

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2013～2014
課題番号：25820418
研究課題名(和文) 誘目性を考慮した海底物体の自動抽出およびリアルタイムモニタリングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of real-time monitoring system of automatically-extracted seafloor objects based on a degree of perceptual importance

研究代表者
佐藤 芳紀 (Yoshiki, Sato)
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) 3,300,000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 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) によって観測された画像はAUVを回収するまでは確認できない。本研究では、半余弦関数ウェーブレットネットワークにより特に注目すべき画像のみを自動抽出し、データサイズの削減によって低速不安定な水中通信環境においても観測中の物体をリアルタイムにモニタリングするシステムを開発した。本システムでは画像のデータサイズを4%以下に削減しながらも、画像中の物体の識別に十分な特徴を残すことに成功した。

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 image data. In this study, real-time monitoring system of seafloor objects was developed based on the half-cosine wavelet network. The system enables automatical extraction of seafloor objects based on a degree of perceptual importance. The system adapts to the low speed and unstable acoustic communication by reducing the amount of data. The system can reduce the data size of image to less than 4%. Although obtained object image in real time are low resolution, distinguishable features are left.

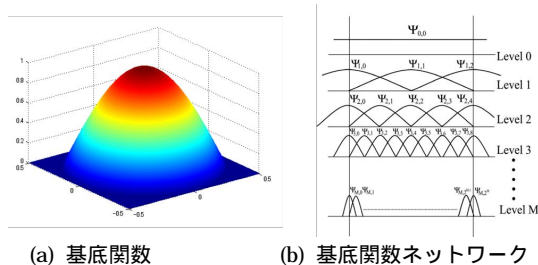
研究分野：自律型海中ロボット

キーワード：半余弦関数ウェーブレットネットワーク 自律型海中ロボット 誘目性に基づく物体抽出 空間周波数解析 ハードウェア実装

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、自己完結型の AUV では保持できるエネルギーやデータ量に限りがあるため、充電やデータ転送のために AUV を定期的に浮上させ母船で回収する、あるいは海底ケーブルによって陸上与繋がれた海底ステーションに AUV を係留させる必要がある。AUV の持つ限られたリソースでより効率的な探査を実現するためには、特に重要性が高い対象的を絞るなどの方法が必要である。また、AUV による観測結果は回収するまで外部から確認できないことも問題である。

一方、画像中から誘目性(目立ちやすさ)の高い物体を自動抽出する方法の 1 つとして、神酒らの半余弦関数ウェーブレットネットワークがある[3]。本手法は図 1 に示すようにコンパクトサポートな基底として半周期の余弦関数をレベルごとに配置した、基底関数ネットワークで画像を近似する。基底のレベルが増加すると、個々の基底関数に対するサポート領域が小さくなるため、より空間周波数の高い領域を受け持つ。コンパクトサポートな基底は画像の一部から誘目性の高い物体特徴を抽出可能であり、新聞記事中の速報性の高い見出しの抽出や、人物同定および表情形成に寄与する人相特徴の抽出、高ノイズ環境下における頑健な物体抽出などが可能であることが神酒らによって確かめられている。また、半余弦関数ウェーブレットネットワークによって抽出した物体画像はプログレッシブ復号が可能である。つまり、電波が使用できない海中のような低速不安定な通信環境下においても、伝達に成功した断片的な情報からたとえ低分解能であっても、抽出物体の近似画像をリアルタイムに復号可能である。



(a) 基底関数 (b) 基底関数ネットワーク
図 1. 半余弦関数ウェーブレットネットワーク

2. 研究の目的

本研究では海底探査の効率化を図るため、図 2 に示す人間が興味を持つであろう物体を自動抽出する技術の開発を目的とした。さらに、抽出物体の近似画像を陸上でリアルタイムモニタリングするための機能を実現する。具体的には、

- (1) 半余弦関数ウェーブレットネットワークを根幹として誘目性の高い物体を自動抽出するシステムの開発。
- (2) 海中の限られた通信環境において、伝達に成功した情報から観測結果の近似画像を陸上で復号、モニタリングできる機能の実現を目指した。

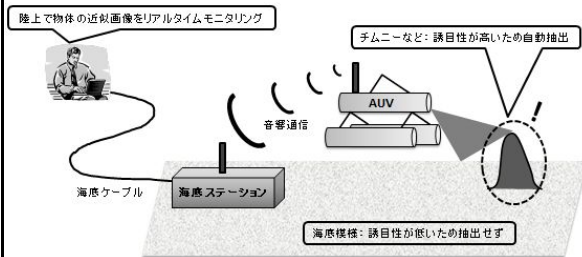


図 2. 誘目性を考慮した海底物体の自動抽出およびリアルタイムモニタリングシステムの概要

3. 研究の方法

平成 25 年度は、図 3 に示す本システムの根幹となる半余弦関数ウェーブレットネットワークを用いた画像の空間周波数毎の(a)分解、(b)再構成ソフトウェアを作成した。

