

平成21年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号：平成21年2月9日付 第08—2号

研究開発項目：（20指定）② に関するもの

栈橋式構造物水中支持部の 全自動点検手法（その2）

平成22年4月30日

東京大学

巻 俊宏

目次

1、はじめに	2
2、AUV の観測経路自動生成アルゴリズムの開発	2
2－1　はじめに	2
2－2　経路計画手法	3
2－3　軌道制御手法	6
3、測位・経路生成手法の有効性の検証	8
3－1　AUV Tri-Dog 1	8
3－2　実験方法	8
3－3　実験結果	9
4、音響による相対測位・通信手法の開発	14
5、まとめ	17
文献目録	18

1、はじめに

現在建設中の羽田空港 D 滑走路のような栈橋式大規模構造物を安全に運用するためには、厳しい腐食環境にある床下・水中支持部の定期点検が不可欠である。しかしながらこのような大規模構造物の支持部は閉鎖空間に存在するとともに膨大な数に上るため、人間による点検は非効率かつ危険な作業となってしまう。

本研究では自律型水中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) を用いて栈橋式大規模構造物の水中支持部 (ジャケット) の点検を全自動化することにより、このような危険な作業から人間を解放するとともに、点検作業の効率化・低コスト化を目指す。また、本手法は構造物そのものの点検のみならず、周辺の海底の深淺測量や巡回パトロールなど、構造物周辺への AUV 展開全般に応用可能である。

本年度は、上記の目的を実現するために

AUV の観測経路自動生成アルゴリズムの開発

測位・経路生成手法の有効性の検証

音響による相対測位・通信手法の開発

について研究を実施した。以下にその詳細を報告する。

2、AUV の観測経路自動生成アルゴリズムの開発

2-1 はじめに

港湾施設や滑走路といった大規模な栈橋式水上構造物を安全に運用するためには、厳しい腐食環境にある床下・水中支持部の定期点検が不可欠である。しかしながらこのような大規模構造物の支持部は閉鎖空間に存在するとともに膨大な数に上るため、人間による点検は非効率かつ危険な作業となってしまう。例えば 2010 年 10 月に供用開始予定の羽田空港 D 滑走路においては、 $1,100 \times 500$ [m] の栈橋部に一辺約 30~60 m のジャケット (補強材付の栈橋ブロック) が 238 基設置されている [1]。図 1 はこのうち連絡誘導路部のジャケットである。

本研究では自律型水中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) を用いて栈橋式大規模構造物の水中支持部 (以下ジャケットと呼ぶ) の点検を全自動化することにより、このような危険な作業から人間を解放するとともに、点検作業の効率化・低コスト化を目指す。AUV はエネルギー源と頭脳を内蔵した水中ロボットであり、人間による遠隔制御を受けることなく全自動で長時間・広範囲を観測することができる。またケーブルが不要のため観測対象に絡まる恐れがなく、効率的な観測経路を選択できる。AUV は現在は水深測量などの比較的単純なミッションにおいて実用化されている一方で、構造物の点検に向けた研究も進められている [2] [3] [4]。

本稿ではジャケット表面の画像観測や肉厚計測を想定し、AUV がジャケット表面に対して至近距離を保ちながら周回し、ジャケット全体を漏れなく観測するための経路計画手法ならびに軌道制御手法を提案する。本手法の前提条件は以下の通りである。

- ・観測対象の配置と形状が既知であること
- ・観測対象は円柱から構成されていること

- ・観測対象に対する AUV の相対的な位置・姿勢が観測中リアルタイムに提供されること
- ・AUV はサージ（前後移動）、ヒープ（上下移動）、スウェイ（横移動）、ヨー（旋回）を独立して制御できること

本手法と、平成 21 年度の SCOPE 研究開発助成を受けて開発したジャケットに対する相対測位手法 [5] [6]を組み合わせることで、AUV によるジャケットの全自動観測が可能となる。本手法はジャケットだけでなく、石油掘削リグや人工漁礁といった他の水中構造物にも適用することができる。

2-2 経路計画手法

観測経路は AUV の測位座標系における 3 次元座標（ウェイポイント）の集合として定義する。単一水深における経路計画の流れを図 2 に示す。まず、ジャケットを構成する全ての円柱の断面を周回する初期ルートを生成し、次に初期ルートのうちジャケットへの衝突が予想されるルートを連結することで当該水深における観測経路を決定する。この処理を複数の水深に対して行うことで、ジャケット全体を観測するための経路を得る。



Fig. 1 Jacket structure of the D-runway of Haneda airport (connection bridge)
(http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/haneda/haneda/haneda_saikaku/photo/b/080625b.jpg)

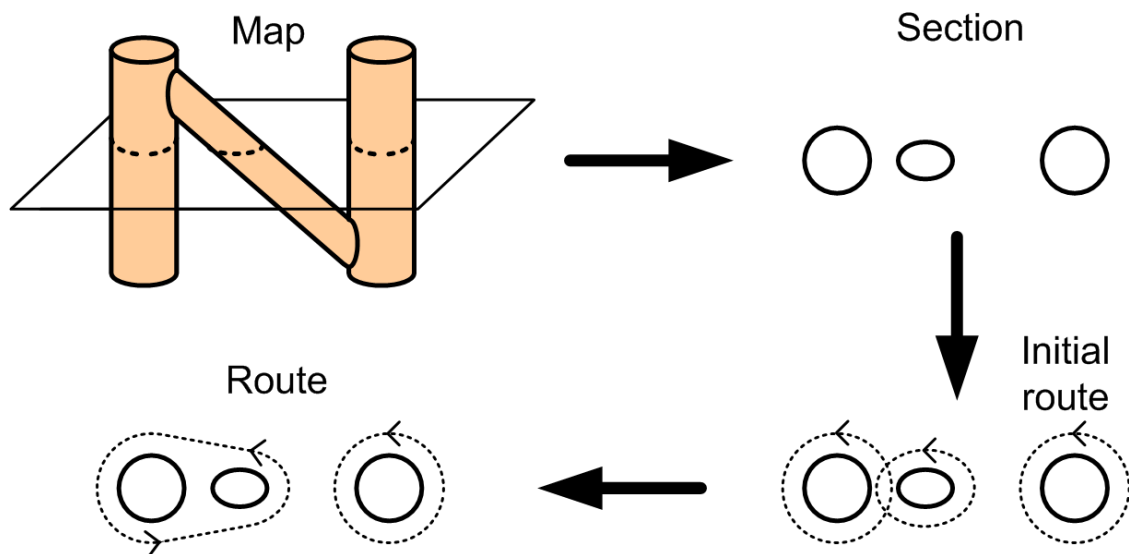


Fig. 2 Path-planning procedure for a single depth.

