

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25560236

研究課題名(和文) 符号化パルス高速撮像法による高画質・高機能超音波イメージング

研究課題名(英文) Coded pulse excitation for enhanced ultrafast ultrasound imaging

研究代表者

近藤 健悟 (Kondo, Kengo)

京都大学・健康長寿社会の総合医療開発ユニット・特定助教

研究者番号：50649233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：平面波を用いた超音波の高速撮像において、時間分解能を低下させることなく空間分解能向上させることを目的として、符号化パルス変調による複数信号の分離法を検討した。本研究では、符号化パルス変調を用いて複数の信号を同時に送信し、復号化の際に最適化問題を解くことによって復号化し、分離する方法を開発した。シミュレーションおよび実験により提案手法の実現可能性を検討した。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of improving spatial resolution without compromising time resolution in ultrafast ultrasound imaging, we studied a coded pulse excitation method for demultiplexing signals. We developed a novel decoding method which can demultiplex simultaneous excited signals by solving an optimization problem. The proposed method was confirmed by numerical simulations and experiments.

研究分野：総合領域

キーワード：生物・生体工学 医用超音波システム パルス符号化

1. 研究開始当初の背景

近年、計算機の能力の向上により超音波の高速撮像をリアルタイムで処理することが可能となり、これを応用した機能イメージングがさかんに行われている。従来の超音波の計測では1秒間に計測できる断層像の枚数は数10枚から100枚程度であったが、高速撮像を用いることで秒間数1,000枚から10,000枚以上の画像取得が可能となった。これにより、心筋の動きを詳細に計測したり、ドプラ血流計測を3Dで行えるなど、より高度な機能イメージング法が提案されている。

一方、通常の超音波計測では送受信ともにフォーカスするビーム形成を行うのに対し、高速撮像では送信時はビーム形成を行わず平面波状に超音波を送信し、受信後の後処理のみによって画像形成を行うため、従来の超音波像と比べて空間分解能やコントラストで劣るという問題がある。

ここで、複数の信号を分離を同時送信し、受信後に分離することが可能であれば、時間分解能を落とすことなく空間分解能を向上させることが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、超音波撮像において、送受信ビーム形成の場合と同様の高画質で高速撮像することを可能とする手法を開発することを目的とし、符号化パルス変調を用いて符号化した複数の超音波信号を同時に送信し、受信後の復号化で分離する手法の開発を行った。

3. 研究の方法

複数の信号を同時に送信し分離を行うために、M系列符号化、Gold符号化を用いて符号化パルス変調を行い、複数の信号を同時送信する。ここで、これまで超音波パルス符号化法で用いられてきた復号化法では、送信した符号と受信信号との相関を求めることで復号化を行うが、ダイナミックレンジの広い超音波画像においては復号化エラーによるアーチファクトを生じた。そこで、新たな復号化法として、compressed sensingにおいて用いられる次式の最適化問題を解くことによって、復号化信号を求める方法を提案した。

$$\min \|x\|_1 \quad \text{subject to } y = MW^1x \quad (1)$$

ここで、 y は、計測信号ベクトル、 M は符号化行列、 W^1 は時間軸に対する1次元 Haar 逆 Wavelet 変換行列、 x は Wavelet 基底における係数ベクトルである。すなわち、符号化パルス変調によって計測される計測信号 y を得られるような復号化信号のうち、Haar Wavelet の基底において最もスパースとなるものを選択する。このとき、復号化信号 s は、

$$s = W^1x \quad (2)$$

となる。

提案手法について、以下の手順により提案手法の実現可能性を検討した。

- (1) ワイヤターゲットのシミュレーションにより提案手法による復号化法の有効性を確かめた。
- (2) 生体組織を模擬した心筋モデルのシミュレーションにより、多数の散乱体が存在する条件において提案手法の有効性を検討した。
- (3) 実際の超音波装置を用いて符号化パルス変調を行い、提案手法による復号化の実現可能性を検討した。

4. 研究成果

(1) ワイヤターゲットシミュレーション
ワイヤターゲットの計測を模擬したシミュレーションを行った。まず、単一の符号列を用いてパルス符号化を行い、復号化を行った。符号には、M系列31ビットを用いた。従来の復号化法および提案手法によって得られる波形を図1に示す。また、リニアプローブによって受信、復号化し、画像化を行った結果を図2に示す。図1、2から、従来の復号化法では、信号の前後に復号化エラーによるアーチファクトが発生しているが、提案手法では、復号化エラーがほとんどなく、理想値と

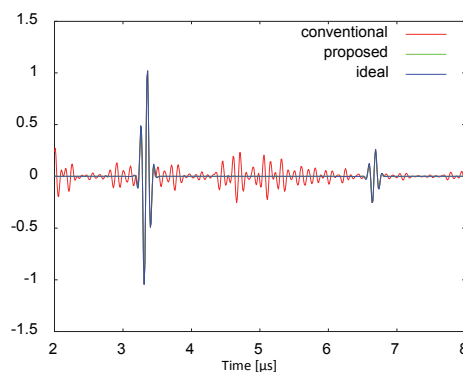
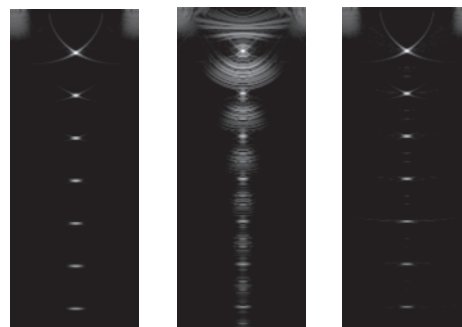


図1 ワイヤターゲットシミュレーションの復号化信号



(a) 理想値 (b) 従来法 (c) 提案手法

図2 ワイヤターゲットシミュレーションのB-mode (単一素子送信)

よく一致していることがわかる。

次に、複数の符号列を同時に送信し、受信後の復号化によって分離を行った結果を図3に示す。符号には、Gold符号511ビットの符号列16組を用いて、16素子から符号化パルスの同時送信を行い、復号化によって分離した。図から、信号の分離はできているが、理想値と比べて深部の信号が弱くなっていることがわかる。これは、提案手法が非線形な最適化問題を解くことから、プローブ近傍の振幅の大きな信号を強調したためだと考えられる。

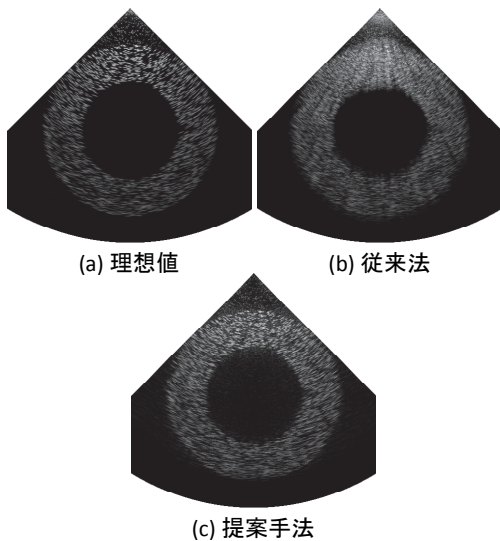
(2) 生体組織シミュレーション

生体組織に近いモデルとして、心筋左室短軸像の計測を模擬したモデルのシミュレーションを行った。単一素子による結果を図4に示す。符号としてM系列31ビットを用いた。信号強度の強い部分では、従来法ではパルス幅が広がり距離分解能が低下しているのに対し、提案手法では理想値に近い値が得られている。一方、提案手法では、信号強度



(a) 理想値 (b) 提案手法

図3 ワイヤターゲットシミュレーションのB-mode (16素子同時送信)



(a) 理想値 (b) 従来法 (c) 提案手法

図4 心筋モデルB-mode (単一素子送信)

の弱い部分で復号化エラーによるノイズが発生している。

4素子による4系列同時送信による結果を図5に示す。符号として、Gold符号511ビットという非常に長い符号を使用したにも関わらず、信号を正しく分離できなかった。式(1)の目的関数をより適切なものに再設計する必要があると考えられる。

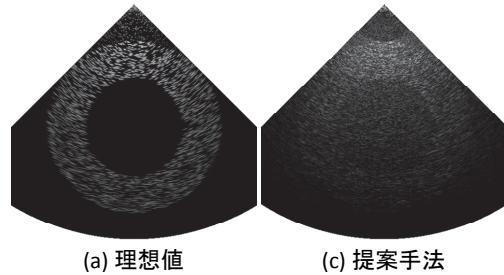


図5 心筋モデルB-mode (4素子同時送信)

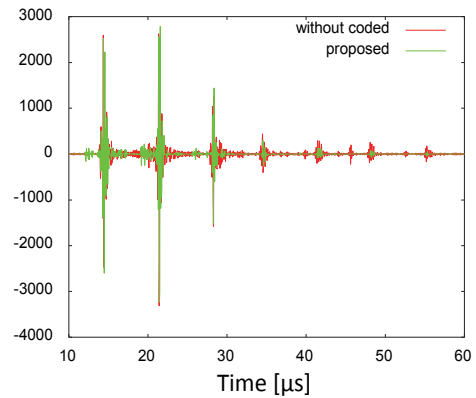


図6 ワイヤターゲット実験波形

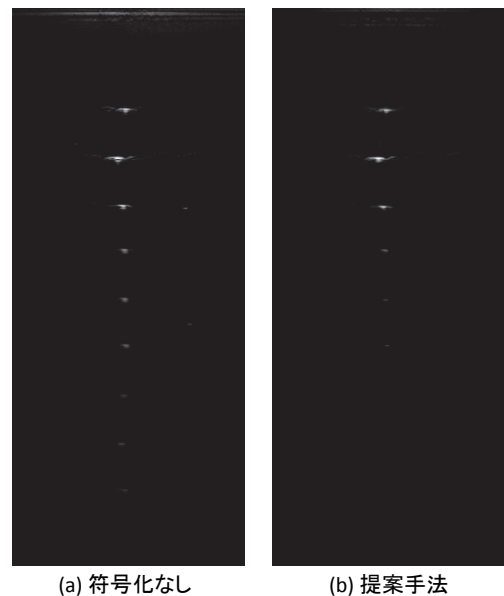


図7 ワイヤターゲット実験B-mode

(3) ワイヤターゲット実験

提案手法の実計測における実現可能性を検討するために、提案手法を用いてワイヤターゲットを計測した。中心素子による復号化波形を図6に、B-modeを図7に示す。図6の波形より、符号化によって無信号部分におけるノイズが減少していることがわかる。また、シミュレーションの結果と同様に、符号化を行わない場合と比較して、深部における信号強度が低下している。

符号化パルス変調における復号化法および複数信号の分離法を提案し、シミュレーションおよび実験によってその実現可能性を示した。提案手法によって、従来の相関を用いた復号化法と比べ、復号化エラーを小さくできた。一方で、生体組織のような複雑な対象においては、従来の正しく復号化できず、長い符号長を用いても信号の分離ができなかった。生体イメージングには最適化問題の目的関数を設計し直すなどして、復号化法の改善を行う必要がある。

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)

[学会発表] (計4件)

① Kengo Kondo, Makoto Yamakawa, and Tsuyoshi Shiina, Coded Excitation Scheme for Acoustic Radiation Push Pulse Compression, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM symposium, 2013年7月22日, Prague, Czech Republic

② Mikako Gomyo, Kengo Kondo, Makoto Yamakawa, and Tsuyoshi Shiina. Mapping Viscoelastic Properties Using Acoustic Radiation Force, 12th International Tissue Elasticity Conference, 2013年10月4日, Lingfield, England

③ 東 政孝, 張 海崇, 近藤 健悟, 浪田 健, 山川 誠, 椎名 毅, “符号化を用いた高速かつ高画質な光音響トモグラフィのシミュレーションによる解析”, 第35回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2014年12月3日, 明治大学(東京都)

④ Masataka Azuma, Haichong K. Zhang, Kengo Kondo, Takeshi Namita, Makoto Yamakawa, and Tsuyoshi Shiina, High frame rate photoacoustic computed tomography using coded excitation, SPIE Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing 2015, 2015年2月7日, San Francisco, United States

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 健悟 (KONDO KENGO)

京都大学・健康長寿社会の総合医療開発ユニット・特定助教

研究者番号: 50649233

(2) 研究分担者

山川 誠 (YAMAKAWA MAKOTO)

京都大学・先端医工学研究ユニット・特定准教授

研究者番号: 60344876

椎名 毅 (SHIINA TSUYOSHI)

京都大学・医学研究科・教授

研究者番号: 40192603