

高次アンビソニクス型音場収録のための 121 ch球状マイクロホンアレイの構築

岡本 拓磨⁺, 岩谷 幸雄⁺⁺, 坂本 修一⁺⁺, 鈴木 陽一⁺⁺

⁺ 東北大学 電気通信研究所 / 大学院工学研究科

⁺⁺ 東北大学 電気通信研究所 / 大学院情報科学研究科学

はじめに：音空間の記録と再現

■ 音空間情報の忠実な記録と再現

- 高臨場感コミュニケーションの実現
- 人間の音空間知覚の解明

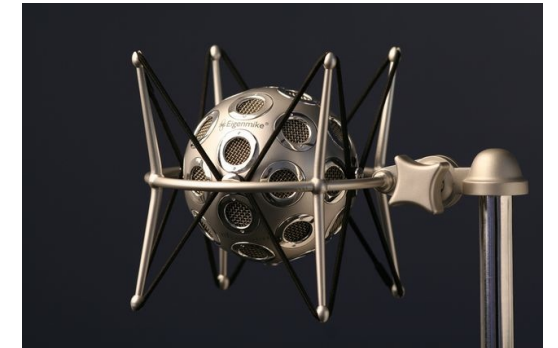
■ 必要となる技術

■ 音空間の収録

- ✳ ダミーヘッド
- ✳ マイクロホンアレイ(中空, 剛球)



ダミーヘッド
(高研製 SAMRAI)



球状マイクロホンアレイ
(B&K)

■ 音空間の再現, 提示

- ✳ ヘッドホン
- ✳ スピーカアレイ
 - 装着感なし
 - 音の距離感を提示可能



ヘッドホン提示



スピーカアレイによる提示

実音場の収録→スピーカアレイでの音場再現に着目

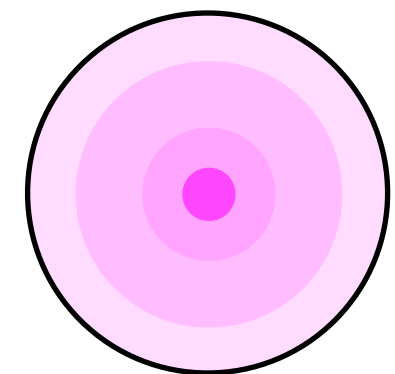
境界制御法と方向制御方法の比較(再生系)

■ 境界制御方式

- 波面合成法(Wave field Synthesis: WFS)
- 境界音場制御(Boundary Surface Control: BoSC)
 - ✳ 領域全体の制御が可能
 - ✳ 再生できる周波数は制御点間隔に依存
→制御点を増やすと上限周波数が拡大



WFS or BoSC

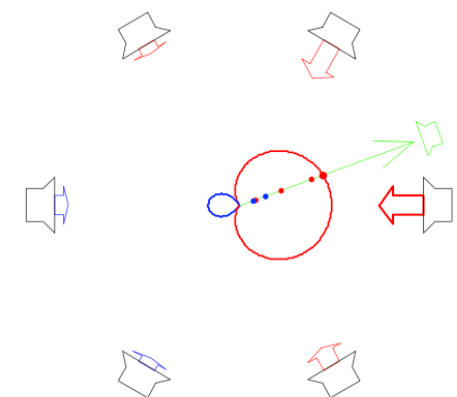
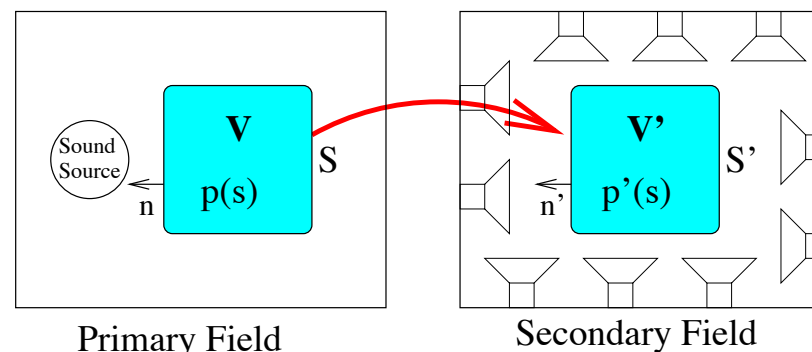
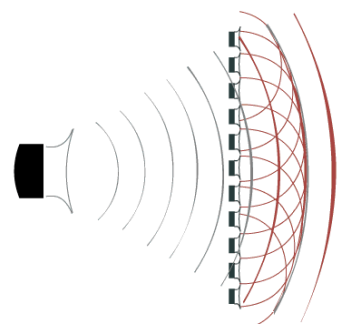


Ambisonics

再現領域と周波数の関係

■ 方向制御方式

- Ambisonics, High-order Ambisonics (HOA)
 - D. H. Cooper *et al.* 1972
 - M. A. Poletti 2005
 - ✳ スピーカレイの中心とその近傍(=スイートスポット:SS)での高精細な音場制御が可能 → 制御点を増やすとSSが拡大



Ambisonics

境界制御法と方向制御方法の比較(収録系)

■ 収録系での比較

■ 領域制御方式

- ✳ 領域境界の音情報を記録
- ✳ 領域境界を巨大なマイクロホンアレイによる収録
→大規模な収録システム

17:00~
DEMO



157 ch包囲型マイクロホンアレイ
(大規模なシステムの例)

