

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

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。しかし、SmartFinderは測位対象のスマートデバイスが少なく、デバイス間の隣接情報が欠如する場合は位置推定精度が低下するという課題がある。本稿では、上記問題を解決するため、スマートデバイスの移動による多様な位置におけるデバイス間の隣接情報を蓄積させ、仮想的にスマートデバイス数を増幅させる多重化を用いたSmartFinderを提案し、実装評価からその有用性を示す。

Self-Organizing Localization with multiplexed information for indoor smart devices and its evaluation

CHIIHIRO 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、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[3] 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、SmartFinderは測位対象のスマートデバイスが少なく、デバイス間の隣接情報が欠如する場合は位置推定精度が低下するという課題がある。本稿では、上記問題を解決するため、スマートデバイスの移動による多様な位置におけるデバイス間の隣接情報を蓄積させ、仮想的に測位対象のスマートデバイス数を増幅させる多重化を用いた SmartFinder を提案し、実装評価からその有用性を示す。

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、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

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

(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[4] や Cricket[5] 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) 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。

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[6], DV-Hop[7], APIT[8] 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。

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) [9] 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 [10] や電波を用いた方式 [11] 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

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。

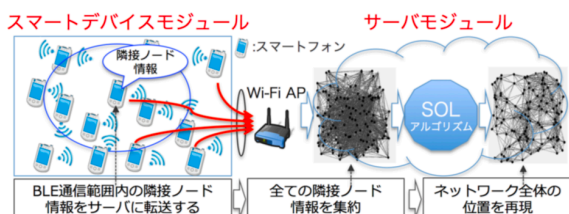


図 1 SmartFinder のシステム構成

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

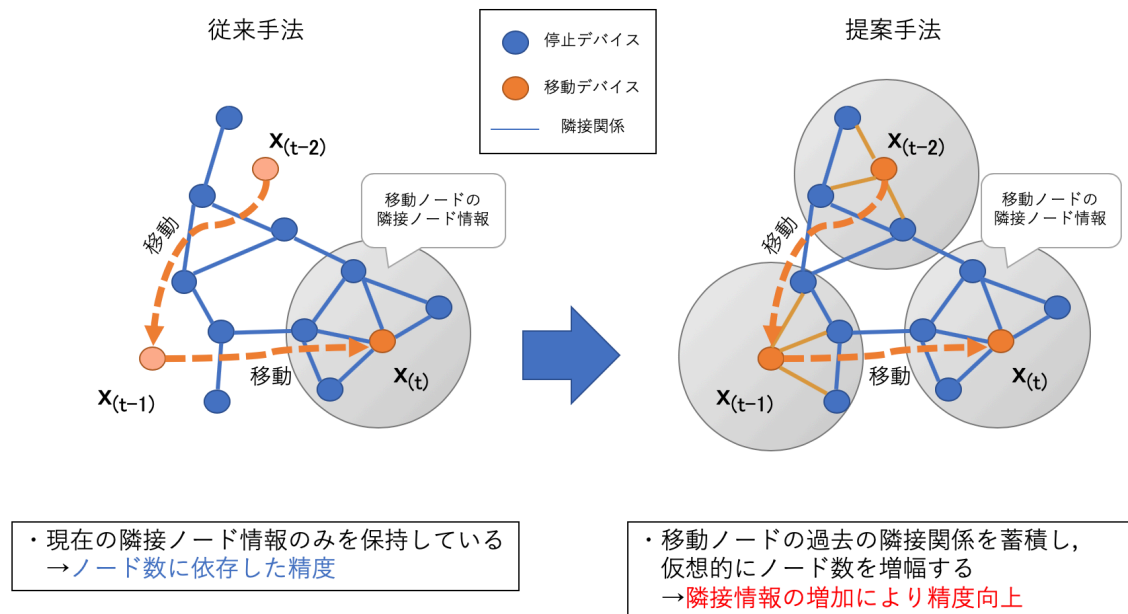


図 2 提案手法

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おける相対位置である。この相対位置をアンカ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

SmartFinder は測位対象のスマートデバイスが少なく、デバイス間の隣接情報が欠如する場合は位置推定精度が低下する。そこで、スマートデバイスの移動による多様な位置におけるデバイス (以降、ノード) 間の隣接情報を蓄積させ、仮想的にノード数を増幅させる多重化を用いた

SmartFinder を提案する。(図 2)

4.1 多重化を用いた SmartFinder

ノード密度が少ない場合でも隣接ノード情報を増加させ、SmartFinder の精度を維持することができる。図 2 は、既存の SmartFinder と多重化を用いた SmartFinder である。青丸が停止ノードをオレンジ丸が移動ノードを表しており、オレンジ破線は移動ノードの軌跡を表している。左は既存の SmartFinder を表しており、移動ノード $x(t)$ は隣接ノード情報のみの保持であり、停止ノードの推定においても停止ノード同士の隣接関係のみで推定を行っている。右は提案手法を用いた SmartFinder を表している。時刻 t における移動ノードの位置 $x(t)$ での隣接ノード情報だけでなく、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関係を蓄積して推定を行うことで、SmartFinder の精度向上を図る。

