

オキアミの色彩及び形状に関する研究

小林 富士男* 岡本 昌丈† 坪井 始* 田中 始男* 尾関 孝史*

Study on Color and Shape of Krill, *Euphausia* sp.

Fujio KOBAYASHI*, Masatake OKAMOTO†, Hajime TSUBOI*, Motoo TANAKA*
and Takashi OZEKI*

ABSTRACT

Recently, the automatic work equipment and the information communications equipment, etc. are being introduced in the field of the agriculture fishery industry to improve mechanization and the quality, and to use the resource effectively. In obtaining, fishery industry's freshness of marine products is important. Marine products captured for that are selected at efficiently, and high speed. In addition, the automation of the selection is hoped for to use marine products effectively. Fish's outline is extracted as fish kind selection device with an image processing device so far. And, the selection method is examined. However, an enough identification result is not obtained for the same kind of fish only by the method by this shape feature extraction. Then, a basic color of krill was first examined in this research. Next, the shape characteristic of krill was examined. And, the algorithm by which only krill was extracted from the sample where krill existed together to the foreign body was developed applying them.

キーワード: フーリエ記述子, 画像処理, パターン認識, 濃度ヒストグラム, 統計量

Keywords: Fourier descriptors, Image processing, Pattern recognition, Gray level histograms, Statistical data

1. はじめに

近年, 農水産業の分野において省人化, 品質の向上, 資源の有効利用を目的として, 自動作業機器や情報通信機器などの導入が進められている。特に水産業界においては, 水産物は鮮度が重要であるため, 捕獲した水産物を効率良く高速で選別し, 更に有効に利用するために選別の自動化が強く望まれている。従来, 漁種選別装置としては, 画像処理装置を用いて魚の輪郭を抽出し, 識別する方法が検討されている [1]。しかし, この形状特徴抽出による方法だけでは, 同科の漁種に対して十分な識別結果は得られていない。乾物のオキアミ *Euphausia* sp. のように漁種に比べて非常に小さく形が一様でない場合には, 形状特徴だけを用いた抽出は困難である。

そこで, 本研究ではオキアミが持つ基本的な色彩と形状特徴を調べ, それを適用して, オキアミと異物が混在している試料において, オキアミのみを抽出するアルゴリズムを開発したので報告する。2.では, 画像の色彩情報の様々な統計量に関して述べ, 次にそれらの統計量を利用してオキアミの色彩情報について調べている。3.では, P形フーリエ記述子と評価関数について述べ, それらを用いてオキアミの持つ形状特徴量を調べている。4.ではオキアミの色彩情報と形状特徴を用いて具体的にオキアミと異物が混在した画像からオキアミのみを抽出するアルゴリズムについて記述している。

2. オキアミの色彩情報

本章では始めに画像の色彩情報を知るために必要な様々な統計量に関して述べる。次に、画像の濃度ヒストグラムとその統計量を用いてオキアミの色彩情報を調べる。なお、本研究では256階調のRGB成分で表現されるカラー画像を取り扱っている。

2.1 濃度範囲

濃度範囲 S は、濃度 Z の最大値 Z_{max} と最小値 Z_{min} との差で次の式のように与えられる。

$$S = Z_{max} - Z_{min} \dots\dots\dots (1)$$

濃度範囲は、このように計算が簡単でしかも必ず画像(対象物)の全濃度値がこの幅の中に入っている。しかし、極端に大きな濃度値のノイズや小さな濃度値のノイズの影響を受けやすいという問題点がある。

2.2 平均値, 中央値, 最頻値

画像の濃度分布を表す統計量として、以下のものを採用する。濃度の平均を表す平均値 \bar{Z} 、濃度の値の小さいものから順にならべたとき、その中央に位置する中央値 Z_m 、最大の度数を表す最頻値 Z_0 である。濃度ヒストグラムの形が山形で左右対象のときには、これらの3つの値は一致する。平均値には、各濃度の値が同等に影響する。しかし、ノイズ等による極端にかけ離れた値が少数個存在してもそれらに左右されやすい。それに対して中央値、最頻値は、ノイズ等の極端な値の影響を受けにくい。

2.3 標準偏差

画素数 $m \times n$ のデジタル画像 $g(i, j)$ において、濃度が0から $L-1$ の L 階段に量子化されているとする。その濃度 Z のヒストグラムを $h(Z)$ で表せば、標準偏差 σ は次の式のように与えられる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{z=0}^{L-1} h(Z)(Z - \bar{Z})^2} \dots\dots\dots (2)$$

標準偏差は濃度ヒストグラムの平均値からのばらつきを表し、その値が大きい程ばらつきが大きく、小さい程平均値の近くに分布が集中する。

2.4 尖度

分布曲線の尖りの度合を示す尺度として尖度 β は、次の式のように与えられる。

$$\beta = \frac{\nu_4}{\sigma^4} - 3 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 ν_4 は次の式を採用する。

$$\nu_4 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{z=0}^{L-1} h(Z)(Z - \bar{Z})^4 \dots\dots\dots (4)$$

正規分布では、 $\frac{\nu_4}{\sigma^4} = 3$ となるから尖度は零となる。尖度が正の符号で大きな値を持つものほど、濃度ヒストグラムにおいて平均値の周りに分布が集中することを意味する。

