

流れのある傾斜地帯に設置可能なホバリング型 AUV 向けの
海底ステーションに関する研究

Development of a seafloor station for hovering type AUVs
that can be mounted on slopes with flow

学籍番号 47-126672 白久 レイエス樹
指導教員 巻 俊宏 准教授

(平成 26 年 2 月 4 日発表予定)

Keywords: ホバリング型 AUV, 海底ステーション, ドッキング, 姿勢制御

Keywords: Hovering type AUV, Seafloor station, Docking, Attitude control

1. 序論

近年、注目を浴びている海底熱水鉱床の資源量探査において、AUV(Autonomous Underwater Vehicle)は、オペレータを必要としないために長時間探査の可能性を有しているものの、活動時間が電池容量に依存してしまう欠点がある。そこで、電池の充電が可能な海底ステーションとドッキングする研究が行われている。しかしながらクルージング型 AUV と比べ、熱水鉱床の詳細観測に活躍が期待されているホバリング型 AUV の研究事例はまだ多くない。

本研究では、海底熱水鉱床などの複雑地形にてホバリング型 AUV と、ドッキング可能な新たな海底ステーションのコンセプト、及びその核となる姿勢水平化手法を提案する。そして、海底ステーションのテストベッドを研究開発し、水槽実験および実海域試験によって提案手法の有効性を示す。

2. 海底ステーションのコンセプト提案

2.1 現状のドッキング手法の課題とその解決方法

海底熱水地帯では、傾斜や流れのある複雑地形、また深海であることから現状のドッキング手法には以下の 3 つの課題が存在する。

- 1) ステーションの設置コスト：開発が有望視されている熱水鉱床の多くは 1000[m]以上の深さであり、母船からロープで吊り下げての設置、また ROV(Remotely Operated Vehicle)による設置作業は、シブタイムの圧迫、設備増加につながる。
- 2) ステーションの傾斜と位置・姿勢変動：ドッキング時のロボット間の接続部は、お互いの姿勢状態に依存する場合が多い。クルージング型 AUV のドッキング手法は、コーン型のステーションによって、形状的にそのような状況を回避している。一般にホバリング型 AUV が 4 自由度しか持っていないロールピッチが静安定であること、また形状が複雑であるためコーン型の採用が難しいことから、ステーションが傾いている場合、ドッキングに失敗してしまうことが予想される。また、ステーションが AUV の音響基準局となる場合、ただ水平になるだけではなく、地面に対して自らの位置及び姿勢を固定する必要がある。
- 3) ドッキング方向の制限：AUV は一般に流れに向かってのドッキングが最も望ましい。しかしながら現状ではドッキングできる方向が決まっているため、流れの向きの変化に対応できない。

これら 3 つの課題を解決するステーションを提案する。Fig. 1 に提案するステーションを示す。以下に課題解決の詳細を述べる。

- 1) フリーフォールにより容易に設置可能とする：自己浮上型地震計のようにバラストリリーサを搭載し、ROV による支援無しにスタンドアローンで設置および回収をこなせるものとする。また、本体と錘を紐でつなぎ、錘着底後は本体が正浮力となるようにすることで、本体を海底に衝突することを防ぎ、耐圧容器内の電子機器に対する着底時の衝撃を低減する。
- 2) 設置後、自動的に姿勢を水平に調整する（姿勢水平化）：海底に

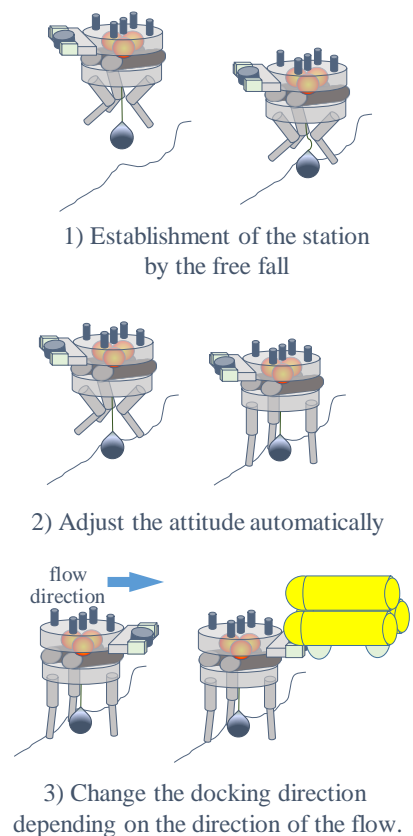


Fig. 1 The concept of the station.

