時間差を考慮に入れた時間-周波数領域でのブラインド信号源分離と 位置の特定に関する研究 定式化と数値実験

BLIND SOURCE SEPARATION AND SOUND SOURCE LOCALIZATION ON TIME-FREQUENCY DOMAIN CONSIDERING TIME LAG INFORMATION Formulation and numerical test

佐々木 文夫*, 上田 将 吾**, 安岡 正 人***, 田 中 治****

*Fumio SASAKI, Shogo UEDA, Masahito YASUOKA
and Osamu TANAKA*

The blind source separation and specification of location on time-frequency domain considering time lag information are conducted. The formulation based on the independency of time-frequency domain is presented. First of all, the number of source signals is specified. Next, the locations of source signals are specified. Then, the source signals are obtained. The numerical test is conducted to confirm our method, and then the locations of source signals and source signals are obtained by high accuracy.

Keywords : *Blind source separation, Sound source localization, Time-Frequency information, Wavelet analysis*

ブラインド信号源分離, 位置の特定, 時間-周波数情報, ウェーブレット解析

1. はじめに

パーティ会場のような人々の話し声や音楽などが混在している状況においても、我々は、希望する話者の声を選択して聞くことができる。このように、混ざり合った複数の音の中から特定の音を選択的に識別する聴覚能力は、カクテルパーティ効果と呼ばれ、多様な分野において様々な観点から説明を与えることが試みられている。とくに、複数の未知の信号が未知の混合系で混ざり合った観測データから、それぞれの信号を分離する問題をブラインド信号源分離という¹⁾。

ブラインド信号源分離は、事前情報を用いることなく観測信号から音源信号を推定する技術として注目されており、近年ますます進展している。情報通信分野では、無線通信や音声通信システムに応用することを目指して盛んに研究が行われており^{2)~5)}、その他の分野でも生体信号処理や画像処理等に応用されている^{6)~10)}。しかし、音響分野ではこの技術に関する研究報告^{11)~15)}が見られるものの、建築分野においてブラインド信号源分離を利用した研究は、現在のところあまり見当たらない。

ブラインド信号源分離の一手法として、複数の観測信号の時間-周波数情報を用いて、信号源の数の推定及び信号源の分離を行う方法が提案されている^{16)~19)}。文献 18,19 では、信号源の時間-周波数

情報にある種の独立性を仮定し、ウェーブレット解析を用いて、観測信号を時間-周波数領域に展開することで、信号源の数の推定と分離を行っている。しかし、この手法では、信号源から観測点までの到達時間差を考慮していないため、現実的な問題設定とは言い難い。実際の環境では、光のように伝播速度が十分大きい場合を除いて、例えば音、振動、地震動等は、観測点に到達するまでの時間差が生じる。建築分野でこの手法を適用するには、時間差を考慮した信号源の分離手法を提案し、現実的な問題設定にする必要があるものと考えられる。

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として、測定した観測信号から未知音源の分離や位置を推定する研究が行われている。例えば、アレイマイクや指向性マイクロホンを利用した音源探査^{20)~22)}や、音響インテンシティ測定法を利用した音源位置の推定手法^{23)~26)}が提案されている。これらの手法は、音源の種類によらず、リアルタイムで測定することが可能であり、音源の方向推定については精度が高い。しかし、指向性マイクによる音源分離の手法は、観測信号を短時間窓で時間分割し、それらを方向別に分離する方法であるため、各音源信号そのものを分離・復元するまでに到っていない。また、音響インテンシティ測定法による手法は、マイク間距離によって解析対象周波数がある程度限定されるという

* 東京理科大学工学部建築学科 教授・博士(数理学)

** 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

*** 東京理科大学工学部建築学科 教授・工博

**** 東京理科大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Ph. D. Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Dr. Eng. Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

条件がある他、方向別の音場評価には向いているが音源信号の分離はあまり行われていない。この他にも、山崎らが提案した近接4点法^{27),28)}が一般的に知られている。近接4点法とは、同一平面上に無い4点のマイクロホンでインパルス応答を測定し、測定した4つのインパルス応答に含まれる各反射音の位相差に着目することで、室内における仮想音源の三次元分布とその大きさを算出する音場評価手法である。近接4点法は、マイクから音源までの空間距離精度は高いが、方向精度は低く、音源の種類はインパルス音源に限定されるという特徴がある。近接4点法を発展させた手法^{29)~32)}もこれまでに提案されており、その他にも音情報と画像を組み込んだ騒音源探索システムといった手法も提案されている^{33),34)}。しかし、いずれの手法も音源信号そのものの分離は行わないか、あるいは音源信号の分離精度が低いことや、音源の数が増えると位置推定精度が低下するという問題がある。

本論文では、信号源から観測点までの時間差を考慮することで、従来法^{18),19)}よりも現実的な問題設定としたブラインド信号源分離手法の提案を行う。本手法では、複数で未知の信号源が混合した観測信号の分離のみならず、それぞれの信号源の位置を特定することが可能である。また、建築分野における既存の音源情報測定法は、マイク配置に関してマイクを近接配置させる等、ある程度制限がある他、測定精度に関して周波数依存するという問題があるが、本手法は原理的にはマイクを自由に配置することが可能であり、分離や位置特定の精度についても周波数依存しない。但し、本手法は伝搬系の線形・均質・時不変性と信号源の時間-周波数情報にある種の独立性を仮定し、観測点数を信号源数以上確保できるものとする。

本論文では、始めに手法の定式化を行う。定式化において、本手法の仮定である線形性と独立性の仮定について説明し、観測信号の分離手法と位置の特定手法について述べる。次に、数値実験により本手法の妥当性の検証を行い、まとめて本手法の適用条件などを整理する。

2. 定式化

2.1 線形・均質・時不変性の仮定

N 個の信号源データを N 次元実数値ベクトル関数

$$\mathbf{s}(t) = (s_1(t), \dots, s_j(t), \dots, s_N(t))^T \quad (1 \leq j \leq N) \quad (1)$$

で、 M 個の観測点データを M 次元実数値ベクトル関数

$$\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_k(t), \dots, x_M(t))^T \quad (1 \leq k \leq M) \quad (2)$$

で表わす。(但し $M \geq N$ とする。) さらに、減衰マトリックスを

$$\mathbf{A} = (a_{kj}) \quad (1 \leq k \leq M, 1 \leq j \leq N) \quad (3)$$

で表わす。(但し a_{kj} は実定数とする。)

ここで、信号源から観測点には直接音のみ伝わることを仮定し、反射音は考慮しない。また、空気の温度分布、変化、気流等による伝搬系の不均質性も考慮しないものとし、信号源と観測点とは以下の線形関係を満たすものと仮定する。

$$x_k(t) = \sum_{j=1}^N a_{kj} s_j(t - c_{kj}) \quad (1 \leq k \leq M) \quad (4)$$

(但し c_{kj} は (k, j) 成分での時間差で実定数である。)

(4)式を便宜的に以下のように表記する。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t - \mathbf{c}_{kj}) \quad (5)$$

ここで、観測点データ $\mathbf{x}(t)$ 、観測点数 M 、観測点位置のみが既知であり、 $\mathbf{s}(t)$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{c}_{kj}$ 、 N は未知である。

2.2 時間-周波数情報の独立性の仮定

本研究の仮定である、観測信号に含まれる信号源の独立性について述べる。

(1)式の時間-周波数情報を N 次元複素数値ベクトル関数

$$\mathbf{S}(t, \omega) = (S_1(t, \omega), \dots, S_j(t, \omega), \dots, S_N(t, \omega))^T \quad (6)$$

で、(2)式の時間-周波数情報を M 次元複素数値ベクトル関数

$$\mathbf{X}(t, \omega) = (X_1(t, \omega), \dots, X_k(t, \omega), \dots, X_M(t, \omega))^T \quad (7)$$

で表わす。これらの時間-周波数情報は窓フーリエ変換や、ウェーブレット変換等を用いて得ることが可能であり、本論文では複素ウェーブレット $\psi(t)$ を積分核とする連続ウェーブレット変換を用いるものとする。すると $s_j(t)$ の時間-周波数情報は

$$S_j(\tilde{t}, \tilde{\omega}) = |\tilde{\omega}|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s_j(t) \cdot \overline{\psi\left(\frac{t - \tilde{t}}{\tilde{\omega}}\right)} dt \quad (8)$$

と表すことができる。(但し $\overline{}$ は複素共役を表わすものとする。)

ここで、 $a_{kj} s_j(t - c_{kj})$ の時間-周波数情報は

$$\begin{aligned} & |\tilde{\omega}|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} a_{kj} s_j(t - c_{kj}) \cdot \overline{\psi\left(\frac{t - \tilde{t}}{\tilde{\omega}}\right)} dt \\ &= a_{kj} |\tilde{\omega}|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s_j(t) \cdot \overline{\psi\left(\frac{t - (\tilde{t} - c_{kj})}{\tilde{\omega}}\right)} dt \\ &= a_{kj} S_j(\tilde{t} - c_{kj}, \tilde{\omega}) \end{aligned} \quad (9)$$

と表現できるので、もとの $S_j(\tilde{t}, \tilde{\omega})$ を単に $a_{kj} S_j(\tilde{t} - c_{kj}, \tilde{\omega})$ という時間軸方向にシフトし、減衰を乗じた形で表わすことができる。これより、(4)式で表わされる観測信号 $x_k(t)$ の時間-周波数情報は

$$X_k(t, \omega) = \sum_{j=1}^N a_{kj} S_j(t - c_{kj}, \omega) \quad (10)$$

と表わすことができる。ウェーブレット解析に関する詳しい説明は、文献 35,36,37,38 等を参照されたい。

ここで以下のように時間-周波数情報の独立性を仮定する。 $X_k(t, \omega)$ ($1 \leq k \leq M$) に対して、 E_{kj} を時間-周波数領域での集合で

$$E_{kj} = \{(t, \omega) | S_j(t - c_{kj}, \omega) \neq 0 \text{ and } \forall i (\neq j) \text{ s.t. } S_i(t - c_{ki}, \omega) = 0\} \quad (11)$$

としたとき、条件

$$|E_{kj} \neq \{\emptyset\} \quad \text{かつ} \quad \text{ある面積 (測度) を有する} \quad (12)$$

を満たすものとする。図 1 は時間-周波数情報 $X_k(t, \omega)$ 全体における領域 E_{kj} の概念を概略的に描いたものである。条件(12)式は、観

測信号 $X_k(t, \omega)$ ($1 \leq k \leq M$) に含まれるそれぞれの信号源 $S_j(t - c_{kj}, \omega)$ (図1は $1 \leq j \leq 4$ とした場合) が互いに重なり合わない領域 E_{kj} が必ず存在することを意味している。

さらに E_{kj} ($1 \leq k \leq M, 1 \leq j \leq N$) を時間の負の方向に c_{kj} だけずらしたものを $\tilde{E}_{kj}$ とし、 G_j を時間-周波数領域での集合で

$$G_j = \bigcap_{k=1}^M \tilde{E}_{kj} \quad (13)$$

としたとき、条件

$$「G_j \neq \{\emptyset\} \text{ かつ ある面積 (測度) を有する}」 \quad (14)$$

を満たすものとする。

図1 時間-周波数情報 $X_k(t, \omega)$ 全体における領域 E_{kj} の概念図

2.3 信号源数の特定

ここでは信号源の数 (N 個) の特定法について述べる。

任意の固定した k, l ($1 \leq k, l \leq M, k \neq l$) に対して、観測信号 $x_k(t), x_l(t)$ の時間-周波数情報は

$$X_k(t, \omega) = \sum_{j=1}^N a_{kj} S_j(t - c_{kj}, \omega) \quad (15)$$

$$X_l(t, \omega) = \sum_{j=1}^N a_{lj} S_j(t - c_{lj}, \omega) \quad (16)$$

と表わせる。このとき、商関数 $Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega)$ を

$$Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega) = \frac{X_k(\tilde{t}, \omega)}{X_l(\hat{t}, \omega)} = \frac{\sum_{j=1}^N a_{kj} S_j(\tilde{t} - c_{kj}, \omega)}{\sum_{j=1}^N a_{lj} S_j(\hat{t} - c_{lj}, \omega)} \quad (17)$$

で定義する。商関数 $Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega)$ は複素数値関数である。

(12)式の独立性の仮定から、もし $(\tilde{t}, \omega) \in E_{kj}$ なら(11)式より

$$X_k(\tilde{t}, \omega) = \sum_{p=1}^N a_{kp} S_p(\tilde{t} - c_{kp}, \omega) = a_{kj} S_j(\tilde{t} - c_{kj}, \omega) \in \mathbf{C} \quad (18)$$

であり、 $(\hat{t}, \omega) \in E_{lj}$ なら、同様に(11)式より

$$X_l(\hat{t}, \omega) = \sum_{p=1}^N a_{lp} S_p(\hat{t} - c_{lp}, \omega) = a_{lj} S_j(\hat{t} - c_{lj}, \omega) \in \mathbf{C} \quad (19)$$

である。ここで $\mathbf{C}$ は複素数全体の集合を表わすものとする。このとき、(14)式の独立性の仮定から、もし $\hat{t} = \tilde{t} - (c_{kj} - c_{lj})$ なら (すなわち、 $\hat{t} - c_{lj} = \tilde{t} - c_{kj}$ なら)

$$Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega) = \frac{X_k(\tilde{t}, \omega)}{X_l(\hat{t}, \omega)} = \frac{a_{kj} S_j(\tilde{t} - c_{kj}, \omega)}{a_{lj} S_j(\hat{t} - c_{lj}, \omega)}$$

$$= \frac{a_{kj} S_j(\tilde{t} - c_{kj}, \omega)}{a_{lj} S_j(\tilde{t} - c_{kj}, \omega)} = \frac{a_{kj}}{a_{lj}} \in \mathbf{R} \text{ (実数)} \quad (20)$$

となる。つまり、少なくとも領域 G_j において、商関数 Q は全て同じ実数値 a_{kj}/a_{lj} をとり、その値は減衰定数の比となる。一般に、 Q は複素数値関数であるので、 $\tilde{t}, \hat{t}, \omega$ が時間-周波数領域全体を動くとき、実数値で同じ値を持つ時間-周波数領域が面積を有するなら、その同じ値を持つ領域の個数が信号源の数 N と一致する。尚、 Q が領域 G_j 以外で実数値を取る可能性はあるが、その場合でも、領域が面積を有する可能性は極めて低いと言える。以上のように、信号源の数 N は任意の2つの観測点から特定することができる。

但し、(20)式で求まる実数値 $Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega)$ が、どの信号源 (ここでは j としている) に対応するかはこのままでは不明であるが、時間-周波数平面上における領域 G_j を推定することでこの問題は解決する。数値計算上は、 l を固定し、 $k (\neq l)$ を動かして2つの観測信号の比である Q を求めていく。このとき、実数値とその値をとるときの $(\tilde{t}, \omega)$ の領域を調べ、時間-周波数領域 $X_k(t, \omega)$ における独立な領域 E_{kj} ($1 \leq k \leq M, 1 \leq j \leq N, k \neq l$) (実数を得る領域) を推定する。さらに、推定した E_{kj} を時間-周波数軸上に全て描き出すと、もし、時間差 c_{kj} が十分に小さいなら、 E_{kj} の重なる領域、すなわち領域 G_j が存在する。この領域 G_j にそれぞれ対応する実数値が、信号源 s_j から観測点 x_k, x_l までの減衰定数比 a_{kj}/a_{lj} であることがわかり、実数値 $Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega)$ がどの信号源に対応するか判明する。以上を概略的に図で説明すると、図2のように表わすことができる。図2は、信号源数 $N=4$ 、観測点数 $M=4, l=1$ とした場合の一例である。

図2 領域 G_j の推定と実数値 $Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega)$ と信号源の対応

尚、以上の領域 G_j を推定する方法は、時間差 c_{kj} があまり大きくない場合に適用可能である。例えば、信号の伝搬速度を $330[\text{m/sec}]$ 、観測点 x_k から信号源 s_j までの距離を $20[\text{m}]$ としたとき、時間差 c_{kj} は $0.06[\text{sec}]$ となる。継続時間を $11.89[\text{sec}]$ とすると、全時間軸上における c_{kj} の割合は $0.5[\%]$ であるので、 $20[\text{m}]$ の伝搬距離による時間軸方向のずれは十分小さいものと考えられる。しかし、伝搬距離が極端に大きい場合は、推定した領域 E_{kj} が重ならず本手法では領域 G_j を推定できない。そのような場合は他の方法で実数値がどの信号源に対応するか検討しなければならないことを記しておく。

以上から信号源数 N 、減衰定数比 a_{kj}/a_{lj} 、相対時間差 $\{c_{lj} - c_{kj}\}$

が判明する。本手法は $M \geq N$ を仮定しているが、信号源数 N があらかじめ判明していることは少ないと思われる。しかし、上述のように少なくとも 2 つの観測点があれば信号源数 N が判明するので、再現性のある音源を対象とする場合には、 N が判明した時点で観測点数 M を増やし、再測定することで本手法が適用可能である。不思議音のように突発性のある音源や、その他再現性の乏しい音源を対象とする場合には、再測定が難しいので、あらかじめ観測点数を多く取っておくことが必要と考えられる。

2.4 信号源の位置の特定

(20)式が成立するとき

$$\hat{t} - \tilde{t} = c_{lj} - c_{kj} \quad (21)$$

となっている。上式は、信号源 s_j から観測点 x_k, x_l までの相対時間差 $(c_{lj} - c_{kj})$ が $\hat{t} - \tilde{t}$ であることを意味している。(ここでは、信号源データ $s_j(t)$ の得られる位置を同じ s_j で表わす。観測点も同様とする。) 従って、信号源を固定し、信号の伝搬速度を v とし、 $d_{jkl} = v(\hat{t} - \tilde{t}) = v(c_{lj} - c_{kj})$ とすると

$$|s_j - x_k| - |s_j - x_l| = d_{jkl} \quad (22)$$

と表わすことができる。故に、 x_l を固定し、 x_k を $1 \leq k \leq M (k \neq l)$ で動かすことにより、信号源 s_j から観測点 x_k までと観測点 x_l までの相対距離 d_{jkl} が判る。

このことから、理論的には観測点数を 3 つ選ぶと、3 つの相対距離から 2 次元平面での、4 つ選ぶと、4 つの相対距離から 3 次元空間での信号源 s_j の位置が特定できることになる。

以上の信号源の位置の特定では、原理的にはマイク間隔・配置が特定精度に影響しないため、マイクは任意に配置することが可能である。但し、例外として全観測点を一直線上に配置した場合は、両端の観測点を結ぶ線分の延長線上にある信号源 s_j の位置は数学的に特定できない。言い換えると、全観測点を一直線上に並べさせなければ信号源の位置は特定可能となる。

2.5 信号源の分離

以上のことから、減衰定数比マトリックス $\mathbf{B}_l$ を

$$\mathbf{B}_l = (b_{kj}) \text{ , } b_{kj} = a_{kj} / a_{lj} \quad (23)$$

で定義すると、マトリックス $\mathbf{B}_l$ の要素 b_{kj} は 2.3 から求まる。また c_{kj} も 2.4 で特定した信号源 s_j の位置から求めることができる。以後、 $\mathbf{B}_l$ を $\mathbf{B}$ で表す。ここで

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{B} \tilde{\mathbf{s}}(t - c_{kj}) \quad (24)$$

とする。本手法ではこの $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ を求めることとする。分離信号 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ と信号源 $\mathbf{s}(t)$ との違いは、 $\mathbf{B}$ の成分が $\mathbf{A}$ の成分の比の形となっていることから、本手法により求まる分離信号 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ と実際の信号源 $\mathbf{s}(t)$ とでは定数倍の違いが生じる (定数倍ベクトルを α とすると $\mathbf{s} = \alpha \tilde{\mathbf{s}}^T$)。 (24)式をフーリエ領域で表現すると

$$\hat{\mathbf{x}}(\omega) = \mathbf{B} \hat{\tilde{\mathbf{s}}}(\omega, c_{kj}) \quad (25)$$

となる。尚、 $\wedge$ はフーリエ領域であることを示すものとする。上式

の第 k 成分を具体的に書くと

$$\hat{x}_k(\omega) = \sum_{j=1}^N b_{kj} e^{-i\omega c_{kj}} \hat{s}_j(\omega) \quad (26)$$

となっている。(26)式は周波数 ω を固定すると、線形方程式となっていることから、周波数毎に $\hat{s}_j(\omega)$ を未知変数として(26)式を解くことにより、 $\hat{s}_j(\omega)$ ($1 \leq j \leq N$) が求まる。 $\tilde{s}_j(t)$ は、 $\mathcal{F}$ をフーリエ作用素としたとき

$$\tilde{s}_j(t) = \mathcal{F}^{-1}[\hat{s}_j(\omega)] \quad (27)$$

とし、フーリエ逆変換することで得られる。

以上の定式化から明かなように、本手法では低音域、高音域の区別なく信号源の分離が可能である。

3. 数値実験

3.1 問題設定

前章では、信号源数を N 、観測点数を M として定式化を行ったが、本章では信号源数と観測点数を 4 として数値実験を行う。

数値実験では、始めに信号源データと観測点位置から観測点データを 2.1 と 2.2 の仮定の下に作成する。その後、観測点位置と観測点データのみ既知として、本手法の妥当性の検証を行う。

4 つの信号源を 4 次元実数値ベクトル関数

$$\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t), s_3(t), s_4(t))^T \quad (28)$$

とし、4 つの観測信号を 4 次元実数値ベクトル関数

$$\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t))^T \quad (29)$$

で表す。二次元平面上に信号源と観測点を図 3 のように配置する。

観測は無指向性マイクロホンで行うことを想定し、信号源 $s_j(t)$ は図 4 に示す 4 種類の波形を使用する。信号源 $s_j(t)$ は DVD 集³⁹⁾ から作成した英語の音声で、サンプリング周波数は 44100[Hz]、総ステップ数は 524288 (継続時間 ≈ 11.89 [sec]) である。 $s_1(t)$ と $s_2(t)$ は男声、 $s_3(t)$ と $s_4(t)$ は女声であり、 $s_1(t)$ と $s_3(t)$ は同一文章、 $s_2(t)$ と $s_4(t)$ は同一文章を朗読した音声である。ここで、信号源と観測信号は、減衰マトリックス $\mathbf{A}$ と時間差 c_{kj} を用いて、(5)式の関係を満たすものと仮定する。尚、二次元平面での信号の減衰を伝搬距離の逆数として設定すると、 $\mathbf{A}$ は図 3 より

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0.1667 & 0.0781 & 0.0767 & 0.0487 \\ 0.1414 & 0.3162 & 0.1179 & 0.0941 \\ 0.0665 & 0.1961 & 0.1581 & 0.1240 \\ 0.0971 & 0.1162 & 0.0620 & 0.1111 \end{pmatrix} \quad (30)$$

図 3 信号源 s_j と観測点 x_k の配置

図4 信号源 $s_j(t)$ ($1 \leq j \leq 4$) の波形

図5 観測信号 $x_k(t)$ ($1 \leq k \leq 4$) の波形

となり、信号の伝搬速度を $330[\text{m/sec}]$ とすると、時間差マトリックス $\mathbf{C}$ は

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 802 & 1711 & 1742 & 2742 \\ 945 & 423 & 1134 & 1421 \\ 2009 & 681 & 845 & 1077 \\ 1376 & 1150 & 2155 & 1203 \end{pmatrix} \quad (31)$$

となる（但し、 $\mathbf{C}$ の要素は実際の時間差 $c_{kj}[\text{sec}]$ の値に対してサンプリング周波数 44100 倍し、さらに整数化した値 $[\text{step}]$ で示している）。(30),(31)式の設定値を用い、(5)式と時間-周波数領域における独立性を満たすように作成した観測信号 $x_k(t)$ を図5に示す。図5の観測信号は、全て同一時間軸に揃えられているものとする。以下、図5の観測信号と観測点位置のみ既知として、信号源の分離と位置の特定が数値計算的にどの程度の精度で可能かを調べる。

2.2 で述べたように、本手法では観測信号の時間-周波数情報 $\mathbf{X}(t, \omega)$ を求める必要がある。本論文では複素ウェーブレットとして、実部は Meyer ウェーブレット³⁵⁾、虚部は Meyer ウェーブレットを Hilbert 変換⁴⁰⁾ したウェーブレットを用いて、複素連続ウェーブレット変換により $\mathbf{X}(t, \omega)$ を求める。

3.2 信号源数の特定

(17)式に示した商関数 $Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega)$ の計算を行う。(11)式で表される独立な領域 E_{kj} は未知であるので、数値計算上、 $\tilde{t}, \hat{t}, \omega$ を時間-周波数領域全体で動かすことで全ての $Q = X_k / X_l$ ($2 \leq k \leq 4, l=1$) を計算する。 Q が実数値を取るとき商の値(X軸)と $\{\hat{t} - \tilde{t}\}$ (Y軸)を求め、その個数(Z軸)をヒストグラムで表す。尚、本数値実験では以下の条件 I ~ III を同時に満たす Q を実数とみなすこととした。

- I. $|X_k(\tilde{t}, \omega)|, |X_l(\hat{t}, \omega)| \geq \text{Max}\{|X_k(t, \omega)|, |X_l(t, \omega)|\} \times 0.001$
- II. $|\text{Im}(Q)| < \text{Max}\{|X_k(t, \omega)|, |X_l(t, \omega)|\} \times 0.001$ (Im は虚部)
- III. $|\text{Re}(Q)| \geq |\text{Im}(Q)| \times 5000$ (Re は実部)

図6の①は $l=1, k=2$ とし、観測信号 $x_1(t)$ と $x_2(t)$ を用いたときのヒストグラムである。ピークの数に4つあることが分かる。ピーク数は信号源数と一致し、ピークに対応する X 軸の値は減衰定数比 a_{2j}/a_{1j} に、ピークに対応する Y 軸の値は相対時間差 $\{c_{1j} - c_{2j}\}$ になっている。図6の②は $l=1, k=3$ としたときのヒストグラム、③は $l=1, k=4$ としたときのヒストグラムである。いずれの場合も、ヒストグラムに4つのピークが現れていることがわかる。

以上の計算から求めた減衰定数比マトリックス $\tilde{\mathbf{B}}$ と相対時間差マトリックス $\tilde{\mathbf{C}}_R$ は以下の通りである。

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.848 & 4.044 & 1.536 & 1.929 \\ 0.399 & 2.512 & 2.061 & 2.545 \\ 0.582 & 1.487 & 0.808 & 2.279 \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -143 & 1288 & 608 & 1321 \\ -1207 & 1030 & 897 & 1665 \\ -574 & 561 & -413 & 1539 \end{pmatrix} \quad (33)$$

ここで、比較のため 3.1 の(30),(31)式で設定した $\mathbf{A}, \mathbf{C}$ から減衰定数比マトリックス $\mathbf{B}$ と相対時間差マトリックス $\mathbf{C}_R$ を求めると、

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.848 & 4.049 & 1.536 & 1.930 \\ 0.399 & 2.511 & 2.061 & 2.545 \\ 0.583 & 1.489 & 0.808 & 2.280 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{C}_R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -143 & 1288 & 608 & 1321 \\ -1207 & 1030 & 897 & 1665 \\ -574 & 561 & -413 & 1539 \end{pmatrix} \quad (35)$$

となる。(32)式と(34)式、及び(33)式と(35)式を比較すると、 $\tilde{\mathbf{B}}$ は最大 0.1[%] の誤差で求まり、 $\tilde{\mathbf{C}}_R$ は完全に一致することがわかる。 $\tilde{\mathbf{B}}$ の数値誤差はデータの離散化によるものと思われる。

図 6 実数となる $Q(\tilde{t}, \hat{t}, \omega)$ のヒストグラム

3.3 信号源位置の特定

3.2 で得られるヒストグラムより、信号源 s_j から観測点 x_k, x_l までの相対時間差が得られるので、これらに伝搬速度を乗ずることで信号源 s_j から観測点 x_k, x_l までの相対距離 d_{jkl} がわかる。本手法では、求まった相対距離から信号源の位置を特定する。

本数値実験では観測点数は 4 点であるので、観測点を 1 つ固定すると、相対距離の組合せは 1 つの信号源に対して 3 通り求まる。ここでは観測点 x_1 を固定とし、相対距離 d_{jkl} から各信号源 s_j の存在する 3 本の軌跡 (双曲線) を描くと図 7 が得られる。点線で示す曲線は信号源 s_j から観測点 x_1, x_2 まで、実線で示す曲線は s_j から x_1, x_3 まで、一点鎖線で示す曲線は s_j から x_1, x_4 までの相対距離より描かれる。この 3 本の双曲線の交点が信号源 s_j の位置となる。特定した $\tilde{s}_j$ の位置をまとめると図 8 に示す結果となり、実際の s_j の位置から最大 4.5[mm] (座標範囲全体の約 0.02[%]) の誤差で求まっている。

図 7 双曲線と特定した信号源 $\tilde{s}_j$

図 8 特定した信号源 $\tilde{s}_j$ の位置

3.4 信号源の分離

3.2 で得られるヒストグラムのピークに対応する X 軸の値 a_{kj} / a_{1j} は、 $x_1(t)$ と $x_k(t)$ に含まれる各信号源の減衰定数比となっているため、定数マトリックス $\mathbf{B}$ が得られ、また c_{kj} も 3.3 の位置の特定から求まる。 $\mathbf{B}, c_{kj}, \mathbf{x}(t)$ から、フーリエ領域においてナイキスト振動数以下、全ての周波数毎に分離信号を未知変数として線形関係式 ((26)式) を解き、フーリエ逆変換することで分離信号 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ が求まる。

ここで、もし信号の減衰は距離に反比例すると仮定できるなら、3.3 の位置の特定から a_{1j} が判明するので、これをそれぞれの分離信号 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ に除することで実際の $\mathbf{s}(t)$ の振幅と同じ大きさの分離信号が得られる。分離信号 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ を a_{1j} で除して振幅を合わせた波形を図 9 に示す。図 4 の実際の波形と比較すると、振幅の大きさは最大 0.1[%] の誤差となっている。さらに $\tilde{s}_1(t)$ の一部を拡大した波形を図 10 に、 $s_1(t)$ の一部を拡大した波形を図 11 に示す。これらと比較するとほぼ完全に一致していることがわかる。分離信号と実際の信号を耳で聴いてみると、聴感的にも完全に分離ができていることを確認できた。最後に、本数値実験で使用した計算機や計算時間等を表 1 にまとめて示す。

図 9 分離信号 $\tilde{s}_j(t)$ ($1 \leq j \leq 4$) の波形
(a_{1j} で除して振幅を合わせてある)

図 10 分離信号 $\tilde{s}_1(t)$ の一部拡大図
(a_{1j} で除して振幅を合わせてある)

図 11 実際の信号 $s_1(t)$ の一部拡大図

表 1 本数値実験の計算条件

計算機システム (プロセッサ)	AMD Athlon(tm) 64X2 Dual Core Processor 5000+ 2.60[GHz]
$\tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}}_R$ の特定に用 いた周波数帯域	1000[Hz] ~ 1500[Hz]
信号源分離に用いた 周波数帯域	0[Hz] ~ 22050[Hz]
観測信号の継続時 間,ステップ数	11.89[sec], 524288[step]
信号源,観測点数	それぞれ 4 点
総解析時間	25 時間

表 2 本手法の条件

伝搬系	・線形・均質・時不変系 ・不特定の暗騒音は考慮しない ・反射音は考慮しない
マイクの種類	・無指向性マイクロホン
観測点数	・観測点数 $\geq$ 信号源数 (任意の 2 点から信号源数は判明)
観測点位置	・既知
信号源位置	・未知
観測点の配置	・任意(一直線以外)
信号源の種別	・点音源・移動しない ・時間-周波数領域において独立 性が成り立つ信号源 ・信号源のインコヒーレント性・ コヒーレント性の条件は不要 (信号の自己相関・相互相関の 条件は不要)

4. まとめ

本論文では、信号源数、信号源位置、信号源データが未知であるという条件のもとに、観測信号の線形性と時間-周波数領域での独立

性を仮定し、信号源の分離と位置の特定手法を提案した。さらに数値実験を行うことで本定式化に示した提案手法の妥当性を検証した。その結果、信号の分離と位置の特定が高精度で可能であることを示した。表 2 に本手法の適用条件をまとめて整理する。

本論文の数値実験は、2 次元平面上に全ての信号源と観測点が存在する場合について示したが、3 次元空間上に信号源と観測点が存在する場合でも本手法は適用可能である。また、連続的なノイズが混入した観測信号のように、時間・周波数領域での独立性の仮定を満たしにくい観測信号についても、ノイズのレベルがあまり高くない場合には商関数 Q を実数とみなす閾値を調整することで本手法を適用できると考えられる。今後は、さらなる数値実験による検証や、本手法の仮定条件に実問題がどの程度合致していれば、許容誤差の範囲内で信号源の分離及び位置の特定が可能か検証する必要がある。さらにノイズや反射音を考慮した観測信号への適用を行うことで、実環境への手法の適用を行ってきたい。

参考文献

- 1) Aapo Hyvärinen, Erkki Oja and Juha Karhunen (共著), 根本幾, 川勝真喜 (共訳): 詳解 独立成分分析, 東京電機大学出版局, pp.4-6, 2005.2
- 2) 塩見英久, 岡村康行: 独立成分分析による無線混信号のブラインド信号分離と無線タグへの応用, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.373 pp.43-48, 2007.12
- 3) 矢田達郎, 塩見英久, 岡村康行: 独立成分分析によるマイクロ波混信号のブラインド分離実験, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.208 pp.61-66, 2007.8
- 4) Okello James, Ikekawa Masao: A Complete Blind MIMO Equalizer for Wireless Communication System, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.679 pp.51-56, 2005.2
- 5) 小林真之, 古川利博: Scaling の不定性を軽減した周波数領域でのブラインド信号分離, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.456 pp.37-42, 2004.11
- 6) 鷲沢嘉一, 山下幸彦, 田中聡久, Cichocki Andrzej: 多チャンネルの観測信号に含まれる共通信号の強度推定と抽出およびその脳電図処理への応用, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.62 pp.61-66, 2007.5
- 7) 中迫昇, 吉田久, 山脇伸行: 独立成分分析と正值時間周波数分布に基づく脳波解析, Memoirs of the School of Biology-Oriented Science and Technology of Kinki University, Vol.19 pp.23-35, 2007.3
- 8) 根田林知之, 木村芳孝, 千田 新一, 伊藤 拓哉, 大和田一成, 辛島彰洋, 片山統裕, 岡村 州博, 中尾光之: 心電図の参照系信号分離における参照信号の最適化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.351 pp.1-4, 2007.11
- 9) 松山文昭, 木村芳孝, 千田新一, 伊藤拓哉, 辛島彰洋, 片山統裕, 岡村州博, 中尾光之: 母体腹部誘導心電図からの胎児心電図の分離抽出, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.105, No.402 pp.25-28, 2005.11
- 10) 梅山 伸二: ガボールフィルタバンクと独立成分分析を用いた劣化過程未知のぼけ画像からの原画像復元, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.156 pp.31-38, 2002.6
- 11) 原口雄基, 宮部滋樹, 猿渡洋, 鹿野清宏, 野村俊之: ブラインド音源分離に基づくオーディオオブジェクトの定位感操作とその評価, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.240 pp.7-12, 2007.9
- 12) 西村竜一, 北村達也, 井ノ上直己: マイクロホン間の振幅比に基づく近傍場音源分離の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.186 pp.7-12, 2007.8
- 13) 猿渡洋: 独立成分分析による音源分離技術, 電気学会誌, Vol.127, No.7 pp.413-416, 2007.7
- 14) 住田雄司, 滝口哲也, 有木康雄: 音響モデルを利用したシングルチャネルによる音源方向推定, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.432 pp.7-11, 2006.12
- 15) 和泉洋介, 亀岡弘和, 小野順貴, 嵯峨山茂樹: 音声スパース性に基づく 2chBSS への EM アルゴリズムの適用, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.432 pp.43-48, 2006.12
- 16) R.Balan and J.Rosca: Statistical properties of STFT ratios for two channel systems and applications to blind source separation, Proceedings ICA2000, 19-22 June 2000, Helsinki, Finland.
- 17) D.Napoletani, C.A. Berenstein and P.S. Krishnaprasad: Quatient Signal Decomposition and Order Estimation, TECHNICAL RESEARCH REPORT of University of Maryland, TR2002-47, http://www.lib.umd.edu/drum/handle/1903/6280 (参照 2009-2-10)
- 18) 藤田景子, 竹井義次, 守本晃, 芦野隆一, 森本光生: 時間周波数情報を用いたブラインド信号源分離—数学的背景—, 電子情報通信学会, 信学技報, pp.37-42, 2005.5
- 19) 守本晃, 藤田景子, 芦野隆一: 時間周波数情報を用いたブラインド信号源分離—実例を中心に—, 電子情報通信学会, 信学技報 pp.31-36, 2005.5
- 20) 藤田祐介, 星和磨, 羽入敏樹, 関口克明: 複数の指向性マイクロホンの方向別感度差を利用した音源方向推定に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.171-172, 2005.9
- 21) 羽入敏樹, 藤田祐介, 星和磨, 関口克明: 複数の指向性マイクロホンの方向別感度差を利用した音源探索, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 2006.3
- 22) 稲毛大輔, 星和磨, 羽入敏樹, 関口克明: 複数のカーディオイドマイクを組み合わせた複数音源および移動音源の方向検出方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1 pp.37-38, 2006.9
- 23) 日野順市, 近藤新一, 花房昌弘, 芳村敏夫: 音響インテンシティ計測法による複数音源の同定, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66 No.642 pp.476-481, 2000.2
- 24) 山田和幸, 柴山秀雄: 音響インテンシティ測定法を用いた音源の位置推定, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol.2003 p.155, 2003.9
- 25) 湯湧, 佐藤大, 青木武史, 田中和佳子, 柴山秀雄: 音響インテンシティ法を用いた室内反射音の到来方向推定, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.105 No.231 pp.1-6, 2005.8
- 26) 朱鎮沫, 日高新人, 橘秀樹: 音響インテンシティ法による在来線鉄道の音響放射特性の検討, 日本音響学会誌, Vol.56 No.1 pp.32-38, 1999.12
- 27) 遠藤健二, 山崎芳男, 伊藤毅: 近接 4 点法による空間情報の把握と展開, 建築音響研究委員会資料 AA85-21, 1985.7
- 28) Yoshio Yamasaki and Takeshi Ito: Measurement of spatial information of sound fields by closely located four point microphone method, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), vol.10, pp.101-110, 1989
- 29) 関口克明, 木村翔, 羽入敏樹, 松本英一郎: 4 チャンネルマイクロホンシステムを用いた正四面体頂点法による室内音場の解析, 日本建築学会計画系論文報告集, No.414, pp.1-11, 1990.8
- 30) 羽入敏樹, 木村翔, 関口克明: 球面上配置マイクロホンシステムを用いた室内音場における任意方向インパルス応答測定手法の開発, 日本建築学会計画系論文報告集, No.445, pp.9-17, 1993.3
- 31) 荻野肅, 山崎芳男: 近接 4 点法を用いた空間の把握 音による空間形状および表面材質の把握と可視化, 日本音響学会研究発表会講演論文集, Vol.2003, No.2, pp.905-906 2003.9
- 32) 大内康裕, 中沢誠, 山崎芳男: 一般化調和解析を用いた近接 4 点法による音場分析, 日本音響学会誌, Vol.62, No.9 pp.654-661, 2006.9
- 33) 上明戸昇, 野上英和, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山武, 和田浩之: 音と画像を組み込んだ音源探索システムの開発 -小型発電機の騒音源位置推定と遮音効果の可視化への適用-, 日本建築学会計画系論文集, No.553, pp.17-22, 2002.3
- 34) 上明戸昇, 野上英和, 富永大祐, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山武, 和田浩之: 画像に音情報を組み込んだ音源探索システムの開発 -反射影響の低減に関する検討-, 日本建築学会計画系論文集, No.564 pp.1-7, 2003.2
- 35) 佐々木文夫, 前田達哉, 山田道夫: ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析, 構造工学論文集, Vol.38B, pp.9-20, 1992.3
- 36) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.5
- 37) 芦野隆一, 山本鎮男: ウェーブレット解析—誕生・発展・応用, 共立出版, 1997.6
- 38) Ingrid Daubechies(著), 山田道夫, 佐々木文夫(共訳): ウェーブレット 10 講, シュプリンガーフェアラーク東京, 2003.12
- 39) 社団法人日本建築学会: 建築と環境のサウンドライブラリ 技報堂出版 2004.11
- 40) Leon Cohen (著), 吉川昭, 佐藤俊輔 (共訳): 時間 - 周波数解析, 朝倉書店, 1998.10

(2008年9月5日原稿受理, 2009年1月29日採用決定)