

博士論文

海底画像を利用した水産資源量の自動推定

公立はこだて未来大学大学院  
システム情報科学研究科

榎本 洸一郎

2013年12月16日

**Doctoral Thesis**

**Image-based Seabed Monitoring for Fishery Resource Estimation**

by

Koichiro Enomoto

Graduate School of System Information Science  
Future University Hakodate  
December 16, 2013

**Abstract**– Recently, investigation methods have been developed to measure fishes using still images or video from an underwater camera. However, these methods do not use automatic measurements from an underwater camera. My research aim was to develop an automatic counting system for fishery investigation using underwater image.

The results of fishery investigations are used to estimate the catch size, times fish are caught, and future stocks in the fish culture industry. In Tokoro, Japan, scallop farms are located on gravel and sand seabed. Seabed images are necessary to visually estimate the number of scallops of a particular farm. However, there is no automatic technology for measuring resources quantities and so the current investigation technique is the manual measurement by experts. Automatic methods must be developed to measure fishes or shells more quickly and investigate fisheries more accurately.

In this paper, I propose an automatic counting system to investigate scallop using seabed image and seabed video. The scallop habitat is gravel and sand seabed. In gravel field, the scallop features are fluted patterns, colored shells, and fan-like shapes. However, in the sand field, we can see only the shelly rim because the scallop is covered with sand and opens and closes its shell while it is alive and breathing. Therefore, I propose a method to detect the scallop for each fields. Additionally, I develop the software to count scallop using seabed video and show an example of application such as fishery map or panorama image.

On the basis of these discussions, I describe the proposed system's effectiveness.

**Keywords:** Scallop, Seabed image, Fishery resource investigation, Underwater technology, Image processing

**概要:** デジタルカメラやDVカメラなどの普及により、様々な分野でデジタル画像の応用が試みられている。水産業においては、水産資源の生態や水産資源量調査などの観測手法としての期待がされている。従来の手法では、ダイバーや漁具による標本採集によって得られた離散的なサンプルデータを用いて対象の状態を把握していた。しかし静止画像は対象資源を採集することなくデータ取得が可能であり、動画は連続的なデータであるため、従来までの調査手法と比較して広域化・高精度化が期待できる。一方で、水産業で対象となる環境は陸上ではなく海中であるため、画像データの取得や画像処理による計測には多くの問題があり、計測技術の確立が求められている。本研究では、海底画像を利用した水産資源量調査のための自動計測システムの開発を通して、水産資源量の自動推定および海中における観測技術の確立を目指すものである。

本研究では、表在性底生生物であるホタテガイに注目し、北海道のホタテガイ地撒き養殖で行われている水産資源量調査のための海底画像を用いた自動計測システムを提案する。北海道常呂のホタテガイの地撒き養殖では、個体数・発育状況を把握するために海底画像群の解析により資源量調査を行っている。2007年に行われた資源量調査では、漁獲面積約62.5km<sup>2</sup>中、625m<sup>2</sup>の画像を取得している。しかし、これらの画像を用いた自動計測技術が確立されておらず、画像中の対象資源を専門家が目視にて計測しているため、計測時間が長期化し、調査の広域化への大きな妨げとなっている。この問題に対して、海底画像から画像処理を用いたホタテガイの自動計測技術を確立することで解決を試みる。

海底画像で直接観測が可能なものは、海底の基質、ケガニやヒラメなどの海底に生息している甲殻類や魚類の一部、ホタテガイやヒトデなどの表在性、サンゴやコンブなどの付着性底生生物である。このうち海底画像から直接観測可能なものは主に表在性底生生物やコンブなどの付着性底生生物である。対象となるホタテガイは、礫場環境では石や砂などの上に存在しているが、砂場環境では殻の上に砂を被せ、身を隠しているため、海底環境によって海底画像における視覚的特徴が大きく異なる。このため本提案システムでは、海底画像から底質を判別し、礫場環境と砂場環境に適したホタテガイ検出手法により計測する。本手法は、ホタテガイの生物学的特徴に基づき、ホタテガイに特化した特徴量を用いることで検出するものである。礫場環境下におけるホタテガイ検出手法ではホタテガイの殻の形状や色彩、肋と呼ばれる放射状の模様注目し、形状特徴、色彩特徴、肋模様特徴を定義しホタテガイ領域を検出する。一方で砂場環境下のホタテガイは、礫場環境で見られるホタテガイ殻上の色彩特徴や肋模様特徴は砂に覆われているため確認することができない。このため砂に覆われていない殻縁部に注目し、形状特徴、殻縁特徴、殻特徴を定義し、ホタテガイ領域を検出する。提案した礫場環境と砂場環境のためのホタテガイ検出手法を、実際の資源量調査で用いられている海底画像に対して適応し、評価実験を行った。この結果、一定の条件下において礫場環境では検出率95%、砂場環境では91.4%と資源量調査への応用へ十分な精度を示した。これらの結果に基づき、他の底生生物の計測技術への応用についての知見を示した。

水産資源量調査では、海底画像と比較して広域の画像データが取得可能である海底動画への応用も求められている。このため本研究では、海底動画を用いたホタテガイ資源量調査のための自動計測システムも提案する。提案システムには、海底動画は海底画像と比較するとデータ量が多いため、自動計測とデータ指定、計測結果の解析などを、専門家や水産業従事者などのユーザーが操作するためのアプリケーションも含まれる。海底動画の応用例として、砂場環境下で撮影された海底動画に対して、砂場環境下のためのホタテガイ検出手法を用いた評価実験を行った。また海底動画を用いた自動計測のアプリケーションを開発し、計測結果と海底動画とともに記録されているGPSログの位置情報を統合したホタテガイ資源量マップや海底のパノラマ画像など紹介し、更なる海底動画の応用を検討した。

これらの結果から、提案システムの有効性と今後の展望を検討し、海底画像を用いた資源量調査の手法の確立を目指す。

**キーワード:** ホタテガイ、海底画像、水産資源量調査、海中工学、画像処理

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>7</b>
1.1	背景	7
1.2	対象とする領域	7
1.3	研究目標	9
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>11</b>
2.1	水産業と水産資源量調査	11
2.1.1	水産業と水産資源	11
2.1.2	水産資源と資源量調査	12
2.1.3	画像を用いた資源量調査と現状	13
2.1.4	ホタテガイ地撒き養殖と問題点	13
2.2	画像処理	16
2.2.1	海中における画像工学の試み	16
2.2.2	色彩情報	17
2.2.3	形状情報	18
2.2.4	テクスチャ特徴	18
2.2.5	複数特徴量の統合	19
<b>第3章</b>	<b>システム設計</b>	<b>21</b>
3.1	対象の水産資源	21
3.2	海底画像	23
3.2.1	撮影環境	23
3.2.2	海底画像	25
3.3	海底動画	29
3.3.1	撮影環境	29
3.3.2	海底動画	30
3.4	設計	32
3.4.1	提案手法	32
3.4.2	提案システムによる資源量調査精度向上の可能性	34
3.4.3	要件	35
3.4.4	資源量推定の観点からの評価法	35
<b>第4章</b>	<b>礫場環境のためのホタテガイ検出手法</b>	<b>37</b>
4.1	提案手法	37
4.1.1	礫場環境とホタテガイ	37



4.1.2	提案手法	39
4.2	前処理	40
4.2.1	認識可能領域の抽出	40
4.3	ホタテガイ検出手法	42
4.3.1	形状特徴	42
4.3.2	色彩特徴	45
4.3.3	肋模様特徴	50
4.3.4	ホタテガイ検出	53
4.4	実験と結果	54
4.4.1	実験方法	54
4.4.2	実験結果	55
4.5	考察	58
<b>第5章</b>	<b>砂場環境のためのホタテガイ検出手法</b>	<b>61</b>
5.1	提案手法	61
5.1.1	砂場環境とホタテガイ	61
5.1.2	提案手法	63
5.2	前処理	65
5.2.1	平滑化	65
5.2.2	フレーム除去	67
5.2.3	認識可能領域の抽出	69
5.3	ホタテガイ検出手法	70
5.3.1	殻縁候補画素	70
5.3.2	形状特徴	75
5.3.3	ホタテガイ検出	76
5.4	実験と結果1	78
5.4.1	予備実験	79
5.4.2	実験	82
5.5	実験と結果2	84
5.5.1	実験方法	84
5.5.2	実験結果	84
5.6	海底動画によるホタテガイ自動計測システムに向けて	86
5.6.1	アプリケーション	86
5.6.2	資源量マップ	87
5.6.3	海底動画のモザイクキング	89
5.7	考察	91
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>94</b>
6.1	まとめ	94
6.2	今後の展望	95
	<b>参考文献</b>	<b>97</b>



# 第1章 序論

## 1.1 背景

水産業では、水産資源管理のための調査方法として水中や海底を撮影した画像や動画の活用に注目が集まっている。画像を利用する資源量調査は対象資源に影響を与えずに調査を行うことができ、魚群探知機などの音響調査では観測が困難な貝などの底生生物を調査することが可能である。また、ダイバーによる標本採集調査と比較して多くの調査点からデータを取得することができる。しかし、水産業における画像利用は、医療分野や農産業と比較すると、水中や海中などの非整備環境下であるため大きく遅れている。水産業の現場における画像を用いた資源量調査は、撮影方法や計測技術が未確立であるため、一部の機関で活用されるに限られており [1]、専門家による観察に止まっているものも多い [2-4]。このため膨大な画像データを活用するための計測技術確立が求められている。

このため海中工学 (underwater technology) や画像工学においては、海底画像の撮影および自動計測技術の確立を目的とし様々な試みがなされている [5-10] [業績 1,10,12,22,38,54,57]。Dawkins らは、*HabCamII* と呼ばれる海底モニタリングのための装置によって得られた海底動画からホタテガイの検出手法として、HoG や SIFT 特徴量などの様々な特徴量を Real AdaBoost によって学習し、検出する手法を提案している [9,10]。萩沢らはコンブ資源量調査を対象とし、海底動画からスガモやアイヌワカメなどの藻類に対してそれぞれに特化した特徴量を設計し、AdaBoost を用いた識別手法を提案した [業績 38,54]。また、水産資源量調査への応用例として、海底動画の解析によって得られた結果と GPS ログを統合したコンブ資源量マップを示している。

海底画像を利用して水産資源量調査を行うためには、対象生物と海底環境を考慮した画像取得、対象生物のための自動計測技術、計測結果の集計をすべて考慮する必要がある。本研究では、海底画像を利用した水産資源量の自動計測システムの開発を目的とし、表在性底生生物であるホタテガイを対象とし、水産資源量調査のための海底画像を用いた自動計測システムを提案する。この中で特に海底画像からのホタテガイ検出手法と有用性を示すことで、他の表在性底生生物への応用のための知見を提示する。また海底動画への応用例と水産現場へ導入するためのアプリケーションを提示することで、提案システムの有用性を示す。

## 1.2 対象とする領域

本研究において海底画像とは、ソナーによって得られる海底音響画像ではなく、一般的な可視波長のカメラで海底を撮影した画像を指す。海底画像中に含まれるものは、海底の表面やケガニやヒラメなどの海底に生息している甲殻類や魚類の一部、ホタテガイなどの

貝やヒトデ、サンゴやコンブなどの藻類などの底生生物である。底生生物とは海底の基質に生息する生物の総称であり、海底の表面に生息しているものを表在性、基質の上に自ら穴を掘って潜るものを潜行性、基質粒子のすき間を利用するものを間隙性、硬い基質に穴を開けて潜るものを穿孔性と呼ぶ。このうち海底画像から直接観測可能なものは主に表在性底生生物である。表在性以外の底生生物は、例えば潜行性の場合、海底の砂に開いた穴から間接的に観測する必要がある。このため本研究では特に海底画像から直接観測可能な表在性の底生生物を対象として議論する。

本研究で提案する水産資源量調査のための自動計測システムの概要を図 1.1 に示す。従来の資源量調査では大まかに、

- サンプルや画像などのデータ取得
- 計測
- 解析

に分けることができる。データの取得は 1.1 節で述べたように、ホタテガイ養殖のための水産資源量調査のようにデータを大量・容易に取得することが可能になりつつある。データ取得が簡易化・効率化していく一方で、人による計測では膨大なデータをすべて活用することは困難である。一方で非整備環境下における画像処理および自動計測の技術は十分ではなく、その技術確立が求められている。

本研究では、北海道のホタテガイ養殖に注目し、海底画像を利用した水産資源量調査のためのホタテガイ自動計測システムの開発を目指し、特に計測にあたる海底画像からのホタテガイ検出手法を対象とする。本システムは海底画像の取得、画像を利用した自動計測、解析の 3 つのプロセスに分けることができる。海底画像の取得は、人間の目視による水産資源量調査のために撮影された画像を用いることとする。自動計測については、海底画像からのホタテガイ検出手法の提案を通して、他の表在性底生生物への応用可能性について述べる。また海底動画を利用したホタテガイ計測システムを提案し、計測部と解析部を含むアプリケーションや応用例などについても述べる。

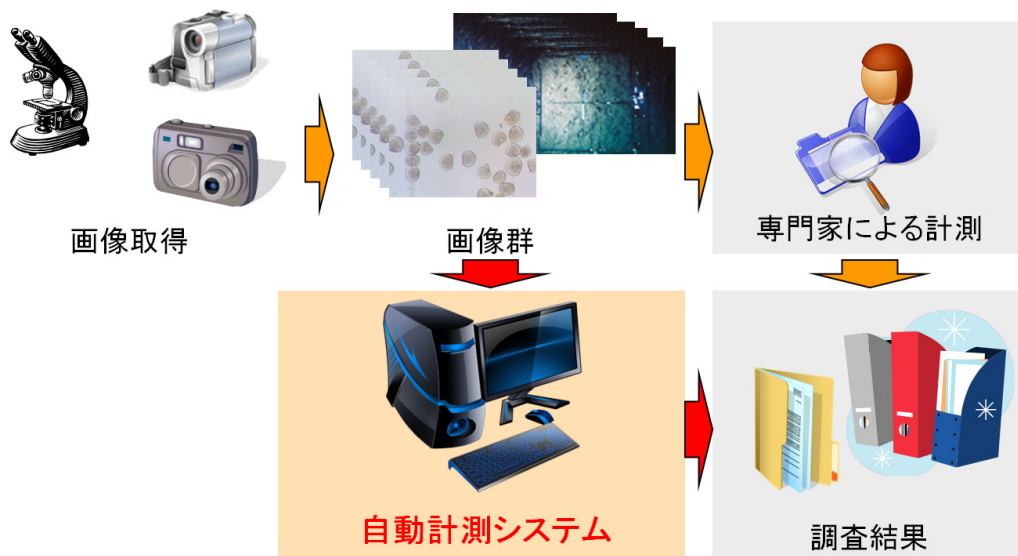


図 1.1: 水産資源量調査のための自動計測システムの提案。  
Proposed system for fishery investigation.

### 1.3 研究目標

本研究の目標は、画像処理を用いた水産資源量調査のための自動計測システムの開発とともに、非整備環境下における画像認識技術の確立、水産分野における新たな計測技術の確立である。システム情報科学において本研究は、対象となる生物に対して画像工学を用いたアプローチにより水産分野や生物学に対して新たな観測手法や、画像以外の情報と統合することで新たなデータを提示することを目指すものである。

対象となる海底画像は海中で撮影されたものであり、底質によって異なる複雑な背景、海中の濁り、海中や対象物による撮影条件の制限などの問題が含まれている。このため屋内や街などの人工物に囲まれた屋外などの整備環境下における画像認識の問題や前提条件とは異なる。本研究では、提案システムの開発を通して、非整備環境下特有の問題や前提条件を明らかにするとともに、画像認識の分野に対して新たな問題を提示することができる。このためには海底画像から得られる視覚的な情報の他にも、対象となるホタテガイの生物学的な特性、ホタテガイ養殖の仕組み、海域や底質などの情報を考慮する必要がある。本研究では、対象物体と海底環境を考慮し、海底環境ごとに対象物体に特化した特徴量を提案し、検出する。また本研究で提案される特徴量は、他の特徴量と機械学習などを用いて統合することにより更なる精度向上が見込めるものであり、それぞれの海底環境における有効な特徴量を示すものである。

水産分野において提案システムは、音響探査などの技術では観測できなかったものを観測可能とする計測技術であり、新たな知見が期待される。水産業においては天候や気温、潮流などを基に漁業者の経験的な知識や勘により、対象資源の密度や生育状況などを把握されてきた。このうち水中カメラやDVカメラなどによって水産資源の状況を把握しようとする動向は、資源管理と共にこのような経験的な知識をより高度にするためのアプロー

チの一つであると考えますが観察の域を出ていない。本研究は、視覚的な情報と知識的な情報を統合するものであり、経験的な知識を裏付けるものとなる。

本研究では、画像処理を用いた水産資源量調査のためのホタテガイ自動計測システムとホタテガイ検出手法を提案し、海底画像と海底動画を用いた実験を通してその有効性を示す。本研究は水産資源量調査を対象としているため、リアルタイム処理は要求されず、精度が重要となる。しかし、対象の海底画像は、海底を撮影した非整備環境下の画像であり、人による計測を想定して撮影されたものである。撮影環境には照明や解像度などの問題点があるため、画像処理をする際に大きな障害となる。また対象となるホタテガイは海底環境により視覚的特徴が大きく異なり、背景も複雑である。これらの問題を考慮したシステムを提案する。また海底動画を例として、水産現場への導入のためのアプリケーションや応用例についても述べる。

## 第2章 関連研究

本章では、資源量調査のための自動計測システムを提案するにあたり、水産業と水産資源量調査の現状、海中工学や画像工学などの実環境下における研究の動向や問題点について述べる。

### 2.1 水産業と水産資源量調査

水産業では技術の発達によって漁業効率の向上する一方で、過剰漁獲による水産資源の生産力低下が問題となっている。水産資源を持続的に活用するために世界各地で適切な資源量管理が求められている。本節では水産業や水産資源、資源量調査についてホタテガイ養殖を例とし、その現状と問題点について述べる。

#### 2.1.1 水産業と水産資源

人類は、古くから水産資源を食料源として活用してきた。水産資源は生態系の一部であり、環境の変化などにより、自律的に増殖する。このため、生産力が失われないように維持することができれば、継続して活用することができる。一方で、資源が乱獲状態になると、その変化に耐えられなくなり、生産力が低下すると共に、回復も困難となる。近年、世界の水産資源は、乱獲や環境破壊による生物生産力が低下が深刻な問題となり、適切な資源管理が求められている。国際連合食糧農業機関 (*Food and Agriculture Organization, FAO*) によると、分析・評価している漁業品種のうち、約 52% は資源が持続可能な最大限度の生産レベルか、ほぼそれに近い量が活用されているが、32% は過剰に利用されていることが報告されている [11]。水産資源を持続して活用するためには、資源量や状態をモニタリングし、適切な管理を行うことが必要である [12]。

水産資源の管理について、様々な手法が提案されてきた [13–15]。近年、水産資源量の不確実性に頑健な順応的管理が注目されている [15]。この手法では、資源管理を順応的学習とフィードバック制御の二つに分けて考える。順応的学習は漁業を実験ととらえ、実際の漁獲量を資源に関する情報とする。漁獲をやめることは、それ以降の情報が得られないことを意味する。フィードバック制御は、現存の資源量が目標の資源量より多ければ、漁獲量を減らし少なければ増やすことにより現存資源量と目標資源量の差を小さくし、漁獲量を調節する。この二つに従い意思決定を行うことにより、不確実性に対する頑健性をもつことができる。現在、意思決定の方法論が様々あり、議論がなされている [13]。日本では 1996 年の国連海洋法条約施行により TAC (漁獲可能量) を定めて、水産資源の保存・管理措置をとることが義務づけられた [12]。これにより資源量が少ないものなどは漁獲量が制限されるため、漁獲量が必ずしも資源状態を反映しなくなっている。このため実

際の漁獲量から意思決定を行う順応的管理の順応的学習が成立しなくなる。この問題に対して、新たな資源量調査手法の確立と精度向上が求められている。

### 2.1.2 水産資源と資源量調査

水産資源量調査は、間接的手法と直接的手法に分けることができる。間接的手法とは、対象資源をサンプルとして採集・計測し、漁獲量を指標とし調査する方法である。一方で直接的手法は、間接的手法とは異なり、音響調査や画像などにより対象資源を直接計測する手法である。資源量調査では、その目的や対象資源に適した手法により行う必要がある。

間接的手法には、海中を遊泳する魚類では漁業の中での漁獲量や漁具による採集、藻類や貝類などの底生生物などではダイバーによる標本採集などがある。しかし、対象資源の状態を把握するために漁獲することは、対象資源に対して影響を与えるとともに、TACにより漁獲量が資源状態を推定するための指標ではなくなっている。また漁獲する際の漁獲効率は100%ではない[4]ため、計測データの精度も十分ではない。ダイバーによる調査では、調査範囲が非常に狭く、調査範囲を広域化することができない。

直接的手法には音響調査や画像を用いる調査などがある。直接的手法は対象の資源を漁獲することなく調査を行えるためTACに因らず、より信頼度の高い情報を得ることができることから注目されている。

音響調査は、資源量の直接推定法として期待が高まっている[16–18]。水中での音波は光や電磁波に比べて減衰が少なく伝播速度も速いため、広域、効率が求められる資源量調査に有効である。通常の魚群探知機では、対象である水産資源の存在を見つけるだけであるが、水産資源量調査では、位置、魚種、体長、魚数、密度などを定量的に計測する必要がある。これに伴う技術は着実に進歩している。納谷らは、漁業効率の向上を目的としてサイドスキャンソナーを用いて中層トロールのサンマに対する採集効率の推定手法を提案している[19]。現在、様々な問題を抱えているが着実に成果を重ねており、水産資源量調査への応用に期待したい。

静止画像や動画画像を用いた調査は、音響調査では計測できない海底に生息する底生生物の計測も可能である。音響調査は物体から反射された音波によって計測するため、物体の有無はわかるが、その物体を特定することは困難である場合がある。一方で静止画像や動画画像を用いた場合、海中を視覚的に観測することができるため、生物種の特定するための情報が多く含まれる。静止画像や動画画像を用いた調査は音響調査と比較すると、撮影範囲は狭いが空間分解能が高く、対象資源以外の生物や環境などの情報も含まれている。また海中を視覚的に観測することができるため、漁業者などの専門家が観るだけで直感的に把握することが可能である。静止画像や動画画像には対象資源の他に、対象資源と共生する水産資源や雑草、生物などの環境、画像中の背景にあたる海底の底質などの環境も含まれるため、専門家の経験的および専門的知識を裏付ける指標なると共に、その逆によって新たな発見が期待できる。



### 2.1.3 画像を用いた資源量調査と現状

デジタルカメラやDVカメラの普及、低価格化により静止画像や動画像を利用して資源量調査を行う試みが盛んである [2-4]。一方で、安定した撮影方法が確立されているものが少なく自動計測技術も確立されていないことから、効率化・広域化への大きな妨げとなっている。

高橋らは、深海用ビデオカメラからのベニズワイの甲幅推定手法を提案している [2]。これはDVカメラから動画中の対象資源の甲幅を推定する手法であり、対象資源の成育状況を把握する上で重要なものである。本田らは、水中ビデオカメラを用いて表中層トロール網によるエチゼンクラゲの採集効率などを調査している [3]。Bassettらは、水中ビデオカメラを用いて夜行性魚種の調査をしている [8]。しかし、これらの研究はビデオカメラ映像を専門家が目視にて計測している。

近年では、特定の水産資源を対象として画像から画像処理を用いた自動検出手法が提案されている。水島らは、北海道沖合の海底で撮影されたDVカメラの映像からケガニを自動的に検出する手法を提案している [業績 57]。Aguzziらは、水中動画からロブスターの検出手法を提案している [7]。これらの水中画像を用いた計測手法は、今後さらに発展していくと期待できる。

### 2.1.4 ホタテガイ地撒き養殖と問題点

農林水産省漁業センサス 2008 年調査によると日本の漁業のうち北海道が占める割合は、海面漁業・養殖業生産量が 147 万トン (27%)、生産額が 2958 億円 (19%) で 1 位である [20]。2011 年における北海道の魚種別の生産量のうちホタテガイは、漁業生産量 38.6 万トン、全体の 30.9% を占めて 1 位、生産額は 23.2% (約 638 億円) で 1 位と、北海道の漁業において主要な水産資源である [21]。一方で 2003 年以降、ホタテガイの 1kg 当たりの価格変動が大きいと、より安定して永続的に活用できるような資源管理が求められている。

たびたびホタテガイ地撒き養殖において貝柱歩留りが問題となっている [22]。これは、ホタテガイ貝柱が十分な大きさにまで成長せず小型化している、ということである。市場においてホタテガイの単価は貝柱の大きさによって決まるため、貝柱歩留りはホタテガイの単価に直接関係する。この問題のひとつの要因として、ホタテガイは個体密度数による成育への悪影響が考えられている。現在、対象海域に対して中間育成された稚貝は均一に撒かれている。ただし、ホタテガイが成長するにつれ、対象海域には潮の流れや礫場や荒砂場、バラス場、細砂場などの海底環境が要因によって、ホタテガイの密度が疎または密になる場所ができる。しかし、ホタテガイの成長に最適な個体密度は  $1\text{ m}^2$  あたり 3~4 個体が最適だといわれている [23]。このために個体密度が密な場所では、ホタテガイが十分に生育できていないと予想されている。しかし、貝柱歩留りの要因の把握するためには、広域な漁場におけるホタテガイの分布を把握する必要がある。

北海道のオホーツク海側などではホタテガイ養殖の方式として、種苗放流輪採制を採用している [22]。種苗放流輪採制は、対象海域を 4 つに分割し、4 年を 1 サイクルとして 1 輪採区内ごとに操業する。また、付着稚貝を採苗し、ある程度の大きさになるまで成長させて再び対象海域に撒く中間育成も行われる [25]。ホタテガイの成長過程と養殖業での

工程を図 2.1 に示す。ホタテガイ養殖において、資源量調査はホタテガイ幼生を採苗するための浮遊幼生調査と三年貝の個体数調査がある。浮遊幼生調査は、ホタテガイ稚貝を採苗する重要な時期を予測するものであり、毎年各関係機関が浮遊幼生の採苗予報を公開する [26]。近年、ホタテガイ浮遊幼生のみを蛍光染色する技術が確立され、蛍光顕微鏡の画像を用いた計数が可能となっている [27,28]。しかし自動計測技術は確立されておらず、専門家が計数する方法が用いられている。このため筆者らは蛍光顕微鏡画像を用いた自動計測システムを提案している [業績 47,58]。

個体数調査は、最終的な漁獲量を推定するために行われるものであり、ホタテガイの生育状態を把握するとともに、操業計画を立てる上で極めて重要である。従来手法では、海底画像や海底動画を用いて行われているが専門家が目視にて計測している。北海道常呂では、ホタテガイ地撒き養殖における資源量推定のために海底画像を用いた資源量調査を行っている [1]。2013 年の常呂海域で行われた調査では、対象漁場の面積は  $62.5 \text{ km}^2$ 、1 輪採区内を 125 小区画（標準小区画面積  $0.5 \text{ km}^2$ ）に分ける。このとき写真は 1 小区画ごとに 5 枚撮影され、撮影面積は  $625 \text{ m}^2$ （625 枚）であり、撮影期間は約 2 日であった。また画像からの目視による計数期間は約 10 日であるが、殻長などの計測は含まれていない。解析には層別抽出法を用いて推定し、期間は約 1 日である。また、殻長などの計測により成長度合いを解析するには、更なる計測期間がかかることとなる。このため、得られた画像の計測に時間がかかることから、調査の広域化への大きな妨げとなっている。また、海底画像を用いた資源量調査結果と推定されていた漁獲量に大きな差が生じることもあるため、精度向上の必要性が高まっている。

底生生物の資源量調査において、ダイバーや海底画像によるサンプル取得の流れを図 2.2 に、海底動画によるデータ取得の流れを図 2.3 に示す。図 2.2 より、海底画像による調査は、対象海域からランダムにデータを取得しサンプリングする標本調査である [1]。一方で、図 2.3 に示すように海底動画は、海底画像のような離散的なデータではなく連続的なデータであり、従来の資源量推定と比較して広域化・高精度化が期待される。しかし、従来手法では海底画像による調査においてもデータ量が膨大となり、人手では計測に時間がかかるため効率化が求められている。このため、海底画像や海底動画のための自動計測技術の確立が求められている。

海底画像を用いた資源量調査の自動化にあたっては、

- 撮影環境は照度差が大きく且つ砂、泥等、多様な背景を有する高ノイズ環境
- 対象の計数に加え、体長や状態（生死など）などに関する視覚的推定の必要性
- 撮影環境による対象資源の生態的および視覚的特徴の変化
- 対象資源の生態的特徴による画像取得方法の制限

など課題が多い。このため、従来手法では人手に頼るのが現状であり、システムの開発が求められている。

ここまで、ホタテガイ養殖業における資源量調査は、操業計画と問題の把握のために極めて重要であることを述べてきた。海底画像を用いた資源量調査は、効率的な漁業および対象資源の生態の把握に有効な手法であるが、従来手法では資源量自動計測技術がないた

めに十分に活用できていない。このため本研究による成果は、従来手法では困難であった大規模なサンプルデータを元に高精度な資源モニタリング法の確立に繋がると考える。

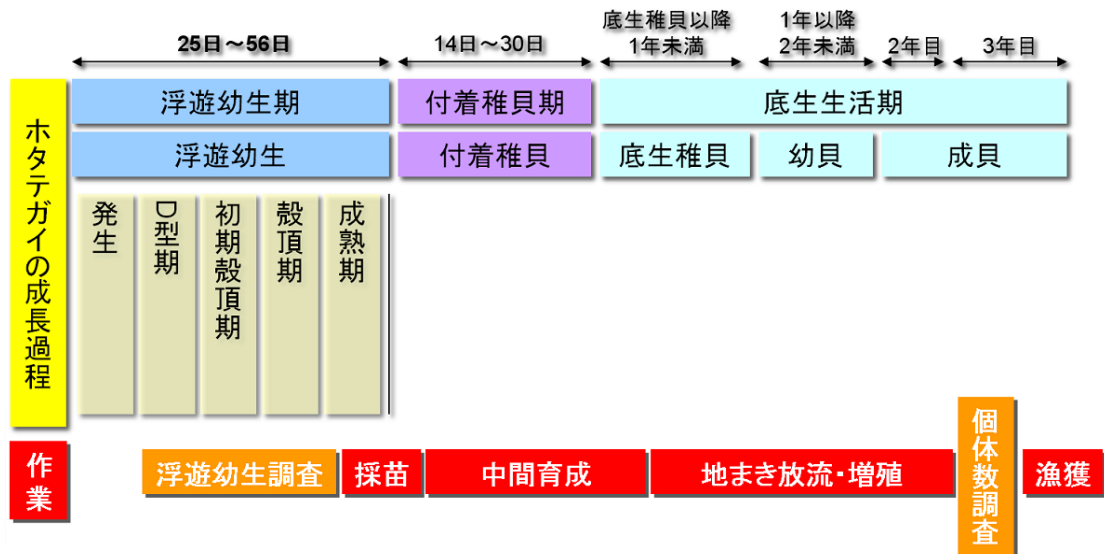


図 2.1: ホタテガイの成長過程と養殖業での工程。  
Growth process of the scallop and the process of culture fishery.

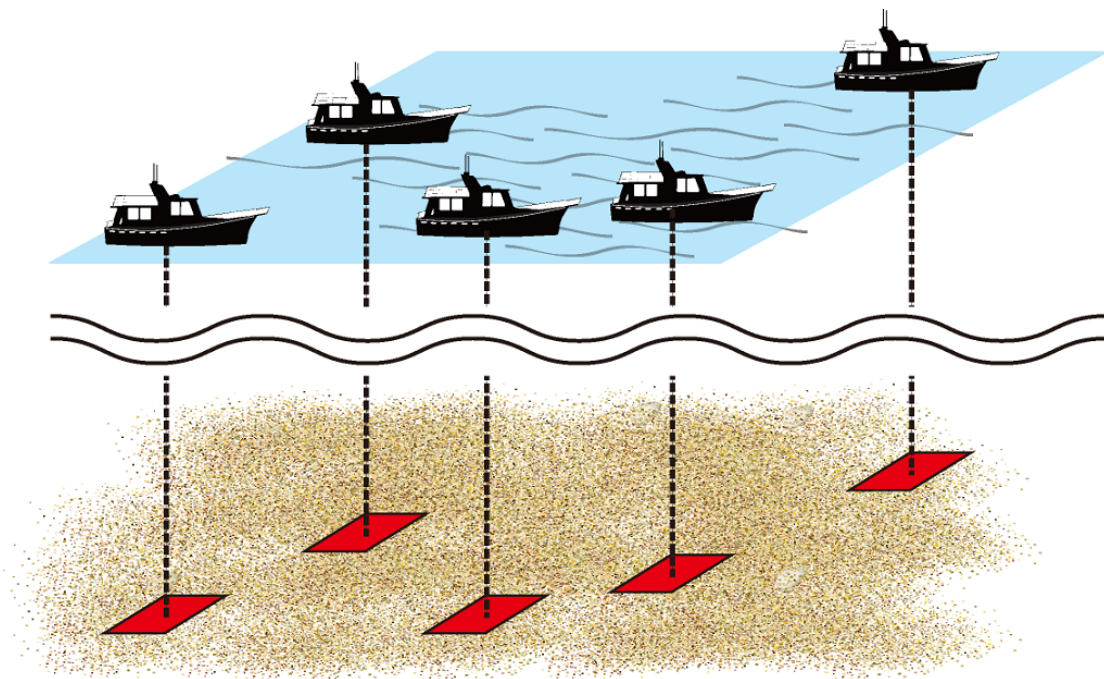


図 2.2: 海底画像による離散的なデータ取得の様子。  
Illustration of discrete sample data using the seabed images.

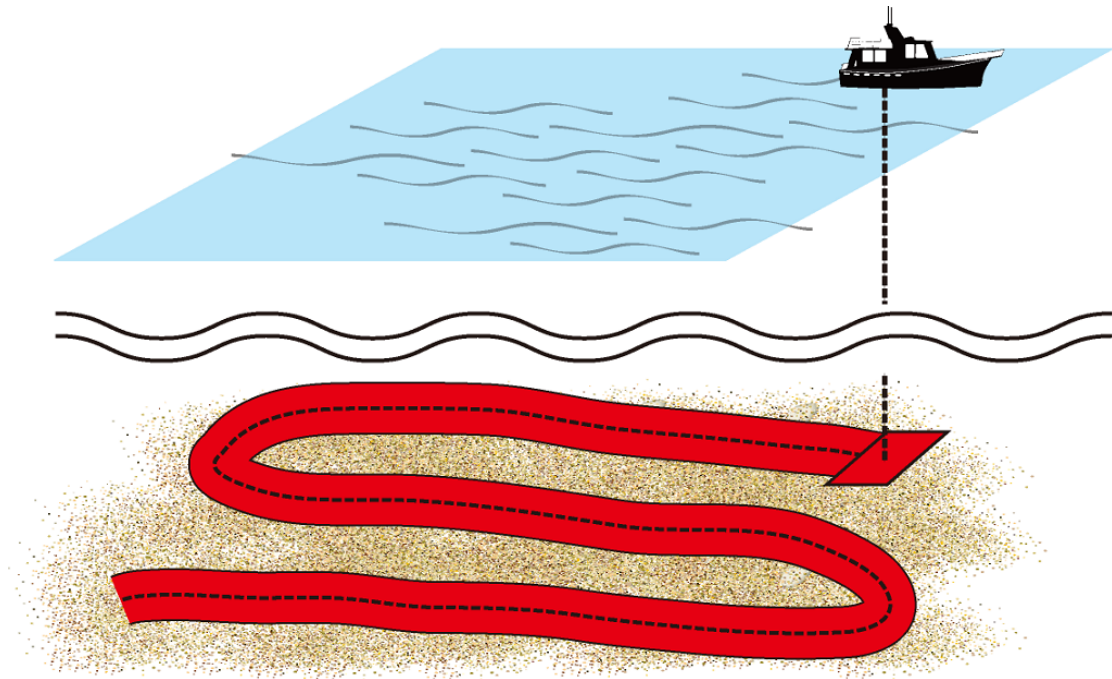


図 2.3: 海底動画による連続的なデータ取得の様子。  
Illustration of non-discrete sample data using the seabed videos.

## 2.2 画像処理

### 2.2.1 海中における画像工学の試み

画像工学の分野では、ソナーによって得られる海底音響画像を対象とするものと、海中の静止画像や動画を対象とし、非整備環境下のための基礎研究や底生生物などを対象とした画像認識の研究がなされている。

海底音響画像は、海底画像と比較すると空間解像度は低いが広域のデータ取得が可能であり、海底の底質判別に利用されている [29–31]。Preston らは、多波長音響画像から画像の平均値や標準偏差などの統計量やパワースペクトル、同時生起行列などのテクスチャ特徴量などを用いて k-means 法を用いた底質判別手法を提案している [29]。また Laanaya らは、サイドスキャンソナー (SSS) によって得られた画像から、テクスチャ特徴を用いて SVM (Support Vector Machine) により底質判別する手法を提案している [31]。

画像工学の分野において一般的に研究されている画像データは陸上で撮影されたものであり、被写体とカメラの間の媒体は空気であるのに対して、海底画像は海中で撮影されたものであり、媒体は海水である。海中環境では砂などによる濁りにより、撮影の際の光源が散乱することがある。このように画像データに光散乱が含まれる場合、データの精度が劣化している状態である。この問題に対して Treibits らは、二つの異なる光源方向から得られた画像を用いて、散乱光の除去手法を提案し、その有効性を示している [32]。散乱光が含まれる画像を補正することは、画像データの質を向上させるものであり、後の画像処理においても有効である。また海中環境の濁りが画像処理によって補正可能であるならば、

海中での画像データ取得可能な条件が緩和されるため、実応用に対しても重要な研究であり、更なる発展が期待される。

海中環境で撮影された静止画像や動画画像からの底生生物の認識についてはいくつか研究されている。底生生物のうちサンゴは盛んに研究されている [33–35]。Mehta らは SVM を用いて、水中動画中のサンゴ領域のピクセル値自体を特徴量とし学習させ、識別する手法を提案している [33]。また、Gleason らは多波長の水中ビデオカメラ映像から、同時生起行列から得られる統計量を用いてサンゴ類や藻類の識別手法を提案している [34]。これらの手法は、サンゴ類の持つ色彩に注目し検出を試みている。また、他の底生生物に関する研究として Gesu らは、砂場環境の海底動画からヒトデ（種不明）の検出手法を提案している。対象であるヒトデは 5 本の腕をもつ表在性底生生物であり、海底動画中では体全体が白色である。これに対してヒトデの形状特徴を定義し、検出することでその有効性を示している。Aguzzi らは水中動画からロブスターを SIFT 特徴量を用いて機械学習による識別を提案している [7]。

海中における画像認識だけでなく、静止画像や動画画像の撮影や計測、解析を含めたシステムの開発も行われている。萩沢らは、北海道根室近郊のコンブ漁業のための DV カメラを用いたコンブ資源量推定システムの開発を行っている [業績 38,54]。従来のコンブ資源量調査は、ダイバーによる標本採取により調査が行われていたが、対象海域は広域であり、海中環境によって大きく左右されるコンブ資源量を正確に推定することは困難である。このため、海底を DV カメラで撮影し GPS データと統合することで、調査対象海域のコンブおよび雑草類などの資源量推定マップの作成を目的とし、様々な提案がなされている [業績 54]。Dawkins らは、*Habitat Mapping Camera System (HabCam) II* で撮影された映像からホタテガイを検出する手法を提案している [9,10]。

これらの研究は、サンゴの保全や水産資源の管理が求められている社会的ニーズや、海洋水産学や生物学などのための観測技術として発展することが期待される。

## 2.2.2 色彩情報

色彩情報は、海底音響画像では取得できないものであり、カラー画像のもつ特徴の一つである。海底環境における物体認識においては、重要な特徴量の一つである。

底生生物のうちサンゴは種によって色彩や形状が異なるため、識別のための重要な指標となる。Bernhardt らは水中画像からのサンゴ識別のために、カラーセグメンテーション手法を提案している [35]。また海底画像においてサンゴは何種も含まれることが多く、その領域を認識するためには、より詳細なカラー情報が必要となる場合がある。このうち Gleason らは、サンゴ類や藻類の識別のために、多波長の水中ビデオカメラを用いてカラー情報を取得し、活用している [34]。

サンゴ以外の底生生物において萩沢らは、北海道根室近郊のコンブ漁業のための DV カメラを用いたコンブ資源量推定システムの開発を目的とし、海底動画からコンブやそれ以外の商業的価値のないアイヌワカメやスガモなどの藻類の識別のための特徴量として色彩情報を用いている [業績 38,54]。

海底画像における画像認識において、撮影環境の底質によって対象の色彩情報が非常に有効な場合がある。水島らは、砂場環境下における海底動画からのケガニ領域抽出手法と

して、対象の赤色な身体に注目し活用している [業績 57]。ケガニは主に水深 30~200 m の砂泥場に生息しており、調査は主に水深 80~120 m であったことから、対象以外に類似した色彩をもつモノはほぼいない。このため、撮影環境と対象物体の特性を考慮することで非常に有効な情報の一つとなる。

### 2.2.3 形状情報

形状情報は、画像認識において非常に有効な情報である。画像認識において形状情報は、特定の撮影環境や対象物体の特性を考慮し、対象となる物体の形状を一つの特化したモデル化するものと、SIFT 特徴や HoG 特徴などの局所特徴量を機械学習を用いて識別器を構築するものがある。このうち、後者は建物などの屋内環境や人工建造物に囲まれた屋外環境下において、人や車などの認識に用いられている。一方で、海底などの非整備環境下においては、対象物体以外の背景領域が複雑であるため、前者のほうが有効であると考えられる。

例えば、人より上方から撮影された動画像に対して、形状をモデル化し検出している研究がある。辻らは、エレベータ乗場を上方から撮影した動画像から待客数計測のために、人物の頭部形状に注目し Hough 変換を用いた手法を提案している [38]。Zhao らや Sidla らの研究では、人物の方から頭部の形状 ( $\Omega$  形状) を検出することで、人数を計測する手法を提案している [39,40]。また著者らは、顕微鏡画像におけるホタテガイ D 型浮遊幼生の自動識別手法を提案している [業績 47]。これは D 型幼生の蝶番線と呼ばれる直線状の形状に注目し、モデル化することで検出を試みている。これらは特定の撮影環境における対象物体の形状をモデル化し、認識する研究の一例である。

また対象物体の形状が既知である場合、テンプレートを用いたり、幾何学的なものに近似することでモデル化し、認識する手法がある。形状が代数方程式で表現可能なものを検出する手法として、Hough 変換がある [41,42]。Hough 変換は、直線に限らず、円や楕円などの検出に用いることができる。原田らは、人工衛星によって取得された月の数値地形図中のクレーターを、楕円検出 Hough 変換を用いて検出し、その有効性を示している [43]。また Kitamoto らは、衛星画像から台風の認識を目的とし、楕円検出 Hough 変換を用いた検出手法を提案している。Hough 変換はノイズに強く、実画像処理でも対応できる。Hough 変換は計算コストが高いことが指摘されているが、様々な高速化が図られている [37,45,46]。

### 2.2.4 テクスチャ特徴

対象物体のテクスチャを認識するには、それを構成する基本単位や、その繰り返しの度合い・ばらつきなどの特徴を定量化する必要がある。テクスチャの定量化の手法には、対象画像に対して二次元離散フーリエ変換によって得られる空間周波数画像からフーリエ特徴を得るものと、同時生起行列からスカラー特徴量を得るものなどがある。

空間周波数画像は、パターンの頻度やばらつき、方向、強さなどを表しており、様々な特徴量が提案されている。建築の分野では、フーリエ変換によって得られた空間周波数画像を用いて、コンクリートの亀裂 [47,48] や表面の汚れ [49] の評価手法を提案している。コンクリートは一樣な模様が存在するが、亀裂や汚れが生じることにより、テクスチャに



変化が生じる。このため、空間周波数の解析によりテクスチャ特徴量をもとに、その変化の定量化が可能となる。

同時生起行列 (GLCM:Gley Level Co-occurrence Matrix) は、M. Robert らによって提案されたテクスチャ特徴のための手法である [50]。これは対象画像の輝度値に対して、同時生起行列を求め、これから導かれるスカラー特徴量によりテクスチャ特徴を示すものである。古屋らは、同時生起行列から導かれる複数の特徴量を用いて、乳房 X 線写真からの悪性腫瘍影判別手法の提案をしている [51]。また太田らは、高解像度衛星画像を用いてスギ林区分のために同時生起行列から得られるテクスチャ情報を用いて、最適な特徴量を示している [52]。

### 2.2.5 複数特徴量の統合

画像処理において、単一特徴量では他の対象物体との差別化が困難である場合が多い。このため、画像中または画像以外の特徴を複数組み合わせることで、様々な精度向上が試みられている。

Kitamoto らは、人工衛星によって撮影された気象画像と、地上で観測された気象情報などを統合し、過去の台風情報を検索するシステムを提案している [44]。また古屋らは、複数の形状特徴量とテクスチャ特徴量を統合し、特徴量の組み合わせも考慮した乳房 X 線写真からの悪性腫瘍影判別能力の評価を行っている [51]。

水産業の分野において、萩沢らは、水中 DV カメラで撮影された動画画像から色彩特徴と形状特徴を用いてコンブと雑草であるアイヌワカメの識別手法を提案している [業績 38]。また小林らは、対象の水産物であるオキアミを海藻等の異物が混在している画像から形状特徴と色彩特徴を統合し抽出する手法を提案している [5]。複数特徴量を統合することは、さまざまな分野においても応用可能であり、本研究で対象となる非整備環境下の画像に対して有効な手段である。

Dawkins らは、*Habitat Mapping Camera System (HabCam) II* で撮影された映像からホタテガイを検出する手法を提案している [9,10]。提案手法では、一般的な色彩特徴や形状特徴、テクスチャ特徴を Real AdaBoost により学習し、ホタテガイを識別している。実験では検出率約 90% であった。一方で、対象画像中の底質は細砂や粗砂が多く、ホタテガイ上の砂の有無には対応しているが、礫場などの底質については考慮されていない。このため提案手法は、砂場環境において有効である特徴量を用いて AdaBoost が学習するため、礫場などの底質には対応していない。

機械学習を用いることで対象海域に最適な識別器の構築が期待されるが、実際の海底環境は、細砂から粗砂、粗砂からバラスのように底質は変化している。このため、海底環境下の画像認識においては、砂場のように一様な背景から、礫場のように様々な色や大きさ、形状の礫が混在する複雑な背景を考慮する必要がある、それぞれの背景領域に適した対象領域検出のための手法が必要である。また実環境下における対象物体検出のために、一般的な膨大の特徴量を用いて機械学習による識別器を構築する際は、対象物体や対象環境による拘束条件に反する可能性がある。例えば、対象を礫場環境におけるホタテガイとしたとき、ホタテガイは大きな礫により潜ることはなく、呼吸の際に殻を開閉させるために殻上に礫があることもない。このような生物学的な特徴などに基づいた拘束条件がある

対象に対して機械学習を用いた物体検出をする際には、対象物体と対象環境に適した特徴量を機械学習に用いて検出することは有効であると考えられるが、考慮されていない特徴量を用いることは実環境に対して矛盾した手法になる可能性を含む。

本研究は、対象物体と海底環境などを考慮した自動計測手法の確立を目指す。また本研究で提案される計測手法は、それぞれの海底環境において有効な特徴量を示すとともに、機械学習などの複数特徴量を統合した検出手法設計のための知見となる。



## 第3章 システム設計

本章では、対象となる表在性底生生物のホタテガイと北海道常呂で撮影された海底画像、海底動画について説明する。また海底画像や海底動画を用いたホタテガイ自動計測システムを提案する。

### 3.1 対象の水産資源

本研究で対象となる水産資源のホタテガイ (*Patinopecten yessoensis*) は、ウグイスガイ目イタヤガイ科に分類される二枚貝の一種である [53]。ホタテガイを図 3.1 に、二枚貝綱の各部名称を図 3.2 に、砂場環境のホタテガイの様子を図 3.3 に示す。体長 18 cm、貝殻は扇形で、殻の背縁前後に耳状の突起がある。左右の殻は、ふくらみが強い殻が右殻であり、弱い殻は左殻である [54]。浅い海の海底では、右殻を下に左殻に薄く砂を被って生息している (図 3.3)。左右の殻に見られる放射状の線は肋と呼ばれ、両殻とも 20~26 本前後あり、右殻の肋は太くて強いが左殻は細い。通常、右殻は黄白色、左殻は褐色である。東北からオホーツクで、水深 10~30 m の砂底などに生息している。食用として漁獲され、北日本で盛んに養殖されている。

ホタテガイは主に礫場や粗砂場、バラス場、細砂場に生息している [23,24]。普段は海底で貝を開閉させて、呼吸をしている。急激な照度変化に敏感であり、反応すると泳いで逃避行動をとる。対象海域の底質は、生息密度 (個体 /m<sup>2</sup>) が 6 個体前後の上漁場は礫、3~5 個体の中漁場は礫と大砂、2 個体以下の下漁場は細砂が卓越している [23]。このため、資源量調査では礫場と砂場などの環境に対応する必要がある。

ホタテガイは、海底環境によって視覚的特徴が異なる。礫場やバラス場においてホタテガイは、底質の粒度が荒く重いことから潜ることができず、礫の上に存在し殻を確認することができる。一方で砂場などの粒度が細かい底質場では、殻を砂で覆って身を隠している。しかし、ホタテガイは呼吸をする際に殻を開閉するため、その動きにより殻縁 (shelly rim, 図 3.2 の腹縁) の砂が落ち、殻縁部のみ確認することができる。ホタテガイの殻縁は白色であり、個体差はほとんどない。またホタテガイの個体同士は、同様の理由で重なることはない。しかし、露出している殻縁領域の面積は様々である。

本研究において対象の表在性底生生物をホタテガイとすることは、海底画像を利用した計測技術の確立と他の水産資源などへの応用を目指す上で適切であると考えられる。ホタテガイは、生息している水深が水深 10~30 m と比較的浅いことから、砂場やバラス場、礫場などの様々な底質に生息している。様々な海底環境に生息するホタテガイを対象とすることで、それぞれの場に生息する表在性底生生物への応用のための知見が得られることが期待される。また殻の形状の個体差はほぼなく、底質ごとの視覚的特徴はほぼ同じである。例えば海底動画において、コンブやアイヌワカメなどの藻類では常に葉が海中に漂って

いるために、時間経過と共に1つの形状が変化するのに対して、ホタテガイでは安定した視覚的特徴をもつ。このため本研究ではホタテガイを対象とし、提案手法を一般化することで、他の表在性底生生物への応用が期待される。

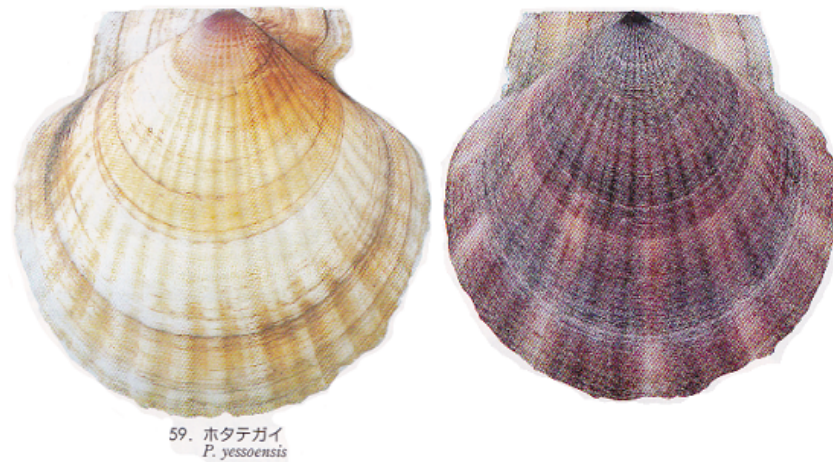


図 3.1: ホタテガイ : (左) 右殻. (右) 左殻. (「日本近海産貝類図鑑」より転載 [53]) .  
Patinopecten yessoensis: Left image is the shell of right and right image is the shell of left.

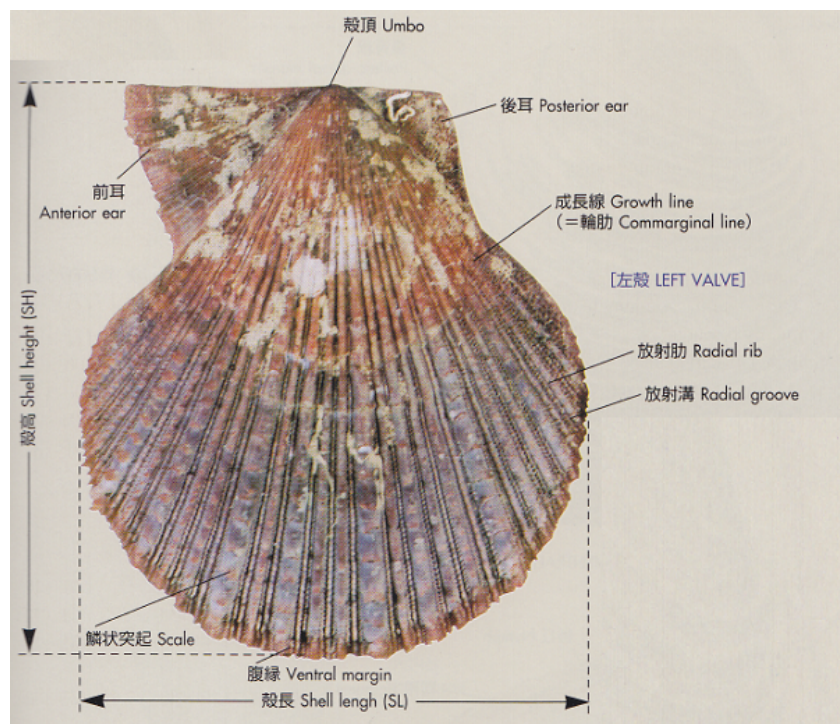


図 3.2: 二枚貝綱の左殻各部名称 (「日本近海産貝類図鑑」より転載 [53]) .  
Name of regions about clam.

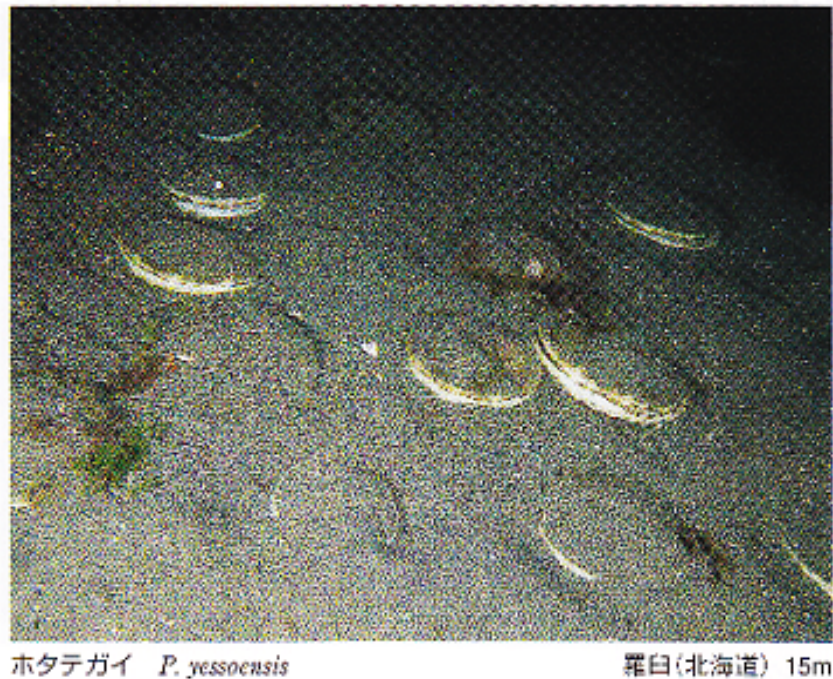


図 3.3: 砂で身を隠すホタテガイ（「日本近海産貝類図鑑」より転載 [53]）.  
Scallop is covered with sand in sand field.

## 3.2 海底画像

### 3.2.1 撮影環境

本研究では、北海道常呂漁業組合の水産資源量調査で用いられている海底画像を対象とする。海底画像の撮影の様子を図 3.4 に、海底画像の撮影環境と撮影手順をそれぞれ図 3.5 と図 3.6 に示す。撮影機材はフレームとその上部に  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  の範囲を撮影できるように設置されたデジタルカメラと撮影用のフラッシュが 1 つ備わっている（図 3.5）。また船上からデジタルカメラの画像を有線接続されたモニタにより確認が可能となっている（図 3.4(b)）。

海底画像の撮影手順は、まず調査船で調査対象となる地点まで移動し、撮影機材を海中に投入する（図 3.4(a)）。つぎに海底に着底するまでゆっくり撮影機材を沈めていく（図 3.6(a)）。そして撮影機材が海底に着底すると、フレーム下部のスイッチによって自動的にフラッシュが点灯し撮影される（図 3.6(b)）。撮影が終わると、撮影機材を引き上げ、次の撮影地点に移動する。これを繰り返すことで対象海域の海底画像を取得し、資源量調査を行っている。

この撮影方法は、ホタテガイの生態的性質に基づいており、対象資源に対して影響のないものである。海底を撮影する際の照明としてフラッシュを一つ用いている。これは照明を点灯させたままの撮影機材が海底に近づくと、ホタテガイが照度変化に反応し逃避行動をとる。このため、撮影機材が海底に着いた瞬間にフラッシュを発光させることで、対象資



源に影響を与えることなく、且つ確実に撮影することができる。また海底画像は、フレームが海底に設置したとき、海底に対してほぼ鉛直方向から一定の高さから撮影される。

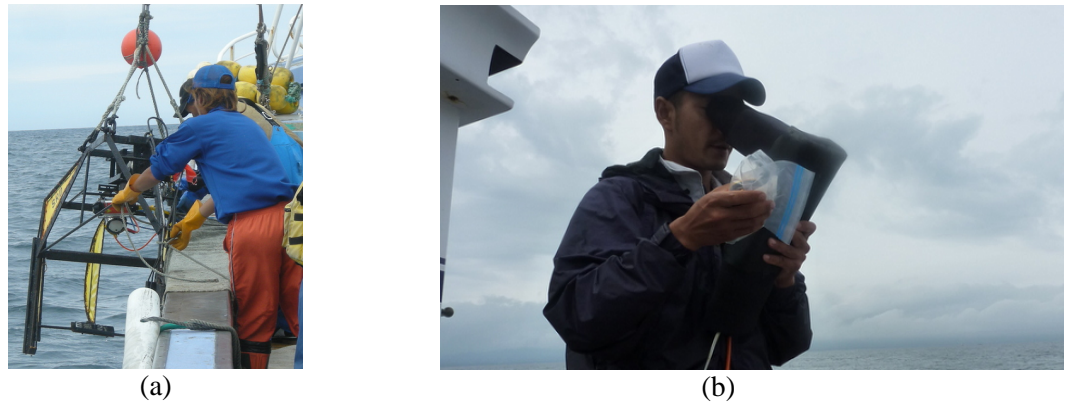


図 3.4: 船上での海底画像撮影の様子. (a) 撮影機材を海中に投入. (b) 海底画像をモニターで撮影し、撮影地点を記録.

Shooting state of seabed image on the ship.

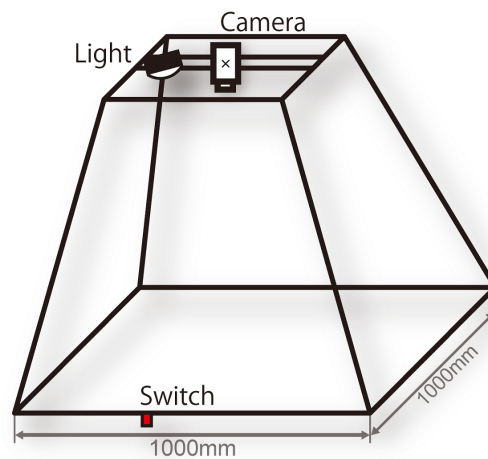


図 3.5: 海底画像撮影機材の簡略図.  
Simplified schematic of camera apparatus.

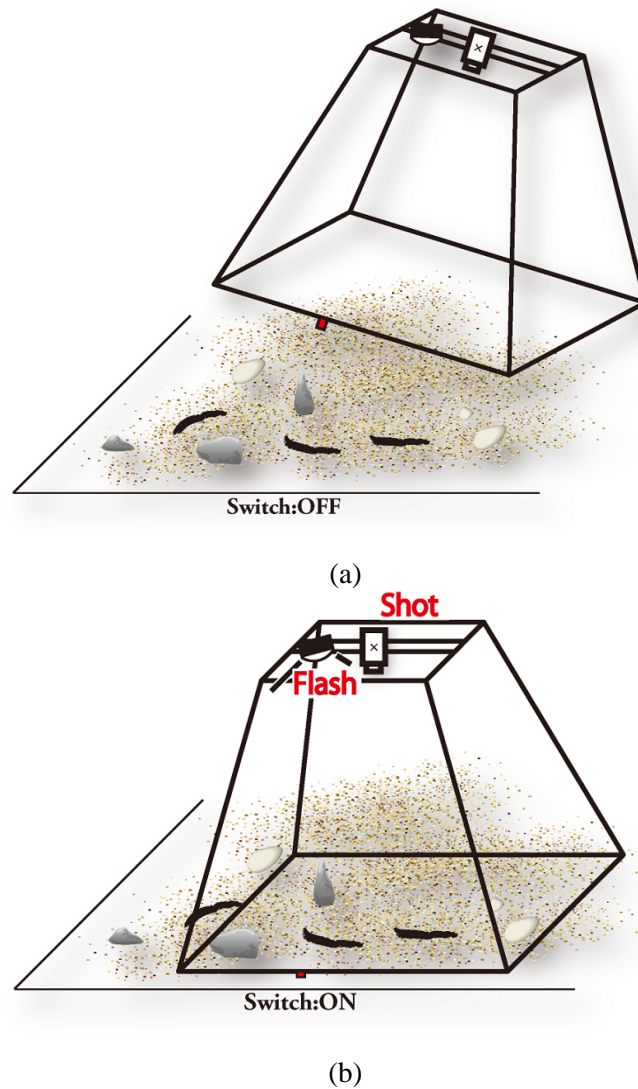


図 3.6: 海底画像撮影手順. (a) 撮影機材を調査地点の海底まで沈める. (b) 撮影機材が着底すると、自動的に撮影される.

Shooting process. Initial state: (a) metallic frame is sunk at investigation point. Shooting state: (b) automatic shooting when metallic frame reaches seabed.

### 3.2.2 海底画像

本研究で対象となる北海道常呂の底質は礫場、砂場、バラス場などである [55,56]. 資源量調査で用いられている海底画像のうち、礫場環境の例を図 3.7 に、砂場環境の例を図 3.8 に示す. 海底画像はサイズが  $1536 \times 1024$  の 24bit のカラー画像である. 海底画像に含まれている中央のフレーム枠が  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  で、従来の資源量調査における計測範囲である. フレームの一部が中央で交差しており、色は黒色であるが一部青色である. また画像内には左側や中央付近にフレームの影が写りこむこともある. 海底画像内でのフレームの位置は毎回異なる. これは図 3.5 に示すように、デジタルカメラとフレームは固定されている

が、デジタルカメラを取り付ける際にばらつきがあり、水中に投入する際などの振動などによりずれるものと考えられる。さらに海底画像内では照度にムラがあり、礫場環境下の画像右端では暗く、礫やホタテガイの色彩を確認することができない。

北海道常呂では種苗放流4輪採制によるホタテガイ漁業をしており、資源量調査は放流3年目の対象海域で行われる(2.1.4節)。このため、資源量調査の対象となるホタテガイは三年貝であり、大きさや成長度合いはほぼ同じである[22,24,25]。礫場環境では、海底が礫に覆われているため、ホタテガイの多くは礫の上にいる(図3.7)。一方で細砂場では、砂の粒度は細かく、礫などはほとんどない(図3.8)。さらに、ホタテガイは砂の中で身を隠しているが、殻縁部だけは確認できる。



図 3.7: 礫場の海底画像.  
The seabed image in gravel field



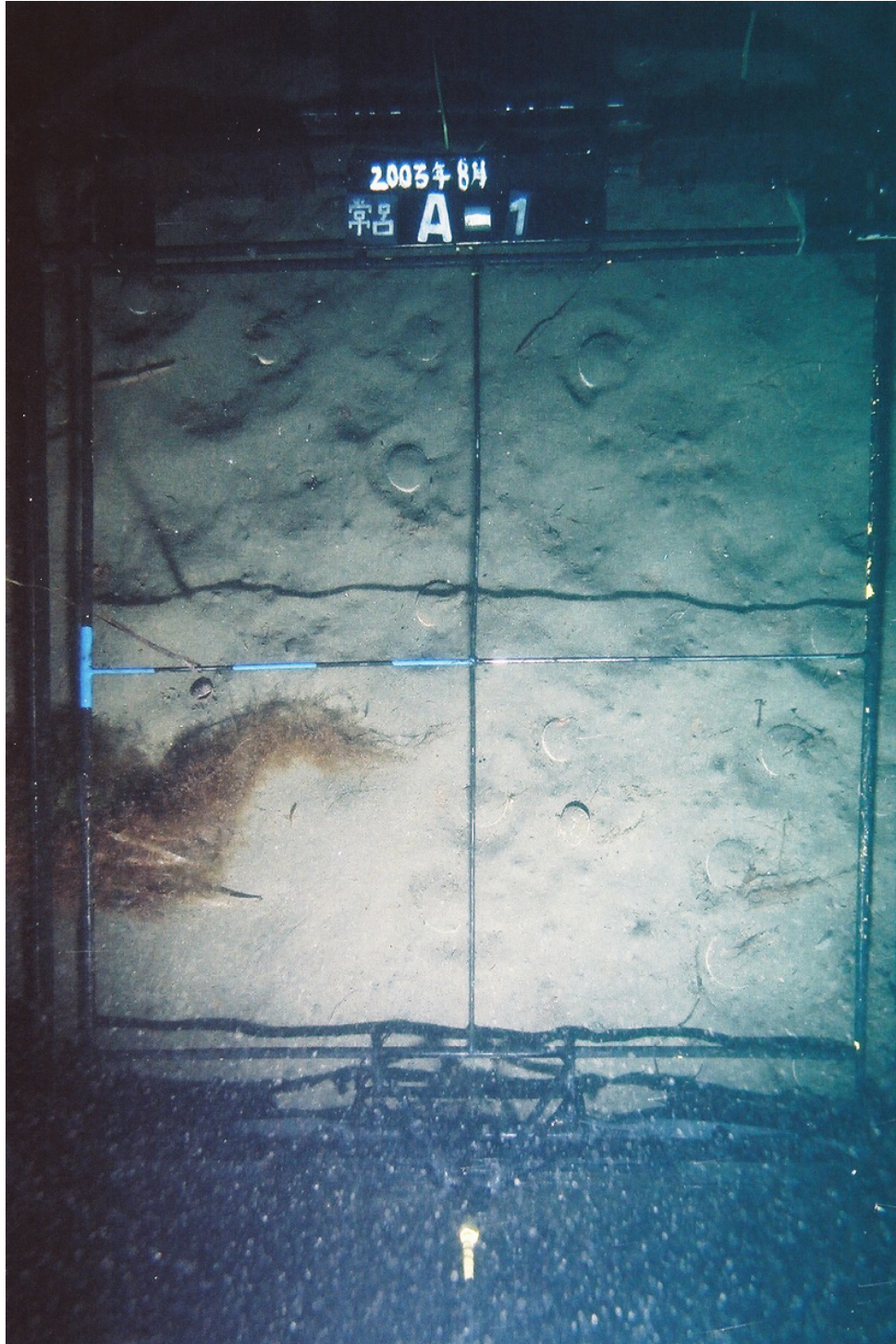


図 3.8: 砂場環境の海底画像.  
The seabed image in sand field.



### 3.3 海底動画

#### 3.3.1 撮影環境

本研究では、北海道網走水産試験場で開発された海底装置により撮影された海底動画を対象とする。海底動画の撮影機材の簡略図と撮影機材を図 3.9 と図 3.10 に示す。撮影機材はフレーム、DV カメラ、照明が 1 つ備わっている (図 3.9)。調査船と機材はロープでつながっており (図 3.10)、機材の脚部はソリのように海底を滑る構造になっている。

海底動画の撮影手順は、まず調査船で調査対象となる地点まで移動し、撮影機材を海中に投入する。つぎに海底に着底した後、調査船が約 2 kn (約 3.7 km/h) で航行し牽引する。海底画像の撮影 (3.2.1 節) では、1 枚撮影するごとに機材の上げ下ろしがあるため、作業量が多く撮影範囲も狭い。一方で海底動画は、撮影機材を海中に投入後は機材の上げ下ろしなどは必要なく、連続して撮影可能である。また海底動画は、撮影機材が常に脚部が海底に設置しているため、海底に対してほぼ鉛直方向、一定の高さから撮影される。

海底動画の撮影時は、海底動画の撮影とは異なり常に照明が点灯している。ホタテガイの照度変化への反応については 3.2.1 節で述べたが、海底画像のための撮影機材は海底の上方から接近するのに対して、海底動画のための撮影機材は海底を水平に移動している。また、海底動画の撮影装置のホタテガイへの接近速度が速いため、撮影された動画中ではホタテガイが逃避行動をとる様子を確認することはできなかった。このため本撮影手法は、対象資源に対して影響を与えることなく撮影することができる。

また海底動画の撮影と同時に GPS ログも記録されているため、海底動画の情報と撮影した海域の位置を対応付けることができる。このため水産資源量マップや底質マップなどへの応用が可能である。

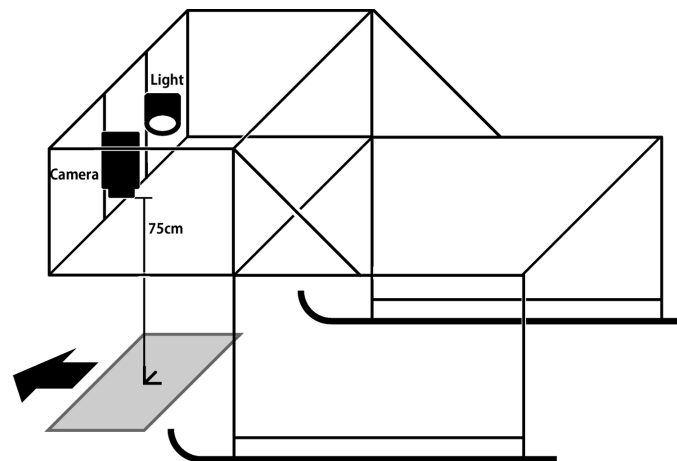


図 3.9: 海底動画撮影機材の簡略図.

Simplified schematic of video apparatus for the seabed video.



図 3.10: 海底動画の撮影機材.  
Seabed video apparatus.

### 3.3.2 海底動画

本研究では、北海道野付沖で撮影された海底動画を対象とする。海底動画の例を図 3.11 に示す。海底動画は、サイズが  $1920 \times 1024$ 、フレームレート 30 fps の 24bit カラーである。海底動画には海底画像のようなフレームなどの写りこみはなく、海底画像と比較すると照度差はほぼない。

対象海域の海底動画には、ホタテガイの他にマヒトデ [57] やエゾスナヒトデ [58] なども生息している。またホタテガイの殻に藻が付着している割合が高いが、北海道常呂で撮影された海底画像と同様 (3.2 節) にホタテガイの殻縁部を確認することができる。



図 3.11: 海底動画の例。画像中の中央にホタテガイが 1 個体, 右側にヒトデ類が 2 個体いる。  
Sample of seabed video. In this image, there are a white asteroid on the left and a blue asteroid on the center.

