

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 SmartFinder とその評価

北之馬 貴正¹ 安達 直世² 滝沢 泰久²

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. 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. 本稿では, 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.

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. そのため, 各種センサやフィンガープリンティングを用いた方式が提案されているが, 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/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非常に困難となる. 以上のことから, 測位設備や事前計測に依存しない自律性の高いモバイルスマートデバイスの屋内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極めて低い. 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. 我々は, 集約型 SOL の測位設備への極めて低い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, 従来方式の問題を解決する屋内スマートデバイス測位方式の研究を進めている.

本稿では, 集約型 SOL を適用拡張し, 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 を提案し, そのシミュレーション評価からその有効性を示す.

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 無線電波を用いた方式

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

¹ 関西大学 理工学研究科
Graduate School of Engineering, Kansai University

² 関西大学 環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

信機能の他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) [5] や Ultra Wide Band(UWB) [6] がある。GPS や QZSS 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ー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 [7], Cricket [8], Ubisense [9] や Iterative Multilateration [10] がある。

Range-Based 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 方式は、付加的な測距デバイスを用いず位置推定する Centroid 方式 [11] や APIT 方式 [12] 等があり、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、通信可能な複数のアンカーノードの位置情報を位置推定するノードが取得し、それらの重心を利用することで自身の位置を推定する方式である。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、位置推定を行うノードが外側にあるか内側にあるかを判定することで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ー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つ以上のアンカー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ー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、位置推定にはモバイルスマートデバイスの移動空間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センサを用いる Pedestrian Dead Reckoning (PDR) [13] 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、絶対位置を得るためには 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その位置を特性マップ上から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 [14] や電波を用いた方式 [15] 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、このマップ作成のために事前に綿密な環境の特性計測が必要となる。すなわち、事前にマップ作成を必要としてこれに強く依存する。

3. 集約型 SOL

我々が提案した集約型 SOL [3] [4] を概説する。

3.1 集約型 SOL の構成

WSN は多数のセンサノードと1つのシンクノードから構成される。このような構成の定点センシングの WSN を想定し、図1に示すように、集約型 SOL は無線センサモジュールとクラウドサーバモジュールで構成する。無線センサモジュールでは、隣接ノード情報の取得とそのクラウドサーバモジュールへの転送を行う。クラウドサーバモジュールでは、集約された隣接ノード情報から構成した仮想 WSN に SOL を適用することで位置推定を行う。

3.1.1 無線センサモジュール

無線センサモジュールが動作する各ノードは自身の隣接ノードへの広告として自己 ID をデータとするブロードキャストを行う。この広告ブロードキャストにより各隣接ノードは隣接ノード ID を取得する。各ノードは取得した隣接ノード ID のリストをシンクノードであるクラウド環境へ送信する。従って、各ノードは広告ブロードキャストと隣接ノード ID リストをシンクノードへ送信するのみである。

3.1.2 クラウドサーバモジュール

クラウドサーバモジュールはセンサモジュールにより集約された隣接ノード ID のリストを基に仮想 WSN を構成する。仮想 WSN はすべてのノードの隣接ノード情報を集

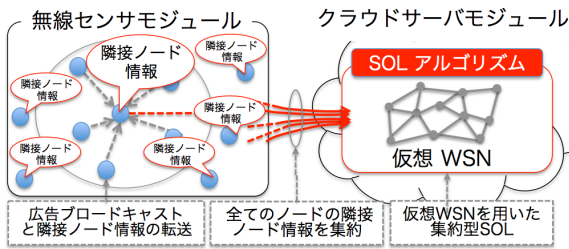


図 1 集約型 SOL の構成

約するため完全な近傍トポロジ情報を有する。一方、そのノード位置とノード間リンクで構成されるネットワーク全体の形状（ジオメトリ）は全くのランダムである。集約型 SOL はこの完全なトポロジ情報を持つ WSN に SOL を適用する。

3.2 仮想 WSN の構成

クラウドサーバモジュールは以下の仮想 WSN を構成する。

- ノード i の隣接ノード情報に含まれるノードをノード i の 1 次近傍ノードとする。
- 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で、ノード i およびノード i の隣接ノード情報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て、 $(n-1)$ 次までの近傍ノード群の隣接ノード情報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。

以上の処理をクラウド上で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し、これを仮想 WSN とする。

