

センサノードの測位精度の向上を目的とする ビーコンノードの選択アルゴリズム

寺嶋 邦浩[†] 鈴木 和久[†] 横田 裕介^{††} 大久保 英嗣^{††}
[†]立命館大学大学院理工学研究科 ^{††}立命館大学情報理工学部

センサネットワークを利用することにより、広範囲な空間における温度や照度といった環境情報を容易に収集することが可能となるが、防災システムやナビゲーションシステムへの利用を考える場合、環境情報とともに位置情報の精度が重要となる。位置情報の精度は、センサノード間の距離情報が含む誤差やセンサノードの位置関係といった複数の因子が相互に影響し合うことにより、複雑に変化する。従来の位置測定手法では、位置情報に影響を与える因子の影響の度合いを考慮していないため、大きな誤差が発生する可能性のある状況での位置測定に対応できない。本稿では、位置情報に影響を与える因子の影響の度合いを考慮して、測位誤差が最小となるセンサノードの組合せを選択することで位置測定を行うアルゴリズムを提案する。センサノードの組合せによる測位誤差の比較には、位置測定に用いるパラメータから導出する測位誤差の程度を表す指標を利用する。提案手法により、従来の位置測定手法に比べて精度の高い位置測定が可能となる。

An Algorithm of the Selection Method of Beacon Nodes for Improving Position Estimation of Sensor Nodes

KUNIHIRO TERASHIMA[†] KAZUHISA SUZUKI[†] YUSUKE YOKOTA^{††} EIJI OKUBO^{††}
[†]Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
^{††}College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

Sensor networks enable us to gather easily scattering environmental information such as temperature and illuminance. When sensor networks are used for disaster prevention systems and navigation systems, important elements are not only the environmental information but also the position-fix accuracy. The position-fix accuracy may be changed intricately by interaction of several factors such as the relation of sensor nodes' positions and the distance between sensor nodes. Traditional positioning methods may make significant errors because they do not support the degree of effects of factors which make an impact to the position-fix accuracy. This paper presents an algorithm of the selection method of sensor nodes based on the degree of effects of factors which make an impact to the position-fix accuracy. The position-fix accuracy is compared by using a measure showing the degree of errors. The measure is derived from parameters used in positioning. The proposal method provides a higher accuracy positioning than traditional positioning methods.

1 はじめに

現在、我々は、センサネットワークを利用することにより、広範囲な空間において温度や照度といった環境情報を収集する技術を研究している。この技術により、広範囲に散在する環境情報を容易に収集可能となり、防災システム

や地下街におけるナビゲーションシステムといったアプリケーションに本技術を適用できる。

ナビゲーションシステムを考える場合、ユーザの位置情報が正確に把握できない場合、ユーザに対して適切なサービスを提供することは難しい。そのため、位置情報の精度は非常に重要である。位置測定では、ビーコンノードが未

知ノードと通信を行い、ビーコンノードの位置情報と得られる距離情報から対象の位置を決定する。ここで、ビーコンノードとは、位置が既知であるセンサノードを指し、未知ノードとは、測位対象である位置がわからないセンサノードを指す。現実には、さまざまな影響により、得られる位置情報は誤差を含む。測位誤差の値を正確に把握することは不可能であるため、高精度な位置測定を行うことは、非常に難しい問題となっている。しかし、測位誤差の値を正確に把握することは不可能であるが、位置測定に用いるパラメータから測位誤差の程度を表す指標を決定し、測定結果の精度を事前に予測することは可能であると考えられる。

本稿では、位置測定に用いるパラメータから測位誤差の大きさを事前に予測し、利用するビーコンノードを選択することにより、測位誤差の軽減を図るアルゴリズムを提案する。提案手法により、ネットワーク全体での測位誤差を減少させることが可能であるとともに、ネットワーク全体で利用するビーコンノード数も削減可能となる。

以下、2章では、センサネットワークにおける位置測定の課題を述べ、3章では、測位値に影響を与えるパラメータの検証を行う。4章では、パラメータ検証の結果に基づいたビーコンノードの選択アルゴリズムである提案手法を述べ、5章では、提案手法の評価を行い、検討すべき課題を述べる。6章で結論を述べ、本稿のまとめとする。

2 センサネットワークにおける位置測定の課題

2.1 基本課題

位置測定手法は、大別して Range-free localization と Range-based localization に分けられる。Range-free localization は、センサノード間の距離の推定を行わない、あるいは無線電波のホップ数や通信半径から間接的に距離の推定を行うことで未知ノードの位置を計算する手法である。代表的な手法として、Centroid[3]、DV-hop[3]、APIT[1]がある。Range-based localization 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から推定し、推定した距離情報とビーコンノードの位置情報から未知ノードの位置を計算する手法である。代表的な手法として、GPS、multilateration[4]がある。

Range-free localization では、間接的に距離の推定や位置の計算を行うために、総じて測位精度が低い結果になることが多い。Range-based localization では、無線電波や超音波の到達時間からセンサノード間の距離の推定を行うために、間接的に距離の推定を行う Range-free localization に比べて高精度な測位結果を得ることができる。そのため、センサネットワークを用いたシステムの中でも正確な位置情報を必要とするシステムにおいては、一般的に Range-based localization が位置測定手法として用いられる。

Range-based localization における基本的な位置測定手法について述べる。図 1 に示す 3 つのビーコンノード

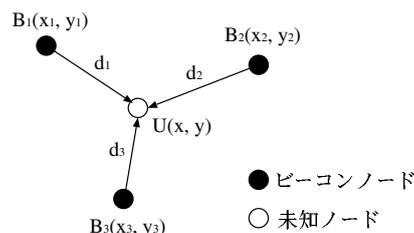


図 1 Range-based localization による位置の計算

$B_1(x_1, y_1)$, $B_2(x_2, y_2)$, $B_3(x_3, y_3)$ で未知ノード $U(x, y)$ の位置を計算する場合、連立方程式 (1) を解くことにより、未知ノード U の位置情報を得ることができる。

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} \end{cases} \quad (1)$$

しかし、連立方程式 (1) により位置情報を得ることができるのは、推定した距離情報に誤差が含まれない理想的な場合だけである。実際には、センサノード内部における配線遅延やゲート遅延による遅延誤差や、無線電波や超音波が空間を伝わる際に発生する物理的な伝播遅延により、推定した距離情報は誤差を含む。また、測位を終えた未知ノードを新たなビーコンノードとして利用することで繰り返し測位を行う場合、測位計算に利用する位置情報が誤差を含む可能性もある。これらの場合、連立方程式 (1) により、位置測定を行うことはできない。そのため、センサネットワークにおける位置測定手法として、一般的には誤差を含む情報を利用して計算可能な multilateration が用いられる。

multilateration では、最小二乗法の考え方をを用いることにより、測位計算に利用するそれぞれの距離情報や位置情報が含む誤差の二乗和が最小となるもっとも美しい位置情報を得ることができる。多くの場合、安定した解を得ることが可能であるが、測位計算に利用する距離情報が含む誤差と位置情報の関係によっては、大きな測位誤差が発生する可能性がある。

位置測定において、推定した距離情報や位置情報に含まれる誤差の程度を正確に把握することはできないため、誤差を完全に除去することは本質的に不可能である。しかし、センサネットワークにおいて位置情報は重要であるため、測位誤差を軽減することにより、測位精度の向上を図ることがセンサネットワークにおける位置測定の課題の 1 つである。

2.2 測位の反復による誤差蓄積の問題

実際の位置測定においては、複数のビーコンノードが配置された空間の中で、複数の未知ノードの位置を測定する状況での利用が一般的であると考えられる。例として、地

下街におけるナビゲーションシステムでの位置測定を考えると、未知ノードを身につけた複数の人が、それぞれ壁や天井に配置された複数のビーコンノードを利用して位置情報を取得する。このとき、複数のセンサノードの位置測定を行うために、多数のビーコンノードを配置することは、センサノードが高価なものであることを考えると現実的ではない。また、ビーコンノードの位置情報は正確である必要があるため、多数のビーコンノードを正確に配置する労力も少なくない。そのため、なるべく少数のビーコンノードで複数の未知ノードの位置測定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カバーし切れない。そこで、位置測定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位置測定に利用することで、空間全体をカバーする手法が考えられる。Savvidesらは、この手法に *multilateration* を適用することを、特に、*Iterative Multilateration*[4]と呼んでいる。*Iterative Multilateration*は、少数のビーコンノードでも広範囲の空間をカバーすることが可能であるが、位置測定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、位置測定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、測位精度が急速に低下していく問題を本質的にはらんでいる。ビーコンノードの数を少なくすることと測位精度を向上させることは、トレードオフの関係にある。Savvidesらは、少数のビーコンノードで複数の未知ノードの位置測定を行うための手法として、他にも *N-hop Multilateration*[2]を提案している。*N-hop Multilateration*は、*multilateration*の実行に必要なビーコンノード数が足りない場合でも、特定の条件を満たしていれば未知ノードの位置測定を可能にする手法である。しかし、条件が満たされている場合に位置測定を可能にすることが約束されているだけであり、精度の高い位置測定は保障されていない。

複数のセンサノードが配置された状況で複数の未知ノードの位置測定を行う場合、誤差が蓄積・増大する問題の影響を小さくすることができれば、初期配置に必要なビーコンノード数が減ることになり、ビーコンノードを配置するためのコストを削減するとともに、精度の高い位置測定を実現することが可能である。少数のビーコンノードによって、精度の高い位置測定を実現することが、センサネットワークにおける位置測定の課題である。

3 測位値に影響を与えるパラメータ

*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。*Range-based localization*においては、測位計算に用いるパラメータとして、(1)式より、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挙げられる。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。以下、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、検証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。

なお、検証で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、本章でいうシミュレーションとは、正規乱数によりばらつきをも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、得られた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言える。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について調査を行った。調査に用いたセンサノードは *Cricket*[5]である。*Cricket*は、米 *Crossbow*社が開発した測距デバイスである。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 $5m$ まで、 $50cm$ ごとの距離情報のばらつきを図2に示す。ばらつきは、それぞれ2000個の距離情報の標準偏差で表した。各散布データから、図2に示す回帰曲線が得られ、回帰曲線の決定係数 R^2 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わかる。

3.1.2 センサノード間の距離の影響

次に、センサノードを図3(a)のように未知ノードから各

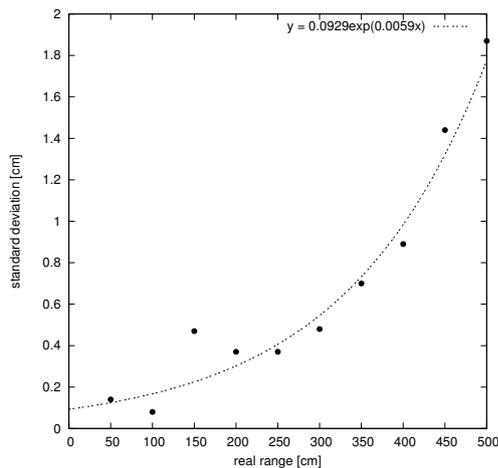


図2 距離ごとの測定値の標準偏差

ビーコンノードを 10m 離して配置する. 図 3(a) の配置からビーコンノードを 10m ずつ離していき, 図 3(b) の配置になるまで, 10 種類の配置パターンにおいて位置測定の実験を行った. シミュレーションで用いた距離情報は, 3.1.1 節で得られた実機検証の結果に基づいたものである. まず, ボックス・ミュラー法を用いて (0, 1] である一様乱数 α, β から $N(0, 1)$ である正規乱数 a, b を得る.

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \sin(2\pi\beta) \\ b &= \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \cos(2\pi\beta) \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式で得られる正規乱数 a, b に標準偏差 σ を乗算し, 平均 μ を加算することにより, 正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従う正規乱数が得られる. ここで, 平均 μ はセンサノード間の実距離であり, 標準偏差 σ は図 2 より, 式 (3) で得る.

$$\sigma = 0.0929 \exp(0.0059\mu) \quad (3)$$

シミュレーションでは, 以上のようにして求めた距離情報を用いる. 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 4 に示す. 図 4 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わかる. しかし, センサノード間の距離が 100m に対して測位値に現れる影響が平均して 10cm 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.

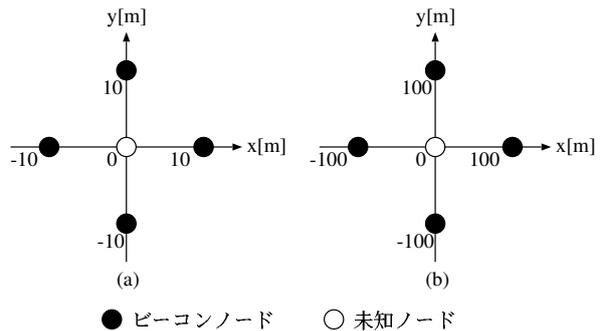


図3 センサノード間の距離が測位値に与える影響の検証

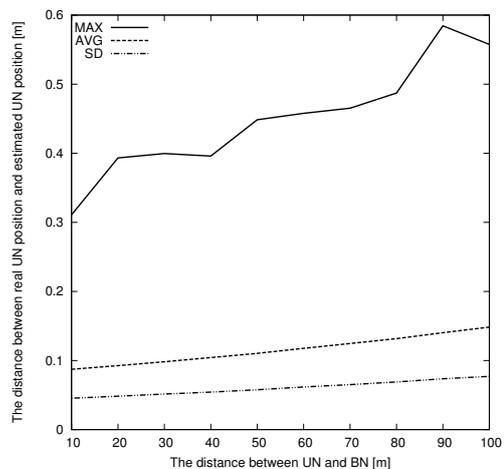


図4 センサノード間の距離が測位値に与える影響

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[6] と呼ばれる指標でも示されている. 例えば, 図 5(a) と 図 5(b) での測位精度を比べると, 図 5(a) の方が測位精度が高い. これは, 図 5(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.

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 6 のように配置し, ビーコンノードを固定したまま未知ノードを x 方向に 10m ずつ, 100m 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 7 に示す. 図 7 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 100m 離れると, 平均して 1m 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

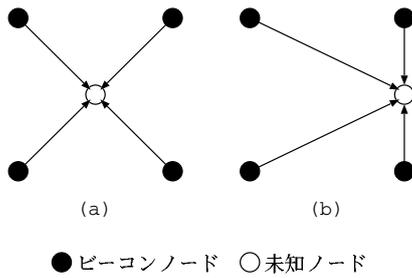


図5 センサノードの位置関係

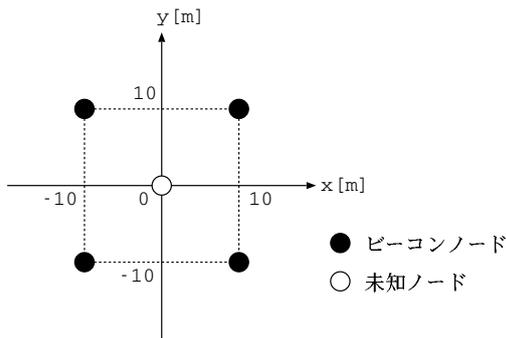


図6 センサノードの位置関係が測位値に与える影響の検証

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ことが考えられる。これは、測位の計算過程において、ビーコンノードの位置情報および、センサノード間の距離情報が二乗されるため、位置情報および距離情報に含まれる誤差も二乗され、測位値に影響を与えようと考えられるためである。

3.3 ビーコンノード数

通信可能なビーコンノード数が増加することにより、一般的に測位精度は向上する。これは、測位計算に利用する方程式数が増えることにより、誤差が平均化され、誤差の影響が小さくなるためである。測位に利用するビーコンノード数を変化させ、ビーコンノード数が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8のように配置した。図8(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。図8(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4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8の配置により、ビーコンノード数が測位値に与える影響

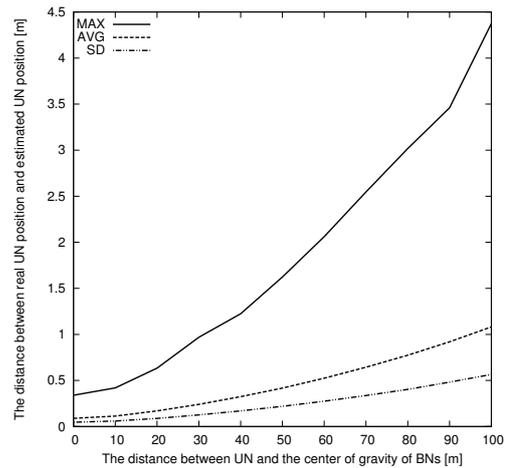


図7 センサノードの位置関係が測位値に与える影響

を検証可能であると考えられる。検証結果を図9に示す。図9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わかる。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ではなく、ビーコンノード数と測位精度は反比例の関係にあると考えられる。これは、multilaterationでは最小二乗法の考え方を採用していることに由来する。最小二乗法では、式に内包される誤差の二乗和が最小となるような、もっともらしい解を求めるので、ビーコンノード数の増加に伴う方程式の増加により、誤差が方程式の数だけ平均化されると考えられる。

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 を導出する式を考える。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、未知ノードの位置とビーコンノードの重心間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ことが考えられる。そのため、 E は、未知ノードの位置とビーコンノードの重心間の距離の二乗値に比例する。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、(4)式で表すことが可能であると考えられる。 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採用する。

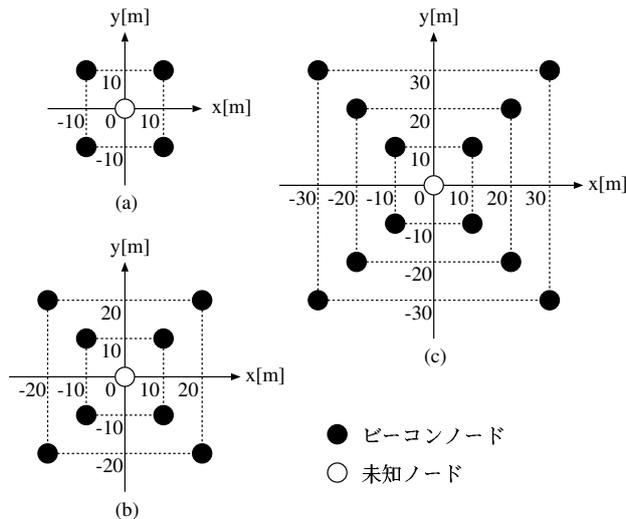


図8 ビーコンノード数が測位値に与える影響の検証

$$E = \frac{1}{n} \cdot d^2 \quad (4)$$

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。具体的には、二次元平面で 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 提案手法

4.1 概要

提案手法は、従来の Range-based localization による位置測定手法と併用して、測位誤差の程度を表す指標 E を利用することにより、従来の位置測定手法よりも精度の高い位置測定を実現する。従来の位置測定手法では、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、通信可能な全てのビーコンノードを利用することで位置測定を行う。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、必ずしも全てのビーコンノードを利用することが精度の高い位置測定につながるとは限らない。提案手法では、 E を全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位置測定を行う。利用するビーコンノードを選択することにより、従来手法に比べて測位誤差の軽減が可能となる。

また、2章で述べた通り、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

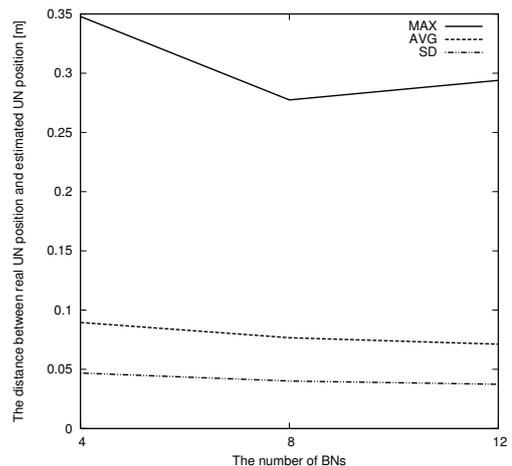


図9 ビーコンノード数が測位値に与える影響

ノードで、かつ高精度に位置測定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位置測定の課題の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、各未知ノードの位置測定を行う場合の E 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、位置測定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位置測定を始めれば、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位置測定を行えば、測位誤差が小さいと想定される未知ノードから順番に位置測定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つの未知ノードの位置測定を行う場合の誤差を軽減するだけでなく、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 測位手順

提案手法では、3.4節のパラメータ E を比較することにより、信頼度の高い位置測定を実現することが可能である。提案手法による位置測定手順を次に示す。

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 を対象未知ノードの最小な指標値とする。
4. ネットワーク全体に存在する全ての未知ノードに対して1~3の手順を実行する。

5. 全ての未知ノードに対する最小誤差推定値を比較し、最も値の小さい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。

1~6の手順を繰り返すことにより、ネットワーク全体における位置測定において、大きな誤差が発生する可能性を最小限に抑えた位置測定が可能となる。

4.3 実装環境

提案手法は、ネットワーク全体のセンサノードの情報を集めることで測位誤差が最小となるであろう未知ノードから測位を行うことで測位誤差の軽減を行う。そのため、各未知ノードの測位計算および測位誤差の程度を表す指標 E の比較によるビーコンノード選択アルゴリズムの実行は、各センサノード上ではなく、サーバ上で行う。測位計算に必要なビーコンノードの位置情報はあらかじめサーバ側に設定しておき、センサノード間の距離情報は、センサネットワークを介してサーバ側に送信される状況を想定している。また、3章での測位値に影響を与えるパラメータの検証や、5章での提案手法の評価においては位置測定手法として *multilateration* を用いた。しかし、提案手法は(1)式で用いられるパラメータに基づいた E を利用するため、(1)式で用いられるパラメータを利用する位置測定手法であれば、提案手法を適用することは可能であると考えられる。

5 評価

5.1 センサノード Cricket を用いた評価

1つの未知ノードが複数のビーコンノードと通信可能である状況で、全てのビーコンノードを利用して位置測定を行う場合と、利用するビーコンノードを選択して位置測定を行う場合の測位精度の比較を行うために、センサノード Cricket を用いた実験を行った。本実験により、4.2節に示した提案手法の測位手順の1~3までの有用性が示される。

実験では、あらかじめ規定の位置に配置した複数のビーコンノードの位置情報と、未知ノードから得られる各ビーコンノードとの距離情報から未知ノードの位置測定を行った。具体的には、6つのビーコンノード A, B, C, D, E, F を図10に示すように配置し、5つの未知ノード $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ の位置測定を行った。5つの未知ノードはビーコンノードのみを用いて測位するものとし、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとしては使用しないものとする。全てのビーコンノードを利用して位置測定を行う場合と、提案したビーコンノードの選択アルゴリズムに基づいて選択されたビーコンノードを利用して位置測定を行う場合を比較することにより、ビーコンノードの選択アルゴリズムの有用性を示す。実験結果を表1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。また、いずれの未知ノードにおいても500回の位置測定を行い、位置測定手法として、*multilateration* を用いた。

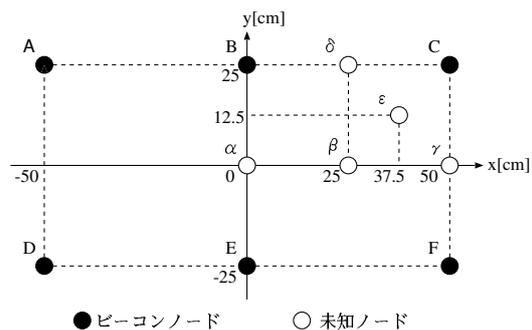


図10 ビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験

表1 ビーコンノード選択アルゴリズムの検証実験の結果

未知ノード		全ビーコンノードの利用	提案手法
α	最大誤差 [cm]	20.714	1.785
	平均誤差 [cm]	1.104	0.862
	標準偏差 [cm]	1.777	0.351
β	最大誤差 [cm]	25.672	1.807
	平均誤差 [cm]	3.721	1.212
	標準偏差 [cm]	2.429	0.250
γ	最大誤差 [cm]	5734.299	8.971
	平均誤差 [cm]	74.962	4.741
	標準偏差 [cm]	623.694	0.768
δ	最大誤差 [cm]	5.817	4.793
	平均誤差 [cm]	3.689	3.326
	標準偏差 [cm]	0.487	0.543
ϵ	最大誤差 [cm]	94.012	9.833
	平均誤差 [cm]	3.151	2.826
	標準偏差 [cm]	8.108	0.897

表1より、いずれの場合においても、通信可能な全てのビーコンノードを利用して位置測定を行う場合よりも、提案手法により位置測定に利用するビーコンノードを選択する場合の方が、精度の高い位置測定が可能であることが示された。特に、提案手法によって大きな測位誤差の発生を防ぐことが可能である。大きな測位誤差が発生する原因は、測距デバイスが正確に超音波の受信ができない場合に、測定された距離の値が実際の距離の値とは著しく異なるためである。提案手法では、未知ノードの推定位置とビーコンノードの重心からの距離をパラメータとして用いるため、大きな測距誤差が発生する場合には、測位誤差の推定値も大きくなる。そのため、大きな測位誤差の発生を防ぐことが可能である。本実験により、提案手法の有用性が示された。

