海洋環境における生態理解のための画像処理技術

榎本 洸一郎（〒 950-2181 新潟大学大学院自然科学研究科
新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番）

Image Processing Technology for Ecological Knowledge in Marine Environment

Koichiro Enomoto (Graduate School of Science and Technology, Niigata University)

Abstract

膨大な海底動画から画像処理によるホタテガイ自動計測技術による資源量推定システムの開発を目的とし，バラス場環境下におけるホタテガイ検出手法を提案する．本稿ではモルフォロジーフィルタバンクを用いることで従来法より非常に高速かつ高精度な検出を可能にし，実応用に耐えるものであることが確認された．

キーワード：

1. はじめに

日本国内において最大の漁業生産額を誇る北海道において，魚種別の生産量のうちホタテガイは，全体の 3 割を占める北海道の漁業において主要な水産資源である．このうち北海道オホーツク海側ではホタテガイ地まき養殖が盛んであり，海底画像や海底動画を用いた資源量調査が行われている．一方でデータが膨大であり，計測・解析の大きな障害となっている．

著者は，ホタテガイ高精度資源量推定のための海底動画を用いた自動計測システムの開発を行っている [(1)(2)]．対象となる海底動画は，礫場や砂場，バラス場など，底質により視覚的特徴が大きく異なるため，それぞれの場に適したホタテガイ検出手法を提案している．このうち砂場環境においては，殻縁特徴と殻特徴をそれぞれ定義し，ホタテガイ領域をモデル化することで検出を試みている．一方でバラス場環境では，殻縁特徴の抽出として線集中度フィルタ [(2)] を用いた検出手法を提案しているが，計算コストが非常に高いため，膨大なデータの処理には適していない．

そこで本稿では，新たにモルフォロジーフィルタバンク [(3)] を導入し，バラス場環境のためのホタテガイ検出手法を提案する．まず第 2 章ではバラス場環境のためのホタテガイ検出の従来手法とその問題点について述べ，モルフォロジーフィルタバンクを用いた検出手法を提案する．次に第 3 章では提案手法について述べ，第 4 章では，従来手法と提案手法の比較実験を行い，提案手法の有効性を検証する．最後に第 5 章では，考察と今後の展望について述べる．

2. システム設計

〈2･1〉 海底動画とホタテガイ　本稿で対象となる海底動画は，北海道オホーツク海側のホタテガイ養殖場で撮影されたものであり，サイズは 1920 × 1024，30fps，24bit のカラーである．また DV カメラは，海底からの高さが一定になるように撮影機材に設置されている [(2)]．

バラス場環境下における海底動画の例を図 1，バラス場環境と砂場環境のホタテガイ領域の画像例を図 2 に示す．図 1 より動画中にはホタテガイの他に，二枚貝の死殻などの残骸が含まれており，基質は細砂や粗砂が混在していることがわかる．またホタテガイは，海底の基質が細砂や粗砂などの砂場環境やバラス場環境では砂に覆われており，呼吸の際の殻の開閉によって殻縁部（貝殻の縁部）のみが確認できる．また図 2(a) よりバラス場環境では，ホタテガイの殻縁部以外にも白い残骸が含まれているのに対して，図 2(b) より砂場環境では，ホタテガイ以外には白い残骸などが含まれていない．

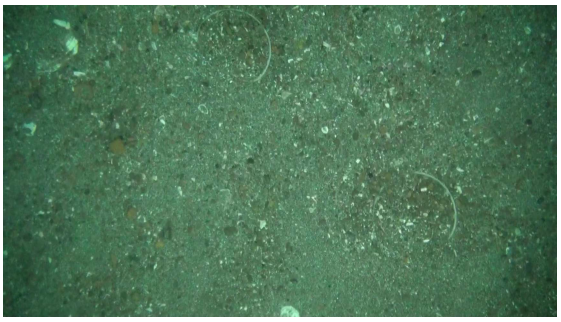


図 1: バラス場環境の海底動画例．画像内にホタテガイが 2 個体含まれている．
Fig. 1. Sample image of the seabed video. In this image, there are two scallops.