3.3 SOL アルゴリズム

SOL アルゴリズムは多次近傍ノードによる位置修正を繰返すことでジオメトリを再現する。ただし、各ノードの近傍ノード数の偏りが大きい場合、SOL アルゴリズムは位置推定精度の劣化の主要因となるトポロジ矛盾を起こす場合がある。従って、位置修正終了後に推定ジオメトリのトポロジ矛盾を確認する。また、位置修正の繰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。

3.3.1 多次近傍ノードによる位置修正

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、修正段階の進行に伴い位

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。従って、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、ノード i の修正 t 回目の推定位置を $w_i(t)$ とする。

[Step.2] ノード i に対して N 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 n とする。ノード n を用いたノード i の修正ベクトル $V_i^{\{N\}}(t)$ において、ノード間距離をホップ数 N とし、次のように定義する。

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

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。

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

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

ただし、 τ_N 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 を繰返して位置修正を行い、ノード全体でネットワークジオメトリを再現する。

3.3.2 トポロジ矛盾判定

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、位置推定誤差は変動する。しかし、集約型 SOL 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判定を行い、矛盾の少ないジオメトリを推定する。

図 2(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 2(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。従って、 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

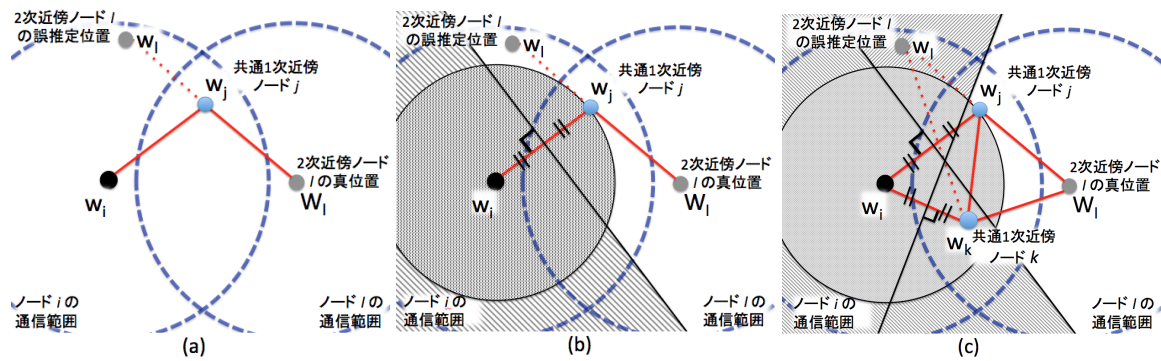


図 2 推定ノードのトポロジ矛盾領域

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，図 2(c) に示すように，ノード j に加えて，ノード i とノード l の共通の 1 次近傍ノード k 基準点として用いて，その推定位置 w_k と w_i によりそれぞれに近い領域に 2 分割し， w_i に近い領域にある ($|w_i - w_l| \leq |w_k - w_l|$) 場合トポロジ矛盾と判定する．以上のように，全ての共通 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． A は共通 1 次近傍群領域判定を行った回数， a はトポロジ矛盾の発生回数， β は判定閾値である．

$$\frac{a}{A} \leq \beta. \quad (4)$$

このトポロジ矛盾判定で得られる値を領域判定値と定義する．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 に近づくほどトポロジ矛盾の極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．従って，式 (4) を満たさない場合，トポロジ矛盾と判定し，SOL アルゴリズムの再試行を行う．

3.3.3 絶対座標変換

アンカーノードの真位置 $W_A = (X_A, Y_A)$ 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．

$$\begin{aligned} X_A &= ax_A + by_A + t_x \\ Y_A &= cx_A + dy_A + t_y \end{aligned} \quad (5)$$

3 つのアンカーノードから構成される連立方程式 (5) 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 $\hat{w}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ へ変換される．これを位置推定結果とする．

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & t_x \\ c & d & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

4. モバイルスマートデバイスへの適用

前述の通り，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，アンカーノ

ド 3 点のみで多数の無線ノードの位置を推定できる．従って，集約型 SOL は測位設備への依存性が極めて低く，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．

人やモノの状態は移動と停止を断続的に繰返すと想定し，モバイルスマートデバイス全体としては移動状態とデバイスと停止状態のデバイスが混在する場合を想定する．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．

集約型 SOL により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．

- 無線ノードモジュールによる隣接ノードの取得と転送
- 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の集約と仮想ネットワーク構築
- SOL アルゴリズムによる仮想ネットワークのノード位置推定

しかし，この周期処理において次の課題がある．

- BLE および WiFi の通信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，仮想ネットワーク構成と大域/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．

