

複素スペクトル円心 (CSCC) の推定に基づく マイクロホンアレーによる雑音抑圧

井上 和士[†] 鎌本 優[†] 岡嶋 崇[†] 西本 卓也[†] 嵯峨山茂樹[†]

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科

〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: †{inoue,kamamoto,t-okajima,nishi,sagayama}@hil.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本報告では、複素スペクトル円心 (CSCC) 法と呼ぶ原理に基づいてマイクロホンアレーを用いた雑音除去のアルゴリズムについて検討する。CSCC 法は雑音が一方から到来するという仮定の下で、目的信号スペクトルの推定を複素平面上において観測信号から円心を推定するという非線型な処理に帰着させる方法である。さらに推定円心と観測信号でなす角度は雑音の到来方向の情報を持つことから、フレーム毎に雑音到来方向推定を行うことで、従来の CSCC 法では扱わなかった角度方向の誤差を扱う方法を示す。シミュレーションによる実験によって本手法の雑音除去性能を評価し、Delay-and-Sum 法に比べ最大で約 15dB、150ms の残響下で約 9dB の雑音除去性能を示すことができた。また従来の CSCC 法に対し、雑音方向推定を用いた方法では残響環境下でさらに平均で約 1dB の性能の向上を得た。

キーワード マイクロホンアレー 複素スペクトル 位相差 CSCC 法

Complex Spectrum Circle Centroid Method for Microphone-Array-Based Noise Reduction

Kazuhito INOUE[†], Yutaka KAMAMOTO[†], Takashi OKAJIMA[†], Takuya NISHIMOTO[†], and Shigeki SAGAYAMA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

E-mail: †{inoue,kamamoto,t-okajima,nishi,sagayama}@hil.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract We propose an approach based on Complex Spectrum Circle Centroid (CSCC) of restoring complex spectrum of the target signal from multiple microphone input signals in noisy environment. By synchronizing the target signal with a proper time delay, the observed noise signals lie on the outline of a circle centered at target signal on the complex spectrum plane. The spectrum of target signal can be restored by estimating the center of the circle. We further propose a combination of this method with direction of arrival estimation of noise. The angles between microphone inputs in complex plane have information about direction of noise. Under consideration that this angle must be proportional to frequency, we can apply regression line approximation to the given angle estimate obtained along frequency-bins. Hence the target spectrum can be reestimated with the help of the approximated regression line. For evaluation of the proposed method, simulated experiments were performed. Signal-to-Noise Ratio improved about 15 dB in anechoic room and about 9 dB in reverberant(150 ms) room compared to Delay-and-Sum.

Key words Microphone array, Complex spectrum, CSCC method, Phase difference

1. はじめに

本報告では、複素スペクトル円心 (CSCC) 法に基づいて目的の音声を強調し雑音を低減するマイクロホンアレー信号処理手

法に関する検討結果を報告する。

マイクロホンにより音響信号を受音する際、実環境においては周囲の雑音や残響の影響を受けて目的の音響信号がしばしば劣化する。このように劣化した音響信号は聴取者にとって聴き

取りづらばかりでなく、計算機による音声認識やピッチ抽出などの音響分析の性能を低下させる。

近年、ハンズフリーホンやテレビ会議など、音声をインタフェースとするさまざまなサービスが実現に向け研究されており、使用快適性の点からハンズフリー收音であることが望ましいが、その場合の SN 比は近接マイクに比べ低下し、環境中の雑音・残響がよりクリティカルに影響する。このため、目的信号を強調し、雑音成分を除去する技術に関する研究が盛んに行われている。その一分野としてマイクロホンアレーを用いた研究があり、多数のマイクロホンを用いることにより、単点收音では得ることのできない信号の到来方向に関する空間的な情報を得ることができる。

最も古典的な手法の一つである Delay-and-Sum 法は目的音声の到来方向を既知とし、その方向に指向性のビームを構成する方法であり、雑音に特別な仮定をおかないため実環境においても頑健な方法であるが [1] [2]、素子数が少ない場合、特に低域においてサイドローブが残ってしまい、その性能は十分とはいえない。

一方、雑音に対し適応的にフィルタを構成する方法としては、Griffiths-Jim [3] や AMNOR [4] などさまざまな手法が提案されており、有効性が確認されている。しかし、実際の応用では雑音方向が固定でなく移動・出没する場合も多く、適応に必要な時間遅れのため十分な性能を発揮できない場合がある。また、学習のためには概して雑音のみの区間を必要とし、雑音区間推定技術を必要とする。雑音が音声などの非正常信号である場合も多く、フィルタの逐次的な更新には注意が必要である。