〈2･2〉 従来手法と問題点　砂場環境では，ホタテガイの殻縁部以外の領域には殻縁のような白い領域が存在しないことを前提とし特徴量を設計していた [(1)] が，バラス場環境ではホタテガイ以外の領域にも殻の破片が散乱していため，ホタテガイの殻縁部に類似した白い領域が多く存在している．

このため著者らはバラス場の海底画像において，ホタテガイ殻縁部の円弧の連続性に注目し，線集中度フィルタを

(a) バラス場環境　　**(b)** 砂場環境

図 2: バラス場環境と砂場環境におけるホタテガイ領域.
Fig. 2. Scallop areas in granul-sand field and sand field.

用いたホタテガイ検出手法を提案している[2]．大まかな処理の流れは以下の通りである．

処理 1 平滑化処理
Mean Shift 法により画像を平滑化する

処理 2 殻縁候補画素抽出
輝度値に対して線集中度フィルタによりホタテガイの殻縁を構成する線状成分を抽出し，線集中度画像を得る

処理 3 ホタテガイ候補領域抽出
ホタテガイを円形状と仮定し，得られた画像に対して，線集中度を重みとした重み付き円検出 Hough 変換により，円形状の候補領域を抽出する

処理 4 殻縁特徴量によるホタテガイ検出
ホタテガイ候補領域に対して，殻縁特徴量を算出し，閾値処理によりホタテガイか否かを判別する

従来手法では，図 2(a) からホタテガイ殻縁部の円弧を直線成分とし，線集中度フィルタを用いて抽出し，実際の海底動画を用いた実験において，ホタテガイ検出率 94.1% の精度を示している．

線集中度フィルタとは，画像の輝度勾配ベクトルに注目し，線状凸領域をある中心線を境にして両側の輝度勾配ベクトルがそれに直交している領域としてモデル化したものであり，コントラストや線幅に不変な線抽出フィルタである[4][5]．またマンモグラフィからのスピキュラ判別[5] や海中動画からの藻類判別[6] などに用いられるなど，コントラストやノイズに対して頑健な手法である．

ある注目画素において線集中度は，様々な線幅・長さ・角度のベクトル集中線を仮定し，近傍点の勾配ベクトルを用いて算出される．このため，あらかじめ検出したい線状成分を設定することが可能である．一方で，想定される線状成分の数だけ処理が発生するため，処理 2 の線集中度の計算コストが膨大なため対象動画の全フレームを解析することは困難である．

〈2・3〉 モルフォロジーフィルタバンクによるホタテガイ検出手法の提案　〈2・2〉節では，従来手法とその問題点について述べた．これに対して本稿では，処理 2 において線集中度フィルタに代わり，新たにモルフォロジーフィルタバンクを用いたホタテガイ検出手法を提案する．

モルフォロジーフィルタバンクとは，モルフォロジーによる粒状成分と線状成分抽出[7] とウェーブレット変換における多重解像度分解を用いることで，画像内から異なる大きさの成分を抽出することができる手法である[3]．また前処理として平滑化を行う必要がなく，抽出した各成分画像から元画像を完全に再構成することが保障されている．

そこで本稿では，図 2 より，ホタテガイの殻縁部を線状成分，それ以外の白い残骸などを粒状成分と分離することで，ホタテガイの検出手法を検討する．提案する処理の流れは以下の通りである．

処理 1 モルフォロジーフィルタバンクによる線状成分抽出
ホタテガイの殻縁部を線状成分と仮定し，対象画像に対してモルフォロジーフィルタバンクを用いて線状成分のみを抽出する．

処理 2 殻縁候補画素抽出
得られた線状成分画像に対して，Niblack の動的閾値法を用いて線分を抽出し，殻縁候補画素とする．

処理 3 ホタテガイ候補領域抽出
ホタテガイを円形状と仮定し，得られた画像に対して，殻縁候補画素と特徴点とした円検出 Hough 変換により，円形状の候補領域を抽出する

処理 4 殻縁特徴量によるホタテガイ検出
ホタテガイ候補領域に対して，殻縁特徴量を算出し，閾値処理によりホタテガイか否かを判別する

次節ではそれぞれの処理について詳述する．

3. 提案手法

〈3・1〉 モルフォロジーフィルタバンク

〈3・1・1〉 粒状成分と線状成分の抽出　濃淡画像に対する粒状成分，線状成分の抽出について簡便に説明する[3]．

まず濃淡画像からの粒状成分の抽出について述べる．元画像の粒状成分は，モルフォロジーにおける直線の構造要素による top-hat 変換により抽出される[4]．このとき，あらゆる方向の線状成分を保存したまま粒状成分のみを抽出するためには，複数の構造要素を重ね合わせた多重構造要素を用いればよい．

画像内の座標を (x,y)，元画像を f，モルフォロジーの構造要素を g とおく．このとき直線多重構造要素 $B_0, B_1, \cdots, B_n$ により opening 処理した画像を，それぞれ $f_{B0}(x,y), f_{B1}(x,y), \cdots, f_{Bn}(x,y)$ とする．ここで直線構造要素 B_n は，$n=7$，22.5° 毎の傾きを持つ半直線とする．このとき画像 $f_B(x,y)$ は，

$$f_B(x,y) = max\{f_{B0}(x,y), f_{B1}(x,y), \cdots, f_{B7}(x,y)\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

で表される．

このとき粒状成分は，元画像 f に対する直線多重構造要素 $B_0, B_1, \cdots, B_n$ を用いた top-hat 変換により得られる．つまり粒状成分を抽出した画像 $f_o(x,y)$ は，

$$f_o = f(x,y) - f_B(x,y) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

で表される．

次に線状成分の抽出について述べる．ここで画像 f_B は，元画像 f から直線多重構造要素により粒状成分が除去されたものである．よって線状成分を抽出するためには，この画像に対して直線多重構造要素の横幅と同じ直径を持つ円形構造要素 C を用いた top-hat 変換を行えばよい[3]．つまり線状成分を抽出した画像 $f_v(x,y)$ は，

$$f_v(x,y) = f_B(x,y) - f_{BC}(x,y) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

で表される．ここで画像 $f_{BC}(x,y)$ は画像 f_B に対して円形構造要素 C によって opening した画像である．

〈3･1･2〉 モルフォロジーフィルタバンク 〈3･1･1〉節で述べた処理により，元画像における粒状成分と線状成分を抽出することができる．しかし，単一の大きさの構造要素では，様々な大きさの粒状成分や洗浄成分の抽出に対応することができない．このため，ウェーブレット解析における多重解像度分解に基づいたモルフォロジーフィルタバンクを導入する[3]．

まず画像 $f(x,y)$ を式 (2) と式 (3) を用いて，

$$f(x,y) = f_o(x,y) + f_v(x,y) + f_{BC}(x,y) \cdots\cdots\cdots (4)$$

と変形する．これは元画像 $f(x,y)$ が，粒状成分 $f_o(x,y)$ と線状成分 $f_v(x,y)$，および平滑化画像（残存成分画像）$f_{BC}(x,y)$ に分解できることを表している．このとき，様々な大きさの粒状成分と線状成分を抽出するために，ウェーブレット変換の多重解像度分解を行う．

このとき粒状成分のみについて，最大解像度 N まで抽出する（N は任意の数）．元画像 $f(x,y)$ を解像度ゼロの平滑化画像 $f_B^0(x,y)$ とするとき，サイズの小さい直線多重構造要素を用いた解像度 1 の粒状成分 $f_o^1(x,y)$ を用いて，

$$f(x,y) = f_B^0(x,y) = f_o^1(x,y) + f_B^1(x,y) \cdots\cdots\cdots (5)$$

で表される．ここで得られた平滑化画像 $f_B^1(x,y)$ に対して，さらにサイズの大きな直線多重構造要素で以下のように分解を繰り返す．

$$f_B^1(x,y) = f_o^2(x,y) + f_B^2(x,y) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

この処理を最大解像度 N まで繰り返すことによって，粒状成分についての多重解像度分解を行うことができ，元画像 $f(x,y)$ は，

$$f(x,y) = \sum_{i=1}^{N} f_O(x,y) + f_B^N(x,y) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

で表される．ここで i は解像度を，f_O^i は解像度 i における粒状成分を表す．

次に，線状成分について考える．解像度 N の平滑化画像 $f_B^N(x,y)$ を解像度ゼロの平滑化画像 B_{BC}^0 とするとき，サイズの小さい円形構造要素を用いて解像度 1 の線状成分 $f_v^1(x,y)$ を用いて，

$$f_B^N(x,y) = f_{BC}^0 = f_v^1(x,y) + f_{BC}^1(x,y) \cdots\cdots\cdots (8)$$

で表される．ここで得られた平滑化画像 $f_{BC}^1(x,y)$ に対して，さらにサイズの大きな円形構造要素で以下のように分解を繰り返す．

$$f_{BC}^1(x,y) = f_v^2(x,y) + f_{BC}^2(x,y) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

この処理を最大解像度 M（M は任意の数）まで繰り返すことによって線状成分についての多重解像度分解を行うことができ，元画像 $f(x,y)$ は，

$$f_B^N(x,y) = \sum_{j=1}^{M} f_v^j(x,y) + f_{BC}^M(x,y) \cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

で表される．ここで j は解像度を，f_v^j は解像度 j における線状成分を表す．

式 (7) と式 (10) より，元画像 $f(x,y)$ は，

$$f(x,y) = \sum_{i=1}^{N} f_O^i(x,y) + \sum_{j=1}^{M} f_v^j(x,y) + f_{BC}^M(x,y) \quad (11)$$

で表される．これは，粒状成分と線状成分，平滑化画像を加算することで完全に再構成することが可能であることを示している．図 3 にモルフォロジーフィルタバンクの構成を示す．

〈3･2〉 ホタテガイ殻縁候補画素の抽出 殻縁候補画素[1] として，線状成分画像から二値化処理により抽出する．二値化処理には Niblack の手法を用いる．Niblack の手法は局所領域の分散に応じて閾値を定める適応的二値化手法の一つである．対象画像において注目画素 (x,y)，注目画素を中心とした局所領域の平均値 $m(x,y)$，標準偏差 $\sigma(x,y)$ のとき，閾値 $T(x,y)$ は

$$T(x,y) = m(x,y) + k \cdot s(x,y) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

で表される．ここで k は標準偏差 $\sigma(x,y)$ に対するパラメータ定数であり，本稿では $k = 1.96$ とする[1]．

〈3･3〉 ホタテガイ候補領域の抽出 ホタテガイの形状を円形状と仮定し，前節で得られた殻縁候補画素を特徴点とした円検出 Hough 変換を用いて，ホタテガイ候補領域を抽出する[1]．ただし，対象動画中のホタテガイは，大きさや形状は一定の範囲に収まるため，検出する円の半径 r を $110 \leq r \leq 160$ のみをホタテガイ候補領域とした．

〈3･4〉 ホタテガイ検出 前節で得られたホタテガイ候補領域に対して殻縁特徴によりホタテガイ領域を識別する[1]．

ここで殻縁特徴量を以下のように定義する[1][2]．候補領域の半径を r，周囲長を l，パラメータ $d(0 < d \leq 1)$ とするとき，弧の長さを dl とする．このときホタテガイ候補領域 P とするとき，円近傍の殻縁領域 Q $(Q \subset P)$ を，

$$f(x,y,r-\frac{\Delta r}{2},r-\frac{\Delta r}{2}) \leq Q \leq f(x,y,r+\frac{\Delta r}{2},r+\frac{\Delta r}{2}) \cdots (13)$$