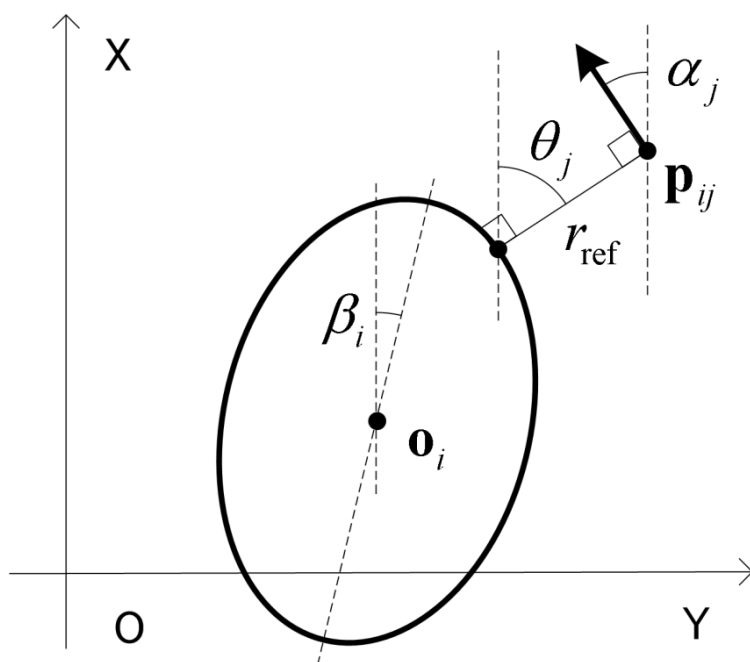


Fig. 3 j th waypoint of the initial route around the i th section.

観測対象であるジャケットの配置・形状は環境マップ M としてあらかじめ与えておく。ジャケットは円柱の集合であると仮定したため、環境マップ M にはジャケットを構成する各円柱の両端の座標 p, q と半径 r が含まれる。

以下、初期ルート生成、ルート連結の順に述べる。本手法は左回り、右回りどちらの巡回方向にも適用可能であるが、説明の都合上、左回りとして説明する。

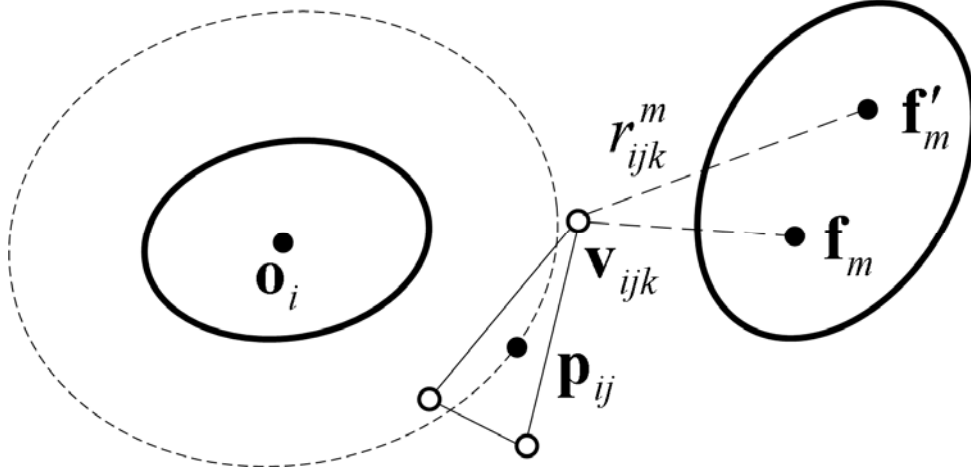


Fig. 4 Distance evaluation between sections.

A. 初期ルート生成

ジャケットを構成する円柱の水平面における断面は楕円になる。観測ミッションにおいてはジャケットに対して一定距離を保つことが求められるため、観測経路は楕円に対して一定の距離 r_{ref} だけ離れた図形、すなわち楕円包絡線となる。楕円包絡線は解析的に扱うことが難しいため、本稿では離散的表現によって表現する。

i 番目の楕円に対する初期ルートは、 n_w 個のウェイポイント $\{p_{ij}, \alpha_j\}, j=1, \dots, n_w$ によって与えられる。ここで p_{ij} は AUV が通るべき位置、 α_j は AUV が向くべき方位である。図 3 にジャケットの断面である楕円とウェイポイントの関係を示す。 j 番目のウェイポイントは、楕円から当該ウェイポイントへ向かう法線ベクトルの向きが

$$\theta_j = 2\pi \frac{n_w - j}{n_w} \quad (1)$$

となるように定める。これにより、どの断面に関する初期ルートも、 j 番目のウェイポイントの方位 α_j は等しくなる。これは後述する初期ルートの連結を容易にするために役立つ。

B. 連結

初期ルートはジャケットを構成する円柱の断面それぞれについて独立して生成されるため、他の円柱に衝突する可能性が考慮されていない。そこで、AUV の形状を考慮して他の円柱との衝突判定を行い、衝突が懸念される場合は初期ルートを連結する。

以下の式が満たされた場合、断面 i と m に関する初期ルートを連結対象とする。

$$\min_{j,k} (r_{ijk}^m) < 2(a_m + r_{ne}) \quad (2)$$

ここで a_m は断面 m の長軸半径、 r_{ne} は AUV とジャケットの最小距離に関するパラメータである。 r_{ijk}^m は、図 4 に示すように、断面 i に関する初期ルートのうち j 番目のウェイポイントにおける AUV の外形を定義する点 v_{ijk} から、断面 m の二つの焦点 f_m, f'_m までの距離の和である。

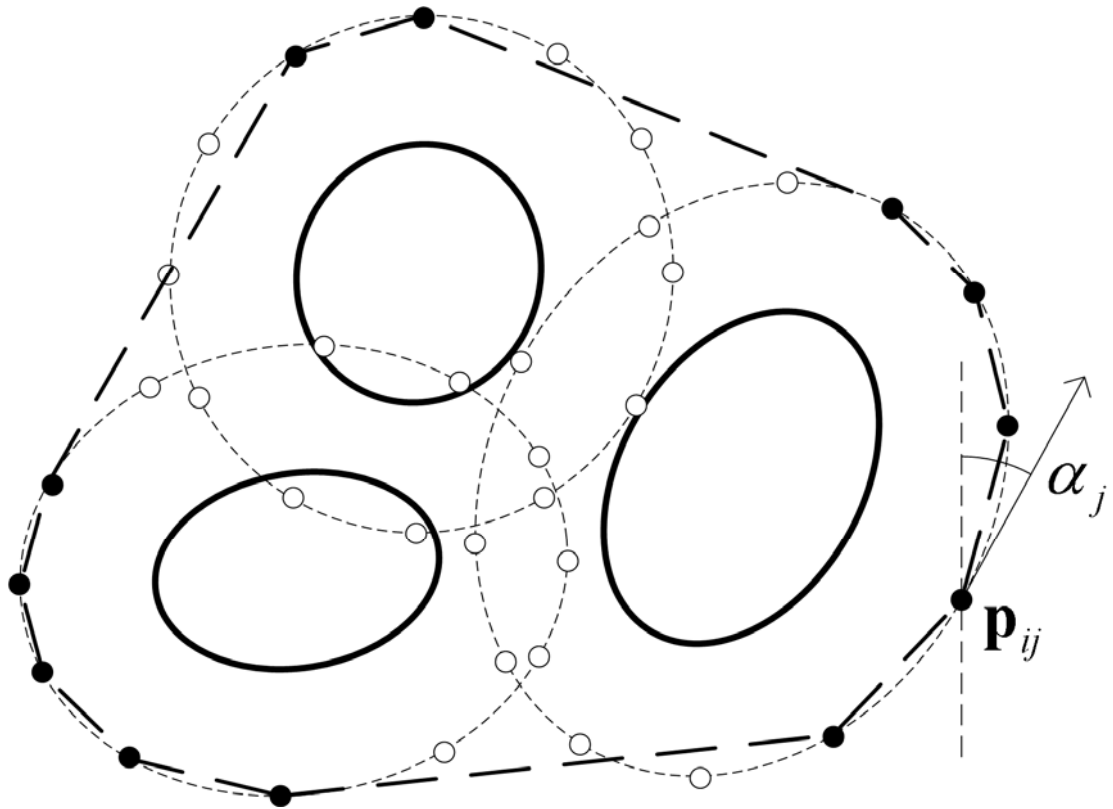


Fig. 5 Route connection. The black points are selected for the connected route.

