Vol.2018-DPS-175 No.14
Vol.2018-MBL-87 No.14
Vol.2018-ITS-73 No.14
2018/5/24

IR-UWBを用いた自己組織化ノード位置推定方式のシミュレーション評価

森 流星[1]　北之馬 貴正[1]　新居 英志[1]　安達 直世[2]　滝沢 泰久[2]

概要：我々は広い屋内空間内に遍在する多数のスマートデバイスの位置を定点 3 点のみで高精度に精度に推定する集約型自己組織化ノード位置推定方式 (SOL: Self-Organizing Localization) を提案している．集約型 SOL は、各ノードの間の相対距離を用いてノード位置を推定する．集約型 SOL の位置推定誤差精度は，BLE を適用した場合 2m 程度である．本稿では，集約型 SOL を，定点 3 点のみである点を継承しつつ，その精度を制御へ適用可能な cm オーダーに高精度化するため，IR-UWB を適用した集約型 SOL を提案する．また，シミュレーション評価からその精度を検証する．

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-Constrcution，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 10cm-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．すなわち，上記のような環境で要求精度を満たす屋内位置推定方式は現存しない．

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 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定点 3 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．SmartFinder は，スマートデバイス間の通信を BLE とした場合，その位置推定精度は 2m 程度である．

本稿では SmartFinder へ IR-UWB を適用することにより定点 3 点のみで制御における要求精度の実現可能性をシミュレーション評価から考察する．

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

2. 関連研究

現在利用もしくは研究されている位置推定方式は，ノード間測距デバイスを必要とするレンジベース位置推定方式（Range-based）とノード間測距デバイスを用いないレンジフリー位置推定方式（Range-free) に分類できる．以下では Range-based 位置推定方式と Range-free 位置推定方式の例を説明する．

2.1 Range-Based 方式

Range-based 方式では位置推定にノード間の距離情報を必要とする．つまり無線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る．またノード間距離の測距方式は TOA（Time of arrival)，TDOA（Time Difference Of Arrival)，RSSI（Received Signal Strength Indicator）が利用されている．

2.1.1 TOA 利用方式

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計測し，転送媒体（超音波，電波等）の転送速度からノード間距離を計算する方式である．TOA 方式を利用した主な位置推定方式として Global Positioning System (GPS) [4] や Ultra Wide Band(UWB) [5] などが挙げられる．

GPS では複数の GPS 衛星からの信号の受診を行う．GPS 衛星から受診した情報の中には時刻データ，衛星の軌道情報などが含まれており，時刻データを元に送信から受信までの時刻差を算出し電波の伝搬速度 (光の速度と同じ 30 万 km/秒) を掛け合わせることで，GPS 衛星からの距離を算出する．3 個以上の GPS 衛星からの距離がわかれば空間上の座標を 1 点求めることが可能になる．しかし GPS を用いた位置推定方式は GPS 衛星と通信できることが前提であるので GPS 衛星と通信のできない屋内，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．

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．しかし通信距離が短いため位置推定を行うためには多数のアンカーノードを必要とする．

2.2 TDOA 利用方式

TDOA 利用方式は，異なる複数のアクセスポイントからの電波の到着時間の差を用いて測位を行う．TDOA 方式を利用した主な位置推定方式として Active Bat[6]，Cricket[7] などが挙げられる．

2.3 RSSI 利用方式

RSSI 利用方式は電波強度を利用しノード間距離を測距する方式である．RSSI を用いた位置推定方式として RADAR[12]，SpotON[13] がある．この RSSI 利用方式で位置推定に必要な情報は電波強度のみである．そのため比較的単純な機能で実装が可能である．しかしこの方式ではフェージングの影響で電波の強弱が変動することがあるため，正確な測距を行うことが難しいとされる．そのため正確な位置推定を行うためには大量の固定点が必要となる問題が存在する．

2.4 Range-Free 方式

Range-Free 方式では，ノード間距離情報を利用しない測位方式である．センサーノードが測距機能を持つ必要がないため，Range-Based 方式と比較し安価で単純な実装が可能である．Range-Free 方式を用いた位置推定方式は，Centroid[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．通信可能なノードの位置情報を取得しそれらの重心を用いて位置を推定する．Centroid 方式は仕組みが単純であるが制度は低い．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．AIPT 方式では制度が構成可能な三角形の数に依存するため，アンカーノード数に制度が依存するとされる．

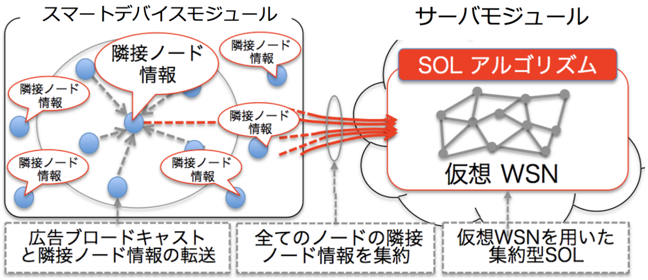

図 1　集約型 SOL の構成

3. 集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder

SmartFinder[2] [3] とは，断続的に移動を繰り返すスマートデバイスへ SOL を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である．以後 SmartFinder の概説を行う．

3.1 SmartFinder システム構成

SmartFinder は主に多数のスマートデバイスモジュールとサーバモジュールから構成される（図 1）．それぞれの主な動作は，スマートデバイスモジュールでは隣接ノード ID 情報及び隣接ノード間距離の取得と，Wi-Fi/LTE を用いたサーバへの情報集約を行う．サーバモジュールでは集約された隣接ノード ID 及びノード間距離から仮装メッシュネットワークの構成，大域/局所 SOL によるスマートデバイスの位置推定を行う．

3.1.1 スマートデバイスモジュール

SmartFinder で想定されるスマートデバイスモジュールは Wi-Fi/LTE の機能及びモーションセンサを備えているものとする．これにはスマートフォン，BLE タグ，IR-UWB デバイスなどが相当する．各スマートデバイスでの動作は自身の ID 情報を伝える広告ブロードキャストの送信をする．同時に他の隣接ノードから広告ブロードキャストの受信を行い隣接ノード ID 情報を取得する．また隣接ノード ID 情報を取得したノードに対し，ノード間距離の測距を行い距離情報の取得を行う．また各ノードはモーションセンサを用い自身の移動/停止状態の判定を行う．以上の隣接ノードの ID/距離情報，移動/停止情報を Wi-Fi/LTE を用いてサーバモジュールへと集約する．

3.1.2 サーバモジュール

サーバモジュールではスマートデバイスモジュールから集約された隣接ノード ID 及びノード間距離情報を元に仮想メッシュネットワークの構成/更新を行い集約型 SOL を適用することでスマートデバイスの位置を推定する．

3.2 サーバモジュールにおける仮想ネットワークの構成及び更新

サーバモジュールではスマートデバイスから集約した隣接ノード情報及びノード間距離情報を用いて，隣接ノード情報の欠損を考慮した仮想メッシュネットワークの構成/更新を行う．

3.2.1 隣接ノード情報の欠損の考慮

隣接ノード情報の欠損が発生する場合として，隣接ノード情報の取得時とサーバへの情報集約時が考えられる．サーバモジュールでは隣接ノード情報の欠損を考慮し，各ノードの移動/停止の状態別に隣接ノード情報の蓄積を行う．停止ノード間の隣接ノード情報は変化しないものとし停止ノード間の隣接ノード情報保持期間 t^s は長期間とする．また移動ノード間の隣接ノード情報は常に変化しているとして移動ノードを含む隣接ノード情報保持期間 t^m は短期間とする．t^s，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装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

隣接ノード間距離情報を用いてサーバモジュールの構成を行う．まず隣接ノード情報及びノード間距離情報から仮想メッシュネットワークの構成を行う．この仮想メッシュネットワークにおいてノード間距離を定義するために，隣接ノード間で正のコスト（隣接ノード間距離）を持つ最短経路問題を考える．この最短経路問題をダイクストラ法を全ノードを始点として解くことでホップ間のノード間距離を算出しノード i，ノード j 間のノード間相対距離 d_{ij} を設定する．

3.3 集約型 SOL による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元に位置情報の修正を繰り返し行いネットワークの形状の再現を行う．また停止ノードでは大域 SOL を用いた位置推定行い，移動ノードでは局所 SOL を用いた位置推定を行う．上記のように停止/移動ノードで位置推定戦略を分ける．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，仮装メッシュネットワークの構成，局所 SOL の計算終了までの過程を 1 サイクルとする．大域/局所 SOL の推定結果を位置推定結果とする．

3.4 大域 SOL によるスマートデバイス位置推定

大域 SOL では仮想メッシュネットワーク全体の停止ノードを用いて高精度に位置推定を行う．大域 SOL では数十秒程度の十分な推定時間を利用できるとし，数十秒の周期で位置推定を実施する．大域 SOL のアルゴリズムは以下の手順で分けられる．

- 集約型 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 における位置推定アルゴリズムは以下の手順で実施される．

[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大域 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 $V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)$ を，次のように定義する．

$$V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t) = \frac{d_{im}^{\{\gamma^g(t)\}} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|}(w_i(t) - w_m(t)) \quad (1)$$

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

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{1.0\}}(t) + V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)) \quad (2)$$

初期の段階では全体的なメッシュネットワークの形状を再現を行い，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（3）により決定する．

$$\gamma^g(t) = \begin{cases} d^{\max} - \frac{t(d^{\max} - 2.0)}{S^g} & (d^{\max} > 2.0) \\ 2.0 & (otherwise) \end{cases} \quad (3)$$

S^g は大域 SOL における仮位置修正回数を表す．$d^{\max}$ は全ノード間におけるコスト距離最大値を表す．

各ノードにおいて [step.2] を繰り返し実施することで停止ノード全体の仮想メッシュネットワークの相似形を再現する．相似形を再現した仮装メッシュネットワークを 3 点のアンカノードの絶対位置と推定位置を対を用いて絶対座標へと変換する．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．

$$\begin{aligned} X_A &= a x_A + b y_A + t_x \\ Y_A &= c x_A + d y_A + t_y \end{aligned} \quad (4)$$

3 つのアンカー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．

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

矛盾の少ないジオメトリを推定するために相対距離矛盾

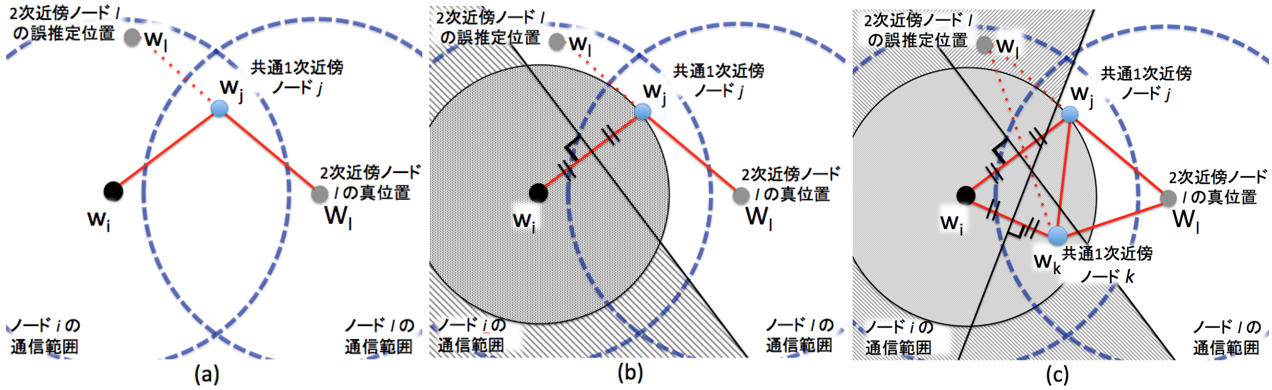

図 2 推定ノードのトポロジ矛盾領域

率の算出による推定ジオメトリ評価を用いる (図 2). ノード i において, ランダムに選択したノードを 2 次近傍ノード相当のノード l とし, ノード i とノード l に対するノード間コスト距離がノード i とノード l 間のコスト距離未満となるノード, すなわち, $(d_{ij} \leq d_{il})$ かつ $(d_{jl} \leq d_{il})$ のノードを 1 次近傍ノード相当のノード j とする. w_i と w_j を基準点とし, 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 分割し, w_i に近い領域にある $(|w_l - w_i| \leq |w_l - w_j|)$ 場合, コスト距離矛盾と判定する.

これにより, 任意のノード間相対距離に対して相対距離の矛盾を検知することが可能となる. さらに, 検知領域を拡大するため, 上記と同様に全ての共通 1 次近傍相当のノード群による複数の分割空間を重ね合わせて相対距離矛盾の検知範囲を拡大し, 誤推定検知の可能性を高める. 全ての 2 次近傍ノードとの組み合わせを領域判定値とし, これにより最小の領域判定値のジオメトリを選出し, 位置推定推定結果とする.

3.5 局所 SOL によるスマートデバイスの位置推定

局所 SOL では移動ノードに対応するため位置推定処理の簡略化及び制度の維持を図る.

- 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 2 次近傍ノード相当のノードまでとし, 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相当する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 6 に従う.

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

局所 SOL による位置修正は以下の手順で実施される.

[Step.1] 各ノードの直近の位置推定結果を各ノードの初期仮位置 $w_i(0)$ とする.

[Step.2] 移動ノード i の位置更新を行うノード m を選択する. この時ノード i とノード m のノード間相対距離が 1.0 もしくは 2.0 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 つ選択する. ノード間相対距離 $d_{im}^{\{\gamma^l\}}$ を用いたノード i の修正ベクトル $V_i^{\{\gamma^l\}}(t)$ を, 次のように定義する.

$$V_{im}^{\{\gamma^l\}}(t) = \frac{d_{im}^{\{\gamma^l\}} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|}(w_i(t) - w_m(t)) \tag{7}$$

この修正ベクトル $V_{im}^{\{\gamma^l\}}(t))$ 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.

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{1.0\}}(t) + V_{im}^{\{2.0\}}(t)) \tag{8}$$

Vol.2018-DPS-175 No.14
Vol.2018-MBL-87 No.14
Vol.2018-ITS-73 No.14
2018/5/24

図 3　今回実験で想定された日本 GIT 社の IR-UWB タグ

図 4　事前評価実験風景

4. SmartFinder へ IR-UWB デバイス適用

本論では RTOF を用いることで高精度測距が可能な IR-UWB デバイスを SmartFinder に適用した場合を想定したシミュレーションを行う．

4.1 IR-UWB デバイス

IR-UWB デバイスは無線ノード間の RTOF(Round Trip of Flight) によりノード間距離を測定する．SmartFinder へ適用する IR-UWB デバイスは日本 GIT 社 [15] の IR-UWB デバイス (図 3) を想定する．本デバイスは 7.25-10.25GHz の周波数帯において次のように測距する．

- 相互のブロードキャスト通信で隣接ノード情報を取得.
- 上記隣接ノードへユニキャスト送信.
- ユニキャスト受信ノードは一定時間後にユニキャストで返信.
- 返信受信ノードで通信往復時間により距離を算出.
- 一秒間に数百回の測距を行っており測距成功回数の平均を距離として算出する．

