

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12026

研究課題名（和文）拡張された標本化定理に基づく音空間情報センシングに関する研究

研究課題名（英文）Study on sound space sensing based on an extended spatial sampling theorem

研究代表者

島内 末廣（Shimauchi, Suehiro）

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：30828702

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：音波の到来方向などの空間情報を精度高く獲得するためには、複数のセンサ（マイクロホン）を密に配置することが要求されるが、このことにより、ユーザの視界を遮ったり、他のデバイスと干渉するなど、適用域が著しく限定される問題がある。

本研究では、従来のようにセンサを等間隔に配置するのではなく、局所的に集約したサブアレイを疎らに配置したときの獲得情報の性質を定式化し、実効的な素子間隔の拡大を目指した。シミュレーション実験により、実効素子間隔の拡大が可能となることを確認するとともに、実測実験により、素子の数が有限個に限られることや、個々の素子感度の違いなどが性能に与える影響を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音波の到来方向などの空間情報を精度高く獲得することは、騒音環境下で注目する音声の情報を抽出したり、周囲の状況の変化や危険を音で検知する上で重要である。しかしながら、このような情報を獲得するためには、多数のマイクロホンを密に配置したアレイシステムを構築する必要があり、例えば、自動車の運転中に視界を遮る要因となったり、ビデオ会議システムにおいて、モニタ画面などと配置上干渉してしまう問題が生じる。本研究では、このような問題を克服するために、実効的なマイクロホン素子間隔を広げ、空間的な干渉の低減を図ることを目的とした新たなセンサアレイ方式を検証した。

研究成果の概要（英文）：Densely arranged microphone sensor array can accurately acquire acoustical spatial information such as direction of sound sources. However, the dense arrangement may block the view of users, or may spatially interfere with other devices in some applications.

In this study, we formulated the behavior of a sensor system composed of sparsely arranged sub-array units. We confirmed that sub-array units can be spaced wider than the uniformly arranged sensors of the ordinally microphone array in simulation experiments. We also evaluated effects of the limited sensor number or of the difference in sensitivity of each sensor in real measurements.

研究分野：音響信号処理

キーワード：音空間情報センシング センサアレイ 空間標本化定理

1. 研究開始当初の背景

音空間情報センシングにおいて、センサ群全体が形作るアレイ形状と、その形状を構成する各センサ同志の素子間隔の選定が、目標性能を達成する上で重要となる。アレイ形状には、音場を平面波の重ね合わせで表すモデルと整合性の高い直線や平面状の構成や音場を球面調関数の重ね合わせで表すモデルと整合性の高い球面状の構成などの例がある。センサの素子間隔については、染谷・シャノンの標本化定理を音場のサンプリングに適用した空間標本化定理に基づき、対象とする音波の波長の 1/2 以下の間隔で配置する必要がある。例えば、音声の主要成分が含まれる 7kHz までの帯域の音波を対象とする場合、音速が 340m/s とすると、約 2.4cm 以下の密な素子間隔が要求される。空間標本化定理が満足されない波長に相当する周波数帯域の音波に対しては、空間エイリアシングと呼ばれる空間的な折り返し成分が歪として現れ、空間情報の分析に悪影響を及ぼす。しかしながら、実際には、実装上の制約により、密に空間を覆うセンサ配置が困難となる場合も多い。例えば、自動車内において、センサがユーザ（運転者）の視界を遮らないことが要求されたり、ビデオ会議システムにおいて、映像パネルなどとの配置上の干渉が問題となるようなことがある。

このような観点から、一様に密に空間を覆うセンサ配置の代わりに、一部に集約された小型のセンサアレイ（サブアレイ）を疎らに点在させる構成を取ることで実効的な素子間隔の自由度を高めようとする取り組みも見られる。しかしながら、サブアレイを点在させる構成と空間標本化定理との関係はこれまで明らかにされておらず、このような構成のセンサアレイを個々の要件に応じて実装するための設計指針や性能限界を議論するための道具立てが十分に整っていない。

2. 研究の目的

本研究では、空間標本化定理を満足させながらセンサ素子間隔を実効的に拡大させるための第 1 ステップとして、図 1 に示すように、局所的に密に集約されたサブアレイを疎らに点在配置したセンサアレイ（以下、点在型サブアレイ）に着目する。そして、以下の 3 点を研究の目的とする。

- (1) 点在型サブアレイの設計指針の確立
- (2) 点在型サブアレイ出力から音圧分布を再構成する信号処理方式の確立
- (3) 実環境におけるアレイ設計指針と信号処理方式の有効性の検証

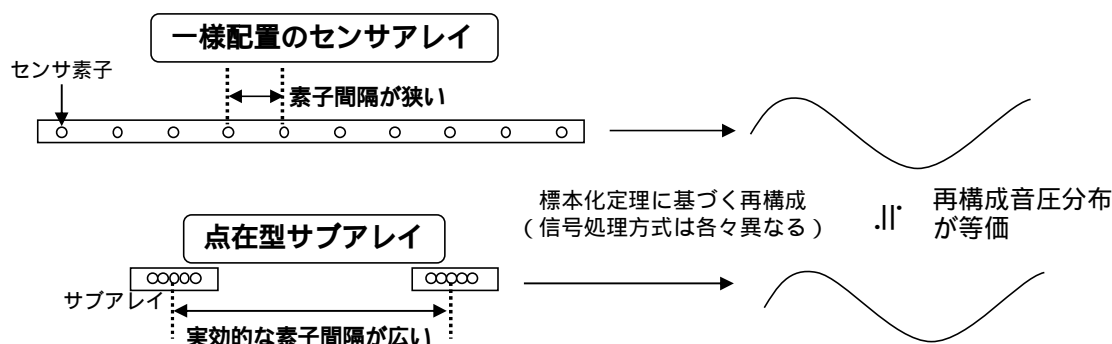


図 1. 従来型の一様配置のセンサアレイと本研究が対象とする点在型サブアレイの例

3. 研究の方法

- (1) 点在型サブアレイの設計指針の確立に向けた取り組み

点在型サブアレイの性質を、音圧およびその空間導関数の観測値を用いて拡張された空間標本化定理に基づき解釈する。このとき、音圧のみを観測する場合と比べ、1 次の空間導関数も観測すると実効的な素子間隔は 2 倍となり、一般に R 次までの空間導関数を観測すると R + 1 倍の間隔の伸長が期待できる。(Linden らにより拡張された標本化定理を音場の空間標本化へ適用する)

本研究が想定する場面においては、空間導関数は直接観測できないため、各サブアレイ内の素子毎の音圧観測値の差分情報が空間導関数の近似値に相当するものと解釈する。当然ながら、サブアレイ内の素子間の距離に応じて、導関数近似値と本来の導関数観測値との間に誤差が生じるから、サブアレイによる導関数近似精度が、伸長可能なサブアレイ間隔(実効的な素子間隔)に与える影響を明らかにし、点在型サブアレイの設計指針を具体化する。

- (2) 点在型サブアレイ出力から音圧分布を再構成する信号処理方式の確立に向けた取り組み
上記の拡張された空間標本化定理に基づき、サブアレイ間の連続的な音圧分布を補間し再

構成する信号処理方式を導出する。数値シミュレーションにより、一様配置されたセンサアレイ出力から再構成される音圧分布と、点在型サブアレイ出力に当該方式を適用して再構成された音圧分布とを比較し、従来方式と当該方式との性能の差異を明らかにする。

(3) 実環境におけるアレイ設計指針と信号処理方式の有効性の検証

(1) において具体化される設計指針に基づき、点在型サブアレイシステムを構築する。素子毎の特性のばらつき、配置の精度、素子やサブアレイの数が有限個に限られることなど、実環境において生じうる実装上の様々な影響を含めた性能を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 点在型サブアレイの設計指針の確立に向けた成果

Lindenらにより拡張された標本化定理を、音場の空間標本化へ応用することにより、点在型サブアレイのセンシングの原理を定式化した。これは、従来の空間標本化定理と多点の観測点におけるテイラー展開とを融合させたことに相当する。まず、理想的な条件として、無限長のアレイにおいて、空間導関数を直接観測可能な場合における性能をシミュレーションにより評価した。その結果、観測する空間導関数の次数 R に対し、実効的な素子間隔を従来の空間標本化定理により規定される間隔の $R+1$ 倍に拡大しても音場情報の再現が可能であることを確認した。また、空間導関数を直接観測する代わりにサブアレイ内の素子から得られる音圧の差分値を所望の空間導関数標本値の近似値として用いた場合の音場情報の再現精度をシミュレーションにより評価し、例えば、サブアレイ内の素子間隔を 5mm とした場合、-40dB 程度の誤差のもとで音場情報の再現が可能となることを確認した。

(2) 点在型サブアレイ出力から音圧分布を再構成する信号処理方式の確立に向けた成果

点在型サブアレイの実装を目的として、アレイ長が無限長ではなく、有限個のサブアレイで構成される場合の信号処理方式を導出し、音場再現性能をシミュレーションにより評価した。その結果、点在型サブアレイを 3 組配置する構成においても、サブアレイに挟まれた内部の空間の音場情報であれば、導関数を差分近似した場合においても一定の精度で補間可能であることを確認した。

(3) 実環境におけるアレイ設計指針と信号処理方式の有効性の検証の成果

(1) において具体化される設計指針に基づき、MEMS マイクロホン素子を用いて、5mm 間隔に配置されたサブアレイを試作し、実測データに基づき音場再現性能を評価した。実環境においては、導関数を差分近似することや、有限個のサブアレイで構成されることに加え、素子毎の特性のばらつきがもたらす影響も加味する必要がある。次数 $R=1$ 次の場合においては、個々の素子感度のキャリブレーションすることにより、実環境においても、理論とほぼ矛盾しない音場再現が可能であることを確認した。その一方で、2 次以上の高次の次数 R に対しては、少なくとも今回の実験環境においては、次数を上げていくほど音場再現精度の劣化が目立った。実環境下で生じる精度の劣化の程度については、具体的な応用事例の要件と照らし合せて許容範囲を評価する必要がある。また、素子やアレイなどを新たに設計・製造する際には、性能目標を定める道具立ての 1 つとして本研究に基づくセンシング原理が役立つものと考えられる。

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 鈴木 遼平, 井上 和弥, 大内 翔, 島内 未廣, 青木 茂明
2. 発表標題 2点のテイラー展開に基づくマイクロホンアレイ構成法の検討
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 和弥, 鈴木 遼平, 大内 翔, 島内 未廣, 青木 茂明
2. 発表標題 空間標本化定理の拡張に関する考察
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大内 翔, 井上 和弥, 鈴木 遼平, 島内 未廣, 青木 茂明
2. 発表標題 テイラー展開と融合させた空間標本化定理における空間導関数の差分近似の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 応用音響研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 和弥, 大内 翔, 鈴木 遼平, 島内 未廣, 青木 茂明
2. 発表標題 空間標本化定理と高次のテイラー近似との融合
3. 学会等名 日本音響学会 2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 和弥, 島内 未廣, 青木 茂明
2. 発表標題 空間導関数標準化における微分係数の差分近似の影響
3. 学会等名 日本音響学会 2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 和弥, 宝田 有矢, 中山 篤志, 島内 未廣, 青木 茂明
2. 発表標題 空間導関数サンプリング型マイクロホンアレイの実装評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 応用音響研究会
4. 発表年 2021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
研究 分担者	青木 茂明 (Aoki Shigeaki) (10396161)	金沢工業大学・工学部・教授 (33302)	

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
---------	---------