

第4回AIVR委員会

三次元音場VRシステムに関する研究

IPA「三次元音空間シミュレーションソフトウェアの研究開発」について

1999年1月19日

早稲田大学理工学総合研究センター

山崎芳男

# 三次元音空間シミュレーションソフトウェアの研究開発

Advanced Software for Three Dimensional Sound Field Simulation

山崎芳男

Yoshio Yamasaki

早稲田大学理工学総合研究センター 音響情報処理研究室

(〒169-0072 東京都新宿区大久保三丁目4番1号 E-mail:yamasaki@mse.waseda.ac.jp)

**ABSTRACT:** The sound field simulation is realized by convolution of the signal and the impulse response. Based on the Kirchhoff-Helmholts integral, an arbitrary sound field within an enclosed space can be determined by the normal component of particle velocities and the sound pressures on the surface of the space. However, realization of this theory, numerous number of loudspeakers are needed. The wave front synthesis is introduced which reduces the number of loudspeakers.

## 1. 背景

マルチメディアにおいて音は画像に勝るとも劣らぬ重要な情報伝達手段であり、特に目を通して摂取する情報が前方のみであるのに対して耳は全空間からの情報を得ている。情報伝達手段としての音、特に音の三次元空間情報が重要であるにもかかわらず、あまりにも身近かなるが故に映像に比べて研究開発が十分行われていないのが現状である。

音空間の伝送技術には人間あるいは人を模したダミーヘッドの両耳の位置で收音し、これをヘッドホンあるいは2～3スピーカーで再生するトランスオーラルシステムがある。しかしこれらのシステムは耳の位置に原音場の音響情報を伝えることを目的とした、あくまでも両耳の位置2点のみの制御システムであり、頭の回転や人の移動には原理的に対応できないシステムである。

三次元音場を正確に伝送するにはキルヒホフヘルムホルツの積分方式に基づく方法がある。すなわち受聴者を取り囲む閉曲面上の音圧と法線方向の粒子速度を目的の音場と合致させることにより、閉曲面内に目的の三次元音場を構築することができる。しかるに音波の波長を考えると1cm以下の間隔で閉曲面上の点を制御する必要があり、到底実現は不可能である。

三次元音空間情報の正確な伝送、個人用さらに大空間における多人数を対象とした再生三次元音空間音場構築の早急な実用化が強く期待されている。

## 2. 目的

本開発は実空間で収録した音源、コンピュータで計算により合成された音楽や音声など各種音源信号のデータベースと、実音空間における測定や設計図面から計算により求めた音場の伝送特性データベースを構築し、両者をたたみ込み演算することにより人の周りに正確に三次元音場を構築する、パーソナルコンピュータ上で動作するシミュレーションソフトウェアを実現しようとするものである。

受聴者が自由に移動することが可能な三次元音場を構築する Kirchhoff - Helmholtz 積分方程式を簡易化する手法である波面合成理論と、人間の聴覚を十分カバーする 100 kHz 以上の信号までも伝送することのできる山崎らが提案した高速標本化 1bit 量子化方式を導入することにより、個人向け及び多人数を対象とした三次元音場の構築を目標にしている。

## 3. プロジェクト内容

本開発は音源信号と音場の伝達特性であるインパルス応答をたたみ込み演算して再生信号を得るたたみ込み積分理論を前提にしている。入力信号となる、例えば音声や楽器音など各種音源のデータベースを構築し、また、音場、例えばコンサートホールや教会等の音響伝達関数の時間領域での表現である音場のインパルス応答のデータベースを構築し、両音をたたみ込み演算して再生信号をシミュレーションし、さらにこの信号を高効率符号化して伝送し、個人用トランスオーラル再生音と面合成を用いて多人数に対して大空間で再生する三次元音環境シミュレーションソフトウェアを開発する。

### (1) 機能間の関連

本開発の 5 つの機能とそれぞれの機能間の開発項目の関連を図 - 1 に示す。

### (2) 理論的背景

本ソフトウェアは主として次の 4 つの創造的処理方式を用いて開発された。

#### a) 高速 1bit 信号処理

本開発では収録から再生まで一環して高速標本化 1bit 量子化デジタル信号を用いる。高速 1bit 信号処理は現在広く使われている 48kHz 標本化、16bit 量子化などの通常のマルチビット方式とは異なり、同じ伝送容量の場合 768kHz で標本化し、1bit で量子化する信号形式である。

例えば AD 変換では量子化器を帰還ループ内に設けるなどの処理により量子化雑音を可聴帯域外の高周波域に集中させる。通常の AD 変換が 20kHz 程度の帯域制限を受けるのに対しこの方式では 20kHz 帯域では現行の方式と同等の 100dB 以上のダイナミックレンジを確保したうえ、100kHz 以上の帯域におよぶ信号の伝送が可能である。

b) 近接4点法<sup>①</sup>

本開発では音場の空間情報即ち直接音と反射音の室内位置とその特性の把握、および再生音場の評価に近接4点法を用いる。近接4点法は早稲田大学教授・山崎らが1973年頃に考案した三次元空間の測定方法で、以後今日までコンサートホールや教会など内外の多くの音空間を測定してきた。近接して置かれた同一平面上にない4本のマイクロホンで音を収録し、地震の震源探査と同じその僅かな時間構造の違いに着目して短時間

