

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760263
 研究課題名（和文） 実音響空間における移動音源追尾システムの性能改善
 研究課題名（英文） Performance Improvement of Moving Sound Source Tracking System
 In Actual Environment
 研究代表者
 陶山 健仁（SUYAMA KENJI）
 東京電機大学・工学部・准教授
 研究者番号：50303011

研究成果の概要：本研究では、実環境におけるマイクロホンアレーによる音源追尾性能の向上について検討した。検討手法は、アレーの高周波帯域における解像度の高さを利用し、低周波帯域の推定結果を高周波帯域の初期値として利用する手法である。実環境実験により、低周波帯域のみを用いた場合と比べ、高精度な追尾が可能となったことを確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	0	2,000,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	270,000	3,170,000

研究分野：信号処理

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：マイクロホンアレー，音源定位，音響信号処理

1. 研究開始当初の背景

人間は複数の音源が存在する状況においても特定の音を選択的に聴取することが可能である。この能力には、音源方向の検出能力、すなわち音源定位能力がかかっていると考えられる。本研究では、マイクロホンアレーによる音源定位の実現について考える。

代表的な音源定位法として遅延和アレー法、相互相関関数による手法、MUSIC (Multiple Signal Classification) などが知られ

ている。特に MUSIC は、受信信号の相関行列の固有ベクトルによって構成される信号空間の直交性に基づく推定法であり、高解像度推定が可能である。しかしハンズフリー通話等への応用を考えたとき、音源位置は時刻とともに変動することが多いと考えられる。そこで移動音源追尾に着目し、その手法について検討してきた。

移動音源追尾法には、周波数領域一般化サイドローブキャンセラを用いる方法や、パー

ティクルフィルタを用いた手法が提案されている。一方、本研究では MUSIC のもつ解像度の高さを利用するため、MUSIC に信号部分空間の逐次更新アルゴリズムである PAST (Projection Approximation Subspace Tracking) を組み込んだ手法を検討した。しかし、音源方向を求める際に MUSIC スペクトルを走査する必要があり、多くの複素乗算が必要となるため、高い演算量を要するという問題が生じた。そこで、音源追尾問題を制約付最小化問題として定式化し、内点最小 2 乗 (Interior Point Least Square: IPLS) アルゴリズムで解くことによって、適応的に音源追尾を行う手法について検討した。IPLS は制約付最小化問題の逐次解法であり、制約条件により実行可能領域を学習の度合いによって制御するため、数値的安定性が保証されるという特徴をもつ。これにより、安定な移動音源追尾が可能となった。また、MUSIC スペクトルを計算する必要がないため、演算量を低減することが可能となった。しかしながら、空間エイリアシングを満たす低周波帯域においては、高い解像度が得られないこと、部屋の残響特性の影響が大きいことから、必ずしも十分な性能を確保できないという問題があった。

2. 研究の目的

一般に、マイクロホン間隔を広げると空間解像度が高くなり、高精度な推定が期待できる。しかし、マイクロホン間隔が、推定に使用する最大周波数の半波長以上の場合は空間的エイリアシングを生じるため、推定に使用できる周波数帯域は低く制限され、結果的に推定精度の向上は難しい。そこで本研究では、IPLS の初期値として低周波帯の推定結果を用いることで、エイリアシングを生じる周波数帯域であっても高精度に推定が可能な手法について検討する。これは、比較的低

い周波数帯域により求めた推定値を高い周波数帯域における実行可能領域を設定するための初期値に適用する方法である。これにより、高い空間的解像度を得ながら推定精度を向上することが可能となる。

実環境実験により、提案法が従来法に比べて高精度に移動音源追尾が可能であることを示す。

3. 研究の方法

検討中の手法は高解像度スペクトル推定法である MUSIC に基づく手法である。MUSIC は M 本のマイクロホンの受信音ベクトルの相関行列 \mathbf{R}_f の固有ベクトルが張る信号部分空間の直交性に基づいて音源定位を行なう。 \mathbf{R}_f を固有値分解して得られる M 本の固有ベクトルのうち、最大固有値に対応する固有ベクトル \mathbf{q}_1 は信号部分空間を張る基底ベクトルであり、その他の $M - 1$ 本の固有ベクトル $\mathbf{Q}_N = [\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \dots, \mathbf{q}_M]$ は雑音部分空間を張る基底ベクトルとなる。 $\mathbf{a}(\tau_n)$ と \mathbf{Q}_N は直交関係にあり、MUSIC はその直交性を MUSIC スペクトルによって評価し、音源定位を行なう。

