

無線センサネットワークにおける仮想トポロジを用いた 集約型自己組織化ノード位置推定方式とその実装評価

北之馬 貴正¹ 安達 直世² 滝沢 泰久²

概要: Internet of Things や Machine to Machine などの物理情報処理をインターネットに取り込む試みにおいて、無線センサネットワーク (WSN) は必須技術であり、そのセンサノードの位置は重要な情報である。そこで我々は、WSN において各ノードから集約した隣接ノード情報を元にクラウド環境で位置推定を行う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。集約型 SOL は、シミュレーション評価において測距デバイスを用いず極少数のアンカーノードから高精度な位置推定が可能であることが確認されている。しかし、集約型 SOL が有効に機能するためには WSN がマルチホップトポロジを構成する必要がある。本稿では、位置推定対象 WSN のトポロジ制約を排除するため、仮想トポロジを用いた集約型 SOL を提案しその実装手法を示す。また、その実機評価実験からその有用性を示す。

1. はじめに

無線センサネットワーク (WSN) は、Internet of Things [1] や Machine to Machine [2] などの物理情報処理をインターネットに取り込む試みにおいて必須技術であり、そのセンサノードの位置はデータの取得位置として重要な情報である。人手による作業を必要とせず自律的に位置情報を取得できる無線ノード位置推定方式において、現在、利用もしくは研究されている方式は、ノード間測距デバイスの使用の観点から Range-Based と Range-Free に大別できる。前者は測距デバイ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、特別なデバイスを必要とするためコストが高くなり無線センサノードに不適である。後者は測距デバイスが不要であるが、高精度な位置推定をするためには、十分な数のアンカーノードにより構成された空間を必要とし、任意の広範囲な空間に適用することは困難である。

上記問題を解決するため、我々は自己組織化マップを用いたノード位置推定方式 [3] (Self-Organizing Localization: SOL) をクラウド環境上で適用する集約型 SOL [4] [5] 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 SOL を適用して位置推定を行う。近傍トポロジ情報のみで相対位置推定が可能であり、アンカーノード

3点で絶対位置推定が可能のためアンカーノードへの依存度が極めて低い。また、クラウド環境ではマルチホップの近傍ノード情報が利用できるため高精度な位置推定が可能である。さらに各ノードは隣接ノード情報を収集しクラウド環境へ転送するだけでよいため、ノードの電力消費を抑制できる。集約型 SOL はシミュレーション評価において、測距デバイスを用いず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。

しかし、SOL は位置推定を行う WSN がマルチホップのトポロジ構成であることを前提とする。本稿は、この前提を排除し、WSN のトポロジに依存しない仮想トポロジを用いた集約型 SOL を提案し、その実装手法を示す。さらにその実機評価実験から有用性を示す。

2. 関連研究

2.1 Range-Based

Range-Based 位置推定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最も一般的なものは GPS である。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。

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

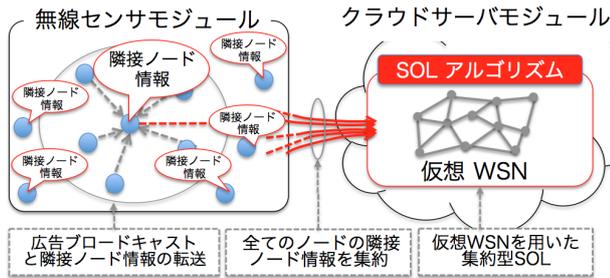


図 1 集約型 SOL の構成

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. しかし, TOA 方式や TDOA 方式を用いた位置推定技術は精度が高いが, センサノードに特別な測距デバイスを用いる必要があり, センサノードの消費電力やコストの面において WSN での利用は不向きであると考えられる.

2.2 Range-Free

RangeFree 位置推定方式は, 位置推定に測距デバイスを用いない方式である. Centroid 方式 [11], APIT 方式 [12] や DV-Hop 方式 [13] [14] 等がある. 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を行うノードが取得し, 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. DV-Hop 方式は, 3 つ以上のアンカーノードからのホップ数とアンカーノード間の距離から算出された 1 ホップの平均距離を利用して, アンカーノードとの距離を見積もることにより位置を推定する方式である. これらの方式は少なくとも 3 つ以上のアンカーノードが必要であり, 精度の向上には多量なアンカーノードが必要なため広範囲な空間への適用には十分な事前準備が必要である. そのため, 適用可能な環境は限定的となる.

3. 集約型 SOL

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. 従って, 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 (図 1).

3.1 集約型 SOL の構成

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約するため完全な近傍トポロジ情報を有する. 一方, その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 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, 位置更新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, 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.

3.2.1 多次近傍ノードによる位置更新

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更新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 から N ホップにあ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 とし, ノード i のノード n に対する修正ベクトル $V_i^{\{n\}}(t)$ をノード間距離をホップ数 N として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 の位置更新は次のように行う.

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

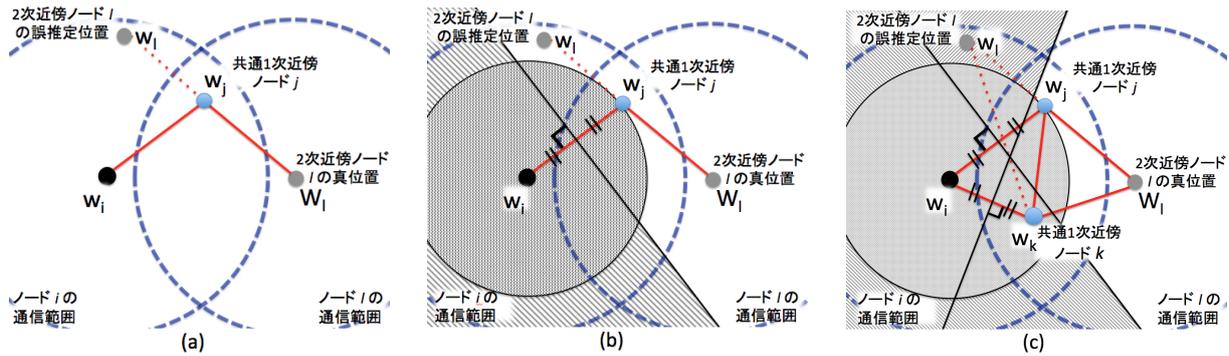


図 2 推定ノードのトポロジ矛盾領域

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

ただし、 τ_n は位置更新に用いる多次近傍ノードを切り替える更新回数の閾値、 $\alpha_i(t)$ はノード i の t 回目更新における学習係数である。

各ノードにおいて Step.2 を繰り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。

3.2.2 推定トポロジ矛盾判定

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 $\overline{w_j - w_i}$ の垂直二等分線を用いて 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 $\overline{w_j - w_i}$ の垂直二等分線の左側が 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。この実施結果を領域判定値と定義し、式 (4) を満たさない場合、トポロジ矛盾と判定する。 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。

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

3.2.3 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。

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

4. 集約型 SOL における仮想トポロジ

SOL アルゴリズムはマルチホップとなるトポロジ構成をもつ WSN で有効に機能する。しかし、WSN は SOL アルゴリズムに適したトポロジを構成するとは限らない。仮想トポロジはクラウド環境の仮想 WSN を SOL アルゴリズムに最適化して再構成し、実際の WSN トポロジに依存することなく、高精度な位置推定を可能とする。

4.1 位置推定誤差と無線通信距離

SOL アルゴリズムに対して最適な仮想トポロジを構成するにあたり、位置推定誤差の無線通信距離への依存性をシミュレーションにて評価する。シミュレーション環境は 1×1 平面領域にランダムにノードを配置し、無線通信距離は 1×1 の空間に正規化した値として設定した。図 3 にシミュレーションでの正規化空間における各無線通信距離に対する 50 トポロジ平均の位置推定誤差を示す。いずれのノード数においても位置推定誤差は無線通信距離に対して概ね下に凸となる。無線通信距離が最適な無線通信距離よりも短い場合、各ノードの 1 次近傍ノード数が少なくなることによって近傍ノードのトポロジ情報が不十分となり位置推定精度が急激に劣化する。一方、無線通信距離が最適な無線通信距離よりも長い場合、広範囲の近傍ノードが同一のホップ数となることによって近傍ノードのトポロジ情報のホップ解像度が低くなり位置推定精度劣化が起こる。従って、下に凸で極小点を持ち、SOL アルゴリズムには最適な無線通信距離、すなわち誤差を最小とする無線通信距離により構

