドセンサを用いた深層学習での人の位置推定手法の検討, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2021 論文集, Vol. 2021, No. 1, pp. 909–915 (2021).
- [31] 阿久津邦男: 歩行の科学: 運動不足克服のために, No. 15, 不昧堂 (1975).
- [32] Vitracom: VC-3D Sensor - Vitracom GmbH | Personenzählung mit Shop Efficiency Monitoring | Personenzählung, <http://www.vitracom.de/en/people-counting/vc-3d-sensor.html>. (Accessed on 01/11/2023).
- [33] SLAMTEC: RPLIDAR S2 High performance DToF Lidar. Workable in both Indoor and Outdoor, <https://www.slamtec.com/en/S2>. (Accessed on 01/11/2023).