移動音源追尾では音源が移動するとともに \mathbf{q}_1 も変動するため、観測ごとの \mathbf{R}_f の固有値分解が必要となる。しかしながら、固有値分解に要する計算コストは大きいため、実時間追尾を妨げる要因となる。そこで、アンテナアレー等の分野で使用されている PAST を用いて、部分空間の逐次更新を試みる。

PAST では、次式の評価関数 $J_P(\mathbf{q}_1)$ を設定し、再帰的最小 2 乗法を用いて部分空間更新により \mathbf{q}_1 の推定値 $\hat{\mathbf{q}}_1$ を求める。

$$J_P(\mathbf{q}_1) = \overline{|\mathbf{X}_f(n) - \mathbf{q}_1 \mathbf{q}_1^H(n-1) \mathbf{X}_f(n)|^2}$$

ここで、 $\mathbf{q}_1(n-1)$ はフレーム $n-1$ における \mathbf{q}_1 の推定値である。

PAST により、 \mathbf{q}_1 の逐次更新が可能となる

が、 \mathbf{q}_1 の変動のたびに MUSIC スペクトル $P_{M,f}(\tau)$ のピークサーチが必要となる。 $P_{M,f}(\tau)$ の算出には多くの複素乗算が必要なため、実時間処理を妨げる要因となる。そこで、逐次的な更新を行なうことにより、演算量の低減を図る。そのため、次式の評価関数 $J_I(\tau)$ を考える。

$$J_I(\tau) = \mathbf{a}^H(\tau) \mathbf{Q}_N \mathbf{Q}_N^H \mathbf{a}(\tau)$$

$J_I(\tau)$ は MUSIC スペクトルの分母である。すなわち、 $P_{M,f}(\tau)$ がピークを示す τ において $J_I(\tau)$ は最小値をもつことになる。しかしながら、 $J_I(\tau)$ は一般に多峰性関数となるため、局所最小解を避けるために、なんらかの制約が必要となる。そこで、次式の制約付最小化問題を考え、内点最小2乗法 (IPLS) を用いて音源定位を行なう。

$$\begin{aligned} \min \quad & J_I(\tau) \\ \text{sub.to} \quad & J_I(\tau) \leq \zeta_n, \\ & \tau^2 \leq \eta^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ζ_n は $J_I(\tau)$ の上限、 η は τ の取りうる範囲を規定する定数である。(4)式の問題に対する実行可能領域 Ω_n は

$$\Omega_n = \{ \tau \in \mathbf{R} \mid J_I(\tau) \leq \zeta_n, \tau^2 \leq \eta^2 \}$$

となる。 Ω_n に対する対数障壁関数 $\phi_n(\tau)$ は次式となる。

$$\phi_n(\tau) = -\log(\zeta_n - J_I(\tau)) - \log(\eta^2 - \tau^2)$$

$\phi_n(\tau)$ は Ω_n の境界で無限大に発散する。また、 $\phi_n(\tau)$ の最小点である解析的中心は Ω_n の内部に存在し、 $\phi_n(\tau)$ が凸関数である場合、ただ1つの極小点をもつ。したがって、 ζ_n を適切に選べば、解析的中心の算出により、音源定位が可能となる。

低周波帯域では、 Ω_n を比較的広く設定することができるが、アレーの解像度が高い高周波数帯域においては、 Ω_n を狭く適切に設定しなければ、 Ω_n 内においても $J_I(\tau)$ が多峰性を示し、 $J_I(\tau)$ の極値が複数存在するこ

とがある。そのため、ニュートン法を適用する際に各フレームにおける初期値によっては局所解に陥る可能性がある。

そのために、まず低周波数帯域で音源定位を行ない、次に高周波数帯域において音源定位を行う。このとき、初期値として低い周波数帯域によって求めた推定値を用いる。これにより、実行可能領域の内部に局所解に相当する偽りのピークが入ることを避け、高精度に音源追尾を行うことが可能となる。

4. 研究成果

実環境実験によって、提案法の性能を検証した。

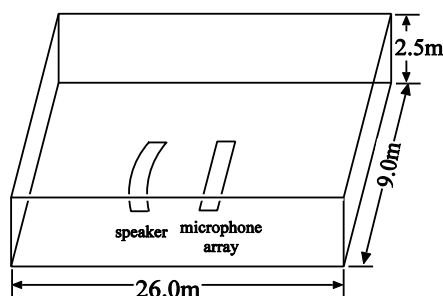


図 1: 室環境

表 1: 実験条件

マイクロホン数 M	4
初期値算出の帯域	1000 ~ 2000[Hz]
推定のための帯域	2000 ~ 4000[Hz]
従来法で使用した帯域	1000 ~ 4000[Hz]
サンプリング周波数	48[kHz]
フレーム長 N	1024

音源方向が離散的に変動する場合の追尾性能を検証した。収録に用いた部屋は通常の会議室で、騒音は36.7[dB]、残響時間は0.5[s]であった。この部屋のほぼ中央にスピーカとマイクロホンを配置した。各配置を図1に示す。音源は図2のように複数のスピーカを扇状に配置し、2[s]ごとに音の出るスピーカを時間とともに切り替え、移動音源を模擬した。

目的音は英語男声を使用した。従来法のマイクロホン間隔は40[mm]，提案法では160[mm]に設置した。また，表1に実験条件を示す。

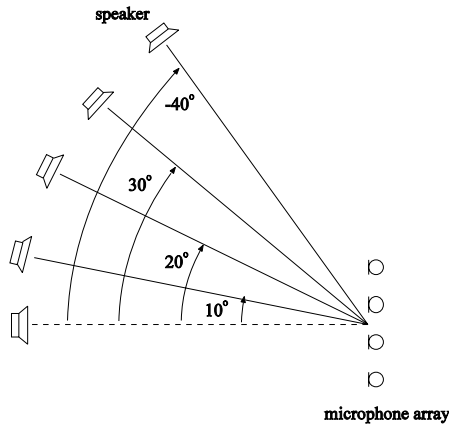


図 2: 実験配置

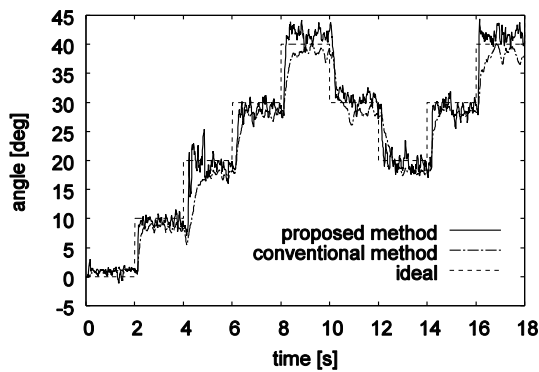


図 3: 実験結果

図 4 に提案法と従来法の音源追尾結果を示す。ここで，提案法の低周波帯域におけるパラメータは $\beta = 0.7, \mu = 0.1$ ，高周波帯域におけるパラメータは $\beta = 0.9, \mu = 0.2$ と設定した。また，従来法では， $\beta = 0.3, \mu = 0.02$ と設定した。平均 2 乗誤差は，提案法が 11.1，従来法が 15.3 であった。平均 2 乗誤差ならびに図 3 の結果より，提案法が安定に移動音源追尾可能であることが確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

辻 大亮, 陶山 健仁: 実環境における逐次部分空間推定に基づく移動音源定位, 電気学会論文誌 C, Vol. 129-C(1), 79-86, 2009 (査読有)

Daisuke Tsuji and Kenji Suyama: A Moving Sound Source Tracking Based on Two Successive Algorithm, Proc. of 2009 IEEE ISCAS, C2L-E5-5, 2009 (査読有)

[学会発表](計 6 件)

大和田 昇, 陶山 健仁: 音源数推定を用いた複数移動音源追尾の一検討, 第 23 回信号処理シンポジウム P-13 2008 年 11 月 13 日, ウェルシティ金沢

大和田 昇, 陶山 健仁: 信号部分空間追跡における 2 話者移動時の固有ベクトル割り当て問題の一検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-10-7, 2008 年 9 月 16 日, 明治大学

大和田 昇, 辻 大亮, 陶山 健仁: 複数移動話者追尾における固有ベクトルの割り当て問題に関する一検討, 電子情報通信学会応用音響研究会, 電子情報通信学会技術報告, EA2008-57, pp.71-76, 2008 年 8 月 5 日, 東北大学

辻 大亮, 陶山 健仁: 内点最小 2 乗法による移動話者追尾の性能改善, 電子情報通信学会回路とシステム研究会, 電子情報通信学会技術報告, CAS2007-102, pp.49-54, 2008 年 2 月 1 日, 沖縄県青年会館

辻 大亮, 陶山 健仁: 逐次更新則による安定な移動音源追尾, 電子情報通信学会応用音響研究会, 電子情報通信学会技術報告, EA2007-78, pp.33-38, 2007 年 11 月 15 日, 熊本大学

辻 大亮, 陶山 健仁: IPLS アルゴリズムによる安定な移動音源追尾, 第 22 回信号処理シンポジウム, C2-3, 2007 年 11 月 7 日, 東北大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陶山 健仁 (SUYAMA KENJI)

東京電機大学・工学部・准教授

研究者番号: 50303011

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし