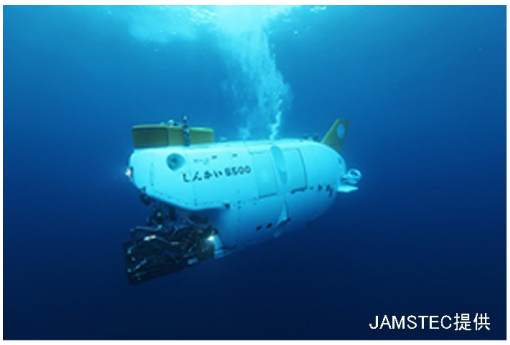
運動制御性と操縦性の向上を目指した しんかい 6500 運動制御システムの開発

Development of Motion Control System of SHINKAI 6500 for high controllability



粟屋 伊智郎 *1 Ichiro Awaya
中田 昌宏 *2 Masahiro Nakata
望月 慶佑 *3 Keisuke Mochizuki
有賀 寛泰 *4 Hiroyasu Aruga
広川 潔 *5 Kiyoshi Hirokawa
井田 匡彦 *6 Tadahiko Ida

しんかい 6500 は，建造・就役後 20 数年が経過し[1]，より高度な調査観測への要求に対応するため，海洋研究開発機構からの発注を受け，改造工事が実施された。この工事では，運動制御性，操縦性の向上を目指して，推進装置，運動制御装置及び操縦装置の換装が行われた。運動制御装置では，運動状態にかかわらず安定した船体運動を実現する制御技術の開発を，操縦装置では，操作を容易にする装置デザインを行った。2012 年春には海上試運転が行われ，制御応答性・操縦性に対して高い評価を頂いた。現在，しんかい 6500 は，再び世界の海で探査を行っている。本報では，改造工事の概要と併せて，これらの技術開発について述べる。

1. はじめに

深海の探査は，科学探査の目的に加え，新たな水産資源，鉱物資源を深海に求める機運の高まりもあり，1970 年頃から各国が深海探査を始めるようになり，今日に至っている。我が国の所有する大深度有人潜水調査船には，しんかい 2000 としんかい 6500 があるが，しんかい 2000 は 2004 年に退役し，現在はしんかい 6500 が唯一の有人潜水調査船となっている。

しんかい 6500 は，海洋研究開発機構で運用されており，建造以来 23 年，1300 回以上の潜航を無事故で達成している[2]。これまで，毎年の保守点検に加え，個々の部品の高機能化等の改良を行い，安全性と信頼性を確立してきた。2011 年度の整備工事では，建造以来最大規模となる改造工事として，推進装置及び操縦・制御システムの換装が行われた[3]。

従来のしんかい 6500 の操船は，パイロットが主推進器，垂直及び水平スラスタのプロペラ回転数を手動で調整する手動方式と，方位の変換・保持の自動制御方式を有していた。手動方式においては，前後進速度と方位及び深度の変化に気を配って各推進装置の出力を手動で同時に微調整する必要があった。そのため，パイロットの操船負担が大きく，また，熟練に時間を要する課題も抱えていた。また，自動方位制御は，速度等の運動状態が変化すると，方位が変動する場合があった。

上記の課題を克服するために，本改造工事において，以下の開発を行った。

①運転条件が変化しても常に安定動作を可能にする運動制御装置の開発

②直接的な操作イメージに基づいた操縦装置の開発

本報では，本改造工事の概要と，新規開発した運動制御装置及び操縦装置について述べる。

*1 技術統括本部名古屋研究所 主席研究員 工博
*2 防衛・宇宙ドメイン艦艇事業部潜水艦部
*3 技術統括本部名古屋研究所
*4 技術統括本部先進技術研究センター 主席研究員
*5 交通・輸送ドメイン船舶・海洋事業部技術統括室 グループ長
*6 交通・輸送ドメイン船舶・海洋事業部 技術統括室

2. しんかい 6500 改造工事の概要

改造工事においては，2008 年から年度毎に水中電動機，スラスタ等の必要機材を順次納品し，2011 年 11 月から 2012 年3月の期間に改造を行うこととなった。

表1に，改造工事前後のしんかい 6500 新旧対照表を示す[(3)(4)]。主な改造内容は，①主推進器・水平スラスタの増設，②全ての推進装置用モータの応答性向上，③運動制御装置の換装（3章に記載），④操縦装置の換装（4章に記載）の4つである。また，水中抵抗の低減や運動安定性の向上を目的に，垂直・水平安定ひれの形状・取付位置にも，改造が加えられている。

