

海中 AUV (Autonomous Unmanned Vehicle) 対応測位通信システムにおける SSBL (Super Short Base Line) 法を用いた測位精度向上に関する検討

山里 昌一郎[†]、和田 知久[‡]

[†] 琉球大学理工学研究科情報工学専攻 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1

[‡] 琉球大学工学部工学科知能情報コース 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1

E-mail: [†] k198582@ie.u-ryukyu.ac.jp, [‡] wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

概要 海底地図作成のために運行している海中 AUV と海上母船間の SSBL 測位通信システムの測位精度向上について検討した。3×3 のアレイトランスデューサーがそれぞれ受信するロングチャープ信号とテンプレートとして用意したロングチャープ信号との相関処理を行い、その相関のピークポイントでの相関値の実数成分と虚数成分から逆正接処理により位相を推定し UL 信号の到着時間差の測定の精度を向上させることができた。そして求めた到着時間差により SSBL 方式を用いることで測位通信システムの精度を向上させることが出来た。また計算機シミュレーションによる実験からアレイトランスデューサーの隣接するトランスデューサー間の距離を変えることによる精度の変化を明らかにした。

キーワード 海中通信, チャープ信号, SSBL, AUV

Improvements on position-measurement accuracy of underwater acoustic positioning & communication system for Autonomous Unmanned Vehicles

Shoitiro YAMAZATO[†] Tomohisa WADA[‡]

[†] Graduate School of Engineering and Science (Master's Program) Information Engineering Course, University of the Ryukyu 1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami-gun, Okinawa, Japan

[‡] Faculty of Engineering Computer Science & Intelligent Systems, University of the Ryukyu 1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami-gun, Okinawa, Japan

E-mail: [†] k198582@ie.u-ryukyu.ac.jp, [‡] wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

Abstract The improvement of the positioning accuracy of the SSBL positioning communication system between the underwater AUV and the mother ship operating to create the seafloor map was examined. Correlation processing is performed between the long chirp signal received by each 3 × 3 array transducer and the long chirp signal prepared as a template, and the phase is estimated by Arctangent processing from the real and imaginary components of the correlation value at the peak point of the correlation. We were able to improve the accuracy of the UL signal arrival time difference measurement. It was possible to improve the accuracy of the positioning communication system by using the SSBL method from the calculated arrival time difference. In addition, it was clarified from the experiment by computer simulation that the accuracy changed by changing the distance between the adjacent transducers of the array transducer.

Keywords Underwater communication, chirp signal, SSBL, AUV

1. はじめに

周囲を海に囲まれた日本の発展にとって、海洋開発が果たす役割は近年益々大きくなってきている。海洋資源を例に挙げれば、和歌山沖や新潟沖ではメタンハイドレートの存在が確認され、沖縄本島北側の沖縄トラフでは熱水鉱床が複数個所で確認され、試験的な採鉱も行われている。地球全体に視野を広げれば、地球の総面積で海が占める割合は約 71% で、海の平均深度は約 3800m であり、広大な面積の深海部の海洋地形マップを作成することが大きな課題であり、今後の海洋

開発を加速するために、より詳細な海底地図の作成の必要性が高まっており、世界的な海底地図を計測するコンテストも実施されている。

海底地図の作成には、海面から音波を使ってその反射波の遅延時間を計測することにより、深度を計測する方法が一般的である。しかし、3000m の深海地図を海面からの音響測定では地図の解像度を向上することは困難で、一般的には AUV (Autonomous Unmanned Vehicle) などの潜水艇を用いて、海底近くから音響測定により解像度を向上させて海底地形を計測する方法