2-3 軌道制御手法

A. 制御指令値

AUV への制御指令値はサージ速度 $\hat{u}$ 、スウェイ速度 $\hat{v}$ 、方位角速度 $\hat{\omega}$ 、水深 $\hat{d}$ とする。

図 6 に制御指令値の生成に用いるオフセット $\angle x$, $\angle y$, $\angle \phi$ を示す。横方向の誤差 $\angle y$ はスウェイ速度により、方位誤差 $\angle \phi$ は方位角速度によりそれぞれゼロとなるように制御する。そして $\angle y$, $\angle \phi$ が一定範囲内の場合にのみ一定速度 u_{ref} で前進させ、 $\angle x$ がゼロになったら次のウェイポイントへ移行する。

B. ルート遷移

ルート遷移には同一水深での遷移と異なる水深への遷移の二種類があるが、どちらの場合も観測方向と反対側への旋回をしないことが重要である。これは、ジャケットまでの距離が AUV の長さより短い場合、反対方向に旋回すると AUV の後部をジャケットにぶつける恐れがあるためである。

ある断面（あるいはその集合）に関するルートを終了し、同一水深において未観測のルートが残されている場合に、同一水深におけるルート遷移が発生する。この場合、AUV は以下の式を満たす未観測の断面 i' とウェイポイント j' が見つかるまで現在のルートを周回し、見つかったら直ちにそのルート・ウェイポイントへ遷移する。図 7 は遷移すべきルートが見つかった場合の例である。

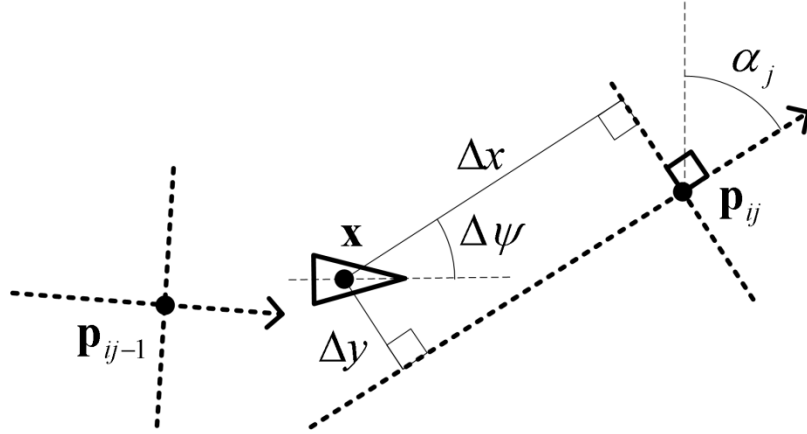


Fig. 6 Position offset Δx , Δy and heading offset $\Delta \psi$.

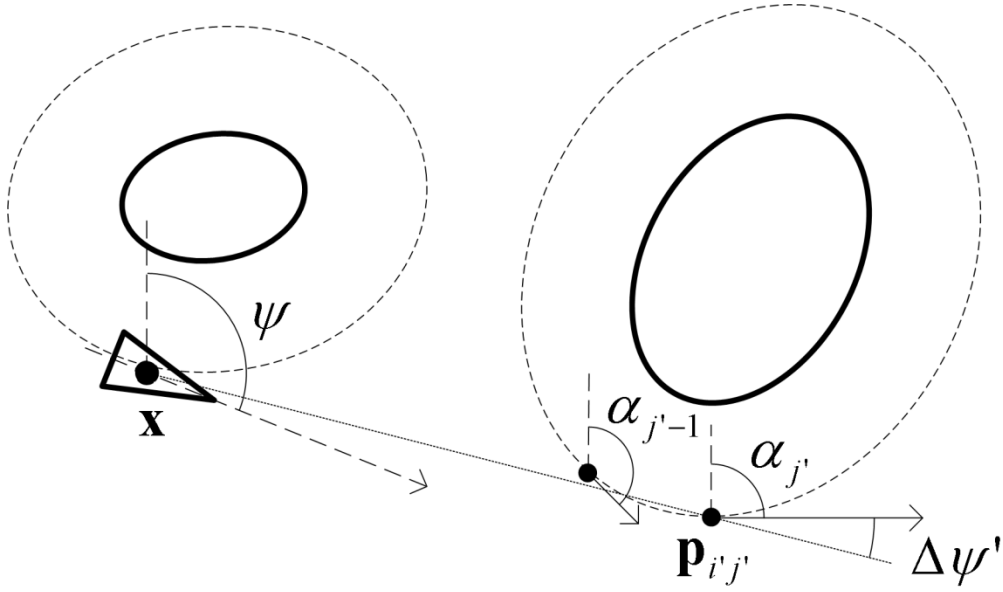


Fig. 7 Route transition at the same depth.

$$\alpha_{j'} < \psi \leq \alpha_{j'-1} \quad (3)$$

$$\Delta \psi' = |\arg(p_{i'j'} - x) - \alpha_{j'}| < 2\pi/n_w \quad (4)$$

同一水深における全てのルートが終了すると、 d_{step} だけ浅い水深へ遷移する。このとき AUV は上方へ移動するため、上方のジャケットとの位置関係を考慮し、衝突を防ぐ必要がある。そこで現在の AUV の位置と一つ上の水深における断面に関して式 2 に基づく近接判定を行い、AUV 近傍に断面が無い場合のみ遷移を認める。もう一つの条件は、新しい水深において観測と反対方向への旋回を行わずに入れるルートが最低一つ存在することである。

