

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560414

研究課題名（和文） 腹部組織音速の超音波トモグラフィ映像に基づいた内臓脂肪検査法

研究課題名（英文） Visceral fat inspection method based on the ultrasound tomographic reconstruction of abdominal tissue sound speed image

研究代表者

山田 晃 (YAMADA AKIRA)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20159213

研究成果の概要（和文）：

本研究では、腹部体表周囲上の超音波伝搬時間測定に基づいた音波トモグラフィ内臓脂肪検査装置の実現に向けた諸課題の検討ならびにその評価試験を行った。具体的には、腸内ガスを含む腹腔内長距離間の伝搬時間を減衰の影響を受けずにオープンエアー体表密着測定するために、低周波帯（数百 kHz 帯）の広帯域圧電送受波器(40mmΦ円形開口)を対向させて機械走査する方式を用いた。また、体表送受波器間の接触条件の違いをカバーしながら音響的接触状態を良好に保つために、半球状のカップリングゲルを送受信器前面に装着した。回転

（内径:720mm）、平行(ストローク:600mm)、密着（ストローク:300mm）の三方向の自動ステージに取り付けられた対向送受信器対を、コンピュータ制御により腹部体表上の任意の伝搬経路上に機械移動させながら観測する。その際、脊髄を通る音波送受信データを回避（脊髄が音波の障害物になるため）した際の情報損失を最小限に抑えるために、走査回転中心を脊髄に一致させるよう送受信経路を決定した。このために、体表輪郭のレーザ計測ならびに脊髄位置推定に基づいて、被験者の体格や座位に合わせて、走査範囲や送受信経路を適応的に選択するようにした。さらに、受信音波振幅をモニタしながら体表/送受信器間の押し込み距離を制御することにより、体動や機械移動誤差が避けられない状況にあっても、最適な音響接触状態を実現できるようにした。最後に、腹部模擬ファントムを用いた評価試験の結果、伝搬時間測定ならびに音速断面映像の再現結果とも理論値と比較的良く一致する結果が示された。また、脂肪組織と蛋白組織の音速の違いが区別でき、提案法の有効性が確認できた。人体を対象にした評価試験については課題が残されたものの、音波測定から内臓脂肪領域抽出に至るまでを自動測定可能な検査装置として完成させることができた。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, investigations and validation experiments were made for the realization of acoustic tomographic visceral fat inspection apparatus based on the observation of ultrasound time of flight data around human abdominal surface. In particular, mechanical scanning system using a facing pair of high sensitivity broad band piezoelectric transducers in low frequency range was developed, so that waves propagated through the long distant intestinal gaseous medium can be detected without suffering sound attenuation. In addition, urethane gel hemi-spheres were attached in front of the transducers to keep good contact between transducer and body surface, regardless of contact angles between them. The facing pair transducers attached on the automated actuator stages for the movement of rotation (720 mm in diameter), translation (600 mm stroke), and pushing (300 mm stroke) were controlled by the computers to move to arbitral positions on the abdominal body surface. On this occasion, to minimize the loss of data caused by the avoidance of sound propagation paths intersecting a spine, propagation path was determined so that center of scanning rotation was adjusted to the spine. To this end, contour of the body surface was measured by laser range sensor and spine position was estimated in advance. By this means, the paths were adaptively determined in accordance with patient's body size and sitting position. In addition, amplitudes of the sound waves were monitored so that contact condition can be controlled at an optimal

pushing position regardless of the deviation of the premeasured body surface position. Finally, from the evaluation experiments by using the phantom specimen, it was shown that the measured precision of time of flight data were good enough to reproduce the abdominal sound speed cross sectional profile image. In addition, validity of the proposed visceral fat measurement techniques was confirmed from the results that fat areas can be clearly discriminated from the remaining protein areas with high degree of accuracy. Although the evaluation experiments for human patients were remained as future work, the system was brought to completion which can automatically collect the sound wave data around body surface and measure the visceral fat area from the abdominal reconstructed sound speed image.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム

1. 研究開始当初の背景

高齢化社会の到来に伴って予防医療への転換が叫ばれる中、生活習慣病の予防手段として、日常使用が可能な内臓脂肪検査法の実現が待ち望まれている。この要求に答える方法として、電気抵抗の測定原理に基づいた体脂肪計は、家庭用の簡易な装置として使用されているが、内臓脂肪だけを取り出して測定できない。一方で、病院における内臓脂肪検査手段として X 線 CT (Computer Tomography) が使われている。しかし、放射線被爆による健康被害が心配されることや、大病院にしか備えることができない大規模な装置であり、頻繁に検査するための手段として使うことはできない問題があった。

2. 研究の目的

本研究は、腹部体表周囲上の透過型超音波伝搬時間測定に基づいた腹部断面音速トモグラフィ映像装置の実現とその内臓脂肪検査への応用を目的した検討を行う。本手法は、トモグラフィ映像法により再現した腹部断面音速映像の低音速領域から内臓脂肪面積を算定するものであり、本研究独自の発案に基づいている。これまで課題申請者が継続的に行ってきた研究成果を踏まえて、医用現場で使用可能な実用段階の装置を実現するとともに、提案法の有効性を検証するための臨床評価試験を行う。これにより、一般家庭や診療所レベルで日常使用可能な新しい内臓

脂肪映像検査法を実現する。

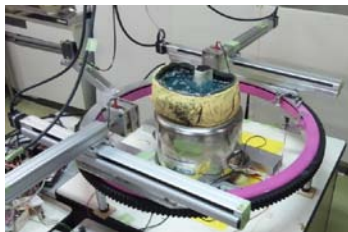
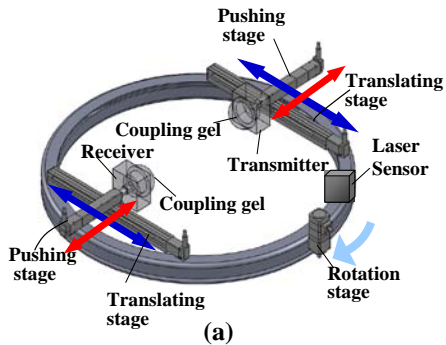
3. 研究の方法

人体腹部周囲上において体表密着型対向送受信器対を機械走査することにより、腹部断面内の複数の伝搬経路上の伝搬時間差データを取得する。その体表周囲上伝搬時間データが、媒質断面内逆音速分布の経路積分(直進伝搬モデル方程式)で表現できる前提条件のもとに、トモグラフィ法により腹部断面の音速分布映像を再構成する。その際、人体の脂肪組織では音速が遅く(1450m/s 付近)、蛋白質組織では速くなる(1550m/s 付近)性質を利用することにより、内臓脂肪領域を分離抽出しその面積を測定する。ここでは、腸内ガスを含む腹部組織媒質中の音波減衰の影響を回避するために、100kHz 帯低周波領域の高感度広帯域な超音波圧電送受信器を用いる。加えて、目的とする音速再現性能を達成するために、送受信器間距離位置決め精度 0.1mm 以下、目標位置への移動精度 1mm 以下、の体表機械走査機構を実現する。これにより、0.1ms オーダの伝搬時間測定、数十 m/s 分解能の音速再構成映像の再現を目指す。本研究では、これらの性能要求を満足するコンピュータ制御自動検査装置の実現に向けた検討を行なう。また、試作システムに基づいて提案法の有効性を検証するための評価試験を行なう。

4. 研究成果

(1) コンピュータ制御体表自動機械走査システムの構築

検査装置に用いた体表周囲自動機械走査システムの構成を図1に示す。本システムは音波送受信のための対向送受信圧電トランスジューサ（直径40mm）、およびパルスレシーバ（駆動用高電圧パルス発生器と受信増幅器&AD変換器）、トランスジューサを任意の体表上に移動させるためのアクチュエータステージ機構から構成される。ここでは、送受信トランスジューサ対は、各々の体表接触用アクチュエータ（ストローク300mm）に取り付けられている。さらにこれらは並進移動用のステージ（ストローク600mm）に取り付けられている。ここで、送受信器の前面には結合用半球ウレタンゲルが取り付けられており、半球状ゲルを介することにより体表とトランスジューサ表面の接触角の大小に関わらず、常に良好な音響的接触状態が保持できるようにした。並進移動に加えて、回転走査を可能にするために、以上の送受信ユニット全体は、直径720mmの回転ステージの上に載せられている。この回転ステージには、体表輪郭測定用レーザ距離センサが装着されており、輪郭測定用の回転ユニットの役割も兼ねている。すべてのアクチュエータには専用マイクロプロセッサ素子が実装されており、各々が独立に並列高速動作できる仕組みにした。装置全体は汎用PC（パーソナルコンピュータ）に接続され、データ送受信を含めた全体を自動制御するシステムを実現した。



(b)

