

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760684

研究課題名(和文) 深海環境における光学屈折特性の補償法と深海画像計測に関する研究

研究課題名(英文) The research about compensation methods of an optical refraction characteristic and image measurement in deep sea environment

研究代表者

石橋 正二郎 (ISHIBASHI, Shojiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・グループリーダー代理

研究者番号：90371731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：サンプル採取が困難な深海生態系の研究分野において、深海探査機が撮影するカメラ映像は重要かつ貴重な資料であり、この映像より深海生物の組成や構造の解明に尽力する。一方で、このような映像から把握できる内容には限界があり、特に深海生物の三次元形状やサイズ、特徴部位の長さや面積といった幾何学的情報を正確に把握することは難しい。そこで本研究では、深海探査機が通常的に搭載可能な小型カメラを用いて、深海における光学屈折特性を保障したカメラモデルを設計し、これを用いたステレオ視技術により上記情報をミリ単位の精度にて取得する深海用映像システムを構築するとともに、実海域にておいてその実用性を示した。

研究成果の概要(英文)：In the research field about deep sea ecosystem that it is difficult to gether samples, image taken by an underwater vehicle are very important and valuable. Many scientists try to figure out the composition and architecture of marine organism. On the other hand, the images can not show and express the 3D size, shape and geometric information; such as 2-point distance, area and volume; of marine organism. So in this research, the underwater camera model, which is mounted on an underwater vehicle, was designed. It can compensate a complex optical refraction characteristic in each medium. The 3D image with high resolution can be created because it was applied into a stereo vision system. Also, it can calculate and 3D geometric information of shooting objects on the 3D image. The vision system was used in some sea trials and its utility and practicality were shown as results of the sea trials.

研究分野：海中工学 / 海中ロボット / 海中光学

キーワード：光学センサ ステレオ視 海底撮影 3Dモザイク 海中探査機

## 1. 研究開始当初の背景

極限環境である海洋大深層では、その生態が解明されていない深海生物や未発見の種が多々存在する。一方、中深層においては、微小な浮遊性生物の周期的な鉛直移動が確認されており、この現象の解明は海洋炭素循環を理解するうえで重要な事項でもある。しかし、環境圧力の変化や捕獲時の機動性、組成の脆弱性などを理由として、これら深海生物のサンプル採取は困難であり、またその個体数を定量的に計測する手法も確立されていない。そのため当該研究分野では近年、サンプル採取に代わる新たな調査手法として、深海探査機が撮影するカメラ映像を用いて深海生物の生態系を研究する手法が注目されており、現在、当該研究分野の進捗に大きく貢献している。しかし当然、このような通常のカメラ映像から深海生物の幾何的情報までを正確に把握することは困難であり、同様にその個体数(棲息密度)を計測する術もない。そのため昨今、下記に示す深海生物の情報を正確かつ容易に取得する手段が当該研究分野において望まれている。

- ◆幾何的情報(特徴部位の長さ・面積)
- ◆三次元形状
- ◆個体数(棲息密度)

しかし、上記情報を取得するために大型かつ重量なシステム、エネルギー消費率の高いシステム、あるいは高額で構成が複雑なシステムを搭載することは、経済面、運用面からみて実現性が低い。上記情報の取得に際しては、深海探査機の種別、形状に関係なく搭載可能であり、エネルギー消費が低く、経済的で小型かつ軽量の汎用性の高いシステムが適当である。そこで、いずれの条件も満たすだけでなく、通常多くの深海探査機が既に標準的に搭載している光学カメラが着目される。光学カメラでは、カメラキャリブレーションにより正確な数学モデル(透視投影行列)が導出されると、撮影画像と実空間との幾何学関

係が詳細に表現され、結果として上記情報を非常に精密(ミリ単位)に取得することが可能になる。しかし気中と異なり深海においては、◇水圧によるカメラ格納容器及びビューポートの微小変形 ◇受光線が経路する各媒質境界面における光学特性の変化 を考慮することが必須であるため、未だ実験的な試みさえ進捗していない。そこでこれら課題について取り組み、深海におけるカメラ映像から上記情報を取得する新しいシステムの研究開発、及びその実環境実験が必要となる。