■ 方向制御方式

- ✳ 再現したいポイントでの音情報を記録
- ✳ 球状マイクロホンアレイによる収録
→コンパクト

■ HOAに基づく音空間の収録と再現に注目

■ 再生メリット

- ✳ スピーカ数が同じ場合、聴取者近傍では領域制御方式よりも高精細な音空間提示

■ 収録メリット

- ✳ 収録システムがコンパクト



球状マイクロホンアレイ
(コンパクト)

HOAの基本概念

■ 球面調和関数展開による音空間情報の直交展開

■ 直交展開の例(テイラー展開)

- ✳ 無限回微分可能な任意の関数 $f(x)$ は任意の定数 a に対して以下が成立

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} (x-a) + \frac{f''(a)}{2!} (x-a)^2 + \cdots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n + \cdots$$

- ✳ それぞれの成分は互いに直交(orthogonal)
- ✳ n を増やすほど実際の関数に近づく

■ 球面調和関数展開による音空間情報の直交展開

$$p(kr, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{+\infty} i^m j_m(kr) \sum_{n=-m}^m B_m^n Y_m^n(\theta, \phi)$$

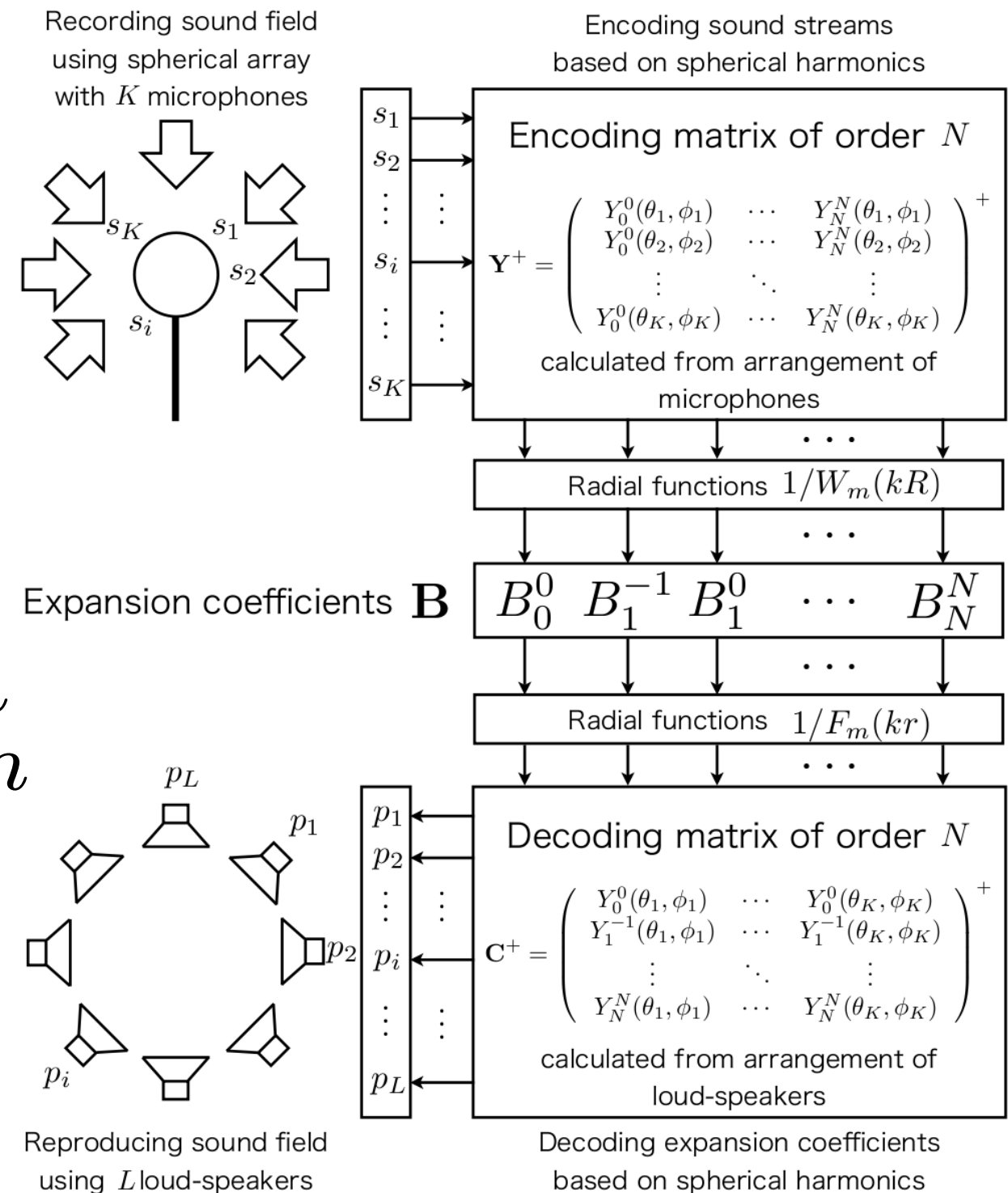
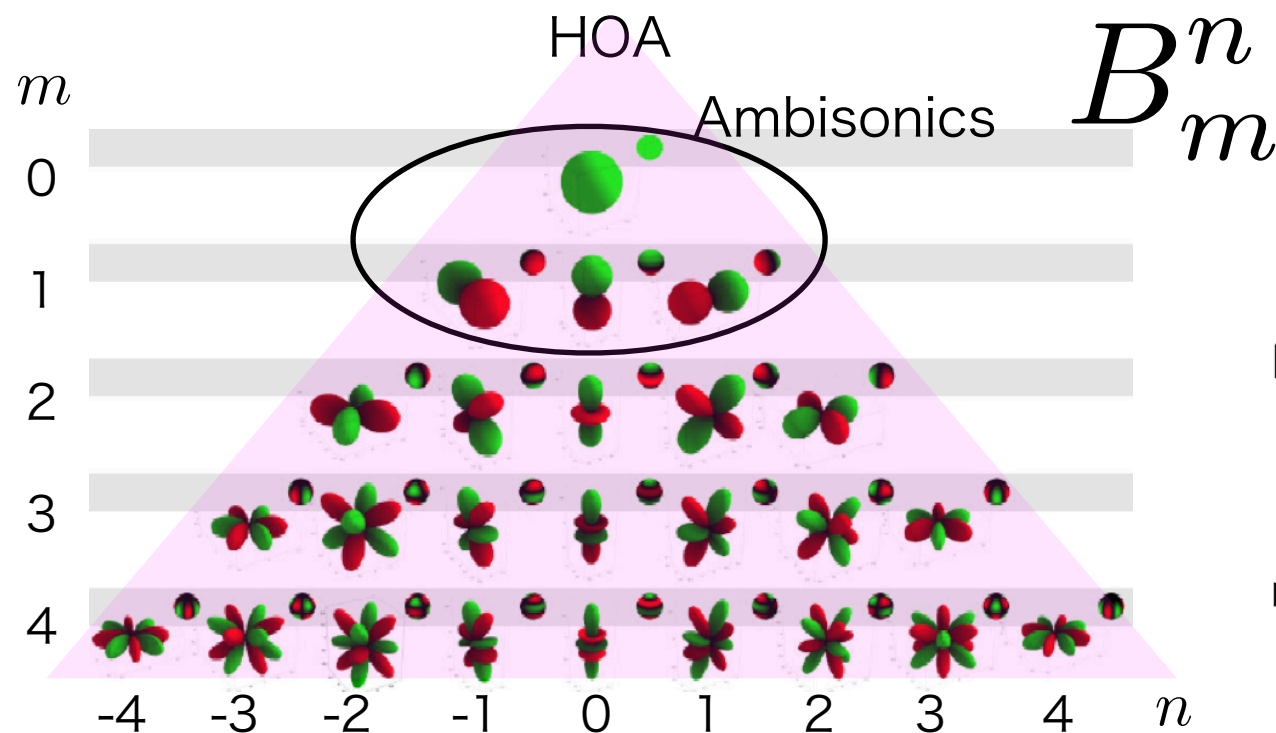
- ✳ 音情報を記録を方向 (θ, ϕ) ごとの球面調和関数 $Y_m^n(\theta, \phi)$ と展開係数 B_m^n により直交展開
- ✳ 展開次数 m を増やすほど実際の音場に近づく

