

移動アンカノードを用いた三辺測量による 水中センサノードの低コスト位置推定手法

勝間 亮^{1,a)} 松本 啓司² 柴田 直樹^{2,b)} 安本 慶一^{2,c)} 伊藤 実^{2,d)}

受付日 2013年5月14日, 採録日 2013年10月9日

概要: 水中センサネットワークは、赤潮や地震調査などでの活用が期待されている。センサノードを海底に配置するには海上から投入する方法が考えられるが、その場合、海底に沈んだセンサノードの位置は投入地点から推測可能ではあるが、正確には特定できない。しかし、水中センサネットワークではセンサノードの故障位置やイベントの発生位置などを知るために、センサノードの位置を特定することは非常に重要である。本研究では、GPSにより位置が判明しているアンカノードが海面上を移動しながら、音波の送受信により測定したアンカノードから各センサノードまでの距離とセンサノードの水圧センサの情報をもとに、低コストで各センサノードの位置を推定する。ノードの位置を推定するためには、各センサノードにつき海上の3地点(測距点)での距離測定が必要である。提案手法では、アンカノードの巡回コストが最適な測距点の集合を求めるため、各センサノードにつき3つの測距点をランダムに配置し、全測距点を巡回する最短経路をLin-Kernighan法により求める。そして、共役勾配法を使って測距点を再配置することで距離測定回数の最小化を行う。その際、塩分濃度や水温などに基づく音速の変化によって生じる測定距離の誤差および位置推定誤差ができるだけ小さくなるよう、測距点の配置を工夫する。シミュレーションに基づく評価実験の結果、3つの測距点が正三角形に近く、測距点間の距離が離れているほど高精度に位置推定できることが分かった。また、測距点の配置を鋭角三角形に制限したとき、提案手法は、一般的な方法より27–34%少ないコストで平均誤差119–137mでのノードの位置推定ができた。

キーワード: 水中センサネットワーク, 位置推定, 最短経路, モバイルアンカノード

Low-cost Localization Method for Underwater Sensor Nodes by Trilateration Using Mobile Anchor

RYO KATSUMA^{1,a)} KEIJI MATSUMOTO² NAOKI SHIBATA^{2,b)}
KEIICHI YASUMOTO^{2,c)} MINORU ITO^{2,d)}

Received: May 14, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: Underwater Sensor Networks (USNs) are used for monitoring outbreak of red tide or earthquakes, and so on. In order to deploy the sensor nodes on the seabed in these networks, the nodes are sometimes just thrown into the sea. In these cases, we only know the approximate positions, and we need more accurate positions for the sensor nodes under the sea. In this paper, we propose a localization method for estimating the positions of the nodes while minimizing the fuel and other costs for an anchor node (i.e., a boat) moving on the surface of the sea. The proposed method utilizes the trilateration technique to locate the accurate positions of the nodes by measuring the distances between the boat and sensor nodes. In order to maintain the accuracy of the obtained positions, we need to measure the distances from three affine-independent points, and we need to find a good route to save the fuel and other costs for the boat. The proposed method first decides three random measurement points for each sensor node, and then it derives the shortest path for visiting the all measurement points. This is a travelling salesman problem, and we use the Lin-Kernighan method to obtain the shortest route. Then, we apply the Conjugate Gradient method to the positions of the measurement points so that the total cost function is minimized. We also consider the error involved in the measured distances coming from variation of acoustic signal velocity by fluctuation of the salt concentration, temperature, etc. We conducted a simulation-based study, and our method estimated positions of all nodes with 119–137 m of average estimation error in 27–34% lower costs than a random method.

Keywords: underwater sensor network, localization, shortest route, mobile anchor node

¹ 大阪府立大学
Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599–8531, Japan
² 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, Nara 630–
0192, Japan

a) ryo-k@mi.s.osakafu-u.ac.jp
b) n-sibata@is.naist.jp
c) yasumoto@is.naist.jp
d) ito@is.naist.jp

1. はじめに

近年, WSN (Wireless Sensor Network) を水中に応用する USN (Underwater Sensor Network) の研究がさかんに行われている. 水中では電波による通信が難しいため, USN では音波を用いてパケット通信を行う. USN のアプリケーションとして, 海中の水質調査や生態調査, 地下資源の観測などがある [2]. 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が重要である. 地上で使用する WSN のセンサノードは GPS などを用いて比較的簡単に位置情報を取得できるが, 水中では電波が減衰してしまうため, GPS のような電波を用いる手法は使用できない. これまで USN において, 位置が既知の複数のアンカ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 [6] 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 [7], 多数のアンカノードが存在する環境で, 水深を計測可能なセンサノード群が分散計算により高精度に位置推定する手法 [14], モビリティパターンがある程度分かっているモバイル水中センサノードの位置を定期的に求める手法 [15] などが提案されている. しかし, これらの手法は, 位置推定の精度や, 特殊な機器の使用・導入にともなう設置・維持コストの点で問題があった.

本論文では, USN においてすべての水中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 受信機を搭載し水面を移動可能な船型アンカノード, 水圧センサと音波通信機器を搭載した複数の水中センサノードを用いる. アンカノードは GPS 信号を受信しながら海面を移動でき, 水中のセンサノードと音波による通信が可能である. センサノードは海面上のある地点から投入され, 海底のある地点に沈んで固定されているものとする. 投入地点における潮流の影響とその付近の水深情報を用いて, センサノードが存在する海底上のエリアが分かるとする. 海底上の存在エリアと音波の通信距離からセンサノードと通信が必ず可能である海面上のエリア (通信保証エリアと呼ぶ) が分かる.

センサノードの位置は, 海面からの三辺測量を用いて推定する. アンカノードは水中のセンサノードと通信できる通信保証エリアへ移動し, 信号の送受信を行い, その信号の到達時間から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保証エリア内のアフィン独立な3地点 (測距点と呼ぶ) から音波信号を送受信することで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, センサノードの位置を推定する.

提案手法では, 位置推定の精度を保つため, 測距点間の距離がある程度離れている, 同一通信保証エリアの3つの

測距点が構成する三角形のなす角がそれぞれ一定範囲内であるという2つの制約を設ける. アンカノードがすべての測距点を巡回し各地点で停止してセンサノードとの距離を測定するので, 測距点の位置および数によってコスト (時間) が大きく変化する. そこで, 制約を満たす3つの測距点をランダムに配置した後, それらの位置情報を引数とした位置推定コスト関数 (各測距点で静止している時間も含める) を定義し, 共役勾配法により位置推定コスト関数の最小化を行う. アンカノードは距離測定のための信号をブロードキャストするため, アンカノードから通信距離内に複数のセンサノードが存在すれば, 1度の送信で複数のセンサノードとの距離を測定することができるため, そのような場合は複数の測距点を1つにまとめ, 測距点の数を削減する.

