

推薦論文

IR-UWB 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

森 流星^{1,a)} 北之馬 貴正² 川田 千尋¹ 滝沢 泰久³

受付日 2019年11月11日, 採録日 2020年4月8日

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。集約型 SOL はノード間通信に Bluetooth Low Energy を用いており, その位置推定精度誤差は 2m 程度である。本論文では, 工場や建設現場などの動的環境における自律型サービスロボットの応用を想定し, 集約型 SOL に Impulse Radio UWB (IR-UWB) を適用することで, 位置精度誤差数十 cm オーダに高精度化する方式を提案する。さらに提案方式の実装評価実験によりその位置精度から本方式の有用性を示す。

キーワード: トラッキング, 位置推定, スマートデバイス, 自己組織化マップ

Self Organizing Localization Using UWB device and Its Implementation Evaluation

RYUSEI MORI^{1,a)} TAKAMASA KITANOUMA² CHIHIRO KAWATA¹ YASUHISA TAKIZAWA³

Received: November 11, 2019, Accepted: April 8, 2020

Abstract: We propose SOL that estimates the location of many smart devices ubiquitous in an indoor space with only three anchors. The location estimation error of SOL using Bluetooth Low Energy (BLE) is about 2 meters. In this paper, assuming that in future service robot is applied to dynamic environments such as factories and construction sites, a localization with high precision will be required due to tracking service robot movement. Accordingly, by applying Impulse Radio UWB (IR-UWB) to SOL, we propose a localization of which location error is several ten centimeters. Furthermore, we show its effectiveness by implementation evaluation.

Keywords: tracking, location estimation, smart device, self-organizing-map

1. はじめに

近年, 工場や建設現場などにおいて従来生産方式である

ライン生産方式とセル生産方式を合わせた, ダイナミックセル生産方式の導入が進んでいる [1]. 従来のライン生産方式では同品種大量生産を目的として 1 本のコンベア (ライン) を軸に所定の場所で決められた工程を行う。ライン生産方式では同品種大量生産を目的としているため, 他品種の製造のためにはラインを組み替える必要があるため多品種少量生産には向いていない。セル生産方式では多品種少量生産を目的とし, 同一空間 (セル) で全行程を行う方式である。1 つの空間で 1 つの製品を組み上げるため, 多品

¹ 関西大学理工学研究科
Graduate School of Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

² 関西大学先端科学技術推進機構
Organization for Research and Development of Innovative Science and Technology, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

³ 関西大学環境都市工学部
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

a) znkn5zhmm@gmail.com

本論文の内容は 2019 年 3 月の第 178 回マルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され, 同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

種の製造が可能になるが人1人あたりの作業範囲が増加するため作業員の熟練度によって品質に影響を及ぼすことがある。ダイナミックセル生産方式ではライン生産方式とセル生産方式を合わせた生産方式であり、多品種多量生産と動的な生産調整を目的とする。ダイナミックセル生産方式においても、複数台の自律型サービスロボットが協働し人の労働力の代わりとなりモノの運搬、設備配置、清掃などの作業を行うことが考えられるが、ダイナミックセル方式ではセル内のレイアウト変更が頻繁に行われるため、自律型サービスロボットの作業経路は固定化されず、変更されたレイアウトや作業状況に応じて動的に変動する。そのために業務管理上において複数台の自律型サービスロボットのリアルタイムな移動状況とその軌跡把握が必要となる。また、移動軌跡の位置精度は、人1人が停止して作業を継続する範囲を肩幅相当50cmを最小範囲とした場合、数十cmオーダの位置精度が必要である。

自律移動ロボットの研究において、ロボットと周辺との相対的な距離把握機能の実現のためカメラやレーザレンジファインダを用いた方式が多数提案されている[2]。しかし、この方式は大域的な自己位置把握機能に欠けるため、自律移動ロボットは自身の現在位置(所在場所)を把握できない。そのため、移動空間にカメラの配置や移動空間のマップ(ランドマーク)を用意することにより、自律移動ロボットが現在位置を把握するとともに、業務管理においてもその移動軌跡を把握可能とする。しかし、ダイナミックセル方式の工場や建設現場では、作業工程の組み替えにより作業空間のレイアウトは頻繁に変動するため、前述のようなカメラやマップなどの移動環境内の測位設備は、そのつど、再構成する必要があり、大きなコストが発生し、持続可能性が低い。したがって、測位設備への依存性が低い大域的な位置推定方式が必要である。現在、大域的な位置推定を行う方法として電波を用いるiBeacon[3]やIndoor Messaging System (IMES)[4]、各種センサを用いるフィンガープリンティング[5]、カメラ画像を用いる手法[6]がある。電波を用いる手法では環境内に多数の定点ビーコンを必要とし、フィンガープリンティングで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。また、これら方式の位置推定精度は数mオーダであり、自律移動ロボットの移動軌跡把握の精度要件を満たせない。高精度な位置推定方式としてカメラによる多点計測の方式があり、数cmオーダでの位置把握が可能とされている。しかし、高精度な位置推定を行うには相当数のカメラと事前の十分なデータによる位置推定機能の学習を必要とし、また見通し環境を確保する必要がある。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や事前準備を必要とするため、頻繁にレイアウト変更があるダイナミックセル生産環境への適用は困難である。