5.2 検討課題

5.1節の評価により、提案手法を適用することで、従来手法をそのまま適用する場合に比べて、精度の高い位置測定が可能であることが示された。しかし、測位誤差の程度を表す指標である式(4)を改善することにより、さらに精度

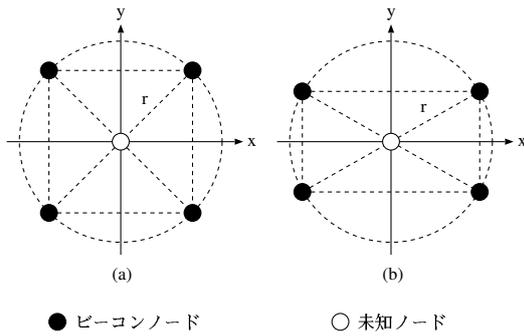


図 11 配置の偏り

の高い位置測定を実現可能であると考えられる。以下に、検討すべき課題を述べる。

5.2.1 ビーコンノードの配置の偏り

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が大きいことは、3.2 節で示した通りである。しかし、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。図 11 に示すビーコンノードの配置 (a), (b) では、どちらもビーコンノードの重心に未知ノードが配置されている。また、測位に利用するビーコンノード数も等しい。そのため、式 (4) による測位誤差の程度を表す指標が等しいことから、提案手法では、どちらも同程度の測位精度であると判定される。しかし、実際には、(b) の方が測位精度が悪い。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。したがって、ビーコンノードの配置の偏りを数値化して式 (4) に加えることでさらに精度の高い位置測定を期待できる。

5.2.2 反復的な位置測定における測位精度の向上

少数のビーコンノードで広範囲な空間をカバーするために、測位を終えた未知ノードをビーコンノードとして用いる場合、測位対象である未知ノードの測位精度を決定付けるパラメータとして、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な位置を占める。位置精度の低い未知ノードを測位計算に利用すれば、次に得られる未知ノードの位置精度も低くなり、測位を進めるごとに飛躍的に測位精度が低下する可能性が高い。提案手法により、反復的な位置測定における測位誤差の軽減も可能であるが、測位を終えた未知ノードの位置精度を現在考慮していない。そこで、測位に利用する未知ノードの位置精度も測位値に影響を与えるパラメータとして (4) 式に加えることで、より精度の高い位置測定の実現を期待できる。

6 おわりに

本論文では、測位誤差の程度を表す指標を用いることにより、位置測定に利用するセンサノードを選択することで測位誤差を軽減するアルゴリズムについて述べた。提案手法を用いることにより、従来手法をそのまま適用する場合に比べて精度の高い位置測定が実現可能であることが確認された。今後の課題として、5.2 節でも述べた、ビーコンノードの配置の偏りを数値化する手段と、提案手法を反復的な位置測定へ適用するための考察を行い、測位誤差の程度を表す (4) 式の拡張を行う必要がある。(4) 式の拡張により、複数のセンサノードが存在する空間における未知ノードの再利用が可能となるとともに、精度の高い位置測定の実現を期待できる。

参考文献

- [1] Tian He, Chengdu Huang, Brian M. Blum, John A. Stankovic and Tarek Abdelzaher, "Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks," In Proc. of the 9th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03), ACM Press, pp.81-95, 2003.
- [2] Savvides, A., Park, H., and Srivastava, M. B., "The Bits and Flops of the N-Hop Multi-literation Primitive for Node Localization Problems," First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Application, Atlanta, GA, pp.112-121, 2002.
- [3] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS)," In Proc. of IEEE GLOBECOM, pp.2926-2931, 2001.
- [4] Savvides, A., Han, C., and Srivastava, M. B., "Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors," In Proc. of the 7th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01), ACM Press, pp.166-179, 2001.
- [5] Priyantha, N. B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H., "The Cricket Location-Support system," In Proc. of the 6th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00), ACM Press, pp.32-43, 2000.
- [6] 村井 俊治, "改訂版 空間情報工学," p143, 社団法人日本測量協会, 平成 16 年 5 月 20 日.