

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：54502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871038

研究課題名(和文)多チャンネル振動計測と数値シミュレーションを併用した人体内の音波伝搬推定

研究課題名(英文) Estimation of the Wave Propagation inside Human Body using Multi-Channel Sensors and Numerical Simulation

研究代表者

長谷 芳樹 (Nagatani, Yoshiki)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：60448769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：歩行等の運動時の人体内の音波・振動伝搬の分布を定量的な推定をおこなうため、まず、体表面に接触型の多チャンネル振動センサと圧力センサを装着し、深度センサと同期してリアルタイムで計測するシステムを構築した。次に、実験参加者の測定データおよび数値シミュレーション結果の比較検討、および数値モデルの形状を変化させたシミュレーションをおこなった。結果、実測結果とシミュレーション結果との間に興味深い関連性を発見し、体表面での測定から体内を伝搬する音波の振幅を推定できる可能性を示した。これに加え、3次元シミュレーション結果をヘッドマウントディスプレイを用いて効率的・直感的に把握できる可視化システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In order to estimate the wave propagation inside human body quantitatively while walking or practicing, we constructed a system for real-time measurement of the vibration on the surface and pressures, which are synchronized to the data from depth sensor. The data of participants derived by using the system were compared to the results of the numerical simulation using 3-D human model. The pose of the model was also changed. As a result, an interesting correlation between measurements and simulations was found, implying the possibility of estimating the wave amplitude inside human body quantitatively by monitoring the measurement on the body surface. In addition, we developed a 3-D visualizing system of the acoustic field using a head mounted display in order to perceive the acoustic field intuitively.

研究分野：超音波工学

キーワード：シミュレーション 音波伝搬 人体 可視化

### 1. 研究開始当初の背景

本研究課題開始以前に研究代表者らは試験的に超音波解析用の3次元人体モデルを作成し、簡易的に人体全身の内部の音波伝搬を可視化することに成功していた。このモデルは、低解像度ながら、骨や軟組織などの構造をある程度正確に表現していた。このモデルの膝部と実際の生体のMRI画像の比較からも、モデルの妥当性が伺えた。

研究代表者はこのモデルを利用して、歩行を想定したパルスを踵(かかと)に印可する条件で、実測結果とシミュレーション結果の間に一定の一致を見出した。しかしながらこのモデルには、

- ・実測センサのデータとの詳細な比較検討がおこなえていないこと、
  - ・確認されたモデルは直立時のみであり、歩行時等にも適用可能であるかどうかは未知であったこと、
  - ・モデルに用いている音響定数の妥当性も未検討であったこと、
- などの課題があった。

### 2. 研究の目的

以上の課題事項に鑑み、本研究課題では、歩行や走行(ジョギング)などの運動時の体内の音波・振動伝搬の分布を、体表面に設置したセンサの情報から頑健かつ定量的に推定することを目的として検討をおこなった。実測が不可能である体内の音波伝搬は、数値シミュレーション結果との比較検討をおこなうことによって推定できると仮定し、その妥当性を確認することとした。

### 3. 研究の方法

#### 2.1 多チャンネルセンサを用いた歩行時の振動や動作計測

振動センサを腰および膝部の2カ所に設置することに加え、3軸加速度センサを足首および膝部の2カ所、深度センサを1台、両足裏にも圧力センサを設置した。これらのセンサで総合的に得られる情報より、歩行および走行時などに体勢が変化した場合にも安定したデータ取得が可能となることを期待できると考えた。

#### 2.2 重畳波形からの頑健な特徴量抽出

振動センサなどで受波される波には複数経路を伝搬してきた波が重畳していることがわかったため、この受波波形から安定して特徴量を抽出するための信号処理手法についても検討をおこなった。具体的には、信号の周波数と重畳時刻を定量的・安定的に取り出す手法を開発した。

#### 2.3 高精度・正確なシミュレーションの実現

研究課題の途中段階で、さらなる正確なシ

ミュレーションの実施にはモデルの高精細化と媒質での吸収減衰の考慮等が必要であることが示唆されたため、これらにも取り組んだ。この目的のため、さらなるモデルの高精細化に伴って必要となるシミュレーションプログラムの効率化、高速化に組み込み、不要な計算式を可能な限り除外して計算するアルゴリズムの考案や並列処理部分の効率化などにより、メモリの節約と演算速度の高速化を実現した。また、媒質の吸収減衰を反映したシミュレーションの実現についても取り組みを始めた。

