

平成23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」の研究開発目標・成果と今後の研究計画

1. 実施機関・研究開発期間・研究開発費

- ◆実施機関 同志社大学(幹事者), 北陸先端科学技術大学院大学, 東北大学
- ◆研究開発期間 平成21年度から平成24年度(4年間)
- ◆研究開発費 総額54.9百万円(平成23年度13.3百万円)

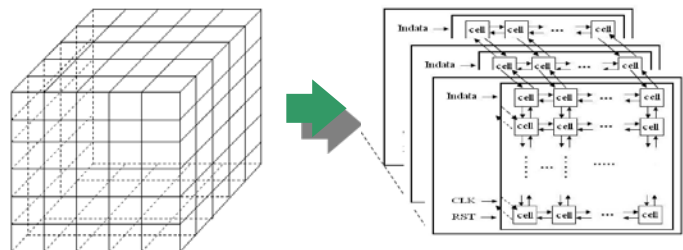
2. 研究開発の目標

・人体を収容できる大きさの三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。

3. 研究開発の成果

①音場シミュレーションのハードウェア化手法

音響空間を均一な小空間に分割し、各小空間に関連付けられた演算セルによる高速音圧計算



3次元音響空間

ハードウェアの演算セル

- A 3次元モデリング向けの新しいアルゴリズム
- B 時分割アーキテクチャ

研究開発成果: 3次元モデリング向け新しいアルゴリズム

3次元モデリングには、できるだけ多数の演算セルをFPGA内に実装することが不可欠。そのためには、できるだけ回路面積の小さなアルゴリズムの開発が必要。

- 本研究開発では、従来のDHMアルゴリズムを改良して、乗算回路を必要とせず、必要演算量が少ないアルゴリズムを開発、実装に成功。これにより1つのFPGAチップに収容可能な演算ノード数を増加させた。
- 今後は、リアルタイム技術を開発。

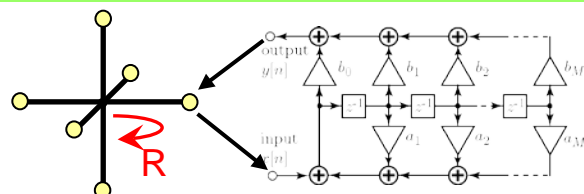
研究開発成果: 時分割アーキテクチャ

従来のアルゴリズムでは、ノード毎に演算セルが必要となり非効率。時分割処理技術が不可欠。

- 本研究開発では、FPGA内のブロックRAMを使用した時分割処理可能なアーキテクチャを開発。演算可能な空間の大きさを27倍に拡大。演算時間も40%向上。

②デジタル境界処理技術

デジタルフィルタにより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. GPUによるレンダリングとデジタル境界処理技術
- B. レンダリング結果提示技術

研究開発成果: GPUによるレンダリングとデジタル境界処理技術

臨場感の高い音響レンダリング技術の確立には、ホールなどの壁面反射条件の組み入れが不可欠。また、デジタル境界の効果検証には、現実的な大きさの音響空間のレンダリングが重要。

- 本研究開発では、32GPUクラスタを用いたレンダリング技術を開発。**4,400m³の音響空間を80kHzサンプリングによりレンダリング成功。266GFLOPSを達成。**

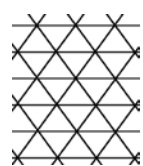
研究開発成果: レンダリング結果提示技術

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。

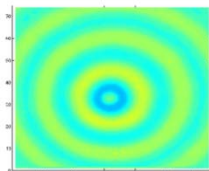
- 本研究開発では、**157chのスピーカアレイへの出力**に成功。受音点の指向性と音源位置(8パート)を考慮した音響レンダリングにより、立体的で広がりのある音場の再現に成功。

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
2次元アルゴリズムを拡張して、3次元アルゴリズムを開発・実装



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. 3次元音場LGAアルゴリズムの開発
- B. 3次元音場LGA法の実装

研究開発成果:3次元音場LGAアルゴリズムの開発

音響レンダリングには、LGAアルゴリズムの3次元音場への対応が不可欠。
●本研究開発では、伝搬の等方性を満たす3次元モデルとして、4次元面心立方格子の3次元射影モデル(FCHCモデル)を音場用に開発。これにより音波の3次元伝搬を確認。

研究開発成果:3次元音場LGA法の実装

上記3次元音場LGAアルゴリズムをCPUに実装。
●本研究開発では、FCHCモデルを用いて、CPU上で3次元LGA法の実装を行った。実装においては、前年度までに行った2次元LGA法の開発で得られた $\Delta\Sigma$ 変調による音信号の符号化やアップサンプリングに関する知見を応用し、任意の音源波形の3次元伝搬をシミュレートし、音圧及び粒子速度を算出することに成功した。

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

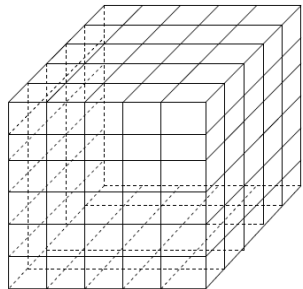


Fig.1 3次元音響空間

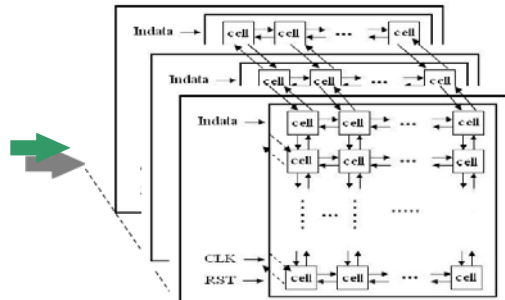


Fig.2 ハードウェアの演算セル

音響空間を均一な小空間に分割し、各小空間に関連付けられた演算セルが音圧を計算する。

- A. 3次元向けの新しいアルゴリズム
- B. 時分割アーキテクチャ
- C. 3次元音響シミュレーションの実装と評価

A. 3次元モデリングアルゴリズムと最適化

従来の3D DHM:

$$P^n(i, j, k) = \frac{1}{3} \sum_{m=1}^6 P_m^n(i, j, k)$$

$$S_m^n(i, j, k) = P^n(i, j, k) - P_m^n(i, j, k)$$

演算数: 加算×5回,
減算×6回,
乗算(1/3)×1回

改良型アルゴリズム:

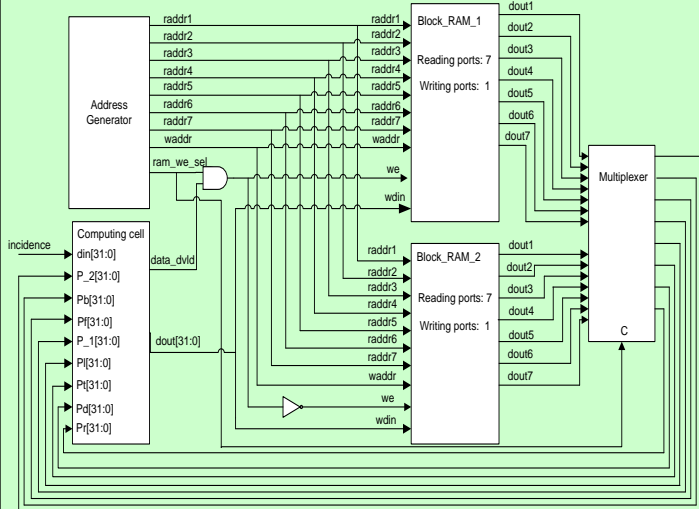
$$P^n(i, j, k) = \frac{1}{4} [P^{n-1}(i+1, j, k) + P^{n-1}(i-1, j, k) + P^{n-1}(i, j+1, k) + P^{n-1}(i, j-1, k) + P^{n-1}(i, j, k+1) + P^{n-1}(i, j, k-1)] - P^{n-2}(i, j, k)$$

演算数: 加算×6回, 減算×1回,
右シフト×1回,
左シフト×1回

乗算削減

- ❑ DHMの従来手法は、加算×5回、減算×6回、および乗算×1回が必要
- ❑ 改良型アルゴリズムは、加算×6回、減算×1回、右シフト×1回、および左シフト×1回で十分
- ❑ 乗算回路を省略できた。

B. 時分割アーキテクチャ



- ❑ ノード毎に音圧計算のための演算セルが必要。
- ❑ 全音響ノードの音圧は、1クロック周期で読み書き可能なFPGA内のブロックRAMに格納される。
- ❑ その結果、1つの演算セルが多くの音響ノードの演算を行うことができるようになり、シミュレーション空間が広がった。

C. 3次元音響シミュレーションの実装と評価

Table 1 XC5VLX330Tに収容可能な音響ノード数

	Parallel architecture	Timing sharing architecture
Number of nodes	1700	47000

Table 2 Calculation time

Node	Hardware system (timing sharing architecture)	Software simulation
32 x 32 x 32	6.55s	10.85s

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: 32 × 32 × 32

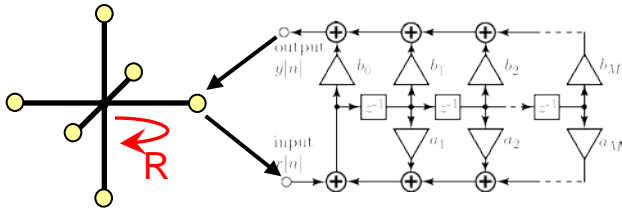
入射信号: サンプルレート T=16; 入射点: (16, 16, 16); 観測点: (16, 16, 15)

タイムステップ: 20000

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)

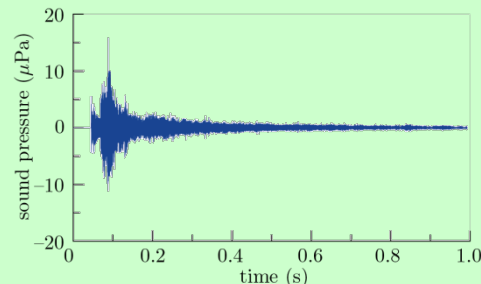
- A. デジタル境界処理技術
- B. GPUによるレンダリング技術
- C. レンダリング結果提示技術

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。

●今年度はシングルGPUへの実装にとどまるため、GPUクラスターへの実装が必要。

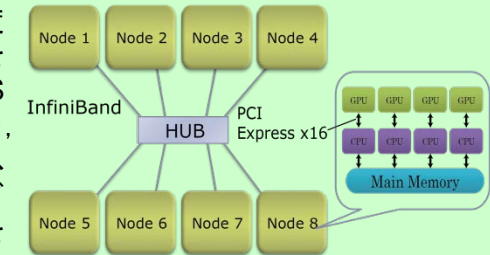


残響特性(インパルス応答)

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、そのために必要なレンダリングの高速化として、前年度構築された16GPUクラスターを32GPUに拡張し、約266GFLOPSの演算性能を達成した。これにより、約4,400m³というかなり現実的なスケールの音響空間のレンダリング(1秒間のインパルス応答計算)をCDの倍の音質(80kHzサンプリング)で、約19時間の計算時間で達成した。

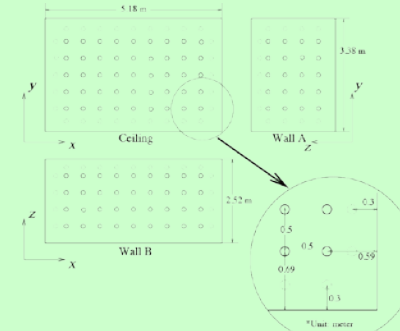


GPUクラスターの構成

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、157チャンネルのスピーカアレイに出力し、レンダリング結果の可聴化を試みた。その結果、立体的で自然な音場が再現可能であることが確認できた。

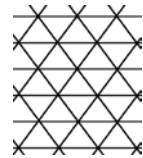


157chスピーカアレイ

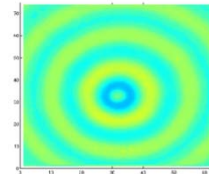
③音場LGA法によるレンダリング技術の主な成果

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
2次元アルゴリズムを拡張して、3次元アルゴリズムを開発・実装



空気粒子の挙動の論理演算表現

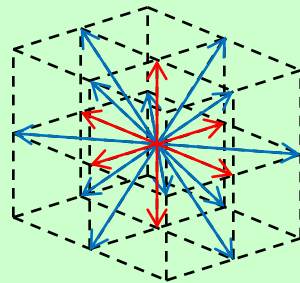


音響物理事象のリアルタイムレンダリング

- A. 3次元音場LGAアルゴリズムの開発
- B. 3次元音場LGA法の実装

A. 3次元音場LGAアルゴリズムの開発

- 伝搬の等方性を満たす3次元モデルとして、4次元面心立方格子の3次元射影モデルを採用
- 4次元において単速度粒子を伝搬
- 3次元に射影することで等方性を満たす伝搬となる

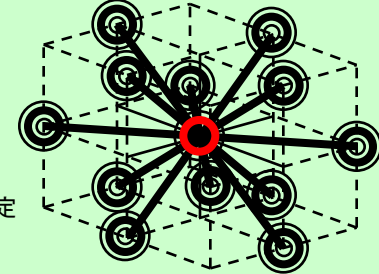


FCHCモデル (Fritsh et al., 1986)

- 面心超立方格子 (Face-Centered Hyper Cubic : FCHC)
- 4次元面心立方格子を3次元に射影
- 3次元空間で伝搬の等方性を満足
- 4次元空間において隣接格子点は24個
- 2体粒子の衝突規則は288通り存在

B. 3次元音場LGA法の実装

- 3次元空間に立体格子を構築
 - 粒子はFCHCモデルの2体衝突(288通り)に基づく伝搬、散乱を行う
 - 4次元目の座標は各格子点に4重の殻を想定
 - 外側の殻に向かう方向を正方向
 - 内側の殻に向かう方向を負方向
 - 最外殻と最内殻が繋がる周期的境界条件を設定
- 2次元モデルで得られた知見を応用
 - $\Delta\Sigma$ 変調を応用した音信号の符号化
 - アップサンプリングにより音波形情報の精度を保持
 - 領域を複数格子点を含むセル単位で区切り、粒子存否情報をマクロに取り出す
 - 粒子数 = 音圧, 粒子の平均運動量ベクトル = 粒子速度



4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等) ※成果数は累計件数と()内の当該年度件数です。

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース	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)	0 (0)	3 (1)	16 (8)	0 (0)	6 (2)	0 (0)

5. 研究成果発表会等の開催について

6. 今後の研究開発計画

この成果により、今後、どのような研究を行うのかを例示を上げながら、具体的、かつ簡潔に記載して下さい。

①音場シミュレーションのハードウェア化

これまでの成果は、リアルタイム性を重視したため、音質の点で改善の余地がある。一方、FPGAチップの集積度は増加しており、より精密な演算が可能となってきたので、今後はシミュレーションの音質を向上させたい。

②デジタル境界処理技術の開発

これまでの成果は、デジタル境界のシングルGPUへの実装にとどまっているため、GPUクラスタへ実装が必要である。また、レンダリングにおいて音源の指向性を考慮していないため、音源の単一指向性を考慮できるアルゴリズムを開発する。さらに、現時点では直方体室のみのレンダリングしか対応できていないが、ある程度の形状変更へも対応できるような境界条件処理手法を開発する。

③三次元LGA法の精緻化・高速化

これまでの研究により、FCHCモデルを用いた三次元LGA法により、三次元空間での音波の伝搬を模擬できることが確認されたが、その物理精度及び計算速度については改良の余地がある。空間的・時間的疎視化における領域の最適な設定の検討や、アルゴリズムの実装方法の検討により、性能向上を図る。