

平成22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22年2月2日付 第09—5号

研究開発項目：（21指定）② に関するもの

自律型水中ロボットと海底ステーションに よる水中構造物の全自動・長期モニタリン グシステム（その1）

平成23年4月26日

東京大学

巻 俊宏

目次

1、はじめに	2
2、研究開発の概要	3
3、音響による測位手法の性能評価	4
3－1、方法.....	5
3－2、結果.....	7
3－3、考察.....	9
4、画像による測位手法	11
4－1、はじめに	11
4－2、方法.....	11
4－3、精度評価試験	12
5、水槽実験	17
5－1、方法.....	17
5－2、AUV Tri-Dog 1	19
5－3、結果.....	20
5－4、考察.....	20
6、まとめ.....	26
参考文献.....	27

1、はじめに

岸壁や栈橋等の港湾施設を安心して運用するためには、水中支持部の定期点検が不可欠である。具体的な検査項目としては肉厚や腐食状況、生物付着状況、堆砂状況などがあり、現在は主にダイバーか遠隔操縦ロボット（ROV）によって行われている。

自律型水中ロボット（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）[1]はエネルギー源と頭脳を内蔵した海中探査機器であり、全自動で活動する新たな海中プラットフォームとして実用化が進められている。人工構造物観測への応用も提案されているが、電池充電やデータ転送のため観測のたびに回収しなくてはならず、結局船舶が必要となり、大きなコスト削減は期待できない。

そこで本研究では、図1のようにAUVの充電・データ転送を行う海底ステーションとAUVを組み合わせることで、全自動かつ長期展開が可能なシステムを提案する。このようなシステムが実現すれば、人間が現場へ行く必要がなくなるため港湾施設の保守点検コストの大幅な削減が可能になる。特に羽田空港のD滑走路のような大規模構造物の定期点検に威力を発揮すると期待される。また、天候・時間によらない対応が可能になるため、災害時の緊急調査や重要施設の警備にも応用可能である。

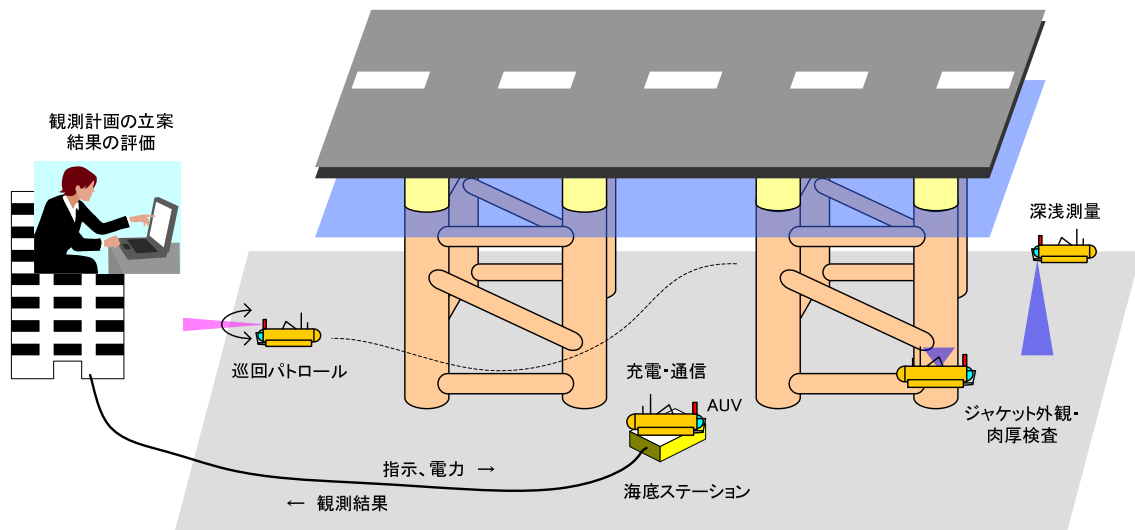


図1 自律型水中ロボットと海底ステーションによる水中構造物の長期モニタリング

2、研究開発の概要

海底ステーションを用いて AUV を充電し、また AUV による観測結果（ビデオ動画等の大容量データと想定される）を陸上の監督者へ転送するためには、AUV とステーションが物理的に接触しているか、または至近距離で静止している必要がある。これは、水が電磁波を吸収するために、距離が離れると充電・通信効率が急激に悪化するためである。即ち AUV はステーションに自律的にドッキングできることが必須であり、これを実現するためには、AUV はセンチメートル精度でステーションとの相対位置関係をリアルタイムに把握することが求められる。また、AUV の活動範囲はステーションとの相対測位が可能な範囲に制限されるため、AUV の活動範囲を拡大するためには最大測距レンジの拡大が重要である。

水中での相対測位手法には主に音響的手法と視覚的手法がある。前者は遠距離でも適用可能だが分解能が悪く、後者は高分解能であるが至近距離でしか適用できないという特徴がある。

そこで本研究においては、AUV が海底ステーションに対してリアルタイムに相対位置を求める手法として、図 2 のように音響的手法と視覚的手法を組み合わせ、さらに他のセンサ情報と融合することにより、高精度でかつセンサノイズに対してロバストな相対測位手法を開発する。本手法は海底ステーションによる AUV の長期展開システムの鍵となる技術である。

本年度は、まず音響による測位手法として、前年度までに申請者らが開発した音響測位・通信装置 ALOC (Acoustic Localization and Communication) の性能検証試験を行った。次に、画像による測位性能を検証したうえで、両者の結果から画像と音響の融合による測位手法を開発し、水槽実験によって有効性を検証した。

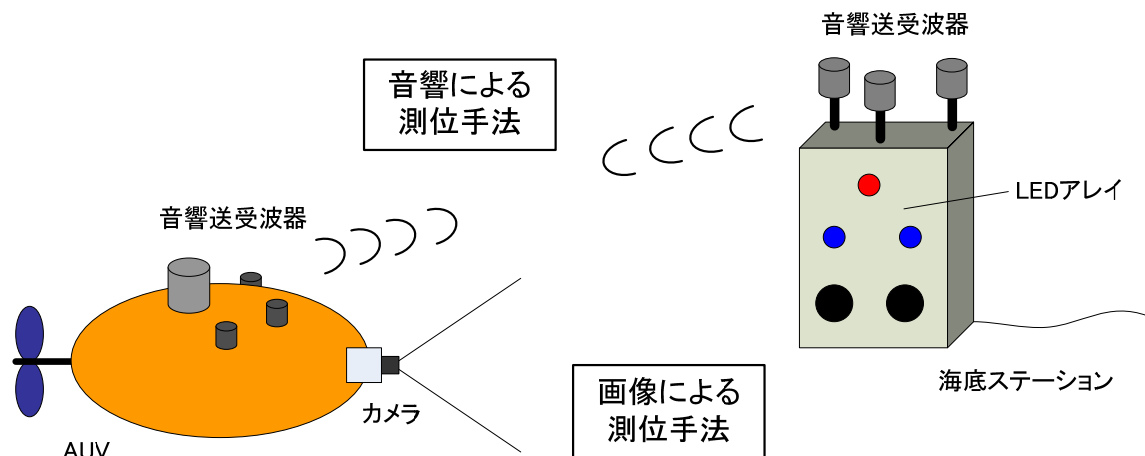


図 2 音響的手法と画像的手法の融合による AUV と海底ステーション間の相対測位手法

3、音響による測位手法の性能評価

申請者らはこれまでの研究活動により音響による相対測位・通信装置「ALOC (Acoustic Localization and Communication)」の試作を進めている。これは送波器が一台と受波器が4台からなるシステムであり、図3のように AUV⇄AUV あるいは AUV⇄海底ステーションなど海中システム同士が相互に連携するための装置である。送波器からの超音波信号を受波器4台で受け、その時間差および往復伝播時間から相対距離・方位を求めるものであり、最大通信・測位レンジは 1000m である。ALOC のブロック図を図4に、各構成要素の写真を図5、6に示す。

本研究では水槽実験によってこのシステムの性能評価を行うと共に、ハイドロフォンアレイの配置方法と精度の関係、ならびに AUV のスラスタ等によるノイズの影響について検討する。

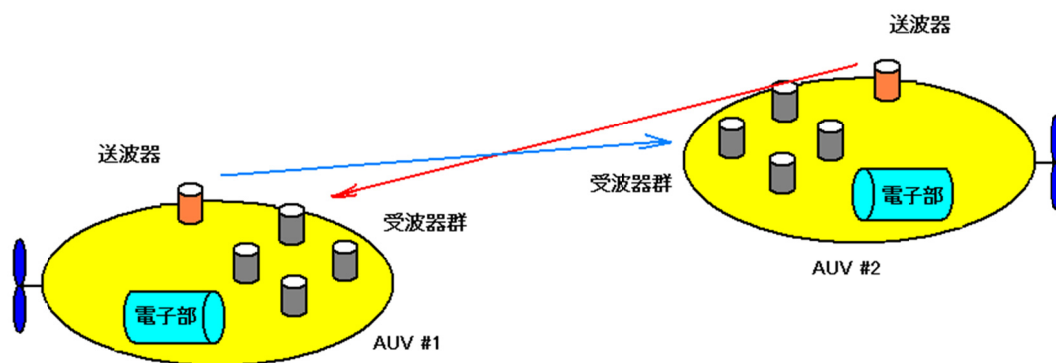


図3 ALOC の概念図

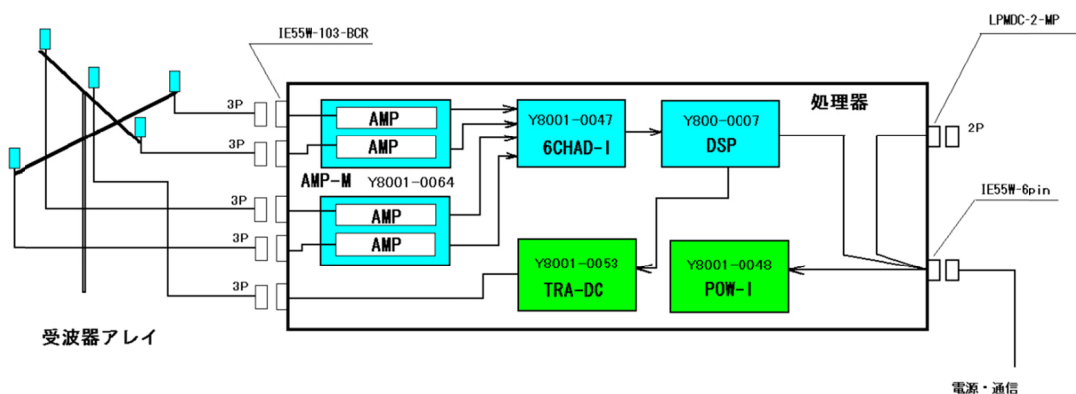


図4 ALOC ブロック図

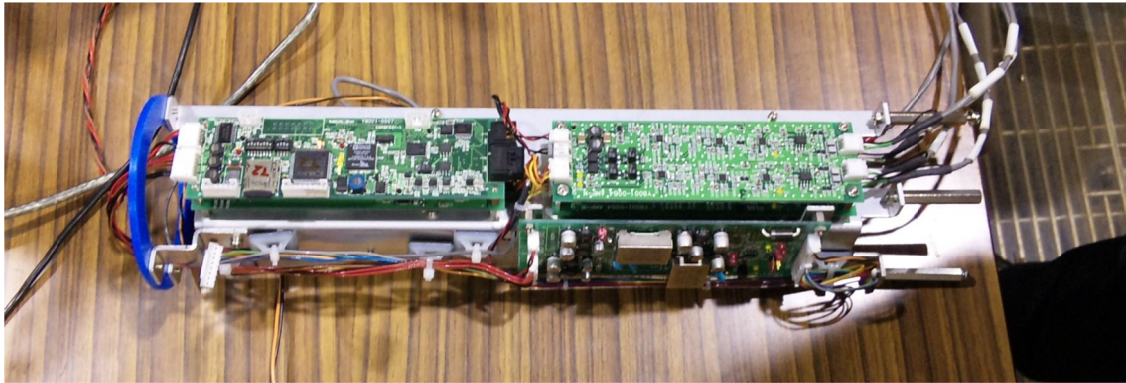


図5 ALOC 電子部



図6 ALOC 送受波器

3-1、方法

ALOC 単体での性能を確認するために、実海域での動作試験を実施した。実験場所は神奈川県三浦市にある東京大学三崎臨海実験所[2]の栈橋付近である。2組の ALOC (ALOC_1、ALOC_2) をそれぞれ図7のような簡易ステーションに装着し、この状態で海底に設置した。一台は栈橋近くに (ALOC_1)、もう一台はまずは地点 A に設置し (ALOC_2A)、その後地点 B に移動した (ALOC_2B)。水深はどちらも約 5 m である。ALOC の設置位置を図8、表1に示す。なお、設置位置は水面にてハンディ GPS で計測したため、数メートル程度の誤差を含んでいる可能性がある。GPS 計測値から求めた ALOC 間の直線距離は、ALOC_1 ⇒ ALOC_2A が 103m、ALOC_1 ⇒ ALOC_2B が 190m となった。

実験手順は次の通りである。まずは相対距離による性能変化を調べるため、ALOC_1 から、ALOC_2A および ALOC_2B をそれぞれ 200 回連続で呼び出し、測位およびデータ通信を行った (実験①)。次に相対方位の影響を調べるため、ALOC_1 の向きを手でさまざまに変えて、ALOC_2B 計測した。向きは 5 方向とし、それぞれの向きで 70 回計測した (実験②)。

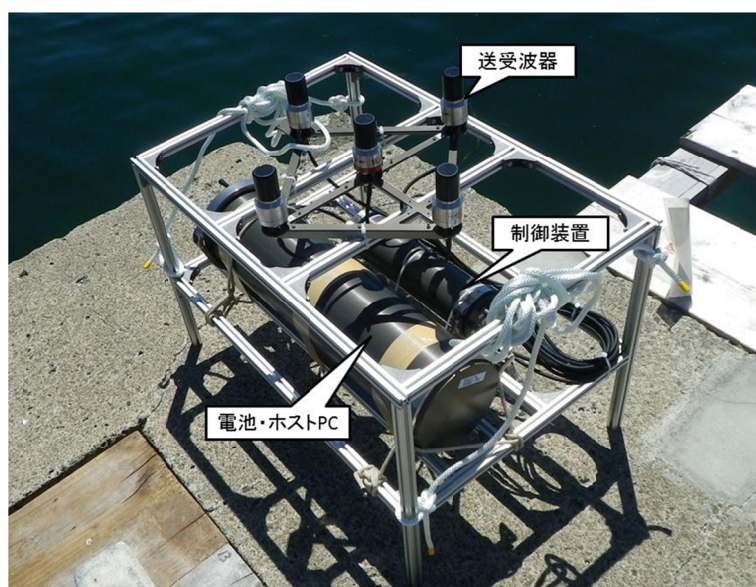


図7 ALOC を搭載した簡易海底ステーション（写真は ALOC_2。ALOC_1 はケーブルで陸上から制御したため、電池・ホスト PC が無い）



図8 ALOC 設置場所（描画には Google Earth[3]を利用）

表1 ALOC 設置場所

	緯度 [deg-min]	経度 [deg-min]	水深 [m]
ALOC_1	N35-09.451	E139-36.739	5
ALOC_2A	N35-09.425	E139 36.799	5
ALOC_2B	N35 09.405	E139 36.851	5

3-2、結果

実験①

図9、10はALOC_1によって計測された、ALOC_1からALOC_2Aまでの距離と方位である。方位はALOC_1を基準とする相対方位である。図11、12は同じくALOC_1によって計測された、ALOC_1からALOC_2Bまでの距離と方位である。計測結果と相対距離の関係を表2に示す。

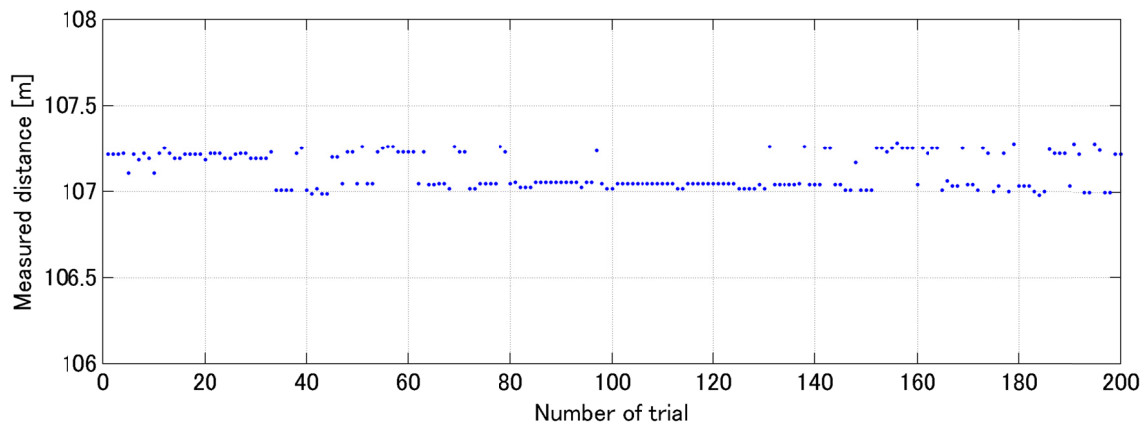


図9 距離計測結果 (ALOC_1 ⇒ ALOC_2A)

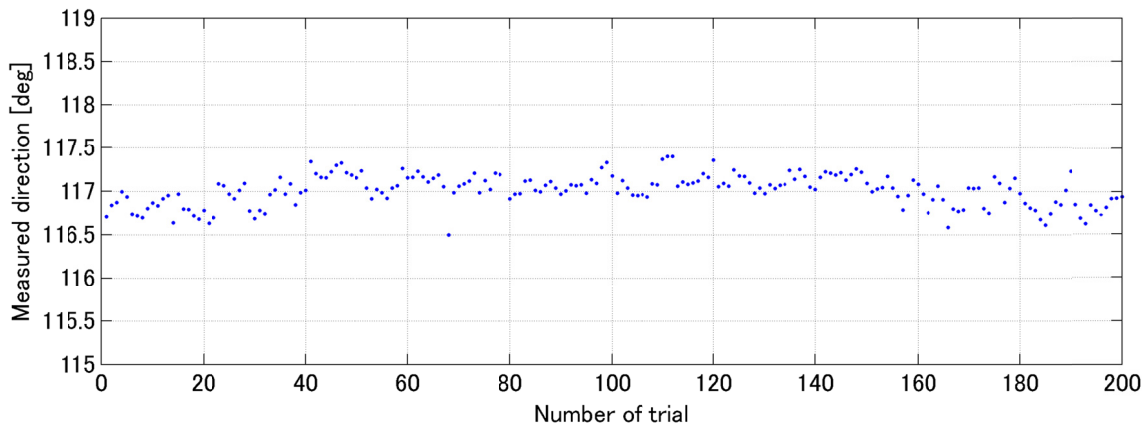


図10 方位計測結果 (ALOC_1 ⇒ ALOC_2A)

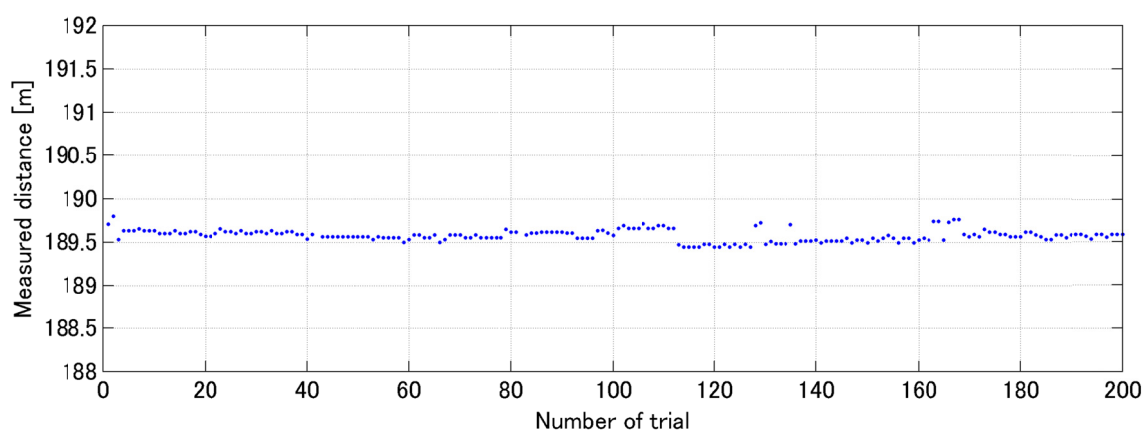


図 1 1 距離計測結果 (ALOC_1 ⇒ ALOC_2B)

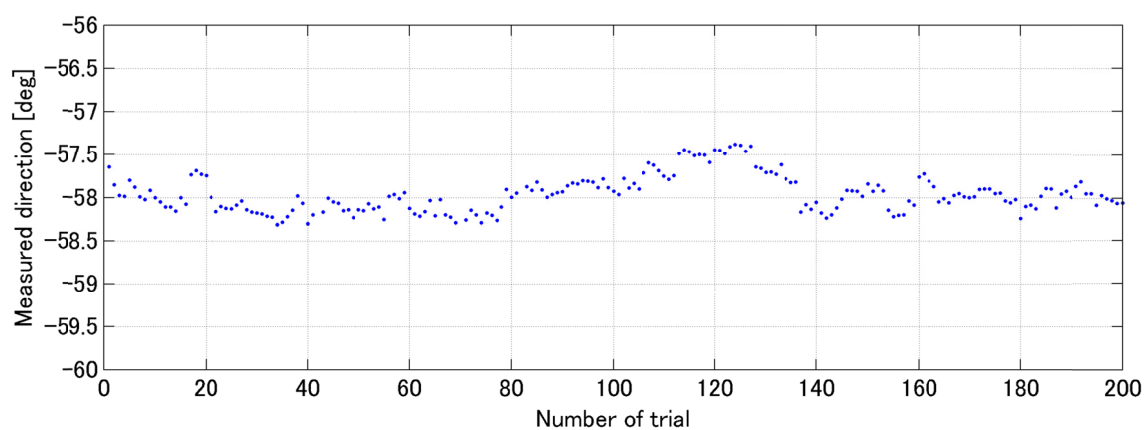


図 1 2 方位計測結果 (ALOC_1 ⇒ ALOC_2B)