水面からの距離測定値や水圧センサの値には誤差が含まれているため, 推定したノード位置にも誤差が含まれる. 提案手法では, ノード位置の存在範囲を含む球を算出し, 球の中心をセンサノードの推定位置, センサノードの実際の位置と推定位置との距離を推定誤差とする.

提案手法の有効性を評価する計算機シミュレーションを行った. その結果, 測距点がなす三角形の形が正三角形に近いほど, また, 測距点間の距離が離れているほど位置推定誤差が小さくなることが分かった. また, センサノードが25-100個, 測距点のなす三角形の最大角度が90°のとき, 提案手法はランダム配置に比べ位置推定コストを27-34%削減できた.

2. 関連研究

もっともよく知られている位置推定システムとして, グローバルポジショニングシステム (GPS) があげられる. GPS は, GPS 衛星から電波信号を GPS 受信機で受け取り, 受信した電波の時間差により, それぞれの衛星との相対的な距離差を算出し, 現在地情報を得る. 4個の衛星の電波をとらえれば, 地球上の平面での位置推定が可能になる. GPS 受信機を搭載するだけで使用可能な簡易なシステムである.

WSN の位置推定技術には, 近隣ノードからの電波受信状況に基づく Range-free 方式と Range-base 方式がある [3]. Range-free 方式では, あらかじめ位置が分かっているノードとの位置関係やホップ数などからノードの位置を推定する手法である [4]. そのため, 特殊な機器を用いる必要がなく, 低コストでの位置推定が可能になる. 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 [5]. 一般に, Range-free 方式と比べ, コストがかかるが高精度な位置推定を実現することができる.

位置推定技術では, 大きく測定と統合の2つのフェーズに分けることができる. 測定フェーズでは, 2つのノード

間の距離や角度を測定する。統合フェーズでは、測定した情報を用いてノードの位置を推定する。有名な測定の方法に、Received Signal Strength Indicator (RSSI) や Time of Arrival (ToA), Time Difference of Arrival (TDoA), Angle of Arrival (AoA) などがある [13]。RSSI 測定は受信信号の強度を測定し、既知の伝送パワーや伝送モデルから送受信者間の距離を測定する方法である。ToA や TDoA は信号の伝送速度からノード間の距離を直接測定する方法である。AoA はアンテナなどの機器を用いて受信信号から通信相手の角度を求める手法である。

たとえば、文献 [16] では、都市部における移動端末の位置を推定する手法を提案している。一般に位置推定手法では、正確な位置情報を発するノード（位置基準ノード）を仮定し、その基準位置情報を無線アドホックネットワークで複数ホップ伝播させる手法をとる。しかし、この論文では、各移動端末が位置基準ノードからの位置情報に加え、遭遇した移動ノードの推定位置情報も位置推定に利用している。また、道路の形状や移動可能領域を各移動端末に与え、端末の実移動情報を考慮することで精度の向上を図っている。これにより、位置基準ノードが疎な間隔で設置されているような状況でも、位置推定誤差が無線到達距離と同程度以下に抑えられている。

また、無線 LAN の電波を用いた位置推定手法も提案されている。このような手法の 1 つに RADAR [17] というものがあり、電波信号をもとにビルの中のユーザの位置をトラッキングする手法がある。RADAR は事前に受信信号強度と距離の関係を調査しており、受信した信号の強さをアクセスポイントで測定することで無線 LAN 端末の位置を測定している。このほかにも、屋内での無線 LAN 信号を用いた屋内エリア推定方式や無線アドホックネットワークにおける位置推定手法 [18] など、様々な想定環境での手法が提案されている。一般に、WSN でこれらの手法を実現するためには、ネットワーク中に多数の参照ノードが必要であり、それぞれのノードは直接通信できる近隣ノードが少なくとも 3 つ以上必要であるなど密な環境が必要である場合が多い。

その他の位置推定技術に Fingerprinting という手法が存在する [20]。Fingerprinting では、あらかじめノードの位置とその場所の電波の特徴をデータベース化しておき、実際に観測したデータとデータベースのパターンマッチを行い位置を推定する手法である。信号の特徴には、受信信号強度やマルチパスの特性などを用いる。この手法では、あらかじめすべての場所での特徴量を観測する必要があるため、データベースの作成に非常に手間がかかってしまう。

一方、水中では電波が大幅に減衰してしまうため、地上のように電波を用いる手法は好まれない。そのため、UWSN では電波信号の代わりに音波信号を用いて、ノード間の通信や位置推定を行う手法が多い。たとえば、UWSN では

次のような位置推定手法が提案されている。

Ling らは、Out-of-Range という情報を用いて位置推定を行う手法を提案している [6]。送受信するノード間だけでなく、すべてのセンサノードが持つ近隣ノードの情報を表す Out-of-Range 情報を参考に三辺測量を行い、センサノードの位置を推定している。これにより、ノード間の距離だけでは分からない新たなノードとの関係が分かるため、位置を推定できるノードの数を増やすことができる。位置を推定したノードは新たなアンカノードとなり、近隣のノードとの距離を測定する。この手法は、ネットワーク中のノードどうして距離の測定や三辺測量を行うことで位置の推定が可能になるため、低コストでの実現が可能である。しかし、次々とアンカノードが生成されるに従って、位置推定の誤差が積み重なるため、元からあるアンカノードから遠くなると位置推定の精度は悪くなる。また、想定環境が 2 次元であり、実環境のような 3 次元のフィールドを考慮していない。

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 [7]。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、水中に沈みながらビーコンを発して近隣ノードに位置情報を配信する。距離測定には、ToA を用いる。この論文では、潮の流れを考慮したノードのモビリティを想定しており、ブイが沈む際の動きや海底でのセンサノードの移動を検討している。シミュレーションでは、すべてのノードの位置推定が可能であることを示している。しかし、狭いエリアに対して大量のブイを必要とするため、広範囲で実現しようとするとコストがかかる。

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 [14]。この研究では、各ノードが自身の水深情報を取得可能であり、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必要であり、文献 [7] と同様、広範囲で実現する際のコストが大きい。

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 [15]。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、本研究の対象である広範囲に設置された多数の静止ノードの位置推定を安価に行う目的には適さない。

これらの既存研究の多くは、UWSNにおける位置推定を実現するために、多数のアンカノードや特殊な機器を用いており、導入・維持管理において非常にコストがかかる。また、高精度な位置推定を行うためにも、高機能なモビリティを有した機器を必要とし、同様に機器の導入にコストがかかるという問題がある。これらの既存研究と異なり、本研究では、UWSNにおいてすべてのセンサノードの位置を高精度かつ低コストで推定するために、水面を移動可能な船型のアンカノードを用いた位置推定手法を提案する。提案手法では、アンカノードが位置推定のためにセンサノードと通信するポイントを導出し、各ポイントを結ぶ最短経路を既存の Lin-Kernighan 法により求め、その経路に沿ってアンカノードを移動させる。

3. USN におけるセンサノードの位置推定の定式化

本章では、USN 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。本論文で用いる記号を表 1 にまとめる。

センサノードは、水面上から水中に投入することで設置されると想定する。設置の際、潮流などの影響により、投入した位置の真下に必ずしも到達せず、水底に達するまでに水面に平行に多少移動すると想定する。その移動する可能性のある範囲を存在エリアと呼ぶ。センサノードは 1 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。固定されたセンサノードの位置を、水面上を自由に移動できるアンカノードと、各センサノードに内蔵された水圧センサを利用して特定する。アンカノードは GPS によって常時自身の位置を知ることができる。また、アンカノードとセンサノードは音波により通信が可能とし、

表 1 記号一覧
Table 1 Notations.

