

## GPUによる音場レンダリングの試み

On the sound field rendering by GPU

上屋隆生<sup>1)</sup>, 大久保寛<sup>2)</sup>

Takao TSUCHIYA and Kan OKUBO

<sup>1)</sup>工博 同志社大教授 理工学部 (〒 610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3. ttsuchiya@mail.doshisha.ac.jp)<sup>2)</sup>博 (工) 首都大学東京准教授 システムデザイン学部 (〒 113-8656 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6. kame@sd.tmu.ac.jp)

The sound field rendering is a technique to compute sound field from three-dimensional numerical models constructed in the computer, which is the same concept as the graphics rendering in computer graphics. In this paper, sound field renderers are developed using the digital Huygens' model (DHM) and the constrained interpolation profile (CIP) method respectively implemented on the graphics processing unit (GPU). The digital boundary condition (DBC) in which the boundary condition with an arbitrary frequency characteristics is realized by an IIR digital filter is also developed and integrated into the sound field renderer. As the result of numerical experiments, it is confirmed that several ten times the computing performance can be easily achieved using GPU compared with CPU. It is also confirmed that the DBC is valid for the boundary condition with arbitrary frequency characteristics.

**Key Words** : sound field rendering, digital boundary condition, digital Huygens' model (DHM), constrained interpolation profile (CIP) method, GPU

## 1. はじめに

CG の分野では, 形状や色データを基にコンピュータ内に仮想的な画像空間を構築し, ディスプレイ上に表示するレンダリング技術が確立されている。これと同様に, 3次元音響空間をコンピュータ上に構築し, 音響情報を数値的に提供する手法を音場レンダリングと呼ぶ。筆者は, 音波の波動性を考慮したリアルタイム音場レンダラーを“シリコンコンサートホール [1, 2]”と名付け, その要素技術を開発するプロジェクトを開始している [3]。

シリコンコンサートホールの実現には, 高速な演算システムと現実空間に即した境界条件処理などが要求される。本報告では, 高速な演算システムの1つの試みとして GPU (Graphics Processing Unit) を用いた音場レンダラーを構築する。また, 境界条件処理については, 反射率が任意の周波数特性を有する壁面をデジタルフィルタでモデル化するデジタル境界 [4] を導入する。ただし, 本報告では垂直入射反射率のみを考慮する。3次元音響空間について, デジタルホイヘンスモデル (DHM) 法 [5, 6] と CIP (Constrained Interpolation Profile) 法 [7, 8] による3次元音場レンダラーを GPU に実装する。さらに, 各レンダラーにデジタル境界を組み入れてその効果を検証する。

## 2. 音場レンダリング

## (1) DHM 法

3次元音場の DHM 要素では, 波動場の微小領域を図1のように長さ  $\Delta l$  の直交線分で表現する。各線分

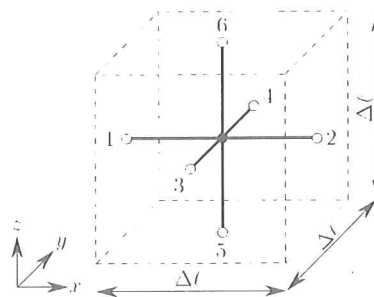


図-1 3次元 DHM 要素

に入射されたパルス  $P$  は, 節点における特性インピーダンスの不連続によって,  $\Delta t$  秒後には各線分に次式のように散乱される [5, 6]。

$$S_i(n+1) = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^6 P_j(n) - P_i(n) \quad (1)$$

ただし,  $P, S$  はそれぞれ入射, 散乱パルス, 添字  $i, j$  は線分番号 (1 ~ 6),  $n$  は離散時刻 ( $t = n\Delta t$ ) をそれぞれ表す。散乱パルスは, 隣接要素の線分への入射となり, 波は連鎖的に広がることになる。その拡がり方はホイヘンスの原理と等価と見なすことができ, DHM はホイヘンスの原理の離散化モデルであるといえる。式 (1) で表される演算は, 非常に単純で, かつ並列処理やハードウェア化に適している。

## (2) CIP 法 [7, 8]

媒質の減衰を考慮しない場合, 線形音場の支配方程式は

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \nabla p = 0 \quad (3)$$

で表される。ただし、 $p$  は音圧、 $\mathbf{u}$  は粒子速度ベクトル、 $\rho_0$  は密度、 $c_0$  は微小振幅音波の音速である。式(2)は連続の式で、式(3)は運動方程式である。

