

令和元年6月24日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06913

研究課題名(和文) 海洋環境を利用したフリーフォール型海底観測装置の高精度位置推定の開拓

研究課題名(英文) Development of high precise positioning estimation method for a free-fall type underwater observation system using underwater environment conditions.

研究代表者

小池 義和 (Koike, Yoshikazu)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：30251672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：海洋調査において拡張性が高いガラス球を用いたフリーフォール型観測機による海底調査において得られたデータに精度の高い位置情報を付与することを目指す。そのためにステレオ視カメラ、慣性センサを内蔵した観測機を構成し、船舶運航実験用水槽及び実海域で観測機の位置推定精度の実験を行った。慣性センサノイズのモデル化及びシミュレーションデータの作成、また距離計データの統合処理アルゴリズムの提案、陸上での精度確認を行った。さらにステレオ画像解析による移動量推定を行った。観測機の移動に伴い、撮影可能領域が変化し特徴点の消失・出現が発生するため、移動量推定に用いる特徴点の更新方法についても検討している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近海を網羅的に調査可能な海中無人探査機の開発を目的としており、新しい試みである。プロジェクトでは、既にガラス球内でガラス球外部の海洋データをモニタ可能なシステムを実現している。海底調査用の基本回路基板、プログラムはユーザが拡張しやすいように検討を重ねることも本研究の目的としており、ユーザが拡張可能な、つまりユーザ開発型の基本セットの提供を念頭においている。海洋研究の専門家以外の研究者を海洋調査に多く取り込むことで、日本の近海の資源、環境の有効活用が期待できる。その成果は、再生可能エネルギーで期待されている洋上発電の立地調査のためのマップデータ提供など、波及効果のポテンシャルは大きなものがある。

研究成果の概要(英文)：The project aimed to develop high accurate positioning system of a free-fall type underwater observation system that has high extension possibility of oceanographic survey. A stereo vision camera system and an inertia measurement unit sensor were installed inside a glass sphere. The practical measurement was carried out in an indoor experiment pool or actual sea. At first, the acquisition method of both sensor noise model and sensor noise simulation data for the employed IMU sensors was proposed. Additionally, the algorithm for improvement of positioning in the combination with range sensor data was proposed. The proposed algorithm validity was confirmed on the land experiment by using a cart. Stereo vision analysis was also applied to estimate trajectory of the observation system. The update algorithm of feature points was also investigated because the feature points extracted by the recorded images are also appeared or vanished during the observation system motion.

研究分野：波動応用

キーワード：海底観測 特徴点抽出 慣性航法 ステレオ画像法 フリーフォール型 ガラス球 海洋調査 移動量推定

1. 研究開始当初の背景

平成25年4月に新たに打ち出された海洋基本計画からもうかがえるように日本が有する世界第6位の排他的経済水域を守り抜き、さらなる国土周辺の海洋の利用、開発が求められている。そのためには、沿岸の網羅的な海中、海底の調査が必要である。これを実現するためには、海洋に深く関わっている研究所以外の団体・個人が、専用の調査船及び高額な機器を用いることなく調査に参加可能な環境を構築する必要がある。また、海洋調査機器のさらなる高機能化をユーザが実施し、ユーザが取得した観測データの収集を容易にできるような環境にすることで、沿岸の網羅的調査の費用、時間の大幅な削減が期待できる。海洋調査では、ROV (Remotely Operated Vehicle)、AUV (Autonomous Underwater Vehicle) が利用されているが、機器の開発に費用がかかることと運用も大型船舶を必要とするため、限られた台数と限られた研究機関での運用に限られていた。また、海底での定点観測にはガラス球に封入された観測機が地震計測などに利用されている。J-CAD で代表される小型漂流ブイなども開発が進められている。その他に海中の水温、塩分濃度の地球規模で、ARGO 計画が進められており、日本近海で184個の観測装置 (ARGO フロート) が投入されている。ARGO フロートは、海底観測を目的しておらず、映像データは取得できない。また、海上に浮上した時に観測位置の測位が可能であるが海中ではGNSS (GPS などの測位航法衛星システム) が利用できないため、測位することはできない。また、海底観測用のガラス球などの位置は海上からLBL (Long Base Line)、SSBL (Super Shot Base Line) などの音響計測により海上から測位可能であるが、同じく運用は限られた研究機関となり、海中の観測機内にも測位のための音響機器が必要となることから、網羅的観測には費用と時間がかかることになる。そのため、運用が容易で海底での測位を簡便に実現するリアルタイム測定可能なシステムの開発が必須である。

