

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：33803

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K12732

研究課題名(和文) 乗算出力と多入力型 変調器を用いた超多チャンネル駆動法による音波面の再生

研究課題名(英文) Reproduction of sound wavefront by super multi-channel driving method using multiplication outputs and multiple inputs delta-sigma modulator

研究代表者

武岡 成人 (Takeoka, Shigeto)

静岡理工科大学・理工学部・准教授

研究者番号：30514468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：自らが提案している多入力型 変調器(MIDS)を用いた新しい超多チャンネル駆動法について研究を行った。提案法は、端子間電圧の積に比例した出力を行うトランスデューサと組み合わせることで、共通の配線で多チャンネルを制御するマトリクス駆動方式を、個別制御でありながらパッシブかつ時分割を用いることなく実現することができる。本プロジェクト期間内では理論を構築するとともに、制御線40本の400chのパッシブスピーカアレイを試作し提案法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における提案法により、受動素子のみ、かつ走査を用いることなく、スピーカアレイをマトリクス駆動する手法が理論・試作実験から示された。本法を用いることで、個別にICを設置することなく2N本の配線でN×N点のスピーカを個別駆動することが可能となる。これまで過大な制御点数から不可能とされてきた“音を1点ではなく波面として制御”する手法の確立に向けて、特にハードウェア上でのブレイクスルーが期待できる結果となった。

研究成果の概要(英文)：We researched a new multi-channel drive method using the multi-input delta-sigma modulator (MIDS) that we proposed. The proposed method realizes a matrix drive method that controls multiple channels with common wiring by combining it with a transducer that outputs in proportion to the product of the voltage between terminals, while being individual control but passive and without using time division. In this project, the theory was constructed and a 400ch passive speaker array with 40 control lines was prototyped.

研究分野：音響工学

キーワード：多入力型 変調器 MIDS スピーカアレイ 超多チャンネル信号処理 波面合成

### 1. 研究開始当初の背景

空間上のある1点の音圧ではなく、3次元音場そのものを再生する方法としてホイヘンスの原理に基づく手法が知られている。制御波面上各点の音圧と法線方向の粒子速度を原音場と一致させることにより所望の音場を生成することが可能となるが、厳密な再生には対象となる周波数帯の半波長毎（可聴域全般であれば1cm弱毎）にスピーカを設置する必要があり、このことから“hopeless idea”とされてきた。近年欧州を中心に Berkhout により提案された Wave Field Synthesis に基づく研究や、国内では伊勢らによる境界音場制御に基づく手法など、波面合成法の研究が広く行われている。これらは理論上よく整備されつつある一方で、実装段階では膨大な制御点に変わり10～数100点程度のスピーカで音場を囲んでおり、必然的に上記の条件から帯域あるいは領域が制限されてしまい、再生音場の厳密性を欠くこと（用途が限られる）や、通常のスピーカを多数使うことにより再生装置が大規模化する（一般に普及し難い）ことが課題となっている。一方、CDの伝送容量は700kbps/ch程度に対して近年はGbitオーダの伝送も容易であり、コンピュータ内で3次元音場の数値計算も行われているなど情報量の面では極めて多くの点数を制御する環境が整いつつある。すなわち、前述の「音波面の厳密な再生は不可能」という前提は、そのようなトランスデューサアレイを作成できないことが主要因の一つといえる。

### 2. 研究の目的

研究代表者は、多チャンネルスピーカアレイを対象とした新しい駆動方法として、多入力型  $\Delta\Sigma$  変調器 (MIDS) による駆動信号を用いた手法を提案している。これは、図-1に示すように音響信号の量子化で広く用いられている  $\Delta\Sigma$  変調器に対して、複数の変調器の量子化器を共通とすることで、駆動信号線が共通でありながらも線の組み合わせごとに所望の信号となるよう変調を施すもので、図-2に示すマトリクス駆動方式で個別の制御を行うことができる。

そこで、本研究では空間の標本化を満たす高密度スピーカアレイの実現に向けて、MIDS法を用いた高密度パッシブマトリクス・スピーカアレイ再生法の確立を目的に検討を進めた。提案法は、各素子が入力信号の積に比例した出力をするという条件を必要とするものの、1bit信号で駆動でき、なおかつマトリクス駆動でありながら走査ではないという特徴を有しており、その結果映像デバイスと比較してはるかにハイサンプリングを必要とするスピーカアレイに対して、受動素子のみでマトリクス駆動するシステムの実現が期待される。

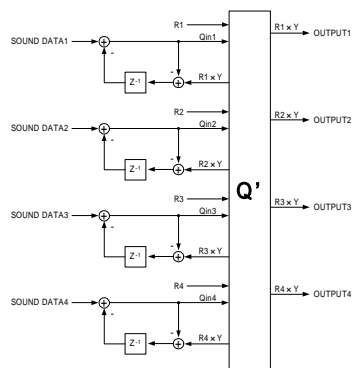


図-1 多入力型  $\Delta\Sigma$  変調器(MIDS)

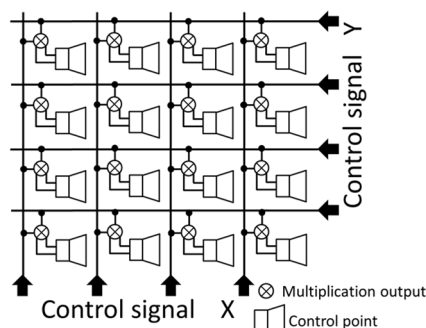


図-2 提案するマトリクス駆動スピーカアレイ

### 3. 研究の方法

本研究は MIDS 変調器という新しい量子化手法がキーテクノロジーとなっており、それらの理論面の構築が重要な検討内容となる。また、提案法はスピーカに特殊な構造を持たせることが特徴となっていることから、それらハードウェア構成の提案を行い、総合的な評価として試作実験を行った。

(1) MIDS 法の基となる  $\Delta\Sigma$  変調においては、ノイズシェーピングの観点からフィードバック次数の高次化と、系の安定性が重要な要素であり、MIDS 法においてもそれらを明らかにすることが実用上求められる。そこで、MIDS 法における高次化を試みるとともに、量子化器入力総エネルギーに着目することで安定性に関する考察を行った。

(2) 本法はトランスデューサが端子間の積に比例した出力を行う必要がある。一方、本研究の位置づけとして実用的な高密度スピーカアレイの実現を目的としていることから、電源やその配線が必要となる乗算用の IC を各素子に設置するのは好ましくない。そこで、MIDS 変調器が 1bit 量子化を可能である点に着目し、動電型スピーカとダイオードを組み合わせることで受動素子のみで乗算出力を行う構造について提案した。またそれらの試作実験として、フレキシブル基板上に構成した  $20 \times 20$  の 400ch スピーカアレイを MIDS 変調器による信号で駆動し、波面が生成される様子を確認した。

(3) 素子を加えることなく、電極と素材のみで所望の特性を得る挑戦的な手法としてサーモホンに着目し、再生原理自体に乗算出力を持たせる手法について基礎実験から有効性を確認した。

#### 4. 研究成果

##### (1) MIDS 変調器の理論面での検討

提案手法のキーテクノロジーである MIDS 変調器について、雑音伝達関数と駆動点数の関係および系の安定性を中心に理論計算とシミュレーションを行った。

##### 変調器の雑音伝達関数(NTF)

MIDS 変調器は  $\Delta\Sigma$  変調器の量子化器を共通としたもので、個々のチャンネルを見ればフィードバック系自体は通常の  $\Delta\Sigma$  変調器と同様であるが、チャンネル単位から見れば多チャンネル化するほど量子化ノイズは量子化器入力に対して無相関化していく。したがって 1bit 量子化器を前提とした場合、通常量子化雑音は-1~1 間の一様分布を仮定するが、本法では量子化器入力と出力の符号が反転する可能性もあることから量子化雑音電力は従来法と比較して増加するはずである。また後述するように駆動チャンネル数に反比例してチャンネル単位の量子化器入力は減少することから、量子化器で発生するチャンネル単位の量子化雑音エネルギーは通常の 1/3 ではなく 1 に収束していくことが予想される。それらの仮定を元にシミュレーションを行った結果、ある程度の駆動点数と入力信号振幅の条件下においては通常の  $\Delta\Sigma$  変調の NTF から上記に基づく補正を行うことで、よく一致したノイズシェーピング特性が確認された。

##### 変調器の高次化について

$\Delta\Sigma$  変調器の利点であるノイズシェーピングの高次化について MIDS 変調器への導入を試みた。シミュレーションの結果、1 次変調器では常に安定動作するが量子化雑音は特性を持つこと、通常の  $\Delta\Sigma$  変調器と異なり安定動作には 2 次変調器以上でループフィルタの極シフトを要するという違いはあるものの、高次の変調器では量子化雑音は概ね一様乱数とみなせ、ノイズシェーピング効果を確認することができた。

##### 安定性と入力範囲

通常の  $\Delta\Sigma$  変調器においては、Lee の基準と呼ばれる NTF の無限大ノルムの値で概ね安定範囲が判別されることが知られている。しかしながら MIDS 変調器においては 1 つの量子化器に複数の入力がなされることから、入力信号のレベルをそのままに駆動チャンネル数を増加させた場合、明らかにチャンネル数の増加に対して量子化器出力(-1,1)が過負荷になることが予想される。そこで量子化器入力の総エネルギーに着目し、変調器の次数・入力レベルに応じた発振限界をシミュレーションにより確認した。その結果、変調器の安定動作範囲は量子化器入力の実効値に対して駆動点数の指数に比例する傾向があることがわかり、また変調器次数に応じて比例定数が変わる傾向が示された。

##### (2)提案法に関する実装系の検討及び試作実験

提案法はスピーカが端子間の乗算結果に比例した出力を行うと仮定することにより、通常では困難な共通の駆動線での個別制御を実現している。そこでそれらトランスデューサ系の実装手法に関して提案・試作実験を行った。

##### ダイオードを用いた ex-or 構造による 1bit 乗算機構

一般に広く用いられている動電型スピーカは、特に近年ネオジウム磁石と組み合わせることで小型高出力化が可能となっている。そこで動電型スピーカを想定し、乗算機構を付加する手法として受動素子であるダイオードによる手法を検討した。MIDS 変調器は  $\Delta\Sigma$  変調器と同様に 1bit 信号に量子化することが可能である。信号が 1bit であるとなれば、乗算は ex-or の関係性となることから図 - 3 に示すようなダイオードブリッジを前段に接続することで 1bit 乗算器を構成することができるはずである。これら構造に MIDS 変調器による信号を入力する基礎実験により所望のスペクトラムが出力されていることを確認した。

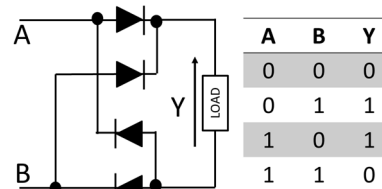


図 - 3 ダイオード用いた 1bit 乗算

##### 試作実験

提案法について試作実験を行った。フレキシブル基板を振動膜とし、基板上のプリントパターンでボイスコイルを形成した。ネオジウム磁石と組み合わせることで動電型スピーカを構成している。格子状に配置した共通の駆動線の接点にダイオードブリッジを設置し、検討した乗算機構としている。試作したスピーカアレイ外観を図 - 4 に示す。制御線は縦方向 20 本、横方向 20 本とし、1cm 四方の間隔で 20×20 の 400ch のスピーカアレイを構成している。これらに対

して(a)同相信号, (b)同心円状の波面(c)市松模様状の波面を入力した際の出力波面を測定した結果を図 - 5 に示す。20cm 四方の範囲ではあるが 1cm 間隔で任意の音波面が合成できている様子, すなわち提案法の方法である駆動線の二乗の点数を個別制御できている様子がわかる。

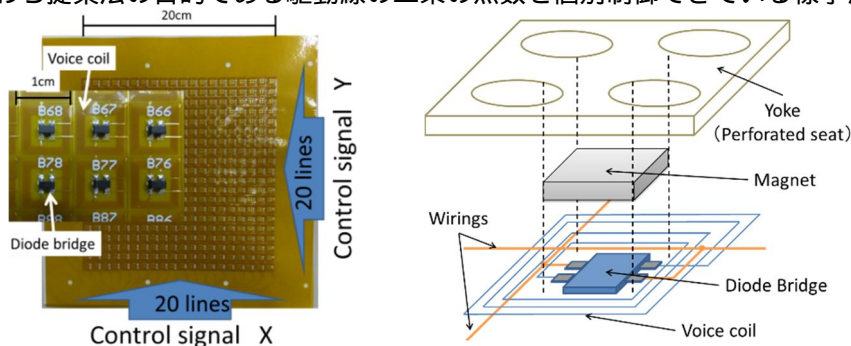


図 - 4 試作したスピーカアレイ外観および基本構造

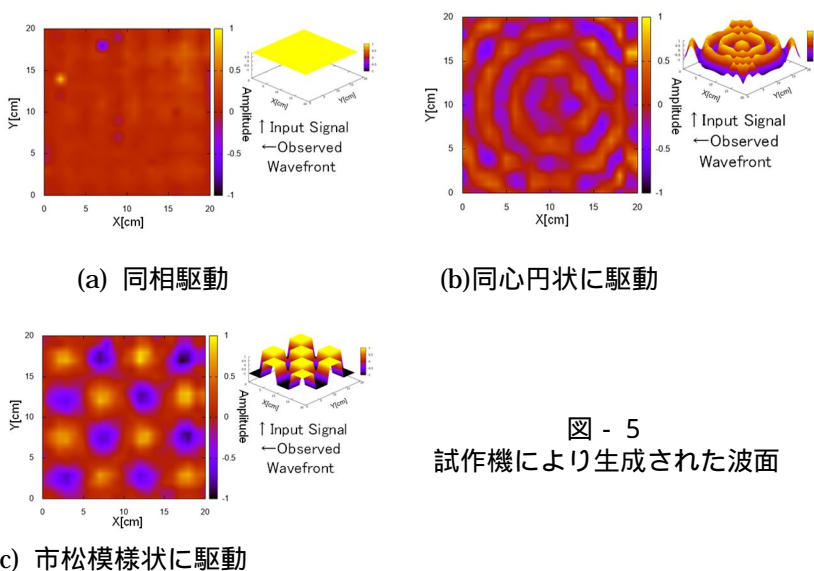


図 - 5 試作機により生成された波面

### (3)サーモホンをういた応用

前項のダイオードを付加する手法は受動素子のみで高出力なダイナミックスピーカアレイを駆動可能であるという利点がある一方で, 駆動点毎にダイオード素子を設置する必要があった。そこで再生原理の異なるトランスデューサに着目し, 素子を付加することなく乗算出力を行うスピーカシステムについて検討した。

電熱現象を応用したスピーカとしてサーモホンが知られている。気体が熱せられると膨張することを利用するものであるが, 温度変化に応じて二乗波を非線形出力することから, 一般的なスピーカとしては実用されていないのが現状である。一方提案法が 1bit 信号で駆動することを考慮すれば, (1,-1)の二値信号同士の乗算は差分の二乗波と相似の関係にあることがわかる。そこで, 近年極めて高い熱伝導率で注目されているカーボンナノチューブでサーモホンを試作し, MIDS 変調信号による駆動を試みた。スピーカ外観と, 1kHz 純音を変調した MIDS 信号による駆動時のスペクトラムを図 - 6 に示す。図 - 6 右図の点線は変調前の信号を直接入力した場合の結果であり, 二乗歪により本来の周波数の倍音が出力されている一方で, 実線で表した提案法では所望のスペクトラムが再生されている様子がわかる。

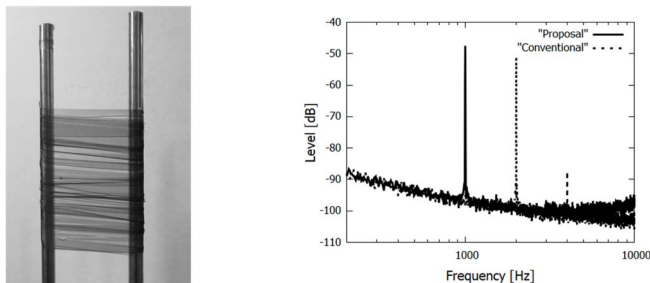


図 - 6 カーボンナノチューブを用いたサーモホン外観および得られたスペクトラム

### (4)総括

本研究では, 提案する MIDS 変調器と乗算出力を用いた多チャンネルスピーカ駆動法につい

て、変調方式の安定性を中心に考察を勧めるとともに、スピーカ構造を含む試作実験により有効性を明らかにした。

本研究により高密度スピーカアレイに対して走査を用いずにパッシブマトリクス駆動する手法が示されたことから、これまで膨大な制御点から不可能とされてきた、空間の標本化定理を満たす音波面再生を実用的な規模で実現する手法への可能性が示された。ダイオードは近年プリント技術の研究・開発が進んでおり、本手法を応用することで将来的にはプリント構造のみで高密度スピーカアレイを期待することができ、またサーモホンを用いた実験による知見は、サーモホンに限らず二乗歪を動作原理とするアクチュエータを応用することで格子状電極と素材のみで構成された個別アレイ制御を実現する可能性を示しており、音響に限らず様々な分野での応用が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 武岡 成人、大内 康裕、山崎 芳男	4. 巻 73
2. 論文標題 音響信号のデータ変換と量子化雑音	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 585 ~ 591
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20697/jasj.73.9_585	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shigeto Takeoka
2. 発表標題 Relationship between Drive Signal and Stability in MIDS Modulator
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藺部健，武岡成人
2. 発表標題 多入力型 変調を用いた高密度動電型乗算出力スピーカアレイによる波面の生成
3. 学会等名 電子情報通信学会 応用音響研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藺部健，武岡成人
2. 発表標題 多入力型 変調を用いた超多チャンネルスピーカ(2) ~ 高密度400ch動電型乗算出力スピーカアレイによる波面の生成 ~
3. 学会等名 日本音響学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigeto Takeoka
2. 発表標題 Matrix Driving Method for Multichannel Loudspeaker using Multiplication-output and Delta-sigma Modulator with Multiple inputs
3. 学会等名 電子情報通信学会 応用音響研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 園部健, 武岡成人
2. 発表標題 多入力型 変調を用いた超多チャンネルスピーカ(1) ~乗算出力スピーカアレイによる全面マトリクス駆動の検討~
3. 学会等名 日本音響学会2017年秋季研究発表会
4. 発表年 2017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
---------	---------