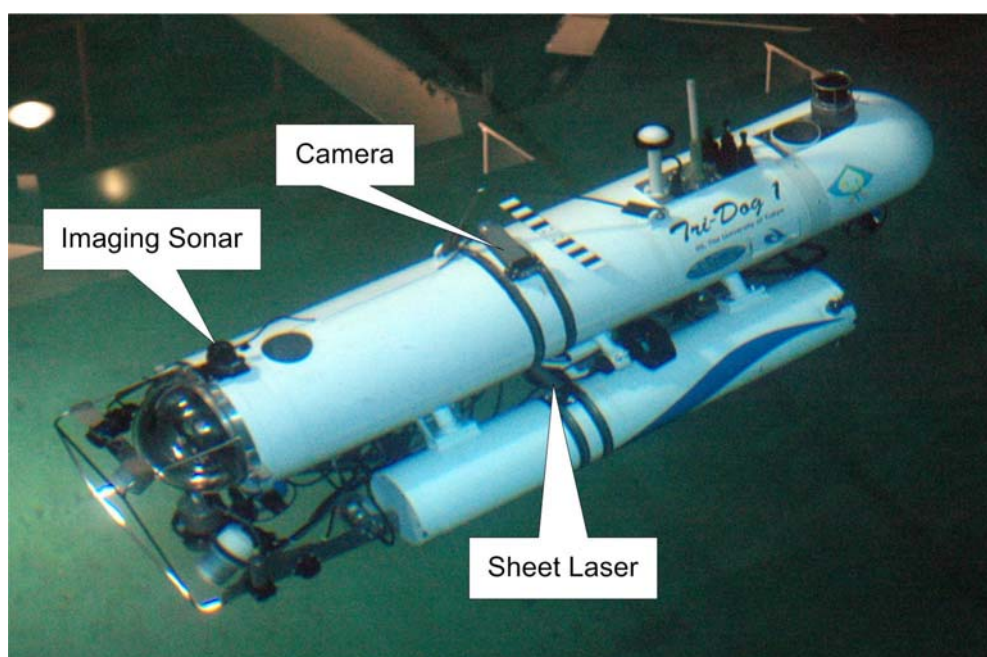


Fig. 8 AUV Tri-Dog 1.

3、測位・経路生成手法の有効性の検証

提案手法の有効性を検証するため、AUV Tri-Dog 1 を用いて水槽試験を実施した。

3-1 AUV Tri-Dog 1

AUV Tri-Dog 1(以後ロボットと称す)は 1999 年に東京大学生産技術研究所海中工学研究センターで開発された全長約 2 m のホバリング型 AUV であり、6 台のスラストによってサージ、スウェイ、ヒープ、ヨーの四自由度を制御することができる。写真を図 8 に示す。速度センサとしては、海底面に音波を出し反射波のドップラーシフトから対地速度を求めるドップラ式対地速度計(Doppler Velocity Log, DVL)を、方位角速度センサとしては光ファイバジャイロ(Fiber Optic Giro, FOG)を搭載している。DVL は海底からの高度の計測にも使用する。その他の航法センサとしては深度計と姿勢センサを搭載している。

ジャケットとの相対位置関係を求めるための環境センサとしては、水平方向を周回スキャンする小型ソーナーのほか、至近距離において光切断法 [7] [8]による高精度な計測を行うためのカメラとシートレーザーを左側に向けて搭載している。

AUV の位置・姿勢はこれらのセンサ情報及び環境マップから、確率的手法によりリアルタイムに推定される。本実験と同一条件において、水平位置の測位誤差が 0.1m 以内であることが確認されている [5]。

3-2 実験方法

まず水槽にジャケットの模型を設置した。模型は外径 318mm・長さ 4m の塩ビパイプを垂直に立て、その根元に外径 216mm・長さ 4m の塩ビパイプを斜めに接続したものである。

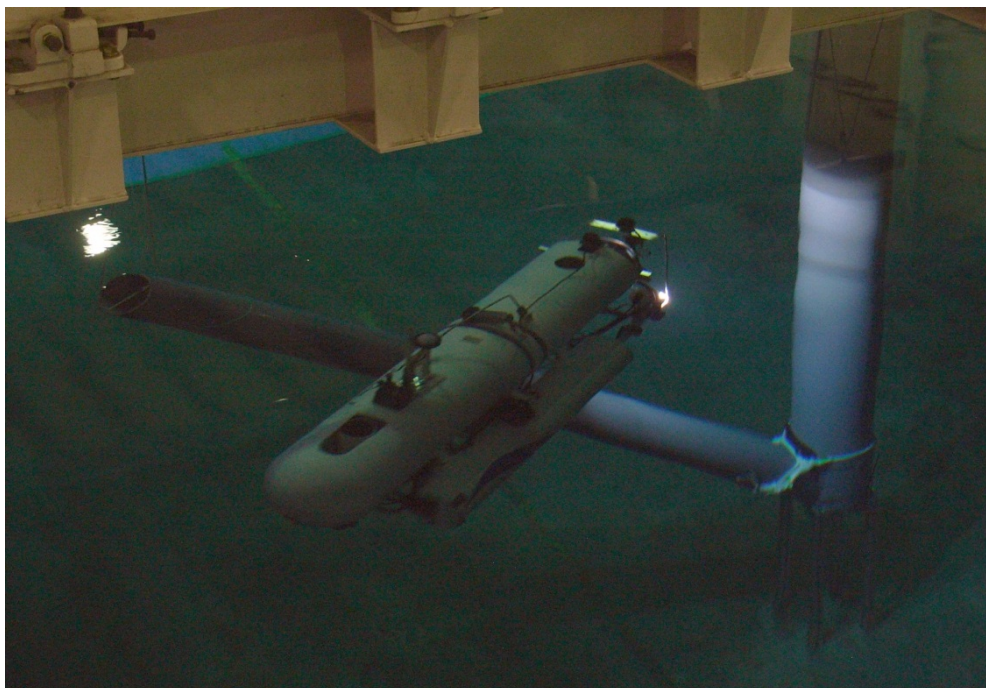


Fig. 9 Tri-Dog 1 passing through the jacket model.

水槽の水深は 5m であり、模型は台座およびロープにより底から 1m の高さに固定した。図 9 にジャケット模型ならびにロボットの様子を示す。

次にジャケット模型から環境マップ M を求め、提案手法に従って観測ルートを生成した。水深は 3.5m から 1m 刻みで 1.5m まで、ジャケットに対して保つべき距離 r_{ref} は 0.8m、接近可能距離 r_{ne} は 0.5m、ウェイポイント数 n_w は 72 とした。

そして、環境マップ M と観測経路をロボットに与え、実際にジャケット模型の観測を行わせた。ロボットの前進速度 u_{ref} は 0.1m/s とした。スタート地点はジャケット模型の約 9m 手前とした。

3-3 実験結果

図 10 は各水深において生成された観測ルートである。青色の点がウェイポイント、黒線は環境マップとして与えたジャケットの断面である。水深 3.5m と 2.5m においては二つの断面を周回するルートが連結されているのに対し、水深 1.5m では二つに分かれている。これは円柱間の間隔がロボットが通過するのに十分離れていると判断されたためである。

ロボットの航跡を図 11 に示す。これはロボット自身が観測中リアルタイムに推定した航跡である。ロボットは水深 3.5m で観測ルートに入り、2.5m、1.5m と順番に通過した。深度遷移は、上方にジャケットが無かったため当該水深における観測終了後直ちに行われた。ただ、水深 1.5m における同一深度でのルート遷移は、第一のルート終了後、第二のルートへの遷移条件が満たされるまで半周程度そのまま周っている。

