

CIP法を用いた3次元音響シミュレーションのGPU実装

大島和輝† 榆井雅巳†
 長野工業高等専門学校†

1 はじめに

コンサートホールの音響設計などには、音響伝搬シミュレーション技術が利用されている。また、グラフィック処理用プロセッサ GPU を汎用的な数値計算に利用した並列化手法が、多くの分野で用いられるようになってきた。著者らは、GPU を利用した並列化による3次元音響シミュレーションコードの高速化を検討した。本論文では、音響伝搬シミュレーションコードを GPU を利用して並列化し、高速化を検討した結果について報告する。

2 GPUによる音響シミュレーション

ここでは、CIP法による音響シミュレーションと、CIP法のGPUによる並列化について述べる。

2.1 CIP法

音響シミュレーション手法にはM型CIP法を採用した。CIP法は計算対象の物理量とともにその空間微分値を陽に計算に組み込んで解く計算手法である。CIP法の計算のほとんどは積和演算であり、計算が格子点ごとに独立しているため、GPUを用いた並列化との相性がよい。M型CIP法を採用したのは、他のCIP法の計算方法に比べてメモリ使用量や計算コストが小さいためである。

2.2 計算手順

CIP法により解く移流方程式は、式(1)と式(2)に示す支配方程式から求められる。また、移流方程式をそれぞれ x, y, z で偏微分することで空間微分値の移流方程式が得られる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -K \nabla \vec{u} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla P \quad (2)$$

ここに、音圧 P 、体積弾性率 K 、媒質密度 ρ 、粒子速度 $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ 。

CIP法では、移流方程式の特性曲線を求めた後、伝搬の計算を行う。計算対象の物理量そのものの伝搬は、3次 Hermite 補間を用いて、伝搬方向と直行する空間微分値の伝搬は線形補間を用いてそれぞれ計算される。媒質境界での伝搬計算は、境界に接するそれぞれの媒質の音響インピーダンスをもとに得られる透過係数と反射係数を用いて行うことができる。特性曲線の移流の計算結果から音場の値を得て、 x 方向への計算が終了する。 y, z 方向も同様に計算される。[1, 2]

2.3 GPUによる並列化

GPUによる並列化の実装は、GPU上での1スレッドにCIP法での1格子点での計算を割り当てるものとした。加えて、以下に示すような2つの実装の最適化を試みた。

伝搬計算に用いられる3次 Hermite 補間と線形補間には、音速とタイムステップ、格子幅から求められる係数を用いるが、これらの係数には伝搬方向の正負によらず同じ値になるものがある。そのような値はプログラム中で変数を1つだけ確保し、その値を再利用するようにして、係数を導出する計算の回数を減少させた。この最適化の結果であるが、実行速度が約1.01倍になるに留まり、改善は僅かであった。

また、透過係数と反射係数の算出についても高速化を行った。異なる媒質 M_1 から M_2 への特性曲線の移流を計算するときの透過係数 T_{12} と反射係数 Γ_{12} は、媒質 M_i の音響インピーダンスを Z_i とすると、式(3)によって与えられる。

$$T_{12} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad \Gamma_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

Implementation of 3D acoustic simulation with CIP method on GPU

†Kazuki Ohshima, Masami Nirei,

National Institute of Technology, Nagano College

式 (3) から, 同一の媒質中の伝搬計算では, $Z_1 = Z_2$ より, 透過係数と反射係数は常にそれぞれ 1 と 0 である. そのため, 同一媒質中の伝搬計算では透過係数と反射係数の算出を省略し, 境界面での伝搬計算に限って透過係数と反射係数を求めるようにした. これによって, すべての格子点で透過係数と反射係数を求める場合に対して, 約 1.46 倍の速度でシミュレーションを行うことができるようになった.

3 実行結果

GPU プログラムは, 表 1 に示す環境で実験を行った.

表 1: プログラム実験環境 (GPU)

CPU	Intel Xeon E5 2660
CPU メモリ	128[GB]
GPU	Tesla K20m
GPU メモリ	4800[MB]
CUDA バージョン	7.5
コンパイラ	cl(VC++ 2013) nvcc 7.5

3.1 シミュレーション結果

3次元の境界条件付き音響シミュレーションを行った結果の空間モデルの断面を可視化し図 1 に示す. 断面は x 軸と y 軸に垂直で空間の中心を通る 2 つの面である. このモデルでは, 空間の中心に z 軸と垂直な境界面を設定した. $z \leq 0$ の媒質には音速 c , 音響インピーダンス Z に空気と同じ値を設定し, $z > 0$ の媒質では c を空気の $\frac{1}{3}$ 倍, Z を空気の 3 倍にそれぞれ設定した. 境界での反射や媒質が異なることによって音波の伝搬速度が異なっていることが確認できる.

3.2 CPU との実行速度の比較

CPU プログラムは表 2 に示す環境で開発と実行を行った. また, CPU プログラムに対しては並列化を行っていない.

表 2: プログラム実験環境 (CPU)

CPU	Intel Core i7 6700K
CPU メモリ	16[GB]
コンパイラ	cl(VC++ 2013)

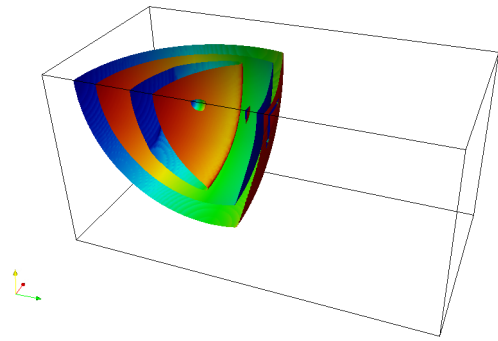


図 1: シミュレーション結果

x, y, z 各方向の格子数を 256 として 100 ステップ計算を行うプログラムを CPU と GPU 上でそれぞれ実行した. 実行時間の 10 回平均を求めた結果を表 3 に示す.

GPU による並列化によって, 1 コアの CPU と比較して, 129.03 倍の高速化を行うことができた.

表 3: プログラム実行速度

実行環境	実行時間 [s]	速度比
CPU	2484.7	1
GPU	19.7	129.03

4 まとめ

境界条件付きの 3次元 CIP 法による音響シミュレーションを GPU を用いて並列化した. 1 コアの CPU と比較して 129.03 倍の高速化を行うことができた. 今後, 計算のマルチ GPU 化とリアルタイムでの可視化を行う予定である.

参考文献

- [1] 日本建築学会編: 「はじめての音響数値シミュレーションプログラミングガイド」, コロナ社, pp.122-165 (2012)
- [2] 大久保寛, 紺野正二, 土屋隆生, 呉星冠, 竹内伸直, 田川憲男: 「境界面の取り扱いを考慮した M 型 CIP 法による 2次元音波伝搬数値シミュレーション」, 信学技報, pp.19-23 (2007)