2. 研究の目的

本研究では、プレジャーボートのような小型船舶でも海洋調査を可能とする海上に浮かべた漂流ブイとケーブル接続された測位可能なフリーフォール型の海中無人探査機の開発を目的としている。海底、海中での測位を実現するために海底観測に用いるカメラの撮影映像、慣性測定データと海上から送られる音響データにより、測位に適用する。そのために観測機に設置されたバブルを発生する仕組みを持たせ、ケーブルで映像を送ることにより PIV (Particle Imaging Velocimetry, 粒子画像流速測定) を海上のブイで行い、GNSS (GPS に代表される全地球衛星測位システム) データで再構成し、海中の観測機の測位を水深3000mで水平位置10m以内を目指す。本研究では海中無人探査機の海中での測位を目指しており、この申請を始める前に実現しているガラス球内からの海洋観測システムを発展させる。ガラス球の観測機の発展により網羅的な調査を海洋関係以外の研究グループに普及させるための技術の実現を目指す。そのために測位は光ファイバージャイロ、超音波センサ、加速度センサ、地磁気センサ、振動ジャイロおよびガラス球内からの海洋観測データ、ガラス球の姿勢、複数個の組み合わせを行い、数万円での比較的高精度な慣性航法の実現を目指している。これによりフリーフォール型の海中無人探査機に対して、高精度な測位技術が提供できると考えている。さらに浮上機構についても検討を行い、おもり切り離しだけではなく、浮力調整による浮上機構の検討も行っていく。

実現される観測機は、研究機関だけでなく、資源に関わる鉄鋼業、ガス会社、製薬会社などが関わっていくと考えている。

3. 研究の方法

本研究は図3に示す研究体制を取っており、上記に述べた研究を円滑に進め、遂行するための体制を整えている

【平成28年度】ガラス球にステレオ視カメラ、慣性センサを内蔵した観測機を構成し、船舶運航実験用水槽及び実海域での位置推定精度の実験を行っている。平成28年度は、慣

