

推薦論文

集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinderのノード間経路長を用いた実機実装評価

北之馬 貴正^{1,a)} 新居 英志² 森 流星² 滝沢 泰久³

受付日 2019年4月1日, 採録日 2019年9月11日

概要: 空港, 駅, 工場, 商業施設, オフィス, 病院などの多様な屋内施設での人の活動状況やモノの利用状況を把握する試みにおいて, スマートフォンや BLE デバイスなどのモバイルスマートデバイスの位置は重要な情報である. 我々はスマートデバイスの隣接トポロジ情報と 3 定点のみから高精度な位置推定ができる集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder を提案している. SmartFinder は, まず, スマートデバイスの隣接トポロジをクラウド環境に集約し, クラウド環境においてネットワーク全体のトポロジから仮想メッシュネットワークを構成する. 続いて, クラウド環境の仮想メッシュネットワークにおけるノード間ホップ数をノード間相対距離として用いて相対ジオメトリを再現し, アンカノードを用いた座標変換により絶対位置を推定する. しかし, 隣接トポロジ情報から構成する仮想メッシュネットワークがマルチホップを多く含むトポロジを前提とするため, 位置推定が有効に機能するトポロジに制約が発生する. 本論文では, 前述の制約を排除するとともに, SmartFinder の実環境における有用性を示すため, スマートフォンを用いた実装方式とその実機評価を示す. 約 500 m² の空間において 50 台のスマートフォンを用いた実験では, アンカノード 3 台のみで位置推定平均誤差が停止ノードでは 2.00 m, 移動ノードでは 3.19 m となることを確認した.

キーワード: トラッキング, 位置推定, スマートデバイス, 自己組織化マップ

Real Space Evaluation on Cloud-based Self Organizing Localization SmartFinder with inter-node path length

TAKAMASA KITANOUMA^{1,a)} EIJI NII² RYUSEI MORI² YASUHISA TAKIZAWA³

Received: April 1, 2019, Accepted: September 11, 2019

Abstract: In such large-scale indoor facilities as airports, train stations, factories, and hospitals, the locations of mobile smart devices provide critical information for grasping the activity states of people and the utilization states of things. We previously proposed SmartFinder, which is a localization method with extremely low dependence on infrastructure. SmartFinder estimates the network geometry with virtual mesh network which is constructed by aggregating neighbor node lists of localizing nodes, and it requires that the virtual mesh network is a multi-hop topology. In this paper, to show effectiveness on SmartFinder in a real space, we describe the implementation with smart phones excluding the above requirement, and the evaluation on SmartFinder with the implementation.

Keywords: tracking, localization, smart device, self-organizing maps

¹ 関西大学先端科学技術推進機構
Organization for Research and Development of Innovative Science and Technology, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan
² 関西大学理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan
³ 関西大学環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan
a) kitanouma@phindex-tech.co.jp

1. はじめに

空港, 駅, 工場, 商業施設, オフィス, 病院などの多様な屋内施設において, 人やモノの位置は人の活動状況やモノの利用状況の把握のための重要な情報であることから, 人が携帯するスマートフォンの位置情報やモノに添付された

本論文の内容は 2018 年 5 月の第 175 回マルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され, 同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

Bluetooth Low Energy (BLE) デバイスの位置情報には非常に高いニーズがある。屋内環境では Global Positioning System (GPS) [3] が有効に機能しないため、GPS を代替する数多くの屋内位置推定方式が研究されている。しかし、既存方式は屋内施設内にスマートデバイスを測位する高密度の測位設備や特性マップの構築、さらにこれらの維持管理に著しいコストを必要とする。したがって、屋内環境においては測位設備やマップに依存しない自律性と柔軟性の高いモバイルスマートデバイスの位置推定方式が求められている。

我々はスマートデバイスの近傍トポロジ情報と 3 定点のみから高精度な位置推定ができる集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder [1], [2] を提案している。SmartFinder は、まず、スマートデバイスの隣接トポロジをクラウド環境に集約し、クラウド環境においてネットワーク全体のトポロジから仮想メッシュネットワークを構成する。続いて、クラウド環境の仮想メッシュネットワークに自己組織化マップを応用した位置推定アルゴリズム (Self-Organizing Localization: SOL) を適用する。近傍トポロジ情報のみで多数の無線ノードの位置推定が可能であり、アンカノード 3 点で絶対位置推定が可能のためアンカノードへの依存度がきわめて低い。SmartFinder はシミュレーション評価において、近傍トポロジ情報のみから人の移動速度に追従した位置推定が可能であり、その有効性が確認されている。

SmartFinder の位置推定精度は、位置推定デバイスの隣接情報から構成される仮想ネットワーク規模の拡大にともなって高精度化する。これは、ホップ数が増加することによってネットワーク規模に対するノード間相対距離の分解能が向上するためである。しかし、仮想メッシュネットワークのトポロジ (仮想メッシュトポロジ) がマルチホップを多く含まない場合、ノード間相対距離の分解能が低下するため、SmartFinder による高精度な位置推定結果が得られないという問題がある。

本論文は、上述の問題を解決するため、位置指定対象デバイスの隣接情報から構成される仮想ネットワークのトポロジ制約を排除するとともに、スマートデバイス間で計測した BLE RSSI から導出するノード間経路長を用いた実装方式を示し、さらに、スマートフォンを用いた実機評価からその有用性を示す。

2. 関連研究

利用もしくは研究されているモバイルスマートデバイスの屋内位置推定方式について、位置推定のために利用するデバイスの観点から方式を分類して概説し、実用性を議論する。

2.1 搬送波を用いた方式

2.1.1 Range-Based 方式

Range-Based 方式はノード間の距離情報を利用した位置推定を行うため、モバイルスマートデバイスにノード間通信機能のほかにノード間距離を測定するデバイス (測距デバイス) を必要とする。ノード間距離の測距には、Time Difference Of Arrival (TDOA), Time Of Arrival (TOA) が利用されている。TOA 方式は、送信側から受信側に信号が到着するまでの時間を測定し、伝送媒体の伝送速度からノード間距離を計算する方式である。TOA 方式を利用した位置推定方式として Ultra Wide Band (UWB) を用いた方式 [4] がある。TDOA 方式は、異なる 2 つの伝送媒体を用いて通信を行い、それらの到着時間の差からノード間の距離を計算する方式である。TDOA 方式を利用した位置推定方式としては、Cricket [5] や Ubisense [6], Iterative Multilateration [7] がある。Range-Based 方式は、TOA 方式や TDOA 方式で得られた高精度なノード間距離を使用した三辺測量によって位置推定を行う。3 つ以上のアンカノードとの見通し内通信を必要とするため、これを確保できる場合は高精度となるが、相当数のアンカノードを必要とする。すなわち、これら方式は測位設備に強く依存し、実用においては測位設備の維持管理が課題となる。さらに、モバイルスマートデバイスに付加的な測距デバイスを用いる必要があるため、モバイルスマートデバイスの位置推定には適さないと考える。

