

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04161

研究課題名(和文) 波面符号化を用いる合成開口型波動計測

研究課題名(英文) Generalized synthetic aperture sensing with wavefront coding

研究代表者

田村 安孝 (Tamura, Yasutaka)

山形大学・大学院理工学研究科・名誉教授

研究者番号：40171904

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)：合成開口型の波動計測システムのデータ取得条件と復元する情報の関係を“波面の符号化”という観点から一般化して考察し、システム設計の指針を理論的かつ実証的に示すことを目指した。

特異値分解解析により、計測条件を制限するWide Null形成の手法を提案し、有効性を確認した。さらに、圧縮センシングの手法として注目されているL1ノルム最小化手法を適用することで、従来は不完全とみなされていた観測データからでも対象の情報を復元する手法を提案し検証した。また、センサの非線形特性を利用して2次元の波動分布を符号化する手法を提案した。

以上の検討は、主に数値シミュレーションにより、一部は実測により行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療やレーダなど広い応用分野を持つ合成開口技術は、観測データから対象の情報を復元する計測の問題として一般化でき、学術的に重要な意義を持つ。

本研究では、合成開口技術を、時間と空間の両次元に渡る多次元信号である波面を符号化する過程として扱うことでデータ取得と情報復元の最適化設計を図る。また、ランダム配置された素子や多重反射・共鳴・非線形性などの、従来は利用されることの少なかった特性を利用した新しい合成開口システムを可能にすることを目指す。本研究の成果は、高フレームレート・高分解能の超音波撮像システムや、低コストの車載用レーダなどへの応用が可能であり、広い分野の産業への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The relationship between the data acquisition conditions and the information to be recovered in the synthetic aperture type sensing system is discussed from the viewpoint of "wavefront coding" in a generalized manner, and the guideline for the system design is theoretically and empirically presented.

By using singular value decomposition analysis, we proposed a method of wide null formation to limit the measurement conditions, and confirmed its effectiveness. In addition, by applying the L1 norm minimization method, which has been attracting attention as a compressed sensing method, we proposed and verified a method for recovering target information from incomplete observation data. In addition, we proposed a method to encode two-dimensional wave distributions using the nonlinear characteristics of sensors. These investigations were carried out mainly by numerical simulations and partly by actual measurements.

研究分野：計測工学，信号処理

キーワード：多次元信号処理 波面の符号化 合成開口 L1ノルム最小化 デルタシグマ変調

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) Yang Lou らは、空間的な matched filtering を用いる超音波撮像が、完全データの合成開口システムとほぼ同程度の性能を少ない回数の繰り返し送受信で達成できることを示した。

(2) 不完全な観測データから信号を復元する手法として圧縮センシングが注目され、波動計測の分野では、3D 画像のデータ量低減や A モード像の高分解能再構成など、部分的な応用が試みられ始めていた。特異値分解解析による合成開口レーダのスプリアス像の低減手法が Manikas らにより報告されていた。

(3) 研究代表者らは、直交性が不完全な Walsh 関数変調波や、単一の信号チャンネルしか持たない素子を使った撮像が可能なことを示していた。これらのシステムは、送受信される波面を複数の空間周波数成分を含むように符号化して、反射波を復調することで空間選択性を実現できていると解釈できる。このことから、素子配置と送信波形を空間も含めた符号として扱うことで、観測条件を緩和し、不完全なデータからでも情報復元可能な波動計測が可能であるという着想を得た。

Lou らが符号の空間的性質のみに注目しているのに対し、研究代表者らは時間・空間の両方の性質を考慮しようと考えた。

(4) 研究代表者らは、Walsh 関数変調波を用いる高フレームレートの 3 次元撮像システムの開発を経験していた。また、波面の多次元変調による 2 値駆動方式や素子の非線形特性を利用して 2 次元アレイの信号チャンネル数を大幅に低減する手法などを提案している。

その後、L1 ノルム最小化法による超音波像の復元が可能であることを示した。解の存在する範囲を制限する前処理を行ってから L1 ノルム最小化法を用いることで、安定な解が短い収束時間で得られることも確認している。