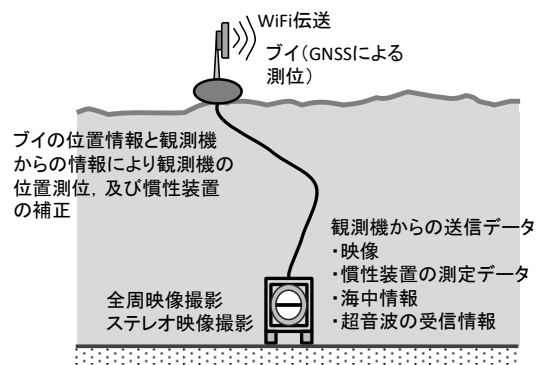


図1. 本研究で開発する観測機の運用と解決すべき課題

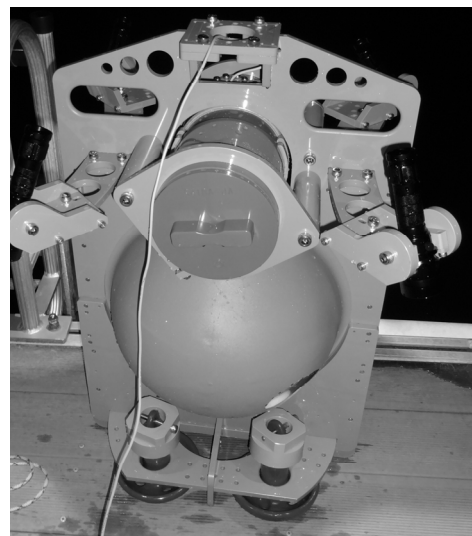


図2. 試作中の本研究の観測装置

性センサの評価を中心に、データ取得頻度を100Hzで行い、拡張カルマンフィルタ(EKF)を適用することで、得られる位置推定精度の確認を行った。第1段階として、慣性センサから得られるノイズのモデル化を行い、水深計と距離センサを組み合わせた場合の位置推定手法を提案し、位置推定精度の確認が可能となるシミュレータの開発を行った(図4参照)。EKFに一台の距離センサデータを導入し、地磁気データと組み合わせた場合、円周上軌道に位置推定誤差をとどめられることとなる。姿勢推定はIMUセンサに地磁気センサの誤差が入らないようにするため、地磁気による加速度速度ベクトル算出後、ジャイロスコープのデータと合わせて推定を行うアルゴリズムとしている(図5参照)。誤差の蓄積を抑えるための距離センサは、測定原理に音だけでなく光も利用することを考える。小型化を考え可視光を用いた距離計による補正を検討した。母船が送信した可視光を観測機側のCMOSイメージセンサで受光し、送受信に要した時間から算出する距離情報により補正を行う(図6参照)。位置推定精度の検証を実験水槽で行い、観測機をクレーンに吊り下げ、移動させ、慣性センサから得られた軌跡との比較を行っている。また、内蔵されたカメラによる撮影映像をSURF(Speeded Up Robust Features)を用いることで特徴点を抽出して、位置推定を試みている。また、観測機にバブル発生装置を取り付け、内蔵されたカメラで得られたバブルの動画を撮影し、PIVを適用することで観測機移動推定量を得て、推定精度の改善を試みている。

【平成29年度】平成28年度に引き続き、ガラス球に封入されたステレオ視カメラを用いた画像処理による挙動推定の高精度化を行った。SURFとICP(Iterative Closest Point)を用いることで特徴点を抽出し、三角測量を用いて、フリーフォール型観測機の移動量推定を試みている。陸上で地面に特徴点となる指標を置いて、SURFとICPを組み合わせた移動量推定を行い、陸上において10mの移動で10%程度の誤差の精度を得ている。東京海洋大学の船舶運航性能実験水槽でクレーンによる牽引実験を試みているが、光量の調整等に問題があり、十分な精度を得ることができていない。また、実海域での映像を取得し、特徴点の抽出及びICPの適用可能性も検討している。また、28年度に引き続き、慣性センサを用いた位置推定を行っている。昨年度の結果から陸上と比較して水中では10分の1以下の加速度であることを確認している。高精度の慣性センサを導入し、データ取得頻度を100Hzで行い、EKFを適用することで、位置推定精度の確認を試みた。

【平成30年度】平成29年度に引き続きガラス球に封入されたステレオ視カメラを用いた画像処理による挙動推定の高精度化を行った。平成30年度は推定精度を向上させるために水中でのキャリブレーションについて重点的に検討を行った。従来からよく用いられているチェスボードを水中に挿入しステレオ視カメラによりキャリブレーションを行い、ガラス球及び水の存在が精度に与える影響について検討を行っている。さらに、ステレオ視における移動量の推定において、前後の撮影画像の特徴点の対応付けにおいて、左右の特徴点の対応付けで用いたICPではなく、SAD法とRANSAC法を組み合わせを試みている。特に前後のフレームでの特徴点の出現、消失に対して適したアルゴリズムの検討を行っている。加えて回転情報は失われるが、誤差の累積を抑えるために一定間隔で回転情報を初期化することで、直線運動の場合、精度が向上することを確認している。本研究で対象とするフリーフォール型観測機の場合、観測機の移動は、ほぼ、直線運動になる運用も多いことから、妥当なアルゴリズムであると考えている。

ステレオ視による移動量推定に加えて、慣性センサを用いた位置推定を引き続き行った。平成28年度に慣性センサのノイズのモデル化に成功しており、水深計と距離センサを組み合わ

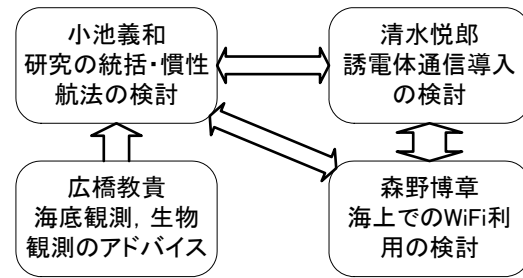


図3. 協力体制

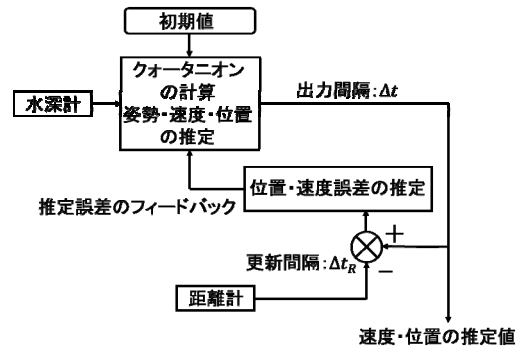


図4. 本研究で提案するMEMS慣性センサを用いた位置推定システム

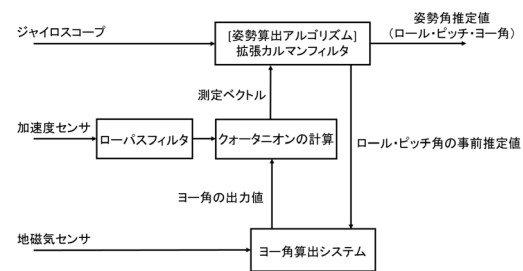


図5. 姿勢推定アルゴリズム全体図

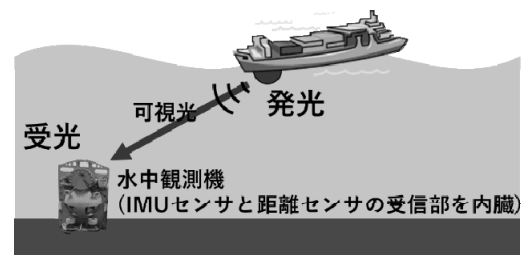


図6. 提案する水中観測機の構成

せた場合の位置推定手法の提案し、位置推定精度の確認が可能となるシミュレータの開発を行った。平成30年度、陸上での実験として、台車にガラス球を乗せ、直線および矩形軌跡を移動させ、距離センサと慣性センサデータを合わせて開発したアルゴリズムを適用した。

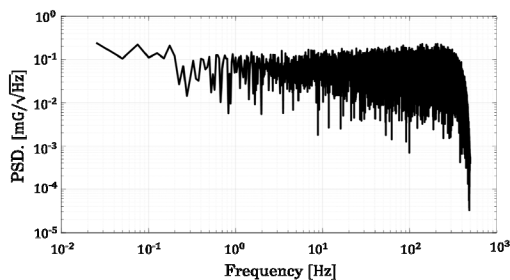
4. 研究成果

4-1. センサのモデル化

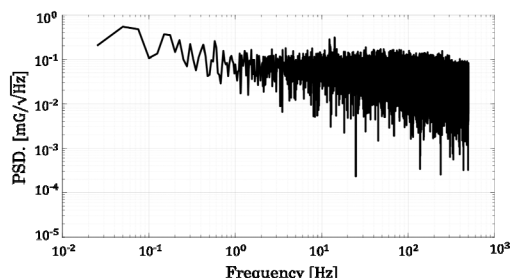
アラン分散を用いた慣性センサノイズのモデル化及びシミュレーションデータの作成、また距離計データの統合処理アルゴリズムの提案、シミュレーションにより距離データの有無が位置推定結果に対してどのような影響を与えるかの考察を行った。アラン分散を用いて作成した慣性センサノイズは、実データと比較して良好にモデル化できている(図7参照)。水中実験を行う前に地上での事前実験として、台車に姿勢推定実験で使用したIMUセンサを載せ、 x 軸方向に-10[m]移動させた時のセンサデータを取得し、移動軌跡の推定を試みた。室内実験であるため地磁気センサは使用できず、ヨー角の算出もジャイロ스코ープにより行っている。移動軌跡は従来手法である積分法(100Hz)またEKF(100Hz)、EKF(10Hz)で推定し結果を比較している。実験結果より、EKFアルゴリズムの使用、またデータ取得頻度を高くすることで位置推定結果の大幅な改善が確認でき、EKF(100Hz)で x 軸推定誤差が0.43[m]という結果を得た。これより約9秒で10[m]の移動については十分な精度が得られることが確認できた。シミュレーションと陸上実験での有効性確認を行った後に、船舶運航性能実験水槽で水中に沈めた観測機をクレーンで引っ張り、移動させた時のセンサデータを取得し、移動軌跡の推定を試みた。得られた結果から、推定移動軌跡が真値とは逆方向へ移動しており、移動軌跡を推定が十分に行うことができていない。提案している手法は、陸上である程度の加速度が与えられた場合に、十分な位置精度が得られることを確認した手法を用いている。同様なアルゴリズムで、水中での位置推定を試みているが、陸上と比較して10分の1以下の加速度のため、正確な移動方向の推定が困難なことを確認している。また、更なる原因として、クレーンの振動が大きくローパスフィルタで取り除ききれないこと、また移動開始時の加速度が小さくノイズ及びクレーンの振動に埋もれセンシングできていないことが挙げられる(図8参照)。

4-2. PIV法の適用

試作した観測機にバブル発生装置を取り付け、発生する機体をガラス球の内部から撮影した(図9参照)。得られた動画に対して、それぞれのフレームの画像にPIV法を適用するためにPIVLabを適用し、観測機の移動量推定を行っている。ステレオ視カメラの測定により、左右のカメラで異なる挙動の観測が期待できる。2台のカメラにより2次元平面での移動量のみ推定可能である。クレーンで観測機を吊り下げて移動させ時の移動量を推定しているため、左右に観測機の揺れが発生し、鉛直方向にはほとんど移動が生じていないことが確認できる(図10参照)。気泡発生装置をガスポンペにより試みて



(a) モデル化したセンサノイズ



(b) 測定したセンサノイズ

図7 センサモデルの検証

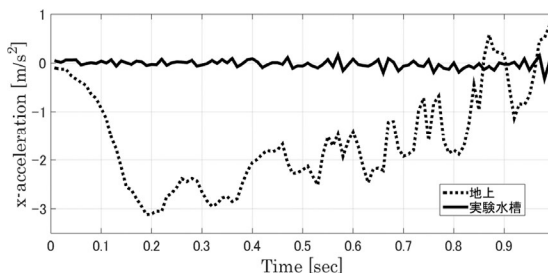


図8 姿勢補正後の加速度データ
(移動開始部を拡大)

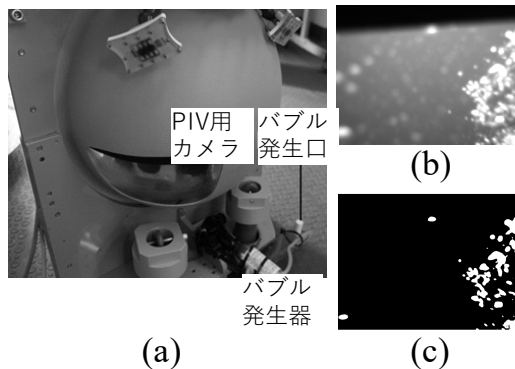
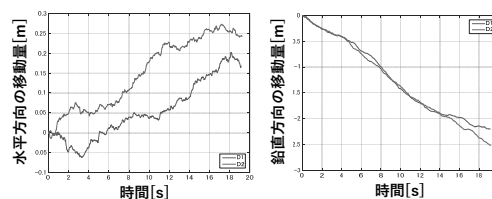


図9 バブル発生装置及びバブル撮影画像
(a)本体への取り付け、(b)撮影画像(処理前)
(c)撮影画像(2値化処理後)



(a) (b)

図10 PIVLabによる観測機の移動量
(a) 水平方向、(b) 鉛直方向の移動量

いる。気泡は、比較的移動速度が遅い場合には、有効な特徴点となりうるが、水平方向の移動推定において水平方向の観測機の移動により、バブルの映像がカメラから消えて、推定が不可能となる問題点がある。実海域では、潮流のため、観測機が不規則な振動を行うため、PIV だけでは十分な軌跡推定を得ることが困難なことが確認された。

4-3. ステレオ視カメラによる移動量推定

ステレオ視カメラを用いた観測機の移動量推定処理は以下の手順に基づいている。

- ①ステレオカメラのキャリブレーション
- ②ステレオ画像からの特徴点抽出
- ③ステレオ画像から得られた特徴点の対応付け
- ④三角測量により特徴点の3次元座標を取得
- ⑤時間 t の画像と $t+1$ の画像の特徴点の移動量からカメラの移動量を算出

①は1マスの大きさが既知であるチェスボードを撮影し、撮影画像をもとに右カメラを基準として、左カメラの位置を表す回転行列と並進ベクトルを求める。また、カメラの内部パラメータ（焦点距離など）も求まる。②はSURFを用いて行う。SURFは反復性、スケール不変性、回転不変性に優れた特性を持っている。③は設定した閾値より左点と右点のペアワイズ距離が小さい特徴点ペアを抽出する。得られた点の対応は本来の特徴点ペアから大きく外れる点も含まれるため、エポポーラ制約を満たしている点のみを抽出する（図11参照）。④は抽出された左右の点の対応とキャリブレーションで得られたパラメータから三角測量によって画像空間における2次元座標から実空間における3次元座標に変換する。⑤のICPアルゴリズムにより時間 t のフレーム画像の特徴点の点群1の各点から時間 $t+1$ のフレーム画像の特徴点の点群2で最近傍の点を探索し対応付け、対応した点と点間の回転行列と並進ベクトルを算出するアルゴリズムを介してカメラの移動量を算出する。

移動量推定結果は特徴点が行われている場合、陸上で行った10mの直線運動では実際の移動量を算出することができている（図12参照）。今回は意図的な特徴点を設けることで精度を高めているが、単調な床の映像では明るさが変化するため、特徴点を前後のフレームでペアづけることが非常に難しく、移動量推定に大きな誤差が生じる結果となっている。ただ、水中では海底に到達した場合、近海では特徴点が行われやすい環境となることが多いと考えている（図13参照）。また、回転行列を導入した場合、意図的な特徴点を設けた場合であったとしても水平方向の誤差が大きくなる結果となる場合があり、更なる検討が必要である。今回、精度の改善として一定間隔で回転情報を初期化することを提案している。そのため、一定間隔で初期化した場合の校正を検討する必要がある。

4-4. 距離センサ情報を付加した移動軌跡推定

地上において台車に観測機を載せ、正方形運動で距離情報の有無による位置推定結果の改善を評価した。試験では、別途検討しているCMOSイメージセンサが実装できなかったため、代わりにレーザ距離計を使用し、位置推定の処理をMATLAB上で実行した（図14参照）。提案している距離情報を付加し位置推定法（図4参照）を適用し、真値に近い移動軌跡が推定できていることを確認している（図15参照）

以上の成果により、フリーフォール型観測装置の精度の高い位置推定法について有用な技術の基礎を確立できたと考えている。

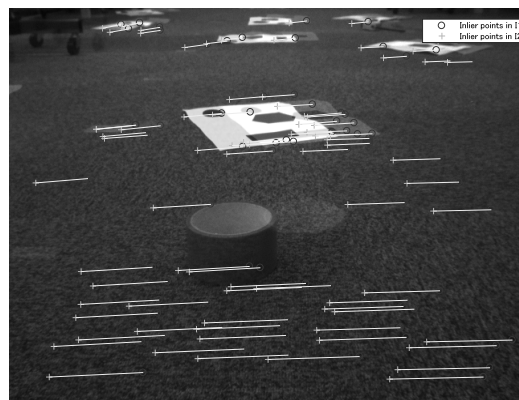


図11 ステレオ視カメラ結果のSURFの適用及び特徴ペアの抽出

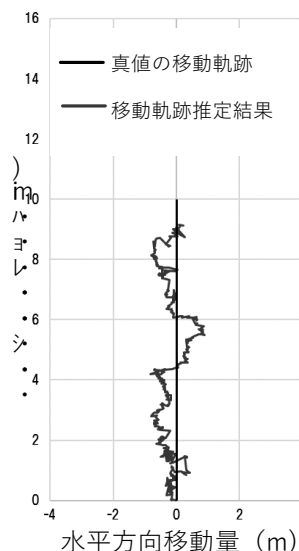
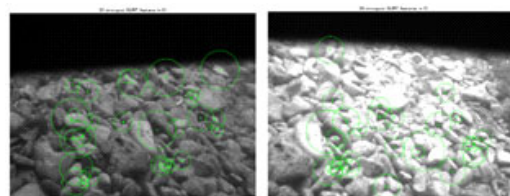
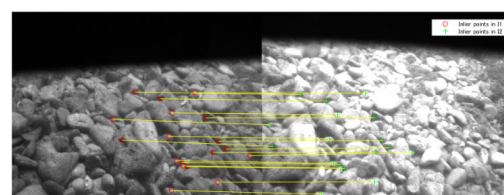


図12 移動量推定結果



(a) 左右のカメラの特徴点の抽出



(b) 特徴点のペアリング

図13 海底映像に対する特徴点の抽出及びペアリング

5. 主な発表論文等

- [1] Yoshikazu Koike, Hiroaki Morino and Etsuro Shimizu, "Positioning and navigation for free-fall type underwater observation system", Proc. of ISUD10, KL2, (2016.9) [Keynote Lecture]
- [2] 畑健太他, "MEMS 慣性センサを用いた水中移動軌跡追従システムの検討", 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-18-21 (2017.9)
- [3] 畑健太他, "水中環境における MEMS 慣性センサを用いた位置推定精度向上に関するシミュレーション", 電子情報通信学会技術研究報告書, ASN2017-100 (2018.1)
- [4] Yoshikazu Koike, "Challenge To Underwater Observation System Using Glass Sphere", Proc. of SEATUC2018, xiii (2018.3) [Keynote Speech]
- [5] Yoshikazu Koike *et al.*, "The Investigation of Underwater Positioning System Using the MEMS Inertial Sensor", Proc. of SEATUC2018, 173 (2018.3)
- [6] Masyhuri Husna binti Mazlan et al, "Motion Detection of Underwater Observation System Using Stereo Vision", Proc. of SEATUC2018, 4 (2018.3)
- [7] Masyhuri Husna binti Mazlan et al, "Motion Estimation By Using Stereo Vision Analysis For Underwater Observation System", 2019 ICEIC, DOI: 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706467 (2019.1)
- [8] Junji Shmizu et al, "Simulation on Improvement of Position Estimation Accuracy in Underwater Using MEMS IMU", 2019 ICEIC, DOI: 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706500 (2019.1) [Best paper award bronze prize winner]
- [9] Eriko Enomoto et al, "Application of Range Finder by Image Sensor in the Underwater Environment", 2019 ICEIC, DOI: 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706398 (2019.1)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 9 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：森野博章

ローマ字氏名：Morino Hiroaki

所属研究機関名：芝浦工業大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：50338654

(2)研究分担者

研究分担者氏名：清水悦郎

ローマ字氏名：Etsuro Shimizu

所属研究機関名：東京海洋大学

部局名：学術研究院

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：60313384

(3)研究分担者

研究分担者氏名：広橋教貴

ローマ字氏名：Noritaka Hirohashi

所属研究機関名：島根大学

部局名：学術研究院農生命科学系

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：90376997

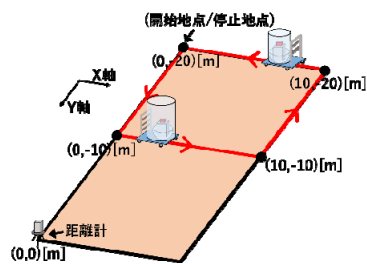


図 1 4 正方形運動試験における移動の様子

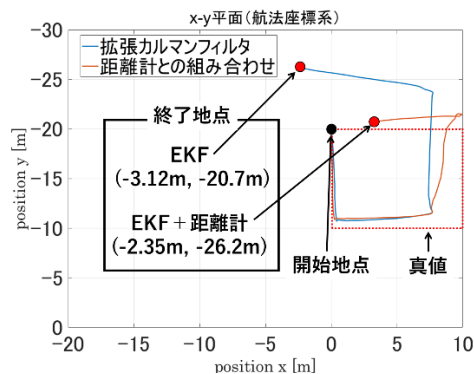


図 1 5 正方形に移動したときの推定結果

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。