

水面を移動可能なアンカーノードを用いた 水中センサネットワークのノード位置推定手法の提案

松本 啓司^{†1} 勝間 亮^{†1} 柴田 直樹^{†2}
安本 慶一^{†1} 伊藤 実^{†1}

近年、海洋調査などの目的のため、広範囲の海域に情報収集のための水中センサネットワークを構築する技術が注目を集めている。センサネットワークではイベントの発生場所や故障機器の場所を特定するため、各センサノードの位置情報を求めることは重要である。しかし、水中センサネットワークでは電波の減衰により GPS が使用不可能なため、各センサノードが自身で位置情報を知ることは困難である。本稿では、水中センサネットワークにおいてすべてのセンサノードの位置を正確に推定するため、水面を移動可能な船型のアンカーノードを用いた位置推定手法を提案する。提案手法では、まず海底のセンサノードと通信可能な海面上の領域からアンカーノードがセンサノードと信号の送受信を行い、信号の到着時間差から各センサノードまでの距離を測定する。1つのセンサノードに対して一次独立な3地点からの距離が分かれば、それらの情報とセンサノードの水圧センサから求めた水深を用いて三辺測量により位置を推定できる。提案手法では、アンカーノードがそれらの地点をすべて回りかつ移動コストが小さくなる経路を導出し、その経路を実際にアンカーノードに移動させることで、すべてのセンサノードの位置を推定する。

Localization with Moving Anchor Node for Underwater Wireless Sensor Networks

KEIJI MATSUMOTO,^{†1} RYO KATSUMA,^{†1} NAOKI SHIBATA,^{†2}
KEIICHI YASUMOTO^{†1} and MINORU ITO^{†1}

Recently, underwater wireless sensor network (UWSN) has attracted public attention for ocean investigation. To identify the place in the target field where some event occurs or some sensor node fails, it is important to know the position of each sensor node in WSN. However, GPS cannot be used in underwater environment due to rapid attenuation of radio wave in the water. In this paper, we propose a localization method for UWSN that efficiently estimates the positions of all sensor nodes in the ocean with an anchor node (i.e., a ship) moving on the surface of the sea. In the proposed method, the anchor node moves to

an appropriate position, exchanges acoustic signals with a sensor node, and measures the distance to the node based on the time duration to exchange the signal. From the distances to a sensor node measured from three linear independent points on the surface, the position of the node can be estimated by the trilateration. In the proposed method, we propose an algorithm to decide the positions on the surface and the minimum distance route to visit all of the positions that enables estimation of positions of all sensor nodes and minimizes the cost for moving the anchor node.

1. ま え が き

近年、広範囲の環境情報収集のためにワイヤレスセンサネットワーク (WSN) を構築する技術が注目されている。WSN は複数のセンサノードから取得した情報を無線マルチホップでサーバへ伝送し、収集した情報を解析することで環境モニタリングやオブジェクトの追跡などを行うネットワークである。また、WSN を水中に応用する UWSN (Underwater Wireless Sensor Network) の研究も行われている。水中では電波による通信が難しいため、UWSN では音波を用いてパケット通信を行うのが特徴である。この技術のアプリケーション例として、海中の水質調査や生態調査、地下資源の観測などが期待されている。

WSN ではイベントの発生場所や故障した機器の場所を特定するために、各センサノードの位置情報は重要である。WSN のセンサノードはデータを送受信する通信機器や各種センサの他に GPS を内蔵している場合が多く、比較的簡単に位置情報を取得することができる。しかし、水中では電波の減衰により GPS を使用できないため、地上と比べ位置情報を取得することが困難である。これまで UWSN において、位置が既知の複数のアンカーノードとの相対距離に基づいて新しいセンサノードの位置を順次推定していく手法¹⁾ や海面に垂直に浮き沈みするブイを多数設置し、それらのブイからの距離に基づいて水中のノードの位置を推定する手法²⁾ など音波を用いた三辺測量による手法が提案されているが、位置推定の精度やコストの点で問題があった。本稿では、UWSN においてすべてのセンサノードの正確な位置を推定するため、水面を移動可能な船型のアンカーノードを用いた位置推定手法を提案する。提案手法では、GPS を搭載した水面を移動可能な船型アンカーノード、UWSN を構成する複数のセンサノードを用いる。アンカーノードは GPS 信号を受信しながら海面を移動でき、

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

^{†2} 滋賀大学
Shiga University

水中のセンサノードに対して音波による通信が可能である。センサノードは投入後海底のある地点に沈んでいるものとし、近隣のセンサノードやアンカノードと通信が可能である。センサノードは水圧センサを保持し、水圧から水深が算出可能であると仮定する。UWSN ではセンサノードを地上のように1つ1つ正確に配置していくことが難しく、水面から順次センサノードを投入するという設置方法がコストの面で実用的である。ここでは、その投入地点から潮流の最大速度とその付近の深さ情報を用いて各センサノードが存在するエリア、また、それらのセンサノードと通信が可能であるエリアが分かると仮定する。

センサノードの位置を推定する方法は、海面からの三辺測量を用いる。アンカノードは水中のセンサノードと通信できる海面上のエリアへ移動し、水中のセンサノードと信号の送受信を行い、その信号の到着時間差から各センサノードまでの距離を測定する。1つのセンサノードに対して通信可能エリア内の一次独立な3地点から測定した距離と水圧センサから求めた水深を用いることで、位置を推定することが可能である。ここで、精度のよい位置推定を行うために、通信可能エリア内の3地点は水深が大きい場合を考慮し、ある程度離れている必要がある。距離測定ポイントは各センサノードに対して少なくとも3つ存在し、アンカノードにそれらの地点を移動させることで全センサノードの位置推定を行う。このとき、アンカノードの総移動距離をできるだけ短くすることで、低コストかつ短時間で全センサノードの位置を推定することができる。また、各センサノードの3つの距離測定ポイントをうまく重ね合わせることで、一回の測定で複数のセンサノードとの距離を計測でき、距離測定ポイントの削減につながり、位置推定にかかる時間を短くできる。

センサノードの位置推定を行うアンカノードの移動コストを最小にするアルゴリズムを提案する。本アルゴリズムは、距離測定ポイントの修正と、移動コストの最小経路の導出の2つのフェーズからなる。経路導出フェーズと距離測定ポイント修正フェーズを繰り返すことで、より移動コストの小さい経路の導出を行う。

距離測定ポイントの修正フェーズでは、最初にランダムに選択した距離測定ポイントを修正していくことで、より移動コストの小さい経路の導出を行う。ある地点から一度に複数のセンサノードの距離測定を行うことで、距離測定ポイントを減らすことが可能になり、移動コストを軽減することができる。そこで、あるセンサノードの距離測定ポイントを他のノードの距離測定ポイントと重ね合わせることで、全体の測定回数の削減を行う。

経路の導出フェーズでは、導出した距離測定ポイントをできるだけ低い移動コストで巡回するアンカノードの移動経路を導出する。この問題は巡回セールスマン問題であり、距離測定ポイントの数が増加すると最短経路の導出が困難になる。この問題を解くための手法と

して、Lin-Kernighan アルゴリズム⁵⁾を用いる。Lin-Kernighan アルゴリズムは巡回セールスマン問題をヒューリスティックに解くことで、短時間で質の良い近似解を導出できる手法である。

以上より、得られた経路上をアンカノードが移動し、距離測定ポイントで各センサノードに対して距離の測定を行うことで、すべてのセンサノードの位置情報を推定する。

以下、2章では、本研究の関連研究について触れ、3章で提案手法について詳しく述べる。4章にて、今後行う予定の評価実験の設定について述べ、5章でまとめを述べる。

2. 関連研究

WSNにおける、位置推定技術には、GPSを用いる他にTDOAやAOAなどのRange-base方式と、DV-HopやHop-VectorなどのRange-free方式がある。Range-base方式は、電波や音波、磁気などの情報から各ノード間の距離を測定し、位置を推定する手法である。Range-free方式は、それらの情報を必要とせず特殊な機器を用いる必要がない。一方、水中では電波の減衰により、これら地上WSNの技術の利用は困難である。そのため、UWSNではセンサノードの位置を特定することが難しい。そこで、次のような位置推定手法が提案されている。

Lingらは、複数あるアンカノード周辺のノードの位置を三辺測量を用いて推定し、それらを新たなアンカノードとして、全ノードの位置を推定する手法を提案している¹⁾。この手法は、各ノード間の距離の測定と三辺測量を行うだけで位置情報を取得できるため低コストでの実現が可能であるが、次々とアンカノードが生成されるにしたがって、誤差が積み重なり、位置推定の精度は悪くなる。

Erolらは、水面を浮き沈み可能な機器(ブイ)を使った位置推定手法を提案している²⁾。この手法は、ブイが水面にいる間にGPSで自身の位置情報を取得し、その後、水中に沈みビーコンを飛ばしながら近隣ノードに位置情報を配信する。しかし、この手法を実現するには、大量のブイを必要とし、コストがかかる。

Chengらはノードが密でない水中センサネットワークで、分散計算により高精度で位置推定を行うための研究をしている⁹⁾。この研究では、各ノードが自身の水深情報が取得可能であり、アンカノードは多数あると仮定している。提案された手法は、位置情報が不明な各ノードが、その水深情報、および、周辺のアンカノードの3Dの位置情報を利用して、3D情報を等価な2D情報に変換する。変換された情報に対して、2Dの位置推定に特化したUSPという手法を適用する。この研究はアンカノードが多数あり、移動できないという点で、我々の研究と異なる。

Zhou らは、時間とともにノードの位置が変化する状況を想定して、定期的に位置推定を行う手法を提案している¹⁰⁾。この手法は、移動パターンが予測可能な物体を利用することによって、各ノードの将来の位置を予測し、それを位置推定に使用して、低い通信コストで高い精度を達成している点に特徴がある。この研究は、時間の経過によりノードの位置が変化するという点で我々の研究とは異なる。

これらの既存研究の多くは、事前にアンカノードを多数用意することや、ブイなどの特殊な機器を用いることなどが必要となり、コストがかかる。そこで本稿では、UWSN においてすべてのセンサノードの正確な位置を低コストで推定するため、水面を移動可能な船形のアンカノードを用いた位置推定手法を提案する。

3. UWSN におけるセンサノードの位置推定の定式化

本章では、UWSN のモデルを示し、アンカノードの移動による位置推定およびその経路を最小化する問題を定式化する。本稿で使用する記号の一覧を表 1 に示す。

表 1 各記号の説明

記号	記号の説明
F	センシング対象のフィールド
$F.top, F.depth, F.base$	フィールドの海面, 深さ, 海底面
R	水中での最大通信距離
$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$	センサノードの集合
$s.exist$	センサノードの存在エリア
r_{exist}	センサノードの存在範囲の半径
$s.range$	通信保証エリア
r_{range}	センサノードの通信可能エリアの半径
$A = \{a\}$	アンカノードの集合
$a.inipos$	アンカノードの初期位置
v	アンカノードの移動速度
$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$	距離測定ポイントの集合
$time$	センサノードの位置推定にかかる時間
$length$	アンカノードの総移動距離
$cost$	アンカノードの移動コスト

3.1 仮定, 想定環境の定式化

ある海洋のフィールド F を想定し、その水面を $F.top$ 、水深を $F.depth$ 、海底面を $F.base$ と表す。センサノードおよびアンカノードは最大通信距離 R の範囲内で音波による通信が

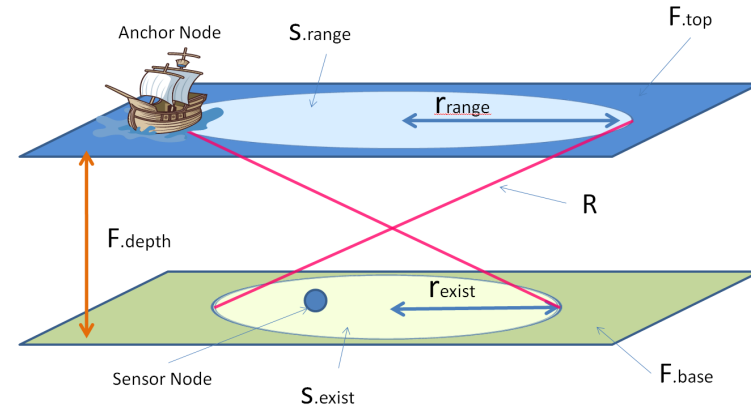


図 1 フィールドの概要図

可能である。センサノードは半径 R の円内の近隣センサノードと通信を行いネットワークを形成している。水中に配置されたセンサノードの集合を $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ とする。センサノードは一度海底に設置されると、その後は潮流などの影響で移動しないものとする。センサノードを投入した水面上のある地点から潮流の速度や水深の情報を用いてセンサノードの存在するエリア $s.exist$ がそれぞれのセンサノードに対して与えられる。 $s.exist$ は $F.base$ 上のエリアで半径 r_{exist} の円とする。 $F.top$ 上のアンカノードが $s.exist$ 内に存在するセンサノードと通信を行うことができるエリアを $s.range$ とする。 $s.range$ は水中での最大通信距離 R と $s.exist$ から導出でき (図 1)、次式で表される。

$$s.range = \left(\bigcap_{p \in s.exist} Ball(p, R) \right) \cap (F.top) \quad (1)$$

ここで、 $Ball(p, R)$ は座標 p を中心とした半径 R の球である。水深が $\sqrt{R^2 - r_{exist}^2}$ 以下の時、 $s.range$ は半径 r_{range} の円になる (水深がそれ以上の場合は本稿では対象としない)。

アンカノードを a と表す。アンカノードは GPS によって自身の位置が取得でき、水面を自由に移動できる。GPS の誤差は x とする。アンカノードの初期位置を $a.inipos$ とし、移動速度を v とする。アンカノードは各センサノード s の位置 $s.pos$ を三辺測量により決定する。距離測定ポイントの集合を $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ で表わした時、各センサノード s に対して、3 つの測定ポイント p_{s1}, p_{s2}, p_{s3} が必要になる。ただし、センサの通信可能範囲内

に測定ポイントがなければならないので、 $p_{s1}, p_{s2}, p_{s3} \in s.range$ である。さらに、精度の良い位置推定を行うには、水深が大きい場合も考慮し、3つの距離測定ポイントの距離がある程度離れていることが望ましい。ここでは、センサノードの位置を高精度に推定するために、以下の条件を満たすことを要求する。1つのセンサノードに対する通信保証エリア内の3つの距離測定ポイント間の距離はすべて d 以上とする(ここで、 d は定数として与えられる)。

アンカノードの移動経路を $route$ とする。 $route$ は、アンカノードの初期位置から各センサノードの距離測定ポイントを一度ずつ巡回する際の軌跡である。アンカノードの総移動距離を $length$ で表す。アンカノードが p_1, \dots, p_m の順で巡回する際の経路の総移動距離は以下のように表すことができる。

$$length(p_1, \dots, p_m) = Dist(a.inipos, p_1) + Dist(p_1, p_2) + \dots + Dist(p_{m-1}, p_m) \quad (2)$$

アンカノードが距離測定ポイント p_i で静止し、センサノードと通信し、次の測定ポイント p_{i+1} に移動開始するためにかかる時間を $time$ とする。 $time$ には碇を下ろす、上げるなどにかかる時間も含まれるとする。すべての距離測定ポイントにおける、通信にかかる時間の総和 $time$ はそれらの静止時間の和で定義する。

$$time(p_1, \dots, p_m) = time_1 + time_2 + \dots + time_m \quad (3)$$

ここで、距離測定ポイント数が少なければ、通信にかかる時間の総和は小さくなると考えられる。

アンカノードの移動コストを $cost$ と表す。 $cost$ は総移動距離 $length$ を移動するときにかかる時間とセンサノードと通信している間に止まっている時間 $time$ の和と定義する。

$$cost(p_1, \dots, p_m) = \frac{length(p_1, \dots, p_m)}{v} + time(p_1, \dots, p_m) \quad (4)$$

3.2 問題の定式化

各センサノードに対する距離測定ポイントをすべて通り、移動コスト $cost(p_1, \dots, p_m)$ を最小化するアンカノードの経路 ($a.inipos \rightarrow p_1 \rightarrow \dots \rightarrow p_m$) を求める。そのため、すべてのセンサノードに対して位置推定が完了するまでの移動コスト(時間)を最小にするために、以下の目的関数を設定する。

$$minimize(cost(p_1, \dots, p_m)) \quad (5)$$

4. アルゴリズム

4.1 提案手法の概要

本手法は、各センサノードに対して三辺測量のための3つの距離測定ポイントの導出を行い、アンカノードがそれらの地点で距離測定することで全センサノードの位置を推定する。このとき、アンカノードの総移動距離を小さくすることで、低コストかつ短時間で全センサノードの位置を推定する。また、距離測定ポイントが少なくなれば、全センサノードの位置推定にかかる時間を短縮できる。そこで、距離測定ポイントを削減するため、一回の測定で複数のセンサノードとの距離を計測するよう、各センサノードの3つの距離測定ポイントを重ね合わせるアプローチをとる。本章では、距離測定ポイントの修正と移動コストの低い経路の導出を繰り返すことで、センサノードの位置推定を行うアンカノードの移動コストを最小にするアルゴリズムを提案する。アルゴリズムのフローチャートを図2に示す。

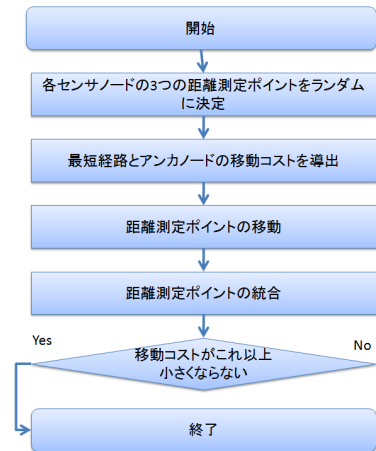


図2 アルゴリズムのフローチャート

4.2 初期距離測定ポイントの決定

アンカノードからセンサノードの位置を推定する方法を述べる。各センサノードに対して、海面からの三辺測量により位置を推定する。三辺測量とは、1つのセンサノードに対して一次独立な3地点から距離を測定することで、センサノード位置を特定する手法である。

距離測定の方法を以下で述べる．アンカノードが水面の距離測定ポイントへ移動して，水中のセンサノードと信号の送受信を行い，その信号の到着時間差から各センサノードまでの距離を測定する．距離測定ポイントは各センサノードに対して少なくとも3つ存在し，アンカノードがそれらの地点へ移動し，距離測定することで全センサノードの位置推定を行う．本アルゴリズムでは，初期の距離測定ポイントの集合 P を以下のように決定する．

$$P = \bigcup_{s \in S} \{p_1, p_2, p_3 | (p_1, p_2, p_3 \in s.range) \wedge (|p_1 - p_2| \geq d) \wedge (|p_2 - p_3| \geq d) \wedge (|p_3 - p_1| \geq d)\} \quad (6)$$

この時， p_1, p_2, p_3 は $s.range$ 内でランダムに決定するものとする．

4.3 距離測定ポイントの修正による移動コストの最小化

ここでは，初期の距離測定ポイントを移動させ，移動コストの小さい経路を求めするための2つのフェーズについて説明する．経路の導出フェーズと距離測定ポイントの修正フェーズを繰り返すことで，移動コストの小さい経路を導出する．

4.3.1 経路の導出フェーズ

経路の導出フェーズでは，導出した距離測定ポイントをできるだけ低い移動コストで巡回するアンカノードの移動経路を導出する．すべての距離測定ポイントを一度ずつ巡回し，総移動距離が最短になるような経路を求める．この問題は巡回セールスマン問題であり，距離測定ポイントの数が増加すると最短経路の導出が困難になる．この問題を解くための手法として，Lin-Kernighan アルゴリズム⁵⁾を用いる．Lin-Kernighan アルゴリズムは巡回セールスマン問題をヒューリスティックに解くことで，短時間で質の良い近似解を導出できる手法である．そして，Lin-Kernighan アルゴリズムにより得られた経路に対して，アンカノードの移動コストを導出する．

4.3.2 距離測定ポイントの修正フェーズ

距離測定ポイントの修正フェーズでは，導出した距離測定ポイントの位置を修正することで，より移動コストの小さい経路の導出を行う．距離測定ポイントの修正には，以下の2つのアプローチをとる．

距離測定ポイントの移動

アンカノードの移動コストが小さくなる位置に現在の測定ポイントを一齐に移動する．測定ポイントの集合 P のベクトルを $\vec{p} = (p_1, \dots, p_m)$ とする．このとき最急降下法を用いて，以下の式で \vec{P} の値を更新する．

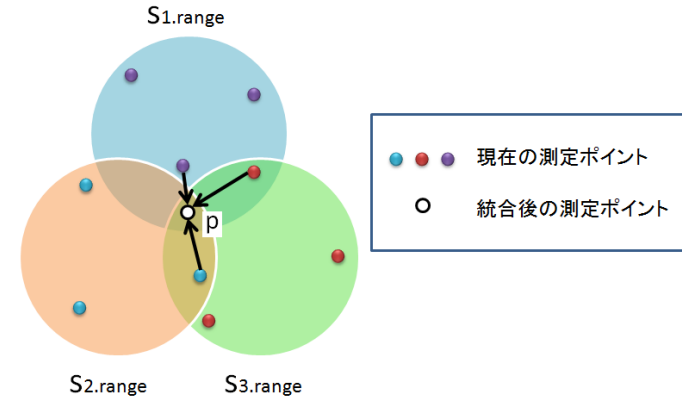


図3 距離測定ポイントの統合

$$\vec{p}^{(k+1)} = \vec{p}^{(k)} - \alpha \begin{bmatrix} \partial cost(\vec{p}^{(k)}) / \partial p_1^{(k)} \\ \dots \\ \partial cost(\vec{p}^{(k)}) / \partial p_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで， $\vec{p}^{(0)} = \vec{p}$ であり， α は正の定数である．各 i について， $\partial cost(\vec{p}^{(k)}) / \partial p_i^{(k)} = 0$ となるまで， k を1ずつ増やし， $\vec{p}^{(k)}$ を更新する．そして，各 i について， $\partial cost(\vec{p}^{(k)}) / \partial p_i^{(k)} = 0$ となるとき $\vec{p}^{(k)}$ を解とする．

距離測定ポイントの統合

図3のように一回の距離測定で複数のセンサノード s_1, \dots, s_k への距離が求まるような通信エリア内のポイント p が存在する場合， s_1, \dots, s_k の現在の距離測定ポイント3点のいずれかを p に変更する．ただし，各センサノード $s_i (1 \leq i \leq k)$ について，1つのセンサノードに対する通信保証エリア内の3つの距離測定ポイント間の距離はすべて d 以上(3.1節参照)という制約を満たさない時は変更しない．また，フィールド全体で p のようなポイントが複数ある場合，一度に距離測定できるセンサノードの数が大きいポイントから優先的に結合の操作を行う．

5. 評価実験に向けての検討事項

本章では、提案手法を評価するためのシミュレーション実験についての検討事項述べる。まず、提案手法による位置推定の精度を評価するために、実際に配置したセンサノードと提案手法により位置推定を行った結果の比較をする実験を行うことを予定している。また、センサノードの数が変化した場合の移動コストや計算時間を評価する実験を行うことを予定している。最後に、フィールドの水深が変化した場合の位置推定の精度や移動コストの変化を評価する実験を行うことを予定している。

本実験におけるフィールドやノードの設定は以下のようにする。

- フィールドの大きさ(縦×横×深さ): $10000m \times 10000m \times 2000m$, $10000m \times 10000m \times 3000m$, $10000m \times 10000m \times 4000m$
- 水中での最大通信距離: $R = 5000m$
- センサノード数: 10, 50, 100
- アンカノードの移動速度: $v = 20km/h$
- GPSの誤差: $x = 5m$
- 距離測定ポイント間の距離: $d = 400m$

水中での最大通信距離は $5000m$ とする³⁾。10個～100個のセンサノードが水中でセンサネットワークを形成しており、 $10000m \times 10000m$ の範囲で水深は $2000 \sim 4000m$ であると設定する。アンカノードの初期位置の座標は $(0,0,0)$ とする。センサノードの存在エリア中心座標はフィールド内の海底面に一様分布乱数を用いて与え、各センサノードの存在エリア $s.range$ の円における半径 r_{range} は $100 \sim 500m$ の値をランダムに与える。水面上の $s.range$ が最小になるときは、水深 $4000m$ のフィールドで $r_{range} = 500m$ と与えた場合で半径 $r_{range} = 2500m$ の円になる。また、通信可能エリア内の距離測定ポイント間の距離 d は、最大水深の $4000m$ に比べ 10 分の 1 である $400m$ とする。

5.1 実験 1

本実験では、提案手法における位置推定の精度を評価する実験を行う。フィールドの大きさは $10000m \times 10000m \times 2000m$ を想定し、センサノードの数は 50 個とする。フィールドにセンサノードを配置し、それらのセンサノードに対して提案手法を用いた位置推定を行う。この実験では、実際に配置したセンサノードと提案手法により推定した結果の差異ができるだけ小さくなることが望ましい。

5.2 実験 2

実験2では、フィールド内のセンサノードの数を変化させ、センサノードの数がアンカノードの移動コストに与える影響を評価する。フィールドの大きさは $10000m \times 10000m \times 2000m$ を想定し、センサノードの数は $10, 50, 100$ 個と変化させる。フィールド上の全距離測定ポイントの数に対して、距離測定ポイントの統合を行うことで統合できた距離測定ポイントの数の割合を比較する。フィールド内のセンサノードの数が増加すれば、各センサノードの通信可能エリアが重複する場所が多くなる。よって、異なる通信可能エリア内の距離測定ポイントが統合できる数が多くなり、距離測定ポイントの削減できる割合が増加する。ゆえに、センサノードの数が増加した場合は、提案手法を用いず単純に全距離測定ポイントをアンカノードが回った経路と比べて移動コストが小さくなるのが望ましい。

5.3 実験 3

実験3では、フィールドの水深を変化させることで、水深がアンカノードの移動コストに与える影響を評価する。フィールドの大きさは $10000m \times 10000m \times 2000m$, $10000m \times 10000m \times 3000m$, $10000m \times 10000m \times 4000m$ の3つを想定し、センサノードの数は 50 個とする。水中での最大通信距離が定数 R であるため、フィールドの深さが深くなれば、海面上の各センサノードの通信可能エリアが小さくなる。よって、通信可能エリアの重複が少なくなり、距離測定ポイントの共有ができず、移動コストの削減率が小さくなる。本実験では、フィールドの深さを深くすると、アンカノードの移動コストがあまり減少しないことが望ましい。

6. あとがき

本稿では、UWSNにおけるセンサノードの位置推定における問題を定式化した。そして、問題設定に対して、水面を移動可能なアンカノードを用いた位置推定手法とアンカノードの移動コストを小さくする手法を提案した。今後、提案手法を用いた位置推定の精度を評価するために、実際に配置したセンサノードと提案手法の結果を比較する実験を行う。また、フィールドの環境がアンカノードの移動コストに与える影響を評価するための実験を行う。また、文献1)2)の手法と精度、コストについて比較を行う。

今後の課題として、センサノードの移動を考慮したモデルを考える。センサノードが潮流により移動すると通信可能エリアが移動するので、アンカノードの移動経路の再導出を行う必要がある。その場合、距離測定ポイントを回る順番や経路の導出アルゴリズムの改善やセンサノード同士の通信の導入などが考えられる。

参 考 文 献

- 1) Ling, H. and Znati, T. : “Locate More Nodes in Under Water Sensor Networks Using Out-of-Range Information,” *Proc. IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC 2008)*, (CD-ROM)(2008).
- 2) Erol, M. , F.M.Vieira, L. and Gerla, Mario. : “Localization with Dive’N’Rise (DNR) Beacons for Underwater Acoustic Sensor Networks,” *Proc. ACM the Int’l Workshop on Underwater Networks (WUWNet’07)*, pp.97–100 (2007).
- 3) Casari, P. and F.Harris III, A. : “Energy-efficient Reliable Broadcast in Underwater Acoustic Networks,” *Proc. ACM the Int’l Workshop on Underwater Networks (WUWNet’07)*, pp.49–56 (2007).
- 4) Vasilescu, I. , Detweiler, C. and Rus, D. : “AquaNodes: An Underwater Sensor Network,” *Proc. ACM the Int’l Workshop on Underwater Networks (WUWNet’07)*, pp.85–88 (2007).
- 5) Lin, S. and Kernighan, B.W. : “An Effective Heuristic Algorithm for the Trabeling Salesman Problem,” *Oper. Res.* 21 , pp.498–516 (1973).
- 6) Rice, J. : “Seaweb Acoustic Communication and Navigation Networks,” *Proc. of the Int’l Conference Underwater Acoustic Measurments: Technologies & Results (UAM 2005)*, (2005).
- 7) Niculescu, D. and Nath, B. : “Ad Hoc Positioning System(APS),” *Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2001)*, Vol. 5, pp. 2926–2931 (2001).
- 8) Chandrasekhar, V. , Seah, W.K.G , Choo, Y.S and Ee, H.V. : “Localization in Underwater Sensor Networks - Survey and Challenges,” *Proc. ACM the Int’l Workshop on Underwater Networks (WUWNet’06)*, pp. 33–40 (2006).
- 9) Cheng, W. , Teymorian, A.Y. , Ma, L. , Cheng, X. , Lu X. and Lu, Z. : “Underwater Localization in Sparse 3D Acoustic Sensor Netowrks,” *Proc. IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2008)*, pp. 236–240(2008).
- 10) Zhou, Z. , Cui, J.H. and Bagtzoglou, A. : “Scalable Localization with Mobility Prediction for Underwater Sensor Networks” *Proc. IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2008)*, pp. 2198–2206 (2008).