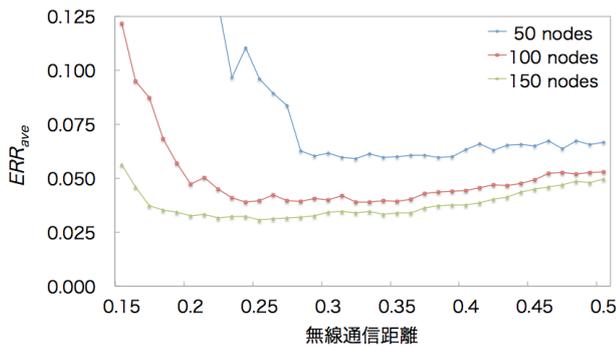


図 3 位置推定誤差と無線通信距離の相関関係

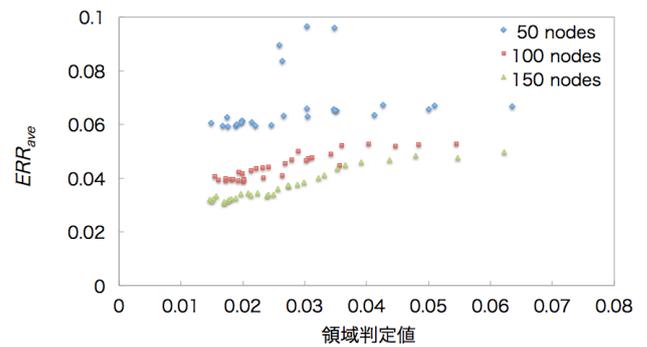


図 5 位置推定誤差と領域判定値の相関関係

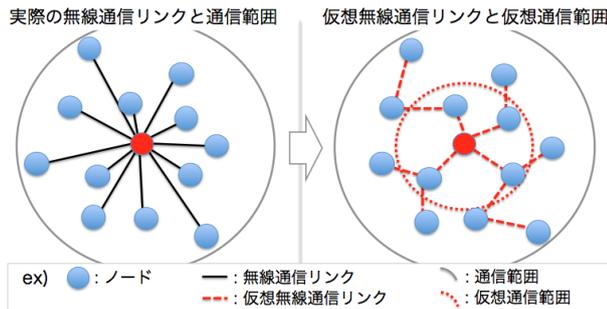


図 4 仮想トポロジ構成例

成されるトポロジが存在する。

4.2 仮想無線通信距離による仮想トポロジの構成

無線通信距離を制御することにより、SOL に最適なトポロジを構成して高精度な位置推定が可能である。無線通信距離は送信電力から制御可能であるが、その制御が難しいこと、および無線センサノードの処理負荷の増加を考慮して、これを用いない。我々は、クラウドサーバモジュールにおける仮想 WSN に対して仮想無線通信距離を設定することにより、無線センサノードにおいて送信電力制御を実施せずに、SOL に最適化したトポロジを構成する。仮想無線通信距離は無線センサノードが隣接ノード情報を取得する際に計測された無線リンク品質から設定する。すなわち、隣接ノード間の無線リンク品質において受信可能閾値を設定することにより、仮想的に無線通信距離を変更し、実際の WSN のトポロジを SOL に最適化した仮想トポロジへ再構成する (図 4)。

5. 仮想トポロジ実装手法

5.1 実装システム構成

集約型 SOL の実装システムは WSN のデファクトスタンダードである ZigBee [15] に準拠して構成する。無線センサモジュールが動作する無線センサノードのハードウェアは CPU として Arduino [16]、無線デバイスとして ZigBee 準拠の XBee [17] を使用し、センサデバイスは搭載しない。XBee では、クラウドモジュールが仮想無線通信距離を動的設定及び変更を可能とするため、無線リンク品質として

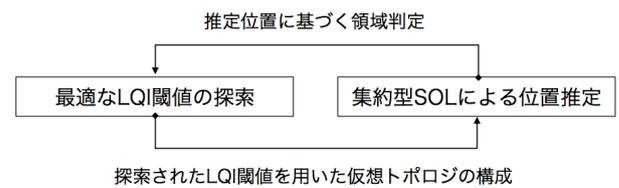


図 6 LQI 閾値探索と位置推定の循環

IEEE802.15.4 (ZigBee の MAC 仕様) における LQI を取得する。クラウドモジュールの実行環境はシンクノードとする。シンクノードには PC を用い USB により XBee と接続し、無線センサノードモジュールからのデータを受信収集する。この受信データから仮想 SOL アルゴリズムを実行する。

5.2 LQI を用いた仮想トポロジ実装

仮想トポロジ実装において、無線リンク品質は ZigBee の MAC レイヤ仕様の IEEE802.15.4 でサポートしている LQI を用いる。LQI は絶対距離を求めるには適さないが近傍の範囲として用いることは可能と考える。

5.2.1 位置推定誤差と領域判定値

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領域判定値を用いる。3.3.2 節の推定トポロジ矛盾判定で得られ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。図 5 に通信距離 0.15~0.5 における 50 トポロジ平均の精度と領域判定値の関係を示す。図 5 が示す通り、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、SOL アルゴリズムにおいて位置精度誤差を最小とする無線通信距離を領域判定値を最小化する無線通信距離として求める。

5.2.2 LQI 探索と仮想トポロジの構成

領域判定値を最小化する無線通信距離を探索するため、受信可能な LQI の閾値 (LQI 閾値) の設定により仮想的に無線通信距離を変える。しかし、最適な LQI 閾値は電波環境やノード配置等に依存し、トポロジごとに異なる。さら

に、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、領域判定値は同一の LQI 閾値により構成される同一のトポロジにおいても変動する。従って、トポロジに依存せず位置推定を行うため領域判定値を最小化する LQI 閾値を SOL アルゴリズムに逐次適用して動的に探索する。すなわち、仮想トポロジを用いて集約型 SOL が位置推定し、その結果である領域判定値から LQI 閾値を更新して仮想トポロジを再構成し、集約型 SOL が再位置推定する。以上のように、集約型 SOL による位置推定と領域判定値を最小化する LQI 探索の循環を繰り返す、領域判定値を最小化することによりノード位置推定精度を高精度化する (図 6)。

前述のように領域判定値はトポロジ、電波伝搬環境および SOL アルゴリズムにおける位置更新対象ノードにより変動するため、最急降下では局所解に至る可能性が高い。従って、図 6 における循環において、最小領域判定値を記憶し、その LQI 閾値の近傍により良い解があると仮定して、記憶する最小領域判定値の LQI 閾値近傍を判定値が小さくなる方向へ繰返し探索する。より小さい最小領域判定値を発見した場合は、最小領域判定値を更新して、発見された領域判定値の LQI 閾値近傍へ探索を移動する。ただし、LQI 閾値の変更単位は、仮想トポロジのトポロジ構成が変わる LQI 最小変化量とし、探索速度と精度を高めるために以下の仮想トポロジ構成となる範囲に探索を制限する。

- 各ノードの 1 次近傍ノード数が 2 つ以上
- 各ノードの 1 次近傍ノード数より多次近傍ノード数が多い

LQI 探索と集約型 SOL による位置推定の循環終了条件は、次のように考える。

- 領域判定値の最小値更新率が高い場合、探索過程であり探索を継続する必要がある。
- 領域判定値の最小値更新率が低い場合、最適解を発見した可能性が高い。

従って、探索と位置推定の循環終了条件は、領域判定値の最小値更新率が十分に低い場合とし、記憶する最小領域判定値における推定結果をノードの推定位置とする。

以上の処理により、WSN ごとに異なるトポロジ構成に対し、最適な仮想トポロジを動的構成することで、実際の WSN のトポロジ依存を排除して位置推定精度を高める。従って、LQI 閾値探索は次のように実施する。ただし、SOL アルゴリズムの実行回数を s 、 s 回目の SOL アルゴリズムの結果から得られた領域判定値を γ_s 、記憶している最小領域判定値を γ_{best} 、初期化時または再初期化時から s 回目までの探索において、LQI 閾値を前回探索より高くして領域判定値が改善するケース (高くして良くなるケースと低くして悪くなるケース) 数を b_s 、同様に、LQI 閾値を前回探索より高くして領域判定値が悪化するケース (高くし

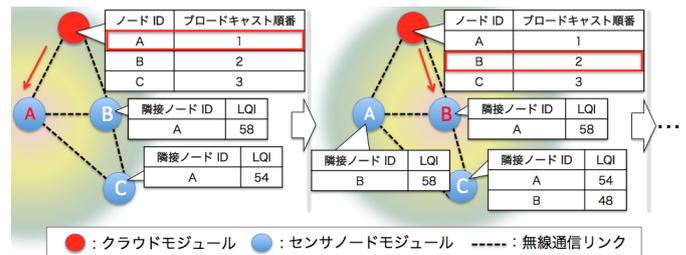


図 8 ノード間無線リンク品質指数の取得

て悪くなるケースと低くして良くなるケース) 数を w_s 、 s 回目までの最小領域判定値の更新回数の総和を q_s 、 s 回目の最小値更新率を $Q_s = q_s/s$ とする。

[Step 1.] 全てのノードが少なくとも 2 つ以上の 1 次近傍ノードをもつトポロジが構成される LQI 閾値から開始し、その仮想トポロジを SOL アルゴリズムへ適用する。

[Step 2.] s が 1 または γ_s が γ_{best} を下回る場合、 γ_s を γ_{best} に更新し、 b_s と w_s を 0 に初期化する。これにより、探索を γ_{best} の LQI 閾値近傍へ移動する。

[Step 3.] γ_{best} の LQI 閾値近傍で繰返し探索を行うため、 b_s と w_s を確率変数とする確率分布関数 $P(b_s, w_s)$ を用いて LQI 閾値の更新方向を確率的に変更する。

$$P(b_s, w_s) = \frac{b_s + 1}{b_s + w_s + 2} \quad (7)$$

図 7 は b_s と w_s における $P(b_s, w_s)$ の分布を示す。再初期化時から s 回目の探索における領域判定値改善方向の比 b_s/w_s によって $P(b_s, w_s)$ を用いた探索の挙動が変化する。 b_s/w_s が 1 から遠い場合、 P_s は 1/2 から遠く、LQI 閾値を上げるまたは下げるいずれかの方向へ指向性が強い探索となる。一方、 b_s/w_s が 1 に近い場合、領域判定値の改善方向が明確ではなく P_s は 1/2 に近くランダムな方向への探索となる。

[Step 4.] 変更された LQI 閾値による仮想無線通信距離から仮想トポロジを再構成し、SOL アルゴリズムに適用する。その結果により b_s または w_s に 1 を加算する。

[Step 5.] Step 2 から Step 4 を繰返し、領域判定値が最小化する LQI 閾値を探索する。探索終了条件は $Q_s < \epsilon$ とし、Step.6 へ移る。

[Step 6.] 領域判定値 γ_{best} における推定結果をノードの推定位置とする。

5.2.3 ノード間無線リンク品質指数の取得

仮想無線通信距離は LQI に基づいて設定されるため、隣接ノード ID と隣接ノード間の正確な LQI を必要とする。従って、隣接ノード間でのブロードキャストの競合による電波干渉を排除し確実な隣接ノード ID 取得と正確な LQI 取得を行うため、シンクノードによるセンサノードのスケジューリング制御を行う。図 8 に位置推定ノード A とその後の位置推定ノード B に対してのスケジューリング制御例

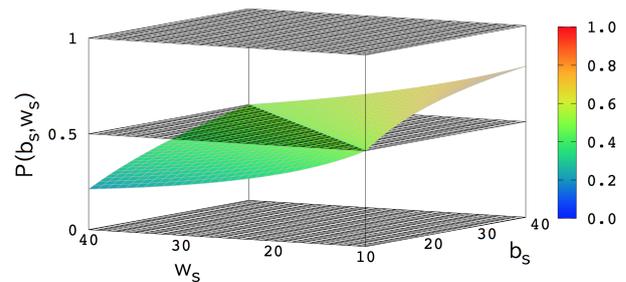
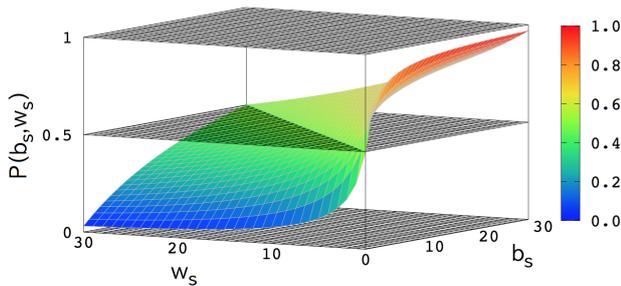


図 7 確率分布関数



屋内環境

屋外環境

図 9 実験風景

を示す。各ノードに対してのスケジューリング動作は以下を繰り返し行う。

- シンクノードが保持する WSN ノードリストから 1 つのセンサノードを選択し、その選択ノードへブロードキャスト送信許可の指示メッセージを送信する。
- そのメッセージを受信したセンサノードは隣接ノードへの自身の広告として自己 ID をデータとするブロードキャストを行う。
- 広告ブロードキャストにより各ノードは隣接ノード ID の取得と同時に、広告ブロードキャスト受信時の LQI を取得する。

全てのセンサノードによる広告ブロードキャスト終了後、各センサノードは取得した隣接ノード ID と LQI を隣接ノード情報としてシンクノードへ転送する。

6. 評価

6.1 評価実験

評価実験は図 9 のように屋内と屋外の 2 か所で行った。ネットワーク空間を $5.0\text{m} \times 5.0\text{m}$ の平面として定義し、この空間にノードをランダムに配置する。また、比較対象として、仮想トポロジを用いない集約型 SOL とアンカーノード 3 点で絶対位置が推定でき、かつ既存方式で最も精度が高いとされている DV-Hop を用いる。実験で得た隣接ノード情報をそれぞれに与えることで位置を推定し比較評価する。

実装においてセンサノードには

- Arduino UNO (CPU ATmega328 Clock 16MHz, Flash Memory 32KB, SRAM 2KB)
- XBee Series 2 Wire Antenna (ZigBee Mesh)

シンクノード・クラウド環境には

- MacBook Pro (CPU Clock 2.8GHz, RAM 16GB, MacOSX 10.11)
- XBee Series 2 Wire Antenna (ZigBee Mesh)

を用いる。

6.2 評価方式

位置精度の評価に相対位置評価と絶対位置評価を行い、推定コスト評価に推定時間評価を行う。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。

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

$$V[r_{ij}] = \frac{1}{|N|C_2} \sum_{i=1}^{|N|-1} \sum_{j=i+1}^{|N|} (1 - r_{ij}/\bar{r})^2 \quad (9)$$

\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。推定位置評価は、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総和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 (10) 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。

$$Err_{ave} = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N |w_i - \tilde{w}_i| \quad (10)$$

以上の 2 つの評価を用いて、ノード間の相対位置関係が正しくかつ個々のノード位置が絶対位置として正しく推定されて有用な位置であるかを評価する。

推定コスト評価として推定時間評価は、探索による SOL アルゴリズムを繰り返すことによる位置推定のコストを示す。

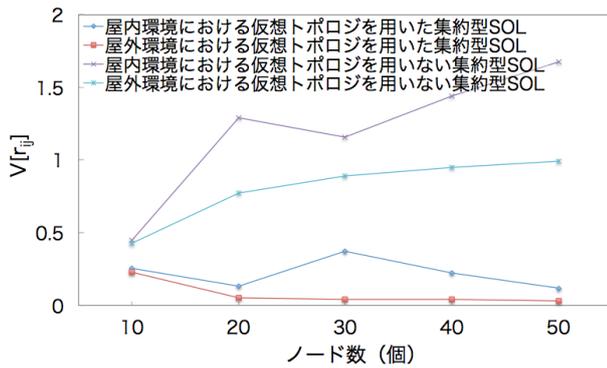


図 10 相対評価

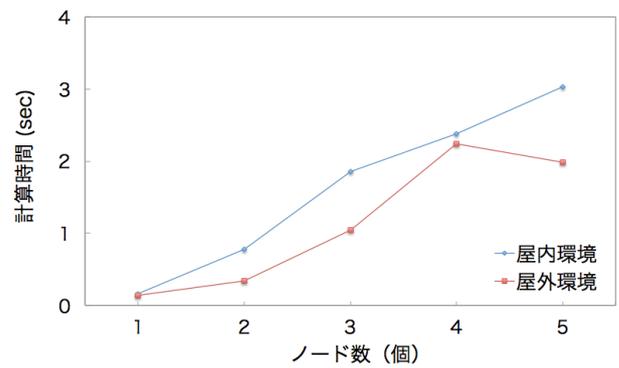


図 14 位置推定計算時間評価

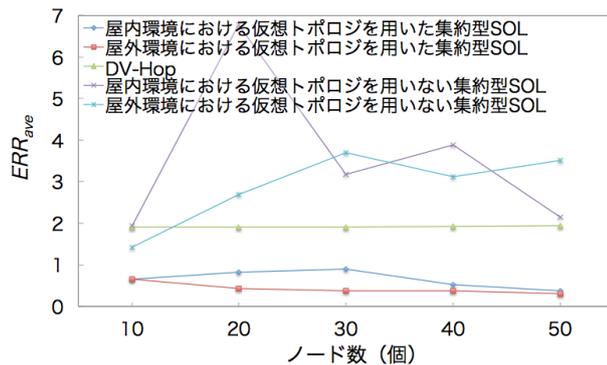


図 11 絶対評価

6.3 評価結果

6.3.1 推定位置評価

比較対象である DV-Hop は三辺測量では解が得られず、多数のノードがアンカーノード 3 点の重心に推定される。平均誤差はノード数に関わらず、約 1.9m (図 11) であるが、 $V[r_{ij}]$ はノード数が増加するに従い 0 を大きく上回る (図 10 左)。すなわち、DV-Hop の推定ネットワーク形状はオリジナルネットワーク形状と全く異なり、平均誤差が示した値よりその位置の有用性は著しく低い。仮想トポロジを用いない集約型 SOL は DV-Hop のようにノードが重なって推定されることはないため、 $V[r_{ij}]$ は DV-Hop より下回る。仮想トポロジを用いない場合、トポロジ構成はマルチホップ構成を含まないため、ネットワークジオメトリにおいてホップによる解像度が低く、SOL アルゴリズムはジオメトリの特徴を再現できない。従って、ジオメトリは大きく変形し、大きな位置誤差となる。一方、仮想トポロジを用いた集約型 SOL は屋内と屋外のいずれの環境においても、 $V[r_{ij}]$ はノード数が増えるに従い 0 へ近づく (図 10)。すなわち、集約型 SOL はオリジナルネットワーク形状とほぼ同じとなるネットワーク形状を推定している。さらに、平均誤差もノード数の増加に従い、小さくなり (図 11)、50 ノードでは 40cm 未満となる。

図 12, 図 13 は仮想トポロジの使用有無における集約型 SOL の屋内、屋外の実ジオメトリと推定ジオメトリを示す。実ジオメトリの点はノードの真位置を示し、推定ジオ

メトリの点はノードの推定位置を表す。また、仮想トポロジを用いないトポロジのノード間の線は無線通信リンクを表し、仮想トポロジを用いたトポロジのノード間の線は仮想無線通信リンクを表す。屋内・屋外、共に実トポロジが完全グラフに近いトポロジである。仮想トポロジを用いない集約型 SOL による推定トポロジは実トポロジに対応した位置関係でないため $V[r_{ij}]$ は大きく真位置からも大きくずれている。一方、仮想トポロジを用いた場合、ホップ数によるジオメトリの解像度が上がるためその特徴が明確になる。仮想トポロジを用いた集約型 SOL は、このようなトポロジ構成が入力されるため推定トポロジの相似性が高く実位置にほぼ一致する位置推定が可能となる。

仮想トポロジを用いた集約型 SOL の屋内と屋外との環境の違いを比較すると、ノード数が少ない場合において、屋内環境は $V[r_{ij}]$ 、および ERR_{ave} のいずれも屋外環境に劣る。これは屋内環境はマルチパスフェージングの影響により LQI が変動するためと考えられる。しかし、ノード数の増加に従い、屋内環境の各 $V[r_{ij}]$ と ERR_{ave} は改善し、屋外の値に近づく。すなわち、隣接ノード数の増加に従い、多様な仮想トポロジ構成が可能になると、マルチパスフェージングの影響を比較的受けにくいより近い近傍ノードを隣接ノードとするトポロジを構成することで電波伝播の影響を排除し、かつそれらのトポロジ構成から SOL アルゴリズムに適したマルチホップトポロジ構成を発見し、推定位置精度を高精度化することができる。

6.3.2 推定コスト

位置推定計算時間評価

図 14 は仮想トポロジを用いた集約型 SOL の位置推定時間を示す。ノード数が 10 個のとき、SOL アルゴリズムの推定処理時間が少ないことに加え探索範囲の制限により探索範囲が非常に狭く 0.2 秒程度である。ノード数の増加に従い、位置推定処理時間は線形的な増加に留まる。従って、仮想トポロジの動的構成は位置推定計算時間を考慮しても有効な手法であるといえる。

