

平成 30 年 5 月 12 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00240

研究課題名(和文) 生体電気インピーダンス法と超音波撮像法を融合した新しい組織イメージング法の開発

研究課題名(英文) A novel imaging method based on bio-electrical impedance tomography and ultrasonography

研究代表者

福田 修 (FUKUDA, OSAMU)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20357891

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生体電気インピーダンストモグラフィー法と超音波エコー法を融合した新しい組織イメージング法の開発を試みた。提案手法は、両手法の弱点を補完し合うことで、従来にはない組織の「構造」と「組成」の同時イメージングが期待できる。シミュレーション、基礎実験、生牛の脂肪交雑推定への応用を検討した。

研究成果は、生体電気インピーダンストモグラフィーを、高い完成度で構築できたことである。一方で、超音波エコー画像との融合による横断面インピーダンス分布の推定精度向上は実現できなかった。しかしながら、要素技術は3年間で大きく前進することができたので、この研究を継続し、近い将来の目標実現を目指す予定である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have tried to develop a novel imaging method, which combines bioelectrical impedance tomography and ultrasonography. This method can visualize information on both organizational structure and composition by compensating for respective faults in both imaging methods. To verify the proposed method, a simulation, basic experiments, and an estimation beef marbling score in live beef cattle were conducted.

As a result, we have developed a highly complete device for bioelectrical impedance tomography. However, we have not improved accuracy of impedance imaging yet based on boundary conditions obtained by ultrasonography. Our elemental technologies have progressed in these years so that we would like to continue the research and development to achieve our goal in the near future.

研究分野：情報学

キーワード：生体電気インピーダンス トモグラフィー 超音波 イメージング

1. 研究開始当初の背景

病気の早期発見から経過観察まで、医用画像の有用性は計り知れない。中でも、MRI や X 線 CT 装置のように組織断層像を鮮明に映し出すイメージングは、確定診療において欠くことのできない重要な情報を提供する。しかしながら、これらの装置は原理上、比較的大型となってしまうことが避けられず、1つの問題点と考えることができる。一方で、検診や日々の経過観察においては、もっと軽便に組織の横断面画像を観察できる装置が求められている。

これまで本研究グループでは、超音波信号を利用したイメージングに取り組んでおり、断片的な組織画像を合成して体肢横断面の画像を得る画像計測装置を開発している。既にこの装置を用いて、介護施設などの様々な現場で1千人規模のデータを蓄積し、要介護者を含む高齢者の筋量調査などに役だっている。超音波エコーを用いた体組成評価の研究は、運動生理学やスポーツ科学などの分野でも盛んに行われており、フィールド調査などにおいて有効な方法と考えられている。また、畜産業の現場でも、肥育牛の超音波画像の特徴変化から、筋肉組織内の脂肪交雑（いわゆる霜降り）評価が行われており、専門技術者による画像判読技術やその精度が研究されている。本研究グループでも、画像の濃淡特徴量から脂肪交雑を自動評価するプログラムを開発し、システムを実用化している。しかしながら、超音波画像は、組織の音響インピーダンス変化を利用した可視化方法であり、イメージの濃淡変化は、あくまでも定性的なものにすぎない。定量的な組織評価を実施することができない問題点があった。

一方で、軽便に組織の定量評価を行う方法として、生体電気インピーダンス法が提案されている。この方法は、組織に印加した定電流とその際に発生する電圧とから、組織の電気インピーダンスを定量化する方法であり、

家庭用の体組成計などでも用いられている。

これまでに、本研究グループでは、生体電気インピーダンス値に基づく肥育牛の脂肪交雑評価を実施してきた。この研究では推定値と真値との間に有意な相関を認めた。しかしながら、通常の生体電気インピーダンス法は、電極を設置したポイントでの数値計測となり情報には乏しく、組織断層イメージを定量化するものではなかった。

近年、生体電気インピーダンスの計測原理を応用したトモグラフィー技術が開発されている。複数の電極を体肢や体幹に設置し、その部分の横断面画像を計測する技術である。この技術は、電流注入と電位計測のみで構成できるため、装置が比較的小型コンパクトに開発でき、しかも安価に実現できるという特徴を有する。1980年代頃から少しずつ国内外の医療分野で研究が進められており、イメージングの手法自体はある程度確立されつつある。著名な研究にはオタワ大学の EIDORS プロジェクトなどがあり、このプロジェクトでは、解析のためのフリーウェアを提供している。しかしながら、X線や超音波信号が生体組織内で比較的に直進性が高いのに対して、生体電気トモグラフィー法で印加する定電流は生体組織内で拡散してしまうため、イメージングは不適切な逆問題となり、原理的に高解像度が得られない問題がある。

2. 研究の目的

組織の定性的な構造のみならず、定量的な組成情報を、非侵襲、高精度、かつリアルタイムにイメージングすることができれば、医療・健康・福祉分野はもちろん、工業製品から食品の検査に至る様々な製造現場で、多くの応用展開が期待できると考えられる。本研究の目的は、超音波エコーによるイメージングと生体電気インピーダンストモグラフィーを融合した新しい組織イメージング法の開発を目指すことである。提案手法は、両手法の利点

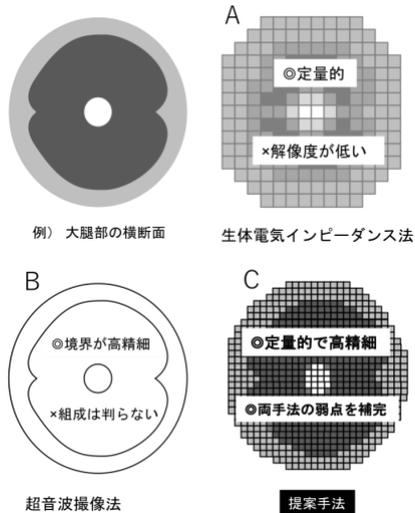


図 1 提案手法

はそのままに、弱点を補完し合うことで、従来にはない組織の定性的な構造情報と定量的な組成情報の同時イメージングを実現できる可能性がある。

図 1 に提案手法の概要を示す。生体組織（大腿部）の横断面（例）とそれを生体電気インピーダンストモグラフィー（A）、超音波エコー画像（B）、提案手法の各手法でイメージングした様子を模式的に描いている。生体電気インピーダンストモグラフィー法と超音波エコー法の共通の利点は、1. リアルタイム性が高いこと、2. コンパクトにシステムを構成できること、3. 比較的安価で普及が見込めることなどである。しかしながら、生体電気インピーダンストモグラフィー法に基づくイメージングは、印加する定電流が生体内部で拡散するために ill-posedness が強い逆問題となり、解像度の低下を原理的に避けられない。また、超音波エコー法も組織の音響インピーダンス変化を利用した可視化方法であり、イメージの濃淡変化は、あくまでも定性的なものにすぎない。つまり定量的な組成成分（例えば水分子の量など）を知ることはできない。

本研究では、生体電気インピーダンストモグラフィー法における逆問題に超音波エコー

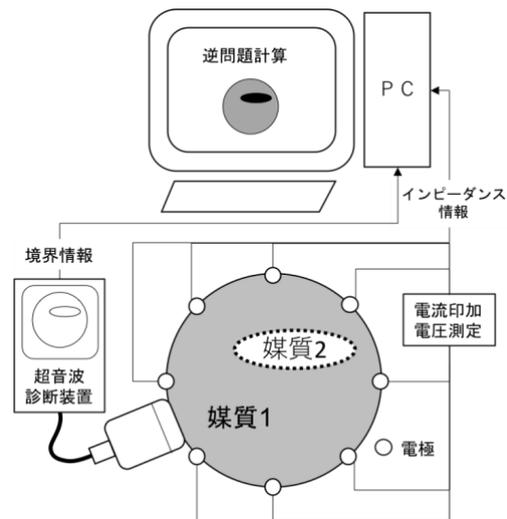


図 2 システム構成

法により得られる組織境界条件を与えることで、両者の弱点を補った新しい高精細な組織イメージングを実現することに挑戦する。研究期間内にシミュレーション、基礎実験、実データへの適用（肥育牛の胸最長筋）を実施し、提案の妥当性や有用性を検証する。

3. 研究の方法

開発するシステムの構成を図 2 に示す。システムは、定電流の印加と電圧の測定を行うためのインピーダンスメータ、多電極を配した計測用の水槽（16 チャンネルの電極を等間隔に配置）、定電流を印加する電極とその順番を選択的に切り替えるための切り替えボックス、制御用のパーソナルコンピュータ（PC）と入出力拡張ボード、制御用ソフトウェア、それから、対象物の内部構造を非侵襲的に計測するための超音波エコー装置、画像合成プログラムからなる。

生体電気インピーダンスの計測方法を図 3 に示す。計測用の水槽は、ポリエチレン容器を加工して製作し、16 極のビス電極を等間隔に配した。この円柱型の水槽に、非伝導体を挿入したものを検証するモデルとし、このモデルにおいて電極を設置した水平面上でスライスした一平面についてイメージングを試み

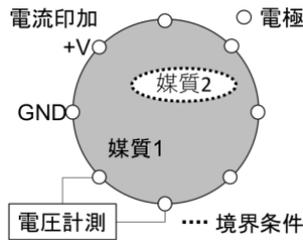


図 3 計測方法

た. 16 極の電極の内, 2 つの電極に定電流を印加し, 残りの 14 電極間の電圧を計測する. この際, 定電流を印加する電極では計測を行わないため, 計測可能なデータは $13 \times 16 = 208$ 個となる. これらの組み合わせで計測した電圧データから, 逆モデル解析により, 検証モデルのイメージングを行う.

定電流を印加する電極の切り替えは, 制御用 PC から試作した切り替え装置に指令を出力することによって実行される. 開発した装置の概要とそのソフトウェアを図 4 に示す. この装置では, インピーダンスメータにより印可される定電流と計測電圧とを, PC からの制御信号とは絶縁して送受信するために, 16 個の機械式リレーを利用して構成されている. 各機械式リレーの駆動は, 制御用 PC から USB インタフェースを介して実行される.

制御用ソフトウェアには, グラフィカルユーザインタフェース (GUI) が備えられており, マウス及びキーボードの操作により, パラメータの変更や動作の切り替え, 実行ができる. このソフトウェアは, Visual C++ 2015 の開発環境により開発と実装を行った. 開発したシステムは, 16 個の電極選択を切り替えながら定電流の印加と電圧の計測を実行するが, ソフトウェアでは, これらの電極選択の組み合わせや, 切り替えの順番を自由に制御できる. 全ての電極切り替えを, 指定通りに順番に実行する自動切り替えモードと, 実験条件などに応じて自由に選択するマニュアルモードが用意されている.

定電流を印加する電極と電圧を計測する電



(a) 試作システムの外観



(b) 内部の駆動・計測回路



(c) ソフトウェアのインタフェース

図 4 試作した計測装置



図 5 計測実験の様子

極の組み合わせ毎に記録した計測値からトモグラフィー画像を生成する処理には, MATLAB (MathWorks 社) をベースとしたソフトウェアライブラリである EIDORS (<http://eidors3d.sourceforge.net/>) を利用した. このライブラリは, インピーダンストモグラフィに特化した関数群を備えており, 簡単なスクリプトを記述することで生体電気インピーダンストモグラフィーに必要な順モ

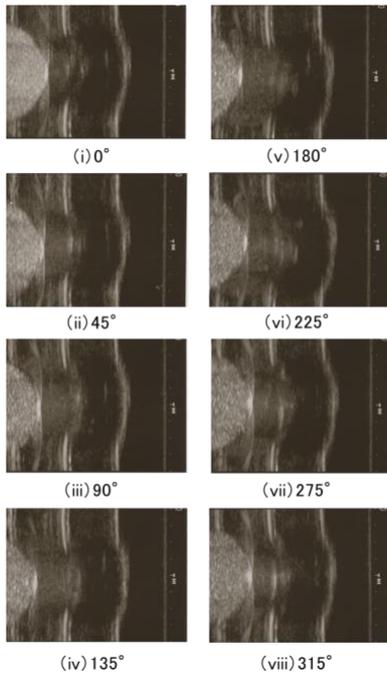


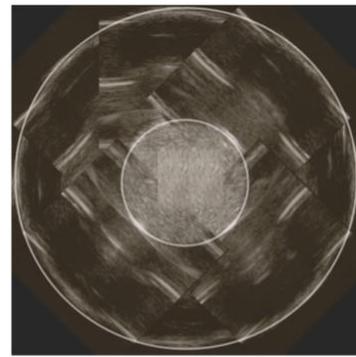
図 6 計測した断片エコー画像

デル・逆モデルの計算を実装することが可能である。

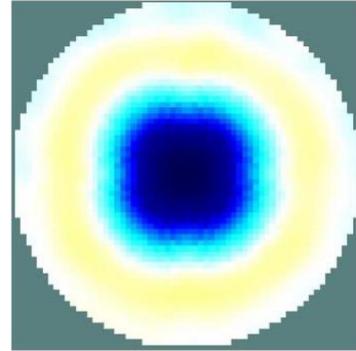
4. 研究成果

開発した装置やプログラムを用いて、生体電気インピーダンストモグラフィ法と超音波エコー法によるイメージングを試みた。計測実験の様子を図 5 に示す。計測対象は水槽に充填された水と、その中に挿入された絶縁体（ペットボトル内のオイルに反射体を混濁したもの）とする。超音波エコー画像の撮影は、塩化ビニル性の水槽壁を介して実施する。この際、超音波エコー装置のプロープと水槽壁面の形状を隙間なく接合するために、高分子ゲルからなるカップリング材料を間に挟んだ。

エコー画像は水槽の中心を軸として 45 度間隔で 8 方向から撮影し、それらを合成して一枚の横断面画像を構成するものとした。これについては、本研究グループが保有する画像合成技術を利用した。計測した断片エコー画像を図 6 に示す。各画像の右端が超音波プロープ側であり、この端から高分子ゲルから



(a) 超音波エコーを利用した横断面画像



(b) 電気インピーダンスを利用した横断面画像

図 7 横断面の合成画像



図 8 提案手法

なるカップリング材料の層を経て水槽壁が観測され、次いで反射体を混濁させた絶縁体が高輝度に観測されている。

計測した断片エコー画像を画像処理して横断面全体を合成した画像と、生体電気インピーダンストモグラフィ法による横断面イメージングの結果を図 7 に示す。いずれの画像にも水槽に浸したペットボトルによる絶縁体が明らかにイメージングされていることが分

かる。開発した装置やプログラムを用いて、生体電気インピーダンストモグラフィー法と超音波エコー法によるイメージングが可能であることを検証できた。

しかしながら、本研究の最終目標である生体電気インピーダンストモグラフィー法と超音波エコー法の融合には至らなかった。超音波エコー法により得られる組織境界条件をトモグラフィー法における逆問題に与えることを検討してきたが、この部分のプログラミングに時間を要してしまい、未完の結果となってしまった。なお、本手法の応用課題として位置付けていた肥育牛の脂肪交雑評価については、肥育牛のデータ計測が可能であるかを見極める目的で、生牛の体表面からのインピーダンス測定(図8)を実施するとともに、同一箇所超音波画像の計測を行い、インピーダンス値と皮下構造が同時に計測可能であることを実証した。しかしながら、こちらについてもトモグラフィーのプログラムに境界条件を導入する問題を解決できなかったため、基礎検証に留まる結果となった。

本研究の成果は、生体電気インピーダンストモグラフィーを利用した横断面イメージング装置を高い完成度で構築できたことである。一方で、重要な課題である超音波エコー法との融合は未完の結果となってしまった。しかしながら、要素技術の研究開発は3年間で大きく前進することができたので、引き続きこの研究を継続し、近い将来の目標実現を目指す予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

1. Osamu FUKUDA, Daisuke Hashimoto, Iqbal Ahmed: Bioelectrical impedance analysis for estimating marbling score of live beef cattle in Japan, Proceedings of the 2016 IEEE International conference on

industrial engineering and engineering management, 査読有, pp. 1508-1512, 2016.

[学会発表] (計3件)

1. 村木里志、中島弘貴、福元清剛、松隈浩之、福田修: 高齢者の下肢筋量を増やすための取り組み, 第91回日本産業衛生学会, 2018.5.17, 熊本.
2. Osamu FUKUDA, Daisuke Hashimoto, Iqbal Ahmed: Bioelectrical impedance analysis for estimating marbling score of live beef cattle in Japan, The IEEE International conference on industrial engineering and engineering management, 2016.12.6, Bali, Indonesia.
3. 橋元大介, 福田修, 佐藤正浩, 高山和貴, 森直道, 早田剛: 非侵襲的生体インピーダンス法を用いたウシ枝肉脂肪交雑推定手法の開発, 第16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, 2015.12.15, 名古屋.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田修 (FUKUDA, Osamu)
佐賀大学大学院・工学系研究科・教授
研究者番号: 20357891

(2) 研究分担者

奥村浩 (OKUMURA, Hiroshi)
佐賀大学大学院・工学系研究科・教授
研究者番号: 50251195

村木里志 (MURAKI, Satoshi)
九州大学・大学院芸術工学研究院・教授
研究者番号: 70300473