## 2. 研究の目的

サンプル採取が困難な深海生態系の研究分野において、深海探査機が撮影するカメラ映像は重要かつ貴重な資料であり、当該研究分野の従事者達はこの映像より研究対象とする深海生物の組成や構造の解明に尽力する。一方で、このような映像から把握できる内容には限界があり、特に深海生物の三次元形状やサイズ、及び突起部や肢体部などの特徴部位の長さや面積といった個体識別に重要な要素となる幾何的情報を正確に把握することは難しい。そこで本研究では、深海探査機が通常的に搭載可能な小型カメラを用いて、大深度域において上記情報をミリ単位の精度にて取得する深海用映像システムを開発し、その実用性を実海域にて示す。ステレオ配置及び同期制御した当該カメラの撮影画像を用いることにより高解像度の三次元可視化画像を生成すると共に、任意の撮影対象における幾何学情報を、高精度で導出するシステムを構築する。

## 3. 研究の方法

### (1) 深海用ステレオ視システムの開発

当初計画では最大水深 2,000m の深度環境下において使用可能な小型高性能なデジタルカメラユニットを新たに設計・製作することを予定していたが、予算節約を考え、既に所有していた 1,500m 耐圧仕様となる小型カメラユニットをステレオ配置して流用する

ことにした。仕様耐圧は落ちたものの、5,000,000pixel の高解像度デジタルカメラを用いることにより、大幅な三次元計測解像度（精度）の向上が提供された。

深海用ステレオ視システムでは、ステレオ配置した上記小型カメラユニット2機と、その各シャッター信号、及び2機のストロボユニットの動作を同期制御する制御ユニットから構成される。制御ユニットは各電源系統も管理し、カメラユニット、ストロボユニットを管理するだけでなく、カメラパラメータ制御及び撮影画像記録も管理する。探査機搭載時の汎用性を考え、電源は24VDCを入力とし、CPUシステム用電源（5VDC）、ストロボ発光用電源（5VDC）、カメラ用電源（12VDC）にそれぞれDC/DCコンバータを介して分配される。当該ユニットの中核はISAバス、PCIバスを提供するPC/104フォームファクタとなるCPUボードで、動作信頼性を考慮したWindows Embedded OSが搭載されている。当該CPUボードは、GPIOポートからGigaEtherインタフェースにてカメラへのハードウェアトリガとなるシャッター信号を発行し、当該信号がバッファアンプを経由することにより各カメラのシャッター同期、及びストロボ信号を同期させる。各処理を実施するアプリケーション、カメラ制御用ミドルウェア、撮影画像、OSは当該CPUボードとSATAにて接続されているSSD（Solid State Drive）に格納される。また、制御ユニット内部には、MEMSジャイロ及び加速度センサを内蔵する3軸姿勢角ユニットが格納されており、カメラ撮影時において、搭載した海中探査機がどのような姿勢をとっていたかを記録している。これより、撮影画像情報と共に撮影姿勢情報が一元管理され、オフラインにて画像姿勢補正が施される。図1に本システムの概略を示す。本システムは、元電源となる24VDC、及びEthernet Protocolが提供されさえすれば、搭載するプラットフォーム（海中探査

機を含む）の種別、仕様、運用方法、性能にこだわり無く適用することが可能となる。

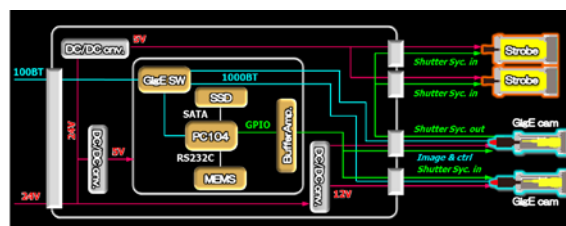


図1 深海用ステレオ視システム概略図

## (2) 深海用カメラモデルの設計

深海用ステレオ視システムに適用する小型カメラユニットは、耐海水および耐水圧を満足するため、アルミ合金製の密閉容器を外殻とし、その内部に高解像度デジタルカメラが格納される。カメラ（内部）と海水（外部）とのインタフェースとなるビューポートはアクリル製の平板とした。つまり深海に適用されるカメラユニットにおいて、撮像素子と撮影対象までの光軸は、気中（容器内部）→ビューポート（アクリル）→海水の各媒質を経由するため、その各媒質境界において、光学屈折が生じる。これに加え、水圧環境下においては、耐圧容器（アルミ合金製の密閉容器）及びビューポートの微小変形（形状歪み）が生じるため、各媒質を経由する光路長が変化する。図2に海中における光軸の経路を示す。

