

2016 年 2 月 1 日修了

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

## 環境変化にロバストなホバリング型 AUV のドッキング手法

### Docking method for hovering type AUVs with robustness

学籍番号 47-146639 岡田 宣義

指導教員 巻 俊宏 准教授, 浅田 昭 教授

Keywords : ホバリング型 AUV, ドッキング, 状態推定, LED, フィードフォワード制御

Keywords : Hovering type AUV, Docking, State estimation, LED, Feed forward control

## 1. 序論

日本の排他的経済水域には多くの海底資源の存在が確認されており, これらの調査, 開発は世界に対するアドバンテージとなると考えられている [1]. これらの調査に, 自律型海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) を使う方法がある. 中でもサージ, スウェイ, ヨー, ヒープに自由度を持つホバリング型 AUV は複雑な地形の海底を詳細に観測可能である. しかし AUV はバッテリー充電や観測データ回収の度に AUV を海底から船上へ引き上げる必要がある. 長期的な海底観測を実現するために, 海底に海底ステーション (Seafloor Station) を設置し, AUV のバッテリー充電やデータ転送を実施するシステムを開発中である. ホバリング型 AUV のドッキング手法として Fig. 1 に示すような AUV とステーション間の距離が遠距離である場合には音響によって AUV を誘導し, 近距離ではステーションに取り付けられた複数の LED から構成される LED アレイを画像で認識することで高精度な位置推定を行う手法が提案されている [2]. しかし, この手法では LED アレイをアレイとして認識しているため, 濁りによる視界低下や魚群に隠される等して一部の LED が認識不能になった際に AUV の位置推定精度が低下しドッキングが困難になる課題がある.

本研究では, 視界が制限される, または流れがあるような絶えず変化する環境におけるロバストなドッキング手法を提案する. そして提案手法を実機に実装し, 海域試験で得られたデータを元にしたシミュレーション, 並びに水槽での試験を通して提案手法の有効性を検証する.

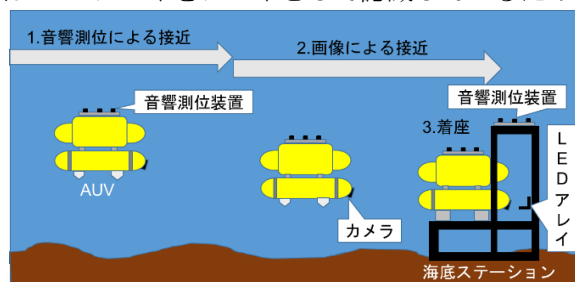


Fig.1 Docking method for a hovering type AUV

## 2. 提案手法

LED の画像測位に基づく自己位置推定と流れに対する制御の二つの側面から新たなドッキング手法を提案する. 画像測位では, LED アレイをアレイとして認識するのではなく, それぞれの LED を個別に認識し, それぞれの LED の相対方位から自己位置推定を行う手法を提案する. また, 制御では従来の PID 制御に加え, ステーションに搭載された流速計によって計測された流速, 流向を音響通信によって AUV に伝達し, AUV はその値をもとに流れによる外乱を推定し, フィードフォワード制御を行う手法を提案する.

### 2.1 AUV の状態推定

本手法で AUV が推定する状態はドッキング位置を原点としたステーション座標系における水平位置  $(x, y)$  とヨー角  $\psi$  である. AUV はセンサの計測値をもとに状態推定を行うが, 計測値には誤差が含まれているため, 確率的な状態推定を行う. 本研究では確率的状态推定手法の一つであるパーティクルフィルタ [3] を用いる. パーティクルフィルタでは, 状態の確率分布を多数のサンプルの集合として表現する. 時刻  $t$  における  $i$  番目のパーティクルの速度  $\mathbf{v}_t^i$ , 角速度  $\omega_t^i$  をもとに, 現在の状態  $\mathbf{S}_t$  から次の状態  $\mathbf{S}_{t+1}$  を予測する予測フェイズと, 画像観測で得られた方位  $\theta_t$  や音響測位によって得られた距離, 方位をもとに予測した状態を修正する観測フェイズがある.  $i$  番目のパーティクルについて, 予測フェイズにおける時刻  $t+1$  での AUV の状態  $x_{t+1}^i, y_{t+1}^i, \psi_{t+1}^i$  の推定式は以下ようになる.

