

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560308

研究課題名(和文)非接触超音波筋活動計測システムの開発

研究課題名(英文)Development of muscle measurement system by non-contacted ultrasound sensor

研究代表者

久保田 直行(Kubota, Naoyuki)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：30298799

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文):リハビリテーションにおいて重要とされている体幹筋を非拘束・非侵襲に計測するための手法として、空中超音波と呼ばれる空気を伝搬媒質とした超音波計測技術の開発を行った。人体を透過する際に大幅減衰が生じるため、高感度な探傷装置を採用するとともに、動作中の計測のため、二次元スキャナを開発した。人体腹部における空中超音波計測に適する箇所を求め、振幅値や周波数等の複数の波形特徴からファジィ推論による到達波形の抽出法を提案し、人体内部の透過波形を11 μ sの誤差で計測できることを確認した。

研究成果の概要(英文):This study developed an air-coupled ultrasound measurement system to evaluate non-contacted and non-destructive inner muscle for rehabilitation. Power of ultrasound wave is strongly reduced at boundary between human body and air. We employed a high-sensitive ultrasound pulsar-receiver, and developed jig with X-Y scanner to measure muscle in rehabilitation. We estimated measurement point of human abdominal region, and we proposed fuzzy inference based transmitted wave detection method from amplitude, frequency and other wave features. In experiment, the method detected the transmitted wave with 11 μ s error.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：福祉用具・支援機器 筋活動計測 空中超音波

1. 研究開始当初の背景

リハビリテーションを必要とする患者の多くは運動と姿勢の機能低下が問題となることが多い。総合的な運動・姿勢の基本機能として体幹筋が注目されており、体幹筋によって体の中心が安定することで四肢の運動が円滑になるため、姿勢の安定性を提供するに重要な部位である。体幹筋ではその筋量だけではなく、その活動のタイミングが重要だと言われ、四肢の運動に際し数百ミリ秒先んじて活動することが望ましいとされている。しかしながら、体幹筋は人体の深部に位置しているため、評価を行うことは難しい。現状、評価には磁気共鳴 (MR) 画像法や X 線 CT、接触式の超音波画像法が用いられているが、どれも対象への拘束性が高く、動作中の体幹筋の活動状態を計測することが困難である。そのため、非接触かつ非侵襲的に動作中の体幹筋の活動状態を計測および評価できるシステムが求められている。本研究では、リハビリテーションにおける非拘束での計測と診断を目標に、高齢者の他、中枢神経疾患及びスポーツ・整形外科疾患などの患者を対象とした計測システム及び支援システムを開発する。

2. 研究の目的

非接触計測装置の一つである超音波装置を用いた人体内部の計測を目的とする。一般に超音波装置を用いた計測では物体と探触子との間を水などの伝搬媒質で満たして計測を行う。しかしながら、リハビリテーション中の動作計測では、空気中での計測を行う必要がある。このように、伝搬媒質が空気である超音波計測のことを空中超音波と呼称する。空中超音波では伝搬中の減衰が著しいこと、空気と人体との音響インピーダンスの違いに起因し、媒質境界での透過エネルギーが少なく、人体内部の計測は困難とされてきた。本研究では、空中超音波による人体内部における体幹筋の活動状態の評価を行うための計測方法の検討を行うとともに、ソフトコンピューティング技術を用いることにより、ノイズを多く含む波形から、到達波形の抽出を行う方法論を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 空中を伝搬した超音波波形の計測を行うため、高性能な増幅器を有する超音波探傷器 (DIO2000, STARMANS electronics Ltd.) と中心周波数 50kHz の超音波探触子を使用し計測システムを構築する。図 1 に計測システムの構成図を示す。超音波探触子は計測治具に送信側と受信側の探触子の中心を一致させるように固定される。この状態で送信側探触子からパルス繰り返し周波数 10Hz で中心周波数 50kHz の波形を生成する。この波形が人体を透過した波形を受信側の探触子で計測し、探傷装置を通じデジタルオシロスコープ (PicoScope3200, Pico Technology) により PC に取り込む。ここで、計測対象として、図 2 に

