

# 音空間・収音再生システムにおける 空間サンプリングの分割数が定位精度に与える影響

○田浦大地 渡邊貫治\* 西口正之\* 安倍幸治\* (秋田県立大学大学院)

## 1 はじめに

ある音空間を別の空間に再現することを音空間合成と呼ぶ。大野ら[1]は、原音場において聴取位置に到来する音信号を方向別に取得し、対応する方向の頭部伝達関数 (HRTF) を畳み込み、それらを足し合わせることで、音空間を仮想的に再現するシステムを構築した。このシステムでは、マイクロホンアレイで収音された音信号に遅延和法を適用するビームフォーミング処理によって、方向別収音 (空間サンプリング) を実現している。もし、収音時のビーム方向数、すなわち空間サンプリングの分割数を減らすことができれば演算量を削減することができる。また、ビーム方向数の削減により、マイクロホンアレイに必要なマイク数も減らすことができる可能性もある。しかし、ビーム方向数の違いが定位精度に与える影響については明らかになっていない。著者ら[1,2]は、従来の方向数 (29 方向) と極端に少ない方向数 (7 方向) のケースで検証を行った。その結果、ビーム方向数が両耳間レベル差 (interaural level difference, ILD) の再現に影響を及ぼすことが示された。ただし、方向数の条件が2条件のみであり、他の方向数については検証がされていなかった。ビーム方向数が減少することにより、空間再現精度が下がり、定位精度が低下することが

予想される。そこで本報告では、ビーム方向数の条件を2つ追加し同様の検討を行う。

## 2 システムの概要

Fig. 1 にシステムの処理フローを示す。まず、マイクロホンアレイによって収音された音信号に対しビームフォーミングを適用し、方向ごとの信号を得る。つぎに、各ビームの総和がフラットになるように各ビームに重みをかける。最後に、対応する音源方向の HRTF を畳み込み足し合わせることで両耳信号 (システム出力) を算出する。

## 3 ビーム方向及びビーム幅

本報告ではビーム方向数を 29,19,13,7 方向とした。ここで、29 方向は従来法の条件であり、ビーム幅はビーム方向に応じて異なる[3]。一方、7方向は既報の条件である[2]。この条件では、ビーム方向が7方向の場合、ビームの間隔がないように、かつ重なりすぎないようにビーム幅を $\pm 20^\circ$ とした。本報告で追加した、19,13 方向の場合もそのような考慮をすべきであるが、本検討ではビーム方向数の違いによる影響を比較するために、これらについて

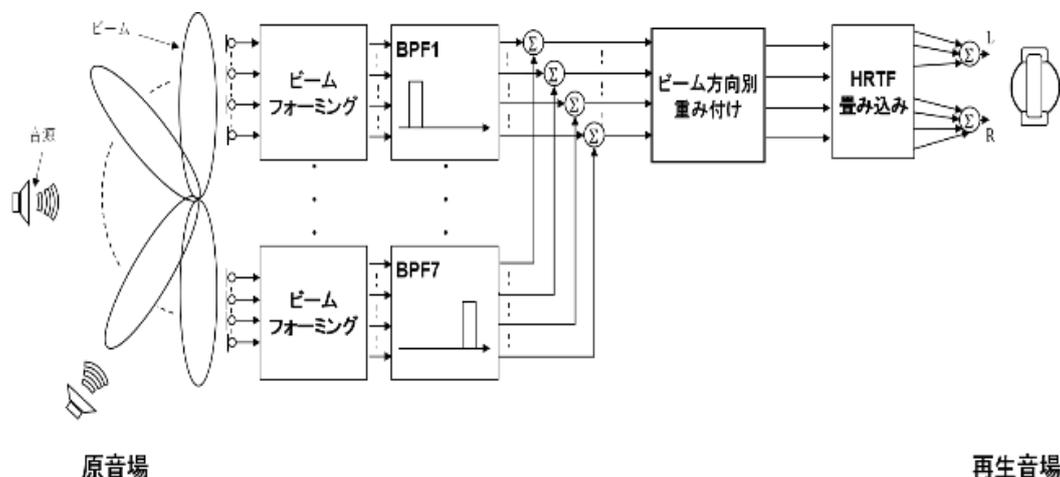


Fig.1 System flow

\*Influence of spatial sampling divisions on localization in sound field acquisition and reproduction system, by TAURA, Daichi, WATANABE, Kanji, NISHIGUCHI, Masayuki, and ABE, Koji (Akita Prefectural University).

