

# 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

北之馬 貴正<sup>1,a)</sup> 新居 英志<sup>1</sup> 安達 直世<sup>2</sup> 滝沢 泰久<sup>2</sup>

受付日 2017年5月9日, 採録日 2017年11月7日

**概要:** 空港, 駅, 工場, 病院などの大規模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. 既存方式は測位インフラとして測位設備や特性マップが十分に用意されていることを前提とし, 導入・維持に大きなコストを必要とするため, 大規模屋内施設への適用は非常に困難となる. 我々は, 無線センサネットワークにおいてトポロジ情報と 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ノード位置推定方式 (集約型 SOL) を提案している. 本論文では, 断続的に移動を繰り返すスマートデバイスへ集約型 SOL を適用し, その位置を追尾する集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder を提案する. さらに, シミュレーション評価からその有効性を示す.

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

## SmartFinder: Cloud-based Self Organizing Localization for Mobile Smart Devices in Large-scale Indoor Facility and Its Evaluation

TAKAMASA KITANOUMA<sup>1,a)</sup> EIJI NII<sup>1</sup> NAOTOSHI ADACHI<sup>2</sup> YASUHISA TAKIZAWA<sup>2</sup>

Received: May 9, 2017, Accepted: November 7, 2017

**Abstract:** In large-scale indoor facilities such as airports, train stations, factories, and hospitals, the locations of mobile smart devices provide important information for grasping the activity state of people and the utilization state of things. Consequently, many indoor localization systems for people and things have been proposed. However, such systems require a large amount of localization equipment or advanced measurements of environmental physical characteristics, and thus they strongly depend on the infrastructure for localization. In this paper, we propose SmartFinder as a solution with extremely low dependence on the infrastructure. This localization system applies our previously proposed Cloud-based Self-Organizing Localization to mobile smart devices, such as smartphones carried by people and BLE devices attached to things. SmartFinder can track the location of many mobile smart devices with only three anchor nodes and in real time.

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

### 1. はじめに

空港, 駅, 工場, 病院などの屋内施設において, 旧来から

人の活動状況やモノの利用状況の把握のため, それらの位置情報には高いニーズがある. この高いニーズに基づき, 屋内施設における人の位置を人が携帯するスマートフォンの位置, モノの位置をモノに添付された BLE デバイスの位置とし, それらのスマートデバイスを追尾する屋内位置推定方式の研究開発が進められている.

スマートデバイスの屋内位置推定方式の実用システムとして電波を用いた方式である iBeacon [1] や Indoor Messaging System (IMES) [2] があるが, これらはアンカ

<sup>1</sup> 関西大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

<sup>2</sup> 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@cm.kansai-u.ac.jp

ノードに対する Proximity (接近による発見) を用いるため、位置が既知とする多数のアンカノードを綿密に配置する必要があり、測位設備に強く依存する。一方、各種センサやフィンガープリンティングを用いて測位設備不要とする方式が提案されている。しかし、この方式は事前に十分な環境計測に基づく特性マップ作成を必要とする。すなわち、これらの方式は、屋内施設内にスマートデバイスを捕捉する高密度な測位設備/特性マップを構築および維持する必要があり、これらの導入、保守および拡張において著しいコストを必要とする。そのため、空港、駅、工場、病院などの大規模屋内施設への適用は、測位インフラの導入・維持に大きなコストを必要とし、非常に困難となる。以上のことから、大規模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・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る。

我々は、無線センサネットワーク (WSN) においてトポロジ情報と 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ノード位置推定方式 (集約型 SOL) [3], [4] を提案している。集約型 SOL は、各ノードが隣接ノード情報を取得し、その情報をクラウド環境上に集約して構成した仮想 WSN に自己組織化マップを応用した測位アルゴリズム、SOL (Self-Organizing Localization) を適用して位置推定を行う。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。集約型 SOL は実装実験において、近傍トポロジ情報のみから高い位置推定が可能であり、その有効性が確認されている [5], [6]。

本論文では、集約型 SOL のきわめて低い測位設備への依存性と高い位置精度に注目し、これをスマートデバイスへ適用拡張を図ることにより、大規模屋内環境において、アンカノード 3 点のみで多数の移動するスマートデバイスの位置を追尾する集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder を提案する。さらに、そのシミュレーション評価から有効性を示す。

## 2. 関連研究

屋内施設でのモバイルスマートデバイスの位置推定方式において、使用するデバイスの観点から利用もしくは研究されている方式を分類し概説する。

### 2.1 搬送波を用いた方式

#### 2.1.1 Range-Based 方式

Range-Based 方式は位置推定処理にノード間の距離情報を利用するため、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の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 Global Positioning System (GPS) [7] や Ultra Wide Band (UWB) を用いた方式 [8] がある。GPS は衛星との見通しが遮られるため屋内での使用ができない。UWB は非常に短いパルスを用いることでノード間距離を測ることにより高精度な位置推定が可能であるが、通信距離が短いため多数のアンカノードを必要とする。

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、Active Bat [9], Cricket [10], Ubisense [11] や Iterative Multilateration [12] がある。

Range-Based 方式はこれらの測距デバイスで得られたノード間距離を使用し、三辺測量を用いて位置推定を行う。TOA 方式や TDOA 方式を用いた方式は高精度な位置推定が可能であるが、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。さらに、各ノードは 3 つ以上のアンカノードとの見通し内 (Line-Of-Sight) 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。すなわち、これら方式は測位設備に強く依存する。

#### 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位置を推定する。代表的な方式として Centroid 方式 [13] や APIT 方式 [14] 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を図れるが、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 [1] や IMES [2] 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り、大規模屋内施設では膨大な数になる。すなわち、これらの方式も測位設備に強く依存する。