### 4. 研究成果

まず、体表面に接触型の多チャンネル振動センサと圧力センサを装着してリアルタイムで計測するシステムを構築した(図1)。これらのデータは、同時に設置している深度センサ(奥行きセンサ)からのデータと同期して解析することが可能となっている(図2)。

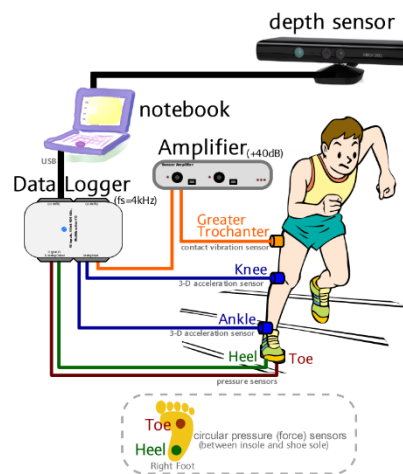


図1 開発した多チャンネル測定系例。振動センサ、加速度センサ、圧力センサ、および深度センサを同期して測定可能である。

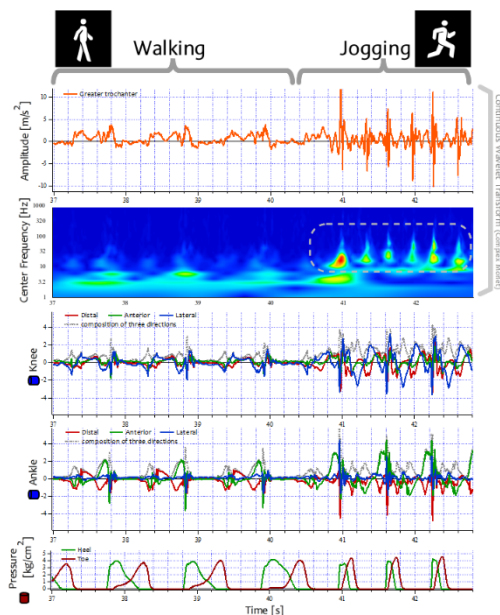


図2 多チャンネル測定結果例。歩行時および走行時で異なる周波数成分が確認できる。

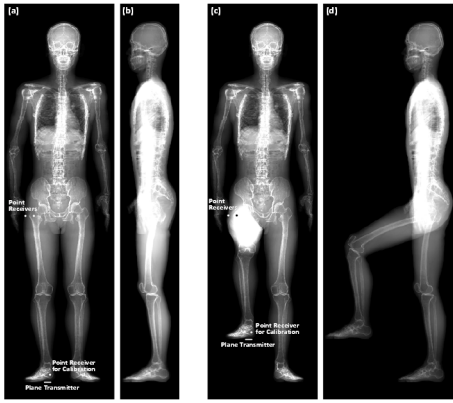


図3 3次元数値人体モデルの音響インピーダンス透過図。各部位の音響定数（密度・音速）を定義している。形状も変更可能である。

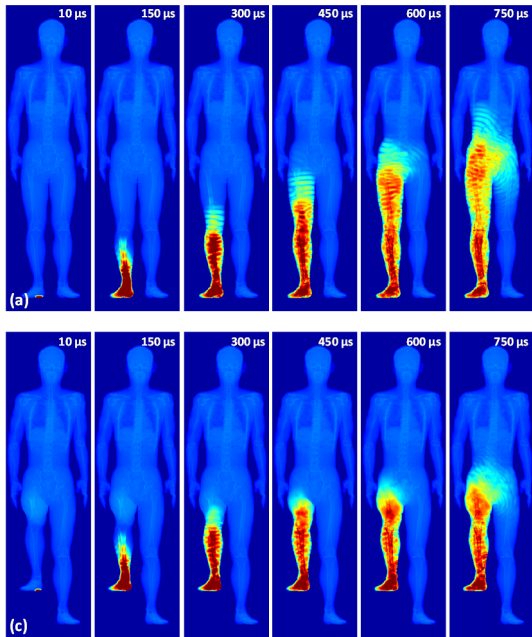


図4 3次元数値人体モデルのシミュレーション結果例。踵の下からパルスを印可した場合の例である。

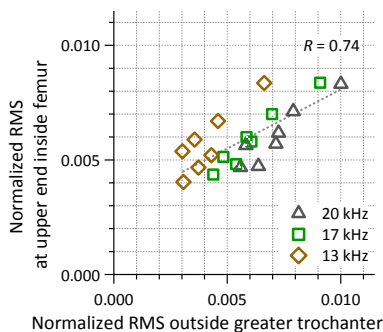


図5 モデル形状を変化させた場合の、腰部の体表面および大腿骨内部の振幅の関係。周波数にかかわらず相関が見られる。

また、被験者を募って測定したデータの解析および数値モデル（図3）を用いたシミュレーション結果を比較検討するとともに、数値モデルの形状を変化させたシミュレーションをおこなった（図4）。結果、実測結果とシミュレーション結果との間に、複数の波群のそ

れぞれの到達時刻などにおいて関連性を発見した。これはモデルの妥当性を示している。また、モデル形状を変化させたモデルであっても、体表面での測定から体内を伝搬する音波の振幅を推定できる可能性も示した（図5）。

ところで、振動センサなどで受波される信号には複数経路を伝搬してきた波が重畳しており、この受波波形から安定して特徴量を抽出するための信号処理手法についても検討をおこなった。具体的には、信号の瞬時周波数を求める際にフィルタバンクを用いてノイズや重畳に対して頑健に取り出す手法（図6）を開発し、その妥当性を骨モデルを用いて検証した。この手法を用いれば、音源から直接伝搬した最速の波の音速や周波数を頑健に得ることができることに加え、2波目以降の波が重畳し始める時刻を定量的に得ることから音波伝搬経路の推定に有用であると考えられる。

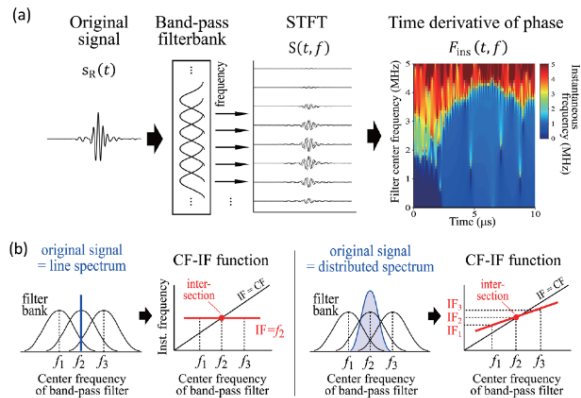


図6 瞬時周波数を頑健に検出する方法（Multi-Channel Instantaneous Frequency）。

また、得られたデータの詳細な検討の結果、さらなる正確なシミュレーションの実施にはモデルの高精細化と媒質での吸収減衰の考慮等が必要であることが示唆されたため、これらに取り組んだ。この目的のため、さらなるモデルの高精細化に伴って必要となるシミュレーションプログラムの効率化、高速化に取り組み、不要な計算式を可能な限り除外して計算するアルゴリズムの考案や並列処理部分の効率化などにより、メモリの節約と演算速度の高速化を実現した。なお、媒質の吸収減衰についても取り組みを始めたところである。現在は実際の現象とシミュレーション結果との整合を確認している段階である。

これに加え、3次元シミュレーション結果を効率的・直感的に把握できる可視化システムを開発した。このシステムは、シミュレーションソフトウェアから可視化に適した形式で結果を出力しておく部分と、GUIを介して任意の時刻・任意の面での音場の分布を高速に可視化することができるようになっている部分から成る。このシステムにより、人体のど



の部位でどのような音波伝搬現象が生じているのかをこれまで以上に高速・直感的に理解することが可能となった。

さらに、3次元ヘッドマウントディスプレイを用いて3次元音場のシミュレーション結果をリアルタイムに立体的に可視化できるシステムも試作した(図7)。現在のところワークステーションの処理速度面の制約から人体モデルのような大規模なシミュレーション結果の表示には対応できていないが、将来的に重要な技術になると考えられる。

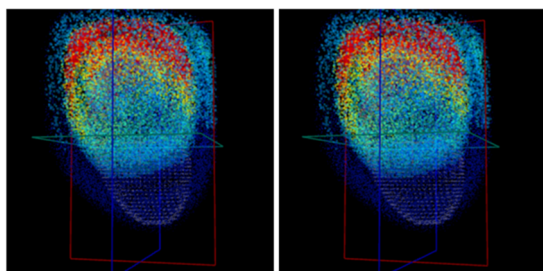


図7 3次元音場の立体表示例。ヘッドトラッキングを併用してこのような画像をヘッドマウントディスプレイに表示することで、音場の直感的把握を実現した。

#### 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 5件)

- (1) 長谷芳樹, "人体の音響モデル," 超音波 TECHNO 2014.11-12. Vol.26 No.6 (2014) pp. 16-20. (解説記事)  
[http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product\\_id=3421](http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=3421)
- (2) Yoshiki Nagatani and Ryosuke O. Tachibana, "Multichannel Instantaneous Frequency Analysis of Ultrasound Propagating in Cancellous Bone," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.135, No.3 (2014) pp. 1197-1206. (査読有)  
DOI: 10.1121/1.4864464
- (3) Yoshiki Nagatani, Katsunori Mizuno, and Mami Matsukawa, "Two-wave behavior under various conditions of transition area from cancellous bone to cortical bone," Ultrasonics 54 (2014) pp. 1245-1250. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.ultras.2013.10.016
- (4) Hirofumi Taki, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, Katsunori Mizuno, and Toru Sato, "Fast characterization of two ultrasound longitudinal waves in cancellous bone using an adaptive beamforming technique," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 137 (2015) pp. 1683-1692. (査読有)  
DOI: 10.1121/1.4916276
- (5) Keith Wear, Yoshiki Nagatani, Katsunori Mizuno, and Mami Matsukawa, "Fast and

slow wave detection in bovine cancellous bone in vitro using bandlimited deconvolution and Prony's method," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 136 (2014) pp. 2015-2024. (査読有)  
DOI: 10.1121/1.4895668

[学会発表] (計 22件)

- (1) Yoshiki Nagatani, Isao Mano, and Mami Matsukawa, "Estimation of Wave Propagation inside Human Body while Walking and Running - Measurement of Vibration on Body Surface and 3-D Simulation," Abstract Book of IEEE International Ultrasonic Symposium 2013 (2013) IUS1-PD4-1.
- (2) Yoshiki Nagatani and Takashi Saeki, "Measurement and Estimation of the Wave Propagation in Human Body using Multi-Sensory System and 3-D Simulation," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.34 (2013) pp. 561-562.
- (3) 長谷芳樹・橘亮輔, "[研究紹介] 骨粗鬆症診断のための超音波信号の特徴量解析～モデル化・時間領域解析・周波数領域解析～," 電子情報通信学会 IEICE Technical Report, SP2014-40 (2014).
- (4) Yoshiki Nagatani and Takashi Saeki, "Quantitative Estimation of Exercise Effect using Numerical Simulation and Multi-sensory System on Human Leg," Abstract of 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) (2014).
- (5) Yoshiki Nagatani and Takashi Saeki, "Morphological Investigation of Acoustical Vibration using Simulation of Postured 3-D Human Body Model," Materials Science and Engineering 2014 (2014) -.
- (6) Yoshiki Nagatani, Hirofumi Taki, Guillaume Haiat, and Mami Matsukawa, "Numerical Investigation of the Effect of Incoherence on Fast Wave Generation in Cancellous Bone," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35 (2014) pp. 135-136.
- (7) Yoshiki Nagatani, Vu-Hieu Nguyen, Salah Naili, Guillaume Haiat, "The effect of viscoelastic absorption on the fast and slow wave modes in cancellous bone," Proceedings of 6th European Symposium on Ultrasonic Characterization on Bone (2015) pp.1-2.
- (8) Yoshiki Nagatani, "Simulation Technique and Time-Frequency Analysis of the Acoustic Wave inside Cancellous Bone," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 138, No. 3, Pt. 2, (2015) p. 1797. [invited]
- (9) 長谷芳樹, "WebVR と WebGL で 3次元音場を視る," 日本音響学会関西支部 第18回若手研究者交流研究発表会 発表資料集 (2015) .
- (10) Fuminori Fujita, Takuma Hachiken, Yoshiki Nagatani, Isao Mano, Katsunori Mizuno, and

