

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18291

研究課題名(和文) AUVの撮影度評価に基づく観測経路生成の広域調査実用化

研究課題名(英文) Realize wide area survey based on real-time quality evaluation and path-planning method for AUVs

研究代表者

佐藤 芳紀 (Sato, Yoshiki)

東京大学・生産技術研究所・特任研究員

研究者番号：90635210

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：水中でのデータ通信は低速であるため、一般的に自律型海中ロボットによって観測された成果はロボットを回収するまでは確認できない。本研究は、自律型海中ロボットによる海底画像観測の効率化のため、1度の潜行で複雑な海底を高被覆率に観測するためのナビゲーションを実海域の広域調査で実現する。ロボット内蔵CPUの負荷増加を抑えるため、本システムはロボットに追加装着可能なGPU(Graphics Processing Unit)主体のハードウェアモジュールとして作成した。本システムでは約1,000平米に及ぶ地形を高被覆率に観測可能なルートを現実的なシブタイム内に自動生成できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In general, observed image by AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) can not be confirmed until the AUVs are recovered. It is because underwater communication devices are too low speed to send observed data. In this study, the proposed method realizes high-coverage observation in one dive. In order to reduce the calculation cost of CPU in AUV, proposed system was created as hardware modules to cooperate with the CPU. The hardware based on GPU (Graphics Processing Units). We confirmed that the system can generate high-coverage path automatically within realistic ship time in an area of 1,000 square meters.

研究分野：自律型海中ロボット

キーワード：海洋工学 海洋探査 自律型海中ロボット ロボットナビゲーション Path Re-planning Method

1. 研究開始当初の背景

我が国の排他的経済水域内には海底熱水鉱床などの鉱物資源やメタンハイドレートなどのエネルギー資源の存在が確認されており、資源量の推定や海底資源開発による環境影響評価、採掘方法の検討などが盛んに進められている[1]。研究代表者らの研究グループにおいても、人間による管制や数キロメートルにも及ぶケーブルを必要とせず、全自動で海中探査を行う AUV に関する研究を進めており、鹿児島湾たぎり噴気帯の海底環境の約 3,000 平方メートルにわたる画像マッピングなどに成功している[2]。しかしながら、熱水鉱床や生物群集が形成する複雑な海底地形においては、予め与えたパスに従うのみの従来の観測ではオクルージョンやカメラと海底との位置関係の悪さなどから未観測領域が生じ得る。AUV は高速通信が可能なテザーケーブルを持たないため、船上のオペレータが未観測領域をリアルタイムに確認することは困難である。その結果、事後処理によって未観測領域が発見された場合には観測機器の再投入の必要性が生じ、シフトタイムやコストの増加を招く。そこで研究代表者らは 1 度の投入で複雑な海底を高被覆率に観測するためのナビゲーション手法 (Path Re-planning Method) を提案した[3]。

本ナビゲーション手法は図 1 に示す 3 段階のフェーズで構成される。AUV は予め与えられたパスに従う初期観測 (I. First observation) を終わると、初期観測での未観測領域を推定し、再観測用のパスを生成する (II. Calculation)。最後に、Calculation フェーズで得られたパスに従い、未観測領域を観測する (III. Re-observation)。研究代表者らは水槽実験ならびに水深約 35 メートルの浅海域実験により本ナビゲーション手法の妥当性を示すとともに、実海域の広域探査のためには Calculation フェーズの処理の高速化が必要であることを示唆した[4]。

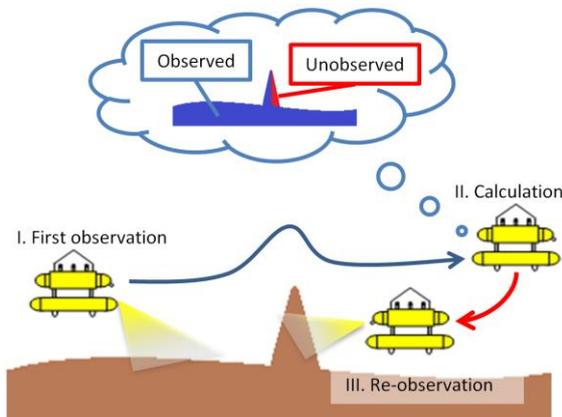
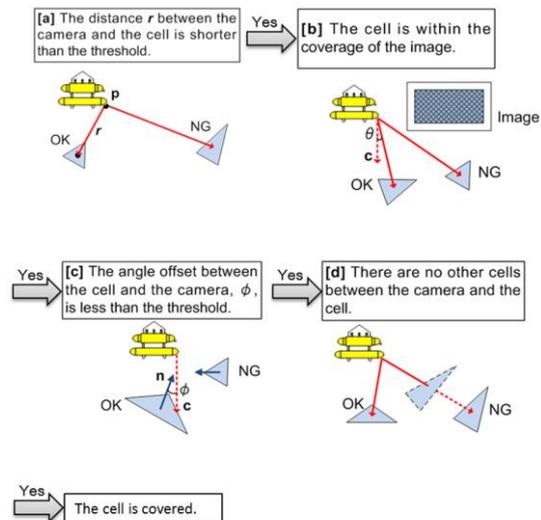


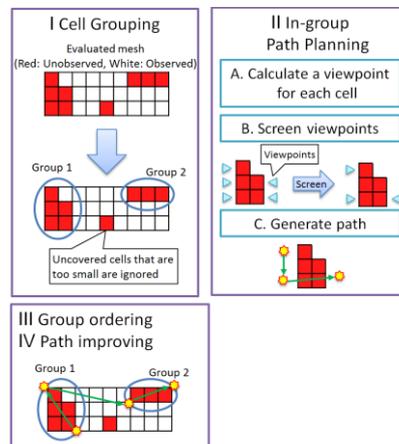
図 1. Path Re-planning Method の概要

2. 研究の目的

本研究では Path Re-planning Method の課題である Calculation フェーズの高速化を行い、本手法を実海域の広域調査において現実的なシフトタイム内で実現させることを目的とした。Calculation フェーズは、図 2 に示すフローに従い初期観測フェーズで未観測であった領域を推定、再観測用の経路を生成する。はじめに、First observation フェーズで計測した地形形状をメッシュ化し、メッシュを構成する各セルと画像観測時のカメラの視線ベクトルの位置関係から撮影度を評価する (1. 撮影度評価)。続いて、未観測であると評価されたセルをグループ化し、各未観測セルグループを効率よく巡回、観測するための経路を生成する (2. 再観測経路生成)。研究開発当初において、AUV による 1,000 平方メートルの海底画像観測では Calculation フェーズには 1 時間以上の時間を要することがわかっていた。これらの処理を数 10 倍以上のオーダーで高速化することを目指した。具体的には、1,000 平方メートルオーダーの広域観測においても Calculation フェーズを数分で完了させる。



(1) 撮影度評価



(2) 観測経路生成

図 2. Calculation フェーズ 処理フロー

3. 研究の方法

本研究では GPU の導入により図 2 に示した一連の処理を数 10 倍以上のオーダーで高速化することを目指した。具体的には、GPU の持つ高速なメモリインタフェース機能と高い並列処理能力を GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) によって CPU と協調させる。また、本研究においては想定する AUV の例として図 3 に示す既存の AUV Tri-TON (最大水深 800 メートル) および AUV Tri-TON2 (最大水深 2000 メートル) を用いた。Tri-TON および Tri-TON2 はカメラとフラッシュおよび光切断のためのシートレーザーを前方、下方にそれぞれ 2 組持つ海底画像観測用 AUV である。観測中は画像の約 50% がオーバーラップするように前進しながらフラッシュ撮影を繰り返し、図 4(1) に示すような海底のカラー画像を取得する。フラッシュ撮影の合間にシートレーザーを海底に照射し、図 4(2) に示すように光切断法により海底の地形形状を算出する。



(1) Tri-TON (最大水深 800 メートル)



(2) Tri-TON2 (最大水深 2000 メートル)

