

# 集団内の社会的関係に基づく人間相互距離を用いた 屋内測位補完手法

池田 亘<sup>1</sup> 齊藤 裕樹<sup>1</sup>

**概要：**屋内環境における測位においてアンカーノードなどの信号源に基づく測位手法では、電波や音、磁場などノイズの影響を受けやすい信号を利用しているため、測位の精度や安定性が劣るといった課題がある。また、加速度センサなどを用いた歩行者自律航法では、歩行動作以外に起因する重力加速度などのノイズにより、時間の経過とともに位置推定誤差が推定結果に蓄積されて大きくなるという課題があり、いずれの手法も精度や安定性に欠けるという問題がある。社会心理学の研究では、群衆における人間同士の社会的関係から適切な人間間距離があることや、社会的関係の差異によりパーソナルスペースと呼ばれる、人に侵入されたくない領域が異なることなどが知られている。本稿では集団における人間同士の社会関係を基にパーソナルスペースによる位置情報を推測し補完する測位手法を提案し評価する。まず、相対位置を求める確率の算出方法を示し、次に、本手法の有用性を検証するための実験と評価について述べる。

## 1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット端末等の通信機器が普及し、ウェアラブル端末を用いたヘルスケアユーザをターゲットとした O2O (Online to Online) サービスなどにおいて、ユーザの正確な位置情報を必要とするサービスは今後ますます重要となることが期待されており、モバイル端末の測位は位置情報サービスの根幹となる技術のみならず、様々な応用分野においても重要な役割を担うことが期待される。屋外環境においては、GPS (Global Positioning System) をはじめとする全球測位衛星システム GNSS (Global Navigation Satellite System) による衛星測位システムにより、数メートル程度の誤差で測位が可能である。屋内環境においては、基準点となるいくつかの信号源 (無線局、超音波発信機) であるアンカーノードからの受信状況を基に測位を行う方法や、Wi-Fi フィンガープリンティングに基づく手法や、加速度センサ、電子コンパス、ジャイロセンサ等の計測値を基に歩数や歩行方角を推定することで相対的に人の移動経路を推定する歩行者自律航法などの方法が多く提案されている。しかし、信号源に基づく測位手法では、電波や音、磁場などノイズの影響を受けやすい信号を利用しているため、測位の精度や安定性が劣るといった課題があり、歩行者自律航法では、歩行動作以外に起因する加速度などのノイズにより、時間の経過とともに位置推定誤差が推定結果に蓄積されるという課題があり、

いずれの手法も精度や安定性に欠けるという問題がある。

本論文では、GPS による測位が困難な屋内や地下空間や、屋外であっても周囲の構造物の影響により GPS 情報が取得できない、または精度が低い場合を想定し、一時的に位置情報が取得できなかった際に、集団における人間同士の社会関係を基に位置情報を推測し補完する測位手法を提案する。ノンバーバルコミュニケーションの研究において、群衆における人間同士の社会的関係から適切な人間間距離があることや [1]、社会的関係の差異によりパーソナルスペースと呼ばれる、人に侵入されたくない領域が異なること [2] などが知られている。この考え方を測位に応用し、具体的には、家族、恋人、友人、知り合いといった社会的関係を有する人間の集団の中で少数のユーザの端末の位置情報が欠落した際に、パーソナルスペースから得られる人間相互の適切な間隔を求めることで周囲の環境から得られた確率分布を表現する確率モデルを作成し、セルオートマトンにより移動軌跡を反復的に計算する手法を提案する。本論文の構成は以下のとおりである。まず第 1 章に引き続き、第 2 章では、従来の測位技術と人流の解析技術を取り上げ本研究の位置づけを示す。第 3 章では、群衆内の周囲の人間同士の社会的関係から推定されるパーソナルスペースから確率的に相対位置を推定する原理について述べる。第 4 章では、渋谷駅前交差点で行った実測に基づく精度評価実験により提案手法の有効性を考察する。最後に第 5 章で本論文をまとめる。