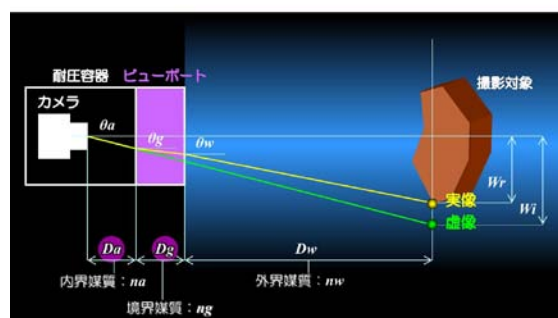


図2 海中における光軸経路

そこで本研究では、これらに起因する複雑な光学屈折を考慮するため、カメラモデルに独自の補正パラメータを組み入れる。このパラメータを海水密度と水圧の相関関数から

導出される行列としてカメラ数学モデル加えることにより、深海用カメラモデルを構築した。相関関数は、事前に当該小型カメラユニットを水圧環境槽（図3参照）に入れ、昇圧・降圧を繰り返し実施し、この環境下にてキャリブレーションボードを撮影することにより、画像の歪みを定量化することにより導出した。この深海用カメラモデルを用いることにより、各媒質境界の屈折と外殻の微小変形に起因する複雑な光学屈折が保障される。

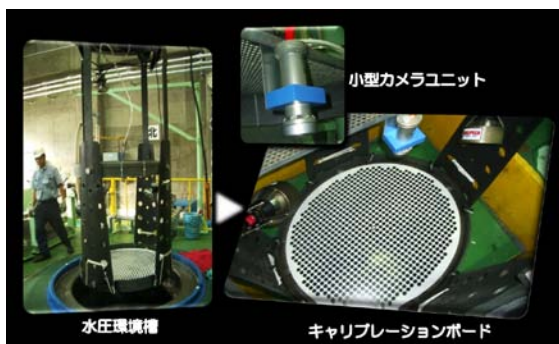


図3 水圧環境槽試験

### (3) ステレオマッチング手法の設計

前記した深海用ステレオシステムにより撮影されたステレオ画像（時刻同期された左右ステレオ配置による2画像）を用いて、ステレオマッチングにより三次元可視化画像を生成する。上記した深海用カメラモデルを適用したエピポーラ幾何によりステレオ対応点を効率的に探索し、当該対応点（画素）に対する深海用カメラモデルを用いて画像座標系（二次元座標系）から世界座標系（三次元直行座標系）における各画素単位の三次元位置情報を算出する。この際、対応点探索時におけるエピポーラ幾何では、基準画像（ステレオ画像中の任意の1画像）における任意の画素位置に対して、他方画像における視線ベクトル（エピポーラ線）を生成し、基準画像に定義される当該エピポーラ線上を探索することにより対応点を見つける。ステレオマッチングにおける対応点探索アルゴリズムとしては、NSSD (Normalized Sum of

Squared Difference) 法と NCC (Normalized Cross-Correlation) 法とを組み合わせた手法を採用し、海底という撮影画像に対する輝度・彩度の変化に乏しい環境において、類緯度に対するロバストを保障することに重点を置いた。図4に探索アルゴリズムの概要を図示する。この処理をステレオ画像上の全ての画素に対して施すことにより、重複画像範囲（ステレオマッチング可能領域）が抽出され、当該範囲における三次元可視化画像が生成される。

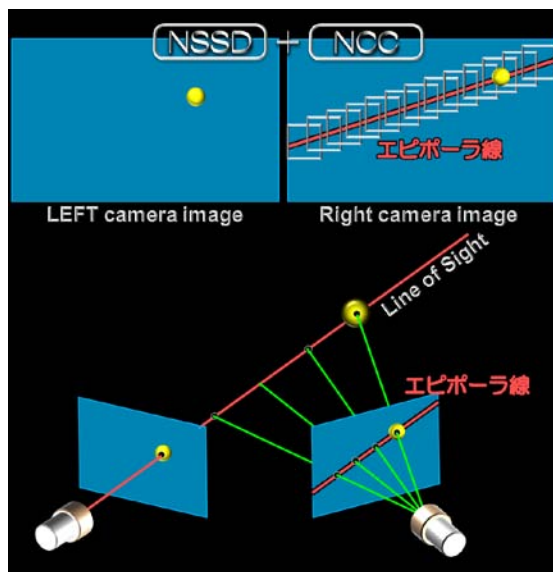


図4 ステレオ対応点探索

### (4) 海域試験の実施

深海用ステレオ視システムを海中探査機に搭載し、本研究にて実施した各項目の妥当性を検証した。海中探査機2機種に対して全3回の海域試験を実施し、深海用ステレオ視システムの実用性を確認するとともに、これにより得られたステレオ画像、及び姿勢情報を用いてオフラインにて三次元可視化画像を生成した。これを解析することにより、深海用カメラモデルの妥当性、ステレオマッチング手法の有効性を検証した。また適宜各カメラパラメータを変更させ撮影することにより、海底撮影における探査機速度、撮影高度、ストロボ光量、シャッタースピードに対するカメラパラメータの最適値について評価した。これにより得られた知見をフィード

