

相関行列スケーリングを用いた屋外音源探索手法の解析

Analysis of Outdoor Sound Detection Using Correlation Matrix Scaling

大畑琢磨¹, 長峰諒英², 中村圭佑³, 石崎孝幸¹, 水本武志³, 中臺一博^{1,3}

Takuma OHATA, Akihide NAGAMINE, Keisuke NAKAMURA,

Takayuki ISHIZAKI, Takeshi MIZUMOTO, Kazuhiro NAKADAI

1 東京工業大学 大学院 情報理工学研究科, 2 東京工業大学 工学部 電気電子工学科,

3 (株)ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン

1 Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,

2 Department of Electric and Electrical Engineering, Tokyo Institute of Technology,

3 Honda Research Institute Japan Co., Ltd.

ohhata@cyb.mei.titech.ac.jp, nakadai@jp.honda-ri.com

Abstract

我々は、屋外でクアドロコプタに搭載したマイクロホンアレイを用いて、雑音下でもロバストに音源定位を行うことができる MUSIC (Multiple Signal Classification) ベースの手法について研究を行っている。これまでに、雑音相関行列の逐次推定や、相関行列のスケーリングといった拡張を施した CMS 付 iGSVD-MUSIC 法を提案し、良好な音源定位性能が得られることを示した。この手法は、理論的に雑音にロバストであることは知られているものの、実環境での挙動の解析が十分ではなく、どのような条件でロバストに動作するのか、パラメータ値の最適性についての議論することが難しかった。本稿では、提案手法の挙動をシミュレーション実験によって解析し、雑音環境の変化に対する最適パラメータ値の傾向について議論する。

1 はじめに

屋外で、音源の位置、種類、発生時刻といった音源に関する情報を抽出し、構造化する「屋外音環境理解」研究は、学術的な側面だけでなく、災害地での人命救助にも応用が可能な重要な研究領域である。特にクアドロコプタは、被災地でも広範囲に移動することが可能であり、制御の容易さから近年商用化も進んでいる。このため、クアドロコプタにマイクロホンアレイを搭載し、音源探索を行うことができれば、上述の場面での有用性が高いといえる。

従来、飛行体から音源探索を行う試みは、軍事用途を中心に行われてきたが、Acoustic Vector Sensor (AVS) などの高価なセンサが必要であったり、戦車や飛行機などパワーの大きな音源を対象にしていた [1]。我々は、マイク

ロホンアレイを用いた音源定位手法の中でも雑音に頑健であるとされる MUSIC (Multiple Signal Classification) 法 [3] をベースにクアドロコプタのプロペラ音や風切り音が存在する屋外雑音下で、ロバストに音源定位ができる手法を報告した [4, 6, 7, 2]。例えば、奥谷らは、小型で軽量のマイクおよびマイク収録デバイスを用いて、コンシューマ向けのクアドロコプタである AR.Drone にマイクロホンアレイを搭載した [4]。また、プロペラ音が変化する雑音下でも雑音を適応的に白色化しながら、音源定位を行うことができる *Multiple Signal Classification based on incremental Generalized EigenValue Decomposition (iGEVD-MUSIC)* 法を提案し、その有効性を示した。さらに、iGEVD-MUSIC 法の計算量を削減するため、特異値展開に基づく MUSIC 法である GSVD-MUSIC [5] に対して、雑音の逐次推定機能を追加した *MULTiple Signal Classification based on incremental Generalized Singular Value Decomposition (iGSVD-MUSIC)* 法を提案し、性能劣化を抑えつつ、計算量を劇的に削減できることを報告した [6]。また、iGSVD-MUSIC 法は、iGEVD-MUSIC 法と比較して、誤差項 (クロスターム) が存在するため、性能劣化が起こりやすい、特に雑音相関行列の推定が正確でない場合、過抑圧が発生して検出性能が低下する場合があるという問題があった。そこで、相関行列スケーリング (Correlation Matrix Scaling, CMS) 法を合わせて用いる iGSVD-MUSIC-CMS 法を提案し、この問題の解決を図った [2]。

iGSVD-MUSIC-CMS 法により、過剰な雑音抑圧を防ぐことができ、定位性能は飛躍的に向上したものの、その挙動については未解明な部分も多く、このため、ロバストに定位を行うための条件や実験的に求めた最適なパラメータ値の妥当性を検証することは難しかった。そこで、本稿では、iGSVD-MUSIC-CMS 法と、その未解明な部