<sup>1</sup> 明治大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻

## 2. 関連研究

屋内測位技術はこれまで多くの研究が行われてきた。基準点となるいくつかの信号源（無線局，超音波発信機）であるアンカーノードからの受信状況を基に測位を行う方法が多数提案されている [3], [4], [5]。これらは，Wi-Fi，超音波，UWBなどを信号に用い，受信電波強度など測距方法は異なるものの三辺測量法を用いて位置を推定する手法である。また，Wi-Fi フィンガープリンティングに基づく手法も広く利用されつつある [6]。これは，まず，あらかじめ環境内の多数の地点で複数のアクセスポイントから受信電波強度を計測し，位置と各アクセスポイントからの受信電波強度との対応関係を記録しておき，測位を行う端末は各アクセスポイントとの受信電波強度を計測し，記録された対応関係からマッチングを行い位置を特定する方式である。しかし，これらの屋内測位手法では，電波や音，磁場などノイズの影響を受けやすい信号を利用しているため，測位の精度や安定性が劣るという課題がある。例えば，端末上で計測される受信電波強度は，環境内の構造物や人体の影響による反射，回折，減衰などの影響により大きな誤差を生じるという問題がある。

歩行者自律航法 (Pedestrian Dead Reckoning, PDR) は，加速度センサ，電子コンパス，ジャイロセンサなどの慣性センサを用いて端末を所持する人間の行動から，歩数や歩行方向を推定することで相対的に人の移動経路を推定する技術である [7], [8]。端末の初期の絶対位置と絶対方向が分かれば，その後はインフラに依存せず測位を継続的に行うことが可能である。しかし，歩行動作以外に起因する加速度などのノイズにより，時間の経過とともに位置推定誤差が推定結果に蓄積され，建物の構造物などの周囲の金属等による地磁気の歪みからも方向の推定結果にも誤差が生じる問題がある。一方，人の歩行行動を群衆流動の特性に基づきモデル化する研究も活発である。その手法は，人の動きをマクロな流体として導出された支配方程式により全体の流動として見る手法と，セルオートマトンやマルチエージェントシステムに代表される規則ベースのモデル化手法に大別される。近年では，避難行動のシミュレーションのために，できるだけ詳細な人の行動特性を組み込んだモデル化を目指す研究や，複雑系数理分野との融合を目指す研究がある [9], [10], [11]。

これらに対し，本研究は測位インフラや加速度等の変位計側に頼らず，周囲の人物との相対的な位置関係を社会心理学により定義されるパーソナルスペースに基づき推定する点で他の測位とは異なる。

## 3. パーソナルスペースに基づく位置推定手法

本章では，E. T. Hallにより提唱されたパーソナルス

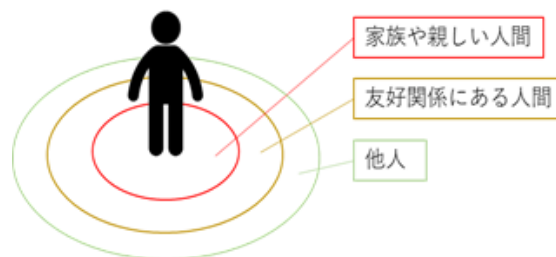


図 1 パーソナルスペース

ペースの原理および，パーソナルスペースに基づく位置推定手法について述べる。

### 3.1 パーソナルスペース

1966年，アメリカの文化人類学者の E. T. Hall は，パーソナルスペースを4つのゾーンに大別し，それらをさらに近接相と遠方相の2つに分類した (Proxemics)。その空間については以下のとおり定義されている。

**密接距離** ごく親しい人に許される空間

- 近接相 (0~15cm) 抱きしめられる距離
- 遠方相 (15~45cm) 頭や腰，脚が簡単に触れ合うことはないが，手で相手に触れるくらいの距離

**個体距離** 相手の表情が読み取れる空間

- 近接相 (45~75cm) 相手を捕まえられる距離
- 遠方相 (75~120cm) 両方が手を伸ばせば指先が触れあうことができる距離

**社会距離** 相手に手は届きづらいが，容易に会話ができる空間

- 近接相 (1.2~2m) 知らない人同士が会話をしたり，商談をする場合に用いられる距離
- 遠方相 (2~3.5m) 公式な商談で用いられる距離

**公共距離** 複数の相手が見渡せる空間

- 近接相 (3.5~7m) 2者の関係が個人的なものではなく，講演者と聴衆と言うような場合の距離
- 遠方相 (7m以上) 一般人が社会的な要職にある人物と面会するような場合におかれる距離