2.5 オキアミの色彩情報

濃度ヒストグラムおよび様々な統計量を用いて、オキアミの色彩情報を調べる実験を行なった。

まず、オキアミの持つ色彩情報を調べるために、図1のようにオキアミのみを敷き詰めた試料をデジタルカメラで撮影してコンピュータに入力した。このようなデジタル画像を100枚用意した。デジタル画像のサイズは 640×480 画素である。

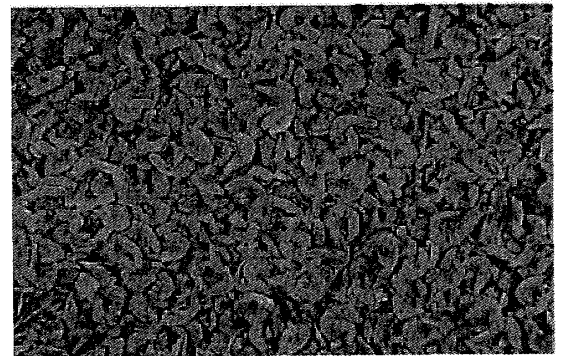


図1 オキアミのみの画像
Fig.1 Image only of krills.

入力画像の色彩情報を求めるために赤成分、緑成分、青成分(以後、赤成分をR、緑成分をG、青成分をBとする)に分解し、それらの濃度ヒストグラムを求めた。次に、その濃度ヒストグラムから様々な統計量を計算した。図2にその濃度ヒストグラム、表1にその統計量を示す。なお、本実験では100枚の画像に対して同じ計算を行なったが全て図2と同様な結果が得られている。

ここで表1の統計量のうち標準偏差と尖度に着目する。標準偏差を見るとオキアミのB成分がRGB各成分の中では一番値が小さい。これは図2の濃度ヒストグラムでオキアミのB成分が0のところ分布が偏っているためである。この原因は、撮影の際にオキアミとオキアミのすき間にできた影が濃度ヒストグラムの濃度値の低い領域に影響を及ぼしたためである。従って、本来、正規分布になるはずのB成分は、上述した理由により0のところ分布が偏ってしまった。つまり、本実験で得られた濃度ヒストグラムの濃度値の低い領域のデータは信

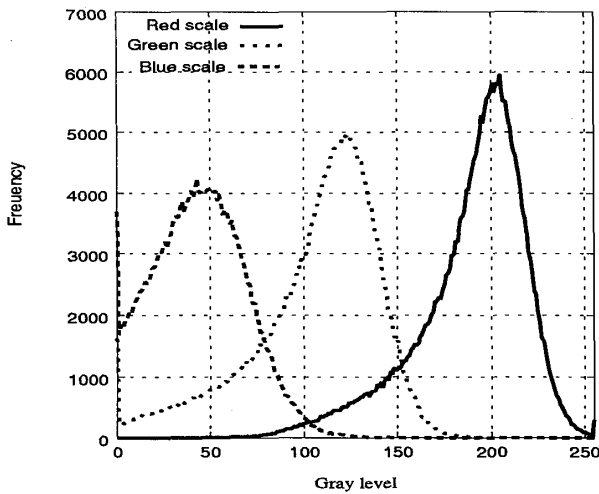


図2 濃度ヒストグラム
Fig.2 Gray level histograms.

表1 濃度ヒストグラムから得られる統計量
Table1 Statistical data of Gray level histograms.

統計量	R成分	G成分	B成分
濃度分布の範囲	21~255	0~222	0~201
中央値	195	113	39
最頻値の濃度値	205	124	43
平均値	189.131	106.077	38.354
標準偏差	29.600	33.732	27.079
尖度	1.329	0.683	-0.649

頼性が低い。そこで濃度ヒストグラムの濃度値の高い領域のほうに注目することにする。濃度値の高い領域のほうには R成分が存在していることがわかる。しかも、R成分は B成分の次に標準偏差が小さい。また、尖度を見ると R成分が正の値で一番大きい値を持つ。具体的には、R成分は最頻値の濃度値 205 あたりに分布が集中しており、かつ 100 以下の濃度値は非常に小さいことがわかる。故にオキアミの特徴量としては R成分に良い特徴が現れている。また、この濃度ヒストグラムの濃度値の高い領域には B成分がほとんど分布していないという顕著な特徴が読みとれる。

3. オキアミの形状特徴量

本章では P形フーリエ記述子を用いてオキアミの形状特徴量を調べる。始めに P形フーリエ記述子と評価関数について述べる。

3.1 P形フーリエ記述子

P形フーリエ記述子は、平面上の曲線を周波数領域で記述する手法である [6]。この手法には低域成分に情報が集約されるという特徴がある。以下ではその P形フーリエ記述子について記述する。

平面上の連続曲線 Y は、Y 上の始点からの長さ s を変数とし x-y 座標の値をもつ関数 x, y から定まる点 (x(s), y(s)) の集合として、以下のように表すことができる。

$$Y = \{(x(s), y(s)) : 0 \leq s \leq Y_{max}\} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、Y_{max} は連続曲線 Y の全長である。s は区間 [0, Y_{max}] の値をとるが、計算機で曲線パターンの情報処理を実際に行なうときには、s の値を [0, Y_{max}] の中で有限個に標準化しなければならない。そこであらかじめ以下のような折れ線図形 S を考え、これを連続曲線 Y の近似とする。

まず、折れ線図形 S の各線分の端点の x-y 座標を次のように表す。

$$x(t), y(t) \quad (t = 0, 1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (6)$$

x 軸を実軸、y 軸を虚軸とする複素平面を考える。複素数

$$z(t) = x(t) + jy(t) \dots\dots\dots (7)$$

(以後、虚数単位を j で表す。) を x-y 座標 (x(t), y(t)) と同一視する。ここで、折れ線図形 S を構成している各線分の長さを δ とすると、

$$\delta = |z(t) - z(t-1)| \quad (t = 1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここで、図 3 に示すように、折れ線図形上の 2 つのベクトル z(t) - z(t-1) と z(t+1) - z(t) のなす角を

- 時計方向に負
- 反時計方向に正

に測って、その角の値を a(t) とおく。ただし、a(t) の取りうる範囲は、次の範囲である。

$$-\pi \leq a(t) < \pi \dots\dots\dots (9)$$

なお、a(0) はベクトル z(1) - z(0) と x 軸とのなす角と定める (図 4)。以下、この a(t) を点 z(t) における偏角と呼ぶことにする。

次に、偏角関数 a(t) を用いて折れ線図形 S の全曲率関数 θ(t) を次の式のように定める。

$$\begin{cases} \theta(0) = a(0) \\ \theta(t) = \theta(t-1) + a(t) \quad (t = 1, 2, \dots, n-1) \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

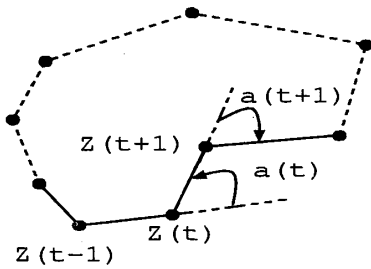


図3 偏角 $a(t)$ の定め方
Fig.3 Definition of angular bend $a(t)$.

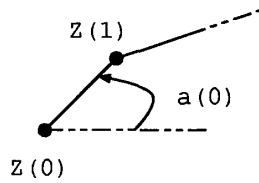


図4 偏角 $a(0)$ の定め方
Fig.4 Definition of angular bend $a(0)$.

これは折れ線図形の P 表現と呼ばれているものである。ここで $\theta(t)$ を用いて、複素数値関数 $\omega(t)$ を次の式のように定める。

$$\omega(t) = \exp(j\theta(t)) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (11)$$

偏角と全曲率関数の定め方から容易にわかるようにベクトル $z(t+1) - z(t)$ と x 軸のなす角 $\phi(t)$ (図5参照) は、 $\theta(t)$ と 2π の整数倍を除いて等しい。

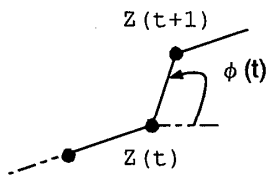


図5 $\phi(t)$ の定め方
Fig.5 Definition of $\phi(t)$.

従って次の式が成立する。

$$\begin{aligned} \exp(j\theta(t)) &= \exp(j\phi(t)) \\ &= \frac{z(t+1) - z(t)}{\delta} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

式(11)と式(12)から次の式を得る。

$$\omega(t) = \frac{z(t+1) - z(t)}{\delta} \dots\dots\dots (13)$$

この複素数値関数を離散フーリエ展開すると

$$\omega(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \exp(j2\pi tk/n) \dots\dots\dots (14)$$

となり、その離散フーリエ係数は、次の式のようになる。

$$a_k = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \omega(t) \exp(-j2\pi tk/n) \dots\dots\dots (15)$$

ここで $2M + 1$ 個の低域成分からなるフーリエ係数の集合 $\{a_k : |k| \leq M\}$ を折れ線図形 S の M 次の P 形フーリエ記述子という。

3.2 評価関数

P 形フーリエ記述子は、折れ線図形 S の平行移動、拡大縮小に対して不変であるという性質を持つ (付録参照)。一方、回転、開始点の遅れに関しては不変ではない。即ち、 $\{a_k\}$ を折れ線図形 S に対するフーリエ記述子とし、 $\{b_k\}$ を折れ線図形 S に回転及び開始点の遅れなどが生じた時のフーリエ記述子とする。すると、2つの記述子の間に

$$b_k = \exp(j(\phi + k\lambda)) a_k \dots\dots\dots (16)$$

という関係が成立する。ここで、 ϕ は相対的回転角、 λ は開始点の遅れを表し k に無関係な定数である。そこで、折れ線図形 A の M 次の P 形フーリエ記述子を $\{a_k\}$ 、折れ線図形 B の M 次の P 形フーリエ記述子を $\{b_k\}$ とした時、2つの折れ線図形の近似度の評価のために以下の関数を導入する。

$$E = \sum_{k=-M}^M |a_k - \exp(j(\phi + k\lambda)) b_k|^2 \dots\dots\dots (17)$$

この関数において、相対的回転角 ϕ と開始点の遅れ λ は未知数である。ここで、評価関数 E が最小となるように ϕ と λ を決定する (付録参照)。評価関数 E が、零に近いほど折れ線図形 A と B は類似することを意味する。

3.3 オキアミの形状特徴量

前節の P 形フーリエ記述子と評価関数を用いてオキアミの形状特徴を調べる実験を行なった。まず、図6にオキアミの形状特徴を調べるアルゴリズムの流れ図を示す。次に、アルゴリズムの流れ図について下記の手順で詳しく説明する。

まず、P 形フーリエ記述子を用いるアルゴリズムを手順1から手順5までに示す。次に、P 形フーリエ記述子を用いて、評価値を調べるアルゴリズムについて、手順6から手順10に記述する。最後に、手順11から手順12を基本的形状モデルを求めるアルゴリズムとする。以下にそれらの手順を示す。

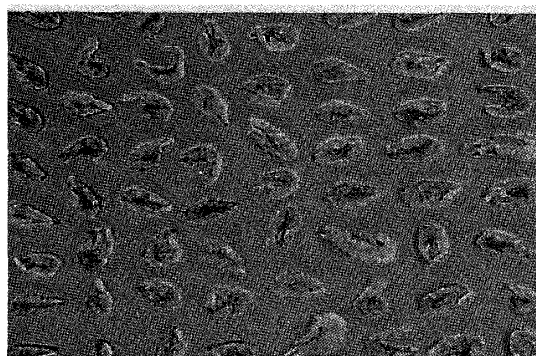


図7 オキアミを等間隔でならべた画像
Fig.7 Image of krills displayed
at equal intervals.

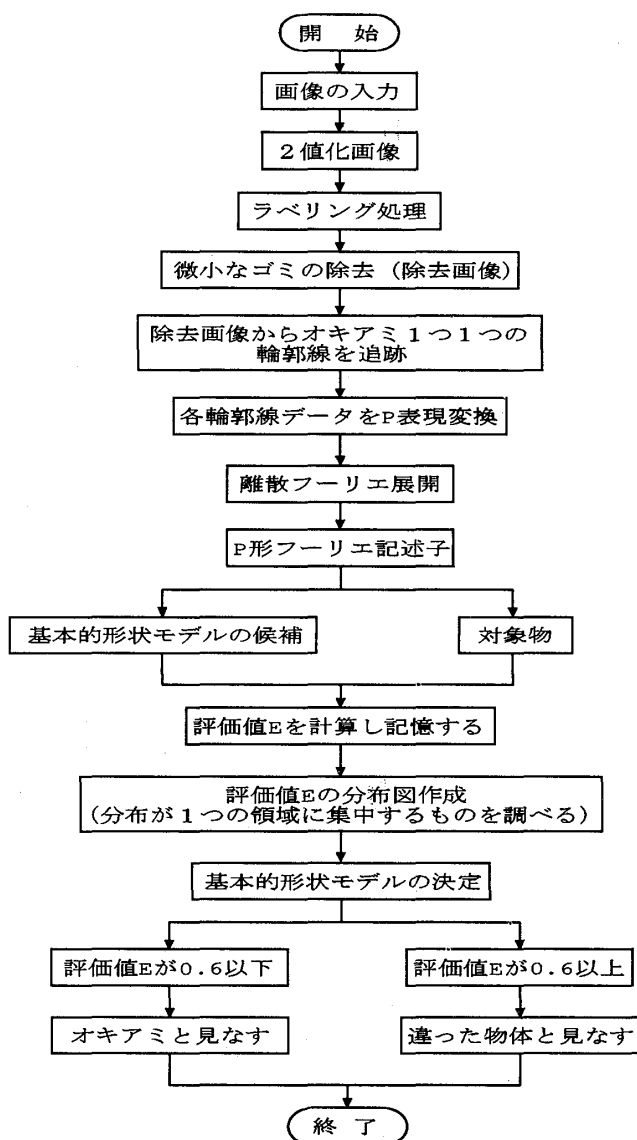


図6 アルゴリズムの流れ図 その1
Fig.6 Flowchart of algorithm 1.

手順1: ほぼ等間隔にならべたオキアミを、デジタルカメラで撮影して、コンピュータに入力にする。(その画像を図7に示す。このような画像を100枚用意した。)

手順2: 入力したデジタル画像を判別分析法 [3] を適用して2値化画像にする。

手順3: 2値化画像にラベリング処理 [5] を行ない、ラベル付けを行なう。

手順4: 微小なノイズ (小さなゴミ) を除去する。このようにして得られた画像を除去画像とする。

手順5: 除去画像からオキアミ1つ1つの各輪郭線を追跡する。

手順6: 手順5で作成した各輪郭線のデータをP表現で表す。

手順7: p表現に変換された各データを離散的にフーリエ展開し、 $2^{10} + 1$ 個の低域成分で構成されるP形フーリエ記述子を計算する。

手順8: 手順7で作成した、全てのP形フーリエ記述子を基本的形状モデルの候補とする。その基本的形状モデルの候補の内1個を抽出する。今、抽出した基本的形状モデルの候補を基準として、その他の全てのオキアミと比較する。

手順9: 式(17)の評価値Eが最小となるように ϕ_p , λ_p を選ぶ。(ただし、本実験では手順9のところでは $2^{10} + 1$ 個の全てのP形フーリエ記述子を必要とせず絶対値の大きい係数を2個選択した。)