4.1 システム構成

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，一般的に，多数のモバイルスマートデバイスとこれらを WiFi 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 3 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．

4.1.1 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

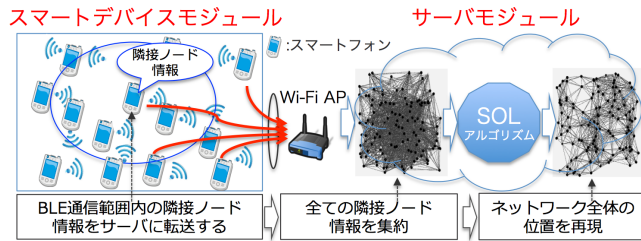


図 3 SmartFinder のシステム構成

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 LTE/Wi-Fi 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返す。

- BLE を用いた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)
- LTE/Wi-Fi 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

4.1.2 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 WiFi または LTE を用いて集約し蓄積する。隣接ノード ID のリストを基に構成した仮想ネットワークに SOL アルゴリズムを適用して、モバイル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、継続的にモバイルスマートデバイスの位置を推定する。

4.2 隣接ノード情報の欠損を想定した仮想ネットワーク構成方式

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の隣接ノード ID リスト集約時

これらの問題を双方向リンクの仮想ネットワーク構成と隣接ノード情報の保持により抑制する。

4.2.1 双方向リンクの仮想ネットワーク構成

集約型 SOL の仮想 WSN は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構成する。すなわち、互いの隣接関係の対称性を保証しない片方向リンクである。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ンクが全損し、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双方向リンクの仮想ネットワーク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。3.2 節の仮想 WSN の構成において、以下の双方向リンク構成処理を加えて、隣接ノード情報の欠損を補完する。

- ノード i の隣接ノード情報に含まれるノードに加え、隣接ノード情報としてノード 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。
- 同様の補完を行なうため、 n 次近傍ノード x の隣接ノード情報に含まれるノードに加え、隣接ノード情報としてノード x を含むノードにおいて、 $(n+1)$ 次近傍ノードを設定する。

4.2.2 隣接ノード情報の保持

4.2.1 で述べたように、双方向リンクによりトポロジの欠損を補完した仮想ネットワークを構成する。しかし、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や、互いに隣接ノードである 2 つのノードにおいて LTE/Wi-Fi を用いたシンクノードへの隣接ノード ID リストの集約が両方も欠損した場合は、該当するリンクが失われるため、双方向リンクの仮想ネットワーク構成ではトポロジの欠損を補完することはできない。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ネットワークを構成する。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、移動ノードと他の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、停止ノード間の隣接ノード情報保持期間 t^s 、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 $t^s \gg t^m$ 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ネットワークのトポロジ欠損を補完し、位置推定精度の維持を図る。

4.3 処理時間制約内での精度維持を実現する拡張 SOL アルゴリズム

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) の位置推定戦略を分ける (図 4)。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

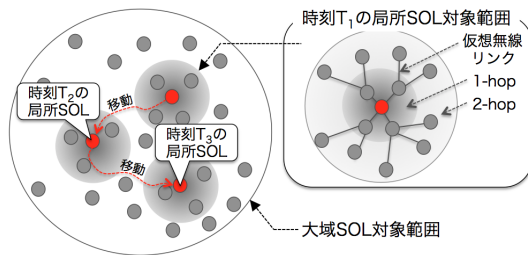


図 4 大域 SOL と局所 SOL

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。以降、大域/局所 SOL 内での位置推定のための繰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し、隣接ノード情報の集約、仮想ネットワークの構成、複数ステップから成る局所 SOL の繰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。

4.3.1 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、次の位置推定処理サイクルを複数回実施して、位置推定結果を領域判定値が最小となる推定ジオメトリとして求める。

- 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

大域 SOL 実行周期期間中の上記処理の繰返しにおいて、記憶した(領域判定値が最小とする)推定ジオメトリを採用し、大域 SOL の実行周期中停止していたノードの位置推定結果を更新する。

4.3.2 局所 SOL

局所 SOL において、以下の処理の削減によって計算時間を短縮し、かつ精度の維持を図る。

- 停止ノードは大域 SOL により高精度に位置推定されていると仮定し、移動ノードのみを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、局所的な移動に留まるため、その狭域の近傍トポロジによる位置推定が可能である。従って、大域的な多次近傍ノードを用いた仮位置修正を行わず、それに相当するステップを削減する。

上記の計算時間の短縮を図りながら下記により精度維持を図る。

- 移動量が少ないことを前提とし、大域 SOL の仮位置更新ステップの終盤過程相当の学習係数を適用した直

近の位置推定結果からの漸次的な位置更新により、大域 SOL より少ない位置更新回数で大域 SOL に相当する位置推定を行う。

- 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、位置推定処理の簡略化と精度維持を両立する。

局所 SOL は大域的なジオメトリを形成するための位置修正を省略し、かつ直近の推定位置から漸次的な位置更新とするため、局所 SOL における学習係数 $\alpha_i(t)$ は大域 SOL の仮位置更新ステップの終盤過程における 1 次近傍と 2 次近傍を用いた位置修正時相当の学習係数に重ねる。 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、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。

$$\alpha_i(0) = \eta \cdot \exp(S^g - S^l) \quad (0 < \eta < 1). \quad (7)$$

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ー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、移動ノードのみの仮位置修正を行なう局所 SOL は、移動ノードを中心とする 2 次近傍までの局所ネットワークを用いる局所 SOL は、アンカーノードを用いた座標変換やアンカーノードを基準点とする位置更新ができない。従って、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、実際のネットワーク全体のスケールを勘案したノード間相対一定距離を用いて、位置推定を行う。ノード間相対一定距離は実際のネットワーク全体のスケールを勘案するため、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 で用いるノード間相対一定距離は、座標変換前のノード間相対一定距離であるホップ数に対する比として求める。局所 SOL で用いるノード間相対一定距離 D^l は大域 SOL で用いたノード間相対一定距離 D^g とその推定結果から算出した \bar{r} を用いて、以下の式で算出する。 d_{ij} は絶対座標変換前の推定ネットワークにおけるノード i とノード j の相対距離、 D_{ij} は絶対座標変換後の推定ネットワークにおけるノード i とノード j の絶対距離、 N は位置推定ノードの集合、 $|N|$ はノード数を示す。 \bar{r} は絶対座標変換前の推定ネットワーク形状と絶対座標変換後の推定ネットワーク形状のスケール比を表す。

$$r_{ij} = \frac{D_{ij}}{d_{ij}}, \quad \bar{r} = \frac{1}{|N|C_2} \sum_{i=1}^{|N|-1} \sum_{j=i+1}^{|N|} r_{ij} \quad (8)$$

表 1 シミュレーション諸元

フィールド範囲 ($m \times m$)	50 × 50
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
隣接ノード情報取得時の欠損確率	0.0, 0.1
集約時の欠損確率	0.0, 0.1
アンカーノード数	3
ノード数	100, 200, 300
減衰定数 η	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

$$D^l = D^g \cdot \bar{r}, \quad (9)$$

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 $V_i^{\{N\}}(t)$ は以下のように表される。

$$V_i^{\{N\}}(t) = \frac{D^l \cdot N - |w_i(t) - w_n(t)|}{|w_i(t) - w_n(t)|} (w_i(t) - w_n(t)) \quad (10)$$

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。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{2\}}(t)) \quad (11)$$

5. 評価

シミュレーション諸元は表 1 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 10m のクラス 2 を想定し、半径 R の正円である Unit Disc Graph と仮定する。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 (隣接ノード情報取得時の欠損確率)。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)。

5.1 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

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 (12) 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。

$$ERR_{ave} = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N |W_i - w_i| \quad (12)$$

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。

5.2 評価結果

図 5 は各サイクルにおける隣接ノード情報取得時の欠損確率と集約時の欠損確率が 0 の場合の 100, 200, 300 ノードの絶対位置推定評価を示す。まず、時間の変化に対する値の変化を考察する。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。それに伴い、局所 SOL では、ランダムな位置である停止ノードの位置を用いた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、約 37m の誤差を示す。10 サイクル以降の値の変化は以下に分類できる。

- 大域 SOL による位置推定結果の更新時
- 大域 SOL による位置推定結果の更新時からノードの移動/停止遷移時までの間
- ノードの移動/停止遷移時から大域 SOL による位置推定結果の更新時までの間

大域 SOL による位置推定結果の更新時は、大域 SOL により高精度に推定された位置推定結果を得ることから他のステップ時と比べ位置推定誤差は小さくなる傾向がある。大域 SOL による位置推定結果の更新時からノードの移動/停止遷移時までの間は大域 SOL の位置推定結果から精度劣化なしにほぼ横ばいに推移する傾向がある。これは大域 SOL により高精度に推定された停止ノードの位置推定結果を用いた局所 SOL が有効に機能していると言える。ノードの移動/停止遷移時から大域 SOL による位置推定結果の更新時までの間は大域 SOL の位置推定結果により高精度な位置をもつ幾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、幾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。従って、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、他の時間と比べ位置推定精度が劣化する。

次に、各ノード数における値の違いを比較する。10 サイクル以降において、ノード数が増えると ERR_{ave} が低くなり、時間ごとのばらつきも小さくなる。300 ノードにおいて、時間ごとのばらつきは 1 サイクルあたりの移動量である約 1m 程度にとどまる。これは、ノード数が増えるとノード間の相対関係が増え大域 SOL の精度が向上することと、その高精度に推定された停止ノードが増えることに

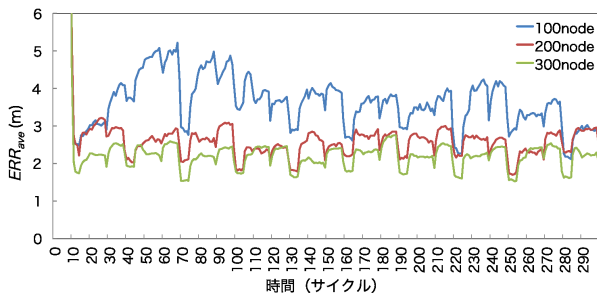


図 5 隣接ノード情報取得時の欠損確率と集約時の欠損確率が 0 のときの絶対位置推定評価

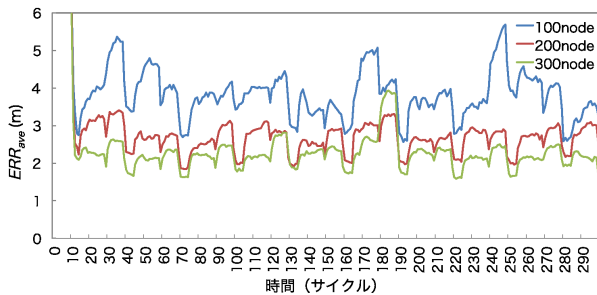


図 6 隣接ノード情報取得時の欠損確率と集約時の欠損確率が 0.1 のときの絶対位置推定評価

より、局所 SOL の位置推定が有効に機能するため時間ごとのばらつきも小さくなると考えられる。

図 6 は各サイクルにおける隣接ノード情報取得時の欠損確率と集約時の欠損確率が 0.1 の場合の 100, 200, 300 ノードの絶対位置推定評価を示す。時間の変化に対する値の変化は隣接ノード情報取得時の欠損確率と集約時の欠損確率が 0 の場合と同様の挙動を示す。図 5 と図 6 を比較するとノードの移動/停止遷移時から大域 SOL による位置推定結果の更新時までの間における位置推定精度の悪化量が大きくなっている箇所はあるものの、全体を見ると大きな違いはない。これは、双方向リンクの仮想ネットワーク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ネットワーク構成方式が有効に機能しているためであると考えられる。

6. まとめ

本稿では、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り、時間ごとのばらつきも小さくなる。
- 隣接ノード情報の欠損を想定した仮想ネットワーク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。

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] Kitanouma, T., Takashima, Y., Adachi, N., 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] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J.: *Global Positioning System, Theory and Practice*, 4th ed. (1997).
- [6] Molisch, A., Cassioli, D., Chong, CC., Emami, S., Fort, A., Kannan, B., Karedal, J., Knish, J., Schnoz, H., Siwiak, K. and Win, M.: A Comprehensive Standardized Model for Ultrawideband Propagation Channels, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.54, no.11, pp.3151–3166 (2006).
- [7] Harter, A., Hopper, A., Steggle, P., Ward, A., and Webster, P.: The anatomy of a context-aware mobile applications, *Proc. ACM/IEEE MobiCom 99*, Vol.8, pp.187–197 (1999).
- [8] Priyantha, N., Miu, A., Balakrishnan, H., and Teller, s.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *Proc. MOBICOM 2001* (2001).
- [9] Wozniak, M., Odziemzyk, 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] He, C., Huang, C., M.Blum, B., A.Stankovic, J., and F.Abdelzaher, T.: Range-free localization and its impact on large scale sensor networks, *ACM TECS*, Vol.4, No.4, pp.877–906 (2005).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] Kawachi, 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).