

音場計測・再生の最近の研究動向

尾本, 章
九州大学大学院芸術工学院

<https://hdl.handle.net/2324/7159647>

出版情報：日本音響学会研究発表会講演論文集．2014秋季，pp.1277-1280，2014-08-26．日本音響学会
バージョン：
権利関係：



音場計測・再生の最近の研究動向*

尾本章 (九大芸工)

1 はじめに

昨年、カナダのトロントで International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2013[1] が開催された。室内音響に関する最新の話集まる会議であるが、その中でも特に二つのグループの発表が、質・量共に抜きん出ている印象を持った。一つはドイツの Michael Vorländer が率いる SEACEN と名付けられたグループ [2]、もう一つがフィンランドの Tapio Lokki の Virtual Acoustics Team[3] である。二つのグループで 14 件の発表を行っており、全体の発表件数の 1/3 を占めていた。

それぞれ、コンサートホールをはじめとする音場の計測・分析・再生までを包括的に取り扱うビッグプロジェクトの内容紹介と進捗報告である。計算機を持ち込んだ効果的なデモや、多チャンネルスピーカシステムでの音場可聴化の試聴会まで、非常に幅広い内容であった。本稿では、彼らの活動を支える技術を中心に紹介し、最近の音場計測、再生に関するトレンドを紹介できればと考えている。

2 二つのプロジェクトの特徴

上記の二人は、それぞれ ISRA において Keynote Lecture [4, 5] を行い、彼らのプロジェクトについての詳細な紹介を行っていた。Vorländer は、Simulation and Evaluation of Acoustical Environments: SEACEN というプロジェクトを推進している。音場の数値モデル化、シミュレーション音場あるいは実音場でのデータ収集、得られた信号の符号化と伝送、電気音響機器を用いたバイノーラルあるいは各種音場再生手法による再現、までの一連の流れを包括的に取り扱うものである。音場のモデル化やアレイ信号処理等 9 個のサブグループを組織してコンソーシアムを形成しているが、ほぼ全グループが共通して音の知覚を研究課題に取り入れていることが特徴である。本稿の主題である音場計測・再生に関しては、Boaz Rafaely をグループリーダーとして、球形マイクロホンアレイを音場情報収集に用いている。彼の取組について、詳細を後述する。

ISRA においては、波動的なシミュレーションにおける局所作用と拡張作用の違いに関する考察や、減衰曲線においてノイズの影響を除去する方法、現場での壁面音響特性の測定方法等、トラディショナルな

課題と共に、SketchUp で簡単に作図しながら、その空間の可聴化を幾何音響のシミュレーションに基づいてほぼリアルタイムに行うデモンストレーション [6] 等を行っていた。初期反射音や主要な回折、散乱音のみを取り扱うものと分かってはいても、その場で描いた空間の音がヘッドホンから流れてくるというのは、音響シミュレーションには時間がかかるもの、という先入観がある筆者にとっては、やはり驚きであった。

Vorländer も「もう一つの大きな動き」として紹介しているが、Lokki のグループの取組もユニークである。ホールでの一般的な音源であるオーケストラをモデル化し、標準化する試みとして、ステージ上の複数のスピーカで代替している。さらに統一的な収録方法を設定してヨーロッパの主要なホールの測定を実行している。その様子は動画で公開 [7] されているが、バス 2 台を測定専用に使った大規模な測定ツアーのようである。

この一連の研究の中で、収録と再生の方法も微妙に進化している。ISRA では最新と思われる収録・再生手法も報告 [8] していたが、これまでの流れを整理して後述する。またこのグループでは、ホールの音の「好み」や個人的な嗜好に関して、「ワインや食べ物と同じような観点で」官能検査の手法を取り入れた考察を行っている [9] のも特徴的である。さらに Lokki は全ての発表が終了した後に、これまでに Loudspeaker Orchestra を用いて測定した結果のデモンストレーションを行い、ホールの特徴を明確に再現できる手法であることを証明していた。

全体的な印象としては、Vorländer のグループは、ISO3382 をはじめとする規格に沿った研究内容を充実させて、コンサートホールをはじめとする室内、あるいは音場の解析、再生全体を包括することを意図しているように思われる。一方の Lokki のグループは、Keynote Lecture の少し刺激的な題目 [5] が示すように、規格うんぬんよりも耳で聞いて評価する手法を重視した流れのようである。

3 音場情報の収集・再生

ISO3382[11] で示されている音響物理指標は、主として全指向性あるいは 8 の字型のマイクで収集できる情報に基づいている。しかし、先述の二つのプロジェクトのように、音場情報の徹底的な収集と評価、

*Current Trend of Sound Field Measurement and Reproduction. by OMOTO, Akira (Faculty of Design, Kyushu University)

さらに高品質な再生を考えた場合、方向情報の収集は不可欠である。何らかの方法によって受音位置に到来する音の方向を分離する訳であるが、このために各種マイクアレイや B-format マイクなどが用いられている。なお、最近のマイクロホンアレイの技術動向に関しては、最近の学会誌の特集 [10] を参照されたい。ここでは ISRA にて紹介されていた技術を中心に、建築音響分野での適用に限定して紹介する。

3.1 SEACEN における音場情報収集

Vorländer のグループでは、Measurement, Processing and Modeling of Natural Acoustic Environment というサブグループにおいて、B. Rafaery が主として球形のマイクアレイを用いて音情報の収集を担当している。彼は 2002 年に Meyer らが球形のマイクロホンアレイを提案 [12, 13] して以来、一貫してこの形にこだわり、音情報収集の精度を上げ、バリエーションを増やしている。

初期の段階では、球面アレイの表面で観測される音圧を平面波に分解する定式化、設計指標を示しており、いわゆる Delay-Sum 法との差異を検討している [14–16]。その後、剛球を使ったバージョン [17] も検討している。この場合も現存のいわゆる球バツフルマイクではなく、木で出来た球の表面にマイクの先端を当てながら測定する方法を試みていたようである。この段階で 6 次の成分まで分解できることを示している。またどちらかと言えば、オープンな球面アレイを好んで使っており、その構造から生じる ill-condition の問題を異なる半径の 2 重のアレイで回避したり、マイクロホンローテータを用いた逐次測定で多くの点数を実現すること等を試みている [18–21]。続いて、アレイで生じる指向性に重み付けを行い、任意形状にすること [22, 23] を試みている。

2010 年あたりから、マイクアレイで収集した情報から HRTF との関係を整理して ITD, ILD, IACC などの値を球面調和関数と結びつける方法 [24, 25] や、指向性を高めた音で残響除去を試みる [26] 等、精度向上の試み [27] と共に、建築音響分野へ近づいた内容がみられる。2012 年以降は、スピーカアレイとの組み合わせや、バイノーラルシステムとの融合 [28–30] 等に取り組んでおり、SEACEN におけるプラットフォーム作りを課題にしていることが明らかである。

Vorländer の方針 [4] をみると、今後は上記のようなマイクアレイにおいて得られた球面調和関数領域の到来方向情報を HRTF と融合することや、空間知覚の知見と共に心理音響の観点からアレイを最適化し、将来的な Spatial File Format の策定へと進もうとしているようである。また再生手法に関しては、いわゆる Higher Order Ambisonics や WFS の研究と共

に、動きを伴うことが出来る多自由度ダミーヘッドと “Binaural Near Field Loudspeaker” との組み合わせにも考察の範囲を広げていくとのことである。

3.2 Virtual Acoustics Group における音場情報収集と再生手法

Lokki のグループでは、コンサートホールにおける標準的な音源であるオーケストラをモデル化し、複数のスピーカーで模擬することを試みており、Loudspeaker Orchestra と称している [31, 32]。指向性と周波数特性を慎重に考慮した無響室録音の各楽器の音を、ステージ上に適切に配置した 24 個のスピーカから放射することで、どのホールでも同じ条件の「大きな」音源で音を聴くことが出来る。さらに各音源から受音点までのインパルス応答を測定し、加算することで、「大きな」音源からの全体的な応答を得て、現実的な特徴を把握することを試みている。無指向性を目指す 12 面体スピーカを用いる標準的な測定とは異なる観点である。

この標準的な音源と組み合わせた収録方法を提案しているが、年代と共に緩やかにその中身も変遷している。キーワードとしては、Spatial Impulse Response Rendering (SIRR) から Directional Audio Coding (DirAC)、そして最新の Spatial Decomposition Method (SDM) である。彼らの手法で一貫しているのは、厳密な音場再生を目指すのではなく、ITD, ILD や両耳信号のコヒーレンス、時変のスペクトル構造に依存する音色など、人間の音知覚に関する幾つかの手がかりを再現できればよいと、割り切った考えでシステム構築を試みていることであろう。

SIRR と DirAD SIRR という呼称は、2005 年あたりから使われている [33, 34]。基本的にこの方法では B-format (SoundField) マイクロホン、あるいはそれに類したマイクを用いて測定を行い、音響インテンシティを算出することで方向情報推定などを行っている。特に特徴的なのは、拡散性の推定とそれに応じた拡散音成分の合成方法であろう。B-format マイクロホンの直交する 8 の字型指向性マイクの出力を粒子速度 $\mathbf{u}(t)$ に比例した信号であることを利用し、全指向性マイクで得られた音圧信号 $p(t)$ と共に、各方向の音響インテンシティを合成した瞬時インテンシティ $I(t)$ を算出する。同時に、平面波を仮定した音場のエネルギー密度 $E(t) = \rho_0[Z_0^2 p^2(t) + \mathbf{u}^2(t)]/2$ も算出する。ここで ρ_0, Z_0 はそれぞれ媒質の質量密度および比音響インピーダンスである。

ここで、以下で定義される音響エネルギー密度と音響インテンシティの比を算出し、これを拡散性の指標として使っている。

$$\psi = 1 - \frac{\|\langle \mathbf{I}(t)/c \rangle\|}{\langle E(t) \rangle} = 1 - \frac{2Z_0 \|\langle p(t)\mathbf{u}(t) \rangle\|}{\langle p^2(t) \rangle + Z_0^2 \langle \mathbf{u}^2(t) \rangle}$$

拡散音場ではインテンシティは小さくなり、 ψ が1に近づくことを利用した指標である。全指向性マイクで収録した信号のうち $\sqrt{1-\psi}$ 倍した振幅を方向別に再生スピーカに割り振り、 $\sqrt{\psi}$ 倍した成分は、両耳で得られる信号ののコヒーレンスを下げるために、位相をランダムに変更したり、ランダムな成分を持つフィルタを畳み込んだりして全体のスピーカから放射している。再生方法としての多チャンネルスピーカへの割り振りは、Vector Base Amplitude Panning (VBAP) [35] を継続的に利用しているようである。得られた信号は WFS やアンビソニックに利用することも出来るが、いくつかの単純なスピーカアレイでの再生では、このようなパンニングの方法で十分であると述べられている。基本的に方向情報はインテンシティから得ているため、B-format マイクでどの程度正確にインテンシティが計測できるかが精度を決める大きな要因である。

SIRR は、インパルス応答の分析が主たる目的であるが、これを連続信号にまで拡張したものを DirAC と呼んでいる [36]。方向情報の導出には、変わらず B-format マイクを用いてインテンシティを算出して用いている。ただし、瞬時インテンシティにおける急激な方向変化を避けるために、アベレーシングを行うなど、多分にノウハウ的な側面もありそうである。

さらに、DirAC の中でも再生音生成のために工夫も行われている。これまでは全指向性マイクで得られた信号を、インテンシティから得られた方向別にパンニングして再生していた。しかし折角 B-format で1次のアンビソニック信号を得ているので、これらをもとに色々なパターンの指向性を再現して、その仮想的に得た信号をスピーカに割り振って再生する手法も試みられている [37]。音としては8の字型と鋭指向性 (Hyper-cardioid) との間で得られたものが良いとの記述も見られる。しばらくはこの方法を継続 [38] していたようであるが、2012 年以降、方向情報取得の方法を変更している。

SDM Spatial Decomposition Method と呼ばれる方法 [39, 40] は、Localization Function という概念を導入し、様々なアレイ、測定条件、音場によって適した関数を用いて方向情報推定を行う方法である。分析は基本的にサンプリングごとに行い、離散的な虚像音源を時々刻々探す方法である。

この手法はマイクアレイを限定しないが、必要なマイクの数最低4個、すべてが同一平面内に存在しないことが条件である。またマイクの中で最低ひとつは全指向性を持っていること、あるいは合成でき

ることが必要である。寸法としては人の頭よりも小さい程度が望ましく、できればオープンな形式が望ましいとされている。

各マイクロホンへの音波の到来時刻、その差の情報を用いて、最尤推定法や一般化した相関法などの「関数」を組み合わせる。具体的な関数やシミュレーション結果は [39] に詳細に記述されている。確率的にもっともらしい方向を推定する方法であるが、計算量の比較や、アレイ、音場との組み合わせの相性に関する検討が待たれる。

4 おわりに

ISRA 2013 において公開された二つの大きなプロジェクトで用いられている音場情報の計測、再生方法に関して概略を紹介した。特に計測に関しては、方向情報の収集が主たる課題であり、それゆえ結果の効果的な可視化方法が重要である。この点、Lokki が示した可視化手法 [5] は秀逸であると感じた。ホールの平面、立面図に到来音のポーラーパターンを時系列ごとに重ねて描いただけのものであるが、ステージで複数音源が鳴った場合の、直接音、初期反射音から徐々に様な残響音に包まれる成長の様子が一見して把握できる。我々も、音響インテンシティを用いた反射音到来方向の可視化をパノラマ写真と組み合わせで行っているが [41]、学ぶべきところは多いと感じた。なお、ISRA での発表をもとに収集したため、偏った文献リストになっていることをご容赦いただきたい。

参考文献

- [1] http://www.caa-aca.ca/conferences/isra2013/en/index_en.html
- [2] <https://www.seacen.tu-berlin.de/menue/seacen/parameter/en/>
- [3] <https://mediatech.aalto.fi/en/research/virtual-acoustics>
- [4] Vorländer, M.: Simulation and Evaluation of Acoustic Environments, *Proc. International Symposium on Room Acoustics* (2013).
- [5] Lokki, T.: Throw away that standard and listen: your two ears work better, *Proc. International Symposium on Room Acoustics* (2013).
- [6] Pelzer, S., Aspöak, L., Vorländer, M. and Schröder, D.: Interactive real-time simulation and auralization for modifiable rooms, *Proc. International Symposium on Room Acoustics* (2013).
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=cjgdzZ3Bez0>
- [8] Tervo, S., Pätynen, J. and Lokki, T.: Spatial analysis of concert hall impulse responses, *Proc. International Symposium on Room Acoustics* (2013).
- [9] Lokki, T., Pätynen, J., Kuusinen, A., Vertanen, H. and Tervo, S.: Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes, *The Journal of*