2.1.2 Range-Free 方式

Range-Free 方式は、付加的な測距デバイスを用いずノード間通信機能を利用して位置推定する。代表的な方式として Centroid 方式 [8] や APIT 方式 [9] などがあり、一般的なモバイルスマートデバイスで容易に利用ができる。Centroid 方式は、各ノードが通信可能な複数のアンカノードの位置情報を取得し、それらの重心を自己位置として推定する方式である。APIT 方式は、複数個のアンカノードの組合せから作成可能なすべての三角形に対して、位置を推定するノードが外側にあるか内側にあるかを判定し位置を推定する方式である。Centroid と APIT の位置推定精度はアンカノード数に依存して改善することができるが、その絶対精度は低い。さらに、各ノードは 3 つ以上のアンカノードとの通信を必要とするため、位置推定には相当数のアンカノードを必要とする。実用システムの iBeacon [10] や IMES [11] もこの方式に分類できるが、電波強度を用いたアンカノードとの近接から位置推定を行うため絶対精度は低く、また、位置推定にはモバイルスマートデバイスの移動領域全体にアンカノードを配置する必要があるため、大規模屋内施設では膨大な数になる。すなわち、これら方式も測位設備に強く依存するため、実用においては測位設備の維持管理が課題となる。

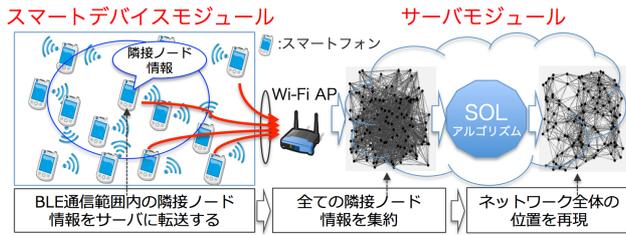


図 1 SmartFinder のシステム構成

Fig. 1 System components of SmartFinder.

2.2 センサを用いた方式

2.2.1 Pedestrian Dead Reckoning (PDR)

ジャイロセンサや加速度センサなどの各種モーションセンサを用いる Pedestrian Dead Reckoning (PDR) [12] は移動方向や移動距離を算出することで基準点からの相対位置を推定する方式である。そのため、絶対位置を得るには iBeacon や IMES などと連携し基準点を推定する必要がある。さらに、移動における相対位置算出の誤差が累積するため、実用において利用可能な精度を得るには、その精度補正のための基準点・補正点となるアンカノードを移動空間全体に配置する必要がある。すなわち、測位設備を前提としてこれに依存するため、実用においては測位設備の維持管理が課題となる。

2.2.2 フィンガープリンティングを用いた方式

事前に施設内の電磁気や電波などの環境物理特性を計測して作成した特性マップとスマートデバイスが持つセンサの計測値を用いて、特性マップ上からそのスマートデバイスの位置を推定するフィンガープリンティングを用いた方式がある。地磁気を用いた方式 [13] や電波を用いた方式 [14] などがある。これらの方式はアンカノードが不要になるが、それに代わる施設内の特性マップが必要である。実用において利用可能な精度を得るには、特性マップの作成のために環境物理特性の綿密な計測が事前が必要となり、さらに環境特性の変化にともなった定期的な再計測を必要とする。すなわち、事前の特性マップ作成を必要としてこれに強く依存するため、実用においては特性マップの維持が課題となる。

3. SmartFinder

我々が提案した SmartFinder [1], [2] を概説する。

3.1 システム構成

一般的に、屋内施設におけるモバイルスマートデバイスに関するネットワーク環境は多数のモバイルスマートデバイスとこれらからの情報を Wi-Fi または LTE で集約するサーバから構成される。このような構成の無線ネットワークに着目し、図 1 に示すように、システムはスマートデバイスモジュールとサーバモジュールで構成する。モバイルスマートデバイスの位置を継続的に求めるため、以下の位

置推定処理シーケンスを周期的に繰返し実施することで高精度なモバイルスマートデバイスの位置推定を実現する。

- 無線ノードモジュールによる隣接ノード ID の取得と転送
- サーバモジュールにおける無線ノードモジュールからの隣接ノード ID リストの集約と仮想メッシュトポロジ構成
- 大域/局所 SOL による人の移動速度に追従する仮想メッシュトポロジのノード位置推定

3.1.1 スマートデバイスモジュール

スマートデバイスはスマートフォンなどの Bluetooth Low Energy (BLE) と Wi-Fi/LTE の通信機能とモーションセンサを持つデバイスを想定する。スマートデバイスで動作するスマートデバイスモジュールは以下の処理を周期的に繰返す。

- BLE を用いた自己 ID の広告ブロードキャストと広告ブロードキャスト受信による隣接ノードの ID 取得
- 自身の移動もしくは停止状態をモーションセンサを用いた判別 (移動/停止情報)
- Wi-Fi/LTE を用いたサーバへの隣接ノード ID リストと自身の移動/停止情報の送信

3.1.2 サーバモジュール

サーバで動作するサーバモジュールは以下のシーケンスを周期的に繰返し、継続的にモバイルスマートデバイスの位置を推定する。

- すべてのモバイルスマートデバイスの隣接ノード ID リストと移動/停止情報を Wi-Fi または LTE を用いて集約し蓄積する。
- 集約した隣接ノード ID リストに基づき、仮想メッシュトポロジを構成/更新する。
- 仮想メッシュトポロジに集約型 SOL を適用することですべてのスマートデバイスの位置を推定する。

3.2 仮想メッシュトポロジ構成と更新

クラウド環境のサーバモジュールにおいてスマートデバイスモジュールからの隣接トポロジを集約して双方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成する。

- ノード i の隣接ノード ID リストに含まれるノードと隣接ノード ID リストにノード i を含むノードをノード i の 1 次近傍ノードとする。
- ノード i の n 次近傍ノード x の隣接ノード情報に含まれるノード、または、隣接ノード情報としてノード x を含むノードにおいて、ノード i および $(n-1)$ 次までの近傍ノード群の 1 次近傍ノードに含まれないノードをノード i のノード x を中継する $(n+1)$ 次近傍ノードとする。

上記処理をすべてのノードに実施し、個々のノードごとに多次近傍ノードを設定することにより、仮想メッシュトポ

ロジを構成する。

3.3 モバイルスマートデバイスへ適用拡張した SOL アルゴリズム

全体の仮想メッシュトポロジを用いて停止ノードの位置を高精度に推定する大域 SOL と局所的な範囲の仮想メッシュトポロジを用いて移動ノードの位置を短時間に推定する局所 SOL の並列処理により停止ノードと移動ノードの位置推定を行う。

3.3.1 大域 SOL

停止ノードの位置を推定する大域 SOL では十分な推定時間を利用できることから、次の位置推定処理サイクルを複数回実施して、最良の推定ジオメトリを位置推定結果として出力する。

- SOL アルゴリズムによる位置推定
- 絶対座標変換
- 推定ジオメトリの領域判定値算出
- 最小値の領域判定値と推定ジオメトリを記憶

SOL アルゴリズムは多次近傍ノードによる位置修正を繰り返すことで相対ジオメトリを再現する。位置修正の初期段階は広い範囲の多次近傍ノードを用いて大域的なジオメトリを形成し、修正段階の進行にともない位置修正に使用する多次近傍ノードのホップ数を減少させて局所的かつ詳細なジオメトリを形成し収束させる。したがって、SOL アルゴリズムによる位置修正は以下のステップにより構成される。

[Step.1] 各ノードの推定位置をランダムに生成する。以降、 t 回目の修正におけるノード i の推定位置を $w_i(t)$ とする。

[Step.2] ノード i に対して H ホップとなるノード群からランダムにノード 1 つを選択し、これをノード h とする。ノード h を用いたノード i の修正ベクトル $V_i^{\{H\}}(t)$ において、ノード間距離をホップ数 H とし、次のように定義する。

$$V_i^{\{H\}}(t) = \frac{H - |w_i(t) - w_h(t)|}{|w_i(t) - w_h(t)|} (w_i(t) - w_h(t)) \quad (1)$$

修正ベクトル $V_i^{\{H\}}(t)$ を用い、ノード i の位置修正は次のように行う。

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{H\}}(t)) & (t < \tau_H) \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{H-1\}}(t)) & (\tau_H \leq t < \tau_{H-1}) \\ \vdots & \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{3\}}(t)) & (\tau_3 \leq t < \tau_2) \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{2\}}(t)) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_i(t) = \eta \alpha_i(t-1) \quad (0 < \eta < 1). \quad (3)$$

ただし、 τ_H は位置修正に用いる多次近傍ノードを切り替

える修正回数の閾値、 $\alpha_i(t)$ はノード i の t 回目修正における学習係数である。

各ノードにおいて Step.2 を繰り返して位置修正を行い、ノード全体の相対ジオメトリを再現する。この相対ジオメトリを 3 点のアンカノードの真位置と推定位置の対を用いて絶対座標へ変換し、各ノードの絶対位置を推定する。アンカノードの真位置 $W_A = (X_A, Y_A)$ は推定位置 $w_A = (x_A, y_A)$ を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} X_A &= ax_A + by_A + t_x \\ Y_A &= cx_A + dy_A + t_y \end{aligned} \quad (4)$$

3 つのアンカノードから構成される連立方程式 (4) から 6 つの係数 a, b, t_x, c, d, t_y を得ることにより、すべてのノードは以下のように推定位置 $w_i = (x_i, y_i)$ から絶対座標 $\hat{w}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ へ変換し絶対推定位置を得る。

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & t_x \\ c & d & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

トポロジ矛盾率を用いた推定ジオメトリ評価により、矛盾の少ないジオメトリを位置推定結果とする。ノード i 、ノード i の 1 次近傍ノード j 、ノード i の 2 次近傍かつノード j の 1 次近傍ノード l のそれぞれの推定位置を w_i, w_j, w_l 、ノード l の真位置 W_l とすると、ノード l はノード i の 2 次近傍であるので、 w_l は w_j に近い領域内に位置しなければならない。したがって、 w_i に近い領域にある ($|w_l - w_i| \leq |w_l - w_j|$) 場合トポロジ矛盾と判定する。さらに、トポロジ矛盾の検知領域を拡大するため、上記と同様にすべての共通 1 次近傍群による複数の分割空間を重ね合わせてトポロジ矛盾の検知範囲を拡大し、誤推定検知の可能性を高める。共通 1 次近傍群による領域判定を行った回数におけるトポロジ矛盾の発生回数を領域判定値と定義する。領域判定値と位置推定誤差には、領域判定値が低下すれば位置推定誤差が小さくなるという一定の相関関係があるため、最小の領域判定値のジオメトリを位置推定結果とする。

3.3.2 局所 SOL

人の移動速度に追従可能な位置推定処理の時間制約において、移動ノードの位置を推定する局所 SOL は、以下により計算時間の短縮と精度維持を両立する。

- 大域 SOL により高精度に推定された位置を持つ停止ノードの仮位置修正は実施せず、停止ノードを基準点として用いた移動ノードの仮位置修正を行う。
- 移動ノードの移動速度および更新周期から、局所 SOL 実行周期あたりの移動距離は局所的である。そのため、直近の位置推定結果から漸次的な局所更新とし、大域的な多次近傍ノードを用いた仮位置修正を削減する。局所 SOL の学習係数は、大域 SOL と同様の収束を得る

ため、局所 SOL における学習係数の初期値 $\alpha_i(0)$ は式 (6) より算出する。

$$\alpha_i(0) = \eta \cdot \exp(S^g - S^l) \quad (0 < \eta < 1). \quad (6)$$

ただし、 S^g を大域 SOL における仮位置修正回数、 S^l を局所 SOL における仮位置修正回数とし、 t 回目の学習係数 $\alpha_i(t)$ は式 (3) に従う。

停止ノードの絶対推定位置を基準点とした仮位置更新を行う局所 SOL において、ホップ数を用いたノード間相対距離を絶対距離として用いるために、大域 SOL の絶対座標変換後の推定ジオメトリにおける各ホップ数 H の平均ノード間推定距離 $\bar{s}^{\{H\}}$ を以下により算出し、これをノード間相対距離のスケール調整に用いる。

$$\bar{s}^{\{H\}} = \frac{1}{|N||N^{\{H\}}|} \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{h=1}^{|N^{\{H\}}|} d_{ih} \quad (7)$$

ただし、絶対座標変換後の推定ジオメトリにおける全ノードの集合を N 、その集合の要素数を $|N|$ 、ノード集合 N の任意のノード i に対して H ホップとなるノードを h 、その集合を $N^{\{H\}}$ (ノード集合 N の部分集合)、その集合の要素数を $|N^{\{H\}}|$ とし、ノード i とノード h の推定ノード間距離を d_{ih} と示す。

この局所 SOL による仮位置修正は以下のステップにより構成される。

[Step.1] 各ノードの直近の位置推定結果を各ノードの修正初期仮位置 $w_i(0)$ とする。

[Step.2] ノード i が移動ノードであれば、ノード i に対して 1 ホップとなる停止ノードと 2 ホップとなる停止ノードを 1 つずつ選択する。修正ベクトル $V_i^{\{H\}}(t)$ は以下のように表される。

$$V_i^{\{H\}}(t) = \frac{H \cdot \bar{s}^{\{H\}} - |w_i(t) - w_h(t)|}{|w_i(t) - w_h(t)|} (w_i(t) - w_h(t)) \quad (8)$$

