

平成22年度「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研究開発」の開発成果について

1. 施策の目標

- ・人体を収容できる大きさの3次元音響空間についてリアルタイムに音響レンダリングできるシステム(シリコンコンサートホール)を2013年までに開発する。具体的には、直方体領域(2m×2m×4m程度)の室内音場を想定し、音声周波数帯域(3kHzまで)のシリコンコンサートホールの実現を目指す。

2. 研究開発の背景

- ・超臨場感コミュニケーションにおいてリアルな雰囲気を出し出すには、三次元映像技術だけでなく音響技術の開発が不可欠である。コンピュータグラフィックス(CG)の分野では、コンピュータ内の仮想空間をディスプレイ上にレンダリングすることでリアルな視覚情報を提供しているが、これと同様に音響レンダリング技術を実現できれば、超臨場感を音響についても提供できるものと考えられる。さらに、波動音響理論に基づく音響レンダリングをリアルタイムで実現する技術(シリコンコンサートホール)が開発されれば、超臨場感コミュニケーションに革新的な変革をもたらすものと期待される。

3. 研究開発の概要と期待される効果

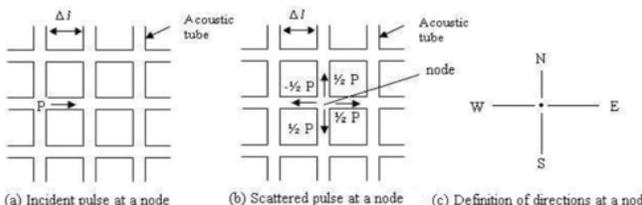
- ・研究開発で扱う音響レンダリング技術は主に、①音場シミュレーションのハードウェア化手法、②デジタル境界処理技術、③音場LGA法によるレンダリング技術に大別される(下図)。

①音場をDHM法で細かいセルに分割し、セルを演算回路としてFPGA上にハードウェア化することで、リアルタイムに音場のシミュレーションが可能となる音響レンダリング技術の開発を目指す。これにより、シリコンコンサートホールの基礎技術の構築が期待される。

②ホールなどの壁面反射率に任意の周波数特性をデジタルフィルタで組み入れることで、多様な壁面材質が容易に再現可能となり、臨場感を飛躍的に増大した音響レンダリングが可能となる。さらに、本技術を椅子などの構造物の散乱応答へ適用すれば音響テクスチャの概念へと拡張できる。

③格子ガス法を音響波動方程式に適用させた音場LGA法を開発し、超並列化による次世代のリアルタイム音響レンダリングを目指す。

①音場シミュレーションのハードウェア化手法

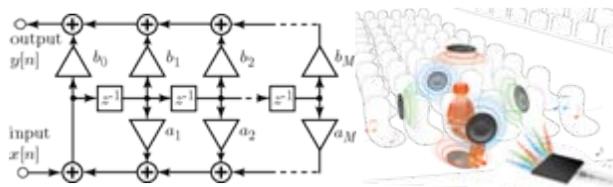


DHM法: 音場を細かいセルに分割し、各セル内の音波伝搬・散乱を計算する

- デジタルホイヘンスモデルの改良、演算量の削減
- 2次元音響シミュレーションの実装と評価

②デジタル境界処理技術

- ・デジタルフィルタで任意の壁面反射率を組み入れることで、臨場感を飛躍的に増大
- ・GPUとマルチスピーカによる

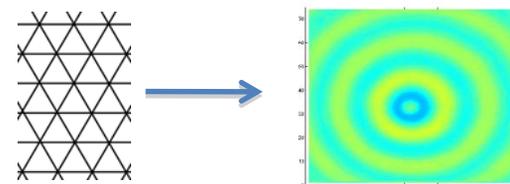


デジタル境界
(IIRフィルタ)

マルチスピーカ
システム

③音場LGA法によるレンダリング技術

- 格子に配置した粒子の振る舞いをブール演算で表現し、超並列演算を駆使して高速リアルタイム音響レンダリングを目指す



空気粒子の挙動
の論理演算表現

粗密波伝搬の
レンダリング

4. 研究開発の期間及び体制

平成21年度～平成24年度(4年間)