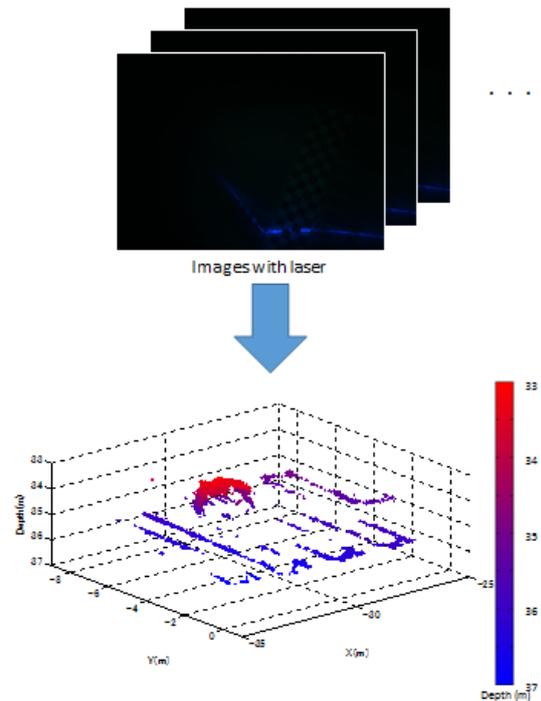
図 3. 想定する AUV の例

平成 27 年度は、GPGPU 開発環境を整え、ソフトウェア開発を行った。CPU と GPU の効率的な協調動作のためにはプログラムコードの最適化が不可欠であった。そこで GPU 実装にあたり点群データへのハッシュ値付与、データの局所性を考慮したデータアクセスなどのアルゴリズム最適化を実施した。また、プログラムコード最適化用のデータ取得のため、鹿児島湾熱水噴出域(水深約 200 メートル)、静岡県内浦湾(水深約 35 メートル)、沖縄トラフ与論海穴(水深約 670 メートル)でそれぞれ実海域実験を行い、サンプルデータを新規に収集した。

ハードウェアに関しては、平成 28 年度に NVIDIA 製のハイパフォーマンスコンピューティング用途に特化した GPU を導入し、平成 27 年度に取得したサンプルデータを基にソフトウェア開発および最適化を行った。



(1) フラッシュ観測された海底熱水鉱床
(鹿児島湾 水深約 200 メートル)



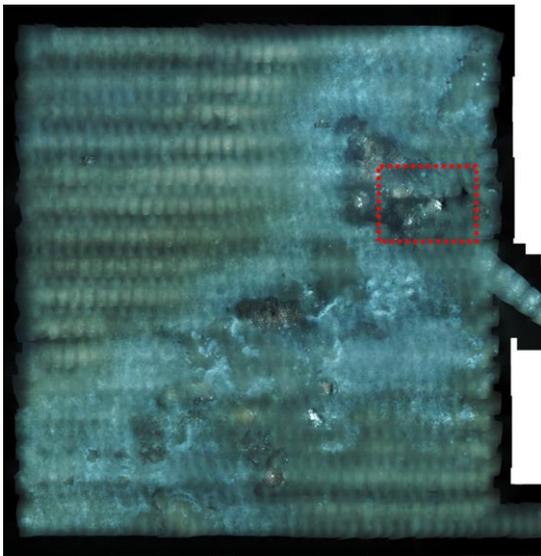
(2) 光切断法による地形計測

図 4. AUV Tri-TON による画像観測結果の例

4. 研究成果

平成 27 年度は、GPGPU 開発環境を整え実海域実験で得られた海底の 1,000 平米級モザイクの例を図 5 に示す。図 5 の画像は平成 26 年 9 月に鹿児島湾において AUV Tri-TON2 によって撮影されたサツマハオリムシ群集である。図 5(1)の画像は高さ約 35 メートル、幅約 32 メートルであり、面積は約 1056 平方メートルである。図 5(2)は図 5(1)中の赤枠部分を拡大したものである。図 5(2)中にはハオリムシ群集が含まれているが、ハオリムシによって形成された地形は隆起に富んでいるため 1 度の撮影では赤色で示すように観測漏れが生じた。

本試験では、AUV Tri-TON2 は潜航に約 5 分、自己位置推定および初期観測に約 201 分、浮上に約 4 分を要した。それに対し、Path Re-planning Method による自動観測経路生成には約 900 分が必要であったことが判明している。AUV Tri-TON はシフトタイムを 8 時間未満と想定しているため、研究開始当初では本手法の実現は不可能なものであった。



(1) 1,000 平米級画像モザイク(水深約 110 メートル)



(2) ハオリムシ群集部

図 5. 海底画像の例 (鹿児島湾サツマハオリムシサイト)