が用いられている。

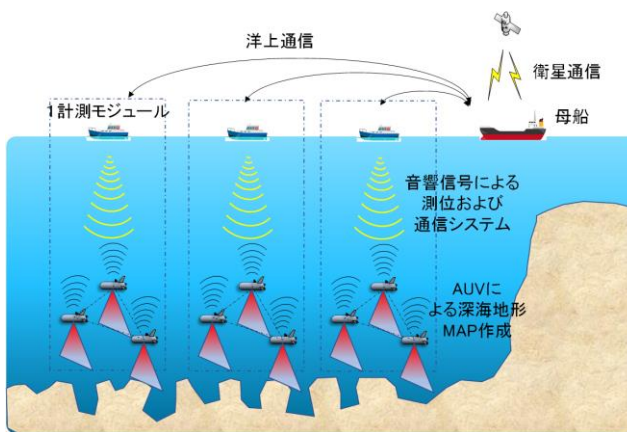


Fig.1 AUV 船団による深海マップ計測システム

私達研究チームでは、AUVを用いた海底地図計測の測定スピードの向上のために、図1で示すようなAUV船団による測定システムの研究開発を行っている。同一深度にある3台のAUVを協調動作させるために、海面母船とAUV、そしてAUV間で音響による通信を実現し、同時に、AUVの位置を海面母船が測位することで、各AUVに自船の位置を知らせることができる1計測モジュール（ファミリー）の実現を目指している。そして、そのようなファミリーを複数用意し、平行で海底地図を計測することにより海底地形マップ作成スピードの向上を目指している。本論文では、特に海上母船でのAUV測位精度に関する検討を行ったので、その内容を報告する。

2. 海底地形マップ計測モジュール（ファミリー）

図2に3台のAUVと1隻の母船からなる1ファミリーの構成を示す。図では、母船をBase Station (BS)、AUVをUser Equipment (UE)と示している。3台のUE0,

UE1, UE2は1辺150mの正三角形の位置を保つようにコントロールされる。そして、BSから3台のUEへの

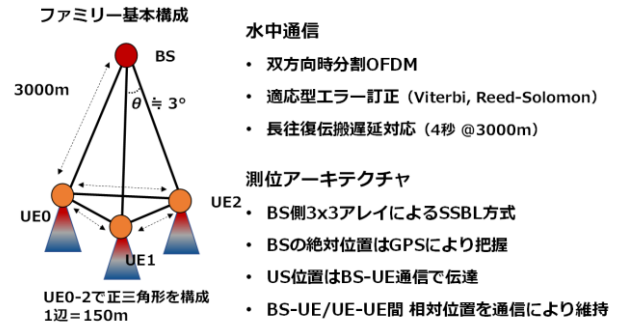


Fig.2 AUVファミリーの構成

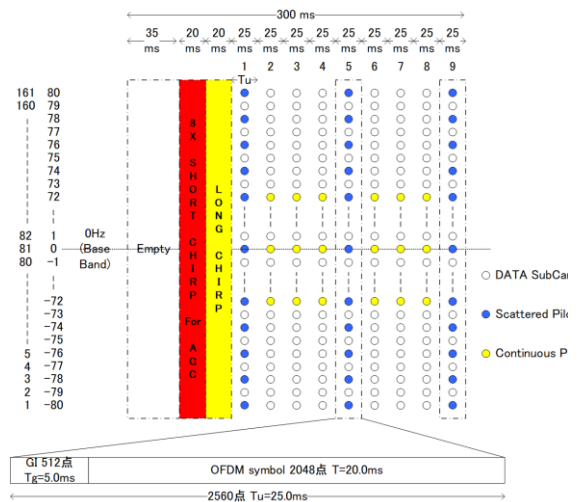


Fig.3 信号パッケージ構成

ダウンリンク (DL) 通信と、各 UE から BS へのアップリンク (UL) 通信がサポートされている。各 UE からのアップリンク通信は時分割通信である。UE のアップリンクを他の UE も受信し、UE 間の通信も実現される。

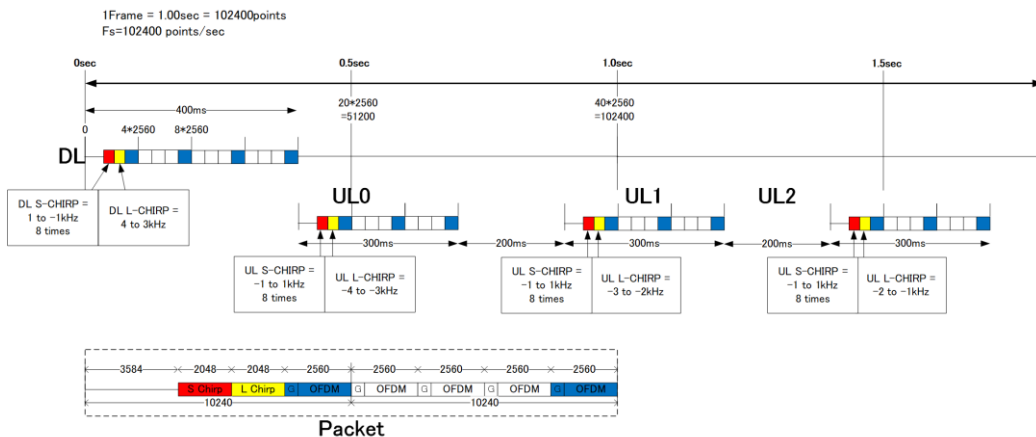


Fig.4 DL および UL 信号

音響通信には、時分割の OFDM 通信[1-2]が用いられている。BS での各 UE の測位は、各 UE からの UL 信号を 3x3 でアレイ配置されたトランスデューサーにて受信し、SSBL(Super Short Base Line)法[3]を用いて BS から見た UE の角度方向を計測する。図 3 に使用する音響信号パッケージを示す。最初の 20ms 区間で 8 回繰り返すチャープ信号からなるショートチャープ、次の 20ms 区間で 1 回のチャープ信号であるロングチャープ信号がある。その後、図 3 では 9 つの OFDM 信号が送信される。各 OFDM シンボルは図中下方に示すように、20ms の有効 OFDM 信号とその信号の最期の 5ms を先頭にコピーしたガードインターバル(GI)信号 5ms を足した 25ms 長である。1 番目、5 番目、9 番目の OFDM シンボルの多数の青丸はスキャタードパイロット信号であり、チャネル推定などに利用される。

図 4 は、BS からすべての UE への DL 信号と、各 UE からの UL 信号の全体像を示している。図中赤で示されるショートチャープは、受信側でのオートゲインコントロールに用いられ、黄色で示されるロングチャープは UE 側での受信時の同期と BS 側では受信時の同期とタイミング測定による測位に用いられる。図中各チャープの周波数掃引の値が示されているが、これらはベースバンド処理での値である。ロングチャープの周波数掃引の値は異なっており、これらの違いでそれぞれのパケットの区別をすることができる。

3. 測位システム

図 5 に SSBL 方式を用いた測位システム構成を示す。

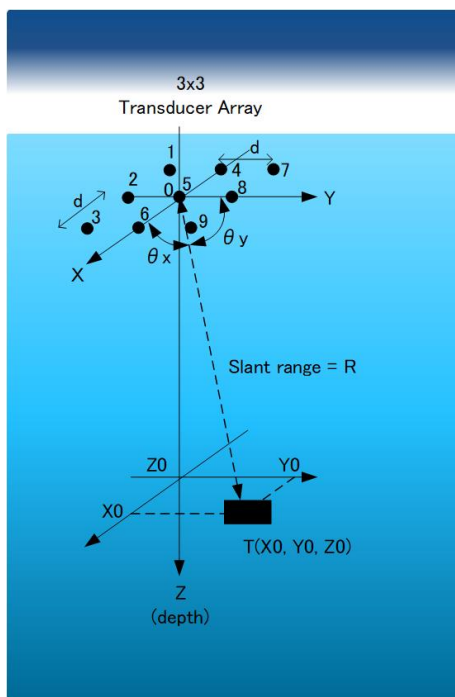


Fig.5 3x3 測位アレイとターゲット

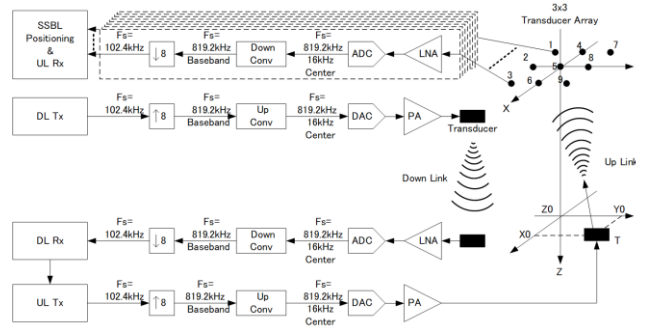


Fig.6 測位・通信システムブロック図

BS 側に配置された 3x3 のトランスデューサーアレイは隣接トランスデューサー間の距離(ピッチ)が $d(\text{mm})$ の正方形アレイであり、海底ターゲット T からの UL 信号を受信して、その位置を推定する。図中の BS とターゲット間の直線距離スラントレンジ R は、DL 信号送信後に UE 側が UL 信号を送信し、その往復受信時間から UE での遅延時間を引き算することにより音波の往復遅延時間を計測することで、推定する。

図 6 はより詳細な測位・通信システムのブロック図である。図の左端にある 4 つの四角は DL および UL 用の送信 Tx および受信 Rx の信号処理ブロックで、サンプリング周波数 $F_s=102.4\text{kHz}$ である。今回想定したハードウェアシステムはその 8 倍の $F_s=819.2\text{kHz}$ システムであり、図で示すようなアップサンプル、デシメーション、アップコンバージョン、ダウンコンバージョンを行っている。SSBL 方式を用いた測位では高精度に 3x3 の 9 つのトランスデューサーで受信される UL 信号の時間差を計測する必要がある。トランスデューサーピッチ d が 20mm 程度とすると、ターゲット T から 9 つのトランスデューサーへの伝搬距離の差は小さく、1mm とするとその時間差は $0.67\mu\text{s}$ と小さい。これは信号処理部のサンプリング周期 $T_s=1/F_s=9.765625\mu\text{s}$ と比べると、10%以下であり、サンプリング周波数の 1 桁下の時間解像度が必要ということになる。

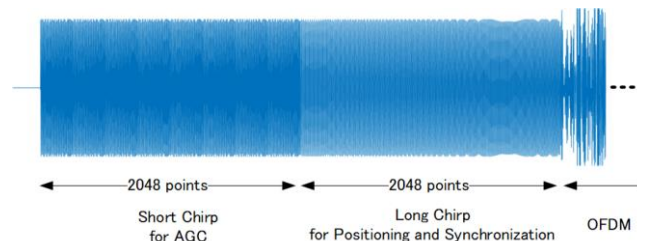


Fig.7 プリアンブル信号

このような精度の高い時間差の計測をするために、本システムでは先に述べたようにロングチャープ信号を用いている。図 7 は、アップコンバージョン後、す

なわちパスバンド信号パケットの先頭部分をプロットしたものである。ショートチャープ領域では8回の繰り返し信号がありその後、20msのロングチャープ信号があり、OFDM信号へと連結している。SSBL測位では、このロングチャープ信号を用いる。

図8は測位信号処理を示すブロック図である。9つのアレイからの信号はロングチャープ検出処理が行われ、それぞれ推定位相信号 $\hat{\theta}$ が出力される。そして、この位相の差を時間差に換算することで、ターゲットの角度方向を推定している。ロングチャープ検出処理では、テンプレートとしてのロングチャープ信号（複素ベースバンド信号）との相関処理を行い、その相関のピークポイント（ T_s の解像度）での、相関値の実数成分と虚数成分から逆正接処理により位相を推定している。

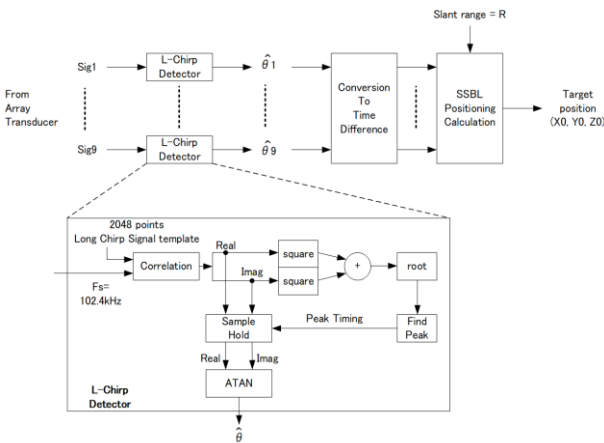


Fig.8 測位信号処理ブロック図

4. 詳細な推定手法

図9は図11にて表現されているアレイトランスデューサー番号のNO.5にあたる受信アレイが受信したロ

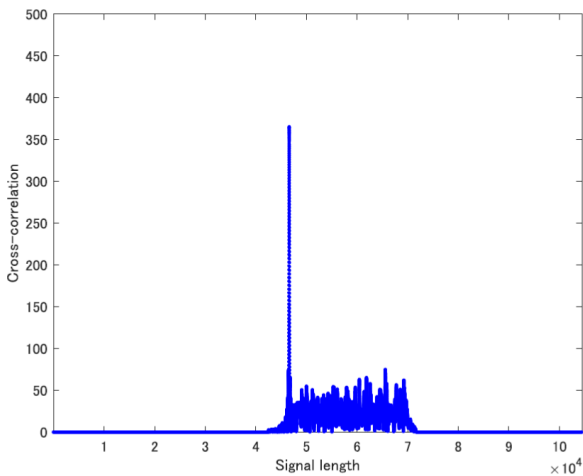


Fig.9 No5 受信アレイ相関処理結果

ングチャープ信号とテンプレート信号の相関処理で得られた信号である。相関処理には相互相関関数を使用した。No.5受信アレイでは図9の最大点の横軸地点を基準点として取得する。その他の受信アレイでは相関処理で得られた相関値の内、先ほど基準としたNo.5の最大値地点に在る値を用いる。こうすることで図10のように実数成分と虚数成分をもった九つの相関値が得られる。そして、それぞれの相関値に対し逆正接処理を行うことで各受信アレイの位相差が推定できる。

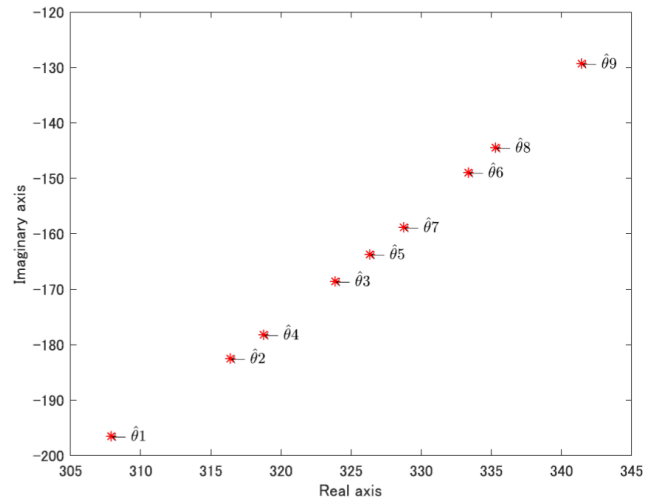


Fig.10 各受信アレイの位相差推定用の相関値例

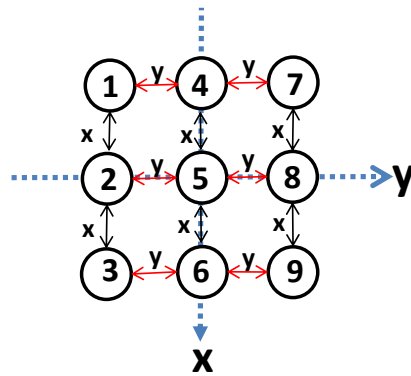


Fig.11 アレイトランスデューサー番号

先ほど得た位相差を元に時間変換処理を行う。位相を時間に変換するために先ほど得た9つの位相差を各受信アレイが受けとったUL信号の到着時間差で割った平均値を補正值として保存する。これを先ほど推定した位相差と掛け、サンプリング周期Fsで割ることで時間に変換される。時間差として取得するべく各トランスデューサーの時間から中央のトランスデューサーの時間を差し引く。次に手に入れた時間差 θ を基にSSBL方式を用いてターゲットTの位置を推定する。9つの

アレイトランスデューサーを用いた SSBL ではアレイの x 方向と y 方向のそれぞれの音波の到来角度 θ_x と θ_y が必要になる。これらは(1)と(2)で求めることができる。

$$\theta_x = \text{ArcCos}(X * C/d) \quad (1)$$

$$\theta_y = \text{ArcCos}(Y * C/d) \quad (2)$$

この時、X は図 11 に描かれているアレイトランスデューサーの x 軸側 1-2,3-2,5-4,6-5,8-7,9-8 間の時間差の平均値、Y は図 11 に描かれているアレイトランスデューサーの y 軸側 4-1,7-4,5-2,8-5,6-3,9-6 の時間差の平均値を表している。C は海中における音速、d(mm)は隣接トランスデューサー間の距離を表す。

それぞれ求めた音波の到来角度 θ_x, θ_y から AUV の座標位置(z0,x0,y0)を求めていく。図.5 の OZT 平面内において θ_x, θ_y は式(3)を満たす。

$$\cos^2\theta_z = 1 - \cos^2\theta_x - \cos^2\theta_y \quad (3)$$

そのため T の位置座標である T(X0,Y0,Z0)はそれぞれ、式(4)-(6)となる。R はスラントレンジと呼ばれ、BS-UE 間の音波の往復時間を計測することで求めることができる。

$$X0 = R \cos\theta_x \quad (4)$$

$$Y0 = R \cos\theta_y \quad (5)$$

$$Z0 = R \sqrt{1 - \cos^2\theta_x - \sin^2\theta_y} \quad (6)$$

5. シミュレーション評価

5.1 評価方法

上記の推定手法についてコンピュータシミュレーションを行いその性能について評価した。

評価方法は以下の式(7)を用いて計算した。式中の xt, yt, zt はそれぞれ AUV の実座標の x 軸, y 軸, z 軸に対応しており、X0, Y0, Z0 は本測位システムが実際に推定した座標である。G を実座標からの位置測位誤差の距離と考える。このとき値が低いほど測位誤差が少ないものとする。

$$G = \sqrt{(xt - X0)^2 + (yt - Y0)^2 + (zt - Z0)^2} \quad (7)$$

5.2 評価条件

トランスデューサー同士の距離 d (mm) がそれぞれ [17mm, 34mm, 68mm] の時、どのような変化を見せるのか検証した。測位推定用の信号にはランダムノイズが付与されており、SNR=20dB で検証した。

以上の条件で各深海 1000m~5000m でそれぞれ 100 回ずつシミュレーションを行い、得られた各深さの位置

測位誤差の平均と標準偏差を求める。

5.3 実験結果

図 12 は各 100 回の位置推定誤差の平均値と標準偏差を図示したものである。これは AUV の実座標を x=10m, y=20m と想定し、深海 1000~5000m における位置推定誤差をシミュレートしたものである。図からは海中の浅いところから順に位置推定誤差の平均が大きくなっていくことが見て取れる。図の縦棒は n=100 における位置推定誤差の標準偏差で誤差の広がりを表している。これも同様に海中の浅いところから順に大きくなっている。また、トランスデューサー同士の距離 d (mm) が一番小さい 17mm の時最も測位推定したときに測位誤差が生まれやすく d の大きさを 2 倍 4 倍とするたびに測位誤差は半分近く減少していき誤差の範囲も小さくなっていくことが読み取れる。

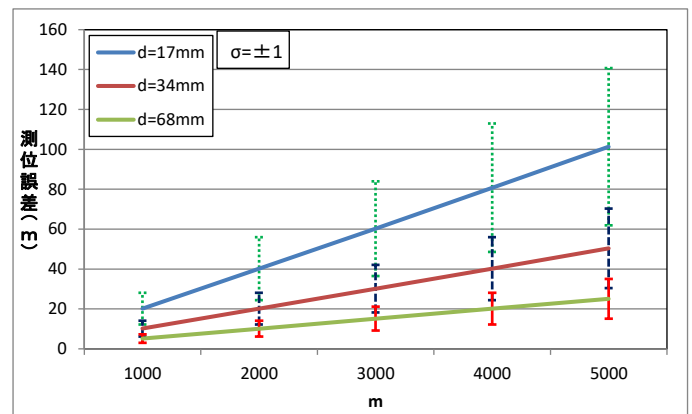


Fig.12 x=10,y=20 のシミュレーション結果

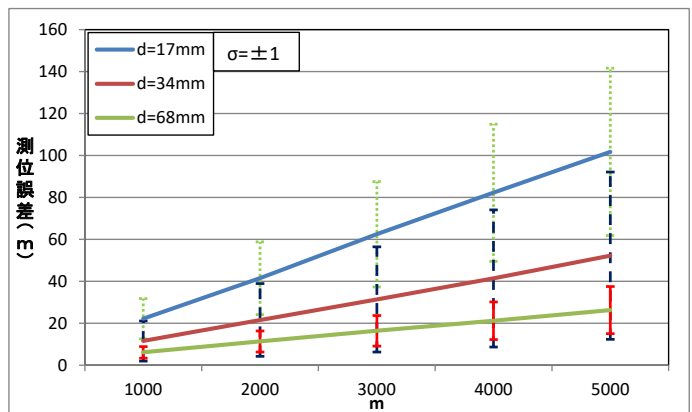


Fig 13 x=150,y=200 のシミュレーション結果

図 13 は各 100 回の位置推定誤差の平均値と標準偏差を図示したものである。これは AUV の実座標を x=150m, y=200m と想定し、深海 1000~5000m における位置推定誤差をシミュレートしたものである。この図も図 12 とほぼ同様のシミュレート結果を示している。このことから、この測位システムは 3×3 アレイトラ

ンスデューサーの d の大きさや測位する海中の深さに依存していることが分かった。例として $x=10\text{m}, y=20\text{m}$, 深度が 3000m 場合 $d=17\text{mm}$ では $\pm 23\text{m}$ 前後の誤差, $d=34\text{mm}$ では $\pm 11\text{m}$ 前後, $d=68\text{mm}$ では $\pm 6\text{m}$ として測位精度が向上する。

6. まとめ

本研究では、AUV を用いた海底地図計測の測定スピードの向上のために AUV 測位精度の向上に関する検討に取り組んだ。9つのアレイトランスデューサーが受け取ったロングチャープ信号の時間差の精度を相関処理で得られる位相差を用いて向上させることが出来た。シミュレーション実験では、アレイトランスデューサーの同士の距離 d や測位する海中の深さに依存することを示した。

この測位通信システムでは AUV が海上母船へ向け放つ通信が多いため AUV のバッテリー稼働時間が短いという課題が見つかったため今後の課題として省電力化について取り組んでいく。

7. 謝辞

本研究は 2017 年 4 月から開始された、公益財団法人日本財団および株式会社リバネスの共同事業である「XY 軸方向の分解能が 100m 以下の海底地形図を地球上の全海域に渡って作成することを最終目標とし、その実現を飛躍的に加速しうる技術を日本国内から生み出すことを目的」とした DeSET プロジェクトの TEAM06 の“海底 AI マップ作成オープンプラットフォームの構築”チームの活動の一部として測位の今後の精度改善を目指して検討を行ったものである。情報を頂いた関係各位のご協力に感謝いたします。

文 献

- [1] Shiho Oshiro, Yuta Sakima, Ryuki Chibana, Atsushi Kinjo, Yusuke Onna, Suguru Kuniyoshi, Rie Saotome, Hajime Toma, Fumiaki Takemura, Taisaku Suzuki, and Tomohisa Wada, “A Prototype Wireless Underwater Robot Control system using a 32 kHz Bandwidth Underwater Small Area Acoustic Network (USAAN),”, MTS/IEEE OCEANS 2019, Seattle USA, October 27-31nd 2019.
- [2] Atsushi Kinjo, Yusuke Onna, Suguru Kuniyoshi, Rie Saotome, Taisaku Suzuki, and Tomohisa Wada, “A 32kHz Bandwidth, Robust TDD Synchronization, Underwater Small Area Acoustic Network (USAAN) System,” MTS/IEEE OCEANS 2018, Charleston USA, October 22-25nd 2018.
- [3] 海洋音響学会編、“海洋音響の基礎と応用、” 海洋音響学会, pp.236-245, 2004.