Table 1 Numbers of beam directions and beam width for each beam direction

ビーム方向数	ビーム方向 [°]	ビーム幅 [°]
29	0, ±4.1, ±8.1, ±12.1, ±16.5, ±20.8, ±25.2, ±29.6, ±34.4, ±39.6, ±45.2, ±51.3, ±58.3, ±66.8, ±80.7	可変
19	0, ±10, ±20, ±30, ±40, ±50, ±60, ±70, ±80, ±90	±20
13	0, ±15, ±30, ±45, ±60, ±75, ±90	±20
7	0, ±30, ±60, ±90	±20

もビーム幅を±20°とした。各条件のビーム方向及びビーム幅を Table 1 に示す。

#### 4 ビーム方向数が両耳信号の再現に与える影響

ビーム方向数が両耳信号に与える影響を検証する。本システムが、高精度に空間再現が可能だとすると、インパルス信号の入力に対して、出力は音源方向に対応した HRTF となるはずである。そこで、様々な音源方向に対するインパルス応答を算出し、得られたインパルス応答から周波数特性を求めた。Fig. 2 に HRTF とシステム出力（左耳）の周波数スペクトルを示す。使用した HRTF はダミーヘッド (KEMAR, GRAS) のものである。横軸は周波数、縦軸は音源方向、色で相対レベルを表している。音源方向は-90°から 90°まで 1°間隔（正面前方を 0°, 上から見て時計回りを正）とした。1 段目が HRTF, 2 から 5 段目がそれぞれ 29, 19, 13, 7 方向の場合のシステム出力を表している。図から 29 方向の場合、概形が HRTF に類似したものとなっていることがわかる。19, 13, 7 方向の場合、概ね HRTF の概形は類似しているが、音源方向に対する不連続がみられる。以上より、29 方向の場合は再現精度が高いが、19, 13, 7 方向の場合は再現精度が低いといえる。

既報[2]で、ビーム方向数の減少が ILD の再現に影響があることが示されたので、本検討でも同様に ILD について評価することとした。Fig. 3 に HRTF と各システム出力の両耳間レ

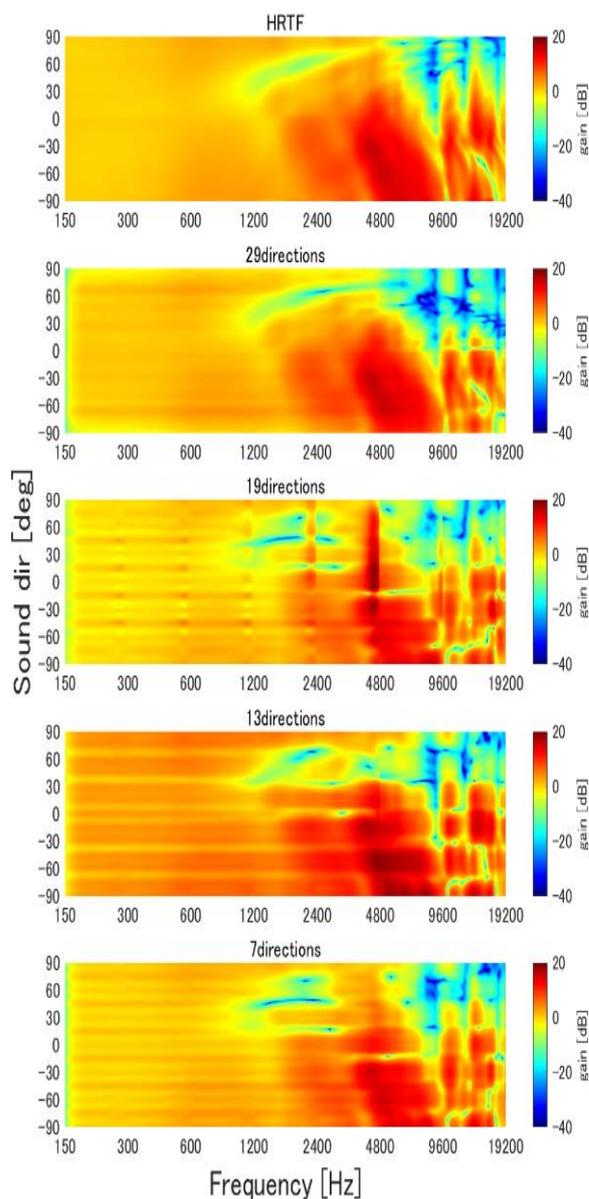


Fig.2 Frequency characteristics of HRTF and system outputs

ベル差を示す。横軸は音源方向、縦軸は ILD である。それぞれの図は HRTF の (破線) ILD とあるビーム方向数の場合のシステム出力の ILD (実線) を重ねてプロットしている。HRTF と 29 方向の場合、ずれてはいるが音源方向の変化に対して、滑らかに変化している。19, 13, 7 方向の場合、HRTF のように音源方向の変化に対して、滑らかに変化せず凹凸がみられる。ただし、7 方向の場合、HRTF の ILD と重なる部分が他の条件と比べて多い。HRTF の ILD との違いを定量的に評価するため、ユークリッド距離を類似度として算出することとした。ユークリッド距離は以下の式で計算される。

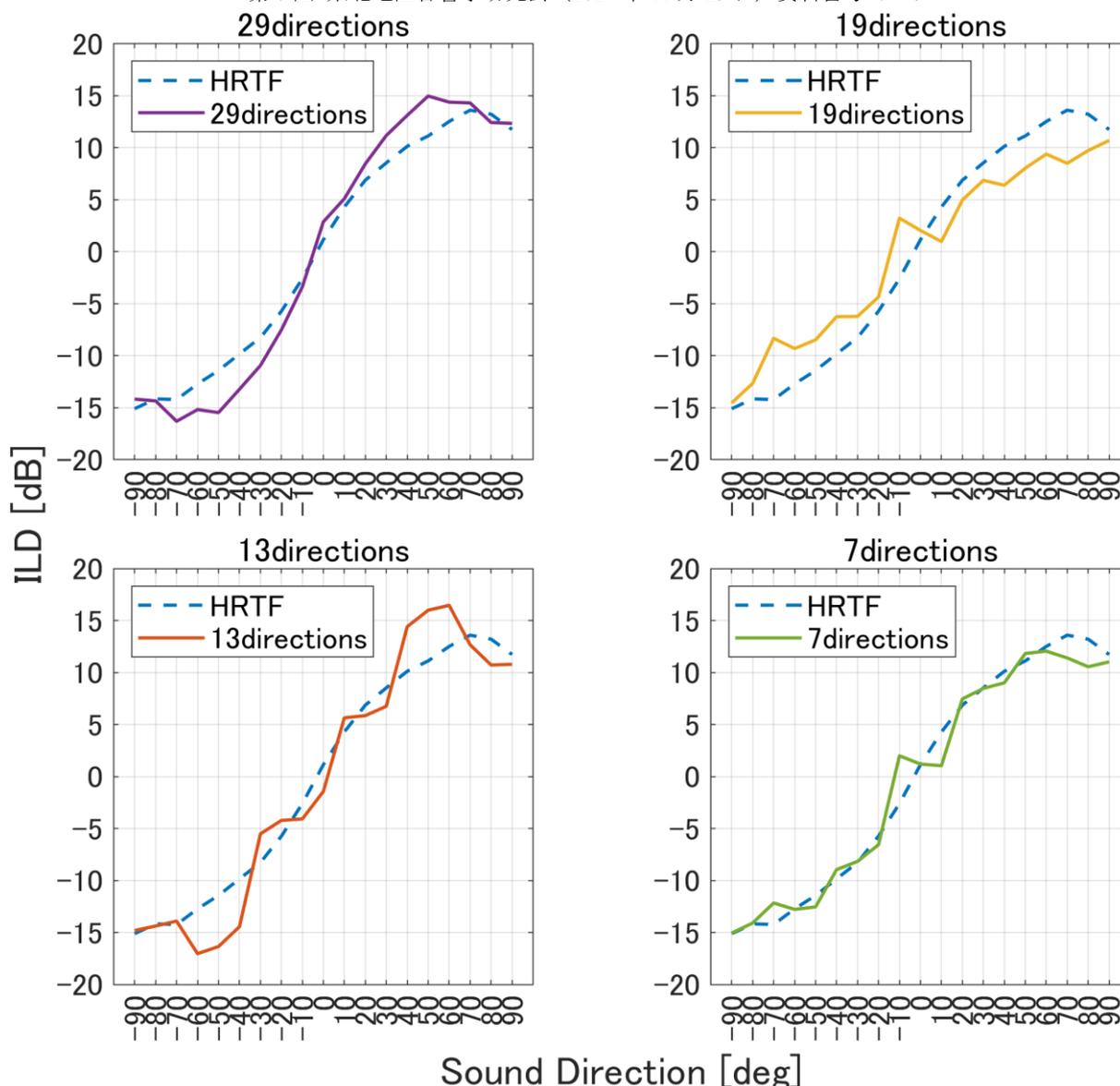


Fig.3 ILDs calculated from HRTF and system outputs

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

ここで、 $x_i$ と $y_i$ は*i*番目の音源方向の HRTF の ILD とシステムの両耳信号の ILD である。Fig.4 に結果を示す。図から、ビーム方向が29方向の場合と比べて19,13方向の場合にはユークリッド距離が大きいことがわかる。一方、7方向の場合には29方向の場合よりもユークリッド距離が小さいことがわかる。よって、ビーム方向を減らしたことにより、必ずしも空間再現精度が下がるわけではないということが言える。

## 5 ビーム方向数が定位精度に与える影響

ビーム方向数の減少が定位精度へ及ぼす影響を主観評価実験によって評価した。実験では、1音源がある原音場を再現した。被験者に、刺激音をヘッドホンで提示し、知覚した音像の方向を回答させた。実験は防音室で行った。被験者は健聴な20代の男性2名と女性1名であった。本実験の刺激音は、原音場の聴取位置に対する音源方向の HRTF を音源信号に畳み込んだ両耳信号（リファレンス）、及び音源信号にシステムの伝達関数を畳み込んだ両耳信号とした。使用したシステ

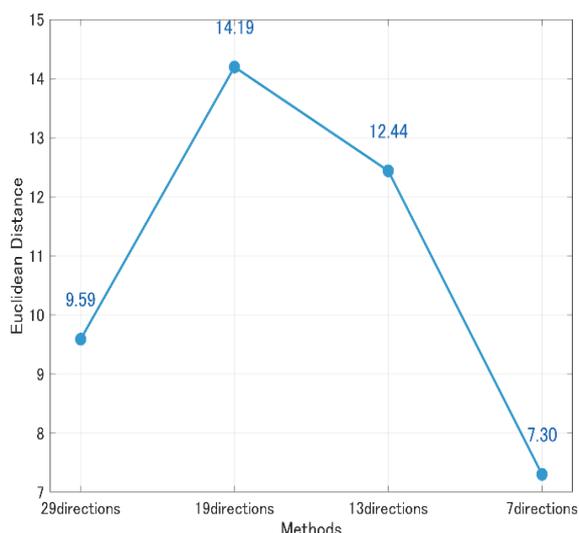


Fig.4 Euclidean distance between HRTF and ILDs of each system output

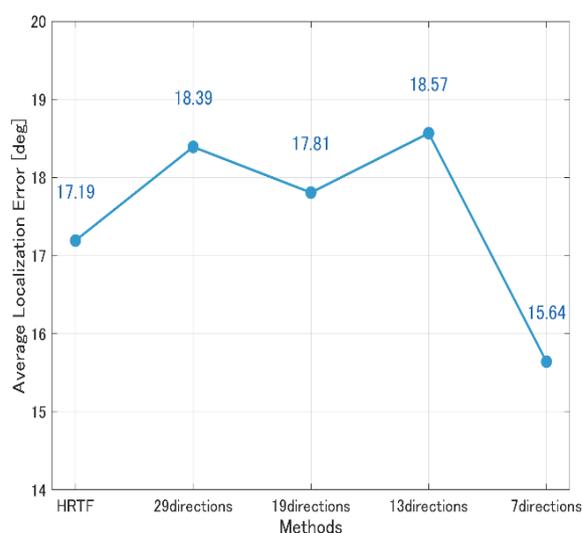


Fig.5 Average Localization Error

ムの伝達関数はビーム方向数が29方向, 19方向, 13方向, 7方向の場合であった。なお, 音源信号はホワイトノイズ (継続時間1 s, サンプリング周波数48 kHz) であった。音源方向は $-90^\circ$ から $90^\circ$ まで $10^\circ$ 間隔の19方向 (正前方を $0^\circ$ , 上から見て時計周りを正) とした。また, 刺激音の音圧レベルは音源方向 $0^\circ$ の左耳で70 dB となるように校正した。1方向の繰り返し回数は6回とし, すべての条件をランダムな順序で提示した。ビーム方向数の違いによる定位への影響を評価するために平均定位誤差を求めた。平均定位誤差は, 提示した音源方向と回答した音源方向の差の絶対値を方向ごとに算出し平均値をとって求めた。なお, 回答結果が前後誤りをしていた場合は, 前後誤りを前後対称の方向に折り返して計算を行った。Fig.5は各方向数ごとに, 音源方向及び被験者の平均をとって算出したものである。29,19,13方向の場合, 平均定位誤差はHRTFの平均定位誤差よりも大きいことがわかる。一方, 7方向の場合, HRTFの平均定位誤差よりも小さい。1節で述べたようにビーム方向が減少することにより, 平均定位誤差は大きくなると予想したが7方向の場合には平均定位誤差が小さい。Fig.4でHRTFのILDの類似度は7方向の場合が一番高かった。このことから, 本実験結果は妥当であるといえる。この

結果をふまえると, システムのビーム方向数や各ビームの方向を設計する際に, ILDの再現を考慮することが重要であると考えられる。また, 3節でも述べたように, 本報告の検証では19,13方向のビーム幅を考慮しておらず, 複数のビームが重なって収音されていた。したがって, 隣接するビームの影響を受けて再現精度が落ちている可能性が高い。よって, ビーム方向数だけでなくビーム幅を考慮することも, 重要であることが考えられる。

## 6 まとめ

ビームフォーミングに基づく音空間・収音再生システムにおいて, ビーム方向数が方向定位に与える影響について客観・主観的な評価を行った。それらの結果, ビーム方向数やビーム方向の設計をする時に, ILDを考慮することや, 適切なビーム幅を設定することが有効であることが示唆された。

## 参考文献

- [1] 大野ら, 信学技報, vol. 117 (399), 7-14 (2018)
- [2] 田浦ら, 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 1F07 (2024)
- [3] 大屋敷ら, 音講論 (秋), 489-492 (2022)