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[7],[8],[9]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あり、測位設備の依存性がきわめて低い。SmartFinderは、スマートデバイス間の通信をBluetooth Low Energy (BLE)とし、集約型自己組織化ノード位置推定方式(Self-Organizing Localization : SOL)にBLEのReceived Signal Strength Indicator (RSSI)によるノード間相対距離を適用してスマートデバイスの位置を推定する。その位置推定精度は2m程度である。しかしBLEのRSSIでは電波伝搬においてマルチパスフェージングの影響を強く受け、ノード間相対距離は大きな誤差が生じる場合がある。特に工場など反射波の強いフェージング環境ではノード間相対距離誤差が増大し、位置推定精度が劣化する問題点がある。

本論文ではダイナミックセル生産方式とする工場や建設現場に代表される屋内レイアウトが動的に変更・更新される屋内環境において、自律移動ロボットの大域的な移動軌跡をリアルタイムで把握可能とするため、ノード間通信およびノード間距離計測にIR-UWBデバイスを用いた集約型SOLの改良方式を提案する。IR-UWBの通信は非常に短時間のパルスによる電波伝搬であり、またRSSIでなく電波の往復時間でノード間距離を計測するため、マルチパスフェージングの影響を受けにくい。従って、提案方式はUR-UWBを用いるとともに、集約型SOLを改良し、位置推定精度を誤差数十cmとする高精度化と測位設備へのきわめて低い依存性を実現する。さらに、本論文では、提案方式をiRobot社製Roomba[10]に実装し、実機実験から方式の有用性を示す。

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、電波を用いる方式とセンサ情報を用いる方式が存在する。電波を用いる方式はノード間距離を用いるレンジベース位置推定方式(Range-based)とノード間距離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。本章では上記の例の概説をする。

2.1 Range-Based方式

Range-Based方式ではノード間距離を利用するため測距機能を持った無線ノードが必要となる。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、電波など)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) [11] や Ultra Wide Band (UWB) [12] などが存在する。GPS では GPS 衛星からの信号を受信し時刻データに電波の伝搬速度を掛け合わせることで GPS 衛星との距離を算出する。3 個以上の GPS 衛星との通信ができれば 3 点測量の要領で位置推定が可能である。しかし屋内や山間部では GPS 衛星と通信が困難なために位置推定精度の劣化が発生する。

UWB は非常に短いパルスを用いることにより高精度なノード間測距が可能である。しかし電波の通信カバレッジ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。

2.1.2 TDOA 利用方式

TDOA 方式は、異なる複数の伝送媒体からの信号の到着時間の差を用いて測位を行う。一般的には電波や音波が用いられるが、各伝送媒体による通信カバレッジや環境依存特性の違いから利用環境が限定的になる。TDOA 方式を利用した主な位置推定方式として Active Bat [13], Cricket [14] などがあげられる。

2.1.3 RSSI 利用方式

RSSI 方式は電波強度を利用しノード間距離を測距する。RSSI を用いた位置推定方式として RADAR [15], SpotON [16] がある。電波強度のみでノード間の測距が可能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アンカーノードや事前の電波状況の計測が必要となる問題が存在する。

2.1.4 Range-Free 方式

Range-Free 方式ではセンサ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 [17], APIT [18] がある。Centroid 方式は、通信可能なアンカー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精度は低い。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すべ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。APIT 方式では精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精度が依存するとされる。

2.2 センサを用いた方式

センサを用いた手法では主に Dead Reckoning (DR) [19], Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) [20] などが該当する。DR 法ではジャイロセンサや加速度センサなどの各種センサの情報を元に移動距離、移動方向を算出し過去の自己位置からの相対位置を算出する方式である。

DR 法では過去の自己位置と比較を行うためセンサ値の誤差による位置推定誤差の蓄積が問題となる。そのため、誤差の補正と絶対位置を得るために、相当数の定点が必要となる。SLAM は初期に大域的な自己位置推定機能または環境マップのいずれかが必要である。大域的な自己位置推定機能を有する場合はこれを用いて動的に環境マップを作成することは可能である。一方、大域的な自己位置推定機能を有しない場合は、事前に用意した環境マップから大域的な自己位置推定を行い、これをフィードバックして環境マップを更新する。しかし、環境が動的に変わる状況には適用が困難である。したがって、SLAM は環境が動的に変わる状況において大域的な自己位置推定機能が必須となる。

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 情報およ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 およびノード間距離から仮想メッシュネットワークの構成、集約型 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 の機能およ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

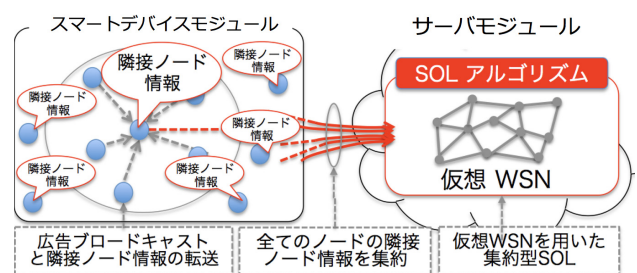


図 1 集約型 SOL の構成

Fig. 1 System components of Self-Organizing Localization.

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 およ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および更新

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およ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つね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およ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。式 (1) を用いて、仮想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。

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

ただし、 $Link_{xy}$ 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 $Link_{xy}$ 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。

3.3 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。以

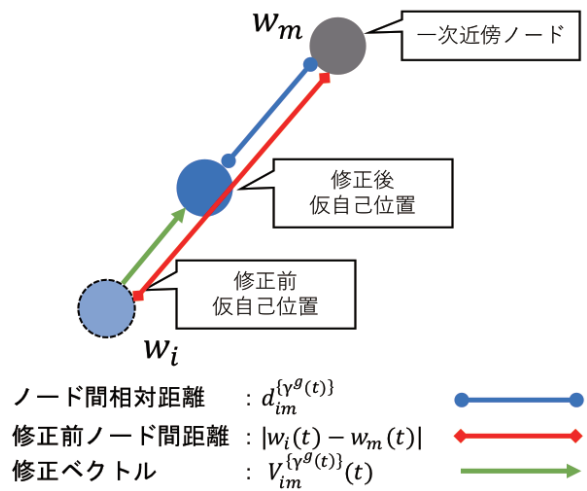


図 2 集約型 SOL における位置修正図

Fig. 2 Location update in Self-Organizing Localization.

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。

3.4 集約型 SOL によるスマートデバイス位置推定

集約型 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。集約型 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。集約型 SOL のアルゴリズムは以下の手順で分けられる。

- (1) 集約型 SOL アルゴリズムによる位置推定
- (2) 絶対座標変換
- (3) 推定ジオメトリの領域判定値算出
- (4) 最小値の領域判定値と推定ジオメトリを記憶

集約型 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] 集約型 SOL におけるノードの仮位置修正を図 2 に示す。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 (図 2: 青線) $d_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}$ と、修正前仮自己位置 (図 2: 破線青丸) と位置更新対象ノード (図 2: 黒丸) 間距離 (図 2: 赤線) $|w_i(t) - w_m(t)|$ (図 2: 赤線) を用いて、ノード i の修正ベクトル (図 2: 緑線) $V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)$ (図 2: 緑線) を式 (2) のように定義する。

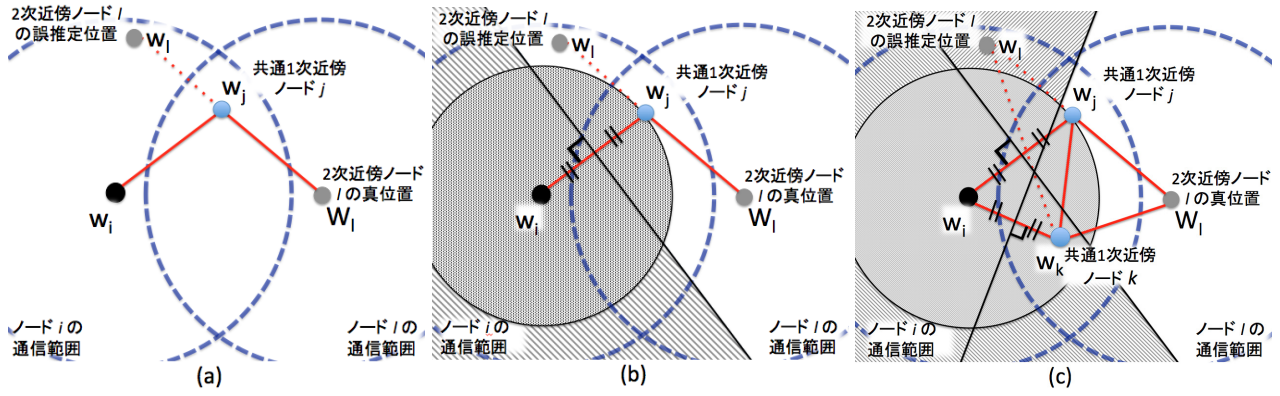


図 3 推定ノードのトポロジ矛盾領域

Fig. 3 Contradictory area to actual geometry.

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

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。

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_{im}^{\{1.0\}}(t) + V_{im}^{\{\gamma^g(t)\}}(t)) \quad (3)$$

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

$\alpha_i(t)$ 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 (5) により決定する。

$$\gamma^g(t) = \begin{cases} d^{\max} - \frac{t(d^{\max} - 2.0)}{S^g} & (d^{\max} > 2.0) \\ 2.0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

S^g は集約型 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。また、式 (3) における位置修正ベクトルでは多ホップノードにおける位置更新は最小で 2 ホップであるため $\gamma^g(t)$ の下限値は 2.0 とする。

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想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。

$$\begin{aligned} X_A &= ax_A + by_A + t_x \\ Y_A &= cx_A + dy_A + t_y \end{aligned} \quad (6)$$

3 つのアンカーノードから構成される連立方程式 (6) 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。

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & t_x \\ c & d & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

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 3)。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 3(a))。 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 (図 3(b))。

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、上記と同様にすべての共通 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 (図 3(c))。すべての 2 次近傍ノードとの組合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、位置推定結果とする。

3.5 既存の集約型 SOL における課題

既存の集約型 SOL ではノード間相対距離算出に BLE の RSSI を用いているため、マルチパスフェージングの影響を受けてノード間相対距離に多くの誤差を含む場合がある。特に工場など金属物が多い屋内施設の反射波の強いマルチパスフェージング環境において、BLE の RSSI はノード間距離との相関 (ノード間距離の n 乗に比例して RSSI が単調減少する) を失い、その相関はランダムに近くなるため、BLE の RSSI に基づいて算出したノード間相対距離は大き

な誤差を含むことになる。集約型 SOL は複数の隣接ノード間相対距離を用いることから、一部のノード間相対距離の大きな誤差に対する耐性は有する。しかし、上記のようなマルチパスフェージングの影響を強く受ける環境では、BLE による隣接ノード間の RSSI はその大部分ノードにおいて大きな誤差を含むことになり、このような場合、集約型 SOL は位置推定精度を維持することが困難となる。

4. 集約型 SOL へ IR-UWB デバイス適用

移動/停止を繰り返すようなロボットの高精度な位置推定を行う集約型 SOL アルゴリズムの提案を行う。図 4 に SOL へ IR-UWB デバイスを適用した場合のシステム構成図を示す。従来の集約型 SOL におけるスマートデバイスモジュールに IR-UWB デバイスを付した構成になる。本章では、ネットワークの観点から自律移動ロボットをノードと表記する。従来方式における BLE のマルチパスフェージングによるノード間距離誤差増大の問題解決のために BLE デバイスから IR-UWB デバイスに変更を行う。IR-UWB デバイスでは非常に短いパルスの RTOF (Round Trip of Flight) によるノード間距離測距を行うためマルチパスフェージングの影響を受けにくく高精度なノード間距離計測が可能である。以下 4.1 節では IR-UWB デバイスにおける RTOF ノード間距離測位アルゴリズムを示す。また 4.2 節では BLE から IR-UWB に変更に応じた集約型 SOL の改良アルゴリズムを示す。

4.1 IR-UWB デバイス

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 RTOF (Round Trip of Flight) による測距アルゴリズムを示す。

- (1) 相互のブロードキャスト通信で隣接ノード情報を取得。
- (2) 上記隣接ノードへユニキャスト送信。
- (3) 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。
- (4) 返信受信ノードで通信往復時間により距離を算出。
- (5) 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。

以上の手順で測距したノード間距離を Wi-Fi を用いてサーバモジュールへと転送する。また、UWB の通信は Impulse Radio でかわめて短い送信時間であることから、アクセス制御は実施しないことし、通信制御を軽減する。

4.2 提案集約型 SOL

断続的に移動/停止を繰り返す自律移動ロボットに対応した位置推定を実現するため、従来の集約型 SOL から以下の 3 点の変更を行う。

- 仮想メッシュネットワークにおける隣接ノード情報

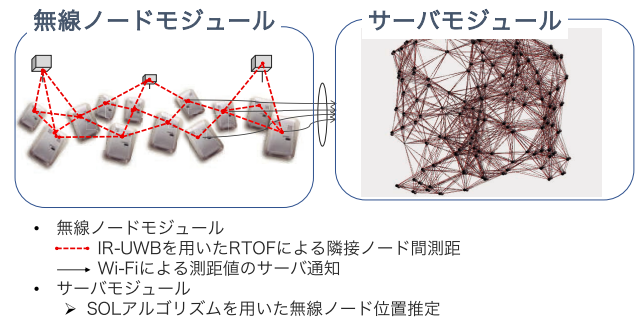


図 4 IR-UWB を適用した集約型 SOL の構成

Fig. 4 System components of Self-Organizing Localization using IR-UWB device.

保持

- 仮想メッシュネットワークにおける近傍ノード設定
- 集約型 SOL の移動体対応

4.2.1 隣接ノード情報保持

移動ノードへの対応およびリアルタイム性を考慮した隣接ノード情報の保持を行う。自律移動ロボットは断続的に移動/停止を繰り返していることから隣接情報はつねに変化する。したがって、移動している自律移動ロボットの位置推定を行うためには最新の隣接情報を隣接ノードを用いて位置推定を行うことが必要である。提案方式は、UWB デバイスによる周期的なノード間距離計測に引き続き、集約型 SOL を用いて全自律移動ロボットの位置を推定する。提案方式は、UWB の通信においてアクセス制御を実施しないため、電波干渉によるノード間距離計測の失敗の可能性がある。隣接ノード間距離計測の起点となるブロードキャスト通信が干渉要因などにより失敗した場合、多くの隣接とのノード間距離計測ができなくなる。この場合を想定して、計測に成功した直近のノード間距離を保持する。保持期間が長い場合、その間の移動により現在のノード間距離に一致しない。一方で、直近のノード間距離を短時間で破棄した場合、ノード間リンクを失う。集約型 SOL はノード間距離への誤差耐性が高い特徴を有することから、ノード間距離データが少なくなるより、過去のノード間距離、すなわち、誤差を含むノード間距離を採用してノード間距離データを確保することが位置推定精度に有利と考える。以上をふまえ隣接ノード情報保持期間 t_g はノード間距離計測周期より十分に長い時間とする。また、より直近に計測したノード間距離を用いるため、2 ノードでそれぞれ計測したノード間距離においてより最新のノード間距離を 2 ノードのノード間距離として採用する。

4.2.2 仮想メッシュネットワークにおけるノード間距離

IR-UWB デバイスでは BLE と比較し通信カバレッジが小さく隣接情報が減少することから、式 (1) を用いてノード間距離の定義を行った場合マルチホップを経由する機会が多くなる。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

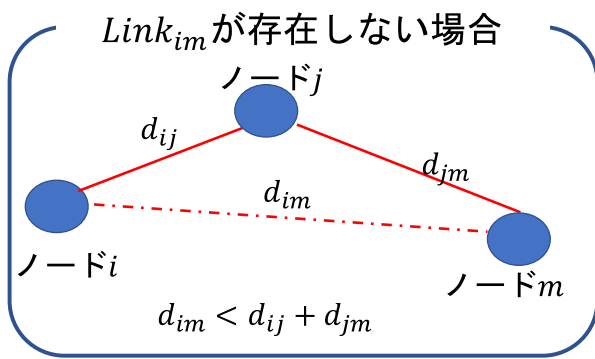


図 5 マルチホップにおけるノード間距離の変化
Fig. 5 Inter-node distance based on multihop path.

ため算出される距離が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(図 5)。そのため 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およ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持つ 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。これにともない、仮想メッシュネットワークにおける最短パスの取得は省略する。

4.2.3 集約型 SOL の移動体対応

従来の集約型 SOL は数十秒程度の十分な推定時間を利用して停止ノードの位置を高精度に位置推定することを目的としていたため、移動体の位置測位には適さない。そこで UWB を用いた提案集約型 SOL においては、高精度化と実時間性を両立させるため次のように処理を実施する。

- 前述のように、1 ホップノード間距離のみを採用するため、仮想メッシュネットワークの最短パス取得処理を省略する。
- 人の歩行速度相当と想定し、移動範囲は局所的であるとして、位置推定は前回推定した位置から推定処理を開始し、位置更新回数を減じて、推定処理を簡略化する。
- 上記の簡略化にともなう精度劣化を抑制し、かつ高精度とするため隣接するすべての 1 ホップノードのノード間距離を採用する。

以上の処理の手順は以下のとおりである。

[Step.1] 時刻 t での各ノードの初期(第 1 回目修正)仮位置 $w_i^t(0)$ を時刻直前に推定した推定位置 w_i^{t-1} とする。 $t = 0$ の場合はランダム位置とする。以降、実時刻 t におけるノード i の位置推定過程の n 回目の修正におけるノード i の仮位置を $w_i^t(n)$ とする。

[Step.2] 位置更新対象ノード i の選択を行う。

[Step.3] ノード i において位置更新に用いる対象ノード m を、ノード i の一次近傍ノードから 1 つを選択する。

[Step.4] ノード m を用いたノード i の位置修正を行う場

合、実時刻 t において計測されたノード i と m のノード間距離 d_m^t を用いて、実時刻 t におけるノード i の位置推定過程の n 回目仮位置更新の修正ベクトル $V_{im}^t(n)$ を、次のように定義する。

$$V_{im}^t(n) = \frac{d_{im}^t - |w_i^t(n) - w_m^t(n)|}{|w_i^t(n) - w_m^t(n)|} (w_i^t(n) - w_m^t(n)) \quad (8)$$

上記更新式を用いてノード i の仮位置 $w_i^t(n)$ を式 (9) のように更新する。

$$w_i^t(n+1) = w_i^t(n) + \alpha_i^t(n) \cdot V_{im}^t(n) \quad (9)$$

$\alpha_i^t(n)$ は実時刻 t におけるノード i の位置推定過程の n 回目仮位置修正に用いる学習係数であり、移動は局所的であることを想定して、初期仮位置(直近の推定位置)からの大きな変更を抑制するために小さな値とする。

[Step.5] Step.3, 4 をノード i の 1 ホップノードすべてに行っていない場合は Step.3 に戻る。 Step.3, 4 をノード i の 1 ホップノードすべてに行った場合は Step.2 に戻る。

5. 実装評価

5.1 実装評価システム

実装評価では、IR-UWB デバイスを移動体 Roomba 600series [10] に搭載し Roomba の位置推定を行う。Roomba は全 8 台用意し 4 台を停止体、4 台を移動体とし移動させる。Roomba はあらかじめ決められたルートを移動するとし、Roomba の移動シナリオを図 7 に示す。ID3, 6, 7, 10 の Roomba を移動体とし。ID4, 5, 8, 9, の Roomba を停止体とする。図 8 に実験風景、表 1 に実験諸元を示す。また図 6 に実装評価におけるシステム構成図を示す。適用する IR-UWB デバイスとして日本ジー・アイ・ティー社製の IR-UWB デバイス [21] を用いた。本デバイスでは 7.25~10.25 GHz 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。またサーバへのデータ通知には IEEE802.11 b を用いた。

5.2 評価方式

以下に記載する、従来方式と提案手法において絶対座標評価を行う。

- 従来方式：ノード間通信デバイスに UWB を用い、位置推定アルゴリズムを先行研究の方式とする(表 2)。
- 提案方式：ノード間通信デバイスに UWB を用い、位置推定アルゴリズムを提案方式とする(表 3)。

絶対位置評価は、実時刻 t において推定された各ノードの位置と同実時刻 t におけるユークリッド距離の平均である位置推定誤差 Err^t を用いて評価する。 Err^t は次の式 (10) のように求める。 W_i^t は実時刻 t のノード i の真位置、 w_i^t

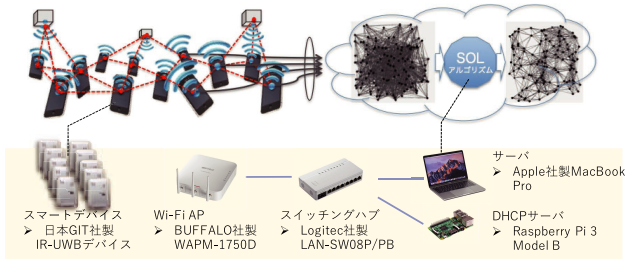


図 6 実装評価におけるシステム構成図

Fig. 6 System configuration in implementation experiment.

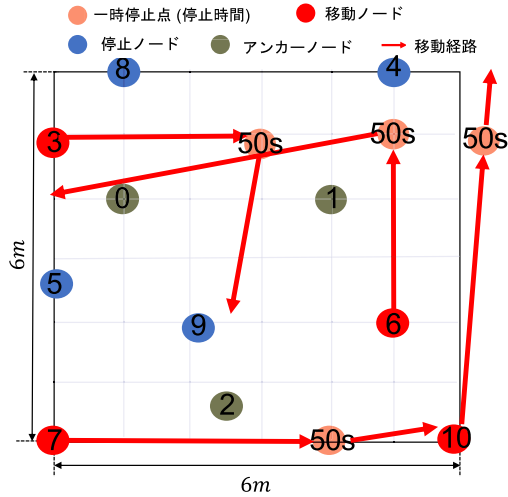


図 7 Roomba 移動シナリオ

Fig. 7 Moving routes for Roomba.



図 8 実験風景

Fig. 8 Experiment scene.

実時刻 t におけるは推定位置を示す。 N はノード総数を示す。

$$Err^t = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N |W_i^t - w_i^t| \quad (10)$$

実時刻 t の仮想メッシュネットワークにおけるノード i の 1 ホップノード間距離を SD_i^t を用いて評価する。 SD_i^t は仮想メッシュネットワークにおける隣接ノード距離とオリジナルネットワーク形状における近傍との距離精度の誤差分散を正規化して評価する。 SD_i^t は次の式により評価する。

表 1 実験環境

Table 1 Physical parameter in experiment.

フィールド範囲 (m ²)	49
アンカーノード数	3
停止ノード数	4 (ID : 4, 5, 8, 9)
移動ノード数	4 (ID : 3, 6, 7, 10)
移動ノード移動速度 (cm/sec)	10
実験時間 cycle (sec)	180

表 2 従来方式におけるパラメータ値

Table 2 Parameter in conventional method.

SOL の実行周期 (sec)	1
隣接ノード情報保持期間 t_g (sec)	5
SOL における仮位置修正回数 S^g	800
学習係数初期値 α	1.0
減衰定数 η	0.992

表 3 提案方式におけるパラメータ値

Table 3 Parameter in proposed method.

SOL の実行周期 (sec)	1
隣接ノード情報保持期間 t_g (sec)	5
SOL における仮位置修正回数 S^g	100
学習係数初期値 α	0.1
減衰定数 η	0.992

$$r_{ij}^t = \frac{d_{ij}^t}{D_{ij}^t}, \quad \bar{r}^t = \frac{1}{|N|C_2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N r_{ij}^t \quad (11)$$

$$SD_i^t = \frac{\sqrt{\sum_{j=i+1}^N (\bar{r}^t - r_{ij}^t)^2}}{Link_i^t} \quad (12)$$

$Link_i^t$ は実時刻 t におけるノード i の 1 ホップノード数を表す。 d_{ij}^t , D_{ij}^t はそれぞれ実時刻 t でのノード ij 間における真距離, 仮想メッシュネットワークにおけるノード間距離を示す。 \bar{r}^t が 1 に, SD_i^t が 0 に近いほど測距精度が正確であることを示す。

5.3 評価結果

図 9 に従来方式における Err^t , SD_i^t 推移のグラフ, 図 10 に提案方式における Err^t , SD_i^t 推移のグラフを示す。移動体の移動期間は 25~75 sec, 120~170 sec の期間であり, この期間内では少なくとも 1 台は移動を行っている。従来方式では全期間の平均位置推定精度誤差は 0.372 m, 提案方式における全期間の平均位置推定精度誤差は 0.297 m となった。従来方式では 120~170 sec の移動期間において位置推定精度が劣化し最大誤差が 0.876 m となったが, これはアンカーノードの位置推定精度の劣化が大きく影響している。この精度劣化はアンカーノードにおける SD_i^t が大きくなっており, UWB による測距精度が劣化していることが原因である。アンカーノード近傍の UWB 測距精度劣化は, 移動ノード 3 と 6 が当該移動期間においてアンカー

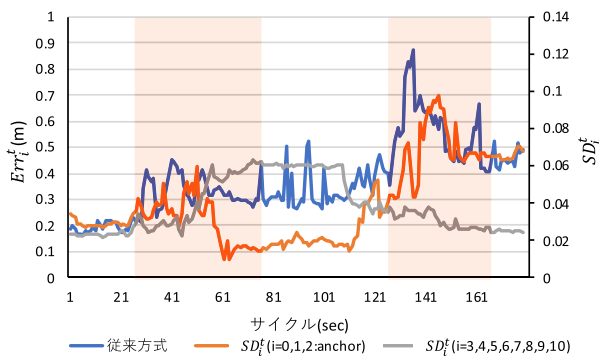


図 9 従来方式における Err_i^t , SD_i^t 推移

Fig. 9 Err_i^t and SD_i^t transition in conventional method.

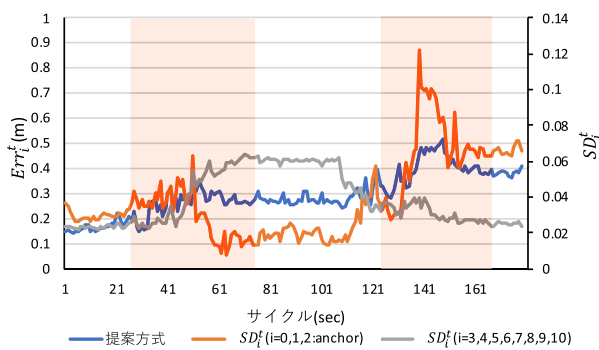


図 10 提案方式における Err_i^t , SD_i^t 推移

Fig. 10 Err_i^t and SD_i^t transition proposed method.

ノード 0 と 1 の間に集まり、これらのノード間の UWB 通信において相互に電波干渉が発生したためと考えられる。以上から、アンカーノードの推定位置は絶対座標変換の基準点であるためアンカーノードの推定位置精度の誤差がすべてノード位置の変換において誤差を増幅させる。一方、提案方式においては最大誤差は 0.515 m となっている。提案方式においても精度劣化が見られるが、従来方式と比較して精度劣化が抑制されている。この精度劣化の抑制は、1 ホップノードをすべて用いた位置更新と、前回推定位置を継承した局所位置更新の効果によると考えられる。1 ホップノードすべてを用いた位置更新ではマルチホップによる更新と比較した場合、仮想メッシュネットワークにおけるノード間相対距離の精度が高くなる。その結果、全体的な精度向上に貢献していると考えられる。また、前回推定位置を継承した局所位置更新では、学習係数の初期値を 0.1 とすることで一時的な精度劣化したノード間相対距離の重みが弱まり、一方で、前回推定位置の重みが強まる。そのためノードの移動位置は前回推定位置から大きく離れることが抑制される。したがって、提案方式は上記 2 点から 80~100 sec, 120~170 sec における隣接デバイスのトポロジに基づいたノード間相対距離の誤差増大に対して、位置推定精度の劣化を抑制すると考える。図 11 に提案手法における推定移動軌跡と実移動軌跡の比較図を示す。赤矢印が実移動軌跡を示し、各ノードの移動軌跡はそれぞれ図形の

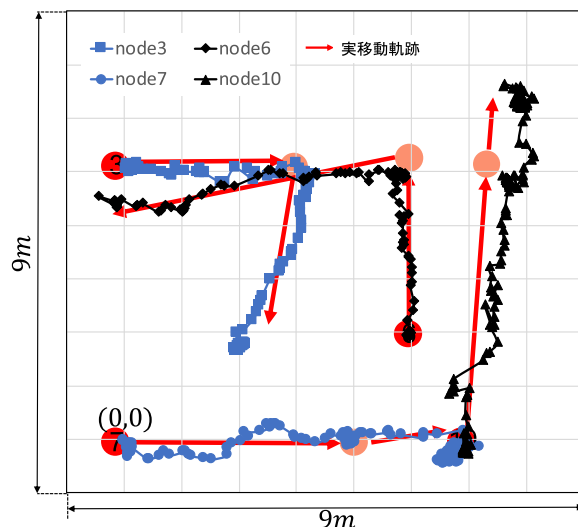


図 11 推定移動軌跡と実移動軌跡

Fig. 11 Estimated tracks and actual tracks.

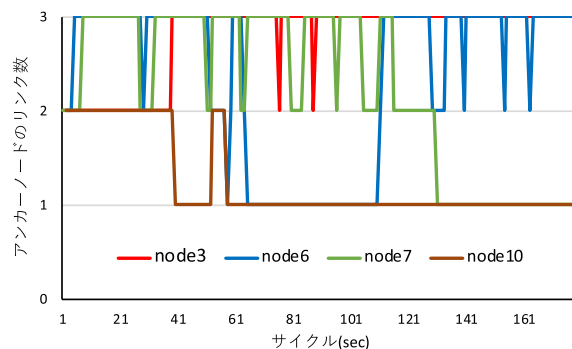


図 12 移動ノードとアンカーノードの間のリンク数

Fig. 12 The numbers of link between anchor and mobile node.

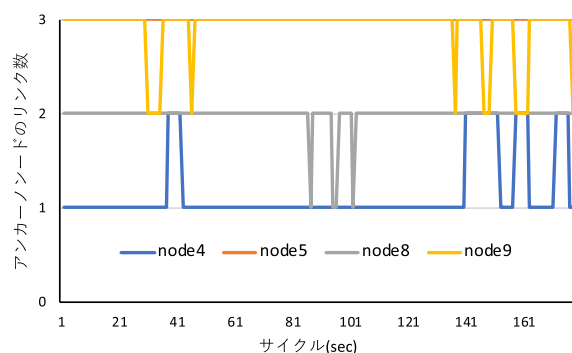


図 13 停止ノードとアンカーノードの間のリンク数

Fig. 13 The numbers of link between anchor and staying node.

マーカで示す。推定移動軌跡と実移動軌跡を比較して目立った外れ値はなく、直線運動の移動軌跡を確認することができる。

図 12 に移動ノードとアンカーノード間のリンク数、図 13 に停止ノードとアンカーノード間のリンク数を示す。アンカーノードとのリンク数が 2 以下の場合には 3 点測位を行うことができない。今回の実装評価においてはこれらノードとアンカーノード 3 点間のリンク数はその移動に

ともなって変動し、ID10の移動ノードはすべての時間において3点のアンカーノードとのリンクは確保されず、またID6の移動ノードも期間の大半で3つのアンカーノードとのリンクは確保されていない。さらに、IDが4, 5, 8, 9の停止ノードでは大部分の時間において3つのアンカーノードからのリンクは確保できていない。したがって、アンカーノード数の不足から3点測位が適用困難な測位設備環境である。このようなアンカーノード3点での3点測位の難しい空間において、集約型SOLを用いることにより継続的に高精度な位置推定を可能としている。すなわち、提案方式は、測位設備への依存性は低く、かつ高精度な位置推定であると考ええる。

6. まとめ

本論文では工場や建設現場などの動的環境における自律型サービスロボットの応用を想定し、作業管理上において必要となる自律移動ロボットの移動軌跡を数十cmで軽微な測位設備で推定する屋内測位方式として、集約型SOLへIR-UWBデバイス適用する方式を提案した。さらにRoombaを用いた実装評価を行った。今回の評価結果では提案方式において位置推定精度誤差が平均で0.297mとなる結果が確認できた。提案方式では従来方式と比較してアンカーノードの推定位置による精度劣化の影響は抑制されたが、その影響を完全に排除するには至らなかった。アルゴリズム改良に関しては今後、座標変換を行わないアルゴリズムにアンカーノードの位置推定精度の影響を受けにくい方式を検討する。また、本論文で行った実機実験では障害物がなかったため障害物混在環境での実機実験は今後の課題とする。

謝辞 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。

参考文献

- [1] 富士通マーケティング, 第11回IoT時代の工場構造・インダストリー4.0の「ダイナミックセル生産方式」のメリット, ICTのmikata 入手先 (<https://www.fujitsu.com/jp/group/fjm/mikata/column/fjm-topics2/011.html>).
- [2] 倉鋪圭太, 深尾隆則, 永田純平, 石山健二, 神谷剛志, 村上則幸: 日本ロボット学会レーザーレンジファインダによる自己位置同定と逆最適制御を用いた果樹園UGVの巡回走行, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.4, pp.428–435 (2012).
- [3] Newman, N.: Apple iBeacon technology briefing, *Journal of Direct, Data and Digital Marketing Practice*, Vol.15, No.3, pp.222–225 (2014).
- [4] 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).
- [5] Kawauchi, K. and Rekimoto, J.: FineMesh: High-Density Sampling Platform Using an Autonomous Robot, *2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom)*, pp.477–

- 486, Besancon (2012).
- [6] Okutomi, M. and Kanade, T.: A multiple-baseline stereo, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.15, No.4, pp.353–363 (1993).
- [7] Kitanouma, T., Takashima, Y., Adachi, N. and 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).
- [8] 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).
- [9] 北之馬貴正, 新居英志, 安達直世, 滝沢泰久: SmartFinder: 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とその評価, 情報処理学会論文誌, Vol.59, No.2, pp.462–472 (2018).
- [10] iRobot Japan G.K., available from (<http://www.irobot-jp.com/>).
- [11] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.: *Global Positioning System, Theory and Practice*, 4th ed. (1997).
- [12] Molisch, A., Cassioli, D., Chong, C.C., 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, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol.54, No.11, pp.3151–3166 (2006).
- [13] Woodman, O.J. and Harle, R.K.: *Concurrent scheduling in the Active Bat location system* (2010).
- [14] Priyantha, N., Miu, A., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *Proc. MOBICOM 2001* (2001).
- [15] Bahl, P. and Padmamabhan, V.N.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, Vol.2, pp.775–784 (Mar. 2000).
- [16] Hightower, J., Boriello, G. and Wat, R.: SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength, CSE Report 200-02-02, University of Washington (2000).
- [17] Karmaker, D., Chowdhury, A.Z.M.E., Miah, M.S.U., Imran, M.A. and Rahman, M.H.: Cricket shot classification using motion vector (2015).
- [18] He, C., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A. and Abdelzaher, T.F.: Range-free localization and its impact on large scale sensor networks, *ACM TECS*, Vol.4, No.4, pp.877–906 (2005).
- [19] Woodman, O. and Harle, R.: Pedestrian localisation for indoor environments, *Proc. 10th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'08)*, pp.114–123 (2008).
- [20] Kohlbrecher, S., von Stryk, O., Meyer, J. and Klingauf, U.: A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation, *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics* (2011).
- [21] 株式会社日本ジー・アイ・ティー, 入手先 (<http://www.git-inc.com>).

推薦文

本論文では、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、3点の定点観測のみから、高精度に推定することが可能な、集約型自己組織化ノード位置推定方式を提

案している。また、この手法を実装し、実環境での位置推定精度誤差が最小で約 20 cm となる結果を確認しており、推定手法の理論的な裏付けだけでなく、提案手法を実装することで、実世界での性能を示すなど、完成度が高い論文であり、今後の実践的な取組が期待されます。以上の理由により、本論文を推薦いたします。

(マルチメディア通信と分散処理研究会研究会主査

田上 敦士)



森 流星 (学生会員)

2018 年関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業。現在、関西大学大学院博士課程前期課程において無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。



北之馬 貴正 (正会員)

2019 年関西大学大学院博士課程後期課程修了。2019 年関西大学先端科学技術推進機構客員研究員、株式会社 Phindex Technologies 代表取締役。現在、無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。博士 (工学)。



川田 千尋 (学生会員)

2019 年関西大学環境都市工学部都市システム工学科卒業。現在、関西大学大学院博士課程前期課程において無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。



滝沢 泰久 (正会員)

1983 年京都工芸繊維大学工芸学部機械工学科卒業。同年日本ユニシス (株) 入社。1990 年住友金属工業 (株) 入社。1998 年 ATR 環境適応研究所出向。2002 年 ATR 適応コミュニケーション研究所主任研究員。2008 年同研究所上級主任研究員。2009 年関西大学環境都市工学部准教授、ATR 適応コミュニケーション研究所客員研究員。2014 年関西大学環境都市工学部教授。現在、無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会、IEEE、IEEE-CS 各会員。