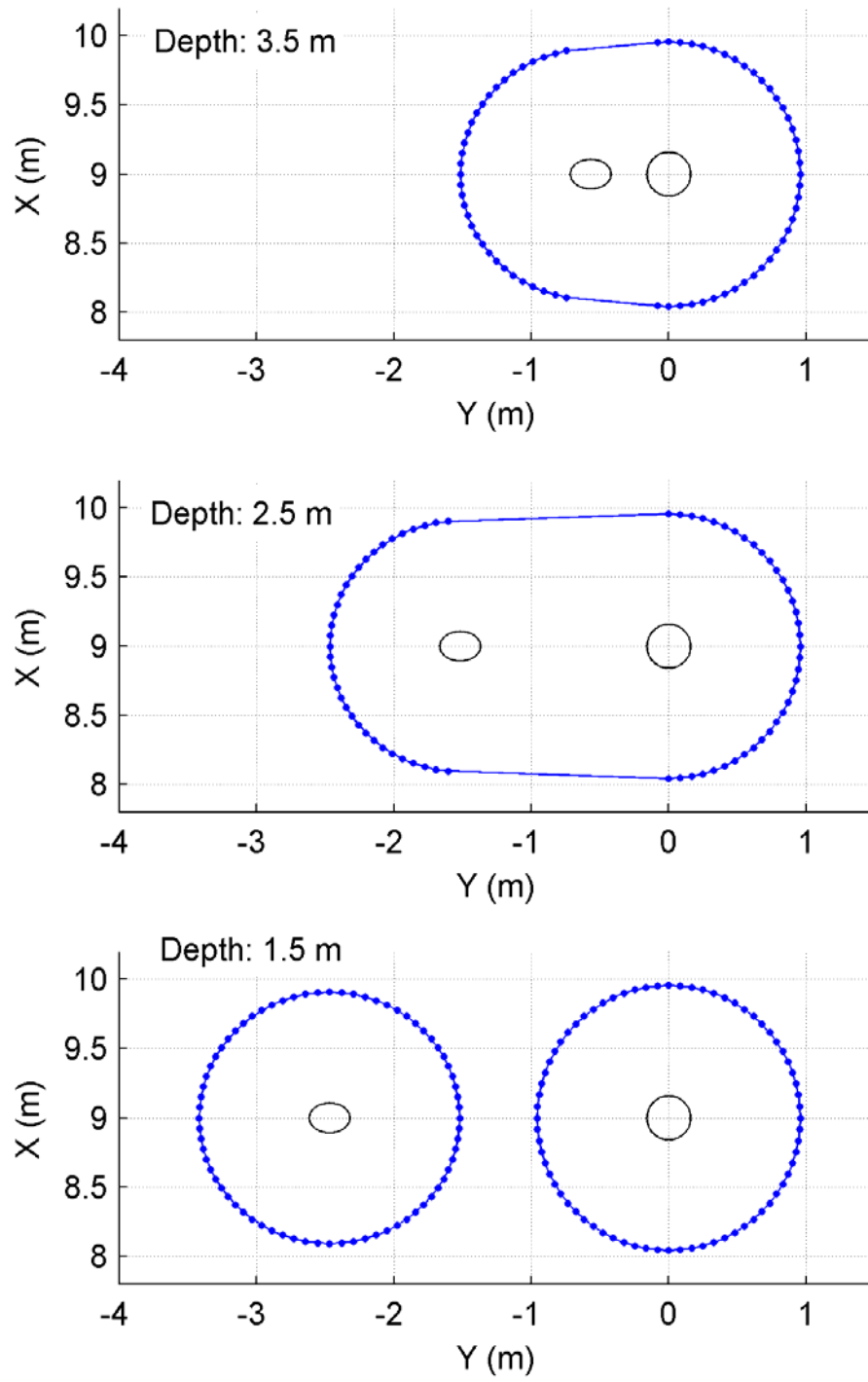


Fig. 10 Observation route generated by the path-planning method

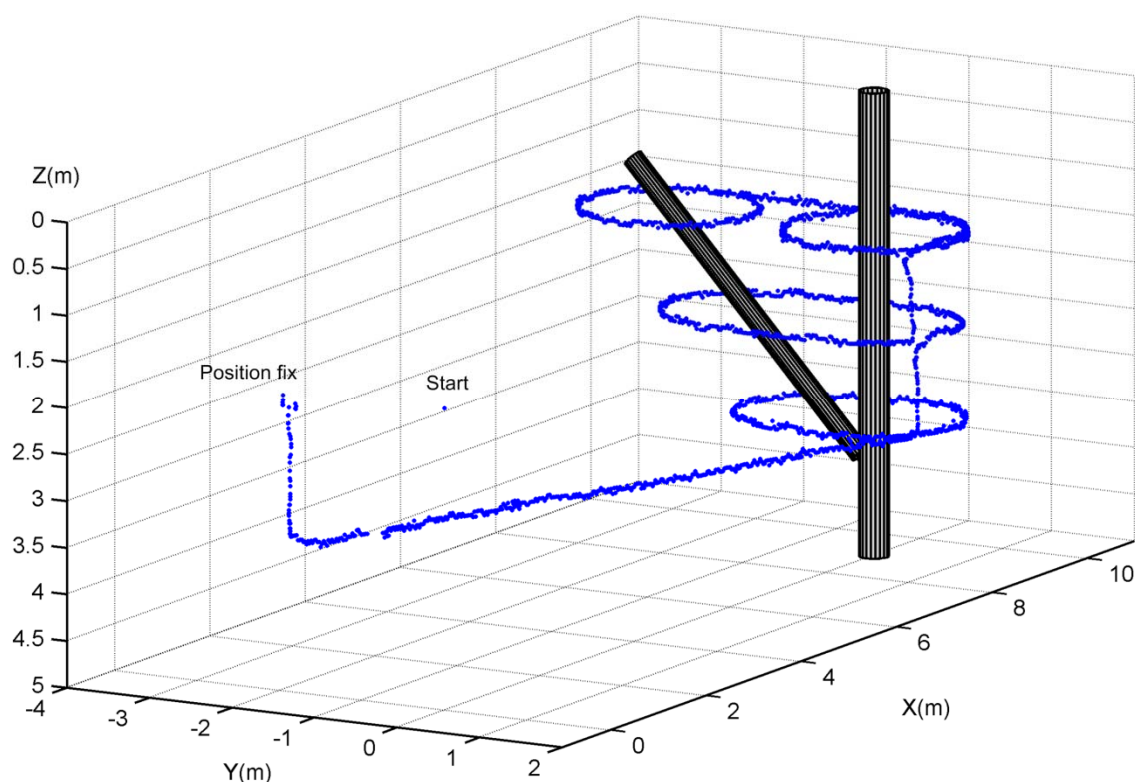


Fig. 11 Trajectory of the vehicle estimated in real-time.