3次元の場合、CIP法では方向分離により $x, y, z$ 方向を個々に扱う。まず、 $x$ 方向を考えると、式(2)、(3)はそれぞれ

$$\frac{\partial p}{\partial t} + c_0 \frac{\partial(Z_0 u_x)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(Z_0 u_x)}{\partial t} + c_0 \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

ただし、 $Z_0 = \rho_0 c_0$  は媒質の特性インピーダンス、 $u_x$  の粒子速度ベクトルの $x$ 方向成分である。さらに、両式の和と差をとると

$$\frac{\partial f_{x\pm}}{\partial t} \pm c_0 \frac{\partial f_{x\pm}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

となる。ただし、 $f_{x\pm} = p \pm Z_0 u_x$  である。式(6)は、 $f_{x\pm}$  に関する移流方程式である。同様に、式(6)の $x$ 方向微分についても

$$\frac{\partial g_{x\pm}}{\partial t} \pm c_0 \frac{\partial g_{x\pm}}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

となり、移流方程式の形となっている。ただし、 $g_{x\pm} = \partial f_{x\pm} / \partial x = \partial_x p \pm \partial_x Z_0 u_x$ 、 $\partial_x = \partial / \partial x$  である。CIP法では $f$ と $g$ を同時に移流させることで、エルミート補間を用いた高精度な移流計算を実現している。

$y, z$ 方向に関しても同様に移流方程式が得られるため、CIP法により各方向の移流計算を交互に行えば、スカラー量である音圧を媒介として3次元の伝搬計算が行える。ただし方向分離だけでは、移流方向以外の方向の微分成分(例えば、 $x$ 方向移流時の $\partial_y p$ など)は移流計算により更新されないため、M型CIP法では1次の風上差分法などにより近似的に移流計算を行う。

式(6)は $\pm x$ 方向へ速度 $c_0$ で伝搬する波( $f_{\pm}$ )を表す移流方程式になっている。これは、ある格子点 $x_i$ には $\Delta t$ 後に $f_{\pm}^n(x_i + \xi)$ (ただし、 $\xi = \mp c_0 \Delta t$ )の値が移流して来ることを意味する。しかしながら $f_{\pm}^n(x_i + \xi)$ の値は、いつでも格子点上にあるとは限らないため、格子点上の値から補間によって求めることになる。

$$f_{\pm}^{n+1}(x_i) = f_{\pm}^n(x_i + \xi) \approx F_{\pm}^n(x_i + \xi) \quad (8)$$

ただし、 $F_i$ は格子点 $i$ に関する補間関数、 $n$ は離散時間である。CIP法では補間関数 $F_i$ を3次関数で定義し、さらに $f_{\pm}$ の微分値 $g_{\pm}$ も使用してエルミート補間により高精度に移流計算を行う[4]。

$$F_{\pm}^n(x_i + \xi) = a_{\pm} \xi^3 + b_{\pm} \xi^2 + g_{\pm}^n(x_i) \xi + f_{\pm}^n(x_i) \quad (9)$$

$$G_{\pm}^n(x_i + \xi) = 3a_{\pm} \xi^2 + 2b_{\pm} \xi + g_{\pm}^n(x_i) \quad (10)$$

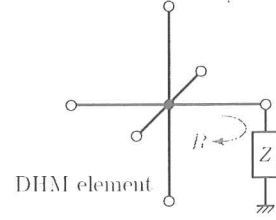


図-2 DHM for absorption wall.

ここで、係数 $a_{\pm}, b_{\pm}$ は

$$a_{\pm} = \pm \frac{2\{f_{\pm}^n(i+1) - f_{\pm}^n(i)\}}{(\Delta x)^3} + \frac{g_{\pm}^n(i+1) + g_{\pm}^n(i)}{(\Delta x)^2} \quad (11)$$

$$b_{\pm} = \frac{3\{f_{\pm}^n(i+1) - f_{\pm}^n(i)\}}{(\Delta x)^2} \pm \frac{g_{\pm}^n(i+1) + 2g_{\pm}^n(i)}{\Delta x} \quad (12)$$

ただし、 $\Delta x$ は格子点間の距離、 $f(i), g(i)$ は $x = x_i = i\Delta x$ における場の値とその微分値である。

### 3. デジタル境界

#### (1) DHM法への組み入れ [9]

デジタル境界は、デジタルフィルタを用いて壁面の反射率に周波数依存性を導入する。DHM法では、反射率は境界に接している線分と境界との間に組み入れられるが、その方法には図2のように線分に壁面の表面インピーダンス $Z$ を接続する方法と、壁面も媒質として取り扱う方法がある。ここでは前者の方法を採用する。この場合、壁面の反射率 $r$ は

$$r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (13)$$

で与えられる。ただし、 $Z_0$ は空気の特徴インピーダンスである。しかしながら、3次元DHMではモデル上の音速が実空間の音速の $1/\sqrt{3}$ 倍となることから、式(12)をそのまま用いることはできず、次式で定義される局所反射率 $R$ を用いることになる。

$$R = \frac{(1+r) - \sqrt{3}(1-r)}{(1+r) + \sqrt{3}(1-r)} \quad (14)$$

この手法では、 $r \leq 0.268$ で $R$ が負となり、デジタルフィルタ設計の際に面倒になるが、ホール空間を仮定する場合、壁面はあまり吸音性ではないことと、GPUへの実装の容易さからこの手法を採用する。

周波数依存性の表現は、壁面に接している線分に図3のようなIIRフィルタを接続し、フィルタ出力が再び線分に戻るようなモデルを考える。フィルタ係数 $a_m, b_m$ は、MATLABのfilter design toolboxを使用して、周

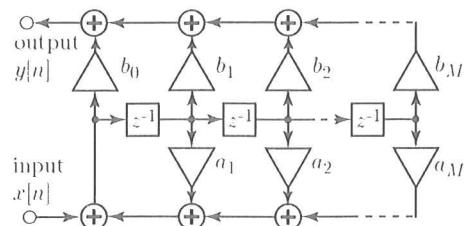


図-3 IIR フィルタ



図-4 境界における反射

波数ごとに式 (14) で求めた壁面の反射率に一致するように決定する。

(2) CIP 法への組み入れ [10]

CIP 法では境界条件は図 4 に示すように、境界に位置するグリッド上の正方向 ( $f_+$ ) と負方向 ( $f_-$ ) 方向に移流する波に対して反射率  $r$  を組み入れる。 $+x$  方向へ進む波  $f_+$  が右端の境界で反射した場合は、反射波は  $-x$  方向へ反射される。同様に、 $-x$  方向へ進む波  $f_-$  が左端の境界で反射した場合は、反射波は  $+x$  方向へ反射される。したがって、反射率を考慮すると

$$f_{\pm} = r f_{\pm} \quad (15)$$

$$g_{\pm} = -r g_{\pm} \quad (16)$$

で表される。デジタル境界の場合は、入射波をデジタルフィルタの入力とし、出力を反射波として戻すことになる。

4. 数値実験

計算モデルは、日本建築学会の音響数値解析 WG により提案されている音響問題のベンチマークプラットフォーム (AIJ-BPCA) の 1 つ (基本問題 B0-1T) [11] を例題として取り上げた。モデル図を図 5 に示す。1 × 1 × 1 m の立方体室の原点 O (0, 0, 0) に点音源 S をおき、 $t = 0$  でインパルスを放射する。観測点は点 R (0.5, 0.5, -0.5) で、インパルス応答をサンプリング周波数 8kHz で 10000 ステップまで計算する。DHM 法、CIP 法とも空間刻み幅  $\Delta l$  は 1cm、時間刻み幅  $\Delta t$  は CFL 数が  $1/\sqrt{3}$  となるように 16.8  $\mu s$  に設定している。ただし、空気の音速  $c_0$  は 343.7m/s を想定している。GPU は GeForce GTX280 を使い、CUDA ver2.3 for Windows でコーディングした。

デジタル境界を GPU に実装する場合、メインカー

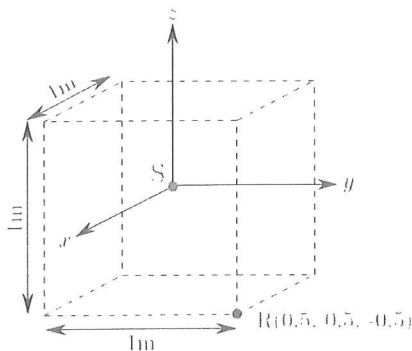


図-5 計算モデル

ネルの中で条件分岐によりデジタル境界を組み入れると複雑かつ性能が低下するため、デジタル境界の計算はメインとは別のカーネルとして実行する。また、デジタル境界はモデル境界面のみについて 2 次的に計算すればよいから、スレッド数とブロック数はメインカーネルとは別に境界面に関して 2 次的に定義し、効率化を図る。

(1) 剛壁の場合

図 6 は、観測点 R における音圧波形である。図で実線が CIP 法による計算結果、破線が DHM 法による計算結果である。ただし、各結果ともカットオフ周波数 1kHz、8 次のバターワース IIR ローパスフィルタにより処理を行った後、最大値で規格化している。また、両手法とも計算結果はサンプリング周波数が 8kHz とはならないため、8kHz となるように再サンプリングしている。両者は良く一致しており、インパルス応答が精度良く計算できている。また、10,000 ステップの計算に要した時間は DHM 法で 13.9s、8.63GFLOPS、CIP 法で 82.8s、56.6GFLOPS の演算性能であった。

(2) デジタル境界

つぎに、デジタル境界について数値実験を行った。図 7 の点線のような反射特性を有する仮想的なデジタル境界を想定し、5 次の IIR フィルタで実現した。図の実線は 1 次元音波を想定し、DHM 法に組み入れられたデジタル境界により計算された反射波形から周波数ごとの反射率を計算した結果、破線は CIP 法の結果

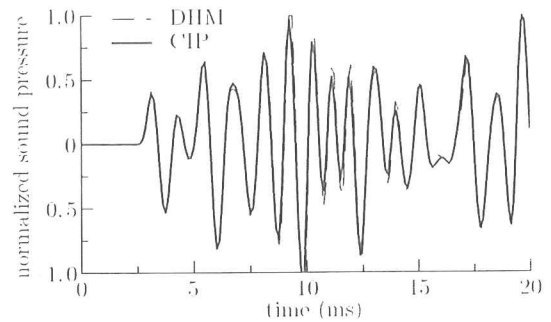


図-6 観測点 R における音圧波形

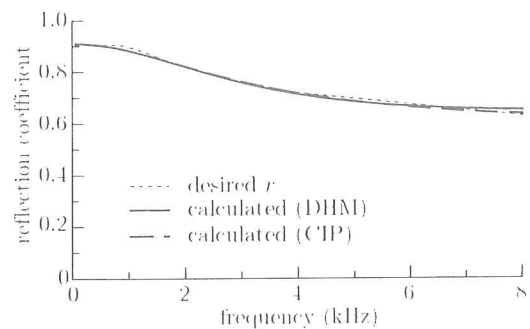


図-7 デジタル境界の反射係数

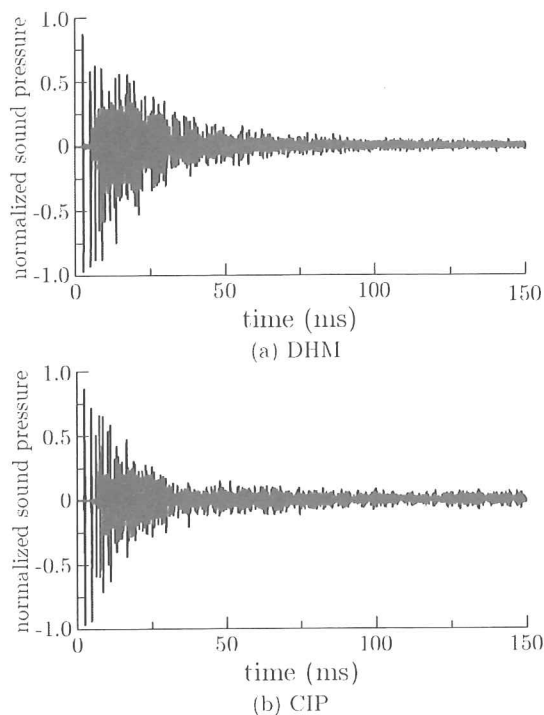


図-8 音圧の時間減衰

であるが、両者とも反射特性を良く表現できているのが分かる。つぎに、室の1つの境界面をデジタル境界にした場合の観測点における音圧波形を図8に示す。実線がデジタル境界の場合、破線が剛壁の場合であるが、デジタル境界では壁面での吸収により減衰が生じ、残響時間が短くなっていることがわかる。また、CIP法の方が残響時間が短く計算されているが、これはCIP法には本質的に数値散逸の誤差があるためで、この誤差の影響で見かけ上減衰が大きく計算されている。デジタル境界の処理に要した時間は全体の10%程度であった。図9は、図8の波形を短時間フーリエ変換によりスペクトログラムにした結果である。デジタル境界により高周波成分が時間とともに減衰している様子がわかる。また、CIP法では数値散逸の影響により、高周波成分がさらに減衰していることがわかる。

謝辞：本研究の一部は、NICT平成21年度委託研究「革新的な三次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術の研究開発」(143ウ2)の補助を受けた。

#### 参考文献

- 1) 土屋隆生他: FPGAによるシリコンコンサートホール実現に関する検討, 第25回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp.293-296 (2006.6).
- 2) 中園隆明, 土屋隆生他: FPGAによる音場シミュレーションとその計算精度に関する検討: 同志社大学理工研報告, 47, 2, pp.118-124 (2006).
- 3) 土屋隆生他: 五感コミュニケーションの中核的要素技術-シリコンコンサートホールを目指したりアルタイム音響レンダリング技術の研究開発-, NICT平成21年度委託研究課題143ウ2 (2009~2013).

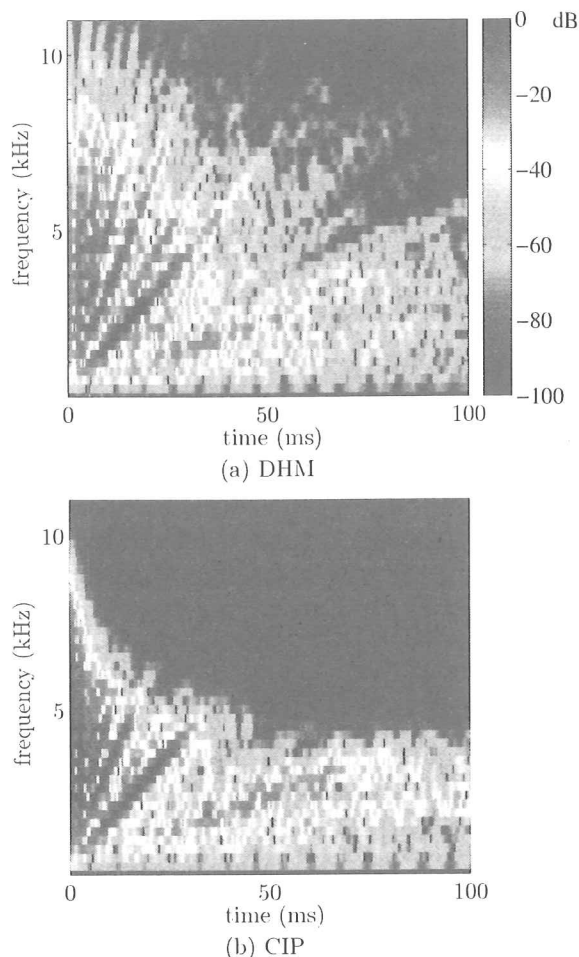


図-9 1面をデジタル境界にしたときの周波数スペクトラムの時間変化

- 4) T. Tsuchiya: Implementation of normal incidence absorption coefficient for boundary condition of digital Huygens' model, *Acoust. Sci. & Tech.*, **29**, 5, pp.326-329 (2008).
- 5) 土屋隆生他: マルチGPUによる音場の高速シミュレーション, アコースティックイメージング研究会資料, AI2008-3-4 (2008.10).
- 6) 土屋隆生他: GPUによる3次元音場シミュレーション, 信学技法, US2009-16, pp.17-20 (2009.6).
- 7) 矢部 孝他: CIP法, 森北出版 (2003).
- 8) 土屋隆生他: 散逸性媒質内の音波伝搬解析へのCIP法の適用, 音響学会誌, **64**, 8, pp.443-450 (2008).
- 9) 土屋隆生: デジタル境界を組み入れたGPUによる3次元音場シミュレーション, 音響学会2009年秋季研究発表会講演論文集, 2-6-8 pp.1323-1324 (2009.9).
- 10) 大塚正広, 土屋隆生: デジタル境界を組み入れたGPUによるCIP音響レンダリング, 音響学会2010年春季研究発表会講演論文集, 2-2-5 pp.1459-1460 (2010.3).
- 11) 安田洋介他: AIJ-BPCAベンチマーク内部問題群の解析, 建築音響研究会資料, AA-2005-12, pp.1-8 (2005.3).