この修正ベクトル $V_i^{\{H\}}(t)$ を用いた局所 SOL における移動ノード i の位置修正は次のように行う。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{2\}}(t)) \quad (9)$$

4. ノード間経路長を用いた実装手法

SmartFinder は仮想メッシュトポロジにおけるノード間ホップ数をノード間相対距離として用いて相対ジオメトリを再現し、アンカノードを用いた座標変換により絶対位置を推定する。すなわち、ノード間の絶対距離を用いずに相対距離のみで絶対位置推定が可能である。位置推定精度は、位置推定対象のネットワーク規模の拡大にともなって高精度化する。これは、ホップ数が増加することによって、ネットワーク規模に対するノード間相対距離の分解能が向

上するためである。しかし、マルチホップを多く含まない仮想メッシュトポロジの場合、ノード間相対距離の分解能が低下するため、SmartFinder による高精度な位置推定結果が得られない。実装においては、精度がトポロジに依存しない位置推定を実現するため、ホップ数に代替して、スマートデバイス間で計測した BLE RSSI から導出したノード間経路長をノード相対距離として用いる。

BLE RSSI は次の理由から非常に不安定で信頼性が低い。

- BLE は送信電力が低いため、その RSSI は電波干渉の影響を受けやすい。
- 電波衝突回避のための BLE のチャンネルホッピングによって、受信した RSSI はチャンネルごとの伝搬特性を持つ。

したがって、各ノード間で計測した BLE RSSI からそれぞれのノード間相対距離を求めるのではなく、すべてのノード間の BLE RSSI を用いて、電波干渉やチャンネルごとの伝搬特性によるフェージングの影響が相対的に少ないリンクの組み合わせとする経路からノード間経路長を導出し、これをノード間相対距離として用いる。これにより、BLE RSSI の電波干渉やチャンネルごとの伝搬特性によるノード間相対距離への影響を抑制し、さらにホップ数に対して格段にノード間相対距離の分解能を上げることにより、位置推定対象のトポロジに依存しない高精度な位置推定を実現する。

4.1 BLE RSSI 取得手法と移動/停止判定

BLE RSSI はスマートデバイスモジュールにおいて取得する。BLE を用いた広告ブロードキャスト受信時に隣接ノード ID とその ID に対応する RSSI を取得し、これらを隣接ノード情報として用いる。各デバイスの移動/停止情報は、当該ノードの位置推定処理を大域 SOL または局所 SOL のいずれとするかの判断に用いる。移動/停止情報の誤判定は、以下の影響を発生させる。

- 停止デバイスが移動状態であると誤判定した場合、局所 SOL によって停止ノードの位置が再推定されるが位置と隣接ノード情報の整合性は失われない。
- 移動デバイスが停止状態であると誤判定した場合、移動ノードの推定位置は長周期の大域 SOL によって更新されるため、更新頻度が低下する。さらに、多地点で取得した隣接ノード情報が一地点の隣接ノード情報として扱われることで位置と隣接ノード情報の整合性が失われるため、大域 SOL の位置推定精度が劣化する原因となる。

すなわち、移動/停止判定は移動デバイスが停止状態であると誤判定されなければ十分である。そのため、移動/停止判定にスマートフォンの 3 軸加速度センサの値から算出した合成加速度を簡易的に用いる。各ノードは、サーバへの隣接ノード情報と自身の移動/停止情報の送信周期にお

いて、合成加速度が閾値以上の変位を検出した場合に移動と判定し、これを各ノードの移動/停止情報として用いる。すべてのスマートデバイスが自身の隣接ノード情報と自身の移動/停止情報を Wi-Fi/LTE を用いてサーバへ周期的に送信することにより、サーバモジュールは隣接ノード情報と全ノードの移動/停止情報を取得する。

4.2 ノード間経路長の導出

SOL アルゴリズムは、ホップ数をノード間相対距離とした位置推定が可能であることから、ノード間相対距離は実距離に対して少なくとも単調増加傾向であれば良い。そのため、ノード間相対距離が実距離に対して単調増加傾向となることが期待できるリンクを組み合わせたノード間経路を設定して仮想メッシュネットワークを構成する。

4.2.1 ノード間リンク長の算出

各ノード間の RSSI からノード間リンク長を算出する。電波干渉やチャンネルごとの伝搬特性によるノード間リンク長への影響を緩和させるため、ノード i が受信したノード j の受信電力とノード j が受信したノード i の受信電力の隣接ノード保持期間における平均受信電力 \bar{P}_{ij} をノード間リンク長の算出に用いる。ここで、伝搬損失係数を ν とすると、平均受信電力は距離の ν 乗に反比例して減衰し、 ν は理想空間では 2、シャドウイングやマルチパスフェージングの影響下ではおおむね 2 以上 4 以下となることが知られている。そのため、 ν は実距離に対して単調増加傾向を期待できる 2 以上の任意の値とする。

以上から、式 (10) により算出した \bar{l}_{ij} をノード間リンク長とする。

$$\bar{l}_{ij} = \bar{P}_{ij}^{-\frac{1}{\nu}} \quad (10)$$

4.2.2 仮想メッシュネットワークにおけるノード間経路長

仮想メッシュネットワークは、ノード間相対距離が実距離に対して単調増加傾向となることが期待できるノード間経路を設定することにより構成する。そのために、ノード間経路設定においては、RSSI フェージングによる影響が少ないと想定される経路を構築する。ノード間の実距離が近く見通しがある場合、BLE の直接波は間接波による干渉を受けにくいいため、ノード間 RSSI は高い傾向となる。すなわち、高い RSSI から算出されるノード間リンク長ほど干渉や障害物の影響が少なく、実距離との単調増加傾向が強いと想定する。そのため、式 (10) のように、ノード i とノード j を結ぶ経路において、ノード間リンク長の和が最短となる経路をノード i とノード j のノード間経路とし、その距離をノード間経路長 d_{ij} とする。ただし、 l_{xy} はノード x とノード y 間のリンク、 p_{ij} はノード i から j までの経路となるリンク l_{xy} の集合、 $d(p_{ij})$ はノード i から j までの経路長、 $S(p_{ij})$ は p_{ij} の集合とする。

$$d_{ij} = \min(d(p_{ij})|S(p_{ij})), \quad d(p_{ij}) = \sum_{l_{xy} \in p_{ij}} \bar{l}_{xy} \quad (11)$$

これにより、フェージングによる影響を強く受けたノード間リンク長はノード間経路長の算出から排除される。以上から、ノード間経路長 d_{ij} はフェージングによるノード間相対距離への影響を抑制し、かつホップ数より格段に分解能の高いノード間相対距離となる。

4.3 ノード間経路長を用いた位置推定アルゴリズム

4.3.1 ノード間経路長の近傍範囲

近傍範囲をホップ数でなく、ノード間経路長に基づいて定義する。すべての 1 次近傍ノード間におけるノード間経路長から、通信半径に相当するノード間経路長の近傍半径を算出し、これを近傍範囲として位置修正に用いる近傍ノード選択の基準に用いる。ノード間経路長の近傍半径を R とすると、1 次近傍ノード間におけるノード間実距離の期待値は以下の式 (12) により算出される。

$$E[X] = \int_0^R x \frac{2\pi x}{\pi R^2} dx = \frac{2}{3}R \quad (12)$$

ここで、1 次近傍ノード間におけるノード間経路長の平均を \bar{d} とすると、ノード間経路長の期待値から算出した近傍半径 R は式 (13) となり、 H 次近傍ノードは $(H-1)R$ 以上 HR 未満のノード間経路長に相当する。

$$R = 1.5\bar{d} \quad (13)$$

これにより、ノード間経路長から位置修正段階に応じたノード選択ができるため、任意のホップ数で構成されたトポロジにおいても高精度な位置推定が可能となる。

4.3.2 大域 SOL

複数回の位置推定処理サイクルから最良の推定ジオメトリを位置推定結果として出力する大域 SOL において、以下の処理をノード間経路長に対応するように拡張する。

- SOL アルゴリズムによる位置推定
- 推定ジオメトリの領域判定値算出

一方、以下の処理は高解像度の仮想メッシュネットワークに関係しない処理のため、従来の SmartFinder と同様の処理とする。

- 絶対座標変換
- 最小値の領域判定値と推定ジオメトリを記憶

SOL アルゴリズムによる位置推定において、相対ジオメトリを再現するために多次近傍ノードによる位置修正を繰り返す Step.2 の処理を拡張する。位置更新の繰返しにおいて、ノード間経路長 d_{ij} をノード間相対距離として用い、ステップ数 t により決定される大域 SOL の位置修正に用いるノード集合を選択するためのノード間経路長の上限閾値を $\gamma^g(t)$ 、ノード i に対してノード間経路長が $\gamma^g(t)$ 以下となるノード群からランダムに 1 つ選択したノードを

ノード m とする。位置修正の初期段階は大域的なジオメトリを形成し、修正段階の進行にともない局所的かつ詳細なジオメトリを形成し収束させるため、このノード m とのノード間経路長 $d_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}$ を用いたノード i の修正ベクトル $V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)$ を、次のように定義し、

$$V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t) = \frac{d_{im}^{\{\gamma^g(t)\}} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|} (w_i(t) - w_m(t)) \quad (14)$$

この修正ベクトル $V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)$ を用いたノード i の位置修正は次のように行う。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{R\}}(t) + V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)) \quad (15)$$

ただし、この $\gamma^g(t)$ は式 (16) により決定する。

$$\gamma^g(t) = \begin{cases} d^{\max} - \frac{t(d^{\max} - 2R)}{S^g} & (d^{\max} > 2R) \\ 2R & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (16)$$

ただし、 d^{\max} は全ノードにおけるノード間経路長の最大値とする。

矛盾の少ないジオメトリを推定するためのトポロジ矛盾率の算出による推定ジオメトリ評価は、1 次数近傍ノードと 2 次近傍ノードの選択方法を変更することにより、ノード間経路長に対応させる。ノード i において、 $2R$ 以下のノードを 2 次近傍ノード相当のノード l とし、ノード i とノード l に対するノード間経路長がノード i とノード l 間の経路長未満となるノード、すなわち、($d_{ij} \leq d_{il}$) かつ ($d_{jl} \leq d_{il}$) のノードを 1 次近傍ノード相当のノード j とする。従来の SmartFinder におけるトポロジ矛盾判定と同様に、 w_i と w_j を基準点とし、線分 $\overline{w_j - w_i}$ の垂直 2 等分線を用いて w_i と w_j のいずれかに近い領域に空間を 2 分割し、 w_i に近い領域にある ($|w_l - w_i| \leq |w_l - w_j|$) 場合は矛盾と判定する。これにより、任意のノード間経路長に対して相対距離の矛盾を検知することが可能となる。

4.3.3 局所 SOL

大域 SOL で推定された停止ノードの位置を基準点とし、位置推定を行う局所 SOL において、以下の処理をノード間経路長に対応するように拡張する。

- ノード間相対距離のスケール調整
- SOL アルゴリズムによる位置推定

一方、以下の処理はノード間経路長に関係しない処理のため、従来の SmartFinder と同様の処理とする。

- 局所 SOL で用いる学習係数の算出

ノード間経路長をノード間の絶対距離として用いるには従来の SmartFinder と同様にスケール調整を必要とする。そのため、大域 SOL の座標変換前のネットワークスケールと座標変換後のネットワークスケールの比を用いる。すなわち、局所 SOL で用いるノード間経路長は、大域 SOL での絶対座標変換前の推定ネットワーク形状に対する絶対

座標変換後の推定ネットワーク形状のスケール比として求める。この、拡張した SmartFinder におけるスケール調整は \bar{s} を以下により算出し、これをスケール調整に用いる。

$$\bar{s} = \frac{1}{|N|C_2} \sum_{i=1}^{|N|-1} \sum_{j=i+1}^{|N|} \frac{|\hat{w}_i - \hat{w}_j|}{|w_i - w_j|} \quad (17)$$

局所 SOL の Step.2 による仮位置修正をノード間経路長に対応するように以下のように拡張する。ノード i に対してノード間経路長が R もしくは $2R$ の閾値 γ^l 以下となるノード群からランダムにノードを 1 つ選択し、これをノード m とする。このノード m とのノード間経路長 $d_{im}^{\{\gamma^l\}}$ を用いたノード i の修正ベクトル $V_{im}^{\{\gamma^l\}}(t)$ を、次のように定義する。

$$V_{im}^{\{\gamma^l\}}(t) = \frac{d_{im}^{\{\gamma^l\}} \cdot \bar{s} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|} (w_i(t) - w_m(t)) \quad (18)$$

この修正ベクトル $V_{ij}^{\{\gamma^l\}}(t)$ を用いた局所 SOL における移動ノード i の位置修正は次のように行う。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{R\}}(t) + V_{im}^{\{2R\}}(t)) \quad (19)$$

5. 評価

5.1 実装システム構成

RSSI は BLE の標準プロトコルで取得可能であるため、システム構成は従来の SmartFinder と同様 (図 1) とする。スマートデバイスには Android スマートフォンである FREETEL の SAMURAI REI (1.3 GHz 64 bit, RAM 2 GB), Wi-Fi アクセスポイント (Wi-Fi AP) には BUF-FALO の WAPM-1750D, DHCP サーバには Raspberry Pi 3 Model B, SmartFinder サーバには MacBook Pro (CPU 3.3 GHz, RAM 16 GB) を用いる。また、スマートフォン間の隣接ノード情報取得には BLE を用い、隣接ノード情報集約のための Wi-Fi AP との通信には、2.4 GHz の BLE との電波干渉をあらかじめ避けるため、5 GHz の IEEE 802.11a を用いる。スイッチを介して、スマートフォンを収容する Wi-Fi AP と DHCP サーバ、SmartFinder サーバをスター型に有線接続する。

5.2 評価方法

実験諸元を表 1 に、実験風景を図 2 に示す。本論文では 500m^2 の空間にスマートデバイスを保持する人が 50 人程度存在する中規模オフィスでの利用を想定する。大域 SOL および局所 SOL のいずれの精度も近傍ノード数に依存するため、各ノード数における精度変動を検証する。また、局所 SOL の精度はそれぞれの移動ノードにおいて独立であるため、本論文では移動ノードを 1 台とした基礎的評価を行う。位置推定精度が最近傍ノード間の平均距離以

表 1 実験諸元

Table 1 Experiment parameters.

フィールド範囲 (m × m)	25 × 20
全ノード数	10, 20, 30, 40, 50
各試行回数	5
アンカノード数	3
アンカノード座標 (m)	(8.79, 14.13), (5.12, 5.53), (12.51, 5.52)
移動ノード数	1
1秒あたりの移動量 (m/sec)	1



図 2 実験風景

Fig. 2 Experiment environment.

下であれば各ノード位置を識別できると考え、これを位置推定誤差の想定値とする。具体的に、500 m²の本実験環境において、50 ノードでは1台あたりの面積が10 m²/台であり、それらの最近傍ノード間の平均距離は約3.16 mとなるため、これを位置推定誤差の想定値とする。本実験環境において、従来手法で3 m程度の平均誤差となる位置推定精度を取得するためには、BLEの電波強度を用いたアンカノードとの近接とフィンガープリンティングを併用した文献 [15] を参考にして概算すると、少なくとも15~20台程度のアンカノードと事前計測して作成した特性マップを必要とする空間であると想定される。また、前述したスマートデバイスにおけるBLEの電波到達距離は20 m以上であったため、仮想メッシュトポロジは完全グラフに近いトポロジとなり、ノード間ホップ数をノード間相対距離として用いる SmartFinder は有効に機能しない実験環境である。SmartFinderのパラメータは表 2 に示す。停止ノードの真位置は縦20 × 横18のグリッドから構成される計360の格子点からランダムに選択する。ただし、同一の格子点に複数のノードは配置せず、アンカノードは実験諸元に示す座標の格子点に配置する。移動ノードは図 3 に示すように S をスタートし、等速で表記番号順に線上を移動する。事前計画した移動シナリオに従って人がスマートフォンを携帯して移動することにより、任意の時間の移動ノードの真位置が既知となるため精度評価が可能となる。この移動経路は、隣接ノード情報の異方性が高くなるトポロジの外

表 2 実装評価における SmartFinder のパラメータ

Table 2 Experiment parameters for SmartFinder.

減衰定数 η	0.992
隣接ノード情報の更新周期 (秒)	1
大域 SOL の実行周期 (秒)	10
局所 SOL の実行周期 (秒)	1
大域 SOL における仮位置修正回数 S^g	800
局所 SOL における仮位置修正回数 S^l	400
停止ノード間の隣接ノード情報保持期間 (秒)	60
移動ノードと他のノード間の隣接ノード情報保持期間 (秒)	1
伝搬損失係数 μ	2.0

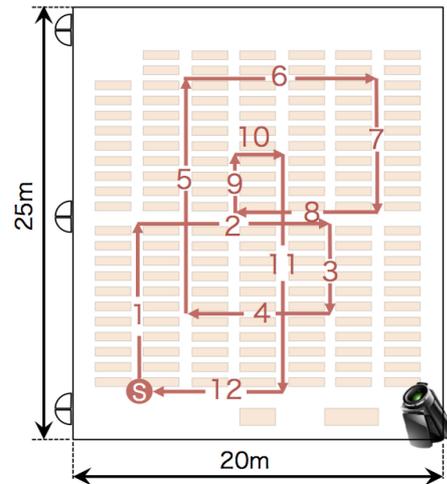


図 3 移動シナリオ

Fig. 3 Scenario for movement.

周付近や隣接ノード情報の等方性が高くなるトポロジの中心付近を通り、かつ多様な停止ノード間を通る経路として設定した。

推定位置の精度評価は、推定された各ノードの位置と真位置のユークリッド距離の平均である位置推定誤差により評価する。SmartFinderの位置推定において、10秒までは大域 SOL は未実施であるため、停止ノードの位置は初期状態のランダムな位置から更新されていない。したがって、局所 SOL ではランダムな位置である停止ノードの位置を基準点として用いるため、移動ノードの位置推定結果もランダム相当となる。この点を考慮して、精度評価の対象とする時間は位置推定結果が反映される10秒から移動経路のすべてを精度評価可能な180秒までとする。s秒目の位置推定誤差 $ERR_{ave}(s)$ は次の式 (20) のように求める。 $W_i(s)$ は s 秒目のノード i の真位置、 $w_i(s)$ は推定位置を示す。

$$ERR_{ave}(s) = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N |W_i(s) - w_i(s)| \quad (20)$$

また、10秒から180秒までの $ERR_{ave}(s)$ の平均を ERR_{ave} とする。

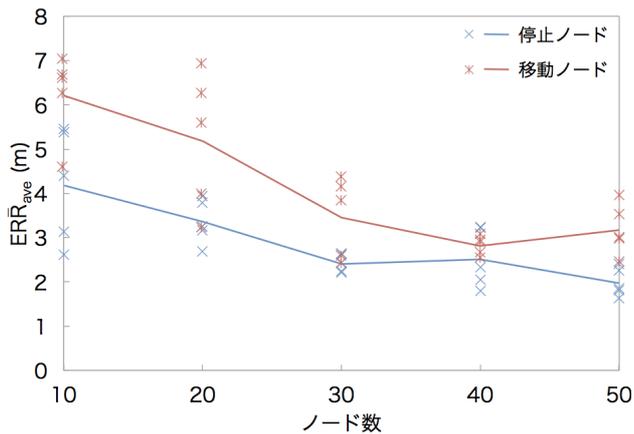


図 4 各ノード数における停止ノードと移動ノードの ERR_{ave}
 Fig. 4 ERR_{ave} on a moving node and staying nodes.

5.3 評価結果

5.3.1 ノード数と ERR_{ave} の関係

図 4 は、同一移動シナリオにおける各ノード数 5 ケースのノード配置の平均絶対位置推定評価を示す。ノード数の増加にともなって隣接ノード数が増加するため、移動ノードと停止ノードの ERR_{ave} は減少傾向となり、その分散も減少傾向となる。すなわち、ノード数の増加に従って、SmartFinder による移動ノードと停止ノードの位置推定精度は高精度化する傾向となる。10 ノードにおいて、移動ノードの ERR_{ave} は約 6.23m、停止ノードの ERR_{ave} は約 4.20m、これらの差は約 2.03m、50 ノードにおいて、移動ノードの ERR_{ave} は約 3.19m、停止ノードの ERR_{ave} は約 2.00m、これらの差は約 1.19m である。停止ノードと移動ノードの推定精度差の要因は以下が考えられる。

- 大域 SOL と局所 SOL の位置推定処理の相違
- ノード間リンク長に対するフェージングによる影響の相違

まず、大域 SOL と局所 SOL の位置推定処理の相違を考察する。大域 SOL は、複数回の位置推定処理サイクルから最良の推定ジオメトリを位置推定結果として出力することで、矛盾の少ないジオメトリを推定する。一方、局所 SOL は移動ノードは大域 SOL により高精度に推定された位置を持つ停止ノードの位置推定結果を基準点にして位置推定を行う。そのため、移動ノードの位置推定精度は、停止ノードの位置推定精度に依存し、停止ノードの位置推定精度よりも悪くなると考えられる。しかし、移動ノードの位置を推定する局所 SOL は、前述した隣接ノード数の増加による精度向上に加えて、基準点として用いる停止ノードの高精度化にともなって精度向上するため、ノード数の増加に従って移動ノードと停止ノードの ERR_{ave} の差は減少傾向になると考えられる。

次に、ノード間リンク長に対するフェージングによる影響の相違を考察する。停止ノード間のノード間リンク長は長時間保持された隣接ノード情報から算出される。一方、

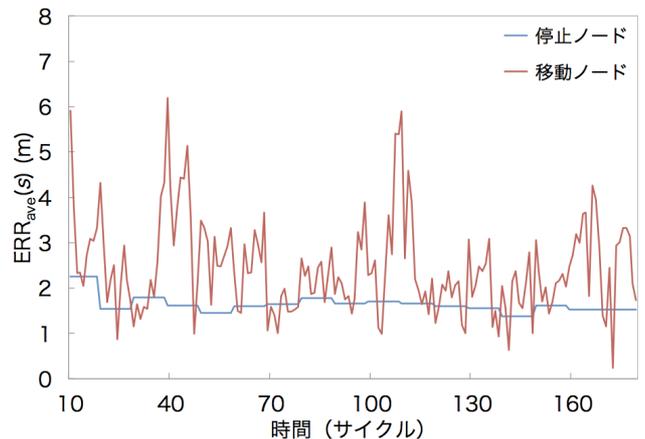


図 5 10 秒から 180 秒間における停止ノードと移動ノードの $ERR_{ave}(s)$ の推移

Fig. 5 Transition of $ERR_{ave}(s)$ on a moving node and staying nodes from 10 to 180 seconds.

移動ノードとその隣接ノード間のノード間リンク長は、隣接ノード情報の長時間保持が不可であるため、短時間保持された隣接ノード情報から算出される。停止ノード間のノード間リンク長は、長時間保持された数多くの RSSI から算出されることでフェージングによる影響が平滑化されるため、フェージングによる影響を受けにくくなると考えられる。したがって、停止ノードの ERR_{ave} は移動ノードの ERR_{ave} よりも高精度となる。しかし、ノード数が増加すると、停止ノードと移動ノードの ERR_{ave} の差は減少傾向となる。これは、ノード数の増加にともなった隣接ノード数の増加により、ノードを結ぶノード間リンク長の経路が増加することで、フェージングによる影響の少ないノード間経路長が構成可能となり、ノード間経路長のノード間の実距離に対する線形性が強くなると考えられる。そのため、大域 SOL と局所 SOL におけるフェージングによる影響の相違は少なくなり、停止ノードと移動ノードの ERR_{ave} の差は減少傾向になると考えられる。

以上から、高解像度の仮想メッシュネットワークを用いた SmartFinder は、フェージング環境においてもアンカノード 3 点のみでノード数の増加にともなった高精度な位置推定が可能である。

5.3.2 時間と $ERR_{ave}(s)$ の関係

図 5 に各時間における停止ノードと移動ノードの絶対位置推定誤差の時間遷移を示す。これにより、大域 SOL により推定された停止ノードの位置推定精度と局所 SOL により推定された移動ノードの位置推定精度の時間遷移を考察する。大域 SOL と局所 SOL の位置推定結果は 10 秒以降に反映され、10 秒から 180 秒の ERR_{ave} は、停止ノード約 1.64m、移動ノード約 2.46m である。

まず、大域 SOL により推定される停止ノードの精度の時間遷移を考察する。10 秒以降の大域 SOL により推定される停止ノードの $ERR_{ave}(s)$ は 10 秒ごとに位置推定結果

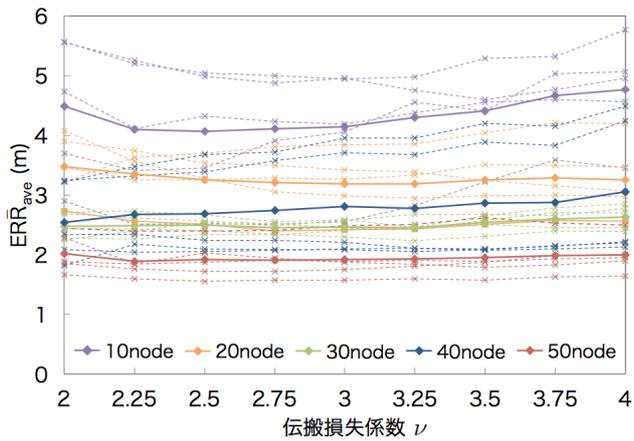


図 6 伝搬損失係数 ν に対する各ノード数の ERR_{ave} の関係
 Fig. 6 Dependence of ERR_{ave} on propagation loss coefficient ν .

を更新するため変動するが、20 秒以降は 2m 以下の安定した値となる。これは、停止ノード間のノード間リンク長を長時間保持することでフェージングによる影響の少ないノード間経路長を構成し、さらに、複数回の位置推定処理サイクルから推定ジオメトリ評価が最良となる位置推定結果を出力するためであると考えられる。

次に、局所 SOL により推定される移動ノードの精度の時間遷移を考察する。局所 SOL により推定される移動ノードの $ERR_{ave}(s)$ は 1 秒ごとに推定位置を出力するため、位置推定誤差は毎秒変動する。移動ノードは隣接ノード情報を長時間保持できないため、隣接ノードとのノード間リンク長は毎回異なった少数の RSSI から算出される。そのため、移動ノードとのノード間リンク長はフェージングによる影響を受けやすい。さらに、局所 SOL は、位置推定計算時間の制約から、推定ジオメトリ評価が最良となる複数回の位置推定処理サイクルの繰返しを行わずに位置推定結果を出力するため、移動ノードの位置推定精度は停止ノードと比較して変動が大きくなると考えられる。しかし、局所 SOL により推定される移動ノードの $ERR_{ave}(s)$ は、最大で瞬時的な約 6m 程度に留まり、平均の約 2.46m 周辺に多く分布する。

以上より、高解像度の仮想メッシュネットワークの構成手法においても、大域 SOL と局所 SOL に分けた位置推定戦略は有効に機能し、1 秒ごとの位置推定が可能であることから、人の移動速度においては十分に追従できると考える。

5.3.3 伝搬損失係数と ERR_{ave} の関係

図 6 に伝搬損失係数 ν に対する各ノード数の ERR_{ave} の関係を示す。伝搬損失係数 ν に対する ERR_{ave} は、10 ノードではそれぞれ約 1.66m 以内の差、50 ノードではそれぞれ約 0.50m 以内の差に留まり、おおよそノード数の増加にもなって減少する傾向がある。しかし、いずれのノード数においても伝搬損失係数 ν に対する ERR_{ave} の明確

な増減や極大の傾向はない。すなわち、SmartFinder における伝搬損失係数 ν は測位精度に対して重要なパラメータではなく、その影響は非常に限定的となる。以上より、SmartFinder におけるノード間相対距離は実距離に対して少なくとも単調増加傾向であれば良く、SmartFinder は伝搬損失係数 ν の設定に依存しない高精度な位置推定が可能である。

6. まとめ

本論文では、SmartFinder の実環境における有用性を示すため、位置推定対象デバイスの隣接情報に基づく仮想メッシュネットワークのトポロジ制約を排除しつつ、BLE RSSI から導出するノード間経路長を用いた SmartFinder の実装手法を示し、さらに、50 台のスマートフォンを用いた実験では、アンカノード 3 台のみで位置推定平均誤差が停止ノードでは 2.00m、移動ノードでは 3.19m となることを確認し、実装評価から次の有用性を示した。

- ノード間経路長を用いた SmartFinder は、フェージング環境においてもアンカノード 3 点のみでノード数の増加に従って高精度な位置推定が可能であり、かつ 1 秒ごとの位置推定が可能であることから、人の移動速度においては十分に追従できる。
- 伝搬損失係数の設定に依存しない高精度な位置推定が可能である。

謝辞 本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 181507001) の委託を受けたものです。

参考文献

- [1] Kitanouma, T., Nii, E., Takashima, Y., Adachi, N. and Takizawa, Y.: SmartFinder: Cloud-based self organizing localization for mobile smart devices in large-scale indoor facility, *2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, pp.1-6 (2017).
- [2] 北之馬貴正, 新居英志, 安達直世, 滝沢泰久: SmartFinder: 大規模屋内施設における集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式とその評価, *情報処理学会論文誌*, Vol.59, No.2, pp.462-472 (2018).
- [3] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.: *Global Positioning System: Theory and Practice*, 4th ed., Springer-Verlag (1997).
- [4] Mikhaylov, K., Petäjäjärvi, J., Hämäläinen, M., Tikanmäki, A., and Kohno, R.: Impact of IEEE 802.15.4 Communication Settings on Performance in Asynchronous Two Way UWB Ranging, *International Journal of Wireless Information Networks*, pp.1-16 (2017).
- [5] Priyantha, N., Miu, A., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *Proc. MOBICOM 2001* (2001).
- [6] Wozniak, M., Odziemczyk, W. and Nagorski, K.: Investigation of Practical and Theoretical Accuracy of Wireless Indoor Positioning System Ubisense, *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, Vol.95, No.1, pp.36-48 (2013).
- [7] Savvides, A., Han, C. and Srivastava, M.: Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors,

- Proc. ACM MobiCom 2001*, pp.1-14 (2001).
- [8] Bulusu, N., Heidemann, J. and Estrin, D.: GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, *IEEE Pers. Commun.*, Vol.7, No.5, pp.28-34 (2000).
- [9] He, C., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A. and Abdelzaher, T.F.: Range-free localization and its impact on large scale sensor networks, *ACM TECS*, Vol.4, No.4, pp.877-906 (2005).
- [10] Nic, N.: Apple iBeacon technology briefing, *Journal of Direct, Data and Digital Marketing Practice*, Vol.15, No.3, pp.222-225 (2014).
- [11] 石井 真, 小暮 聡, 神武直彦, 海老沼拓史: IMES (Indoor Messaging System) の原理と課題及びその解決について, GPS/GNSS Symposium 2009 テキスト, pp.120-125 (2009).
- [12] Li, F., Zhao, C., Ding, G., Gong, J., Liu, C. and Zhao, F.: A reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors, *Proc. 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '12)*, pp.421-430 (2012).
- [13] Vandermeulen, D., Vercauteren, C. and Weyn, M.: Indoor localization using a magnetic flux density map of a building, *3rd International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, pp.42-49 (2013).
- [14] Kawachi, K. and Rekimoto, J.: FineMesh: High-Density Sampling Platform Using an Autonomous Robot, *2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom)*, Besancon, pp.477-486 (2012).
- [15] 佐野博之, 塚本昌克, 片桐雅二, 池田大造, 太田 賢: BLE タグを用いた屋内位置推定手法における耐障害性の向上, 情報処理学会論文誌, Vol.58, No.5, pp.1138-1150 (2017).

推薦文

本研究は、BLE の受信信号強度に基づき、多数のスマートデバイスを 3 点の観測のみから位置を推定する手法を提案するとともに、実環境における実証実験により、高い推定精度で位置を特定できることを示している。空港、駅、工場、商業施設、オフィス、病院などの多様な屋内施設における実用化を目指した意欲的な論文であり、今後の取組において、スマートデバイスが活用される様々な現場での性能評価など、実践的な取組が期待されます。以上の理由により、本論文を推薦いたします。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 田上敦士)



北之馬 貴正 (正会員)

2019 年関西大学大学院博士課程後期課程修了。同年関西大学先端科学技術推進機構客員研究員、株式会社 Phindex Technologies 代表取締役。現在、無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。博士 (工学)。



新居 英志 (学生会員)

2017 年関西大学大学院博士課程前期課程を修了。現在、関西大学大学院博士課程後期課程において自律移動体への群知能適応の研究に従事。



森 流星

2019 年関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業。現在、関西大学大学院博士課程前期課程において無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。



滝沢 泰久 (正会員)

1983 年京都工芸繊維大学工芸学部機械工学科卒業。同年日本ユニシス (株) 入社。1990 年住友金属工業 (株) 入社。1998 年 ATR 環境適応研究所出向。2002 年 ATR 適応コミュニケーション研究所主任研究員。2008 年同研究所上級主任研究員。2009 年関西大学環境都市工学部准教授、ATR 適応コミュニケーション研究所客員研究員。2014 年関西大学環境都市工学部教授。現在、無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会、IEEE、IEEE-CS 各会員。