表1 しんかい 6500 新旧対照表

項目	旧	新	備考
全長	9.5m	9.7m	サンプルバスケット先端から
全幅	2.8m	2.8m	固縛用アイを含む
高さ	4.3m	4.1m	垂直尾翼頂部まで
空中質量	26.7t	26.7t	—
水中最大推力	2.5 ノット	2.7 ノット	—
主推進器	後部1台	後部両舷2台	旋回式大型1台を固定式中型2台に変更 電動機換装
水平スラスタ	前部1台	前部1台，後部1台	後部水平スラスタを新規増設 併せて前部の電動機換装
垂直スラスタ	両舷2台	両舷2台	電動機換装
電動機方式	誘導電動機	DC ブラシレス電動機	海水ポンプ・油圧ポンプ用は誘導電動機
操縦制御方式	各スラスタを個別に操作	複数のスラスタの同時操作が可能	ジョイスティックによりあらゆる方位への操船が可能
自動操船機能	船首方位保持	船首方位保持 深度保持	従来の船首方位保持に加え，深度保持機能を追加
その場回頭に要する時間	約4分	約2分	船体中心を基準に回頭可能 （従来は旋回半径約 20m））
横移動	スラスタ起動に約6秒かかる 真横へは進めない 速度制御が困難	スラスタ起動準備が不要 真横に移動可能 速度・方向を容易に制御可能	従来は主推進器と前部水平スラスタを手動で調節していたため熟練を要した
停止から巡航速度までの所要時間（0→2ノット）	1分 40 秒	1分 15 秒	試験実測値 加速能力は 1.3 倍
巡航速度から停止までの所要時間（2→0ノット）	1分 55 秒	53 秒	試験実測値 制動能力はほぼ倍

図1に改造前後の船体後部写真を示す[(3)]。主推進器は，従来は1台の大型推進装置であり，左右にそれぞれ最大約 80 度に首振りを行うことで，方位を変更していた。今回の改造工事では，中型推進装置を2台水平に配置する構造とした。これにより，左右の回転数に差をつけることで，回頭モーメントが直ちに発生し，方位を従来より速く変えることができる。水平スラスタは，従来からある船首水平スラスタに加え，船体後部にも新規増設した。これにより，真横への水平移動がスムーズに行えるようになった。運動制御機能については3章，操縦装置のデザインについては4章に詳細を記載する。

(a) 改造前　(b) 改造後　JAMSTEC 提供

図1 改造前後の船体後部写真

3. 常に安定動作を可能にする運動制御装置の開発

3.1 開発の狙い

改造前のしんかい 6500 は，自動方位制御の機能を備えていたが，前後進速度の大きさによっては，方位応答にオーバーシュートが見られ，安定するまでに時間がかかる課題があった。

本改造工事では，速度が変わっても，常に安定した応答が得られる運動制御技術の実現を目指した。さらに，パイロットの負担を軽減すべく，方位制御に加えて深度制御機能も追加した。これにより，調査観測作業において，パイロットは方位・深度の目標値を設定すれば，その方位・深度を保持できるため，試料採取等の作業が容易になる。

3.2 船体運動特性の解析

制御系設計を容易にするためには，運動方程式を線形化することがよく行われる。しかし，しんかい 6500 の場合，一つの線形運動方程式で近似することは困難である。

その理由としては，船体の6軸運動方程式（前後，左右，上下，ロール，ピッチ，ヨー）が，強い非線形特性を持っていることが挙げられる。具体的には，流体抵抗力は，速度に対して非線形で，大きく変化する特性を持つ。同様に，推力も，プロペラ回転数に比例せず，非線形に変化する特性を有している。これらの非線形特性により，パイロットの操縦には熟練が必要となり，また，常に安定な制御系の実現が困難となっていた。

このような非線形性を有する船体の運動を線形化して解析するために，速度とプロペラ回転数の取り得る領域を図2のようにメッシュ化し，メッシュの各格子点で線形運動方程式を導出した。

次に，各格子点での線形運動方程式を基に，船体運動の周波数特性を求め，運動特性がどの程度変動するかを定量的に解析した。図3は，方位制御を行う時の船体周波数特性である。これは，前進速度を一定とし，方位操作量である水平スラスタのプロペラ回転数をパラメータに取っている。図3から，プロペラ回転数の変化により，周波数特性のゲインや応答帯域が大きく変動するのがわかる。ゲインは，方位操作量に対する方位の応答倍率を，応答帯域は方位の反応の速さを意味する。したがって，回転数の大きさによって船体運動の挙動が著しく変わることになる。

同様に，プロペラ回転数一定で前後進速度が変化した場合でも，ゲイン及び時定数が変動する。したがって，速度の大きさによっても船体運動の挙動が大きく変化することがわかる。以上の解析を通して，船体特性の変動を把握することができ，制御系設計への指針が得られた。

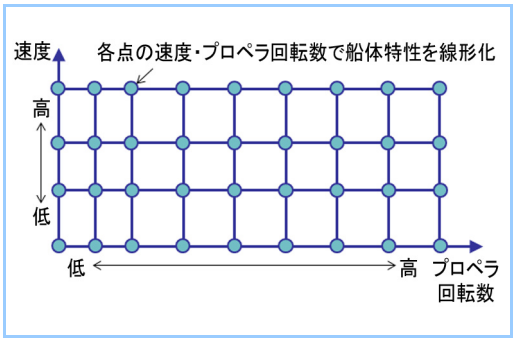


図2 前後進速度とプロペラ回転数に対応した運動領域のメッシュ化

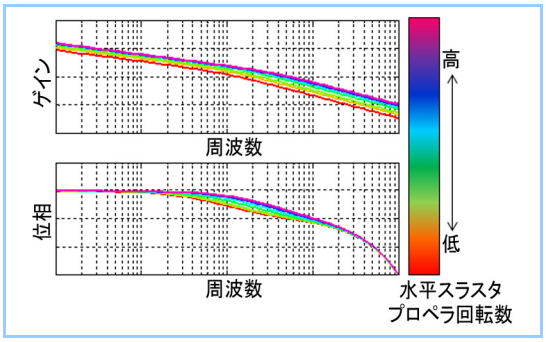


図3 船体周波数特性（前進速度一定時に水平スラスタのプロペラ回転数が変化した場合）

3.3 固定制御パラメータ方式の課題

特性変動が大きい船体に対し，一般的な固定制御パラメータのフィードバック制御系を使って安定化することは困難である。図4に，固定制御パラメータを用いて，前進しながら方位変換を行った時のシミュレーション結果を示す。図4より，固定制御パラメータを用いた場合は，速度の違いにより，目標方位への到達時間及びオーバーシュートの発生度合がばらついており，速度の違いにより自動制御性能の安定性が変動していることがわかる。

このような安定性の劣化は，深海での調査観測の効率に大きく影響するのみならず，無駄なオ

ーバーシュートの発生等によりスラスタが余分な動作をするため，バッテリのエネルギー消費も増える。しんかい 6500 は，限られたバッテリ容量と観測時間で，効率的に深海を探査する必要があるため，広範囲な安定性の実現は，運動制御設計における重要な条件である。

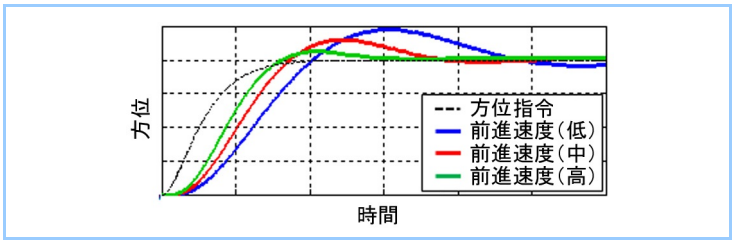


図4 固定制御パラメータを用いた方位変換シミュレーション結果

3.4 常に安定した船体運動を実現する運動制御系の開発

図5に，水平スラスタを用いた方位制御系の構成を示す。方位指令生成器は，パイロットが設定した方位目標値に向けて，急激な加速度が発生しないように滑らかに補間して方位指令を出力する。方位制御器には，方位指令と方位検出値の差が入力され，水平スラスタのプロペラ回転数指令を出力する。

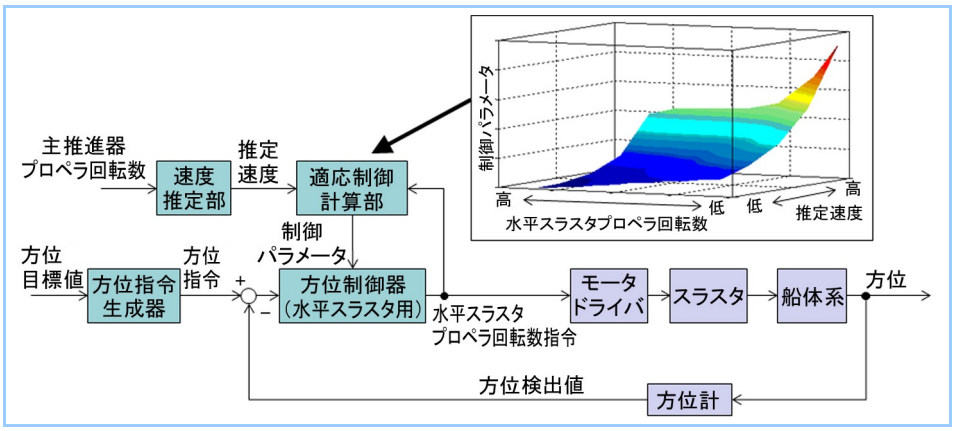


図5 しんかい 6500 の新運動制御系構成(水平スラスタを用いた方位制御の場合)

本制御系の特徴は，船体速度と方位や深度の操作量を読み込み，制御パラメータを最適な値に逐次更新する，適応的な制御方式にある。この制御方式の中心となるのが，図 5 の適応制御計算部である。適応制御計算部に入力される速度は，主推進器のプロペラ回転数から計算した速度の推定値を用いている。一方，操作量は，水平スラスタを用いた方位制御の場合は，2 つの水平スラスタのプロペラ回転数差を用いている。計算部は，速度とプロペラ回転数に応じた，最適制御パラメータのマップを有する。これは，3.2 節で用いたメッシュの各格子点で求めた線形化運動方程式のそれぞれに対して，最適な制御設計を行って得られた制御パラメータのマップである。図5の右上部が，方位制御系の最適制御パラメータマップの一部である。このマップは，水平スラスタのプロペラ回転数が高く，速度が低いほど制御パラメータ値が小さく，プロペラ回転数が低く，速度が高いほど値が大きくなることを意味している。また，パラメータの変化の仕方は非線形であり，マップを平面では表現できないことがわかる。この最適制御パラメータマップを用いて，時々刻々と変化する船体特性に対して，常に最適な制御パラメータを用いた制御を行うことで，常に安定した運動制御系を実現できる。

3.5 開発した運動制御系の有効性検証

図6に，開発した適応型運動制御を用いた方位変換シミュレーション結果を示す。固定制御パラメータを用いた図4と比較すると，本制御方式では，制御パラメータを状況に応じて更新する適応的な制御の働きにより，目標値への到達時間のばらつき及びオーバーシュートの発生を大きく抑制できていることがわかる。応答のばらつきをシミュレーションで評価すると，到達時間のばらつ

きは標準偏差で約 1/10 に，オーバーシュートのばらつきは約 1/20 となった。また，スラスタの余分な動きが抑制され，バッテリ消費の削減にも貢献できた。

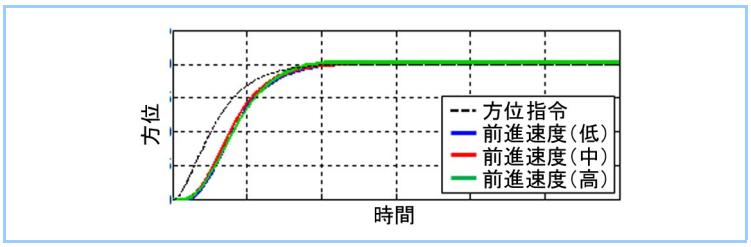


図6　開発した運動制御系を用いた方位変換シミュレーション結果

なお，主推進器を用いた方位制御及び垂直スラスタを用いた深度制御においても，図6と同様の制御システムを構成し，同等の効果を確認できた。深度制御における固定制御パラメータ方式との比較を，図7に示す。図より，方位制御と同様に，安定に制御できていることがわかる。

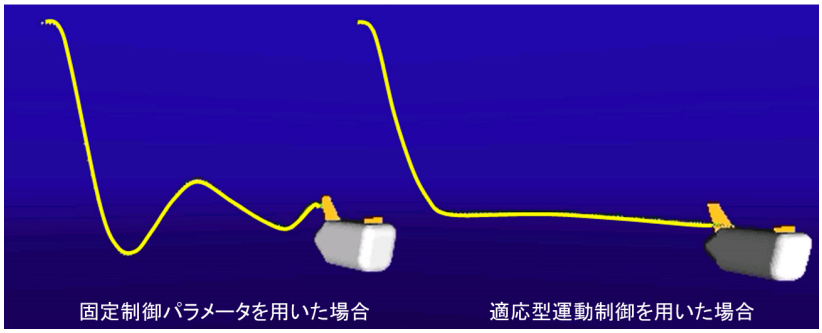


図7　深度変換のシミュレーション結果

以上説明したように，船体特性変動を考慮した適応的な運動制御装置により，速度に依らず常に安定な方位・深度制御を実現することができた。

また，本制御方式は，無人潜水船をはじめ，自身の状態により特性が大きく変動する他製品にも適用可能な制御方式である。

4. 直接的な操作イメージに基づいた操縦装置の開発

推進装置数が増加したことにより，改造前とは異なる様々な操船が可能となったが，パイロットにとっては操船方法が大きく変わったこと，操船方法の選択肢が増えたこと，等により，操船時の“状況認識”“意思決定”“操作”に関わる負荷が増大してしまう恐れがあった。そのような負の効果を極力排除し，ユーザビリティを高めるため，ユーザ・インタフェース・デザイン・プロセスに則り，操縦装置の開発を行った。

4.1　行動観察とユーザ・ヒアリングによるニーズ・課題の抽出

デザイン・プロセスにはいくつかのニーズ・課題の顕在化手法がある。本開発では使用状況の行動観察とユーザ・インタビューを行うことで，操縦装置に求められるニーズ・課題を数多く抽出することができた。

図8に示す従来の操縦装置は，各推進装置の回転数及び主推進器の首振り角度を個別に調整する方式であった。この方式では，推進装置と操作器が一対一で対応している為，各推進装置の状況が把握しやすい。その反面，操作の手数が多くなってしまい，また，複数の推進装置を使用した操船をする場合，しんかい 6500 の複雑な動きをイメージするには，パイロットに経験と技量が必要であった。すなわち，操船時の思考プロセスでは“操船（動きや位置）をイメージ”した後，“その操船結果を得る為にどの推進装置をどのように操作すべきか”という2段階の意思決定が必要であった。これらのことから，従来の操船方式は，繊細で複雑な操作をパイロットの経験や操船テクニックに頼る方式と言える。

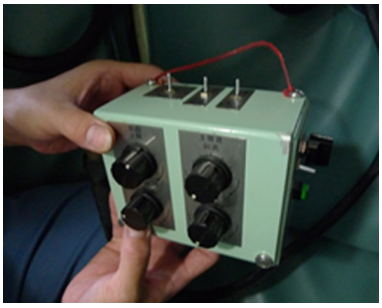


図8 改造前の操縦装置

(a) A型

(b) B型

図9 改造後の操縦装置

4.2 パイロットの操船負担を軽減する操縦装置のデザイン

パイロットの操船負担を軽減する操縦装置を実現するために，要求オペレーションに適した2つのタイプの操縦装置を作ることになった。これらは，各推進装置の設定（向き，回転数）を個別に指示するA型と，調査船の動き（挙動種類，進行方向，速度）を直接的な操作イメージで指示できるB型である。この2タイプのデザイン検討を実施するに当たり，様々な動きを想定した操船モードをスイッチに置き換え，人間工学の側面からレイアウトを検討，デザイン画を作成した。これをベースにソフトモックアップ（発泡材料による簡易モデル）を複数作成し，再度パイロットレビューを実施した。このルーチンを重ねることでデザインのブラッシュアップを図り，3D プリンターで作成したモデルをお客様に提示，最終デザインの承認を頂いた。

① A型操縦装置

A型操縦装置を図9(a)に示す。A型は，各推進装置に対応したダイヤルボリューム及びスライドボリュームによって各推進装置の回転数を指示する方式であるため，スイッチの数が多くなり，必然的に操縦装置を大きくする必要があった。片手で操縦装置を持ち，もう一方の手でスイッチを操作する方式のため，片手で持つときに保持しやすい形状とした。スイッチのレイアウトは，調査船の各推進装置の配置が連想しやすいように配置を決定した。前側の水平スラスタのボリュームは奥側に配置，後方の水平スラスタのボリュームは手前側に配置するといったように，どの推進装置を動かすのかある程度見た目で判断できるようにした。このA型操縦装置は，スラスタの設定状況が把握し易く，パイロットの方々が慣れ親しんだ従来方式を進化させたものであるため，ベテランパイロットの方々から使いやすいとの評価を頂いた。

② B型操縦装置

B型操縦装置を図9(b)に示す。B型は，ジョイスティックにより，合計6台の推進装置を統合制御できる方式であり，ゲームやラジコンのコントローラーのように進みたい方向にスティックを倒すことで操船できる。よって，パイロットは，操船時に推進装置同士の複雑な関係を頭の中で想定しなくてもよい。その特徴的な機能を以下に示す。

・進行方向をジョイスティックで入力するだけの操船
・ワンアクションで全てのスラスタを停止させる全停止ボタン
・前進惰力を制動し，かつ海底より離れる衝突回避ボタン
・方位保持及び深度保持ボタン
・速度モード選択スイッチ
・回転中心を選択できる回転モード選択スイッチ

この装置デザインによれば，スイッチ/スティックの一つの操作で，パイロットが意図する船体の動きを実現できる。B型のボタン配置と機能を図 10 に示す。

図 10　新型操縦装置のボタン配置と機能

この方式では，多くのスイッチを使用する必要がなくなり，操縦装置の小型化が可能となった。また，片手で全ての操船を行えるようにするため，上昇/下降スイッチを操縦装置の裏面にトリガー方式として設けた。回頭スイッチは，ジョイスティックの周囲に円形状のダイヤルで配置した。また，グリップしやすくするため，手のひらに収まる部位に肉付けする等の処理を行い，左右どちらの手でも容易に操作できるようデザイン処理を行った。このB型操縦装置は，指の動きと船の動きがマッチしてイメージしやすく，操船経験が少ないパイロットでも容易に操作できるという評価を頂いた。

それぞれの操縦装置の押しボタンスイッチは，誤操作を防ぐため押したことがはっきり判る照光式のタイプで，操作力の大きいものを用いている。液晶表示画面は，表示を切り替えることで，深度，方位，各推進装置の回転数等を表示することができる。この表示機能は，“操船に集中しながら情報を容易に取得できることは非常に有効である”，とのパイロットインタビュー結果をデザインに反映したものである。

5. 海上試運転による評価

2012 年春，駿河湾沖で海上試運転が実施された。

図 11 は，海上試運転時に計測された方位変換試験結果である。図において，緑線で示す試験結果は，オーバーシュートがなく安定した応答を実現できており，本制御系の有効性を実証できた。また，赤線のシミュレーション結果ともよく一致しており，設計に用いた運動方程式モデルの妥当性も確認できた。なお，自動制御に関する試験では，再調整することなく応答仕様を満足でき，試験調整時間の削減に貢献することができた。

また，操縦装置については，パイロットの方々から，A型，B型とも使いやすく，2つの併用が望ましいとのお話を頂くことができた。

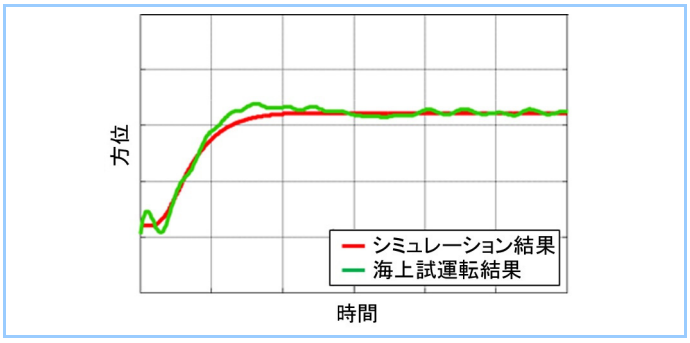


図 11　方位変換試験結果

6. まとめ

2011 年から行われたしんかい 6500 の改造工事で実施した，新型運動制御装置及び操縦装置の開発について述べた。本開発により，パイロットの操船負担が軽減され，どの運転条件でも安定した応答が得られる操船システムを構築できた。

この改造により，あらゆる方向への複雑な動作が可能になり，地形が複雑な熱水噴出域や垂直に切り立った崖での試料採取等が行えるようになった[4]。今後，より高度な調査観測が可能になるものと期待される。

最後に，この改造工事に当たり，ご指導を頂きました独立行政法人海洋研究開発機構をはじめプロジェクトに関係された団体各位に謝意を表します。

参考文献

(1) 難波他，深海潜水調査船“しんかい 6500”の開発，三菱重工技報，Vol.27，No.2（1990）p.143～152
(2) (独)海洋研究開発機構，“しんかい 6500”特集ページ http://www.jamstec.go.jp/shinkai6500/
(3) (独)海洋研究開発機構，プレスリリース，有人潜水調査船“しんかい 6500”の改造について，(2012) http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20120327/
(4) 有人潜水調査船しんかい 6500 模型と写真で見る“しんかい 6500”の活動と実績，アスキー・メディアワークス，(2012) p.6～23