示す腹部の肋骨と骨盤の中心を挟みこむように超音波探触子を設置して計測を行うことで、骨によるノイズが少なく、体内の筋組織を透過した超音波波形を取得する。

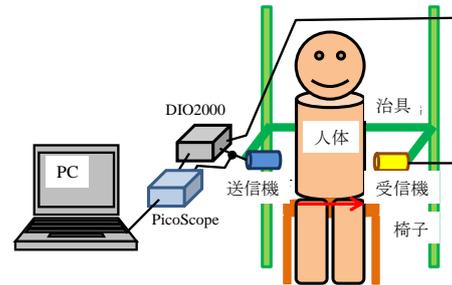


図1 計測装置

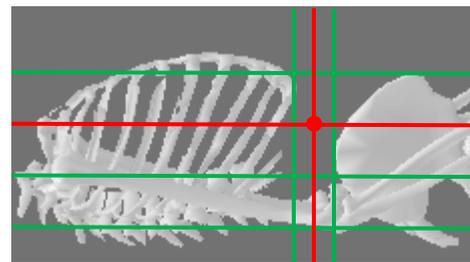


図2 計測箇所

図 3 に計測波形の例を示す。この図において赤枠で示した部分が透過波の第一波であり、その後の超音波波形は体内内部での多重反射波や体表を回りこんだ波であると考えられる。本研究では、この第一波を自動的に検出する手法について検討する

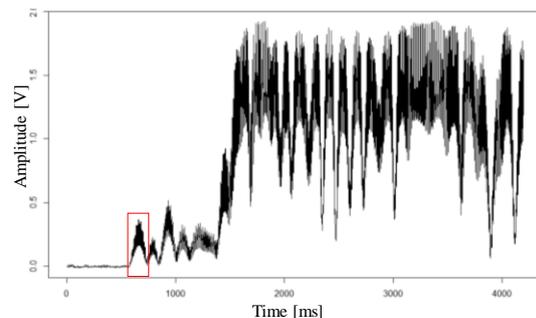


図3 取得波形例

(2) 波形の特徴を数値化するために、移動平均波形 $x_{MA}(t)$ (図 4)、微分波形 $x'(t)$ (図 5) および積分波形 $X(t)$ (図 6) を算出する。ここで、これらの波形はそれぞれ、取得波形 $x(t)$ より次式で算出される。

$$x_{MA}(t) = \left\{ \sum_{i=t-T}^{t+T} x(i) \right\} / T$$

$$x'(t) = x_{MA}(t+1) - x_{MA}(t-1)$$

$$X(t) = \sum_{i=0}^t x(i).$$

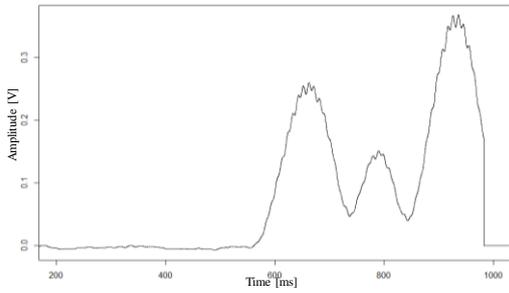


図4 移動平均波形

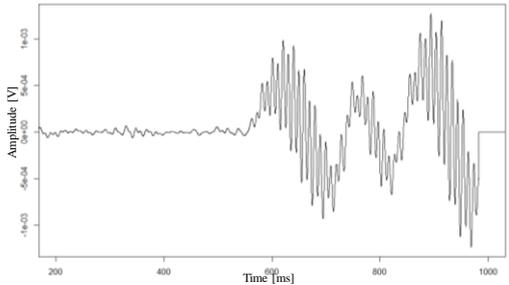


図5 微分波形

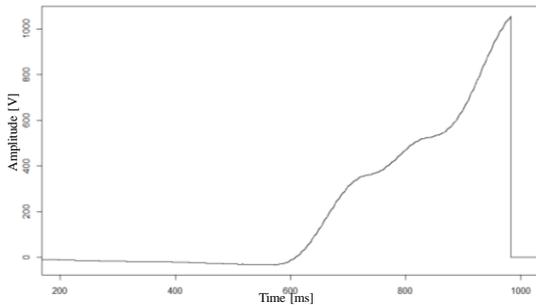


図6 積分波形

さらに、超音波波形のピーク位置では左右(前後)対象な値を取ると想定されるため、積分波形より左右対称性を評価するための指標である $\Delta x(t)$ を次式で算出する。

$$\Delta x(t) = |X(t+T) + X(t-T) - 2X(t)|$$

ここで、 $\Delta x(t)$ は図 7 に示すように、ある時刻 t から T 秒間の積分値の差を示しており、左右が対象な波形においては小さい値を持つ。

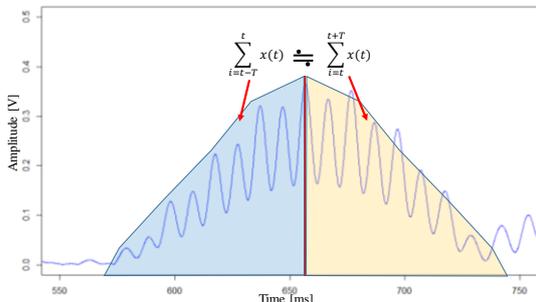


図7 波形の差分

また、送信周波数を 50kHz として設定しているため、受信される周波数もまた 50kHz 付近に高いエネルギーを持つと考えられる。

超音波の性質より、受信した透過波のピークでは以下の様な特性を持つと仮定する。

- ① 受信波形における振幅値 $x(t)$ が大きい
- ② 移動平均波形の微分値 $x'(t)$ が 0 に近い
- ③ ピーク点では、左右対象な波形を持ち、 $\Delta x(t)$ が小さい。
- ④ 周波数は送信波形と等しく、周波数解析により得られるパワースペクトル密度において 50kHz で高い値を持つ。