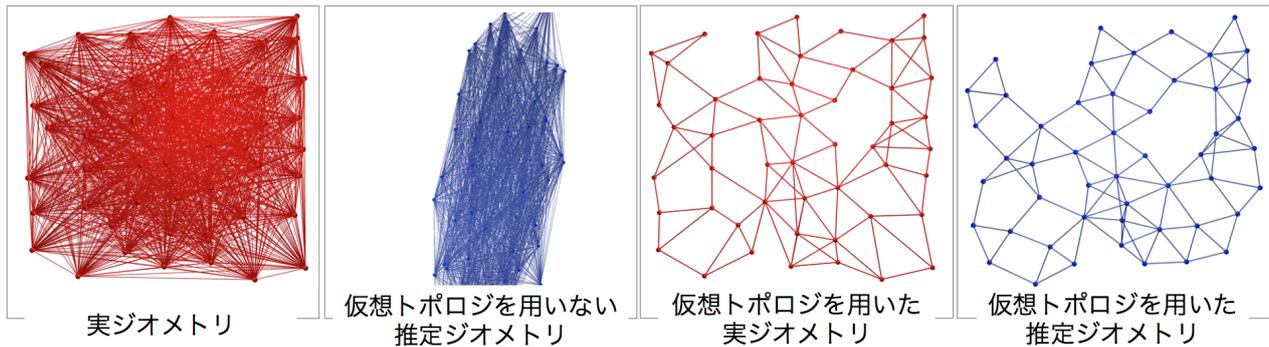


図 12 50 ノードにおける屋内位置推定トポロジ

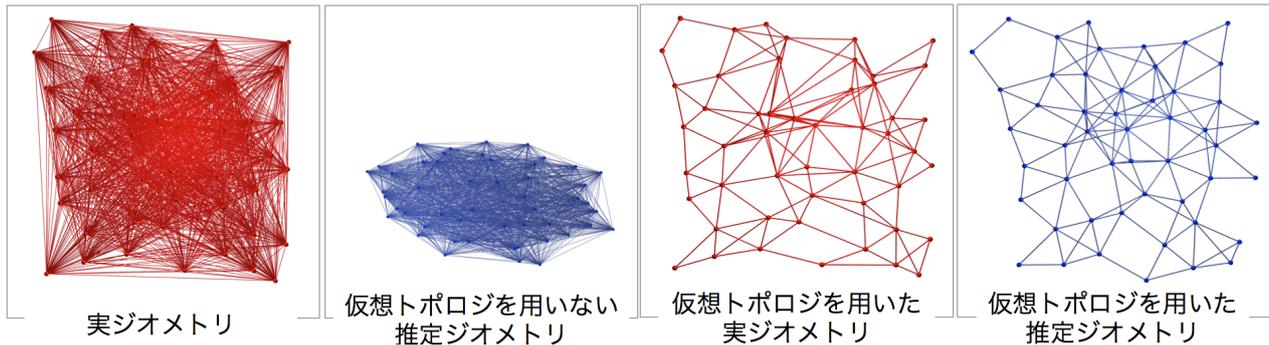


図 13 50 ノードにおける屋外位置推定トポロジ

7. まとめ

本論文では、多様な WSN トポロジに集約型 SOL を適用可能とするため、WSN のトポロジに依存しない仮想トポロジを用いた集約型 SOL を提案し、その実装手法を示した。さらにその実機評価実験から次の有用性を確認した。

- ノード数増加に従い電波伝播の影響を排除できる。
- ノード数増加に従い高精度な位置推定ができる。
- 実トポロジに非依存のため多様な WSN に適用可能である。

参考文献

- [1] Kortuem, G., Kawsar, F., Fitton, D. and Sundramoorthy, V., "Smart objects as building blocks for the Internet of things," *IEEE Internet Computing*, Vol.14, No.1, pp.44-51 (2010).
- [2] Geng, Wu., Talwar, S., Johnsson, K., Himayat, N. and Johnson, KD., "M2M : From mobile to embedded internet," *IEEE Communications Magazine*, Vol.49, No.4, pp.36-43 (2011).
- [3] 大野翔平, 安達直世, 滝沢泰久, "無線センサネットワークにおける自己組織化位置推定方式の提案," 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.7, pp.1774-1782, (2012).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, "Global Positioning System," *Theory and Practice*, 4th ed. (1997).
- [7] 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).
- [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 Positionings 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] Niculescu, D. and Nath, B. "DV-based positioning in ad hoc networks," *Telecommun.Syst.*, Vol.22, No.1-4, pp.267-280, (2003).
- [14] Zhou, Z., Xiao, M., Liu, L., Chen, Y. and Lv, J., "An Improved DV-HOP Localization Algorithm," *Proc. ISISE 2009*, pp.598-602, (2009).
- [15] <http://www.zigbee.org/>
- [16] <https://www.arduino.cc/>
- [17] <http://www.digi.com/lp/xbee>