近年では独立成分分析 (ICA) に基づくブラインド音源分離の研究が盛んに行われている [5]。この方法は目的信号の到来方向情報を必要としないが、音源が互いに独立であることを仮定して目的信号の抽出をする。ICA には大別して時間領域で行う方法と周波数領域で行う方法があり、音声を扱う場合、実環境では混合行列が畳み込みで表現されるため主に周波数領域の ICA が用いられる。周波数領域 ICA と時間領域 ICA を多段に組合せる方法 [6] や ICA の出力に適応型ビームフォーマを用いる方法 [7] などが提案されており、実環境でも高い性能を示している。また、ICA では信号の独立性を評価する評価関数の設計が重要となるが、Bach and Jordan はガウシアンカーネルを用いる方法 [8] を提案している。ICA は信号の統計的な性質を用いるため、十分な分離性能を得るには多数のサンプルを用いる必要があり、歩き回る話者、動く雑音源、突発的な雑音などの環境の頻繁な変化に対する適応には限界がある。

我々は複素スペクトル円心 (CSCC) 法と呼ぶマイクロホンアレーを用いた新しい目的音推定法を提案した [11], [12]。本手法はフレーム毎、周波数毎に目的信号のスペクトルを推定する方法であり、非線型なフィルタに相当する。以前の報告では音声認識への応用を行ったが、本稿では本手法で得られたスペクトルを時間領域に再変換し、音声の品質としての評価を行う。また、新たに CSCC 法によって得られる雑音の到来方向情報を利用し雑音除去を行う手法を提案し、シミュレーションによる実験評価を行う。

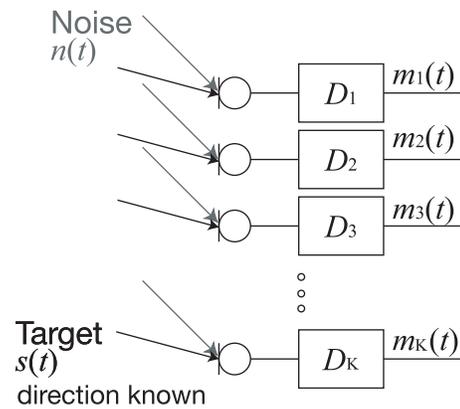


図 1 各マイクロホンで受信した信号 $m_i(t)$ は遅延 D_i により、目的信号に対して同相化され得られる。

Fig. 1 Sound propagation to the microphone array. $m_i(t)$ is given by synchronizing the target signal with a proper time delay.

以下、2 章では提案する複素スペクトル円心 (CSCC) 法のアルゴリズムについて述べる。3 章では本手法に雑音の到来方向推定を組み合わせた方法を示す。4 章では提案法の性能をシミュレーションを通して評価する。5 章では本報告のまとめと今後の展望を示す。

2. 複素スペクトル円心 (CSCC) 法

2.1 複素平面上でのマイクロホン入力

図 1 に示すように目的音源及び単一の雑音源からの音響信号が、それぞれ別の方向から到来し、 K 個のマイクロホンで收音される状況を仮定する。目的音源の到来方向が既知であると仮定すると各マイクロホンで観測した信号にそれぞれ適当な遅延 D_i を与え目的音源に対して同相化を行えば、 i 番目のマイクロホンの観測信号 $m_i(t)$ は以下のように表すことができる。

$$m_i(t) = s(t) + n(t - \tau_i), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

ここで $s(t)$ と $n(t)$ はそれぞれ時刻 t における目的信号と雑音信号、 τ_i は i 番目のマイクロホンでの目的信号と雑音の間の到達時間差である。これをフーリエ変換すれば、周波数 ω の成分は

$$M_i(\omega) = S(\omega) + N(\omega)e^{-j\omega\tau_i}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

となる。式 (2) を幾何学的に解釈すると、図 2 に示すように複素平面上で全ての $M_i(\omega)$ は $S(\omega)$ を中心とした半径 $\|N(\omega)\|$ の円上に位置する。したがってこれらの円周上の点が 3 個以上あれば、円の中心が求められ、目的信号のスペクトル $S(\omega)$ が得られる。この原理に基づく信号処理手法を CSCC 法と呼ぶ。一方、Delay-and-Sum によって求められる信号の短時間スペクトルは、幾何学的には観測信号の短時間スペクトルの重心であり、一般に真のスペクトルとは一致しない。

以上の原理は異なる周波数ごとに独立に成り立つ。すなわち、周波数ごとに雑音方向が異なっても良い。雑音が複数の音声であるような場合、それらの基本周波数やフォルマント周波数が異なれば、周波数ごとに優勢な雑音成分は一方向のみであると

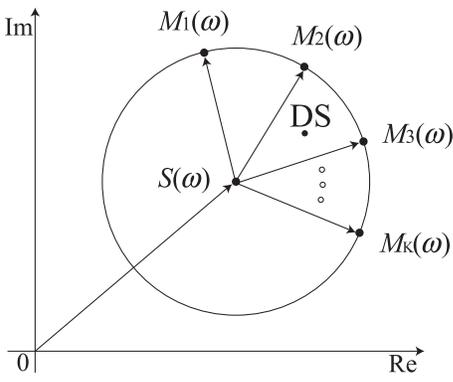


図2 各マイクロホンで受信した信号の周波数 ω における複素平面上での配置．図中の点 DS は観測点の重心であり，Delay-and-Sum 法により得られる． $S(\omega)$ は円心であり，本手法によって得られる．

Fig.2 Arrangement of signals received at microphones on complex plane. $S(\omega)$ is given by proposed method, while the point DS is given by Delay-and-Sum.

見なせる場合があり，効果が期待できる．また，短時間フレームごとに分析を行えば，フレームごとに移動するような雑音成分や突発的な雑音にも対応可能である．

2.2 円心推定の方法

実際に得られる各 $M_i(\omega)$ は複素平面上で上記の円上からずれて位置する．その理由としては，短時間フレームによる切り出しの影響，マイクロホン特性のばらつき，信号のパワーの減衰，一つの帯域への複数方向からの雑音，残響などの要因などが考えられる．これら誤差要因のそれぞれを個別に議論するのは困難である．そこで，誤差分布は正規分布で近似し，円心 $S(\omega)$ の推定に最尤法を用いる． $M_i(\omega)$ ， $S(\omega)$ で作る距離 $\|M_i(\omega) - S(\omega)\|$ の 2 乗の誤差は正規分布に従うと仮定すると，その対数尤度 $L_{r,2}(M(\omega); X, Y, R^2)$ は

$$L_{r,2}(M(\omega); X, Y, R^2) = -\frac{K}{2} \log 2\pi\sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K ((x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 - R^2)^2 \quad (3)$$

となる．ただし $M(\omega) = (M_1(\omega), M_2(\omega), \dots, M_K(\omega))^T$ ， $M_i(\omega) = x_i + jy_i$ ， $\tilde{S}(\omega) = X + jY$ ， R は円の半径， σ^2 は正規分布の分散を表す．式 (3) が最大となるとき，それぞれのパラメータについて，偏微分が 0 となることから次式を得る．

$$R^2 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K ((x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2) \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \text{Var}[x_i] & \text{Cov}[x_i, y_i] \\ \text{Cov}[x_i, y_i] & \text{Var}[y_i] \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \text{Cov}[x_i, x_i^2] + \text{Cov}[x_i, y_i^2] \\ \text{Cov}[y_i, y_i^2] + \text{Cov}[x_i, y_i^2] \end{pmatrix} \quad (5)$$

ただし $\text{Var}[a]$ は a の分散， $\text{Cov}[b, c]$ は b ， c の共分散を表す．式 (5) より $\tilde{S}(\omega) = X + jY$ は解析的に求められることがわか

る．ただし上式が上式のように解けるためには x_i と y_i の共分散行列

$$S_{xy} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \text{Var}[x_i] & \text{Cov}[x_i, y_i] \\ \text{Cov}[x_i, y_i] & \text{Var}[y_i] \end{pmatrix} \quad (6)$$

が正則であることが必要である．行列 S_{xy} の行列式は x_i と y_i の相関係数を用いて

$$\det(S_{xy}) = \text{Var}[x_i]\text{Var}[y_i](1 - r_{xy}^2) \quad (7)$$

と表せる．相関係数 r_{xy} の絶対値は 1 以下であり，絶対値が 1 に等しくなるのは点 $M_i(\omega)$ が複素平面上で一直線上に並ぶときに限られるが，1 に近い場合，式 (5) は誤差の影響を受け易い不安定な式となるため，何らかの補償が必要である．本稿ではこの不安定性を避けるため， r_{xy} の 2 乗が 0.99 を越えた場合には Delay-and-Sum と同様に $M_i(\omega)$ の重心を目的信号の短時間スペクトル推定値とした．

