

IR-UWB を用いた自己組織化ノード位置推定方式の実装 評価

森 流星¹ 北之馬 貴正¹ 川田 千尋² 滝沢 泰久²

概要: 我々は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 では各ノード間の相対距離を用いてノード位置を推定する。従来の BLE を用いた集約型 SOL の位置推定精度誤差は 2m 程度である。本稿では BLE デバイスの代わりに IR-UWB デバイスを集約型 SOL に適用することで、数 cm オーダーに高精度化する方式を提案し、さらに IR-UWB デバイスを用いた集約型 SOL の実装を行い実環境での位置推定精度誤差の検証及び評価を行う。

1. はじめに

近年の屋内測位は工場での作業員の動線管理やショッピングモールの顧客のナビゲートなどのスマートデバイスの見える化において高いニーズがあり、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、その位置推定精度誤差は数 m オーダーである。一方、将来においては Internet of Things (IoT) と共に増え続けるスマートロボットの普及によってロボットの制御にも屋内測位が用いられることが予想される。例えば、建設現場における i-Constrecution, 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。これらの制御において必要とされる位置推定精度は数 10cm-数 cm オーダーであると言われている。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[2] [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 BLE デバイスの代わりに IR-UWB デバイスを集約型 SOL に適用することで、数 cm オーダーに高精度化する方式を提案し、さらに IR-UWB デバイスを用いた集約型 SOL の実装を行い実環境での位置推定精度誤差の検証をし評価を行う。

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

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

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

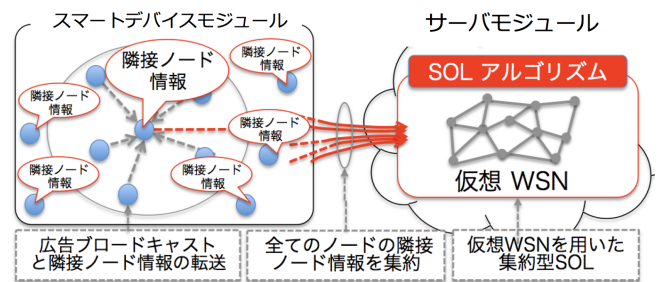


図 1 集約型 SOL の構成

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。

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 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。次節から 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想メッシュネットワークの構成、大域 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 を用いた位置推定を行い、移動ノードでは 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 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 (9) 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点のアンカー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。

$$\begin{aligned} X_A &= ax_A + by_A + t_x \\ Y_A &= cx_A + dy_A + t_y \end{aligned} \quad (4)$$

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。

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

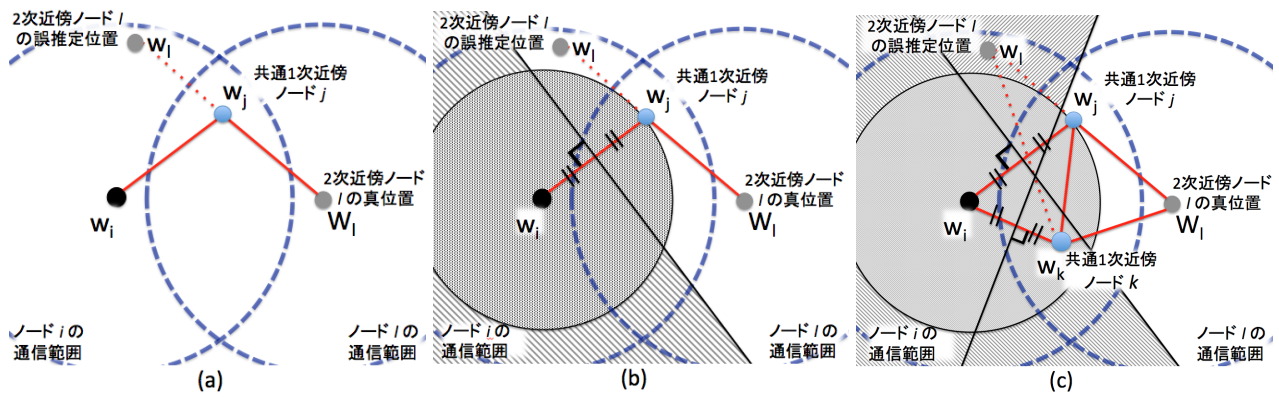


図 2 推定ノードのトポロジ矛盾領域

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.

4. SmartFinder へ IR-UWB デバイス実装

4.1 IR-UWB デバイス

SmartFinder に IR-UWB デバイスを適用するにあたって株式会社日本ジー・アイ・ティー [15] の IR-UWB デバイスを用意した. 本デバイスでは 7.25-10.25GHz 帯において端末間で RTOF(Round Trip of Flight) により測距を行い, 誤差数 cm 以内の高精度な測距が可能である. 以下に UWB デバイス間での測距アルゴリズムを示す.

- 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.
- 端末間で数十回の測距を行い測距成功時の平均を距離として算出する.



図 3 日本 GIT 社の IR-UWB タグ

4.2 IR-UWB デバイス適用による SmartFinder 変更点

SmartFinder に IR-UWB を適用するにあたってサーバモジュール測位メカニズムの変更点を示す.

4.2.1 仮装メッシュネットワークの構成

SmartFinder サーバには毎秒 IR-UWB デバイスによって測距された隣接ノード間距離情報が送られてくる. サーバが隣接ノード間距離情報を受信したとき, ノード間相対距離情報に対してオフセット値による補正を行う. オフセット値は実験環境によって変動する. 補正を行なった隣接ノード間距離情報を用いて仮装メッシュネットワークの構成を行う. 次に式(6)を用いて, 仮装メッシュネットワークにおいてノード相対距離の定義を行う. 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我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相対距離 D_{ij} とする.

$$D_{ij} = \min(d(p_{ij})|S(p_{ij})), d(p_{ij}) = \sum_{l_{xy} \in p_{ij}} l_{xy} \quad (6)$$

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.

4.2.2 大域 SOL によるスマートデバイス位置推定

集約型 SOL アルゴリズムによる位置推定において更新式の変更点を以下に示す.

[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 $D_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)$ 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。

$$V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t) = \frac{D_{im}^{\{\gamma^g(t)\}} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|} (w_i(t) - w_m(t)) \quad (7)$$

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。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{1.0\}}(t) + V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)) \quad (8)$$

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 (9) により決定する。

$$\gamma^g(t) = \begin{cases} D^{\max} - \frac{t(D^{\max} - 2.0)}{S^g} & (D^{\max} > 2.0) \\ 2.0 & (otherwise) \end{cases} \quad (9)$$

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。

5. 評価

5.1 実験方式

実験風景、実験風景をそれぞれ表 1, 図 4 に示す。ノード配置は図 5 のように全 11 台の内 3 台をアンカーノードとして配置する。隣接ノード情報の更新周期は 10 秒とする。大域 SOL の実行は 10 秒毎である。



図 4 実験風景

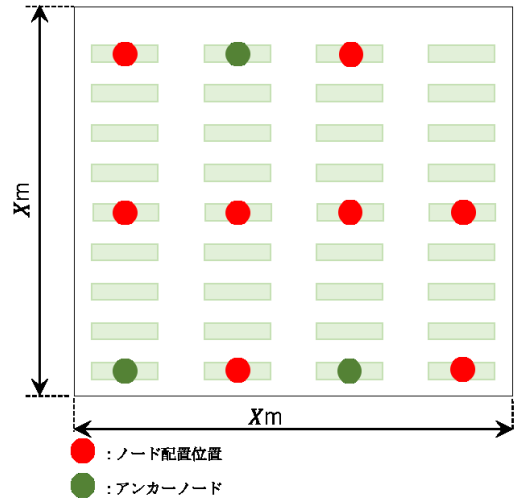


図 5 ノード配置図

表 1 実験環境

フィールド範囲 (m^2)	25, 36, 49, 64, 81
アンカーノード数	4
ノード数	11
SOL の実行周期 (s)	10
SOL における仮位置修正回数 S^g	800
実験時間 (s)	120