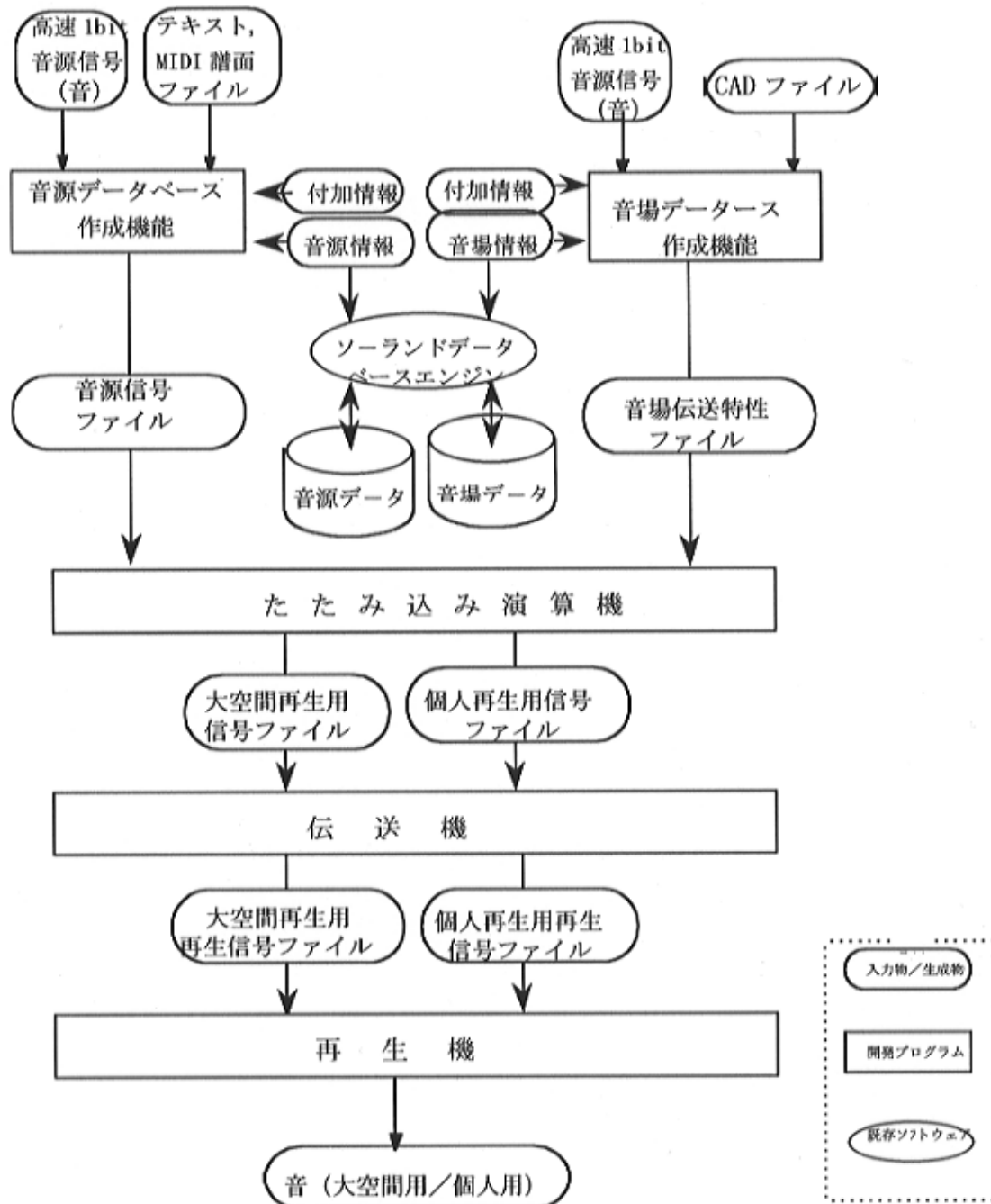


図-1 各機能間の関連

相関、インテンシティの手法により直接音、反射音の空間座標及び大きさを特定する測定法である。本開発において三次元音場の測定、音源位置の特定に用いる。

#### c) 一般化調和解析<sup>(2)</sup>

本開発において音響信号の分析に主として一般化調和解析を用いる。信号処理の始祖 Wiener により提案され、最近平田、東山、山崎らにより音響信号の分析に適用されている<sup>(3)</sup>。一般化調和解析は、原信号の着目する区間において残差を最小とする周波数成分を1つ特定し、これを原信号から差し引く操作を順次繰り返すことにより周波数成分を決定する単純明快な分析手法である。広く行われているフーリエ分析とは異なり分析窓幅の影響を受けずに正確な周波数成分の抽出が可能である。

#### d) 波面合成

##### Jessel らによる音場制御

音の VR (Virtual Reality) を実現する手段として、受聴者を取り囲む空間領域内において波面を合成する手法がある。波面を合成する手法として Huygens の原理に基づきある制御領域の周辺に Tri-pole を設置して、所望の音場の境界面の音圧および音圧傾度に比例してそれらの音源の強さを制御する方法が提案されている<sup>(4)</sup>。

G. A. Mangiante は能動騒音制御を目的に Huygens の原理による領域内の音場の制御を試みた<sup>(5)</sup>。これは制御領域を囲む閉曲面上の任意の音圧と粒子速度を生成することのできる音源を分布させることにより、制御領域内の所望の音場を生成しようというものである。能動騒音制御では所望の音場の音圧は0である。

Huygens の原理とはある時点の波面を無数の波源と考えるもので、音場と構築するには、閉曲面上の無数の点音源を配慮し任意の信号を出力するシステムが必要となる。

##### Kirchhoff の積分公式

伊勢らは Kirchhoff の積分公式に基づき任意の位置に音源の配置が可能なシステムを提案した<sup>(6)</sup>。Kirchhoff の積分公式によれば、領域内に音源がない場合は境界面上の音圧と粒子速度を制御すれば、領域内に所望の音場を実現することができる。しかるに音圧および粒子速度を境界面上を連続的に制御することは不可能である。そこで境界面の微小要素内では音圧と法線方向の粒子速度が一定値であることを仮定して面を離散化し、境界面上の離散点での音圧および法線方向の粒子速度を制御する。

境界面上 N 点の音圧および法線方向の粒子速度を再現するには法線方向の粒子速度が音圧信号から近似的にもとめることから、2N 点の音圧信号を原音場と等しくすればよいことになる。すなわち、これは 2N 点の音圧が原音場ともっとも近くなるような制御用フィルタの伝達関数を求める問題となる。

この手法は Jessel らの理論のように、境界条件を点音源と 2 重音源によって再現するのではなく、制御点よりも少ない個数の音源により所望の境界条件を満たす最小 2 乗解を求める方法であり、原理的には音源の種類や設置位置によらない制御手法であるが、音場の逆フィルタ処理が必要となる。

## Kirchhoff の積分公式の半空間への拡張

無限大の境界面で音源と受音点が分けられているとき、Kirchhoff の積分公式は次式の Reyleigh 積分

$$p(r, \omega) = |z - z_1| \oint p(r_s, \omega) \frac{1 + jk|r - r_s|}{2\pi|r - r_s|} e^{-jk|r - r_s|} ds$$

に収束する。Reyleigh 積分により音場を解釈すれば、音源と受音点を分ける境界面上のすべての点で音圧のみを制御することにより、受音源を含む領域内に所望の音場を構築することができる。

波面合成法による音場構築を Reyleigh 積分に基づき実現するには、Kirchhoff の積分公式によるほうほうと同様に境界面の微小要素内では音圧が一定であることと見なして面を離散化し、境界面上の離散点での音圧を再現する。制御系の規模を削減するには境界面に設置した制御点よりも少ない個数の制御用音源により所望の境界条件を満たす制御用フィルタの伝達関数の最小 2 乗解を求めればよい。

また、Reyleigh 積分の無限大の境界で音源と受音点が分けられている音場を表わしたものであるから、近接 4 点法で計算された反射音分布を用いてさらに制御系を削減し、実現可能な規模で波面合成により音場を構築する方法が考えられる。

### 4. 処理結果

音場制御領域を従来の両耳入口という特の 2 点から三次元空間へ拡大し、聴覚を考慮した実現可能な波面合成法に基づく三次元音空間シミュレーションソフトウェアの研究開発を実施した。

愛知芸術文化センターコンサートホールの三次元音空間を本ソフトウェアでシミュレーションした例を図 - 2 に示す。原音場と再現音場を近接 4 点法で測定した反射音分布を比較したものである。両者は十分類似しており、実用的なシミュレーション技術が確立したといえる。

### 5. 参加企業および機関

早稲田大学、千葉工業大学、工学院大学、東京理科大学、IAT、シャープ、東芝、ヤマハ、ADS、シエラシステムデザイン、日東紡音響エンジニアリング、トーエイ工業、イメージ情報科学研究所

### 6. 文 献

- (1) Y. Yamasaki and T. Itow, "Measurement of spatial information in sound field by closely located four point microphone method," 音響学会英文誌、Vol.10、No.10、pp.101 - 110 (1989. 10).
- (2) N. Wiener, "The Fourier Integral and Certain of Its Application (Dover, New York) (1958).
- (3) 牛山 聡、東山三樹夫、飯塚昌弘、平田能睦、"一般調和解析による波形分析," 信学技報、EA93 - 103、pp. 39 - 44 (1994).

- (4) M.J.M.Jessel and G.A.Mangiante, "Active Sound Absorbers in an Air Duct," J.Sound Vib. 23, 3, 383 - 390 (1972).
- (5) G.A.Mangiante, "Active sound absorption," J.Acoust.Soc. Am. 61, 6, 1516 - 1523 (1977).
- (6) 伊勢史郎, 鮫島俊哉, 山崎芳男, "キルヒホッフ積分公式に基づく音場制御理論とその応用," 建築音響研究会資料 AA 95 - 4 (1994).
- (7) A.J.Berkhout, D.de Vries and P.Vogel, "Acoustic Control by Wave Front Synthesis," J.Acoust.Soc.Am. 93, 2764 - 2778 (1993).

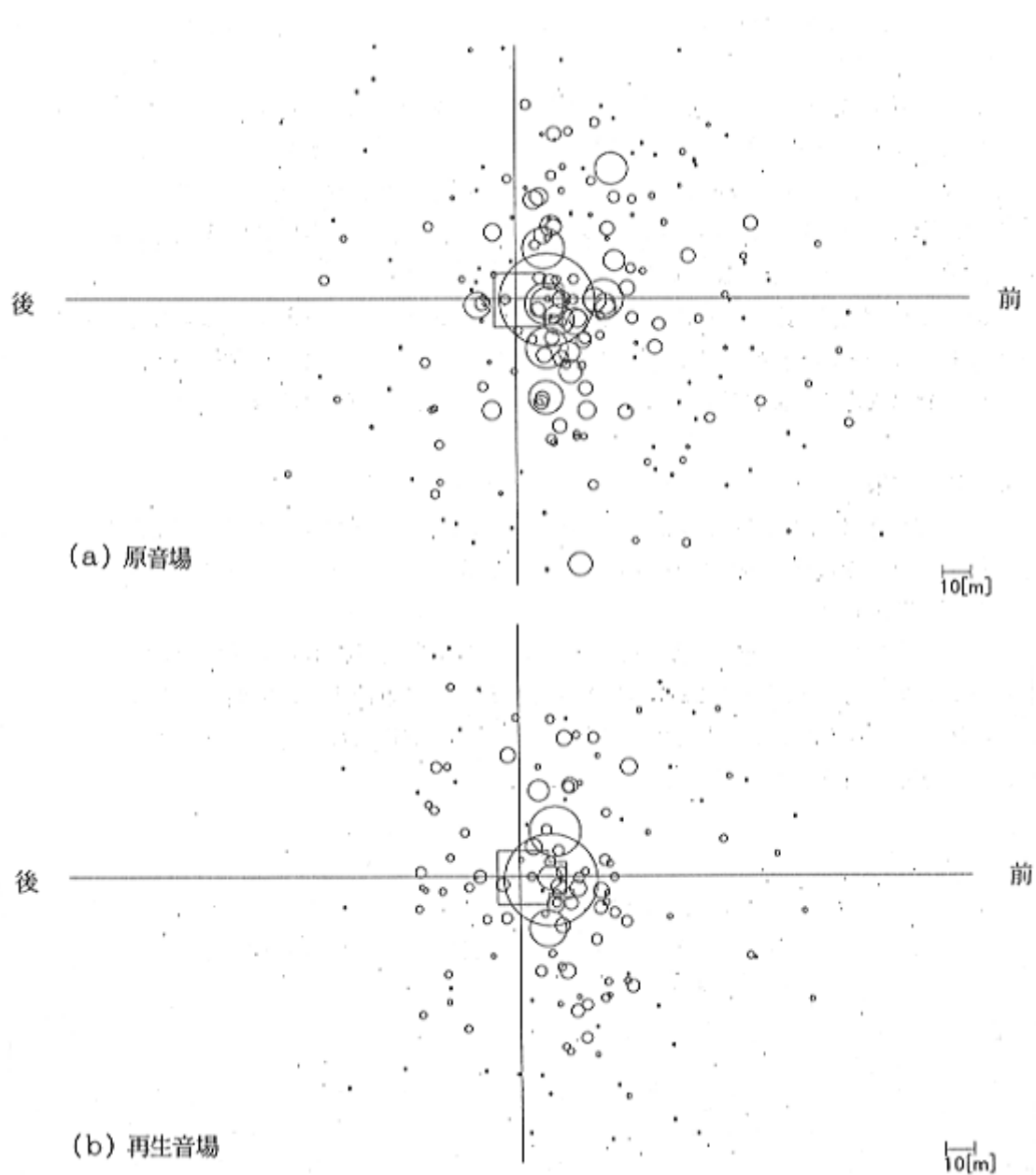


図-2 近接4点法による反射音分布