これらより、到達波の検出のため、振幅値 $x(t)$ 、微分値 $x'(t)$ 、波形の差分 $\Delta x(t)$ 、50kHz における PSD 値 $\text{PSD}_{50}(t)$ を波形特徴として取り扱う。

(3) 4つの波形特徴に対しファジィ推論を適用することにより、透過波の検出を行う。まず、前述の超音波の性質より、以下のファジィ IF-THEN ルールの導出を行う。

- ① IF 振幅値 $x(t)$ が大きい(HIGH)
THEN 透過波の所属度 $\mu_A(t)$ が高い
- ② IF 微分値 $x'(t)$ が 0 に近い(CLOSE)
THEN 透過波の所属度 $\mu_D(t)$ が高い
- ③ IF 波形の差分 $\Delta x(t)$ が小さい(SMALL)
THEN 透過波の所属度 $\mu_\Delta(t)$ が高い
- ④ IF 50kHz における PSD 値が大きい(LARGE)
THEN 透過波の所属度 $\mu_{\text{PSD}}(t)$ が高い

ここで、HIGH, CLOSE, SMALL, LARGE はファジィ言語関数であり、このルールに従い、それぞれのファジィ所属度である $\mu_A(t)$ 、 $\mu_D(t)$ 、 $\mu_\Delta(t)$ および $\mu_{\text{PSD}}(t)$ の算出する。このように得られたファジィ所属度の平均値を時刻 t における透過波の所属度 $\mu(t)$ として、 $\mu_\Delta(t)$ が最大となる時刻 t を透過波のピークとして検出を行う。

(5) 静止状態だけではなく、動作時の超音波波形の計測を行うため、図 8 に示す計測治具のスキヤナを開発した。このスキヤナは x 軸および Y 軸への平行移動および、回転を行うことができるため、例えば、椅子からの立ち上がり動作などに追従させ計測することも可能となる。



図8 スキヤナ装置

4. 研究成果

(1) 図 9 に示すように仰臥位の被験者に対し腹部の計測を行い、透過波の検出が行えるかを確認した。実験では、安静時および筋緊張時の二通りにおいて計測を行う。筋緊張時には、仰臥位の姿勢で意識的に腹式呼吸を行い、息を吐き切った状態で停止させることで、腹横筋を働かせる。

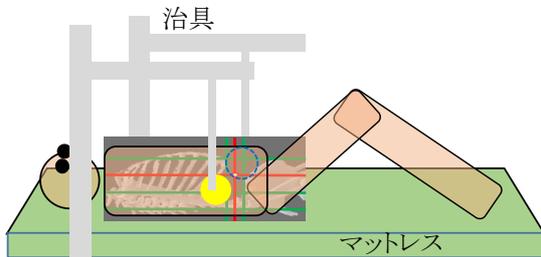


図9 実験条件

3名の被験者に対し、提案手法で自動検出を行った透過波の到達時間と手動で抽出した時間とを比較した結果を図 10 に示す。また、この際の検出誤差は平均 11.1 μ s であった。一方で、緊張状態および安静状態での透過波の到達時間および振幅値に大きな差異は確認できず、体幹筋評価のための指標として、適切な波形特徴量を発見する必要があるが、非接触での空中超音波による人体透過波の検出に成功した。また、腹部における非接触な超音波計測での妥当な計測箇所が決定できた。

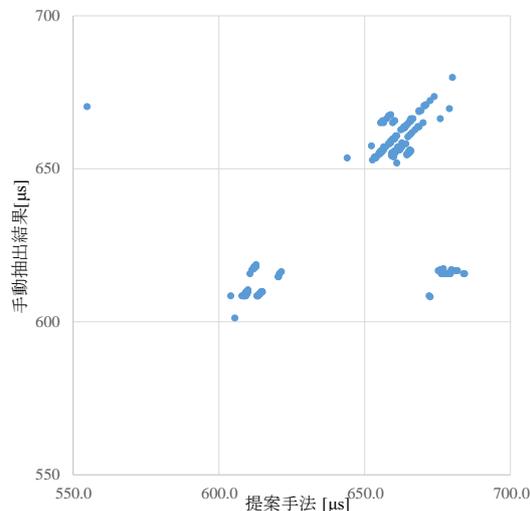


図10 波形検出精度評価

(2) 超音波探傷装置とスキャナを同時に起動させると、スキャナのモータに流れる電流に起因するノイズが発生することが懸念される。そこで、まず、探触子間に空気以外の物体が存在しない場合で、スキャナを動作させた場合の超音波伝搬時間を調査したが、ノイズによる影響は見られなかった。次に、被験者を静止させた状態で、スキャナを図 11 に示すように動作させ、駆動部による超音波波形への影響を調査した。その結果、スキャナ稼働中であっても計測可能なこと、図 12 に示すよ

うに腹部の計測位置に応じて透過波の到達時間に差が出ることが確認された。この差は超音波が通過した体組織の違いや体表形状の違いに起因していると考えられる。

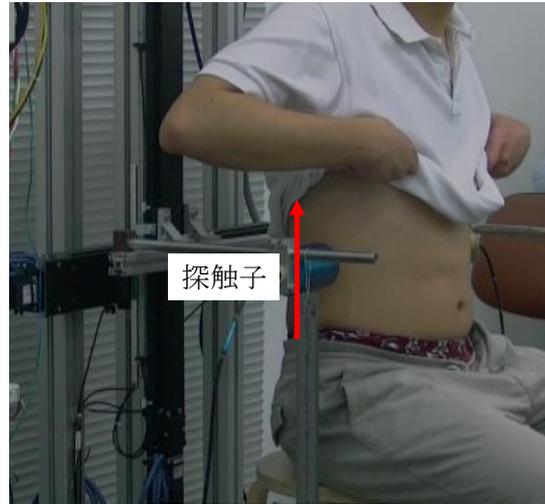


図11 スキャナ動作実験

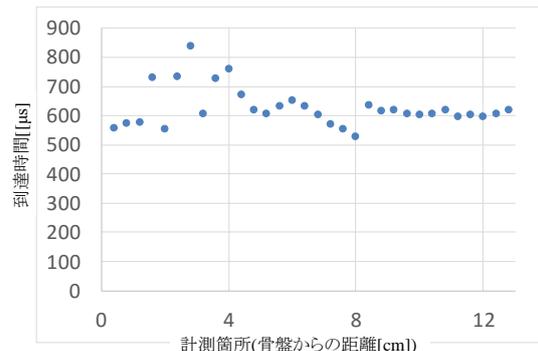


図12 スキャナ動作実験結果

(3) 本研究では、非接触な人体腹部の体幹筋計測を目標とし、従来であれば困難とされていた空中超音波での腹部計測を可能とした。今後の課題として、計測データより、体幹筋活動を評価する指標の推定が挙げられる。また、この手法により評価された体幹筋活動より、計算論的システムリハビリテーション(図 13)の概念に則り、ユーザモデルの生成や、大規模データ解析を通じ、リハビリテーションプログラムの立案や支援などを行うシステムの提案を行う。

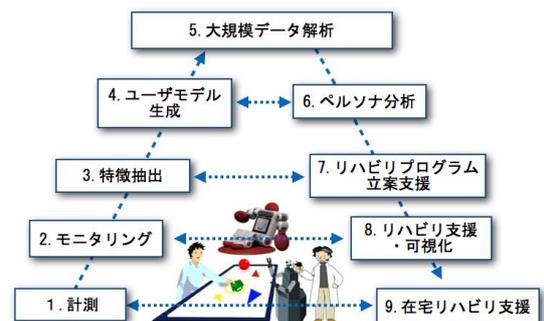


図13 計算論的システムリハビリテーション

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計1件)

①武田隆宏 他、A non-contacted ultrasound system for inner muscle evaluation in rehabilitation support system、ISEM2015、2015.9.17、淡路夢舞台国際会議場(兵庫県・淡路市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保田 直行 (KUBOTA, Naoyuki)
首都大学東京・システムデザイン研究科・教授
研究者番号：30298799

(2) 研究分担者

和田 一義 (WADA, Kazuyoshi)
首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授
研究者番号：20453037

松田 雅弘 (MATSUDA, Tadimitsu)
植草学園大学・保健医療学部・講師
研究者番号：20453037

武居 直行 (TAKESUE, Naoyuki)
首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授
研究者番号：70324803

新田 収 (NITTA, Osamu)
首都大学東京・人間健康科学研究科・教授
研究者番号：80279778

武田 隆宏 (TAKEDA, Takahiro)
首都大学東京・システムデザイン研究科・特任助教
研究者番号：70748186