2013.3.13 ASJ Annual Meeting Spring 2013@Tokyo Univ. of Tech., Hachioji

Rayleigh積分の逆問題と順伝搬に基づく音場推定

Estimation of sound field based on inversion of Rayleigh integral and forward wave propagation

○岡本 拓磨. 榎本 成悟. 西村 竜一

情報通信研究機構

Introduction

- 超臨場感次世代インタラクティブコミュニケーションの実現
 - あたかもその場にいる, そのものがあるかのような通信
 - 3次元音空間の収録・伝送・再現
 - * 音の方向, 向き, 距離感を伝送



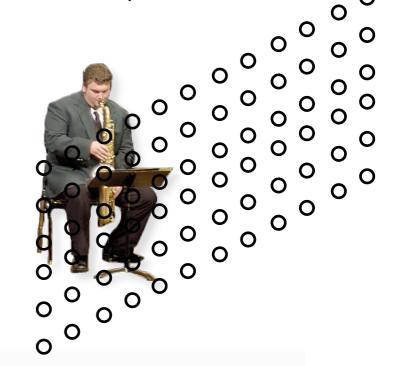


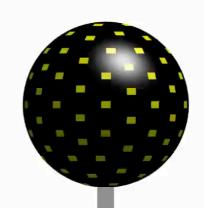
- 3次元音場推定
 - マイクロホンを好き放題配置してよいわけではない
 - 限られたマイクロホン配置から音場を推定する技術が必要

Previous method

- 空間フーリエ変換に基づく方法
 - 近接音響ホログラフィ,波面再構成フィルタ(Koyama et al. 2013),など
 - 業 アレイを通過する波面から逆or順伝搬を計算:○
 - * 推定できる方向が限定:×
 - 業 直線や面といった大規模なアレイが必要:x

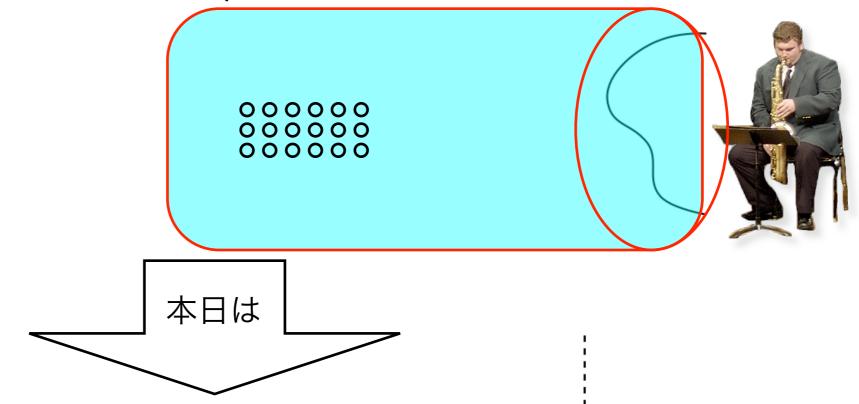
- 球面調和解析に基づく方法
 - Higher order Ambisonics (HOA)
 - * アレイに対して全方向の逆伝搬を計算:○
 - * アレイも小規模:○
 - * 推定領域が球(や円)に限られる:×
 - * 再現できない周波数がある:×



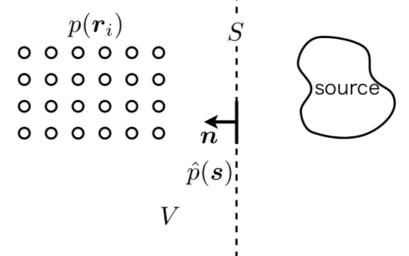


Purpose

- Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の逆問題と順伝搬に基づく音場推定 (2012年11月EA研究会@大分)
 - 小規模アレイ
 - 全方向任意形状推定
 - 全周波数帯域推定



- Rayleigh積分の逆問題と順伝搬に 基づく音場推定
 - 小規模アレイ
 - <u>全方向推定</u> → チャネル数半分
 - 全周波数帯域推定



Basic theory

■ Kirchhoff-Helmholtz積分方程式に基づく音場再現

$$p(\mathbf{r}) = \iint_{\mathbf{S}} \left\{ G(\mathbf{s}|\mathbf{r}) \frac{\partial p(\mathbf{s})}{\partial n} - p(\mathbf{s}) \frac{\partial G(\mathbf{s}|\mathbf{r})}{\partial n} \right\} \delta S$$