NICT委託研究(同志社大学、北陸先端科学技術大学院大学、東北大学)

①音場シミュレーションのハードウェア化手法の主な成果

①音場シミュレーションのハードウェア化手法

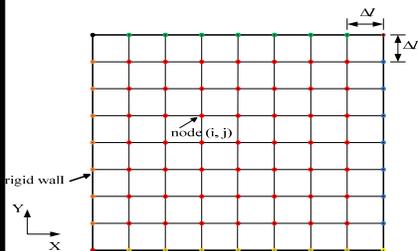


Fig.1 2次元音響空間

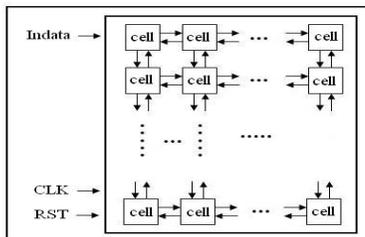


Fig.2 ハードウェアの演算セル

2次元の音場は音響ノードに分割され、各音響ノードごとに音圧を計算する演算セルが割り当てられる。

- (i) デジタル ホイヘンス モデルの改良
- (ii) 改良型アルゴリズムの動作検証
- (iii) PCIを経由した音の入出力も含めた計算時間の評価

(ii) デジタル ホイヘンス モデルのアルゴリズムの改良

従来の2D DHM:

$$\kappa P(i, j) = \frac{1}{2} \sum \kappa P_m(i, j)$$

$$\kappa S_m(i, j) = \kappa P(i, j) - \kappa P_m(i, j)$$

演算数: 加算×3回,
減算×4回,
右シフト×1回

改良型アルゴリズム:

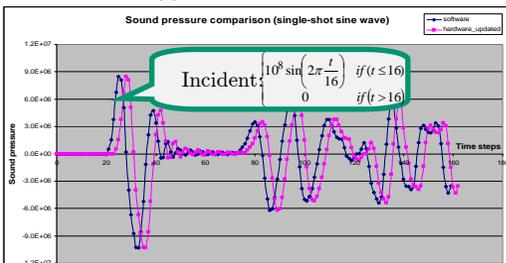
$$\kappa P(i, j) = \frac{1}{2} (\kappa P(i+1, j) + \kappa P(i-1, j) + \kappa P(i, j+1) + \kappa P(i, j-1)) - \kappa P(i, j)$$

演算数: 加算×3回,
減算×1回,
右シフト×1回



- DHMの従来手法は、加算×3回、減算×4回、および右シフト×1回が必要
- 改良型アルゴリズムは、加算×3回、減算×1回、および右シフト×1回で十分
- 減算×3演算を省略できた

(i) 演算回路の動作と精度の検証(ソフトとの比較)



シミュレーション環境

ホストPC:

CPU: AMD Phenom 9500 Quad-core processor, 2.2 GHz;

RAM: 4GB

FPGA システム:

CPU: Intel Pentium M, 1.4GHz;

RAM: 504MB

演算ノード: 35 × 35

入射信号: サンプルレート T=16

大きさ M=10⁸ Pa

入射点: (0, 0), 観測点: (6, 15)

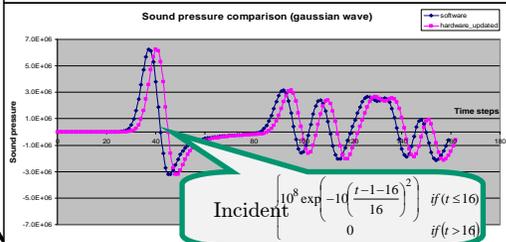
タイムステップ: 163

検証結果:

誤差: ハードウェアによる演算結果は整数版ソフトウェアの結果と完全に一致。

遅延: ハードウェアは初期化によって3

クロックの遅延発生。



(iii) 計算時間の検討

Nodes	Time steps	software solution			hardware solution
		original scheme	updated scheme	FDTD	
10 x 10	20000	31ms	30ms	109ms	0.2ms (total 50ms)
25 x 25	20000	234ms	124ms	266ms	0.2ms (total 50ms)
32 x 32	20000	328ms	234ms	406ms	0.2ms (total 50ms)

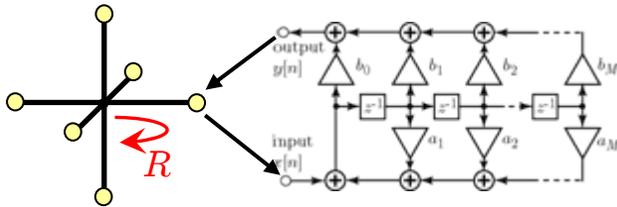
* 入射: 単発正弦波 (前ページと同波形)

- ハードウェア回路では、実際の計算時間は200 μ 秒(20,000 × 10 ns)。
- 0.05秒の殆どはPCIバスを通したホストPCとの入出力。
- ソフトウェア実装では、ノード数とタイムステップに比例して演算時間が増加
- 32x32ノードの場合、ハードウェア実装は通常のFDTDソフトウェア実装と比較して、理論性能で2,030倍、音響をPC経由で取り出して8.12倍の性能向上。
- 改良型ソフト版と比較して、理論性能で1,170倍、実性能で4.68倍の性能向上

② デジタル境界処理技術の主な成果

② デジタル境界処理技術

デジタルフィルタで壁面反射率に任意の周波数特性を組み入れることで、音響レンダリングの臨場感を飛躍的に増大



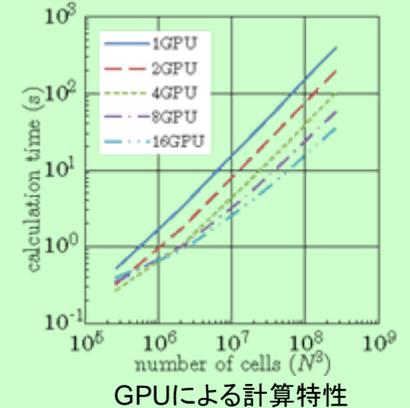
デジタルホイヘンスモデル(DHM) デジタル境界(IIRフィルタ)

- A. デジタル境界処理技術
- B. GPUによるレンダリング技術
- C. レンダリング結果提示技術

B. GPUによるレンダリング技術

● デジタル境界の効果を検証するためには、現実的な大きさの音響空間のレンダリングを実施し、その可聴化が重要となる。

● 今年度は、そのために必要な高速化として、16GPUを搭載したクラスターを構築し、約155.9GFLOPSの演算性能を達成した。これにより、約3,000m³というほぼ現実的なスケールの音響空間のレンダリング(3秒間のインパルス応答計算)をCD音質(44.1kHzサンプリング)により約5.5時間の計算時間で達成した。

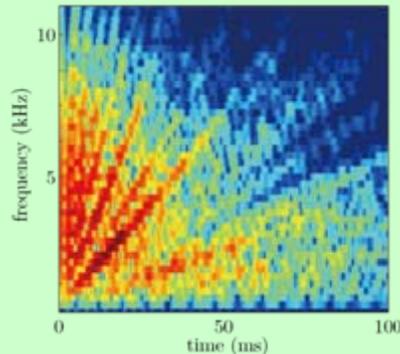


GPUによる計算特性

A. デジタル境界処理技術

● コンサートホールなどの現実空間の境界壁面には、多様な材質が使用されており、残響特性などのホールの主要な音響特性を支配している。それらの壁面の反射率は任意の周波数特性を有しており、時間領域においては畳み込み積分により応答が求められる。

● 本研究開発では、時間領域において任意の周波数特性を組み入れるために、IIR型のデジタルフィルタを壁面に埋め込むデジタル境界を考案し、直方体室において残響特性の制御に成功した。

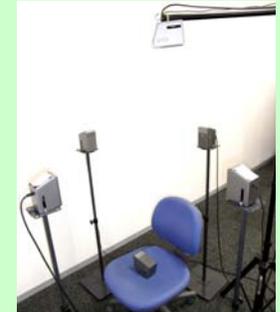


スペクトラムによる残響特性

C. レンダリング結果提示技術

● シリコンコンサートホールの実現には、音響レンダリングの結果を提示するための技術も不可欠である。

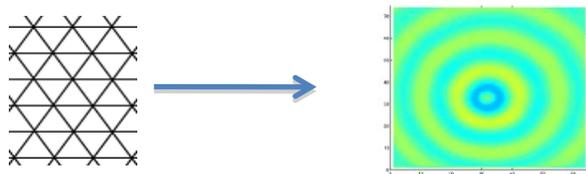
● 今年度は、6チャンネルが同時出力可能なマルチスピーカシステムを構築し、レンダリング結果の出力を試みた。その結果、自然な残響を伴った立体的な音場が再現可能であることが確認できた。



③音場LGA法によるレンダリング技術の主な成果

③音場LGA法によるレンダリング技術

格子に配置した粒子の振る舞いをブール演算で表現し、超並列演算を駆使して高速リアルタイム音響レンダリングを目指す



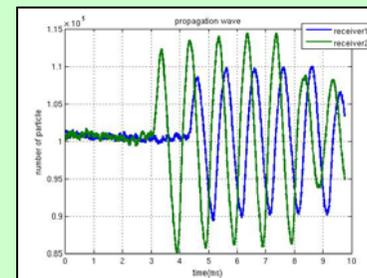
空気粒子の挙動の論理演算表現

音響物理事象のリアルタイムレンダリング

- A. 2次元音場LGA法の実装
- B. 波形表現の高精度化
- C. リアルタイム処理の可能性の検証

B. 波形表現の高精度化

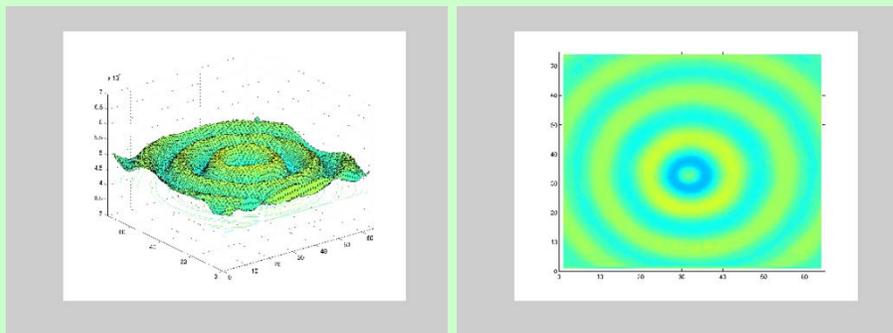
● 256倍のアップサンプリングを施すとともに、格子空間と実空間を正確に対応付けることで、4 kHz 以下の周波数において、音波伝搬の遅延と伝搬減衰が高い精度で物理法則に従うことを確認した。



音源から 1 kHz 正弦波を放射した場合の音波測定結果

A. 2次元音場LGA法の実装

● 1ビット $\Delta\Sigma$ 変調とそれに伴うアップサンプリングにより、経時的な波形の変化を表現する手法を提案し、実装を行った。



C. リアルタイム処理の可能性の検証

- 現状の計算時間
 - ・計算機: CPU: QuadCoreX2, メモリ: 24GByte (約100GFLOPS)
 - ・8 kHz サンプリング, 領域: 1 m x 1 m, 10 ms 間の音波伝搬
 - アップサンプリングあり → 計算時間: **約 200 s**
(約20,000倍の高速化が必要)
 - アップサンプリングなし → 計算時間: **0.01 ms**
(ほぼリアルタイムでの演算)
 - ・波形精度保持に必要なサンプリングレートを明らかにする必要がある
- スーパーコンピュータの利用を想定すると・・・
 - ・東北大学所有 SX-9: 約 1.6 TFLOPS × 18 ノード
 - ・次世代スーパーコンピュータ「京」では、既に1ラック(約0.8 × 0.75 × 2m)で 12Tflopsを実現 → 3ラック程度でリアルタイム処理が可能

1. これまで得られた研究成果(特許出願や論文発表等)

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	報道発表	展示会	標準化提案
五感コミュニケーションの中核的要素技術に関する研究開発	0	0	2	8	0	4	0

(1) 表彰・受賞

特になし

(2) 研究成果発表会等の開催について

特になし