パーソナルスペースは，他人に近付かれると不快に感じる空間のことで社会文化や民族，個人の性格やその相手によっても差があるとされる。本研究では，このパーソナルスペースがユーザ間の距離にも適用できると仮定し，各ユーザそれぞれの相対距離を算出する手法を提案する。

### 3.2 相対距離の確率密度関数

本章では，パーソナルスペースを基にして位置推定を行う手法について説明する。具体的には，パーソナルスペースに応じて他者との位置関係が3.1節で述べた範囲にいる可能性が高く，離れるほど可能性が低くなると考えられる。このことを距離に応じた確率密度で表す。位置推定の確率計算を行う際には正規分布関数を用いる。正規分布の確率

密度関数を式 (1) に示す.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

社会的関係を家族, 友人, 他人の 3 種類に分類し, それぞれのパーソナルスペースにおける密接距離, 個体距離, 社会距離について適正な相互人体距離を適用する. 図 1 は社会的関係とパーソナルスペースにおける適正距離の対応を示しており, 赤円は家族と密接距離, 黄円は友人と個体距離, 緑円は社会距離と他人と対応している. 式 (1) における平均  $\mu$ , 標準偏差  $\sigma$  は先述の社会的関係におけるパーソナルスペースの相互距離から設定する. この密度関数を元にある人物から見た相対距離  $x$  における他者が位置する確率を算出する.

上述の 1 対 1 の相対距離の確率を 1 対多の確率に拡張する. そのために, 得られたそれぞれ異なる対象との間の確率が独立であると仮定し, 総当たりで確率を求め和算することで周囲のユーザそれぞれとの相対距離に対する確率を求めることができる. 本研究では, この原理を元にユーザ間の相対距離を算出する確率モデルを作成する. 具体的には, 特定の場所に位置するある人物から見た, パーソナルスペースにおける社会距離までの範囲のユーザ  $U$  を探索範囲とし, この範囲内の個々のユーザ  $N(N \in U)$  に対する相対距離を  $x_N$ , 社会的関係より得られる平均を  $\mu_N$ , 分散を  $\sigma_N$  とすると, 測位対象のユーザがこの場所に位置する確率  $p$  は式 (2) で計算される.

$$p = \sum_{k=1}^N f_k(x_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \exp\left(-\frac{(x_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) + \dots + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N^2}} \exp\left(-\frac{(x_N - \mu_N)^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (2)$$

以上の原理に基づき, ユーザ間の相対位置についての確率密度を求める.

### 3.3 セルオートマトンによる相対位置の推定

本研究では各々のユーザがパーソナルスペースを保つように移動する状況をセルオートマトンによる移動モデルで表現する. セルオートマトンとは意思を持つオブジェクトがあるルールに従って行動する離散的なモデルである. 連続的に移動する様子を離散的モデルに落とし込むことにより容易な計算で処理することが可能であると考えられる. 本節ではセルオートマトンの内部計算について述べる.

セルオートマトンの 1 マスの大きさは次のように設定する. 人間の一步の歩幅がおおよそ身長  $\times 0.45$ [m] とされており, 人間の平均身長 160cm に対して一步の大きさは約

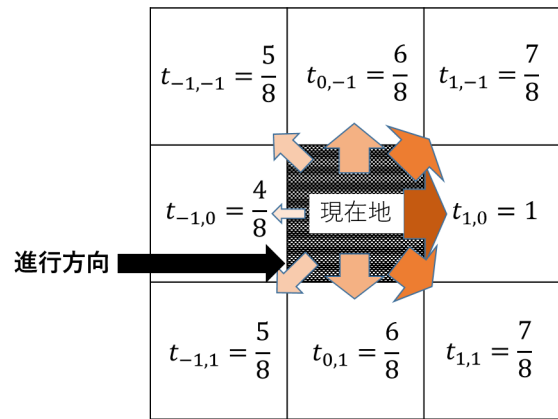


図 2 1-step 方式

72cm と言える. これよりも細かい動きまたは歩行スピードが遅い人間の動きを表現するため, 一般的な歩幅の 72cm よりも小さい範囲とする. ユーザの GPS 情報等の測位インフラによる測位が不可能になった場合, もしくは測位の信頼度が低くなった場合, パーソナルスペースによって位置が既知の周囲のユーザの位置情報から対象のユーザの位置を推定する. 以下, 確率密度に基づくセルオートマトンを用いた位置推定手法について述べる.

### 3.4 セルオートマトンの処理

本節ではセルオートマトンにおける進行方向推定について述べる. ある特定の位置から 1 ステップ先の移動について 8 方向ごとに確率を算出し, 確率が最大の方向に移動するものとする. その際, 測位インフラが利用できなくなる直前の進行方向を求め, 進行方向に応じた各方向の確率に重みをつけ, 所定のセルにおける 3.2 節に基づく確率を計算する. 隣接するセル, すなわち  $x$  軸方向に  $m$ ,  $y$  軸方向に  $n$  移動する確率  $P(m, n)$  は式 (3) で求める.

$$P(m, n) = t_{m,n} p (-1 \leq m, n \leq 1, 0.5 \leq t_{m,n} \leq 1) \quad (3)$$

なお, 本手法ではパラメータとなる  $t_{m,n}$  の設定に, 直近の移動方向と同じ方向に進む確率が最大, 逆の方向に進む確率が最小とする重みを用いる. この重みづけは以下のよう定める.

- 進行方向が同じ移動先では  $t$  の値は 1, 進行方向が逆の移動先では  $t$  の値は 0.5 に設定する.
- 他の方向については進行方向が同じ方向から  $\pi/4$  ラジアン間隔での移動先の  $t$  の値は  $1/8$  ずつ減少するように設定する.
- 位置情報が取得できなくなる直前の 3 秒間の移動距離が 2 マス未満だった場合, 動かずにそのまま停止する.

図 2 は具体的な  $t_{m,n}$  の値を示しており, 真ん中のセルにユーザが存在しており直近の移動方向は右である場合の確率の減衰を示す.

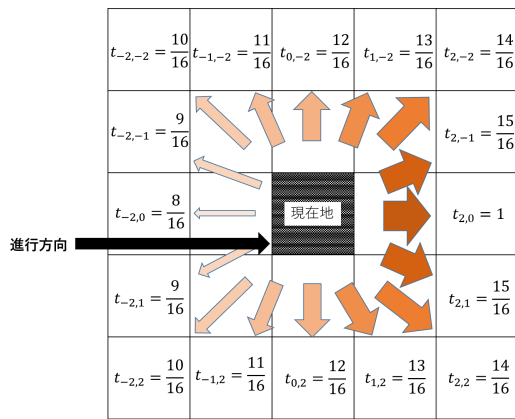


図 3 2-step 方式



図 4 渋谷スクランブル交差点

### 3.5 高次ステップへの拡張

セルオートマトンは、オブジェクトが一定時間ごとに 1 ステップ動くモデルであるため、速度の違いを表現することができないため、3.3 節で述べた手法では 1 マスを越える移動を表現できない。そこで本節では、3.3 節で述べたアルゴリズムを拡張し、複数ステップの移動についても確率計算が行えるようにすることを検討する。ここでは説明のため、2 マスの移動を対象とし、16 方向への移動アルゴリズムを検討する。以降、1 マス移動のアルゴリズムを「1-step 方式」、2 マス移動のアルゴリズムを「2-step 方式」と呼ぶ。1-step 方式と 2-step 方式は、位置情報が取得できなくなる直前での移動距離に応じて切り替える。2-step 方式における周囲の移動候補、すなわち  $x$  軸方向に  $m'$ 、 $y$  軸方向に  $n'$  移動した位置に移動する確率  $P'(m', n')$  は式 (4) で得られる。

$$P'(m', n') = t_{m', n'} p(-2 \leq m', n' \leq 2, 0.5 \leq t_{m', n'} \leq 1) \quad (4)$$

式 (4) におけるパラメータ  $t_{m', n'}$  について説明する。2-step 方式のセルオートマトンでは以下のように定める。

- 進行方向が同じ方向の移動先の  $t$  の値は 1、進行方向の逆の移動先の  $t$  の値は 0.5 に設定する。
- 他の方向については進行方向が同じ方向から  $\pi/8$  ラジアン間隔での移動先の  $t$  の値は  $\frac{1}{16}$  ずつ減少するように設定する。
- 位置情報が取得できなくなる直前の 3 秒間の移動距離が 2 マス未満だった場合、動かずにそのまま止まる。

