

令和元年6月13日現在

機関番号：82708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00348

研究課題名(和文) ソフトコンピューティングを用いた超音波魚肉評価検査支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of ultrasound evaluation system for fish meat using soft computing

研究代表者

徳永 憲洋 (Tokunaga, Kazuhiro)

国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産大学校・講師

研究者番号：00432956

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は超音波検査とソフトコンピューティング技術を利用し、魚を殺さずとも体外から魚体内の肉の状態を見ることができ、かつ、魚肉の物性や肉質などの多面的情報を素人でも手に取るように理解・評価できるよう視覚化表示する「非破壊的魚肉評価・検査支援システムの開発」を目標とする。平成28～30年度の研究期間においては、魚体から得られた超音波信号をもとに魚肉の脂質量、歯応えを推定するソフトコンピューティング技術の提案と、提案方法の有効性の検証を行った。その結果、提案したソフトコンピューティング技術で超音波信号から魚肉の脂質量と歯応えを非破壊で評価できることが示唆される結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波を用いることで魚肉の品質に関わる脂質量と歯応え(肉の硬さ)を定量的かつ非破壊的に評価できることを本研究で示すことができた。超音波で魚体内の状態を評価する研究は多いが、脂質量や歯応えを評価する研究はこれまでになく学術的に意義がある。また超音波の新たな利用方法として示せたことも学術的に意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Aim of this research is to develop a nondestructive evaluating support system for a fish meat using an ultrasound signal and soft computing techniques. This system is expected to see the condition inside the fish from outside without killing the fish. In the research period, soft computing techniques for estimating the amount of lipid and the hardness of the fish meat were proposed. Moreover, the validity of the proposed methods was verified. As a result, it was suggested that the proposed methods can evaluate the lipid content and the hardness of fish meat non-destructively from ultrasonic signals.

研究分野：脳型情報処理工学

キーワード：魚肉の非破壊評価 超音波 自己組織化マップ 放射基底関数ネットワーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

魚体内の肉の性状を調べることで、脂の含有量や歯ごたえ、寄生虫の有無、病巣の有無などを多面的に評価できる。例えば、魚肉に含まれる脂質が過剰な場合は、歯ごたえがなく、さらに風味が損なわれる。また過剰な脂は魚肉保存時の品質低下を早める。他方、アニサキスなどの寄生虫は内臓だけでなく魚肉の可食部にも寄生している。アニサキスは食中毒を引き起こすだけでなくアレルギー原因物質を有している。冷凍または加熱をすることでアニサキスは死ぬがアレルギー原因物質は残存する。このためアニサキスの存在に気付かず食してしまい、アニサキスアレルギーを発症することもある。このため市場に出回る前に魚肉の性状を調べることは食の品質・安全管理において重要である。

従来、魚肉の性状評価は、魚を捌いて体内の状態や組織を検査・評価する、すりつぶした魚肉を化学的に調べる、等の方法が一般的に行われてきた。しかし魚は鮮度が大事なため破壊的方法よりも非破壊的な評価方法が望まれる。特に養殖魚の場合は、魚の品質や健康状態(寄生虫や病巣の有無)、さらには養殖環境そのものを、魚を殺さずいつでも検査・評価できる。

以上のことから、魚を殺さず魚肉の性状を検査する装置開発や研究が以下のように行われているが、いずれも脂質にのみ着目しており、魚肉の性状を多面的に評価するためのシステム開発・研究は国内外でも未だ行われていない。

2. 研究の目的

以上に対し本研究では、魚を殺さずとも体外から魚体内の肉の状態を見ることができ、かつ魚肉の物性や肉質などの多面的情報を素人でも手に取るように理解・評価できるよう視覚化表示する「非破壊的魚肉評価・検査支援システムの開発」を目標とする。本システムの概要を図1に示す。本システムの実現のために、誰でも扱いやすく材料検査や医療分野で非破壊検査として使われている超音波を利用する。さらに超音波信号から物性などの隠れた情報を抽出・視覚化するためにソフトコンピューティングを用いる。