図 12 はロボットのサージ（前後移動）速度、スウェイ（左右移動）速度、ヨー（水平回頭）角速度、深度の時間変化である。それぞれ計測値を青の太線で、制御目標値をピンクの細線で示す。横軸はロボット展開開始からの経過時間である。深度変化のグラフから、潜航開始後約 170 秒で深度 3.5m 地点の観測を終えて深度 2.5m へ浮上、そして潜航開始から約 260 秒後に深度 1.5m へ浮上したことがわかる。サージ速度は深度変化中を除いて安定して一定値 (0.1m/s) に制御されている。ヨー角速度は右回りをプラスにとっているため、左回りに観測した本実験においてはマイナスの値が出力されている。深度変化時のほか、同一深度での軌道遷移時も角速度がゼロ、即ち直進していることがわかる。

図 13 はパーティクルフィルタのサンプル集合の標準偏差の時間変化であり、ロボットが観測中リアルタイムに推定した自己位置・方位の確からしさを表す。開始から約 100 秒間はジャケット模型へ接近していく段階であり、この間はシートレーザによる計測はできないため、プロファイラーのみでジャケットとの相対測位が行われる。プロファイラーは 360 度スキャンするのに約 20 秒かかる。サンプル集合の収束はこの周期で行われている。ジャケットの観測開始後は、光切断法による高精度計測が可能になるので、水平位置が 5cm、方位が 0.5deg 程度まで収束している。

図 14 は水深 3.5m において観測中に、ロボットの左向きに搭載されたカメラによって撮影された写真である。ジャケット表面に対してほぼ一定距離で観測できたことがわかる。

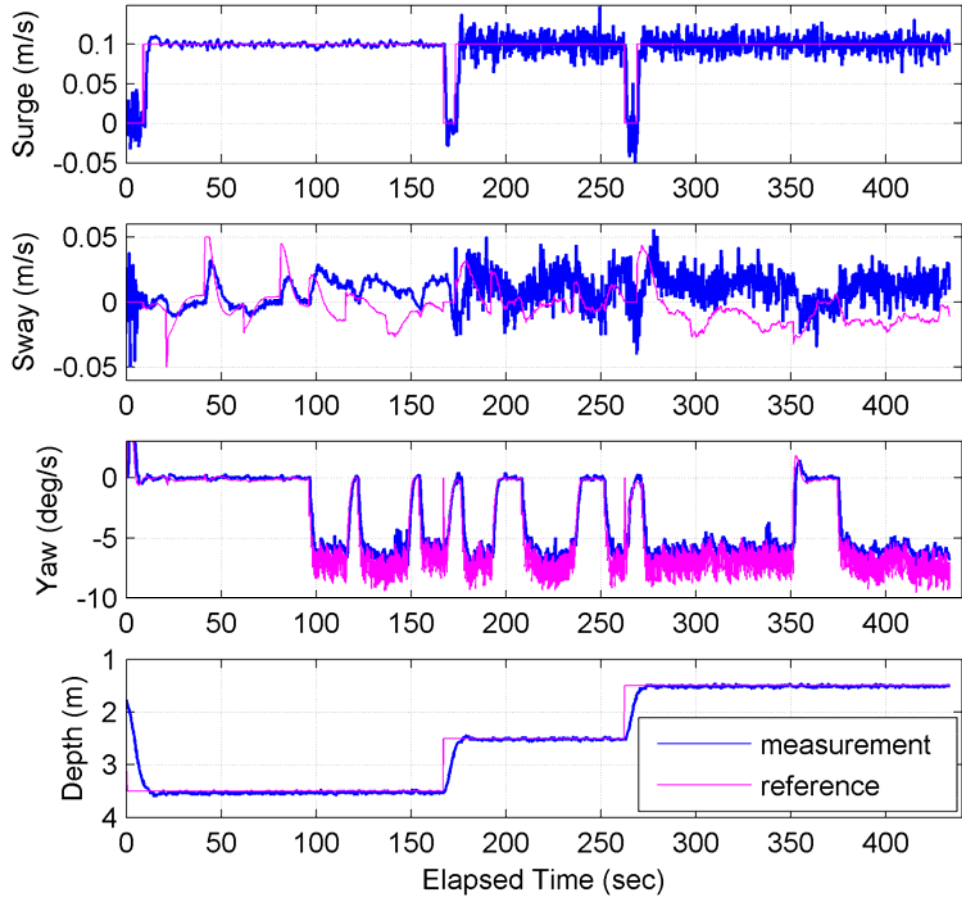


Fig. 12 Control references and measurements of navigational parameters.

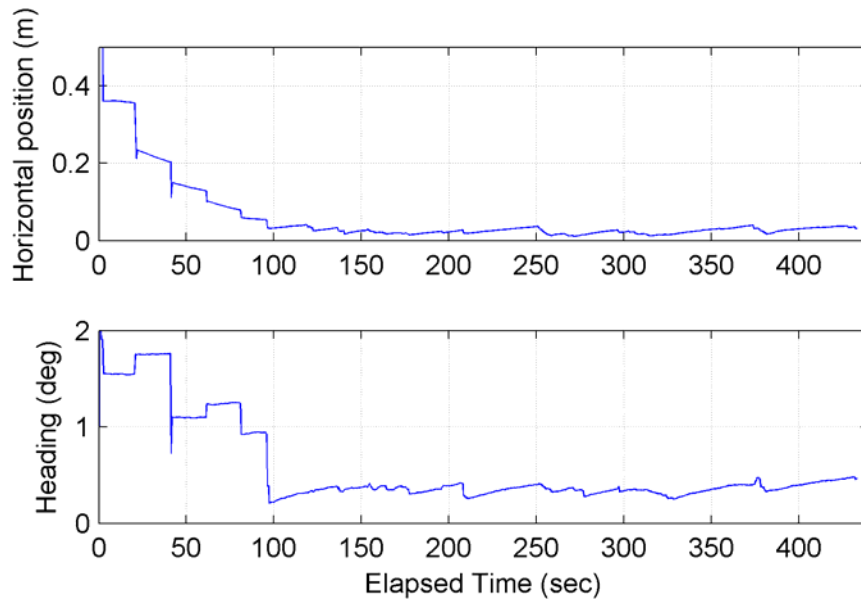


Fig. 13 Positioning uncertainty.

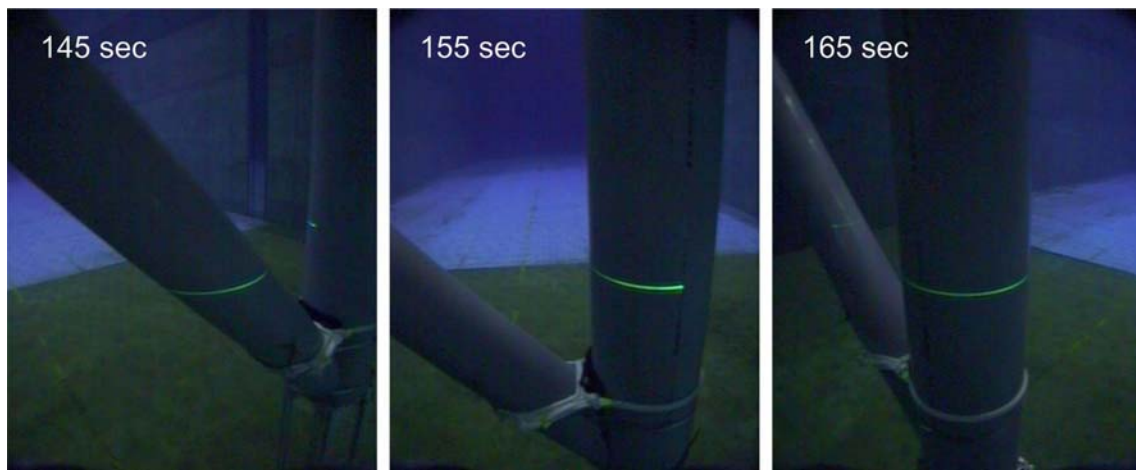


Fig. 14 Images taken by the side-looking camera on the vehicle.