表 2 相対距離と計測結果の関係

ターゲット	ALOC_2A	ALOC_2B
相対距離 [m]	103	190
測位成功率	1.00	0.99
通信成功率	0.57	0.10
距離計測値の平均 [m]	107.12	189.58
距離計測値の標準偏差 [m]	0.10	0.07
方位計測値の平均 [m]	116.98	-57.92
方位計測値の標準偏差 [m]	0.38	0.51

実験②

結果を表 3、図 1 3 に示す。

表 3 相対方位と計測結果の関係（相対距離 約 190m）

	方向①	方向②	方向③	方向④	方向⑤
測位成功率	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
通信成功率	0.14	0.06	0.01	0.10	0.37
距離計測値の平均 [m]	189.56	190.50	190.42	190.31	189.33
距離計測値の標準偏差 [m]	0.10	0.07	0.04	0.03	0.02
方位計測値の平均 [m]	-57.82	-175.72	81.79	135.84	19.63
方位計測値の標準偏差 [m]	0.25	1.70	1.03	1.79	2.06

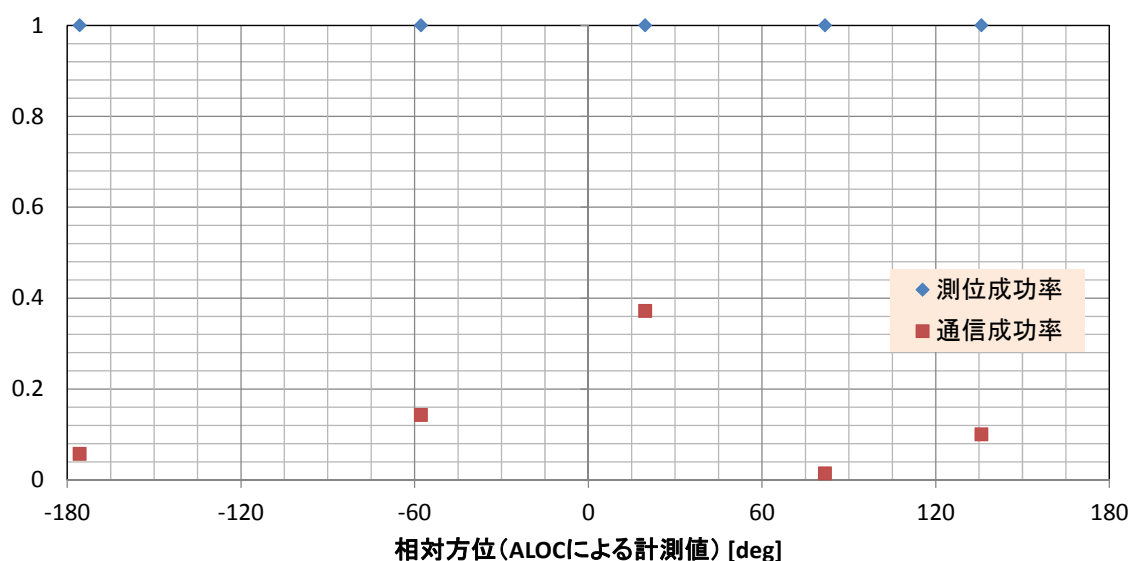


図 1 3 相対方位による計測成功率の関係

3-3、考察

以上の結果より、ALOC により 200m 程度であれば距離や方位によらず安定した測位が可能であることを確認した。特に測位成功率は全ての距離、方位においてほぼ 1 であり、確実に測位できたことがわかる。また、計測の安定性に関しても、距離の標準偏差が 0.1m 前後、方位の標準偏差が 0.3～2.1deg となっている。この値は、AUV がステーションに搭載された LED マーカーを発見するために十分な精度である。

一方、通信性能には距離、方位による影響が見られた。また、成功率が測位に比べて全体的に低くなっている。表 2 によると、距離 100m の時の通信成功率が 0.57 であるのに対し、190m では 0.1 まで低下している。ただし図 1 3 を見ると、距離が同じ 190m でも相対方位によって成功率が大きく異なることがわかる。成功率が低い原因としては、データ量が多いことがあげられる。測位の場合は単一の信号を送受信できればよいが、データ通信の場合、データ信号全ての送受信に成功する必要がある。この信号は 1 秒以上の長さになるため、海底や水面による多重反射（マルチパス）等の影響を受けやすい。本実験は水深が 5m と水平距離に対して非常に浅い場所で行ったため、マルチパスの影響が大きかったと推定される。相対方位による成功率の違いは、データ受信に使うハイドロフォンと ALOC 本体の位置関係によって説明できる。ALOC にはハイドロフォンが 4 台、送波器の前後左

右に1台ずつ設置されているが、このうち前方のものでデータ受信を行っている。このため、送信源が前方にあれば、他の装置の影響を受けずに信号を受けられるため成功率が上がると思われる。

以上の実験により、音響通信・測位装置 ALOC が AUV と海底ステーション間の測位・通信手法として有効であることが確認された。通信性能が測位性能に比べて低いという問題も明らかになったが、これには ALOC のハイドロフォンの配置の工夫や、運用上の工夫（通信時には AUV がステーションの方を向くなど）によって回避可能である。

4、画像による測位手法

4-1、はじめに

水中では光の減衰が大きいため、画像による測位が適用できるのは近距離に限られる。実際の測位可能距離は環境光や水の透明度、浮遊物の有無などにも影響されるが、およそ1～10m程度である。これは音響と比べると非常に小さいが、光は波長が短いので音波よりも高分解能な計測が可能である。このため、AUVがステーションへドッキングするときの最終的な測位手法として最適であり、これまでに複数の提案がなされている[4, 5]。海中ステーションへドッキングするためには、AUV自身とステーションとの相対的な位置関係を求める必要がある。これを画像で行う場合、ステーションに視覚的な位置基準となる「ランドマーク」を装着し、AUVがこれをカメラで撮影することになる。本研究では、視認性の良さと消費電力、そして測位分解能の観点から、LEDアレイをランドマークとする手法を採用する。

4-2、方法

ランドマークとしてステーションに設置するLEDアレイを図14に示す。平面上に3つの緑色のLEDを並べ、その前方に1つの赤色LEDを配置している。LEDの色は他の色でも構わないが、後ろの3つと前の1つの色や明るさを変えることで、識別しやすくすることができる。

このLEDアレイをカメラで撮影し、写ったLEDの位置を求めることで、図15のようにカメラから見たLEDアレイの相対位置関係（直線距離 r 、方位 θ 、相対角 ϕ ）を求めることができる。

画像処理の流れを図16に示す。まず撮影画像に対して歪み補正を行う。次に、画像の膨張・収縮によってノイズを除く。そして抽出された目標物をラベリングし、その面積を計算し、重心やステーションとの相対角を計算する。

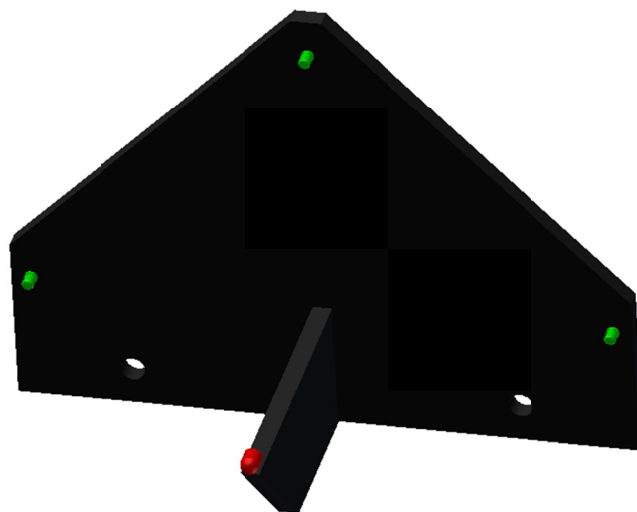


図14 LEDアレイ

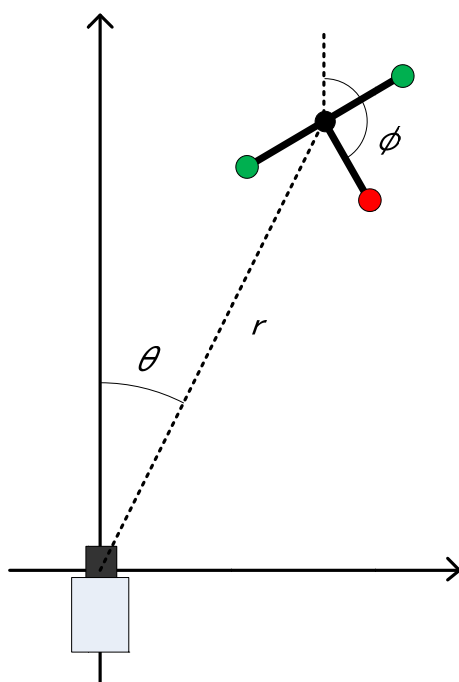


図 1 5 カメラによる相対位置測位

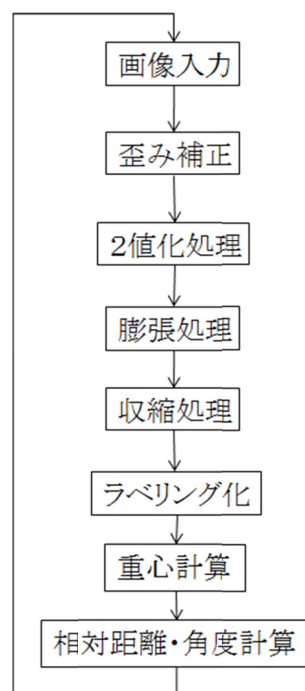


図 1 6 画像処理の流れ

4-3、精度評価試験

4-3-1、方法

LED アレイをアルミフレームに取り付けて、ロボットからの距離を 0.5m、1.0m、1.5m に変えてデータを取得した。ロボットは水槽実験でも利用する AUV Tri-Dog 1 であり、本ロボット前方についているカメラをそのまま利用した。本ロボットについては次章にて説明する。それぞれの距離において、相対角を 180° 、 150° 、 120° に向けた状態で固定し、水中にて各 50 枚の写真を撮った。ロボットの前方カメラと LED アレイの位置関係を図 1 7 に示す。それぞれの位置での距離 r 、方位角 θ 、及び相対角 ϕ の計測結果の標準偏差を求める。なお、LED アレイの大きさは両端の緑の LED 間の距離を 15 cm、緑の LED の上下の距離を 7.5cm、緑の LED の平面から赤の LED までの距離を 7.5cm とした。

画像処理には OpenCV (Intel Open Source Computer Vision Library) を用いる。OpenCV は米 Intel 社で開発された画像処理・画像認識用の C 言語ライブラリである。オープンソースで、商用・非商用を問わず無料で使用できる。静止画にも動画にも対応しているため、特にロボット工学やバイオメトリクスの研究によく使われている[6]。

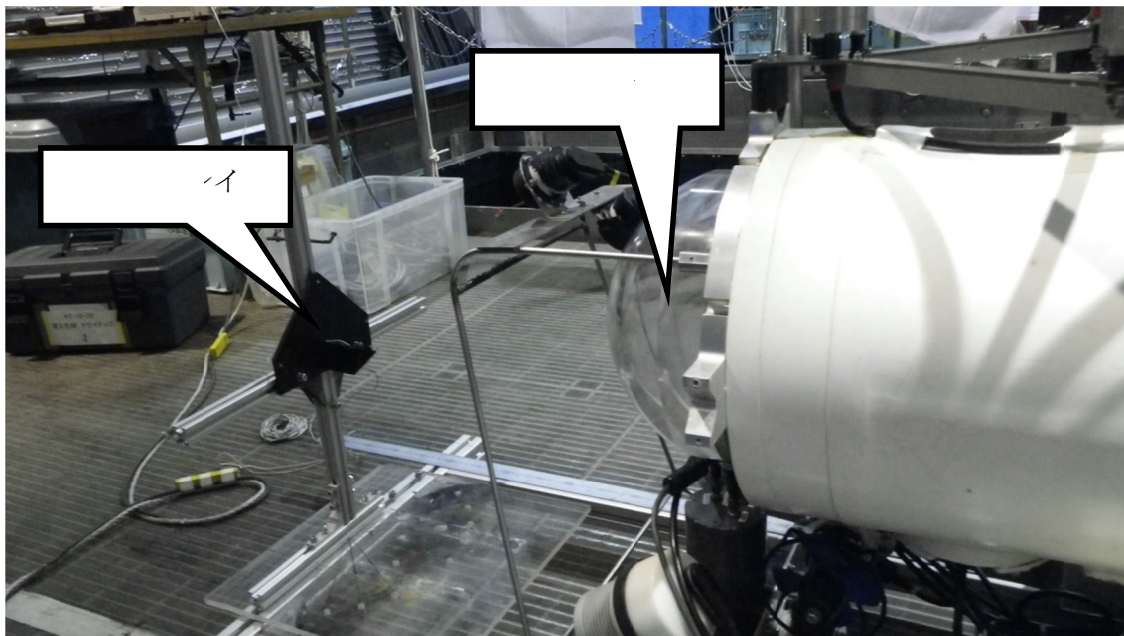


図 1 7 LED アレイ測位精度評価試験のセットアップ

4-3-2、結果

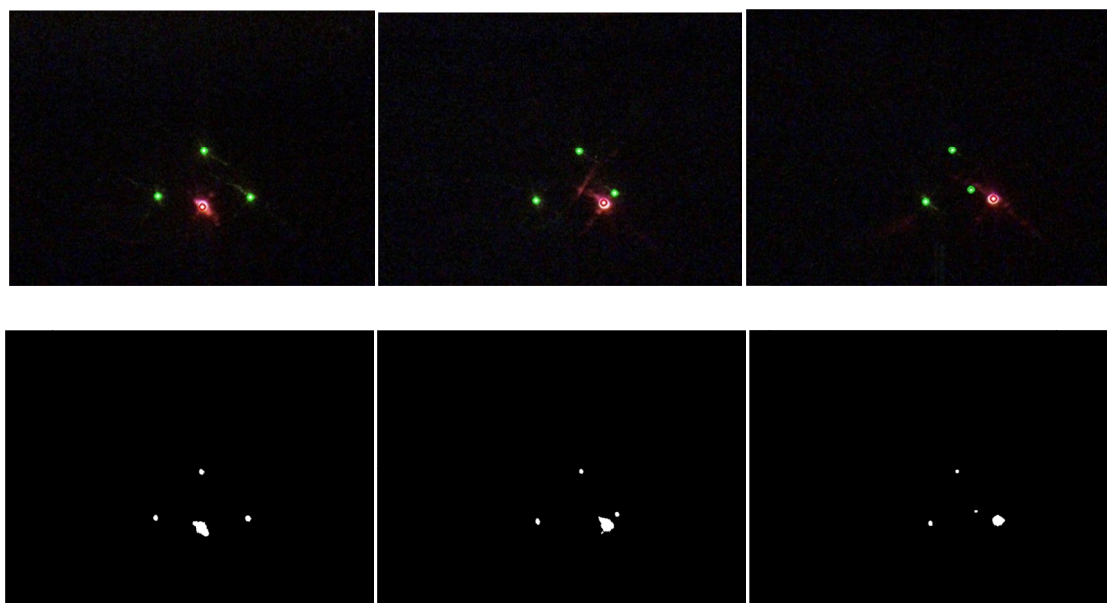
AUV のカメラによって撮影された画像と、LED の抽出結果を図 1 8 ～ 2 0 に示す。それぞれ上段が元画像、下段が顔像処理によって LED を抽出した結果である。三種類の相対角度における結果を示す。

各条件で撮影した 50 枚の画像から求めた、測位結果の標準偏差を図 2 1 ～ 2 3 に示す。図 2 1 からは、LED までの距離が離れるほど標準偏差が大きくなり、その値は距離 0.5m のときで 5mm、1.5m のときで 35mm 程度である。一方、図 2 2 を見ると方位角 θ は距離との明確な関係は見られず、0.1deg 程度となっている。図 2 3 を見ると、相対角 Φ は距離との関係は認められないが、角度によって標準偏差が大きく異なっている。180- Φ が小さいほど、即ち AUV と LED アレイが正対に近いほど標準偏差が小さくなり、その値は 180- Φ =0deg で 1～2deg、180- Φ =60deg で 2～4deg となっている。

4-3-3、考察

本実験では、LED アレイの測位精度評価を行った。LED アレイを用いる利点としては、音響測位センサよりコストが低い、そして自ら発光しているので認識しやすい点があげられる。また、AUV 側に必要なセンサはカメラのみであり、これは観測用と併用できるのでシステムが簡単になるという利点がある。

測位精度試験の結果、LED アレイまでの距離が遠いほど、また相対角が大きいほどそれぞれの測位安定性が悪化することがわかった。しかしながら遠距離においては音響測位によって測位可能である。そして近距離で相対角が小さい条件では、LED アレイによってドッキングに十分な精度が得られることが確認された。このため、音響測位との融合により高精度かつロバストな測位が実現できると考えられる。

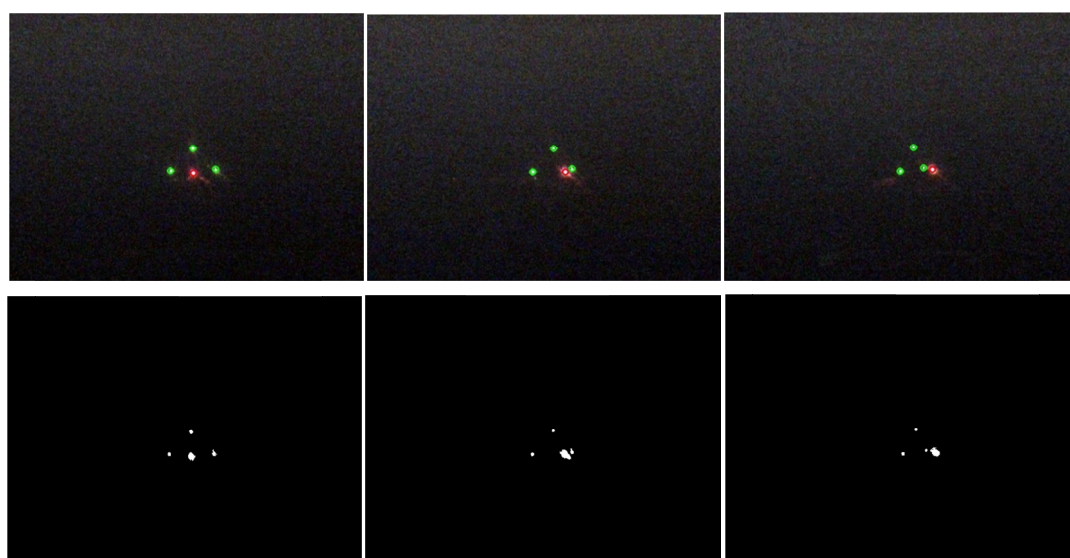


$\phi = 180^\circ$

$\phi = 150^\circ$

$\phi = 120^\circ$

図 1 8 撮影画像（上）と LED 抽出結果（下）：距離 0.5m



$\phi = 180^\circ$

$\phi = 150^\circ$

$\phi = 120^\circ$

図 1 9 撮影画像（上）と LED 抽出結果（下）：距離 1.0m

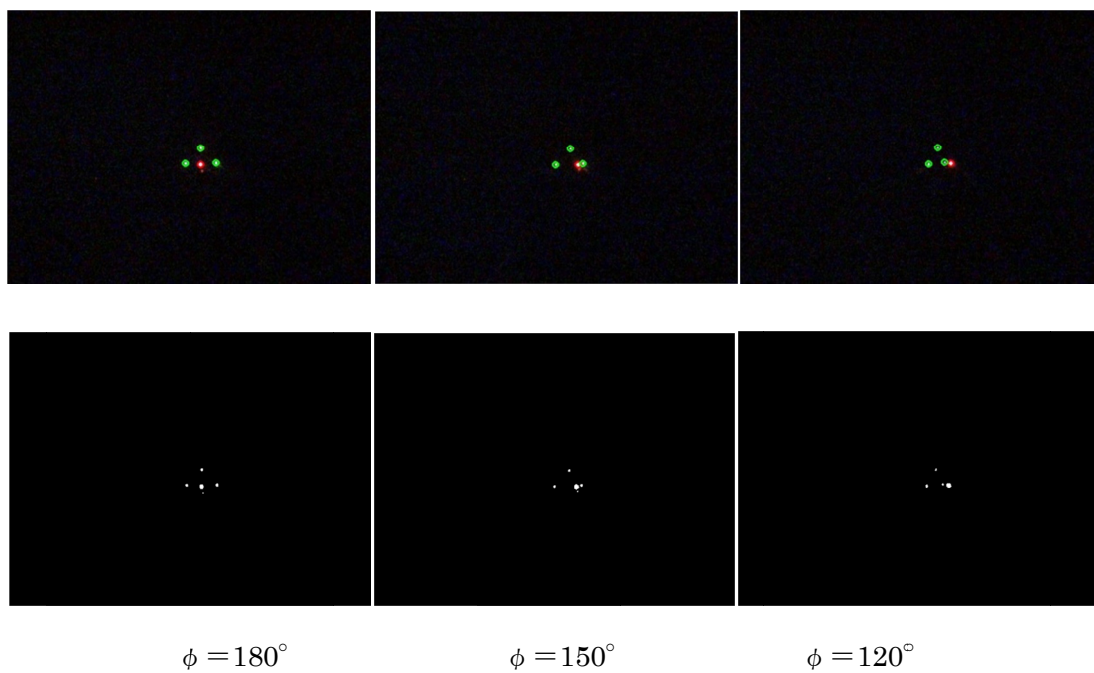


図 2 0 撮影画像（上）と LED 抽出結果（下）：距離 1.5m

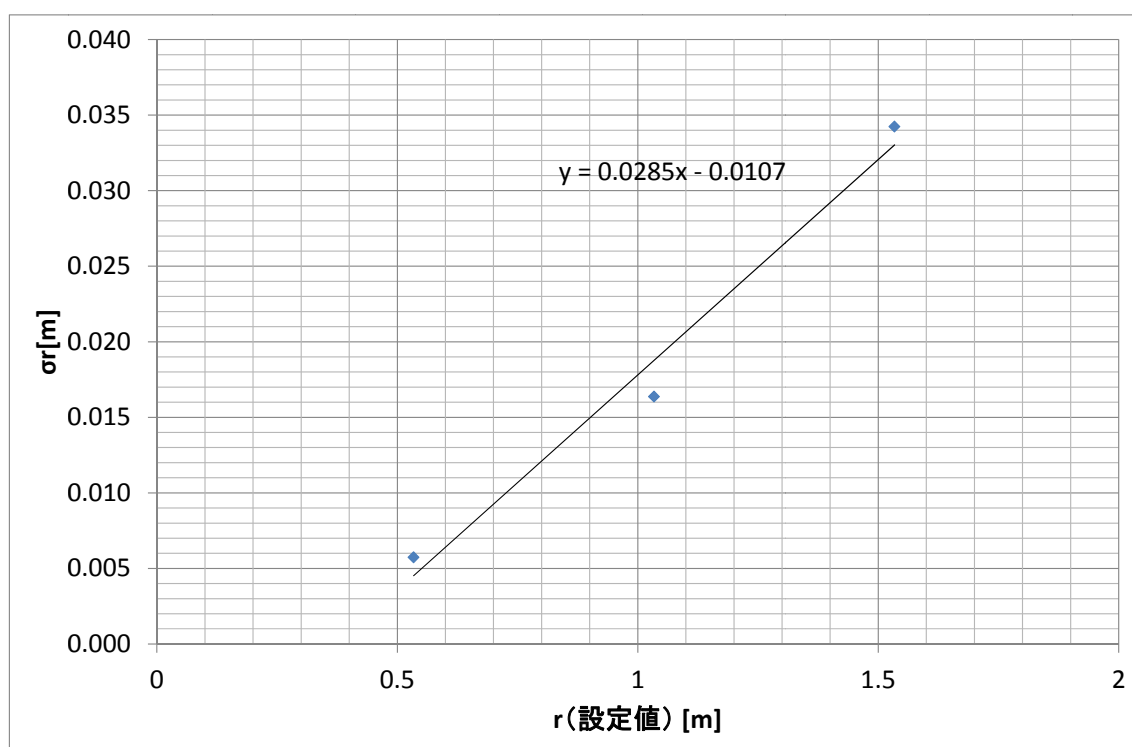


図 2 1 標準偏差（直線距離 r）

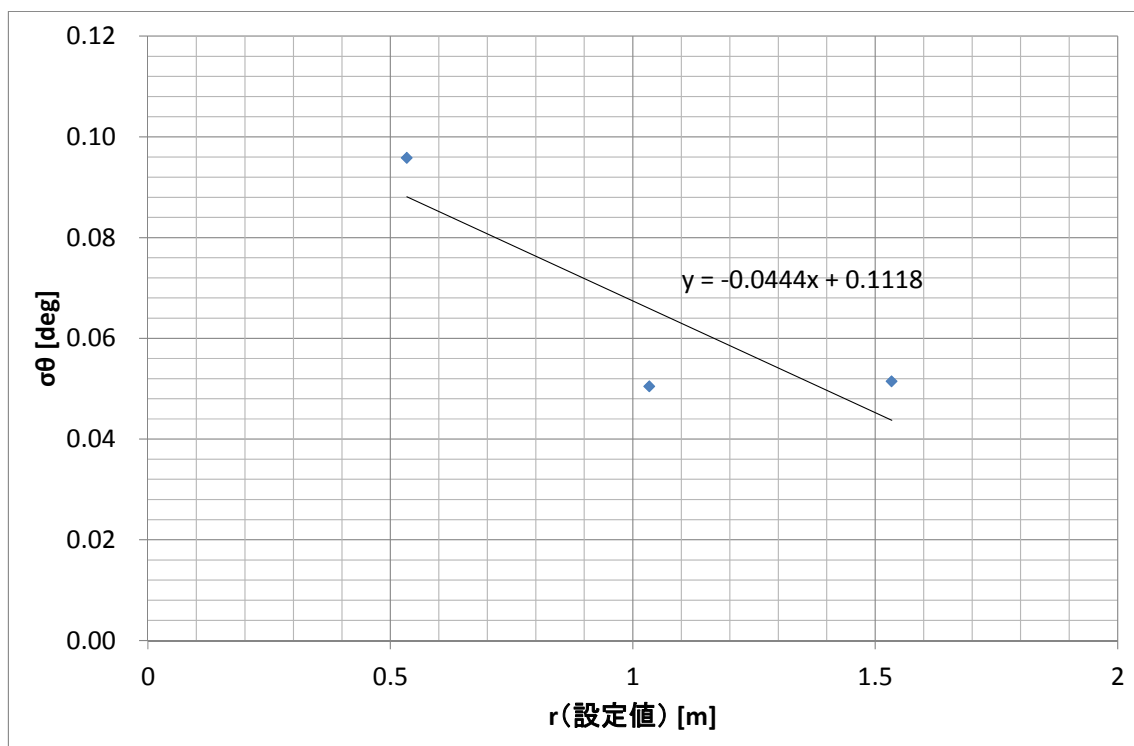


図 2 2 標準偏差 (方位 θ)

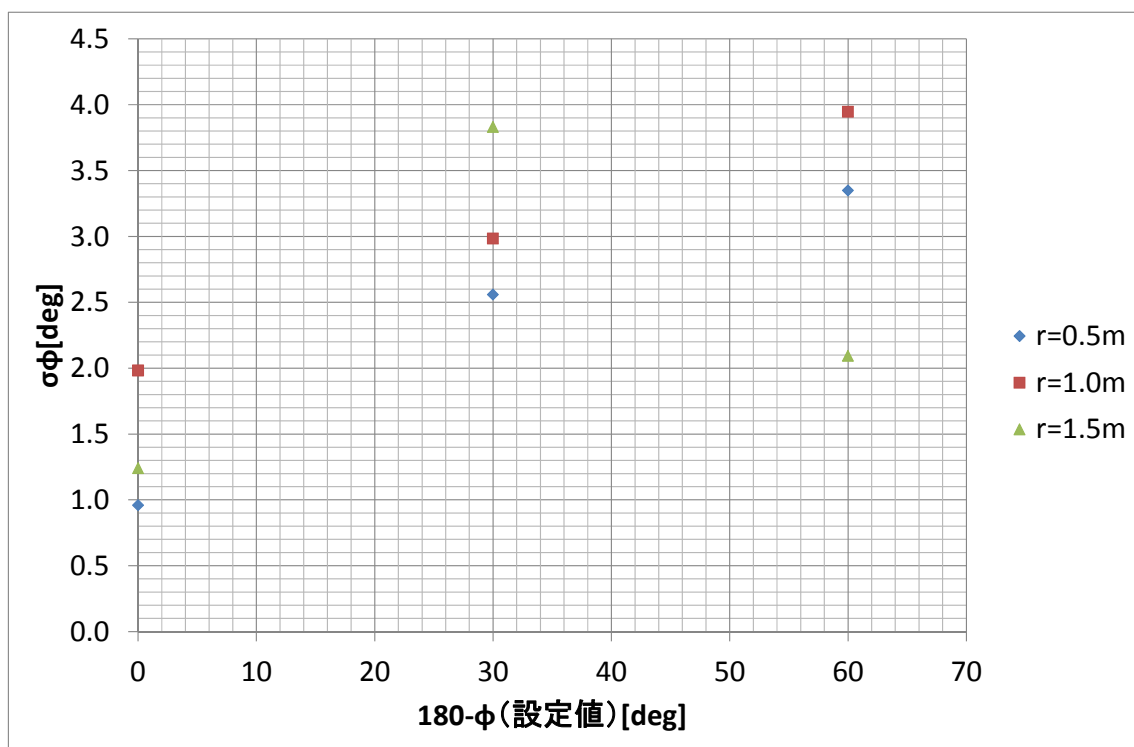


図 2 3 標準偏差 (相対角 ϕ)

5、水槽実験

提案手法の有効性を確認するために、AUV Tri-Dog 1 を用いて水槽実験を実施した。

5-1、方法

実験は東京大学生産技術研究所の試験水槽で行う。本水槽は長さ 8m、幅 8m、深さ 8m の試験水槽である。AUV は音響通信ができ、自身の速度、方位、深度を計測できることが前提条件である。ステーションとの音響測位は水槽環境では難しいので、本実験では図 2-4 のように音響カメラを用いる。そして AUV の制御は外部 PC によって行ものとする。実験配置を図 2-5 に示す。ステーションを原点とし、音響カメラをその真正面に 5.81m 離して設置する。座標系は、LED アレイの位置を原点とし、LED アレイと正対したときに AUV が向く方向を x 軸方向、その 90° 右を y 軸方向とした。実際の設置状況を図 2-6 ~ 2-7 に示す。なお、本実験では音響カメラとして DIDSON (<http://www.soundmetrics.com/>) を利用した。本装置は 1.8 MHz の超音波により周辺環境をスキャンすることができる。本装置の計測結果を画像処理することで AUV の位置と方位を推定する[7]。最終的な AUV の位置は、DIDSON による測位と LED による測位、そして AUV 自身の対地速度と方位角速度からパーティクルフィルタ[8]により確率的に推定する。この測位結果に基づいて AUV を制御し、ステーションヘドッキングさせる。

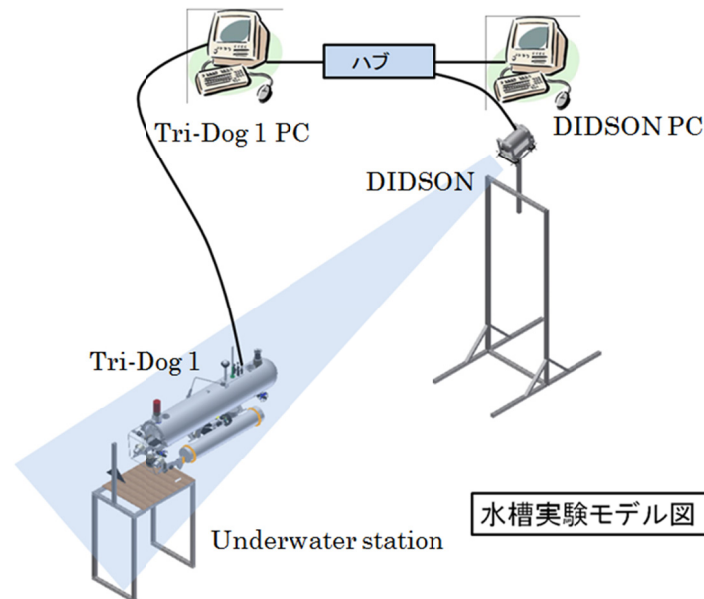


図 2-4 水槽実験の概念

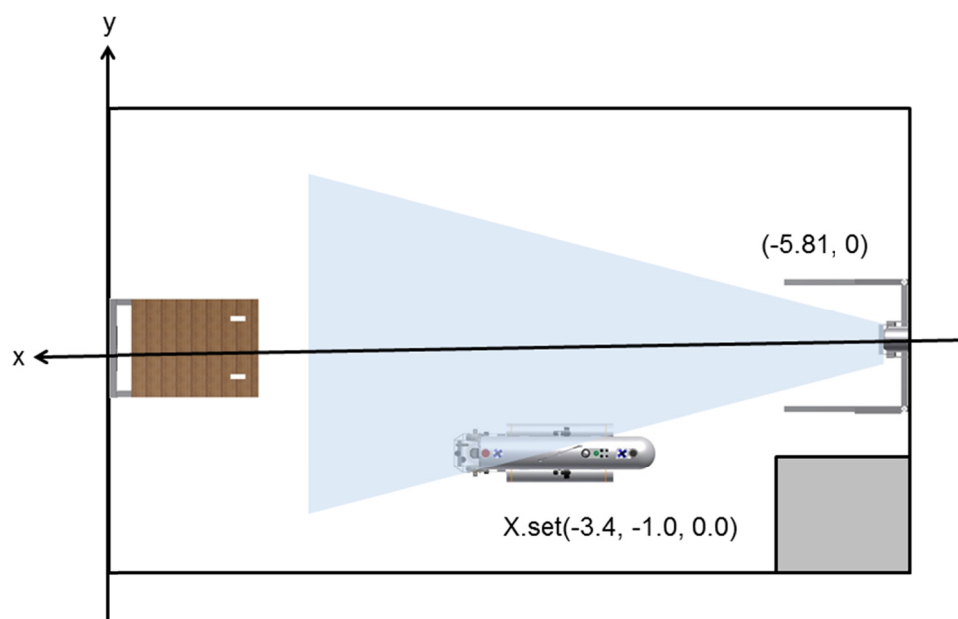


図 2 5 初期配置（上面図）

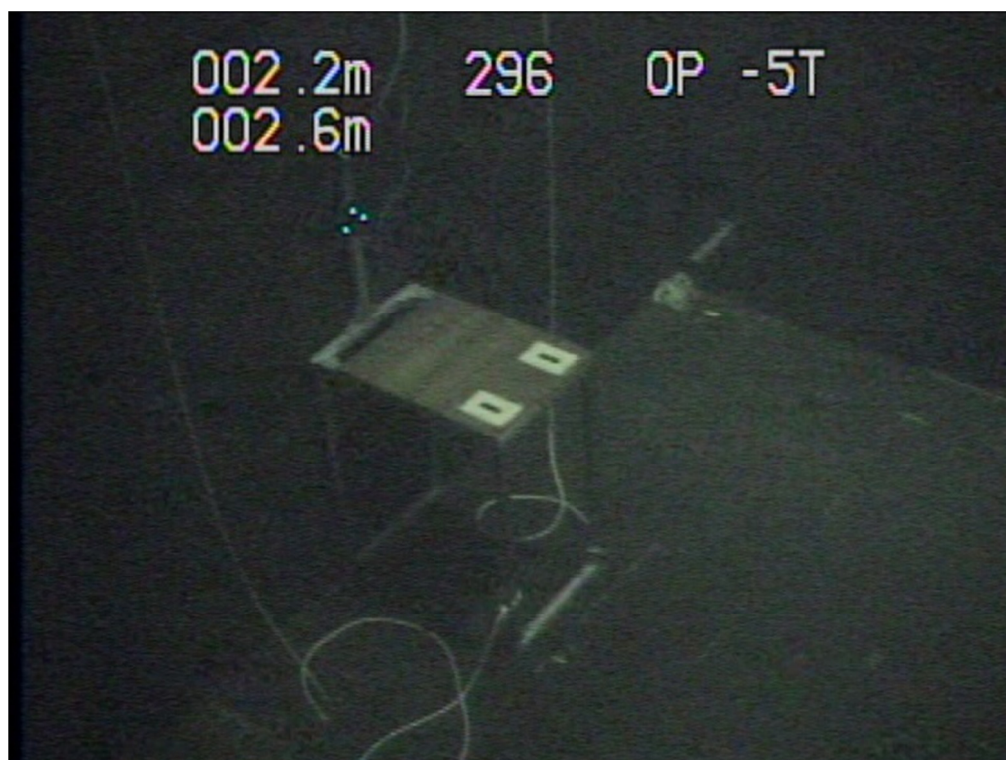


図 2 6 試作ステーション



図 2 7 試作ステーションへ接近する Tri-Dog 1

5－2、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[9]。最大潜航深度は 110m である。

写真を図 2 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 Gyro, 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。環境センサとしては、音響測位通信装置 ALOC を前方上部に備えているほか、前方のアクリルドーム内のカメラ (SONY EVI-D100, NTSC) にてステーションの LED アレイを検出することができる。



図 2 8 AUV Tri-Dog 1

5-3、結果

結果を図 2 9 ～ 3 5 に示す。図 2 9 は測位結果から推定された AUV の軌跡である(①前進、②横移動、③ドッキング)。図 3 0 ～ 3 4 は各種パラメータ(水平位置 X,Y と方位 Yaw のパーティクルフィルタによる推定結果および DIDSON による測位結果、LED の計測結果)の時間変化を表したグラフである。時間基準は AUV がプールの底に達し、水平移動を開始した瞬間である。まずは DIDSON の計測値のみによって移動し、開始から約 142.6 秒後には LED の計測も得られるようになった。そして 301.2 秒後にステーションへのドッキング地点に到達した。このときに真上から撮影した写真を図 3 5 に示す。図 3 5 から、AUV の位置がステーション方向約 1.8cm、横方向約 11.4cm、方位約 2.9° の誤差であったことが確認された。

5-4、考察

図 3 0 ～ 3 2 は DIDSON による計測値とパーティクルフィルタによる推定結果の比較である。これらの図を見ると、水平位置(図 3 0、3 1)についてはドッキングするまでは DIDSON 計測値と推定結果に差がみられるものの、ドッキング後にはほぼ同じ値に収束していることがわかる。これは、パーティクルフィルタで初期値として与えたばらつきが DIDSON 計測値に沿って収束したためと考えられる。一方で図 3 2 からは、方位に関しては DIDSON 計測値と推定結果に常に 10deg 程度の差があることがわかる。この原因としては、DIDSON 計測値の求め方が挙げられる。DIDSON の計測結果から AUV の方位を求めるためには、図 3 6 のように AUV 領域を抽出し、これを楕円近似するなどする必要がある。このため、AUV の高度や位置によって誤差が生じやすい。

図 3 3、3 4からは、LED アレイによって安定した測位が出来ているとともに、AUV が適切に制御されていることがわかる。そして、図 3 5 から計算された程度の誤差であればドッキング装置の工夫によって十分吸収可能であるため、提案手法の有効性が示されたといえよう。

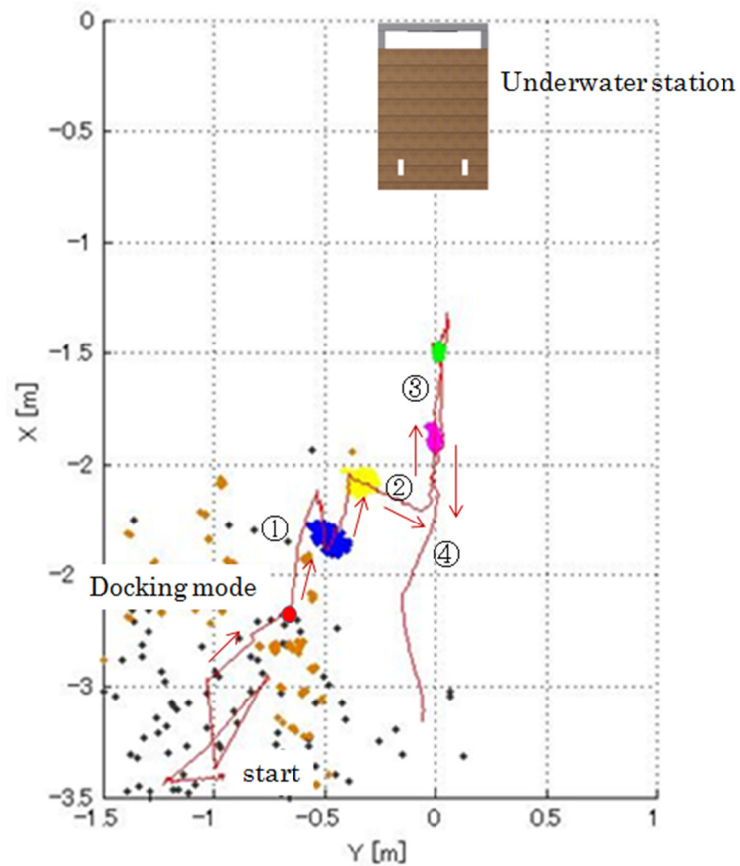


図 2 9 AUV の航跡

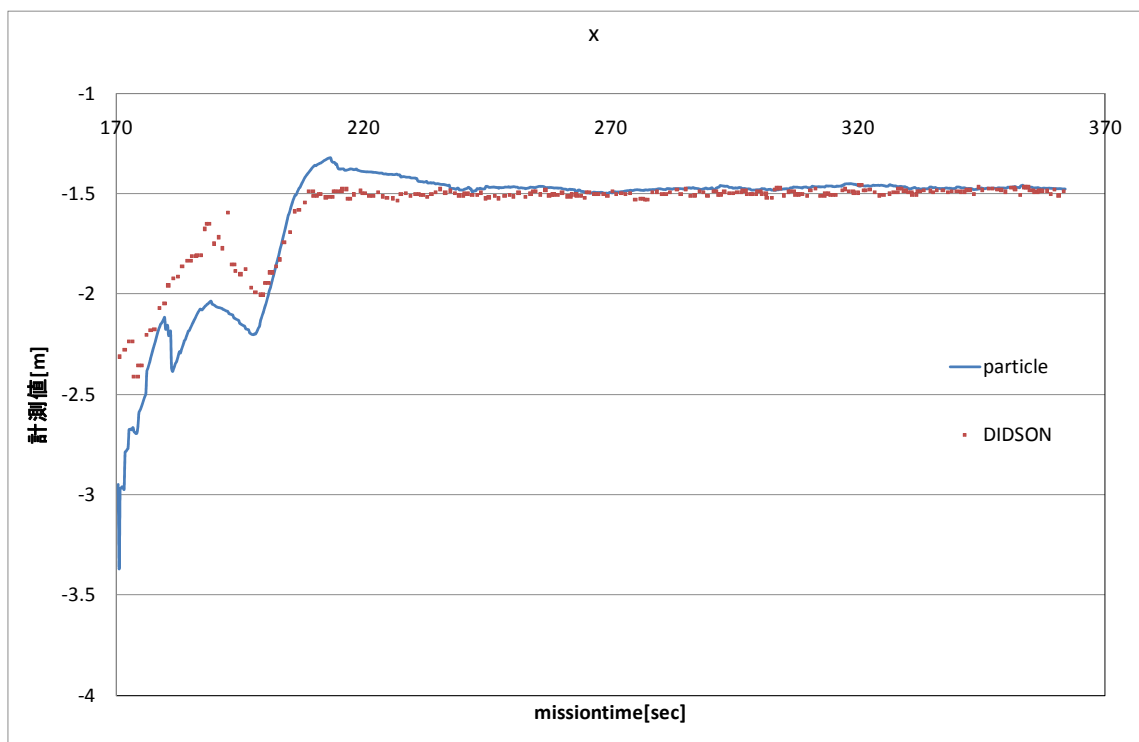


図 3 0 AUV 水平位置 (X) の計測結果

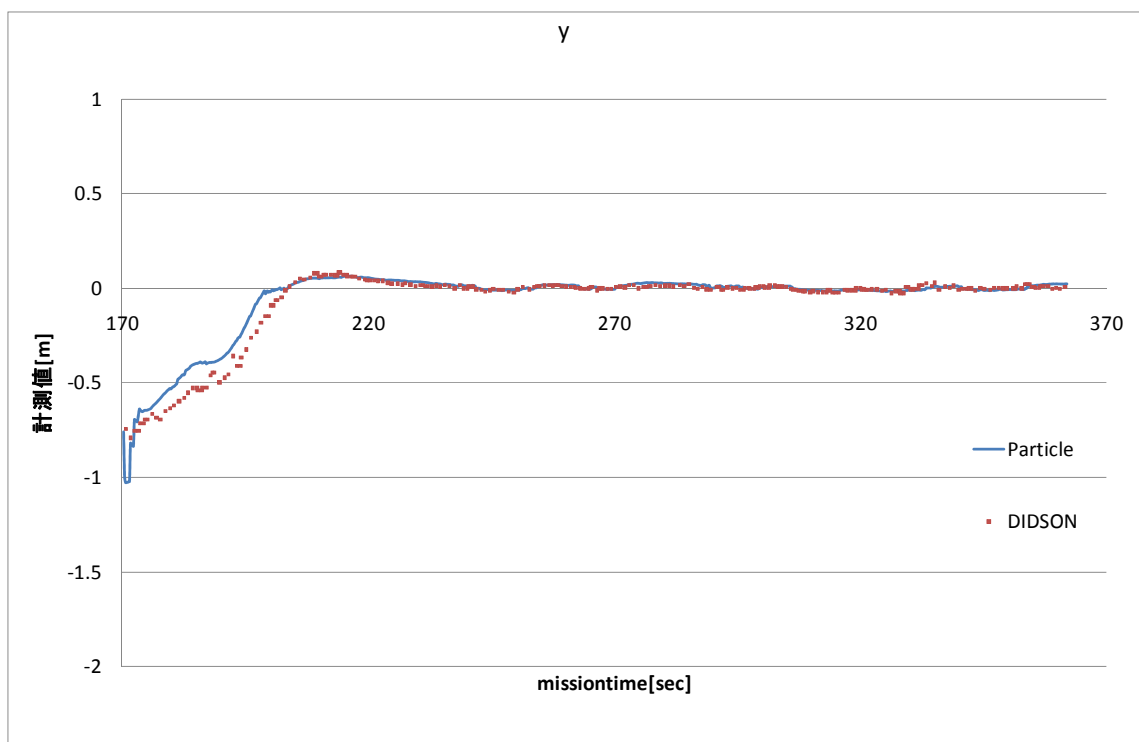


図 3 1 AUV 水平位置 (Y) の計測結果

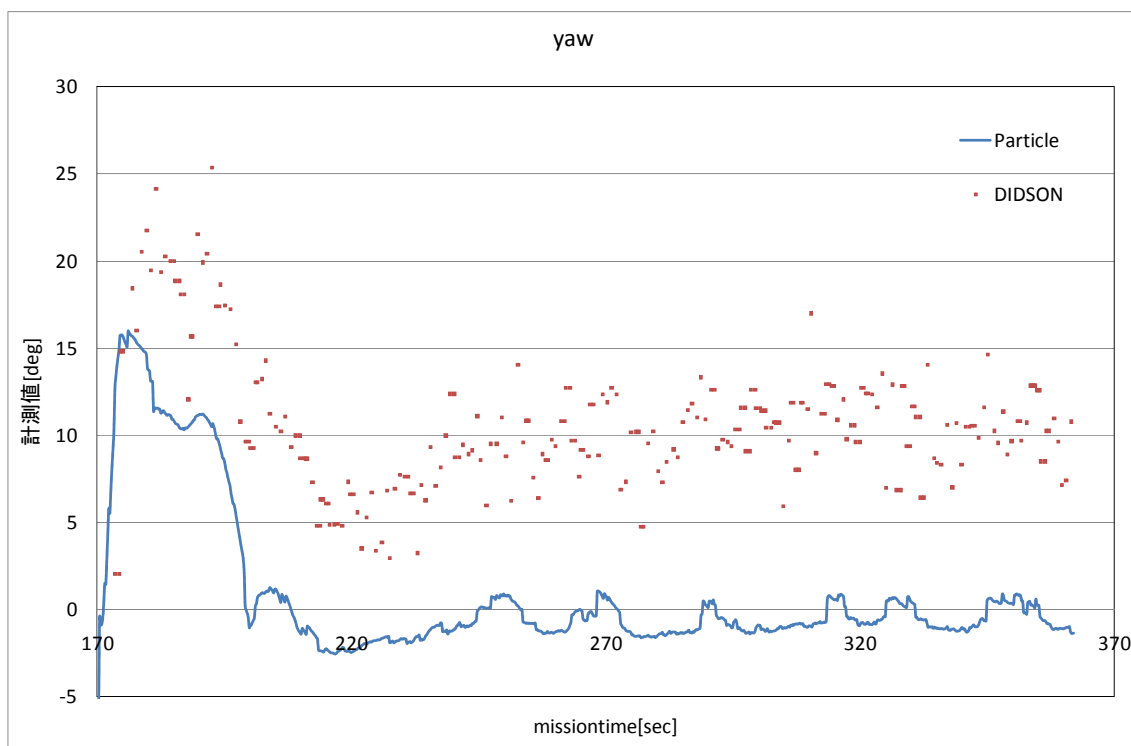


図 3 2 AUV 方位の計測結果

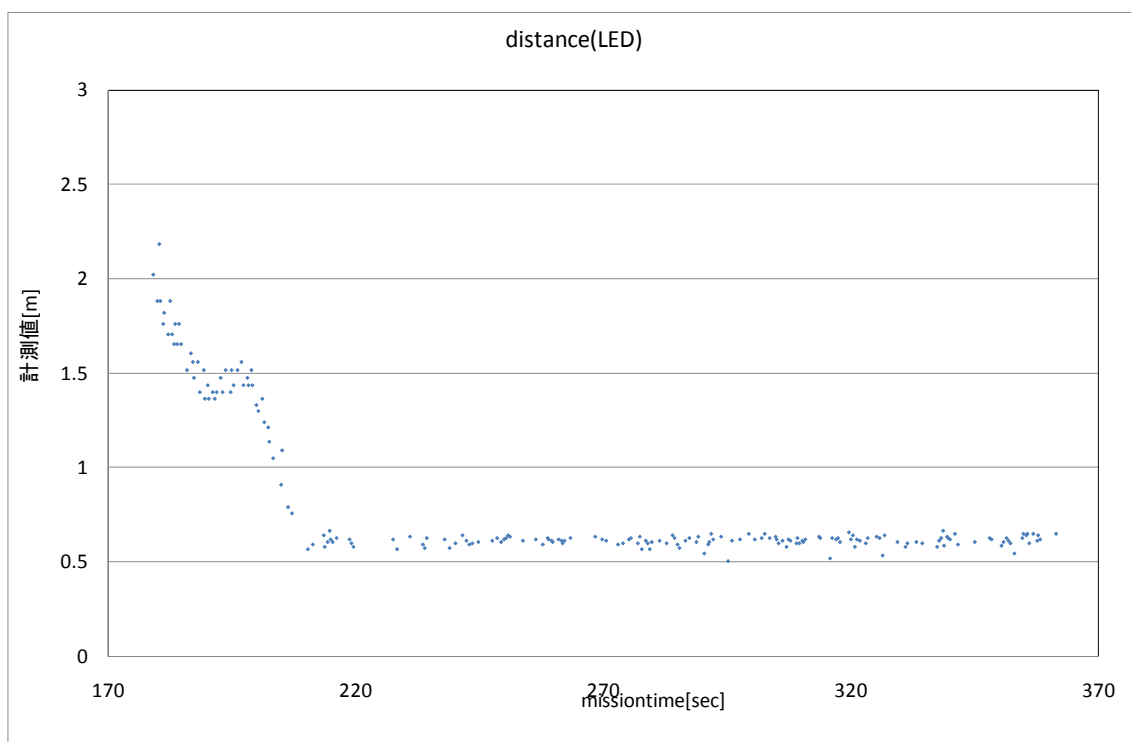


図 3 3 r 計測結果 (LED アレイ)

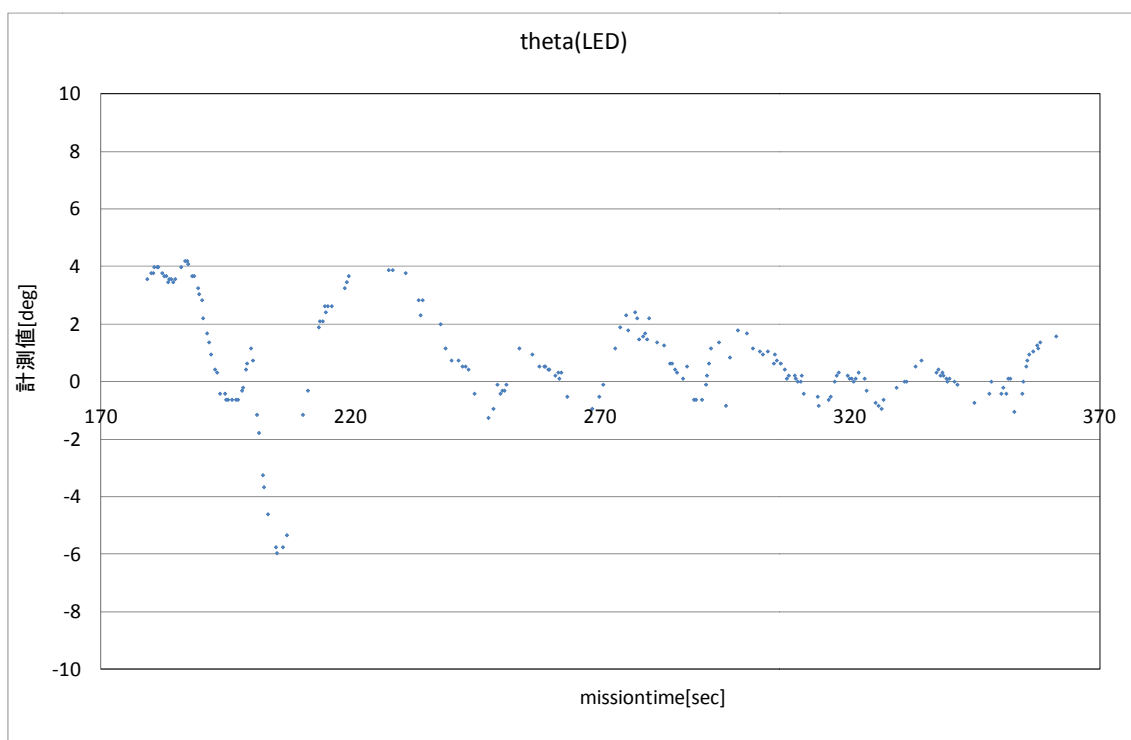


図 3 4 θ 計測結果 (LED アレイ)

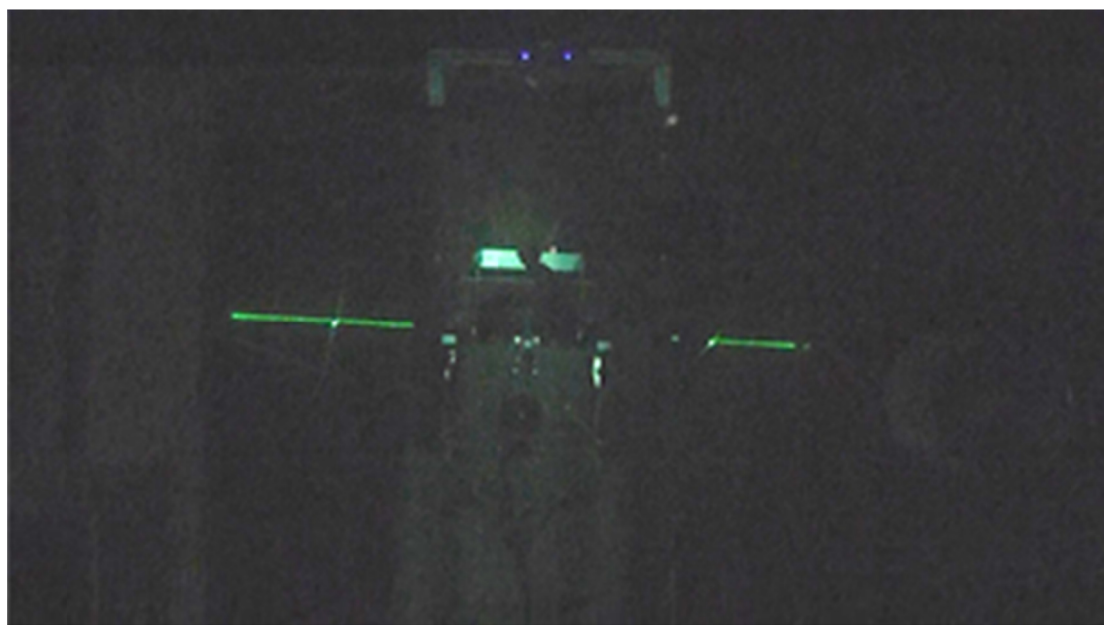


図 3 5 ドッキング時の真上からの撮影結果

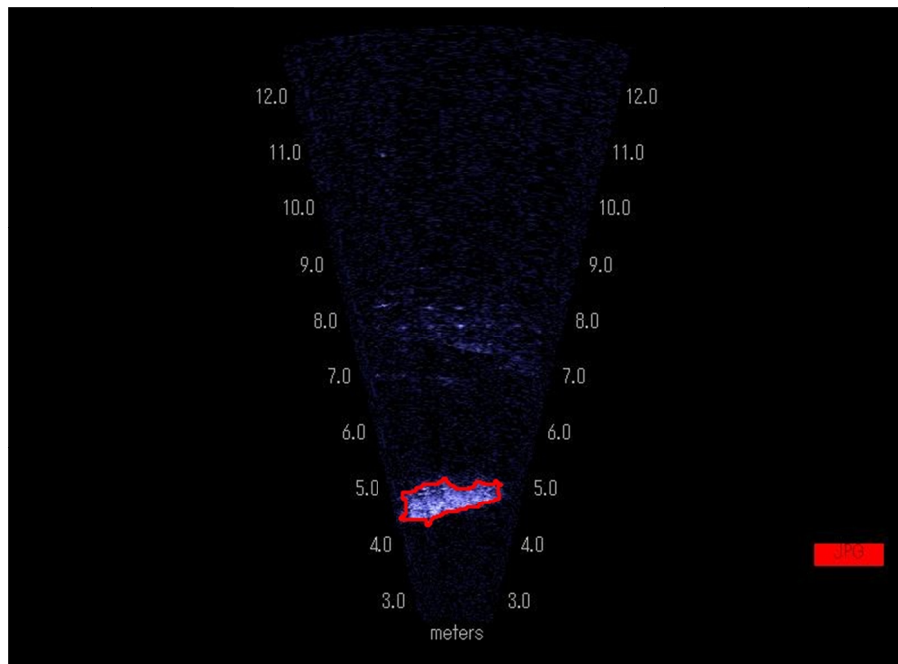


図 3 6 DIDSON 画像（手前の赤枠が AUV の抽出結果、奥には水槽壁面が写っている）

6、まとめ

岸壁や栈橋等の港湾施設を安心して運用するためには、水中支持部の定期点検が不可欠である。具体的な検査項目としては肉厚や腐食状況、生物付着状況、堆砂状況などがあり、現在は主にダイバーか遠隔操縦ロボット（ROV）によって行われている。本研究ではこのような点検作業の自動化手法として、AUVの充電・データ転送を行う海底ステーションとAUVを組み合わせることで、全自動かつ長期展開が可能なシステムを提案した。

海底ステーションを用いてAUVを充電し、またAUVによる観測結果を陸上の監督者へ転送するためには、AUVはステーションに自律的にドッキングできることが必須であり、これを実現するためには、AUVはセンチメートル精度でステーションとの相対位置関係をリアルタイムに把握することが求められる。水中での相対測位手法には主に音響的手法と視覚的手法がある。前者は遠距離でも適用可能だが分解能が悪く、後者は高分解能であるが至近距離でしか適用できないという特徴がある。そこで本研究においては、AUVが海底ステーションに対してリアルタイムに相対位置を求める手法として、音響的手法と視覚的手法を組み合わせ、さらに他のセンサ情報と融合することにより、高精度でかつセンサノイズに対してロバストな相対測位手法を開発した。

本年度は、まず音響による測位手法として、前年度までに申請者らが開発した音響測位・通信装置ALOC（Acoustic Localization and Communication）の性能検証試験を行った。2台のALOCを実海域に設置して試験したところ、最大200m離れても測位可能であることを確認した。また、計測の安定性に関しても、距離の標準偏差が0.1m前後、方位の標準偏差が0.3～2.1degとなった。この値は、AUVがステーションに搭載されたLEDマーカーを発見するために十分な精度である。通信性能が測位性能に比べて低いという問題も明らかになったが、これにはALOCのハイドロフォンの配置の工夫や、運用上の工夫（通信時にはAUVがステーションの方を向くなど）によって回避可能である。

次に、画像による測位手法としてLEDアレイとカメラによる手法を提案した。LEDアレイをステーションに設置し、AUVに搭載したカメラによってこれを撮影する。これにより、画像中のLED位置からAUVとLEDアレイの相対位置関係を求めることができる。水槽実験により、距離0.5～1.5mの至近距離において、距離の標準偏差が0.03m程度で安定した測位ができることを確認した。

最後に、AUV Tri-Dog 1による水槽試験を行った。ALOCの代わりに音響カメラDIDSONを用い、LEDアレイの検出結果と合わせて相対位置をリアルタイムに推定した。そしてこの位置情報を元に自動制御し、試作ステーションへドッキングさせた。最終的な誤差は水平位置が10cm程度、方位が3deg程度となった。このレベルの誤差であればドッキング装置の工夫によって吸収可能であることから、提案手法の有効性が示された。

このようなシステムが実現すれば、人間が現場へ行く必要がなくなるため港湾施設の保守点検コストの大幅な削減が可能になる。特に羽田空港のD滑走路のような大規模構造物の定期点検に威力を発揮すると期待される。また、天候・時間によらない対応が可能になるため、災害時の緊急調査や重要施設の警備にも応用可能である。

参考文献

1. 浦環、高川真一, *海中ロボット*. 1997: 成山堂書店. 309.
2. 東京大学三崎臨海実験所. [cited 2010; Available from: <http://www.mmbs.s.u-tokyo.ac.jp/>].
3. *Google Earth*. [cited 2010; Available from: <http://www.google.com/earth/index.html>].
4. Evans, J., et al. *Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation*. in *OCEANS 2003. Proceedings*. 2003.
5. Park, J.-Y., et al., *Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera*. *Ocean Engineering*, 2009. **36**(1): p. 48-61.
6. 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム, *OpenCV プログラミングブック 第2版 OpenCV 1.1 対応*. 2 ed. 2009: 毎日コミュニケーションズ. 496.
7. 王曉琦, *画像センサと音響ビデオカメラの融合による AUV の海底ステーションへのドッキング手法*, in *海洋技術環境学専攻 平成 22 年度修士論文*. 2011, 東京大学.
8. Thrun, S., W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic robotics*. 2005, Cambridge, Mass.: MIT Press. xx, 647 p.
9. Kondo, H., T. Ura, and Y. Nose, *Development of an Autonomous Underwater Vehicle "Tri-Dog" Toward Practical Use in Shallow Water* *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2001. **13**(2): p. 205-211.