157 chスピーカアレイを用いた リアルタイム音響レンダリングシステムの 実装と基礎的性能評価

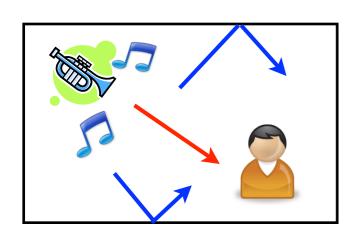
岡本 拓磨¹⁾, Katz Brian FG²⁾, Noisternig Markus³⁾, Cabrera Densil⁴⁾, 岩谷 幸雄⁵⁾, 鈴木 陽一⁵⁾

1) 東北大学 電気通信研究所 / 大学院工学研究科, 2) LIMSI-CNRS (France), 3) IRCAM (France), 4) The University of Sydney (Australia), 5) 東北大学 電気通信研究所 / 大学院情報科学研究科

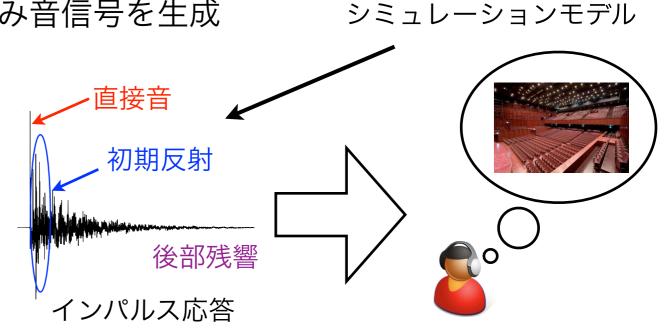
研究背景:可聴化技術 (Auralization)

■ 可聴化技術(Auralization)とは?

- 計算機などで作成したコンサートホールなどの音空間モデル から音場を予測して人間に提示する技術
 - * 音空間モデルから室内伝達特性(=インパルス応答)を計算
 - * インパルス応答と音源信号を畳み込み音信号を生成
 - * 生成した音を提示







- コンサートホールなどの評価
- モデルさえ作ることができれば… 任意の仮想環境の音の創出が可能
- 基本的にはヘッドホンを用いた再生系が主流

研究目的:多チャネルスピーカを用いた可聴化システムの構築

■ 旧:ヘッドホンを用いたリアルタイム可聴化システム

M. Noisternig et al. 2008

- 音源や人の動きに追従したレンダリング
 - * 位置情報の更新を受けてインパルス応答を逐次計算
- 従来法よりも再現力のある仮想音空間提示を実現
- 新:多数スピーカを用いたリアルタイム可聴化の実装
 - 上記のシステムを計157 chのスピーカを用いた再生系へと発展
 - * ヘッドホンフリー:自然な聴取が可能
 - * PC1台での同時再生は不可能 → 157 chを4台のPCに分割して再生
 - 最初に検討すべき問題点
 - * 157 chの同期再生(サンプリング周波数48 kHz, 16 bitリニアPCM)

本報告では…

- 実装したシステム全体の概要
- 157 chのチャネル間同期およびシステム遅延の検証

包囲型スピーカアレイ

■ 157 chの音データを同時再生可能なスピーカシステム



包囲型スピーカアレイ@東北大通研W114

室内形状とスピーカ配置図

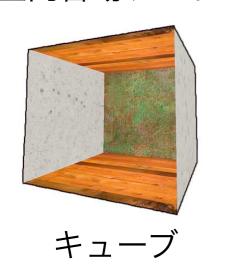
- 💶 床を除く壁面,天井の計5面にスピーカ(FOSTEX FE38E)を格子状に配置
- 4台のPC, 14台のD/A, クロックジェネレータを用いた サンプリング周波数48 kHz, 16 bitリニアPCMの157 ch同時再生