## 3.4 設計

### 3.4.1 提案手法

本研究では、ホタテガイの生物学的特徴（3.1 節）と対象となる海底画像（3.2 節）を考慮したホタテガイ自動計測手法を提案する。提案手法を図 3.12 に示す。

本手法では、ホタテガイの視覚的特徴が底質によって異なる（3.1 節）ため、それぞれの底質にあった検出手法が必要であると考え、このため底質を礫場と砂場の二つにわけ、海底画像から底質を判別する。ただし、「礫場」・「砂場」は、地質学における粒度組成による分類ではなく、ホタテガイ検出のための海底環境を示すものとして用いることとする。底質判別の結果に基づき、それぞれのホタテガイ検出手法によりホタテガイを検出し、結果として出力する。本研究では、礫場環境下のためのホタテガイ検出手法を第 4 章、砂場環境下のためのホタテガイ検出手法を第 5 章で述べる。ただし底質判別の手法については、別途筆者らの報告を参照していただきたい [業績 8,10]。なお提案手法は 1.2 節における計測部に相当する。このため本手法によって期待される成果は、海底画像を用いた資源量調査の計測時間の短縮であり、得られた結果は専門家が必要な解析を行うこととなる。

つぎに海底画像を用いたホタテガイ自動計測手法を基に、水産現場への導入を考慮した海底動画を用いた自動計測システムを提案する。提案システムを図 3.13 に示す。提案システムのホタテガイ自動計測手法は海底画像の提案手法と同様である。提案システムは、海底動画からの計測から得られた結果の解析までをアプリケーションとして提供する。海底動画は、海底画像と比較して膨大なデータ量（2.1.4 節）であり、GPS ログによる位置情報（3.3.1 節）と統合することで得られる結果を、専門家や水産業従事者に対して意味のあるデータとして提供するのが重要であると考え、このため、専門家や水産業従事者は、海底動画の自動計測と GPS ログなどの情報と統合された結果がアプリケーションとして提供されることで、容易に提案システムを使用すること可能となる。本研究では、海底画像のためのホタテガイ検出手法の応用として海底動画に対する実験と結果を 5.5 節で述べ、アプリケーションや資源量マップなどへの応用例を 5.6 節で紹介する。また、海底動画に含まれるホタテガイの外敵であるヒトデ類の自動計測手法も提案しているが、詳細については別途報告しているので参照していただきたい [業績 12]。

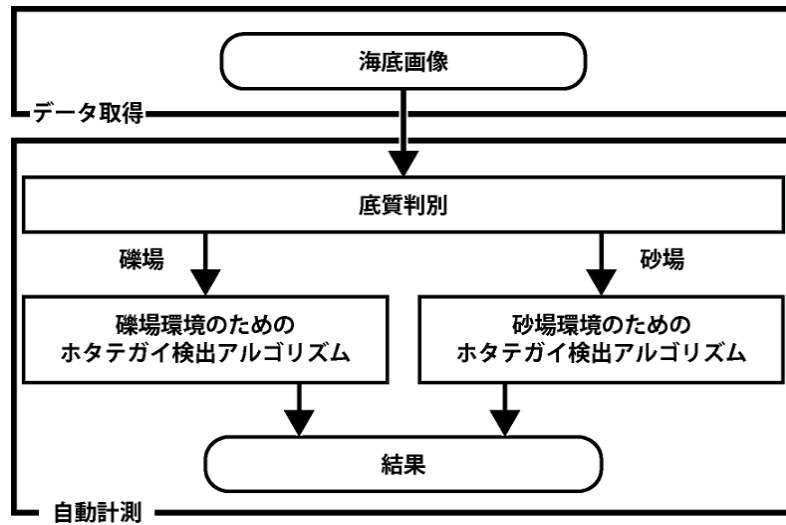


図 3.12: 海底画像を用いたホタテガイ自動計測手法.  
Proposed method to detect the scallop using the seabed image.

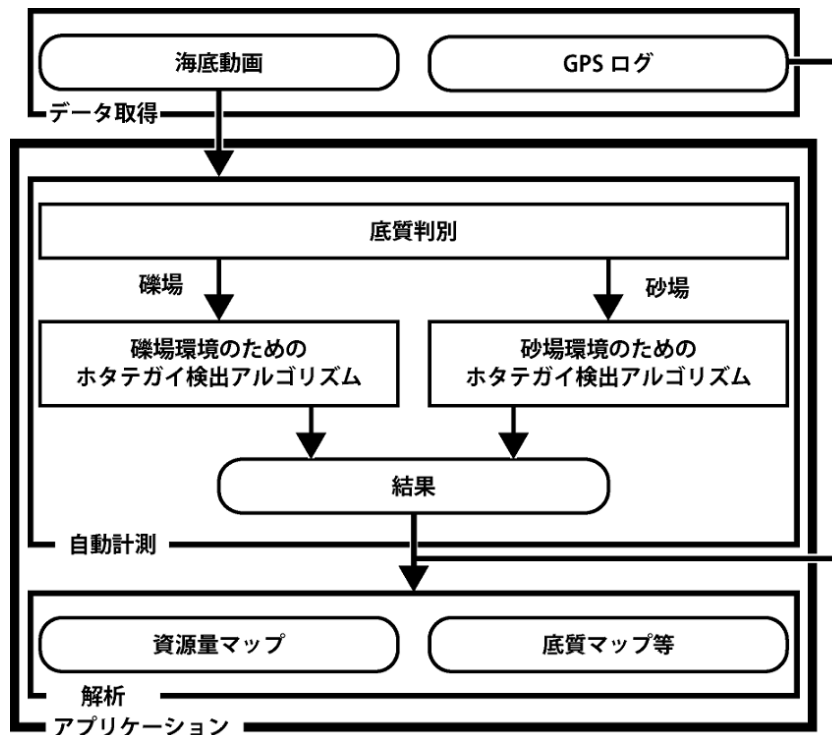


図 3.13: 海底動画を用いたホタテガイ自動計測システム.  
Proposed system to count the scallop using the seabed video.

### 3.4.2 提案システムによる資源量調査精度向上の可能性

海底画像のための自動計測システムが確立された場合、水産資源量推定精度が大幅に改善されることが期待される。北海道常呂を例とすると、従来の資源量調査では1輪採区を125区画に分割し、各小区画から海底画像を利用してホタテガイを計測し、層別抽出法により資源量を推定している [1]。目視計測によるホタテガイの検出率を100%としたとき、大幅な標本数の増大だけで、

- 小区画内の調査精度は20%台から3%台に改善、
- 輪採区内の調査精度は5%台から1%台に改善、

が達成可能となる。ただし、これらは従来の調査結果の分散値と標本数により算出されている。自動計測の検出率が高く、その検出率の分散が十分小さければ、誤差伝搬の定理より推定される精度は従来手法を凌駕する向上が見込める。これまで個体数の分散に対して単位小区画内における標本数が少ないことから変動係数が大きく、操業計画の参考としては信頼性が低かった。しかし自動計測システムにより標本数を増加できるのであれば、小区画内のホタテガイ分布についても議論可能な精度が達成可能となる。これまで得られなかった海区内での細かなホタテガイ密度変動がとらえられることにより、成長や死亡に関する微小環境の影響についての研究が進むと予想され、生産性に関するホタテガイ増養殖技術でのイノベーションの促進に役立つことが期待される。

海底動画による資源量調査手法が確立された場合、海底画像によるものと比較すると以下のような改善が期待できる。北海道常呂を例とすると、漁業面積  $62.5 \text{ km}^2$ 、1輪採区内125区画（標準区画面積  $0.5 \text{ km}^2$ ）としたとき、

- 撮影面積は海底画像では  $625 \text{ m}^2$  ( $1.0 \text{ m}$  (撮影面積)  $\times 5$  (撮影枚数/小区画)  $\times 125$  (小区画)) に対して、海底動画では  $93750 \text{ m}^2$  ( $0.75 \text{ m}$  (撮影幅)  $\times 1000 \text{ m}$  (撮影距離)  $\times 125$  (小区画)) で、150倍、
- 高精度検出が達成できるなら、小区画内の調査精度は海底画像では20%台に対して3%台に改善、
- 輪採区内の調査精度は海底画像では5%台に対して海底動画では1%台に改善

が期待される。また、従来手法である海底画像による資源量調査では撮影に約2日かかっていたが、海底動画による調査では撮影面積が150倍になるが撮影はほぼ同じ期間で可能であるとされている。これは海底画像の撮影においては、撮影ごとに撮影機材を引き上げ、次の撮影地点に移動するため、撮影枚数分の機材の上げ下ろしの行程が必要となる (3.2.1節)。このため海底画像の撮影の行程において、撮影以外の撮影機材の上げ下ろしの時間が大部分を占めている。一方で海底動画においては、1度の撮影機材の上げ下ろしで連続して動画の記録が可能であり、撮影行程の大半をデータ取得に費やすことができる。このため、海底動画による資源量調査は、海底画像による調査と比較して資源量推定精度の向上とともに、調査の効率化においても有効である。

### 3.4.3 要件

資源量調査での利用を想定した時、提案システムにおける自動計測では以下の点を考慮する必要がある。

- 計測項目（個体数，位置，殻長）
- 計測時間
- 計測精度

従来手法では，計数期間は 10 日であるが殻長などサイズ計測などは別途行われている（2.1.4 節）．このため提案システムでは，対象画像中からホタテガイの検出と同時にサイズ計測が必要となる．計測時間は，従来手法では約 10 日であるが，提案システムにおいてはコンピュータにより自動的に処理されるため，複数台使用することも可能である．またコンピュータの処理性能は，今後さらに向上することが見込めるため考慮しない．

計測精度については，画像工学の観点からの評価と資源量推定を目的とした際の評価が必要である．画像工学における精度評価では，検出率および類似研究 [9,10] の結果から行う．また，資源量推定においては，海底環境の変化に対して検出精度が安定していることが重要である．これは資源量を推定する際に，予め実験的に検出精度が既知で且つ安定しているのであれば，システムの結果に対して検出精度を考慮することで結果を補正することが可能である．しかしシステムが海底環境などの変化に応じてホタテガイの検出率や誤検出率などが変化する場合，得られる結果の信頼度は低く，補正も困難である．提案システムでは，海底の底質に適した検出手法を用いることで安定した検出精度を実現する．また資源量調査において自動計測システムは，高精度のホタテガイ検出率により推定結果が向上するのではなく，標本数を増加することで得られる結果の精度向上が見込めるものである．これは調査海域のホタテガイを母集団としたとき， $n$  個のサンプリングにより得られた平均値の分散はサンプリングの数  $n$  に応じて小さくなるためである．資源量推定における評価については次節で詳説する．

### 3.4.4 資源量推定の観点からの評価法

水産資源量調査における本システムの検出手法は以下のように評価する．本研究では，特にシステムのホタテガイ検出率を用いて評価する．これは誤検出率を考慮した場合，システムがホタテガイとして検出するものは，正しく検出されたホタテガイと誤って検出されたそれ以外のものであり，これらを合わせて評価することは正確ではない．また検出手法の改善により精度向上した場合，誤検出率は低下することが期待される．

本研究では，過去の海底画像を用いた調査結果を基に検証する．調査結果がベータ分布に従うと仮定したとき，画像数を  $n$ ，過去の調査によって得られた個体密度の平均値を  $\mu_X$ ，個体密度の分散を  $\sigma_X^2$  と表す．ここで標準誤差  $SEM_X$  は，

$$SEM_X = \frac{\sigma_X^2}{n}, \quad (3.1)$$

となる。また、変動係数  $CV_X$  は、

$$CV_X = \frac{SEM_X}{\mu_X} \cdot 100[\%], \quad (3.2)$$

で表される。

システムが検出したホタテガイの個体数を  $a$ 、未検出の個体数を  $b$ 、システムがホタテガイをホタテガイ領域として正しく検出する検出率を  $R_{TP}$  と表す。システムの検出結果がベータ分布と仮定すると、検出率の分散  $\sigma_Y^2$  は、

$$\sigma_Y^2 = \frac{ab}{(a+b)^2(a+b+1)}, \quad (3.3)$$

である。

過去の調査結果に基づき、システムが計測した場合を考える。システムにより得られる個体密度の平均値を  $\mu_Z$ 、分散を  $\sigma_Z^2$  はそれぞれ、

$$\mu_Z = \mu_X R_{TP}, \quad (3.4)$$

$$\sigma_Z^2 = R_{TP}^2 SEM_X^2 + \mu_X^2 \sigma_Y^2, \quad (3.5)$$

で表される。このとき変動係数  $CV_Z$  は、

$$CV_Z = \frac{\sigma_Z}{\mu_Z} \cdot 100[\%], \quad (3.6)$$

で表される。

本システムを用いて実際に調査を行う際は、システムの検出率  $R_{TP}$  が安定していると仮定すると、システムの結果に対して検出率を考慮した補正することができる。補正された個体密度の平均値  $\mu_{X'}$ 、分散  $\sigma_{X'}^2$ 、変動係数  $CV_{X'}$  とすると

$$\mu_{X'} = \frac{\mu_Z}{R_{TP}}, \quad (3.7)$$

$$CV_{X'} = \frac{\sigma_{X'}}{\mu_{X'}} \cdot 100[\%], \quad (3.8)$$

で与えられる。このときシステムによって調査された画像数  $n'$  のときの変動係数  $CV_{X'}$  により評価する。ただし評価には  $a, b$  を定数  $C$  倍したものをを用いる。

本研究では、2007年北海道常呂のC輪採区の調査法および調査結果を用いて評価する。ただし、 $n = 583$ 、 $\mu_X = 5.439$ 、 $\sigma_X^2 = 8.162$ 、 $SEM_X = 0.1183$ 、 $CV_X = 2.17\%$  であり、画像数  $n' = 1000, 2000$ 、定数  $C = 30$  とする。



## 第4章 礫場環境のためのホタテガイ検出手法

本章では、まず4.1節で礫場環境下の海底画像におけるホタテガイ検出手法を提案する。つぎに前処理を4.2節、ホタテガイの検出手法を4.1.2節で、海底画像(3.2.2節)を対象として詳説する。最後に4.4節で、海底画像を用いた評価実験を行い、4.5節で考察を述べる。

### 4.1 提案手法

#### 4.1.1 礫場環境とホタテガイ

礫場環境のうち、北海道常呂で撮影された海底画像のホタテガイ領域の例を図4.1に、ホタテガイ以外の礫領域を図4.2に示す。ホタテガイは、礫場環境では礫の上に生息し、海底画像から殻などの視覚的特徴を確認することができる(図4.1)。ホタテガイの色彩や模様はさまざまであるが、共通して肌茶色のような色をしている。砂場環境下ではホタテガイは砂に覆われている(図5.1)が、礫場環境では、ホタテガイの殻に重い礫が堆積することはない。また、ホタテガイは呼吸をする際に殻を開閉させる(3.1節)ことから、殻の上に礫があることはほぼない。その他の領域では、礫や死殻の残骸などが含まれており、その大きさなどは様々である(図4.2)。

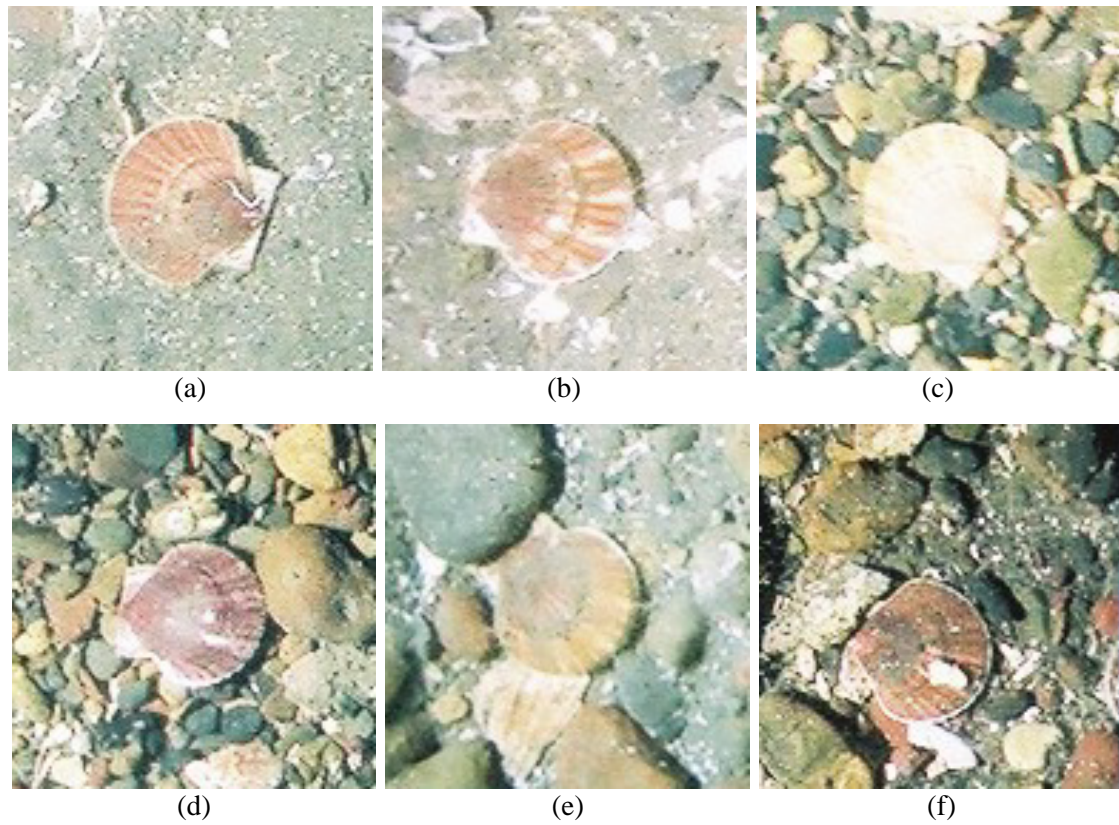


図 4.1: 礫場環境下の海底画像におけるホタテガイ領域の例.  
Scallop area images in seabed image of gravel field (size:128 × 128).

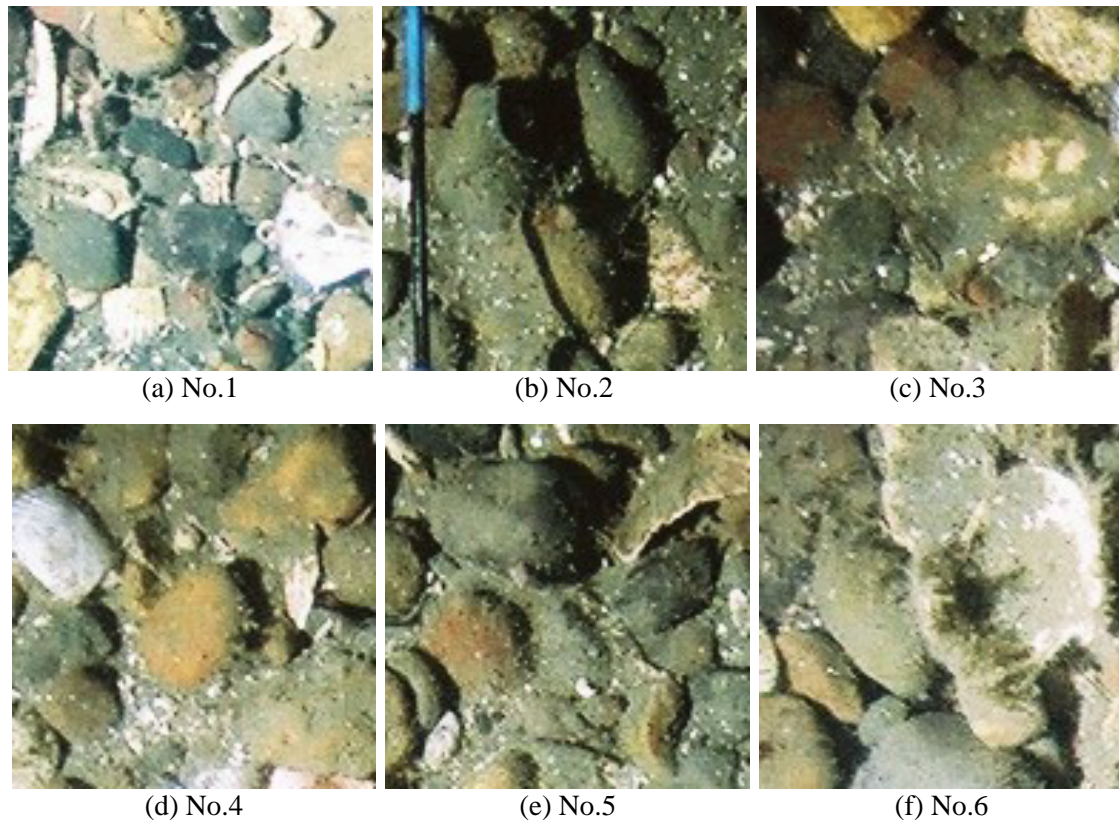


図 4.2: 礫場環境下の海底画像におけるその他領域の例.

Gravel area images in seabed image of gravel field (size:128 × 128).

#### 4.1.2 提案手法

ホタテガイ領域を磯や死殻の残骸などと比較すると、以下のような特徴を確認できる.

- 扇状の形状を有する
- 肌茶色の特徴的な色彩を有する
- 放射状に広がる特徴的な肋の模様が存在する

本研究では、これらの特徴を形状特徴、色彩特徴、肋模様特徴とし、礫場環境下のためのホタテガイ領域の検出手法を提案する. 提案するホタテガイ検出手法を図 4.3 に示す. まず前処理では、十分な照度の領域を認識可能領域とし抽出する (4.2.1 節). つぎにホタテガイの形状特徴からホタテガイ候補領域を抽出する (4.3.1 節). 得られたホタテガイ候補領域において、色彩特徴と肋模様特徴を用いてホタテガイ領域を判別し、検出する (4.3.4 節).

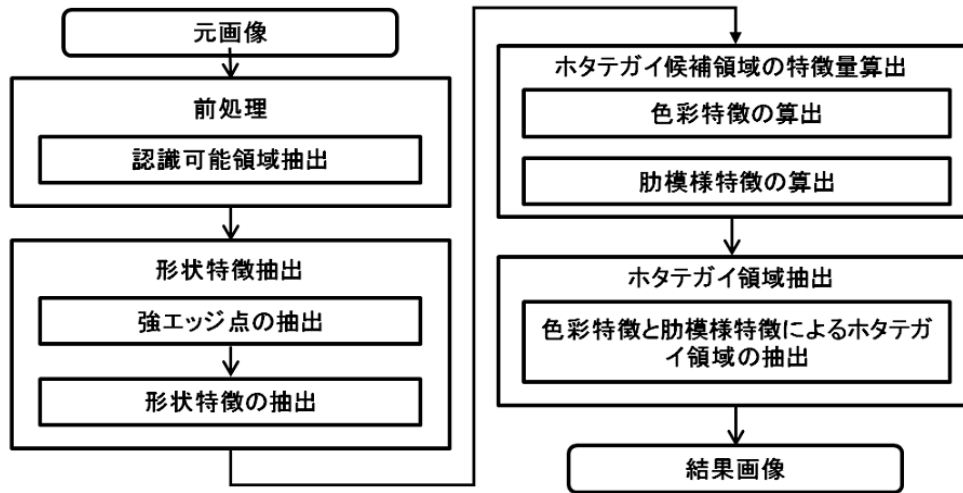


図 4.3: 礫場環境下のためのホタテガイ領域検出手法.  
Proposed method to detect the scallop in the gravel field.

## 4.2 前処理

### 4.2.1 認識可能領域の抽出

対象画像は、撮影時の照明による照度差が大きく、十分な照度が得られていない領域がある。このような領域では、正確な色彩情報や形状情報を得ることは困難である。そこで、十分な照度が得られている領域を認識可能領域と定義し、この領域に対してホタテガイ領域を検出することとする。ただし、海底画像中で計測の対象としない領域を定義した場合、対象領域の面積が既知であるならば、水産資源量調査の結果に影響はない。これはホタテガイの資源量推定では単位面積当たりの個体密度に基づいているためである。

認識可能領域を以下のように定義する。大きさ  $(M, N)$  の画像  $I$ 、大きさ  $(W, H)$  で画像  $I$  中の局所領域を  $I_{local}$  とする ( $I_{local} \subset I$ )。ここで礫場環境下においては画像中に様々な礫が含まれているため、十分な照度が得られている局所領域では輝度値の平均値と分散が大きいと仮定できる。このため礫場環境では局所領域  $I_{local}$  において、輝度値の平均値  $L_\mu$ 、分散  $L_{\sigma^2}$  が、

$$Th_{L_\mu} \leq L_\mu, \quad (4.1)$$

かつ、

$$Th_{L_{\sigma^2}} \leq L_{\sigma^2} \quad (4.2)$$

を満たすとき、認識可能領域とし抽出する。ただし、 $Th_{L_\mu}$  と  $Th_{L_{\sigma^2}}$  は、それぞれ平均値  $L_\mu$ 、分散  $L_{\sigma^2}$  に対する閾値である。この処理を局所領域  $I_{local}$  の移動幅  $k$  とし、対象画像  $I$  全体に対して行う。

本手法では局所領域  $I_{local}$  の大きさ  $(W, H) = (32, 32)$ 、移動幅  $k = 32$  とする。礫場環境の海底画像において、各局所領域の輝度値の平均値  $L_\mu$  と分散  $L_{\sigma^2}$  を表したものを図 4.4 に示

す. 図 4.4 より, 輝度値の平均値  $L_\mu$  と分散  $L_{\sigma^2}$  が小さい範囲に多く分布しているのがわかるが, これは海底画像周辺の陰領域であると考えられる. 本手法では, 輝度値の平均値に対する閾値  $Th_{L_\mu} = 100$ , 分散に対する閾値  $Th_{L_{\sigma^2}} = 2000$  とした.

認識可能領域の抽出結果例を図 4.5 に示す. 図 4.5 より, 十分な照度のある領域が抽出されており, ホタテガイや礫などの色彩や形状を確認できることがわかる.

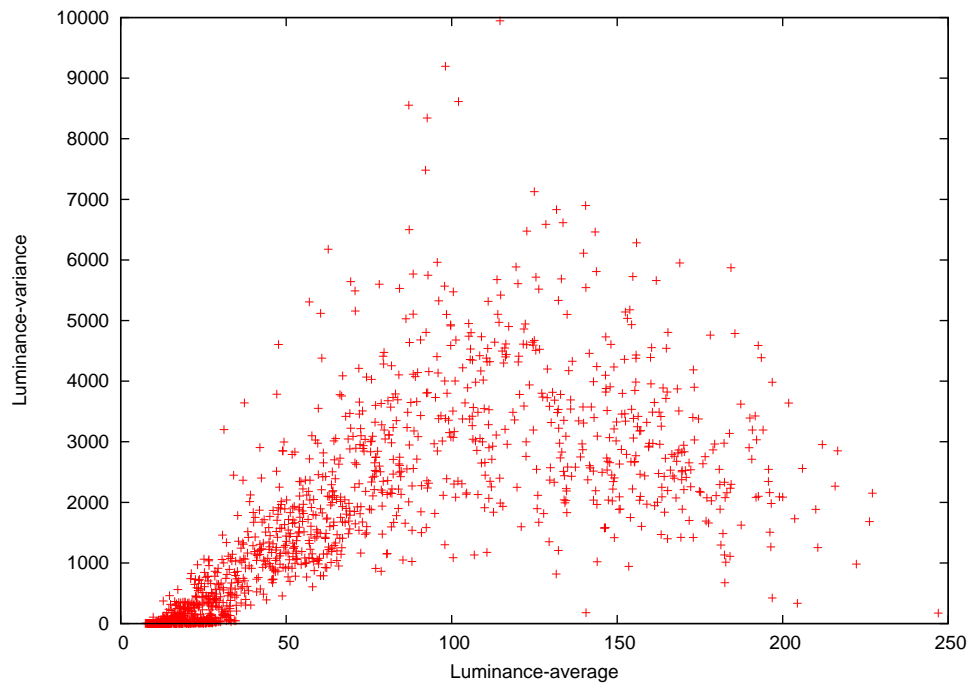


図 4.4: 礫場環境下の海底画像における局所領域内の輝度平均と分散の分布.  
Distribution of average lightness and variance in localized area of gravel seabed image.



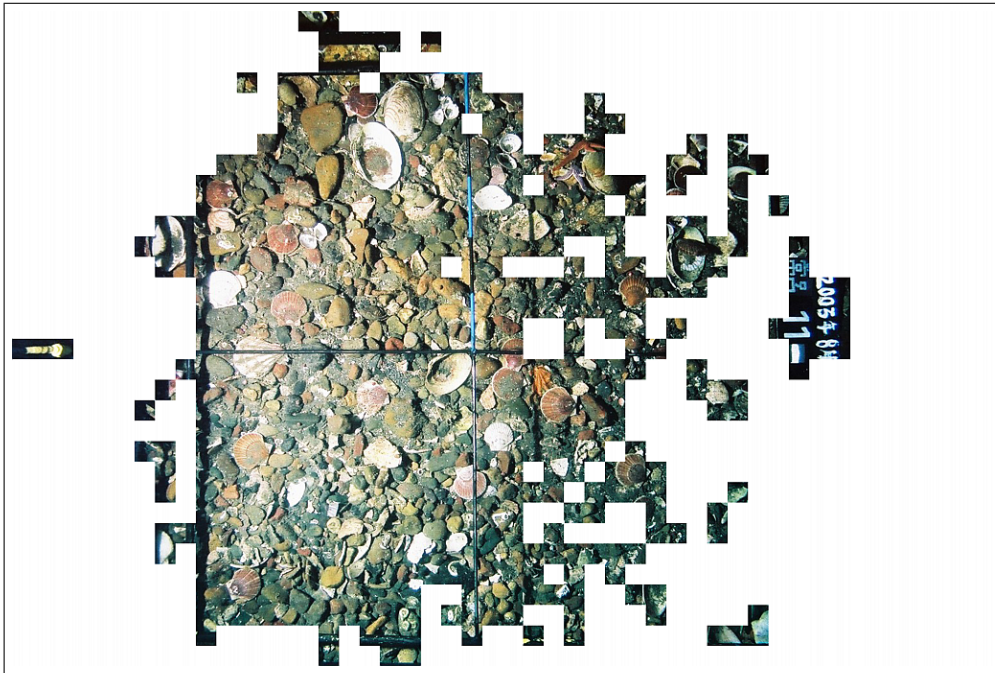


図 4.5: 礫場環境下の海底画像からの認識可能領域抽出結果.  
Results of the recognizable areas in the seabed image of gravel field.

### 4.3 ホタテガイ検出手法

#### 4.3.1 形状特徴

##### 形状情報の抽出

ホタテガイの殻は扇状の形状を有する (4.1.2 節). また耳部は礫場環境では特徴的な特徴の一つではあるが, 砂場環境下の場合, 砂に覆われているため, 海底画像中から確認することができない. そこで本研究では, ホタテガイの形状を楕円と仮定し, 楕円検出 Hough 変換により検出する. 本節では, ホタテガイの形状情報の抽出手法について述べる.

礫場環境下におけるホタテガイは, 礫の上に存在していることから殻の形状を確認することができる (図 4.1). そこでエッジ処理を用いて形状情報を抽出する.

画像  $I$  の座標  $(x, y)$  における水平方向と垂直方向の微分値は,

$$\frac{d}{dx}I(x, y) \approx I(x, y) - I(x - 1, y), \quad (4.3)$$

$$\frac{d}{dy}I(x, y) \approx I(x, y) - I(x, y - 1) \quad (4.4)$$

である. このときエッジ勾配  $\nabla I(x, y)$  は,

$$\nabla I(x, y) = \left( \frac{\partial}{\partial x}I(x, y), \frac{\partial}{\partial y}I(x, y) \right)^T \quad (4.5)$$

で表される。このときエッジ強度  $|f(x, y)|$  とエッジ方向  $\theta$  はそれぞれ、

$$|I(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x} I(x, y)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} I(x, y)\right)^2}, \quad (4.6)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y} / \frac{\partial I(x, y)}{\partial x}\right) \quad (4.7)$$

で与えられる。

まず対象画像の輝度値に対して Sobel フィルタを用いてエッジ強度を算出する。Sobel フィルタは中心に重みをおいたものであり、ラプラシアンフィルタと比較するとノイズに強い。対象画像は解像度が低く、対象画像中のホタテガイの大きさは 40~60pixel 程度である。このため、ここではフィルタサイズを  $3 \times 3$  とした。本研究で用いる Sobel フィルタを、図 4.6 に示す。つぎに得られたエッジ強度に対して閾値処理により二値画像を得る。最後に得られた画像に対して細線化処理を行う。これは、4.3.1 節の楕円検出 Hough 変換の処理の際、線分の太さにばらつきがある場合、特徴点の投票数に偏りが出るためである。本研究では、エッジ強度に対する閾値を 180 とした。形状情報抽出の例を図 4.7 に示す。図 4.7 より、ホタテガイの輪郭が抽出されているのがわかる。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(a) 水平エッジマスク

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

(b) 垂直エッジマスク

図 4.6: Sobel フィルタ.  
Sobel filter mask.

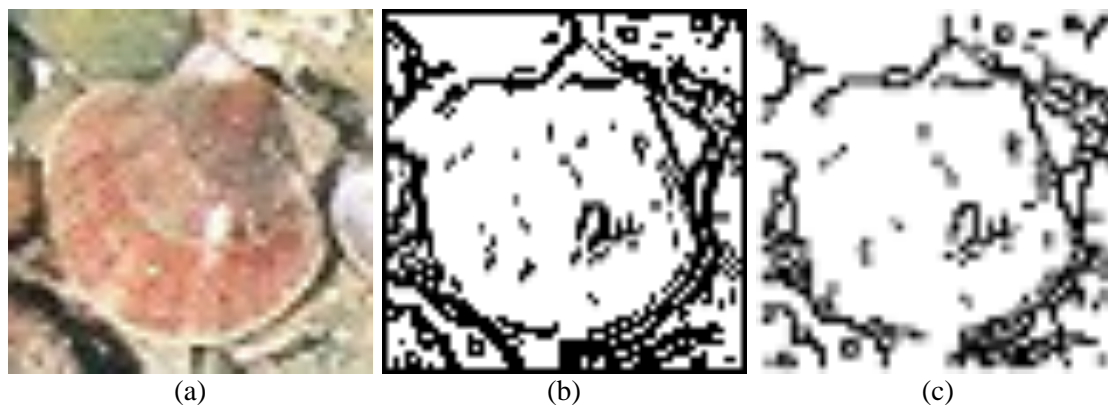


図 4.7: ホタテガイ領域における形状情報の抽出の流れ。  
Process to extract shape information in scallop area

### 形状特徴のモデル化

ホタテガイの形状を楕円とみなし、楕円検出 Hough 変換を用いてモデル化する。Hough 変換は、直線や円など代数方程式で表現できる関数をパラメータ空間上に特徴点に従い投票することで候補形状を検出する手法であり、ノイズに強く、対象の画像に適した手法である [41,42].

楕円の中心座標  $(x, y)$ 、半長径  $\alpha$ 、半短径  $\beta$ 、長軸の傾き  $\phi$  の 5 個のパラメータにより、楕円に対する関数  $f(x, y, \alpha, \beta, \phi)$  を定義する。楕円関数のパラメータを図 4.8 に示す。そして対象画像の特徴点に対して Hough 変換により楕円の検出を行う。本研究では楕円検出 Hough 変換によって得られた楕円領域を、ホタテガイ候補領域とする。礫場環境下におけるホタテガイ検出に用いる特徴点は 4.3.1 節で得られた強エッジ点とする。

本研究では、海底画像中の資源量調査の対象となるホタテガイは三年貝である (3.2.2 節) ことから、一定範囲の大きさ・形状であるため、楕円パラメータ  $\alpha, \beta$  が  $26 \leq \alpha, \beta \leq 34$ 、楕円率  $\beta/\alpha$  が  $0.85 \leq \beta/\alpha$  を満たすものとした。

ここで楕円検出 Hough 変換を用いるが通常は 5 次元のパラメータ空間が必要となり、膨大な計算時間が必要となる。これらの問題を解決するために、投票法の工夫 [45] や楕円の幾何学的特徴を用いた手法 [37,46] など様々な高速化手法が提案されている。しかし対象画像中のホタテガイは、長径・短径が  $26 \leq \alpha, \beta \leq 34$  と小さく、特に楕円の幾何学的特徴を用いた手法では特徴点の数が少ないため楕円を検出することができない。また砂場環境下のホタテガイにおいては、構成する特徴点が楕円の 50% 以下であり同じく検出することができない。このため楕円検出 Hough 変換においては、全特徴点を投票する。

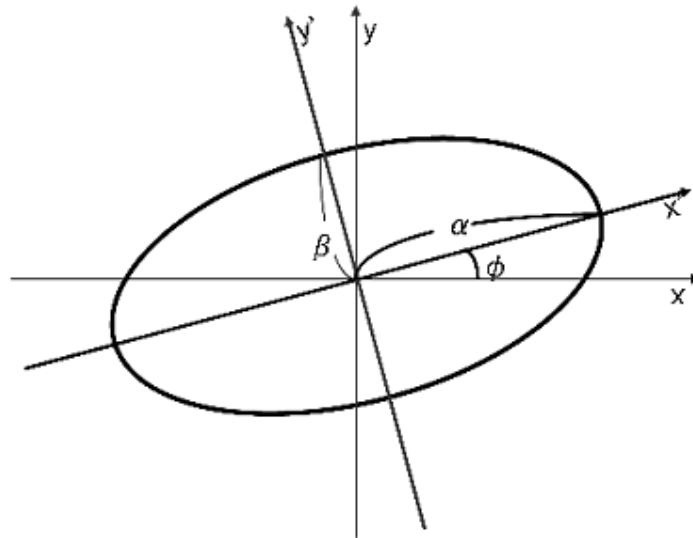


図 4.8: 楕円のパラメータ.  
Ellipse anatomy.