$$\begin{pmatrix} x_{t+1}^i \\ y_{t+1}^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi_t^i & -\sin \psi_t^i \\ \sin \psi_t^i & \cos \psi_t^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{xt}^i \\ v_{yt}^i \end{pmatrix} \Delta t + \begin{pmatrix} x_t^i \\ y_t^i \end{pmatrix} \cdots (2.1.1)$$

$$\psi_{t+1}^i = \omega_t^i \Delta t + \psi_t^i \cdots (2.1.2)$$

観測フェイズでは, AUV が推定した状態が正とした場合における, AUV から LED  $j$  までの視線ベクトル  $\mathbf{P}_t^{ij}$ , 方位  $\theta_t^{ij}$  ( $j=1, \dots, J$ ) を計算する. この方位  $\theta_t^{ij}$  と, カメラで撮影した画像から得られた LED の

方位 $\hat{\theta}_t^k(k=1, \dots, K)$ を比較し、2.2 節で述べる方法で LED の判別をする (Fig.2). 推定した LED の対応関係に基づき LED の方位と画像観測で得られた方位の差から、2.3 節で述べる方法でそのパーティクルの尤度を計算する. 全てのパーティクルについて尤度を求め、その結果に応じて再サンプリングを行う.

## 2.2 画像測位

画像測位では、Fig. 3 に示すように、カメラで撮影した画像に対し歪み補正、色抽出、二値化、ノイズ除去、ラベリングの処理をすることで、画像から LED を抽出する. 抽出された LED が 4 点未満の場合はそれぞれの方位を計算する. 画像認識された LED と実際の LED の対応関係を以下のように求める.  $i$  番目のパーティクルから推定した  $j(1 \leq j \leq 4)$  番目の LED の方位を  $\theta^{ij}$ , 画像から得られた LED  $k(1 \leq k \leq K)$  の方位を  $\theta^k$  とする. 式 2.2.1~2.2.4 で定義されるすべての  $j$  と  $k$  の組み合わせ  $D$  を、式 2.2.5 で定義される  $\theta^{ij}$  と  $\theta^k$  の差の絶対値の合計  $d\theta$  が最小となるように求める.

$D(j, k) = 1$  ( $j$  番目の LED に画像内の  $k$  番目の LED に割り当てた場合)

$$\dots (2.2.1)$$

$D(j, k) = 0$

( $j$  番目の LED に画像内の  $k$  番目の LED に割り当てなかった場合)

$$\dots (2.2.2)$$

$$\sum_{k=1}^K D(j, k) \leq 1 (k = 1, \dots, K) \dots (2.2.3)$$

$$\sum_{j=1}^J D(j, k) = 1 (j = 1, \dots, J) \dots (2.2.4)$$

$$d\theta = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K |\theta^{ij} - \theta^k| D(j, k) \dots (2.2.5)$$

## 2.3 尤度計算

時刻  $t$  での画像測位における  $i$  番目のパーティクルの重み  $w_t^i$  は定数  $A$  を用いて式(2.2.6)のように表せる.

$$w_t^i = A^K \prod_{j=1}^J \prod_{k=1}^K \exp\left((\theta_t^{ij} - \hat{\theta}_t^k)^2 D(j, k)\right) \dots (2.2.6)$$

この時推定した LED の方位と観測で得られた LED の方位の差が閾値以内であれば重みを付ける. カメラと LED までの距離の関係性から、閾値を設定する. LED の方位計測の標準偏差の値を設定する. 標準偏差はカメラと LED の距離が遠いほど値を小さくし、近距離では値を大きく設定する.

## 2.4 流れを考慮したフィードフォワード制御

従来手法では AUV の現在の位置から目標位置までの距離に応じて目標速度を求め、その速度を入力値として PID 制御に基づいてスラスタの指令値を求めている.

本手法では流れを考慮したフィードフォワード制御を行う. ST に搭載された流速計から ST 座標系の流速  $u$ , 流向  $\phi$  を計測し、音響通信によって AUV に伝達する. AUV はその値を元に、スラスタの出力値を計算する (Fig.4). 計算式は以下ようになる. 係数  $\alpha (=C\rho A/2)$  は予め実験で求めた定数である ( $C$ : 抗力係数,  $\rho$ : 水の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $A$ : AUV の投影面積 ( $\text{m}^2$ )).

$$F_{\text{surge}} = \alpha_{\text{surge}} (u \cos(\phi - \psi))^2 \dots (2.3.1)$$

$$F_{\text{sway}} = \alpha_{\text{sway}} (u \sin(\phi - \psi))^2 \dots (2.3.2)$$

求めた項を  $\cos$ ,  $\sin$  成分の符号に応じて従来手法のスラスタ指令値に加算または減算する.

## 3. 検証試験

本手法の有効性を検証するために、海域試験結果を用いたシミュレーションならびに水槽での実機試験による試験を行った.

### 3.1 状態推定のシミュレーション, および結果

2015 年 8 月に従来手法で AUV Tri-TON2 [4] による海域試験を行った. ドッキング試験に使用したステーションには 4 点の LED から構成される LED アレイ、音響装置が搭載されていた. 試験の様子を

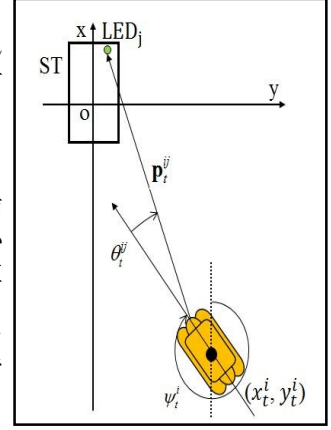


Fig.2 State estimation based on LED observation.

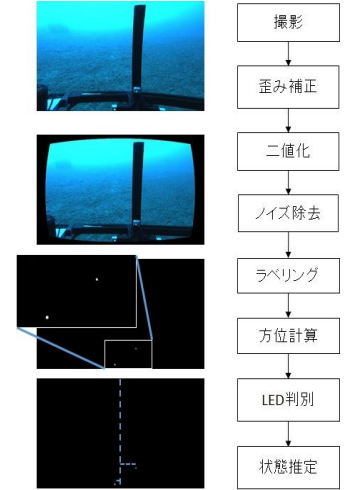


Fig.3 Image processing.

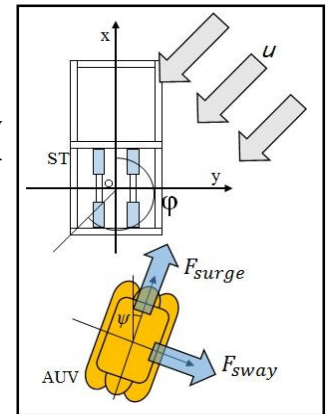


Fig.4 AUV control against the current.

Fig. 5 に示す．海域試験のログデータを用い，取得した LED の画像を加工し，認識可能な LED の数を人工的に変え，従来手法・提案手法について状態推定のシミュレーションを行った．AUV はステーション(ST)正面から約 3m 離れた位置から開始し，画像によるアプローチを行う．海域試験時は音響測位も併用したが，本シミュレーションでは画像測位によるパーティクルの収束性を検証するため，音響測位のデータは使用しないものとする．

シミュレーションの結果，認識可能な LED が 3 点の場合において，AUV が推定した状態のパーティクルフィルタの分布の標準偏差を，従来・提案両手法で比較した．その結果を Fig.6-7 に示す．従来手法ではアレイとして認識できず標準偏差が増大し続けたのに対し，提案手法では標準偏差が収束した．LED が 1 点，2 点の場合も 3 点の結果と同様に従来手法ではパーティクルの分布の標準偏差が増大し続け，提案手法では収束する結果となった．



Fig. 5 Docking experiment in the sea

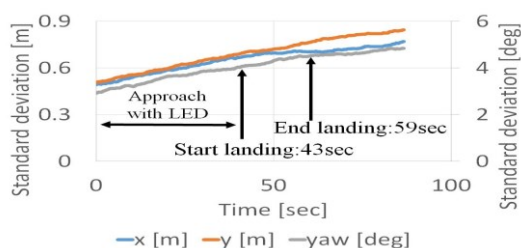


Fig. 6 Standard deviation of conventional method (with 3 LEDs)