分について述べ、その挙動をシュミレーション実験によって解析し、雑音環境の変化に対する最適パラメータ値の傾向を議論する。

2 iGSVD-MUSIC-CMS 法

iGSVD-MUSIC-CMS 法の挙動を解析を行う前に、iGSVD-MUSIC-CMS 法の説明と課題の整理を行う。

2.1 iGSVD-MUSIC 法

iGSVD-MUSIC 法は、GSVD-MUSIC 法の雑音相関行列推定を逐次的に行うことができるように改良した手法である。これによって、少ない計算量で、動的な雑音が存在する環境でも頑健に音源定位を行うことが可能となる。以下に、そのアルゴリズムを説明する。

f フレーム目の M チャンネル入力音響信号をフーリエ変換して得られる $X(\omega, f) \in \mathbb{C}^M$ から、以下のように相関行列 $R(\omega, f) \in \mathbb{C}^{M \times M}$ を定義する。

$$R(\omega, f) = \frac{1}{T_R} \sum_{\tau=f}^{f+T_R-1} X(\omega, \tau) X^*(\omega, \tau) \quad (1)$$

ただし、 ω は周波数ビン番号、 T_R は相関行列の計算に用いるフレーム数である。

MUSIC 法 [3] では、式 (1) の $R(\omega, f)$ を以下のように標準固有値展開 (Standard Eigen Value Decomposition (SEVD)) して、その固有ベクトルを音源定位に用いていた。

$$R(\omega, f) = E(\omega, f) \Lambda(\omega, f) E^*(\omega, f) \quad (2)$$

ここで、 $\Lambda(\omega, f)$ は降順に並んだ固有値を対角成分に持つ行列であり、 $E(\omega, f)$ は固有ベクトルを並べた行列である ($E(\omega, f) = [e_1(\omega, \psi), \dots, e_M(\omega, \psi)]$)。しかし、この手法は目的音よりも大きな雑音がある場合は性能が著しく劣化する問題があった [5] (本手法をこれより SEVD-MUSIC 法と呼ぶこととする)。

そこで、GSVD-MUSIC 法では、 f 番目のフレームに対して、 f_s 前のフレームから、 T_N フレーム分の信号は雑音区間であると仮定して、雑音の相関行列 $K(\omega, f)$ を求める。

$$K(\omega, f) = \frac{1}{T_N} \sum_{\tau=f-f_s-T_N}^{f-f_s} X(\omega, \tau) X^*(\omega, \tau), \quad (3)$$

GSVD-MUSIC 法は、雑音の相関行列には、与えられた雑音区間から事前に計算したものを使用しており、動的な雑音の変化に対応できないという問題があった。iGSVD-MUSIC 法では、フレームごとに (逐次的に) 雑音が推定できるため、iGEVD-MUSIC 法と同様、動的な雑音変化に対応できることが期待できる。

K の逆行列を、左から R に掛けることで、雑音成分を白色化することが出来る。こうして得られた

$K^{-1}(\omega, f)R(\omega, f)$ を一般化特異値展開し、左特異ベクトルを計算する。

$$K^{-1}(\omega, f)R(\omega, f) = E_l(\omega, f) \Lambda(\omega, f) E_r^*(\omega, f) \quad (4)$$

ただし、 $\Lambda(\omega, f)$ は降順に並んだ特異値を対角成分に持つ行列である。 $E_l(\omega, f)$ 、 $E_r(\omega, f)$ は、特異ベクトルを並べた行列である。

これと音源方向 ψ に対応した伝達関数 $G(\omega, \psi)$ を用いて MUSIC スペクトル $P(\omega, \psi, f)$ を計算する。

$$P(\omega, \psi, f) = \frac{|G^*(\omega, \psi)G(\omega, \psi)|}{\sum_{m=L+1}^M |G^*(\omega, \psi)e_m(\omega, \psi)|} \quad (5)$$

ただし、 L は目的音源数、 M はマイク数である。 e_m は、 E_l に含まれる m 番目の特異ベクトルを表す。音源方向を推定するために $P(\omega, \psi, f)$ を以下のように ω 方向に平均する。

$$\bar{P}(\psi, f) = \frac{1}{\omega_H - \omega_L + 1} \sum_{\omega=\omega_L}^{\omega_H} P(\omega, \psi, f) \quad (6)$$

なお ω_H 、 ω_L は使用する周波数ビンの上限と下限に対応したインデックスである。

最後に、 $\bar{P}(\psi, f)$ に対してピーク検出と閾値処理を行い、得られたピークに対する ψ を音源方向として検出する。

SEVD-MUSIC 法の拡張である GEVD-MUSIC 法では、式 (4) において、一般化特異値展開の代わりに一般化固有値展開を用いていた。しかし、 $K^{-1}(\omega, f)R(\omega, f)$ は一般にエルミート行列ではないため、固有値ベクトル同士が直交するとはかぎらない。SEVD-MUSIC 法では式 (5) に示すようにベクトル同士が直交していることを利用したアルゴリズムであるため、性能劣化が生じる。そこで、GEVD-MUSIC 法では、この問題を解決するために、 $K^{-1}(\omega, f)R(\omega, f)$ の代わりに、 $K^{\frac{1}{2}}(\omega, f)R(\omega, f)K^{\frac{1}{2}}(\omega, f)$ を用いている。しかし、この計算にかかる計算量が大きく、実時間処理が困難であった。

一方、GSVD-MUSIC 法では、非エルミート行列に対しても、特異ベクトル同士が直交することが保証されているため、この問題は生じない。このため、 $K^{\frac{1}{2}}$ を計算する必要がないこと、一般化特異値展開の計算量が一般化固有値展開のそれに比べて小さいことから、雑音ロバスト性能の劣化を抑えつつ、計算量を大きく削減できることが期待できる。

ここで、式 (1) の入力音響信号を次のように定義する (簡単のため、 ω, f は省略する)。

$$X = AS + N \quad (7)$$

$A \in \mathbb{C}^{M \times L}$ は L 個の音源と M 個のマイクロホンアレイ間の伝達関数 ($A = [A_1(\psi_1), \dots, A_L(\psi_L)]$)、 $S \in \mathbb{C}^L$ は L 個の音源信号 ($S = [S_1, \dots, S_L]^T$)、 $N \in \mathbb{C}^M$ は雑音信

号を表している． N と S は無相関であると仮定すると R は以下のように変換できる．

$$R = XX^* = ASS^*A^* + NN^* = \Gamma + K \quad (8)$$

iGEVD-MUSIC 法では，以下のように雑音が白色化されて I となる．

$$\begin{aligned} K^{-\frac{1}{2}}RK^{-\frac{1}{2}} &= K^{-\frac{1}{2}}(\Gamma + K)K^{-\frac{1}{2}} \\ &= K^{-\frac{1}{2}}\Gamma K^{-\frac{1}{2}} + I. \end{aligned} \quad (9)$$

iGSVD-MUSIC 法は，式 (4) より，以下のように R^2 と K^2 を用いた一般化固有値問題とみなせる．

$$\begin{aligned} K^{-1}R &= E_l \Lambda E_r^* \\ \Leftrightarrow K^{-1}R(K^{-1}R)^* &= E_l \Lambda E_r^* (E_l \Lambda E_r^*)^*, \\ \Leftrightarrow K^{-1}R^2 K^{-1} &= E_l \Lambda^2 E_l^*. \end{aligned} \quad (10)$$

ここで， E_l が固有ベクトルとなっていることがわかる．式 (10) は，式 (8) を用いて以下のように表せる．

$$\begin{aligned} K^{-1}R^2 K^{-1} &= K^{-1}(\Gamma + K)(\Gamma + K)^* K^{-1} \\ &= K^{-1}\Gamma^2 K^{-1} + K^{-1}\Gamma + \Gamma K^{-1} + I \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) から雑音相関行列 K による白色化が実現されている（右辺第 4 項）ものの，式 (9) の白色化と比較すると，iGSVD-MUSIC 法の白色化は，右辺第 2, 3 項が残ってしまい，完全な白色化が達成されない問題がある．

2.2 CMS

iGSVD-MUSIC 法では，雑音相関行列の推定に過去の入力音響信号を用いるため，実際に抑圧したい現時刻の雑音相関行列を完全に予測することは不可能である．実際の雑音相関行列と適合しない雑音相関行列を用いた場合，過抑圧が生じ，結果として定位性能が劣化する．CMS 法は，雑音相関行列が適合しない場合でも抑圧の程度を制御することにより，過抑圧を防ぐことができる．具体的には，雑音相関行列の値を固定し，雑音抑圧率のみを変化させるように雑音部分空間を制御する．iGSVD-MUSIC 法における式 (3) の K に対し，次のように固有値展開を行う．

$$K = E \Lambda E^* \quad (12)$$

ここで， Λ は固有値を含む対角行列， E は固有ベクトルを表す． Λ は各固有ベクトルのパワーを表し， E は雑音部分空間における各固有ベクトルの方向を表す． Λ を制御すれば，雑音部分空間の大きさのみを制御できることから， K^α を以下のように定義する．

$$K^\alpha = E \Lambda^\alpha E^*, \quad (13)$$

$$\Lambda^\alpha = \text{diag}(\lambda_1^\alpha, \dots, \lambda_M^\alpha) \quad (14)$$



図 1: マイクアレイ配置

ここで， α は CMS 法におけるスケーリングパラメータとする．CMS 法を用いた iGSVD-MUSIC 法では，式 (4) における K を K^α とする． α が 1 のとき， K^α は K となり，CMS 法を用いない iGSVD-MUSIC 法と同等となる．また， α が 0 のとき， K^α は I となり，雑音抑圧を行わない SEVD-MUSIC 法と一致する．

我々はこれまで，iGSVD-MUSIC-CMS 法において， α は実験的に 0.5 付近が最適であるとの結果を得た [7]．しかし， K の推定誤差に対する α の最適値との関係はこれまで解析していなかった．

3 iGSVD-MUSIC-CMS 法の白色化性能解析

本稿では，2 章で述べた iGSVD-MUSIC 法の課題による性能への影響と，CMS 法の導入による効果を解析する．

2.1 章では，iGSVD-MUSIC 法での白色化（式 (11)）は，iGEVD-MUSIC 法での白色化（式 (9)）と比較して，クロスターム項が残るため，完全な白色化を達成するためには目的音源と雑音が無相関であることが求められることを述べた．また，2.2 章では，一般的に雑音相関行列は正しく推定することができないため，その誤差が定位性能を劣化してしまう問題について述べた．目的音源と雑音が無相関，かつ雑音相関行列が正しく推定されていれば，CMS での α は 1 であるべきであり，0.5 程度が最も性能が良いとする結果 [7] は，この仮定が成り立たなくなったためであると考えられる．

そこで，本稿では，以下をシミュレーション実験によって調べることで白色化性能解析を行う．

- 式 (11) のクロスターム項と白色化性能の評価
 - 1) 拡散性雑音：空間的的白色雑音のみが存在する場合
 - 2) 方向性雑音：空間的有色雑音が存在する場合
- 雑音推定誤差と白色化性能の評価
 - 3) パワー誤差：雑音相関行列生成時の雑音源の大きさが，観測信号のそれと異なる場合
 - 4) 方向誤差：雑音相関行列生成時の雑音源の方向が，観測信号のそれと異なる場合

シミュレーション実験では、図 1 に示されるクアドロコプタに搭載された 16 チャンルのマイクアレイ（半径 0.37m）を想定し、伝搬波モデルを用いた幾何計算による伝達関数を生成して仮想的な目的音（白色雑音）と雑音（白色雑音）を使用することで評価した．入力音響信号は 16kHz, 16 ビットとし、音響信号処理のフレーム長とシフト長はそれぞれ、512, 160 サンプルとした．

評価では、 0° 方向に目的音（白色雑音 S_0 ）があるとし、上述の雑音や誤差を加えた、 0° 方向に 1 つの目的音のみがある場合、式 (7) は以下で表される．

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}_0(\psi_0 = 0^\circ)S_0 \quad (15)$$

この場合、雑音が存在しないため、この \mathbf{X} から得られる相関行列 \mathbf{R} を用いた SEVD-MUSIC 法 [3] は白色化処理を行わなくても、信号の部分空間が式 (2) の e_1 として得られ、目的音方向に正しく定位することができる．この時の e_1 を \tilde{e}_1 とする．

式 (15) に雑音 N を加え、

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}_0(\psi_0 = 0^\circ)S_0 + N \quad (16)$$

とした相関行列を固有値展開すると、 $e_1 = \tilde{e}_1$ となるとは限らないため、音源定位性能が劣化する．従って、式 (16) から得られる第一固有ベクトル e_1 と \tilde{e}_1 の内積を評価することで音源定位性能を評価できる．

iGEVD-MUSIC 法、iGSVD-MUSIC 法、iGSVD-MUSIC-CMS 法は、式 (16) の観測信号から得られる相関行列の第一固有（特異）ベクトル e_1 が \tilde{e}_1 となるように、雑音情報 N を用いて白色化を行う（式 (9)、式 (10)）．従って、以下から得られる第一固有（特異）ベクトル e_1 と \tilde{e}_1 の内積を評価することで各手法の白色化性能を評価できる．

- SEVD-MUSIC : \mathbf{R} の第一固有ベクトル（白色化なし）
- iGEVD-MUSIC : $\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{R}\mathbf{K}^{-\frac{1}{2}}$ の第一固有ベクトル
- iGSVD-MUSIC : $\mathbf{K}^{-1}\mathbf{R}$ の第一特異ベクトル
- iGSVD-MUSIC-CMS : $\mathbf{K}^{-\alpha}\mathbf{R}$ の第一特異ベクトル

ここで、 $\alpha = \{0.1, 0.2, \dots, 0.9\}$ とした．

相関行列計算のための式 (1),(3) のパラメータ $T_R = T_N = 50$ とした．また、内積は各周波数毎に算出されるため、以下のように $500\text{Hz} \leq \omega \leq 2800\text{Hz}$ の周波数帯で平均を取った．

$$\xi = \frac{1}{\omega_H - \omega_L + 1} \sum_{\omega=\omega_L}^{\omega_H} |e_1^*(\omega)\tilde{e}_1(\omega)| \quad (17)$$

S_0 と N の信号対雑音比 (SNR) を変化させた時に ξ が 1 に近い方が白色化性能が高いと言える．

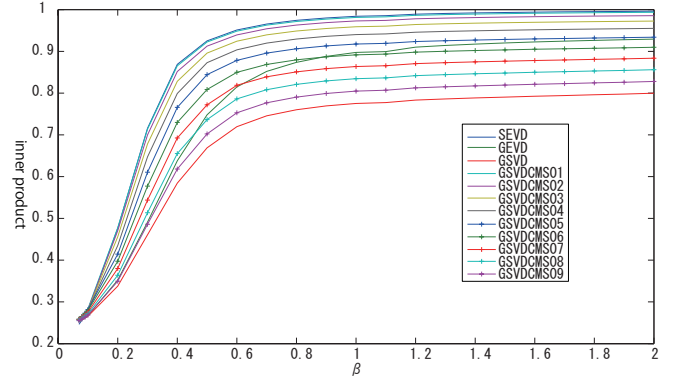


図 2: 拡散性雑音と ξ との関係

3.1 拡散性雑音に対する解析

式 (16) の N として、以下のように、空間的に白色な雑音を入力して評価する．

$$N = \beta[S_1, \dots, S_M]^T \quad (18)$$

ここで、 S_1, \dots, S_M は互いに異なる白色雑音、 β は S_0 と N の SNR を変化させるパラメータである．本稿では、 $0.07 \leq \beta \leq 2.0$ とした．

空間的に白色な雑音のみが存在する場合、式 (11) の課題であったクロスターム項が白色化によって残らないことから、iGEVD-MUSIC 法と iGSVD-MUSIC 法の差がないことが見込まれる．雑音相関行列 \mathbf{K} は、

$$\hat{N} = \beta[\hat{S}_1, \dots, \hat{S}_M]^T \quad (19)$$

から生成し、 N とは異なる白色雑音を用いた．

図 2 に、 β の変化に対する、各手法から得られた式 (17) の ξ の変化を示す．凡例の SEVD は SEVD-MUSIC 法を、GEVD は iGEVD-MUSIC 法を、GSVD は iGSVD-MUSIC 法を、GSVDCMS** は iGSVD-MUSIC-CMS 法を表し、** は α の値を表す．

図より、全ての手法において、 ξ の挙動が SEVD-MUSIC 法と類似していることがわかる．これは、 S_0 と N が無相関であることと、 $\mathbf{K} \approx \delta\mathbf{I}$ （ただし、 δ はスカラー）となっているからだと考えられる．この場合は式 (8) の SEVD を用いた場合でも、

$$\mathbf{R} = \mathbf{\Gamma} + \mathbf{K} = \mathbf{\Gamma} + \delta\mathbf{I} \quad (20)$$

となり、 \mathbf{R} を固有値展開して得られる固有ベクトルが $\mathbf{\Gamma}$ を固有値展開して得られる固有ベクトルと等しい．

したがって、 N が空間的に白色な場合の最適な α は 0 と結論づけられた．

3.2 方向性雑音に対する解析

次に、 N が方向性雑音の場合を考える．具体的には、式 (16) に対して以下の雑音を考える．

- 単独雑音：120° 方向に白色雑音 S_1 が存在する

$$N = \beta A_1(120^\circ) S_1 \quad (21)$$

- 二雑音源：±90° 方向に白色雑音 S_1, S_2 が存在する

$$N = \beta A_1(90^\circ) S_1 + \beta A_2(-90^\circ) S_2 \quad (22)$$

- 四雑音源：±45°, ±135° に白色雑音が存在する

$$N = \beta A_1(135^\circ) S_1 + \beta A_2(45^\circ) S_2 \\ + \beta A_3(-45^\circ) S_3 + \beta A_4(-135^\circ) S_4 \quad (23)$$

$0.07 \leq \beta \leq 2.0$ とした。

方向性雑音は空間的に有色な雑音であることから、式 (11) の課題であったクロスターム項の影響があると考えられ、CMS 法によってその誤差を吸収できるかを評価することができる。雑音相関行列には、式 (21), (22), (23) の S_1, \dots, S_4 を $\hat{S}_1, \dots, \hat{S}_4$ として相関行列を生成し、最後に逆行列が不安定とならないように δI を加えたものを用いた (δ は十分に小さい 10^{-4} とした)。

図 3, 4, 5 に、それぞれ単独雑音の場合、二雑音源の場合、四雑音源の場合の結果を示す。単独雑音の場合を見ると、方向性雑音のパワーが小さい $1 \leq \beta \leq 2$ では、 $\alpha = 0.1$ が最も良い性能を示しており、パワーが大きくなるにつれ、 $0.5 \leq \beta \leq 1$ では $\alpha = 0.2$ が、 $0.3 \leq \beta \leq 0.5$ では $\alpha = 0.3$ が最も性能が良いことが確認できる。いずれも iGEVD-MUSIC 法や iGSVD-MUSIC 法よりも高い性能を示していることから、CMS 法を導入したことの有効性を確認することができた。また、方向性雑音のパワーが大きくなるにつれて最適な α が大きくなっていることから、雑音の空間的有色度を推定することで動的に α を変化させる適応的 CMS の可能性を確認できる。適応的 CMS については今後の課題とする。

次に二雑音源や四雑音源の場合を見ると、 α が 0.4 や 0.5 の場合に最適な場合があることがわかる。このように環境の雑音有色度が増すほど、大きな α が最適であることがわかった。実環境下のクアドロコプタの場合、プロペラが 4 つあることから、四雑音源の場合に類似した環境であると考えられる。本稿の評価からも、クアドロコプタの環境において α が 0.4~0.5 で最適であることの妥当性が示された。

3.3 パワー誤差に対する解析

2.2 章で述べた雑音相関行列の推定誤差について評価するため、雑音源のパワーに対する誤差について考える。雑音源は、3.2 章の単独方向性雑音と同じものを考えるが、雑音相関行列として、実際の雑音の 0.1 倍の雑音を以下のように考えた。

$$\hat{N} = 0.1\beta A_1(120^\circ) \hat{S}_1 \quad (24)$$

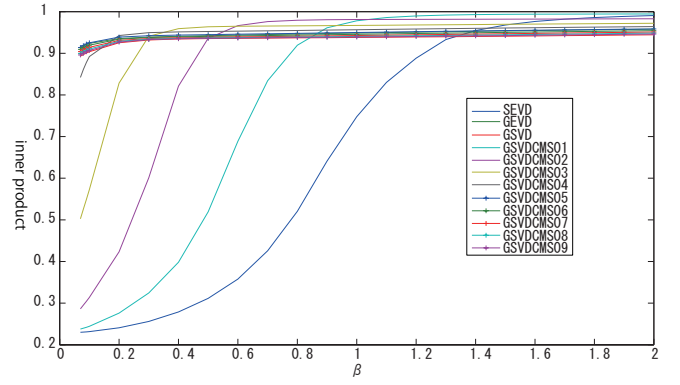


図 3: 方向性雑音と ξ との関係 (単独雑音)

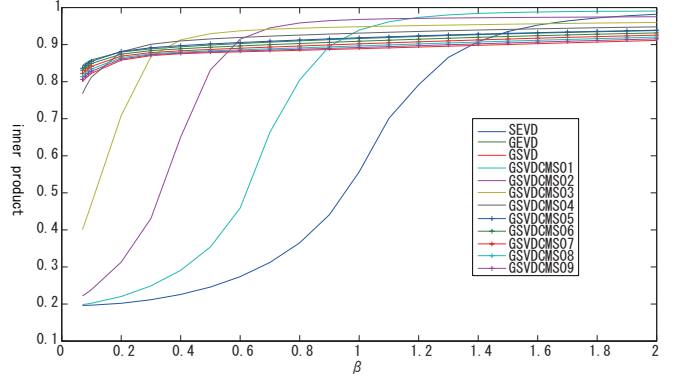


図 4: 方向性雑音と ξ との関係 (二雑音源)

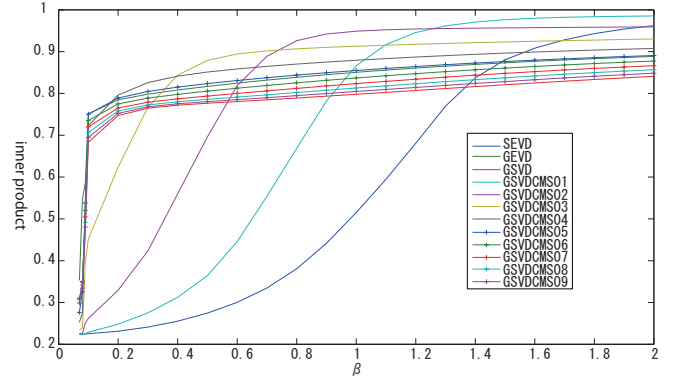


図 5: 方向性雑音と ξ との関係 (四雑音源)

図 6 に結果を示す。図 3 と比較すると、最適な α がより大きい方向にシフトしていることがわかる。このように、雑音のパワーに対する推定誤差は α によって吸収できることがわかる。

図 7 は図 6 の $0.2 \leq \beta \leq 0.9$ 付近を拡大した図である。図より、SNR によって、最適な α が変化していること、また iGEVD-MUSIC 法や iGSVD-MUSIC 法よりもそれぞれが性能が高いことがわかる。従って、雑音のパワー推定誤差を含める範囲で iGSVD-MUSIC-CMS 法が有効であることがわかった。

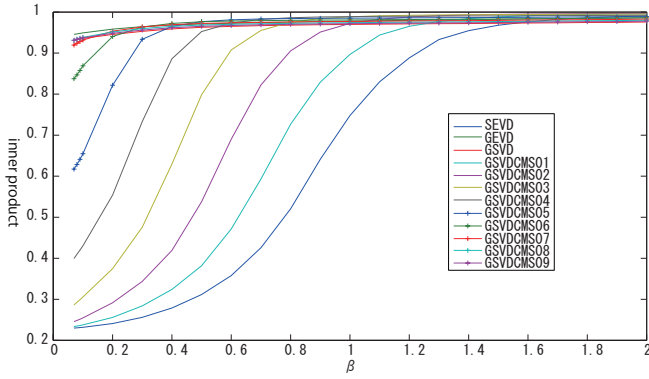


図 6: パワー誤差と ξ との関係

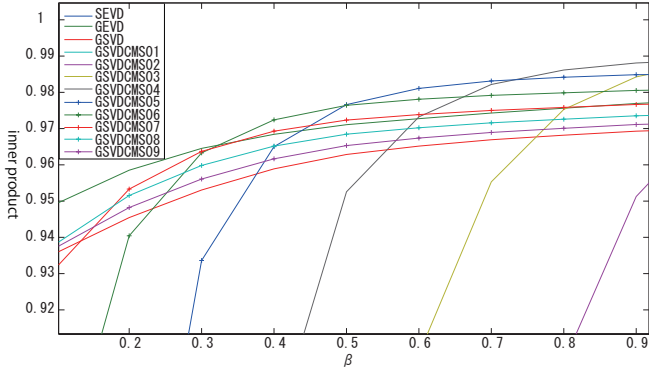


図 7: パワー誤差と ξ との関係 (図 6 の拡大)

3.4 方向誤差に対する解析

最後に、雑音の方向に対する推定誤差について考える。雑音源は、3.2 章の単独方向性雑音と同じもの考えるが、雑音相関行列として、実際の雑音とは 5° 誤差のある雑音を以下のように考えた。

$$\hat{N} = 0.1\beta A_1(115^\circ)\hat{S}_1 \quad (25)$$

図 8 に結果を示す。図より、全ての α について同様の白色化性能であることから、方向誤差は α で吸収できないことがわかる。しかし、これは雑音相関行列が 5° よりも細かな解像度であることを示唆しており、ターゲットとなる雑音方向に対してより急峻な白色化が達成できるといえる。一方、iGEVD-MUSIC 法は、 5° の誤差に対して iGSVD-MUSIC-CMS 法よりも白色化性能が高かったことから、方向誤差に対するロバスト性が高いが、ターゲット方向に対して急峻な白色化は難しいことがわかった。このように、目的に応じた iGEVD-MUSIC 法と iGSVD-MUSIC 法の使い分けも興味深い今後の課題であると考えられる。

4 おわりに

本稿では、クアドロコプタのプロペラ音や風切り音が存在する屋外雑音下で、ロバストに音源定位ができる手法として提案していた CMS 付 iGSVD-MUSIC 法について、これまで未解明であったロバストに定位を行うための条件

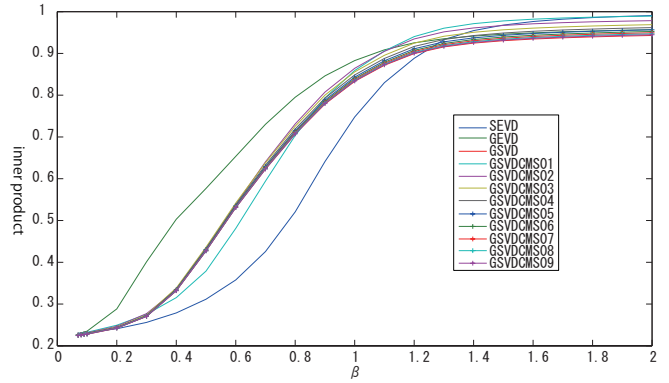


図 8: 方向誤差と ξ との関係

や実験的に求めた最適なパラメータ値の妥当性についてシミュレーション実験を通して議論を行った。結果、雑音の空間的な有色度と最適なパラメータ値に相関があったこと、以前に報告した最適パラメータがクアドロコプタの持つ 4 つの方向性雑音に対して妥当であったこと、雑音のパワーの推定誤差に対して CMS 法がロバストであったこと、雑音方向に対して iGSVD-MUSIC 法が既存法よりもより急峻な白色化が達成できることが示された。今後の課題として、クアドロコプタの実環境雑音データの有色度の検証、雑音の有色度を動的に推定して CMS 法のパラメータを適応的に変化させる適応的 CMS 法の構築、方向性の点雑音・面雑音などの雑音の空間的広がりには合わせた iGSVD-MUSIC 法と iGEVD-MUSIC 法の使い分けなどが考えられる。

謝辞

本研究は科研費基盤 (S) No.24220006 の支援を受けた。

参考文献

- [1] B. Kaushik, D. Nance, and K. K. Ahuj. A review of the role of acoustic sensors in the modern battlefield. In *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference)*, pp. 1–13, 2005.
- [2] Takuma Ohata, Keisuke Nakamura, Takeshi Mizumoto, Taiki Tezuka, and Kazuhiro Nakadai. Improvement in outdoor sound source detection using a quadrotor-embedded microphone array. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems (IROS)*. IEEE Press, 2014.
- [3] R. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 34, No. 3, pp. 276–280, 1986.
- [4] 奥谷啓太, 吉田尚水, 中村圭佑, 中臺一博. クアドロコプタ搭載のマイクロホンアレイを用いた屋外音環境理解の逐次雑音推定による向上. *ロボット学会誌*, Vol. 31, No. 7, pp. 38–45, 2013.
- [5] 中村圭佑, 中臺一博, インジユギョカン. ロボットを対象にした複数同時発話にロバストな音源定位の検討. 第 29 回日本ロボット学会学術講演会. 日本ロボット学会, 2011.
- [6] 大畑琢磨, 手塚太貴, 中村圭佑, 水本武志, 中臺一博. クアドロコプタを用いた屋外音環境音源探索. 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 0360–0363. 計測自動制御学会, 2013.
- [7] 大畑琢磨, 長峰諒英, 中村圭佑, 水本武志, 中臺一博. 相関行列スケリングを用いた igsvd-music 法による屋外環境音源探索の向上. 日本ロボット学会第 32 回学術講演会, pp. 111–03, 2014.