と定義する．ただし Δr は，Hough 空間における解像度である．図 4 に殻縁領域 Q の概略図を示す．殻縁領域 Q に

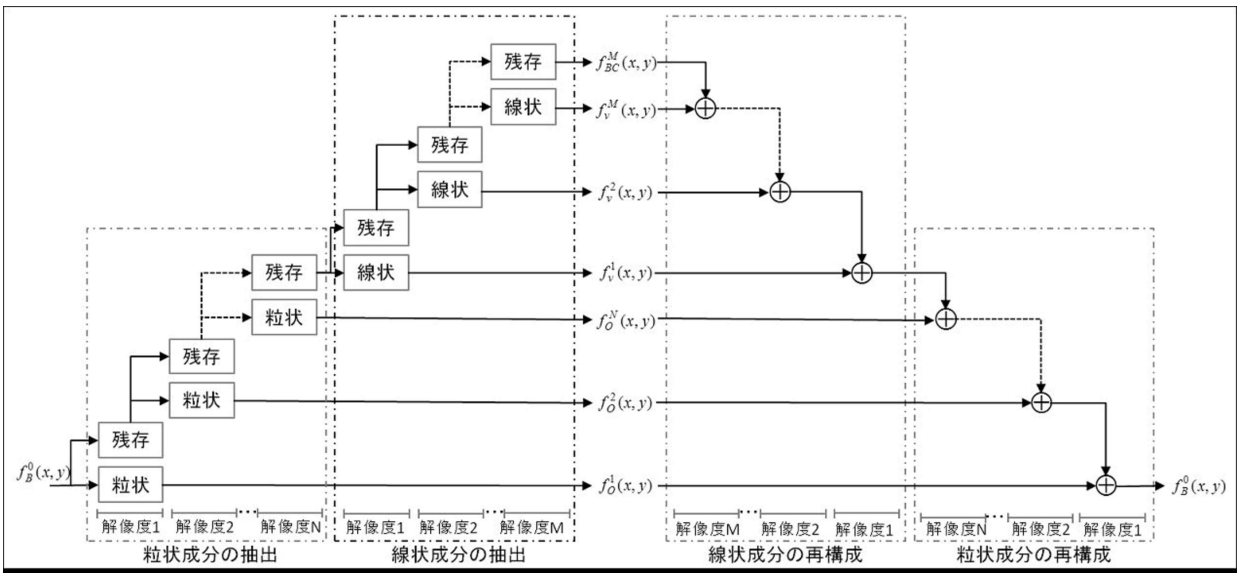


図 3: モルフォロジーフィルタバンクの構成.
Fig. 3. Architecture of morphology filter bank.

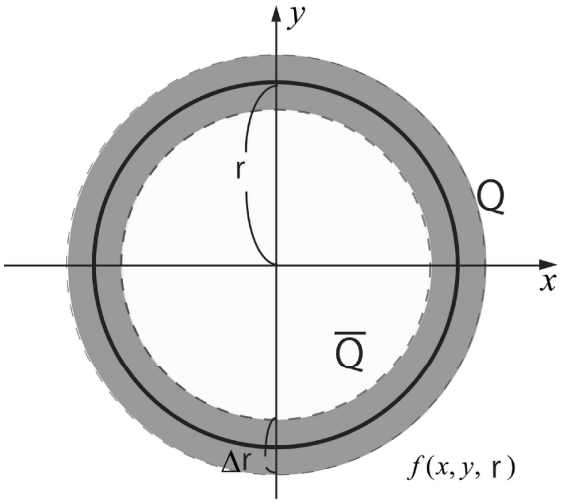


図 4: 殻縁領域 Q の定義.
Fig. 4. Definition of shelly rim region Q.

おいて，弧上 dl の殻縁候補画素の数を N_Q とするとき，これを円領域上のすべての弧において求める．このとき，殻縁領域の特徴量 R_Q を，

$$R_Q = max(\frac{N_Q}{Q}) \cdots\cdots (14)$$

と定義する．

ここでホタテガイ候補領域 P が，

$$Th_Q \leq R_Q \cdots\cdots (15)$$

を満たすとき，ホタテガイ領域とする．ただし，Th_Q　R_Q に対する閾値である．

本稿ではパラメータ $d = 0.25$，閾値 $Th_Q = 0.6$ とした [2]．

4. 実　験

〈4・1〉 実験方法　本実験では，提案手法であるモルフォロジーフィルタバンクによるホタテガイ画像からの線状成分抽出について検討する．また提案手法に加えて，従来手法の線集中度フィルタ，Niblack の手法 [1] による殻縁候補画素の抽出結果と比較する．