さらに、波面を 2 値信号により制御する手法として従来の時間のみの変調を時間・空間の多次元に拡張した手法や、波動センサの非線形特性を利用することで 2 次元空間に分布する波動を少ない信号チャンネルで発生する手法を提案していた。

### 2. 研究の目的

(1) 多次元符号化の観点から不完全観測の波動計測システムに対応

合成開口におけるデータ観測は、時間と空間の両次元に渡る多次元信号である波面を符号化する過程として把握できる。これまでは、この多次元符号を、時間ごと、または空間ごとに独立に設計していた。これに対し本研究では、時間・空間の両方を統合して扱うことでデータ取得と情報復元の最適化設計を行う。また、観測過程を一般化することで、空間的に変調された感度やランダム配置した素子、さらに多重反射・共鳴などの従来は利用されることの少なかった特性を利用した新しい合成開口システムを可能にする。

(2) 特異値分解解析の応用

離散化した観測モデルを表す伝達行列から特異値分解により基底ベクトルを計算する。この基底ベクトルを使って、空間分解能やダイナミックレンジ、雑音耐性などの要求に対するデータ量の下限を見積もり、情報復元用行列を設計する。

さらに、基底ベクトルを用いた線形な前処理により、解が存在する範囲を制限したデータを得て、これに L1 ノルム最小化などの解法を適用することで、従来は不完全とみなされていた観測データからでも対象の情報を復元する手法を確立する。

(3) 2 値符号化の検討

計測システムを実装する際に、効率のよい 2 値符号化は不可欠になる。2 次元に分布する波動を 2 次元のセンサアレイを使って高速に扱おうとする場合、信号チャンネル数が大きくなり、その結果、システムのコストが非現実的に大きくなる可能性がある。既に、研究代表者らは、非線形特性を利用して信号チャンネル数を削減する方式を提案している。この方式を、やはり研究代表者らが提案した多次元変調と組み合わせることで、2 値の信号で扱えるようにする手法を新たに検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1)性能とシステムパラメータの関連を明らかにする

多次元符号化に基づく観測と情報復元について、性能（視野角，奥行，角度分解能，奥行分解能，ダイナミックレンジ：PSF 不要ピークの相対レベル，フレームレート）とシステムパラメータ（送受信素子数，アレイ寸法，信号チャンネル数，周波数帯域幅，SN 比）の関係を明らかにする。性能とパラメータの関係は数値シミュレーションにより定量的に決定する。特に，従来の波動計測の研究での検証が不十分であった，空間符号化された素子による観測について，符号長や信号チャンネル数が性能に与える影響を調べ，信号チャンネル数をどこまで減らせるかについて明らかにする。

#### (2)最適な観測システムと復元手法の確立

(2)の過程で，性能に対する最適な観測と情報復元の手法についても検討する。観測モデルの特異値分解解析により，ダイナミックレンジを評価値として情報復元用行列を最適化設計する方法を確立する。

また，L1 ノルム最小化法のパラメータ選択についても検討し，特異値分解解析による前処理で解の空間範囲を制限した場合の効果を，定量的に検証する。

並行して，非線形特性を利用して少数の信号で 2 次元の波動場を制御する手法と 2 次元変調を組み合わせた手法について，安定に動作する条件を明らかにし，精度を評価する。

### 4. 研究成果

(1)直線状にならべた送受信素子アレイについて，反射率分布と受信波面を離散化したデータの間の伝達行列を求める数学モデルをコンピュータ上に実装した。これを用いて，伝達行列の特異値分解により基底ベクトルを求め，素子数や素子配置を変更して分解能やダイナミックレンジを評価するシステムを構築した。

次に，基底ベクトルを用いた線形な前処理により，空間的選択性の相対感度を広い角度範囲で低く抑える Wide Null Beamformer を構成できることを確認した。Wide Null を形成することにより，指定した角度範囲での感度の相対レベルを従来方式に比べ-10 から-14dB 低減できることを示した。