多角形の外接円の中心を求める演算は雑音のスペクトルに対して非線形な処理であるので，従来の線形フィルタによる処理にはない性質を持つ．また，適応学習処理を必要とせず，周波数成分ごとに信号のスペクトルが推定できる．さらに，目的信号と雑音が独立である必要はない．

2.3 時間信号への変換

以上の議論を短時間フレームごとに，周波数成分ごとに行う．短時間フレームごとに円心として推定された $S(\omega)$ をフーリエ逆変換して時間領域に戻し，フレームをずらしながら加算すれば，雑音を軽減した目的信号が得られる．以上の手続きが図 3 の前半部にあたる．

短時間フレームごとに独立した処理であるので，雑音方向や雑音特性が動的に変化する場合にも対応できる．

3. 雑音の到来方向推定を用いる CSCC 法

3.1 雑音到来方向推定

前章での円心推定方法では各マイクロホン観測点は半径方向にのみ誤差が含まれるという仮定の下での推定であった．例えば残響を誤差として見積もるとすると，これは複素平面上で複素数の足し算となり，半径方向の誤差を考えるだけでは不十分である．半径方向の誤差に加えて円の角度方向の誤差も扱うことで，より頑健な円心推定ができると考えられる．

一方，複素平面上で各マイクロホン間でなす角度は物理的には雑音の到来方向という意味を持つ．今，マイクロホン間隔は既知かつ等間隔 d とする．複素平面上において観測点 $M_{i+1}(\omega)$ と $M_i(\omega)$ および円心 $S(\omega)$ とで作る角度 ϕ_i (今後この角度のことをマイクロホン間角度と呼ぶ) は，目的信号の到来方向から見た雑音の到来方向 θ 及び音速 c を用いて

$$\phi_i = \omega(\tau_{i+1} - \tau_i) = \frac{d \sin \theta}{c} \omega \quad (8)$$

と表せる．つまりマイクロホン間角度は周波数 ω に比例し，その傾きは雑音の到来方向に当たる．角度方向の誤差を考えると雑音の到来方向推定を行うことを意味する．

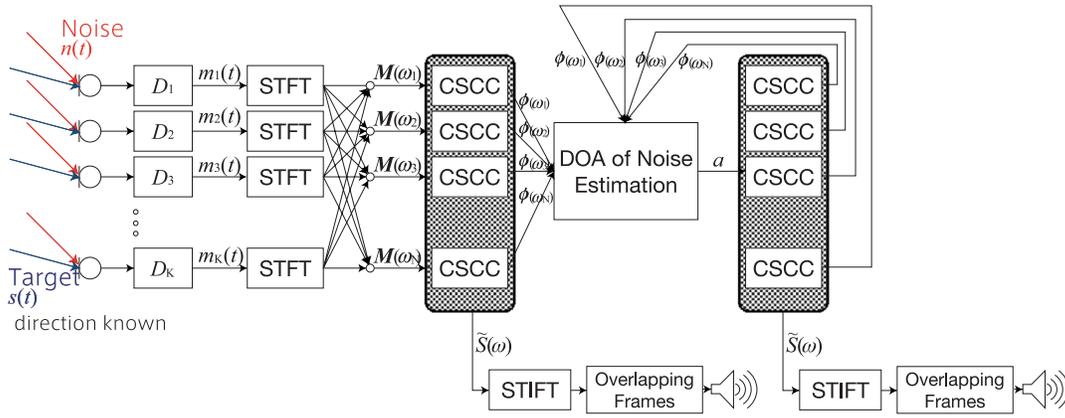


図3 複素スペクトル円心 (CSCC) 法の手順. 同相化信号 $m_i(t)$ はフレーム毎にフーリエ変換され周波数ごとに集められ, 円心の推定により $\tilde{S}(\omega)$ を得る (2章). この推定スペクトル $\tilde{S}(\omega)$ を初期点としマイクロホン間角度を求め, 雑音方向推定を行う. 角度誤差を用いた CSCC 法及び雑音到来方向推定は収束するまで繰り返し行われる (3章).

Fig.3 Diagram of CSCC method.

実際にはさまざまな誤差要因のため, 推定されたマイクロホン間角度がすべて等しい角度を持つとは限らない. 本方法では式 (8) の直線を回帰分析により求める.

今, 推定目的信号スペクトル $\tilde{S}(\omega)$ は与えられているとするとマイクロホン間角度 $\phi_i(\omega)$ は

$$\phi_i(\omega) = \arccos \left(\frac{(M_{i+1}(\omega) - \tilde{S}(\omega), M_i(\omega) - \tilde{S}(\omega))}{\|M_{i+1}(\omega) - \tilde{S}(\omega)\| \cdot \|M_i(\omega) - \tilde{S}(\omega)\|} \right) \quad (9)$$

で得ることができる. 回帰直線のパラメータは明らかに傾き a のみであり,

$$a = \frac{\sum_{\omega} \phi(\omega)\omega}{\sum_{\omega} \omega^2} \quad (10)$$

で与えられる. ただし, $\phi(\omega) = (\phi_1(\omega), \phi_2(\omega), \dots, \phi_{K-1}(\omega))^T$ である.

3.2 角度誤差を取り入れた CSCC 法

円心の推定は, マイクロホン間角度によっても行うことができる. 式 (10) より, 周波数 ω における推定マイクロホン間角度 $\tilde{\Phi}(\omega) = a\omega$ が得られているとすると, 各マイクロホン間角度の誤差は平均 $\tilde{\Phi}(\omega)$ を中心とした, 分散 ζ^2 の正規分布に従うと仮定すれば, 次の対数尤度から円心の推定を行うことができる:

$$L_a(\mathbf{M}(\omega); X, Y) = -\frac{K-1}{2} \log 2\pi\zeta^2 - \frac{1}{2\zeta^2} \sum_{i=1}^{K-1} (\phi_i - \tilde{\Phi}(\omega))^2. \quad (11)$$

したがって半径方向及び角度方向誤差を考慮した対数尤度 $L_{ra}(\mathbf{M}(\omega); X, Y, R)$ は

$$L_{ra}(\mathbf{M}(\omega); X, Y, R) = L_r(\mathbf{M}(\omega); X, Y, R) + L_a(\mathbf{M}(\omega); X, Y)$$

$$= -\frac{K}{2} \log 2\pi\sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K \left(\frac{\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2}}{R} - 1 \right)^2 - \frac{K-1}{2} \log 2\pi\zeta^2 - \frac{1}{2\zeta^2} \sum_{i=1}^{K-1} \left(\frac{\phi_i}{\tilde{\Phi}(\omega)} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

のように与えることとした. 半径方向の誤差と角度方向の誤差は互いに直交し, それぞれの誤差分布の積として書くことができる. 半径に対する誤差の比及び $\tilde{\Phi}(\omega)$ に対する角度の比が正規分布に従うと仮定し, 互いの平均を正規化している. 式 (12) の最大化問題は解析的に解くことはできない. 本稿では共役勾配法 [9] を用いて数値計算的に最大化させることとした.

以上の手順を以下に示す. また, 図3に概略を示す.

- 従来型の CSCC 法で初期パラメータ X, Y を求める.
- マイクロホン間のなす角 ϕ_i を求め, 回帰分析により雑音の到来方向を推定する.
- 式 (12) で表す対数尤度を最大化するパラメータ X, Y を求める.
- 雑音到来方向が収束するまで繰り返す.

前章で述べたように CSCC 法は周波数ごとの処理であるため帯域ごとに異なる方向からの雑音に対応可能という利点を持つが, 雑音の到来方向推定を用いる方法の場合, フレーム内における雑音数を厳密に1つとして仮定する必要がある.

4. シミュレーション実験による評価

4.1 実験条件

提案法の有効性を確認するため, シミュレーションで実験を行い, 雑音除去性能を評価した. イメージ法 [10] を用いて計算機上で閉空間の音響特性を作成し, 評価信号に畳み込んだ. 部屋の大きさは $6.00 \times 5.00 \times 3.00 \text{m}^3$ とし, 壁の反射係数を変化させることにより, 部屋の残響時間を変化させた. 残響時間は 0ms (反射無し), 150ms とした. 作成した部屋の模式図を図4に示す. マイクロホンアレーは直線型とし, 素子間距離を 4cm とした. マイクロホン数の違いによる性能の差を評価するた

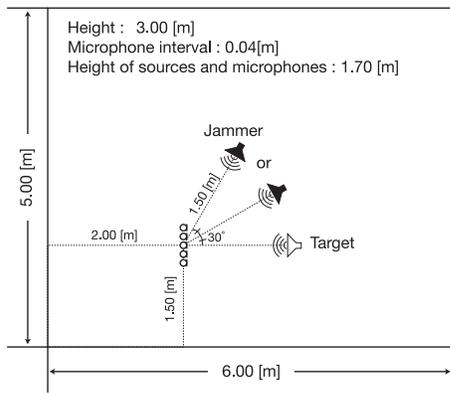


図 4 計算機上でシミュレートした部屋及び音源，センサの配置
Fig. 4 Simulated room for experiment.

め，マイクロホン数は 3, 5, 7, 9 の 4 つの場合で実験を行った。またマイクロホン特性は全てのマイクロホンで均一であるとした。目的音源はアレー正面から見て 0° 方向，妨害音源は 30° あるいは 60° から到来するとし，マイクロホンアレーからの距離は 1.50m とした。床からの高さは，マイクロホンアレーおよび信号源ともに 1.70m とした。また，音速は 345m/s とした。評価音声は日本音響学会の新聞記事読み上げ音声コーパスから男女 2 名を選び，また雑音として妨害音声を男女各 1 名ずつを用意し，計 8 種の組み合わせで実験を行った。音源のサンプリング周波数は 8kHz とした。短時間スペクトル分析では分析フレーム幅を 37.5ms，フレームシフトを 18.75ms，窓関数をハミング窓とした。性能評価尺度としては Noise Reduction Rate(NRR = 出力 SNR - 入力 SNR) を用いた。評価の対象として提案法 (CSCC)，雑音到来方向推定を用いた CSCC 法 (CSCC+DOA)，従来法として Delay-and-Sum(DS) を選んだ。CSCC+DOA ではパラメータ σ^2 及び ζ^2 を事前に与える必要がある。この値はそれぞれ 0.01 とした。また雑音として音声を扱っているため，評価音声には雑音がない区間も存在する。回帰分析による直線当てはめの精度により雑音方向情報の利用を閾値処理で決定した。

なお本実験では目的音声に対して厳密な同相化は行っていない。例えばマイクロホン数が 9 本の場合， 0° 方向から到来する目的信号をアレーの中心のマイクロホンと端点のマイクロホンとで受音する際，約 2.46×10^{-2} ms の遅延が生じる。この時間差は 8kHz サンプリングで約 0.2 サンプルの遅れとなるが，この遅延は無視することとした。実際，この遅延を厳密に同相化するためにはマイクロホンアレーと目的信号源の相対的な 3 次元位置が既知である必要があり，音源方向以上の情報を与えなければならない。

4.2 実験結果及び考察

雑音除去結果及び CSCC+DOA による雑音到来方向推定結果をそれぞれ図 5 図 6 に示す。無響条件及び残響 150ms の条件とも提案法は DS に比べ，マイクロホンの数，雑音到来方向によらず，雑音の低減を行うことができた。無響条件では最大で約 14dB，150ms の残響下では最大約 9dB の SN 比の改善が見られた。

雑音到来方向が 60° の条件に比べ 30° の場合は一般に性能

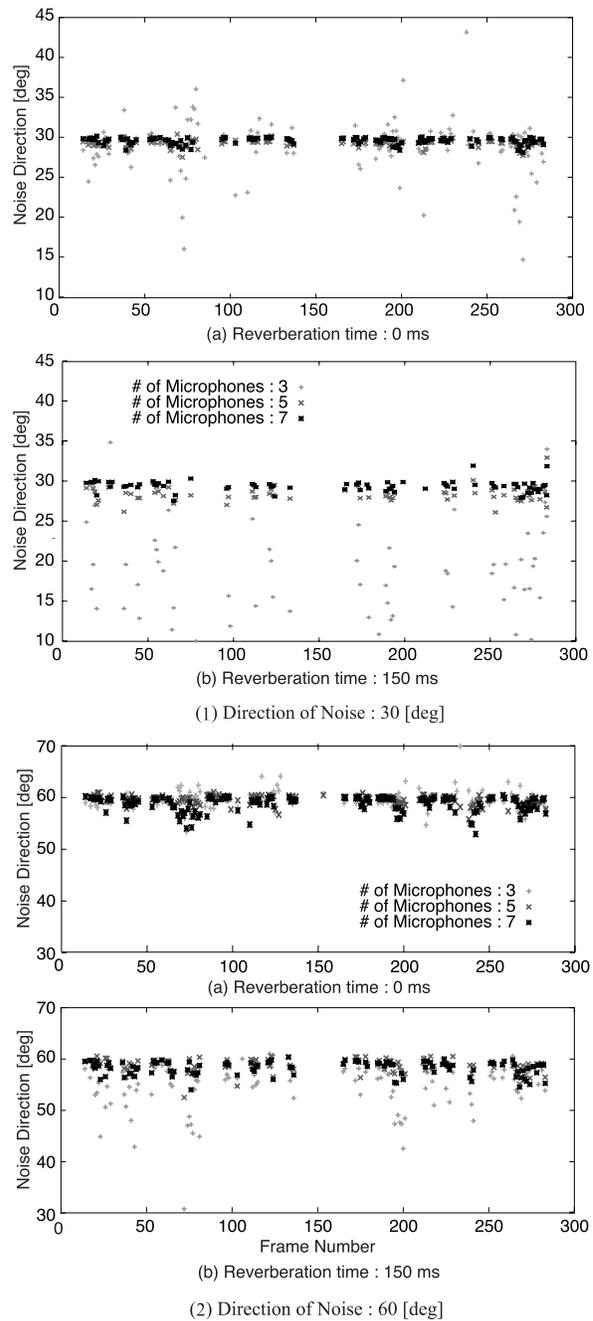


図 6 雑音の到来方向推定結果

Fig. 6 Experimental result : Estimation of noise direction.

が劣化している。これはマイクロホン間角度が狭くなるため，特に低い帯域での円心の推定が誤差に対し敏感になっているためであると考えられる。この問題に対してはマイクロホン間の距離を大きくすることで対処できると考えられるが，アレー長が長くなるため現実的ではない。

残響なしの条件と比較すると，残響による性能低下は約 6 から 8dB に及ぶ。この理由として残響環境では壁からの反射により目的信号と雑音がともに様々な方向から到来するため，複数雑音を扱う問題に相当するためであると考えられる。現実的な対策としては円の当てはめの精度にしたがって Delay-and-Sum 法などの他の手法との組合せを考える必要がある。

CSCC+DOA は CSCC に比べ残響 150ms 下では平均で約 1dB の性能の向上を得た。無響下では特にマイクロホン 3 本の

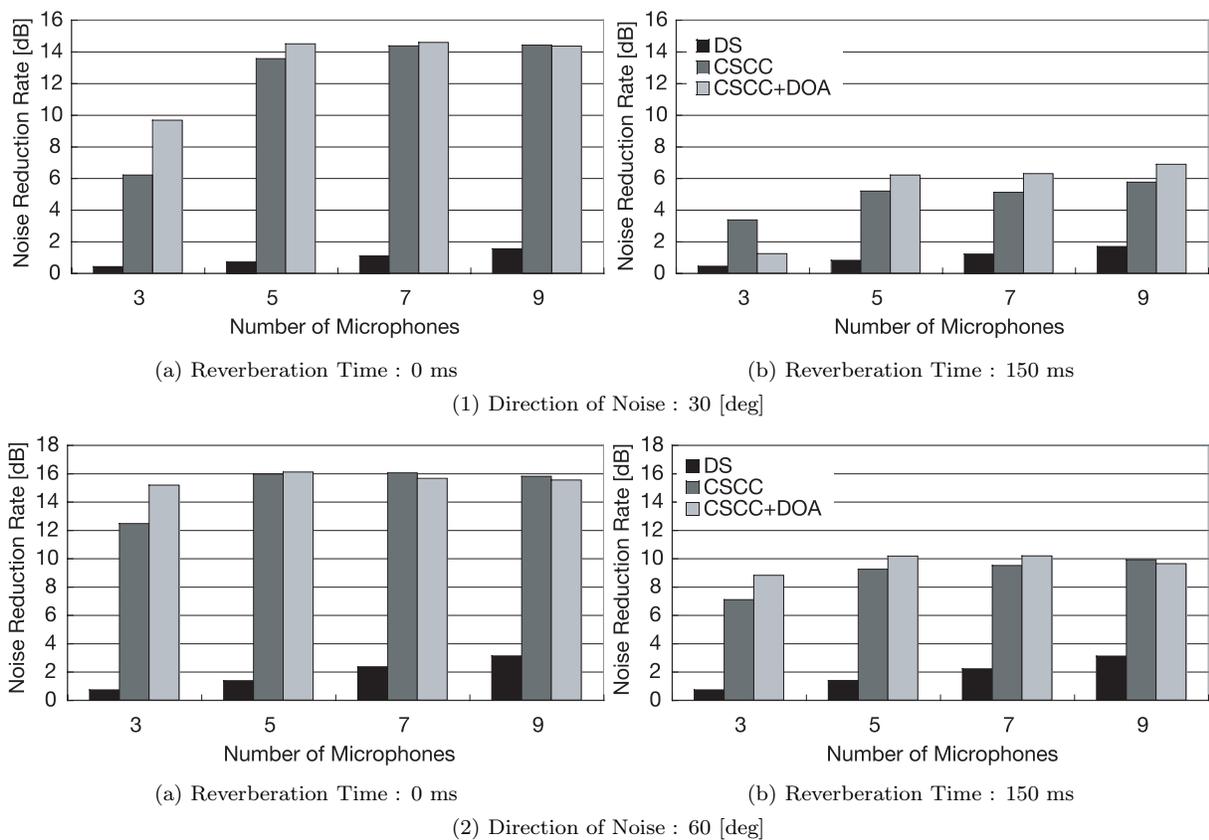


図 5 シミュレーションによる雑音削減結果

Fig. 5 Experimental result : Noise reduction performance.

条件で大きな性能向上を示した。図 6 より、雑音到来方向推定は円心の推定に対し有益な情報を与えていたことが分かる。しかし、雑音到来方向 30°, マイクロホン数 3 の条件において CSCC+DOA の性能が低下した。この原因については図 6 から分かるように雑音到来方向の推定がうまくいかなかったためであると考えられ、より頑健な雑音方向推定のアルゴリズムが要望される。

5. 結 論

本稿では、複素スペクトル円心 (CSCC) 法と呼ぶ原理に基づくマイクロホンアレーを用いた雑音除去のアルゴリズムについて報告した。雑音が一方向から到来する場合、目的信号スペクトルの推定は複素平面上において観測信号から円心を推定するという非線型な処理に帰着する。さらに円心推定の枠組から雑音の音源方向の推定を行うことができ、従来の CSCC 法では扱わなかった角度方向の誤差を考慮する方法を示した。シミュレーションによる実験によって本手法を評価し、Delay-and-Sum 法に比べ最大で約 15dB、150ms の残響下で約 9dB の雑音除去性能を示すことができた。また従来の CSCC 法に対し、雑音方向推定を用いた方法では残響環境下でさらに平均で約 1dB の性能の向上を得た。今後は本手法を実環境での実験による評価をしていきたい。

文 献

- [1] J. L. Flanagan, D. A. Berkley, G. W. Elko, J. E. West and M. M. Sondhi, "Autodirective microphone systems," *ACUSTICA*, Vol. 73, pp. 58-71, 1991.
- [2] 金森 丈郎, 茨木 悟, 古川 博基, 直野 博之, 藤藤 浩, 西川 清, "2次元デジタルフィルタを用いた超指向性マイクロホン," 信学技報, Vol. EA91-84, 1992.
- [3] L. J. Griffiths and C. W. Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming," *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 30, pp. 27-34, 1982.
- [4] Y. Kaneda and J. Ohga, "Adaptive microphone-array system for noise reduction," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. ASSP-34, no.6, pp. 1391-1400, 1986.
- [5] A. Hyvärinen, J. Karhunen and E. Oja, *Independent Component Analysis*, John Wiley & Sons, 2001.
- [6] T. Nishikawa, H. Saruwatari and K. Shikano, "Blind source separation of acoustics signals based on multistage ICA combining frequency-domain ICA and time-domain ICA," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E86-A, no. 4, pp. 846-858, 2003.
- [7] S. Ukai, H. Saruwatari, T. Takatani, K. Shikano, "Blind source separation using SIMO-model-signal extraction and adaptive beamforming," *IEICE Technical Report*, no. EA2004-24, pp. 43-48, 2004.
- [8] F. R. Bach and M. I. Jordan, "Kernel independent component analysis," *J. Machine Learning Res.*, vol. 3, pp. 1-48, 2002.
- [9] E. Polak, *Computational Methods in Optimization* New York: Academic Press, 1971.
- [10] J. B. Allen and D. A. Berkley, "Image method for efficiently simulating small-room acoustics," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 62, no. 4, pp. 943-950, 1979.
- [11] 岡嶋 鎌本, 西本, 嵯峨山, "マイクロホンアレー入力の周波数領域での幾何学的処理による雑音環境下での音声認識," 音講論集, vol.1, 3-10-1, pp. 583-584, 2004-Sep.
- [12] S. Sagayama, T. Okajima, Y. Kamamoto and T. Nishimoto, "Complex Spectrum Circle Centroid for Microphone-Array-Based Noisy Speech Recognition," *Proc. ICSLP2004*, vol.2, pp. 825-828, 2004.