4、音響による相対測位・通信手法の開発

AUV は単独でも効果的だが、複数台の連携や給電・通信用の水中ドックとの併用によりさらに観測効率を高めることができる。本研究では昨年度に引き続き、このための基礎となる音響による相対測位・通信手法に関する検討を実施した。中でも実装が容易な SBL(Short Base Line)方式の測位精度について検討するとともに、装置を試作して性能評価試験を行った。水槽試験の結果、距離 2～7m における測距誤差は±3cm 以内、距離 2.5m における角度誤差は±1.5 度以内であることを確認した。

試作した装置を図 15 に示す。本装置は電子機器類を収納する圧力容器と、送波器 1 台、受波器 4 台から構成されている。信号は 25kHz のチャープ（振れ幅±15%）であり、パルス幅は 4ms である。データ伝送は多値 FSK 方式で、通信速度は 100bps である。

いま A,B という 2 台の装置があるとする、A が B の位置を求める手順は次の通りである。まず、A が B に向けて質問信号を送る。信号を受けた B は一定時間後に応答信号を送る。すると A は、質問信号を送ってから応答信号を受信するまでの時間差から B までの距離を求めることができる。また、4 台の受波器に到来した応答信号の時間差から、B の方向が求められる。

実験の様子を図 16 に示す。装置 A は移動・回転が可能な台車に固定し、装置 B は水槽に中央部に設置した。水槽の水深は 5m、装置の深度は A,B とも 2.5m である。この状態で台車を移動し、A,B 間の距離と方位をさまざまに変化させてそれぞれ数十点の計測を行い、測位精度を調べた。

結果を図 16、17 に示す。図 16 は距離の誤差平均と標準偏差である。横軸は A,B 間の実際の距離である。ちなみに相対方位は 0deg（正対）とした。2m から 7m までの範囲で、誤差平均は±3 cm以内に収まっていることがわかる。標準偏差は 1～2cm であった。図 17 は角度変化に対する、角度計測値の誤差平均と標準偏差である。横軸は実際の相対角度である。相対距離は 2.5m とした。本図から、すべての角度において、誤差は±1.5deg 以内、標準偏差は 0.3deg 程度であった。

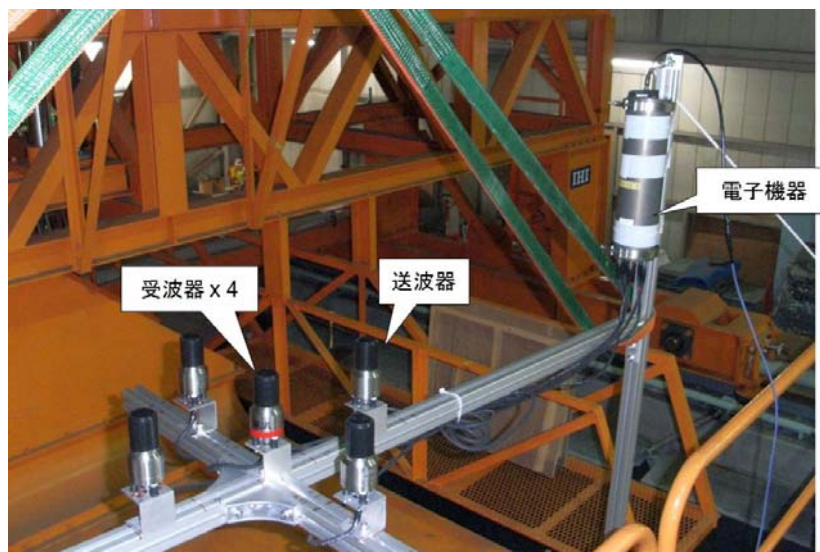


Fig. 15 Arrangement of the developed communication and positioning device.

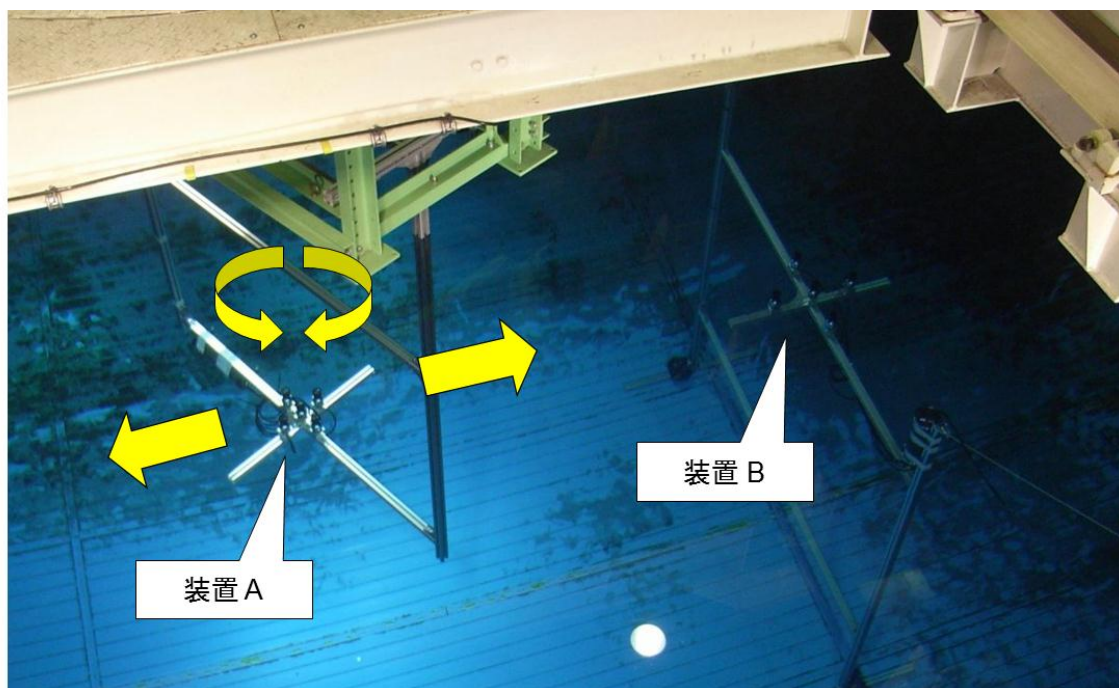


Fig. 16 Experimental setup.

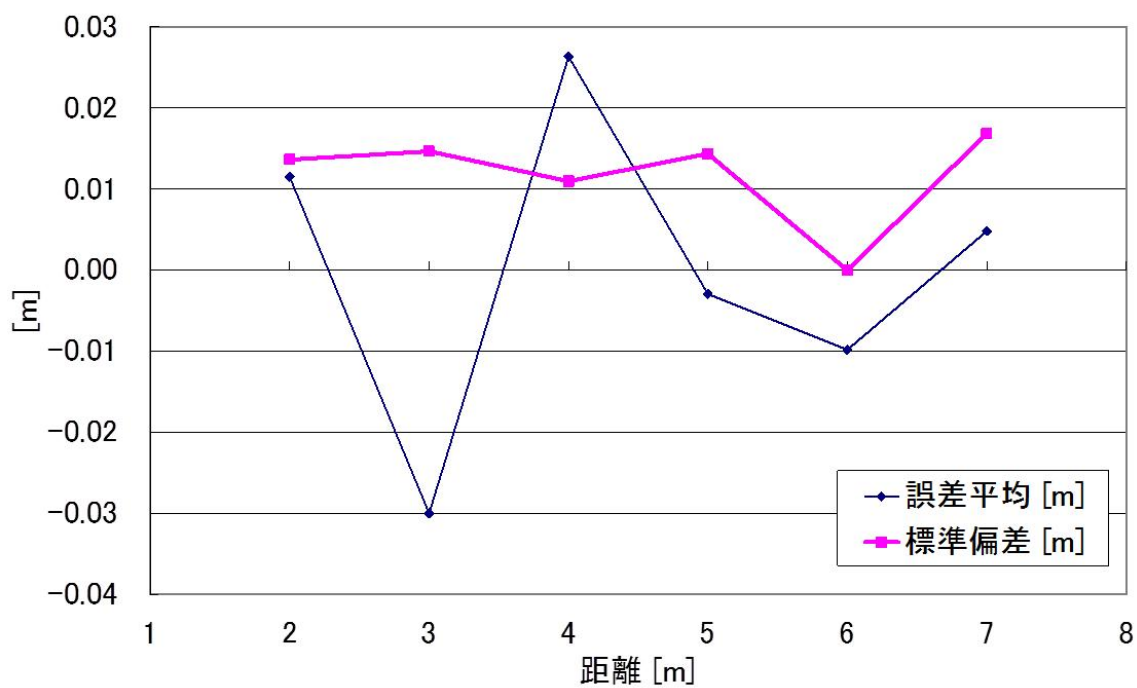


Fig. 17 Range accuracy.

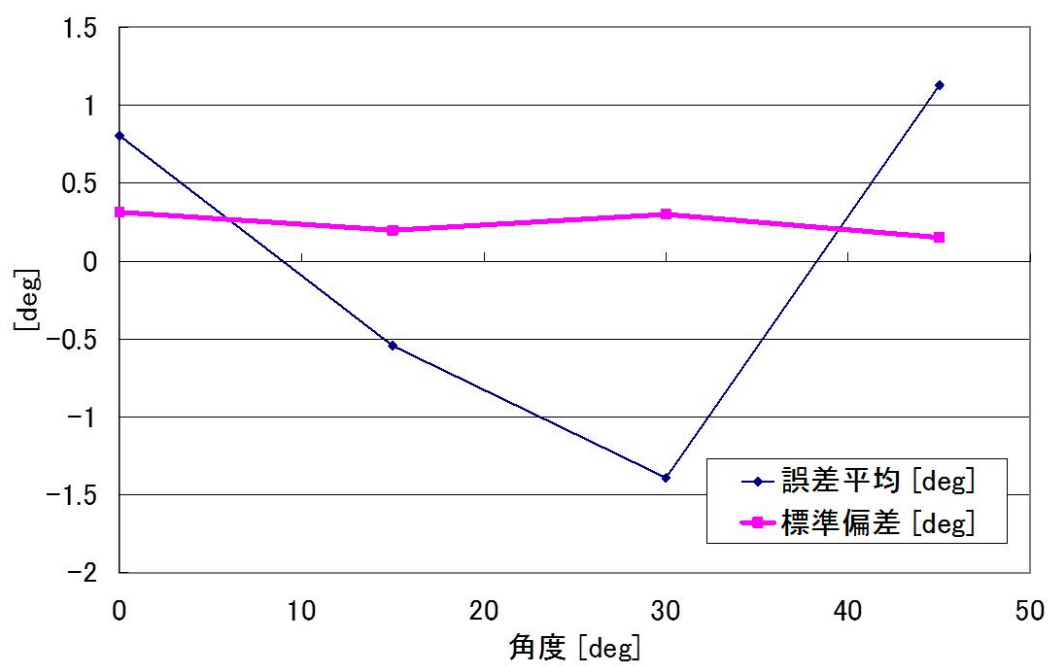


Fig. 18 Directional accuracy.

5、まとめ

本研究では、ジャケット状の水中構造物を AUV により全自動観測するための経路計画手法と軌道制御手法を提案した。経路計画はあらかじめ与えられる環境マップを基に、一定距離を保ってジャケット全面を観測する経路を生成する。軌道制御手法は、AUV のジャケットに対する位置・姿勢がリアルタイムに得られることを前提に、観測経路の滑らかな追従と経路間の安全な遷移を行う。

提案手法は AUV Tri-Dog 1 に実装され、水槽実験によってその有効性が確認された。本手法とこれまでに提案した測位手法 [5] [6] を組み合わせることで、AUV によるジャケットの全自動観測が可能となる。本手法はジャケット観測にはもちろん、石油掘削リグや人工漁礁といった他の水中構造物周囲での AUV オペレーション全般に適用可能であると期待される。

また、AUV を将来ドッキングステーションと共に運用するための基礎技術開発として、音響による相対測位・通信装置を試作して精度評価試験を実施した。その結果、距離 2~8m において距離誤差 $\pm 3\text{cm}$ 以内、距離 2.5m において方位誤差 $\pm 1.5\text{deg}$ 以内という結果を得た。これは実用に十分耐えうる精度である。しかしながら港湾などの実環境においては AUV はステーションから数十~数百メートル離れて活動することが考えられるほか、海底面や構造物によるマルチパスや音響的な影の問題が生じる。今後はより実環境に即したシミュレーションにより測位精度を推定するとともに、実海域での性能評価試験を実施する予定である。

文献目録

1. 国土交通省 関東地方整備局. D-runway News Letter No.14. 2010.
2. VaganayJ, ほか, ほか. Ship hull inspection with the HAUV: US Navy and NATO demonstrations results. Proc. of IEEE OCEANS'06 Boston. 2006 年.
3. 巻俊宏, ほか, ほか. 自律型水中ロボットによる人工構造物の観測. 日本船舶工学会論文集. 2005 年. 第 1 巻. 17-26.
4. ChoiJ, ShiraishiT , TanakaT. Safe breakwater-following control of an autonomous underwater vehicle with non-zero forward velocity. Automation in Construction. 2007 年. 第 16 巻. 778-786.
5. 巻俊宏, ほか, ほか. AUV による栈橋式水中構造物の全自動点検手法 ―画像と音響による相対測位―. Proc. of ROBOMECH '09. 2009 年.
6. 浦環 , 巻俊宏. 平成 19 年度 (財) 港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成報告書「栈橋式水中構造物水中支持部の全自動点検手法」. (オンライン)
http://www.scopenet.or.jp/main/research/pdf/ura_houkoku.pdf.
7. 水島隼人. ジャケット状構造物を基準とする AUV の位置推定手法に関する研究. 出版地不明 : 早稲田大学修士論文, 2009.
8. TetlowS , AllwoodR. Development and applications of a novel underwater laser illumination system. Underwater Technology. 1995 年. 第 21 巻, 2.