並行して，L1 ノルム最小化による高分解能撮像方式の検討を行った。従来は，周波数毎に角度方向の反射率分布を L1 ノルム最小化により求めてから，フーリエ逆変換により奥行き方向の分布を復元することで，角度方向について複数の反射体の像を高分解能で得られることを示した。この方法では，反射体の数が増大するに従い，再構成した画像のアーチファクトのレベルが増大し，繰り返し計算の収束時間も増加する計算時間が増加するという問題があった。

そこで，反射率分布を線形変換によりスパース化して L1 ノルム最小化を適用する方法を検討した。スパース化基底としては，二次元の Daubechies ウェーブレット基底とコサイン基底を用いるものが最も良い結果が得られた。復元された反射率分布と元の分布の誤差を RMSE で評価した結果，素子数 1024 のとき，従来の L1 ノルム最小化手法では RMSE 値が 0.835 と比較的高い値をとったのに対し，新しい手法のウェーブレット基底を用いた場合では 0.320，コサイン基底を用いた場合では 0.157 となり，旧手法に比べて 0.515~0.678 程減少する結果となった。

(2)三次元撮像を想定し，小数回の送受信で得られた超音波エコーデータから L1 ノルム最小化によって高分解能な画像を再構成できるか検討した。

生成された画像について参照画像との類似度を評価する MSSIM（平均構造類似性）を用いて画質を評価した。伝達行列の共役転置行列を用いて画像再構成を行う従来法によって再構成された画像との比較を行ったところ，L1 ノルム最小化によって再構成された画像は，従来法で得られた平均 0.88 という値に対して，平均 0.95 と大きく向上された MSSIM 値を示した。また，計算時間について評価を行ったところ，L1 ノルム最小化の計算時間は受信素子数に比例して増加し，三次元物体の画像を再構成するのに約数百秒~千秒の時間を要する結果となった。

次に，(1)の研究で二次元の対象に対して有効であることが確認された WideNull ビームフォーマが三次元超音波撮像システムに関しても有効であるかを検討し，素子数と Wide Null 領域での感度の関係を明らかにした。数値シミュレーションの結果，周波数 3.5MHz，受信素子数 128 のリニアアレイを用いて，3次元の撮像領域内の Wide Null の相対感度を-41dB 以下にできることが示された。また，2次元アレイを用いる場合，受信素子数 4096 での Wide Null 相対感度抑

圧比は-31dB となった。

二次元アレイの信号チャンネル数を低減するための波面符号化の手法として、送受信素子の非線形な特性とデルタシグマ変調による量子化の利用についても検討した。図1は、波面を発生する駆動回路に应用する場合の構成例である。二次元アレイの信号を SDD (Semi Definite Decomposition) 処理により2つの一次元アレイ信号  $x$  と  $y$  に展開してセンサを駆動する。このままでは、発生する波面の SN 比を高くするためには高いサンプリング周波数が必要となる。

しかし、本研究では、この処理を図2のように  $\Delta\Sigma$  変調の負帰還ループに入れることで、動作周波数と量子化誤差の低減が可能なることをシミュレーションにより確認した。

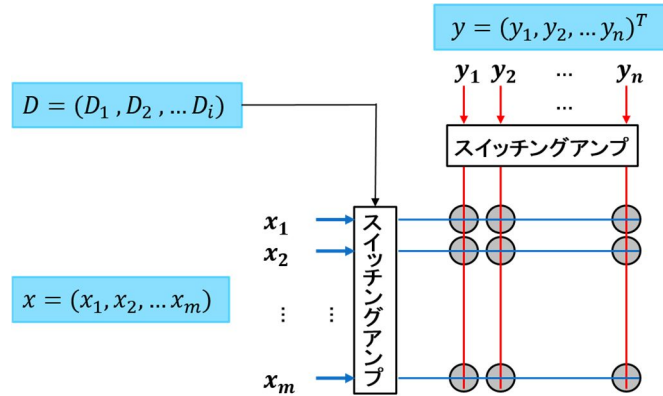


図1. SDD 法による2次元アレイセンサの駆動

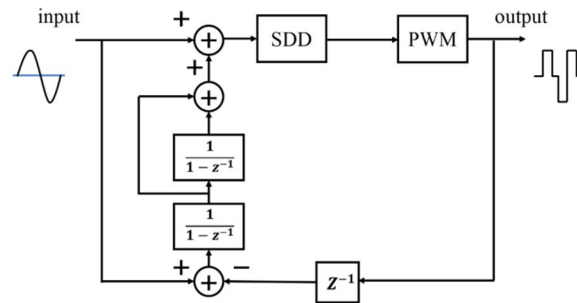
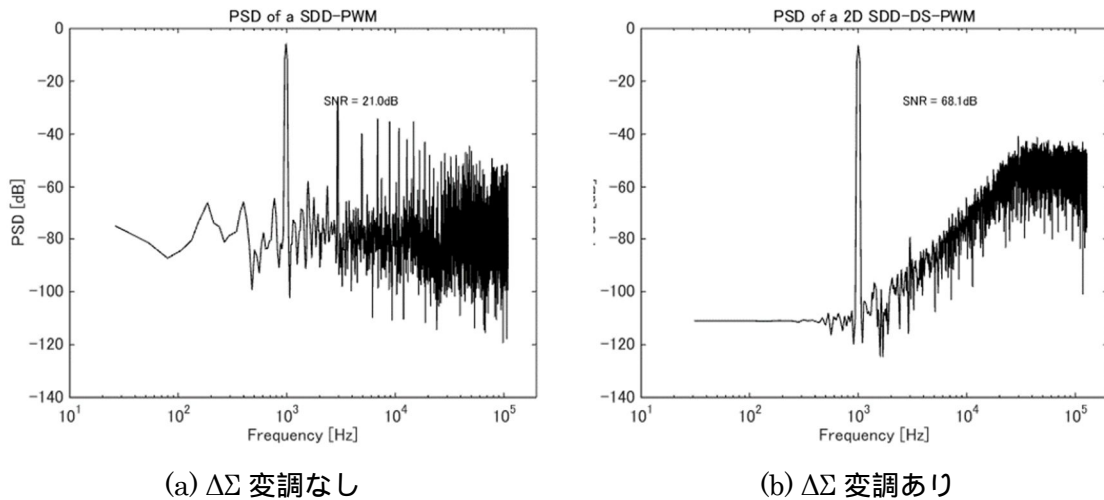


図2. 多次元  $\Delta\Sigma$  変調の構成



(a)  $\Delta\Sigma$  変調なし

(b)  $\Delta\Sigma$  変調あり

図3. 観測点での周波数スペクトルの比較

図3にシミュレーションの結果を示す。8×8(64素子)の2次元アレイから1点に集束するような波面を発生させるような信号を計算する。この信号をSDDにより16chの3値(1,0,-1)信号に変換してセンサを駆動し、集束位置でのSN比を評価した。SDDを変調ループ内に入れた構成により、SN比が21dBから68dBと大きく向上することがわかる。

(3)(1),(2)で構築した数値計算システムを用い、パラメータの範囲を広げたシミュレーションをおこなった。検討するパラメータは、送信素子・受信素子の個数、測定対象の複雑さの指標である反射点の個数とした。

素子数と反射点の個数が増加すると計算時間が大幅に増加することが判明したため、これに対応した数値計算システムを構築した。また、並列もより計算速度を向上させた超音波シミュレーションソフトを導入した。

複雑な構造を持つ対象に対する画質評価として、MSE(Mean Square Error), PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio), SSIM(Structural SIMilarity)を検討した。

構築した計算システムにより、送受信回数1回の場合について、L1ノルム手法を用いる像再生手法と従来手法の画質を比較した。想定した撮像システムは、中心周波数3.5MHz、帯域幅1.75MHz、2次元アレイ寸法20mm×20mm~75mm×75mm、受信素子数256~3600、無指向性の音源による送信回数1回とした。

受信素子数を1600個とした場合、従来法によって再構成された画像は、本来物体が存在しない位置にピークより相対レベルが-30~-60dBのアーチファクトが広がり、元の物体の形を読み取れない。しかし、L1ノルム最小化により再構成された画像は、アーチファクトの相対レベルが-60dB以下となり、元の物体の形を正しく認識することができる。定量的な画質評価では、256個の受信素子を用いるL1ノルム最小化による撮像は、3800個の受信素子を用いる従来型の撮像方式より優れた画質を得られることを確認できた。

図4に従来手法とL1ノルム最小化により得られる3次元画像(数値シミュレーション)を示す。受信素子数は1600、撮像対象として10,000個の点反射体を半径1cmの球体内にランダムに配置したものを想定している。

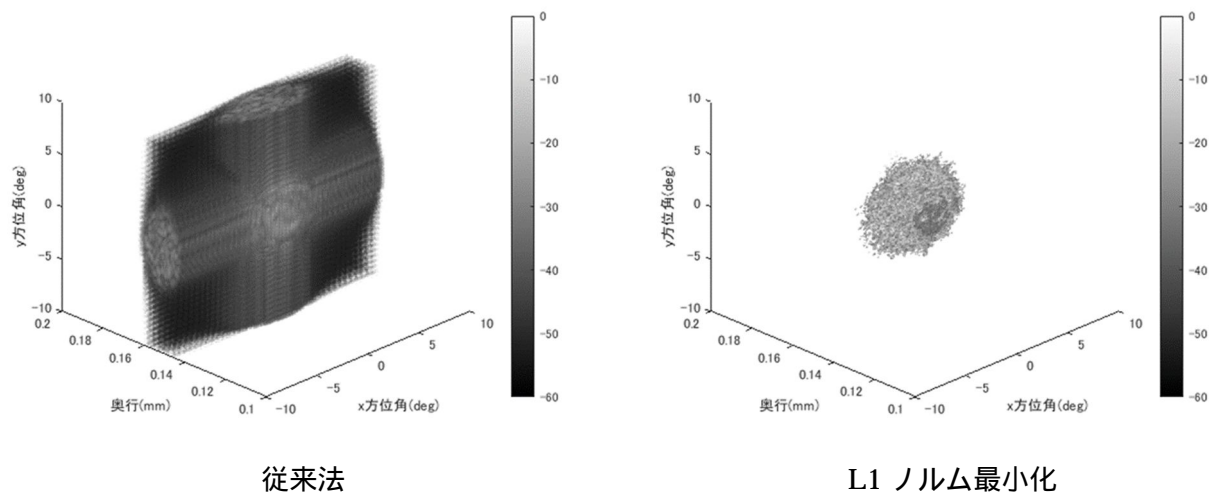


図4. 受信素子数を1600ch用いて得られた超音波画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 阿部光, 田村 安孝, 柳田 裕隆
2. 発表標題 L1ノルム最小化を用いた三次元超音波イメージング
3. 学会等名 日本音響学会 東北地区音響学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三村祐輝, 田村 安孝, 柳田 裕隆
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた超音波CT用TOFの推定
3. 学会等名 日本音響学会 東北地区音響学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉永 大洋, 田村 安孝, 柳田 裕隆
2. 発表標題 L1 ノルム最小化を用いた超音波撮像システムの開発
3. 学会等名 2019年秋季研究発表会 - 日本音響学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田代 康平, 田村 安孝, 柳田 裕隆
2. 発表標題 SDD 法による非線形 2次元アレイスピーカの駆動
3. 学会等名 2019年秋季研究発表会 - 日本音響学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大井 一希, 柳田 裕隆, 田村 安孝
2. 発表標題 二次元 変調を用いたサーキュラレイスピーカの指向性制御
3. 学会等名 2019年秋季研究発表会 - 日本音響学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小関裕一郎, 安達祐希, 田村安孝, 柳田裕隆
2. 発表標題 L1ノルム最小化を用いた3次元超音波イメージング
3. 学会等名 第57回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関