

センサネットワークにおける高精度測位のための ビーコンノード選択手法

横田 裕介^{†1} 大久保 英嗣^{†1}

センサネットワークの Range-based localization に基づく測位において、測距誤差から生じる測位誤差を軽減させることは重要な課題である。測位誤差に影響を与える要因としては、センサノード間の距離、センサノードの位置関係、位置が既知のノードであるビーコンノードの数などがあげられる。本論文では、これらの要因が測位に与える影響の程度を実験により検証し、あるビーコンノード集合を用いて測位を行う場合に生じる測位誤差の程度を示す指標値を提案した。また、この指標値を用いて実際に測位を行うためのアルゴリズムを提案した。これは、1つの未知ノードの測位を行う際に用いるビーコンノード集合を決定する部分と、複数の未知ノードの測位を行う際に、最も測位誤差が小さくなるよう、測位を行う未知ノードの順番を決定する部分から構成される。このアルゴリズムを用いて測位を行うシステムを実装し、3次元環境において実際に測位を行う評価実験を実施した。その結果、従来の手法に比べ提案手法が測位誤差を低減させ、より高精度な測位を実現できることが示された。

A Selection Method of Beacon Nodes for High Accuracy Localization in Sensor Networks

YUSUKE YOKOTA^{†1} and EIJI OKUBO^{†1}

Reducing errors of localization derived from errors of ranging is an important issue in range-based localization techniques of wireless sensor networks. Distance between sensor nodes, position relation of sensor nodes, and the number of beacon nodes are the primal factors of localization errors. In this paper, first, we verified the extents of effects of these factors to localization based on the experiments and proposed an index value indicating an extent of a localization error when a certain subset of beacon nodes are used. Then a localization algorithm using the proposed index value was proposed. The algorithm consists of two parts: selection of a subset of beacon nodes for localization of one unknown node and decision of a sequence of unknown nodes for localization that minimizes localization errors. We implemented the localization system based on the proposed algorithm and evaluated it in three-dimensional environment

using the system. As a result of the experiments, reduction of localization errors in comparison with an existing method were observed and more accurate localization was realized by the proposed method.

1. はじめに

センサネットワークを用いて測位を行う場合、正確な位置情報を必要とするような状況においては、一般的に Range-based localization が用いられる。Range-based localization とは、センサノード間の距離を無線電波や超音波の到達時間などから推定し、これによって求められた距離の値（以下、この求められた距離の値を単に距離情報と呼ぶ）とビーコンノードの位置情報を用いて未知ノードの位置を計算する手法全般を指す。代表的な手法として、Multilateration があげられる。Multilateration では、3次元環境において4つ以上のビーコンノードからの距離情報を用いて未知ノードの位置を計測する。

Multilateration は、測距誤差に強いという特徴を持つため、ビーコンノードから未知ノードの距離を測定する際に生じる測距誤差を原因として発生する測位誤差を軽減させることが可能である。しかし、測位において誤差を完全に除去することは本質的に不可能である。できる限り測位誤差を軽減させることにより、測位精度の向上を図ることがセンサネットワークを用いた測位技術において求められている。著者らはこれまでに、Multilateration における精度向上に取り組んできている¹⁾。

また、複数個の未知ノードの測位を行う場合、それに応じた数のビーコンノードを配置する必要がある。センサノードは比較的low価格になりつつあるが、非常に多数のビーコンノードを配置することはコスト面を考慮すると、まだ現実的ではない。さらに、正確に位置を計測して多数のビーコンノードを配置する作業にかかるコストも無視できない。そのため、できるだけ少数のビーコンノードで複数の未知ノードの測位を行うことが理想的である。しかし、ビーコンノードが少ない場合、空間全体の未知ノードを網羅することができない。そこで、測位を終えた未知ノードを擬似的なビーコンノードとして次の測位に利用する手法として、Iterative Multilateration²⁾ が提案されている。Iterative Multilateration を用いることにより、比較的少数のビーコンノードによって空間全体をカバーすることが可能になる。

^{†1} 立命館大学
Ritsumeikan University

しかし、測位を終えた未知ノードの位置情報には誤差が含まれている可能性が高いため、測位を進めるごとに未知ノードの位置情報の誤差が蓄積・増大し、測位精度が低下していく。このような状況における測位誤差の蓄積・増大を抑えることで、初期配置に必要なビーコンノード数を減らすことが可能となる。できるだけ少数のビーコンノードを用いて、精度の高い測位を実現することが、センサネットワークにおける測位の重要な課題としてあげられる。

センサネットワークにおける位置情報の精度は、センサノード間の距離情報の誤差やセンサノードの数、位置関係といった因子が影響し合う。これらの因子の影響の度合いを指標とし、誤差が小さくなるように測位に利用するセンサノードの組合せを選択することにより、精度の高い測位が可能になると考えられる。また、複数のセンサノードの測位を行う場合、測位の反復による測位誤差の伝播・蓄積問題が発生するが、測位誤差の程度を表す指標を比較し、測位を行うセンサノードを選択することで、測位誤差の伝播・蓄積の軽減が可能になると考えられる。

本論文では、実験およびシミュレーション結果に基づき上記の指標を提案し、さらにこれを用いたビーコンノードの選択手法を提案する。このビーコンノード選択手法は、1つの未知ノードの測位を行う際に使用するビーコンノードの組合せを決定する部分と、複数の未知ノードの測位を行う際にどの未知ノードから測位を行うか、測位順序を決定する部分に大きく分けられる。

この手法に基づいたシステムを実装し、実際にセンサノードを用いて評価実験を行った。評価実験では、提案手法の2つの部分それぞれの有用性の検証、および手法全体を適用した場合の測位精度の評価を行った。なお、本論文では、ビーコンノードおよび未知ノードの数がいずれも10個以下程度の規模の環境を想定している。より大規模な環境への適用については、今後の課題として検討している。

以下、2章では関連研究について述べ、3章では測位値に影響を与えるパラメータについて実験に基づき検討を行う。4章では3章の結果をふまえ、ビーコンノード集合を選択する手法を提案する。5章では提案手法を実装した測位システムの概要について述べる。6章では実装したシステムを用い、3次元環境における測位の実験を行い、提案手法の有用性を検証し、従来手法と比べどの程度測位精度を向上させることができるかを調べる。さらに、今後の課題の検討も行う。最後に、7章で本論文のまとめを述べる。

2. 関連研究

本章では、関連研究として、複数の未知ノードを対象とした測位手法である Iterative Multilateration と、Iterative Multilateration における誤差蓄積問題に対する改善を行ったシステムである DOLPHIN³⁾ について述べる。

2.1 Iterative Multilateration

Iterative Multilateration は、Multilateration を用いて測位を行った未知ノードを新たなビーコンノードとして利用し、未知ノードがなくなるまで反復して測位を行う手法である。Multilateration は、複数のビーコンノードの情報を利用することで誤差情報を平均化することができるため、通信可能なビーコンノード数が増えるほど誤差を軽減させることが可能である。2次元環境で Multilateration を用いた測位を行う場合、3つ以上のビーコンノードが必要であり、すべてのビーコンノードが一直線上にある場合、解を算出することは不可能である。同様に、3次元環境の場合4つ以上のビーコンノードが必要であり、すべてのビーコンノードが同一平面上にある場合、解を算出することは不可能である。Iterative Multilateration は、測位を行った未知ノードをビーコンノードとして再利用することにより、少数のビーコンノードで広範囲に配置された未知ノードの測位を行うことが可能である。しかし、測位を終えた未知ノードの位置情報は誤差が含まれている可能性が高いため、測位が進行するにつれて位置情報に誤差が蓄積され、測位精度が急速に低下していくことが考えられる。

本論文で提案する手法は、Iterative Multilateration と比較すると、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとして再利用する点は同様であるが、1回の測位において、利用可能なビーコンノードを単純にすべて利用するのではなく、利用可能なビーコンノード集合から、測位結果の精度が最も高くなるような組合せとなる部分集合を選択して測位を行うこと、および複数の未知ノードの測位を行う際に、最も誤差が小さくなるような未知ノードの測位順序を決定することで、測位誤差の伝播・蓄積問題を解決し、全体としてより精度の高い測位を実現しようとする点に特徴がある。

2.2 DOLPHIN

DOLPHIN は、測位手法としては Iterative Multilateration を用いているが、Iterative Multilateration における誤差蓄積問題に対処するため、位置基準の精度を評価するパラメータを導入し、ある未知ノードの測位を行う際に利用するビーコンノードを選択するためのアルゴリズムを持たせることで改善を行っている。評価値には、GPS における PDOP⁴⁾

(Position Dilution of Precision) の概念を導入し、位置誤差をモデル化したものを採用している。

DOLPHIN の手法は、本論文で提案する手法と比較した場合、Iterative Multilateration の考え方を利用している点、また測位に利用する最適なビーコンノードを評価値に従って選択する点が共通しているが、評価値の算出方法、および複数の未知ノードを測位する際の測位順序による誤差軽減が考慮されていない点などが異なっている。

3. 測位値に影響を与えるパラメータの検討

Range-based localization では、ビーコンノードと未知ノード間の距離の推定を行い、得られた距離情報とビーコンノードの位置情報をもとに位置の計算を行う。一連の処理の流れの中で、さまざまな因子の影響が測位値に誤差を与える。測位計算に用いるパラメータとしては、センサノード間の距離情報、ビーコンノードの位置情報、測位計算に利用するビーコンノード数があげられる。したがって、これらのパラメータが因子となり、互いに作用し合うことで測位値に誤差が発生するものと考えられる。

距離の推定においては、センサノード内部の配線遅延やゲート遅延、通信信号の伝播遅延の影響により、測距誤差が発生する。このような誤差を含む距離情報を測位に用いることにより、測位誤差が発生する。また、ビーコンノードと未知ノードの位置関係によっては、安定した位置情報が得られる場合や、位置情報に大きな誤差が発生する原因となる場合がある。

さまざまな因子が測位値に影響を与えるが、因子ごとに与える影響の度合いは異なる。各因子が与える影響の度合いを明らかにし、測位計算に用いるパラメータから測位誤差の程度を表す指標として数値化すれば、測位計算における誤差の大小を予測することが可能であると考えられる。本章では、各因子が与える影響の度合いを明らかにするための検証を行い、その結果から導き出される測位誤差の程度を表す指標の導出式を示す⁵⁾。

ここでは、測位精度に影響を与えるパラメータのうち、特に影響が大きいものを選び出し、4章で述べるような、測位に用いるのに適切なビーコンノードを選ぶための指標を作成することを目的とする。そのため、作成された指標値は必ずしも測位精度そのものを示すものでなくても、実際に適用される環境において十分有効な近似値を与えることができれば、ビーコンノードの選択に有効に働くと考えられる。

なお、検証においては位置測定手法として Multilateration を用い、位置測定に利用する距離情報は、正規乱数を用いてセンサノード間の距離から擬似的に発生させた。特に断りの

ない限り、本章におけるシミュレーションは、正規乱数によりばらつきを持たせた擬似的な距離情報を用い、Multilateration により位置測定を行うことを指すものとする。

3.1 センサノード間の距離

3.1.1 測定される距離情報のばらつき

センサノード間の距離が離れるほど、通信信号の減衰の影響により受信機が通信信号を認識するタイミングが変化し、距離情報に大きな誤差が発生する可能性が高くなる。したがって、得られた距離情報が大きな値の場合、その距離情報には大きな誤差が含まれている可能性が高いといえる。そこで、センサノード間の距離と得られる距離情報のばらつきの関係について調査を行った。調査では、米 Crossbow 社の測距デバイスである Cricket^{6),7)} を用いた。Cricket は、ビーコンノードと未知ノードが無線電波と超音波の送受信を行うことで、2つの信号の到着時間差によりビーコンノードと未知ノード間の距離を測定する。

センサノード間の距離が 5 m まで、50 cm ごとの距離情報のばらつきを図 1 に示す。ばらつきは、それぞれ 2,000 個の距離情報の標準偏差で表した。各散布データから、図 1 に示す回帰曲線が得られ、回帰曲線の決定係数は $R^2 = 0.8592$ であった。このことから、センサノード間の距離が離れるほど、距離情報のばらつきは指数関数的に増大していくことが分かる。

3.1.2 センサノード間の距離の影響

次に、図 2 (a) のように未知ノードから各ビーコンノードを 10 m 離して配置する。図 2 (a) の配置からビーコンノードを 10 m ずつ離していき、図 2 (b) の配置になるまで、10 種類の

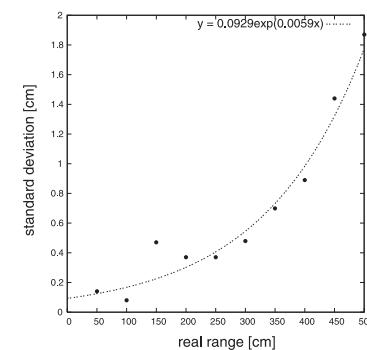


図 1 距離ごとの測定値の標準偏差

Fig. 1 Standard deviations of measurement value per distance.

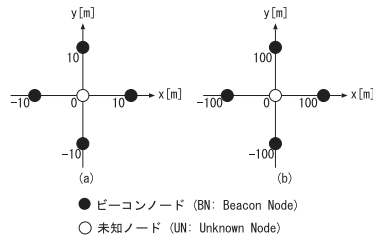


図2 センサノード間の距離が測位値に与える影響の検証
Fig. 2 Verification of effects of distances between sensor nodes to localization values.