### 4.3.2 色彩特徴

#### 色彩情報のモデル化

礫場環境下のホタテガイ領域は、肌茶色の特徴的な色彩を有する（4.1.2節）。本研究では、HLS色空間を用いて色彩特徴の解析を行う。

画像全体と、様々な場所に存在するホタテガイ領域の色彩情報を比較するために、海底画像から目視にてホタテガイ領域から10,000点を抽出し、サンプル点とした。得られたサンプル点と画像全体のR, G, B各成分をHLS色空間へ変換し、色相、輝度、彩度のヒストグラムを求め、比較した。画像全体とホタテガイ領域を比較した結果を図4.9～図4.11に示す。図4.9よりホタテガイ領域の色相は $100^{\circ}$ ～ $175^{\circ}$ の間に集中していることがわかる。これは、ホタテガイ左殻の色彩特徴を反映した結果であると考えられる。彩度、輝度においては、ホタテガイ領域とその他の領域を分離する明確な特徴を得ることができなかった（図4.10, 図4.11）。

つぎにホタテガイ領域とその他の領域の色相について比較を行う。比較には、ホタテガイ領域のみを手動で切り出した画像を6枚とサイズ $128 \times 128$ のその他の領域画像6枚を用いた。ただしホタテガイ領域は、ホタテガイ殻の上に砂が存在しないものとし、その他の領域画像は図4.2を用いた。実験で用いたホタテガイ領域のみを切り出した画像を図4.12に示す。これらの対象画像に対して、色相ヒストグラムを求める。得られたヒストグラムの平均値 $Hue_{\mu}$ および標準偏差 $Hue_{\sigma}$ を求め、比較した。各分布の色相平均値 $Hue_{\mu}$ 、標準偏差 $Hue_{\sigma}$ を求めた結果を表4.1に、ホタテガイ領域とその他の領域の結果例を図4.13に示す。

表4.1(a)と図4.13から、ホタテガイ領域では色相 $135^{\circ}$ ～ $170^{\circ}$ に集中していることがわかる。表4.1(b)より、その他の領域では色相の平均値が $170^{\circ}$ 以上であった。また、様々な色彩の礫が含まれている場合には、標準偏差 $Hue_{\sigma}$ が高いことがわかる。これらの結果からホタテガイ領域は一定の色相範囲に従い、その範囲はその他の領域と比較して小さいことがわかる。本研究では、画像中のある局所領域の色相平均値 $Hue_{\mu}$ が、

$$125^{\circ} \leq Hue_{\mu} \leq 175^{\circ} \quad (4.8)$$

のとき、ホタテガイの色彩特徴を満たすとする。

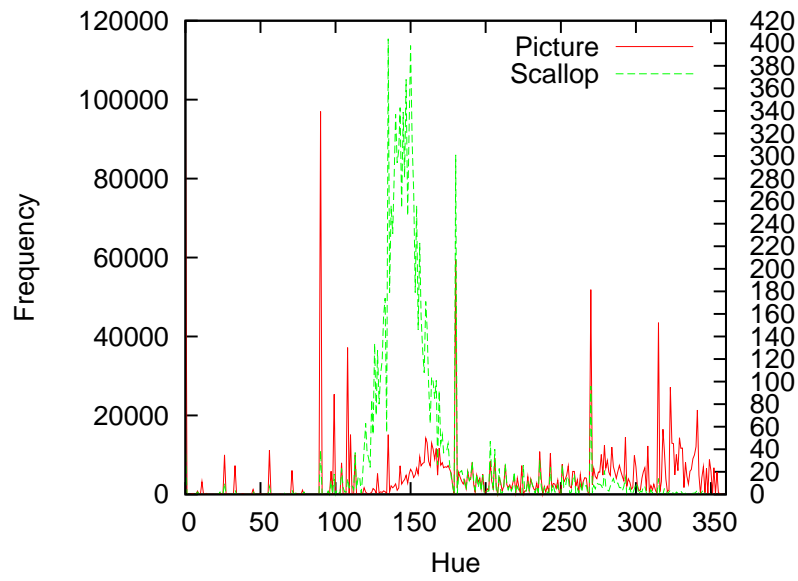


図 4.9: 色相によるホタテガイ領域と海底画像の比較結果.  
Comparing scallops and seabed image by hue.

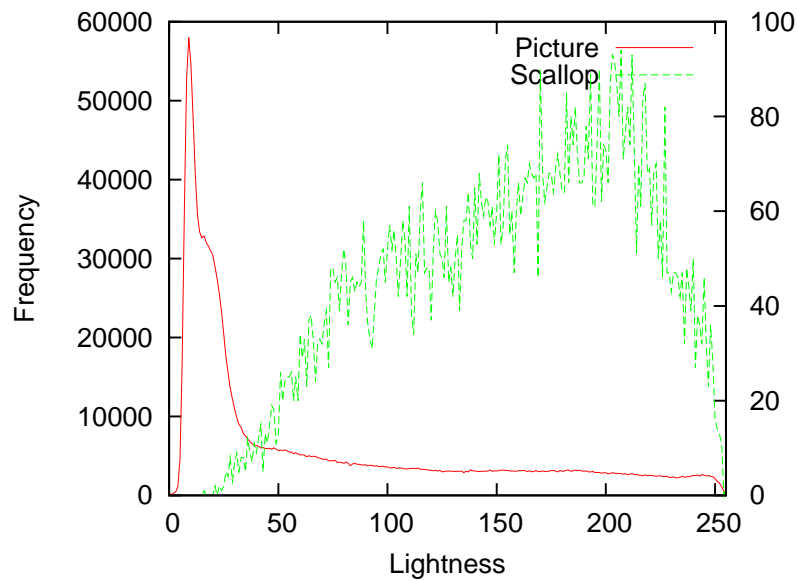


図 4.10: 輝度値によるホタテガイ領域と海底画像の比較結果.  
Comparing scallops and seabed image by brightness.

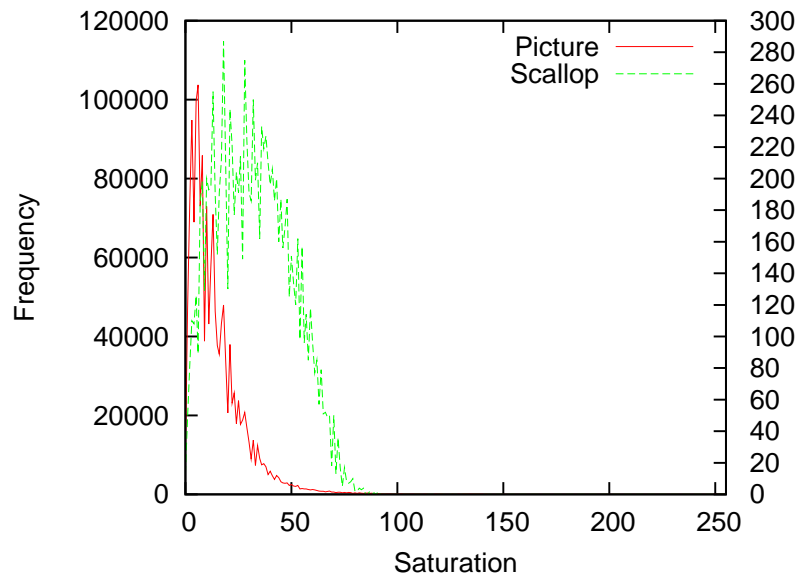


図 4.11: 彩度によるホタテガイ領域と海底画像の比較結果.  
Comparing scallops and seabed image by saturation.

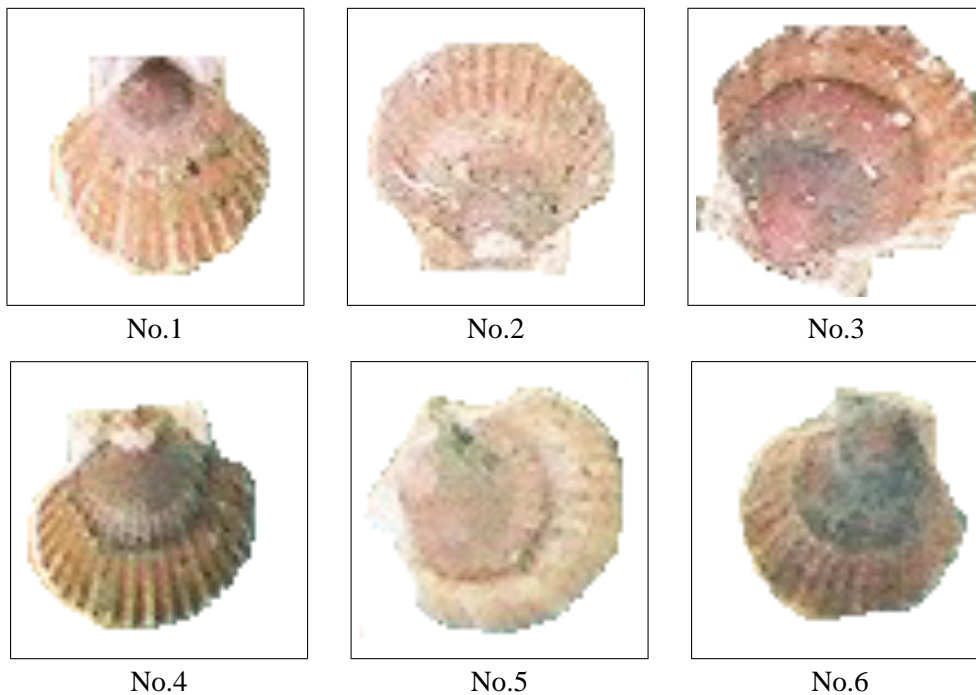


図 4.12: 4.3.2 節の実験に用いるホタテガイ領域の画像。  
Object images of scallop area in Sect. 4.3.2.

表 4.1: 各領域の色相平均値と標準偏差結果 (対象画像は図 4.12, 図 4.2) .

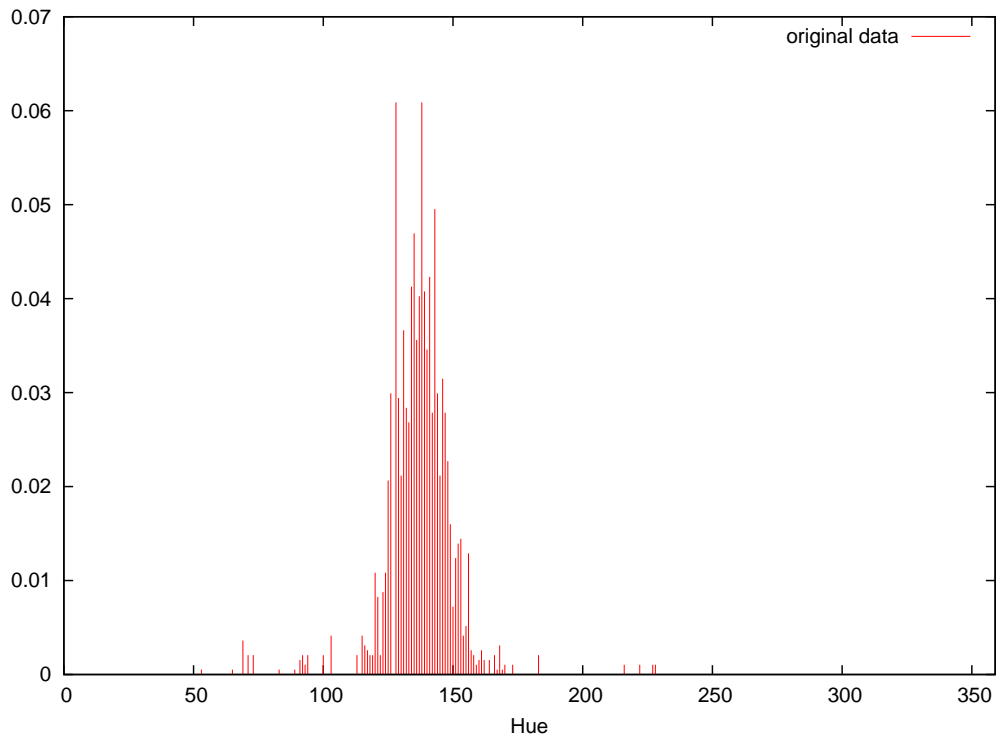
Results of hue mean and standard deviate of scallop area and other area.

ホタテガイ	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Mean (°)	139.1	139.1	133.2	156.1	152.9	164.5
SD	14.6	7.3	10.7	18.1	17.5	31.0

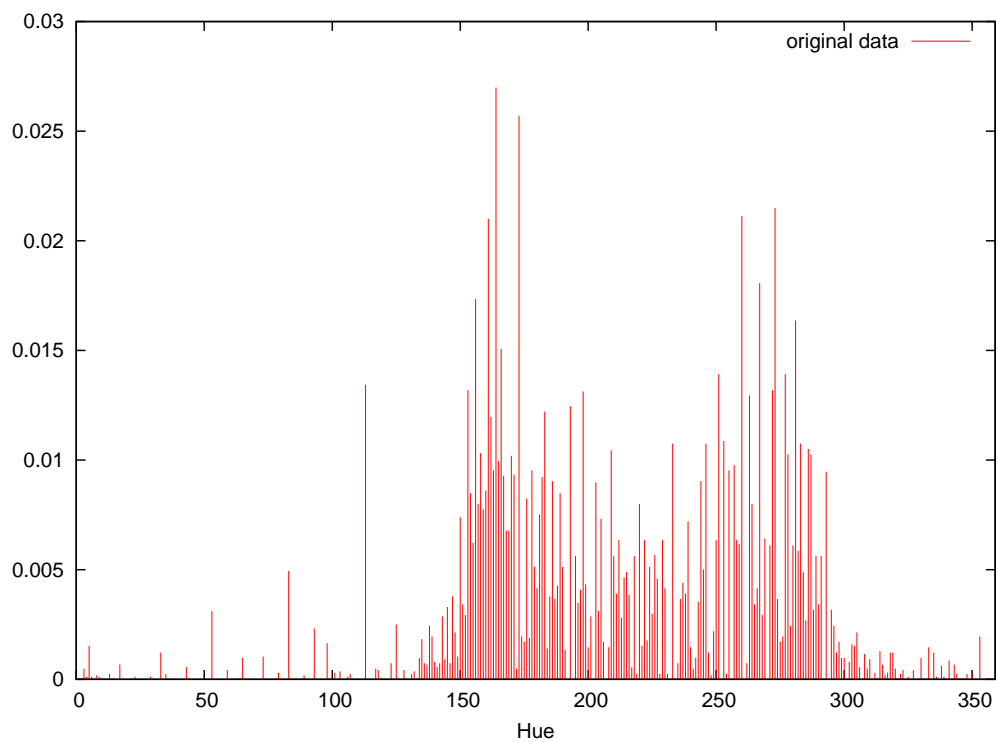
(a) ホタテガイ領域

その他	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Mean(°)	208.4	230.9	174.8	175.4	180.5	174.1
SD	59.0	50.7	15.7	33.6	14.3	18.9

(b) その他の領域



(a) ホタテガイ領域 (No.1)



(b) その他の領域 (No.1)

図 4.13: 各領域における色相ヒストグラム結果例.  
Results of hue histogram.

### 4.3.3 肋模様特徴

#### 肋模様の抽出

礫場環境下のホタテガイ領域は、放射状に広がる特徴的な肋の模様が存在する（4.1.2節）。本節では、ホタテガイの肋模様特徴をモデル化するために、肋模様を抽出する手法について述べる。

対象画像中におけるホタテガイの肋模様は、図 4.1 より濃淡の変化に個体差があるが、その間隔はほぼ一定のように見える。このため本研究ではエッジ勾配（式 4.7）を用いて、肋模様のパターンを抽出する。ただし、ここでは形状特徴の抽出と同様にサイズ  $3 \times 3$  の Sobel フィルタを用いる（4.3.1 節）。

ホタテガイ領域の画像に対してエッジ処理により得られたエッジ強度画像とエッジ方向画像の例を図 4.14 に示す。図 4.14(b) より、エッジ強度画像では肋模様を確認することができないが、図 4.14(c) より、エッジ方向画像では肋模様が抽出されていることがわかる。これは肋模様の輝度変化が非常に弱いため、エッジ強度画像（図 4.14(b)）では肋模様を抽出することができなかったと考えられる。このため本研究では、エッジ方向により肋模様を抽出する。

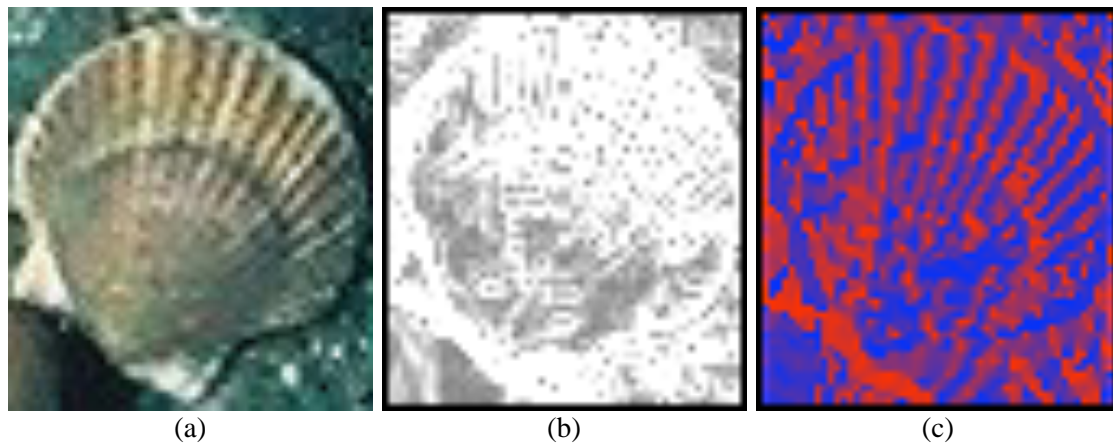


図 4.14: ホタテガイ領域のエッジ強度・エッジ方向算出結果.

Results of edge treatment. Objects image is (a), edge strength image is (b), and edge direction image is (c).

#### 解析とモデル化

本節では、4.3.3 節で得られた結果に基づき、肋模様のモデル化について述べる。本研究ではフーリエ特徴 [47, 48] を用いて肋模様の特徴を定義する。

フーリエ変換は、ある連続な関数とその周波数成分の連続スペクトルに分解するものである。デジタル画像は離散的なデータであるため離散フーリエ変換（DFT）を用いる。サ

イズ  $M \times N$  の 2 次元画像を  $I(m, n)$  とする. ただし  $m, n$  は,

$$m = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (4.9)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4.10)$$

の 0 以上の整数である. 画像  $I$  のフーリエ変換によって得られる周波数分布  $F(u, v)$  は,

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} f(m, n) W_1^{mu} W_2^{nv}, \quad (4.11)$$

で与えられる. ただし  $W_1, W_2$  は,

$$W_1 = e^{-j\frac{2\pi}{M}}, \quad W_2 = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

である. このとき,  $F_{u,v}$  のパワースペクトル  $P(u, v)$  は,

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 \quad (4.12)$$

で定義される. パワースペクトル  $P(u, v)$  は空間周波数  $(u, v)$  の強さを表す. パワースペクトルは中央部分が低周波成分で, 外側が高周波成分となっている. ここでパワースペクトル  $P(u, v)$  において,  $(u, v) = (0, 0)$  の原点を中心に距離  $r$ , 方向  $\theta$  とし正規化し, 極座標変換したものを考える. 距離  $r$  は, テクスチャの頻度を表し, 方向  $\theta$  は  $\theta$  の垂直方向における濃淡変化を表す.  $P(u, v)$  を極座標変換したものを  $P(\theta, r)$  とするとき, 周波数のフーリエ特徴量  $P(r)$  は,

$$P(r) = 2 \sum_{\theta=0}^{\pi} P(\theta, r) \quad (4.13)$$

で定義される. パワースペクトル空間とフーリエ特徴量  $P(r)$  の関係を図 4.15 に示す. フーリエ特徴量  $P(r)$  はパワースペクトル空間において原点を中心とした同心円状の領域についてのパワースペクトルの和を表す (図 4.15). これは, ある周波数  $r$  について  $P(r)$  が大きいとき,  $r$  に対応する空間周波数成分が大きいことを表す.

ホタテガイとその他の領域を以下のように比較する. それぞれの領域を, サイズ  $32 \times 32$  とし切り出し, 4.3.3 節に従いエッジ方向画像を得る. 得られた画像に対して, フーリエ変換し, フーリエ特徴量  $P(r)$  を得る. フーリエ変換の例を図 4.16 と図 4.17 に, フーリエ特徴量  $P(r)$  の例を図 4.18 に示す. 図 4.16(c) より, 5~9 Hz の周波数帯にホタテガイの肋模様特徴が反映されている. これは図 4.18 から, 7~9 Hz において同様な特徴がみられた. しかし図 4.16(b) より, パワースペクトル  $P(u, v)$  からは肋模様の特徴はみられなかった. また図 4.17 より, その他の領域では様々な礫の大きさや形状があるため, 特徴はみられなかった.

これらの結果より, フーリエ特徴量  $P(r)$  を用いて肋模様特徴を定義する. エッジ方向画像内の局所領域を  $L(x, y)$ , パワースペクトルにおける周波数  $r$ , 領域  $L(x, y)$  においてフーリエ変換によって得られるフーリエ特徴量を  $P_L(r)$  とする. このとき, ある範囲の空間周波数成分の和を色彩特徴量  $A$  としたとき,

$$A = \sum_{r=k_{min}}^{k_{max}} P_L(r), \quad (4.14)$$

とする. ただし  $k_{min}$ ,  $k_{max}$  はパワースペクトル空間における任意の周波数の下限値, 上限値を表す. 本研究では, 局所領域  $L(x, y)$  のサイズを  $32 \times 32$ ,  $k_{min} = 7, k_{max} = 9$  とする ( $0 \leq k_{min} \leq r \leq k_{max} \leq 16$ ). このとき, 特徴量  $A$  が

$$T_A \leq A \quad (4.15)$$

を満たすと, ホタテガイの肋模様特徴を満たすとする. ただし,  $T_A$  は特徴量  $A$  に対する閾値とする.

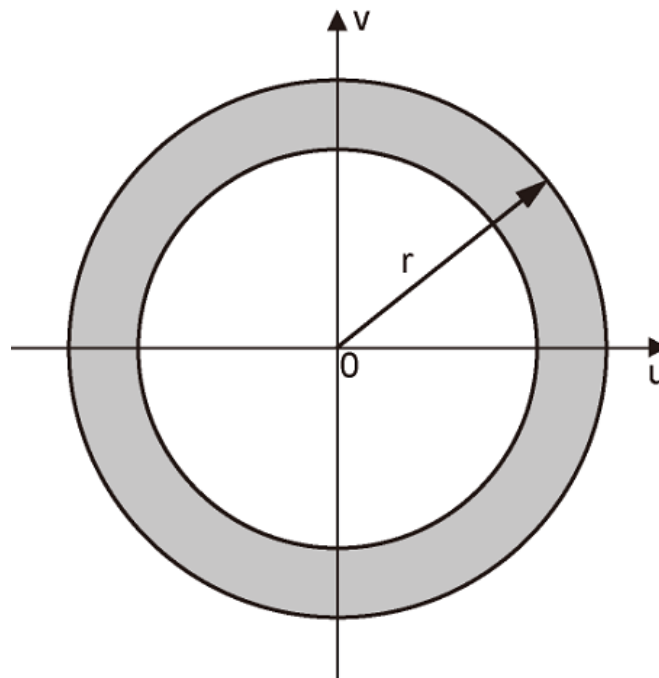


図 4.15: フーリエ特徴量  $P(r)$ .  
Definition of fourier feature  $P(r)$



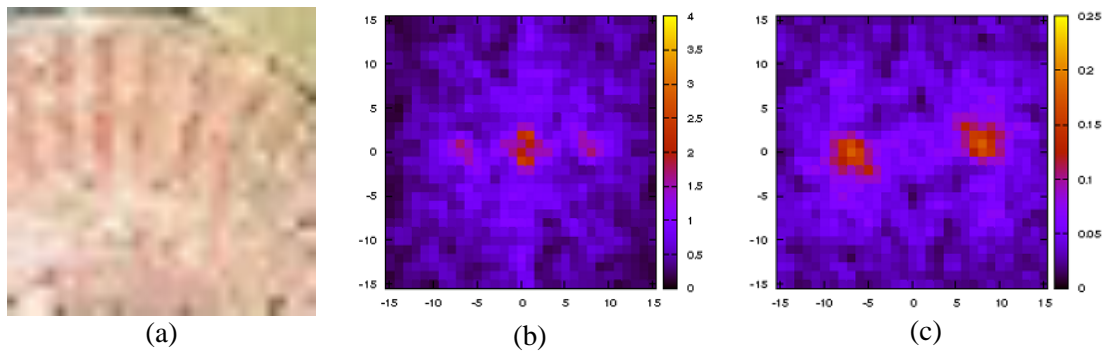


図 4.16: ホタテガイ画像における輝度値とエッジ方向に対するパワースペクトルの結果例. (a) 対象画像. (b) 輝度値に対するパワースペクトルの結果. (c) エッジ方向に対するパワースペクトルの結果.

Samples of power spectrum in scallop image of brightness and edge direction. Object image is (a), power spectrum image of brightness is (b), and power spectrum image of edge direction is (c).

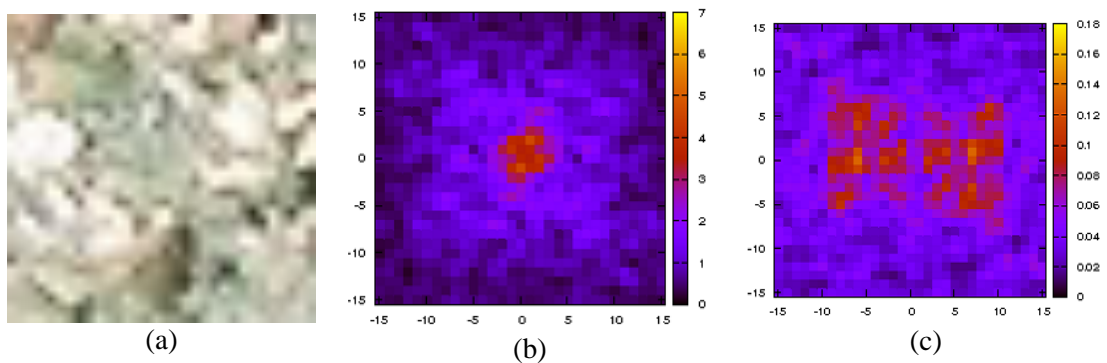


図 4.17: その他の画像における輝度値とエッジ方向に対するパワースペクトルの結果例. (a) 対象画像. (b) 輝度値に対するパワースペクトルの結果. (c) エッジ方向に対するパワースペクトルの結果.

Samples of power spectrum in other image of brightness and edge direction. Object image is (a), power spectrum image of brightness is (b), and power spectrum image of edge direction is (c).

#### 4.3.4 ホタテガイ検出

本節では、形状特徴 (4.3.1 節), 色彩特徴 (4.3.2 節), 肋模様特徴 (4.3.3 節) を用いたホタテガイ領域の検出法について述べる.

4.3.1 節の手法を用いることで検出されるホタテガイ候補領域において, 色彩特徴と肋模様特徴を求める. このとき, 式 4.8 または式 4.15 を満たすとき, ホタテガイ領域とする. ただし, 複数のホタテガイ領域が重なって検出されたとき, 色彩特徴のうち色相の標準偏

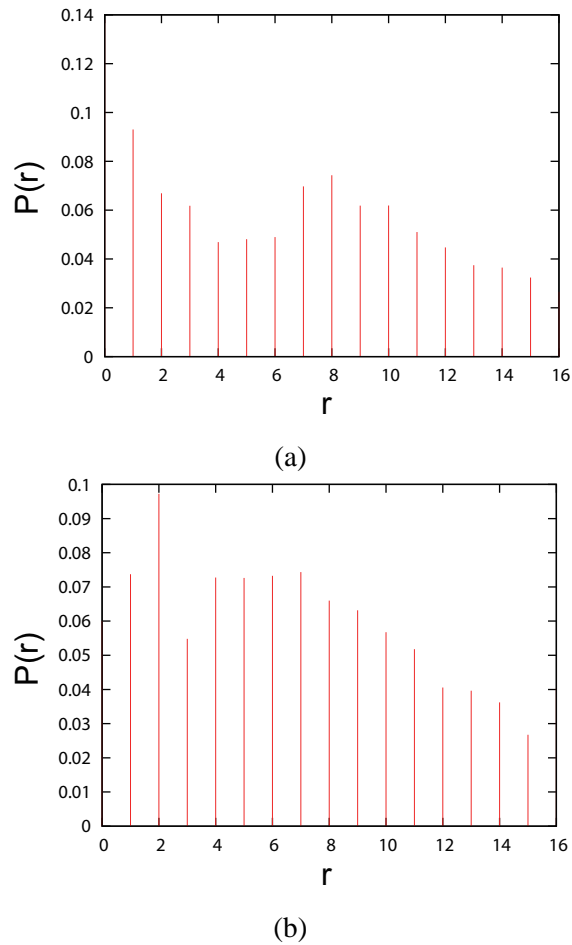


図 4.18: ホタテガイ画像とその他の画像によるフーリエ特徴  $P(r)$  の結果例. (a) ホタテガイ画像 (対象画像は図 4.16(a)). (b) その他の画像 (対象画像は図 4.17(a)).

Results of fourier feature  $P(r)$ .

差  $Hue_{\sigma}$  が最小の領域をホタテガイ領域とする. これは, ホタテガイは殻の開閉のため個体同士が重ならない (3.1 節) ためであり, 色彩特徴 (4.3.2 節) に基づいたものである.

## 4.4 実験と結果

### 4.4.1 実験方法

実験には, 認識可能領域においてサイズ  $128 \times 128$  に切り出されたホタテガイを含む画像 (ホタテガイ画像) 28 枚, ホタテガイを含まない画像 (その他の画像) を 104 枚用いた. ホタテガイ画像において, ホタテガイの上に砂が覆われていないものを “normal”, 砂に覆われているものを “covered” とする. ホタテガイ画像 28 枚のうち, “normal” が 19 枚 19 個体, “covered” は 9 枚 10 個体であった.

実験の評価方法は以下のとおりである. 提案システムにより検出された領域のうち, ホタテガイ領域を正しく検出された数を  $TP$ , 未検出のものを  $TN$  とする. また, ホタテガ

イ以外の領域が検出された数を  $FP$  とする. ここで, ホタテガイの数を  $N_{scallop}$  とするとき, 検出率  $R_{TP}$ , 未検出率  $R_{TN}$ , 誤検出率  $R_{FP}$  をそれぞれ,

$$R_{TP} = \frac{TP}{N_{scallop}} \cdot 100[\%], \quad (4.16)$$

$$R_{TN} = 100 - R_{TP}[\%], \quad (4.17)$$

$$R_{FP} = \frac{FP}{TP + FP} \cdot 100[\%], \quad (4.18)$$

と定義する.

また実験の結果に基づき, 資源量調査における精度を 3.4.4 節の評価法を用いて考察する.

#### 4.4.2 実験結果

ホタテガイ検出の処理の流れを図 4.19 と図 4.20 に示す. ホタテガイ画像においては, 形状特徴だけでは複数のホタテガイ候補領域が抽出され (図 4.19(b)), ホタテガイを特定することができない. しかし, 色彩特徴と肋模様特徴により正しくホタテガイ領域を検出されている (図 4.19(c)). その他の画像においては, 形状特徴だけでは礫部分に複数のホタテガイ候補領域が抽出されているが, 色彩特徴と肋模様により正しく判別されている.

ホタテガイ領域の検出結果例を図 4.21 に, 実験結果を表 4.2 に示す. 図 4.21 より, 正しくホタテガイが検出されているのがわかる. 表 4.2 よりホタテガイの検出率は, “normal” で  $R_{TP} = 95\%$ , “covered” で  $R_{TP} = 70\%$  であり, 全体で  $R_{TP} = 86\%$  であった. また, 誤検出率は  $R_{FP} = 17\%$  であった.

本実験で得られた結果を用いて, 資源量調査における精度を 3.4.4 節で述べた方法により評価する. ここでは, “normal” のホタテガイについて考える. 実験結果より  $a = 18, b = 1$  であるとき, 検出率の分散  $\sigma_Y^2$  は式 3.3 より,

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2 &= \frac{18 \cdot 1}{(18 + 1)^2(18 + 1 + 1)} \\ &= 0.002493, \end{aligned}$$

である. ここで  $R_{TP} = 0.9474$  であるとき, 提案手法により得られる個体密度の平均値  $\mu_Z$ , 分散  $\sigma_Z^2$  は, 式 3.5, 式 3.5 より,

$$\begin{aligned} \mu_Z &= 5.439 \cdot 0.9474 \\ &= 5.125, \\ \sigma_Z^2 &= 0.9474^2 \cdot 0.1183^2 + 5.439^2 \cdot 0.002493^2 \\ &= 0.08631, \end{aligned}$$

である. このとき変動係数  $CV_Z$  は,

$$\begin{aligned} CV_Z &= \frac{\sqrt{0.08631}}{5.125} \cdot 100 \\ &= 5.7 [\%], \end{aligned}$$

である。システムによって調査された画像数  $n' = 1000, 2000$ , 定数  $C = 30$  としたときの変動係数  $CV_{X'}$  の結果を表 4.3 に示す。表 4.3 より, 画像数  $n' = 1000$  のとき  $CV_{X'} = 2.2\%$ , 画像数  $n' = 2000$  のとき  $CV_{X'} = 1.8\%$  であった。

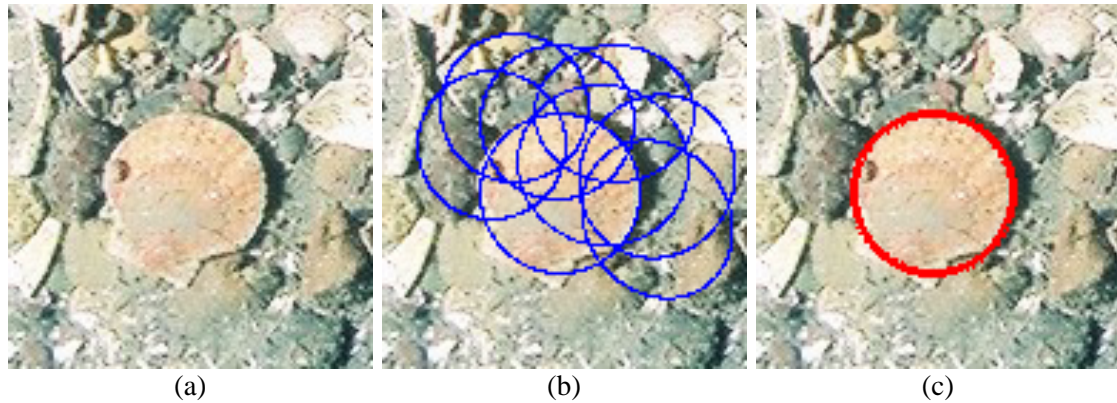


図 4.19: 礫場環境のためのホタテガイ検出手法によるホタテガイ画像からの検出の流れ. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出.

Actual process using proposed method to detect scallop for gravel field: Object image is (a), extracted image of the scallop candidate areas is (b), and result image is (c).

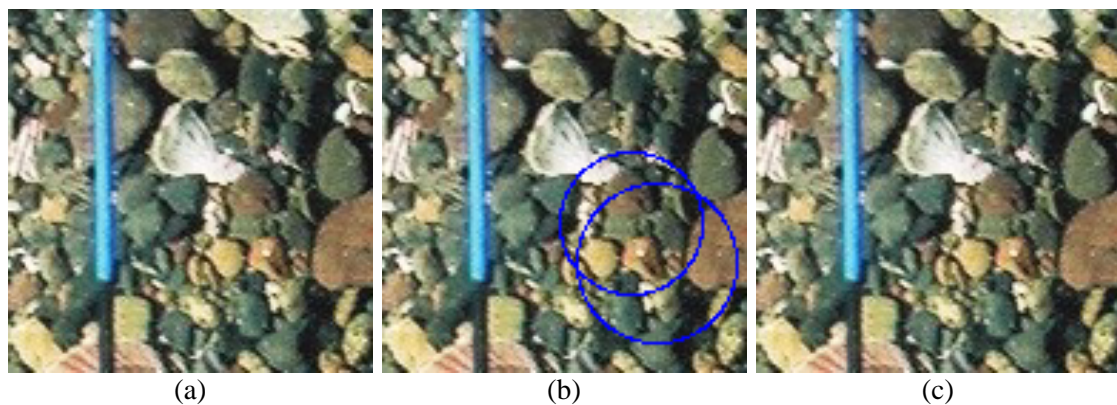


図 4.20: 礫場環境のためのホタテガイ検出手法によるその他の画像からの検出の流れ. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出.

Actual process using proposed method to detect scallop for gravel field: Object image is (a), extracted image of the scallop candidate areas is (b), and result image is (c).

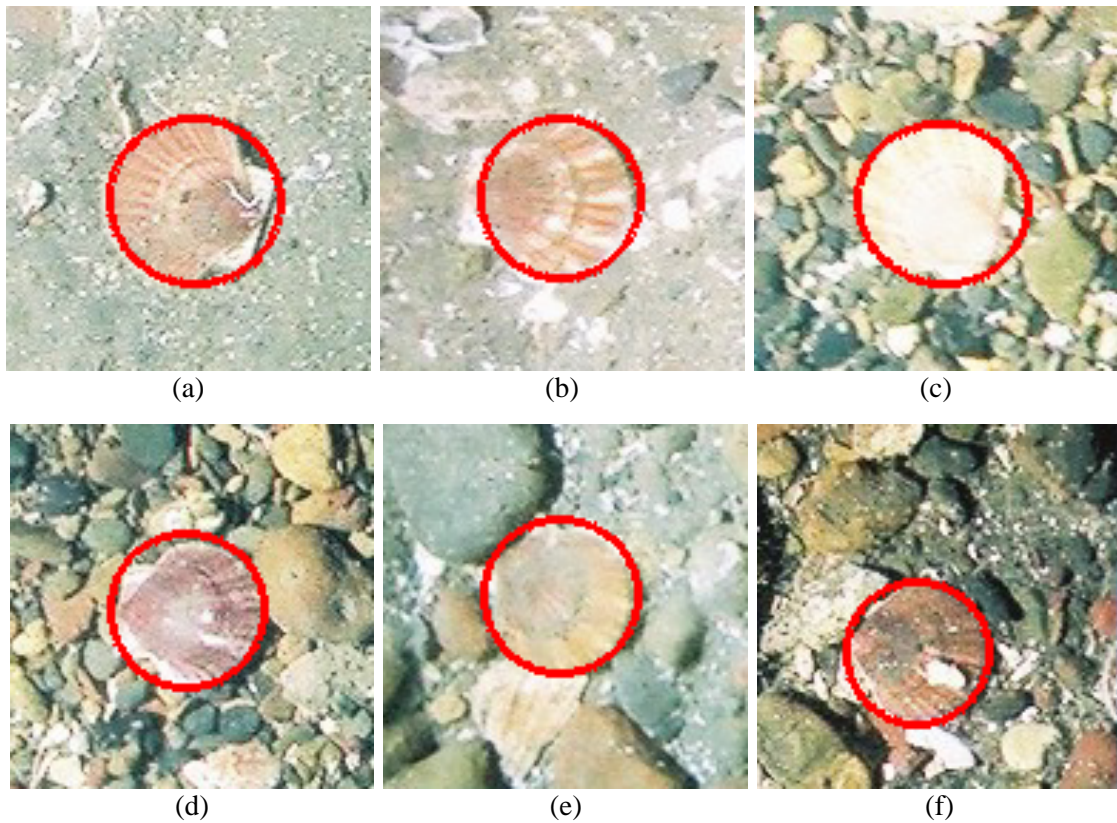


図 4.21: 礫場環境のためのホタテガイ検出手法によるホタテガイ検出例 (対象画像は図 4.1) .

Samples of the detected scallop in the gravel field. Object images are those in Figs. 4.1.

表 4.2: 4.4 節の実験結果.

Experiment results in Sect. 4.4. Clear scallop is “normal”, and scallop covered with something is “covered”.

	ホタテガイ画像		その他の画像
	“normal”	“covered”	
画像数	19	9	104
ホタテガイ数	19	10	0
正検出	18 (95 %)	7 (70 %)	86 (83 %)
誤検出	1 (5 %)	3 (30 %)	18 (17 %)
検出率	25(86 %)		



表 4.3: 4.4 節の実験における資源量推定精度評価結果.

Evaluation results in Sect. 4.4.			
a	b	$n'$	$CV_{X'}$
540	30	1000	2.2 %
		2000	1.8 %

## 4.5 考察

礫場環境下のホタテガイ検出のために、形状特徴、色彩特徴、肋模様特徴を提案し、海底画像を用いてその有効性を検証した。図 4.19(b) より、形状特徴のみではホタテガイ候補領域が多数抽出されるため、ホタテガイ領域を判別することができない。また図 4.20(b) では、ホタテガイ領域以外の領域が多数抽出されている。図 4.19(c) と図 4.20(c) より、これらのホタテガイ候補領域に対して色彩特徴と肋模様特徴を用いることで正しく検出されていることがわかる。4.4 節の実験では、ホタテガイ領域の未検出やホタテガイ以外の領域の誤検出などもみられた。ホタテガイ領域の未検出例を図 4.22 に、その他の領域の誤検出例を図 4.23 に示す。図 4.22 では、2 個体のホタテガイが砂に覆われているため、色彩特徴や肋模様が得られず、ホタテガイ領域と判別できなかった。また図 4.23 では、赤い礫がホタテガイ領域として検出されている。

画像工学の観点から本手法を評価する。専門家による海底画像からのホタテガイ計測精度は 95% といわれている。提案手法は、表 4.2 より、“normal” なホタテガイの検出率が 95% と専門家による計測と同等の精度であった。また、Dawkins の手法においては、同様の礫場環境下の結果がないため正確に比較することはできないが、論文中で *Rocky background* とされている粗礫場においては検出率 92.04% であった [9]。ただし細礫場においては様々な色彩や形状の礫が含まれていないため、この手法が本研究で対象としている礫場環境には対応できないと考えられる。このため提案手法は、礫場環境下において十分な精度である。

また 4.4 節の実験結果に基づき、資源量推定の精度について検証した。表 4.3 より画像数  $n' = 1000$  のとき  $CV_{X'} = 2.2\%$ 、 $n' = 2000$  のとき  $CV_{X'} = 1.8\%$  と従来の調査精度より高精度な推定が可能であった。従来の画像数 583 枚に対して、実際に自動計測が可能であるならば画像数 2000 枚を取得し調査を行うことは、現在の撮影技術でも可能である。このため、本手法は資源量推定においても十分な精度である。一方で誤検出率が 17% であったが、検出率と誤検出率の和が 1 を超えるため、過剰に検出される可能性がある。この問題については検出率が十分な精度であるため、手法の改善により誤検出率を減らすことで解決できると考えられる。

また本手法は、形状特徴で用いた楕円検出 Hough 変換により得られた楕円パラメータから、資源量調査の際に成長度合いを把握するために必要となるホタテガイの殻長などのサイズ計測が可能である。従来の資源量調査においてはサイズの計測なしの計数期間が 10 日であるため、計数と計測を同時に行うことでより計測期間の短縮が見込まれる (2.1.4 節)。



本章では、礫場環境下において形状特徴、色彩特徴、テクスチャ特徴を用いてホタテガイを検出した。礫場環境下において表在性底生生物は礫の上にいることから、対象の形状や色彩、模様などを確認することが可能であり、ホタテガイ以外の表在性底生生物などへの応用が可能であると考えられる。例えば海底画像に同じく含まれているイトマキヒトデ (*Patiria pectinifera*) [59] とマヒトデ (*Asterias amurensis*) [57] の例を図 4.24 に示す。図 4.24 より、イトマキヒトデやマヒトデも輪郭の形状や色彩、模様などを確認することができる。ホタテガイ養殖のための資源量調査では、外敵であるヒトデ類によるホタテガイへの影響の把握も求められている。これに対して、それぞれのヒトデに対してホタテガイと同様にモデル化することで自動計測が可能となり、提案する自動計測システムの一部として組み込むでより詳細な観測が期待できる。

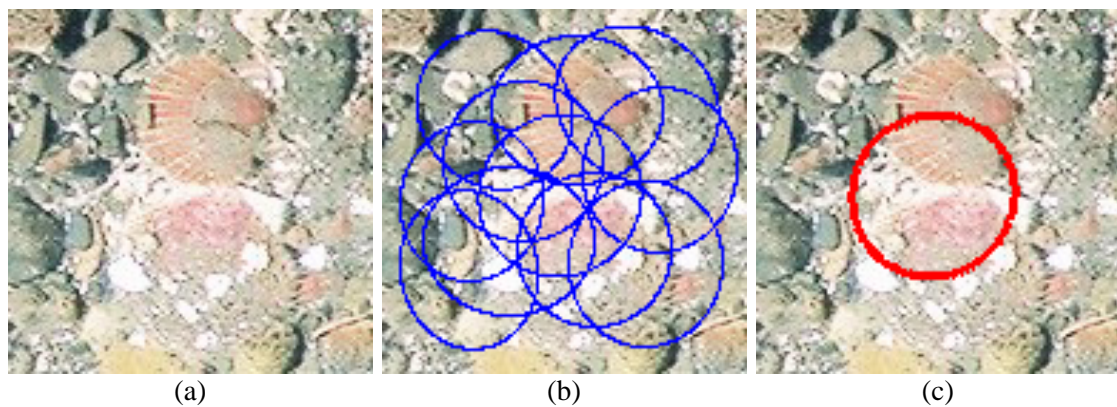


図 4.22: 4.4 節の実験におけるホタテガイ領域の未検出・誤検出の例. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出.

Examples of error in scallop area: Object image is (a), extracted image of the scallop candidate areas is (b), and result image is (c).

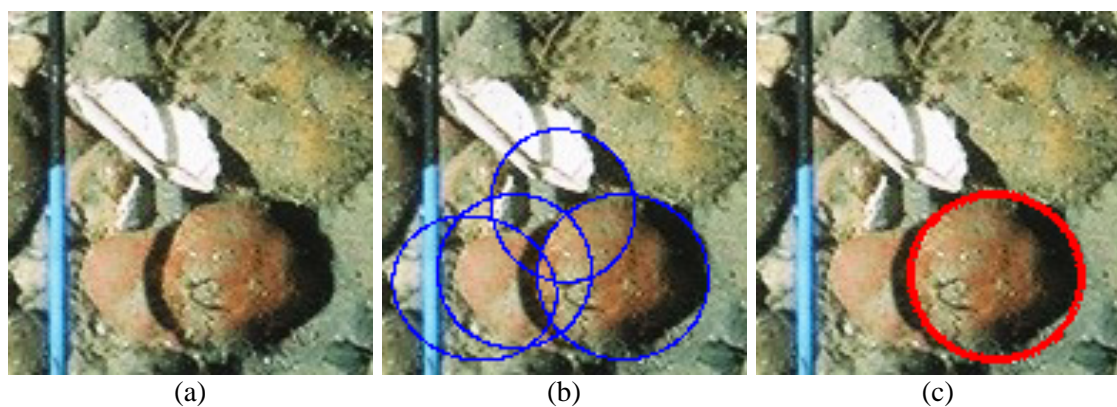


図 4.23: 4.4 節の実験におけるその他の領域の誤検出の例. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出.

Examples of error in other area: Object image is (a), extracted image of the scallop candidate areas is (b), and result image is (c).

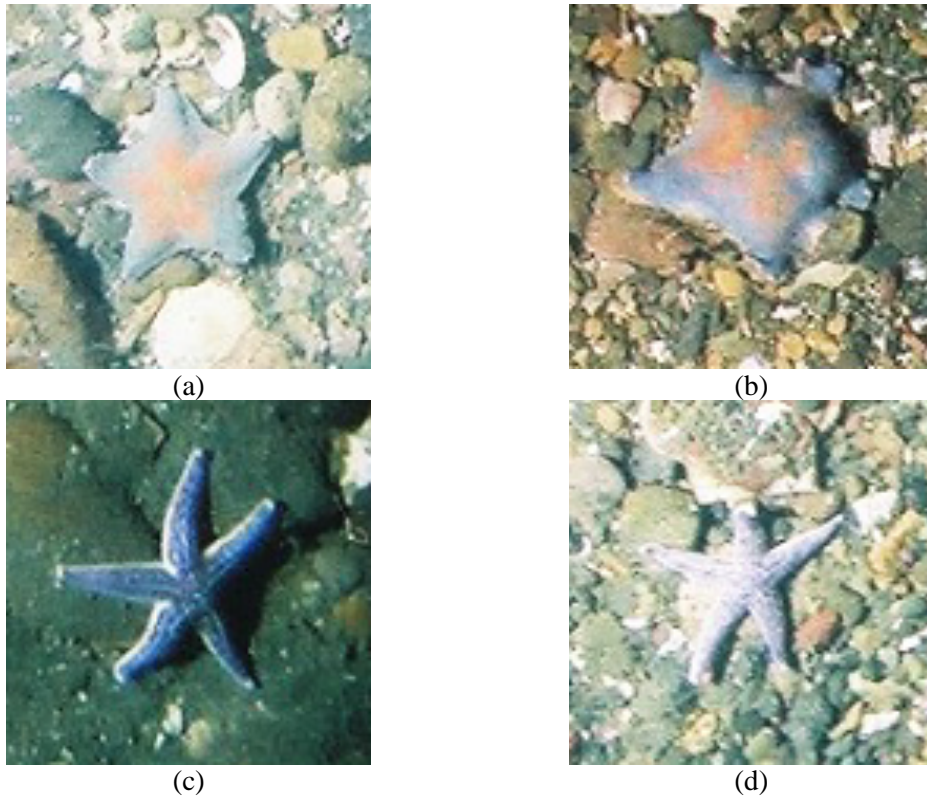


図 4.24: 海底画像におけるイトマキヒトデとマヒトデ (サイズ : 128 × 128) . (a), (b) : イトマキヒトデ (c), (d) : マヒトデ

*Patiria pectinifera* and *Asterias amurensis* in seabed seabed image.

## 第5章 砂場環境のためのホタテガイ検出手法

本章では、まず5.1節で砂場環境下の海底画像におけるホタテガイ検出手法を提案する。つぎに海底画像(3.2.2節)を対象として、前処理を5.2節で、ホタテガイの検出手法を5.3節で詳説し、5.4節で海底画像を用いた評価実験を行う。5.5節で、海底動画に対して提案手法を適用した結果を示す。また、5.6節で海底動画によるホタテガイ自動計測システムに向けた応用例について紹介し、5.7節で本章の考察を述べる。

### 5.1 提案手法

#### 5.1.1 砂場環境とホタテガイ

ホタテガイは、礫場環境下では礫の上に生息し、海底画像から殻などの視覚的特徴を確認することができる(4.1.1節)が、砂場環境下ではほとんどが砂に覆われている(3.1節)。砂場環境のうち、北海道常呂で撮影された海底画像のホタテガイ領域の例を図5.1に、北海道野付沖で撮影された海底動画の同領域の例を図5.2に示す。両海域ともホタテガイは、確認できる殻縁領域の大きさに差はあるが、共通して殻縁は白色であり、殻は砂に覆われている(図5.1, 図5.2)。これらの特徴は、*HabCamII*で撮影された画像でも同様である[9,10]。ただし北海道野付沖のホタテガイには、図5.2(a)~(c)では一部の、図5.2(d)~(f)では大半の左殻部には藻が付着していることがわかる。これは、撮影された海域を含む一部でみられるものである。

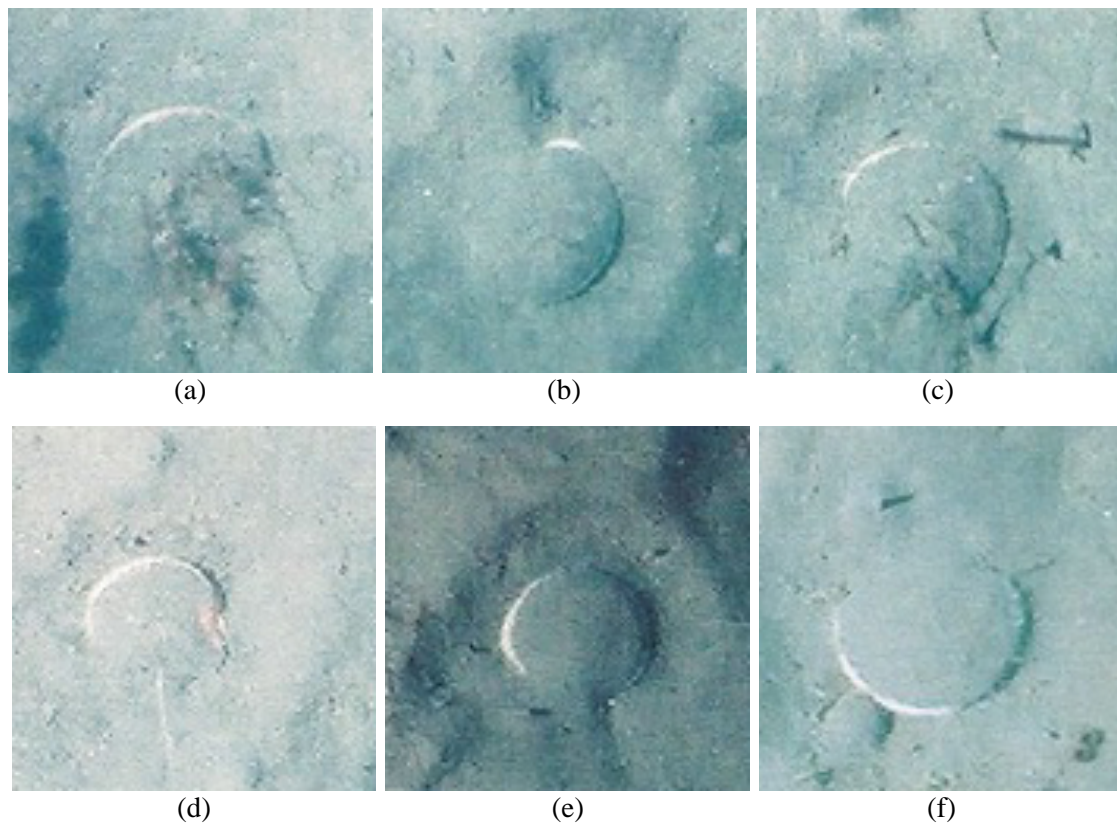


図 5.1: 砂場環境下の海底画像におけるホタテガイ領域の例.  
Scallop area images in the seabed image of sand field (size:128 × 128).



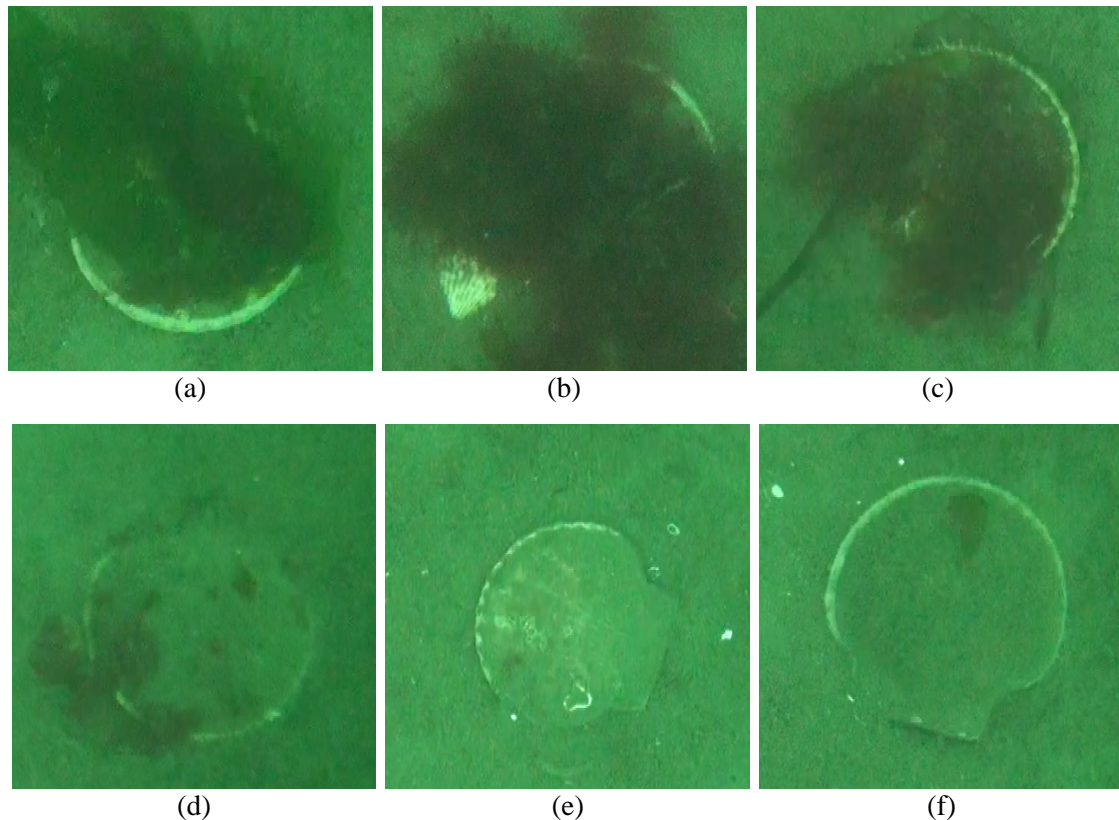


図 5.2: 砂場環境下の海底動画におけるホタテガイ領域の例.  
Scallop area images in the seabed video of sand field (size:450×450).

### 5.1.2 提案手法

砂場環境のためのホタテガイ検出手法を提案するにあたり、ホタテガイ領域において、図 5.3 に示すように殻縁領域と殻領域を定義する。殻縁はホタテガイ殻の縁の領域であり、砂場環境下において、その一部は砂に覆われない (3.1 節)。本研究ではホタテガイ領域において、殻縁領域を砂に覆われていない白色の領域とし、それ以外の領域を殻領域とする (図 5.3)。

砂場環境の海底画像におけるホタテガイ領域から、以下のような特徴を確認できる。

- 白色で弧の形状な殻縁
- 砂に覆われた殻

本研究では、これらの特徴を形状特徴、殻縁特徴、殻特徴とし、砂場環境下のためのホタテガイ領域の検出手法を提案する。提案するホタテガイ検出手法を図 5.4 に示す。まず前処理では、平滑化処理とフレーム除去した後、礫場環境下のための手法 (4.2.1 節) と同様に認識可能領域を抽出する。つぎに、殻縁領域の白色画素を殻縁画素とし、殻縁候補画素の抽出する (5.3.1 節)。得られた候補画素群から形状特徴により、ホタテガイ候補領域を抽出する (5.3.2 節)。得られた候補領域から殻縁特徴と殻特徴を用いてホタテガイ領域を

判別し，検出する（5.3.3 節）．ただし前処理（5.2 節）とホタテガイ検出（5.3 節）については海底画像を対象として詳説する．

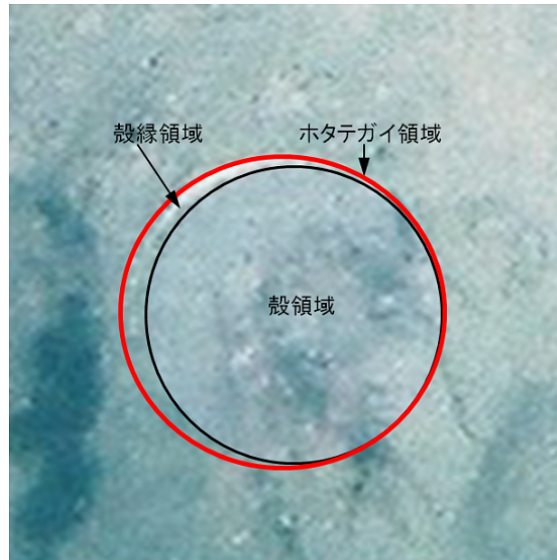


図 5.3: 砂場環境下におけるホタテガイ領域の定義（元画像は図 5.1(a)）．  
Definition of scallop area in the sand field.

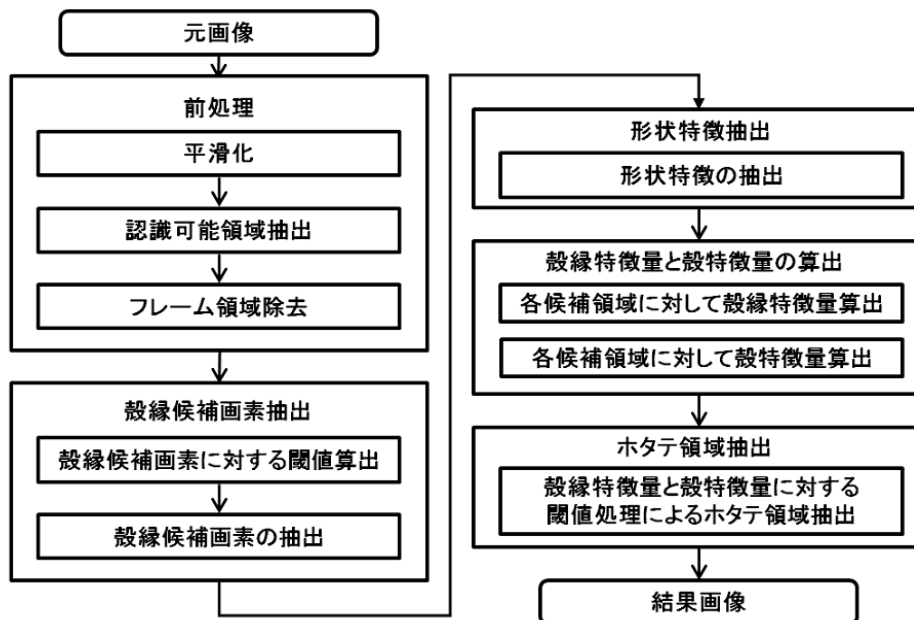


図 5.4: 砂場環境下のためのホタテガイ検出手法．  
Proposed method for the sand field.

## 5.2 前処理

### 5.2.1 平滑化

砂場環境において、対象画像の背景は粗砂や細砂などの砂の粒度によって背景が大きく異なり、ノイズを多く含むことから、ホタテガイ領域の特徴を失うことなく平滑化する必要がある。特に砂場環境下のホタテガイは、殻縁部以外は砂に覆われているため、殻縁領域が失われてはならない。そこで、対象画像の平滑化手法として、Mean-Shift フィルタ、Median フィルタ、Gaussian フィルタを比較を最適な手法を検討する。

Mean-Shift フィルタはエッジ情報を保持したまま平滑化する手法である [60, 61]。ここで、色情報  $r$  と空間情報  $s$  に対するカーネル幅を  $(h_r, h_s)$  とする。本研究では、カーネル幅  $(h_r, h_s) = (20, 15)$  とした。Median フィルタは、注目画素を局所領域内すべてのピクセル値の中間値とする平滑化手法である。本研究では、Median フィルタのウインドウサイズを  $3 \times 3$  とした。Gaussian フィルタは、ガウス関数に従って重みが決定される線形平滑化フィルタである。本研究では、Gaussian フィルタのウインドウサイズを  $3 \times 3$  とした。

平滑化手法の比較には、ホタテガイを含むサイズ  $128 \times 128$  の画像 3 枚を用いた。図 5.5(a1)～(a3)に元画像を、図 5.5(b1)～(d3)に Mean-Shift フィルタ、Median フィルタ、Gaussian フィルタによる平滑化の結果を示す。Mean-Shift フィルタは、殻縁領域を失うことなく砂の領域のみ平滑化されている（図 5.5(b1)～(b3)）が、Median フィルタおよび Gaussian フィルタは、砂の領域だけでなく殻縁領域も平滑化されていることがわかる（図 5.5(c1)～(c3), (d1)～(d3)）。

本研究では、平滑化処理に Mean-Shift フィルタリングを用いることとする。海底画像に対する Mean-Shift フィルタリングによる平滑化結果を図 5.6 に示す。図 5.6 から、ホタテガイの形状を失うことなく砂の領域は平滑化されているのがわかる。



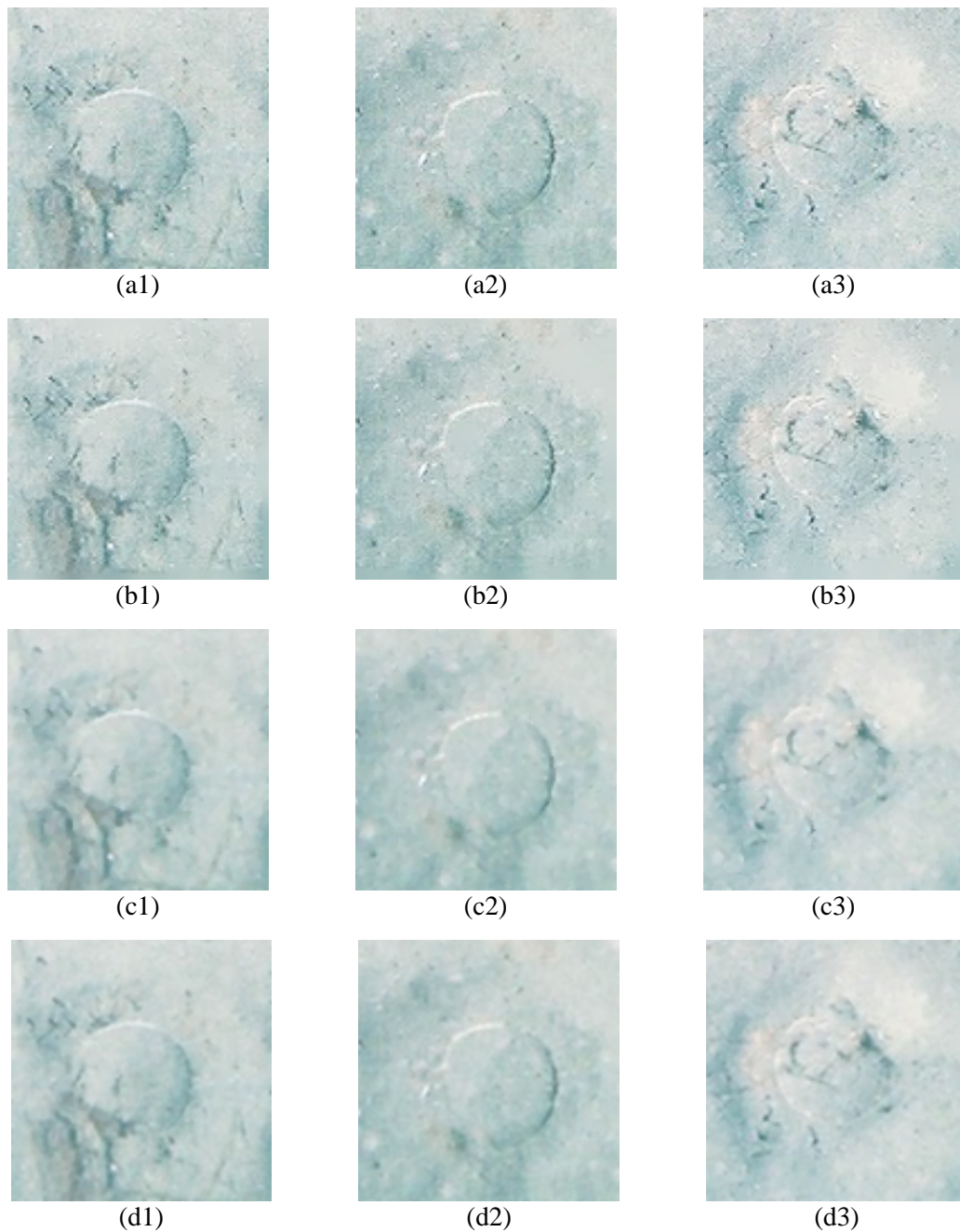


図 5.5: 平滑化手法の比較実験結果. (a1)~(a3): 元画像 (b1)~(b3): Mean-Shift フィルタの実験結果 (c1)~(c3): Median フィルタの実験結果 (d1)~(d3): Gaussian フィルタの実験結果

Results of smoothing using Mean-Shift, Median, and Gaussian filtering. Object images are (a1)–(a3). Result images of Mean-Shift filtering are (b1)–(b3). Those of Median filtering are (c1)–(c3), and those of Gaussian filtering are (d1)–(d3).

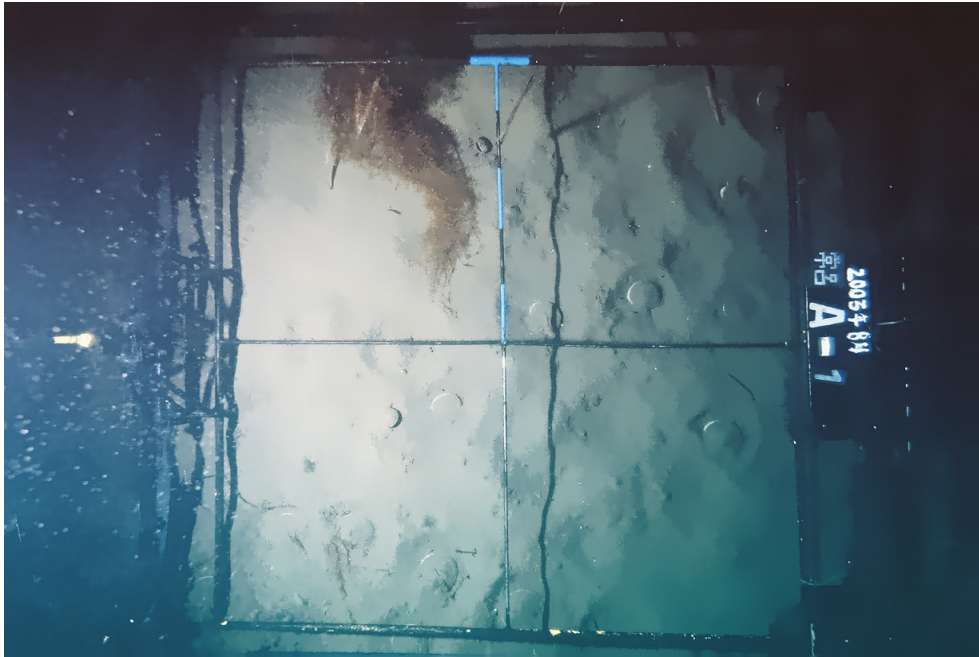


図 5.6: Mean-Shift フィルタリングによる平滑化結果（対象画像は図 3.8）.  
Result of smoothing using Mean-Shift filtering. Object image is that in Fig. 3.8.

## 5.2.2 フレーム除去

対象画像中には、撮影機材のフレームが含まれている（図 3.8）。フレームは黒色であり、画像中の中央から上方にかけては一部青色に塗装されている。また撮影時の照明により、フレームの一部が反射することがある。フレームとデジタルカメラは固定されているため、画像内のフレーム領域の大きさはほぼ一定であるが、位置は不安定である（3.2 節）。このため本研究では画像内のフレームサイズを既知とし、フレーム領域の除去を行う。

フレーム除去処理は、フレーム中で特徴的な領域をテンプレートとしたテンプレートマッチングにより行う。テンプレート画像を図 5.7 に示すテンプレート画像は、海底画像中からフレームの中央上部（図 5.7(a)）と中央部（図 5.7(b)）から切り出して用いた。ただし、テンプレート画像中の白領域は、マッチングの際に比較しない領域とする。テンプレートマッチングによって得られたフレームの中央上部と中央部の座標から、既知である画像中のフレームサイズに従い、その中央と周辺領域の除去する。ただし、テンプレートマッチングにおける評価には RGB 値に対する二乗誤差和（SSD: Sum of Squared Difference）を用いた。ここで元画像  $I$ 、大きさ  $(W, H)$  のテンプレートを  $I_{local}$  ( $I_{local} \subset I$ )、テンプレートの座標  $(i, j)$  に対応する画素値を  $T(i, j)$ 、これに対応する元画像の画素値を  $I(i, j)$  とするとき、二乗誤差和  $R_{SSD}$  は、

$$R_{SSD} = \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} (I(i, j) - T(i, j))^2, \quad (5.1)$$

で定義される。

フレームの除去結果を図 5.8 に示す. 図 5.8 より, フレーム領域を正しく除去できていることがわかる.



図 5.7: フレーム除去のためのテンプレート領域 (画像サイズ:  $64 \times 64$ ). (a): フレームの中央上部. (b): フレームの中央部.

Template images (size:  $64 \times 64$ ). In metallic frame, part of top center is (a) and of middle is (b). White areas are not compared with object image.



図 5.8: フレーム除去結果 (対象画像は図 5.6).

Result of removing metallic frame area. Object image is that in Fig. 5.6.

### 5.2.3 認識可能領域の抽出

砂場環境の海底画像においても、礫場環境と同様に撮影時の照明による照度差が大きく、十分な照度が得られていない領域がある。礫場環境におけるホタテガイ検出の前処理として、認識可能領域を定義した(4.2.1節)が、砂場環境においてもほぼ同様の領域を用いることとする。しかし、礫場環境の画像の局所領域では、様々な礫やホタテガイが含まれるため輝度値の分散が大きくなると仮定した(4.2.1節)が、砂場環境のほとんどの領域は砂であるため、この仮定は成り立たない。このため、砂場環境における認識可能領域を以下のように定義する。

大きさ  $(M, N)$  の画像  $I$ 、大きさ  $(W, H)$  で画像  $I$  中の局所領域を  $I_{local}$  とする ( $I_{local} \subset I$ )。局所領域  $I_{local}$  に対して、輝度値の平均値  $L_{\mu}$  を求め、閾値  $Th_L \leq L_{\mu}$  を満たすとき、認識可能領域とする。この処理を、局所領域  $I_{local}$  の移動幅  $k$  とし、対象画像  $I$  全体に対して行う。本研究では、局所領域  $I_{local}$  の大きさ  $(W, H) = (64, 64)$ 、移動幅  $k = 16$ 、輝度値の平均値に対する閾値  $Th_L = 75$  とした。

フレーム除去された画像において、抽出された認識可能領域を図 5.9 に示す。図 5.9 より、対象画像中の照度が十分ではない領域が除去されていることがわかる。

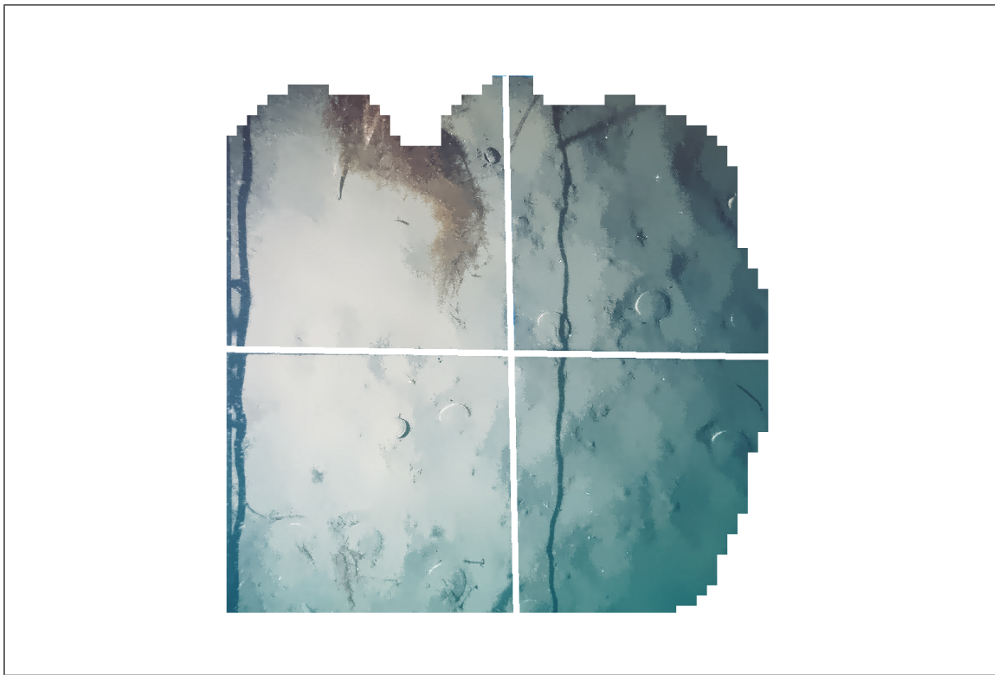


図 5.9: 認識可能領域の抽出結果 (対象画像は図 5.8)。

Result of removing the unrecognizable areas. Object image is that in Fig. 5.8.

## 5.3 ホタテガイ検出手法

### 5.3.1 殻縁候補画素

#### 殻縁候補画素の抽出方法

砂場環境下において、ホタテガイ領域のうち砂に覆われていないのは殻縁領域のみである (5.1.1 節)。殻縁領域は、ホタテガイの個体差はほとんどなく、白色である。このため本研究では、白色の画素を殻縁候補画素として抽出する。砂場環境下の海底画像において、ホタテガイ領域の近傍を見たとき、殻縁領域の白色の画素は砂領域と比較して輝度値が高いため最も明るい領域であると仮定できる。しかし対象画像は照度差が大きく、固定閾値によって抽出するのは困難である。ここでは、可変閾値を用いることで照度差に対応した殻縁候補画素の抽出手法を提案する。

殻縁候補画素を定義するにあたり、大きさ  $(W', H')$  で画像  $I$  中の局所領域  $I_{local'}$  ( $I_{local'} \subset I$ ) を考える。局所領域  $I_{local'}$  が十分に大きく且つ、ホタテガイの殻縁領域が含まれているとき、図 5.11 より、殻縁領域が  $I_{local'}$  を占める割合は小さい。すなわち、局所領域  $I_{local'}$  を占める領域のほとんどは背景である砂領域である。また殻縁領域は白色であるため、局所領域  $I_{local'}$  において、もっとも輝度値の高い領域であるといえる。

これらの特徴から以下のように殻縁候補画素  $SR_c$  を定義する。まず局所領域  $I_{local'}$  における輝度値のヒストグラムを求める。このとき殻縁領域は、ヒストグラムの分布の中で輝度値が高く且つ他の領域分布に含まれず、十分に小さい。ここでヒストグラムの平均値  $L_{\mu'}$ 、標準偏差  $L_{\sigma'}$ 、局所領域の中央座標  $(x'_0, y'_0)$ 、座標  $(x'_0, y'_0)$  に対応する画像  $I$  の座標  $(x, y)$ 、殻縁候補画素とする割合  $p$  としたとき、座標  $(x'_0, y'_0)$  の殻縁候補画素に対する閾値  $Th_{SR}(x'_0, y'_0)$  を、

$$Th_{SR}(x'_0, y'_0) = L_{\mu'} + \lambda L_{\sigma'} \quad (5.2)$$

とする。ただし  $\lambda$  は、ヒストグラムの分布を正規分布としたときに、殻縁候補画素とする割合  $p$  により決定され、正規分布表に従う。また、対象画像の輝度値は 256 階調で与えられるため、もしも閾値の上限値  $Th_{SR_{upper}}$  が、 $Th_{SR_{upper}} < Th_{SR}$  を満たすとき、閾値  $Th_{SR} = Th_{SR_{upper}}$  とする。この閾値  $Th_{SR}(x'_0, y'_0)$  を画像  $I(x, y)$  に対応する閾値とする。この処理を移動幅  $k'$  により画像  $I$  全体に対して行う。このとき、閾値  $Th_{SR}$  は移動幅  $k'$  の間隔が空くため、線形補間法により画像  $I$  全体の閾値  $Th_{SR}$  を決定する。輝度値  $I(x, y)$  が

$$Th_{SR}(x, y) \leq I(x, y) \quad (5.3)$$

を満たすとき、殻縁候補画素  $SR_c$  とする。

#### 予備実験

ホタテガイの殻縁候補画素を検出するための、可変閾値処理に際して局所領域の大きさに対するパラメータ  $(W', H')$  の最適な値を決定するために予備実験を行った。

予備実験では、海底画像から 4 個体のホタテガイを含むサイズ  $400 \times 400$  の領域をトリミングし、用いた。実験に使用した画像を図 5.10 に示す。パラメータ  $(W', H')$  として、 $(32, 32)$ 、



(64, 64), (128, 128), (256, 256) を用いた。また移動幅  $k' = 16$ , 閾値の上限値  $Th_{SR_{upper}} = 245$ , 殻縁候補画素の割合を  $p = 0.01$  とし,  $\lambda$  は 2.326 として与えられる。

予備実験の評価は以下のように行う。対象画像から提案手法によって抽出された殻縁候補画素の数を  $S_{total}$ , 抽出された画素のうち殻縁画素の数を  $S_{rim}$  とする。このとき, 抽出率  $E_{(W', H')}$  を,

$$E_{(W', H')} = \frac{S_{rim}(W', H')}{S_{total}(W', H')} \quad (5.4)$$

と定義する。

パラメータ  $(W', H')$  による殻縁画素抽出率の比較結果を表 5.1 に示す。表 5.1 より  $(W', H') = (64, 64)$  のとき, もっとも抽出率が高いことがわかる。また,  $(W', H') = (128, 128), (256, 256)$  のとき, 抽出される殻縁候補画素の数は多いが, これに含まれる殻縁画素の数は少なく, 抽出率も低い。このため本研究では, パラメータ  $(W', H')$  を  $(64, 64)$  とする。

予備実験に用いたホタテガイ領域の画像を図 5.11 に, 画像の輝度ヒストグラムと可変閾値処理により決定された閾値  $Th_{SR}$  の例を図 5.12 に示す。図 5.12 より, それぞれの領域の照度に応じて閾値が決定されている。つぎに海底画像に対する閾値マップの例を図 5.13 に, 殻縁候補画素の抽出結果例を図 5.14 に, ホタテガイ領域の殻縁候補画素の抽出例を図 5.15 に示す。図 5.13 より, 画像内の照度に合わせて閾値が決定されているのがわかる。また図 5.14 と図 5.15 からホタテガイの殻縁領域が抽出されているのがわかる。



図 5.10: 5.3.1 節の予備実験に用いる対象画像。  
Object image for the preliminary experiment in Sect. 5.3.1.

表 5.1: パラメータ  $(W', H')$  による殻縁画素抽出率変化の比較結果.

Comparison results of localized region parameters  $(W', H')$

パラメータ $(W', H')$	殻縁候補画素	その他	抽出率 $E$
(32, 32)	142	1578	0.083
(64, 64)	169	1612	0.095
(128, 128)	124	2232	0.053
(256, 256)	91	2126	0.041



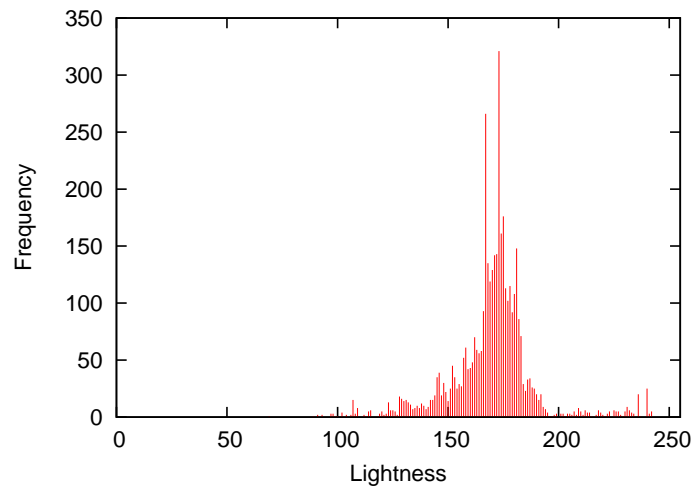
(a)



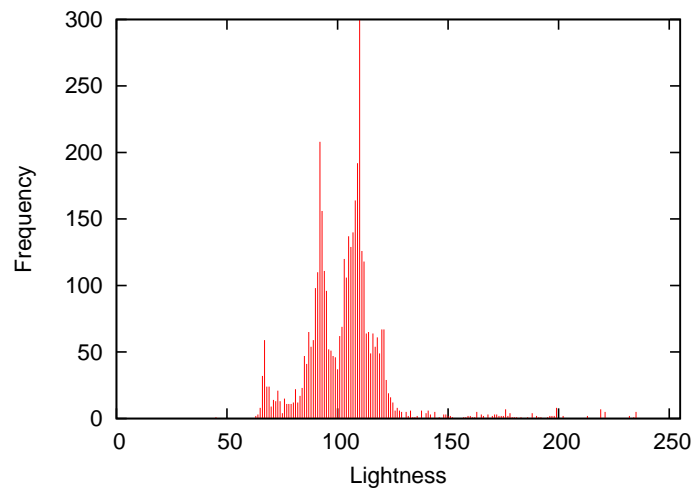
(b)

図 5.11: 5.3.1 節の実験に用いる砂場環境下のホタテガイ領域の画像.  
Object images in sand fields.





(a) Threshold  $Th_{SR} = 214$ .



(b) Threshold  $Th_{SR} = 149$ .

図 5.12: 輝度ヒストグラムと閾値  $Th_{SR}$  の結果例 (対象画像は図 5.11) .  
Lightness histogram and threshold  $Th_{SR}$  of object images. Object images are those in  
Figs. 5.11.

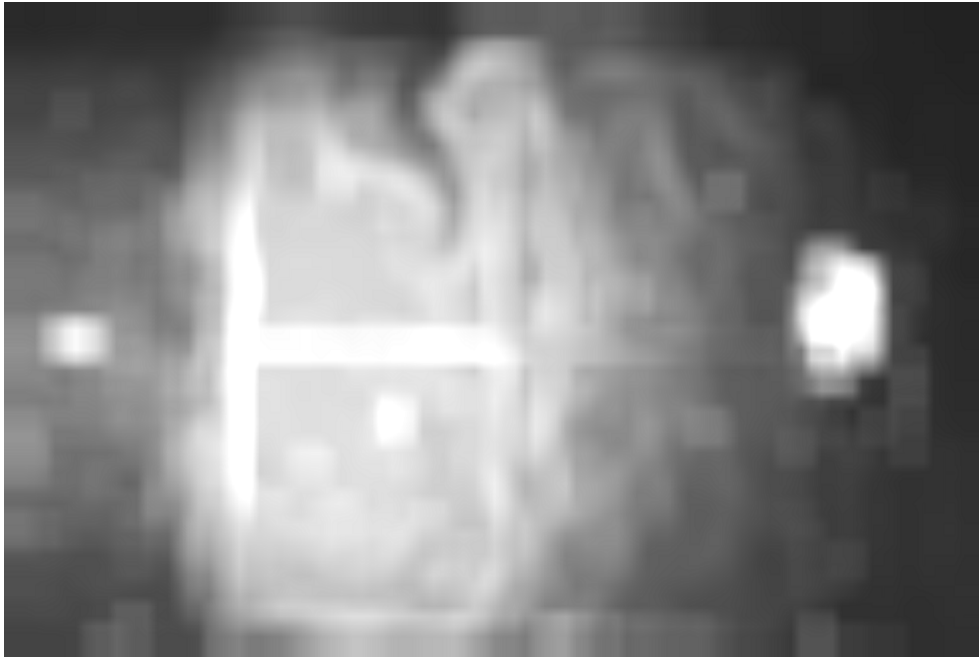


図 5.13: 海底画像の可変閾値  $Th_{SR}$  の結果例 (対象画像は図 5.6) .  
Results of threshold  $Th_{SR}$  in seabed image. Object image is that in Fig. 5.6.



図 5.14: 殻縁候補画素の抽出例 (対象画像は図 5.6) . ただし, 白画素を殻縁候補画素とする.

Results of candidate pixels of shelly rim. Object image is that in Fig. 5.6. White pixels are candidate pixels of shelly rim.



図 5.15: ホタテガイ領域における殻縁候補画素の抽出例（対象画像は図 5.11）。  
Results of the candidate pixels of shelly rim in the scallop area. The object images are  
Figs. 5.11.

### 5.3.2 形状特徴

ホタテガイの形状は扇状であり、殻縁はその形状に沿った白色の領域である。このため、5.3.1 節で定義した殻縁候補点は、ホタテガイの殻縁領域内であるとき、殻の形状に沿って存在していると仮定できる。このため本研究では、礫場環境下のためのホタテガイ検出手法と同様にホタテガイの形状を楕円とみなし、楕円検出 Hough 変換を用いてモデル化する。Hough 変換において、特徴点として 4.3.1 節で用いたエッジ点が用いられることが一般的である。しかし砂場環境下では殻縁領域しか確認することができず、殻縁画素はホタテガイの縁に沿って存在している。

そこで本研究では、殻縁候補画素を楕円検出 Hough 変換のための特徴点と定義する。ここで可変閾値処理によって検出されたすべての殻縁候補画素（5.3.1 節）を  $C$ 、1つの殻縁候補画素を  $c(c \in C)$  とする。このとき楕円検出により、もっとも殻縁候補画素  $c$  に沿う楕円が Hough 変換により検出される。

楕円検出 Hough 変換によって検出される楕円とパラメータ空間の関係を図 5.16 に示す。ここで Hough 変換に用いられる半長径  $\alpha$ 、半短径  $\beta$  のパラメータ空間量子化幅を、それぞれ  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$  とする。このとき、対応するパラメータ空間に投票された特徴点は、楕円近傍領域  $Q$  上に存在する。ただし領域  $Q$  は

$$f(x, y, \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}, \beta - \frac{\Delta\beta}{2}) \leq Q \leq f(x, y, \alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}, \beta + \frac{\Delta\beta}{2}) \quad (5.5)$$

とする。楕円近傍領域  $Q$  は、図 5.16 の灰色の領域である。パラメータ空間の投票数は、対応するパラメータの楕円近傍領域  $Q$  に存在する特徴点の数と同値である。形状特徴によって抽出される楕円領域は、Hough 変換の際に特徴点は対応するパラメータ空間に投票されるため、楕円近傍領域  $N$  上に投票数の数だけ殻縁候補画素が含まれる。得られた領域をホタテガイ候補領域とする。

ただし、楕円検出 Hough 変換は 4.3.1 節と同様の楕円関数のパラメータを用いるが、対象となる特徴点は楕円を構成する曲線のうち半分にも満たない。このため、長軸の傾き  $\phi = 0$  とし 4 次元のパラメータ空間に投票することとした。また、楕円パラメータ  $\alpha, \beta$  が

$22 \leq \alpha, \beta \leq 36$ , 楕円率  $\beta/\alpha$  が  $0.85 \leq \beta/\alpha$  を満たすものとし, パラメータ空間量子化幅  $\Delta\alpha, \Delta\beta = 2$  とした.

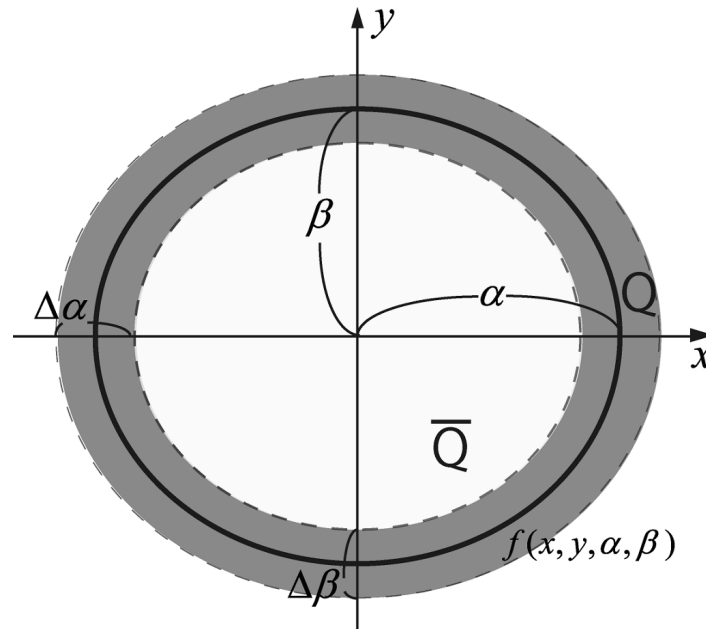


図 5.16: 楕円と近傍領域.  
Definition of the near-field ellipse.

### 5.3.3 ホタテガイ検出

本節では, 5.3.2 節で得られたホタテガイ候補領域において, 新たに殻縁特徴量と殻特徴量を定義し, これを用いたホタテガイ領域の検出手法について述べる. 対象環境は, 粗砂や細砂など砂の粒度によって大きく異なる砂場である. このため, 殻縁候補画素はホタテガイの殻縁領域以外のノイズなども多く含まれている. これは 5.3.1 節の実験結果 (表 5.1) から明らかであり, 可変閾値処理によって抽出されたすべての殻縁候補画素のうち, ホタテガイの殻縁画素であったものは 1% に満たない. このため, 殻縁候補画素は画像中では様々な状態で分布している.

5.3.2 節の手法を用いることで検出されるホタテガイ候補領域のうち, 殻縁候補画素分布の例を図 5.17 に示す. 図 5.17(a) は, 砂場環境下のホタテガイ領域には図 5.1 や図 5.2 に示すように白色の殻縁画素が連続した殻縁領域が存在するため, ホタテガイである可能性が高い. 一方で図 5.17(b) は, 殻縁候補画素の分布が疎であるためホタテガイである可能性は極めて低い. また, 海底画像において図 5.1 より殻縁領域は砂であり, 海底動画では図 5.2 より殻縁領域は砂か藻であるため, 殻縁領域中に殻縁候補画素が含まれることは稀である. 本研究ではこれらの特徴に基づき, 殻縁特徴量と殻特徴量を定義しホタテガイ候補領域からホタテガイ領域を判別し, 検出する.

まず殻縁特徴量を定義する. 楕円の周囲長  $l$ , パラメータ  $D(1 \leq D)$  とする. このとき楕円の弧は  $\frac{l}{D}$  で表される. 楕円近傍領域  $Q$  上のうち, 弧  $\frac{l}{D}$  に含まれる殻縁候補画素の最大

値を  $Num_Q$  とする。このとき、殻縁特徴量  $R_Q$  を、

$$R_Q = \frac{Num_Q}{\frac{1}{D}l}. \quad (5.6)$$

と定義する。

つぎに殻特徴量を定義する。ホタテガイ領域において楕円近傍領域  $Q$  の内側の領域を  $\bar{Q}$  とする (図 5.16)。このとき、領域  $\bar{Q}$  に含まれる殻縁候補画素の数を  $Num_{\bar{Q}}$  とする。このとき殻特徴量  $R_{\bar{Q}}$  を

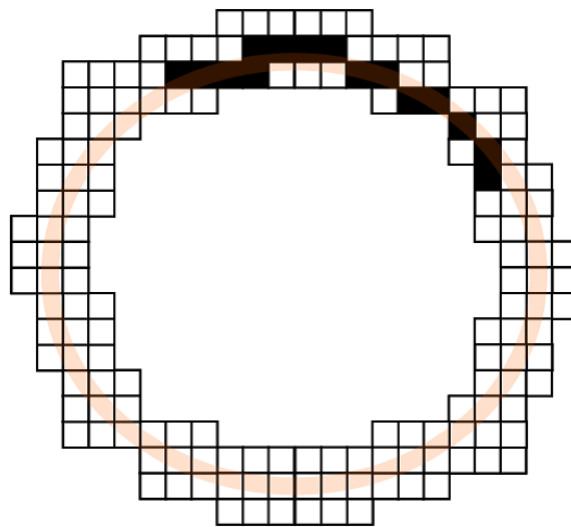
$$R_{\bar{Q}} = \frac{Num_{\bar{Q}}}{\bar{Q}}. \quad (5.7)$$

と定義する。

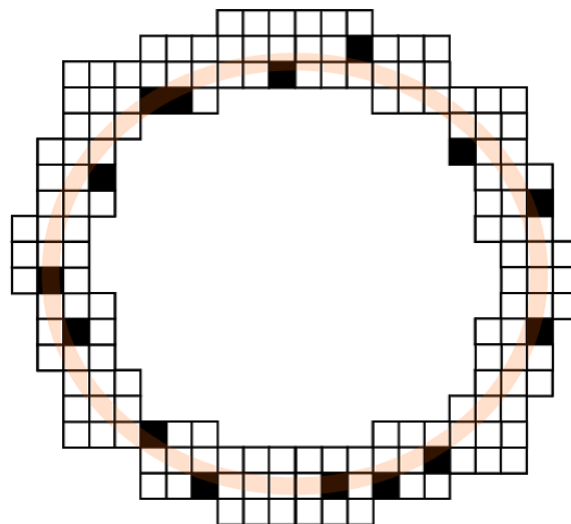
ホタテガイ候補領域のうち、殻縁特徴量  $R_Q$  と殻特徴量  $R_{\bar{Q}}$  が、

$$Th_Q \leq R_Q \cap R_{\bar{Q}} \leq Th_{\bar{Q}} \quad (5.8)$$

を満たすときホタテガイ領域と判別し、検出する。ただし、 $Th_Q$  は殻縁特徴量  $R_Q$  に対する閾値、 $Th_{\bar{Q}}$  は殻特徴量  $R_{\bar{Q}}$  に対する閾値である。



(a)



(b)

図 5.17: 形状特徴により抽出された楕円と殻縁候補画素の分布例（殻縁画素数は15）. (a) 殻縁候補画素群の密度が高い. (b) 殻縁候補画素群の密度が低い.

Distribution of feature points on extracted ellipse. (a) Sample scallop area. (b) Sample noise area.

## 5.4 実験と結果1

本節では、海底画像を対象として砂場環境のためのホタテガイ検出手法の評価実験を行う。

## 5.4.1 予備実験

### 実験方法

5.3.3 節で述べたパラメータ  $D$  および殻縁特徴量に対する閾値  $Th_Q$  の最適値を決定するために予備実験を行った。実験には、ホタテガイが 79 個体含まれる 19 枚の海底画像を用いた。ここでホタテガイのうち、楕円長  $l$  の  $1/8$  以上含まれるものを“clear”とする。本実験で用いた画像に含まれる 79 個体のホタテガイのうち、“clear”なホタテガイは 72 個体であった。

評価方法には 4.4.1 節と同様に検出率  $R_{TP}$ 、未検出率  $R_{TN}$ 、誤検出率  $R_{FP}$  を用いることとする。

本実験では、パラメータ  $D$  を  $D = 2, D = 4, D = 8$  とし、殻縁特徴量に対する閾値  $Th_Q$  を  $0.1 \sim 1.0$  の範囲で  $0.1$  ごとに变化させ、評価した。ただし、殻特徴量に対する閾値は、 $Th_{\bar{Q}} = 0.03$  とした。

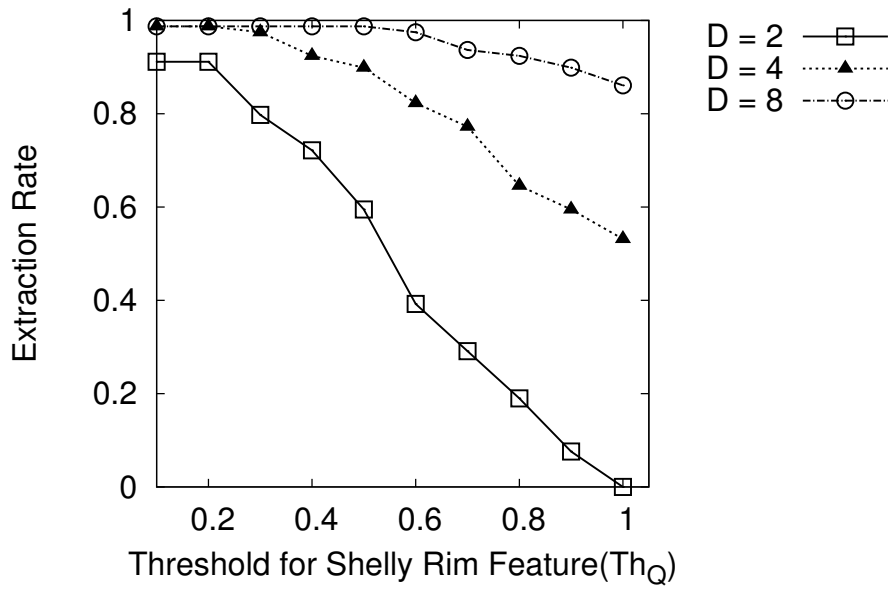
### 実験結果

予備実験の結果を図 5.18 と図 5.19 に示す。パラメータ  $D = 8$  のとき、検出率は他のパラメータよりも高かった (図 5.18) が、誤検出率がすべてのホタテガイに対して  $R_{FP} = 22.8\%$  以上と高い結果 (図 5.19) であった。これに対してパラメータ  $D = 2$  のとき、図 5.18(a) の  $Th_Q = 1.0$  より、殻縁候補画素が連続して楕円長の半分以上含まれる領域は存在しなかった。また、検出率は他のパラメータ値よりも低かった。

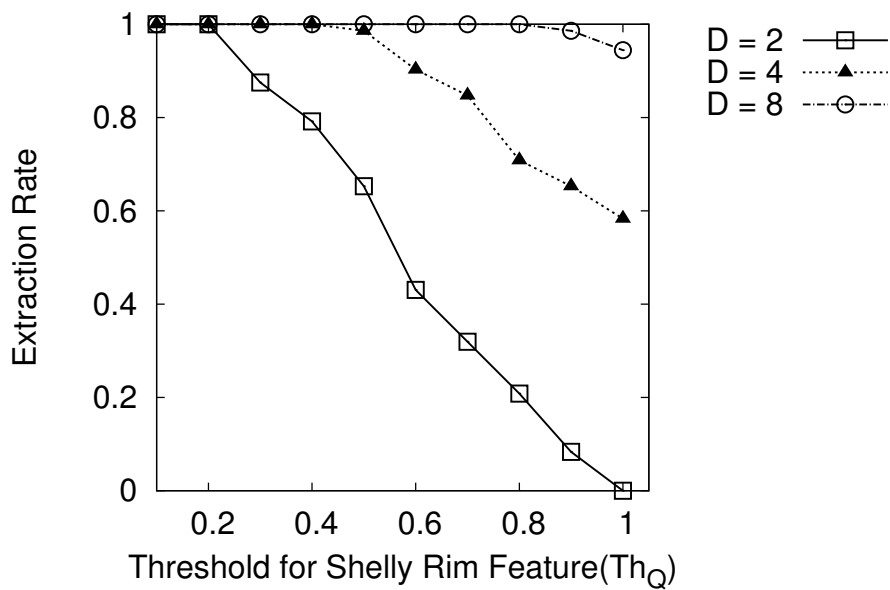
パラメータ  $D = 4$  のとき、検出率は他のパラメータよりも安定しており、誤検出率は  $0.6 \leq Th_Q$  のとき安定していた。また殻縁特徴に対する閾値  $Th_Q = 0.6$  のとき、“clear”なホタテガイの検出率  $R_{TP} = 90.6\%$ 、誤検出率  $R_{FP} = 18.8\%$  であった。

本研究では、パラメータ  $D = 4$ 、殻縁特徴量に対する閾値  $Th_Q = 0.6$  とした。ホタテガイ領域の殻縁特徴量の例を図 5.20 に、その他の領域の殻縁特徴量例を図 5.21 に示す。図 5.20 から、殻縁特徴量  $R_Q$  がホタテガイの殻縁候補画素の分布に従い決定されているのがわかる。一方で図 5.21(b) は死殻の残骸であると思われるが、殻縁特徴量  $R_{SR} = 0.8$  と高い値である。





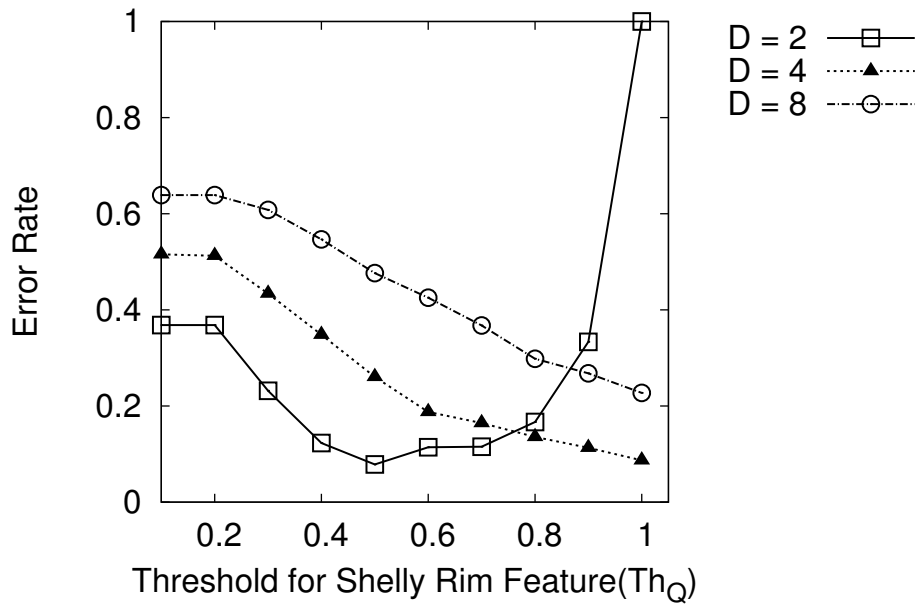
(a)



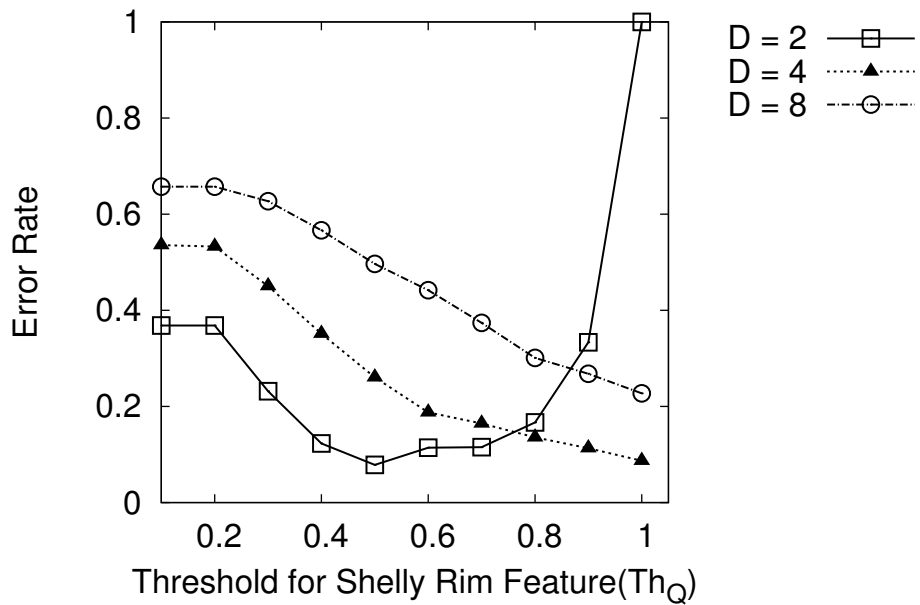
(b)

図 5.18: 5.4.1 節の予備実験における検出率の結果.

Preliminary experimental results of extraction rate in Sect. 5.4.1. (a) Results of all scallops. (b) Results of "clear" scallops.



(a)



(b)

図 5.19: 5.4.1 節の予備実験における誤検出率の結果.

Preliminary experimental results of error rate in Sect. 5.4.1. (a) Results of all scallops. (b) Results of “clear” scallops.

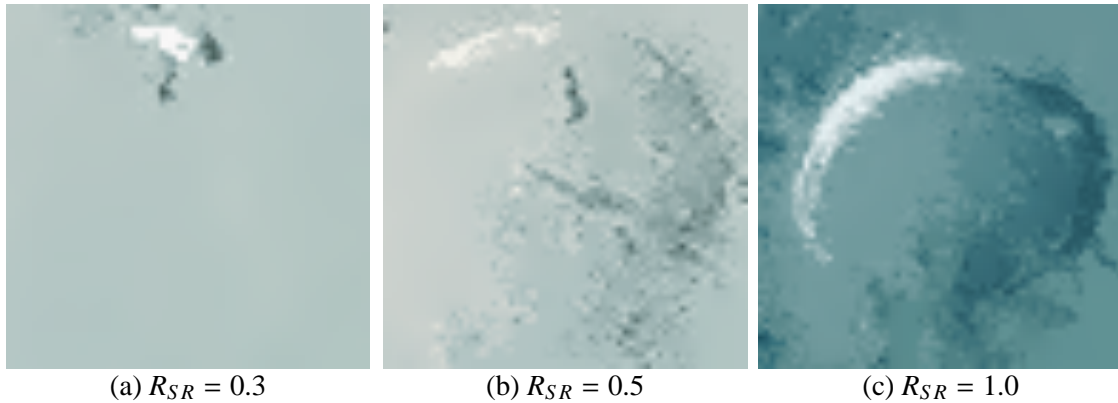


図 5.20: 5.4.1 節の予備実験におけるホタテガイ領域殻縁特徴量  $R_{SR}$  の結果例.  
Results of shelly rim feature  $R_Q$  in the scallop area images.

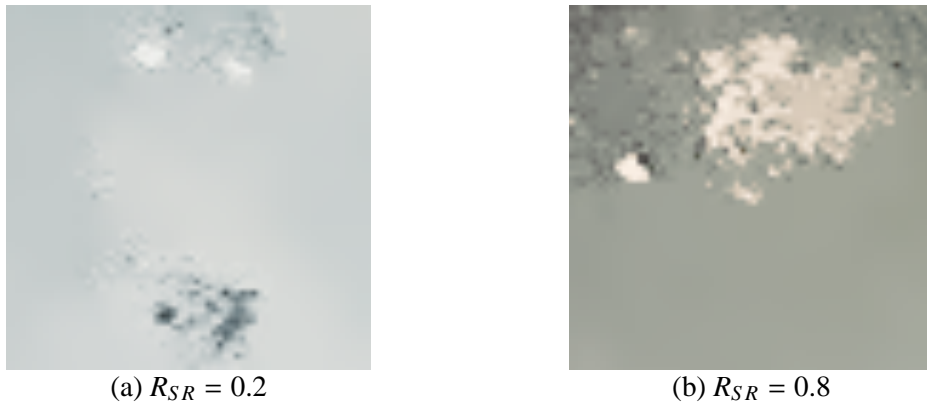


図 5.21: 5.4.1 節の予備実験におけるその他の領域殻縁特徴量  $R_{SR}$  の結果例.  
Results of shelly rim feature  $R_{SR}$  in the other areas.

## 5.4.2 実験

### 実験方法

本実験では、ホタテガイが 87 個体、内“clear”なホタテガイ 70 個体が含まれる 25 枚の海底画像を用いた。評価方法には 4.4.1 節と同様に検出率  $R_{TP}$ 、未検出率  $R_{TN}$ 、誤検出率  $R_{FP}$  を用いることとする

### 実験結果

海底画像に対する実験結果の例を図 5.22 に示す。図 5.22 の画像には、ホタテガイ 8 個体、内 5 個体が“clear”なホタテガイであるが、すべての“clear”なホタテガイが正しく検出された。また図 5.20 のうち、“clear”なホタテガイである図 5.20(a) は正しく検出された。また図 5.21 のうち、殻縁特徴量が  $R_{SR} = 0.8$  であった図 5.21(b) は、殻特徴量  $R_Q$  により正しくホタテガイ以外の領域であると判別された。

実験結果を表 5.2 に示す. ホタテガイ全体の検出率は  $R_{TP} = 73.6\%$  であり, “clear” なホタテガイの検出率は  $R_{TP} = 91.4\%$  であった.

本実験で得られた結果を用いて, 資源量調査における精度を 3.4.4 節で述べた方法により評価する. ここでは, “clear” のホタテガイについて考える. 実験結果より  $a = 70, b = 16$  であるとき, 4.4.2 節と同様に導出すると,

$$\begin{aligned}\sigma_Y^2 &= 0.001104, \\ \mu_Z &= 4.973, \\ \sigma_Z^2 &= 0.04436, \\ CV_Z &= 4.2[\%],\end{aligned}$$

である. 同様に画像数  $n' = 1000, 2000$ , 定数  $C = 30$  としたときの変動係数  $CV_{X'}$  の結果を表 5.3 に示す. 表 5.3 より, 画像数  $n' = 1000$  のとき  $CV_{X'} = 1.9\%$ , 画像数  $n' = 2000$  のとき  $CV_{X'} = 1.5\%$  であった.

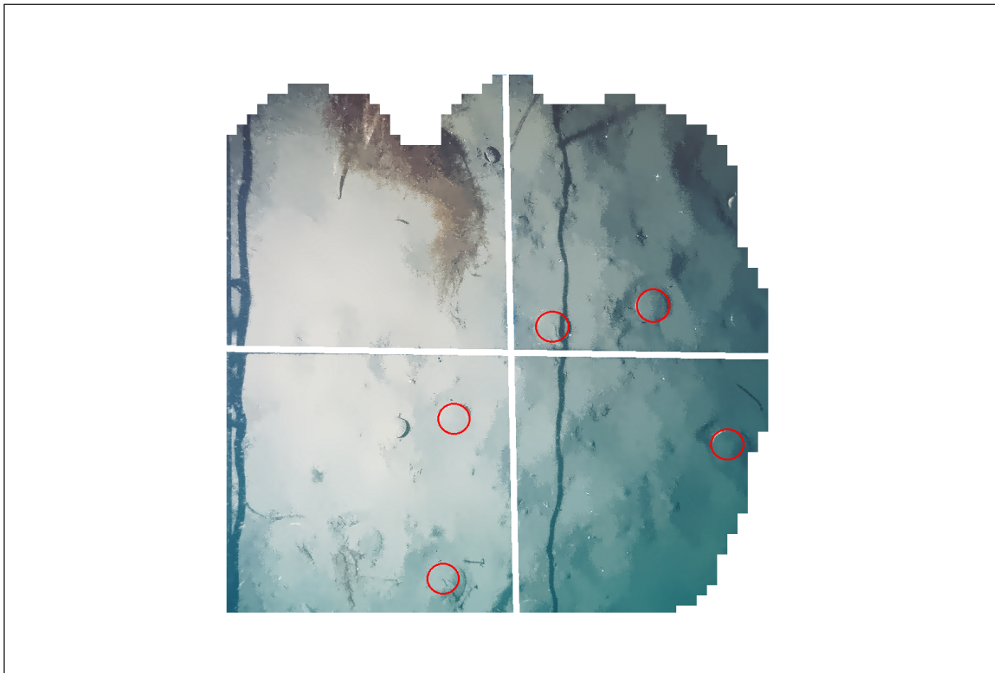


図 5.22: 5.4.2 節の実験結果例 (対象画像は図 3.8).  
Sample of experimental result. Object image is that in Fig. 3.8.

表 5.2: 5.4.2 節の実験結果.

Experimental results in Sect. 5.4.2.

	ホタテガイの数	TP	FP	検出率	誤検出率
all	87	64	14	73.6%	17.9%
clear	70	64	14	91.4%	17.9%

表 5.3: 5.4.2 節の実験における資源量推定精度評価結果.

Evaluation results in Sect. 5.4.2.

a	b	n'	CV <sub>X'</sub>
1920	180	1000	1.9%
		2000	1.5%

## 5.5 実験と結果 2

海底動画を対象として砂場環境のためのホタテガイ検出手法の評価実験を行う。

### 5.5.1 実験方法

5.1 節で提案した砂場環境のためのホタテガイ検出手法を用いて、砂場環境下の海底動画に対して評価実験を行った。ただし砂場環境のためのホタテガイ検出手法の処理のうち、前処理のフレーム除去 (5.2.2 節) および認識可能領域の抽出 (5.2.3 節) は行わないものとする。これは対象の海底動画中にフレームは映りこんでおらず、動画全体の照度が十分なためである (図 3.11)。また本研究ではホタテガイの大きさに対応するパラメータ  $\alpha, \beta$  を  $240 \leq \alpha, \beta \leq 400$  とする。

本実験では北海道野付沖、砂場環境下で撮影された海底動画を用いた。対象動画は長さ 12 分 10 秒、86 個のホタテガイが含まれる。評価方法には 4.4.1 節と同様の検出率  $R_{TP}$ 、未検出率  $R_{TN}$ 、誤検出率  $R_{FP}$  を用いることとする。

### 5.5.2 実験結果

実験結果例を図 5.23 に示す。図 5.23 より正しくホタテガイが検出されているのがわかる。実験結果を表 5.4 に示す。表 5.4 より、ホタテガイの検出率  $R_{TP} = 81.4\%$ 、誤検出率  $R_{FP} = 22.2\%$  であった。

本実験で得られた結果を用いて、資源量調査における精度を 3.4.4 節で述べた方法により評価する。ただし海底動画の撮影場所は北海道野付沖であるが、ここでは 3.4.4 節の北海道常呂の調査結果を用いることとする。実験結果より  $a = 70, b = 16$  であるとき、4.4.2 節と同様に導出すると、

$$\begin{aligned}\sigma_Y^2 &= 0.001740, \\ \mu_Z &= 4.427, \\ \sigma_Z^2 &= 0.06077, \\ CV_Z &= 5.557[\%],\end{aligned}$$

である。同様に画像数  $n' = 1000, 2000$ 、定数  $C = 30$  としたときの変動係数  $CV_{X'}$  の結果を表 5.5 に示す。表 5.5 より、画像数  $n' = 1000$  のとき  $CV_{X'} = 2.1\%$ 、画像数  $n' = 2000$  のとき  $CV_{X'} = 1.8\%$  であった。

誤検出例を図 5.24 に示す。図 5.24(a) は、砂に潜るエゾスナヒトデを誤検出している。また図 5.24(b) は、死殻の残骸をその領域を含まない方向に誤検出しているのがわかる。



図 5.23: 5.5 節の実験結果例（対象画像は図 3.11）。

Sample of experimental result in Sect. 5.5. Object image is that in Fig. 3.11.

表 5.4: 5.5 節の実験結果。

Experiment results of the scallop in Sect. 5.5.

	ホタテガイの数	TP	FP	検出率	誤検出率
all	86	70	20	81.4%	22.2%

表 5.5: 5.5 節の実験における資源量推定精度評価結果.

Evaluation results in Sect. 5.5.

a	b	n'	CV <sub>X'</sub>
2100	480	1000	2.1 %
		2000	1.8 %

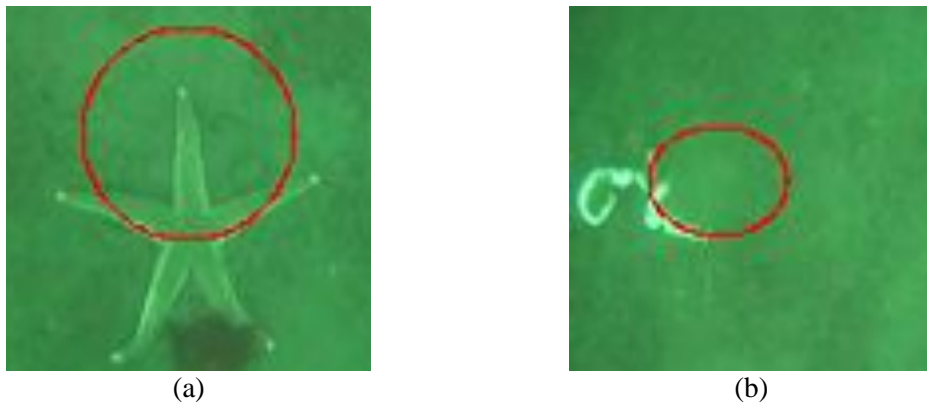


図 5.24: 5.5 節の実験における誤検出例.  
Examples of error detection.

## 5.6 海底動画によるホタテガイ自動計測システムに向けて

本節では、3.4.1 節で提案した海底動画を用いたホタテガイ自動計測システムの現場導入のためのアプリケーションについて紹介する。また砂場環境下のためのホタテガイ検出手法を用いて、水産資源量マップやパノラマ画像などの応用例についても紹介する。

### 5.6.1 アプリケーション

海底動画を用いたホタテガイ自動計測システムにおいて、現場導入のためには専門家や水産業従事者が容易に使用できることが求められる。本研究ではアプリケーションを、実際に専門家に使用していただき、様々な意見を頂きながら開発を進めている。

自動計測のためのアプリケーションを作成するにあたり、使用 OS は Microsoft 社製 Windows7 64bit, 開発環境には Microsoft 社製 Visual C# 2013 Professional, 画像処理ライブラリとして AForge.NET [62] と OpenCV [63], クロスプラットフォームラッパー OpenCVSharp [64] を用いて使用した。現在、海底動画の自動計測と解析結果への GPS ログによる位置情報付与に対応している。

アプリケーションの例を図 5.25 に示す。本アプリケーションは、GUI を用いることで専門的な知識がないユーザーでも操作が容易にできるよう設計している (図 5.25(a))。ま



た解析に必要となるホタテガイ検出のためのパラメータなどは自動で決定し、ユーザーが必要とする入力の削減に努めている (図 5.25(b)). また資源量マップの作製に必要となる GPS ログの指定なども本アプリケーション上で操作することができる。

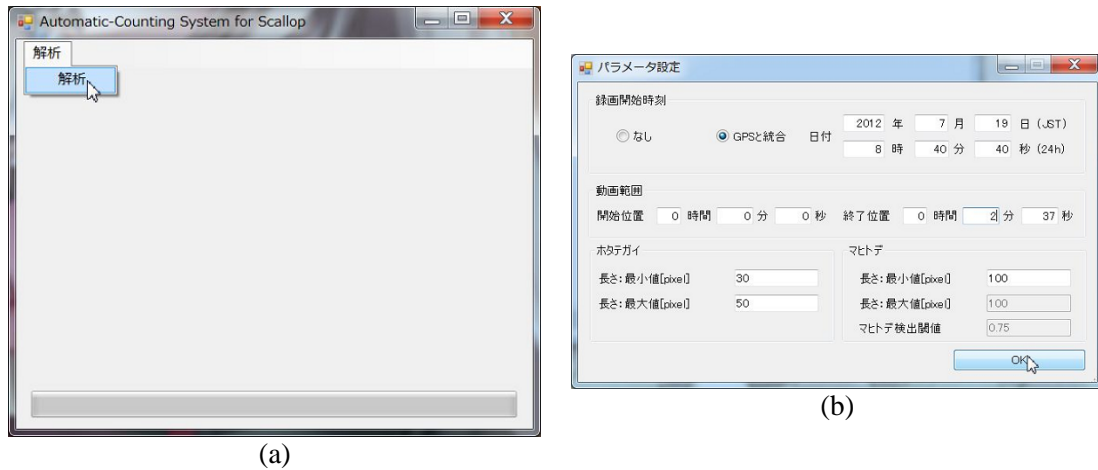


図 5.25: 海底動画を用いたホタテガイ自動計測のためのアプリケーションの例.  
Sample of the application to count scallop using seabed video.

## 5.6.2 資源量マップ

海底動画は撮影時に GPS ログも記録されている (3.3.1 節). このため海底動画から得られる底質やホタテガイ・ヒトデ類の個数など, 様々な情報を位置情報と対応付けることができる. GPS ログの例を図 5.26 に示す. GPS ログは 10~20 秒ごとに記録されている.

5.5 節の実験で用いた動画と, 同じ海域で撮影された 4 分 33 秒, 10 分 18 秒の動画に対して, 5.6.1 節のアプリケーションを用いて計測し, 結果と位置情報を対応付けた. 作成したホタテガイの資源量マップの例を図 5.27 に示す. ただし, ホタテガイの個数を  $n$  とした. 図 5.27 より, ホタテガイの計測結果と位置情報を対応付けることで, 2 次元空間的に個体数の分布を把握することが可能である.

海底動画と位置情報は他にも応用例が期待されている. 筆者らは, ホタテガイの外敵であるヒトデ類の資源量マップも報告している [業績 11]. また本システムにおいて, より多くの底質を判別し, 位置情報と対応付けることで, 底質マップの作成が可能となる. これにより専門家は, ホタテガイの個体数と共に, ホタテガイとヒトデ類の分布の関連性やホタテガイの底質による個体密度などの検討が可能となる.



図 5.26: 海底動画撮影時に取得された GPS ログの例.  
GPS log with recorded the seabed video.

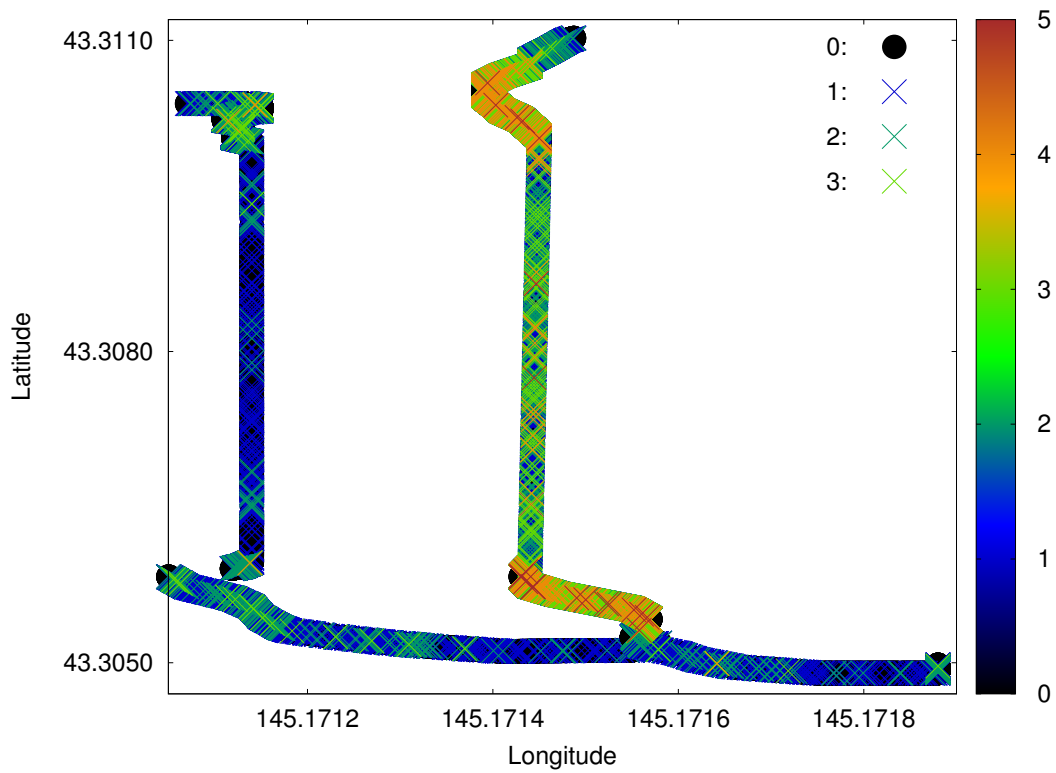


図 5.27: ホタテガイの資源量マップ例.  
Sample of the fishery resource map of scallop.

### 5.6.3 海底動画のモザイクング

海底動画は海底画像とは異なり、図 2.3 で示したように、海底を連続して記録したデータである。このため海底動画をモザイクング処理することで、海底画像よりも広域な範囲の海底画像を生成することができる。従来の海底画像を用いた資源量調査では、対象海域に対して離散的にデータを取得し、統計的に個体数や個体密度を推定していた [1]。しかし、海底動画により生成されるパノラマ画像を用いることで、ホタテガイ間の距離などを直接計測することが可能となる。

北海道野付沖で撮影された海底動画を用いたパノラマ画像の例を図 5.28 に示す。ただしパノラマ画像の生成には、Kolor 社製 Autopano Giga 3.0 [65] を用いた。図 5.28 より海底動画をパノラマ画像化することで、ホタテガイの位置や底質の変化などを容易に確認することができる。



図 5.28: 海底動画を用いたパノラマ画像の例.  
Sample of panorama seabed image using seabed video.

## 5.7 考察

砂場環境下のホタテガイ検出のために、形状特徴、殻縁特徴、殻特徴を提案し、海底画像を用いてその有効性を検証した。海底画像中には、死殻の破片や砂の凹凸などの様々なエッジが含まれているため、礫場環境下のためのホタテガイ検出手法のようにエッジ点を用いることができない。このため、殻縁領域の白い画素を特徴点とし、ホタテガイ候補領域を得た。しかし、図 5.17 より、形状特徴のみではホタテガイ領域を正しく判別することができない。このため、ホタテガイ候補領域に対して殻縁特徴と殻特徴を用いることで正しく検出されていることがわかる。また本手法は、礫場環境と同様に形状特徴で用いた楕円検出 Hough 変換により得られる楕円パラメータから、ホタテガイの殻長などのサイズ推定が可能である (4.5 節)。砂場環境下ではホタテガイが砂に覆われているため、海底画像中から直接計測することは困難であるが、殻縁部からサイズを推定するための一手法として応用が期待される。

5.4.2 節の実験では、ホタテガイ領域の未検出やホタテガイ以外の領域の誤検出などもみられた。5.4.2 節の実験において、提案手法では殻縁領域が一定の割合以上確認できるものを対象としているため、図 5.20(a), (b) のホタテガイを検出できなかった。また、図 5.21(b) のその他の領域を誤検出した。

提案手法は表 5.2 より、“clear” なホタテガイの検出率が 91.4% であった。礫場環境下におけるホタテガイの検出率と比較すると低い、視覚的特徴の少ない砂場環境においては有効であると考えられる (4.4.2 節)。このため提案手法は、砂場環境下において砂に覆われたホタテガイに対して有効であり、十分な精度である。

5.4.2 節の実験結果に基づき、資源量推定の精度について検証した。表 5.3 より画像数  $n' = 1000$  のとき  $CV_{X'} = 1.9\%$ 、 $n' = 2000$  のとき  $CV_{X'} = 1.5\%$  と従来の調査精度より高精度な推定が可能であった。また実際に自動計測が可能であるならば画像数 1000 枚のとき、誤差 2% を実現可能であるため、本手法は資源量推定においても十分な精度である。一方で誤検出率が 17.9% であったが、検出率が十分な精度であるため、手法の改善により誤検出率を減らすことで解決できると考えられる。

また 5.5 節の実験では、提案手法を海底動画に適用しその精度を評価した。実験の結果、ホタテガイの検出率は 81.4% であった。これは対象海域にみられるホタテガイの殻に藻が付着することで、海底画像の海域よりも殻縁領域が隠れていたためと考えられる。一方で、殻領域が砂であるか藻で覆われているかに関わらずホタテガイを検出できたことから、砂場環境下において提案手法に用いたそれぞれの特徴が有効であったと考えられる。また表 5.5 より、画像数  $n' = 1000$  のとき  $CV_{X'} = 2.1\%$ 、 $n' = 2000$  のとき  $CV_{X'} = 1.8\%$  であり資源量推定においても十分な精度である。海底動画による調査が可能となった場合、従来の海底画像を用いた調査と比較して調査面積が 150 倍となることから、より高精度な推定が実現可能である (3.4.2 節)。

砂場環境下のホタテガイにおいては、殻が砂に覆われているため形状特徴と色彩特徴を用いた検出手法を提案し、有効性を示した。砂場環境下において表在性底生生物は、その生物の生態的特徴を考慮したモデル化が必要である。本研究で対象としたホタテガイは砂に覆われており、殻縁部しか確認することができなかった。同様な特徴がみられるものとしてはエゾスナヒトデ (*Luidia yesoensis*) [58] がいる。5.5 節で用いた海底動画中に含まれているエゾスナヒトデの例を図 5.29 に示す。エゾスナヒトデは、砂の中に潜ることが知

られており、ホタテガイと同様に腕の一部分しか見えない。また砂でエゾスナヒトデの体が覆われている割合は様々であり、図 5.29(a), (b) では、各腕の縁を確認することができるが、図 5.29(c) では各腕の先端部のみが確認できるだけである。このように砂に潜る生物については、生物学的な知見に基づき形状特徴やホタテガイの殻縁部のような空間分布などをモデル化することで、さらなる応用が期待できる。

一方で砂場環境下において、5.5 節で用いた海底動画中に含まれているマヒトデの例を図 5.30 に示す。マヒトデは、海底画像に含まれているものと同種であり、礫場環境下と同様に砂場環境下においても身体は砂に覆われておらず模様を確認することができる。しかしマヒトデは遺伝的個体差が大きく、図 5.30(a) のように体の模様が薄いもの、図 5.30(b) のように青色と白色模様のもの、図 5.30(c) のように模様は明瞭だが白色が多いものなどが混在する。ヒトデ類の計測について筆者らは、砂場環境下においてヒトデ類の形状特徴と色彩特徴をモデル化した検出手法を提案し、その有効性を報告している [業績 12]。エゾスナヒトデとマヒトデの違いには、移動の頻度や腕の形状（細い・太い）、身体の柔軟性などが関係しているとされる。このように対象の特徴や環境を考慮することで、検出手法を設計することが有効である。

5.6 節では、海底動画を用いたホタテガイ自動計測システム (3.13 節) のためのアプリケーションを紹介した。Dawkins は、海底画像からのホタテガイ計測のために CUI ベースのアプリケーション *Scallop Detector* を報告している [9]。しかし、アプリケーションで用いられている検出手法ではユーザーが画像データを学習させる必要があり、操作もコマンド入力を必要とする。本研究において対象となるユーザーは水産資源量調査を行う専門家や水産業従事者などであり、ユーザーに対して自動計測のために専門的な知識や操作を要求することは不適切であると考えられる。また *Scallop Detector* は自動計測のためにユーザーが環境に合わせた学習をさせる必要があるのに対して、提案手法は海底環境に注目し海底環境に適した検出アルゴリズムを用いるため、この必要がない。これは対象画像中の特徴量だけではなく、ホタテガイなどの対象生物の特徴や専門家の経験的知見などを考慮することで、異なる海域であっても対応することが可能であることを示している。

海底動画の応用例として、計測結果と位置情報を統合し資源量マップを図 5.27 に、パノラマ画像を図 5.28 に示した。資源量マップは、調査海域で多くの海底動画が撮影され、自動計測の精度が向上することで、より詳細で高精度化が期待できる。またパノラマ画像は、従来の標本採集や海底画像などの離散的なデータでは得ることができなかった連続的なデータの表示方法の一つである。これにより自動計測手法と連続データを用いることで、従来までは離散的なデータから統計学的に個体密度や個体間距離が算出されていたものに対して、直接計測が可能となり、より詳細な観測が可能になることを示している。このため、海底動画を利用した観測技術として海洋水産学や生物学に新たなデータを提供し、新たな知見が得られることが期待される。



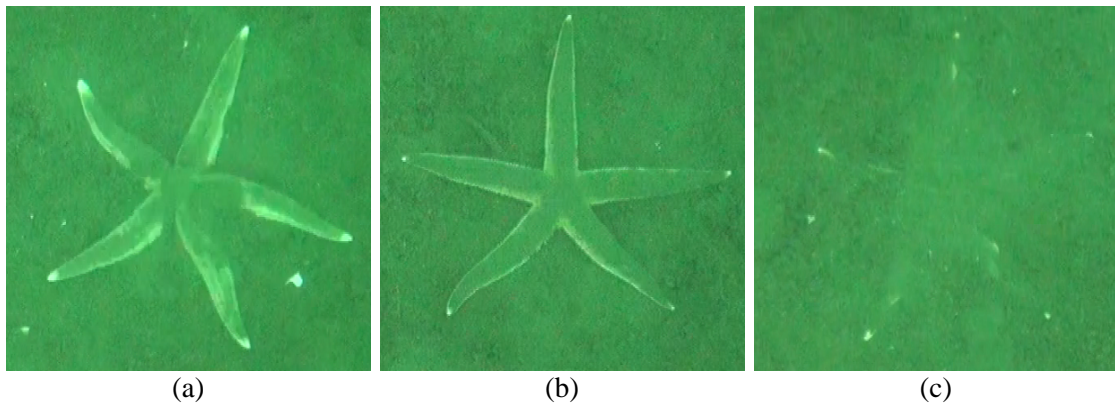


図 5.29: 海底動画におけるエゾスナヒトデ (サイズ : 450 × 450) .  
*Luidia yesoensis* in seabed video.

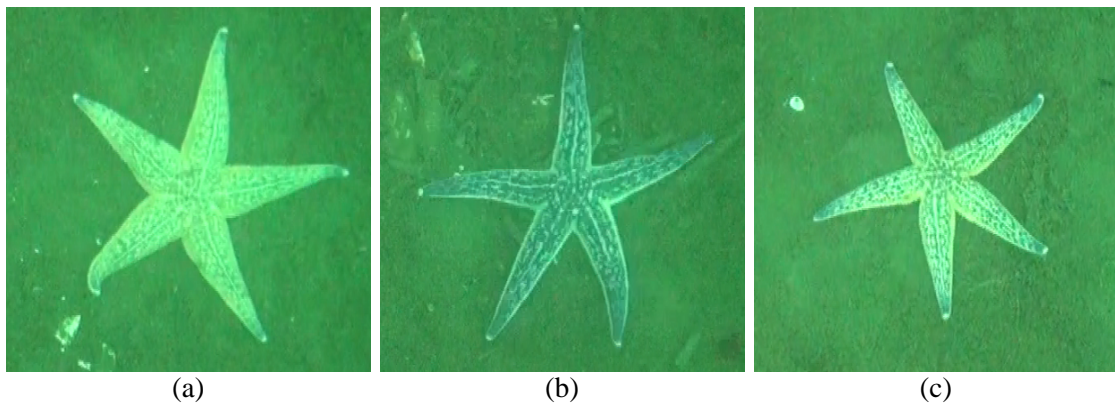


図 5.30: 海底動画におけるマヒトデ (サイズ : 450 × 450) .  
*Asterias amurensis* in seabed video.



## 第6章 結論

### 6.1 まとめ

本研究は、海底画像を利用した水産資源量の自動推定を目的とし、表在性底生生物を対象とし画像処理を用いた自動計測技術の確立を目指した。表在性底生生物のうちホタテガイを対象とし、北海道常呂のホタテガイ地撒き養殖を実例に自動計測技術の確立を目指した。

第1章では、水産業における資源量調査の問題点を上げ、本研究の位置づけとその有用性について述べた。第2章では、水産資源と資源量調査の現状から漁業における資源量調査の様々な試みや、水産資源量調査が抱える問題点を上げた。また本研究で対象となる画像処理において、特に実環境や実画像に対する動向について述べた。第3章では、本研究において表在性底生生物であるホタテガイを対象とする意義や位置づけを明確するとともに、対象となる海底画像や海底動画について詳説し、底質に合わせたホタテガイ検出手法を提案した。第4章では礫場環境、第5章では砂場環境のためのホタテガイ検出手法を提案し、実際の海底画像を用いた実験を通してその有効性を示した。また提案システムを用いた資源量推定の精度について検証するとともに、それぞれの海底環境における他の底生生物への応用のための知見を述べた。また第5章では、提案手法を海底動画に適応し、本手法の有効性を確認するとともに、自動計測のためのアプリケーションや海底動画を用いた資源量調査のための応用例について述べた。

本研究は、底生生物の水産資源量調査方法が抱える問題に対して画像工学的なアプローチにより解決を試みたものである。本研究では、

- 海底環境における表在性底生生物の画像認識による計測法
- 自動計測技術による効率的かつ高精度な資源量調査法

のための知見が得られた。自動計測技術のためには、対象資源の生態や形態などの生物学的な側面や、資源量調査の方法などの水産海洋学的な側面からのアプローチが重要である。例えばホタテガイの自動計測手法は、対象の生態や形態などに基づきホタテガイに特化して設計されているため、専門家の経験的な知識の裏付けにつながるものでもある。またホタテガイと海底の基質との関係に基づき自動計測システムを提案したが、他の底生生物に対しても同様なアプローチが有効であり、いくつかの実例を第4章と第5章で示すことで、その知見について述べた。

また第4章と第5章で礫場環境と砂場環境のためのホタテガイ検出手法を提案し、海底画像を用いた実験により評価した。本研究で提案した自動計測システムを用いることで、従来手法と比較して多くのサンプルを基に資源量推定が実現可能となる。そこで4.4節と5.4.2節の結果に基づき、従来手法と提案手法による資源量推定精度の比較結果を付録A

に示す。提案システムには、従来手法では得られなかった海区内での細かなホタテガイ密度変動がとらえられることが可能となり、ホタテガイ地撒き養殖のための高精度な資源量推定が実現可能となる。

## 6.2 今後の展望

本研究では、海底画像を利用した自動計測技術の高精度化を目指す予定である。例えばホタテガイについては引き続き自動計測の検出精度の向上を目指し、特に誤検出率の改善を行う予定である。また自動計測における底質判別手法は、ホタテガイ検出手法を選択するために砂場と礫場のみに対応していたが、これは海底画像の視覚的な情報からの判別である [業績 14]。このため、海底画像と底質の粒度を対応付けるために、海底のサンプルを採集し、より高精度の判別手法を検討する予定である。また海底画像や海底動画には、ホタテガイの外敵となるマヒトデやエゾスナヒトデなども含まれている。ホタテガイ養殖では、ホタテガイがヒトデに捕食されるためヒトデの駆除などを行っているが、その効果を把握する手段がない。このような問題を解決するために、海底画像や海底動画からより多くの情報を計測できるよう検討し、技術を確立していく予定である。

水産資源量の自動推定を実現するための自動計測システムを現場へ導入するにあたり、海底動画を用いたホタテガイ計測システムとして、自動計測のためのアプリケーションを紹介した。今後、検出精度の向上や機能を追加し、専門家や水産業従事者からのフィードバックをもとに改善していく予定である。またホタテガイ以外の底生生物への応用や海底の底質などの情報の付与についても検討し、資源量調査のための観測技術として充実させていく必要がある。

また海底画像や海底動画を利用した自動計測システムは、水産資源量調査だけではなく生物学や水産海洋学などにおける新しい観測手法になると期待できる。画像や動画は、ある対象が観察された記録情報である。これに対して自動計測技術は、観察された膨大な記録情報を観測するためのツールである。今後は、海中をより詳細に観るための技術として精度向上を目指す。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導を頂いた公立はこだて未来大学の川嶋稔夫教授と熊本大学の戸田真志教授に深く感謝いたします。川嶋先生には博士（後期）課程よりご指導いただき，特に博士論文をまとめる際には貴重なご意見を頂きました。また戸田先生には卒業研究よりお世話になり，日々の議論を通じて多くの知識や助言と共に，外部発表や現場の見学など様々な経験をさせて頂きました。また学位論文作成にあたり，審査と共に多くのご助言を頂いた公立はこだて未来大学の高橋信行教授，三上貞芳教授，和田雅昭教授に深く感謝いたします。

本研究のためにホタテガイ養殖の海底画像や海底動画の撮影やデータの提供，実際の調査の見学等を快く受けてくださると共に，貴重なご意見やコメントを頂いた北海道立網走水産試験場様，北海道立栽培水産試験場様，北海道常呂漁業協同組合様，北海道根室漁業協同組合様に感謝いたします。特に北海道網走水産試験場の栗原様と北海道立栽培水産試験場の清水様には，水産の分野について素人な私に対して様々な知識を教えて頂きました。さらに栗原様には提案手法に対して生態学的な知見を提示して頂きました。また提案システムのための海底画像装置の改良や海底動画撮影装置の開発や撮影に関してもご尽力されたことに，重ねて感謝いたします。

最後に公立はこだて未来大学の戸田研究室の皆様には毎週の長時間に渡るゼミの中で様々なコメントを頂き，活発なディスカッションをできたことは非常に貴重で楽しい経験でした。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 北海道立網走水産試験場, 「ホタテガイ地まき漁場におけるモニタリングマニュアル～市場ニーズに対応した計画的生産を目指して～」, 北海道立網走水産試験場 (オンライン),  
<http://www.fishexp.pref.hokkaido.jp/exp/abashiri/saikin/manyuaru/manyuaru.pdf> (Accessed 24/10/13)
- [2] 高橋秀行, 渡部俊広, 北川大二, 「曳航式深海用ビデオカメラで撮影したベニズワイガニの甲幅推定法」, 日本水産学会誌, vol. 71, no. 4, pp. 542–548, 2005.
- [3] 本多直人, 渡辺俊広, 「水中ビデオカメラを装着した表中層トロール網によるエチゼンクラゲの鉛直分布調査」, 日本水産学会誌, vol. 73, no 6, pp. 1042–1048, 2007.
- [4] 藤田薫, 渡辺俊広, 北川大二, 「トロール網のグランドロープに対するズワイガニ類の行動」, 日本水産学会誌, vol. 72, no. 4, pp. 695–701, 2006.
- [5] 小林富士男, 岡本昌丈, 尾関孝史, 坪井始, 田中始男, 「オキアミの色彩及び形状特徴と抽出への応用」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 98, no. 303, pp. 7–12, 1998.
- [6] 渡辺俊広, 渡辺一俊, 北川大二, 「曳航式深海用ビデオカメラを用いたキチジの生息密度推定法」, 日本水産学会誌, vol. 69, no. 4, pp. 620–623, 2003.
- [7] J. Aguzzi, C. Costa, K. Robert, M. Matabos, F. Antonucci, S. K. Juniper, and P. Menesatti, “Automated Image Analysis for the Detection of Benthic Crustaceans and Bacterial Mat Coverage Using the VENUS Undersea Cabled Network,” *Sensors*, vol. 11, no. 11, pp. 10534–10556, Oct. 2011.
- [8] D. K. Bassett and J. C. Montgomery, “Investigating nocturnal fish populations in situ using baited underwater video: With special reference to their olfactory capabilities,” *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 409, no. 1–2, pp. 194–199, Sep. 2011.
- [9] M. Dawkins, “Scallop Detection In Multiple Maritime Environments,” Master’s Thesis in Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. 2011.
- [10] M. Dawkins, C. Stewart, S. Gallager, and A. York, “Automatic Scallop Detection in Benthic Environments,” *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pp. 160–167, Jan. 2013.
- [11] 国際連合食糧農業機関, 「世界漁業・養殖業白書」, 2012.

- [12] 水産庁, 水産総合研究センター, 「国際漁業資源の現況—平成 21 年度現況—」, <http://kokushi.job.affrc.go.jp/> (Accessed 24/10/13)
- [13] 田中昌一, 「21 世紀の水産資源管理」, 日本水産学会誌, vol. 68, no. 3, pp. 313–319, 2002.
- [14] 牧野光琢, 坂本亘, 「日本の水産資源管理理念の沿革と国際的特徴」, 日本水産学会, no. 69, pp. 368–375, 2003.
- [15] 勝川俊雄, 「水産資源の順応的管理に関する研究」, 日本水産学会誌, vol. 73, no. 4, pp. 656–659, 2007
- [16] 古澤昌彦, 「音響水産資源調査と調査船」, 関西造船協会, vol. 47, pp. 19–23, 2000.
- [17] 飯田浩二, 「魚群探知機を用いた水産資源量計測に関する基礎的研究」, 日本水産学会誌, vol. 66, pp. 619–622, 2000.
- [18] 飯田浩二, 「計量魚群探知機とスキヤニングソナーを用いた海中魚群の可視化と定量化」, 電子情報通信学会論文誌, vol. 102, no. 278, pp. 21–26, 2002.
- [19] 納谷美也子, 上野康弘, 毛利隆志, 大島和浩, 渡部俊広, 藤田薫, 伊藤喜代志, 岩崎和治, 松尾康也, 伊藤寛, 清水勇一, 「サイドスキヤンソナーを用いた中層トロールのサンマに対する採集効率の推定」, 日本水産学会誌, vol. 76, no. 4, pp. 658–669, 2010.
- [20] 農林水産省北海道農政事務所, 「グラフでみる北海道の漁業」, <http://www.maff.go.jp/hokkaido/policy/jyousei/pdf/pamphlet.pdf> (Accessed 25/10/13)
- [21] マリンネット北海道, 「平成 23 年北海道水産現勢」, [http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/sui\\_gensei/teisei25816.pdf](http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/sui_gensei/teisei25816.pdf) (Accessed 25/10/13)
- [22] 西浜雄二, 「オホーツクのホタテ漁場」, 北海道大学図書刊行会, 1994.
- [23] 木下虎一郎, 「ホタテガイの増殖に関する研究」, 北方出版社, pp. 1–106, 1949.
- [24] 丸邦義, 「道東海域におけるホタテガイの生態とその増養殖」, 水産業の再生戦略, 恒星社厚生閣, pp. 49–70, 2000.
- [25] 丸邦義, 「ホタテガイの種苗生産に関する生態学的研究」, 北海道立水産試験場報告, no. 27, 1985.
- [26] 噴火湾ホタテ生産振興協議会, 噴火湾ホタテ生産振興協議会 (RASNET), <http://rasnet.sys-hk.jp/> (Accessed 24/10/13)
- [27] 清水洋平, 岩井俊治, 高島信一, 山下正兼, 「免疫染色法によるホタテガイ幼生の判別技術開発」, 日本水産学会春季大会, pp. 79, 2009.
- [28] 清水洋平, 「ホタテガイ幼生を染め分ける-新判別技術の開発-」, 北水試だより, vol. 80, pp. 16–19, 2010.

- [29] J.M. Preston, A.C. Christney, S.F. Bloomer, and I.L. Beaudet, “Seabed Classification of Multibeam Sonar Images,” MTS/IEEE Conference and Exhibition on OCEANS, vol. 4, pp. 2616–2623, 2001.
- [30] R. Javidan, M.A.M. Shirazi, and Z. Azimifar, “Seabed Image Texture Segmentation and Classification Based on Nonsampled Contourlet Transform,” International CSI Computer Conference, vol. 6, pp. 186–193, Mar. 2008.
- [31] H. Laanaya, A. Martin, D. Aboutajdine, and A. Khenchaf, “Classifier fusion for post-classification of textured images,” International Conf. Information Fusion, pp. 1–7, Jun. 2008.
- [32] T. Treibitz and Y.Y. Schechner, “Active Polarization Descattering,” IEEE Trans. PAMI, vol. 31, no. 3, pp. 385–399, 2009.
- [33] A. Mehta, E. Ribeiro, J. Gilner, and R. Woesik, “Coral Reef Texture Classification Using Support Vector Machines,” International Conf. on Computer Vision Theory and Applications, pp. 302–310, Mar. 2007.
- [34] A.C.R. Gleason, R.P. Reid, and K.J. Voss, “Automated classification of underwater multispectral imagery for coral reef monitoring,” OCEANS 2007, pp. 1–8, Sept. 2007.
- [35] S.P. Bernhardt and L.R. Griffing, “An evaluation of image analysis at benthic sites based on color segmentation,” Bulletin of Marine Science, vol. 69, no. 2, pp. 639–653, Sept. 2001.
- [36] V. Gesu, F. Isgro, D. Tegolo, and E. Trucco, “Finding essential features for tracking starfish in a video sequence,” International Conf. on Image Analysis and Processing, pp. 504–509, Sept. 2003.
- [37] 渡辺孝志, 畠山雅充, 木村彰男, 「ハフ変換を用いた接線情報の抽出と欠損楕円の検出」, 電子情報通信学会論文誌 D, vol. 82, no. 12, pp. 2221–2229, 1999.
- [38] 辻俊明, 田代浩紀, 阿部茂, 「エレベータ乗場画像の移動体上端に着目した待客数計測方法」, 電子情報通信学会論文誌 D, vol. 130, no. 3, pp. 334–340, 2010.
- [39] T. Zhao & R. Nevatia, “Bayesian human segmentation in crowded situations,” IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR ’03), vol. 2, pp. 459–466, 2003.
- [40] O. Sidla, Y. Lypetsky, N. Brandle, & S. Seer, “Pedestrian Detection and Tracking for Counting Applications in Crowded Situations,” IEEE International Conf. on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS’06), pp. 70, 2006.
- [41] R. O. Duda and P. E. Hart, “Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures,” Comm. ACM, vol. 15, pp. 11–15, 1972.
- [42] 和田俊和, 松山隆司, 「Hough 変換に基づく図形検出法の新展開」, 日本情報処理学, vol. 36, no. 3, pp. 253–258, 1995.

- [43] 原田直人, 平田成, 出村裕英, 浅田智朗, 「楕円モデルのハフ変換による数値地形図上のクレータ認識手法の開発」, 日本惑星科学会誌, vol. 17, no. 1, pp. 69–76, 2008.
- [44] A. Kitamoto and K. Ono, “The Construction of Typhoon Image Collection and its Application to Typhoon Analysis,” NII journal, vol. 1, pp. 7–22, 2000.
- [45] L. Xu, E. Oja, and P. Kultanen, “A new curve detection method: Randomized Hough Transform (RHT),” Pattern Recognition Letters, vol. 11, no. 5 pp. 331–338, 1990.
- [46] A.Y.S. Chia, M.K.H. Leung, S. Rahardja, “Ellipse Detection with Hough Transform in One Dimensional Parametric Space,” IEEE International Conf. on Image Processing, vol. 5, pp. 333–336, 2007.
- [47] 田村仁, 阿刀田央一, 本多庸悟, 「フーリエ・パワースペクトルと微小形状特徴に基づくテクスチャ画像の類別」, 精密工学会誌, vol. 68, no. 8, pp. 1047–1051, 2002.
- [48] 佐藤良介, 和田俊良, 上田正生, 「2次元フーリエ変換を用いたコンクリート亀裂面の形状解析手法の開発: コンクリート亀裂面の周波数特性に関する解析的研究その1」, 日本建築学会構造系論文集, no. 589, pp. 105–112, 2005.
- [49] 北垣亮馬, 兼松学, 野口貴文, 「2次元フーリエ変換による打放しコンクリートの視覚情報変化の分析方法に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, no. 597, pp. 39–45, 2005.
- [50] M. Robert, K. Haralick, and D. Its’Hak, “Textural Features for Image Classification,” Trans. IEEE, vol. 3, no. 6, pp. 610–621, 1973.
- [51] 古屋早知子, 魏軍, 萩原義裕, 清水昭伸, 小畑 秀文, 縄野繁, 「特徴量選択による乳房 X 線像上の悪性腫瘍影判別能力の改善と選択基準の評価」, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol. J86, no. 5, pp. 587–597, 2003.
- [52] 太田徹志, 村上拓彦, 加治佐剛, 溝上展也, 吉田茂二郎, 「同時生起行列から得られるテクスチャ情報に対する最適ピクセル間距離の検討」, 九州森林研究, no. 59, pp. 137–140, 2006.
- [53] 奥谷喬司編著, 「日本近海産貝類図鑑」, 東海大学出版会, 2000.
- [54] 山下成治, 濱田武士, 見上隆克, 「ホタテガイの形状特性」, 水産工学会, vol. 35, no. 3, pp. 253–260, 1999.
- [55] 佐竹俊孝, 「サロマ湖の底質の粒度組成」, 地質学雑誌, vol. 73, no. 9, pp. 429–440, 1967.9.
- [56] 西浜雄二, 干川裕, 「サロマ湖における底泥の粒度組成と有機炭素含有率の分布」, 北海道水産試験場研究報告, vol. 39, pp. 1–9, 1992.
- [57] Global Invasive Species Database, “*Asterias amurensis*,”  
<http://www.issg.org/database/species/ecology.asp?fr=1&si=82> (Accessed 24/10/13)



- [58] World Register of Marine Species, “Luidia yesoensis,”  
<http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=241344> (Accessed 24/10/13)
- [59] World Asteroidea Database, “Patiria pectinifera,”  
<http://www.marinespecies.org/asteroidea/aphia.php?p=taxdetails&id=459559> (Accessed 10/12/13)
- [60] Y. Cheng, “Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering,” Proc. IEEE, vol. 17, no. 8, pp. 790–799, 1995.
- [61] D. Comaniciu and P. Meer, “Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis,” Proc. IEEE, vol. 24, no. 5, pp. 603–619, 2002.
- [62] AForge.NET, <https://code.google.com/p/aforge/> (Accessed 24/10/13)
- [63] OpenCV, Open Source Computer Vision Library,  
<http://opencv.willowgarage.com/wiki/> (Accessed 24/10/13)
- [64] OpenCVSharp, OpenCVSharp,  
<http://code.google.com/p/opencvsharp/> (Accessed 24/10/13)
- [65] Kolor, Autopano Giga 3.0, <http://www.kolor.com/> (Accessed 24/10/13)

## 目次

1.1	水産資源量調査のための自動計測システムの提案. . . . .	9
2.1	ホタテガイの成長過程と養殖業での工程. . . . .	15
2.2	海底画像による離散的なデータ取得の様子. . . . .	15
2.3	海底動画による連続的なデータ取得の様子. . . . .	16
3.1	ホタテガイ: (左) 右殻. (右) 左殻. (「日本近海産貝類図鑑」より転載 [53]).	22
3.2	二枚貝綱の左殻各部名称 (「日本近海産貝類図鑑」より転載 [53]). . . . .	22
3.3	砂で身を隠すホタテガイ (「日本近海産貝類図鑑」より転載 [53]). . . . .	23
3.4	船上での海底画像撮影の様子. (a) 撮影機材を海中に投入. (b) 海底画像を モニタで撮影し, 撮影地点を記録. . . . .	24
3.5	海底画像撮影機材の簡略図. . . . .	24
3.6	海底画像撮影手順. (a) 撮影機材を調査地点の海底まで沈める. (b) 撮影機 材が着底すると, 自動的に撮影される. . . . .	25
3.7	礫場の海底画像. . . . .	27
3.8	砂場環境の海底画像. . . . .	28
3.9	海底動画撮影機材の簡略図. . . . .	29
3.10	海底動画の撮影機材. . . . .	30
3.11	海底動画の例. 画像中の中央にホタテガイが 1 個体, 右側にヒトデ類が 2 個体いる. . . . .	31
3.12	海底画像を用いたホタテガイ自動計測手法. . . . .	33
3.13	海底動画を用いたホタテガイ自動計測システム. . . . .	33
4.1	礫場環境下の海底画像におけるホタテガイ領域の例. . . . .	38
4.2	礫場環境下の海底画像におけるその他領域の例. . . . .	39
4.3	礫場環境下のためのホタテガイ領域検出手法. . . . .	40
4.4	礫場環境下の海底画像における局所領域内の輝度平均と分散の分布. . . . .	41
4.5	礫場環境下の海底画像からの認識可能領域抽出結果. . . . .	42
4.6	Sobel フィルタ. . . . .	43
4.7	ホタテガイ領域における形状情報の抽出の流れ. . . . .	43
4.8	楕円のパラメータ. . . . .	44
4.9	色相によるホタテガイ領域と海底画像の比較結果. . . . .	46
4.10	輝度値によるホタテガイ領域と海底画像の比較結果. . . . .	46
4.11	彩度によるホタテガイ領域と海底画像の比較結果. . . . .	47
4.12	4.3.2 節の実験に用いるホタテガイ領域の画像. . . . .	47

4.13	各領域における色相ヒストグラム結果例. . . . .	49
4.14	ホタテガイ領域のエッジ強度・エッジ方向算出結果. . . . .	50
4.15	フーリエ特徴量 $P(r)$ . . . . .	52
4.16	ホタテガイ画像における輝度値とエッジ方向に対するパワースペクトルの結果例. (a) 対象画像. (b) 輝度値に対するパワースペクトルの結果. (c) エッジ方向に対するパワースペクトルの結果. . . . .	53
4.17	その他の画像における輝度値とエッジ方向に対するパワースペクトルの結果例. (a) 対象画像. (b) 輝度値に対するパワースペクトルの結果. (c) エッジ方向に対するパワースペクトルの結果. . . . .	53
4.18	ホタテガイ画像とその他の画像によるフーリエ特徴 $P(r)$ の結果例. (a) ホタテガイ画像 (対象画像は図 4.16(a)). (b) その他の画像 (対象画像は図 4.17(a)). . . . .	54
4.19	礫場環境のためのホタテガイ検出手法によるホタテガイ画像からの検出の流れ. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出. . . . .	56
4.20	礫場環境のためのホタテガイ検出手法によるその他の画像からの検出の流れ. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出. . . . .	56
4.21	礫場環境のためのホタテガイ検出手法によるホタテガイ検出例 (対象画像は図 4.1). . . . .	57
4.22	4.4 節の実験におけるホタテガイ領域の未検出・誤検出の例. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出. . . . .	59
4.23	4.4 節の実験におけるその他の領域の誤検出の例. (a) 対象画像. (b) ホタテガイ候補領域の抽出. (c) ホタテガイ領域の検出. . . . .	59
4.24	海底画像におけるイトマキヒトデとマヒトデ (サイズ: 128×128). (a), (b): イトマキヒトデ (c), (d): マヒトデ . . . . .	60
5.1	砂場環境下の海底画像におけるホタテガイ領域の例. . . . .	62
5.2	砂場環境下の海底動画におけるホタテガイ領域の例. . . . .	63
5.3	砂場環境下におけるホタテガイ領域の定義 (元画像は図 5.1(a)). . . . .	64
5.4	砂場環境下のためのホタテガイ検出手法. . . . .	64
5.5	平滑化手法の比較実験結果. (a1)~(a3): 元画像 (b1)~(b3): Mean-Shift フィルタの実験結果 (c1)~(c3): Median フィルタの実験結果 (d1)~(d3): Gaussian フィルタの実験結果 . . . . .	66
5.6	Mean-Shift フィルタリングによる平滑化結果 (対象画像は図 3.8). . . . .	67
5.7	フレーム除去のためのテンプレート領域 (画像サイズ: 64×64). (a): フレームの中央上部. (b): フレームの中央部. . . . .	68
5.8	フレーム除去結果 (対象画像は図 5.6). . . . .	68
5.9	認識可能領域の抽出結果 (対象画像は図 5.8). . . . .	69
5.10	5.3.1 節の予備実験に用いる対象画像. . . . .	71
5.11	5.3.1 節の実験に用いる砂場環境下のホタテガイ領域の画像. . . . .	72
5.12	輝度ヒストグラムと閾値 $Th_{SR}$ の結果例 (対象画像は図 5.11). . . . .	73

5.13	海底画像の可変閾値 $Th_{SR}$ の結果例 (対象画像は図 5.6) . . . . .	74
5.14	殻縁候補画素の抽出例 (対象画像は図 5.6) . ただし, 白画素を殻縁候補画素とする. . . . .	74
5.15	ホタテガイ領域における殻縁候補画素の抽出例 (対象画像は図 5.11) . . .	75
5.16	楕円と近傍領域. . . . .	76
5.17	形状特徴により抽出された楕円と殻縁候補画素の分布例 (殻縁画素数は 15) . (a) 殻縁候補画素群の密度が高い. (b) 殻縁候補画素群の密度が低い. . . . .	78
5.18	5.4.1 節の予備実験における検出率の結果. . . . .	80
5.19	5.4.1 節の予備実験における誤検出率の結果. . . . .	81
5.20	5.4.1 節の予備実験におけるホタテガイ領域殻縁特徴量 $R_{SR}$ の結果例. . .	82
5.21	5.4.1 節の予備実験におけるその他の領域殻縁特徴量 $R_{SR}$ の結果例. . . .	82
5.22	5.4.2 節の実験結果例 (対象画像は図 3.8) . . . . .	83
5.23	5.5 節の実験結果例 (対象画像は図 3.11) . . . . .	85
5.24	5.5 節の実験における誤検出例. . . . .	86
5.25	海底動画を用いたホタテガイ自動計測のためのアプリケーションの例. . .	87
5.26	海底動画撮影時に取得された GPS ログの例. . . . .	88
5.27	ホタテガイの資源量マップ例. . . . .	88
5.28	海底動画を用いたパノラマ画像の例. . . . .	90
5.29	海底動画におけるエゾスナヒトデ (サイズ: 450 × 450) . . . . .	93
5.30	海底動画におけるマヒトデ (サイズ: 450 × 450) . . . . .	93
A.1	4.4 節の実験結果に基づく従来手法と提案手法による資源量推定精度の比較.	106
A.2	5.4.2 節の実験結果に基づく従来手法と提案手法による資源量推定精度の比較. . . . .	107

## 表 目 次

4.1	各領域の色相平均値と標準偏差結果（対象画像は図 4.12, 図 4.2）. . . . .	48
4.2	4.4 節の実験結果. . . . .	57
4.3	4.4 節の実験における資源量推定精度評価結果. . . . .	58
5.1	パラメータ ( $W'$ , $H'$ ) による殻縁画素抽出率変化の比較結果. . . . .	72
5.2	5.4.2 節の実験結果. . . . .	84
5.3	5.4.2 節の実験における資源量推定精度評価結果. . . . .	84
5.4	5.5 節の実験結果. . . . .	85
5.5	5.5 節の実験における資源量推定精度評価結果. . . . .	86

## 付録A 提案システムによる資源量推定精度

4.4節と5.4.2節の実験結果を用いて、従来手法と提案システムによってサンプル数が増加したときの資源量推定精度を3.4.4節の変動係数 $CV_X$ を用いて比較した。比較結果を図A.1と図A.2に示す。ただし、定数 $C = 30$ とした。

図A.1と図A.2より、提案手法が従来手法とサンプル数が同じとき、提案手法は従来手法の誤差に加えて提案システムの誤差を含むために資源量推定精度は低いが、礫場と砂場共にサンプル数が1000枚を超えると従来手法より精度が向上する。このため、提案手法は従来手法と比較して資源量推定精度の向上が可能である。またサンプル数が4000以上となったとき、推定精度の向上がほぼ横ばいである。これは本研究で行った実験のサンプル数に起因しており、提案システムがもつ誤差によるものである。これは今後、多くのサンプルに対してシステムの精度評価を行うことで高精度な資源量推定が可能である。

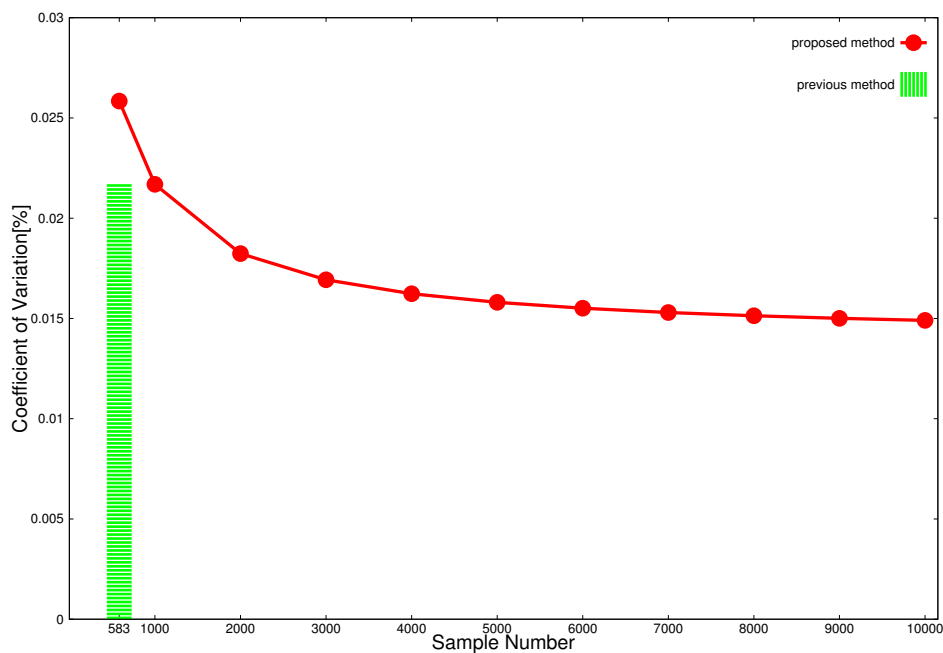


図 A.1: 4.4 節の実験結果に基づく従来手法と提案手法による資源量推定精度の比較.  
Comparison between proposed method and previous method based on Sect. 4.4.

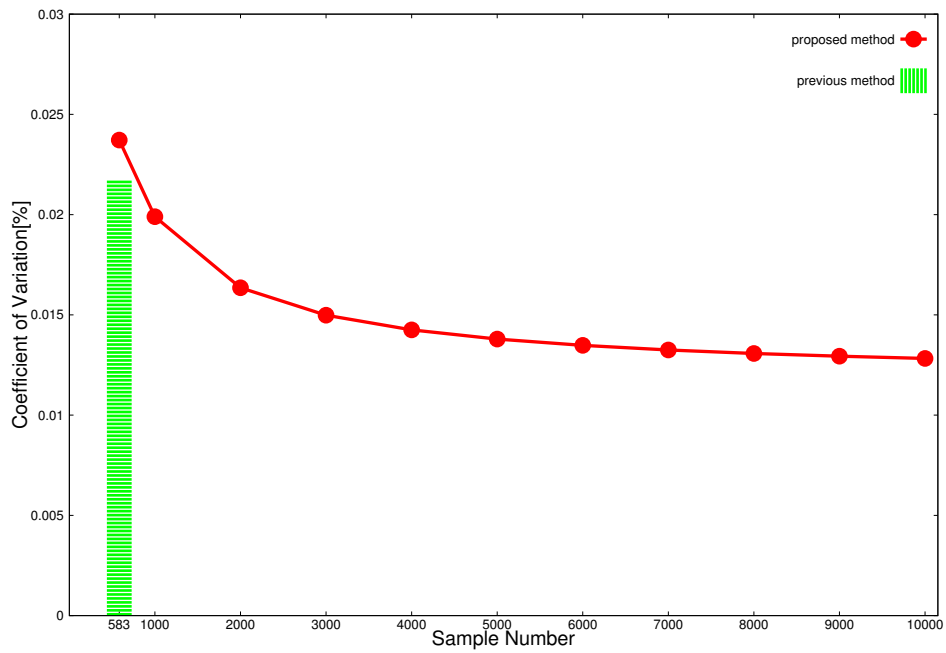


図 A.2: 5.4.2 節の実験結果に基づく従来手法と提案手法による資源量推定精度の比較.  
Comparison between proposed method and previous method based on Sect. 5.4.2.



## 業績一覧

研究業績のうち、博士論文に関係するものを以下に示す。

### 学術雑誌（査読有）

1. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Extraction Method of Scallop Area in Gravel Seabed Images for Fishery Investigation,” *IEICE Trans. Inf. & Syst.* vol.E93-D, no. 7, pp.1754–1760, Jul. 2010.
2. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Extraction Method of Scallop Area from Sand Seabed Images,” *IEICE Trans. Inf. & Syst.* vol. 97, no. 1, pp. 130–139, Jan. 2014.

### 国際学会（査読有）

3. M. Toda, K. Enomoto, Y. Kuwahara, M. Wada, and K. Hatanaka, “Extraction Method of Scallop Area in Seabed Images for Fishery Resources Investigation,” *Proc. Of MTS/IEEE OCEANS’08*, 5 pages in CD-ROM, Quebec, Canada, Sep. 2008.
4. M. Toda, K. Enomoto, Y. Kuwahara, M. Wada, and K. Hatanaka, “Discussion on Method to Extract Scallop Areas in Seabed Images for Fishery Resources Investigation,” *Proc. of 2009 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2009)*, Image Processing II-20, 6 pages in USB Memory, Soul, Korea, Jan. 2009.
5. K. Enomoto, M. Toda, Y. Kuwahara, M. Wada, and K. Hatanaka, “Scallop Detection Method in Seabed Images Using Color and Shape Information,” *Proc. of 15th Japan-Korea Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision*, pp. 87–91, Andong, Korea, Feb. 2009.
6. K. Enomoto, M. Toda, Y. Kuwahara, M. Wada, and K. Hatanaka, “Scallop Detection from Gravel-Seabed Images for Fishery Investigation,” *Proc. of 7th IAPR Conf. on Machine Vision Applications (MVA2009)*, pp. 479–482, Kanagawa, Japan, May. 2009.
7. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Scallop Detection from Sand-Seabed Images for Fishery Investigation,” *Proc. of IEEE Congress on Image and Signal Processing (CISP’09)*, pp. 2453–2457, Tianjin, China, Oct. 2009.

8. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Extraction Method of Scallop Areas Using Shelly Rim Features Considering Bottom Sediment of Sand,” Proc. of 8th IAPR Conf. on Machine Vision Applications(MVA2011), pp. 263–266, Nara, Japan, Jan. 2011.
9. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Extraction Method of Scallop Areas Considering Bottom Sediment of Seabed,” International Symposium on Underwater Technology 2011, 6 pages in CD-ROM, Sep. 2011.
10. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Bottom Sediment Classification Method from Seabed Image for Automatic Counting System of Scallop,” International Symp. on Optomechatronic Technologies, 6 pages in CD-ROM, Oct. 2012.
11. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Detection Method of Scallop and Asteroid from Seabed Video,” Proc. of 9th IAPR Conference on Machine Vision Applications(MVA2013), pp. 435–438, May 2013.
12. K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara, “Detection Method of Asteroid in Sand field from Seabed Video,” International Conf. on Quality Control by Artificial Vision, pp. 298–301, May 2013.

## 商業誌・解説論文

13. 戸田真志, 榎本洗一郎, 栗原康裕, 「水産資源量調査を目的とした海底画像からのホタテ領域抽出」, 画像ラボ, 日本工業出版, pp. 69–72, 2009.7.
14. 戸田真志, 榎本洗一郎, 栗原康裕, 「殻縁特徴とその空間分布を利用した砂場環境でのホタテ領域抽出手法」, 画像ラボ, 日本工業出版, vol. 23, no. 6, pp. 6–14, 2012.

## 国内学会（査読有）

15. 戸田真志, 榎本洗一郎, 栗原康裕, 和田雅昭, 畑中勝守, 「水産資源量調査を目的とした海底画像からのホタテ領域抽出手法の検討」, 平成20年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 612–615, 2008.8.
16. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 和田雅昭, 畑中勝守, 「海底画像からのホタテ領域抽出に関する基礎的検討」, ViEW2008 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp. 76–81, 2008.12.
17. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「殻縁特徴を用いた砂場環境下でのホタテ領域抽出」, ViEW2009 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp. 152–156, 2009.12.
18. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「砂場の海底画像からの殻縁特徴と Hough 変換を用いたホタテ領域抽出」, 第13回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), pp. 163–169, 2010.7.

19. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「砂場環境下における殻縁特徴の確信度を考慮したホタテ領域抽出アルゴリズム」, ViEW2010 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp. 324–331, 2010.12.
20. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「砂場環境下を考慮した殻縁特徴によるホタテ領域抽出」, 第14回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), 6 pages in CD-ROM, 2011.7.
21. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「海底環境を考慮したホタテ領域抽出手法の検討」, 第10回情報科学技術フォーラム (FIT2011), pp. 163–164, 2011.9.
22. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「海底環境を考慮したホタテの自動計数システム」, ViEW2011 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp. 106–113, 2011.12.
23. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「海底動画像を用いたホタテ自動計測手法の検討」, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2012), pp. 63–66, 2012.3.
24. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「砂場環境下における海底動画からのホタテ自動計測手法の検討」, 画像センシングシンポジウム, 4 pages in CD-ROM, 2012.6.
25. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「海底画像からの画像処理を用いたホタテ自動計測システム」, 日本水産学会秋季大会, pp. 5, 2012.9.
26. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「海底動画からのマヒトデ検出手法の検討」, ViEW2012 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, 4 pages in CD-ROM, 2012.12.
27. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「海底動画像を用いたホタテ自動計測手法の検討」, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2013), pp. 103–106, 2013.3.
28. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「バラス場におけるホタテガイ抽出手法の検討」, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2014), 2014.3.(accepted)

## 国内学会（査読無）

29. 戸田真志, 榎本洗一郎, 栗原康裕, 「ホタテ漁場での資源量調査を目的とした海底画像解析に関する検討」, 第26回UBI研究発表会, USBメモリ, 2010.6. (優秀論文賞受賞)
30. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「局所的な殻縁特徴の空間分布を用いた海底画像からのホタテ領域抽出」, PRMU研究会, vol. 111, no. 193, pp. 37–42, 2011.9.

## 特許等

31. 戸田真志, 榎本洗一郎, 栗原康裕, 画像処理装置, 公開2012113436 (公開日:2012/06/14)

## 受賞

32. 2009年3月 電子情報通信学会北海道支部長賞 受賞
33. 2010年6月 第26回 UBI 研究発表会優秀論文賞 受賞
34. 2011年3月 電子情報通信学会北海道支部学生員奨励賞 受賞

研究業績のうち、博士論文に関係しないものを以下に示す。

## 学術雑誌（査読有）

35. 郡司ペギオ幸夫, 村上久, 新里高行, 榎本洗一郎, 戸田真志, 西山雄大, 森山徹, 松井哲也, 飯塚浩二郎, 「頑健な兵隊ガニの群れをもたらす内的ゆらぎ」, *Viva Origino*, vol. 39, pp. 25–29, 2011.
36. D. Fujiwara, K. Iizuka, Y. Matsumura, T. Moriyama, R. Watanabe, K. Enomoto, M. Toda, and Y. Gunji, “The Effect of Mobile Robot on Group Behavior of Animals,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1071–1079, 2012.
37. 榎本洗一郎, 西山雄大, 戸田真志, 郡司ペギオ幸夫, 森山徹, 飯塚浩二郎, 「ミナミコメツキガニの群行動解析のための密な隣接を考慮した分布推定」, *画像電子学会誌*, vol. 42, no. 2, pp. 229–237, 2013.
38. T. Hagiwara, K. Enomoto, M. Toda, M. Tamura, M. Kimura, and S. Takeda, “Extraction Method for Ezo-Wakame Using Line Convergence Index Filter,” *The journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan*, vol. 42, no. 2, pp. 206–213, 2013.
39. 村上久, 西山雄大, 新里高行, 榎本洗一郎, 戸田真志, 森山徹, 飯塚浩二郎, 郡司ペギオ幸夫, 「群れの維持・形成に寄与する内的ゆらぎ」, *計測自動制御学会論文誌*, vol. 49, no. 1, pp. 33–38, 2013.
40. 西山雄大, 榎本洗一郎, 戸田真志, 森山徹, 郡司ペギオ幸夫, 「カニ時計：個の振る舞いと群れの振る舞い」, *計測自動制御学会論文誌*, vol. 49, no. 1, pp. 18–24, 2013.

## 国際学会（査読有）

41. T. Hagiwara, K. Enomoto, M. Toda, S. Takeda, and M. Tamura, “The Amount of *Alaria Praelonga* Kjellmans Analysis Method from *Laminaria* Bed Images for Fishery Investigation,” *Proc. of 17th Japan-Korea Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2011)*, 6 pages in USB memory, Feb. 2011.

42. Y. Nishiyama, K. Enomoto, M. Toda, T. Moriyama, and Y.P. Gunji, “Autonomous oscillations of soldier crabs,” Proc. ICMC2011, pp. 117–119, 2011.
43. Y. P. Gunji, H. Murakami, T. Niizato, A. Adamatzky, Y. Nishiyama, K. Enomoto, M. Toda, T. Moriyama, T. Matsui, and K. Iizuka, “Embodied swarming based on back propagation through time shows water-crossing, hourglass and logic-gate behaviors,” Proc. of the Eleventh European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems, pp. 294–301, 2011.
44. Y. P. Gunji, H. Murakami, T. Niizato, A. Adamatzky, Y. Nishiyama, M. Toda, T. Moriyama, T. Matsui, K. Iizaka, and K. Enomoto, “An Embodied Swarm in Co-creation,” Proc. of SICE Annual Conference, pp. 2587–2589, 2011.

## 商業誌・解説論文

45. 飯塚浩二郎, 森山徹, 松井俊憲, 榎本洗一郎, 戸田真志, 郡司幸夫, 「動物とロボットが紡ぎ出す創発-兵隊ガニとロボットは社会を作れるか-」, 日本ロボット学会, vol. 28, no. 4, pp. 30–32, May 2010.
46. 戸田真志, 萩沢武志, 榎本洗一郎, 田村正勝, 木村賢史, 武田榮, 「コンブ漁業支援を目的とした水中映像からの海藻類抽出」, 画像ラボ, 日本工業出版, vol. 23, no. 7, pp. 1–8, 2012.

## 国内学会（査読有）

47. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「顕微鏡画像におけるホタテガイ D 型幼生識別の試み」, ViEW2009 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp. 321–324, 2009.12.
48. 西山雄大, 榎本洗一郎, 戸田真志, 郡司ペギオ幸夫, 「振動する兵隊ガニ The Oscillating Soldier Crabs」, 日本動物行動学会第 29 回大会, pp. 63, 2010.
49. 萩沢武志, 榎本洗一郎, 戸田真志, 田村正勝, 武田榮, 「水中カメラ映像からの昆布領域抽出手法の検討」, 第 13 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), pp. 874–879, 2010.7.
50. 萩沢武志, 榎本洗一郎, 戸田真志, 田村正勝, 武田榮, 「コンブ資源量調査における筋特徴を用いたアイヌワカメ識別」, ViEW2010 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp. 317–323, 2010.12.
51. 郡司ペギオ幸夫, 村上久, 新里高行, 西山雄大, 松井哲也, 榎本洗一郎, 戸田真志, 森山徹, 飯塚浩二郎, 「場の空気を読む生物集団モデル: ミナミコメツキガニはい

- かにして、忌避する水溜りに入るか」, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp. 1302–1305, 2010.
52. 榎本洗一郎, 西山雄大, 戸田真志, 郡司ペギオ幸夫, 森山徹, 飯塚浩二郎, 「密に隣接する移動物体の追跡手法に関する検討」, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2011), pp. 27–30, 2011.3.
53. 萩沢武志, 榎本洗一郎, 戸田真志, 田村正勝, 武田榮, 「水産資源量調査を目的とした水中映像からの海藻類抽出」, 第14回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), 6 pages in CD-ROM, 2011.7.
54. 萩沢武志, 榎本洗一郎, 戸田真志, 田村正勝, 木村賢史, 武田榮, 「水産資源量調査のための水中映像中の藻類識別」, ViEW2011 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp. 98–105, 2011.12.
55. 水島裕貴, 萩沢武志, 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 佐々木潤, 「水産資源量調査を目的とした海底動画からのケガニ領域抽出手法の検討」, ViEW2011 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, pp.114–118, 2011.12.
56. 榎本洗一郎, 戸田真志, 藤原大佑, 飯塚浩二郎, 森山徹, 郡司ペギオ幸夫, 「屋外環境における群行動解析のための個体追跡手法の検討」, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2012), pp. 67–71, 2012.3.
57. 水島裕貴, 萩沢武志, 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 佐々木潤, 「水産資源量調査を目的とした海底動画からのケガニ領域抽出手法の検討」, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2012), pp. 161–165, 2012.3.
58. 榎本洗一郎, 戸田真志, 栗原康裕, 「蛍光顕微鏡画像からのホタテガイ幼生検出手法の検討」, 画像センシングシンポジウム, 4 pages in CD-ROM, 2013.6.

## 国内学会 (査読無)

59. 萩沢武志, 榎本洗一郎, 戸田真志, 田村正勝, 木村賢史, 武田榮, 「コンブ漁業における水産資源量調査の為の水中映像からの紅藻類抽出」, PRMU 研究会, vol. 111, no. 193, pp. 31–36, 2011.9.