### 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) [15] 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、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、PDR も測位設備を前提としてこれに依存する。

### 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 [16] や電波を用いた方式 [17] 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り、これの作成のために環境物理特性の綿密な計測が事前に必要となる。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。

## 3. SmartFinder

我々が提案した集約型 SOL は無線センサネットワークにおいて測距デバイスや特性マップを用いず、アンカノード 3 点のみで多数の無線ノードの位置を推定できる。したがって、集約型 SOL は測位設備への依存性がきわめて低く、高い自律性を有する。この集約型 SOL をモバイルスマートデバイスへ適用拡張することにより、屋内施設において 3 定点のみで多数のモバイルスマートデバイスの位置推定を実現する方式を提案する。測位対象デバイス間の隣接情報を取得する必要があるため、測位対象となるモバイルスマートデバイスは 3.3.1 項に示す動作を行う。このような動作をスマートデバイスが行う環境として、製造業や建設業の作業現場など、モバイルスマートデバイスの管理者主体が存在する環境を想定する。人やモノの状態は移動と停止を断続的に繰り返すと想定し、モバイルスマートデバイス全体としては移動状態と停止状態のデバイスが混在する場合を想定する。また、モバイルスマートデバイスの移動速度は歩行速度を想定する。

### 3.1 システム構成

一般的に、大規模屋内施設におけるモバイルスマートデバイスの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。

集約型 SOL によりモバイルスマートデバイスの位置を

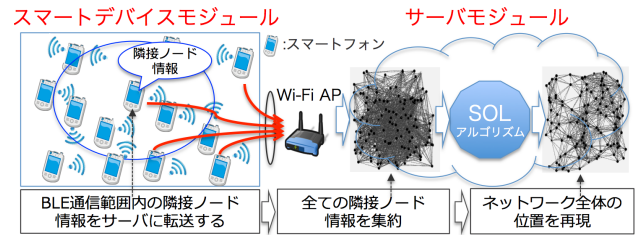


図 1 SmartFinder のシステム構成

Fig. 1 System components of SmartFinder.

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り返し実施する。

- 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 リストの集約とそれらの隣接ノード情報を基にした仮想メッシュトポロジ構築
- SOL アルゴリズムによる仮想メッシュトポロジのノード位置推定

しかし、この周期処理において次の課題がある。

- 隣接ノード ID の取得と転送におけるデータロスによる隣接ノード情報の欠損
- 人の移動速度に追従する位置推定処理の制約時間における精度の維持

これらの課題をそれぞれ、隣接ノード情報の伝搬損失を考慮した仮想メッシュトポロジ構成と大域/局所 SOL により解決し、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。

#### 3.1.1 スマートデバイスモジュール

スマートデバイスモジュールはスマートデバイスで動作する。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。スマートデバイスモジュールは以下の処理を周期的に繰り返す。

- 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

サーバモジュールはサーバで動作する。サーバモジュールは以下のシーケンスを周期的に繰り返し、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 隣接ノード情報の欠損を考慮した仮想メッシュトポロジ構成と更新

各ノードから集約された隣接ノード情報に基づき、集約環境において位置推定に用いる仮想メッシュトポロジを構成する。隣接ノード情報の欠損は以下の通信時に発生する可能性があり、これらは精度劣化の要因となる。

- BLE を用いた隣接ノード ID の取得時
- LTE/Wi-Fi を用いたシンクノードへの隣接ノード ID リスト集約時

隣接ノード情報取得に関する関連研究として文献 [18], [19] などがある。これらは、マルチホップ通信における信頼性の高い経路構築を目的とし、隣接ノード間における通信品質の取得制御を分散環境で行う。本方式は、マルチホップ通信における信頼性の高い経路構築が目的ではなく、集約環境において位置推定に用いる仮想メッシュトポロジの構成を目的とするため、隣接ノード間の通信品質の取得制御は不要である。隣接ノード情報の取得は、各ノードの自己 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 ID 取得のみから行い、上記の隣接ノード情報の欠損に対して、双方向リンクの仮想メッシュトポロジ構成と隣接ノード情報の保持により、集約環境で抑制する。

#### 3.2.1 双方向リンクの仮想メッシュトポロジの構成

個々のノードが持つ隣接ノード情報から隣接ノードを順次たどることにより仮想メッシュトポロジを構成すると互いの隣接関係の対称性を保証しない片方向リンクとなる。そのため、BLE で取得する隣接ノード ID が欠損すると精度劣化の要因となる。さらに、LTE/Wi-Fi を用いたシンクノードへの隣接ノード ID リストの集約が欠損すると、サーバにおいて欠損したデータの対象モバイルスマートデバイスの隣接ノードリストが全損し、位置更新が不可となる。これらの問題を抑制するため、クラウドサーバモジュール上で以下のように双方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成することにより、隣接ノード情報の取得ロスや転送ロスによるトポロジの欠損を補完する。

- ノード  $i$  の隣接ノード ID リストに含まれるノードをノード  $i$  の 1 次近傍ノードとする。これに加え、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。これにより、ノード  $i$  が取得するノード  $j$  の隣接ノード ID 欠損時やノード  $i$  が集約する隣接ノード ID リストの欠損時にノード  $j$  が持つノード  $i$  の隣接ノード ID によりノード  $i$  の欠損した隣接ノード ID を補完する双方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成する。
- 上記 1 次近傍ノード  $j$  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  $j$  を含むノードにおいて、ノード  $i$  およびノード  $i$  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  $j$  を中継する 2 次近傍ノードとする。

