

集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式における 移動デバイス位置推定改善手法に関する検証と考察

川田 千尋¹ 北之馬 貴正² 新居 英志¹ 森 流星¹ 滝沢 泰久³

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。また、移動デバイスにおいて位置推定精度の高精度化と安定化を図るため、移動デバイスにおける時系列の自身の移動距離を用いる移動デバイスの位置推定手法を提案している。本稿は、異なる環境における実機検証から、移動デバイスの時系列データを用いた方式の移動デバイスの位置推定精度への効果を考察する。

Study on Improvement in Tracking Accuracy for Mobile Smart Devices in Cloud based Self-Organizing Localization

CHIHIRO KAWATA¹ TAKAMASA KITANOUMA² EIJI NII¹ RYUSEI MORI¹
YASUHISA TAKIZAWA³

1. はじめに

近年、屋内空間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。現在の屋内位置の利用は「見える化」が主流であるが、将来は「制御」に屋内測位を用いることが考えられる。例えば、建設現場における i-Construction[3], 製造業における人とロボットとの協働、および小売現場におけるリアルタイム促販などがあげられる。これらの「制御」に用いられる位置情報の要求精度は数十 cm-数 cm オーダーと言われている。また前述の建設現場や小売現場は日々環境が変動し、さらに建設現

場では十分なインフラ設備を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[4] を提案している。SmartFinder はスマートデバイス間の隣接情報を用いて3定点のみで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、測位設備の依存性が極めて低い。しかし、移動デバイスでは位置推定に実時間性を得るために位置推定アルゴリズムを簡素化しており、停止デバイスと比較すると誤差が大きくなる。我々は、移動デバイスにおいて位置推定精度の改善を図るため、デバイス間の隣接情報に加えて、加速度センサーを用いた移動デバイスにおける時系列の自身の移動距離を用いる移動デバイスの位置推定手法を提案している [5]。また、提案方式の実機検証において、移動デバイスの位置推定精度は、移動デバイスの隣接情報に基づくデバイス間距離と自身の時系列データに基づく移動距離の利用割合に依存して改善することを確認している。

以上のことから、本稿では、異なる環境において SmartFinder の実機検証を行い、その結果から移動デバイスの位置推定において移動デバイスの隣接情報に基づくデバイス間距離に対する自身の時系列データに基づく移動距離の効果を考察する。

¹ 関西大学大学院 理工学研究科

² 関西大学 先端科学技術推進機構 客員研究員

³ 関西大学 環境都市工学部

2. 関連研究

2.1 Range-based

位置推定処理にノード間の距離情報を利用するため、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 Strength Indicator) が利用されている。

2.1.1 TDOA 方式利用型

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

2.1.2 TOA 利用方式型

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) が挙げられる。これは複数の GPS 衛星からの信号を受け取ることで位置推定を行うものである。その GPS 衛星からの信号には、衛星に搭載された原子時計からの時刻のデータ、衛星の軌道情報などが含まれている。GPS 受信機にも正確な時刻を知ることができる時計が搭載されているならば、GPS 衛星からの電波を受信し、発信から受信までの時刻差に電波の伝播速度 (光の速度と同じ 30 万 km/秒) を掛けることで、その衛星からの距離を得ることができる。そして、3 個以上の GPS 衛星からの距離がわかれば、空間上の一点を決定することができる。しかし、実際の GPS 受信機にはクォーツなどの時計が搭載されており、それほど高い精度ではない。そこで、3 個以上の GPS 衛星からの信号を受信し、GPS 受信機内部の時刻の補正を行いつつ位置推定を行っている。他にもロシア版の GLONASS, 欧州版の GALILEO がある。この GPS は、「ユビキタスネットワーク社会」の実現における無線センサネットワークにおいてはいくつかの問題点がある。まず、GPS を用いた位置推定方式は上空にある GPS 衛星との通信による位置推定方式であるため、GPS 衛星からの電波を受信することができない屋内や山間部、悪天候時などでは位置推定を行うことができない。TOA 利用方式の GPS は精度がおおよそ 5m~10m とされている。