システム全体の流れ

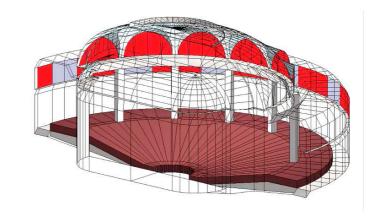
- 157 chリアルタイム可聴化システム
 - 5台のPC,オープンソフトウェアとUDPを用いたリアルタイム可聴化システム
 - 1. 音空間モデルの作成:(※室内音場ソフトウェアパッケージCATT-Acoustic)
 - 2. 反射音情報の計算:虚像法高速演算ライブラリEVERTims
 - 3. インパルス応答と室内音の計算と再生: リアルタイムAVソフトウェアPd (Pure data) 反射音伝搬経路の可視化:3D可視化ソフトウェアVirChor (Virtual Choerographer)
 - 4. 157 chスピーカを用いて再生

音空間モデル・初期反射音の計算

- 音空間モデルの作成
 - 室内音場ソフトウェアパッケージCATT-Acoustic v8.0によるモデルの作成



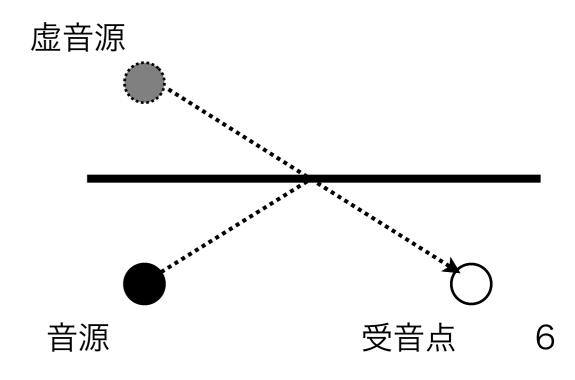




など…

ホール(複雑形状)

- 初期反射音の高速演算
 - 虚像法高速演算ライブラリEVERTに基づく 計算ソフトウェアEVERTimsによる計算
 - 虚像法 J. B. Allen *et al.* 1979
 - * 鏡面反射を仮定して虚音源を生成
 - * 反射次数により虚音源の個数が決定



反射音伝搬経路の可視化

■ Virchorによる反射音経路のリアルタイム可視化

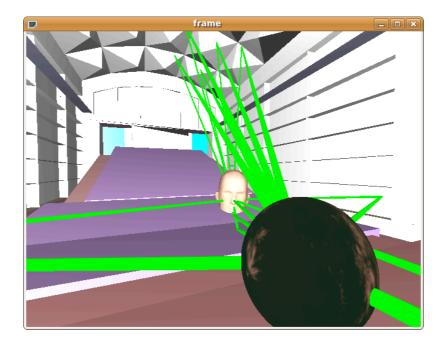
■ 聴取者や音源位置の変化に対応して反射経路を可視化

* ●:音源

* 顔:聴取者

* 緑の光線:反射音伝搬経路





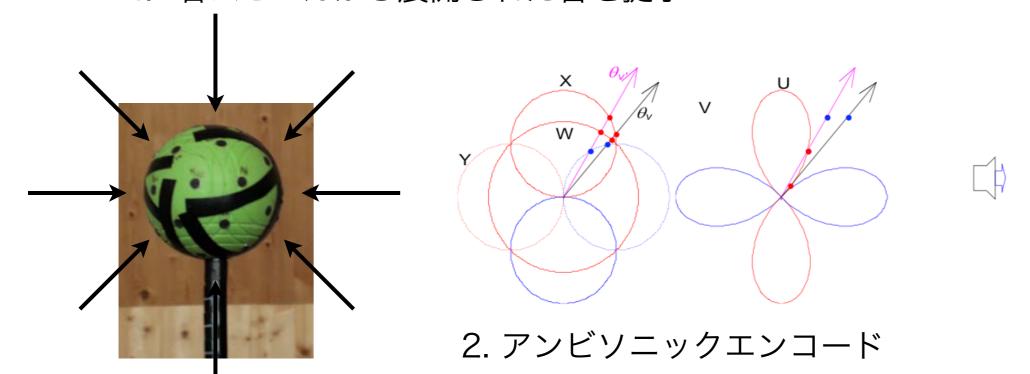


反射なし 1次反射 3次反射

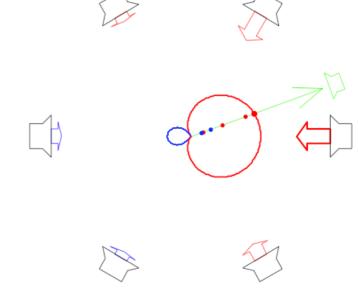
高次アンビソニックに基づく

3次元音空間の集録と再生(1)

- 高次アンビソニック(High-Order Ambisonic)
 - 1. アンビソニックマイクロホンを用いて全方向の音を集録
 - 2. 球面調和解析に基づき、集録した音を各方向に分解
 - 3. 分解した音情報を再生系に合わせて再展開
 - 4. 各スピーカから展開された音を提示



1. アンビソニックマイクロホン を用いた集音



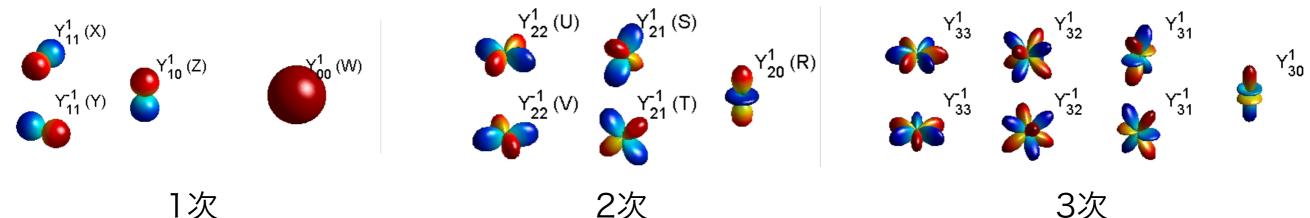
3. アンビソニックデコード

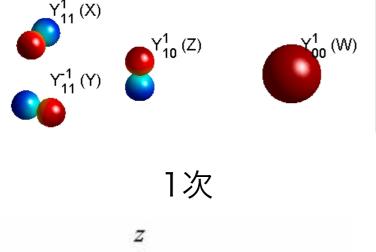
4. 多チャネルスピーカによる再生

高次アンビソニックに基づく

3次元音空間の集録と再生 (2)

- 高次アンビソニック(High-Order Ambisonic)
 - 球面調和解析に基づく音空間情報のエンコードおよびデコード
 - 次数を上げることにより高精細な3次元音空間の記述や提示が可能



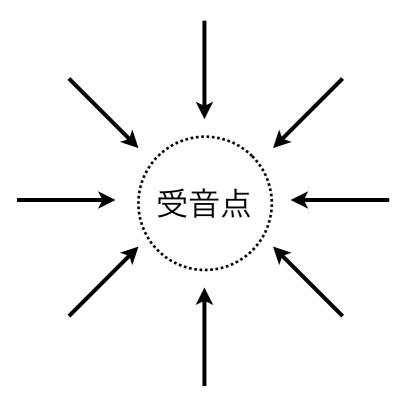


$$p(\mathbf{r},\omega) = \sum_{m=0}^{\infty} i^m j_m(kr) \sum_{0 \le n \le m, \sigma = \pm 1} A_{mn}^{\sigma} Y_{mn}^{\sigma}(\theta,\phi)$$

$$Y_{mn}^{\sigma}(\theta,\phi) = \sqrt{(2m+1)(2-\delta_n)\frac{(m-1)!}{(m+n)!}}P_{mn}(\sin\theta) \cdot \begin{cases} \cos(n\theta) & if \quad \sigma = +1\\ \sin(n\theta) & if \quad \sigma = -1 \end{cases}$$

HOAによる3次元音空間レンダリング

- Pdを用いたHOAに基づくインパルス応答の生成と再生
 - スピーカアレイの中心をスポット
 - 各スピーカからスポット位置までのインパルス応答を計算 (計157 ch)
 - * 高精細な初期反射音は4次,方向性を持たない後部残響成分は1次で記述



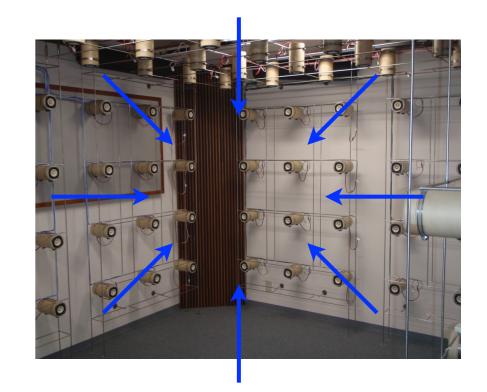
2. アンビソニックエンコード

3. アンビソニックデコード

1. EVERTimsによる 反射音の計算



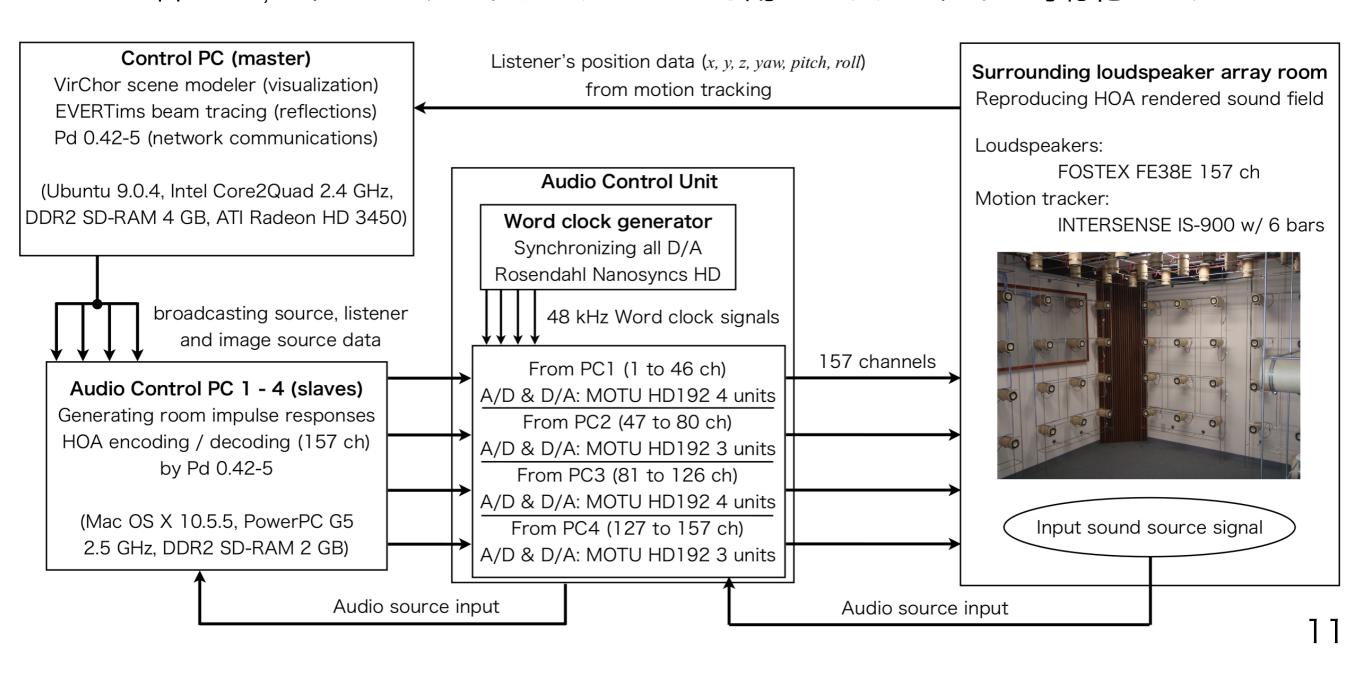
http://puredata.info



4. 157 chでの再生

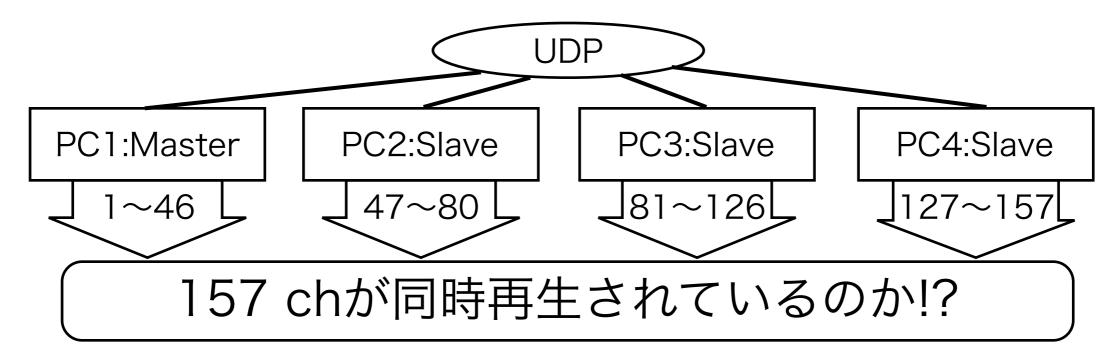
システム全体のブロック図

- 157 chリアルタイム可聴化システム
 - 5台のPC, オープンソフトウェアとUDPを用いたリアルタイム可聴化システム



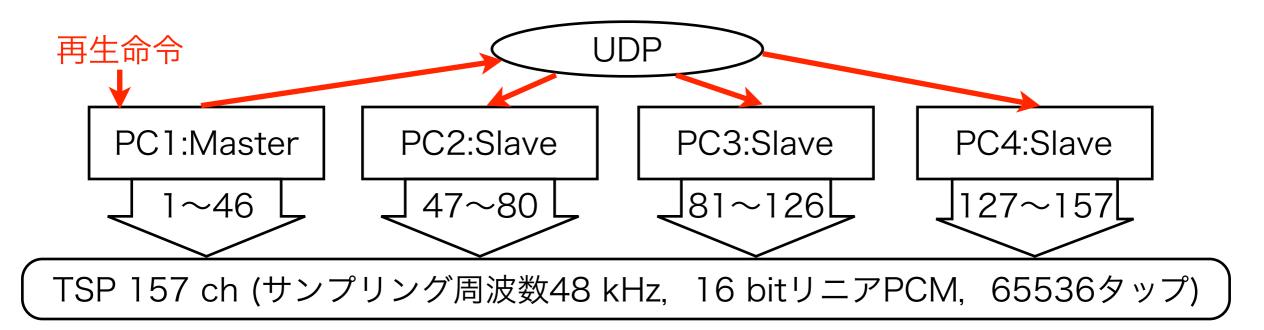
システム性能評価

- 実装したシステムの現状
 - 反射音伝搬経路の可視化
 - 157 chアンビソニック再生
 - 音源や聴取位置の位置変化による応答
- 157 chのチャネル間同期とシステム遅延の評価
 - 4台のPCとPdによる157 ch同時再生
 - ☀ 各マシン間はUDP(User Datagram Protocol)にて通信

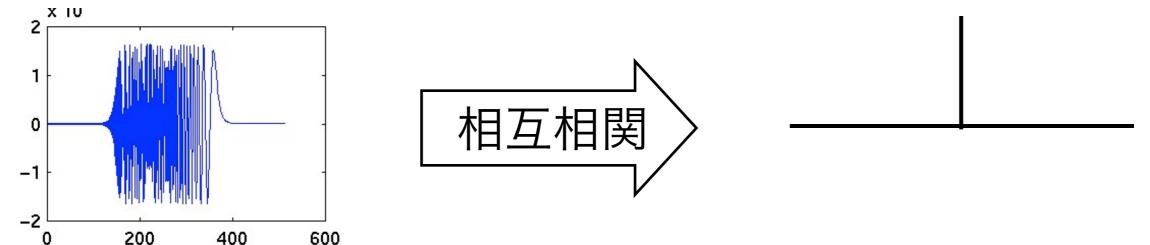


同期確認方法

■ TSP(Time Stretched Pulse)信号を用いた同期確認

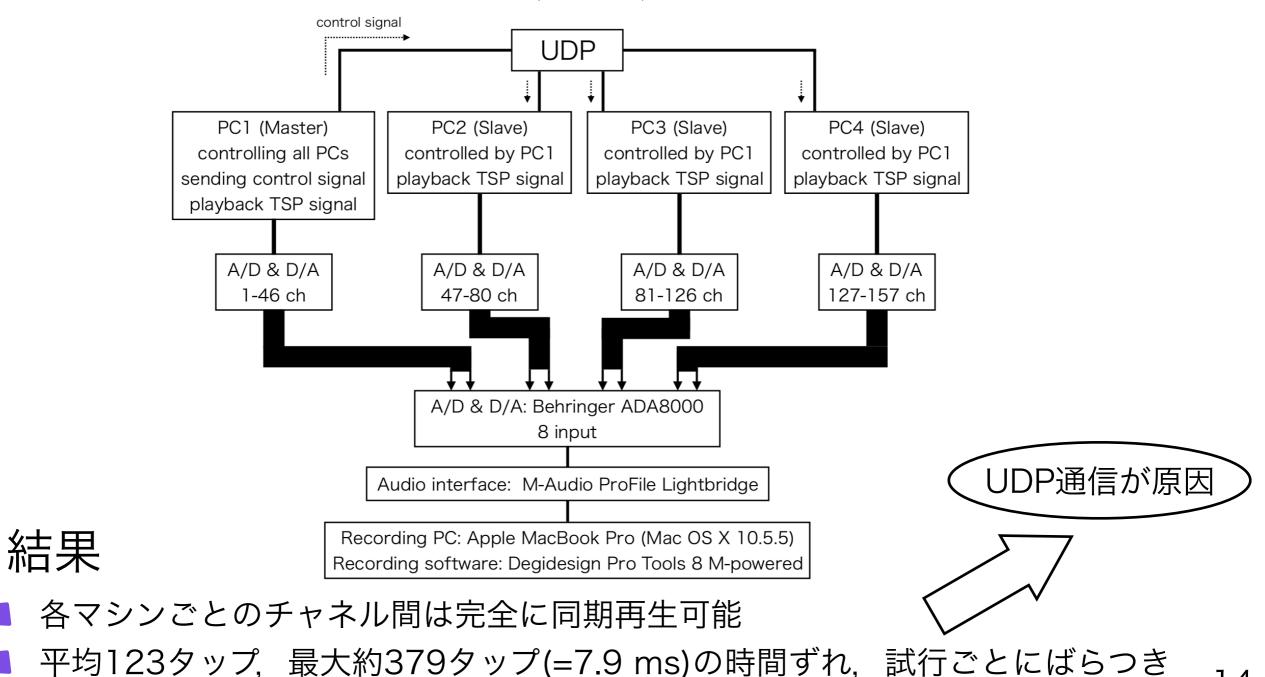


- 入力と出力の相互相関を計算することによりピーク位置を検出
- 各チャネルのピークの位置から時間ずれを評価



検証1:ファイル再生方式

■ 各マシンのwavファイル(TSP)を読み込み→再生

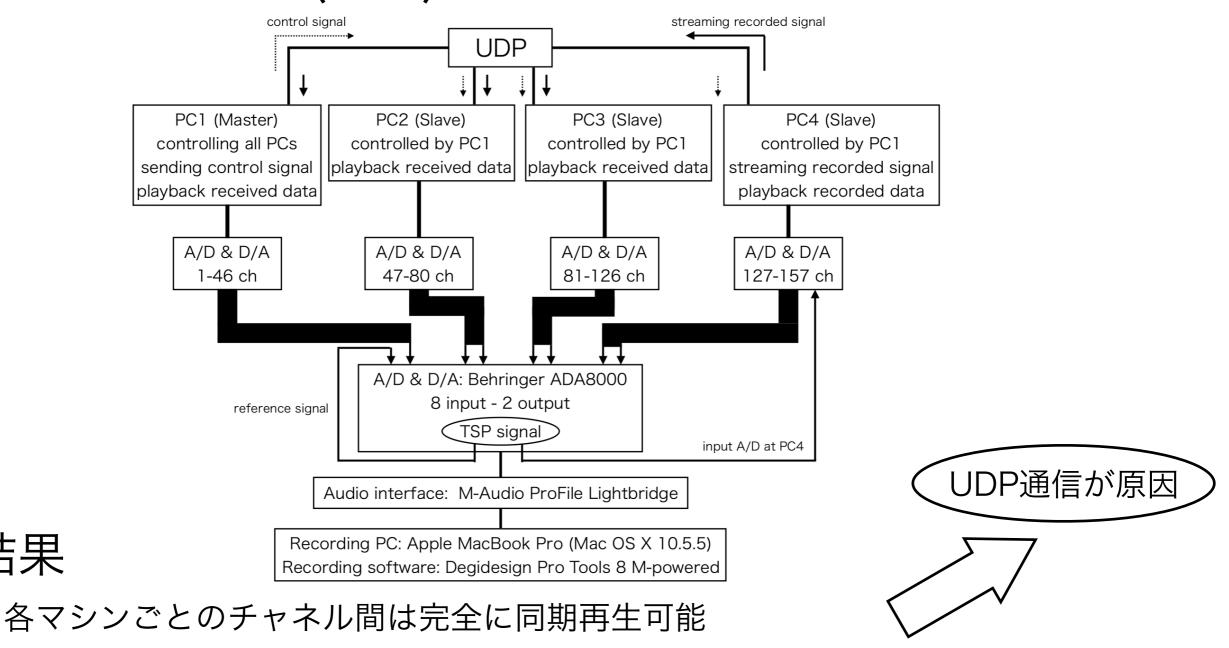


14

検証2:オーディオストリーミング方式

■ PC4への入力音(TSP)を全マシンへストリーミング

結果

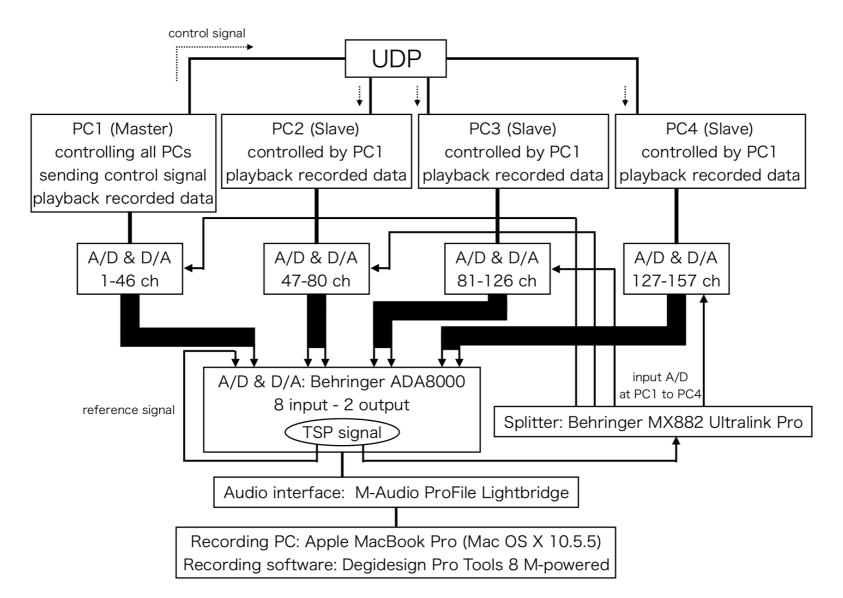


平均177タップ, 最大約352タップ(=7.3 ms)の時間ずれ, 試行ごとにばらつき

15

検証3:オーディオ分配方式

■ 分配機を用いて全マシンに音信号を入力



■ 全チャネル間は完全に同期再生可能

結果

■ システム遅延は固定遅延:982タップ(=20 ms)

まとめと今後の課題

まとめ

- 多チャネルスピーカを用いた可聴化システムの実装
 - * 157 chスピーカアレイ,5台のPCフリーソフトを用いたシステムの紹介
 - * システムのチャネル間同期およびシステム遅延を検証
 - 分配器導入により157 chの同期再生を実現

●今後の課題

- 再生音の再現精度の検証、高精度化
 - * 吸音材導入による室内反射音の軽減(取り組み中)
- システム全体の遅延検証
 - 業 EVERTims,HOAエンコード,デコードを含めたトータル遅延の検証