- Mami Matsukawa, "Experimental study on longitudinal wave propagation in human radius model," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.34 (2013) pp. 397-398.
- (11) Isao Mano, Kaoru Horii, Fuminori Fujita, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, and Takahiko Otani, "Influence of the circumferential wave on the fast and slow waves," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.34 (2013) pp. 543-544.
- (12) Yuka Matsuura, Isao Mano, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, "Ultrasonic wave propagation in a child radius model," Abstract of 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (2014).
- (13) Keith Wear, Yoshiki Nagatani, Katsunori Mizuno, Mami Matsukawa, "Temporal Evolution of Fast and Slow Waves During Propagation Through Bovine Cancellous Bone In Vitro," Abstract Book of IEEE International Ultrasonic Symposium 2014 (2014) p.528.
- (14) Hirofumi Taki, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, Toru Sato, "Fast characterization of the fast and slow ultrasound waves in cancellous bone using frequency domain interferometry," Abstract Book of IEEE International Ultrasonic Symposium 2014 (2014) p.201.
- (15) Takuma Hachiken, Yuka Matsuura, Fuminori Fujita, Isao Mano, Toshiho Hata, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, "Ultrasonic wave propagation in the distal end of adult human radius model," Abstract Book of IEEE International Ultrasonic Symposium 2014 (2014) pp.188-189.
- (16) Hirofumi Taki, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, and Toru Sato, "Determining Fast and Slow Ultrasound Waves in Cancellous Bone Using Frequency Domain Interferometry : Application to Simulation Data," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35 (2014) pp. 133-134.
- (17) Takuma Hachiken, Toshiho Hata, Yuka Matsuura, Isao Mano, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, "Effects of circumferential wave on fast and slow wave propagation in the human radius model," Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35 (2014) pp. 131-132.
- (18) Amber Groopman, Keith Wear, Yoshiki Nagatani, Katsunori Mizuno, Mami Matsukawa, Hirofumi Taki, Jonathan Katz, Mark Hollan, and James Miller, "Sample thickness dependence of Bayesian and modified least squares Prony's analysis methods on systematically shortened bovine cancellous bone," J. Acoust. Soc. Am. 137 (2015) p. 2286.
- (19) Toshiho Hata, Yoshiki Nagatani, and Mami Matsukawa, "FDTD simulations of ultrasonic wave propagation in the cortical bone with heterogeneity," J. Acoust. Soc. Am. 137 (2015) p. 2288.
- (20) Yoshiki Nagatani, Vi-Hieu Nguyen, Sarah Naili, and Guillaume Haiat, "A numerical study of viscosity effects on ultrasound wave propagation in cancellous bones," 7th International Conference on Porous Media (2015).
- (21) Hirofumi Taki, Yoshiki Nagatani, Mami Matsukawa, Katsunori Mizuno, Toru Sato, Hiroshi Kanai, "Modified transfer function with a phase rotation parameter for ultrasound longitudinal waves in cancellous bone," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 138, No. 3, Pt. 2, (2015) p. 1797. [invited]
- (22) Guillaume Haiat, Yoshiki Nagatani, Seraphin Guipieri, and Didier Geiger, "Quantitative ultrasound measurements in trabecular bone using the echographic response of a metallic pin: Application to spine surgery," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 138 (2015) p. 1798. [invited]
- [図書] (計 2件)
- (1) 豊田政弘編, "FDTD 法で見る音の世界 (音響サイエンスシリーズ 14)" (コロナ社, 2015年) (ISBN: 978-4-339-01334-4) (第5章および付録B,Cを執筆担当)
- (2) 日本音響学会編, "音響キーワードブック" (コロナ社, 2016年) (ISBN: 978-4-339-00880-7) ("人体の音響モデル"を執筆担当)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)
- [その他]
- ホームページ等
- <https://ultrasonics.jp/nagatani/>
- <https://twitter.com/nagataniyoshiki>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
- 長谷 芳樹 (NAGATANI, Yoshiki)
- 神戸市立工業高等専門学校・電子工学科・准教授
- 研究者番号 : 60448769
- (2) 研究分担者
- なし
- (3) 連携研究者
- なし