4.2 IR-UWB デバイス事前評価

IR-UWB を想定したシミュレーションを行うために今回は IR-UWB デバイスを 3 台用意し事前評価を行った (図 4)．事前評価から図 5 のような結果が得られた．

- 測距値の分布の範囲は実距離以上に分布する．
- この分布の中央値は実距離に比例する．
- 測距可能な最大距離は 15m である．

上記の特徴と事前評価から得られたデータを元に，シミュレーションでは UWB の測距誤差に式 9 を用いる．d_{ij} はノード i とノード j のノード間相対距離 (m) とする．

$$N(\mu, 0.35) \quad (\mu = d_{ij} * 0.02) \tag{9}$$

上記の精度に基づき SmartFinder のシミュレーションを行うことにする．

5. 評価

5.1 評価方式

測距値の分布の範囲は実距離以上であることから停止ノード間では過去の測距値を保持し最小の値が最も実距離に近く精度が高いと考えられるため，停止ノード間では過去の値と比較し最小の値を SOL への入力データとして使用する．本論では大域/局所 SOL の観点から以下の 2 項目で精度向上を図る．

- 大域 SOL での停止ノードの位置推定において移動/停止ノードの両方の情報を利用する場合
- 大域 SOL での停止ノードの位置推定において停止ノードのみを用いる．

シミュレーション諸元は表 1 に示す．大域 SOL の実行周期は 10 サイクルに 1 回とする．隣接ノード情報の更新及び，局所 SOL の実行周期は 1 サイクル毎とする．無線通信半径は IR-UWB デバイスの事前評価に従い半径 15m の Unit Disk Graph を想定する．ノードの移動速度は人の歩行速度を想定し 3.6km/h とする隣接ノード情報取得時のブロードキャストパケットのデータロスを考慮し，隣接ノード情報取得時の欠損確率を 0.1 とする（隣接ノード情報取得時の欠損確率）．また隣接ノード情報をサーバに送信する際の通信の欠損確率を 0.1 と仮定する集約時の欠損確率）．

5.2 評価方法

相対位置評価はノードの推定位置により構成される推定ネットワークの形状とオリジナルネットワーク形状の合同性を次式により評価する．d_{ij} は推定ネットワークにおけるノード i とノード j の距離 (推定距離)，D_{ij} はオリジナルネットワークにおけるノード i とノード j の距離，N は位置推定ノードの集合，$|N|$ はノード数を示す．

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{D_{ij}}, \quad \bar{r} = \frac{1}{_{|N|}C_2} \sum_{i=1}^{|N|-1} \sum_{j=i+1}^{|N|} r_{ij} \tag{10}$$

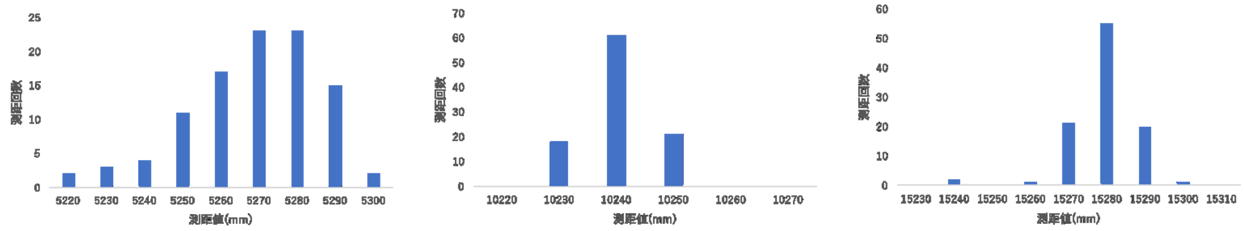

図 5　IR-UWB デバイス事前評価

$$V[r_{ij}] = \frac{1}{{}_{|N|}C_2} \sum_{i=1}^{|N|-1} \sum_{j=i+1}^{|N|} (1 - r_{ij}/\bar{r})^2 \qquad (11)$$

$\bar{r}$ が 1 に，$V[r_{ij}]$ が 0 に近づけば推定ネットワーク形状はオリジナルのネットワーク形状と合同となる．すなわち，$\bar{r}$ が 1，$V[r_{ij}]$ が 0 の場合，推定ネットワーク形状はオリジナルのネットワーク形状にばらつきなく完全に一致する．

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．

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

5.3　評価結果

シミュレーション結果を図 6，図 7 に示す．本シミュレーション結果はシード値を変化させ各 4 回のシミュレーションの平均値である．停止ノードのみの場合ではノード数を増やすことで精度向上が確認できた．しかし移動/停止ノードの両方を用いる場合は大きな精度向上は見られない．これは大域 SOL で停止ノードのみを用いる場合は，350,400,450 とノード数を増やすことで精度の高い停止ノードのみがを増えることで精度向上したと考えられる．しかし移動/停止ノードの両方を用いる方式では精度の高い停止ノード以外にも移動ノード情報も増加しているためノード数増による効果は低いと考えられる．ここから精度の低いノードを増やしてもあまり効果はなく，精度の高いノード数が増えることで効果があることがわかる．

次にサイクル毎の Err_{ave} の変化を考える．図 8 は大域 SOL で停止ノードのみを用いる場合の大域 SOL の Err_{ave} である．このグラフから 49〜60 サイクルにかけて急激に大域 SOL の精度が低下していることが確認できる．図 9 は 350node における 50 サイクル目の大域 SOL の真位置と推定位置の図である．赤色の点が真位置，青色の点が推定位置を表している．図 9 を見ると左上の緑色丸部分のノード密度が過疎になっている Void エリアが確認できる．移動ノードの移動パターンによりフィールド場のノード配置に偏りが出ているため左上の void エリアでは隣接情報が不足し大きく精度が劣化していると考えられる．

表 1　シミュレーション諸元

フィールド範囲 ($m \times m$)	100 × 100
無線通信半径 (m)	15
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）	30
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	350, 375, 400,425,450
減衰定数 η	0.995
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	150

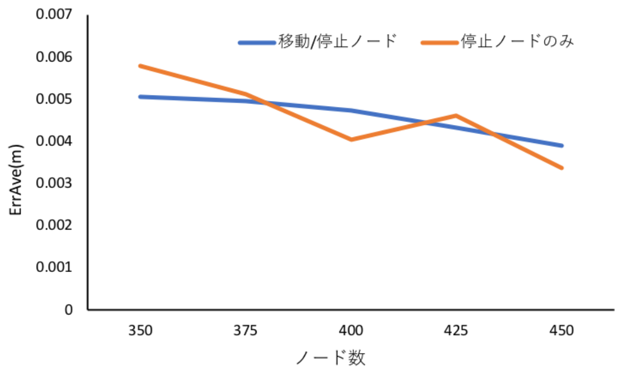

図 6　ErrAve 比較

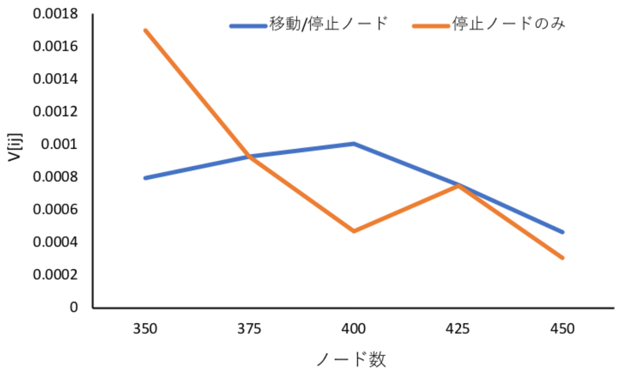

図 7　V[ij] 比較

Vol.2018-DPS-175 No.14
Vol.2018-MBL-87 No.14
Vol.2018-ITS-73 No.14
2018/5/24

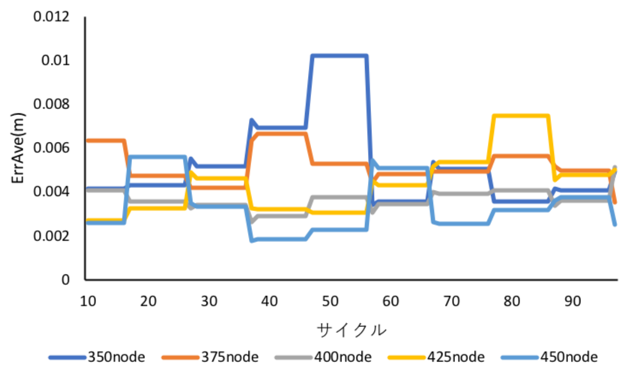

図 8　停止ノードのみ大域 SOL 精度

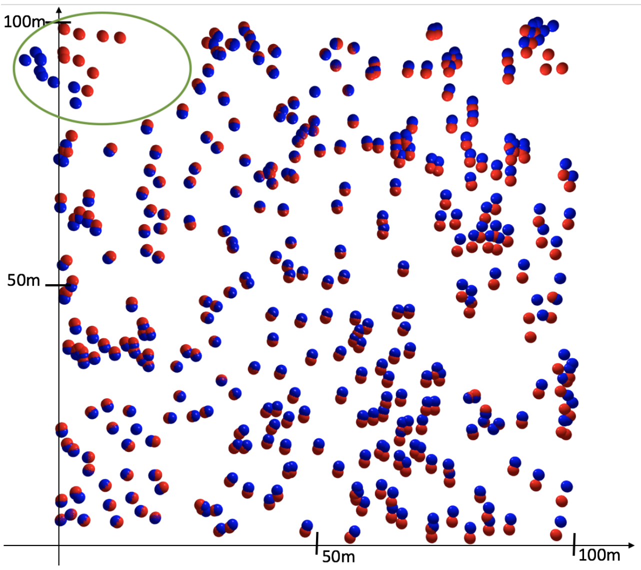

図 9　350node における 50 サイクル目の大域 SOL

6. まとめ

シミュレーションから IR-UWB を SmartFinder に用いた場合の位置推定精度の検証を行った．今回のシミュレーションからは，ノードの移動によってはノード密度が一時的に過疎になり隣接ノード情報が不足する Void エリアが出現する場合があることが判明した．今後は，一時的発生する Void エリアに，過去の時間におけるトポロジと重ねることにより，一時的な Void エリアを排除して精度劣化を抑制することを検討する．

参考文献

[1] Newman, Nic. "Apple iBeacon technology briefing." Journal of Direct, Data and Digital Marketing Practice 15.3 (2014): 222-225.

[2] 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).

[3] 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).

[4] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., "Global Positioning System," Theory and Practice, 4th ed. (1997).

[5] 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, Nov. 2006.

[6] Harter, A., Hopper, A., Steggles, 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).

[7] Priyantha, N., Miu, A., Balakrishman, H., and Teller, s., "The cricket compass for context-aware mobile applications," *Proc. MOBICOM 2001* (2001).

[8] Wozniak, M., Odziemzyk, W., and Nagorski, K., "Investigation of Practical and Theoretical Accuracy of Wireless Indoor Positionings System Ubisense," *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, Vol. 95, No.1, pp.36–48 (2013).

[9] 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).

[10] 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).

[11] 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)

[12] P.Bahl and V.N.Padmamabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system"Proc. IEEE INFOCOM 2000, vol.2,pp.775-784,March 2000.

[13] J.Hightower, G.Boriello, and R.wat "SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength,"CSE Report 200-02-02, University of Washington, 2000

[14] Niculescu, D. and Nath, B. "DV-based positioning in ad hoc networks," *Telecommun.Syst*, Vol.22, No.1-4, pp267-280, (2003).

[15] 株式会社日本ジー・アイ・ティー (http://www.git-inc.com)