CPU と GPU の効率的な協調動作のためにはプログラムコードの最適化が不可欠であった。まず、CPU と GPU 間のトラフィック量を削減する仕組みについて考案した。具体的には、地形計測によって得られた 3 次元点群データ $\{x, y, z\}$ それぞれについて、ハッシュ値としてユークリッド距離 d を付与し、4 次元データ $\{x, y, z, d\}$ として扱うこととした。 d の値が近い点群は原点を中心とした同一球面に近い位置に存在するため、近傍点を効率よく探査可能となった。続いて、点群中の注目点に対し、近傍点を探索するアルゴリズムについても研究開発当初では Algorithm 1 に示す通り点群を全探索し近傍点を抽出していた。

Algorithm 1. Denoising process

```
for  $i = 0$  to  $N - 1$  do
   $count = 0$ ;
  for  $j = 0$  to  $N - 1$  do
    if ( $i = j$ ) then
      continue;
    end if
    if ( $dist(x_i, x_j) \leq d$ ) then
       $count = count + 1$ ;
    end if
    if ( $count \geq n$ ) then
       $x_i$  is valid;
    end if
  end for
end for
```

Algorithm 2. Optimized denoising process

```
for  $i = 0$  to  $N - 1$  do
   $count = 0$ ;
  for  $offset = 1$  to  $N - 1$  do
    if ( $i + offset < N$ ) then
      if ( $dist(x_i, x_{i+offset}) \leq d$ ) then
         $count = count + 1$ ;
      end if
    end if
    if ( $i - offset \geq 0$ ) then
      if ( $dist(x_i, x_{i-offset}) \leq d$ ) then
         $count = count + 1$ ;
      end if
    end if
    if ( $count \geq n$ ) then
       $x_i$  is valid;
    end if
  end for
end for
```

ここで、 N は地形を形成する点の総数を示しており、 $dist(x_i, x_j)$ は i 番目と j 番目の点間の距離を示す。Algorithm1 では $dist(x_i, x_j)$ が一定距離 d 以下となる組合せを数え上げており、その組合せが n 組以上となると i 番目の点は非孤立点として扱うものである。これに対し、最適化したアルゴリズムを Algorithm2 に示す。Algorithm2 ではソースコードの規模は増加しているものの、注目する2点 $\{x_i, x_j\}$ はメモリ空間中の近い番地より探査が開始されるため、 i 番目の点が非孤立点の場合は高速に演算を完了できる。

考案したアルゴリズムを GPU に実装するため、ターゲット GPU として NVIDIA 社の Quadro P5000 を選定した。本製品は新世代の Pascal アーキテクチャを採用しており、従来の Maxwell アーキテクチャと比較して倍精度浮動小数点演算性能およびメモリ帯域が強化されている。そのため、高い演算処理能力と高速なメモリインタフェースを必要とする本システムに適している。結果として、本システムは 1,000 平米級の観測データに対し平均して 2318 倍の速度向上を達成した。図 5 に示した例の場合、研究開発当初では Path Re-planning Method による自動観測経路生成には約 900 分が必要であった。しかしながら、本研究の結果、約 0.37 分で未観測領域を補うための新たなウェイポイントを生成した。

<引用文献>

- [1] 海底資源研究の最前線 現状及び今後の動向 講演要旨集, 海洋研究開発機構, 2011.
- [2] 巻俊宏ほか, “自律型水中ロボットによる鹿児島湾たぎり噴気帯の3次元画像マッピング(第2報) 複数回の全自動潜航による広域画像マッピング,” 海洋調査技術, Vol.21, No.1, pp.13-25, 2009.
- [3] A. Kume et al., “A Method for Obtaining High-Coverage 3D Images of Rough Seafloor Using AUV – Real-Time Quality Evaluation and Path-Planning –,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.2, pp.364-374, 2013.
- [4] Y. Sato et al., “Path Replanning Method for an AUV in Natural Hydrothermal Vent Fields: Toward 3D Imaging of a Hydrothermal Chimney,” Marine Technology Society Journal, 2014.

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)

[学会発表] (計 1 件)

- [1] Yoshiki Sato, Toshihiro Maki, Kotohiro Masuda, Takumi Matsuda, and Takashi Sakamaki, “Autonomous Docking of Hovering Type AUV to Seafloor Charging Station based on Acoustic and Visual Sensing,” Proc. of IEEE OES Underwater Technology 2017 Busan, 2017/2/23 発表, Busan (韓国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 芳紀 (Sato Yoshiki)

東京大学・生産技術研究所・特任研究員

研究者番号：90635210