手順10: 手順9で選択した ϕ_p , λ_p を式(17)に代入して評価値Eを計算する。

手順11: 基本的形状モデル候補の中で、形の近似度を表す相互間の評価値を調べ、その値がある基準値以下になる場合を基本的形状モデルとして決定する。

手順12: 手順10より計算された評価値Eがしきい値0.6未満のものを基本的形状モデルと類似したオキアミとみなす。また、しきい値0.6以上のものは基本的形状モデルとは異なる形状と判断する。(識別に関する評価値のしきい値として、0.6を採用する。付録参照)。

図8に上述の手順に従って決定された基本的形状モデルのオキアミの一例を示す。図8のオキアミを基本的形状モデルとし、図7中のオキアミのラベル番号を横軸として、評価値を縦軸に表すと図9のようになる。



図8 基本的形状モデルのオキアミの1例
Fig.8 One example of basic shape models.

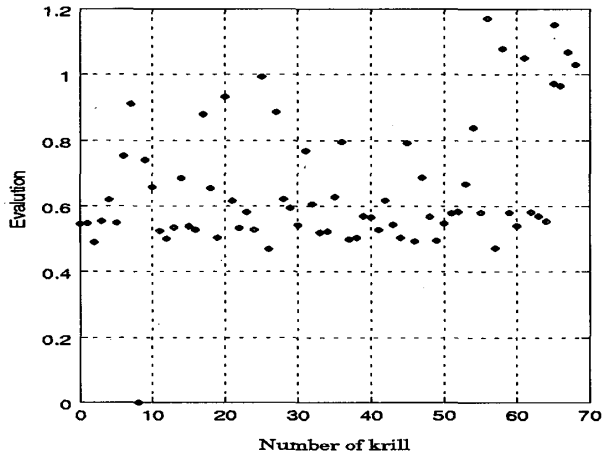


図9 評価値の分布
Fig.9 Distribution of evaluation value.

図9より、評価値 E が 0.6 未満のものを調べると、基本的形状モデルのオキアミとほぼ形状が類似していることが判明した。例えば、図10のオキアミは、ラベル番号58で評価値 E は 0.45 である。



図10 取り出したオキアミの1例
Fig.10 One example of picked up krill.

今回の実験において、100枚の画像に対して、オキアミの基本的形状モデルを調べた結果、オキアミの特定形状は6種類で表現されることがわかった。上述の方法で求めた頻度の高い6種類の基本的形状モデルを図11に示す。

4. オキアミと異物の分離

本章では、オキアミの色彩情報と形状特徴量を適用して、オキアミと異物を分離する方法について記述する。

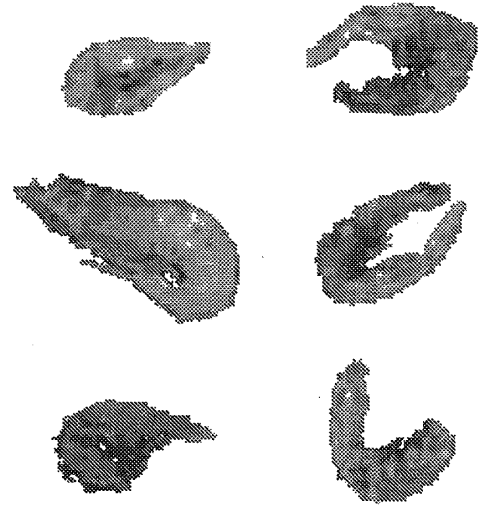


図11 基本的形状モデルのオキアミの6例
Fig.11 6 example of basic shape models.

4.1 実験結果と考察

ここで以下のようなシステムを想定する。異物の混在したオキアミがベルトコンベア上で運ばれており、その上方からカメラにより試料を撮影する。次に、その試料をコンピューターに入力して、画像処理によりオキアミと異物を識別する。更に、オキアミと異物を選別する。図12に、オキアミと異物の混在した試料を示す。

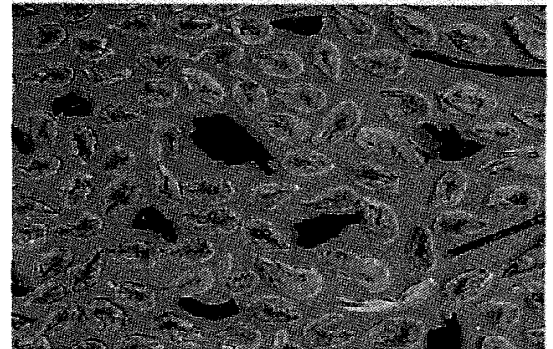


図12 オキアミと異物が混在した試料
Fig.12 Sample where krill and foreign body exist together.

まず、今回使用した背景について述べる。2章で述べたように、オキアミのR成分の濃度値は高いので、背景のR成分の濃度値が低い方がオキアミと区別しやすい。また、オキアミのB成分の濃度値は最頻値43を中心に分布し、100以上の値は非常に小さい。従って、背景のB成分は濃度値が大きい方が良い。更に、オキアミのG成分の最頻値は124であるので、背景のG成分としては

濃度値が0と255の両端のどちらか一方に集中している方がオキアミと背景とを区別しやすい。これらのことから、R成分とG成分の濃度値が0付近に存在し、更にB成分の濃度値が255付近である青を背景色として採用することとした。使用した背景色のB成分とオキアミのB成分の濃度ヒストグラムを図13に示す。

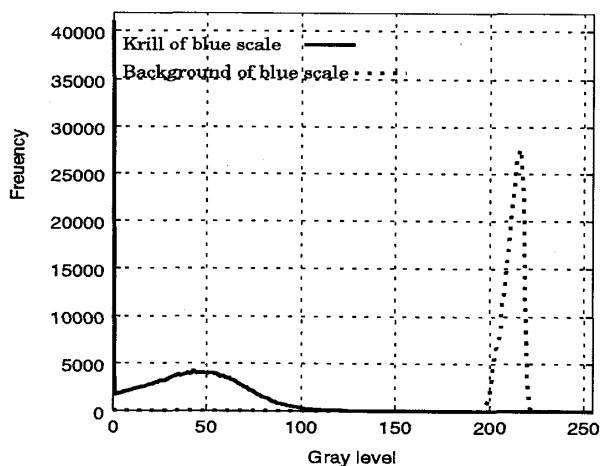


図13 背景色とオキアミの濃度ヒストグラム
Fig.13 Density histogram of background color and krill.

同図より、オキアミのB成分と背景のB成分が、分離していることが分かる。このことは、背景色として使用した青色がオキアミの抽出にとって都合の良いものである。次に、背景色を青にしてオキアミと異物が重ならないように置いた画像(図12)から、オキアミのみを抽出するアルゴリズムの流れ図を図15に示す。また、下記の手順で詳しく説明する。

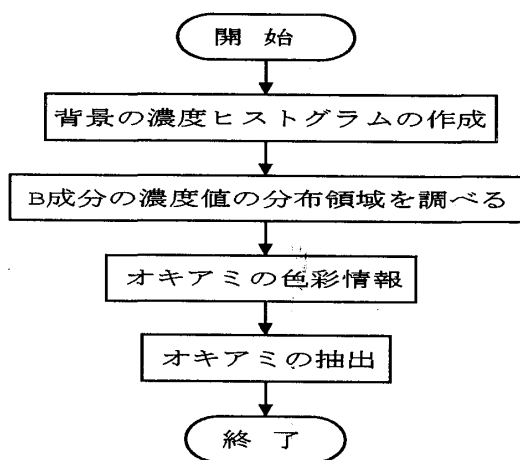


図14 アルゴリズムの流れ図 その2
Fig.14 Flowchart of algorithm 2.

手順1: 背景の濃度ヒストグラムを作成する。

手順2: 手順1より背景のB成分の濃度値の分布領域を調べる。(本実験では 216 ± 80 の領域に分布している。)

手順3: 図12の画像からB成分が手順2の分布領域の濃度値にある画素を背景とみなして除去する。

手順4: 図2のオキアミの濃度ヒストグラムの情報を用いて、図12からオキアミのR成分が 205 ± 50 の領域外の画素のものをオキアミ以外の異物とみなして除去する。

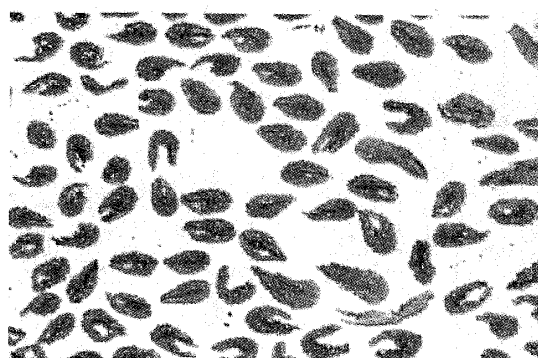


図15 オキアミと多少の異物を抽出した画像
Fig.15 Image of extracted krill and some of foreign bodies.

上述のアルゴリズムの処理結果は図15のようになる。さて図15において、背景やワカメなどが完全に除去され、オキアミは全て残っている。しかし、かにはさみや多少の異物が残っていることが分かる。次に、3章で述べたオキアミの基本的形状特徴を用いて図15からオキアミのみを抽出する。まず、3.3節で求めた6種類の基本的形状モデルのオキアミと図15中の対象物との評価値 E を求め、評価値 E が全てのモデルのオキアミに対し0.6以上のものを異物または不完全と判断して抽出する。図16は、このようにして抽出された対象物を表している。抽出されたものは、画像の淵にあるオキアミである。これらはオキアミの完全な形状を示さず欠けているため、基本形状とは異なるものとみなして処理している。更に、かにはさみも除去されている。また、図16の真中あたりに除去された物体がある。この物体は、2つのオキアミが接触しているために、オキアミと見なされなかったためである。図15から図16の物体を除いたものが図17である。オキアミの形状特徴量を用いることにより、色彩情報だけでは除去できなかったかにはさみや形状の不完全なオキアミ等を全て除去することができた。

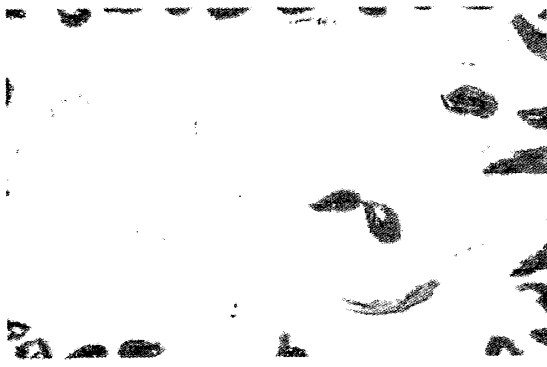


図 16 評価値 E が 0.6 以上の画像
Fig.16 Image with evaluation value 0.6 or more.