$$Y_{mn}(\theta, \varphi) = \begin{cases} N_m^0 P_m^0(\cos \varphi) & \text{if } n = 0, \\ \sqrt{2} N_m^n P_m^n(\cos \varphi) \cos n\theta & \text{if } n > 0, \\ \sqrt{2} N_m^n P_m^{-n}(\cos \varphi) \sin n\theta & \text{if } n < 0, \end{cases} \quad N_m^n = \sqrt{\frac{(2m+1)}{4\pi} \frac{(m-|n|)!}{(m+|n|)!}}$$

HOAシステム

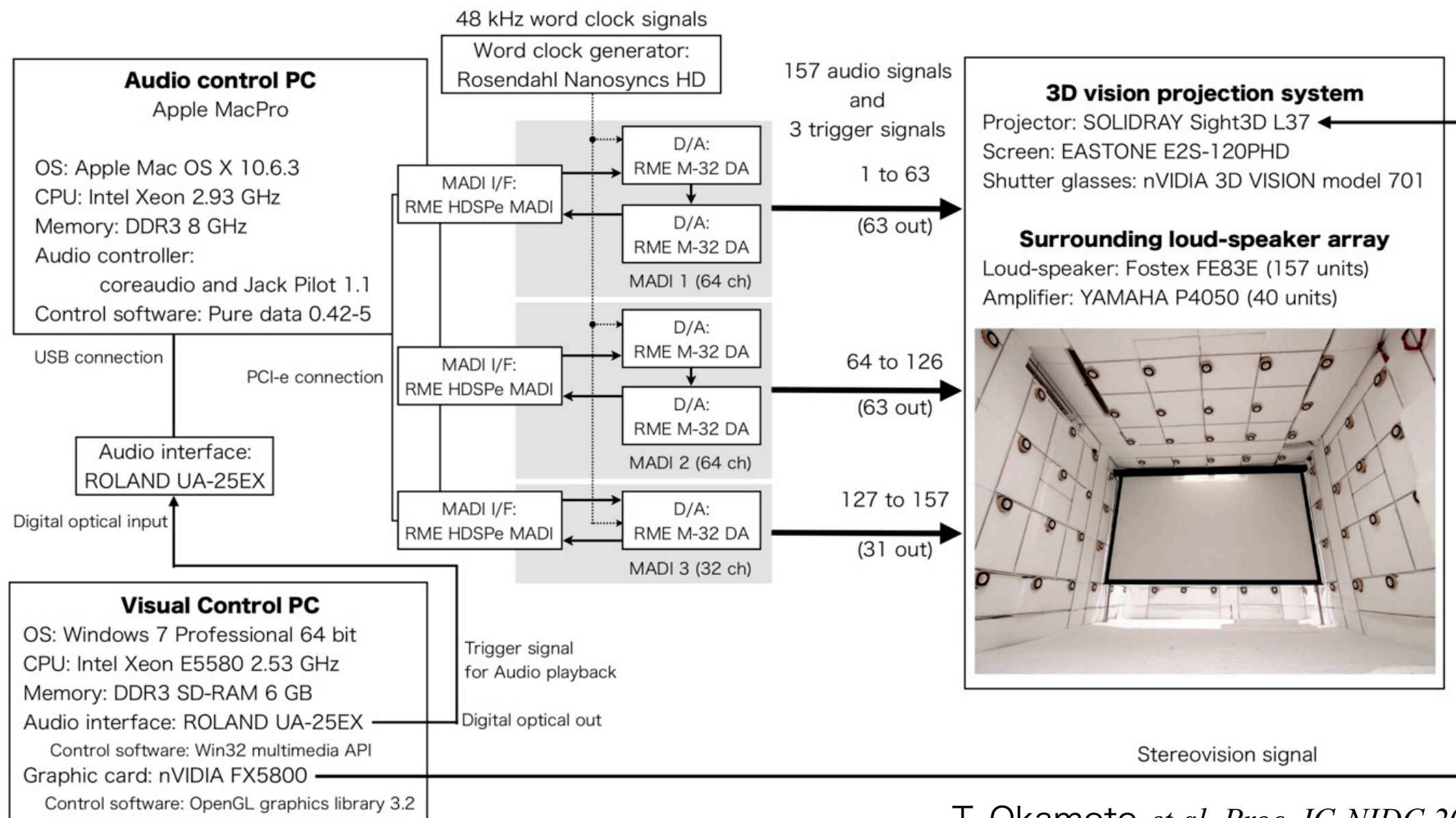
HOAシステムの特徴

- 展開係数の次数を上げるほど実際の音空間に近づく
- 次数 m の展開係数をエンコード、デコードする場合、少なくとも $(m+1)^2$ 以上のチャンネル数が必要
- 展開係数により空間情報が記述されるため、収録と再生の系が独立



157 chスピーカレイによるHOAシステム

- 157 ch包囲型スピーカレイを用いたHOA型音空間再生システム
 - 世界最高の5次デコードシステムを実装
 - 3つのMADIシステムによる157 ch完全同期再生 (サンプリング周波数48 kHz)



17:00~
DEMO

目的：高精細HOA型収録装置の構築

■ 高精細HOA型収録装置の必要性

- 次数の高い再生環境があったとしても収録側の次数が低い場合は高精細な音空間は提示できない
- 高次の展開係数を得るには、超多チャネルの球状マイクロホンアレイが必要
- 現状での最高実装チャネルは64 ch



S. Moreau *et al.* (32 ch) 17:00~
Orange Labs DEMO



D. N. Zotkin *et al.* (64 ch)
University of Maryland

■ 目的

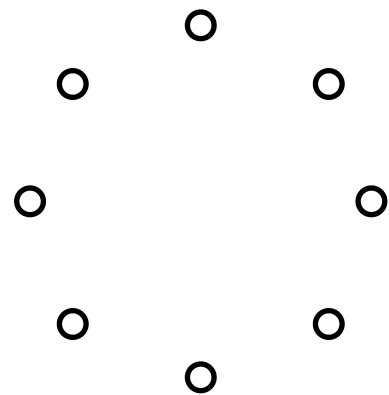
- 100 chを超えるHOA型収録システムの構築

高精細HOA収録の条件

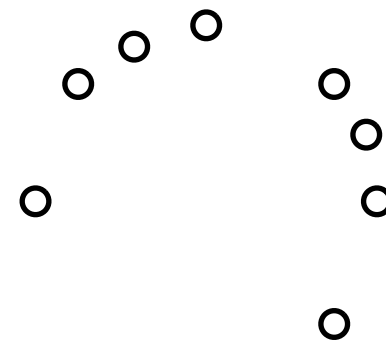
■ HOA型球状マイクロホンアレイに求められる条件

■ マイクロホンの等密度配置

- ✳ 正20面体以上の完全な等密度配置は実現不可能ではあるが、できるだけ等密度にマイクロホンを配置
- ✳ 等密度配置でない場合、エンコード行列の条件数が大きくなり、たとえば $(m + 1)^2$ 個のマイクロホンであっても次数 m までのエンコードは不可能 F. Zotter *et al.* 2010



○：等密度配置



×：不均一置配置

■ 球の半径

- ✳ マイクロホン数が等しい場合、球の半径がマイクロホン間隔に依存
- ✳ 空間的折り返し歪みが発生せず、広帯域収録のためにはマイクロホン間隔が小さいことが重要
- ✳ 球の半径もできるだけ小さく

設計方針

■ 超多チャンネル球状マイクロホンアレイシステムの実現

■ 既存の球状マイクロホンアレイ

- ✳ 最大チャンネル数：64
- ✳ アナログマイクロホン+A/Dによる収録システム



D. N. Zotkin *et al.* (64 ch)

University of Maryland

■ 設計条件

- ✳ 100 ch以上
- ✳ 半径はできるだけ小さく
→既存のシステムではマイクロホンや配線の大きさから64 chが限界

■ デジタルElectric Condenser Microphone (ECM)とFPGAによる実現

- ✳ 携帯電話用デジタルECM(KUS5147：ホシデン)
→小マイクロホン(4 × 3 × 1 mm)
- ✳ 各マイクロホンからのデジタル信号をFPGAボードで制御
→配線小規模
→大規模A/Dシステム不要

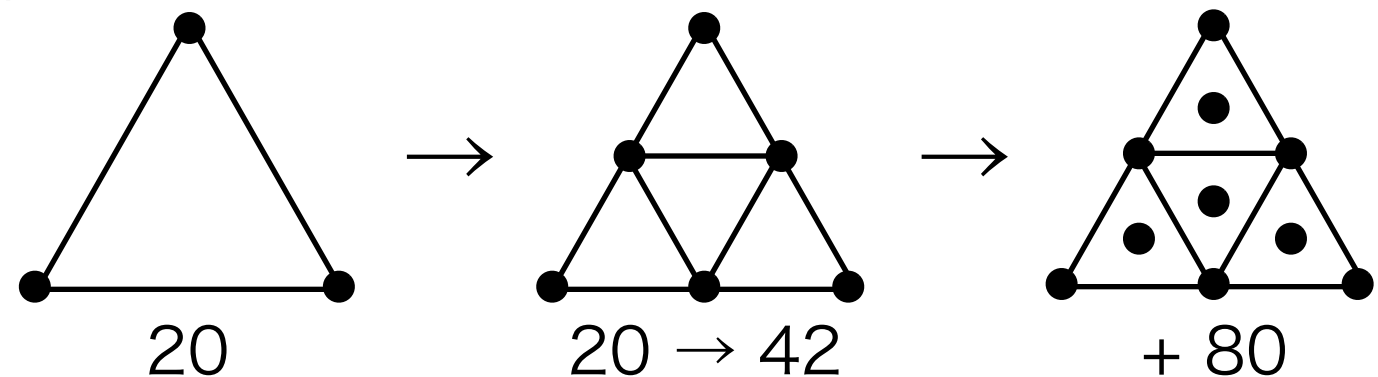
超多チャンネルかつ小サイズアレイを実現

121 ch球状マイクロホンアレイの設計

■ マイクロホン配置

■ 多面体再分割法による正20面体の分割

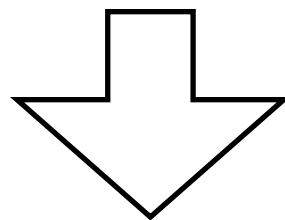
- ✳ 各三角形の中点を結び、4つに分割
- ✳ できた頂点を球面まで延長 (20 → 42)
- ✳ 各三角形の重心も球面まで延長 (80)
- ✳ 合計：122 ch