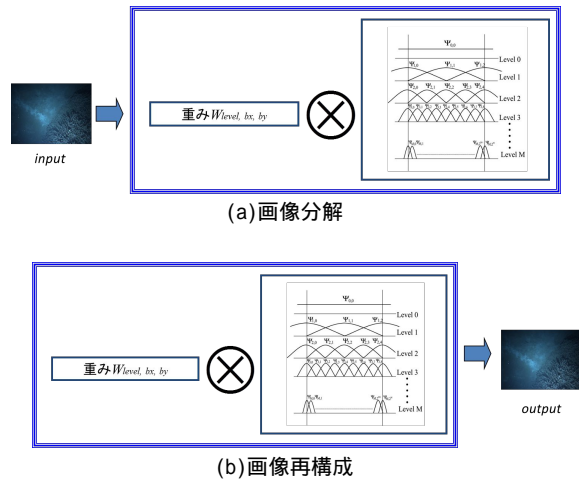


図 3. 半余弦関数ウェーブレットネットワークによる画像の分解、再構成

画像分解部では、入力画像 $input$ は基底関数ネットワーク中の各基底関数 $level, bx, by$ に対応する重み W を(1)式に従い算出する。

$$W_{level, bx, by} = \frac{\sum_{x=0}^{width-1} \sum_{y=0}^{height-1} input(x, y) \Psi_{level, bx, by}(x, y)}{\sum_{x=0}^{width-1} \sum_{y=0}^{height-1} \Psi_{level, bx, by}^2(x, y)} \quad (1)$$

ここで、*width* および *height* はそれぞれ入力画像 *input* の幅および高さのサイズ[*pixel*]を表す。一方画像再構成は(2)式に従い入力画像 *input* の近似画像 *output* を出力する。

$$output(x,y) = \sum_{level=0}^{\max_level} \sum_{bx=0}^{2^{level}-1} \sum_{by=0}^{2^{level}-1} W_{level,bx,by} \Psi_{level,bx,by}(x,y) \quad (2)$$

本研究では、(1)式を AUV に実装し、AUV が取得した画像から重み *W* を算出する。算出された重み *W* は音響通信によって陸上へ伝えられ、(2)式に従い画像を複合する。このとき、音響通信に失敗し取得不可能であった重み *W* は無視される。従って、音響通信の失敗は復号画像の画質劣化をもたらすが、音響通信に成功した情報のみから入力画像の復元が可能である。

作成したソフトウェアは本研究においてハードウェアを作成する上でのシミュレータとしても活用した。ソフトウェアシミュレーションを通し、作成するハードウェアの回路規模を見積るとともに、海底で注目に値する物体を精度よく抽出するための最適なパラメータ群について検討した。これらのパラメータは定量的に最適値を求める手法が確立されていないため、実際の海底サンプル画像が必要であった。そこで実海域実験を通しサンプル画像の収集を実施した。実海域実験では、学術的に興味深いスポットの広域画像を欠損なく収集する必要があった。そこで、研究代表者らが提案している Path Replanning Method を AUV に実装し、複雑環境においても高被覆率な画像取得を実現した。Path Replanning Method の実装および得られた結果については、学会発表にて成果を発信した。

平成 26 年度は、前年度のソフトウェアシミュレーションによって得られた知見を基にハードウェア設計を行った。ハードウェアシミュレーションツールによって配線長や温度条件まで考慮した動作検証を実施し、AUV の密閉された耐圧容器内でも安定かつ十分な速度で動作することを確認した。

4. 研究成果

実海域実験で得られた海底のサンプル画像の例を図 4 に示す。図 4 の画像は平成 25 年 6 月に鹿児島湾において研究代表者らが所有する AUV を用いて撮影されたサツマハオリムシ群集である。図 4 の画像は RGB カラー画像であり、画像の幅および高さはそれぞれ 1392[*pixel*]および 1040[*pixel*]である。また、画像のデータサイズは約 122.2KB である。図 4 のサンプル画像をグレースケール変換し、レベル 7 までの基底関数を用いて分解、再構成した画像を図 5 に示す。図 5 は図 4 と比較して分解能は 25.0%に低下している。しかしながら画像右下部のサツマハオリムシ群集