- 対して本体を水平に固定するべく、複数の伸縮脚を使用する。伸縮脚により地面にアプローチし、地面に対して水平にかつリジッドに固定する。回収時には脚部を元の状態に収納する。
- 3) 流れの向きによって最適なドッキング方位に変更する：ドッキングに使用するヘッド部を回転させ、ドッキング方位の任意選択を実現する。

3. 姿勢水平化手法

本手法は地面に対して最低 3 点以上での設置が必要である。本研究では最も数の少ない 3 つの脚構成とする。なお、脚に使用するアクチュエータはバックドライバビリティの無いものを前提とする。

Fig.2 に姿勢水平化手法のフローチャートを示す。プログラム開始後、全ての脚を一定時間繰り出す。次に、脚の動作を全て停止させ、ステーションのロールピッチおよび各脚の長さにより斜面の傾きを計測する。斜面の傾きから理想的な脚長を計算し、脚部の伸縮を行う。ステーションのロールピッチがある閾値以下に収まっていれば、脚の動作を停止し、プログラムを終了する。収まっていなければ、斜面の計測からやり直す。本手法は伸縮装置と姿勢計測装置による斜面計測フェーズ (Calculate slope angle) と、傾き量から適切な伸縮量を計算し地球座標に対して水平に直立する姿勢調整フェーズ (Horizontal standing) に分けられる。Fig.3 にステーション座標系における脚の配置を示す。

Fig.4 に斜面計測フェーズのシステム図を示す。ステーションのロール θ [deg]、ピッチ ϕ [deg]、脚 A の伸び量 a_z [mm]、脚 B の伸び量 b_z [mm]、脚 C の伸び量 c_z [mm]から、斜面の傾き θ_{gnd} [deg]および ϕ_{gnd} [deg]を算出する。ステーション原点を基準とし、鉛直方向に重力方向だけ定義し直した座標系 EA における各脚の先端座標は、 θ 、 ϕ 、 a_z 、 b_z 、 c_z より求めることができ、それぞれ $a_{1\text{ea}}$ 、 $b_{1\text{ea}}$ 、 $c_{1\text{ea}}$ と定義したとき、座標系 EA における 3 つの脚先端を含む平面は以下の式で表される。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

$$a = (b_{1y_{\text{ea}}} - a_{1y_{\text{ea}}})(c_{1z_{\text{ea}}} - a_{1z_{\text{ea}}}) - (c_{1y_{\text{ea}}} - a_{1y_{\text{ea}}})(b_{1z_{\text{ea}}} - a_{1z_{\text{ea}}}) \quad (2)$$

$$b = (b_{1z_{\text{ea}}} - a_{1z_{\text{ea}}})(c_{1x_{\text{ea}}} - a_{1x_{\text{ea}}}) - (c_{1z_{\text{ea}}} - a_{1z_{\text{ea}}})(b_{1x_{\text{ea}}} - a_{1x_{\text{ea}}}) \quad (3)$$

$$c = (b_{1x_{\text{ea}}} - a_{1x_{\text{ea}}})(c_{1y_{\text{ea}}} - a_{1y_{\text{ea}}}) - (c_{1x_{\text{ea}}} - a_{1x_{\text{ea}}})(b_{1y_{\text{ea}}} - a_{1y_{\text{ea}}}) \quad (4)$$

$$d = -(aa_{1x_{\text{ea}}} + ba_{1y_{\text{ea}}} + ca_{1z_{\text{ea}}}) \quad (5)$$

一方で、座標系 EA における平面の傾きは、

$$\theta_{\text{gnd}} = \tan^{-1} \left(\frac{-b}{c} \right) \quad (6)$$

$$\phi_{\text{gnd}} = -\tan^{-1} \left(\frac{-a}{c} \right) \quad (7)$$

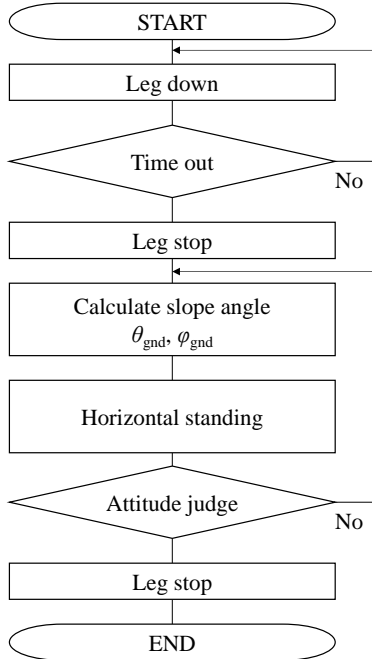


Fig.2 Flowchart of the proposal method.