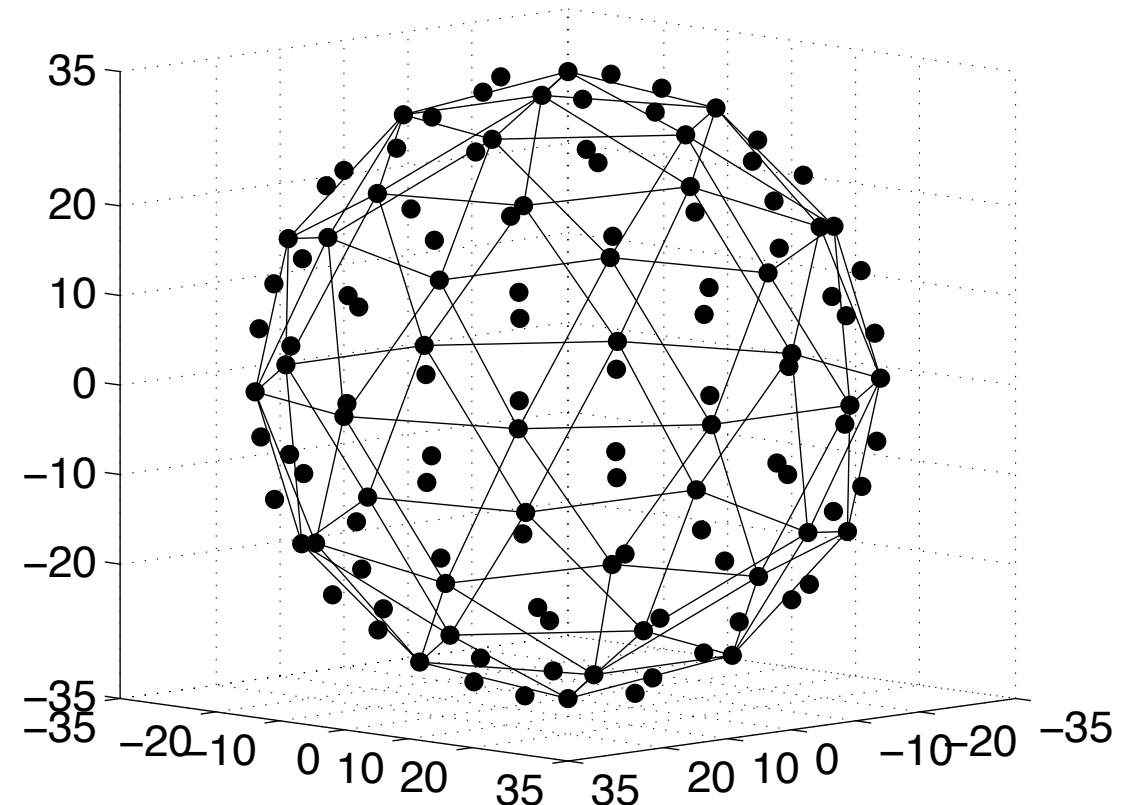
■ 半径

■ 3.5 cm

- ✳ マイクロホン, 配線, マイクロホン制御基盤の大きさから決定
- ✳ 配線口のため底の1 chを使用
- ✳ 空間的折り返し歪み：約8900 Hz以上



121 ch球状配置の設計



121 ch球状マイクロホンアレイの性能

■ エンコード次数の評価

■ 数値的なエンコード次数

- ✳ 10次までのエンコード行列が計算可能
→ $(10 + 1)^2 = 121$

■ エンコード行列の条件数による評価

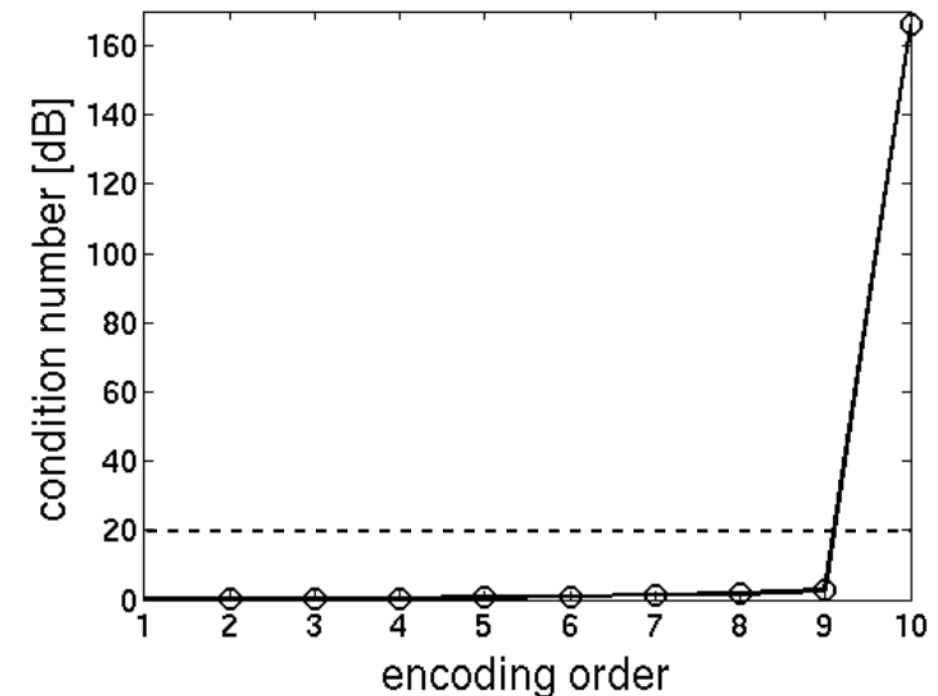
- ✳ 条件数=(最大固有値)/(最小固有値)
→ 逆行列の安定性を評価
- ✳ 20 dB以下なら安定なエンコード可能

M. Noisternig *et al.* 2010

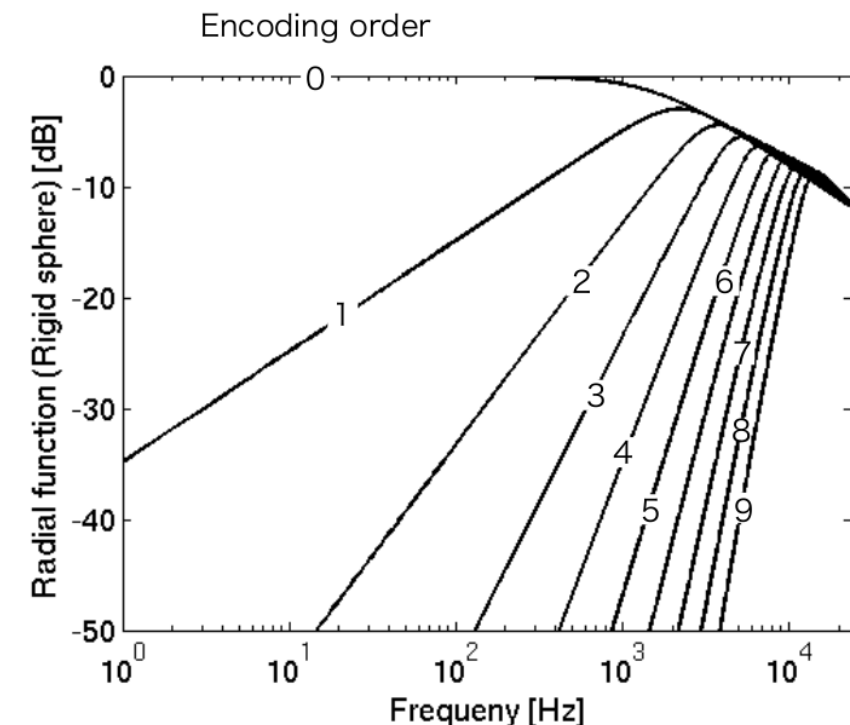
■ 動径分布関数とエンコード次数

■ 剛球モデルにおける動径分布関数とエンコード次数の関係

→ 次数を上げるほど高域成分のみの情報となる



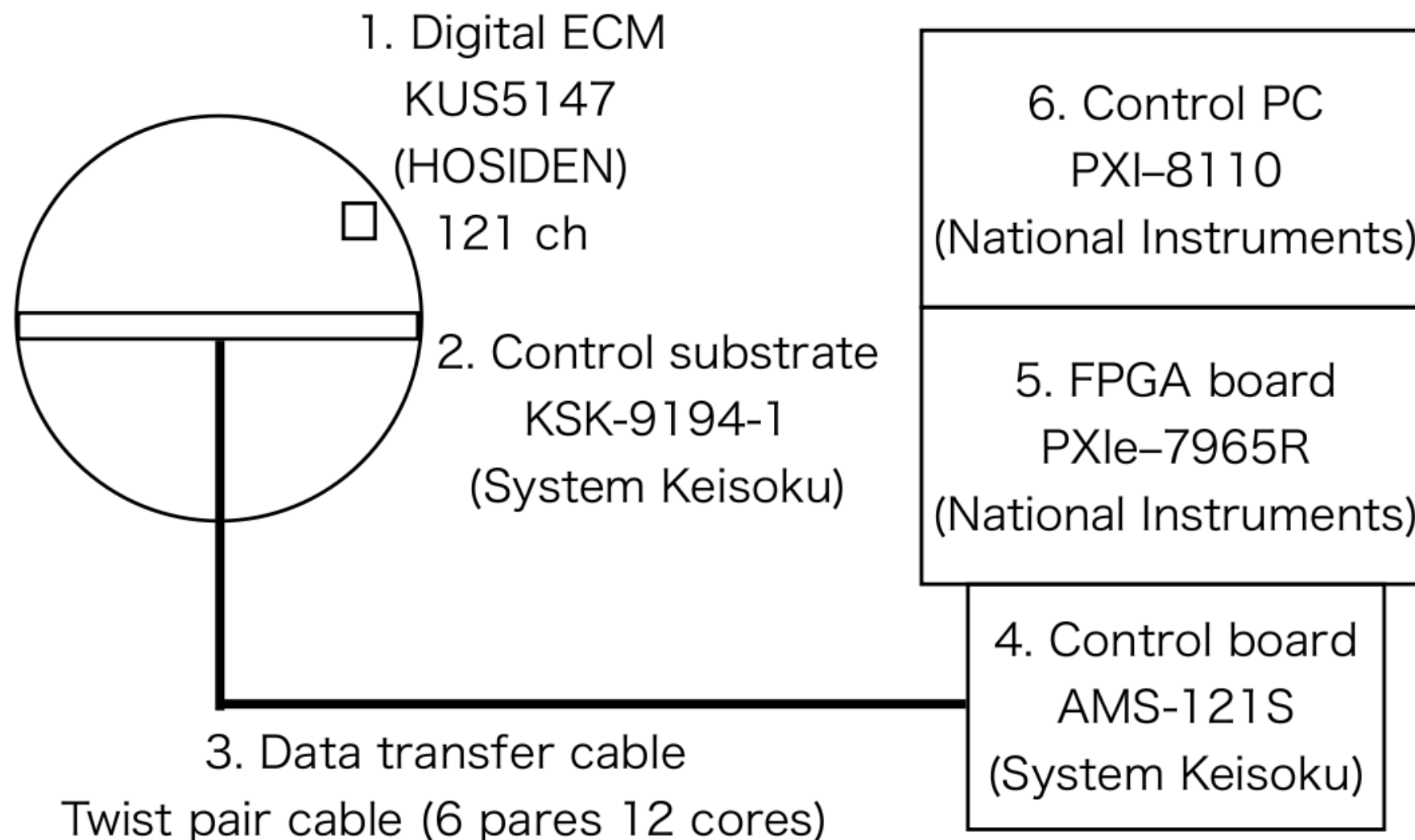
■ 9次までのエンコードが可能
→ 世界最大次数の実装



デジタルECMとFPGAボードを用いた実装

■ 121 chレコーディングシステム

- LabVIEW(National Instruments)にて制御
- 121 ch完全同期収録(サンプリング周波数：48 kHz)



各部位での収録信号状態

1. デジタルECM × 121 ch

- ✳ 48 kHz × 64 = 3.072 MHz, 4次 $\Delta\Sigma$ 変調, 16 bit相当

2. 内部制御基盤

- ✳ SerDes通信技術により(1)を時分割シリアルデータに変換
- ✳ 3ペアSerDes伝送
 - $3.072 \text{ MHz} \times 48 = 147.457 \text{ bps}$ (1ペア)

3. データ転送ケーブル (最大12 m)

- ✳ 3ペアSerDes伝送=442.368 bps

4. 制御ボード

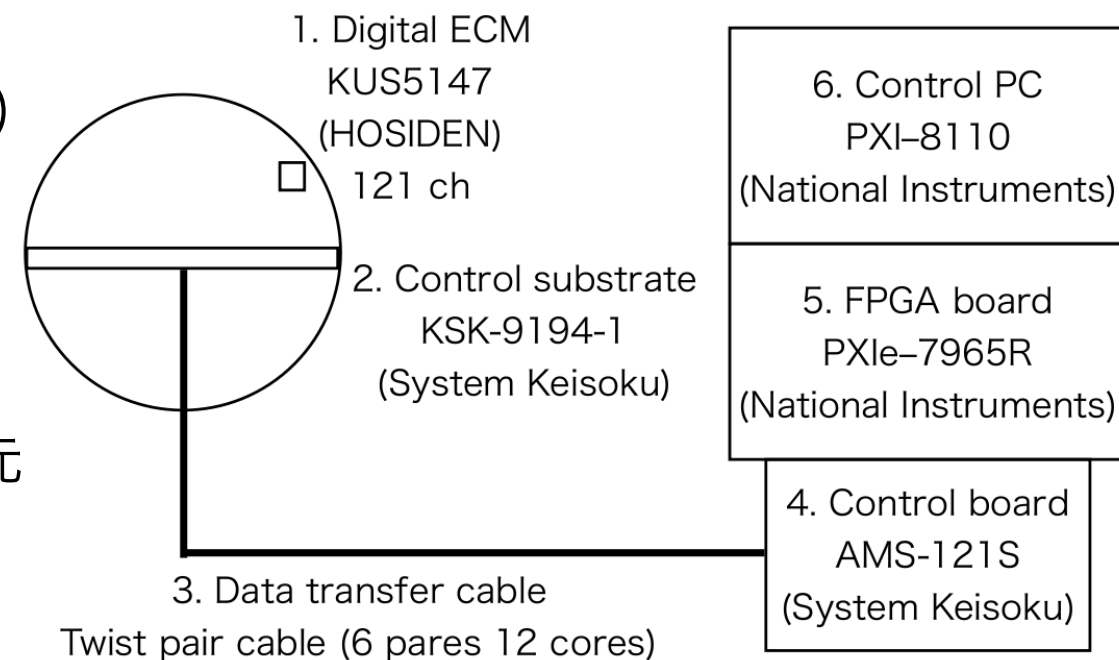
- ✳ 時分割シリアルデータを多点パラレルデータに復元
- ✳ FPGAボードに各マイクロホンの入力として転送
- ✳ サンプリング周波数3.072 MHz, 1 bit

5. FPGAボード

- ✳ Cascaded Integrator Comb (CIC)フィルタによりサンプリング周波数48 kHz, 16 bitに変換

6. 制御PC

- ✳ サンプリング周波数48 kHz, 16 bit × 121 ch分のデータをHDDに記録



※SerDes通信

SERializer/DESerializer通信

121 chHOA型レコーディングシステム



システムの仕様

名称	規格	仕様
デジタル ECM (無指向性)	KUS5147 (HOSIDEN)	$\Delta\Sigma$ 変調器: 4 次 感度: -30 dBFS/Pa (1.8 V) S/N 比: 58 dB typ. 動作電圧: 1.8 V クロック周波数: 3.072 MHz 消費電流: 0.45 mA typ. 外形寸法: $4 \times 3 \times t$ 1.0 mm
FPGA ボード	PXIe-7965R (NI)	FPGA: Xilinx Virtex-5 SX95T DRAM: 512 MB
コントローラ	PXI-8110 (NI)	2.26 GHz Intel Core 2 Quad 800 MHz DDR2, 2 GB OS: Windows XP

まとめと今後の予定

■ HOA型音空間収録システムの構築

- 世界最大次数9次を実現する121 ch球状マイクロホンアレイの設計
- デジタルECMとFPGAシステムによるリアルタイム収録の実装

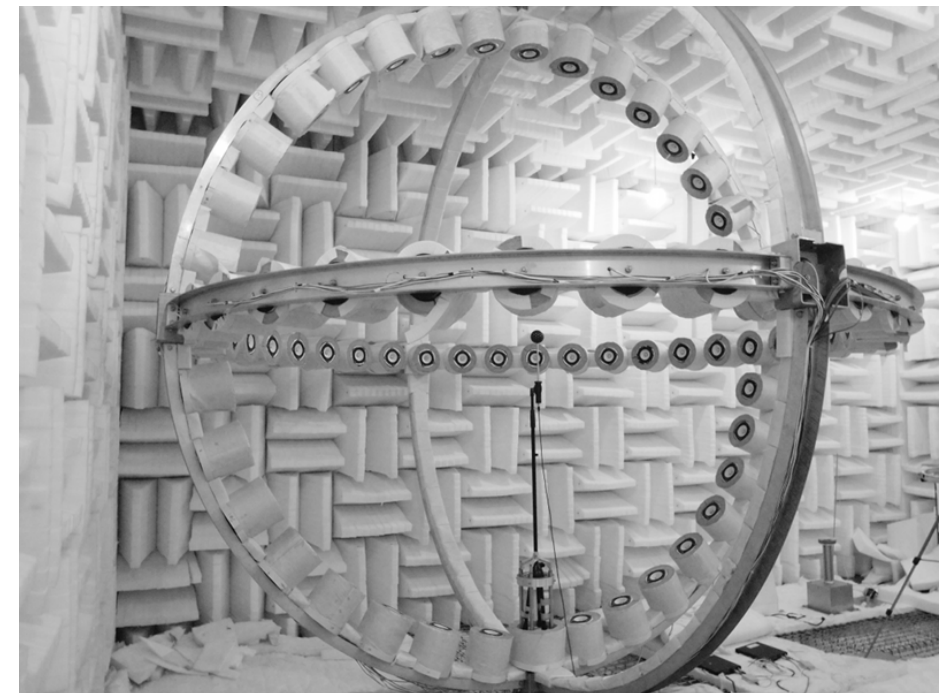
■ 今後の予定

■ マイクロホンシステムのキャリブレーション

- ✳ Time Stretched Pulse信号測定による伝達関数の測定
- ✳ 球状スピーカアレイによる測定
- ✳ キャリブレーション方法の検討

■ 実環境音収録による性能評価

- ✳ 音空間再現精度の理論値との比較
- ✳ 既存の実装システムとの比較



球状マイクロホンアレイ@東北大通研

17:00～ 見学