- 同様に、 $n$  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。
- 上記処理を再帰的に繰り返し、ノード  $i$  の近傍トポロジを拡大し、ネットワーク全体を通してノード  $i$  の多次近傍ノードを設定する。

以上の処理をサーバ上で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し、これを仮想メッシュトポロジとする。

#### 3.2.2 隣接ノード情報の保持

双方向リンクの仮想メッシュトポロジ構成は以下の場合に該当するリンクが失われるため補完することはできない。

- BLE で取得する隣接ノード ID が隣接ノード間の双方向で欠損した場合
- 互いに隣接ノードである 2 つのノードにおいて Wi-Fi/LTE を用いたシンクノードへの隣接ノード ID リストの集約が両方とも欠損した場合

この問題を抑制するため、サーバ上である一定期間保持した隣接ノード情報から仮想メッシュトポロジを構成する。

停止しているノード（停止ノード）間のトポロジは変化しないため、隣接ノード情報の長期間の保持ができる。一方、移動しているノード（移動ノード）とその近傍ノードとのトポロジは変化するため、移動速度に追いついた位置推定には直近の隣接ノード情報を必要とする。したがって、停止ノード間の隣接ノード情報保持期間  $t^s$  は長い期間とし、停止ノードと他のノードの隣接ノード情報保持期間  $t^m$  は短い期間とする。停止ノードおよび移動ノードにおいて上記に期間に基づいて隣接ノードリストを保持し、保持する隣接ノードリストを用いることで仮想メッシュトポロジの欠損を補完し、位置推定精度の維持を図る。

### 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

移動ノードと停止ノードの位置推定戦略を分ける (図 2)。停止ノードの位置推定は従来の集約型 SOL と同様に全体の仮想メッシュトポロジを用いて高精度に実施する (大域 SOL)。大域 SOL の計算時間のおおよその見積りを数秒から数十秒程度と想定し、大域 SOL の実行周期は数十秒程度の長周期とする。移動ノードの位置推定は、局所的な仮想メッシュトポロジの範囲に限定し、かつ高精度な推定位置を持つ停止ノードのみを用いる。この位置推定アルゴリ

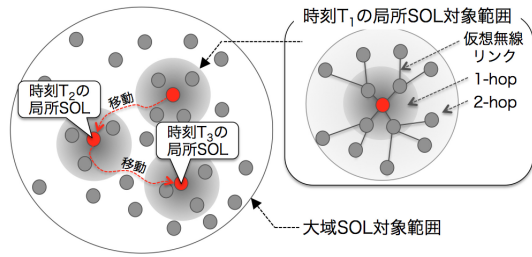


図 2 大域 SOL と局所 SOL  
Fig. 2 Global-SOL and Local-SOL.

ズムにより計算時間を短縮し、かつ精度維持を図る (局所 SOL)。局所 SOL の計算時間のおおよその見積りを 1 秒未満と想定し、局所 SOL の実行周期は 1 秒程度の短周期とする。大域 SOL と局所 SOL の並列処理により移動ノードと停止ノードの位置推定を行う。以降、大域/局所 SOL 内での位置推定のための繰り返し計算処理における 1 回あたりの処理単位をステップ、大域/局所 SOL 内の各ステップの計算過程位置を仮位置と定義する。隣接ノード ID リストの集約、仮想メッシュトポロジの構成、複数ステップからなる局所 SOL の繰り返しシーケンスにおける 1 回あたりのシーケンス単位を 1 サイクル、大域/局所 SOL による推定の結果を位置推定結果と定義する。

ノードの移動/停止状態を位置推定に用いる関連研究として文献 [20] があげられる。これは、最小二乗法による位置推定において、アンカノードとして静止端末を用いた制約増加と静止端末における測位計算頻度の抑制を目的とした分散型の Range-Based 方式である。本方式はノードの移動/静止状態を位置推定に用いる制約の選択にのみ用いるのではなく、移動ノードと停止ノードの位置推定アルゴリズムの戦略をそれぞれに求められる要件と制約条件に応じて変えている点において文献 [20] と明確に異なる。また、本方式は集約型である点や Range-Free 方式である点から前提が異なる。

### 3.3.1 大域 SOL

大域 SOL では十分な推定時間を利用できることから、我々が提案した集約型 SOL [3], [4] の位置推定アルゴリズムを適用する。よって、本節では大域 SOL として用いる集約型 SOL を概説する。大域 SOL では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  $V_i^{\{N\}}(t)$  を用い、ノード  $i$  の位置修正は次のように行う。

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

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

ただし、 $\tau_H$  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。

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

SOL アルゴリズムは位置修正に用いる近傍ノードをランダムに選択するため、同一のトポロジにおいても、位置

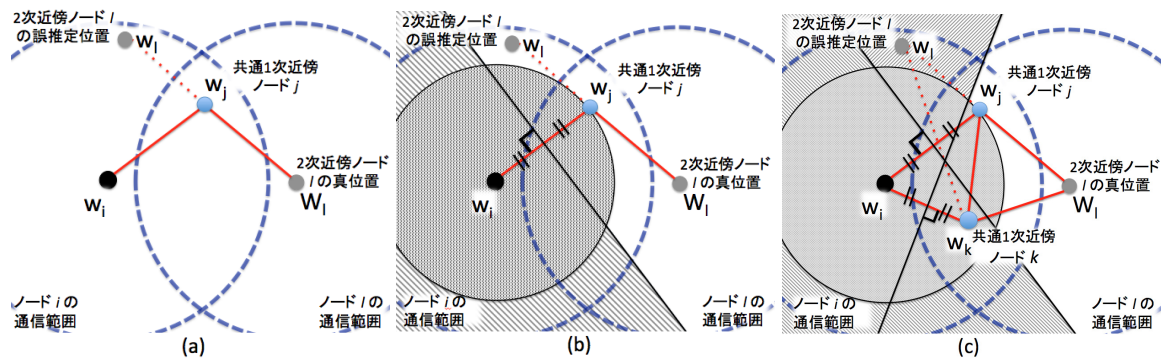


図 3 推定ノードのトポロジ矛盾領域  
Fig. 3 Contradictory area to actual geometry.

推定誤差は変動する。しかし、SOL アルゴリズムにおいてノードの真位置は不明であるので、位置推定誤差は算出できない。そのため、位置推定誤差の代わりに以下のトポロジ矛盾率の算出による推定ジオメトリ評価を行い、矛盾の少ないジオメトリを推定する。

図 3(a) にトポロジ矛盾の場合を示す。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、 $w_l$  はトポロジ矛盾となる位置である。図 3(b) に示すように、基準点  $w_i$  と  $w_j$  において、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 分割する (線分  $\overline{w_j - w_i}$  の垂直 2 等分線の左側が  $w_i$  に近い領域、右側が  $w_j$  に近い領域)。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、図 3(c) に示すように、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、誤推定の検知の可能性を高める。共通 1 次近傍群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。この領域判定値は推定されたジオメトリのトポロジ矛盾率を示すため、値が 0 に近づくともトポロジ矛盾のきわめて少ないジオメトリを推定できていることを表す。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推定結果とする。

### 3.3.2 局所 SOL

局所 SOL は人の移動速度に追従する位置推定処理の制約時間における精度の維持を実現する。そのため、局所 SOL においては以下の処理を削減することで位置推定処理を簡略化する。

- 停止ノードの位置は大域 SOL により高精度に推定されていると仮定し、移動ノードのみを局所 SOL の仮位置修正の対象として停止ノードの仮位置修正は実施

しない。

- 移動ノードの想定速度において、局所 SOL 実行周期あたりの移動距離は小さく、局所的な移動にとどまるため、その狭域の近傍トポロジによる位置推定が可能である。したがって、大域的な多次近傍ノードを用いた仮位置修正を行わず 2 次近傍ノードまでとし、それに相当するステップを削減する。

さらに、下記により精度維持を図る。

- 移動ノードの移動速度および更新周期から、その移動は局所的な移動であることを想定し、直近の位置推定結果からの漸次的な更新とする。また、大域 SOL より少ない位置更新回数で大域 SOL と同様の収束を得るため、大域 SOL の学習係数に比べて小さい学習係数を局所 SOL で用いる。
- 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を基準点とし、移動ノードの仮位置修正には停止ノードのみを用いる。

これらにより、計算時間の短縮と精度維持を両立させる。

大域 SOL に比べて小さい局所 SOL の学習係数は、大域 SOL を基準とした局所 SOL の仮位置更新ステップ削減数に対応させて設定する。 $S^g$  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すると、仮位置更新ステップの削減数は  $(S^g - S^l)$  で表され、大域 SOL における仮位置更新ステップの終盤過程相当である  $(S^g - S^l)$  から  $S^g$  の学習係数を局所 SOL における学習係数として用いる。すなわち、局所 SOL における学習係数の初期値  $\alpha_i(0)$  は大域 SOL における  $S^l$  回の仮位置修正残存時の学習係数  $\alpha_i(S^g - S^l)$  とする。これを以下により算出する。ただし、 $t$  回目の学習係数  $\alpha_i(t)$  は式 (3) に従う。

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

大域 SOL はホップ数をノード間の相対距離 (ノード間相対距離) として用い、相対座標上のジオメトリを推定した後にアンカノードを用いた座標変換を行うことで絶対座標上のジオメトリを得る。一方、移動ノードから 2 次近傍までの局所トポロジを用いる局所 SOL は、アンカノード

を基準点とする位置更新やアンカノードを用いた座標変換ができない。したがって、局所 SOL は、移動ノードからの 2 次近傍までの停止ノードにおいて大域 SOL で推定されたその位置を基準点とし、ノード間ホップ数のスケールを勘案したノード間スケール調整距離を用いて、位置推定を行う。ノード間スケール調整距離は各ホップ数のスケールを勘案するため、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  $\bar{r}^{\{H\}}$  を以下により算出し、これをスケール調整に用いる。ただし、絶対座標変換後の推定ジオメトリにおけるノード  $i$  の集合を  $N$ 、その集合の要素数を  $|N|$ 、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  $N^{\{H\}}$ 、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。

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

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]  $i$  が移動ノードであれば、 $i$  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。

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

この修正ベクトル  $V_i^{\{N\}}(t)$  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. 評価

シミュレーション諸元を表 1 に示し、SmartFinder のパラメータを表 2 に示す。隣接ノード情報の更新周期および局所 SOL 実行周期である 1 サイクルは 1 秒と想定する。スマートデバイスにおける BLE の通信範囲は約 10 m のクラス 2 を想定する。この通信範囲内に存在するノードからの広告ブロードキャストにおいて、無線通信のデータロスによる欠損が生じることを想定し、欠損確率を定める（隣接ノード ID 取得時の欠損確率）。また、隣接ノードリストをサーバに転送する際の通信に欠損確率を定める（集約時の欠損確率）。

### 4.1 評価方法

推定位置精度の評価として絶対位置評価を行う。絶対位置評価は、推定された各ノードの位置と真位置のユーク

表 1 シミュレーション諸元

Table 1 Simulation parameters.

フィールド範囲 ( $m \times m$ )	50 × 50
ノード数	100, 200, 300
無線通信半径 ( $m$ )	10
1 サイクルあたりの移動量 ( $km/h$ )	3.6
移動ノードの割合	0.5
ノードの移動/停止遷移間隔 (サイクル)	15
隣接ノード ID 取得時の欠損確率	0.0, 0.1
隣接ノード ID リスト集約時の欠損確率	0.0, 0.1

表 2 SmartFinder のパラメータ

Table 2 Parameters for SmartFinder.

アンカノード数	3
アンカノード座標	(7.5, 10.65), (42.5, 10.65), (25, 43.65)
減衰定数 $\eta$	0.992
大域 SOL の実行周期 (サイクル)	10
局所 SOL の実行周期 (サイクル)	1
大域 SOL における仮位置修正回数 $S^g$	500
局所 SOL における仮位置修正回数 $S^l$	100
停止ノード間の隣接ノード情報保持期間 $t^s$ (サイクル)	30
停止ノードと他のノード間の隣接ノード情報保持期間 $t^m$ (サイクル)	1

リッド距離の平均である位置推定誤差  $ERR_{ave}$  を用いて評価する。 $ERR_{ave}$  は次の式 (10) のように求める。 $W_i$  はノード  $i$  の真位置、 $w_i$  は推定位置を示す。

$$ERR_{ave} = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N |W_i - w_i| \quad (10)$$

これにより、個々のノード位置が絶対位置として正しく推定されているかを評価する。

評価は以下の方式と比較する。

- Centroid
- 従来方式の集約型 SOL
- 片方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成し隣接ノード情報を保持しない SmartFinder

Centroid は iBeacon 相当として比較に用いる。Centroid の位置推定誤差はアンカノード数に依存するため、以下のようアンカノードを配置する。

- 10 m のグリッド間隔に 25 個
- 5 m のグリッド間隔に 100 個
- 2.5 m のグリッド間隔に 400 個

従来方式の集約型 SOL は大域 SOL のみを用いる SmartFinder に相当する。1 サイクルごとに大域 SOL を適用し、大域 SOL のみで位置推定を行う集約型 SOL を比較に用いることで、大域 SOL と局所 SOL に分けた SmartFinder の位置推定戦略の有効性を示す。さらに、片方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成し隣接ノード情報を保持しな

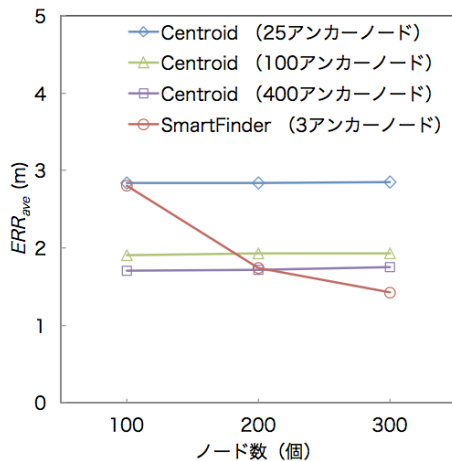


図 4 Centroid と SmartFinder の平均絶対位置推定評価  
Fig. 4  $ERR_{ave}$  in Centroid and SmartFinder.

い SmartFinder と比較し、双方向リンクの仮想メッシュトポロジ構成と隣接ノード情報の保持の有効性を示す。

## 4.2 評価結果

### 4.2.1 Centroid との比較評価

図 4 は 100, 200, 300 ノードにおいて 300 サイクルを 10 回試行した Centroid と SmartFinder の平均絶対位置推定評価を示す。Centroid において各ノードは独立した位置推定を行うため、ノード数が増加しても位置推定誤差は変化しない。アンカノード数の増加に従って位置推定誤差は減少するが、その減少の幅は小さく収束傾向となる。フィールドの端にノードが位置する場合、無線通信範囲におけるアンカノードの分布が異質性となるため、推定位置としての重心は真位置よりフィールドの内側となり位置推定誤差が大きくなる。そのため、アンカノードを 2.5m のグリッド間隔に 400 個設置しても位置推定誤差は約 1.75m となる。一方、SmartFinder はノード数の増加に従い位置推定誤差が減少する。ノード数が 200 個の場合、アンカノード 3 個のみを用いる SmartFinder の位置推定誤差はアンカノードを 2.5m のグリッド間隔に 400 個設置した Centroid と同等となる。さらに、ノード数が 300 個の場合、アンカノード 3 個のみで位置推定誤差は約 1.42m となり、アンカノードを 2.5m のグリッド間隔に 400 個設置した Centroid よりも位置推定誤差が小さくなる。すなわち、ノード数が 200 個以上の場合、アンカノード 3 個のみを用いる SmartFinder はアンカノードを 400 個使用する Centroid より高精度な位置推定が可能となる。

### 4.2.2 局所 SOL の有効性評価

図 5 は SmartFinder と集約型 SOL の 300 サイクル間の位置推定誤差の推移を示す。集約型 SOL は移動ノードの位置を推定するために大域 SOL を毎サイクルごとに実施する。すなわち、集約型 SOL は短い時間で大域 SOL を実行するため、トポロジ矛盾の排除が不完全となる場合があ

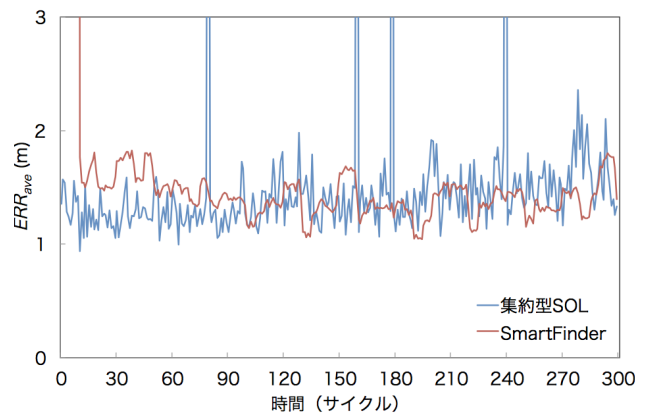


図 5 SmartFinder と集約型 SOL の 300 サイクル間の絶対位置推定評価の推移

Fig. 5  $ERR_{ave}$  transitions in SmartFinder and Cloud-SOL up to 300 cycles.

り、位置推定誤差が大きく劣化する場合がある。一方、大域 SOL 実施後となる 10 サイクル以降の SmartFinder は、位置推定誤差の分散が約 0.02 となり、約 0.9 となる集約型 SOL と比べて安定した位置推定誤差となる。これは、大域 SOL と局所 SOL に分けた位置推定戦略により、大域 SOL による停止ノードの推定と局所 SOL による移動ノードの推定において、それぞれ以下の効果を得るためである。

- 大域 SOL の実行周期を長周期とし、大域 SOL の繰返し回数を増加させ、トポロジ矛盾が最小となるジオメトリが選択可能となることで、停止ノードの高精度な位置推定結果を連続して得る。
- 局所 SOL の実行周期を短周期とし、大域 SOL による停止ノードの高精度な位置推定結果を基準点として用いることで、精度を維持した移動ノードの位置推定結果を短時間で得る。

したがって、大域 SOL と局所 SOL に分けた SmartFinder の位置推定戦略が有効に機能しているといえる。

### 4.2.3 大域 SOL と局所 SOL の詳細評価

図 6 は SmartFinder における大域 SOL の位置推定結果を持つノードと局所 SOL の位置推定結果を持つノードの 300 サイクル間の絶対位置推定評価を示す。これにより、大域 SOL と局所 SOL に分けた位置推定精度の詳細評価を行う。10 サイクルまでは、大域 SOL は未実施であるため、停止ノードの位置はランダムな位置となる。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。これにより、大域 SOL と局所 SOL の位置推定誤差は約 37m を示す。10 サイクル以降は大域 SOL と局所 SOL の位置推定結果が反映されるため高精度な位置推定結果を得る。

10 サイクル以降の大域 SOL の位置推定誤差の変動は以下に分類できる。

- 10 ステップごとの停止ノードの位置推定結果の更新に



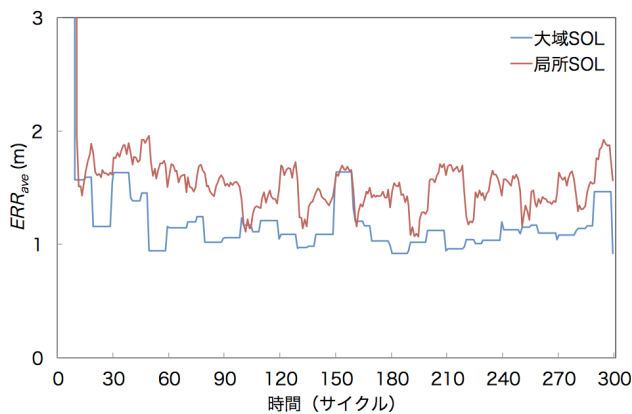


図 6 SmartFinder における大域 SOL の位置推定結果を持つノードと局所 SOL の位置推定結果を持つノードの 300 サイクル間の絶対位置推定評価の推移

Fig. 6  $ERR_{ave}$  transitions in Global-SOL and Local-SOL up to 300 cycles.

よる変動

- 15 ステップごとのノードの移動/停止遷移により大域 SOL の位置推定結果を持つ停止ノードの減少による全体平均の微変動
- 30 ステップごとの上記の変動と微変動が同時に発生する変動

一方、局所 SOL はステップごとに推定位置を出力するため、位置推定誤差はステップごとに変動する。ただし、局所 SOL は大域 SOL により推定された停止ノードの位置推定結果を用いるため、局所 SOL の位置推定誤差は基準点として利用可能な停止ノード数に依存する。15 ステップごとのノードの移動/停止遷移において、大域 SOL の位置推定結果により高精度な位置を持ついくつかの停止ノードが移動ノードとなり、局所 SOL の基準点の対処外となる。一方、いくつかの移動ノードは停止ノードとなるが、大域 SOL が実施前であるため、これも局所 SOL の基準点として利用できない。したがって、局所 SOL において基準点として利用可能な停止ノード数が減少するために、位置推定精度は低下する傾向があるがその量は約 0.5m にとどまる。すなわち、局所 SOL は基準点として利用可能な停止ノード数が減少しても移動ノードの精度劣化が少ない位置推定が可能である。

#### 4.2.4 データ欠損時の評価

図 7 は隣接ノード ID 取得時の欠損確率と隣接ノード ID リスト集約時の欠損確率の両方が 0.1 の場合において、双方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成し隣接ノード情報を保持する SmartFinder と片方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成し隣接ノード情報を保持しない SmartFinder の 300 サイクルを 10 回試行した平均絶対位置推定評価を示す。

まず、片方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成し隣接ノード情報を保持しない SmartFinder を考察する。隣接

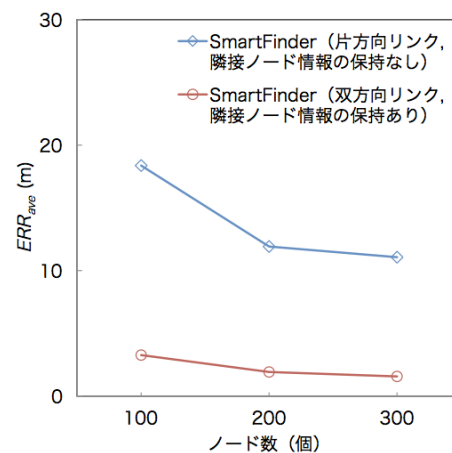


図 7 各通信欠損確率 0.1 の場合における各 SmartFinder の平均絶対位置推定評価

Fig. 7  $ERR_{ave}$  in SmartFinder with communication loss rate 0.1.

ノード ID 取得時に欠損すると、仮想メッシュトポロジ構成において、その欠損した隣接ノード ID は 1 次近傍ノードとして設定されず、他のノードを中継した多次近傍ノードとして設定される。すなわち、本来の 1 次近傍ノードを多次近傍ノードとして構成した不正を含むトポロジ構成となるため位置推定精度が劣化する。また、隣接ノード ID リスト集約時に欠損すると、仮想メッシュトポロジ構成において、送信元ノードの隣接関係が全損するため近傍ノードの設定が不可となる。すなわち、すべてのノードとの隣接関係が不明となるため近傍ノードを用いた位置修正が不可となる。したがって、修正の初期位置として生成するランダムな位置が推定位置となるため、位置推定精度が劣化する。さらに、ランダムな推定位置となるノードの広告ブロードキャストを受信したノードから集約された隣接ノード ID リストにはそのランダムな推定位置となるノード ID が含まれるため、片方向リンクのトポロジ構成はランダムな推定位置となるノードを含むトポロジ構成となる。このトポロジ構成で多次近傍ノードを用いた位置修正を行うと、ランダムな推定位置となるノードとの位置関係を再現するため、推定ジオメトリはトポロジ矛盾を多く含み不正となる。したがって、隣接ノード ID リスト集約時の欠損が発生すると送信元ノードのみの精度劣化にとどまらず、ジオメトリ全体に精度劣化が伝搬することで位置推定誤差は大きく劣化する。

一方、双方向リンクの仮想メッシュトポロジを構成し隣接ノード情報を保持する SmartFinder は隣接ノード ID 取得時の欠損と隣接ノード ID リスト集約時の欠損を仮想メッシュトポロジ構成において補完するため位置推定精度が劣化しない。すなわち、双方向リンクの仮想メッシュトポロジ構成と隣接ノード情報の保持による隣接ノード情報の欠損を想定した仮想メッシュトポロジ構成方式が有効に機能しているといえる。

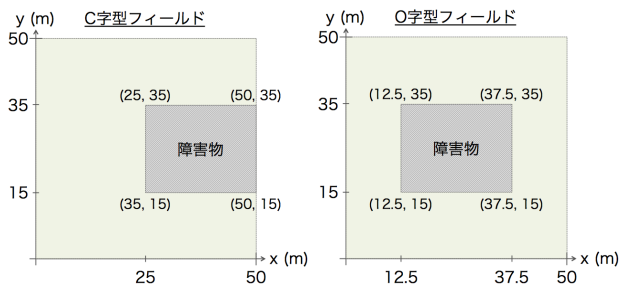


図 8 C 字型フィールド (左) と O 字型フィールド (右)  
 Fig. 8 C-shaped field (left) and O-shaped field (right).

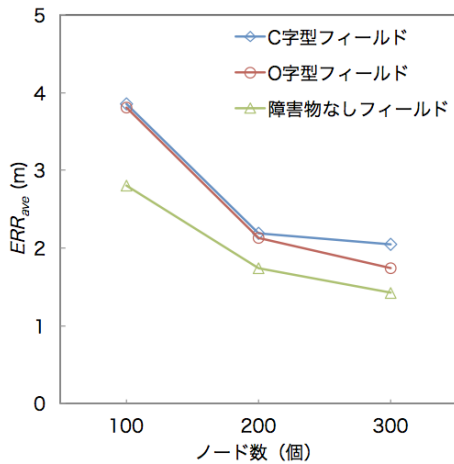


図 9 C 字型フィールド, O 字型フィールド, 障害物なしフィールドにおける SmartFinder の平均絶対位置推定評価  
 Fig. 9  $ERR_{ave}$  in SmartFinder on C-/O-shaped fields and free field.

#### 4.2.5 障害物を含むフィールドでの評価

大規模屋内施設は凸包, 非凸包, void 領域を組み合わせたフィールドとなることを想定して, 障害物を含むフィールドでの評価を行う. 障害物がないフィールドは凸包であるため, 障害物がある環境として, フィールドが非凸包となる C 字型フィールドとフィールドに void 領域を含む O 字型フィールドにおける評価を行う. 図 8 に C 字型フィールドと O 字型フィールドにおける障害物の配置座標を示す.

図 9 に C 字型フィールドと O 字型フィールドにおける 300 サイクルを 10 回行った SmartFinder の平均絶対位置推定評価を示す. 障害物の有無での比較をすると, 障害物があるフィールドは障害物がないフィールドと比較して, 20~40%程度の精度低下が見られる. 障害物がないフィールドは劣角が 4 カ所, 辺が 4 辺となる. 一方, O 字型フィールドは劣角が 4 カ所, 優角が 4 カ所, 辺が 8 辺, C 字型フィールドは劣角が 6 カ所, 優角が 2 カ所, 辺が 8 辺となる. 各ノードが持つ多次近傍ノードが位置する方向の分散状態を, 象限の 4 方向で考えると, 劣角, 優角, 辺, にそれぞれ近接するノードの近傍ノードは, 1 方向, 3 方向, 2 方向に偏る. すなわち, O 字型フィールドと C 字型フィー

ルドは障害物により, 劣角, 優角, 辺が増えて, 多次近傍ノードが位置する方向に偏りが発生する. 大域 SOL/局所 SOL は近傍ノードの方向に偏りがある場合に精度低下する傾向があるため, 障害物があるフィールドは障害物がないフィールドと比較して, 精度低下すると考えられる. 障害物がある C 字型フィールドと O 字型フィールドを比較すると, ノード数が 100 個と 200 個の場合, O 字型フィールドで構成される環状のトポロジの一部が疎となる, もしくは分断され, C 字型フィールドで構成されるトポロジに近くなるため, 位置推定精度は同等となる. ノード数が増加すると, 上記のトポロジが発生しにくくなるため, 前述の近傍ノードの方向の偏りが精度に影響する. すなわち, C 字型フィールドは O 字型フィールドと比較して, 近傍ノードの方向に偏りがあるため精度低下すると考えられる. 以上より, 障害物があるフィールドは障害物がないフィールドに比べ 20~40%程度の精度低下があるが, 障害物があるフィールドでの SmartFinder の精度は障害物がないフィールドで 2.5m のグリッド間隔にアンカノードを 400 個設置した Centroid と比較し, 200 ノードで同等であり, 300 ノードでそれを上回るため, 十分に高精度である.

#### 5. まとめ

本論文では, 断続的に移動を繰り返すスマートデバイスへ集約型 SOL を適用し, その位置を追尾する集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder を提案した. さらに, シミュレーション評価から以下の有効性を確認した.

- 大域/局所 SOL による拡張 SOL アルゴリズムにより人の移動速度に対して追尾する位置推定がアンカノード 3 点で可能であり, ノード数が増えると位置推定誤差が小さくなる.
- 隣接ノード情報の欠損を想定した仮想メッシュトポロジ構成方式により隣接ノード情報の欠損時でも精度劣化なく位置推定が可能である.
- 障害物を含むフィールドにおいても高精度な位置推定が可能である.

#### 参考文献

[1] Nic, N.: Apple iBeacon technology briefing, *Journal of Direct, Data and Digital Marketing Practice*, Vol.15, No.3, pp.222-225 (2014).  
 [2] 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).  
 [3] Kitanouma, T., Takashima, Y., Adachi, N. and Takizawa, Y.: Cloud-based Self-Organizing Localization for wireless sensor networks in mixture environments of LOS and NLOS, *Proc. IEEE IWCMC 2015*, pp.1230-1235 (2015).  
 [4] 北之馬貴正, 高島優斗, 安達直世, 滝沢泰久: NLOS 混

- 在環境における無線センサネットワークの集約型自己組織化ノード位置推定方式とその精度評価, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.2, pp.494-505 (2016).
- [5] Kitano, T., Adachi, N. and Takizawa, Y.: Cloud-based self-organizing localization with virtual network topology for wireless sensor networks and its implementation, *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp.1-7 (2016).
- [6] 北之馬貴正, 新居英志, 安達直世, 滝沢泰久: 無線センサネットワークにおける仮想トポロジを用いた集約型自己組織化ノード位置推定方式とその実装評価, 情報処理学会論文誌, Vol.58, No.2, pp.448-460 (2017).
- [7] Hofmann-Wellenhopf, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.: *Global Positioning System, Theory and Practice*, 4th ed. (1997).
- [8] Mikhaylov, K., Petäjälä, J., Hämmäläinen, 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).
- [9] Harter, A., Hopper, A., Steggle, P., Ward, A. and Webstar, P.: The anatomy of a context-aware mobile applications, *Proc. ACM/IEEE MobiCom 99*, Vol.8, pp.187-197 (1999).
- [10] Priyantha, N., Miu, A., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *Proc. MOBICOM 2001* (2001).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] He, T., 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).
- [15] 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).
- [16] Vandermeulen, D., Vercauteren, C. and Weyn, M.: Indoor localization using a magnetic flux density map of a building, *The 3rd International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, pp.42-49 (2013).
- [17] Kawauchi, K. and Rekimoto, J.: FineMesh: High-Density Sampling Platform Using an Autonomous Robot, *2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom)*, pp.477-486 (2012).
- [18] Patel, P.I., Bhavsar, N.C. and Soni, N.R.: Neighbor Discovery in Wireless Ad Hoc Networks: A Review, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.5, No.3, pp.1227-1230 (2014).
- [19] Comejo, A., Viqar, S. and Welch, L.J.: Reliable Neighbor Discovery for Mobile Ad Hoc Networks, *Ad Hoc Networks*, Vol.12, pp.259-277, Elsevier (2014).

- [20] 樋口雄大, 藤井彩恵, 山口弘純, 東野輝夫: 断続的に移動する無線端末群の位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.1, pp.197-208 (2011).



北之馬 貴正 (正会員)

2014年関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業, 2016年関西大学大学院博士課程前期課程修了。現在, 関西大学大学院博士課程後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。



新居 英志 (学生会員)

2015年関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業, 2017年関西大学大学院博士課程前期課程修了。現在, 関西大学大学院博士課程後期課程において無線センサネットワークにおけるセキュリティ等の研究に従事。



安達 直世 (正会員)

1996年立命館大学理工学部電気電子工学科卒業。1998年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。同年三洋電機(株)入社。2001年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。同年より同大情報科学研究科助手。2006年関西大学工学部助手。2007年関西大学環境都市工学部助教。情報通信システムのモデル化と性能評価に関する研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会, システム制御情報学会, 土木学会各会員。



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。