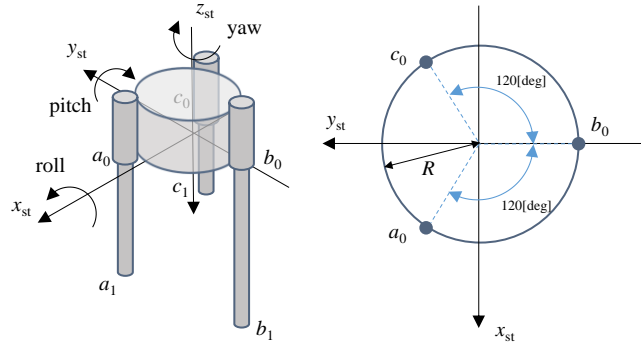


Fig.3 The model of the station.

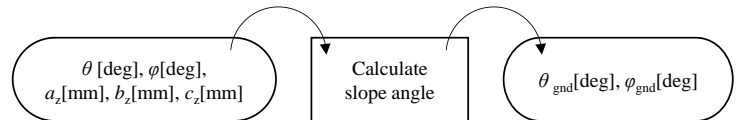


Fig.4 The system of calculate slope angle phase.

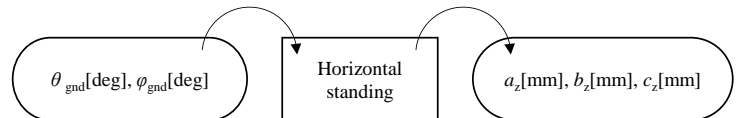


Fig.5 The system of the horizontal standing phase.

となる．式(6),(7)に式(2)~(4)を代入することで，斜面の傾き θ_{gnd} および ϕ_{gnd} が求まる．

Fig.5 に姿勢調整フェーズのシステム図を示す．斜面の傾き θ_{gnd} および ϕ_{gnd} から，a 脚の目標伸び量 a_z ，b 脚の目標伸び量 b_z ，c 脚の目標伸び量 c_z を算出する．水平に直立するためには各脚の長さは以下のようになる．なお， L は錘とステーション間の紐の長さ， R は原点から各脚部根元までの距離である．

$$a_z = |\overrightarrow{a_0 a_1}| = L + 0.5R \tan \theta_{\text{gnd}} - R \cos 30 \tan \phi_{\text{gnd}} \quad (8)$$

$$b_z = |\overrightarrow{b_0 b_1}| = L - R \tan \theta_{\text{gnd}} \quad (9)$$

$$c_z = |\overrightarrow{c_0 c_1}| = L + 0.5R \tan \theta_{\text{gnd}} + R \cos 30 \tan \phi_{\text{gnd}} \quad (10)$$

4. 実海域試験

4.1 セッティング

姿勢水平化手法を実証するためのテストベッドを開発した．Fig.6 に開発したステーションを示す．上から AUV との音響通信機器を備えたモデムユニット，ドッキング時に AUV を把持するドックピンとドック方向変更のためのローテーターを備えたドックユニット，各種センサと制御装置，バッテリーを搭載した容器郡のハルユニット，姿勢水平化のためのレッグユニットとなっている．なお，レッグユニットに搭載された脚はパンタグラフ機構によりリニアアクチュエータの動作量を9倍に拡大する．

実験は緩やかな斜面を形成する静岡の内浦湾にある株式会社オキシテックの保有するバージにて行う．水深は約 30[m]で，海底の流れほとんどない．Fig.7 に本実験で使用するステーションを，Table 1 に基本仕様を示す．

4.2 手順

ステーションの制御目標値は，ロール角 θ を 0[deg]，ピッチ角 ϕ を 0[deg] として実験を行う．提案手法が実装されたプログラムは 200[ms] のサイクルで実行される．Leg down コマンドを受けてからステーションはミッションをスタートする．