4.2 多重化の処理手順

多重化は移動ノードの隣接ノード情報を毎秒蓄積し、独立した位置の異なる個別のノードによる情報として大域 SOL に用いることによりノード密度が低い場合でも精度維持を実現する。処理手順を図 3 に示す。

- ・図 3 の大域 SOL 実行周期インターバル期間 (黄色 2

- 重丸間)において, 多重化は毎秒局所 SOL の実行 (グレー丸) による移動ノードの隣接ノード情報を蓄積する
- 大域 SOL は蓄積された隣接ノード情報を独立した位置が異なる個別のノード (オレンジ丸) による情報とし, 現在時刻から過去の適用期間内の隣接ノード情報を用いて仮想メッシュネットワークを構成し, 大域 SOL 実行時 (黄色 2 重丸) に仮想メッシュネットワークに基づき, 位置推定を行う
 - 蓄積した隣接ノード情報は適用期間後, 保持期間が過ぎれば破棄する

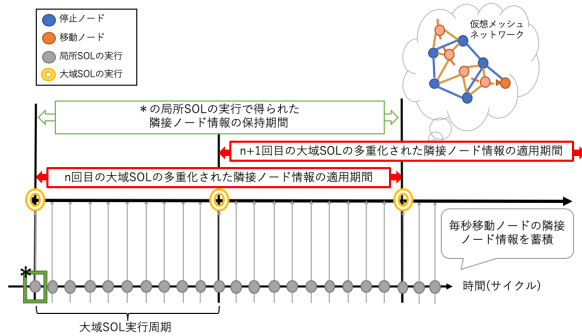


図 3 多重化の実装イメージ図

メモリへの負担を軽減するために保持期間が過ぎた隣接ノード情報を破棄するが, 上記の多重化では大域 SOL 周期期間中毎秒移動ノードの隣接ノード情報を蓄積し, 保持するため, 仮想メッシュネットワーク構築時と位置推定処理時に計算量が多くなり大域 SOL 実行周期内で位置推定が完了しない. 従って, 大域 SOL 実行周期内で位置推定を完了させるために, 大域 SOL 実行時に適用期間内の移動ノードの隣接ノード情報をまとめて蓄積し, 仮想メッシュネットワークを構成し, この仮想メッシュネットワークに基づき位置推定を行う.

5. 実験

5.1 実験方法

多重化を実装した 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 FREE-TEL 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. 本稿では測位対象のノード数が少なく, ノードの密度が低い場合での有用性を示すため, 停止ノード数を 10 台, 30 台, 50 台と変更した. 各停止ノード数ごとのノード配置を (図 4) に示す.

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.

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	10, 30, 50
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
多重化する隣接ノード情報の適用期間 (s)	30

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.

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

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, 多重化で蓄積する隣接ノード情報は 11 秒目からと, 多重化の精度評価の対象とする時間は 21 秒から 180 秒とし, 停止ノードの誤差の平均値を (ERR_{ave}) とする.

$$ERR_{ave} = \frac{1}{160} \sum_{s=21}^{180} ERR(s) \quad (2)$$

5.3 実験結果

停止ノード数ごとの平均誤差を図 7 に示す.

停止ノードが 10 台の場合には多重化を導入したことにより, 従来手法と比較して約 70cm, 約 25%の精度改善ができた. 一方で停止ノード数が 30 台, 50 台の時は従来手法とほぼ同じという結果になった.

5.4 考察

表 2 実験結果

	10 台	30 台	50 台
従来手法	2.58m	1.87m	1.53m
提案手法	1.86m	1.83m	1.52m

表 2 から SmartFinder に多重化を導入した場合, 停止ノードが 10 台の場合, 多重化によってノード数が仮想的に増加するため, 従来手法よりも高精度な結果を得ることができた. これは隣接ノード情報から仮想メッシュネットワークを構成し, この仮想メッシュネットワークに基づき位置推定を行うため, 大域 SOL の精度が向上するためだと考えられる. 本来, SmartFinder はノード数が増えると精度が向上するので, 停止ノードが 30 台の場合, 多重化導

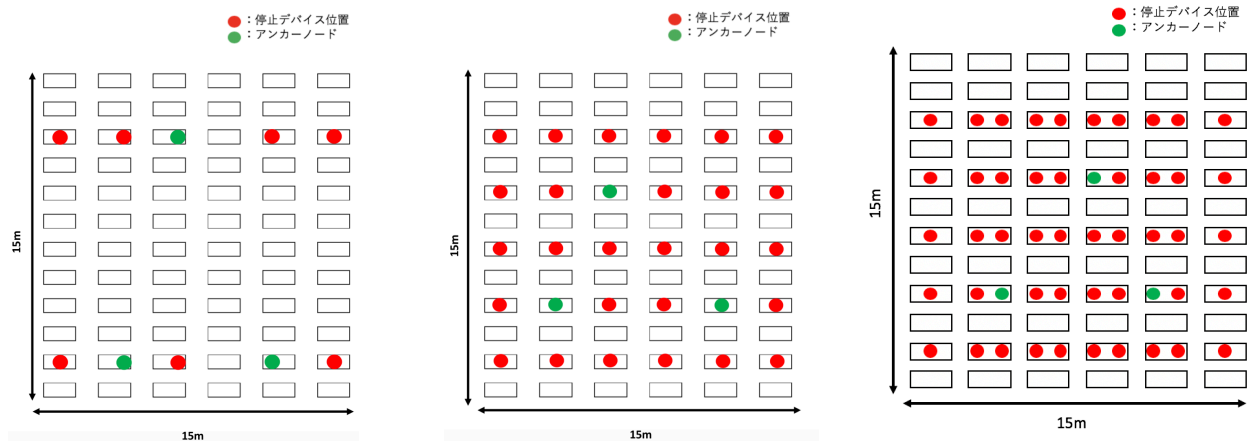


図 4 各停止ノード数ごとのノード配置



図 5 実験風景

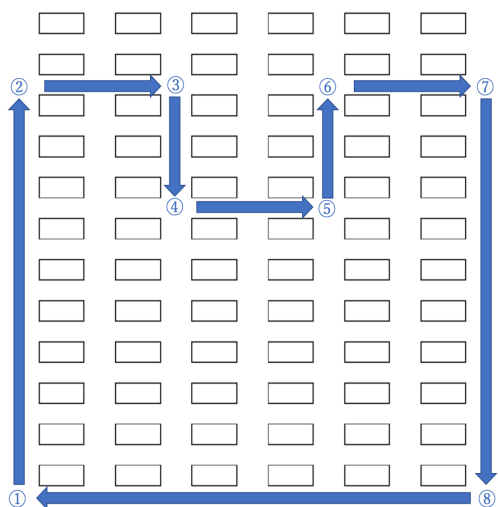


図 6 移動ノードのルート

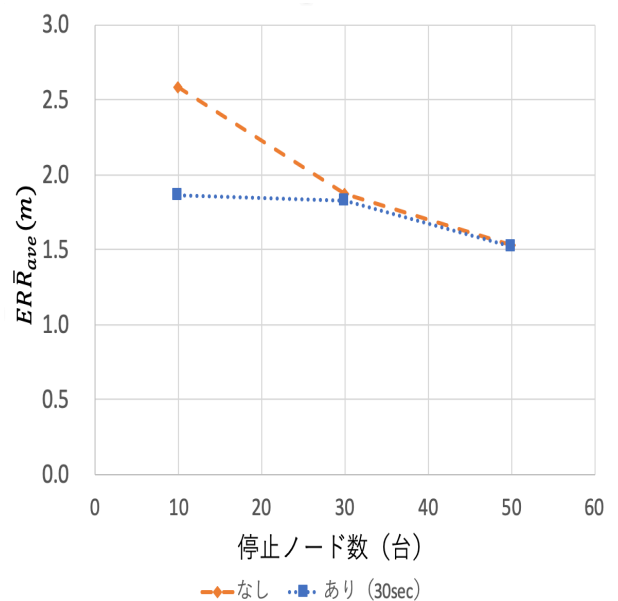


図 7 従来手法と提案手法を実行時の SmartFinder の平均誤差比較

入時には隣接情報は 60 相当となるので、従来手法でノード数が 50 台を推定した時よりも高精度になる。今回ノードが 30 台で多重化導入時に精度が得られなかった原因は隣接関係が偏ってしまったからではないかと考えている。SmartFinder は各方向から多様なノードの隣接関係を得たノードは偏った方向から隣接関係を得たノードと比較して高精度になる。今回の実験では停止ノードの配置の外周を歩くことが多かったが、停止ノードが 30 台、50 台の場合は多重化で外周に仮想的にノードを増やしても、内側の隣接関係が多かったため、停止ノードが 10 台の時と比較するとあまり精度が得られなかったのではないかと考えている。

6. まとめ

本稿では SmartFinder の測位対象のスマートデバイスが少なく、デバイス間の隣接情報が欠如する場合は位置推定精度が低下するという課題を解決するため、スマートデバイスの移動による多様な位置におけるデバイス間の隣接情報を蓄積させ、仮想的に測位対象のスマートデバイス数を増幅させる多重化を用いた SmartFinder を提案した。また、その実装評価から停止ノード数が 10 台の時に約 25% の精度が改善した。

今後は多重化を導入した際の移動ノードの精度評価や多重化する隣接ノード情報の適用期間を変更した時の精度評価を行う予定である。

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] 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, 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.
- [4] 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).
- [5] N.Priyantha ., A. Miu., Balakrishnan, H., and Teller, s.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *Proc. MOBICOM 2001* (2001).
- [6] N.Bulusu, J.Heidemann, and D.Estrin : "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", *IEEE Personal Communications Magazine* (2000).
- [7] D.Niculescu and B.Nath : "DV-based positioning in ad hoc networks", *Telecommun.Syst.*, vol.22, pp267-280 (2003).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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, Besan- con,