バックさせ、とくに深海用カメラモデルの改良に努めた。またステレオマッチングの成否にも深海用カメラモデルの精度が強く依存するため、当該モデルとステレオマッチング手法との微調整を、実際画像を用いて実施した。

#### 4. 研究成果

海域試験を繰り返し実施することにより、実環境を用いた調整作業が実現され、高精度かつ高精細な三次元可視化画像が生成された。図5に当該三次元可視化画像を例示する。各三次元可視化画像は、任意の三次元直交座標系を原点とする三次元点群 (x, y, z 位置) から構成されており、ステレオマッチングが実現される重複範囲は海中探査機の高度に依存するが、平均的に各画像の45-55%程度と

なる。配色は、ステレオマッチングが施されたステレオ画像 (左右画像) 中の各画素 (RGB色) の平均値とした。これは、同一点に対しても、照明光の当たり具合で左右画像それぞれ異なる色彩を持つため、その平均を取ることによって補間している。

三次元可視化画像を用いることにより、撮影対象の任意の幾何学情報を計測することが可能になる。アプリケーションとして、2点間長、3点間面積・傾斜を自動算出する機能を構築した (図5参照)。これによりオフラインではあるが、海底地形あるいは底生生物の三次元形状を把握するだけでなく、それら撮影対象の幾何学的特長をミリオーダー、サブミリオーダーにて計測することが実現され、各海洋研究分野の取り組みに大きく貢献する画像資料となる。

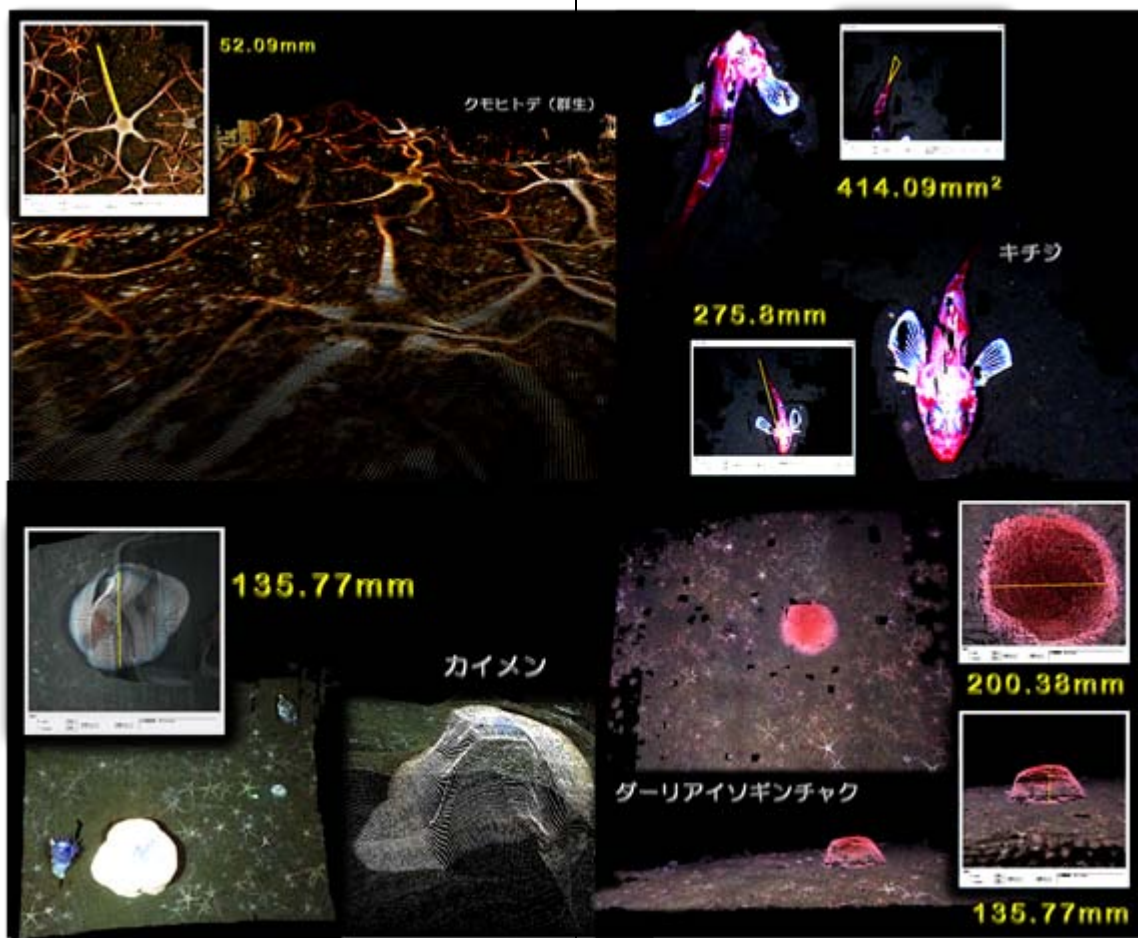


図5 三次元可視化画像

本研究のように、深海環境下（深海底）における三次元可視化画像について、海中探査機を適用した取り組みは国内外的にも少なく、その中、深海環境下における光学特性を補償するカメラモデルを採用することで、正確かつ高精度・高精細な三次元可視化画像の生成に成功したことは、大きな成果といえる。これにより、海中探査機を用いて海底の比較的広い範囲の海底環境を、オフラインではるものより詳細に理解することが期待されるとともに、特に生態系研究分野の発展に資する技術となる。

一方、海域試験中、ステレオ配置した各カメラユニットが、輸送・偽装・潜航・航行を含む海中探査機の運用時の振動により、ごく僅かにズレることが多々発生した。これにより事前に構築した特に外部パラメータ行列の精度が失われ、三次元可視化画像の生成確立を極端に劣化させる事態を招いた。本技術を海中探査機へ適用する場合は、両眼カメラ一体型を構成する圧力容器を開発することにより、当該懸念事項が改善されると考える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Ishibashi Shojiro, 3D Visualization of Deep-Seabed Using a Stereo Vision System Applied into Underwater Vehicles, Proceedings of The Twenty-sixth(2016) International Offshore and Polar Engineering Conference, Full Paper Review, Vol. 1, 2016, 1-6.
- ② Shojiro Ishibashi, Hiroshi Yoshida, et. al., The Development of an Autonomous Underwater Vehicle "Otohome" with the Multiple Operation, Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Full Paper Review, Vol. 1, 2013, 1586-1593.

[学会発表] (計8件)

- ① 石橋正二郎、海中探査機に適用する光学可視化技術、ブルーアースシンポジウム 2016、2016年3月9日、東京海洋大学(東

京都港区)

- ② 石橋正二郎、海底環境調査に適用する3D可視化システムの開発、物理探査学会大133回学術講演会、2015年9月25日、石川県文教会館(石川県金沢市)
- ③ 石橋正二郎、海中探査機に適用するしんかい調査、日本機学会 2015年度年次大会、2015年9月15日、北海道大学(北海道札幌市)
- ④ Ishibashi Shojiro, An Optical Visualization Technology to Survey Deep-Seabed, International Conference on Advanced Mechatronics 2015, 6/12/2015, Waseda University (Shinjuku-ku, Tokyo)
- ⑤ 石橋正二郎、ステレオ視による3D可視化技術の開発、東北マリンサイエンス拠点事業平成27年度全体会議、2015年6月6日、東北大学(宮城県仙台市)
- ⑥ 石橋正二郎、3Dモザイクシステムの開発、東北マリンサイエンス拠点事業平成26年度全体会議、2014年5月17日、東北大学(宮城県仙台市)
- ⑦ 石橋正二郎、自律型海中探査機の開発と要素技術への取り組み、第31回日本ロボット学会学術講演会、2013年9月4日、首都大学東京(東京都八王子市)
- ⑧ 石橋正二郎、海中ステレオ視によるモザイクシステムの開発、東北マリンサイエンス拠点事業平成25年度全体会議、2013年6月8日、東北大学(宮城県仙台市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石橋 正二郎 (ISHIBASHI, Shojiro)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・  
海洋工学センター・グループリーダー代理  
研究者番号：90371731