4.3 実験結果

Table2 に実験結果一覧を示す．左列から収束時間 t [s] ロール角 θ [deg] およびピッチ角 ϕ [deg] の平均値，測定傾斜角 α [deg] の平均値，ヨー角速度 ω [deg/s] の平均値 ω_{ave} [deg/s]，最大値 ω_{max} [deg/s]，最小値 ω_{min} [deg/s] である．Fig.7 に実験結果の代表例として 1 回目の実験結果を示す．脚の繰り出しが Mode 20，脚の一時停止が Mode 30，斜面計測フェーズと姿勢調整フェーズは Mode 40，姿勢水平化手法の終了が Mode 100 である．全 8 回の実験において，ロール角 θ およびピッチ角 ϕ を目標値である ± 1 [deg] に収めることに成功した．

5. 航海実験

5.1 はじめに

約 1800[m] の深海において無索で運用し，時間管理により全自動での姿勢安定化を行い，3 日間水平に直立し続けることを航海実験により確認する．Fig.8 に本実験で使用するステーションを，Table3 に基本仕様を示す．実験は伊良部海丘にて実施された「なつしま」の航海実験 NT13-25 内

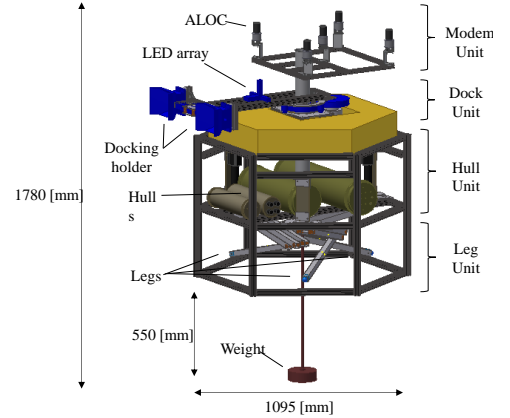


Fig.6 General arrangement of the station

Table 1 Specifications of the station.

Weight in air [kg] (ST + Weight)	205
Underwater weight [kg] (ST+Weight)	12
Underwater weight [kg] (Weight)	18.7

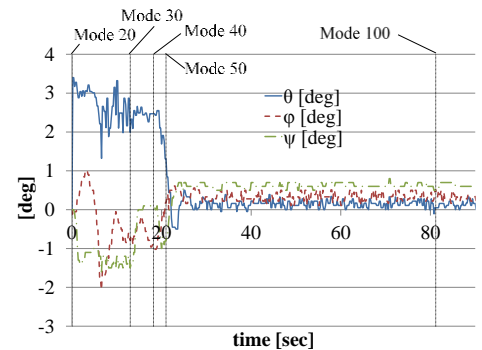


Fig.7 Attitude of the station during mission.

Table 2 State of the station after mission.

exp. No.	t [s]	θ [deg]	ϕ [deg]	α [deg]	ω_{ave} [deg/s]	ω_{max} [deg/s]	ω_{min} [deg/s]
1	2.8	0.2	0.3	10.6	0.0	1.5	-1.5
2	61.2	0.3	0.0	8.8	0.0	2.5	-2.0
3	22.6	0.3	-0.3	23.4	0.0	2.0	-2.5
4	4.4	0.5	-0.6	9.8	0.0	1.5	-2.0
5	6.0	0.7	0.4	10.5	0.0	2.0	-2.0
6	106.6	-0.4	-0.4	9.6	0.0	2.0	-2.0
7	8.2	0.0	-0.2	10.0	0.0	2.0	-2.0
8	13.0	0.0	-0.2	12.4	0.1	2.0	-3.5

で行われる。本実験ではフリーフォールは行わずに、JAMSTEC の保有する大型作業 ROV、ハイパードルフィン(以下 HPD)により設置作業を行う。

5.2 手順

HPD により設置し、設置から 3 日目の所定の時刻に回収する。ステーションの制御目標値は、ロール角 θ を 0[deg]、ピッチ角 ϕ を 0[deg]として実験を行う。時間制御により投入 1 日目のみ 17:00 になると自動的に姿勢水平化制御を開始する。なお、電池の節約のために、姿勢水平化の成功または失敗にかかわらず、制御開始から 300[sec]で脚の動作は停止する。

5.3 実験結果

Fig.9 に実験結果を示す。約 1800[m]の深海において、ロール角 θ を目標値である ± 1 [deg]に全自動で収めることに成功した。しかしながらピッチ角 ϕ は収束しない結果となった。Table4 に姿勢水平化手法実行後のステーションの状態を示す。姿勢安定化手法実行後の約 40 時間も姿勢を水平に保ち続けたことがわかる。Fig.10 に各脚への目標値と実測値の偏差を示す。B 脚および C 脚の偏差が約 1[mm]であるのに対し、A 脚のみが約 4[mm]の差がある。

6. 考察

伊良部海丘での実験において、ピッチ角が収束しなかった原因を考察する。ピッチ角 ϕ が -3.1[deg]の場合、式(8)より、A 脚は 18.7[mm]伸びなければならない。パンタフラフ機構による脚の増幅率は 9 倍のため、リニアアクチュエータにはこの 1/9 の 2.1[mm]伸びることが要求される。機構構造のガタを考慮してプログラム上で制御量に 2.0[mm]足し合わせているので、最終的な制御量は 4.1[mm]となる。これは A 脚に発生している偏差と一致しており、姿勢調整フェーズにおける脚の伸び量計算には成功していると考えられる。A 脚の偏差が収束しなかった要因として、HPD にて撮影した映像において A 脚が地面に沈み込んでいること、また day1 16:00 頃に B 脚方向から ST 中心に向かって流れが確認でき、A 脚の許容負荷を超える海底下の流れの影響があったと考えられる。

7. 結論

本研究では従来手法の問題点である、流れのある傾斜地への不対応を解決するために、新たな運用コンセプトの海底ステーションを提案し、コンセプトの核となる姿勢水平化手法をテストベッド機による実海域試験において実証した。以上のことから、本研究の目的は達成されたと結論する。今後は海底の流れをより大きく見積もり、出力の高い脚に変更するなどのハードウェアの改善が求められる。

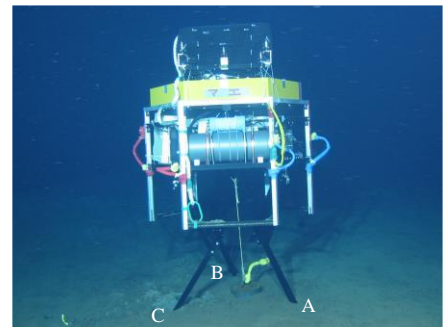


Fig.8 Overview of the station after the mission.

Table 3 Specifications of the station.

Weight in air [kg] (ST + Weight)	193.7
Underwater weight [kg] (ST)	13.5
Underwater weight [kg] (Weight)	18.7

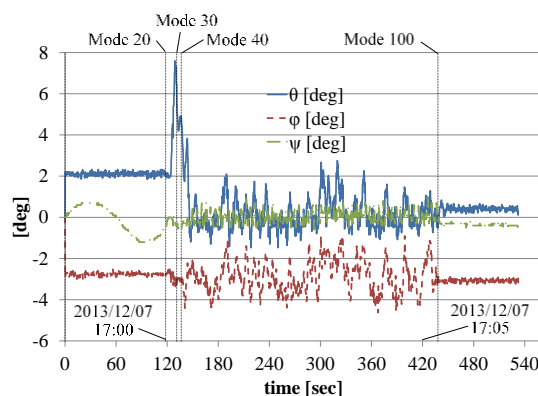


Fig.9 Attitude state of the station during mission.

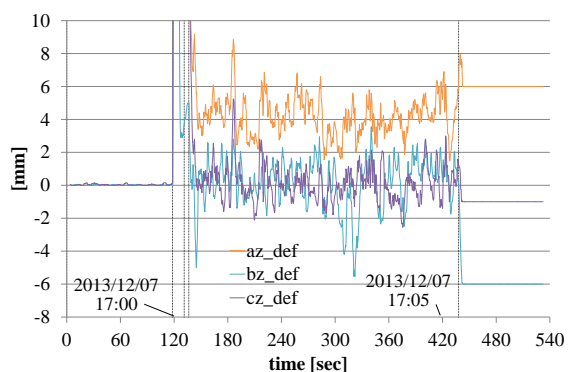


Fig.10 Error of target value and measured value.

Table 4 State of the station after mission.

	θ [deg]	ϕ [deg]	α [deg]	ω_{ave} [deg/s]	ω_{max} [deg/s]	ω_{min} [deg/s]
2013/12/7 17:10~17:30	0.6	-3.1	9.5	0.0	1.0	-1.5
2013/12/9 07:00~10:00	0.2	-3.3	7.6	0.0	9.5	-5.5