本研究課題の期間内ではハード面とソフト面において以下に焦点を絞り研究を行う。

ハード面：超音波で魚体内をスキャンし超音波エコー信号を取得するシステムの開発。

ソフト面：魚肉から得られた超音波信号を元に魚肉の性状を高精度に判別するソフトコンピューティングの基盤アルゴリズムを開発し、有効性を理論的かつ実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

本研究課題の期間内では以下の項目を遂行した。

- (A) 超音波魚体スキャン装置の開発
- (B) 超音波信号を元に魚肉の性状を高精度に判別・視覚化する基盤モデルの確立
- (C) 魚体スキャン装置で得られたデータを元に魚肉の性状判別を行う

3.1 超音波魚体スキャン装置の開発

本研究では、魚体に対して超音波を照射・走査するための装置として、超音波魚体スキャン装置を製作した。図1に製作された超音波魚体スキャン装置の外観を示す。

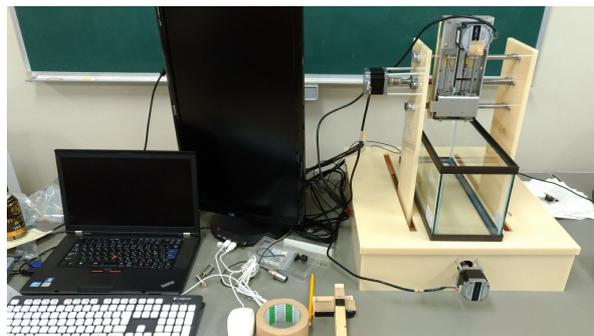


図1. 超音波魚体スキャン装置

また図2に超音波魚体スキャン装置の構成を示す。超音波の発生は超音波探傷器であるDIO-1000J (Starmans社製)を利用した。また二つの探触子を用い、それぞれ送信・受信側探触子とした。送信側の探触子は公称周波数10MHzのものを利用した。受信側の探触子は公称周波数5MHzのものを利用した。二つの探触子はXYZステージにおけるZ軸ステージ上の治具に横並びに取り付けられている。受信側の探触子から得られた超音波信号はオシロスコープ(UDS-1G02S-10k; 日本データシステム株式会社製)を介してパソコンに記録される。パソコンは超音波信号の記録とXYZステージの制御に利用する。

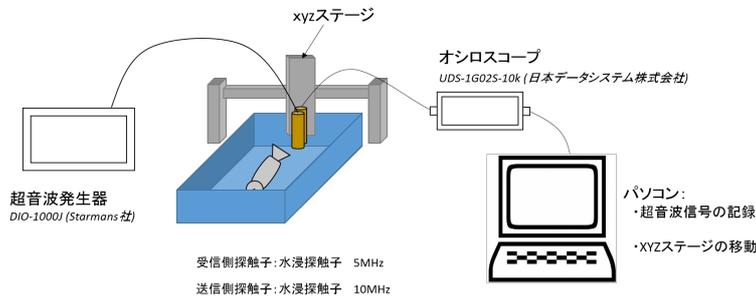


図 2. 超音波魚体スキャン装置の構成

3.2 超音波信号を元に魚肉の性状を高精度に判別・視覚化する基盤モデルの確立

超音波信号から魚肉の脂質量, 歯応え (肉の硬さ = テクスチャ), 鮮度を評価するソフトコンピューティング技術として, 本研究では主に2つを提案した. ひとつは超音波の後方散乱信号のエネルギー減衰度を数値的に表現する Integrated Backscatter 法 (以下, IB 法と称す) を用いた方法, もうひとつは自己組織化マップと放射基底関数ネットワークの二つのニューラルネットワークを組み合わせた機械学習法を利用した評価方法である. 下記に IB 法と機械学習法の二つについて説明をし, さらに両手法を用いた評価方法の説明をする.

3.2.1 Integrated Backscatter 法

IB 法では, 超音波信号の周波数スペクトルを利用し, 超音波が構造物で反射する際の後方散乱波のエネルギー減衰率を表す「IB 値」を計算する. IB 値の計算は様々な方法が提案されているが, 本研究では次式で計算する.

$$IBV = 20 \log \left(\frac{\sum_i P(f_i)}{\sum_i P_b(f_i)} \right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

ここで, $P(f_i)$ はフーリエ変換によって得られる周波数 f_i の周波数スペクトル強度を表す. また $P_b(f_i)$ は基準信号から得られた周波数スペクトルを表す. 基準信号では大抵の場合, スチール板等の基準となる構造物に超音波を照射した際の反射信号を利用する. 本研究ではスチール板に照射した際に得られた信号を利用した. 式 1 は後方散乱信号の周波数スペクトルの面積の減衰率を求めている. 超音波が通過する構造物 (生体の場合は細胞組織) によって減衰率が異なることを利用し性状特定を可能とする.

IB 法は血管内超音波法 (IVUS) における血管内組織性状の特定において実用化されている手法である. 一般的には, IB 法は超音波信号のある短時間区間における周波数スペクトルを求め, その短時間区間における IBV を求める. 言い換えると, 一連の超音波信号に窓関数を掛けて複数の短時間信号に分割し, その分割された短時間信号に対してフーリエ変換を施し, 得られた各周波数スペクトルに対して IBV を計算する. この操作を短時間フーリエ変換と呼ぶ. 本研究でも魚体から得られた超音波信号に対して短時間フーリエ変換を施し, IBV を計算している.

3.2.2 機械学習法の説明

本研究では自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM), Bag of Features (BoF), 放射基底関数ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN) を階層的に組み合わせた機械学習法を利用する. 以下に SOM, BoF, RBFN についてそれぞれ簡単に説明する.

自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM)

SOM は, T. Kohonen によって提案されたニューラルネットワークの一種であり, 学習によって多次元データを 1-2 次元程度のマップ空間にデータ間のトポロジーを保存しつつ写像することが可能である. この特徴から SOM はビッグデータの可視化やデータマイニング等に応用されている.

一方で, SOM は参照ベクトルユニットが格子状に配置されたネットワーク構造を持ち, 各参照ベクトルユニットは多次元データの代表ベクトルを表現することになる. この特性から SOM はデータの量子化にも利用されている. 本研究ではこの量子化の特性を利用している.

Bag of Features (BoF)

Bag of Features は, 文書内容の分類に利用されていた Bag of Words という方法を他分野で利用できる形に形を変えた方法である. Bag of Words では文章中の単語 (Word) の出現頻度をヒストグラムとして表し, そのヒストグラムをベクトルデータとして表現したのちに, 様々な分類手法によって文章全体の分類等を行う. 同様に, 画像や信号データ等においても特徴量を

Word として扱い、ヒストグラムを作成し、分類手法などで分類、認識等に利用したものが Bag of Features (Bag of Keypoints と呼ばれる) である。

放射基底関数ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN)

RBFN は三層の多層パーセプトロンに類似したニューラルネットワークといえる。RBFN は入力層、中間層、出力層の三層で構成され、中間層のユニットには放射基底関数を採用している。各層間は結合荷重で結ばれている。すなわち、多層パーセプトロンの中間層ユニットにおけるシグモイド関数が放射基底関数に置き換えられたものと考えることができる。RBFN は入力に対する出力を表現する関数を次式に従って表現する。

$$y = f(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K a_k \phi_k(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|) \quad (2)$$

$$\phi_k(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 K は放射基底関数 ϕ の数 (中間層ユニットの数)、 \mathbf{c}_k および σ_k は k 番目の放射基底関数の中心ベクトルと範囲である。また a_k は ϕ_k に接続する結合荷重を表す。

本研究では放射基底関数の数 K を入力ベクトルの数と同じにし、中心ベクトル \mathbf{c}_k を入力ベクトルと同じとした。すなわち、入力ベクトル上に放射基底関数を作成する RBF ネットワークとした。また σ_k はすべて 1.0 とした。

RBFN の結合荷重の学習については、線形最小二乗法により求めている。

3.3 魚体スキャン装置で得られたデータを元に魚肉の性状判別を行う

提案したソフトウェアで魚肉の脂質量および歯応えを評価可能かどうか、その有効性を実験的に検証した。

以下に実験の枠組みを簡単に示す。

(1) 実験で用いたサンプル

36 匹のマアジ (*Trachurus japonicus*) をサンプルとして使用する。マアジは西日本を拠点とする 3 漁港で、2017 年 7 月、8 月に水揚げされたものである。

(2) 超音波信号データの取得

魚体をスキャン装置に設置し、超音波を照射しながらスキャンを行う。スキャン中は 100msec 毎に超音波信号データがパソコンに記録される。

(3) テクスチャ測定 (肉の硬さの測定)

魚体を三枚おろしにした後に、二枚のフィレ対して、テクスチャ測定器でテクスチャを測定する。テクスチャ測定では、二枚のフィレそれぞれに対して三ヶ所のテクスチャを測定する。測定箇所はエラ側からゼイゴまでを三等分した箇所とした。本研究で用いたテクスチャ測定器は、株式会社イマダのレオメーター (テクスチャーアナライザー) FRTS-50N を用いた。

(4) 脂質量の測定

脂質量の測定は外部の分析機関に依頼した。本実験では公益財団法人北九州生活科学センターに脂質量の成分分析を依頼した。分析手法はソックスレー抽出法である。

(5) 提案手法の評価

前述した 2 つの提案手法を用いてそれぞれ脂質量とテクスチャの推定を行う。検証は leave-one-out 交差検証で行う。具体的には 36 サンプル中 35 サンプルを推定モデルの作成及び学習データ、残り 1 サンプルをテストデータとし、全 36 サンプルがテストデータとなるように検証を繰り返す。

4. 研究成果

4.1 IB 法の検証結果

IBV と脂質量との相関を調べた結果、-60 (dB) 付近 (-64 (dB) 以上 -60 (dB) 未満) の度数と脂質量に大きな相関があることが分かった。

また -60dB 付近における度数を説明変数、脂質量を目的変数とした線形回帰モデルを生成し、そのモデルを利用し、脂質量を推定した。その結果、推定値と測定値の相関は $r=0.73$ ($p<0.05$) であり、推定精度は高いものとなった。

さらに IBV と歯応えとの相関を調べた結果、-60 [dB] 以上 -56 [dB] 未満の度数とテクスチャに大きな相関があることが分かった。度数を説明変数、テクスチャを目的変数とした線形回帰モデルを生成し、テクスチャを推定した結果、推定値と測定値の相関は $r=0.52$ ($p<0.05$) であり、脂質量の推定ほど高い精度ではなかったが概ね推定が可能であることが示唆された。

4.2 機械学習法の検証結果

図3および図4に機械学習法を用いた脂質量、およびテクスチャの推定結果をそれぞれ示す。図ではデータの多くが破線周りにプロットされている。この際の推定値と測定値の相関係数は $r=0.82$ ($p<0.05$) であり、推定精度が高いことが示された。また IB 法での脂質推定と比較してより高くなっていることが分かる。またテクスチャの結果においても推定値と測定値の相関係数は $r=0.62$ ($p<0.05$) であり機械学習法を用いた場合は、IB 法よりも高い推定精度が得られた。

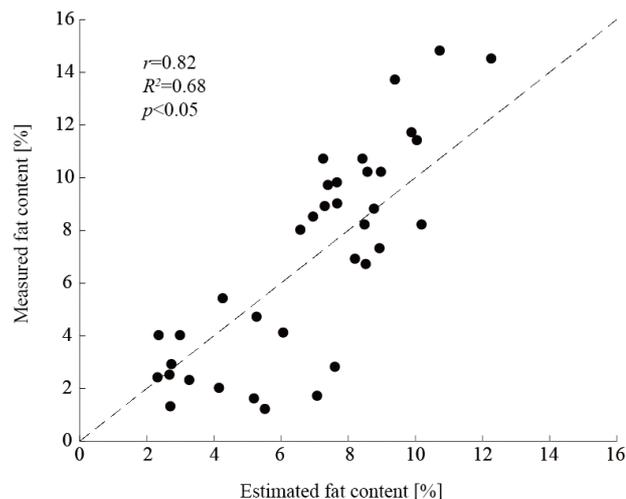


図3. 機械学習法を用いた脂質量の推定結果

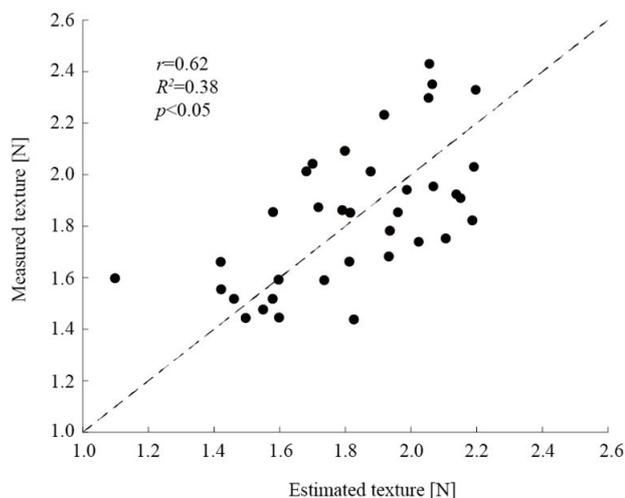


図4. 機械学習法を用いたテクスチャの推定結果

4.3 成果のまとめ

超音波を用いた魚肉の脂質量およびテクスチャ (= 歯応え) の非破壊的評価方法について、IB 法と機械学習法の2つの評価方法を提案し、実験的にそれぞれの有効性を検証した。その結果、魚肉の脂質量推定において、機械学習法と IB 法は共に超音波信号から魚肉の脂質を推定することが可能であると示唆された。また脂質量推定において機械学習法を用いた場合と IB 法を用いた場合を比較すると、機械学習法を用いた場合の方がより良い推定精度が得られた。さらに魚肉の歯応えの推定において、機械学習法は歯応えの推定値と測定値との間にやや相関があるが、決定係数は低く脂質量推定ほどの推定精度は得られなかった。IB 法を用いた歯応えの推定は、歯応えの推定値と測定値との間に相関はあるが低く、決定係数を見ても IB 法を用いた歯応えの推定が困難であることが分かった。

以上の検証結果より、超音波信号から脂質量およびテクスチャの評価は可能であると示唆できる結果を得ることができた。また IB 法と機械学習法を用いた評価では機械学習法を用いた評価方法が優れていることが分かった。

5. 主な発表論文等

(学会発表)

- [1] Chihiro Saeki, Kazuhiro Tokunaga, Shinichi Taniguchi, Shinta Nakano, Hiromitsu Ohta and Makoto Nakamura, Nondestructive Evaluation of Fish Meat Using Ultrasound Signal by Machine Learning and Bag of Features, The 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2018.
- [2] Chihiro Saeki, Kazuhiro Tokunaga, Mitsuhiro Ohta, Makoto Nakamura, A Proposal of Nondestructive Evaluating Method for Fat Content in Fish Meat Using Ultrasound, International Workshop on Smart Info-media Systems in Asia, 2017.
- [3] 佐伯千尋, 徳永憲洋, 谷口真市, 中野新太, 太田博光, 中村誠, 超音波を用いたマアジにおける脂質量の非破壊的推定法の提案, 水産工学会学術講演会, 2017.
- [4] 佐伯千尋, 徳永憲洋, 谷口真市, 中野新太, 太田博光, 中村誠, 超音波後方散乱信号を用いた魚肉の非破壊脂肪含有量測定, 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2017.
- [5] 徳永憲洋, 佐伯千尋, 谷口真市, 中野新太, 太田博光, 中村誠, 機械学習を用いた魚肉の超音波非破壊評価方法の提案, 農業環境工学関連5学会2018年合同大会, 2018.
- [6] 徳永憲洋, 佐伯千尋, 谷口真市, 中野新太, 太田博光, 中村誠, 自己組織化マップと放射基底関数ネットワークを用いた魚肉の超音波非破壊評価方法の提案, 第34回ファジィシステムシンポジウム, 2018.
- [7] 眞鍋智史, 徳永憲洋, 太田博光, 中村誠, 超音波を用いた魚肉の非破壊評価システムの開発~ニューラルネットワークを用いた評価方法の検証~,平成30年度(第69回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2018.

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計7件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 川畑宣之

ローマ字氏名: NOBUYUKI KAWABARA

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。