図 3 は図 2 と同様に、平面から図示した直近の移動方向による確率の減衰を示したものである。

## 4. 評価実験

### 4.1 実験目的

提案する測位手法の有効性を確認するため、従来の GPS のみで測位を行った場合と GPS 情報が一時的に欠落した際に提案手法により補完を行った場合を比較し、精度の改

善を確認する実験を行った。

### 4.2 実験方法

実験は渋谷スクランブル交差点におけるライブカメラ映像<sup>\*1</sup>から撮影された歩行の様子を用いた。記録の際にカメラ映像だけでは社会的関係が家族か友人であるかを区別することは難しかったため、社会的関係を友人と他人の 2 おりとしパーソナルスペースの範囲を個体距離と社会距離に設定した。配信されているライブカメラから手動で人の動きを記録しデータ化を行った。図 4 は、実験に使用した動画のスクリーンショットであり、日時は 2017 年 8 月 8 日、天候は晴れである。本実験においては、細かな移動範囲を推定するために 1 マスを 55cm と設定した。また位置情報が欠落した場合の直近の進行ベクトルは直近 3 秒間の移動方向から取得するものとした。

### 4.3 実験内容

本節では実験内容について述べる。60 秒間の交差点における歩行データから出力情報は本アルゴリズムを適用し欠落した間の情報を補完した歩行データを求め、正解の歩行データとの誤差を求めた。比較対象は、(1) 1-step 方式、(2) 2-step 方式および、(3) 位置情報が取得できなかった場合に最後に位置情報が取得できた地点に静止するアルゴリズムの 3 種類とした。これらのアルゴリズムについて、測位の欠落率と社会性の表明率を変化させた際の誤差を比較した。欠落率とは一定時間内に GPS による信号が取得できなかったとみなす確率であり、表明率とは他人との関係性を表明するユーザの割合である。欠落する場合は 3 秒間継続して位置情報が取得できないものとした。これらを一様分布の乱数により所定の条件を仮想的に再現するシミュレーションを行った。それぞれの欠落率、表明率に対して 100 回シミュレーションを行い、誤差の平均取得し評価を

<sup>\*1</sup> 株式会社シブヤテレビジョン、公園通り渋谷。2017, 8, 8. 渋谷公園通り商店街マルイ WEB カメラ, Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=gVXVrDYvClw>

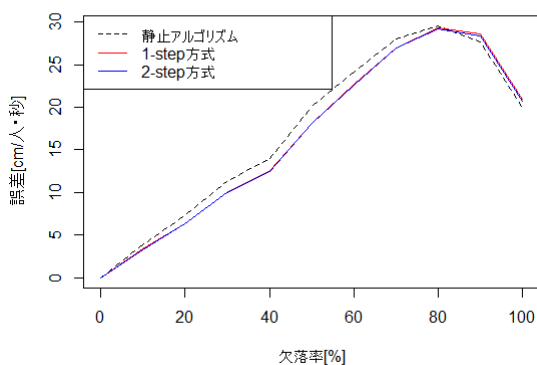


図 5 表明率 100%時の平均誤差

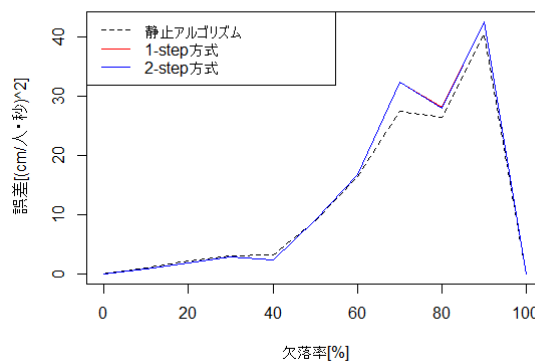


図 6 表明率 100%時の誤差の分散

行った。実験では、表明率を 100%, 60%, 30%, 0%の 4 種類に分類し、欠落率を 0%~100%まで 10%刻みに設定した。これらの条件で推定された位置を求め正解の位置との誤差を評価する。

#### 4.4 実験結果

100 回のシミュレーションの結果得られた最大値, 最小値, 平均, 分散を以下に記す。平均誤差の単位は [cm/人・秒] である。図 5 は表明率 100%の平均誤差の平均, 図 6 は表明率 100%の平均誤差の分散を表す。同様に, 図 7 は表明率 60%の平均誤差の平均, 図 8 は表明率 60%の平均誤差の分散, 図 9 は表明率 30%の平均誤差の平均, 図 10 は表明率 30%の平均誤差の分散, 図 11 は表明率 0%の平均誤差の平均, 図 12 は表明率 0%の平均誤差の分散を表す。

2-step 方式は 1-step 方式と 2-step 方式を適時切り替えるため, 2-step 方式について評価する。0%から 50%の範囲の低い欠落率において平均 1.228cm/人・秒の精度向上が見られた。また, 表明率が 0%と低い場合は静止アルゴリズムよりも欠落率が 80%で既に提案手法の方が誤差 0.13 cm/人・秒大きくなっている。いずれの表明率でも 90%以上の欠落率では提案手法のほうが誤差が大きくなっており, それらの平均誤差の差は 0.557cm/人・秒である。表明率は高く, 欠落率は低い環境で提案手法の誤差が静止アルゴリズムよりも小さくなり測位精度の向上が見られることが確認できた。本実験で精度向上が 0.677cm/人・秒と微小であった要因は, 混雑度が低いことから周囲のユーザの密度が低く, 確率分布を作成する際に対象となる周囲のユーザの数が少なかったことが考えられる。

#### 5. おわりに

本論文では, 社会的関係によるパーソナルスペースで設定されている適正距離を人間は保つ傾向にあると考え正規分布を用いて確率計算を行う手法について述べた。確率計算によって得られた推定される位置の確率分布を用いてセ

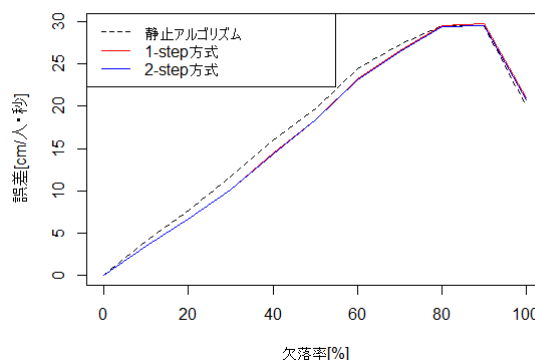


図 7 表明率 60%時の平均誤差

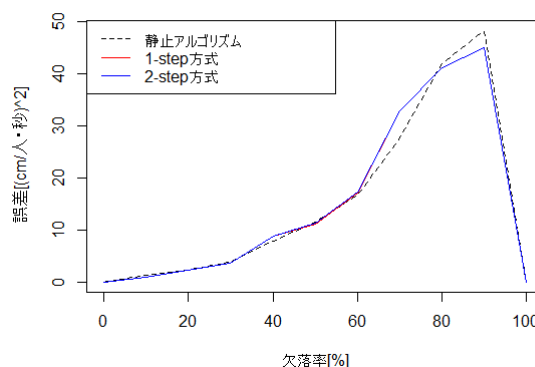


図 8 表明率 60%時の誤差の分散

ルオートマトンにより表現した, 実測データを用いて, 定量的に誤差を求め評価し本手法の有用性を確認した。今後は, 元となるデータを混雑度を変えて比較し, 評価することで提案手法の精度の向上を目指す予定である。

#### 参考文献

- [1] M. F. Vargas, Louder Than Words: An Introduction to Nonverbal Communication, Iowa State Pr, 1986; 邦訳:

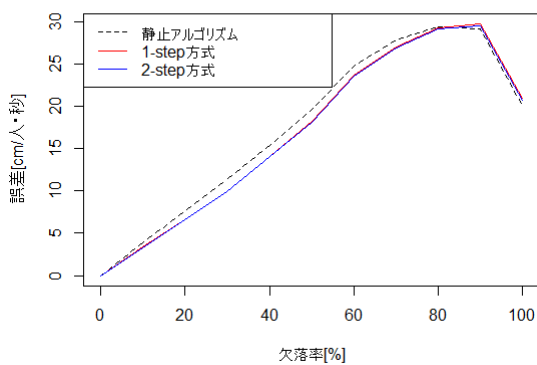


図 9 表明率 30%時の平均誤差

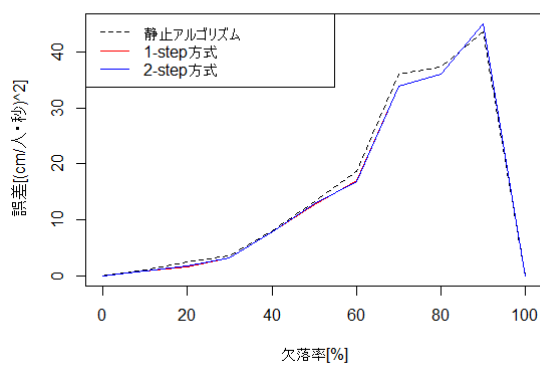


図 12 表明率 0%時の誤差の分散

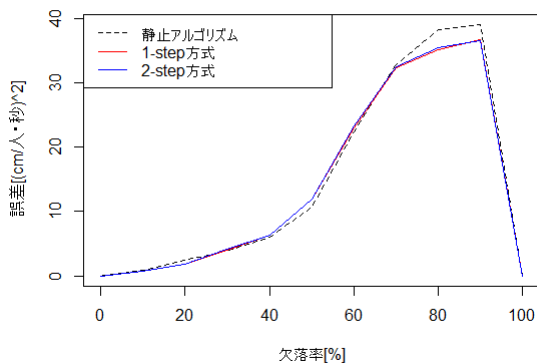


図 10 表明率 30%時の誤差の分散

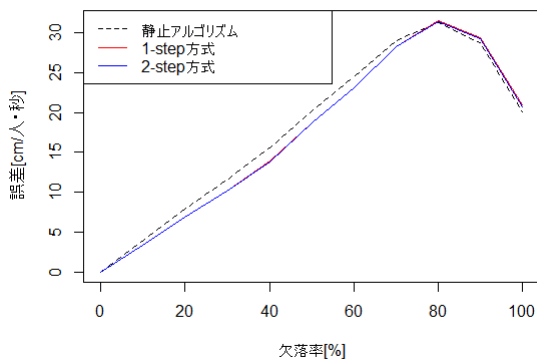


図 11 表明率 0%時の平均誤差

Thecricket location support system, Proceedings of ACM the6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom 2000), pp.32–43, 2000.

- [5] D. Niculescu and B. Nath, Ad hoc positioning system (APS), Proceedings of IEEE GLOBECOM 2001, pp. 2926–2931, 2001.
- [6] P. Bahl and V. Padmanabhan, RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, Proceedings of IEEE INFOCOM 2000, pp.775–784, 2000.
- [7] O. Woodman, R. Harle, Pedestrian localisation for indoor environments, Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing (UbiComp2008), pp.114–123, 2008.
- [8] F. Li, C. Zhao, G. Ding, J. Gong, C. Liu, F. Zhao, Reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors, Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2012), pp.421–430, 2012.
- [9] 松田 泰治, 大塚 久哲, 梶木 武, 内田 広明, セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察, 地域安全学会論文集, No.2, pp.95–100, 2000.
- [10] 小久保 聡, 山本 和弘, 山下 博史, セルオートマトンによる火災時の避難行動のシミュレーション, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 74 巻, 第 748 号, pp.2724–2730, 2008.
- [11] 大鈿 史男, 小野木 基裕, セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 51 巻, pp.94–111, 2008.

石丸 正 (翻訳), 非言語 (ノンバーバル) コミュニケーション, 新潮選書, 1987.

- [2] E. T. Hall, The Hidden Dimension, Garden City, N.Y., Anchor Books, Doubleday, 1966 ; 邦訳: 日高 敏隆, 佐藤 信行 (翻訳), かくれた次元, みすず書房, 1970.
- [3] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks, Proceedings of IEEE Communications Surveys & Tutorials, pp.13–32, 2009.
- [4] N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan,