

# 自己組織化位置推定方式 SmartFinder 精度改善に関する 一考察

立本 航平<sup>1</sup> 北之馬 貴正<sup>2</sup> 滝沢 泰久<sup>3</sup>

**概要：**我々は広い屋内空間に遍在する多数のスマートデバイスの位置を定点3点のみで高精度で推定する自己組織化位置推定方式 (SmartFinder) を提案している。SmartFinder では計測したデバイス間の RSSI を基に SOL アルゴリズムにより各デバイスの相対位置を算出し、当該相対位置をアンカーデバイスの推定相対位置と真位置を用いて絶対位置へ変換し、各デバイスを位置推定する。従って、SmartFinder の全体位置精度はアンカーデバイスの推定相対位置の精度に依存する。本稿では SmartFinder においてアンカーデバイス間の位置関係を真位置関係に対応させ、アンカーデバイスの推定相対精度の誤差を排除した場合の精度についてシミュレーション評価し、考察する。

## Study on accuracy for Self-Organizing Localization with multiplexed topology

KOUHEI TATEMOTO<sup>1</sup> TAKAMASA KITANOUMA<sup>2</sup> YASUHISA TAKIZAWA<sup>3</sup>

### 1. はじめに

近年、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、スマートデバイスの位置情報は非常に重要である。このため、多様な屋内位置推定方式が提案されており、その代表例として電波を用いる iBeacon[1] や Indoor Messaging System(IMES)[2]、各種センサを用いるフィンガープリンティングがある。前者は環境内に多数の定点ビーコンを必要とし、後者は事前にセンサ取得情報に応じた環境の物理情報マップの作成が必要である。すなわち、いずれにおいても位置推定のための十分な設備を必要とし、その精度は数 m オーダーである。しかし、建設現場や小売現場は日々環境が変動し、さらに建設現場では十分な測位設備を常時用意することが困難である。

北之馬らは、屋内の集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder[3] を提案している。SmartFinder はスマートデバイス間のトポロジ情報を用いて相対座標を算出し、3 定点のアンカーデバイスを用いてアフィン変換を行い、多数のスマートデバイスの位置を取得する自律型

屋内測位技術であり、測位設備の依存性が極めて低い。

SmartFinder は位置推定時、ノードが観測した RSSI を基に 3 定点のアンカーノードも含めた相対座標を算出し、アフィン変換を経て絶対座標を算出する。そのためアンカーノードの推定相対精度に応じて、トポロジ全体の推定精度が劣化してしまうという課題がある。本稿はこの課題を解決するため、位置推定時にアンカーノード間の位置関係を真位置関係に対応させ、観測した RSSI を基にした近似距離を用いて位置修正を行うことによって、アフィン変換によって起きる精度劣化を排除する方式を提案する。さらに実機データを用いてシミュレーション評価し、その有効性を考察する。

### 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

<sup>1</sup> 関西大学大学院 理工学研究科

<sup>2</sup> 関西大学 先端科学技術推進機構 客員研究員

<sup>3</sup> 関西大学 環境都市工学部

報を利用するため、センサノードにノード間通信機能の他に測距機能を持たせる必要があり、例としては GPS (Global Positioning System), Active Bat がある。また、Range-based におけるノード間距離の測距には、TDOA (Time Difference Of Arrival), TOA (Time Of Arrival), RSSI (Received Signal StrengthIndicator) が利用されている。

TDOA 方式は送信側と受信側で異なる伝送媒体による通信を行い、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[6] や Cricket[7] がある。これらの方式は、GPS を用いた位置推定方式では困難であった屋内における位置情報の取得を想定している。

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 (超音波、電波等) 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の 1 つに現在実用化されている位置推定技術として、最も代表的な米国が運用している GPS (Global Positioning System)[8] が挙げられる。

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 つ以上のアンカー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ー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 は、ノード間の距離情報を利用しないため、センサノードに測距機能を持たせる必要がなく、比較的単純なデバイスのみで位置推定を行うことができる。Range-free の例としては、Centroid[9], DV-Hop[10], APIT[11] がある。

Centroid 方式は、複数のアンカーノードからの通信を幾つか重ね合わせることで位置推定を行う方式である。はじめに、アンカーノードが自身の位置情報を含んだパケットを一定の時間間隔でブロードキャスト送信する。その後、位置推定処理を行うノードはこのパケットを受信することで自身と通信可能なノードの位置情報を取得し、それらの重心を利用し自身の位置を推定する。アンカーノードによるブロードキャスト送信以外に特別な通信を行わないため、ノード自体の処理は必要最小限で済むが位置推定精度は低い。

DV-Hop 方式は、少数のアンカーノードとそのアンカーノードからのホップ数を利用して位置推定処理を行う方式である。そのため、サーバを持たない分散型のアドホック

ネットワークでの利用も可能であり、無線センサネットワークを利用したサービスにおいても適用可能であると考えられる。前述の Centroid 方式よりは高精度であるが、アンカーノードとの推定距離は大きな誤差を含んでいる場合が多く、高精度な位置情報は得られない。

APIT 方式は、複数のアンカーノードの組み合わせから作成可能な全ての三角形に対して、位置推定対象のノードが外側にあるか内側にあるかを判定することで自身の位置を推定する方式である。この方式の位置推定精度は、アンカーノードにより構成可能な三角形の数に依存するため、高精度な位置推定を行うためには多数のアンカーノードが必要となる。

実用システムの iBeacon や IMES もこの方式に分類できるが、電波強度を用いたアンカー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ーノードを配置する必要がある、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等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 等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ー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 [13] や電波を用いた方式 [14] 等がある。これらの方式はアンカー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. 集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder

ここで、SmartFinder[3] について概説する。

### 3.1 システム構成

SmartFinder 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される(図1)。スマートデバイスでは BLE を用いて隣接トポロジ情報を取得し、それを Wi-Fi/LTE によりサーバモジュールへ転送する。サーバモジュールは全てのスマートデバイスの隣接するデバイスの情報を集約し、仮想メッシュネットワークを構成する。この仮想メッシュネットワークに、SOL(Self-Organizing- Localization) アルゴリズムを適用して、スマートデバイスの位置を推定する。このシーケンスを周期的に繰返し、継続的にスマートデバイスの位置を推定する。

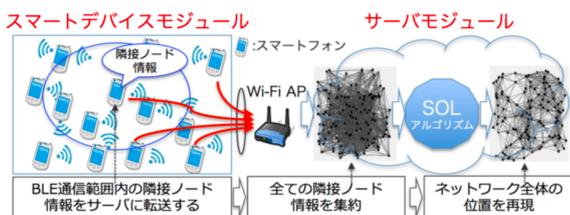


図1 SmartFinder のシステム構成 ([3] pp2293, 図1より引用)

#### 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 ID および RSSI の取得
- 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 および RSSI の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。

- 全てのモバイルスマートデバイスの隣接ノード ID および RSSI のリストと移動/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 および RSSI のリストに基づき、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 を適用することで全てのスマートデバイスの位置を推定する

### 3.2 仮想メッシュネットワークの構成手法

#### 3.2.1 隣接トポロジ情報の欠損の考慮

隣接トポロジ情報の欠損は以下の通信時に発生する可能

性があり、これらは位置推定精度の劣化要因となる。

- BLE を用いた隣接ノード ID の取得時
- Wi-Fi/LTE を用いたサーバへの隣接ノード ID リスト集約時

これらの欠損を補完するため、サーバモジュール上で一定期間保持した隣接トポロジ情報から双方向リンクの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トポロジ情報を必要とする。従って、停止しているノード (停止ノード) 間の隣接トポロジ情報保持期間  $t^s$  は長い期間とし、移動ノードと他のノード間の隣接トポロジ情報保持期間  $t^m$  は短い期間とする。 $t^s$  と  $t^m$  の期間だけサーバモジュールに蓄積された隣接ノード情報を用いて仮想メッシュネットワークの構成を行う。

#### 3.2.2 仮想メッシュネットワークの構成

隣接ノード間の RSSI 強度から求めたノード間リンク長を用いてサーバモジュールを構成する。まず、隣接トポロジ情報およびノード間リンク長から仮想メッシュネットワークの構成を行う。式 (1) を用いて、仮想メッシュネットワーク内のノード間相対距離を定義する。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距離  $d_{ij}$  とする。

$$d_{ij} = \min(d(p_{ij}) | S(p_{ij})), d(p_{ij}) = \sum_{l_{xy} \in p_{ij}} l_{xy} \quad (1)$$

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  $i$  からノード  $j$  までの経路長、 $S(p_{ij})$  は  $p_{ij}$  の集合とする。

#### 3.2.3 集約型 SOL を用いたスマートデバイスの位置推定

集約型 SOL は隣接ノード間相対距離を基に位置情報の修正を繰り返してネットワークの形状の再現を行う。以後、位置推定のための1回の計算処理を1ステップとする。各ステップでの計算過程の推定位置を仮位置とする。隣接ノード ID 情報の取得/集約、仮想メッシュネットワークの構成、集約型 SOL の計算終了までの過程を1サイクルとし、集約型 SOL の推定結果を位置推定結果とする。

#### 3.2.4 SOL アルゴリズム

SOL アルゴリズムは自己組織化マップを応用し、以下の手順で、全くランダムなネットワークのジオメトリから BLE 隣接間 RSSI によるノード間距離に基づき位置修正を繰り返すことでオリジナルジオメトリを再現する。

**Step1.** 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。

**Step2.** ノード  $i$  において位置修正を行う対象ノードを選択する。位置修正対象ノードは集約型 SOL におけるノード間相対距離が  $t$  回目の修正における閾値  $\gamma^g(t)$  以下のノードからランダムに 1 つを選択して、これをノード  $m$  とし、ノード  $i$  と  $m$  との位置推定を行う場合、ノード間相対距離  $d_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}$  を用いてノード  $i$  の修正ベクトル  $V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}$  を次のように定義する。

$$V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}} = \frac{d_{im}^{\{\gamma^g(t)\}} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|} (w_i(t) - w_m(t)) \quad (2)$$

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

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{R\}}(t) + V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)) \quad (3)$$

$$\alpha_i(t) = \eta \alpha_i(t-1) (0 < \eta < 1) \quad (4)$$

$\alpha_i(t)$  はノード  $i$  の  $t$  回目の修正における学習係数を表す。初期の段階では全体的なメッシュネットワークの形状の再現を行い、位置修正が進むほどに局所的な位置推定を行う。そのため仮位置修正回数に応じて  $\gamma^g(t)$  の値を減少させる必要がある。以上を考慮すると  $\gamma^g(t)$  は式 (5) により決定する。

$$\gamma^g(t) = \begin{cases} d^{max} - \frac{t(d^{max} - 2R)}{S} & (d^{max} > 2R) \\ 2R & (otherwise) \end{cases} \quad (5)$$

$S$  は集約型 SOL での仮位置修正回数、 $d^{max}$  は全ノード間距離長の最大値、 $R$  はノード間経路長の期待値から算出した近傍半径を表す。

各ノードにおいて Step2 の位置修正の繰り返しで得られる推定位置はネットワーク内における相対位置である。この相対位置をアンカーノードの真位置と推定位置を用いて絶対位置へ変換しジオメトリの絶対位置を得る。SOL アルゴリズムにおいて、仮想ネットワーク内の移動しているノード (移動ノード) と停止しているノード (停止ノード) の位置推定戦略を変更する。停止ノードは従来の集約型 SOL と同様に、仮想無線ネットワーク全体のトポロジを用いて高精度な位置推定を実施する (大域 SOL)。大域 SOL の実行周期は長周期とし、数十秒程度を想定する。移動ノードは、移動ノードとその近傍の高精度な推定位置をもつ停止ノードによる局所的な仮想無線ネットワークに位置推定アルゴリズムを適用することで精度劣化なしに計算時間を短縮する (局所 SOL)。局所 SOL の実行周期は短周期とし、1 秒程度を想定する。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。

### 3.2.5 多重化を用いた SmartFinder

SmartFinder はノード数が増え、トポロジ情報が増すとトポロジにおける制約条件が強化されて精度向上する特性がある。既存の SmartFinder は移動ノード、停止ノードと

もに現時時刻  $t$  において取得したトポロジ情報を用いて位置推定を行なっているため、実ノード数に依存した精度しか得られない。トポロジ多重化を用いた SmartFinder は移動ノードを離散時間において異なる位置にある異なるノードとして多重化する。すなわち、現在時刻  $t$  における移動ノードの位置  $x(t)$  での隣接トポロジ情報だけでなく、移動ノードの過去の移動位置  $x(t-1)$ ,  $x(t-2)$  において取得した隣接トポロジ関係を蓄積し、推定を行う。

## 4. 提案手法

SmartFinder ではアンカーノードの推定相対精度に応じて、アフィン変換後のトポロジ全体の精度、形状が劣化する。そこでアンカーノードの位置関係を真位置関係に固定し、位置修正にノード間で観測した RSSI に基づいたにノード間近似距離を用いることでアンカーノードの推定相対精度の誤差を排除し、アフィン変換によって起きる精度劣化を排除する方式を提案する。図 3

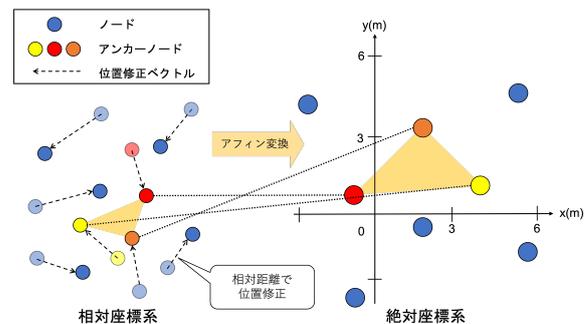


図 2 従来手法

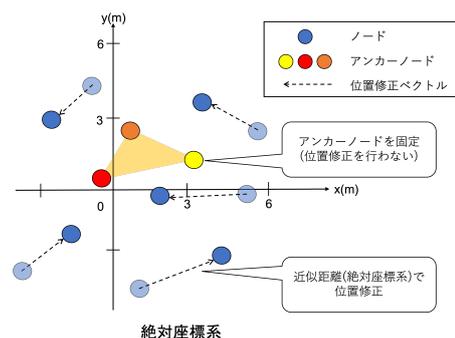


図 3 提案手法

### 4.1 アンカーノード固定方式

#### 4.1.1 アフィン変換の排除

SmartFinder ではアンカーノードの推定相対誤差に応じて再現されたトポロジの精度、形状が劣化する特性がある。そこで本稿ではアンカーノードを真位置に固定し、位置推定を行うことで SmartFinder の精度劣化、形状劣化を防ぐことができると考えている。図 2 の従来手法では位置推定

を行う際にアンカーノードも含めた全てのノードを、相対座標系の位置修正ベクトルを用いて位置修正し、アフィン変換を行うことで絶対座標系の推定位置を決定している。提案方式では図3のようにアンカーノードを真位置に固定し、絶対座標系の位置修正ベクトルを用いて位置修正を行い、精度・形状劣化の一因であるアフィン変換を行わずに位置推定を行うことで SmartFinder の精度向上を図る。

#### 4.1.2 絶対座標系位置更新におけるノード間距離

アフィン変換を行わない提案方式では、位置修正ベクトルが絶対座標系である必要がある。そこで提案方式では観測したノード間の RSSI を基に算出した絶対座標系の近似距離をノード間距離として用いて位置修正ベクトルを算出する。近似距離の算出手順を以下に示す。

- 位置推定時、アンカーノード間において観測した RSSI を蓄積
- アンカーノード間の蓄積した RSSI と既知である実距離をパスロスモデルに適用して式 (6) の  $a$  を最小二乗法で近似する。
- 位置推定時、各ノード  $ij$  間で観測した RSSI  $P_{ij}$  と  $a$  からノード  $ij$  間の近似距離  $D_{ij}^a$  を算出する

$$D_{ij}^a = \alpha \sqrt{\frac{1}{P_{ij}}} \quad (6)$$

式 (6) の  $D_{ij}^a$  を式 (2) のノード間相対距離  $V_{ij}^{\gamma(t)}$  へ適用して絶対座標系で位置修正を実施する。

## 5. シミュレーション

### 5.1 シミュレーション方法

アンカーノード固定方式を実装した SmartFinder の有用性を調べるために Android スマートフォン（以降、ノード）を用いて実験を行う。今回実験で用いた Android スマートフォンは FREETEL の SAMURAI REI2(OS:Android7.1.1, CPU:Cortex-A53 Octa Core 2.0GHz, メモリ: 4GB) である。なお、本稿では論文 [5] の実験にて収集されたログデータを用いてシミュレーションを行う。実験の諸元を表 1 に示す。

表 1 実験方式

フィールド範囲 ( $m \times m$ )	15 × 15
アンカーノード数	3
停止ノード数 (内、アンカーノード 3 台)	10, 30
移動ノード数	1
移動ノードの速さ (m/s)	1.0
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
多重化する隣接トポロジ情報の適用期間 (s)	30
蓄積するアンカーノード間のリンク数	1000

## 5.2 評価方法

### 5.2.1 形状評価

本稿では再現されたトポロジの形状劣化がアフィン変換によって生じているのかを検証するために、アフィン変換前の相対座標系である再現トポロジと実トポロジの形状似度、アフィン変換後の絶対座標系の再現トポロジと実トポロジの形状類似度を算出し比較検証を行う。形状誤差の算出は、再現されたトポロジにおけるノード  $ij$  間の推定距離  $D_{ij}$  とノード  $ij$  間の実距離  $d_{ij}$  の比を全ノード間において算出し、その分散を形状誤差とする。なお、アフィン変換前は再現されたトポロジが相対座標系であるため実トポロジに対するスケール値である  $E$  を用いて形状誤差  $V$  を算出する。ノード数を  $N$ 、全ノード間のリンク数を  $n_l$  とする。

$$E = \frac{1}{n_l} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (7)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( \frac{D_{ij}/d_{ij}}{E} - 1 \right)^2} \quad (8)$$

### 5.2.2 近似精度評価

算出した近似距離の評価は一回のシミュレーションにおける平均近似誤差を式 (9) の  $S$  として行う。 $S$  が大きければ大きいほど形状誤差が大きいものとする。 $N$  はノード数、 $D_{ij}^a$  は近似距離、 $d_{ij}$  は実距離を示す。

$$S = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |D_{ij}^a/d_{ij} - 1| \quad (9)$$

### 5.2.3 精度評価

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位置推定誤差により評価する。移動ノードのルートはあらかじめ決定している。(図 6)  $s$  秒目の推定誤差  $ERR(s)$  は次の式で求める。 $N$  はノード数、 $W_i(s)$  は  $s$  秒目のノード  $i$  の真位置、 $w_i(s)$  は推定位置を示す。

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

ただし、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ランダムな位置となる。従って、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、多重化の精度評価の対象とする時間は 11 秒から 180 秒とし、全ノードの誤差の平均値を ( $ERR_{ave}$ ) (単位は m) とする。

## 5.3 結果

### 5.3.1 アフィン変換による形状劣化

はじめにアフィン変換の前後における形状誤差を図 7 に

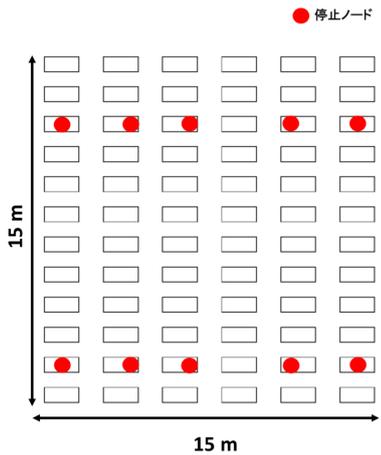


図 4 停止ノード 10 台の配置

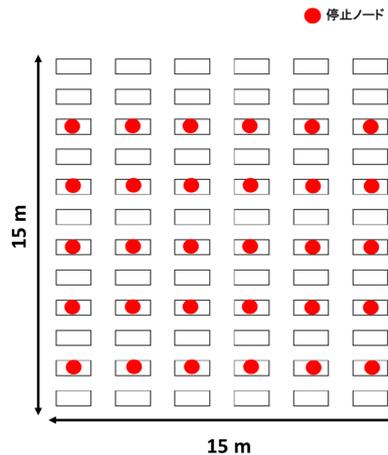


図 5 停止ノード 30 台の配置

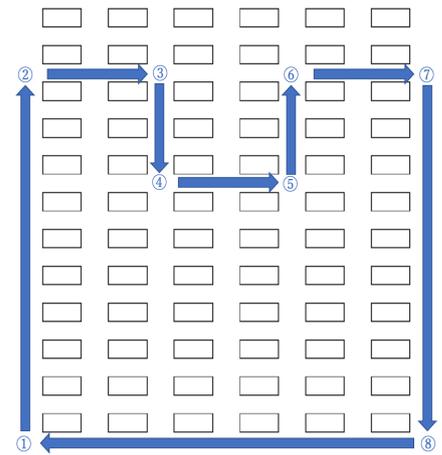


図 6 移動ノードのルート

示す。停止デバイスが 10 台の場合，アフィン変換前の相対座標系での推定トポロジでは 0.027 程度の形状誤差がアフィン変換後の絶対座標系では 0.325 程度に劣化していることがわかる。しかし停止デバイスが 30 台の場合，アフィン変換による形状誤差の変化は考慮する必要がないという結果を得た。このことからアフィン変換は，SmartFinder のノード数減少時において，精度劣化の一因であると考えられる。

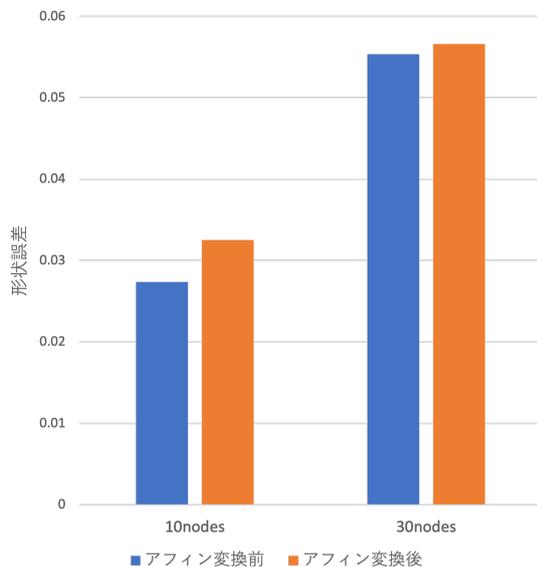


図 7 アフィン変換による形状劣化

### 5.3.2 ノード間距離の近似精度

次にノード間距離の近似精度について図 8 に示す。図は観測した RSSI における実距離と近似距離を示している。図 8 はサンプル数 9900，平均近似誤差  $S$  は 2 割程度となっている。観測した RSSI と実距離には相関があると言えるが同時に分散が大きいことが分かる。

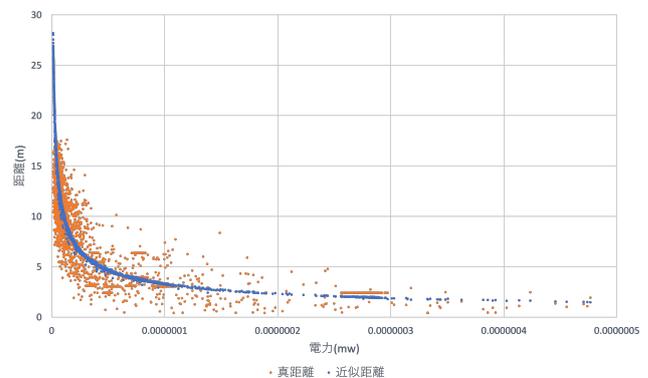


図 8 近似距離の精度

### 5.3.3 提案手法の位置推定精度

次に従来手法と提案手法で実施時の全てのノードの平均誤差を図 9 に示す。停止ノードが 10 台の時，従来手法では 2.7m だったが提案手法では 2.25m と精度が向上している。一方で停止ノードが 30 台の時，1.7m から 2.1m に精度が劣化している。図 9 より提案手法では従来手法に比べ，ノード数減少時の精度が改善しているがノード数が増加すると精度が劣化するという結果を得た。

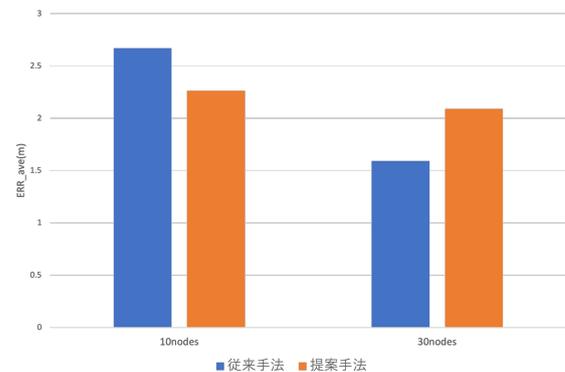


図 9 推定精度誤差

### 5.3.4 提案手法の形状誤差

最後に従来手法と提案手法で実施時の実トポロジに対する再現トポロジの形状誤差を図 10 に示す。停止ノードが 10 台の時、従来手法実施時が 0.33 提案手法実施時が 0.29 再現トポロジの形状改善が見られた。しかし提案手法実施時の形状誤差は図 7 のアフィン変換前の形状誤差に比べて少し大きいという結果を得た。

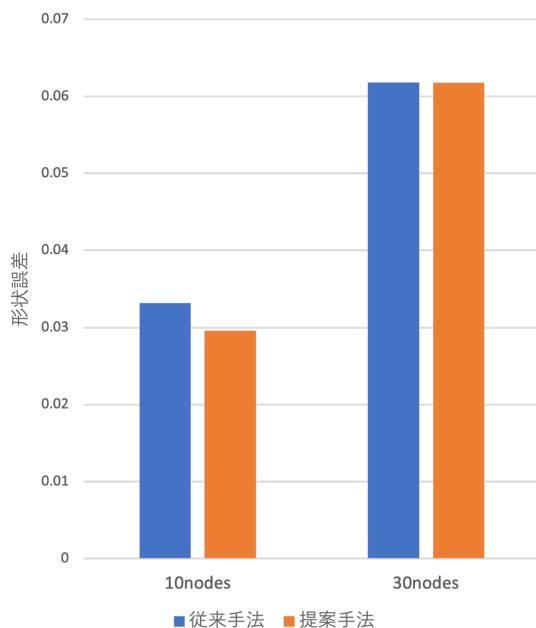


図 10 推定形状誤差

## 5.4 考察

図 9 から提案手法では従来手法に比べて、ノード数減少時において精度が改善し、ノード数増加時は精度が悪化するという結果を得た。ノード数減少時には従来手法のアフィン変換時、推定誤差を含んだアンカーノードを用いていたために形状誤差が生じていた。提案手法では形状誤差の一因であるアンカーノードを真位置に固定し、近似距離を用いて位置推定することでアフィン変換による形状劣化を防ぎ、精度改善が見られたと考える。

一方ノード数増加時の精度劣化は SmartFinder における SOL アルゴリズムによって引き起こされていると考えられる。SOL アルゴリズムではノード間のリンクを用いて位置修正を行う際にリンクを無作為に選択し、位置修正を行っている。そうして得られた相対座標系のトポロジをアフィン変換によって絶対座標系に対応させている。つまり従来手法におけるアフィン変換はトポロジの絶対座標系へ線形変換、回転、平行移動の役割を担っている。

提案方式においてはアフィン変換を排除しているため、アンカーノードを含むリンクを用いた位置修正 (式 (2), 式 (3), 式 (4)) が行われなければノードはアンカーノードの真位置の制約から離脱してしまう。

図 11 にノード数の増減におけるアンカーノードを含んだノード間リンクの割合を示す。ノード数増加時、位置修正を行うリンクの選択においてアンカーノードとのリンクが選択される確率が減少することがわかる。これにより絶対座標系の情報を持つアンカーノードを使った位置修正頻度が下がり、絶対座標系から離脱してしまうことが精度劣化の原因であると考えられる。

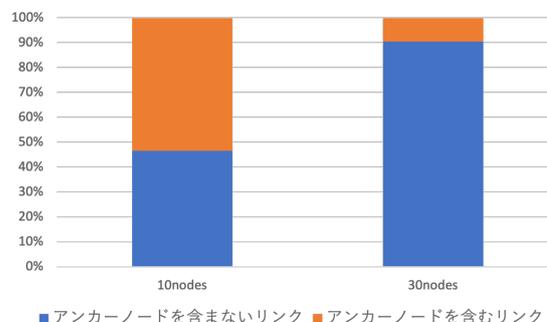


図 11 アンカーノードを含むリンクの割合

また精度改善が見られた 10 ノードでの提案手法実施時において従来手法実施時のアフィン変換前の形状誤差より大きくなるという結果を得た。この結果に関しては先述したように提案手法では位置修正にアンカーノードとのリンクを用いる、もしくはアンカーノードとのリンクを用いて位置修正を行ったノードとのリンクを用いて位置修正を行わなければノードはアンカーノードの真位置の制約から離脱する可能性がある。ノード数減少時においてもノード数増加時と同様に精度劣化する可能性がある。しかしノード数減少時は全体のノードに対してアンカーノードの割合が高いためノードの絶対座標系からの乖離によって生まれる精度劣化より、アフィン変換を行わない事による精度改善が大きかったためにこのような結果となったのではないかと考える。

アフィン変換による形状劣化を抑えることでノード数減少時には精度改善が見られた。しかし図 8 から分かるように観測した RSSI は距離に対しての分散が大きい。つまり RSSI の強度を基にした相対距離、絶対距離の算出には観測した RSSI の誤差を含むために、これ以上の推定精度の向上は難しいと考える。

つまり全てのノード間の RSSI から一つのスケール値で絶対距離を算出する方式ではこれ以上の改善は難しいと考えられる。

## 6. まとめ

本稿では SmartFinder のアフィン変換による形状誤差の増大が精度劣化の一因であると考え、アフィン変換前後の形状誤差を比較検証し、アンカーノードを真位置に固定し、測位フィールド上の RSSI における近似距離を用いて

位置推定を行う方式を提案しシミュレーションによる評価を行った。その結果、本方式ではスマートデバイス数が10台の時に平均誤差を約0.4m改善することが確認された。一方デバイス数増加時においては従来手法に比べて精度劣化することが分かった。

今後はデバイス数増加時においても精度改善を実現するために位置修正時のリンク選択に関するアルゴリズムの検討を行う。またRSSIに対する距離の分散が大きい事への改善策として、リンクそれぞれが別々のスケール値を用いて非線形変換する方式の検討を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Nic, N.: "Apple iBeacon technology briefing." *Journal of Direct, Data and Digital Marketing Practice* 15.3, 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] 北之馬貴正, 新居英志, 森流星, 滝沢泰久: 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, *情報処理学会論文誌*, Vol.60, No.12, pp2291-2301 (2019)
- [4] 川田千尋, 北之馬貴正, 新居英志, 森流星, 滝沢泰久: 屋内環境におけるスマートデバイスの多重化情報を用いた集約型自己組織化位置推定方式とその実装評価, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2019-DPS-180, No.8, pp.1-7 (2019)
- [5] 川田千尋, 北之馬貴正, 新居英志, 森流星, 滝沢泰久: 屋内環境におけるスマートデバイスの多重化トポロジを用いた集約型自己組織化位置推定方式の精度検証と考察, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2020-DPS-184, No.18, pp.1-8(2020)
- [6] A,Harter ., A,Hopper ., P,Steggles ., Ward, A., and Webster, P.: The anatomy of a context-aware mobile applications, *Proc. ACM/IEEE MobiCom 99*, Vol.8, pp.187–197 (1999).
- [7] N,Priyantha ., A, Miu., Balakrishman, H., and Teller, s.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *Proc. MOBICOM 2001* (2001).
- [8] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.: *Global Positioning System, Theory and Practice*, 4th ed.(1997).
- [9] N.Bulusu, J.Heidemann, and D.Estrin : "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", *IEEE Personal Communications Magazine* (2000).
- [10] D.Niculescu and B.Nath : "DV-based positioning in ad hoc networks", *Telecommun.Syst*, vol.22, pp267-280 (2003).
- [11] Tian He, Chengdu Huang, Brian M.Blum, John A.Stankovic, and Tarek F.Abdelzaher : "Range-free localization and its impact on large scale sensor networks", *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, v.4 n.4, p.877-906 (2005).
- [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. the 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, In *The Third International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, pp.42-49 (2013).
- [14] Kawauchi, K. and Rekimoto, J.: FineMesh: High-Density Sampling Platform Using an Autonomous Robot, *Green Computing and Communications (Green-Com), 2012 IEEE International Conference on, Besancon*, pp.477-486 (2012).