- the Acoustical Society of America*, Vol. 130, No. 2, pp. 835–849 (2011).
- [10] 小特集, マイクロホンアレイの新しい技術展開, 日本音響学会誌 Vol. 70, No. 7, pp. 371–409, (2014).
 - [11] ISO3382-1: Acoustics – measurement of room acoustic parameters – part 1: Performance spaces, *International Standard Organization* (2009).
 - [12] Meyer, J. and Elko, G.: A highly scalable spherical microphone array based on an orthonormal decomposition of the soundfield, *Proceedings of ICASSP '02*, Vol. 2, pp. II-1781–II-1784 (2002).
 - [13] Meyer, J. and Agnello, T.: Spherical Microphone Array for Spatial Sound Recording, *Proc. 115th Convention, Audio Engineering Society*, 5979 (2003).
 - [14] Rafaely, B.: Plane-wave decomposition of the sound field on a sphere by spherical convolution, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 116, No. 4, pp. 2149 – 2157 (2004).
 - [15] Rafaely, B.: Analysis and design of spherical microphone arrays, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 13, No. 1, pp. 135–143 (2005).
 - [16] Rafaely, B.: Phase-mode versus delay-and-sum spherical microphone array processing, *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol. 12, No. 10, pp. 713–716 (2005).
 - [17] Park, M. and Rafaely, B.: Sound-field analysis by plane-wave decomposition using spherical microphone array, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 118, No. 5, pp. 3094–3103 (2005).
 - [18] Balmages, I. and Rafaely, B.: Open-Sphere Designs for Spherical Microphone Arrays, *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, Vol. 15, No. 2, pp. 727–732 (2007).
 - [19] Rafaely, B., Weiss, B. and Bachmat, E.: Spatial Aliasing in Spherical Microphone Arrays, *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 55, No. 3, pp. 1003–1010 (2007).
 - [20] Rafaely, B., Balmages, I. and Eger, L.: High-resolution plane-wave decomposition in an auditorium using a dual-radius scanning spherical microphone array, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 122, No. 5, pp. 2661 – 2668 (2007).
 - [21] Rafaely, B.: The Spherical-Shell Microphone Array, *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, Vol. 16, No. 4, pp. 740–747 (2008).
 - [22] Rafaely, B. and Kleider, M.: Spherical Microphone Array Beam Steering Using Wigner-D Weighting, *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol. 15, pp. 417–420 (2008).
 - [23] Rafaely, B.: Spherical Microphone Array with Multiple Nulls for Analysis of Directional Room Impulse Responses, *Proc. ICASSP '08*, pp. 281–284 (2008).
 - [24] Rafaely, B. and Avni, A.: Interaural cross correlation in a sound field represented by spherical harmonics, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 127, No. 2, pp. 823 – 828 (2010).
 - [25] Rafaely, B. and Avni, A.: Sound Localization in a Sound Field Represented by Spherical Harmonics, *Proc. of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics* (2010).
 - [26] Rafaely, B. and Peled, Y.: Method for Dereverberation and Noise Reduction using Spherical Microphone Arrays, *Proc. ICASSP '10* pp. 113 – 116 (2010).
 - [27] Fisher, E. and Rafaely, B.: Near-Field Spherical Microphone Array Processing With Radial Filtering, *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, Vol. 19, No. 2, pp. 256–265 (2011).
 - [28] Morgenstern, H., Zotter, F. and Rafaely, B.: Joint spherical beam forming for directional analysis of reflections in rooms, *Proc. Acoustic 2012, Hong Kong* (2012).
 - [29] Khaykin, D. and Rafaely, B.: Acoustic analysis by spherical microphone array processing of room impulse responses, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132, No. 1, pp. 261 – 270 (2012).
 - [30] Shabtai, N. R. and RAFAELY, B.: Binaural sound reproduction beamforming using spherical microphone arrays, *Proc. ICASSP*, pp. 101–105 (2013).
 - [31] Patynen, J., Tervo, S. and Lokki, T.: A loudspeaker orchestra for concert hall studies, *Proc. Institute of Acoustics*, pp. 45–52 (2008).
 - [32] Patynen, J.: A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics, PhD Thesis, Aalto University (2011).
 - [33] Merimaa, J. and Pulkki, V.: Spatial impulse response rendering I: Analysis and synthesis, *Journal of The Audio Engineering Society*, Vol. 53, No. 12, pp. 1115 – 1127 (2005).
 - [34] Pulkki, V. and Merimaa, J.: Spatial impulse response rendering II: Reproduction of diffuse sound and listening tests, *Journal of The Audio Engineering Society*, Vol. 54, No. 1/2, pp. 3 – 20 (2006).
 - [35] Pulkki, V.: Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning, *Journal of The Audio Engineering Society*, Vol. 45, No. 6, pp. 456–466 (1997).
 - [36] Pulkki, V.: Spatial Sound Reproduction with Directional Audio Coding, *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 55, No. 6, pp. 503–516 (2007).
 - [37] Vilkamo, J., Lokki, T. and Pulkki, V.: Directional Audio Coding: Virtual Microphone-Based Synthesis and Subjective Evaluation, *Journal of The Audio Engineering Society*, Vol. 57, No. 9, pp. 709–724 (2009).
 - [38] Lokki, T.: Recording and reproducing concert hall acoustics for subjective evaluation, *Proc. International Seminar on Virtual Acoustics (ISVA)*, pp. 32 – 37 (2011).
 - [39] Tervo, S., Patynen, J. and Lokki, T.: Acoustic reflection localization from room impulse responses, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 98, pp. 418 – 440 (2012).
 - [40] Tervo, S., Patynen, J., Kuusinen, A. and Lokki, T.: Spatial decomposition method for room impulse responses, *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 61, No. 1/2, pp. 17–28 (2013).
 - [41] Omoto, A., Sugiura, K.: Visualization and Evaluation of Reflections inside an Enclosed Space using Sound Intensity Measurement, *Proc. International Symposium on Room Acoustics* (2013).