数理解析研究所講究録
第2034巻 2017年 125-138

ブラインド再構成とその適用例

早稲田大学基幹理工学研究科　佐々木 裕文 *
Hirofumi Sasaki
School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University
東京理科大学工学部　佐々木 文夫
Fumio Sasaki
Faculty of Engineering, Tokyo University of Science
京都大学数理解析研究所　山田 道夫
Michio Yamada
Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

1　はじめに

ブラインド再構成 (Blind Reconstruction) とは，さまざまな未知の入力情報からなる出力情報を既知としたときに，その入力情報を再構成しようとするものである．これはブラインド信号源分離 (Blind Source Separation: BSS) を拡張した概念である．BSS は複数の未知の混合信号からそれぞれの信号源を分離するもので，ブラインド再構成では信号源以外の未知情報の解析も試みる．BSS の計算手法はさまざまに提案されており，信号処理 [1], [2], [3]，音声解析 [4], [5]，画像処理 [6], [7], [8] などの分野でよく用いられている．

近年，BSS の手法として観測信号の時間–周波数情報を利用するものが報告されている [9],[10],[11]．信号の時間情報をフーリエ変換やウェーブレット変換を用いて周波数領域や時間–周波数領域に展開することで，時間領域だけではわからなかったことを解析する手法である．この手法は，統計的仮定を課す手法に比べて，それらを用いない直接的な手法であり，数値計算においても精度よく計算ができる．例えば，BSS，ブラインド再構成は次のようにモデル化される [12].

$$x_k(t) = \sum_{j=1}^{N} a_{kj} s_j(t - c_{kj}) \qquad k = 1, \cdots, M \tag{1}$$

ここで，$x_k(t)$ は出力情報 (観測信号)，$s_j(t)$ は入力情報 (信号源) であり，M, N はそれぞれ観測点と信号源の数をあらわす．また，信号が混合される際の係数として，a_{kj} を減衰定数，c_{kj} を時間遅延 (時間差) としてあらわす．なお，すべての $c_{kj} = 0$ とすれば時間遅

*E-mail address: hsasaki.jpn@gmail.com

延のないモデルを扱うこともできる．(1) 式において，出力情報 $x_k(t)$ とその数 M のみを既知として，その他の未知情報，特に信号源 $s_j(t)$ を計算することが主な目的となる．さらにブラインド再構成では，減衰定数 a_{kj} や時間差 c_{kj} の計算結果をもとにして，信号位置や観測現場の情報などを解析することを目指す．

本稿では，ブラインド再構成の一例として，1 音源多重反射モデルを取り上げる．特に，音声信号を対象として，統計的手法を用いない直接的な手法について話を進める．これまでに 1 音源 1 回反射モデル [13]，1 音源 2 回反射モデル [14] の研究がなされているが，反射回数を多く考慮するモデルへの拡張は困難であると考えられた．そこで，従来法と異なる定式化を導入することで，多重反射モデルの解析を可能にした [15]．まずはその定式化について，[15] の内容に基づいて解説を行う．次に数値実験において極めて良好な結果が得られていることを報告する．

2　1 音源多重反射モデルの定式化

本章では 1 音源多重反射モデルの定式化について述べる．まず，本モデルの設定と主な仮定および目的を記す．それ以降に具体的な再構成方法を示す．今回の定式化では信号源に関するデータが順次計算されるところに特徴がある．その概略としては，最初に信号源の直接音に関する係数の特定を行い，それを初期値として観測データを解析していくことで信号源に関するデータが再構成される．さらに部屋の形状の定式化を行う．

2.1　モデル設定

1 音源多重反射モデルでは，ある凸多角形部屋（ただし形状は未知）の内部に 1 つの未知の音源があり，その音源から発せられる信号を観測する状況を考える．閉じた部屋の内部で信号を観測するため，信号が壁に反射することを考慮する必要がある．観測される信号としては，音源からの直接音と壁に 1 回，2 回，$\cdots$ と反射する音がある．図 1 は凸多角形部屋の内部で信号が観測点に伝わる様子を一例として模式的に表したものである．

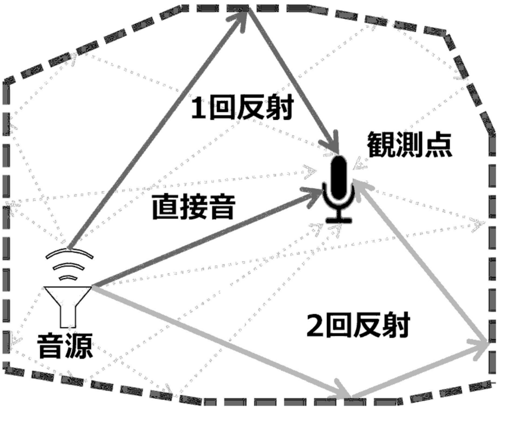

図 1: 凸多角形内部で信号が伝わる様子．

このような状況のもと1音源多重反射モデルの定式化を行う．部屋の形状を凸多角形（すなわちすべての壁が直線的）であるが具体的な形状は未知として，その大きさを20m四方程度とする．信号源データを $s(t)$ で表し，信号源は室内のある位置 s^{pos} から発せられ，移動しないものとする．観測点数を $M\,(M \geq 4)$ とし，観測データを $x_k(t)\,(k=1,2,\cdots,M)$，観測点の位置を x_k^{pos} で表す（観測点も動かないとする）．また観測点には全部で L 個の直接音と反射音（1回反射，2回反射，$\cdots$）が到達するとし，これを考慮波総数と呼ぶことにする．このとき，信号源と観測信号の間に次の関係が成り立つと仮定する．

$$x_k(t) = \sum_{j=1}^{L} a_{kj} s(t - c_{kj}) \qquad k = 1, \cdots, M \tag{2}$$

ここで，$a_{kj} > 0$ と $c_{kj} > 0$ は信号源と観測信号の位置に関する減衰定数と時間差である．本モデルでは，観測データ $x_k(t)$，観測点位置 x_k^{pos}，観測点数 M が既知であり，信号源データ $s(t)$，信号源位置 s^{pos}，減衰定数 a_{kj}，時間差 c_{kj}，考慮波総数 L，および部屋を構成する壁の位置は未知とする．本稿では単純化のため，モデルを2次元平面で扱うものとする．このとき，壁の位置は $A_i x + B_i y + C_i = 0$（ただし i は壁の枚数で未知）と表すことができる．また，便宜的に以下の仮定をする．

$$0 < c_{k1} < c_{k2} < \cdots < c_{kL} \qquad k = 1, \cdots, M \tag{3}$$

$$0 < c_{11} < c_{k1} \qquad k = 2, \cdots, M \tag{4}$$

このとき (2) 式の右辺において，各 k について $j = 1$ の項が直接音に関する項であると解釈できる．それは，それぞれの時間差 c_{kj} の中で c_{k1} が最小であり，観測信号を構成する L 個の音のうち直接音が最初に到達するからである．

以上の定式化のもと，既知の観測データ $x_k(t)$ と観測点位置 x_k^{pos} から未知の信号源 $s(t)$ と信号源位置 s^{pos} および部屋の形状（壁の方程式）を求めることがブラインド再構成の目的となる．

2.2 直接音に関する減衰定数比と相対時間差の特定

(2) 式をフーリエ変換することで次式を得る．

$$\hat{x}_k(\omega) = \left(\sum_{j=1}^{L} a_{kj} \mathrm{e}^{-i\omega c_{kj}} \right) \hat{s}(\omega) \qquad k = 1, \cdots, M \tag{5}$$

ただし，$\hat{\ }$ はフーリエ領域を表すものとする．任意の $l\,(1 \leq l \leq M)$ に対して，

$$\tilde{\hat{s}}(\omega) = a_{l1} \mathrm{e}^{-i\omega c_{l1}} \hat{s}(\omega) \tag{6}$$

と定義する．このとき，(5) 式を $\tilde{\hat{s}}(\omega)$ で表すと，

$$\hat{x}_k(\omega) = \left(\sum_{j=1}^{L} \frac{a_{kj}}{a_{l1}} \mathrm{e}^{-i\omega(c_{kj} - c_{l1})} \right) \tilde{\hat{s}}(\omega) \qquad k = 1, \cdots, M \tag{7}$$

となる．いま，$l=k_1$ と固定し，$k=k_1,k_2\ (k_1\neq k_2)$ に対して商関数 $\hat{h}(\omega)$ を次のように定義する．

$$\hat{h}(\omega):=\frac{\hat{x}_{k_2}(\omega)}{\hat{x}_{k_1}(\omega)}=\frac{\displaystyle\sum_{j=1}^{L}\beta_j\mathrm{e}^{-i\omega\eta_j}}{1+\displaystyle\sum_{j=2}^{L}\alpha_j\mathrm{e}^{-i\omega\zeta_j}} \tag{8}$$

ただし，$\alpha_j,\beta_j,\zeta_j,\eta_j$ はそれぞれ，

$$\alpha_j=\frac{a_{k_1j}}{a_{k_11}}>0,\quad \beta_j=\frac{a_{k_2j}}{a_{k_11}}>0,\quad \zeta_j=c_{k_1j}-c_{k_11}\geq 0,\quad \eta_j=c_{k_2j}-c_{k_11}>0 \tag{9}$$

である．ここで (8) 式右辺の分母において，任意の ω に対してゼロ点は単位円内にないものとする．この仮定は，

$$1=\alpha_1>\alpha_2+\alpha_3+\cdots+\alpha_L \tag{10}$$

と同等であり，直接音が反射音の合計より大きいことを意味し，壁の反射率が高い場合を除き，一般に成立する仮定である．

以下，実データを扱うことを考慮に入れ離散化して考える．観測点における総観測データ数を N とし，観測データ $x_k(t)$ に対して，$x_{k,0},x_{k,1},x_{k,2},\cdots,x_{k,N-1}$ を離散観測データ，観測データの時間刻みを $\Delta t\ (x_{k,j}=x_k(\Delta t\times j)$，観測時間 $T=\Delta t\times N)$，周波数刻みを $\Delta\omega$ とする．なお，Δt と $\Delta\omega$ の間には $\Delta t\times\Delta\omega=2\pi/N$ の関係が存在する．このとき，(8) 式右辺の指数部は，例えば，$\mathrm{e}^{-i\omega\zeta_j}=\mathrm{e}^{-i\cdot m\Delta\omega\cdot\tilde{\zeta}_j\Delta t}$ と離散化される．ただし，$\tilde{\zeta}_j$ は ζ_j を離散化し四捨五入した正の整数値である．離散化された整数値が $\tilde{\zeta}_j,\tilde{\eta}_j$ であるが，記号の煩雑を避けるため，以降 $\tilde{\zeta}_j,\tilde{\eta}_j$ を改めて ζ_j,η_j で表す．

(8) 式をフーリエ逆変換し，離散化を考慮すると

$$\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}h_kz^k=\frac{\displaystyle\sum_{j=1}^{L}\beta_jz^{\eta_j}}{1+\displaystyle\sum_{j=2}^{L}\alpha_jz^{\zeta_j}} \tag{11}$$

と表すことができる．ここで $z=\mathrm{e}^{-im2\pi/N}$ とおいた．いま，(10) 式の仮定より，

$$\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}h_kz^k\left(1+\sum_{j=2}^{L}\alpha_jz^{\zeta_j}\right)=\sum_{j=1}^{L}\beta_jz^{\eta_j} \tag{12}$$

とできる．(12) 式を展開し，z の係数 h_k ではじめにゼロにならない項を両辺で比較すると，

$$\frac{1}{N}h_{\tilde{k}}z^{\tilde{k}}=\beta_1z^{\eta_1} \tag{13}$$

となる．ただし $h_{\tilde{k}}$ は，$h_k\ (k=0,\cdots,N-1)$ のうちゼロでなく，k が最小のものを表している．ここで，(11) 式の左辺が既知であったことより，$h_{\tilde{k}}$ の値とその添え字 $\tilde{k}$ の値が既

知である．また総観測データ数 N も既知であるので，(13) より直接音に関する減衰定数比 $\beta_1(=a_{k_2 1}/a_{k_1 1})$ と相対時間差 $\eta_1(=c_{k_2 1}-c_{k_1 1})$ が判明する．これと同じ操作をすべての観測信号 $k=k_1$: fixed と $k=k_2,k_3,\cdots,k_M$ に対して行うことで，各観測信号の直接音に関する減衰定数比 $a_{k_j 1}/a_{k_1 1}$ と相対時間差 $c_{k_j 1}-c_{k_1 1}$ $(j=2,\cdots,M)$ を計算することができる．

2.3 信号源位置の特定

前章で計算した直接音に関する相対時間差 $c_{k_j 1}-c_{k_1 1}$ を利用して信号源の位置を特定する [16]．いま，信号の伝搬速度を V とする．直接音に関する相対時間差は，信号源 s^{pos} と 2 つの観測点 $x_{k_1}^{pos}, x_{k_j}^{pos}$ $(k_j \neq k_1)$ に関するものであり，伝搬速度 V を用いることで相対距離 $\mathrm{dist}_j = V(c_{k_j 1}-c_{k_1 1})$ に変換することができる．この相対距離について考えてみると，信号源位置 s^{pos} は 2 つの観測点 $x_{k_1}^{pos}, x_{k_j}^{pos}$ を焦点とする相対距離 dist_j の双曲線上に存在する，ということが言える．よって，観測点 $x_{k_j}^{pos}$ を $j=2,3,\cdots,M$ として少なくとも 3 つの双曲線を考え，それら双曲線の交点を求めることで信号源位置 s^{pos} が特定される（図 2 参照）．

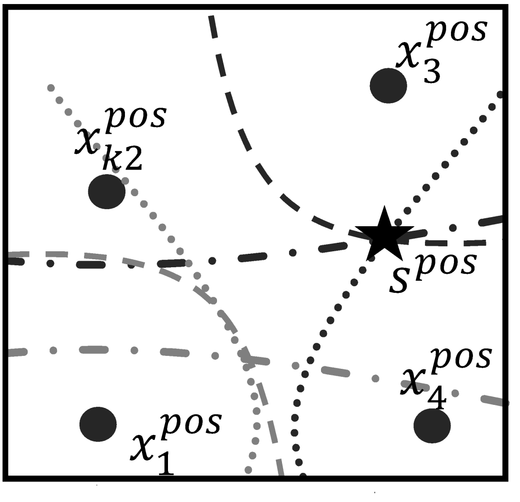

図 2: 双曲線を用いた音源位置特定の模式図.

2.4 減衰定数比と相対時間差の特定

信号源位置 s^{pos} が得られたことにより，その位置 s^{pos} と観測点位置 $x_{k_1}^{pos}$ および伝搬速度 V を考慮することで，x_{k_1} の直接音に関する時間差 $c_{k_1 1}$ を計算することができる．ただし計算上の $c_{k_1 1}$ は実数値として得られるが，離散化を考えているため，これを四捨五入して整数値とする．また，$\eta_1(=c_{k_2 1}-c_{k_1 1})$ が分かっていることから，x_{k_2} の直接音に関する

時間差 $c_{k_2 1}$ も求められる．いま，既知となった時間差 $c_{k_1 1}, c_{k_2 1}$ を用いて (2) 式を変形すると以下の 2 式が得られる．

$$y_{k_1}(t) := \frac{x_{k_1}(t + c_{k_1 1})}{a_{k_1 1}} = s(t) + \alpha_2 s(t - \zeta_2) + \cdots + \alpha_L s(t - \zeta_L) \tag{14}$$

$$y_{k_2}(t) := \frac{x_{k_2}(t + c_{k_2 1})}{a_{k_1 1}} = \beta_1 s(t) + \beta_2 s(t - \eta_2 + \eta_1) + \cdots + \beta_L s(t - \eta_L + \eta_1) \tag{15}$$

ただし (14) 式，(15) 式では，連続量と離散量が混在して記述されている．またそれぞれの式が $1/a_{k_1 1}$ 倍されているが，本来は未知の値である．ここで，(3)(4)(9) より，

$$0 = \zeta_1 < \zeta_2 < \cdots < \zeta_L \tag{16}$$

$$0 < \eta_1 < \eta_2 < \cdots < \eta_L \tag{17}$$

である．本論では次の仮定をする．

$$\text{任意の } j, k \text{ に対して } \zeta_j \neq \eta_k \tag{18}$$

この仮定は観測データ $x_{k_1}(t), x_{k_2}(t)$ におけるすべての相対時間差が，離散化してもすべて等しくならないという仮定である．具体的には，サンプリング周波数 $44100Hz$，伝搬速度 $340m/sec$ で観測データが得られている場合，時間差 1 step あたり約 $8mm$ 弱であり，$2.27 \times 10^{-5} sec$ 程度の違いがあればよい．もしこの仮定が観測データ $x_{k_1}(t), x_{k_2}(t)$ で成立しない場合には，任意の異なる観測データ $x_k(t), x_j(t)$, $k \neq j$ で成立すればよい．本稿では観測データ $x_{k_1}(t), x_{k_2}(t)$ で (18) が成り立つとする．

これまでに，直接音に関する減衰定数比 $\beta_1 (= a_{k_2 1}/a_{k_1 1})$ が得られており，この値を基準として逐次的な計算を行う．(14) 式 (15) 式において，左辺の $y_{k_1}(t), y_{k_2}(t)$ は定数倍 $1/a_{k_1 1}$ の自由度を除き既知と言える．それは観測データ $x_{k_1}(t), x_{k_2}(t)$ と時間差 $c_{k_1 1}, c_{k_2 1}$ が既知であることによる．いま，$y_{k_1}(t), y_{k_2}(t)$ を $y_{k_1,j}, y_{k_2,j}$, $(j = 0, 1, \cdots, N-1)$ と離散化して考える．なお離散化の条件は前述のものと同じである．ここで，

$$m_0 = \mathrm{Min}(\zeta_2 - 1, \eta_2 - \eta_1 - 1) \tag{19}$$

とすれば，

$$y_{k_1,j} = s_j,\ y_{k_2,j} = \beta_1 s_j \qquad (j = 0, 1, \cdots, m_0) \tag{20}$$

となる．$y_{k_1,j}, y_{k_2,j}$ の比を考えると，

$$y_{k_2,j}/y_{k_1,j} = \beta_1 \qquad (j = 0, 1, \cdots, m_0) \tag{21}$$

が言える．ただし，m_0 は，$\zeta_2 - 1, \eta_2 - \eta_1 - 1$ が未知であるため，$y_{k_2,j_0}/y_{k_1,j_0} \neq \beta_1$ なる項 $j_0 = m_0 + 1$ により決定される．さらに (12) 式で次の非ゼロの z 係数 h_k は (18) より，

$$h_{\eta_1+m_0+1}/N = \beta_2 \text{ or } \mathrm{h}_{\eta_1+\mathrm{m}_0+1}/\mathrm{N} = -\alpha_2\beta_1 \tag{22}$$

である．ここで，$\alpha_j > 0, \beta_j > 0$ であることに注意すると，(22) 式の $h_{\eta_1+m_0+1}$ の符号から，$h_{\eta_1+m_0+1}$ が正なら $\beta_2, \eta_2 - \eta_1$ の値が，$h_{\eta_1+m_0+1}$ が負なら α_2, ζ_2 の値が求まる．

次に，

$$m_1 = \begin{cases} \mathrm{Min}(\zeta_2 - 1, \eta_3 - \eta_1 - 1) & (h_{\eta_1+m_0+1} > 0) \\ \mathrm{Min}(\zeta_3 - 1, \eta_2 - \eta_1 - 1) & (h_{\eta_1+m_0+1} < 0) \end{cases} \tag{23}$$

とすれば，$j = m_0 + 1, \cdots, m_1$ に対して，

$$h_{\eta_1+m_0+1} > 0 \Rightarrow \begin{cases} y_{k_1,j} = s_j \\ y_{k_2,j} = \beta_1 s_j + \beta_2 s_{j-m_0} \\ (y_{k_2,j} - \beta_2 s_{j-m_0})/y_{k_1,j} = \beta_1 \end{cases} \tag{24}$$

$$h_{\eta_1+m_0+1} < 0 \Rightarrow \begin{cases} y_{k_1,j} = s_j + \alpha_2 s_{j-m_0} \\ y_{k_2,j} = \beta_1 s_j \\ y_{k_2,j}/(y_{k_1,j} - \alpha_2 s_{j-m_0}) = \beta_1 \end{cases} \tag{25}$$

が言える．ただし m_1 は

$$\begin{cases} (y_{k_2,j} - \beta_2 s_{j-m_0})/y_{k_1,j} \neq \beta_1 & (h_{\eta_1+m_0+1} > 0) \\ y_{k_2,j}/(y_{k_1,j} - \alpha_2 s_{j-m_0}) \neq \beta_1 & (h_{\eta_1+m_0+1} < 0) \end{cases} \tag{26}$$

なる項により決定される．以下，上述により既知となる値 $y_{k_1,i}, y_{k_2,i}, \alpha_i, \beta_i, \zeta_i, \eta_i$ とあらかじめ既知の h_k を用いることで，再帰的に $y_{k_1,j}, y_{k_2,j}, \alpha_j, \beta_j, \zeta_j, \eta_j$ $(i < j)$ を求めることができる．また時間差 $c_{k_1 1}$ がわかっているので，相対時間差 $\zeta_1 = c_{k_1 1} - c_{k_1 1}$ などから時間差 c_{kj} が得られる．このような計算をすべての観測データに対して行うことで，すべての減衰定数比と時間差を再構成することができる．

2.5 信号源の再構成

(20) の第一式より $y_{k_1,j} = s_j$ $(j = 0, 1, \cdots, m_0)$ であり，m_0 までの s_j が再構成される．また，すべての $y_{k_1,j}, y_{k_2,j}, \alpha_j, \beta_j, \zeta_j, \eta_j$ が得られているので，(14) 式の離散化されたものを考えることで，

$$s_j = y_{k_1,j} - (\alpha_2 s_{j-\zeta_2} + \alpha_3 s_{j-\zeta_3} + \cdots + \alpha_L s_{j-\zeta_L}) \tag{27}$$

となり，信号源データが再構成される．ただし，$s_{j-\zeta_k}$ について $j-\zeta_k < 0$ のときは $s_{j-\zeta_k} = 0$ とする．また，前述の通り再構成される信号源には定数倍の違いが生じている．

2.6 壁の位置の特定

これまでに，信号源位置 s^{pos} と，信号源から壁に反射を経た観測点 x_k^{pos} までの時間差 c_{kj} が判明している．ここで信号の伝搬速度 V を用いることで，$\mathrm{dist}_{kj} = Vc_{kj}$ のように時間差を距離の情報に変換することができる．ただし $k = 2, 3, \cdots, L$ の時間差 c_{kj} のどれが 1 回反射なのかは未知である（$k = 1$ の場合は仮定より直接音に関するものとわかっている）．そこで，1 回反射に関する時間差を仮に c_{kj}^1 とし，その距離を $\mathrm{dist}_{kj}^1 = Vc_{kj}^1$ とする．

また，1つの未知の壁 $A_i x + B_i y + C_i = 0$（方向ベクトル:$wall_i$）を考える．この壁に対して観測点 x_k^{pos} と鏡像の位置にある点を $\tilde{x}_k^{pos}$ とする．同様に観測点 x_j^{pos} の鏡像点を $\tilde{x}_j^{pos}$ とする（$k \neq j$）．このとき，未知の壁と各点の関係として以下が成り立つ（図3参照）．

$$\begin{cases} \overline{s^{pos}\tilde{x}_k^{pos}} = \mathrm{dist}_{kj}^1 \\ \overline{s^{pos}\tilde{x}_j^{pos}} = \mathrm{dist}_{jj}^1 \\ \overrightarrow{x_k^{pos}\tilde{x}_k^{pos}} \perp wall_i \\ \overrightarrow{x_j^{pos}\tilde{x}_j^{pos}} \perp wall_i \end{cases} \tag{28}$$

ここで $\overline{ab}$ は ab 間の距離をあらわす．この関係式(28)と M 個の観測点の時間差 $L-1$ 個を組み合わせて計算することにより，未知の壁の方程式が求まる．ただし複数の解が存在する場合は，壁と観測点の位置や再構成された部屋の形状から時間差を逆計算することにより，真の解が構成される．

以上の定式化により観測データ $x_k(t)$ とその位置 x_k^{pos} などから，信号データ $s(t)$ と信号位置 s^{pos} および壁の方程式が再構成できた．

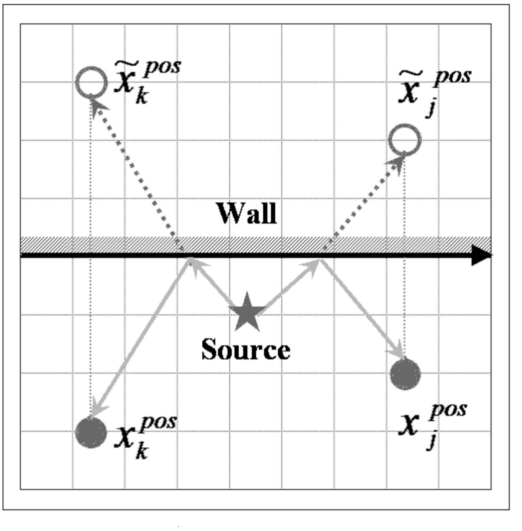

図 3: 観測点とその鏡像点，信号源，壁の位置関係．

3 数値実験

本章ではこれまでの定式化の有用性を確認するため，簡単な設定を用いて数値実験を行う．はじめに問題設定を行い，具体的にどのような数値で数値実験を行うかを記す．次に，実験結果を述べる．併せて，設定値と実験値で生じる誤差について，その要因として考えられるものを言及する．

3.1 問題設定

今回は2次元平面におけるモデルを考える．観測点数 $M=4$ とし，信号源と観測点の位置，部屋を構成する壁の方程式を図4のように設定する．図4において，信号源位置を $s^{pos}(s_x,s_y)$:星印，観測点位置を $x_k^{pos}(p_k,q_k)$:丸印，壁の方程式を $y=A_ix+B_i$:破線で表す．また，観測データとして任意の壁に対する2回反射までをすべて観測する．すなわち図4のような矩形の部屋を考えているので考慮波総数は $L=13$ となる．つまり，観測データは信号源からの直接音1つ，1回反射4つ，2回反射8つから構成される．信号源と観測データの間には，

$$x_k(t)=\sum_{j=1}^{13}a_{kj}s(t-c_{kj}) \qquad k=1,\cdots,4 \tag{29}$$

が成り立つとする．また定式化の際に述べた仮定を満たすものとする．観測条件としては，サンプリング周波数 $44100Hz$，信号の伝搬速度 $V=340m/sec$ とし，総ステップ数 $N=131072step$ （およそ2.97sec）の音声データを扱う [17]．信号源の時刻歴を図5に示す．表1-4に減衰定数比 a_{kj}/a_{11} と時間差 c_{kj} の設定値を示す．この設定値と(29)式を用いて観測データを作成する．その観測データの一例として $x_1(t)$ の時刻歴を図6に示す．以上の問題設定を行い，観測データ $x_k(t)$ とその位置 x_k^{pos} および，観測点数 $M=4$ のみがわかっているとして数値実験を行う．なお実験環境として，CPU Core i7(2.4Ghz)，8 GB RAMのノートパソコンを用いた．

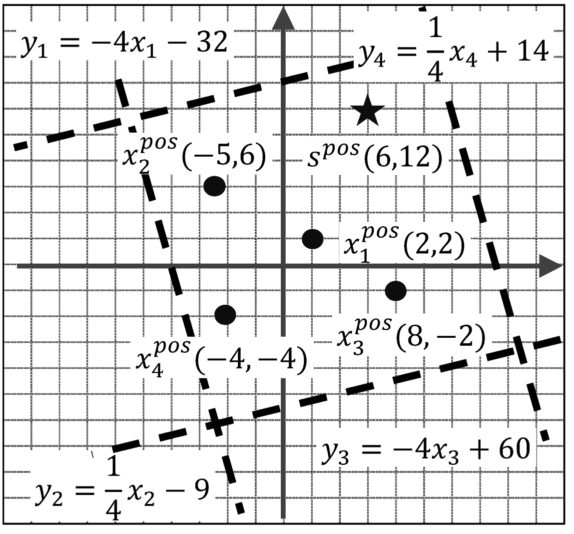

図 4: 信号源，観測点，壁の設定図.

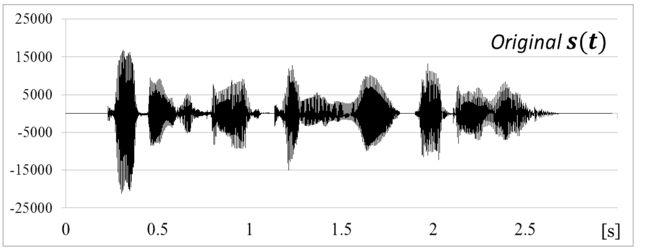

図 5: 信号源 $s(t)$ の時刻歴.

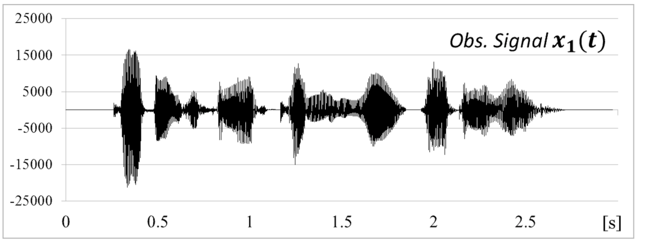

図 6: 観測信号 $x_1(t)$ の時刻歴.

3.2 数値実験結果

数値実験結果を表 1-6 と図 7 にまとめて示す．表 1-4 には，減衰定数比 a_{kj}/a_{11} と時間差 c_{kj} の設定値と実験値および誤差を表記した．減衰定数比の誤差は非常に小さく，ほぼ数値計算誤差の範囲内で求められている．時間差についてはどれも誤差が -1 となっているが，これは信号源の位置の誤差とそこから計算される c_{11} を四捨五入したことによるものといえる．図 7 には分離した信号源の時刻歴を示した．分離された信号源は定数倍の違いが生じているが，比較のため結果を $1/a_{11}$ 倍したものを図に記している．ここで，分離された信号源の誤差を評価するため次の式を用いる．

$$err = \frac{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1}(s_j - \tilde{s}_j/a_{11})^2}}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} s_j^2}} \tag{30}$$

ただし，分離された信号源を $\tilde{s}_j$ とした．この評価式を用いると誤差は，

$$err = 9.08 \times 10^{-8} \tag{31}$$

のようになった．表 5,6 にはそれぞれ信号源の位置と壁の方程式に関する設定値，実験値，誤差を記した．いずれの結果も予想される誤差の範囲内であり，予想される誤差としては離散化誤差がある．今回は観測条件としてサンプリング周波数 $44100Hz$，信号の伝搬速度 $V = 340m/sec$ を用いているので，$1step$ はおよそ $8mm$ であり，最大で約 $16mm$ に起因する誤差が生じると想定される．

表 1: 観測信号 $x_1(t)$ に関する減衰比，時間差の設定値，実験値，誤差.

減衰比	設定値	実験値	誤差	時間差	設定値	実験値	誤差
$a_{1,1}$ / $a_{1,1}$	1.00000000	1.00000000	0.00E+00	$c_{1,1}$	1397	1398	-1
$a_{1,2}$ / $a_{1,1}$	0.00356245	0.00356245	-5.20E-16	$c_{1,2}$	2173	2174	-1
$a_{1,3}$ / $a_{1,1}$	0.00251034	0.00251034	4.99E-17	$c_{1,3}$	2589	2590	-1
$a_{1,4}$ / $a_{1,1}$	0.00177601	0.00177601	-2.00E-16	$c_{1,4}$	3078	3079	-1
$a_{1,5}$ / $a_{1,1}$	0.00126904	0.00126904	3.99E-17	$c_{1,5}$	3641	3642	-1
$a_{1,6}$ / $a_{1,1}$	0.00112762	0.00112762	-2.40E-16	$c_{1,6}$	3863	3864	-1
$a_{1,7}$ / $a_{1,1}$	0.00104964	0.00104964	-1.10E-16	$c_{1,7}$	4003	4004	-1
$a_{1,8}$ / $a_{1,1}$	0.00085530	0.00085530	1.20E-16	$c_{1,8}$	4435	4436	-1
$a_{1,9}$ / $a_{1,1}$	0.00075288	0.00075288	7.99E-17	$c_{1,9}$	4727	4728	-1
$a_{1,10}$ / $a_{1,1}$	0.00064737	0.00064737	2.00E-16	$c_{1,10}$	5098	5099	-1
$a_{1,11}$ / $a_{1,1}$	0.00064151	0.00064151	-1.60E-16	$c_{1,11}$	5121	5122	-1
$a_{1,12}$ / $a_{1,1}$	0.00037448	0.00037448	-3.10E-16	$c_{1,12}$	6703	6704	-1
$a_{1,13}$ / $a_{1,1}$	0.00034640	0.00034640	-1.20E-16	$c_{1,13}$	6969	6970	-1

表 2: 観測信号 $x_2(t)$ に関する減衰比，時間差の設定値，実験値，誤差.

減衰比	設定値	実験値	誤差	時間差	設定値	実験値	誤差
$a_{2,1}$ / $a_{1,1}$	0.43636943	0.43636943	0.00E+00	$c_{2,1}$	1625	1626	-1
$a_{2,2}$ / $a_{1,1}$	0.00406601	0.00406601	-1.50E-16	$c_{2,2}$	2034	2035	-1
$a_{2,3}$ / $a_{1,1}$	0.00224719	0.00224719	1.90E-16	$c_{2,3}$	2736	2737	-1
$a_{2,4}$ / $a_{1,1}$	0.00187287	0.00187287	-1.50E-16	$c_{2,4}$	2997	2998	-1
$a_{2,5}$ / $a_{1,1}$	0.00173949	0.00173949	2.50E-16	$c_{2,5}$	3110	3111	-1
$a_{2,6}$ / $a_{1,1}$	0.00150642	0.00150642	1.70E-16	$c_{2,6}$	3342	3343	-1
$a_{2,7}$ / $a_{1,1}$	0.00093793	0.00093793	4.00E-16	$c_{2,7}$	4235	4236	-1
$a_{2,8}$ / $a_{1,1}$	0.00074077	0.00074077	-2.40E-16	$c_{2,8}$	4766	4767	-1
$a_{2,9}$ / $a_{1,1}$	0.00061052	0.00061052	1.99E-17	$c_{2,9}$	5249	5250	-1
$a_{2,10}$ / $a_{1,1}$	0.00056567	0.00056567	-3.70E-16	$c_{2,10}$	5454	5455	-1
$a_{2,11}$ / $a_{1,1}$	0.00053558	0.00053558	2.40E-16	$c_{2,11}$	5605	5606	-1
$a_{2,12}$ / $a_{1,1}$	0.00041153	0.00041153	-3.70E-16	$c_{2,12}$	6394	6395	-1
$a_{2,13}$ / $a_{1,1}$	0.00030951	0.00030951	1.23E-10	$c_{2,13}$	7373	7374	-1

表 3: 観測信号 $x_3(t)$ に関する減衰比，時間差の設定値，実験値，誤差.

減衰比	設定値	実験値	誤差	時間差	設定値	実験値	誤差
$a_{3,1}$ / $a_{1,1}$	0.33500000	0.33500000	0.00E+00	$c_{3,1}$	1834	1835	-1
$a_{3,2}$ / $a_{1,1}$	0.00270701	0.00270701	2.00E-16	$c_{3,2}$	2493	2494	-1
$a_{3,3}$ / $a_{1,1}$	0.00228741	0.00228741	1.50E-16	$c_{3,3}$	2712	2713	-1
$a_{3,4}$ / $a_{1,1}$	0.00176349	0.00176349	-5.10E-16	$c_{3,4}$	3089	3090	-1
$a_{3,5}$ / $a_{1,1}$	0.00164856	0.00164856	5.00E-16	$c_{3,5}$	3195	3196	-1
$a_{3,6}$ / $a_{1,1}$	0.00135783	0.00135783	-4.99E-17	$c_{3,6}$	3520	3521	-1
$a_{3,7}$ / $a_{1,1}$	0.00106838	0.00106838	-2.70E-16	$c_{3,7}$	3968	3969	-1
$a_{3,8}$ / $a_{1,1}$	0.00083893	0.00083893	2.60E-16	$c_{3,8}$	4478	4479	-1
$a_{3,9}$ / $a_{1,1}$	0.00069970	0.00069970	0.00E+00	$c_{3,9}$	4903	4904	-1
$a_{3,10}$ / $a_{1,1}$	0.00064141	0.00064141	3.00E-17	$c_{3,10}$	5121	5122	-1
$a_{3,11}$ / $a_{1,1}$	0.00048505	0.00048505	1.40E-16	$c_{3,11}$	5889	5890	-1
$a_{3,12}$ / $a_{1,1}$	0.00043077	0.00043077	1.19E-10	$c_{3,12}$	6249	6250	-1
$a_{3,13}$ / $a_{1,1}$	0.00029010	0.00029010	1.60E-16	$c_{3,13}$	7615	7616	-1

表 4: 観測信号 $x_4(t)$ に関する減衰比，時間差の設定値，実験値，誤差.

減衰比	設定値	実験値	誤差	時間差	設定値	実験値	誤差
$a_{4,1}$ /$a_{1,1}$	0.20280899	0.20280899	0.00E+00	$c_{4,1}$	2447	2448	-1
$a_{4,2}$ /$a_{1,1}$	0.00182482	0.00182482	1.99E-17	$c_{4,2}$	3036	3037	-1
$a_{4,3}$ /$a_{1,1}$	0.00172414	0.00172414	-2.00E-16	$c_{4,3}$	3124	3125	-1
$a_{4,4}$ /$a_{1,1}$	0.00129534	0.00129534	7.00E-17	$c_{4,4}$	3604	3605	-1
$a_{4,5}$ /$a_{1,1}$	0.00125554	0.00125554	1.90E-16	$c_{4,5}$	3661	3662	-1
$a_{4,6}$ /$a_{1,1}$	0.00123798	0.00123798	9.97E-18	$c_{4,6}$	3686	3687	-1
$a_{4,7}$ /$a_{1,1}$	0.00101166	0.00101166	-1.00E-16	$c_{4,7}$	4078	4079	-1
$a_{4,8}$ /$a_{1,1}$	0.00096921	0.00096921	1.80E-16	$c_{4,8}$	4166	4167	-1
$a_{4,9}$ /$a_{1,1}$	0.00088083	0.00088083	1.00E-16	$c_{4,9}$	4370	4371	-1
$a_{4,10}$ /$a_{1,1}$	0.00084847	0.00084847	-4.00E-17	$c_{4,10}$	4453	4454	-1
$a_{4,11}$ /$a_{1,1}$	0.00080113	0.00080113	-9.00E-17	$c_{4,11}$	4583	4584	-1
$a_{4,12}$ /$a_{1,1}$	0.00028438	0.00028438	1.70E-16	$c_{4,12}$	7692	7693	-1
$a_{4,13}$ /$a_{1,1}$	0.00028092	0.00028092	3.00E-17	$c_{4,13}$	7739	7740	-1

表 5: 音源位置 s^{pos} の設定値，実験値，誤差.

音源座標	X-座標	Y-座標
設定値	6.00000000	12.00000000
実験値	6.00155092	12.01184268
誤差	0.00155092	-0.01184268

表 6: 壁の方程式 $y = A_i x + B_i$ の設定値，実験値，誤差.

$y = A_1 x + B_1$	A_1 (傾き)	B_1 (y切片)	$y = A_2 x + B_2$	A_2 (傾き)	B_2(y切片)
設定値	-4.00000000	-32.00000000	設定値	0.25000000	-9.00000000
実験値	-3.98298948	-31.86452393	実験値	0.24976148	-8.99654959
誤差	-0.01701052	-0.13547607	誤差	0.00023852	-0.00345041
$y = A_3 x + B_3$	A_3 (傾き)	B_3 (y切片)	$y = A_4 x + B_4$	A_4 (傾き)	B_4 (y切片)
設定値	-4.00000000	60.00000000	設定値	0.25000000	14.00000000
実験値	-4.03156419	60.35676155	実験値	0.24991111	14.00943435
誤差	0.03156419	-0.35676155	誤差	0.00008889	-0.00943435

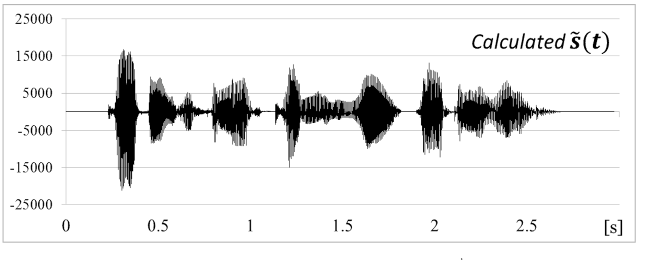

図 7: 分離された信号源 $\tilde{s}(t)/a_{11}$ の時刻歴.

4 おわりに

本論では，ブラインド再構成とその適用例について述べた．その中でも特に 1 音源多重反射モデルを取り上げ，そのモデル設定と定式化についての解説を行った．また数値実験

においては極めて良好な結果を得ることができ，定式化の妥当性が示された．今回の定式化は簡単のため 2 次元平面で行ったが，3 次元への拡張もいくつかの定式化部分を変えることで可能と考えられる．さらに部屋の形状が曲線のような場合についても直線で近似することで計算できると考えられるが，実際にどの程度の精度で形状が再構成されるかを評価する必要がある．また一般的に成り立ちうる仮定をいくつか用いたが，これらの仮定を満たさない場合についての検討は今後の課題である．

ブラインド再構成は，今回の一例以外にもさまざまなモデルが考案できる．例えば，今回のモデルでは信号源を 1 つとしたが，これを複数の音源に拡張することが考えられる．また，音の減衰は一般に距離と周波数に依存すると知られており，特により広い範囲で観測を行う場合には音の減衰の周波数依存性を考慮する必要がある．さらには，音声信号でなく画像処理や信号処理の分野への応用もあるだろう．このように広範に拡張できる可能性を秘めており，今後の発展が期待される．

参考文献

[1] Edger Carlos and Jun-ichi Tanaka, ICA based blind source separation applied to radio surveillance, IEICE Trans. Commun., Vol. E86-B, No. 12, 3491-3497, 2003.

[2] Shmulik Markovich-Golan, Shron Gannot and Israel Cohen, Blind sampling rate offset estimation and compensation in wireless acoustic sensor networks with application to beamforming, Proc. International Workshop on Acoustic Signal Enhancement, Aachen, September, 2012.

[3] Nobutaka Ito, Emmanuel Vincent, Tomohiro Nakatani, Nobutaka Ono, Shoko Araki and Shigeki Sagayama, Blind suppression of nonstationary diffuse acoustic noise based on spatial covariance matrix decomposition, J. Signal Process. Syst., Vol. 79, No. 2, 145-157, 2015.

[4] Radu Balan and Justinian Rosca, Statistical properties of STFT rations for two channel systems and applications to blind source separation, Proceedings ICA and BSS2000, 2000.

[5] Domenico Napoletani, Carlos Berenstein, Parvathi Krishnaprasad and Giuseppe Struppa, Quotient signal estimation, Progress in Mathematics, Birkhauser, Boston, Mass, Vol. 238, 151-162, 2005.

[6] Leonardo Duarte, Yves-Marie Batany and Joao Romano, Blind source separation: Principles of independent and sparse component analysis, Signals and Images, 3-27, 2015.

[7] Jie Liu, Jack Xin and Yingyong Qi, A Soft-Constrained Dynamic Iterative Method of Blind Source Separation, SIAM Mulitiscale Model. Simul., Vol. 7, No. 4, 1795-1810, 2009.

[8] Yuanchang Sun and Jack Xin, Underdetermined Sparse Blind Source Separation of Nonnegative and Partially Overlapped Data, SIAM J. Sci. Comput., Vol. 33, No. 4, 2063-2094, 2011.

[9] Domenico Napoletani, Carlos Berenstein and Parvathi Krishnaprasad, Quatient Signal Decomposition and Order Estimation, Technical Reseach Report of Univ.Maryland, TR2001-47.

[10] 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, pp.37-42, 2005.5.

[11] 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, pp.31-36, 2005.5.

[12] Ryuichi Ashino, Takeshi Mandai, Akira morimoto and Fumio Sasaki, Blind source separation of spatio-temporal mixed signal using time-frequency analysis, Applicable Analysis, Vol. 88, Issue 3, 425-456, 2009.

[13] Yusuke Miyakawa, Fumio Sasaki, Kahori Iiyama, Osamu Tanaka and Masahito Yasuoka, Blind source separation and localization in case of one reflection problem of one source signal, 20th international congress on acoustic, ICA2010, Sydney, 2010.

[14] 佐々木勇人, 佐々木文夫，箭内恵美，田中治，安岡正人，ブラインド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–, 日本建築学会学術講演梗概集, (東海) pp.169-170, 2012.

[15] Hirofumi Sasaki, Fumio Sasaki and Michio Yamada, Blind separation of multi-reflected signals in a convex polygonal room, internoise2015, San Francisco UAS, 2015.

[16] 佐々木文夫, 上田将吾，安岡正人，田中治，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–，建築学会環境系論文集, Vol.74 No.639, pp.542-552, 2009.

[17] 日本建築学会，建築と環境のサウンドライブラリ，技法堂出版，2004.