や海底の白色域を充分視認でき、なおかつ画像データサイズは 21.3KB であり、17.4%までデータ量削減に成功している。

さらに、神酒らの手法[3]によって誘目性の高い部分のみを抽出した場合、画像右下部分のみを残した画像が得られる。その結果を図 6 に示す。図 6 はレベル 5 およびレベル 6 に相当する基底関数に対応する重みから誘目性の指標を表す *curvature energy C_{ij}* を(3)式に従って算出し、その値がレベル 5 では 0.4、レベル 6 では 2 を超えた領域を抽出することで実現可能である。

$$C_{level,i,j} = (W_{level,i-1,j} + W_{level,i,j-1} - 4W_{level,i,j} + W_{level,i+1,j} + W_{level,i,j+1})^2 \quad (3)$$

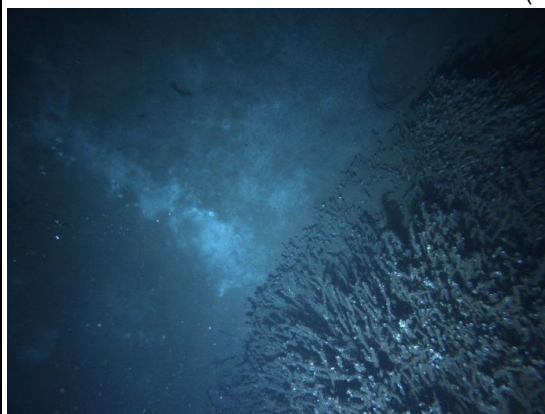


図 4. 海底画像サンプルの例 (データサイズ:122.2KB)



図 5. 画像再構成結果 (データサイズ:21.3KB)

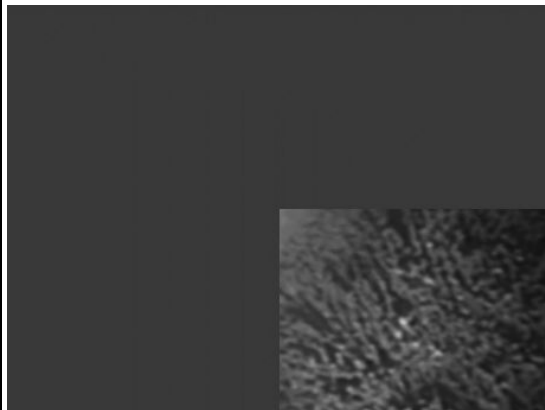


図 6. 誘目性の高い右下領域のみの画像再構成結果 (データサイズ:5.3KB)

(3)式より、誘目性の指標 curvature energy は任意の重み $W_{level,i,j}$ の 4 近傍との差の 2 乗で表される。図 6 のデータサイズは 5.3KB であり、4.3%までデータ量削減に成功した。

ここで、図 6 より誘目性の指標算出に使用されたレベル 5 およびレベル 6 の重みはハオリムシ群集の抽出能力を持つことが確かめられたので、このレベル 5 およびレベル 6 のみで画像を再構成した結果を図 7 に示す。図 7 のデータサイズは 1.3KB であり、元の画像に対して 1.0%まで情報削減に成功している。ただし、図 7 では空間周波数の高いレベル 7 に相当するデータを持たないため解像度が低く、また比較的空間周波数の低いデータも欠落しているため暗い画像となってしまった。しかしながら、本データはサツマハオリムシの生息域で撮影されたものであるという事前情報があれば、図 7 はサツマハオリムシを撮影したものであると十分に判別可能である。

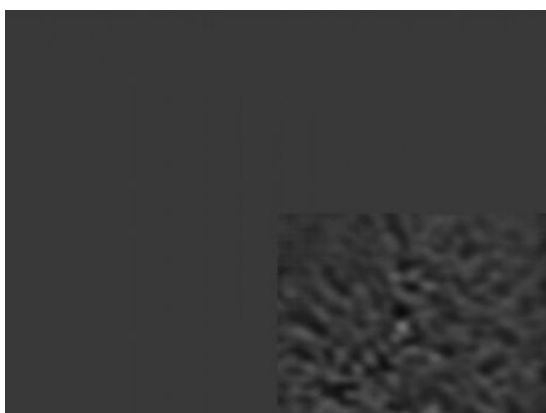


図 7. 誘目性の高い領域をレベル 5,6 のみで画像再構成 (データサイズ:1.3KB)