記号	記号の説明
R	ノード間の最大通信距離
S	センサノードすべての集合
$D(s)$	センサノード s の水深
$E(s)$	センサノード s の存在エリアの中心
r	センサノードの存在エリアの半径
$A(s)$	s の存在しうるエリアのどこからでも通信可能なアンカノードの通信エリア
p_0	アンカノードの初期位置
p_i	i 番目の測距点
W	アンカノードの移動経路
$\theta_{s,i}$	s の各測距点が他の点となす角度
d	測距点間の最短距離
$L(W)$	W の移動距離
t	各測距点での作業時間
$T(W)$	W の全測距点での作業時間
$C(W)$	W での位置推定コスト

この際の到達時間によりアンカノードは自身とセンサノードの距離を知ることができる。ただし、音波の速度は水温、深さ、塩分濃度などにより変化するため [8]、この距離には測定誤差が含まれる。以降、測定誤差に関する制約を定義し、この制約を満たしつつアンカノードの移動コストを最小化し、すべてのセンサノードの位置を特定する方法を定式化する。水中に配置されたセンサノードすべての集合を $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ とする。センサノード s を投入した水面上の位置から、潮流などの影響を受けずに真下に降下したと仮定したときのセンサノードの座標を $E(s)$ で表す。センサノードの存在エリアを $E(s)$ を中心とする水面に平行な半径 r の円盤として与える。アンカノードを a と表す。アンカノードの初期位置を p_0 とし、移動速度を u とする。センサノードおよびアンカノードの最大通信距離を R とする。 s の水深を $D(s)$ とする。アンカノードが確実に水中のセンサノード s と通信できる水面上のエリアを、 s の通信保証エリアと呼び、 $A(s)$ で表す。 $A(s)$ は、最大通信距離 R と $E(s)$, r , $D(s)$ から導出でき (図 1)、水面上の $E(s)$ の真上となる点を中心とする半径 $\sqrt{R^2 - D(s)^2} - r$ の円盤となる。

水中での音速を v とする。 v は水温、深さ、塩分濃度などにより変化する。ここでは、 $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ を満たすと仮定する。センサノード s の位置を推定するために三辺測量を用いる。アンカノードはセンサノード s に対して水面上の 3 点 $p_{s1}, p_{s2}, p_{s3} \in A(s)$ から信号を送信し、 s はアンカノードからの信号を受信したら返信する。 s からの返信を受信したアンカノードは、信号の到達時刻から、3 点 p_{s1}, p_{s2}, p_{s3} から s までの距離をそれぞれ測定できる。 p_{s1} のようなアンカノードがセンサノードまでの距離を測定する地点を測距点と呼ぶ。3 点の測距点からセンサノードまでの距離と $D(s)$ より、三辺測量を用いてセンサノード s の位置を推定する。これらの位置推定手法の詳細は 4 章で述べる。

ここで、3 つの測距点が極端に近い位置に存在する場合 (図 2(a)) や、3 つの測距点がほとんど一直線上に並んで

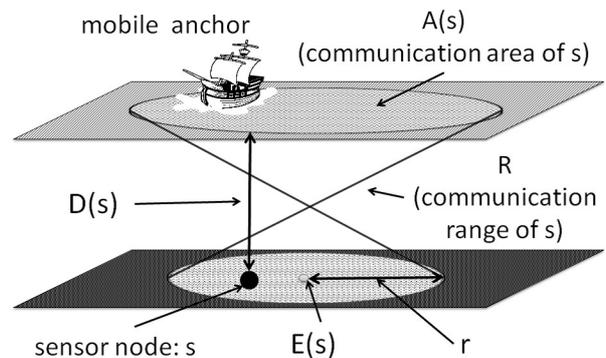


図 1 フィールドの概要図
Fig. 1 Overview of the field.

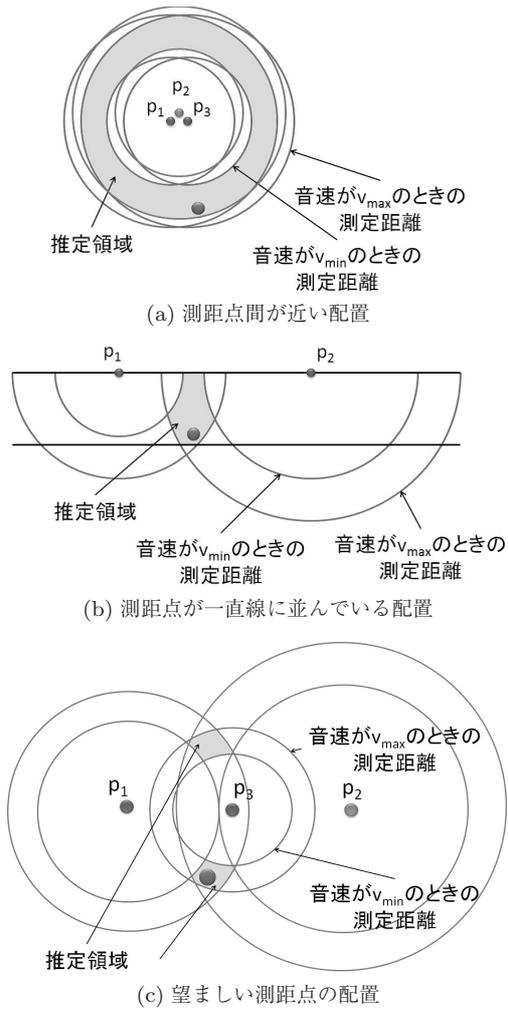


図 2 様々な測距点の配置

Fig. 2 Deployment of measurement points. (a) three measurement points are extremely close to each other, (b) three measurement points are on the one line, (c) good deployment.

いる場合 (図 2 (b)), 音速の変化による誤差を解消できず, どちらの場合も位置推定の精度が下がる. これを防ぐために図 2 (c) のように測距点がある程度離れた位置に設定する必要がある. そのための制約条件として, 各センサノード s の 3 つの測距点 $p_{s,1}, p_{s,2}, p_{s,3}$ の間の距離がそれぞれ d 以上離れており, それらのなす角度 $\theta_{s,1}, \theta_{s,2}, \theta_{s,3}$ がそれぞれ $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ の範囲であるとする. この制約条件は以下で表される.

$$\begin{aligned} \forall s \in S, (p_{s,1}, p_{s,2}, p_{s,3} \in A(s)) \\ \wedge (|p_{s,1} - p_{s,2}| \geq d) \wedge (|p_{s,2} - p_{s,3}| \geq d) \\ \wedge (|p_{s,3} - p_{s,1}| \geq d) \wedge (\theta_{min} \leq \theta_{s,1} \leq \theta_{max}) \\ \wedge (\theta_{min} \leq \theta_{s,2} \leq \theta_{max}) \wedge (\theta_{min} \leq \theta_{s,3} \leq \theta_{max}) \quad (1) \end{aligned}$$

全センサノードに対する測距点の集合を $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ とする. 全センサノードの位置を推定するため, アンカノードはすべての測距点を巡回しなければならない. アンカノードの移動経路を $W = [p_0, p_1, \dots, p_m]$

とする. 総移動距離 $L(W)$ は以下のように表すことができる.

$$L(W) = \sum_{i=0}^{m-1} |(p_i, p_{i+1})| \quad (2)$$

アンカノードが測距点 p で静止し, センサノードと通信し, 次の測距点に向けて移動開始するためにかかる時間を t とする. この時間には舵を下ろす, 上げるなどにかかる時間も含まれる. すべての測距点における, 通信にかかる時間の総和 T はそれらの静止時間の和で定義する.

$$T(W) = m \cdot t \quad (3)$$

測距点の総数 m が少なければ, 通信にかかる時間の総和は小さくなる. アンカノードの位置推定コスト $C(W)$ を, 速度 u のアンカノードが $L(W)$ の移動にかかる時間とセンサノードとの通信にかかる時間 $T(W)$ の和と定義し, 以下の式で表す.

$$C(W) = \frac{L(W)}{u} + T(W) \quad (4)$$

実際にセンサノード s が存在する位置を $real(s)$ とする. 提案手法により推定した位置を $estimate(s)$ とする. 実際の位置と提案手法により推定した位置の距離を位置推定誤差とし, $error(s)$ と表す.

$$error(s) = |real(s) - estimate(s)| \quad (5)$$

本問題では, 位置推定コスト $C(W)$ を最小化するような測距点の座標とアンカノードの移動経路 $W (p_0 \rightarrow p_1 \rightarrow \dots \rightarrow p_m)$ を求める. ただし, アンカノードの経路は各センサノードに対する測距点をすべて通り, かつ, センサノードの推定位置の最大誤差 $\max_{s \in S} (error(s))$ がある指定した閾値以下であるという制約を満たさなければならないとする. 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位置推定コスト (時間) を最小にするために, 以下の目的関数を設定する.

$$\text{minimize } (C(W)) \text{ subject to } (1) \quad (6)$$

4. 提案手法

本章では, 3 章で定式化した問題を解決するためのアルゴリズムについて述べる.

4.1 提案手法の概要

本手法では, 水中のセンサノードの位置を推定するために, 海面上を移動するアンカノードを用いて三辺測量を行う. アンカノードが水中のセンサノードと通信できる海面のエリアから信号の送受信を行い, その信号の到達時間から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保証エリア内のアフィン独立*1な 3 つの測

*1 この場合, 3 つの測距点は同一直線上にはないことを意味する.

距点から測定した距離を用いて、センサノードの位置を推定する。

本手法は大きく分けて、測距点の導出フェーズとセンサノードの位置推定フェーズからなる。

距離測定ポイントの導出フェーズでは、式 (1) を満たしつつ位置推定コスト $C(W)$ が小さくなるように距離測定ポイントを決する。距離測定ポイントの初期配置として、式 (1) を満たすという条件のもとにランダムに配置する。次に、アンカノードの総移動距離 $L(W)$ が小さくなるように、共役勾配法を用いて各距離測定ポイントを移動させる。ここで、最小のアンカノードの総移動距離 $L(W)$ を導出する問題は、すべての距離測定ポイントを巡回する最短経路を求める問題である。この問題は巡回セールスマン問題 (traveling salesman problem: TSP) と呼ばれ、NP 困難な問題として知られている。ここでは、既存手法である Lin-Kernighan 法 [10] を用いることで、距離の短い経路を導出する。最後に、アンカノードが全センサノードとの通信にかかる合計時間 $T(W)$ が小さくなるように、複数の距離測定ポイントを 1 点に結合する。

位置推定フェーズでは、共役勾配法により決定した各距離測定ポイントにおいて、アンカノードがセンサノードまでの距離を測定してセンサノードの位置を推定する。アンカノードは各センサノードとの通信にかかる時間および音速 v から距離を測定する。各距離測定ポイントからセンサノードまでの距離が測定された後、センサノードの位置を推定するために三辺測量を用いる。このとき、音速 v は $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ の範囲で変化するため、センサノードの位置は 1 地点には決まらず、ある立体の範囲内に存在すると求まる。そこで、その範囲をすべて含むような最小の球体を想定し、その球体の中心をセンサノードの推定位置とする。

以下では、提案手法の各フェーズについて詳しく述べる。

4.2 測距点の導出フェーズ

測距点の導出フェーズでは、位置推定を行うために必要なアンカノードがセンサノードと通信を行う地点を導出する。

4.2.1 初期測距点の配置

センサノードの位置を推定するには、水面のアフィン独立な 3 地点からの距離が必要になる。ここでは、センサノードごとに 3 つの初期測距点を設定する。ただし、位置推定の精度を保つために、3 つの測距点の位置関係に式 (1) のような制約をおく。まず、アンカノードはセンサノードと通信を行う必要があるため、測距点 p_1, p_2, p_3 は最大通信距離 R でセンサノードと通信ができるエリアに存在しなければならない。また、位置推定の精度を保つため、測距点間の距離 $|p_1 - p_2|, |p_2 - p_3|, |p_3 - p_1|$ を d 以上、3 つの測距点があなす三角形の角度 $\theta_{s1}, \theta_{s2}, \theta_{s3}$ を θ_{min} 以上 θ_{max} 以下の値に設定する。

提案手法では、4.2.1 項で決定したすべての測距点を回りかつ移動距離の少ない経路 W を導出するために、Lin-Kernighan 法 [10] を用いる。

4.2.2 Lin-Kernighan 法

Lin-Kernighan 法は、組合せ最適化問題における TSP を解くための解法の 1 つである。Lin-Kernighan 法では、2-opt と 3-opt と呼ばれる距離を最小化するために 2 本または 3 本のパスを交換する作業を実行する。

2-opt とは、ある経路の中の 2 本のパスの長さを比較し、短ければその 2 本のパスを入れ替えることで、新たな短い経路を得る手法である。たとえば、図 3 の左図のような経路が与えられたとき、現在の経路よりもポイント p_1 と p_2 、ポイント p_3 と p_4 を結んだ経路の方が全体の経路が短いことが分かる。そこで、この 2 本のパスを交換することで、図 3 右図のような短い経路を得ることができる。同様に、3-opt は図 4 のように、3 本のパスを交換することで経路を最小化する方法である。

Lin-Kernighan 法では、まず 2-opt での交換を試み、新たに 3-opt の形を作りさらに短い経路の探索を行う。たとえば、図 5 のように、 p_1 と p_4 を結んで閉路を作るのではなく、 p_1 と p_5 を結んだ新しい経路の比較も行う。このように 2-opt と 3-opt を状況に応じて使い分け、2-opt や 3-opt 単独での最適化よりも、効率の良い最適化を実現している。提案手法では、4.2.1 項で決定したすべての距離測定ポイントを回りかつ移動距離の少ない経路 W を導出するために、Lin-Kernighan 法を用いる。

4.2.3 位置推定コスト関数への変換

位置推定コストは、3 章で定義したとおり、アンカノ-

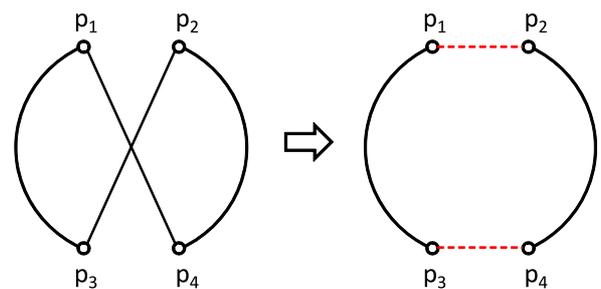


図 3 2-opt
Fig. 3 2-opt.

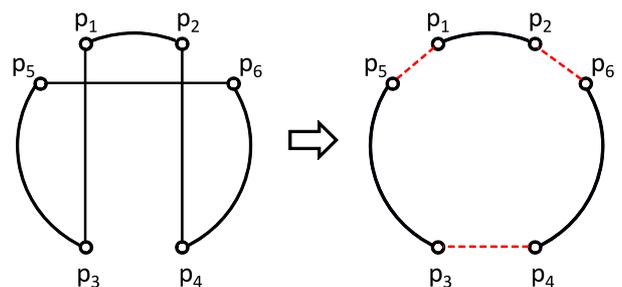


図 4 3-opt
Fig. 4 3-opt.

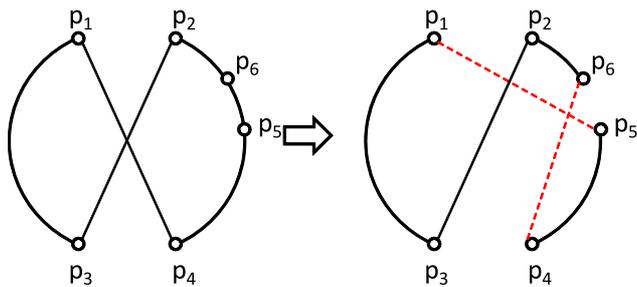


図 5 Lin-Kernighan
Fig. 5 Lin-Kernighan.

下の移動距離と各測距点上での作業時間の和である．今，Lin-kernighan 法で求めたアンカノードの移動経路 W を通ったときの測距点の並び順を $W = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_m\}$ とすると，全体の移動距離は次の式で表せる．

$$L(p_1, \dots, p_m) = |p_1 - p_0| + |p_2 - p_1| + \dots + |p_m - p_{m-1}|$$

ただし， $|p_{i+1} - p_i|$ は p_{i+1} , p_i 間の距離である．

最終的に，位置推定コストは式 (4) で表される．

4.2.4 測距点の移動による位置推定コスト最小化

提案手法では，4.2.3 項で定義した位置推定コストを測距点の移動により最小化する．位置推定コストの最小化には，共役勾配法という手法を用いる．共役勾配法 [19] とは，対称正定値行列を係数とする連立一次方程式を解くためのアルゴリズムである．最急降下法は少しずつ勾配方向へ解を改善していくが，共役勾配法は方向転換するとき勾配方向と今まで下ってきた方向も考慮する．反復法でありながら，有限回のステップ数で厳密解に到達するという性質を持っており，最急降下法などと比べて収束が早いという特徴があげられ，ノード数の増加に対するスケラビリティを持たせることができる．

位置推定コストは測距点の位置情報を引数としている関数であるため，測距点を移動させると位置推定コストを小さくすることができる．そこで本手法では，共役勾配法を用いて位置推定コスト関数を最小化するような新たな測距点の位置を導出する．位置推定コストが最小になるまで，測距点の移動を繰り返す．ただし，初期配置の場合と同様に，位置推定精度を保つため，式 (1) を満たすような位置へ移動させる．以下に，詳細な位置推定コスト最小化のプロセスを述べる．

まず，アンカノードの移動経路 W を通ったときの測距点の並び順を $W = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ とする．このとき共役勾配法を用いて，以下のステップで位置推定コスト $C(W)$ の値を更新する．

(Step 1) すべての p_i に対して，関数 $C(p_1, \dots, p_m)$ に共役勾配法を適用し，位置推定コストが小さくなるまで $\frac{\partial C(p_1, \dots, p_m)}{\partial p_i}$ を計算して測距点を移動させる方向を得る．

(Step 2) すべての $p_i \in P$ を Step 1 で算出した方向に移動させる．

(Step 3) もし， p_i の新しい位置 p'_i が制約条件 (1) を満たさなければ，測距点を移動させない．

(Step 4) すべての測距点 $p_i \in P$ が移動しなくなれば終了する．そうでなければ，Step 1 へ．

4.2.5 複数測距点の結合による位置推定コストの削減

測距点導出フェーズの最終手順として，測距点の数の削減を行う．4.2.4 項で導出した測距点の集合において，複数の測距点が重複している場合，それらの測距点上ではアンカノードは同じ動作をする．そのため，複数のセンサノード s_1, \dots, s_k の測距点が重なっている場合，それらを 1 つの測距点に結合する．ただし，各センサノード s_i ($1 \leq i \leq k$) について，式 (1) の制約を満たさない場合は結合しない．

4.3 位置推定フェーズ

位置推定フェーズでは，各測距点において，アンカノードが各センサノードまでの距離測定を行い，センサノードの位置を推定する．

4.3.1 距離測定手法

アンカノードは海底のセンサノードに対して，距離測定信号を送信する．この時刻を t_0 とする．センサノードがその距離測定信号を受信した時刻を t_1 とし，時刻 t_2 でアンカノードに対して信号を返信する．返信する信号には，センサノードの ID，信号を受信してから返信するまでに要した時間を付加する．このとき，センサノードが信号を受信後すぐに返信を行うと，複数のセンサノードがアンカノードと同じ距離にある場合に信号の衝突が発生してしまう．そこで，センサノードは自身が持つ固有の ID に応じて信号を返信するまでの時間を遅くすることで，信号の衝突を回避する．アンカノードがセンサノードからの信号を受信した時刻を t_3 とし，その通信時間から距離の測定を行う．実際にアンカノードからセンサノードまでの通信にかかった時間 t は以下の式から導出できる．

$$t = \frac{(t_3 - t_0) - (t_2 - t_1)}{2} \tag{7}$$

この時間 t と水中での音波の速度 v を用いることで，アンカノードからセンサノードまでの距離を測定することができる．

4.3.2 位置推定手法

測定した距離からセンサノードの位置を推定するためには，三辺測量による位置推定を行う．各センサノードに対して，3 つの測距点 p_i ($i = 1, 2, 3$) の座標を (x_i, y_i, z_i) ， p_i からセンサノードまでの測定距離を $length_i$ とすると，以下の関係式になる．

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = length_i^2 \tag{8}$$

これらの，3 つの連立方程式を解くことで，センサノードの位置を推定する．

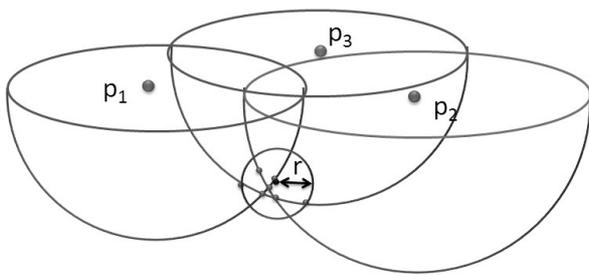


図 6 位置推定誤差
Fig. 6 Estimation error.

しかし、音波の速度 v は温度や塩分濃度の条件により v_{min} から v_{max} まで変化する。ゆえに、距離測定で用いる音波の速度と実際の音波の速度が違くと、距離測定に誤差が生じてしまう。そこで、提案手法では、これらの測定誤差を考慮したセンサノードの位置推定を行う。

各センサノードに対する距離測定において、音波の速度 v が v_{min} と v_{max} の場合を考え、その交点をすべて求め、3回の距離測定でセンサノードが存在するエリアを導出する。図 6 のように、それらの交点をすべて含むような最小の球体を導出し、その球体の中心を推定位置とする。また、その球体の半径を位置推定精度とする。実際のセンサノードの位置と推定位置との差を位置推定誤差とする。

5. 評価実験

本手法の有意性を評価するため、(1) 測距点とセンサノードの位置により位置推定精度がどれだけ変化するか、(2) 提案手法により位置推定コストがどれだけ削減されるか、(3) 位置推定の精度がどの程度に収まるか、をシミュレーション実験により調査した。

実験で使用したパラメータは、既存文献を参考に、表 2 のように設定した [8], [21], [22]。

実験 1 では、測距点間の距離や角度、センサノードの深さを変化させながら位置推定精度を評価した。測距点間の距離 d を 1,000, 2,000, 3,000, 4,000 m と変化させ、測距点がなす三角形を二等辺三角形とし、1つの角度を 60° (正三角形), 90° (直角二等辺三角形), 120° と変化させた。

実験 2 では、アンカノードの移動距離、測距点の数、位置推定コストを初期配置 (ランダム配置) と提案手法適用後とで比較し、提案手法の測距点移動部位および削減部位の有効性を評価した。

実験 3 では、センサノードの実際の位置と推定した位置とを比較し、推定誤差を求めた。

5.1 実験結果

5.1.1 測距点の配置の違いによる精度の評価

水深が 1,000 m, 2,000 m, 3,000 m, 4,000 m のときの実験結果をそれぞれ、図 7, 図 8, 図 9, 図 10 に示す。水深が 1,000 m のとき、角度や d の値を変化させても、位置推

表 2 シミュレーションで使用したパラメータ

Table 2 Simulation parameters.

パラメータ	値
フィールド, 水深 (日本近海のデータ [21])	10,000 m × 10,000 m, 1,000-4,000 m
最大通信距離 R [8]	5,000 m
センサノード数	25, 50, 75, 100
音波の速度 (水温, 塩分濃度などのとりうる範囲を考慮して定義 [22])	1,480-1,520 m/s
アンカノードの移動速度 u	40 km/h
各測距点での測定時間	60 s
測距点間の距離制約 d (式 (1))	1,000-4,000 m
海底の存在エリアの半径 r	0-0.3 × 水深

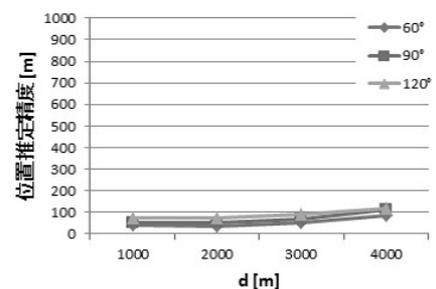


図 7 水深 1,000 m の場合の位置推定精度
Fig. 7 Estimation accuracy (depth 1,000 m).

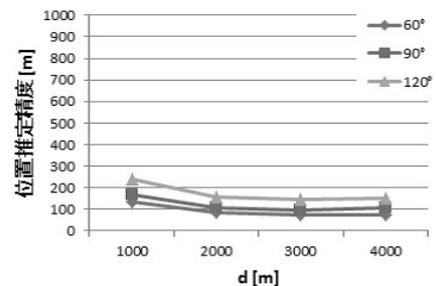


図 8 水深 2,000 m の場合の位置推定精度
Fig. 8 Estimation accuracy (depth 2,000 m).

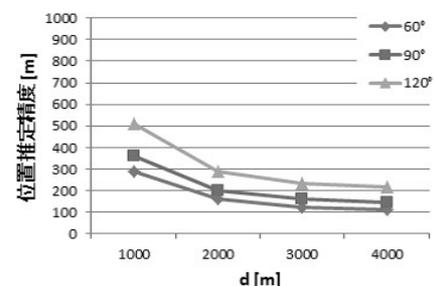


図 9 水深 3,000 m の場合の位置推定精度
Fig. 9 Estimation accuracy (depth 3,000 m).

定精度はおおむね 100 m 以内とほぼ変わらない結果となった。 d を大きくすると、位置推定精度が若干悪くなっている。水深が 2,000 m のとき、 $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ の場合は、 d の値が小さいときに位置推定精度が悪化したが、おおむね推定

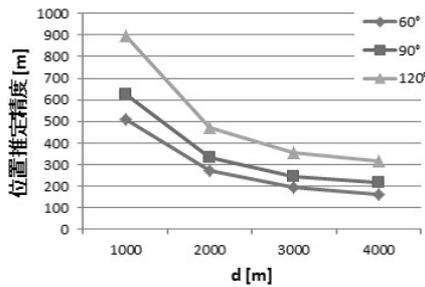


図 10 水深 4,000 m の場合の位置推定精度
Fig. 10 Estimation accuracy (depth 4,000 m).

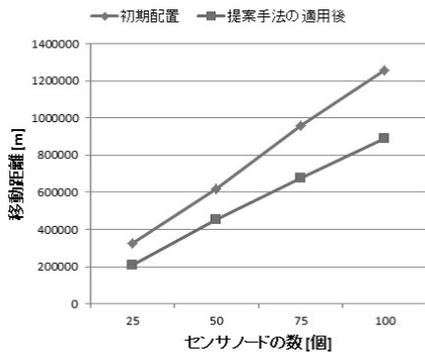


図 11 アンカノードの総移動距離
Fig. 11 Total moving distance of anchor node.

誤差 100 m 前後での位置推定ができている。θ = 120° の場合は、全体的に位置推定精度が若干悪化し、d が 1,000 m のときは、位置推定精度が 200 m を超えた。水深が 3,000 m のときには、2,000 m のときと比べ、全体的に位置推定誤差が悪化していることが分かる。特に、d が 1,000 m のときと θ = 120° のときの、位置推定精度の悪化が目立つ。d の距離が大きくなるにつれ、位置推定精度は改善されている。最後に、水深 4,000 m のとき、d の値が小さいと θ の値にかかわらず、位置推定精度が悪くなった。d を増加させることで、位置推定精度の向上が見られたが、水深が浅い場合と比べて全体的に推定精度が悪くなった。

以上より、三辺測量による位置推定精度は測距点のなす三角形の角度や距離、フィールドの水深に大きく依存し、3つの測距点のなす形は正三角形に近く、測距点間の距離は水深と同程度あることが望ましいことが分かった。

5.1.2 位置推定コストの評価

実験 2 では、提案手法の測距点移動部位および削減部位が位置推定コストの削減率にどの程度効果的であるかを評価する実験を行う。

10,000 m × 10,000 m のフィールドに 25-100 個のセンサノードを配置し、それらのセンサノードに対して測距点をランダムに配置（初期配置）した場合と提案手法を用いた場合の位置推定コストの比較を行った。制約条件として、実験 1 の結果をふまえ、測距点間の距離 d を 2,000 m, θ_{min} = 0°, θ_{max} = 90° とした。

アンカノードの移動距離を図 11、初期の測距点の数と

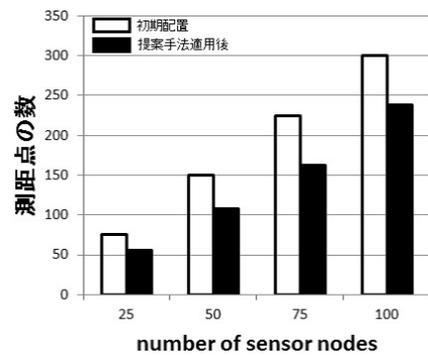


図 12 提案手法適用前後の測距点の数
Fig. 12 The number of measurement points.

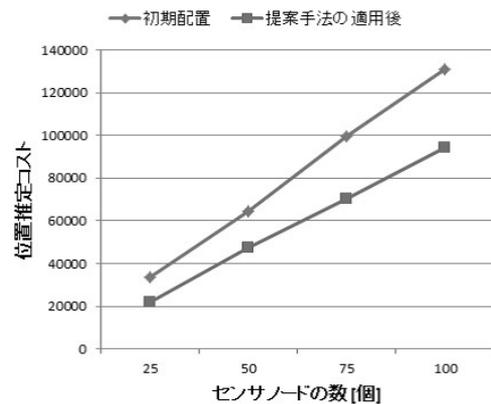


図 13 位置推定コスト
Fig. 13 Localization cost.

提案手法で統合した後の測距点の数を図 12 に、位置推定コストを図 13 に示す。図から、センサノード数が増えるに従って、線形に移動距離、位置推定コストが増加していることが分かる。これは、各センサノードの位置推定に 3 点の測距点が必要であり、それらを巡回するための総距離および測定回数が、ノード数に応じて増えるためである。また、図 12 では白色のグラフが初期の測距点の数、黒色のグラフが提案手法で統合した後の測距点の数を示している。ノード数が 25 から 75 に増えるに従って、統合できた測距点の数も増加しているが、ノード数が 75 のときと 100 のときでは、統合できた測距点の数はどちらも 60 程度であり、ほぼ同数である。このことから、ノード数が増えても、統合できる測距点の数は線形には増加しないことが分かる。

センサノード数が 50 の場合、ランダム配置における総移動距離、位置推定コストはそれぞれ、616,068 m, 64,446 s であり、提案手法では、それぞれ、距離は 454,533 m, 位置推定コストは 47,340 s となった。また、センサノード数が 100 の場合、ランダム配置の総移動距離、位置推定コストはそれぞれ、1,257,685 m, 131,192 s となり、提案手法では、それぞれ、距離は 886,896 m, 位置推定コストは 94,136 s となった。

提案手法は、ノード数 25, 50, 75, 100 のとき、ランダ

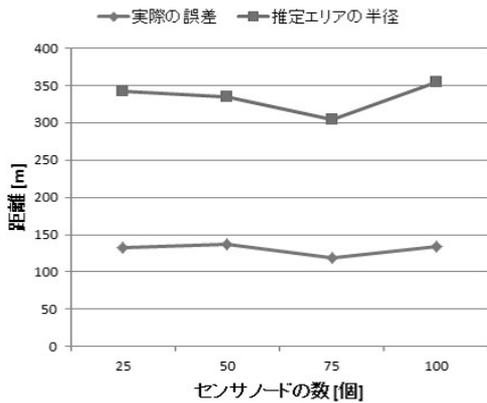


図 14 位置推定の誤差
Fig. 14 Estimation error.

ム配置に比べ、それぞれ、位置推定コストを、34%、27%、29%、28%削減できていることが分かる。

5.1.3 位置推定精度の評価

実験 3 では、実験 2 と同じフィールド、制約を用いて、実際のセンサノードの位置と提案手法で推定した位置の差 (推定誤差) を比較する。実験結果を図 14 に示す。

センサノード数が 25 の場合、平均位置推定誤差は 133 m、平均推定精度 (球の半径) は 342 m となった。センサノード数が 50 の場合、平均位置推定誤差は約 137 m、平均推定精度は約 334 m となった。同様に、センサノード数が 75 の場合の平均誤差、平均精度は、それぞれ、119 m、304 m となり、センサノード数が 100 の場合、134 m、354 m となった。

5.1.4 特殊な機器を用いた既存手法と提案手法との推定精度の比較考察

Erol らの手法 [7] では水中において上下のみの移動 (浮き沈み) が可能なブイ型のアンカノードを多数用いており、その配置密度によってセンサノードの位置推定精度が変化すると思われる。狭い領域にセンサノードを配置する場合、それほど大量のブイを用いずに高精度でセンサノードの位置を推定可能である一方、領域が広大になればなるほど推定精度を保つために必要なブイの数も増え、機器の設置コストがかかってしまう。それに対し、我々の提案手法では領域が広大になったとしても、コスト増加はアンカノードの移動のための燃料代程度である。同コストでの Erol らの手法と我々の提案手法の位置推定精度を比較する場合、領域が広大であるほど提案手法が有利になるとと思われる。

6. おわりに

本論文では、USN において水中センサノードの正確な位置をできるだけ低いコストで推定することを目的に、水面を移動可能な船型のアンカノードを用いた位置推定手法を提案した。提案手法では、水中での音速の変化を考慮したうえでセンサノードの位置を推定でき、かつ、位置推定コストを最小化する測距点群を、Lin-Kernighan 法と共役勾

配法を併用して求める点に特徴がある。

シミュレーションによる性能評価により、測距点間の位置関係が精度に重要な影響を及ぼすこと、提案手法がランダム配置手法に比べ位置推定コストを 27-34%削減できること、位置推定の平均誤差が 119-137 m となることなどを確かめた。

参考文献

- [1] John, H., Wei, Y., Wills, J., Syed, A. and Li, Y.: Research Challenges and Applications for Underwater Sensor Networking, *Proc. IEEE Wireless Communications & Networking Conf. (WCNC 2006)*, pp.228-235 (2006).
- [2] Akyildiz, I.F., Pompili, D. and Melodia, T.: Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges, *Proc. IEEE Elsevier Ad Hoc Networks*, Vol.3, pp.257-279 (2005).
- [3] Hu, L. and Evans, D.: Localization for Mobile Sensor Networks, *Proc. MobiCom 2004*, pp.45-57 (2004).
- [4] He, T., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A. and Abdelzaher, T.: Range-free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks, *Proc. MobiCom 2003*, pp.81-95 (2003).
- [5] Shen, G., Zetic, R., Hirsch, O. and Thoma, R.: Range-Based Localization for UWB Sensor Networks in Realistic Environments, *Proc. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol.2010, No.1 (2010).
- [6] Ling, H. and Znati, T.: Locate More Nodes in Under Water Sensor Networks Using Out-of-Range Information, *Proc. IEEE Wireless Communications & Networking Conf. (WCNC 2008)* (2008).
- [7] Erol, M., Vieira, L.F.M. and Gerla, M.: Localization with Dive'N'Rise (DNR) Beacons for Underwater Acoustic Sensor Networks, *Proc. ACM Int'l Workshop on Underwater Networks (WUWNet '07)*, pp.97-100 (2007).
- [8] Casari, P. and Harris III, A.F.: Energy-efficient Reliable Broadcast in Underwater Acoustic Networks, *Proc. ACM Int'l Workshop on Underwater Networks (WUWNet '07)*, pp.49-56 (2007).
- [9] Vasilescu, I., Detweiler, C. and Rus, D.: AquaNodes: An Underwater Sensor Network, *Proc. ACM Int'l Workshop on Underwater Networks (WUWNet '07)*, pp.85-88 (2007).
- [10] Lin, S. and Kernighan, B.W.: An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, *Oper. Res.*, Vol.21, pp.498-516 (1973).
- [11] Rice, J.: Seaweb Acoustic Communication and Navigation Networks, *Proc. Int'l Conf. on Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results (UAM 2005)* (2005).
- [12] Niculescu, D. and Nath, B.: Ad Hoc Positioning System (APS), *Proc. GLOBECOM 2001*, Vol.5, pp.2926-2931 (2001).
- [13] Chandrasekhar, V., Seah, W.K.G, Choo, Y.S. and Ee, H.V.: Localization in Underwater Sensor Networks - Survey and Challenges, *Proc. ACM Int'l Workshop on Underwater Networks (WUWNet '06)*, pp.33-40 (2006).
- [14] Cheng, W., Teymorian, A.Y., Ma, L., Cheng, X., Lu, X. and Lu, Z.: Underwater Localization in Sparse 3D Acoustic Sensor Networks, *Proc. INFOCOM 2008*, pp.236-240 (2008).
- [15] Zhou, Z., Cui, J.H. and Bagtzoglou, A.: Scalable Local-

- ization with Mobility Prediction for Underwater Sensor Networks, *Proc. INFOCOM 2008*, pp.2198-2206 (2008).
- [16] Uchiyama, A., Fujii, S., Maeda, K., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Ad-hoc Localization in Urban District, *Proc. 26th Annual IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007 Mini-Symp.)*, CD-ROM (2007).
- [17] Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. INFOCOM 2000*, pp.775-784 (2000).
- [18] Kitasuka, T., Nakanishi, T. and Fukuda, A.: Location Estimation System Using Multi-Hop Wireless Network, *Proc. Multimedia, Distributed, Cooperative, and Mobile Symposium 2002* (2002).
- [19] Shewchuk, J.: An Introduction to the Conjugate Gradient Method without the Agonizing Pain, Tech. Rep. CMUCS-TR-94-125, Carnegie Mellon University (1994).
- [20] Li, B., Salter, J., Dempster A.G. and Rizos, C.: Indoor Positioning Techniques Based on Wireless LAN, *Proc. 1st IEEE Int'l Conf. on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications* (2006).
- [21] Japan Oceanographic Data Center, available from <http://www.jodc.go.jp/index-j.html>.
- [22] Mackenzie K.V.: Nine-term Equation for the Sound Speed in the Oceans, *J. Acoustical Society of America*, Vol.70, No.3, pp.807-812 (1981).



勝間 亮 (正会員)

2006年京都教育大学教育学部情報数学科卒業。2011年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年より現在、大阪府立大学理学系研究科助教。ネットワークの研究に従事。



松本 啓司

2008年愛媛大学工学部情報工学科卒業。2010年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2010年より現在、今治造船株式会社にて電装設計チームで電気設計に携わる。



柴田 直樹 (正会員)

1996年、1998年、2001年にそれぞれ大阪大学基礎工学部中退、同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了、同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。2001年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2004年4月より滋賀大学経済学部情報管理学科准教授。2012年9月より現在、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。分散システム、ITS、遺伝的アルゴリズム等の研究に従事。ACM, IEEE 各会員。



安本 慶一 (正会員)

1991年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1995年同大学大学院博士後期課程退学後、滋賀大学経済学部助手。2002年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授、2011年より同研究科教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング、ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。電子情報通信学会, ACM, IEEE 各会員。



伊藤 実 (正会員)

1977年大阪大学基礎工学部卒業、1979年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1979年より大阪大学基礎工学部助手。1986年より大阪大学基礎工学部講師。1989年より大阪大学基礎工学部助教授。1993年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授、現在に至る。工学博士。データベース理論、効率的なアルゴリズム開発等の研究に従事。ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員。