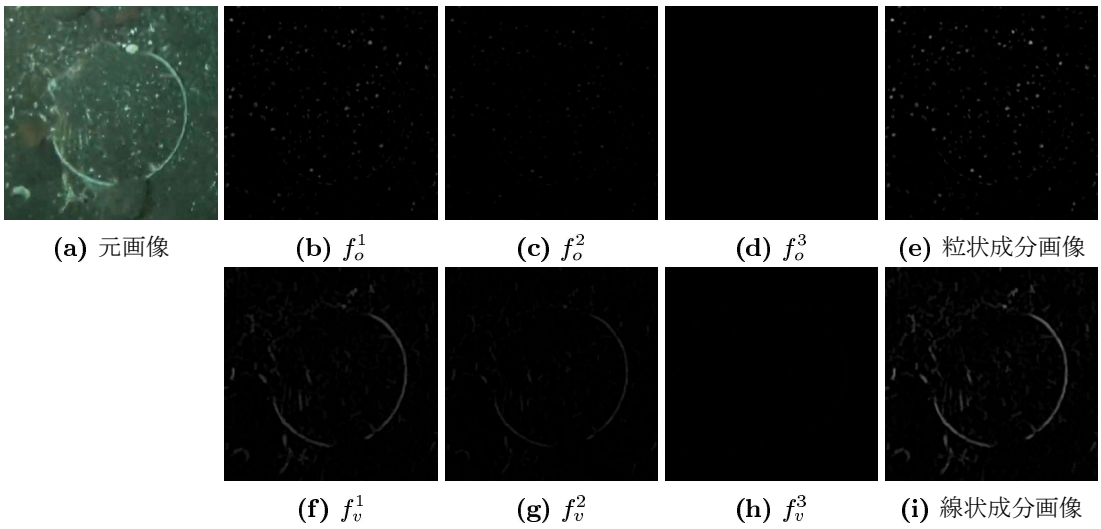
実験には，海底動画のフレームから 450 × 450pixel に切り出したホタテガイを含む画像 90 枚，死殻やバラス場の画像 10 枚の計 100 枚を用いる．ここでモルフォロジーフィルタバンクの解像度を 1 から 3 までとし，各解像度における円形構造要素の直径をそれぞれ 13, 11, 3，線集中度フィルタで検出する線分長を 10 とした．

〈4・2〉 実験結果　図 5 にモルフォロジーフィルタバンクの結果例を示す．図 5 より，各解像度において粒状成分と線状成分が分離されている．

図 6 に，Niblack の手法と線集中度フィルタ，モルフォロジーフィルタバンクによる殻縁候補画素抽出結果を示す．図 6(b) より Niblack の手法では，ホタテガイの殻縁領域は抽出されているが，それ以外の白い残骸も多く抽出されている．一方で，図 6(c),(d) より，線分という形状特徴を持つ領域のみ検出することで，誤検出が大きく抑えられていることがわかる．

図 7 に，提案手法によるホタテガイ検出の結果例を示す．図 7(a) より，モルフォロジーフィルタバンクにより得られた線状成分に対して，Niblack の手法によりホタテガイの殻縁部が抽出されており，後段の処理において正しくホタテガイと識別された．

〈4・3〉 考　察　図 5 より，モルフォロジーフィルタバンクによって対象画像から粒状成分である死殻などの残骸と，ホタテガイの殻縁部の分離が可能であることが示さ



(a) 元画像 **(b)** f_o^1 **(c)** f_o^2 **(d)** f_o^3 **(e)** 粒状成分画像

(f) f_v^1 **(g)** f_v^2 **(h)** f_v^3 **(i)** 線状成分画像

図 5: モルフォロジーフィルタバンクによる粒状成分と線状成分抽出例.
Fig. 5. Examples images of extracting nodular patterns and line patterns using morphology filter bank.

れた.

また図 6(c),(d) より，線集中度フィルタとモルフォロジーフィルタバンクは線分に対して正しく応答していることがわかる．ただし線集中度フィルタは注目画素近傍の勾配ベクトルから線集中度が定義され，0　1
モルフォロジーフィルタバンクは円形構造要素により抽出される対象画像の画素値であるため，その値が線分の度合いを表しているわけではない．このため，モルフォロジーフィルタバンクによって得られた線状成分画像から線分を抽出するための閾値処理などを検証する必要がある．

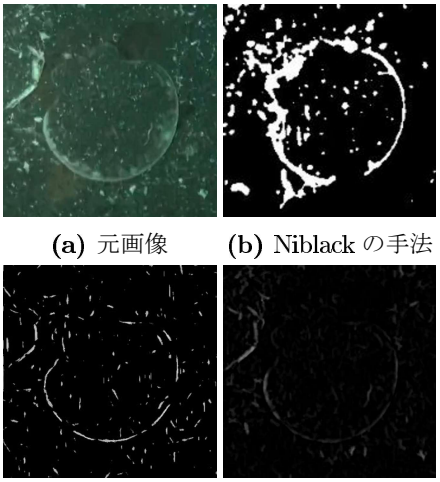
また実験に使用した計算機（CPU Core i5, メモリ 32GB, Windows10 64bit，Microsoft VisualStudio C#
線集中度フィルタのみの処理時間は平均 24,147msec に対して，モルフォロジーフィルタバンクのみの処理時間は平均 238msec であり，100 倍近くの処理時間の差となった．これは線集中度フィルタが注目画素ごとに様々な線分を探索するのに対して，モルフォロジーフィルタバンクは単純な演算のみで処理できるためである．本研究で対象となる海底動画は膨大であるが，図 7 よりモルフォロジーフィルタバンクを用いた提案手法でもホタテガイを検出できることから，非常に有効であるといえる．

5. おわりに

本稿では，バラス場環境下におけるホタテガイ検出手法として，新たにモルフォロジーフィルタバンクを用いた検出手法を検討した．実験の結果，従来手法と同様の性能と共に非常に高速に処理することが可能であることがわかった．今後は構造要素のサイズなどについて更なる検討を行うと共に精度評価やホタテガイ検出精度の向上をを目指す予定である．

謝　辞

本研究は，公益財団法人高柳健次郎財団の助成を受け，実施いたしました.



(a) 元画像 **(b)** Niblack の手法

(c) 線集中度フィルタ **(d)** モルフォロジーフィルタバンク

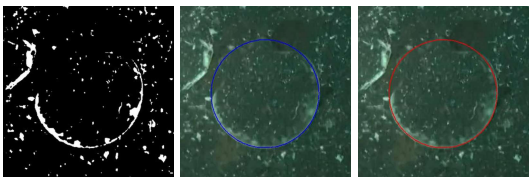
図 6: 各手法における殻縁候補画素抽出結果の比較
Fig. 6. Comparative experiment result for extracting of the shelly rim pixels.

参考文献

（1） 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 (2014-1)

（2） K. Enomoto, M. Toda, and Y. Kuwahara: ”Discussion on a Method to Extract Scallop Using Line Convergence Index Filter from Granule-sand Seabed Videos”, IAPR Conf. on Machine Vision Applications (MVA2015), pp. 35–40, Tokyo, Japan (2015-5)

（3） 橋本隆太郎・内村圭一・上瀧剛・内山良一：「モルフォロジーフィルタバンクにおける構造要素形状についての検討」，信学技報, Vol. 114, No. 482, pp.305–310 (2015-3)



(a) 殻縁候補画素　**(b)** ホタテガイ候補領域　**(c)** ホタテガイ検出結果

図 7: 提案手法によるホタテガイ検出結果例
Fig. 7. Experiment results of the scallop area by proposed method.

（4） H. Kobatake, S. Hashimoto: ”Convergence index filter for vector fields”, *IEEE Trans Image Process*, Vol. 8, No. 8, pp. 1029–1038 (1999)

（5） 吉永幸靖・小畑秀文・福島重廣・縄野繁：「輝度こう配ベクトル場モデルによる線の特徴抽出を用いたスピキュラ判別法」，信学論，Vol. 87, No. 1, pp. 146–154 (2004)

（6） T. Hagisawa, 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)

（7） 小畑秀文：「モルフォロジー」，コロナ社，東京 (1996)