2.1.3 RFID 利用方式

RFID(Radio Frequency IDentification「電波による個体識別」の略)とは、ID 情報を埋め込んだ RF タグから、電磁界や電波などを用いた近距離 (周波数帯によって数 cm~数 m) の無線通信によって情報をやりとりする技術である。流通業界などでバーコードに代わる商品識別管理技術として研究が進められてきたが、それに留まらず社会の IT 化・自動化を推進する上での基盤技術として注目が高まっている。RFID を用いた位置推定方式には、まず複数の RFID リーダーをあらかじめ設置し、どの RFID タグと、どの RFID リーダーが通信可能かを検出することで位置を検出する方法や、通信可能な複数の RFID リーダー情報より GPS と同様に三辺測量を行う方式が存在する。しかし、この方式では RFID タグを付与されたヒトやモノの移動範囲をあらかじめ認識していることを想定しており、RFID リーダーの設置されていないところでは位置推定は行うことができない。また、広範囲にわたり高い精度で位置推定を行うためには、それだけ大量のリーダーが必要となり、設置コストやその保守コストが膨大にかかる。つまり、柔軟性、拡張性に欠け、移動体などを含んだ位置範囲の定まっていないセンシングには不向きである。

2.2 Range-free

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[8], DV-Hop[9], APIT[10] がある。

2.2.1 Centroid

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。

2.2.2 DV-Hop

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。

2.2.3 APIT

APIT 方式は、複数個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。

3. 集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder

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 を用いて隣接ノード情報を取得し、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。

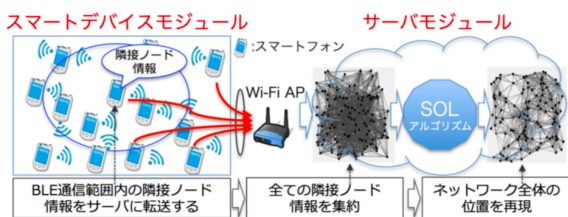


図1 SmartFinder のシステム構成

3.1.1 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 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 リストと自身の移動/停止情報の送信

3.1.2 サーバデバイスモジュール

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 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 を適用することで全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

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、クラウドサーバモジュール上で一定期間保持した隣接ノード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、移動速度に追従した位置推定には直近の隣接ノード情報を必要とする。従って、停止しているノード (停止ノード) 間の隣接ノード情報保持期間 t^s は長い期間とし、移動ノードと他のノード間の隣接ノード情報保持期間 t^m は短い期間とする。以下のように、上記に期間に基づいて保持した隣接ノードリストから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
- 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

上記処理を全てのノードに実施し、個々のノード毎に多次近傍ノードを設定する。以上により、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を構成し、精度劣化を抑制する。

3.3 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、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。また、位置修正の繰り返しによる推定位置はネットワーク内に置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。

4. 提案手法

局所 SOL では位置推定に実時間性を得るために位置推定アルゴリズムを簡素化しており、移動デバイスは停止デバイスと比較すると誤差が大きくなる。BLE 隣接間 RSSI によるノード間距離は環境に依存して、誤差変動が大きい。一方、移動距離は環境依存性が低く、一定の誤差で距離を推定可能である。したがって、移動デバイスにおいて位置推定精度の改善を図るため、局所 SOL に自身の移動距離をノード間距離 (以下、移動距離) として導入し、BLE 隣接間 RSSI によるノード間距離 (以下、電波距離) と組み合わせ推定する方法を提案する。(図 2)

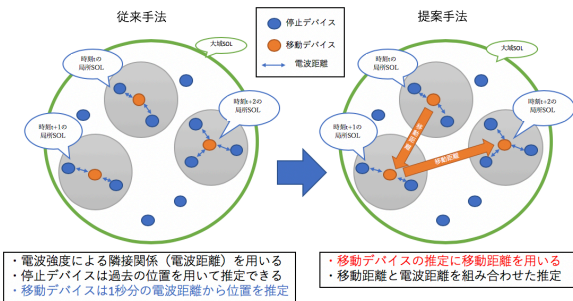


図 2 提案手法

4.1 移動デバイスの移動距離取得

移動距離の取得方法はスマートデバイスに搭載されている加速度センサーを用いて単位時間あたりの端末の加速度を計測し、3 軸の加速度から合成加速度を取得して歩数と歩幅を求めることで端末の移動距離を求める。

- 時刻 t の加速度センサーから 3 軸の加速度値を取得し、合成加速度 (a_t) を求める。

$$a_t = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

- 合成加速度にローパスフィルタをかける。今回は以下のようにフィルタをかけた。 a_{filter} は a_t にローパス

フィルタをかけた後の合成加速度である。

$$a_{filter} = \begin{cases} a_t(t=0) \\ a_{filter} * 0.99 + a_t * 0.01(t \neq 0) \end{cases} \quad (2)$$

- ローパスフィルタをかけた後の合成加速度から歩数を求める。今回は合成加速度の平均値と最大値の平均値を足し合わせて平均を取ったものを上閾値、合成加速度の平均値と最小値の平均を取ったものを下閾値とし、合成加速度が上閾値を越えた後に下閾値を下回った場合に 1 歩とした。
- 合成加速度から歩幅 (S) を求める。1 歩を検出した時の合成加速度の最大値 (a_{max}) と最小値 (a_{min}) を用いて式 (3) のように求める [11]。ただし、 K はパラメータで個人によって調整が必要である。今回は $K = 0.4$ とし、定数とした。

$$S = K \cdot \sqrt[4]{a_{max} - a_{min}} \quad (3)$$

- 1 秒間に検出した歩数と歩幅から移動距離を求める。

4.2 移動デバイスの移動距離を用いた局所 SOL 位置推定

本研究では移動デバイスの位置推定において移動距離による隣接関係と電波距離による隣接関係の利用割合を変更した。スマートデバイスで移動距離を取得し、電波距離と合わせてサーバに集約後に局所 SOL の移動ノードの仮位置修正を行う際の修正ベクトルの作成時にノード 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。今回の移動距離の導入により自身の移動距離を用いる場合 ($m = i$ の場合) は時刻 s の t 回目の修正ベクトル $V_{im}^{\{\gamma^l\}}(t)$ を、次のように定義する。ただし、 $\hat{w}_i(s-1)$ は 1 秒前の w_i の推定位置である。移動距離の利用割合を $n(0.0 \leq n \leq 1.0)$ とし、乱数 $z(0.0 \leq z \leq 1.0)$ を用いて修正ベクトル $V_{im}^{\{\gamma^l\}}(t)$ を次のように定義する。

$$V_{im}^{\{\gamma^l\}}(t) = \begin{cases} \frac{r(s) - |w_i(s, t) - \hat{w}_i(s-1)|}{|w_i(s, t) - \hat{w}_i(s-1)|} (w_i(s, t) - \hat{w}_i(s-1)) & z \leq n \\ \frac{d_{im}^{\{\gamma^l\}} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|} (w_i(t) - w_m(t)) & z > n \end{cases} \quad (4)$$

この修正ベクトル $V_i^{\{\gamma^l\}}(t)$ 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。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{R\}}(t) + V_{im}^{\{2R\}}(t)) \quad (5)$$

5. 実験

5.1 実験方法

移動デバイスにおいて、BLE RSSI による隣接デバイスとの電波距離と自身の時系列データである移動距離との利用割合と移動デバイスの位置精度改善の相関を調

べるために SmartFinder の搭載された 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。実験の諸元を表 1 に示す。今回は配置するデバイスの密度と移動距離利用割合の関係を調査するため、フィールド範囲の異なる教室 A, B で実験を行った。

フィールド範囲 (教室 A) ($m \times m$)	25 × 20
フィールド範囲 (教室 B) ($m \times m$)	15 × 15
アンカーノード数	3
ノード数	51
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

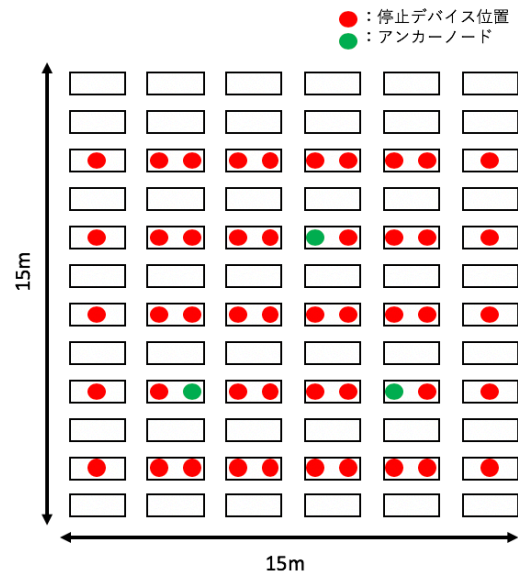


図 4 教室 B のデバイス配置

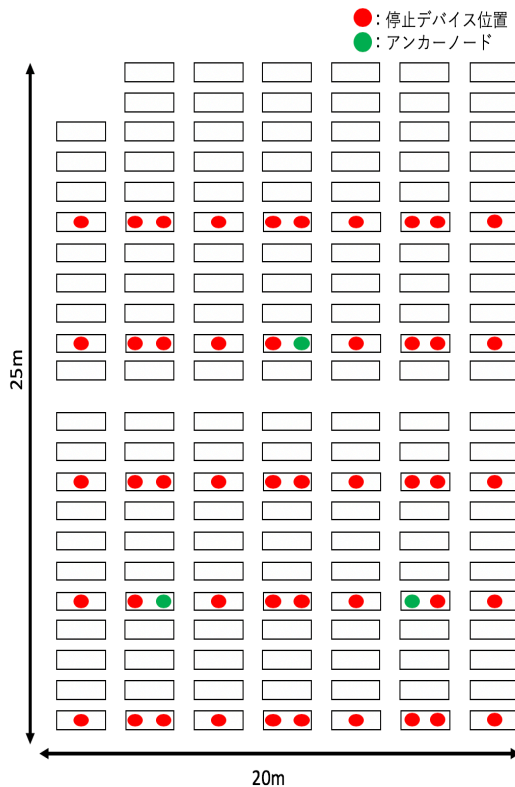


図 3 教室 A のデバイス配置



図 5 実験風景

5.2 評価方法

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。移動ノードの歩行ルートはあらかじめ決定している。 s 秒目の推定誤差 $ERR(t)$ は次の式で求める。 $W_i(s)$ は s 秒目のノード i の真位置、 $w_i(s)$ は推定位置を示す。

$$ERR(s) = |W_i(s) - w_i(s)| \quad (6)$$

今回は 180 秒間の位置推定実験のなかで 1 秒ごとの移動ノード（局所 SOL）の誤差の平均値、標準偏差を求め、評価を行う。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、精度評価の対象とする時間は 10 秒から 180 秒とし、局所 SOL の誤差の平均値を (ERR_{ave}) とする。

5.3 実験結果

まず、教室 A での移動距離利用割合ごとに算出した移動デバイス平均誤差を図 6 に示す。

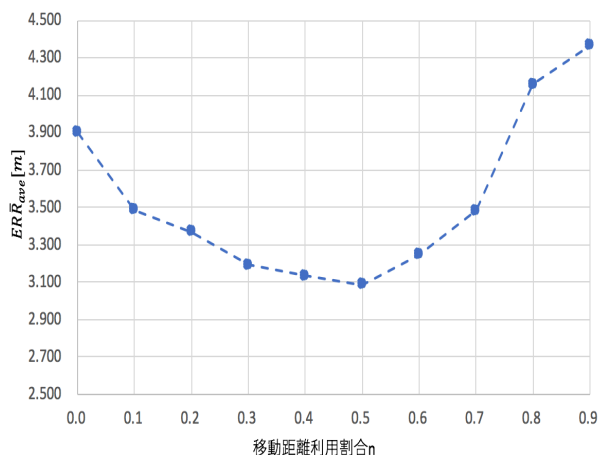


図 6 移動距離利用割合ごとの移動デバイス平均誤差 (教室 A)

移動距離利用割合を高めた場合、0.5-0.6 までは精度が改善し、0.7 を超えると精度改善効果が減少する。これは、0.6 までは BLE による電波距離より距離精度が高い移動距離による隣接関係を用いたほうが有利に働き、0.7 を超えると移動距離による隣接関係に偏って推定するため、隣接関係の多様性や異方性が減少して不利に働く。すなわち、移動距離の利用割合には適正值がある。

次に教室 B での移動距離利用割合ごとに算出した移動デバイスの平均誤差を図 7 に示す。

教室 A では SmartFinder の位置推定に移動距離を導入した場合に精度が改善したのに対し、教室 B では移動距離利用割合を高めていくと移動デバイスの精度が悪化し、精度改善効果が得られないという結果になった。

5.4 考察

表 2 から教室 A よりデバイス密度が高い教室 B が誤差を抑制できている。

表 2 実験結果	
	平均誤差
教室 A	2.80m
教室 B	1.61m

これは、デバイス密度が高いため隣接情報が増えることによる精度向上と考えられ、SmartFinder の位置推定精度に関する特徴である。また、移動デバイスの精度は停止デ

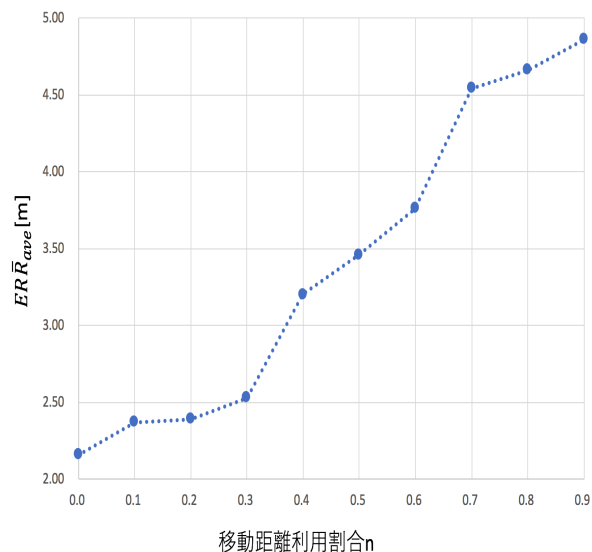


図 7 移動距離利用割合ごとの移動デバイス平均誤差 (教室 B)

バイスの精度に依存するため、停止デバイスの密度が高い教室 B に対して、停止デバイスの密度が低い教室 A の方が移動デバイス平均誤差は大きくなっている。しかし、教室 A で移動距離利用割合を高めた場合、図 6 のように電波距離と移動距離を組み合わせて推定を行った方が精度改善効果が得られたのに対し、教室 B では移動距離利用割合を高めても図 7 のように精度改善効果を得ることができなかった。

ここで、教室 A および教室 B における電波距離によるノード間推定距離と真距離における分布をそれぞれ図 8、図 9 に示す。

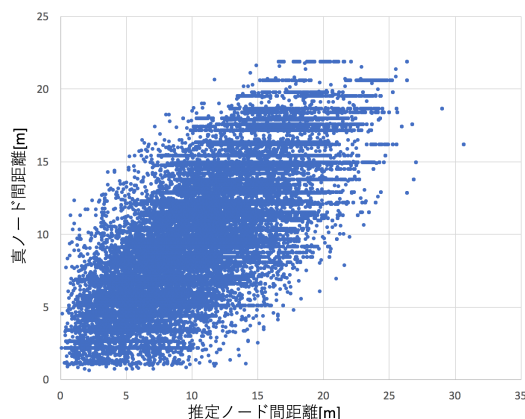


図 8 電波距離による推定のノード間推定距離と真距離における分布 (教室 A)

図 8、9 のいずれにおいても推定ノード間距離は真ノード間距離よりも長く推定される傾向にあるが、教室 A は電波伝搬状況が教室 B と比較して悪く考えられる。また、教室 A はデバイス密度が低いためデバイス間距離が長くなり、さらにその精度が劣化する。このように電波距離の精

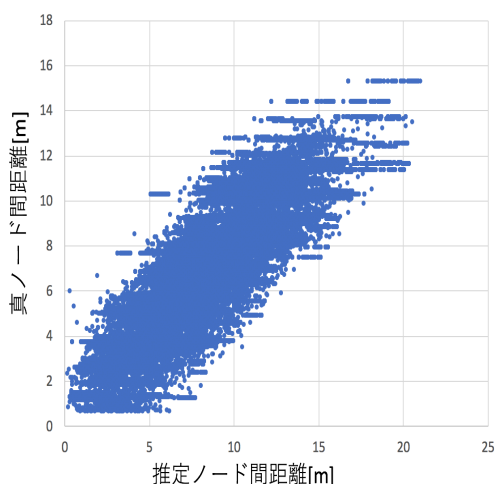


図 9 電波距離による推定のノード間推定距離と真距離における分布 (教室 B)

度が低い場合、電波距離より安定した精度となる移動距離をある程度を位置推定へ用いることにより、電波距離を補完して移動デバイスの位置推定精度の改善が図ることができる。すなわち、電波伝搬状況が悪い場合、全方向から偏りなくデバイス間の電波距離を得るより、電波伝搬状況に影響されない比較的安定した自身の移動距離を、優先的に用いることが位置推定に有効に働く。教室 B は教室 A と比較して電波伝搬状況が良好と考えられる。さらに、デバイス密度が高いため、近接して安定した BLE RSSI から良好な電波距離を取得できる隣接デバイス数が全方位に多いと考えられる。このような場合、電波伝搬状況が悪い場合と異なり、移動距離の利用割合を増やすと、過去の自身の位置方向へ偏った位置推定となるため、位置推定において不利に働く。すなわち、電波伝搬状況が良好の場合は、全方向から偏りなくデバイスを選択することが有効と考えられる。

6. まとめ

本稿では異なる環境における実機検証から、移動デバイスの時系列データを用いた方式の移動デバイスの位置推定精度への効果を考察した。電波伝搬状況が悪い場合、全方向から偏りなくデバイス間の電波距離を得るより、電波伝搬状況に影響されない比較的安定した自身の移動距離を優先的に用いることが位置推定に有効に働く。一方で、電波伝搬状況が良い場合は移動距離の利用割合を増やすと、過去の自身の位置方向へ偏った位置推定となるため、位置推定において不利に働く。すなわち、電波伝搬状況が良好の場合は、全方向から偏りなくデバイスを選択することが有効と考えられる。

今後同じ実験環境で停止デバイスの台数を変更することでデバイスの密度を変更した場合の移動距離利用割合の適正値の調査や移動距離を導入して精度改善効果を得られる環境で動的に移動距離利用割合を決め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] i-Construction 建設現場の生産性向上の取り組みについて, 国土交通省 (<http://www.mlit.go.jp/common/001113551.pdf>), (2015).
- [4] 北之馬貴正, 新居英志, 森流星, 安達直世, 滝沢泰久: SmartFinder:集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式のノード間メトリックを用いた拡張とその実装, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2018-DPS-175, No.15, pp.1-8, 2018.
- [5] 川田千尋, 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における移動デバイス位置推定改善手法, *情報処理学会 第 81 回全国大会*, 発表番号 6X-05
- [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] N.Bulusu, J.Heidemann, and D.Estrin : "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", *IEEE Personal Communications Magazine* (2000).
- [9] D.Niculescu and B.Nath : "DV-based positioning in ad hoc networks", *Telecommun.Syst*, vol.22, pp267-280 (2003).
- [10] 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).
- [11] 大瀧保明, 胡丹, 猪岡光, 鈴木明宏: 携帯型装置による人間の移動行動の推定, *計測自動制御学会東北支部 第 222 回研究集会*, 資料番号 222-10(2005).

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。