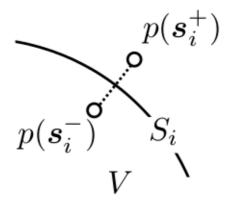
$$G(\mathbf{s}|\mathbf{r})_{3\mathrm{D}} = \frac{\exp(-jk|\mathbf{s} - \mathbf{r}|)}{4\pi|\mathbf{s} - \mathbf{r}|} \qquad G(\mathbf{s}|\mathbf{r})_{2\mathrm{D}} = \frac{j}{4} H_0^{(2)}(k|\mathbf{s} - \mathbf{r}|)$$

$$S$$

$$V$$

- 境界内部の音圧は境界面の音圧と粒子速度により一意に規定される
- Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の離散化

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N} \left[g(\mathbf{s}_i | \mathbf{r}) \frac{\partial p(\mathbf{s}_i)}{\partial n} - g'(\mathbf{s}_i | \mathbf{r}) p(\mathbf{s}_i) \right]$$



$$\frac{\partial p(\boldsymbol{s}_i)}{\partial n} \simeq \frac{p(\boldsymbol{s}_i^+) - p(\boldsymbol{s}_i^-)}{\delta} \quad g(\boldsymbol{s}_i|\boldsymbol{r}) \simeq G(\boldsymbol{s}_i|\boldsymbol{r}) \Delta \qquad g'(\boldsymbol{s}_i|\boldsymbol{r}) \simeq \frac{G(\boldsymbol{s}_i^+|\boldsymbol{r}) - G(\boldsymbol{s}_i^-|\boldsymbol{r})}{\delta} \Delta$$

Matrix description of K-H integral

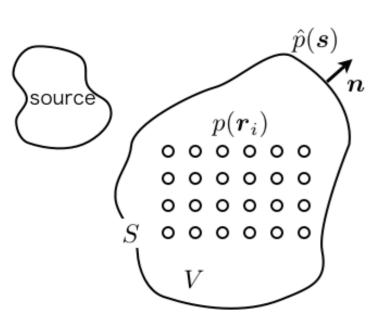
- Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の行列表現
 - 内部の点が複数ある場合の表現

$$g(s|r) = [g(s_1|r) \ g(s_2|r) \ \cdots \ g(s_N|r)] \qquad p(r) = \sum_{i=1}^{N} \left[g(s_i|r) \frac{\partial p(s_i)}{\partial n} - g'(s_i|r) p(s_i) \right]$$

$$p'(s) = \left[\frac{\partial p(s_1)}{\partial n} \ \frac{\partial p(s_2)}{\partial n} \ \cdots \ \frac{\partial p(s_N)}{\partial n} \right]^{\mathrm{T}} \qquad \downarrow$$

$$g'(s|r) = [g'(s_1|r) \ g'(s_2|r) \ \cdots \ g'(s_N|r)] \qquad p(r) = [g(s|r) \ - g'(s|r)] \left[\begin{array}{c} p'(s) \\ p(s) \end{array} \right]$$

$$p(s) = [p(s_1) \ p(s_2) \ \cdots \ p(s_N)]^{\mathrm{T}} \qquad p(r) = [p(r_1) \ p(r_2) \ \cdots \ p(r_M)]^{\mathrm{T}}$$



$$G(s|r) = \begin{bmatrix} g(s|r_1) \\ g(s|r_2) \\ \vdots \\ g(s|r_M) \end{bmatrix} G'(s|r) = \begin{bmatrix} g'(s|r_1) \\ g'(s|r_2) \\ \vdots \\ g'(s|r_M) \end{bmatrix} 6$$

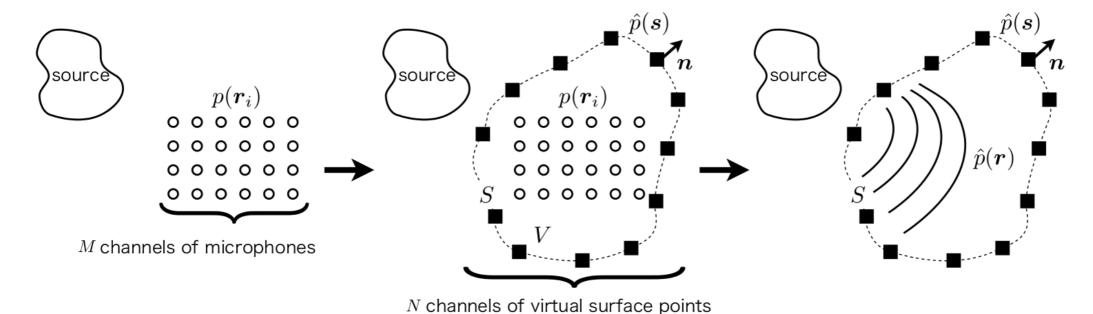
Previous proposed method

- K-H積分方程式の逆問題と準伝搬に基づく音場推定
 - 1. マイクロホンアレイでの受信信号:p(r)
 - 2. 仮想境界をマイクロホンアレイの外側に設定 ightarrow A(s|r) = [G(s|r) G'(s|r)]
 - 3. 境界の音圧 $\hat{p}(s)$ と粒子速度 $\hat{p}'(s)$ を推定

$$m{p}(m{r}) = [m{G}(m{s}|m{r}) \; - m{G}'(m{s}|m{r})] \left[egin{array}{c} m{p}'(m{s}) \ m{p}(m{s}) \end{array}
ight] \hspace{0.5cm}
ightarrow \hspace{0.5cm} \left[egin{array}{c} \hat{m{p}}'(m{s}) \ \hat{m{p}}(m{s}) \end{array}
ight] = m{A}(m{s}|m{r})^{-1}m{p}(m{r})$$

4. 推定した音圧 $\hat{\pmb{p}}(s)$ と粒子速度 $\hat{\pmb{p}}'(s)$ を K-H積分方程式に基づき境界内に順伝搬

$$\hat{p}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N} \left[g(\mathbf{s}_i | \mathbf{r}) \frac{\partial \hat{p}(\mathbf{s}_i)}{\partial n} - g'(\mathbf{s}_i | \mathbf{r}) \hat{p}(\mathbf{s}_i) \right]$$



Discussion

- 特徴
 - マイクロホンの信号から仮想制御点の音圧と粒子速度の両方を推定する
- 精度向上のために
 - 音圧か粒子速度どちらかで内部音場を規定 → マイクロホン数を半分に
 - * ノイマン型グリーン関数

$$p(\mathbf{r}) = \iint_{\mathbf{S}} G_{\mathrm{N}}(\mathbf{s}|\mathbf{r}) \frac{\partial p(\mathbf{s})}{\partial n} \delta S \rightarrow$$
境界上の粒子速度のみで内部音場を記述無限平面:WFS*(第1種Rayleigh積分)

* ディリクレ型グリーン関数

$$p(\mathbf{r}) = -\iint_{\mathbf{s}} p(\mathbf{s}) \frac{\partial G_{\mathrm{D}}(\mathbf{s}|\mathbf{r})}{\partial n} \delta S$$
 → 境界上の音圧のみで内部音場を記述無限平面:WFS*(第2種Rayleigh積分)

球: High order Ambisonics

Extended proposed method

- Rayleigh積分の逆問題と準伝搬に基づく音場推定
 - 仮想境界を無限大平面とする

$$G_{\mathrm{N}}(\boldsymbol{s}|\boldsymbol{r}) = 2G((\boldsymbol{s}|\boldsymbol{r}))$$

■ 第1種Rayleigh積分

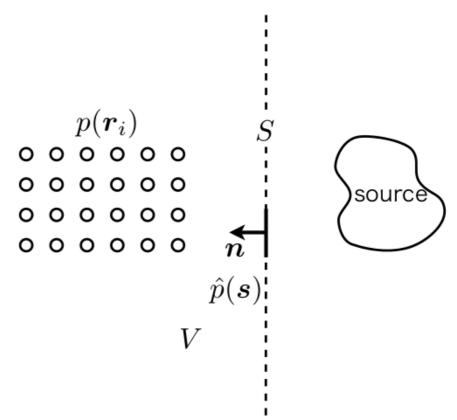
$$p(\mathbf{r}) = -2 \iint_{\mathbf{S}} G(\mathbf{s}|\mathbf{r}) \frac{\partial p(\mathbf{s})}{\partial n} \delta S \rightarrow \mathbf{p}(\mathbf{r}) = -2\mathbf{G}(\mathbf{s}|\mathbf{r})\mathbf{p}'(\mathbf{r})$$

■ 第1種Rayleigh積分の逆問題

$$\hat{\boldsymbol{p}}'(\boldsymbol{s}) = -\frac{1}{2}\boldsymbol{G}(\boldsymbol{s}|\boldsymbol{r})^{-1}\boldsymbol{p}(\boldsymbol{r})$$

■ 順伝搬による音場推定

$$\hat{p}(\mathbf{r}) = -2\sum_{i=1}^{N} \left[g(\mathbf{s}_i | \mathbf{r}) \frac{\partial \hat{p}(\mathbf{s}_i)}{\partial n} \right]$$



Computer simulation

■ シミュレーション条件

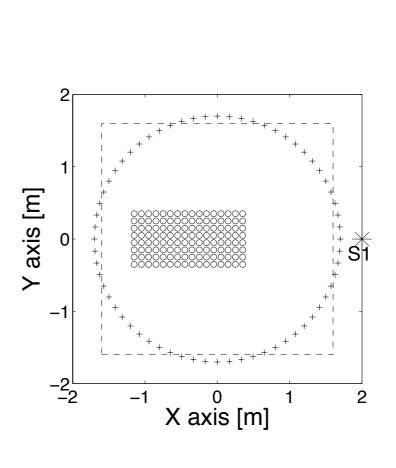
■ 解析周波数:500, 1500 Hz

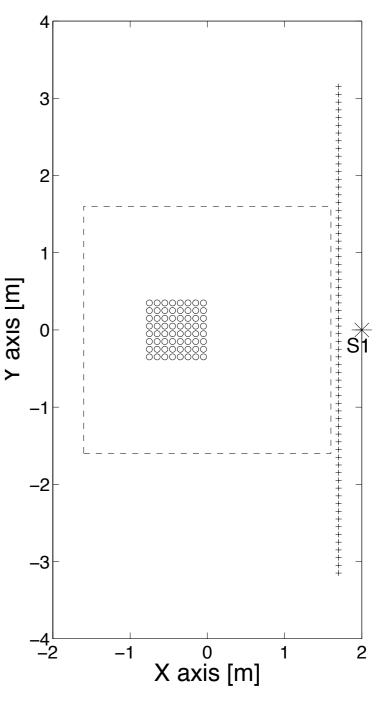
■ 音速:343.26 m/s

🔳 音源:円筒音源

$$G(s|r)_{2D} = \frac{j}{4}H_0^{(2)}(k|s-r|)$$

- 💶 音源位置:(2, 0)
- **■** δ: 0.0000002 m
- マイクロホン間隔:0.1 m
- マイクロホン数
 - * K-H integral: 128 ch
 - ** Rayleigh I integral: 64 ch
- 制御点数:64 ch



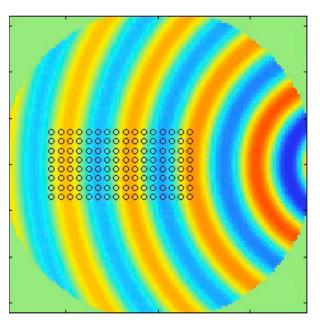


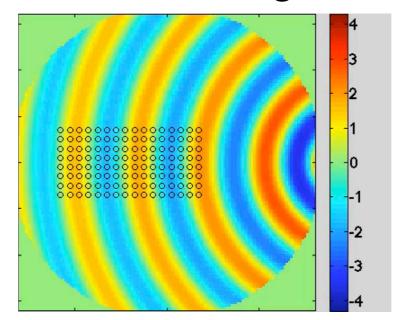
K-H integral

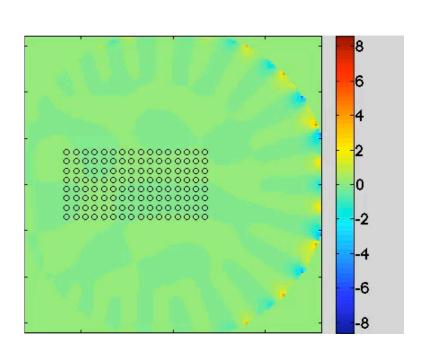
Rayleigh I integral

Simulation results (500 Hz)

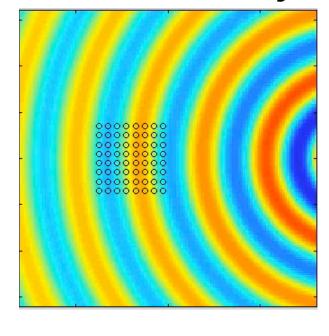
Based on Kirchhoff-Helmholtz integral

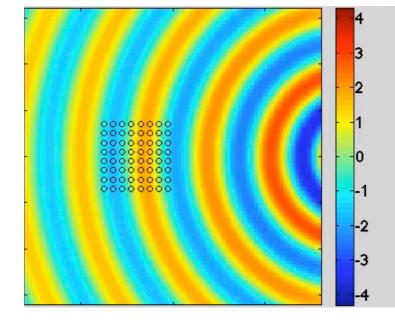


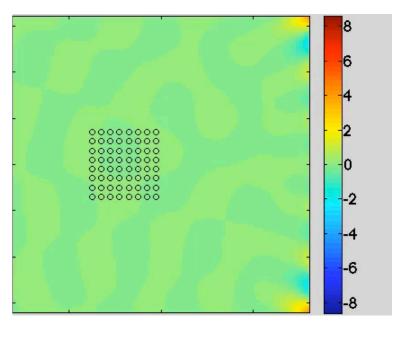




Based on Rayleigh I integral







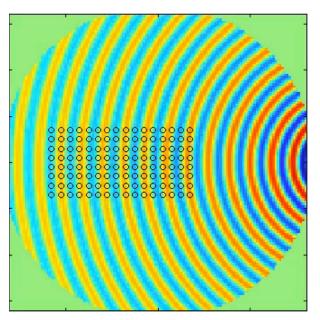
Original

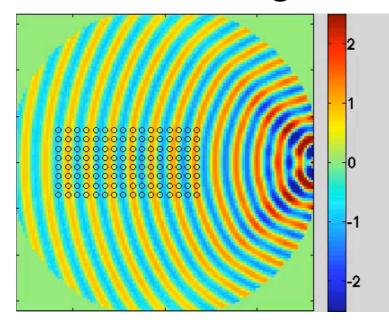
Estimated

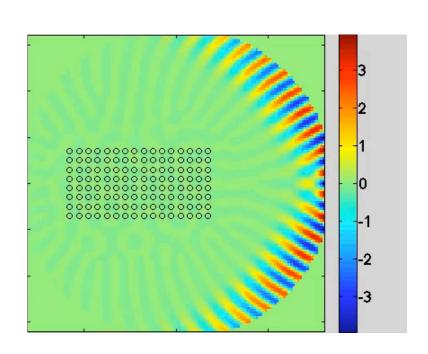
Error

Simulation results (1500 Hz)

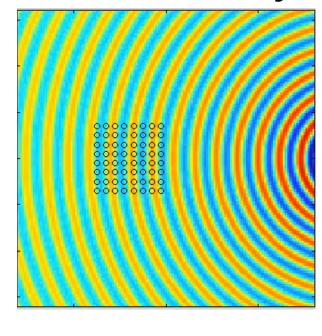
Based on Kirchhoff-Helmholtz integral

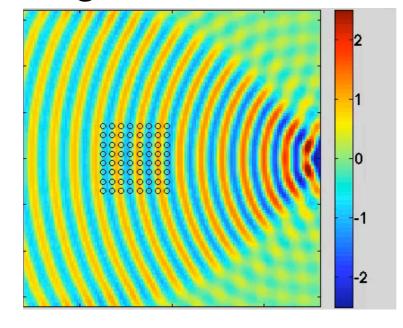


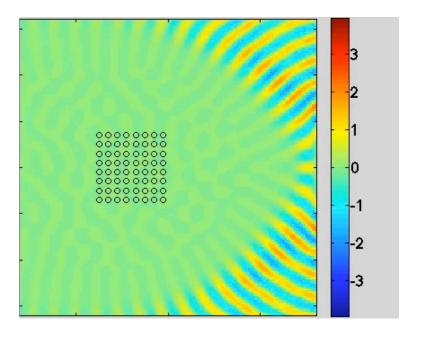




Based on Rayleigh I integral





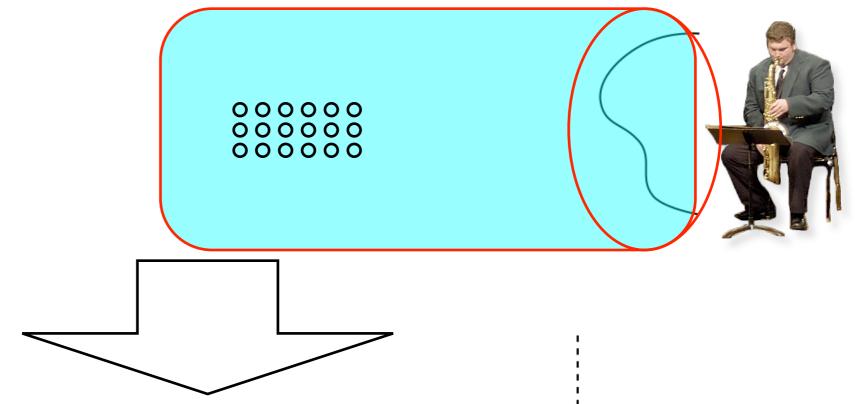


Estimated

Error

Concluding remarks

- Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の逆問題と順伝搬に基づく音場推定
 - 小規模アレイ
 - 全方向任意形状推定
 - 全周波数帯域推定



- Rayleigh積分の逆問題と順伝搬に 基づく音場推定
 - 小規模アレイ
 - 全方向推定 → チャネル数半分
 - 全周波数帯域推定