図1 内蔵脂肪検査用体表機械走査システム、(a)送受信機械走査機構、(b)試作装置を用いた実験の様子

(2) 脊髄を考慮した送受信経路の決定

脊髄は強散乱体であるためトモグラフィ計算の前提条件を満足しない。このため、脊髄を通る経路を避ける必要がある。その際、脊髄を通る経路を排除したことによる情報損失を最小限に抑えるために、図2に示すように、脊髄をトモグラフィ計算の座標中心に一致させる。すなわち、レーザ測定した体表輪郭に外接する回転四角形を求め、その長軸方向の中央、短軸方向の1/5の場所を、脊髄の中心位置として推定した。これらをもとに、以下のように経路選択を行なった。(i)送受信器全体を0~180°の範囲で一定角度ごとに（以下の実験では10°間隔）回転する、(ii)脊髄を通る経路を回避する形で脊髄境界を起点に送受信器を一定間隔（以下の実験では2.5cm間隔）で横移動する、体表に交差するか否かを判定し交差する場合は、(iii)送受信器の各々を押し付け移動した際の、カップリングゲルと体表との接触位置を送受信点とする。ここで、カップリング半球ゲルの体表との接触点は図3の関係から算出する。以上のように決定した各々の経路における、ステージ回転角、ステージ横移動距離、シリンダ押し付け距離が、機械走査制御データとして用意する。

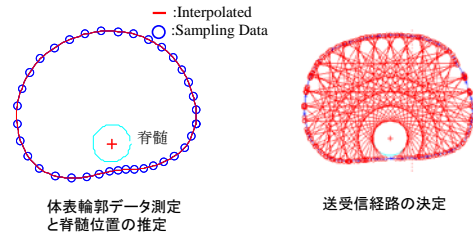


図2 送受信経路の決定方法

(3) 接触検出および音波送受信方法

上記(2)で求めた送受信器経路および各アクチュエータの移動データをもとに、各々の経路ごとに送受信器を目的の体表上の測定点に移動させる。予定した接触点の近傍で、送受信器を微小ステップ間隔で押し付けながら受信振幅をモニタする。この操作を何度から繰り返すことにより最適な押し込み位置（接触位置）を探し出す。これにより、測定途中の体動や、接触点の推定誤差や機械系の位置決め誤差がある程度避けられない状況下にあっても良好な接触状態を実現できるようにした。こうして観測される受信波を取得データとして用いることにより腹部断面音速映像を再現する。

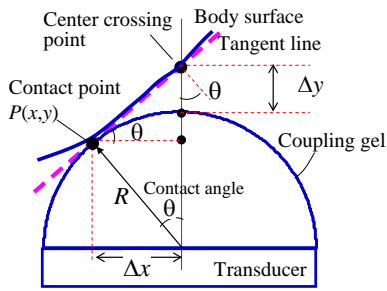


図 3 半球結合ゲルと体表接触点の関係を
示した模式図

(4) 機械移動精度の検証評価

機械走査機構の位置決め精度を検証するために、直径 115mm の金属円筒を試験用試料として用意した。送受信器の先端に取り付けた針電極が金属円筒に接触した際の導通変化を検出する。こうして求めたシリンダ押し込み距離の実測値と、上記(2)の手順に従って求めた押し込み距離の設計値とを比較した。図 4 は 50 経路上の送受信各々のシリンダの押し込み量の比較結果である。両者の誤差の平均および標準偏差は $1 \pm 0.9\text{mm}$ であった。おおむね良好な機械移動精度が実現されていることが確認できた。

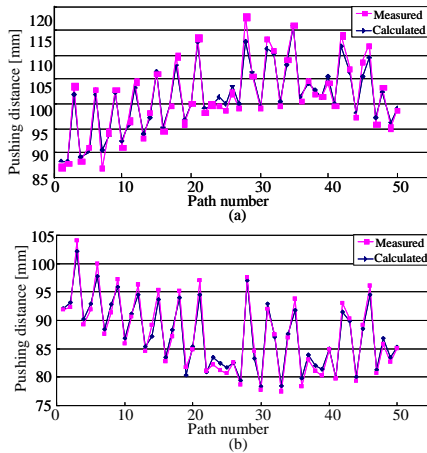


図 4 金属円筒試料に対する押し付け距離
の実測値と設計値の比較

(5) 腹部模擬ファントムによる伝搬時間測定
および音速再構成映像の検証評価

図 5 のような腹部模擬ファントム試料を用いて評価試験を行った。背景媒質としての超音波ゼリー ($c_0=1540\text{ m/s}$) を充填したウレタンゴム容器内 ($c_w=1540\text{ m/s}$ 、 $H:210 \times W:260\text{ mm}$ の楕円形状) に、筋肉模擬物体 (ポリエチレングリコール、 $c_1=1610\text{ m/s}$)、脂肪模擬物体 (ラード、 $c_2=1450\text{ m/s}$)、脊髄模擬物体 (プラスチック、 $c_3=4000\text{ m/s}$) を配置してある。上記(2)の手順に従って求めた 76 の経路上で

音波伝搬時間差データを自動計測した。その実測値とシミュレーション計算値の比較結果を図 6 に示す。両者の結果は、接触角が大きい経路で誤差が大きくなっているが、その他は概ね目標性能を満足する測定誤差範囲内の精度で良好な測定が実現できている。また、両者のデータをもとにした音速画像の再構成結果を図 7 に示す。実験結果は、接触角の大きい周縁の経路を除外したために、輪郭境界付近の情報欠落しており、画像劣化を招いている。接触角の大きな場所におけるデータ観測が行えるよう装置上の改良を加えることにより、この問題は解消できるものと考えられる。

以上、腹部体表周囲上で対向送受信器を機械走査する自動音波送受信システムを構築した。腹部模擬ファントムを用いた評価試験の結果、脂肪組織と蛋白組織の音速の違いがおおむね良好な精度で区別できる画像が再現できることが確認できた。人体を対象にした評価試験については課題が残されたものの、音波測定から内臓脂肪領域抽出に至るまでを自動測定可能な検査装置として完成させることができた。

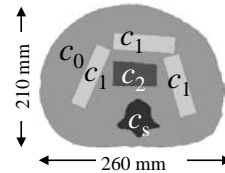


図 5 腹部模擬ファントム

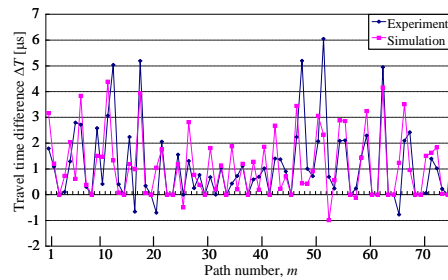


図 6 腹部ファントム試料を用いた音波伝搬
時間の実験とシミュレーションの比較

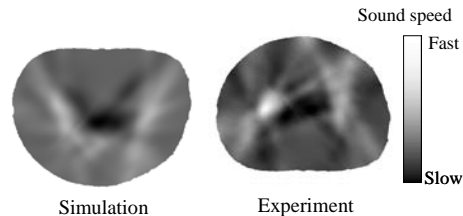


図 7 音速再構成画像の実験とシミュレーションの比較

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)

[学会発表] (計 7 件)

(1) T. Yoyama, K. Sasaki, D. Shimizu, H. Li and A. Yamada, "Body Surface Automated Mechanical Scanner for the Abdominal Sound Speed Tomographic Imaging", 2013 Int. Cong. on Ultrasonics, Sa23.2, 2-5 May 2013, Singapore.

(2) 李, 佐々木, 清水, 横山, 寺田, 山田, "超音波内臓脂肪検査装置のための体表周囲機械走査法の検討", 日本音響学会 2013 年春季研究発表会, 2013 年 03 月 13 日~03 月 15 日, 東京工科大学, 東京.

(3) K. Sasaki, T. Yokoyama, D. Shimizu, K. Li, A. Yamada, "Abdominal mechanical scanner for the acoustic tomographic measurement of the visceral fat area", The 33rd Symp. on Ultrasonic Electronics, 12-15 October, 2012, Chiba Univ., Chiba, Japan.

(4) A. Yamada, K. Sasaki, and T. Yokoyama, "Body surface scanner for the abdominal sound speed tomographic imaging", Int. Conf. Acoustics 2012, 13-18 May, 2012, Hong Kong, China.

(5) T. Shimabukuro, K. Sasaki, T. Yokoyama, and A. Yamada, "Closely-contact body surface scanning mechanism for the acoustic tomographic measurement of the visceral fat area", The 32nd Symp. on Ultrasonic Electronics, 9 November, 2011, Kyoto Univ., Kyoto, Japan.

(6) 和田, 山田, 島袋, 坂野, "体表上走査腹部組織音速トモグラフィ映像の再現性能向上のための検討", 日本音響学会 2011 年春季研究発表会, 2011 年 3 月 9 日, 早稲田大学, 東京都

(7) 山田 晃, "全周囲観測データに基づいた組織音響パラメータの超音波トモグラフィ計測", GE-ヘルスケア-ジャパン学術講演会 (招待講演), 2010 年 6 月 28 日, GE-ヘルスケア-ジャパン, 東京都

[その他]

ホームページ等

生体組織音速の非侵襲音波トモグラフィ計測, <http://www.tuat.ac.jp/~yamada/abdct/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 晃 (Yamada Akira)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号: 20159213

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし