

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560702

研究課題名(和文) ウェーブレット解析によるノイズに埋もれた信号の分離と位置の特定に関する研究

研究課題名(英文) The blind source separation and specification of location of the source signal embedded in the noise using wavelet transform

研究代表者

佐々木 文夫 (SASAKI, FUMIO)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：80385533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：ブラインド信号源分離の手法を用いて、どの位置から発しているのか不明な、ある一点から発するノイズに埋もれた信号から、ノイズを分離し、かつそのノイズの位置と、信号の位置を特定し、信号を100%完全に抽出する手法の数学的な定式化を行った。

またその定式化に基づいて数値実験を行い、定式化の妥当性を証明した。数値実験の結果、ノイズと分離信号の位置は約10メートル四方の場所を仮定した場合、数センチメートルの誤差で特定でき、また信号とノイズはほぼ完璧に分離されることが判明した。

研究成果の概要(英文)：The blind source separation and specification of location on time-frequency domain considering time lag information were conducted. Especially, mathematical formation of the separation method of the source signal embedded in the noise was presented. The numerical test was conducted to confirm our method, and then the separation and specification of location of the source signal and the noise can be done by high accuracy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：ノイズの分離 位置の特定 ウェーブレット 時間 周波数解析 BSS

1. 研究開始当初の背景

建築音響分野では、騒音対策や室内音場を把握することを目的に測定した観測信号から未知の音源の分離や位置を推定する手法の研究がおこなわれている。しかし、いずれの手法も音源の数が多くなると位置推定精度が低下する問題や、音源信号の分離そのものの精度が極端に悪くなることが知られている。特にノイズが混合している場合にはその影響が顕著に表れる。

2. 研究の目的

本研究では、観測信号に音響障害を引き起こす原因の一つであるノイズが混入している場合において、そのノイズを観測信号から抽出しさらにその位置を特定することで障害の原因を探る一助とする。また、源信号の位置も特定し、ノイズと源信号の分離・位置の特定を完全に行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1)本研究では、まずはじめに時間差のあるいくつかの観測信号に対して、時間周波数領域にウェーブレット変換を用いて展開を行い、2次元平面上で源信号とノイズとの関係を求める。一般に、2次元の時間周波数領域において、一つの観測信号には、それらの信号の独立な領域を持つ可能性は3つのパターンに分かれる。ノイズと源信号が完全に独立な場合、ある程度重なっている場合、完全に包含関係のある場合である。完全に独立な場合と、ある程度重なっている場合に関しては、筆者らがすでに研究を終えており、非常に良好な結果が得られている。そこで本研究では、ノイズが源信号を時間周波数領域において完全に覆っているような、一般的な場合についての数学的な定式化を行う。

(2)数学的な定式化に置いてはアナログ信号(連続体仮説)を念頭に置いて行われるが、現実の信号はデジタル値で得られているため、実際にこの定式化においてコンピュータシミュレーションで解析した際に、実際に本来の解が得られるかどうかは別問題である。そこでシミュレーション解析を行うため、コンピュータコードを作成し、コンピュータ上で本定式化が成立するかを検討する。ただし、最初の検討は、計算時間が相当にかかることが予想されたので、まず模擬的な2秒から3秒程度の音源とノイズに関して検討を行う。そこで、それぞれの位置の特定と分離が可能であることが判明したなら、観測データが100万ステップと長い一般的なデータに関して、検討を行いノイズと源信号の位置の特定が可能であることを示す。

4. 研究成果

主な研究成果は以下の二つである。一つ目は、本研究における連続体としての数学的な定式化に完全に成功した点である。二つ目は、

その定式化に基づいて、離散化されたデータをもとにしても、数値計算で定式化の手法が高精度で、ノイズと源信号の分離ができることが示された点である。

以下にそれぞれについて、簡潔に述べるものとする。なお、完全な証明や、数値計算での結果は雑誌や発表論文に示して、国内における学内外のみならず、海外にも広く知らしめてある。

(1)数学的な定式化は、以下のような手順により行われている。はじめに源信号とノイズを  $s_j$  とし観測点を  $x_k$  とする。また定式化上、以下の関係式が成り立つものと仮定する。ここで信号源のどちらかが、源信号で、一方はノイズと仮定し、源信号はノイズに埋もれているものとする。

$$x_k(t) = \sum_{j=1}^2 a_{kj} s_j(t - c_{kj}) \quad (1 \leq k \leq M)$$

なお、 $a_{kj}$  は実定数の減衰係数とする。

さらに、 $c_{kj}$  は  $(k, j)$  成分での信号源  $s_j$  と観測点  $x_k$  との時間差で実定数である。以下、信号源  $s_j$  を信号源の位置、観測点  $x_k$  を信号源の位置として表記する。

観測信号は4か所以上で観測する必要があるが、逆に4つで特殊な配置以外は十分であり、そのうちの2個を、連続ウェーブレット変換を用いて、時間周波数領域に展開する。

源信号がノイズに覆われているという仮定が前提なので、時間周波数領域において、ノイズのみが発生している領域(独立な領域)を周波数ごとに時間を変化させることで、その領域を探し、かつその時の2個の観測信号の時間差を求める。その時に、観測信号同士のノイズの減衰定数比も同時に得られる。

時間差が、観測信号2つとノイズとの間では、いつも同じであることから双曲線が描ける。その双曲線上にノイズの発生位置が存在する。同様に他の観測信号から得られる双曲線上にも理論的にノイズの位置が存在するはずなので、双曲線同士の交点がノイズの発生位置である。これより、まず、ノイズの発生位置が決定する。ノイズの位置の特定の概念図を以下の図-1に示す。

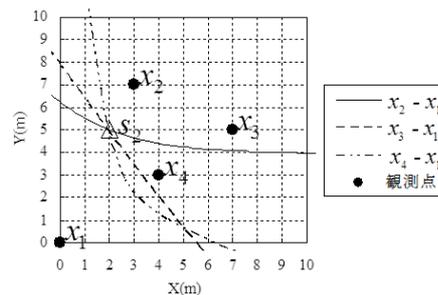


図-1 ノイズ  $s$  の位置の特定の概念図

ノイズの位置と観測信号同士における、ノ

イズに関する減衰定数比が得られたら、数学的な変形を施すことにより、減衰に関する項を消去することで、観測信号と、源信号（源信号には源信号と観測信号との減衰定数、信号間の距離に関する未定項が含まれている）のみの式に置き換える。

これらのうちの2つの信号をフーリエ領域に展開し、割り算することで源信号を消去し、減衰定数比と信号の差だけの式に変形する。その式においてナイキスト振動数、その半分の振動数と変化させ、指数部分の性質を用いることで、源信号の減衰定数比と信号の時間差を求める。

とを繰り返すことで、時間差が少なくとも3つは得られるので、と同様の手法を用いることで、源信号の位置を決定する。

までで、減衰係数  $a_{kj}$  と時間差  $c_{kj}$  がすべて決定したので、未定なものは源信号と、ノイズのみとなる。そこで、フーリエ領域において源信号とノイズを求め、フーリエ逆変換することで源信号とノイズを得ることができる。

数学的定式化を簡潔に述べると以上である。

(2) 数学的定式化上は、分離が可能であっても、数値実験上では精度の問題や離散化による誤差の問題、演算時間の問題などが生じる可能性がある。本研究では、上記の問題に関して、十分な精度で分離と位置の特定ができることを確認した。なお、数学的定式化同様、以下の結果は一例であり、紙面の都合上、簡潔に述べるものとする。

はじめに信号源とノイズ、および観測点を図-2のように定める。減衰係数  $a_{kj}$  と時間差  $c_{kj}$  は以下のとおりである。

また図-3, 4には、信号源データとノイズ、観測信号をのせてある。

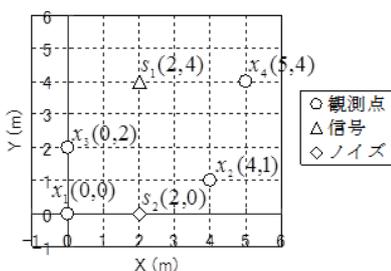


図 - 2 信号源と観測点の位置

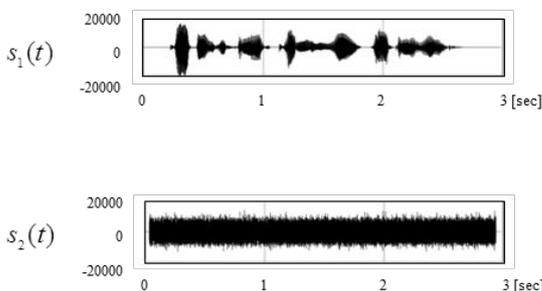


図 - 3 信号源データ

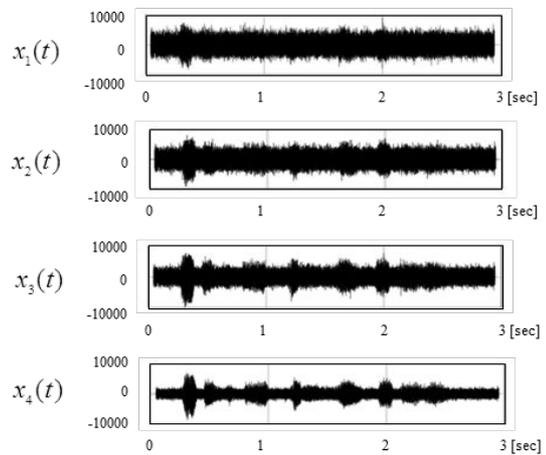


図 - 4 観測データ

はじめに得られるノイズの時間差について、設定値との差を示したものが表 1 であり、差がないことがわかる。

表 - 1 実験により得られた時間差 (  $\times 10^{-2}$  )

|     | $c_{12}$ | $c_{22}$ | $c_{32}$ | $c_{42}$ |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| 設定値 | 0.5873   | 0.6576   | 0.8322   | 1.4717   |
| 実験値 | 0.5896   | 0.6599   | 0.8345   | 1.4739   |

また、この相対時間差を用いて、ノイズの位置を求めた結果、以下のように誤差は 0.12% という高精度で求めた。

設定値 ( 2m , 0m )

実験値 ( 2.0070m, -0.0097m)

これらの結果を用いて、信号源の位置の特定と時間差を計算した結果が、以下の表 2 のとおりである。高精度で位置と時間差が得られていることがわかる。

表 - 2 信号源  $s_1(t)$  の実験結果

| $S_1$ の位置 | 設定値(2,4) 実験値(1.9976, 3.9885) |                        |                        |                        |
|-----------|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|           | $c_{11} (\times 10^2)$       | $c_{21} (\times 10^2)$ | $c_{31} (\times 10^2)$ | $c_{41} (\times 10^2)$ |
| 設定値       | 1.3152                       | 1.0612                 | 0.8322                 | 0.8821                 |
| 実験値       | 1.3129                       | 1.0590                 | 0.8299                 | 0.8798                 |

最後に、数値実験によって分離された信号を以下の図-5に示す。図-3と比べてみると明らかなように、完全に分離されていることがわかる。ただし、数学的定式化上、得られる分離信号は減衰定数比文の違いが生じるため、図ではその分の補正を行っている。

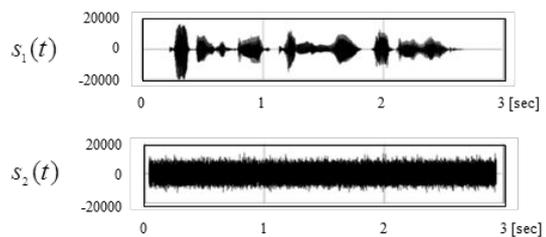


図 - 5 数値実験により分離された信号

最後に演算時間に関して述べると、分離に必要な総演算時間はノートパソコン(cpu2.4GHz)で約40秒ほどと実用的な範囲で正確な解を得ることができた。

(3)本手法のように数学的に完全に分離する手法は世界的にもまだ、我々以外の研究では存在せず、世界をリードしている研究といえる。定式化のみならず、数値実験でも高精度で分離と位置の特定が可能であることは、今後全世界に向けて論文や国際会議などで発信していく予定である。

(4)今後の展望であるが、本手法は、あくまでも理想的な環境でのみ可能であることを示したに過ぎない。実際には、反射の問題、ノイズでも移動するノイズ、暗騒音などが混入している場合など、研究はまた端緒に着いたばかりといえる。今後はまず、反射問題に取り組み、少しずつ成果を上げ、その経過を世界に発信していくつもりである。また、実際に実験を行い、どの程度、自分の手法が現実の問題に近づいているのかも確かめていきたいと思っている。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

Megumi YANAI, Fumio SASAKI, Osamu TANAKA, Hirohito YASUOKA, Blind source separation and two-signal localization in time-frequency domain considering time lag information, Acoustical Science and Technology, 査読有, 41, 2014, 55-58  
DOI:10.1250/ast.35.55

Megumi YANAI, Fumio SASAKI, Osamu TANAKA, Hirohito YASUOKA, Extraction and identification of location of source signal embedded in noise and reflected signals using BSS, 査読有, inter-noise2012, New York USA, 41, 2012, 1-10

### 〔学会発表〕(計 10 件)

辰巳弘太、佐々木文夫、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離と位置の特定に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、2013年8月30日~9月1日、209-210

佐々木勇人、佐々木文夫、箭内恵美、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離と位置の特定に関する研究、日本音響学会大会(信州)、2012年9月19日~9月21日、169-170

箭内恵美、佐々木文夫、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離によるノイズに埋もれた信号の分離と位置の特定、日本音響学会大会(信州)、2012年9月19日~9月21日、171-172

佐々木文夫、箭内恵美、田中治、安岡正

人、ブライント信号源分離を用いたノイズに埋もれた信号の抽出と位置の特定、招待講演、日本応用数理学会(稚内)、2012年8月28日~9月2日、321-322  
佐々木勇人、佐々木文夫、箭内恵美、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離と位置の特定に関する研究-一音源二反射問題への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012年9月12日~9月14日、169-170

箭内恵美、佐々木文夫、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離と位置の特定に関する研究-演算時間の効率化、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、2012年9月12日~9月14日、171-172

佐々木文夫、箭内恵美、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離によるノイズに埋もれた信号の分離と位置の特定(その1)、日本音響学会大会(島根)、2011年9月20日~9月22日、1137-1140

箭内恵美、佐々木文夫、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離によるノイズに埋もれた信号の分離と位置の特定(その2)、日本音響学会大会(島根)、2011年9月20日~9月22日、1141-1144

蔭山翔、佐々木文夫、佐々木勇人、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離と位置の特定に関する研究-一反射音の場合に生じる配置制限の対処法、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、2011年8月23日~8月25日、321-322

佐々木勇人、佐々木文夫、蔭山翔、田中治、安岡正人、ブライント信号源分離と位置の特定に関する研究-3次元での数値実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、2011年8月23日~8月25日、323-324

### 〔図書〕(計 1 件)

薩摩順吉、大石進一、佐々木文夫 他、朝倉書店、応用数理ハンドブック、2013、685(488-491)

### 〔産業財産権〕

なし

### 〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

佐々木 文夫 ( SAKI, Fumio )

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：80385533