

IR-UWBを用いたSmartFinderに関する精度検証と考察

立本 航平² 北之馬 貴正³ 滝沢 泰久⁴

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自己組織化位置推定方式 (SmartFinder) を提案している。SmartFinder ではノード間で観測した BLE の RSSI を用いて位置推定を行なっているが、BLE の RSSI は電波伝搬環境に強く依存し、非常に不安定で瞬時変動するため、高い位置推定精度が安定して得られない問題点がある。そこで本稿はスマートデバイス間の距離をパルス波を用いて数 cm から十数 cm の精度で測距を行う事ができる IR-UWB (Impulse Radio Ultra Wideband) を用いる。加えて IR-UWB を SmartFinder に適用するために IR-UWB の通信処理を水平分散型ネットワークに拡張し、IR-UWB を適用した SmartFinder を実機実験により精度評価、考察を行う。

1. はじめに

火災現場において被災者の安全はもとより、消防活動を行う消防隊員の行動把握と安全管理は、迅速な対応を迫られる火災現場において非常に重要である。特に消防隊員の位置情報は消火活動のフォーメーションを災害現場の外から指示を行ったり、消火活動中に壁や天井の崩落で動けなくなった場合などを把握するために非常に有益である。住宅などの火災現場における消火活動では視覚を確保することが難しく高精度な位置推定が必要であり、最低でも位置推定誤差が 50cm 以下の精度が必要とされている。その上、屋内火災環境では測位設備が機能しない、または測位設備がないことが想定される。従って、火災現場で即時的にかつ機動的に消防隊員位置を測位するシステムが求められている。

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 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。従って、SmartFinder は、消防隊員がデバイスを身につけ、また消火活動時に適時デバイスを活動環境へ配置することにより、即時的にかつ機動的に消防隊員の位置を推定することが可能である。

SmartFinder では現在スマートデバイス間の隣接情報に BLE を用いて位置推定を行なっている。しかしデバイス

間の距離における BLE の RSSI は測位環境の電波伝播環境に強く依存し分散が高い。そのため現行の SmartFinder では 2m 程度の位置推定誤差が精度限界 [6] とされ、消火活動の要求精度を満たさない。

従って、本稿では消火活動時の消防隊員位置把握の要求精度を満たすため、IR-UWB (IEEE802.15.4z) [16] を SmartFinder に適用し、その精度検証を行う。IR-UWB は DS-TWR (Double Side Two Ways Ranging) に基づき時間より測距し、その精度は数 cm ~ 数 10cm である。また、電波強度と異なり時間計測であるので電波伝搬におけるフェージングの影響を受けにくい。SmartFinder への適用においては、垂直分散である IR-UWB の測距を水平分散へ拡張した。

以上の IR-UWB を用いた SmartFinder において実機実験による精度検証を行い、その考察を述べる。

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 情報処理学会

IPSSJ, Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan

² 関西大学大学院 理工学研究科

³ 関西大学 先端科学技術推進機構 客員研究員

⁴ 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[7] や Cricket[8] 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)[9] が挙げられる。

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[10], DV-Hop[11], APIT[12] 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) [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 [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、これ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. BLE を用いた 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 を用いて隣接トポロジ情報を取得し、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り返す、継続的にスマートデバイスの位置を推定する。

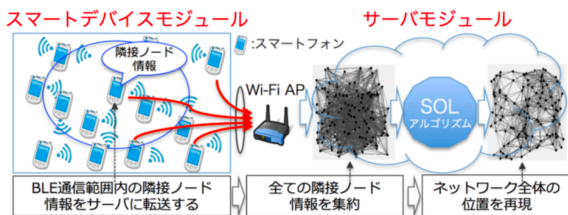


図 1 SmartFinder のシステム構成 ([3] pp2293, 図 1 より引用)

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り返す。

- 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 および RSSI 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 および RSSI のリストと自身の移動/停止情報の送信

3.1.2 サーバモジュール

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り返す、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 および RSSI のリストと移動/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 および RSSI のリストに基づき、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 仮想メッシュネットワークの構成手法

3.2.1 隣接トポロジ情報の欠損の考慮

隣接トポロジ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、サーバモジュール上で一定期間保持した隣接トポロジ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トポロジ情報が必要とする。従って、停止しているノード (停止ノード) 間の隣接トポロジ情報保持期間 t^s は長い期間とし、移動ノードと他のノード間の隣接トポロジ情報保持期間 t^m は短い期間とする。 t^s と 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想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

隣接ノード間の RSSI 強度から求めたノード間リンク長を用いてサーバモジュールを構成する。まず、隣接トポロジ情報およびノード間リンク長から仮想メッシュネットワークの構成を行う。式 (1) を用いて、仮想メッシュネットワーク内のノード間相対距離を定義する。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和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。

$$d_{ij} = \min(d(p_{ij}) | S(p_{ij})), d(p_{ij}) = \sum_{l_{xy} \in p_{ij}} l_{xy} \quad (1)$$

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。

3.2.3 集約型 SOL を用いた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基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。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、仮想メッシュネットワークの構成、集約型 SOL の計算終了までの過程を 1 サイクルとし、集約型 SOL の推定結果を位置推定結果とする。

3.2.4 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、以下の手順で、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 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。

Step1. 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。

Step2. 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集約型 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 $V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}$ を次のように定義する。

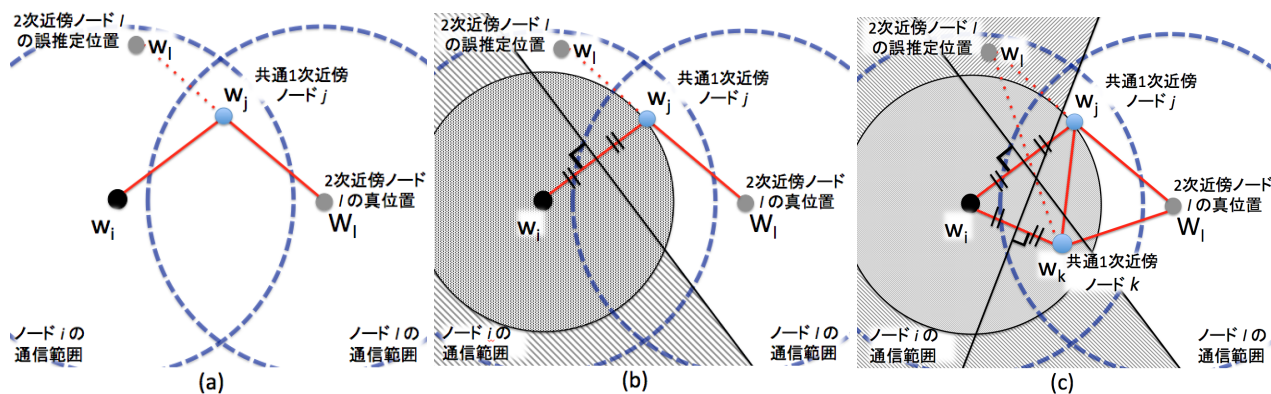


図 2 推定ノードのトポロジ矛盾領域

$$V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}} = \frac{d_{im}^{\{\gamma^g(t)\}} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|} (w_i(t) - w_m(t)) \quad (2)$$

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

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{R\}}(t) + V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)) \quad (3)$$

$$\alpha_i(t) = \eta \alpha_i(t-1) \quad (0 < \eta < 1) \quad (4)$$

$\alpha_i(t)$ はノード i の t 回目の修正における学習係数を表す。初期の段階では全体的なメッシュネットワークの形状の再現を行い、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 (5) により決定する。

$$\gamma^g(t) = \begin{cases} d^{max} - \frac{t(d^{max} - 2R)}{S} & (d^{max} > 2R) \\ 2R & (otherwise) \end{cases} \quad (5)$$

S は集約型 SOL での仮位置修正回数、 d^{max} は全ノード間距離長の最大値、 R はノード間経路長の期待値から算出した近傍半径を表す。

各ノードにおいて Step2 の位置修正の繰り返しで得られ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。

3.2.5 トポロジ矛盾判定

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 (図 2-a)。 w_i と w_j を基準点とし、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 (図 2-b)。

3.2.6 大域 SOL と局所 SOL

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. IR-UWB の適用

4.1 デバイスにおける測距方法

IR-UWB における測距処理は、測距を起動する Initiator とこれに応答する Responder により構成され、Double Side Two Ways Ranging(DS-TWR) により Responder において測距結果を得る。通常の IR-UWB を用いた測距では Initiator または Responder といずれか一方の機能を装備するデバイスから構成される垂直分散システムが採用されている。しかし SmartFinder ではサーバにおいて仮想メッシュネットワークにおけるノード間距離を必要とする。また、想定する利用方法においては Initiator と Responder を分離したデバイスによる垂直分散では事前にネットワーク構成を決める必要があり、即時的・機動的な測距が困難である。従って IR-UWB の測距を Peer-to-Peer の水平分散システムに拡張し、実装を行う。

4.1.1 DS-TWR(Double Side Two Ways Ranging)

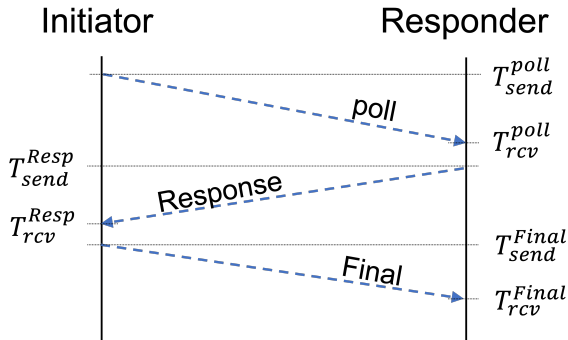


図 3 DS-TWR 通信手順

IR-UWB デバイスでは隣接ノード情報の収集および測距を行いその後サーバへとデータ通知を行う。以下に UWB デバイス間での DS-TWR における測距通信手順を示す。

- Initiator 処理: DS-TWR(Double Side Two Way Ranging) の開始・終了
 - (1) DS-TWR(Double Side Two Way Ranging) の開始要求送信し, Poll 送信時間 T_{snd}^{Poll} を計測する。
 - (2) 応答 Response 受信待機する。
 - (3) 応答 Response を受信した場合, Response 受信時間 T_{rcv}^{Resp} を計測し, 任意時間経過後に終了要求 Final を Final 送信時間 T_{snd}^{Final} に送信する。Final には T_{snd}^{Poll} , T_{rcv}^{Resp} , T_{snd}^{Final} が含まれる。
- Responder 処理: DS-TWR への応答とデバイス間距離の算出
 - (1) DS-TWR の開始要求 Poll の受信待機する。
 - (2) Poll 受信した場合, Poll 受信時間 T_{rcv}^{Poll} を計測して, 任意時間経過後に応答 Response を送信し, Response 送信時間 T_{snd}^{Resp} を計測する。
 - (3) 終了要求 Final を受信した場合, Final 受信時間 T_{rcv}^{Final} を計測し, T_{rcv}^{Poll} , T_{snd}^{Resp} と Final に含まれる T_{snd}^{Poll} , T_{rcv}^{Resp} , T_{snd}^{Final} を用いて Initiator との距離を次のように算出する。

$$Distance = ToF * c \quad (6)$$

$$ToF = \frac{R_a R_b - D_a D_b}{R_a R_b + D_a D_b} \quad (7)$$

$$R_a = T_{snd}^{Poll} - T_{rcv}^{Poll} \quad (8)$$

$$R_b = T_{rcv}^{Final} - T_{snd}^{Resp} \quad (9)$$

$$D_a = T_{snd}^{Final} - T_{rcv}^{Resp} \quad (10)$$

$$D_b = T_{snd}^{Resp} - T_{rcv}^{Final} \quad (11)$$

4.1.2 水平分散型 DS-TWR

SmartFinder のサーバにおける仮想メッシュネットワーク

クのデバイス間距離を取得するため, DS-TWR を用いて水平分散の構成によりデバイス間で相互に測距を実施する。

(1) 隣接デバイス取得

各デバイスは隣接デバイスのプレゼンスを隣接デバイスが送信する Poll を傍受することにより取得する。傍受した隣接デバイスの ID を隣接デバイスリストに保持し, TTL(Time To Live) を設定する。TTL は, 自身の Initiator 処理と Responder 処理の各処理毎に減じられ, 0 となれば隣接デバイスリストから削除される。以上により, 自身の隣接デバイスのプレゼンスを取得し隣接デバイスリスト維持する。

(2) DS-TWR を用いた双方向測距

DS-TWR は Responder で測距結果を得る。SmartFinder では, これを隣接デバイス間で水平分散の Peer-to-Peer の構成として双方向測距を実施する。各デバイスは Initiator 機能と Responder 機能の両機能を有し, 次のように DS-TWR を実施する。

● Initiator 処理

隣接デバイスリストから一つのデバイスを選択して Poll 送信し, 一定期間 Response を待ち, これを受信できれば任意時間経過後 Final 送信して Responder 処理へ移行する。一定時間内に Response を受信できなかった場合は, Initiator 処理を終了して, Responder 処理へ移行する。

● Responder 処理

一定期間 (Responder 処理期間) Poll 受信を待ち, Poll 受信した場合は, 任意時間経過後に Response 送信し, Responder 処理残余時間, Final 受信を待つ。Final 受信した場合は測距計算し, 隣接デバイスリストへ当該デバイス間距離として保持する。以上の処理後, Responder 処理時間に残余時間がある場合は, Poll 受信待ちに戻る。残余時間がない場合は, Initiators 処理に移行する。残余 Responder 期間内に Poll 受信および Final 受信を受信できなかった場合は Responder 処理を終了して Initiator 処理へ移行する。

以上の水平分散型 DS-WTR より得られた隣接デバイスリスト (隣接デバイス ID とその距離) を一定周期でサーバへ WiFi を用いて転送する。

4.1.3 サーバーにおける位置推定

マルチホップの場合ノード間のパス形状が他ノードを迂回するため, 直線形状と大きく異なる。そのため算出される距離が図 4 のように実距離より相当大きくなり, マルチホップによる位置更新は精度劣化の原因となる。また IR-UWB の測距した 1 ホップデバイス間距離は十分な精度が得られることが期待できるため, BLE による不安定なデバイス間を考慮して多様な隣接情報を用いる必要がない。よって IR-UWB デバイスを用いた集約型 SOL では 1 ホップ間のみで仮想メッシュネットワークを構成すること

で、位置推定精度の劣化防止及びアルゴリズムの簡略化を行う。仮想メッシュネットワークにおいて直接リンクをもつ1ホップノード間の距離のみをノード間距離として用いる。これに伴い、仮想メッシュネットワークにおける最短パスの取得(式(1))は省略する。またBLEではデバイス間距離に多くの誤差を含む可能性があるため、各ノードの位置更新処理はランダムに2つの隣接デバイスによる更新に制約して漸次処理としている。一方、IR-UWBは高精度なデバイス間距離が期待できるので全隣接デバイスを用いることにする。以上の変更に従い、SOLアルゴリズムのStep2を次のように修正する。

Step2. 位置更新対象ノード*i*とその1ホップノード*m*とし、ノード*i*と*m*のノード間距離を D_{im} とすると、ノード*i*のノード*m*による*t*回目の修正ベクトル $V_{im}(t)$ は次のようになる。

$$V_{im}(t) = \frac{D_{im} - |w_i(t) - w_m(t)|}{|w_i(t) - w_m(t)|} (w_i(t) - w_m(t)) \quad (12)$$

全隣接ノードを用いて位置更新することからノード*i*の*t*+1回目の推定位置 $w_i(t+1)$ は次のようになる。ただし、 N_i はノード*i*の隣接ノードの集合である。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot \left(\sum_{m \in N_i} V_{im}(t) \right) \quad (13)$$

$$\alpha_i(t) = \eta \alpha_i(t-1) (0 < \eta < 1) \quad (14)$$

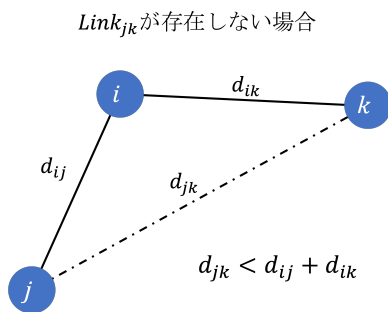


図4 リンク欠損時のノード間経路長

5. 実装評価

5.1 実機実験システム

表1 動作環境

IR-USB デバイス	Qorvo DWS3000
Host デバイス	Raspberry Pi 3B/4B
インターフェース	Serial Peripheral Interface
通信規格	IEEE802.15 4z
測距通信手順	DS-TWR

実機実験に用いたIR-UWBのシステム構成を表1に、その外観を図8に示す。実装評価では、図7のように教室

表2 実験環境

フィールド範囲 m, m	15, 15
アンカーノード数	3
停止ノード数	10, 20
大域 SOL の実行周期 (サイクル)	10
実験時間 cycle (sec)	180
試行回数	10

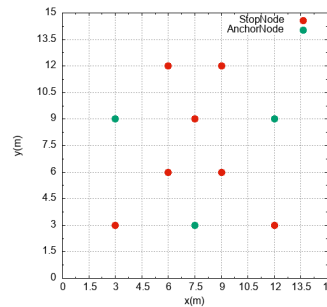


図5 停止デバイス 10 台

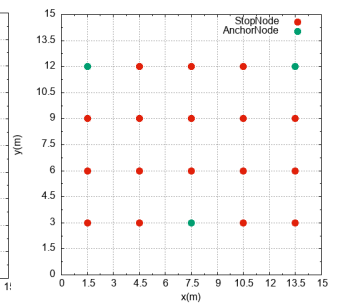


図6 停止デバイス 20 台

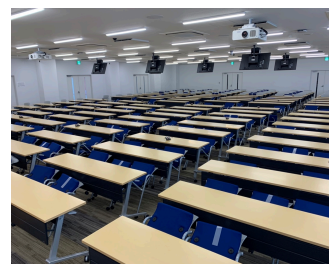


図7 実験風景



図8 スマートデバイス

の机の上にIR-UWBデバイスを配置し、位置推定を行う。デバイス数は停止デバイス10台、20台で実験を行う。停止ノードの配置を図5、図6に示す。なお停止ノードのみで実験を行うためLSOLは行わない。

5.2 評価方法

5.2.1 評価期間

本実験では、隣接ノード情報がSOLアルゴリズムで位置推定を行うために十分に蓄積されている場合の精度を評価するために開始時刻からの精度と共に、十分に隣接ノード情報の蓄積が行われている100秒以降の精度を基に評価を行う。

5.2.2 評価メトリック

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。 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。

$$ERR(s) = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N |W_i(s) - w_i(s)| \quad (15)$$

6. 実験結果

初めに実験における平均推定誤差と時間の関係を図9に示す。

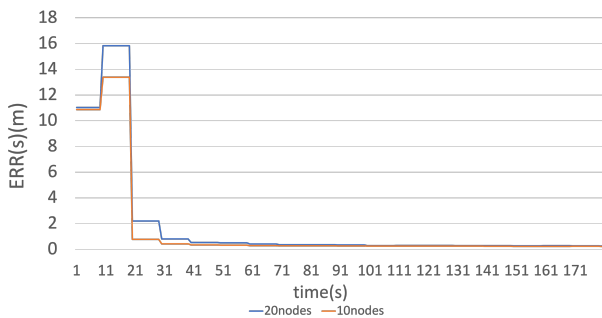


図9 時間経過における位置推定精度

SmartFinder では推定開始から 10 秒間は GSOL 未実施なために無作為に配置されたノードと真位置の誤差が結果として得られるために考慮しないものとする。従来の BLE を適用した SmartFinder では GSOL 実施直後の開始 10 秒以降から精度が収束していたが、図9から IR-UWB を適用した SmartFinder では推定開始 20 秒以降から推定誤差が改善され 70 秒経過後から推定誤差が収束していることが分かる。また収束に至るまでの時間は 10 ノード時に比べてノード数増加時の 20 ノード時が緩やかに収束するという結果が得られた。

次に収束精度を示すために位置推定開始から 100 秒後にて得られた精度の平均値 (ERR_{ave}), 最大値 (ERR_{ave}^{min}), 最小値 (ERR_{ave}^{max}) を表3に、 ERR_{ave} の時間による推移を図10に示す。

表3 収束精度

ノード数	10 台	20 台
ERR_{ave}	24cm	29cm
ERR_{ave}^{min}	18cm	19cm
ERR_{ave}^{max}	32cm	43cm

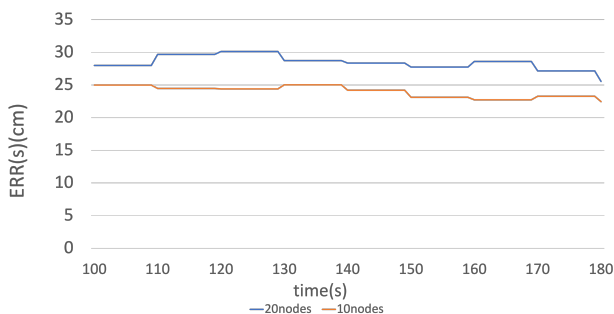


図10 精度収束後における位置推定誤差の時間による推移

次に推定精度が収束してからの平均推定誤差、最小推定

誤差、最大推定誤差を表4に示す。精度収束後、10 ノード時の最大推定誤差は 32cm, 20 ノード時は 43cm と火災現場における救助活動に必要な精度は満たしている。また平均推定誤差は 10 ノード時, 20 ノード時共に 30cm 以下, 最小推定誤差は 20cm 以下と非常に高い精度で位置推定が可能であるという結果が得られた。

次に GSOL サイクルによって得られた複数のトポロジの内, SOL アルゴリズムによるトポロジ矛盾判定によって出力された選択トポロジ, 真位置と比較し位置推定誤差がもっとも小さかった最良トポロジにおける推定誤差の平均値を表4に示す。

表4 トポロジ矛盾判定によるトポロジ選択

ノード数	10 台	20 台
選択トポロジの位置推定誤差	24cm	29cm
最良トポロジの位置推定誤差	8cm	7cm

表4より GSOL の位置推定サイクルにおいて得られたトポロジの内, 推定誤差が最小のものは 10 ノード時, 20 ノード時共に 10cm 以下と非常に高精度な位置推定が行われている。しかし SOL アルゴリズムにおけるトポロジ矛盾判定では推定誤差が最小のトポロジを選択できていないという結果が得られた。

7. 考察

7.1 収束精度に関して

表3から 10 ノード時, 20 ノード時のどちらも最大精度誤差が 50cm 以下であり消火活動における必要精度を満たしている。これは IR-UWB デバイスの高精度なノード間測距と 1 ホップ更新の実装による誤差を含んだノード間経路長が排除された位置更新を行なったためである考える。

7.2 精度収束速度に関して

図9より位置推定開始から 20 秒経過するまで正常な位置推定を行うことが出来ていないのは R-UWB デバイスの SmartFinder への適用における水平分散型システムでの測距プロセスと隣接ノード情報の更新のタイミングが原因であると考えられる。IR-UWB デバイスは特定のスマートデバイスとの距離を測距するためにユニキャストで通信を行う必要がある。そのため位置推定開始時に周囲にどのデバイスが存在するかを把握するために隣接デバイスが送信する Poll 傍受を十分に行う必要がある。これによって位置推定開始から収束精度が得られるまでに時間がかかる。

また SOL アルゴリズムでは隣接ノード情報の更新は 10 秒に一回行われるため, GSOL の位置修正に用いる事ができる隣接ノード情報は GSOL 実施時の 10 秒前までの隣接ノード情報のみである。そのためリンクの欠損が特に多い位置推定開始から 10 秒間の隣接ノード情報を用いて位置修正を行う 20 秒まで高い位置推定精度に至らない。

7.3 ノード数増加による隣接ノード情報の欠損

20 秒経過後においても精度の収束に時間がかかっている要因はノード数の増加であると考えられる。図 11 は位置推定時における隣接ノード情報の欠損数を示したものである。

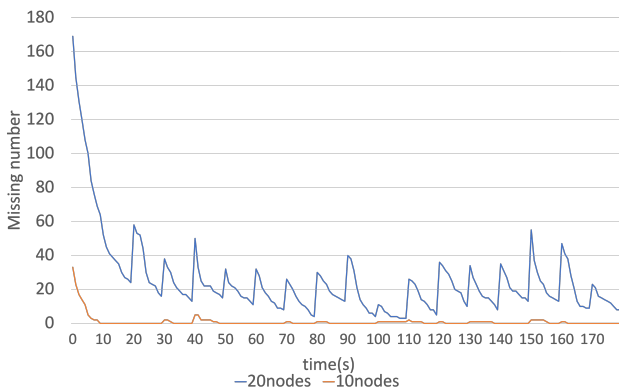


図 11 1 秒あたりのリンク欠損数

SOL アルゴリズムでは隣接ノード情報の欠損を考慮し、ノード間で得られた隣接ノード情報を一定期間保持するために図 11 で分かるように 10 秒ごとにブレが生じている。本来 SmartFinder は隣接ノード情報が増加するノード数増加時に推定精度が向上するという特性を持っているが表 3 のようにノード数増加時にノード数減少時と比較して精度が向上していないのは隣接デバイスリストの欠損にあると考えられる。

BLE はチャンネルホッピングによりサブチャンネルをランダムに選択して送信することで衝突を回避している。また、アダプタイズ送信 1 回でその隣接デバイスが RSSI からリンク情報を得ることができる。一方、UWB は全チャンネルを分割することなく、またコンテンツ制御なしに短周期で送信している。また、一つの隣接デバイスとのリンク長を得るには二つのデバイス間で Poll, Resp, Final の 3 回のユニキャスト通信が必要である。つまり、BLE は衝突回避しつつ各デバイスのアダプタイズ送信 1 回で全リンク長を取得できるが、UWB は全リンク長を得るために、全隣接デバイス間で 3 回のユニキャスト通信が必要になる。従って、UWB はデバイス数が増えれば衝突する可能性が大いに高くなるために隣接デバイスリストが欠損し、ノード数の増加によって期待されるほどの精度向上が得られなかったと考えられる。

7.4 トポロジ矛盾判定に関して

SOL アルゴリズムでは GSOL 実施時に再現された複数のジオメトリの中から隣接ノード情報を基に最も矛盾の最も矛盾の少ないジオメトリを出力している。しかし、今回の実験においてはマルチホップ構成となるトポロジはネットワークの一部分に留まり、一部のトポロジに偏った判定になっている。従って、このような場合、2 ホップトポロ

ジを想定するトポロジ矛盾判定は有効に機能していないと考えられる。

8. まとめ

本論文では屋内施設での火災現場における消火活動など事前の測位準備が難しく、高い位置推定精度を必要とする環境を想定し、測距精度が数 cm 数 10cm の IR-UWB を適用した SmartFinder の実装を行い、実機実験を基に評価を行った。SmartFinder では位置推定を行うためにメッシュ型のネットワークを構成する必要があるため本稿では IR-UWB デバイスの測距処理を Peer-to-Peer の水平型処理に拡張し SmartFinder への適用を行った。

今回の評価結果では 10 ノード時、20 ノード時において位置推定最大誤差が 50cm 以下となる結果が確認できた。SmartFinder が起動して 20 秒程度は高い精度を得るのに時間を要するが、その後は 1 秒周期で高精度な位置推定ができています。

このように要求精度に達するまでに時間が必要となる要因として IR-UWB デバイスが、メディアアクセスにおいてコンテンツ制御が未実装のために、データ衝突から DS-TWR によるデバイス間距離計測数が減少して、SOL における隣接デバイス情報が十分な数になるまでに時間を要したためである。今後衝突回避制御を実装し、検証を行う必要がある。

また 10 ノード時、20 ノード時において GSOL サイクルで得られた精度の内、位置推定誤差が 10cm 以下のトポロジが再現されていた。しかし、今回の実験結果では SOL アルゴリズムにおける隣接ノード情報を基にしたトポロジ矛盾判定によって位置推定誤差が最小のトポロジは最良ではないと判断している。これはサーバにおける SOL のトポロジ矛盾判定が、仮想ネットワーク全体において 2 ホップ以上のメッシュ型のマルチホップネットワークを想定しているため、2 ホップトポロジが少ないまたは一部に偏る場合に最良の結果をとなるケースを選択できていない。従って、トポロジ矛盾判定を見直すことが必要である。

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] 北之馬貴正, 新居英志, 森流星, 滝沢泰久: 集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder のノード間経路長を用いた実機実装評価, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.12, pp.2291-2301 (2019)
- [4] 川田千尋, 北之馬貴正, 新居英志, 森流星, 滝沢泰久: 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, 情報処理

- 学会研究報告, Vol. 2019-DPS-180, No.8, pp.1-7 (2019)
- [5] 川田千尋, 北之馬貴正, 新居英志, 森流星, 滝沢泰久: 屋内環境におけるスマートデバイスの多重化トポロジを用いた集約型自己組織化位置推定方式の精度検証と考察, 情報処理学会研究報告, Vol. 2020-DPS-184, No.18, pp.1-8(2020)
 - [6] 立本航平, 滝沢泰久: 自己組織化位置推定方式 SmartFinder 精度改善に関する一考察, 情報処理学会研究報告会, Vol.2022-DPS-190, No11, pp.1-8(2022)
 - [7] 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).
 - [8] N.Priyantha ., A. Miu., Balakrishnan, H., and Teller, s.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *Proc. MOBICOM 2001* (2001).
 - [9] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.: *Global Positioning System, Theory and Practice*, 4th ed.(1997).
 - [10] N.Bulusu, J.Heidemann, and D.Estrin : "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", *IEEE Personal Communications Magazine* (2000).
 - [11] D.Niculescu and B.Nath : "DV-based positioning in ad hoc networks", *Telecommun.Syst*, vol.22, pp267-280 (2003).
 - [12] 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).
 - [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] 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, pp.477-486 (2012).
 - [16] Erwin Allebes, Gaurav Singh; Yuming He21.2 A 3-to-10GHz 180pJ/b IEEE802.15.4z/4a IR-UWB Coherent Polar Transmitter in 28nm CMOS with Asynchronous Amplitude Pulse-Shaping and Injection-Locked Phase Modulation