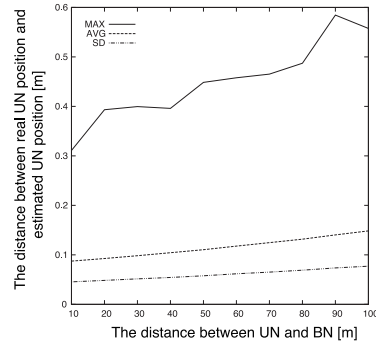


図3 センサノード間の距離が測位値に与える影響
Fig. 3 Effects of distances between sensor nodes to localization values.

配置パターンにおいて位置測定のシミュレーションを行った。ここで用いる距離情報には、3.1.1 項の結果を適用し、実機を用いたときと同程度の誤差が発生するようにしている。

位置測定は各配置パターンにおいて 10 万回行い、測位誤差の最大値、平均値、標準偏差の比較を行った。結果を図 3 に示す。図 3 より、センサノード間の距離が離れるほど測位精度が低下することが分かる。しかし、センサノード間の距離が 100 m に対して測位値に現れる影響が平均して 10 cm 前後であるため、位置測定に対する信頼度パラメータとして、それほど重視する必要はないと考えられる。ただし、今回の検証では、未知ノードをビーコンノードの重心に配置したため、センサノード間の距離が測位値に与える影響が顕著に現れなかったことも考えられる。そのため、未知ノードがビーコンノードの重心から離れている場合において、センサノード間の距離が測位値に与える影響を調査すべきである。次節では、この問題について検討する。

3.2 センサノードの位置関係

センサノードの位置関係が測位値に影響を与えることは、GPS における PDOP と呼ばれる指標でも示されている。たとえば、図 4 (a) と図 4 (b) での測位精度を比べると、図 4 (a) の方が測位精度が高い。これは、図 4 (a) の方がビーコンノードの重心と未知ノード間の距離が短いためであると考えられる。

ビーコンノードの重心と未知ノード間の距離が測位値に与える影響を検証するためにシミュレーションを行った。ビーコンノードと未知ノードを図 5 のように配置し、ビーコン

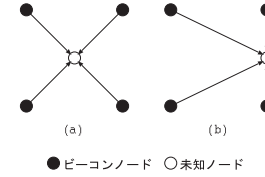


図4 センサノードの位置関係
Fig. 4 Position relations of sensor nodes.

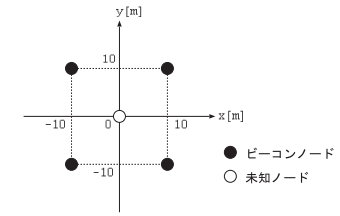


図5 センサノードの位置関係が測位値に与える影響の検証
Fig. 5 Verification of effects of position relations of sensor nodes to localization values.

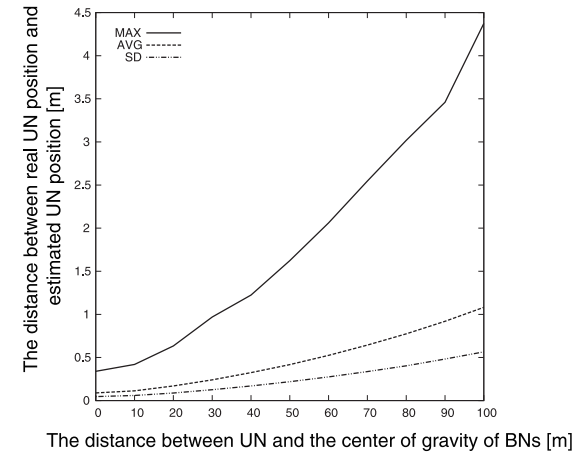


図6 センサノードの位置関係が測位値に与える影響
Fig. 6 Effects of position relations of sensor nodes to localization values.

ノードを固定したまま未知ノードを x 方向に 10 m ずつ、100 m まで移動させ、各配置において位置測定を行う。位置測定は各 10 万回ずつ行い、測位誤差の最大値、平均値、標準偏差の比較を行った。結果を図 6 に示す。図 6 より、未知ノードの位置がビーコンノードの重心位置から離れるほど、測位誤差が増大することが確かめられる。未知ノードとビーコンノードの重心間の距離が 100 m 離れると、平均して 1 m の誤差が現れるため、センサノードの位置関係が測位値に与える影響は、センサノード間の距離が測位値に与える影響より

も重視する必要があると考えられる。また、未知ノードの位置とビーコンノードの重心間の距離に対する測位誤差の増加の割合は、二次関数に近似されると考えられる。以上から、測位精度に影響を与える重要性の高いパラメータの1つとして、ビーコンノードの重心と未知ノード間の距離があげられる。

このほか、位置関係に関するパラメータとして、ビーコンノードの重心位置は同じだが、配置に偏りがあるような場合が考えられる。これについては6.6.2項で述べているように、今後の課題として考えている。

3.3 ビーコンノード数

一般的に、通信可能なビーコンノード数が増加すると測位精度は向上する。ここでは測位に利用するビーコンノード数を変化させ、測位値に与える影響の検証を行った。ビーコンノード4個、8個、12個で位置測定を行う場合を考え、センサノードを図7のように配置した。図7(a),(b),(c)それぞれにおいて、10万回の位置測定を行い、測位誤差の最大値、平均値、標準偏差の比較を行った。ここでは、重心位置の変化の影響を無視するため、図7(a),(b),(c)それぞれにおいて未知ノードの位置座標とビーコンノードの重心座標が一致するような配置としている。また、センサノード間の距離はそれぞれ異なるが、図3より、センサノード間の距離が測位値に与える影響は小さいため、図7の配置により、ビーコンノード数が測位値に与える影響を検証可能であると考えられる。検証結果を図8に示す。

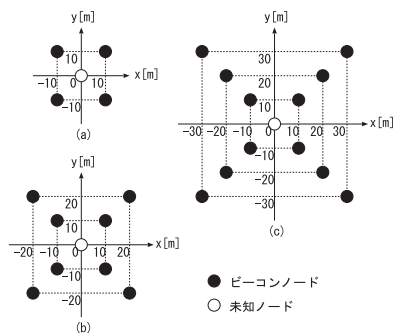


図7 ビーコンノード数が測位値に与える影響の検証
Fig. 7 Effects of the number of beacon nodes to localization values.

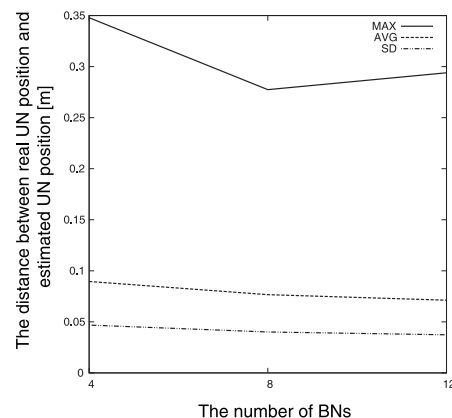


図8 ビーコンノード数が測位値に与える影響
Fig. 8 Effects of the number of beacon nodes to localization values.

図8より、測位に利用するビーコンノード数が増えることにより、測位精度が向上することが分かる。ただし、ビーコンノード数の増加により飛躍的に測位精度が向上することはない、ビーコンノード数と測位誤差の値は反比例の関係にあると考えられる。ビーコンノード数の増加は、Multilateration で用いる最小二乗法における方程式の数の増加に対応し、誤差の平均化に寄与していると考えられる。

3.4 測位誤差の程度を表す指標

以上の検証結果から、測位値に影響を与える因子から推測される測位誤差の程度を表す指標 E を導出する式を検討する。3.3節より、位置測定に利用するビーコンノード数により誤差が平均化されるため、 E は、ビーコンノード数に反比例する。また、3.2節より、測位誤差の値は、未知ノードの位置とビーコンノードの重心間の距離に影響を受けており、おおむね二乗に比例している。さらに、3.1節より、センサノード間の距離が測位値に与える影響は他の因子と比較して非常に小さいため、 E を決定するパラメータから除外できると考えられる。

したがって、測位誤差の程度を表す指標 E は、式(1)で表すことが可能であると考えられる。ここで n は測位に利用するビーコンノード数を表し、 d は未知ノードとビーコンノードの重心間の距離を表す。なお、 d を求めるために必要な未知ノードの位置は、ビーコンノードの組合せごとに既存の位置測定手法で計算したものをを用いる。

$$E = \frac{1}{n} \cdot d^2 \quad (1)$$

E は、測位誤差の程度を表す指標であるため、 E が小さい値であるほど測位精度が高いことを表す。また、 E は、未知ノード1つに対して、通信可能なビーコンノードの組合せの数だけ求められる。たとえば、2次元平面で N 個のビーコンノードと通信可能な場合、 $\sum_{i=3}^N {}^N C_i$ 個の E が求められる。

4. ビーコンノード選択手法

本章では、3章で求めた指標値を用いて、実際に精度の高い測位を実行するための、ビーコンノード選択手法の概要とアルゴリズムについて述べる。

4.1 手法の概要

提案するビーコンノード選択手法は、従来の Multilateration に代表される Range-based localization に基づく測位手法と併用して、測位誤差の程度を表す指標 E を利用することにより、従来よりも精度の高い測位を実現する方法である。

従来の測位手法では、未知ノードと通信可能なビーコンノードが複数存在する場合、基本的に通信可能なすべてのビーコンノードを利用することで測位を行う。しかし、あるビーコンノードとの距離情報に大きな誤差が発生する可能性や、センサノードの位置関係が測位値に与える影響を考えると、必ずしもすべてのビーコンノードを利用することが精度の高い測位につながるとは限らない。ビーコンノード選択手法では、 E をすべてのビーコンノードの組合せに対して求め、 E の値が最小となるビーコンノードの組合せを利用して測位を行う。利用するビーコンノードを選択することにより、従来の手法に比べて測位誤差の軽減が可能となる。

また、複数のビーコンノードと複数の未知ノードが配置された空間において、少数のビーコンノードで、かつ高精度に測位を行う手法を実現することが、センサネットワークにおける測位の課題の1つである。センサネットワーク上に複数の未知ノードが存在する状況では、通信可能なビーコンノードの数や各ビーコンノードとの位置関係は、各未知ノードによって異なる。そのため、各未知ノードの測位を行う場合の E の値もそれぞれ異なる。したがって、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとして再利用する場合、測位を行う順番が重要となる。測位誤差が小さいと想定される未知ノードから測位を始めれば、ネットワーク全体に伝播する誤差の影響を小さくすることが可能である。 E の値が小さい未知ノードから測位を行えば、測位誤差が小さいと想定される未知ノードから順番に測位を行うことができる。このように、提案手法では、測位誤差の程度を表す指標 E を利用することにより、1つの未知ノードの測位を行う場合の誤差を軽減させるだけでなく、ネットワーク全体における測位誤差の伝播の影響を小さくすることが可能である。

4.2 アルゴリズム

以下にビーコンノード選択手法のアルゴリズムを示す。

- (1) ある未知ノードに対して通信可能なビーコンノードの中から組合せ可能な全パターンを導出する。
- (2) ビーコンノードの組合せそれぞれに対して測位誤差の程度を表す指標 E を導く。
- (3) 最も小さい E を対象とする未知ノードの最小指標値を E_{min} とする。
- (4) ネットワーク上のすべての未知ノードに対して (1)~(3) の手順を実行する。
- (5) すべての未知ノードの最小指標値 E_{min} を比較し、最も小さい値を持つ未知ノードの測位を行う。
- (6) 測位を終えた未知ノードをビーコンノードに加える。
- (7) 測位可能な未知ノードがなくなるまで (1)~(6) の手順を繰り返す。

上記において、各未知ノードの測位のために指標値を求め、測位に用いるビーコンノード群を選択する部分(手順(1)~(3))をビーコンノード選択アルゴリズム、指標値をもとに複数の未知ノードの測位順序を選択する部分(手順(4),(5))を測位順序選択アルゴリズムと呼ぶものとする。

E は、未知ノード1つに対して、通信可能なビーコンノードの組合せの数だけ求められる。3次元平面で N 個のビーコンノードと通信可能な場合、 $\sum_{i=4}^N {}^N C_i$ 個の E が求められる。この場合、1つの指標の導出にかかる計算量は $3(3i+5)$ ($4 \leq i \leq N$, i は整数) に比例することから、1つの未知ノードの指標の導出に必要な計算量は、 $\sum_{i=4}^N {}^N C_i \cdot 3(3i+5)$ に比例する。未知ノードが M 個の場合、指標 E の導出に必要な計算量は、 $\sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=4}^{N+k} {}^{N+k} C_i \cdot 3(3i+5)$ に比例する。なお、本論文では、1章で述べたように、ビーコンノードおよび未知ノードの数がいずれも10個以下程度の規模の環境を想定している。この規模における測位においては、計算量の増加による測位処理時間への影響はほとんど無視できる。一方、ビーコンノードが多数存在する場合、 E の値の導出に多大な時間が費やされることになるため、観測規模を拡大するためには、計算量を削減するための工夫を検討する必要が出てくる。

5. 測位システムの構成

本章では、4章で述べた手法を適用した測位システムの構成について述べる。システムの構成を図9に示す。本システムは、センサネットワーク、サーバ、アプリケーションの3つの部分から構成される。

センサネットワークは、センサノード間の距離情報を収集し、サーバに送信する。サーバは、センサネットワークによって集められた距離情報を取得する。取得した距離情報とあらかじめ記録しておいたビーコンノードの位置情報をもとに測位計算を行い、測位結果をアプリケーションに送信する。アプリケーションは、サーバから得た測位結果をもとにユーザに対してさまざまなサービスを提供する。

センサネットワーク部分には、センサノードとして Cricket を用いる。Cricket は、信号を送信するビーコンノードと受信用のリスナノードが存在し、無線電波と超音波を用いて、ノード間の距離を計測する機能を持つ。測位対象となる未知ノードは、リスナノードとして動作しているノードである。Cricket は、外部からのモード変更命令によって、ビーコンノードおよびリスナノードへのモード切替えを動的に行うことができる。

サーバ部分は、ノード通信制御モジュール、測位演算モジュール、ビーコンノード選択モジュールから構成される。ノード通信制御モジュールは、センサネットワークによって集めら

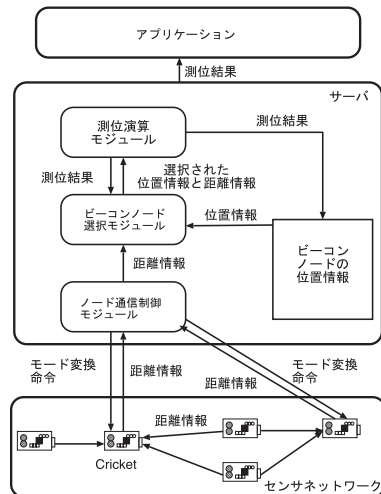


図 9 ビーコンノード選択手法を適用した測位システムの構成

Fig. 9 Organization of the localization system based on the proposed method.

れた距離情報をビーコンノード選択モジュールに送信する。また、測位を終えた未知ノードに対して、ビーコンノードへのモード変更命令を送信する。ビーコンノード選択モジュールは、ノード通信制御モジュールで取得したデータをもとに、通信可能なすべてのビーコンノードの組合せを導出する。測位環境としては、2次元平面上にノードが配置されている状況に限らず、3次元空間の任意の位置にノードが配置されている状況を想定する。測位手法として Multilateration を用いるため、導出した組合せの中から、ビーコンノードが同一平面上にない、4つ以上のビーコンノードを含む組合せを導出する。その組合せに対して、それぞれ E の値を算出し、 E が最小となるビーコンノードの組合せ、距離情報、および、位置情報を測位演算モジュールへ渡す。測位演算モジュールは、ノード通信制御モジュールで得たデータと、ビーコンノード選択モジュールで得た測位に利用するビーコンノードの組合せ情報をもとに、Multilateration による測位演算を実行し、結果をビーコンノード情報に記録する。

6. 3次元環境における実験および評価

本章では、5章で述べた測位システムを用いて行った実験およびその結果をふまえた評価について述べる。

6.1 実験の概要

本実験では、3次元環境における、ビーコンノード選択手法における複数の未知ノードを対象とする測位の有用性について検証する。また、ビーコンノード選択手法を適用した測位の精度評価を行う⁸⁾。

まずビーコンノード選択手法の検証実験として、4.2節で述べた、1つの未知ノードを測位対象とするビーコンノード選択アルゴリズム部分と複数の未知ノードを測位対象とする測位順序選択アルゴリズム部分に分けて実験を行う。ビーコンノード選択アルゴリズムは、1つの未知ノードを対象とした測位において、測位に利用するビーコンノードを選択することにより、測位誤差を軽減させるアルゴリズムである。また、測位順序選択アルゴリズムは、複数の未知ノードを対象とした測位において、指標 E の値から未知ノードの測位順序を選択することにより、測位誤差の伝播蓄積を軽減させるアルゴリズムである。それぞれのアルゴリズムにおいて、測位誤差の軽減が可能であれば、ビーコンノード選択手法全体として測位誤差の軽減を実現可能であると考えられる。6.2節でビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験を行い、6.3節で測位順序選択アルゴリズムの検証実験を行う。さらに、6.4節で精度評価実験として、ビーコンノード選択手法全体を適用した場合の既存の測位手法との測位精度の比較を行う。

実験環境では、図10のようにノードを配置する。天井にビーコンノードが設置され、未知ノードがテーブル上に存在する環境で実験を行う。なお、測位手法として用いる Multilateration の特性により、ビーコンノードがすべて同一平面上に存在する場合、測位結果を算出できないため、ビーコンノードを少なくとも1つはテーブルに配置する。ここでは天井の Z 座標を 0.0 [cm]、テーブルの Z 座標を 168.0 [cm] とする。また、測位対象である未知ノードが静止している状態で測位を行う。

Cricket によって取得された距離情報は一般に誤差を含んでいる。ビーコンノードを設置する段階で、測位を行う空間の広さは把握できるため、空間の最大距離(空間距離)を大きく超える測距情報は、測位に利用しない。これにより大きな測位誤差の発生を軽減させることができる。測位に利用する最大の距離を空間制限距離と定め、空間制限距離以下の距離情報を測位に利用する。具体的には、本実験は 300 [cm] × 150 [cm] × 168 [cm] の空間で行う。この空間では、空間距離が $\sqrt{300^2 + 150^2 + 168^2} \approx 375$ [cm] である。さらに、実際のセンサノードの距離が空間距離と等しくなる場合に、誤差が生じることも考慮して、空間距離に 50 [cm] を付加することで、 $\sqrt{300^2 + 150^2 + 168^2} + 50 \approx 425$ [cm] を空間制限距離とする。これにより、センサノードによる測距情報が 425 [cm] 以下になるものだけを測距情報として使用

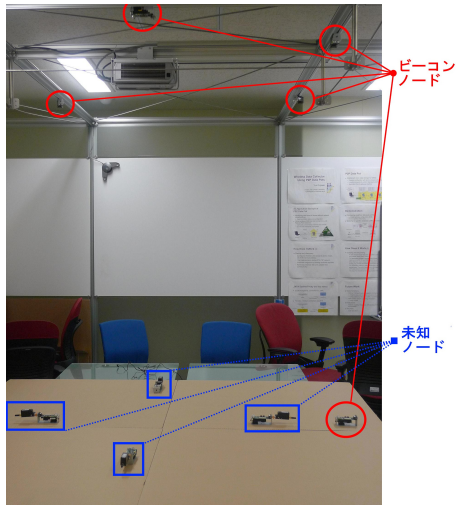


図 10 実験環境

Fig. 10 Experimentation environment.

し、空間制御距離を超える測距情報については、エラーとして扱い、測位には利用しない。

6.2 ビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験

1つの未知ノードを対象とした測位について、以下の実験を行う。

測位 1 通信可能なすべてのビーコンノードを利用した測位

測位 2 ビーコンノード選択アルゴリズムを適用した測位

測位 1 と測位 2 の測位結果を比較し、ビーコンノード選択アルゴリズムの有用性を示す。測位 1 では、通信可能なすべてのビーコンノードを利用した場合の測位手法として、Multilateration を用いる。測位 2 では、4.2 節で述べた、ビーコンノード選択アルゴリズムを用いる。

ノードは、ビーコンノードの重心と未知ノードの位置の距離と、ビーコンノードの数との積により表される指標 E の値に差が出るように配置する。図 11 のように、天井にビーコンノード A, B, C, D, E, F を配置した。また、図 12 のように、テーブル上にビーコンノード G と未知ノード $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ を配置した。

参考として、測位 2 の実験において、Cricket から取得する距離情報に誤差がない理想的な場合に導出される指標値と、その指標値を導出するビーコンノードの組合せを表 1 に示

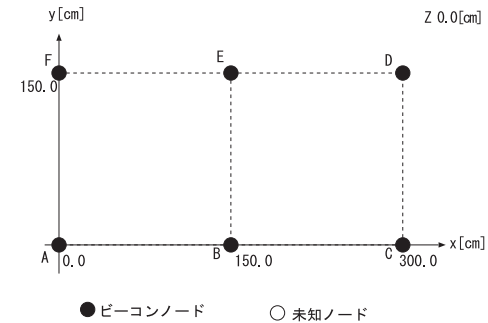


図 11 ビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験のノード配置 (天井)

Fig. 11 Layout of nodes for the verification experiment of the beacon node selection algorithm (ceiling).

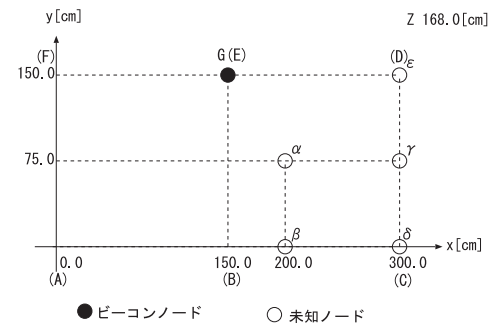


図 12 ビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験のノード配置 (テーブル)

Fig. 12 Layout of nodes for the verification experiment of the beacon node selection algorithm (table).

す。実際の測距情報に大きな誤差が生じない限りは、表 1 のようなビーコンノードの組合せを利用し、測位が行われる。

測位はそれぞれ、200 回ずつの計測を行った。実験結果を表 2 に示す。誤差は、実際の未知ノードの位置と計算された未知ノードの位置の距離で表される。表 2 より、いずれの未知ノードを測位する場合においても、通信可能なすべてのビーコンノードを利用して測位を行う場合よりも、ビーコンノード選択アルゴリズムを適用する場合の方が、精度の高い測位が可能であることが示された。

表 1 測位 2 の理想環境におけるビーコンノードの組合せ

Table 1 Combination of beacon nodes in ideal environment for Localization 2.

未知ノード	組合せ	指標 E の値
α	ABCDEFG	3,335.828
β	ABCDEG	4,308.333
γ	BCDG	6,781.5
δ	BCDEG	5,277.672
ϵ	CDEG	5,726.813

表 2 ビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験の結果
Table 2 Results of the verification experiment of the beacon node selection algorithm.

未知ノード	測位 1	測位 2	
α	最大誤差 [cm]	20.597	10.492
	平均誤差 [cm]	3.548	1.689
	標準偏差 [cm]	0.442	0.143
β	最大誤差 [cm]	192.382	8.089
	平均誤差 [cm]	9.852	5.528
	標準偏差 [cm]	1.315	0.389
γ	最大誤差 [cm]	83.451	21.558
	平均誤差 [cm]	8.672	6.815
	標準偏差 [cm]	1.152	0.652
δ	最大誤差 [cm]	110.381	13.589
	平均誤差 [cm]	9.682	4.965
	標準偏差 [cm]	1.243	0.411
ϵ	最大誤差 [cm]	63.281	18.965
	平均誤差 [cm]	7.544	4.432
	標準偏差 [cm]	0.961	0.544

また、対象未知ノードによっては、測位 1 と測位 2 の結果の差が大きくなっている場合がある。たとえば、未知ノード β の最大誤差は、測位 2 が 8 [cm] 程度となっているのに対し、測位 1 では 192 [cm] 程度と非常に大きくなっている。本実験は実機を用いた実験であるため、測距の段階で、さまざまな物理的要因によるエラーが発生する可能性がある。代表的なものは、電波・超音波の回折や反射によって実際の距離よりも長い距離が計測されるというものである。測位 1 では、比較的大きなエラーを含む距離情報を持つビーコンノードも含めたすべてのビーコンノードを用いて計算を行うが、測位 2 では指標値 E に従って用いるビーコンノードを動的に選択するため、エラーを含むような長い距離情報を持つビーコンノードの利用が回避される。その結果、測位 2 における大きな最大誤差の発生を避けることができたものと考えられる。

6.3 測位順序選択アルゴリズムの検証実験

複数の未知ノードを対象とした測位について、以下の実験を行う。

測位 1 ランダムな測位順序を利用した測位

測位 2 測位順序選択アルゴリズムを適用した測位

測位 1 と測位 2 の測位結果を比較し、測位順序選択アルゴリズムの有用性を示す。測位 1 と測位 2 では、未知ノードの測位手法として 6.2 節で実験を行った、ビーコンノード選択

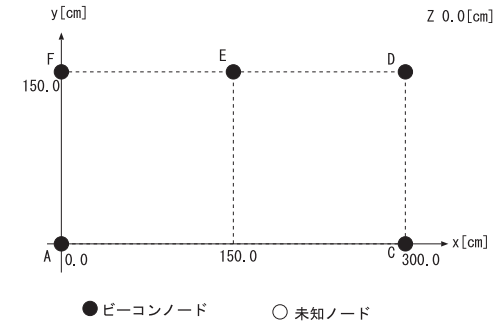


図 13 測位順序選択アルゴリズム検証実験のノード配置 (天井)

Fig. 13 Layout of nodes for the verification experiment of the algorithm of decision of localization sequences (ceiling).

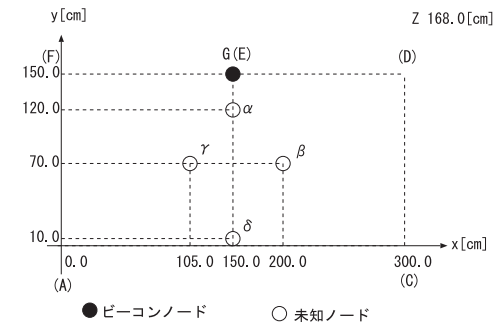


図 14 測位順序アルゴリズム検証実験のノード配置 (テーブル)

Fig. 14 Layout of nodes for the verification experiment of the algorithm of decision of localization sequences (table).

アルゴリズムを用いる。測位 1 と測位 2 の測位手法として、同じものを用いることにより、測位順序の違いにより発生する測位誤差を比較する。また、測位 1 と測位 2 では、Iterative Multilateration の考えを利用し、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとして利用する。測位 1 では、測位を行う順序をランダムに決定する。測位 2 では、各未知ノードの指標の最小推定値 E を計算し、 E が最小となる未知ノードから順に測位を行う。

図 13 のように、天井に 5 つのビーコンノード A, C, D, E, F を配置した。また、図 14 のように、テーブル上にビーコンノード G と 4 つの未知ノード $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を配置した。

表 3 測位順序選択アルゴリズムの検証実験の結果

Table 3 Results of the verification experiment of the algorithm of decision of localization sequences.

未知ノード		測位 1	測位 2
α	最大誤差 [cm]	28.117	16.951
	平均誤差 [cm]	2.310	1.609
	標準偏差 [cm]	0.587	0.190
β	最大誤差 [cm]	52.392	35.901
	平均誤差 [cm]	3.352	2.178
	標準偏差 [cm]	0.596	0.397
γ	最大誤差 [cm]	131.863	100.886
	平均誤差 [cm]	2.652	2.211
	標準偏差 [cm]	0.759	0.403
δ	最大誤差 [cm]	248.838	206.292
	平均誤差 [cm]	4.302	3.063
	標準偏差 [cm]	1.535	1.063
未知ノードの平均誤差の平均 [cm]		3.287	2.265

表 4 測位 2 における選択された測位順序の頻度

Table 4 Frequencies of the selected localization sequences in Localization 2.

測位順序	回数
$\alpha\gamma\beta\delta$	62
$\alpha\beta\gamma\delta$	26
$\alpha\beta\delta\gamma$	7
$\alpha\gamma\delta\beta$	2
$\alpha\delta\gamma\beta$	1
$\beta\alpha\gamma\delta$	1
$\beta\delta\alpha\gamma$	1

ここで、 β と γ は、対称性が高く、わずかにずれるような配置となっている。これは、この違いが測位順序の選択に与える影響を観測するためである。このノード配置では、測位誤差がまったく発生しない場合、測位 2 における測位順序は、 $\alpha\gamma\beta\delta$ の順となる。

測位はそれぞれ、100 回ずつの計測を行った。実験結果を表 3 に表す。また、測位 2 における測位順序の頻度を表 4 に示す。誤差は、実際の未知ノードの位置と計算された未知ノードの位置の距離で表される。表 3 より、測位 1、測位 2 の平均誤差の平均はそれぞれ、3.287 [cm]、2.265 [cm] であり、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとして利用する測位では誤差が増大していくため、測位順序選択アルゴリズムを用いた測位が、ランダムな測位順序で行う測位よりも、ネットワーク全体としての精度の高い測位が可能であることが示された。また、表 3 の実験結果では、測位 1、2 の誤差に極端に大きな差はないが、これは、6.2 節で有用性を実証したビーコンノード選択アルゴリズムを適用したために、いずれの測位においても十分精度の高い測位が行われたためと考えられる。

また、表 4 において選択された回数が最も多い測位順序である $\alpha\gamma\beta\delta$ と 2 番目に多い $\alpha\beta\gamma\delta$ は、順序に関して β と γ を入れ替えたものになっており、 γ を先に計測するもの回数がより多くなっている。指標値 E の値は多くの場合 β に比べ γ の方が小さい値となると考えられるため、この結果は妥当なものとなっていると考えられる。

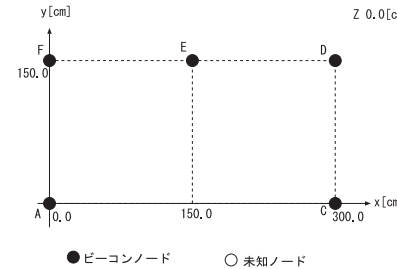


図 15 ビーコンノード選択手法の精度評価実験ノード配置 (天井)

Fig. 15 Layout of nodes for the accuracy evaluation of the proposed method (ceiling).

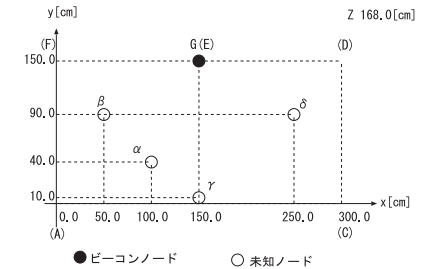


図 16 ビーコンノード選択手法の精度評価実験ノード配置 (テーブル)

Fig. 16 Layout of nodes for the accuracy evaluation of the proposed method (table).

6.4 ビーコンノード選択手法の精度評価実験

本実験では、ビーコンノード選択手法全体の精度評価実験として、以下のように Iterative Multilateration を用いた場合とビーコンノード選択手法を用いた場合の測位精度の比較を行った。Iterative Multilateration では、測位する未知ノードはランダムに選ぶものとする。

- 測位 1 Iterative Multilateration を用いた測位
- 測位 2 ビーコンノード選択手法を適用した測位

図 15 のように、天井に 5 つのビーコンノード A, C, D, E, F を配置する。また、図 16 のように、テーブル上にビーコンノード G と未知ノード $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を配置する。未知ノードの配置は、極端な偏りや対称性がなく、なるべく一般性がある配置とした。

それぞれの測位において、200 回の計測を行った。実験結果を表 5 に示す。また、測位 2 における測位順序の頻度を表 6 に示す。誤差は、実際の未知ノードの位置と計算された未知ノードの位置の距離で表される。表 5 より、測位 1、測位 2 の平均誤差の平均はそれぞれ、3.408 [cm]、1.952 [cm] であり、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとして利用する測位では誤差が増大していくため、図 15 および図 16 で示される環境において、ビーコンノード選択手法を用いた測位の方が、Iterative Multilateration よりもネットワーク全体として精度の高い測位が可能であることが示された。また、測位 1、測位 2 の平均誤差の平均の差は、 $3.408 - 1.925 = 1.456$ [cm] である。したがって、ビーコンノード選択手法を用いることで、従来の測位手法である Iterative Multilateration を利用した測位より、本実験環境においては 1 つの未知ノードあたり 40% 程度の誤差を削減できることが確認できた。

表 5 ビーコンノード選択手法の精度評価実験の結果

Table 5 Results of the accuracy evaluation of the proposed method.

未知ノード		測位 1	測位 2
α	最大誤差 [cm]	180.276	31.998
	平均誤差 [cm]	2.569	1.737
	標準偏差 [cm]	0.313	0.204
β	最大誤差 [cm]	217.034	22.800
	平均誤差 [cm]	3.237	1.325
	標準偏差 [cm]	0.410	0.169
γ	最大誤差 [cm]	260.224	6.816
	平均誤差 [cm]	3.550	0.710
	標準偏差 [cm]	0.457	0.081
δ	最大誤差 [cm]	227.439	243.687
	平均誤差 [cm]	4.277	4.034
	標準偏差 [cm]	0.451	0.724
未知ノードの平均誤差の平均 [cm]		3.408	1.952

表 6 測位 2 における選択された測位順序の頻度

Table 6 Frequencies of the selected localization sequences in Localization 2.

測位順序	回数
$\beta\gamma\alpha\delta$	102
$\gamma\beta\alpha\delta$	63
$\beta\alpha\gamma\delta$	13
$\gamma\alpha\beta\delta$	9
$\alpha\beta\gamma\delta$	7
$\beta\gamma\delta\alpha$	2
$\alpha\gamma\beta\delta$	2
$\gamma\beta\delta\alpha$	1
$\beta\delta\gamma\alpha$	1

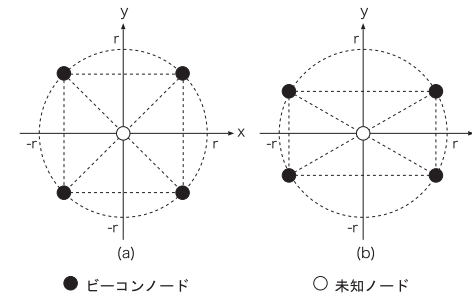


図 17 指標値が等しい場合の配置の偏り

Fig. 17 Normal and biased layouts with the same index values.

6.5 考 察

6.2 節のビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験と、6.3 節の測位順序選択アルゴリズムの検証実験より、それぞれのアルゴリズムが有用であることが確認された。それぞれのアルゴリズムにおいて、測位誤差が軽減されていることから、提案したビーコンノード選択手法は有用であると考えられる。また、6.4 節の測位精度評価実験によって、ビーコンノード選択手法を用いた測位は、従来の測位手法を用いた測位と比較して、より高精度な測位が実現可能であることが確認できた。

6.6 検討課題

6.6.1 測位に要する計算量

4.2 節で述べたように、本提案手法の適用範囲を拡大し、より広範囲の空間における測位を実現するためには、ノード数が数百個となるような状況においてビーコンノード選択手法を適用する必要がある。このような環境では計算量が増大し、指標 E の導出のための計算に多くの時間を費やすことになる。そのため、計算量を削減するための工夫が不可欠となってくる。計算量削減においては、あらゆるビーコンノードの組合せを調べつくすのではなく、明らかに指標値 E が大きくなるような組合せについては計算を途中で打ち切る、枝刈りによる方法が有効であると考えている。

また、本実験における測位では、測位対象として静止している未知ノードを用いた。しか

し、提案手法を移動体の追跡などに使用する場合、リアルタイムで測位を行う必要がある。本実験と同程度の規模の場合には、計算時間が十分短いためそのまま追跡処理にも適用可能だが、ノード数が増加した場合、指標の導出にかかる時間を抑制するため、枝刈りによる計算量の削減や、測位に用いるビーコンノード数の制限を検討する必要がある。

6.6.2 ビーコンノードの配置

測位値に影響を与えることから、測位に利用するビーコンノード数と、ビーコンノードの重心と未知ノード間の距離が指標の中にパラメータとして含まれているが、測位に利用するビーコンノード数が等しく、ビーコンノードの重心と未知ノード間の距離が等しい場合であっても、測位値に対する影響が異なるビーコンノードの配置が存在する。ビーコンノードの数が等しく、ビーコンノードの重心と未知ノード間の距離が等しい場合、指標 E の値は一定になるため、ビーコンノード選択手法では、同程度の測位精度であると判定される。しかし、実際には未知ノードから見て、ビーコンノードが偏った配置である場合に比べて、ビーコンノードが均一に分散して配置されている場合の方が測位精度が高くなる。例をあげると、図 17 で示すビーコンノードの配置 (a), (b) では、(b) よりも (a) の配置の方が測位精度が高くなるという結果が実測により得られる。したがって、ビーコンノードの配置の偏りを数値化し、指標に加える必要がある。

6.6.3 反復した測位に利用するノードの精度

広範囲な空間において、少数のビーコンノードで測位を行い、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとして利用する場合、ビーコンノードとして利用する未知ノードの位置精度が非常に重要である。位置精度の低い未知ノードを測位に利用すれば、測位を進めるごとに

位置精度が低下する可能性が高い。測位誤差の少ない未知ノードから順に測位を行うことで、空間全体の測位誤差を軽減させることが可能である。6.3 節の測位実験の結果より、未知ノードの測位順序を選択することにより、測位誤差が軽減可能であることが確認できる。しかし、軽減される誤差の度合いはそれほど大きくない。そこで、測位に利用する未知ノードの位置精度を測位値に影響を与えるパラメータとして指標に加えることで、より精度の高い測位を実現することが期待できる。

7. おわりに

本論文では、ビーコンノード選択手法を適用したシステムについて、3次元環境における、Cricket を用いた実験に基づく評価について述べた。ビーコンノード選択手法をビーコンノード選択アルゴリズムと測位順序選択アルゴリズムに分けて実験を行い、評価を行った。それぞれのアルゴリズムの有用性を示すことにより、ビーコンノード選択手法が有用であることが確認された。また、提案手法を用いることにより、従来の手法と比較してより精度の高い測位が実現可能であることが示された。

今後の課題として、指標 E の拡張、多数のビーコンノードが存在する場合の指標値の計算量削減方法、また、移動体の追跡に応用する場合の実用性の検討などがあげられる。

参 考 文 献

- 1) 徳永雄一, 伊戸靖則, 平岡精一, 横田裕介, 大久保英嗣: 無線センサネットワークにおける Multilateration 位置推定法の精度向上手法, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J91-B, No.9, pp.1113-1124 (2008).
- 2) Savvides, A., Han, C. and Strivastava, M.: Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors, *Proc. 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, New York, NY, USA, pp.166-179 (2001).
- 3) 南 正輝, 森川博之, 青山友紀: 超音波を用いた自律分散型位置検出システムの設計と実装, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J88-A, No.12, pp.1432-1441 (2005).
- 4) 村井俊治: 空間情報工学, 改訂版, 社団法人日本測量協会 (2004).

- 5) 寺嶋邦浩, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: センサノードの測位精度向上を目的とするビーコンノードの選択アルゴリズム, 情報処理学会研究報告, 2008-MBL-44/2008-UBI-17, pp.33-44 (2008).
- 6) Priyantha, N.B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket location-support system, *MobiCom '00: Proc. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, pp.32-43 (2000).
- 7) Cricket Project MIT Computer Science and Artificial Intelligence Lab Cambridge: Cricket v2 User Manual (2005). <http://cricket.csail.mit.edu/>
- 8) 高橋健介, 横田裕介, 大久保英嗣: センサネットワークによる高精度測位のためのビーコンノード選択手法の評価, 情報処理学会第 72 回全国大会, 第三分冊, 2ZD-2 (2010).

(平成 22 年 7 月 26 日受付)

(平成 22 年 12 月 7 日採録)



横田 裕介 (正会員)

1998 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。京都大学大学院工学研究科および情報学研究科助手を経て、2006 年より立命館大学情報理工学部講師。博士 (情報学)。CSCW, 分散システム, データベース, センサネットワーク等の研究に従事。ACM 会員。



大久保英嗣 (正会員)

1977 年北海道大学大学院工学研究科修了。同年 (株) 日立製作所入社。1979 年より京都大学工学部助手, 助教授を経て, 1991 年より立命館大学理工学部教授, 2004 年より同大学情報理工学部教授。工学博士。オペレーティングシステム, データベースシステム, 分散システム, 実時間システム, センサネットワーク等の研究に従事。ACM, IEEE-CS 各会員。