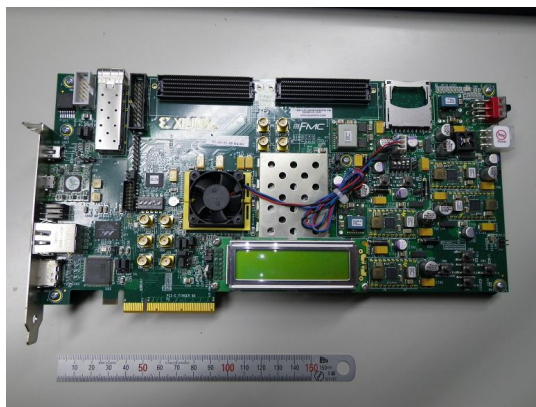
以上より、例示したサンプルデータに対しては AUV が撮影した海底画像のデータサイズを約 1%まで削減できることが確認できた。画像全体にハオリムシ群集が映っている場合においても、データサイズを 4.1%まで削減できることを確認済みであり、海底の低速な音響通信環境でも十分に伝達可能である。

なお、AUV 中のメインコンピュータの負荷増加を抑えるために、本システムは AUV に追加可能なハードウェアモジュールとして作成した。具体的には、先に作成したソフトウェアをハードウェア記述言語 (Hardware Description Language, HDL) で構成し、任意のハードウェアを実装可能な FPGA(Field-Programmable Gate Array) 上に実装可能なものとした。ターゲット FPGA は Xilinx 社の Kintex 7 (Kintex XC7K325T) とし、図 8 に示す評価用ボードに本システムを実装した。本研究ではソフトウェアシステムを単純に HDL 化したのみに留まってしまったため、FPGA 実装のための最適化まではなされなかったが、ターゲット FPGA は AUV の密閉された耐圧容器内でも安定かつ十分な速度

で動作可能であることを確認した。

現在の AUV による海底画像観測では、国内外を問わず、AUV を回収するまでは多量に記録された観測結果を陸上で確認できない。本研究で実現した、観測中に人間が確認すべきデータの候補を自動抽出し、かつ近似画像をリアルタイムに伝達する一連のシステムを備えた AUV はこれまでに存在しない。本研究は資源探査のみに留まらず、生物学、地学などの学術的調査に加え、捜索救助や環境調査にも貢献できる。

図 8. 本システムのハードウェア実装のために使用した



Kintex 7 FPGA 評価用ボード

<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] T. Miki and T. Sato, “A function network-based human-like pre-process algorithm for intelligent feature extractions,” Brain-Inspired IT I, International Congress Series 1269 (Brain IT 2004), Elsevier, pp.169-172, 2004.

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 1 件)

- [1] Yoshiki Sato, Toshihiro Maki, Ayaka Kume, Takumi Matsuda, Takashi Sakamaki and Tamaki Ura, “Path Replanning Method for an AUV in Natural Hydrothermal Vent Fields: Toward 3D Imaging of a Hydrothermal Chimney,” Marine Technology Society Journal, 査読有, No.48, pp.104-114, 2014. DOI: 10.4031/MTSJ.48.3.5

〔学会発表〕(計 4 件)

- [1] Yoshiki Sato, Toshihiro Maki, Hayato Mizushima, Takumi Matsuda and Takashi Sakamaki, “Evaluation of Position Estimation of AUV Tri-TON 2 in Real Sea Experiments,” Proc. of OCEANS ’15 MTS/IEEE Genova, 2015/5/20 発表, Genova(イタリア)
- [2] Yoshiki Sato, Toshihiro Maki, Takumi Matsuda and Takashi Sakamaki, “Detailed 3D Seafloor Imaging of Kagoshima Bay by AUV Tri-TON 2,” Proc. of International Symposium on Underwater Technology 2015, 2015/2/24 発表, Tamil Nadu(インド)
- [3] Yoshiki Sato, Toshihiro Maki, Ayaka Kume, Takumi Matsuda, Takashi Sakamaki and Tamaki Ura, “Toward High-coverage Imaging of Hydrothermal Vent Fields: A Recursive Path-Planning Method of an AUV,” Proc. of 18th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology - UUST 2013, 2013/8/14 発表, Portsmouth, NH(アメリカ)
- [4] 佐藤 芳紀, 巻 俊宏, 久米 絢佳, 松田 匠未, 坂巻 隆, 浦 環, “複雑環境の高被覆率な画像化に向けたAUVのナビゲーション手法(第2報) -リアルタイム撮影度評価に基づく観測経路生成による実海域画像マッピング--, ” ロボティクス・メカトロニクス講演会’13, 2013/5/24 発表, つくば国際会議場(茨城県つくば市)

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