5.2 評価方式

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および平均ノード間相対距離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。

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

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

\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。

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

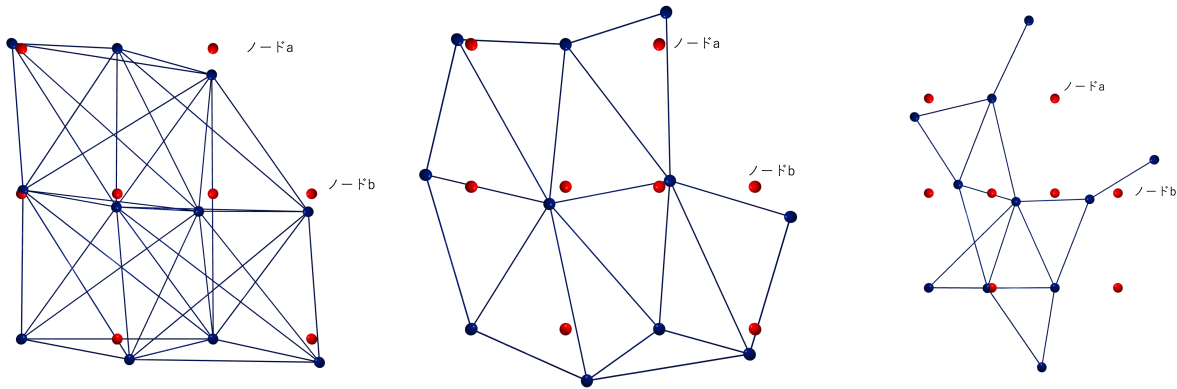


図 6 左から 25m², 64m², 81m² でのトポロジを示す

次に平均ノード間相対距離は、ノード i とノード j のノード間相対距離 d_{ij} の平均である平均ノード間相対距離 D_{ave} を用いて評価する。 D_{ave} は式 (13) により求める。

$$D_{ave} = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N d_{ij} \quad (13)$$

5.3 評価結果

Err_{ave} による評価結果を図 7 に示す。 Err_{ave} は最小が 25m² で約 20cm であり最大が 81m² で 230cm である。 またノード配置面積が 64m², 81m² で大きく精度劣化していることがわかる。これは図 8 に示す $V[r_{ij}]$ による評価結果でも同様の傾向が見て取れる。図 6 は位置推定結果を出力したものであり、赤色の点はノード真位置、青色の点は推定位置、青線は隣接ノード間のリンクを表している。今回の実験において IR-UWB デバイスの電波のカバレッジが約 5m 前後であったため、図 6 からはノード設置面積が広がることで隣接ノード間のリンクが少なくなっていることが確認できる。また図 9 はノード配置面積による D_{ave} のグラフを示しており、ノード配置面積に比例してノード間相対距離の精度が劣化していることが確認できる。図 6 の 25m² の場合のノード a とノード b の最短ホップ数は 1 である。次に 64m² の場合のノード a とノード b の最短ホップ数は 2 である。最後に 81m² の場合の最短ホップ数は 4 である。ここからノード配置面積が増えるとノード間のホップ数が増えるためノード間相対距離の誤差に繋がっていると考えられる。図 10 は 81m² でのリンクを真位置上に表した図である。この時ノード a とノード b の間にリンクが存在しないためノード間相対距離 D_{ab} は迂回して 4 ホップとなり式 (14) のように表される。

$$D_{ab} = d_{ac} + d_{cd} + d_{de} + d_{bb} \quad (14)$$

ノード間相対距離の精度は SOL アルゴリズムの位置修正に影響を及ぼすため、位置推定精度が劣化している。これらの情報をまとめると、リンク数が少なくなることによって多ホップ間でのノード間相対距離の誤差の割合が大きくなる

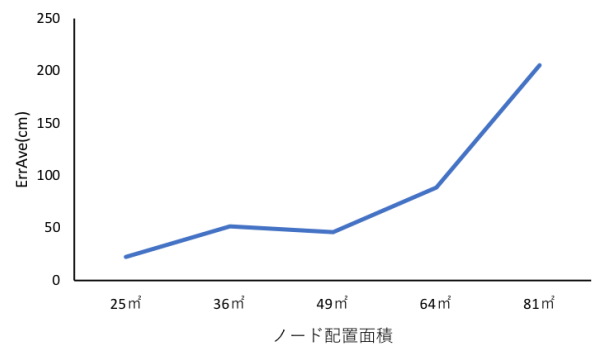


図 7 フィールド範囲による ErrAve の推移

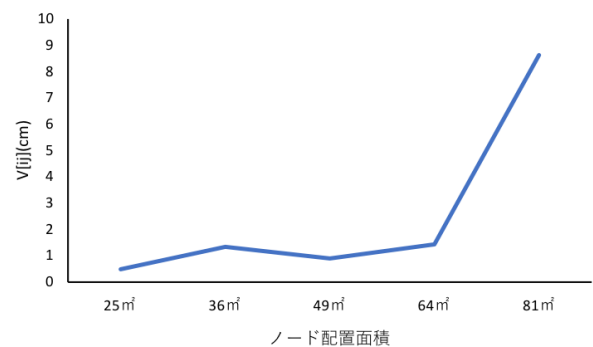


図 8 フィールド範囲による V[ij] 推移

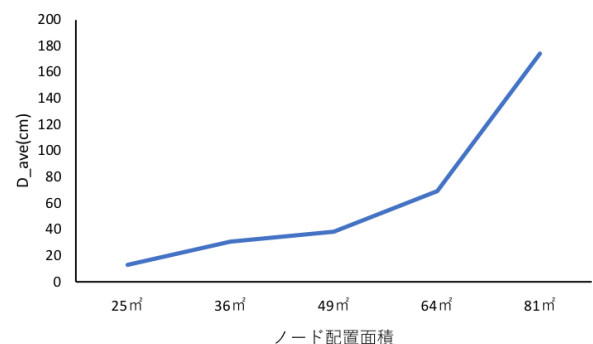


図 9 フィールド範囲による平均ノード間相対距離推移

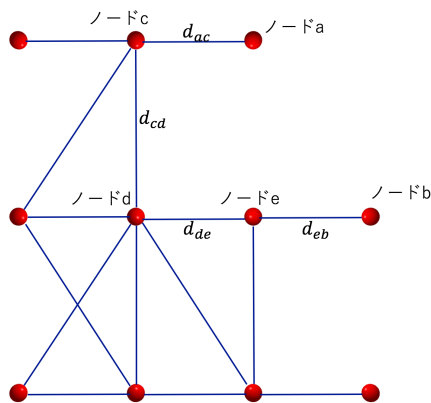


図 10 81m²でのノード間相対距離

ため位置推定精度が劣化していると考えられる。

6. まとめ

本稿では SmartFinder へ IR-UWB デバイスの実装および評価を行なった。今回の実験結果では位置推定精度誤差が最小で約 20cm となる結果が確認できた。しかしノード配置面積が大きくなると隣接ノードとのリンク数が少なくなりノード間相対距離の誤差が大きくなるため、位置推定誤差が大きくなることが確認された。この原因は利用した IR-UWB デバイスの通信カバレッジが 5m 程度であるため、ノード間リンクが極めて少なくなり、ノード間のマルチホップのパス形状が直形状と大きく異なり、算出される距離が実距離より相当大きくなるためである。本 IR-UWB デバイスは 1 対 1 通信では 20m 弱のカバレッジであったが、本実験での複数台の通信では 5m 程度と 1/4 となったことから、この原因について調査する予定である。

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 Standard-

- ized 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>)

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。