図 17 完全にオキアミを抽出した画像
Fig.17 Image of only extracted krill.

5. おわりに

本論文では、オキアミの持つ色彩情報と形状特徴に関して記述し、それらを有効に利用してオキアミと異物が混在した画像からオキアミのみを抽出するアルゴリズムについて記述した。まず、オキアミの持つ色彩情報は R 成分に良い特徴が表れることがわかった。具体的には、R 成分の最頻値の濃度値 205 あたりに分布が集中しており、100 以下の濃度値は非常に小さいことがわかった。次に、オキアミの形状を P 形フーリエ記述で表した場合、フーリエ係数の絶対値の大きい係数を 2 個採用するだけで、オキアミの特徴が記述されることが明らかとなった。更に、オキアミの持つ基本的形状モデルは 6 種類に分類できることが判明した。また、これらの情報を有効に利用して、オキアミと異物が混在した画像からオキアミのみを抽出することができた。今後は、更に多くのオキアミの形状特徴を調べ信頼性を向上させる研究を進めたいと考えている。

謝辞 本研究を行なうにあたり、福山大学工学部海洋生物工学科の楠田理一教授に御指導いただきましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Ching-Huan CHOU, 黒川 不二雄, 松尾 博文:高速魚種類のためのアルゴリズムと画像処理システムの構成についての一考察, 平成 6 年度テレビジョン学会年次大会,12-1
- [2] 小林 富士男, 坪井 始, 田中 始男, 美咲 隆吉:木材の欠陥検査アルゴリズム, 画像電子学会誌, 第 2 2 巻第 4 号,pp-368-375 (平成 5)
- [3] 大津 展之:判別および最 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法, 電子通信学会論文誌, 第 63 巻第 4 号,pp.349-356
- [4] Zahn,C.T.and Roskies,R.Z:Fourier descriptors for plane closed curves, IEEE Trans.Computers,C-21,pp.269-281(1972)
- [5] 谷口 慶治:画像処理工学, 共立出版株式会社, pp.122-123(1996)
- [6] 上坂 吉則:閉曲線にも適用できる新しいフーリエ記述子, 電子通信学会論文誌, Vol.J67-A No.3,pp.166-173 (昭和 5 8)
- [7] 伊藤 豪俊, 平田 達也, 石井 直宏:フーリエ記述子を用いた部品の形状認識と処理, 電子通信学会論文誌,Vol,J71-D No.6,pp.1065-1073 (昭和 6 3)
- [8] 小林 富士男, 岡本 昌丈, 坪井 始, 田中 始男:色彩情報を用いた海老の抽出, 平成 9 年度電気情報関連学会中国支部第 4 8 回連合大会,pp.190-191

付録

1 P 形フーリエ記述子の性質

複素平面で折れ線図形を考え、これに沿って動く点が生成する複素関数 Z とする。ここで、折れ線図形に沿って一定速度で点が動くと仮定すれば、任意の時間 t における複素関数 Z は次の式のように表せられる。

$$Z = Z(t) \dots\dots\dots (18)$$

ここで、式 (1) を p だけ平行移動すると次の式になる。

$$Z = Z(t) + p \quad (p: \text{複素数の定義}) \dots\dots\dots (19)$$

本文中の式 (8) より

$$\begin{aligned}\hat{\omega}(t) &= \frac{\hat{Z}(t+1) - \hat{Z}(t)}{\delta} \\ &= \frac{\{Z(t+1) + p\} - \{Z(t) + p\}}{\delta} \\ &= \frac{Z(t+1) - Z(t)}{\delta} \\ &= \omega(t) \dots\dots\dots (20)\end{aligned}$$

その時のフーリエ係数は $\hat{a}_k = a_k$ となる. 故に P 形フーリエ記述子は, 平行移動に不変であることがわかる.

次に式 (1) を $\exp(\phi j)$ だけ回転させると次の式のようなになる.

$$\hat{Z} = \exp(\phi j) \cdot Z(t) \dots\dots\dots (21)$$

本文中の式 (8) より

$$\begin{aligned}\hat{\omega}(i) &= \frac{\exp(\phi j) \cdot Z(i+1) - \exp(\phi j) \cdot Z(i)}{\delta} \\ &= \frac{\exp(\phi j) \{Z(i+1) - Z(i)\}}{\delta} \\ &= \exp(\phi j) \cdot \omega(i) \dots\dots\dots (22)\end{aligned}$$

その時のフーリエ係数は, 本文中の式 (10) より

$$\begin{aligned}\hat{a}_k &= \frac{1}{n} \sum \hat{\omega}(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right) \\ &= \frac{1}{n} \sum \exp(\phi j) \omega(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right) \\ &= \exp(\phi j) \frac{1}{n} \sum \omega(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right) \\ &= \exp(\phi j) a_k \dots\dots\dots (23)\end{aligned}$$

故に P 形フーリエ記述子の性質の一つとして, 回転に関して次の式が導かれる

$$\hat{a}_k = \exp(\phi j) a_k \dots\dots\dots (24)$$

最後に, 式 (1) を m だけ開始点を遅らせると次の式のようなになる.

$$\hat{Z} = Z(t+m) \dots\dots\dots (25)$$

本文中の式 (8) より

$$\begin{aligned}\hat{\omega}(t) &= \frac{\hat{Z}(t+1) - \hat{Z}(t)}{\delta} \\ &= \frac{Z(t+m+1) - Z(t+m)}{\delta} \\ &= \omega(t+m) \dots\dots\dots (26)\end{aligned}$$

その時のフーリエ係数は, 本文中の式 (10) より

$$\begin{aligned}\hat{a}_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \hat{\omega}(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \omega(i+m) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= \frac{1}{n} \sum_{i=m}^{n+m-1} w(i) \exp\left(\frac{-j2\pi(i-m)k}{n}\right) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=m}^{n+m-1} w(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n} + \frac{j2\pi mk}{n}\right) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=m}^{n+m-1} w(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right) \cdot \exp\left(\frac{j2\pi mk}{n}\right) \\ &= \exp\left(\frac{j2\pi mk}{n}\right) \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=m}^{n+m-1} w(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right) \\ &= \exp\left(\frac{j2\pi mk}{n}\right) \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} w(i) \exp\left(\frac{-j2\pi ik}{n}\right) \\ &= \exp\left(\frac{j2\pi mk}{n}\right) \cdot a_k \\ &= \exp(j\lambda k) \cdot a_k \dots\dots\dots (27)\end{aligned}$$

ただし, $\lambda = \left(\frac{2\pi}{n} \cdot m\right)$ とする. 故に P 形フーリエ記述子の性質の一つとして, 開始点の遅れに関して次の式が導かれる

$$\hat{a}_k = \exp(j\lambda k) \cdot a_k \dots\dots\dots (28)$$

2 評価値 E が最小となるように ϕ, λ を決定する方法

折れ線図形 A のフーリエ係数 $\{a_k\}$ の中で絶対値の大きいものを l 個選択する. この各項に対して折れ線図形 A と B が類似していれば式 (16) の関係がある. そこで, 次の関係が成立する.

$$\alpha_{k1} = \arg\left(\frac{a_{k1}}{b_{k1}}\right) = \phi + k_1 \lambda \pmod{2\pi} \dots (29)$$

$$\alpha_{ki} = \arg\left(\frac{a_{ki}}{b_{ki}}\right) = \phi + k_i \lambda \pmod{2\pi} \dots\dots\dots (30)$$

$(i = 2, \dots, l)$

次に, 式 (33) と式 (34) を ϕ, λ について解く. 更に位相項間の $|k_1 - k_2|$ 個の回転対称を考えると, 次の式が導出される.

$$\phi_p = \left[\frac{k_1 \alpha_{ki} - k_i \alpha_{k1}}{m} + \frac{2\pi p}{m} \right] \pmod{2\pi} \dots (31)$$

$$\lambda_p = \left[\frac{\alpha_{k1} - \alpha_{ki}}{m} - \frac{2\pi p}{m} \right] \pmod{2\pi} \dots\dots\dots (32)$$

$$m = k_1 - k_i, \quad p = 0, 1, \dots, |m| - 1$$

この $|m|$ 個の ϕ_p, λ_p を順次, 式 (17) の ϕ, λ に代入して評価値 E を最小とする ϕ_p, λ_p を選びだす. すると折れ線図形 A のフーリエ係数 $\{a_k\}$ と折れ線図形 B のフーリエ係数 $\{b_k\}$ の l 係数間のマッチングとなる. ここで, 更にマッチングを最適にするために, 位相間で次の式により補正を行なう.

$$\phi = \phi + \Delta\theta \dots\dots\dots (33)$$

$$\lambda = \lambda + \Delta\theta \dots\dots\dots (34)$$

$\Delta\gamma = 0.5$ とし、微小区間 $[-2^\circ \sim 2^\circ]$ において ϕ と λ を式 (17) に代入して評価値 E を求める。

3 評価値のしきい値の決定

図 9 の評価値の分布図より、評価値を横軸に、その頻度を縦軸にプロットすると図 18 のようになる。

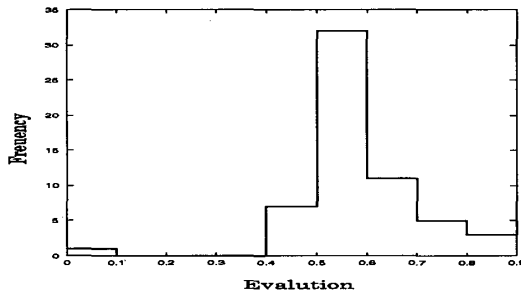


図 18 評価値
Fig.18 Evaluation.

同図から、評価値 E の分布は、0.6 の内に集中することがわかる。そこで、本研究では、識別に関する評価のしきい値として 0.6 を採用した。6 種類の基本的形状モデルに対して調べたところ評価値 E は、ほぼ 0.6 の内に存在することが明らかとなった。