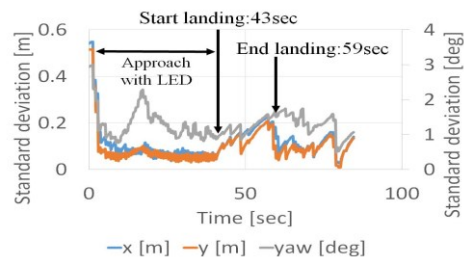


Fig. 7 Standard deviation of proposed method (with 3 LEDs)

### 3.2 水槽試験

水槽試験で使用した AUV とステーションは海域試験と同じである．水槽では音の反響や残響により音響測位・通信が困難であるため，音響装置は使用しないものとした．また，流れのある環境における試験では流速計も取り付けて試験を行った．

#### 3.2.1 水槽試験 - LED が一部認識できない場合 -

試験の流れは，はじめ AUV を無線通信によりステーション正面約 2m 手前の初期位置に誘導する．誘導後ミッションを開始し，真っ直ぐ下に潜航する．目標高度 1m に到達すると LED の探査を開始し認識可能である場合ドッキングを試みる．本試験では，初期位置では 4 点の LED を認識させ，AUV が LED を認識した後に認識可能である LED の数を変化させる．ドッキングに成功または失敗後に 2m 手前まで後退し，再度ドッキングを試みる．この繰り返しの計 5 回行った．また AUV の位置推定精度を検証するため AUV にマーカーを取り付け，水面上の定点からレーザーを水槽底に向けて照射した．レーザー照射位置は ST 座標系における(-1.3m, 0.0m)である．AUV が  $x=-1.3\text{m}$  の地点を通過する際のマーカー上のレーザーの投影位置を撮影した画像から AUV の実際の位置を計算し，その結果と AUV 自身が通過時に推定した自己位置と比較し，推定誤差を検証した．

結果は，従来手法ではドッキングに成功できなかったのに対し，提案手法では LED が 3 点と 2 点認識可能である場合にドッキングに成功した．提案手法における LED が 3 点の場合，AUV がドッキングに成功した際に AUV が推定した航跡を Fig. 8 に示す．認識可能な LED が 3 点と 2 点，それぞれの場合において，従来・提案両手法のドッキング成功率ならびに位置推定誤差の比較を Table. 1 に示す．3 点の場合では，ドッキングの成功率が 80%の向上，位置推定精度は x 方向に 0.16m, y 方向に 0.10m の精度向上が確認され，2 点の場合ではドッキング成功率が 80%向上，位置推定精度は x 方向に 0.14m, y 方向に 0.07m の精度向上が確認された．

Table. 1 comparison of conventional method and proposal

	Docking success rate	Accuracy evaluation of estimation(x,y)
Conventional method	0%	(0.19m, 0.17m)
Proposal method(3LEDs)	80%	(0.03m, 0.07m)
Proposal method(2LEDs)	80%	(0.05m, 0.10m)

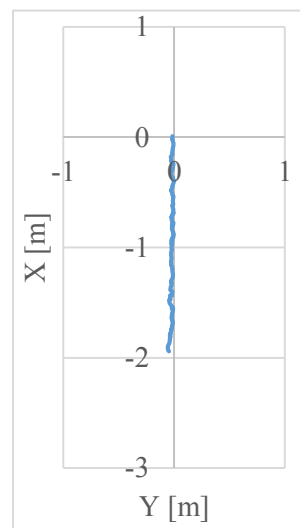


Fig. 8 AUV trajectory (with 3 LEDs)



### 3.2.2 水槽試験 - 流れのある場合 -

流速 0.15m/sec, 流向  $0^\circ$  での試験の様子を Fig. 10 に示す. ST 座標系における流向  $\phi$  を  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $0^\circ$  とし, それぞれの流向に対し流速  $u$  を 0.05m/sec, 0.10m/sec, 0.15m/sec の計 12 通りで従来手法並びに提案手法で試験を行った. 試験の流れは, はじめ AUV を無線通信によりステーション正面約 3m 手前水面の初期位置に誘導する. 誘導後ミッションを開始し, 真っ直ぐ下に潜航する. 目標高度 1m に到達後 LED を探査し, LED 認識後ドッキングを試みる. ドッキング成功または失敗後 3m 手前まで後退し, 再びドッキングを試みる. この繰り返しを計 5 回行った. また, 水槽では音響装置を使用しないため, 流速・流向は潮流発生装置の設定値を予め AUV に与えた. 流向  $0^\circ$ , 流速 0.15m/sec の場合での従来手法の AUV の航跡結果を Fig. 11 に, 提案手法の AUV の航跡を Fig. 12 に示す. また, この時のドッキング成功率は従来手法では 40%, 提案手法では 80%となった. 従来手法ではドッキング可能位置である原点で流れに流され位置がずれてしまいドッキングできなかったのに対し, 提案手法では流れに流されることなくドッキングが可能であった.

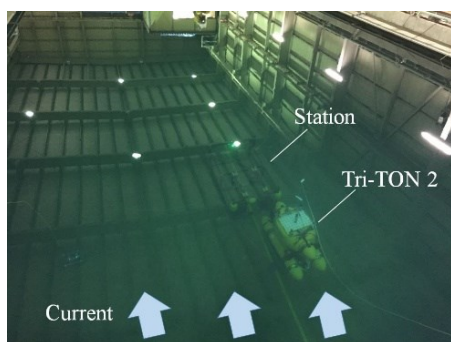


Fig. 10 Experiment  
(current :  $0^\circ$ , 0.15m/sec)

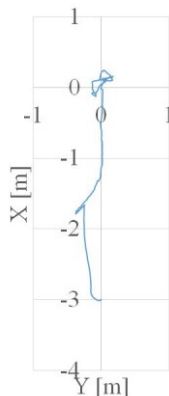


Fig. 11 AUV trajectory by  
conventional method  
(current :  $0^\circ$ , 0.15m/sec)

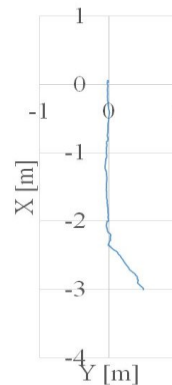


Fig. 12 AUV trajectory by  
proposed method  
(current :  $0^\circ$ , 0.15m/sec)

## 4. 総合考察

シミュレーションより LED が一部しか認識出来ない場合においても AUV は位置, 方位のパーティクルを収束させ, 状態推定が可能であり, ロバスト性が向上した. 水槽試験では, 3 点または 2 点の LED が認識可能である場合のドッキング成功率は従来手法が 0%であるのに対し 80%となった. 3 点における位置推定精度は x, y 方向にそれぞれ(0.16m, 0.10m)の向上が, 2 点における位置推定精度は x, y 方向にそれぞれ(0.14m, 0.07m)の向上が確認された. 流れがある環境での水槽試験では, 流向  $0^\circ$ , 流速 0.15m/sec において, 提案手法は従来手法と比較して流れに流されることなくドッキングが可能であり, またドッキング成功率も向上した. 以上の結果より, 提案手法の有効性が示された.

## 5. 結論・展望

本研究では障害物や流れによって LED アレイの一部が認識不可となった際の自己位置推定精度の低下を解決するため, 新たな画像測位手法並びに流れを考慮した制御手法を提案・実装した. シミュレーションと試験の結果, 位置推定のロバスト性の向上やドッキングの成功率の向上といった結果が得られ, 提案手法の有効性が示された. 今後の課題としてパーティクルフィルタの閾値の設定や流れに対する抵抗力の高精度なリアルタイム推定などが挙げられる. 本研究は, 今後 AUV がステーションを基地局として長期にわたり海底観測を行う上で, 重要な基盤技術になると期待される.

## 6. 参考文献

- [1] 西村 昭, “深海泥のレアアース資源として開発の可能性,” GSJ 地質ニュース, vol.1, pp197-204, 2012.
- [2] T.Maki, R.Shiroku, Y.Sato, T.Matsuda, T.Sakamaki and T.Ura, “Docking method for hovering type AUVs by acoustic and visual positioning,” Underwater Technology Symposium(UT), 2013, pp.1-6, 2013.
- [3] S.Thrun, W.Burgard, and D.Fox, “Probabilistic robotics (intelligent robotics and autonomous agents series). Intelligent Robotics and Autonomous Agents,” The MIT Press, vol.2, p.47, 2005
- [4] T.Maki, Y.Sato, T.Matsuda, R.Shiroku, “AUV Tri-TON 2: An intelligent platform for detailed survey of hydrothermal vent fields,” IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle(AUV), 2014, pp.1-5, 2014.
- [5] 巻俊宏, 浦環, 坂巻隆, “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-,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2010.