

モバイルアンカノードを用いた低コストな 水中センサノードの位置推定法

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

本稿では、水面を移動可能なアンカノードを用いて水中センサネットワークの全てのセンサノードの位置を低コストで推定する三辺測量に基づいた方法を提案する。提案手法では、コスト最適な水面上の測距点の集合を求めるため、各センサノードにつきアフィン独立な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位置推定にかかるコストの最小化を行う。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。シミュレーション実験の結果、提案手法は、一般的な方法より約30%少ないコストで平均誤差約130mでノードの位置を推定できた。

Low-Cost Localization Method for Underwater Sensor Nodes using Mobile Anchor

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

In this paper, we propose a trilateration-based localization method for Underwater Sensor Networks that estimates sensor nodes positions on the seabed with low cost utilizing an anchor node moving on the sea surface. In our method, first we decide three affinely independent measurement points on sea-surface for each node at random and derive the shortest path for visiting all the points with the Lin-Kernighan method. Then, we apply the Conjugate Gradient method to the derived route to minimize the total estimation cost. Since the measured distances involve some error due to variation of acoustic signal velocity in water, we put some constraints on the three points for each node. Our simulations showed that our method estimates positions of all nodes with about 30% lower costs than a conventional method with about 130m of average estimation error.

1. はじめに

WSN (Wireless Sensor Network) を水中に応用する USN (Underwater Sensor Network) の研究が近年盛んに行われている。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⁾、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³⁾、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⁴⁾ などが提案されている。しかし、これら手法は、位置推定の精度や、特殊な機器の使用・導入に伴う設置・維持コストの点で問題があった。

本稿では、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。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

^{†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

通信保証エリアの3つの測距点が構成する三角形が鋭角三角形であるという2つの制約を設ける。アンカノードが全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。また、一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場合には、該当する複数の測距点を統合し、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のが分かった。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°の時、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、その時の推定誤差は平均119-137mとなった。

2. 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。

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上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。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、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、塩分濃度等により変化する³⁾ため、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、全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全ての集合を $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 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 $E(s)$ を中心とする水面上に平行な半径 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

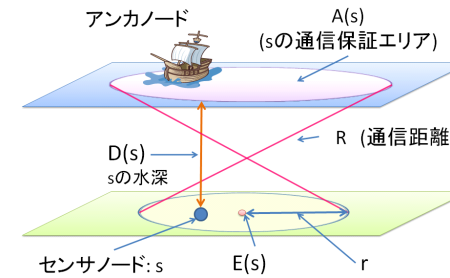


図1 フィールドの概要図

置を $a.inipos$ とし、移動速度を w 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、塩分濃度等により変化する。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 $p_{s,1}, p_{s,2}, p_{s,3} \in A(s)$ 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 $p_{s,1}, p_{s,2}, p_{s,3}$ から s までの距離をそれぞれ測定できる。 $p_{s,1}$ 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3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3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。

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

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

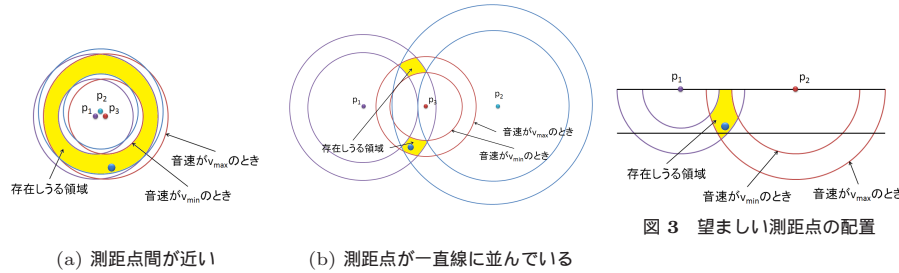


図 2 望ましくない測距点の配置

図 3 望ましい測距点の配置

位置を推定するため、アンカノードは全ての測距点を巡回しなければいけない。アンカノードの移動経路を $Route = [p_0, p_1, \dots, p_m]$ とする。総移動距離 $L(Route)$ は以下のように表すことができる。

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

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。この時間には碇を下ろす、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と定義する。

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

測距点の数が少なければ、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 $C(Route)$ を、速度 w のアンカノードが $L(Route)$ 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 $T(Route)$ の和と定義し、以下の式で表す。

$$C(Route) = \frac{L(Route)}{w} + T(Route) \quad (4)$$

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、 $C(Route)$ 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 $Route$ を求める。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、という制約を満たす、位置推定コスト $C(p_1, \dots, p_m)$ 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。

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

3. 提案手法

本章では、2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。

3.1 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。

本手法は大きくわけて、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。アルゴリズムのフローチャートを図4に示す。

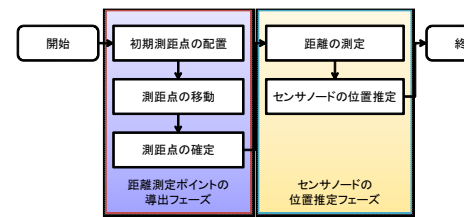


図 4 アルゴリズムのフローチャート

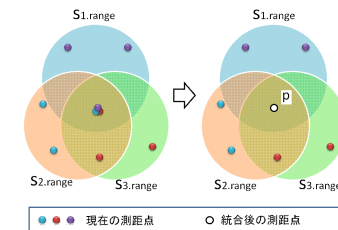


図 5 複数測距点の統合

測距点の導出フェーズでは、式(1)を満たしつつ位置推定コスト $C(Route)$ が小さくなるように測距点を決定する。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。

以下では、提案手法の各フェーズについて詳しく述べる。

3.2 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

*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。

通信を行う地点を導出する．

3.2.1 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、センサノード毎に 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) のような制約を置く．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、3.2.1 節で決定したすべての測距点を周りかつ移動距離の少ない経路 $Route$ を導出するために、Lin-Kernighan 法⁵⁾ を用いる．

3.2.2 位置推定コスト関数への変換

位置推定コストは、2 章で定義した通り、アンカノード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 $Route$ を通ったときの測距点の並び順を $Route = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ とすると、全体の移動距離は

$$L(p_1, \dots, p_m) = |p_2 - p_1| + |p_3 - p_2| + \dots + |p_m - p_{m-1}|$$

となる．ただし、 $|p_{i+1} - p_i|$ は測距点 p_{i+1}, p_i 間の距離である．

また、アンカノードの移動速度を w 、全ての測距点での距離測定にかかる時間を $T(Route) = m \cdot t$ と表し、式 (4) の位置推定コストへ変換する．

3.2.3 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、3.2.2 節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¹¹⁾ 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挙げられる．

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 $Route$ を通ったときの測距点の並び順を $Route = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 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

$C(Route)$ の値を更新する．

(Step 1) 全ての p_i に対して、関数 $C(p_1, \dots, p_m)$ に共役勾配法を適用し、以下を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) 全ての $p_i \in P$ を Step 1 で算出した方向に移動させる．

(Step 3) もし、 p の新しい位置 p' 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) 全ての測距点 $p \in P$ が移動しなくなれば終了する．そうでなければ、Step 1 へ．

3.2.4 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．3.2.3 節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、図 5 のように、複数のセンサノード s_1, \dots, s_k の測定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．

3.3 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．

3.3.1 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の時間を付加する．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、センサノードは自信がもつ固有の ID に応じて信号を送信する時刻を遅らせることで、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．

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

この時間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．

3.3.2 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、

表 1 シミュレーションで使用したパラメタ

パラメタ	値
フィールド, 水深 (日本近海のデータ ¹³⁾)	10000m × 10000m, 1000–4000m
最大通信距離 R	5000m ³⁾
センサノード数	25, 50, 75, 100
音波の速度 (水温, 塩分濃度等のと りうる範囲を考慮して定義)	1480–1520m/s
アンカノードの移動速度 w	40km/h
各測距点での測定時間	60s
同一ノードの測距点間の距離 d	1000–4000m
海底の存在エリアの半径 r	0–0.3 × 水深

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

という関係式になる。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。

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うと、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、その交点を全て求め、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。それらの交点を全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。

4. 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タは、既存文献を参考に、表1のように設定した。

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 1000, 2000, 3000, 4000メートルと変化させ、測距点がなす三角形を二等辺三角形とし、一つの角度を 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

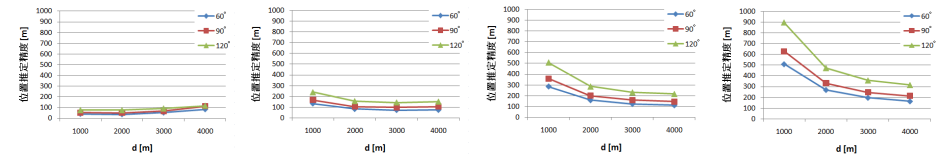


図 6 水深 1000m の場合 図 7 水深 2000m の場合 図 8 水深 3000m の場合 図 9 水深 4000m の場合

ム配置) と提案手法適用後とで比較した。

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。

4.1 実験結果

4.1.1 測距点の配置の違いによる精度の評価

水深が 1000m, 2000m, 3000m, 4000m の時の実験結果をそれぞれ、図 6, 7, 8, 9 に示す。水深が 1000m の時、角度や d の値を変化させても、位置推定精度は概ね 100m 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 2000m の時、 $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ の場合は、 d の値が小さい時に位置推定精度が悪化した。概ね推定誤差 100m 前後での位置推定ができていた。 $\theta = 120^\circ$ の場合は、全体的に位置推定精度が若干悪化し、 d が 1000m の時は、位置推定精度が 200m を超えた。水深が 3000m の時には、2000m 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 1000m 時と $\theta = 120^\circ$ の時の、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している。最後に、水深 4000m の時、 d の値が小さいと θ の値に関わらず、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、3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。

4.1.2 位置推定コストの評価

実験2では、提案手法における位置推定コストの削減率を評価する実験を行う。

10,000m × 10,000m 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の結果を踏まえ、測距点間の距離 d を 2000m, $\theta_{min} = 0^\circ$, $\theta_{max} = 90^\circ$ とした。

アンカノードの移動距離を図 10、提案手法で統合できた測距点の数を図 11 に、位置推定コストを図 12 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、一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

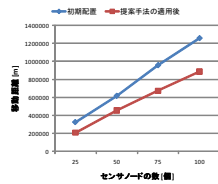


図 10 総移動距離

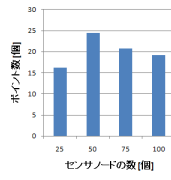


図 11 測距点の結合数

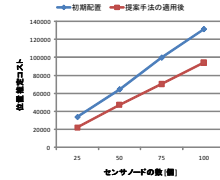


図 12 位置推定コスト

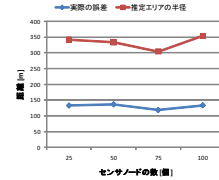


図 13 位置推定の誤差

参考文献

- 1) Ling, H. and Znati, T.: "Locate More Nodes in Under Water Sensor Networks Using Out-of-Range Information," *Proc. of IEEE Wireless Communications & Networking Conf. (WCNC 2008)* (2008).
- 2) Erol, M., F.M.Vieira, L. and Gerla, Mario.: "Localization with Dive'N'Rise (DNR) Beacons for Underwater Acoustic Sensor Networks," *Proc. of ACM 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. of ACM 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. of ACM 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 Traveling Salesman Problem," *Oper. Res.* 21, pp.498-516 (1973).
- 6) Rice, J.: "Seaweb Acoustic Communication and Navigation Networks," *Proc. of Int'l. Conf. on Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results (UAM 2005)*, (2005).
- 7) Niculescu, D. and Nath, B.: "Ad Hoc Positioning System(APS)," *Proc. of 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. of ACM 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 Networks," *Proc. of 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. of INFOCOM 2008*, pp. 2198-2206 (2008).
- 11) Shewchuk, J.: "An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain," *Tech. Rep. CMUCS- TR-94-125, Carnegie Mellon University* (1994).
- 12) Li, B., Salter, J., Dempster A.G., and Rizos, C.: "Indoor Positioning Techniques Based on Wireless LAN," *Proc. of 1st IEEE Int'l. Conf. on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications* (2006).
- 13) 日本海洋データセンター: http://www.jodc.go.jp/index_j.html

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 11 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、616,068m、64,446s であり、提案手法では、それぞれ、距離は 454,533m、位置推定コストは 47,340s 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、1,257,685m、131,192s となり、提案手法では、それぞれ、距離は 886,896m、位置推定コストは 94,136s となった。

提案手法は、ノード数 25, 50, 75, 100 の時、ランダム配置に比べ、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。

4.1.3 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 13 に示す。

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

5. おわりに

本稿では、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、高精度に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 119-137m となることなどを確かめた。