

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560509

研究課題名(和文) 物理量の多点同時観測・制御のための多次元 変調システム

研究課題名(英文) Multidimensional delta-sigma modulation for simultaneous observation and control of physical quantities at multiple points

研究代表者

田村 安孝 (TAMURA, Yasutaka)

山形大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40171904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：空間的な拡がりを持ち時間的に変化する物理量の、多点同時的な観測と制御を効率的に実行する技術の確立を目標としている。そのために、多数のセンサおよびアクチュエータの信号処理に、多次元 変調の技術を応用することを検討した。

研究成果として、安定に動作する高次数の多次元 変調の設計手法とハードウェアの実装方式を確立した。この成果は、振動、音響、電磁波など、多点同時的な観測と制御が必要な分野でのセンシングとアクチュエーションのシステムの応用範囲を拡大するものと期待している。

研究成果の概要(英文)：The goal of our research is developing the efficient method to observe and control spatio-temporal distributions of physical quantities. In order to realize the object, we have proposed a multidimensional delta-sigma modulation to the signal processing of the sensor and actuator arrays.

As a result of the research, we have presented a design method to implement stable high-order multidimensional delta-sigma modulation. We expect the technique will expand the application area where simultaneous observations or controls are needed for temporal and spatial distributed physical quantities such as vibration, sound and radio waves, etc.

研究分野：計測工学，信号処理

キーワード：多点同時観測 デルタシグマ変調 多次元信号処理 アレイ信号処理

1. 研究開始当初の背景

(1)微細加工技術により、センサ/アクチュエータ素子を多数配置したアレイ素子が実現できるようになった。一方、多数のセンサを広い空間に分散させたセンサネットワークが注目されている。これらのシステムを、空間的な拡がりを持ち時間変化する物理量の多点同時的な観測や制御に利用する場合、素子数だけの並列動作する回路が必要となるため、個々の回路の低コスト化が応用範囲の拡大に欠かせない。

(2)音響センサアレイの信号処理：申請者らは2次元アレイを用いる3次元画像計測システムなどの開発を進め、アレイ素子を2値信号で駆動する方式と変調の応用を検討してきた。また、サブハーモニックイメージングや L-band ESR-CT システム など、時空間で変動する情報を扱う研究を行った。

多次元変調：アクチュエータアレイを多次元変調で得られた2値信号で駆動する方式を提案し、精度を必要としないスイッチ回路による低いサンプリング周波数の動作で、高い精度の時空間パターンを発生できることを示した。

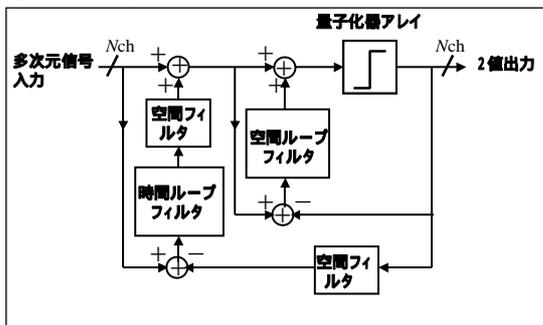


図1 多次元変調器の構成例

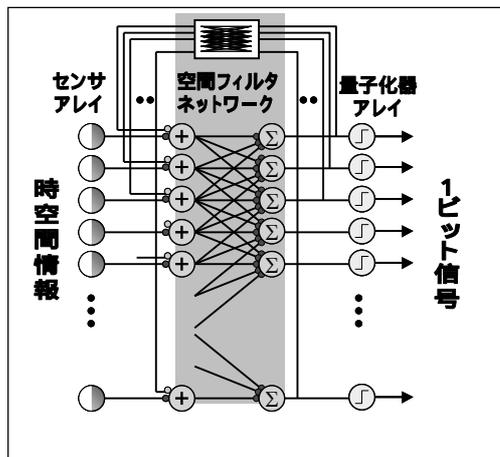


図2 多次元変調による符号化

空間フィルタ挿入型の多次元変調：変調は、フィードバックループ内に挿入する時間領域フィルタの次数（積分器の個数）が高いほど量子化雑音のレベルを低下できるが、高次数化は不安定動作につながるという問題があった。申請者らは、ループ内に空間フィルタを挿入することで、高次数化して

も安定動作する多次元変調（図1）が可能なることを見出した。これらの成果を、様々な時空間情報の観測と制御に利用するためには、素子のランダムな配置への対応と、空間フィルタの実装方式が安定性に与える影響を明らかにし、動作周波数、回路規模、SN比などを実験的に検証する必要がある。

変調はオーディオ帯域で実用化が進み、高次数化の設計手法も確立している。しかし、時間と空間の両次元を含む多次元変調の報告は申請者らの研究が最初であり、高次数化の手法の確立も今後の課題である。海外では、申請者らの報告を参照した Scholnik らが2次元変調によるアンテナアレイの駆動方式を提案している。彼らの研究は2次元変調のループ内量子化にベクトル量子化を用い、ハードウェアのばらつきも補正する点が興味深い。一方、変調はセンサネットワークのような、ランダムに配置された素子への適用は検討されていない。

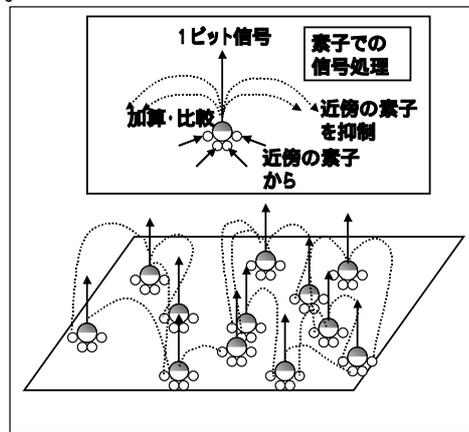


図3 ランダム配置の場合の構成例

2. 研究の目的

(1)空間的な拡がりを持ち時間的に変化する物理量の、多点同時的な観測と制御を効率的に実行するためのセンサおよびアクチュエータの信号処理に、多次元変調の技術を応用する。安定に動作する高次数の多次元

変調の設計手法とハードウェアの実装方式を確立し、振動、音響、電磁波など、多点同時的な観測と制御が必要な分野でのセンシングとアクチュエーションのシステムの応用範囲を拡大する。

(2)具体的な目標は、以下の～とする。

安定な多次元変調器（図2）の設計手法を確立する。空間5次元・時間5次元までの2次元変調が安定動作する条件を明らかにする。さらに、ランダム配置素子の多次元変調（図3）について、素子位置の計測精度と回路精度の影響を数値計算により評価する。

実装方式を検討する。変調ループに装入する空間フィルタを設計し、間引きによる部品点数の削減と素子精度の影響を見積もる。

設計した多次元 変調器を物理量の符号化に応用し、SN 比を評価する。

### 3. 研究の方法

安定動作する高次多次元 変調の構成手法については見通しを得ていた。そこで、平成 24 年度に基本的な開発環境を整備し、シミュレーションにより最適な構成とパラメータを求める。並行してハードウェアの設計を行う。平成 25 年度以降は変調システムとセンサ/アクチュエータアレイを実装する。本研究では、時空間で変動する実証用の信号として 数 kHz までの振動/音響信号を扱う。FPGA を搭載した評価ボードに演算ハードウェアを実装し、スピーカアレイと接続してシステムを構築する。シミュレーションと実測により、SN 比の評価を行う。

### 4. 研究成果

(1)平成 24 年度：多次元 変調の理論的整備と演算方式の検討を行った。

多次元 変調の理論的整備：空間フィルタ挿入型の多次元 変調について、時空間のサンプリング間隔、信号の周波数帯域・振幅が量子化の精度と安定性に与える影響をシミュレーションにより評価した(田村)。

演算ハードウェアの設計：演算のハードウェア化について検討した(多田, 田村)。最終的な目標とするハードウェアは、64 チャンネルまでの信号を処理するものとし、ハードウェア記述言語および MATLAB/Simulink により動作の検証を行った。実装は FPGA を搭載した評価ボードを用い、64 個のアクチュエータ素子に対して安定に動作する 2 次元 変調を実装できることを確認した。

回路素子数と精度が SN 比に与える影響をシミュレーションにより評価してアナログ空間フィルタを設計した。また、回路シミュレーションソフトウェア SPICE 用のネットリストを生成する C 言語による開発用ツールを作成した。

システムの評価：64 チャンネルまでのアレイ用の設計データを FPGA 評価ボードに実装し、ハードウェアで生成した多チャンネル信号データを用いて多次元 変調器の動作検証を行った(柳田, 多田)。

ランダムアレイ用 2 次元 変調：図 4 にランダム配置アレイ用の空間フィルタ挿入型 2 次元 変調器を用いて発生した音場の 1 点での周波数スペクトルを示す。1 次元上にノードを不等間隔に配置したランダムアレイにおいて、ノードの個数および空間的加算個数を変更してシミュレーションを行った(図 5, 6)。ノード間の信号の空間データの補間には 3 次のスプライン補間を用いた。

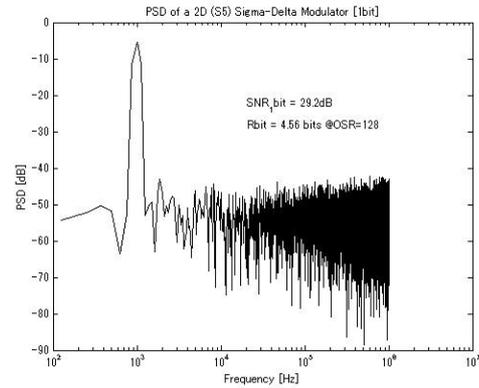


図 4 ノード個数および空間的加算個数と SN 比の関係(オーバーサンプリング比: 16)

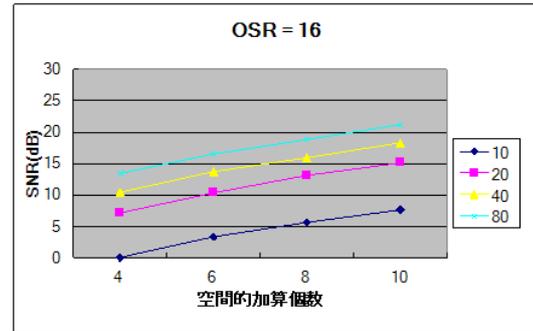


図 5 ノード個数および空間的加算個数と SN 比の関係(オーバーサンプリング比: 16)

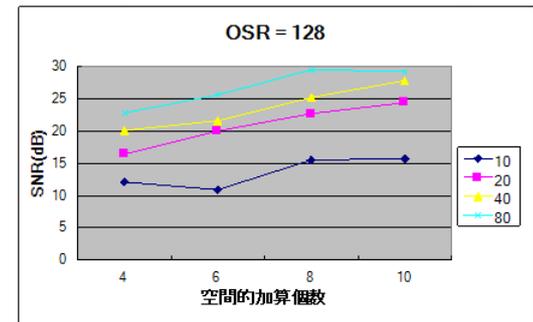


図 6 ノード個数および空間的加算個数と SN 比の関係(オーバーサンプリング比: 128)

(2)平成 25 年度：多次元 変調の演算ハードウェアの実装方式と規模の拡大の検討を行った。

演算ハードウェアの実装方式の検討：ハードウェアの FPGA への実装方式として、ハードウェア・ソフトウェア協調設計の考えを取り入れて、C 言語により記述したアルゴリズムを HDL に変換することを検討した。HDL の生成には、C 言語記述によりハードウェアを設計する開発ツール群である Impulse C/CoDeveloper を用いた。積和演算を多用する演算回路を FPGA ボード上に実装し高速動作することを確認した(多田, 田村)。

規模の拡大の検討：空間チャンネル数とフィルタ次数を拡大する場合の回路規模を、シミュレーションにより見積もった(田村, 柳田)。チャンネル数の異なる時間 2 次元 2 次元の変調システムについて、チャンネル数

と、素子間隔，動作周波数を数値シミュレーションにより調べ，信号の空間周波数帯域と変調の安定性との関連を明らかにした（柳田，田村）。

#### 位置決め精度による影響の比較

想定したランダムアレイシステムではノードの位置をセンサによって取得することを考えている。センサによって得られた位置座標に誤差がある状態で時空間変調を行った場合の SN 比の変化を検討する。精度誤差に応じた位置座標で時空間変調を行った場合と、正確な位置座標で時空間変調を行った場合の SN 比の変化を表 1 と 2 に示す。精度誤差はフルスケールをスピーカアレイの設置範囲（今回は 3.0m）とし、x、z 軸それぞれの方向のみに誤差がある場合を比較した。

各ノードの真の位置と位置センサで得られた位置のずれをランダムに定めて焦点位置で得られる信号の SN 比を求める計算を複数回行い、SN 比の変化の平均値を算出した。

表 1: 位置決め精度(x)による影響

精度誤差(%)	SN 比の変化(dB)
10	-5.93
5	-3.61
1	-0.41
0.1	-0.09

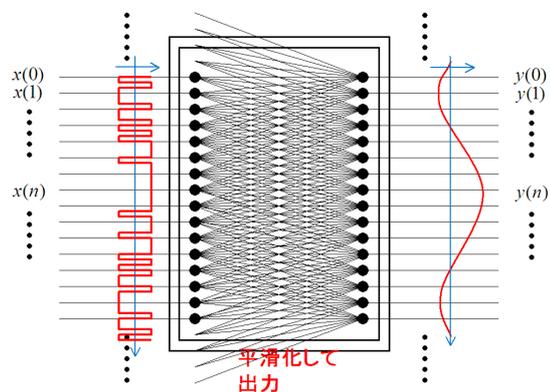
表 2: 位置決め精度(z)による影響

精度誤差(%)	SN 比の変化(dB)
10	-11.60
5	-5.23
1	-0.61
0.1	-0.09

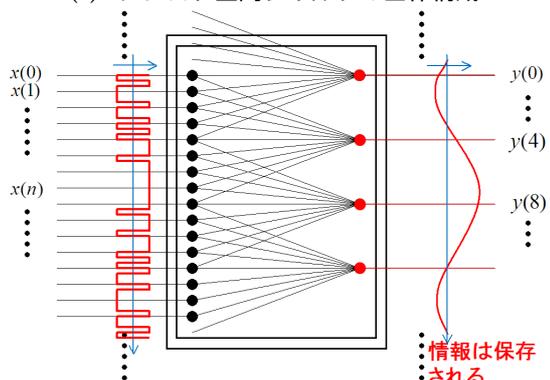
それぞれの場合に対して、精度誤差が少ないほど SN 比の低下が小さくなり影響が少なくなった。精度誤差 1% 以下ではほとんど SN 比は低下しなかった。z 軸方向への誤差は、誤差が大きくなるほど x 軸方向の誤差に比べて SN 比の低下が大きくなった。したがって z 軸方向の誤差が SN 比の低下に大きく影響すると考えられる。

#### アナログ空間フィルタの実装

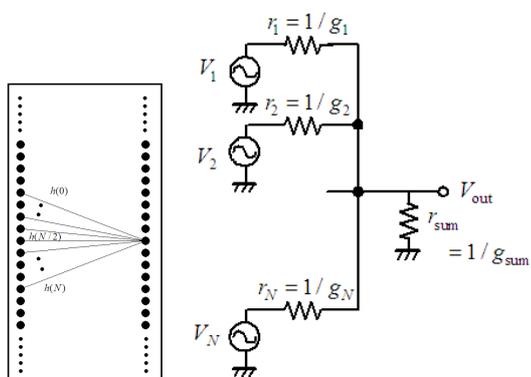
24 年度に開発した回路シミュレータ用ネットリスト自動生成ソフトウェアを使い，設計したアナログ空間フィルタ（図 7）のシミュレーションを行った。その結果，抵抗ネットワークによるアナログ空間フィルタが予想とおり働くことを確認した。また，出力 1 チャンネル分の回路を試作した。



(a). アナログ空間フィルタの全体構成



(b). 間引きの原理



1 出力に対する重み係数と抵抗ネットワーク

図 7 アナログ空間フィルタ

集束点での観測波形とその周波数スペクトルをそれぞれ図 8，図 9 に，SN 比の算出結果を表 3 に示す。シミュレーションの結果，同じ 64 チャンネル出力でも，入力チャンネル数が多い時ほど SN 比が良くなることが確認できた。

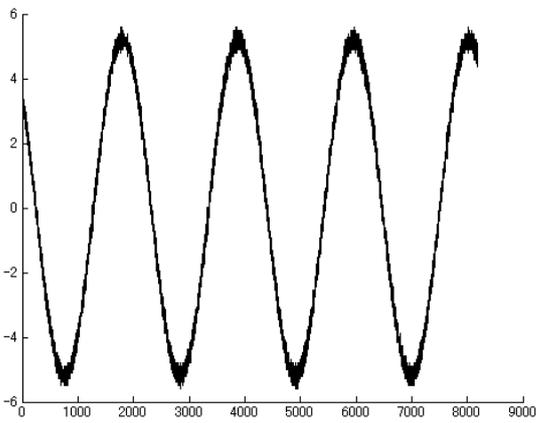


図 8 入力 512ch , 出力 64ch での観測波形

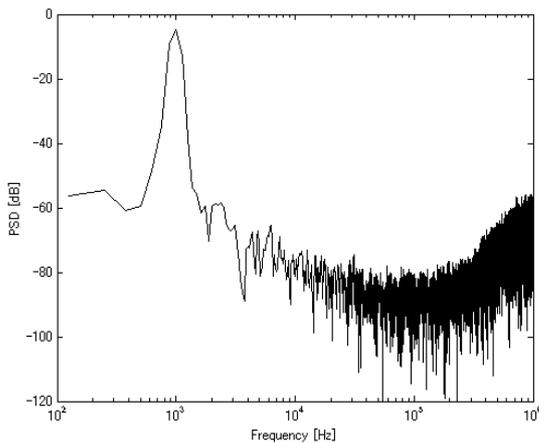


図 9 図 8 の波形の周波数スペクトル

表 3 各入力 ch 数, 周波数における 64ch 出力時の SN 比

		入力 ch [個]			
		64	128	256	512
周波数	1.0	4.0	10.1	14.6	16.7
	2.5	6.4	7.2	11.3	11.7
[kHz]	4.0	1.9	5.1	7.8	7.8

#### 空間周波数による安定性の検証

集束点移動のシミュレーションにおいて所望の指向性を得られなかった場合を含む入力信号 2.5kHz について、シミュレーション結果より得られた空間的な波形から空間周波数を求めて検証を行った。求めた空間周波数を表 4 に示す。所望の指向性を得られなかった入力 64 チャンネルでの  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、および入力 128 チャンネルでの  $20^\circ$  における空間周波数の値に注目すると、所望の指向性を得られた場合に比べ値が増大していることが分かる。この結果から、指定した集束点で指向性を得るためには、空間周波数をある一定値以下にしなければならないと考えられる。

表 4.求めた空間周波数

		入力 ch [個]			
		64	128	256	512
角度 [°]	10	0.065	0.025	0.017	0.007
	20	0.1	0.063	0.02	0.01

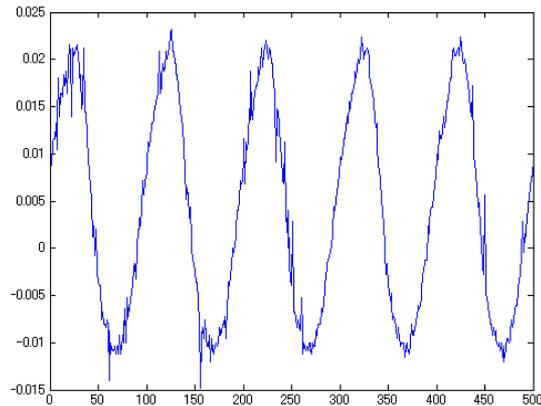


図 10 アナログ空間フィルタの出力波形

(3)平成 26 年度：多次元 変調の理論的整備と演算方式の検討（平成 24 年度）、演算ハードウェアの実装方式と規模の拡大の検討（平成 25 年度）に引き続き、実測による評価を行った。

アナログ空間フィルタの実装：24 年度に開発したネットリスト自動生成ソフトウェアにより設計し、25 年度にシミュレーションで動作確認と試作を行ったアナログ空間フィルタを、プリント基板上に実装した。プリント基板は、基板設計ソフトにより開発し、外注により作製した。

実測による評価：今回は、ランダム配置のアクチュエータ素子ではなく、既存の円周上に小型スピーカ 64 個を配置したサーキュラ・スピーカアレイを対象に、システムを構成した。2次元時空間デルタシグマ変調の信号処理を実行する演算システムを VHDL により記述し、設計データを Xilinx 社製 FPGA にダウンロードして実装した。デジタルオーディオインタフェースにより正弦波信号を演算システムに入力し、収束音場を発生するように制御した空間並列な 1 ビット信号に変換した。この信号を増幅回路を介して、アナログ空間フィルタに入力した。

図 10 は、アナログ空間フィルタの 1 つのチャンネルの出力波形である。時間領域のフィルタを使わない、空間的な処理のみで、量子化雑音が低減されていることが確認できた。

設計データ，ソフトウェアの整理：信号処理アルゴリズムの開発に用いた MATLAB コード，多次元デルタシグマ変調の演算ハードウェアを設計するための VHDL コード および，これらのコードを処理するための開発用ソフトウェアを，公開し広く利用するための環境の整備に着手した。

以上の研究成果により，アナログ空間フィルタの挿入による多次元デルタシグマ変調の安定性の向上が確認できた。また，開発したシミュレータは，改良することで精度の向上や高速動作時の特性解析に利用できる。多次元データを効率よく 1 ビット信号群に変換する手法は，多数の素子を広範囲に配置した計測・監視システムへの応用が期待できる。

## 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6件)

綿引駿，田村安孝，柳田裕隆：スピーカアレイを用いた屋内測位システム，情報処理学会，東北支部研究会(2015年3月4日，山形大学工学部(山形県米沢市))  
大友雄貴，田村安孝，柳田裕隆：2次元

変調を用いたアレイスピーカ駆動システム，電子情報通信学会 総合大会 情報・システム講演(2014年3月18日，新潟大学(新潟県新潟市))

小池祐太郎，田村安孝，柳田裕隆：空間選択性を持たせたノイズキャンセルシステム，情報処理学会第76回全国大会(2014年3月13日，東京電機大学(東京都足立区))

和田裕人，田村安孝，柳田裕隆：FPGAを用いた高速3次元超音波撮像演算，情報処理学会第76回全国大会(2014年3月12日，東京電機大学(東京都足立区))

河村尚典，田村安孝，柳田裕隆：音響アレイによる屋内測位システム，情報処理学会第76回全国大会(2014年3月12日，東京電機大学(東京都足立区))

斎藤涼，田村安孝，柳田裕隆：サーキュラアレイスピーカによる指向性制御システムの開発，情報処理学会，東北支部研究会(2013年3月11日，山形大学工学部(山形県米沢市))

[その他]

ホームページ等

<http://tamlab.yz.yamagata-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

田村 安孝 (TAMURA, Yasutaka)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40171904

(2)研究分担者

多田 十兵衛 (TADA, Jubei)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：30361273

柳田 裕隆 (YANAGIDA, Hirotaka)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80323179