

波面合成法を用いた 立体音場再生における 合成音像定位モデル

2007/08/02

木村敏幸, 勝本道哲(NICT),
笈一彦(中京大学)

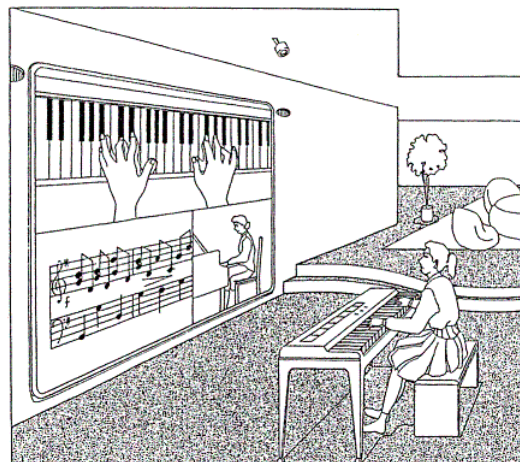
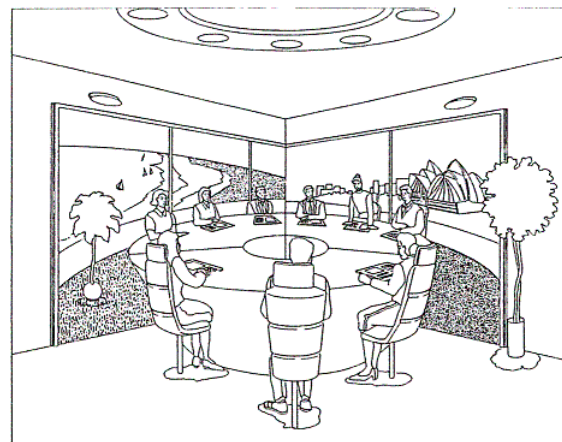
発表の流れ

1. はじめに
2. 合成音像定位モデルの原理
3. モデルパラメータの設定
 - チャネル信号の作成
 - 頭部伝達関数パラメータの推定
 - その他のパラメータ設定
4. 定位実験結果との比較
5. まとめ

1. はじめに

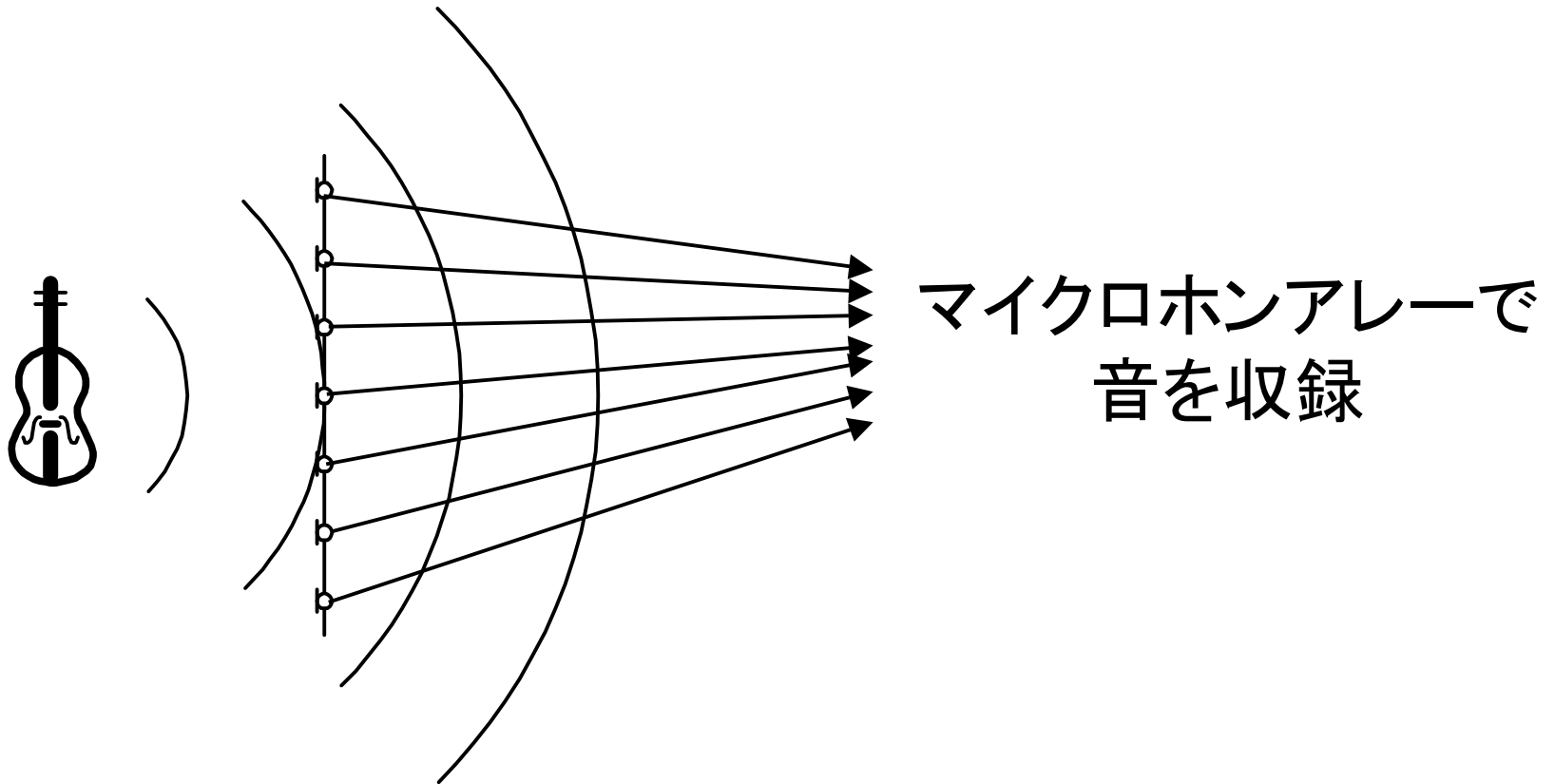
超臨場感音響技術

- 遠隔通信会議
 - 同じ場所で会議
 - 本当は違う場所
 - 目の前に相手がいる
 - 本当はいない
- 遠隔アンサンブル
 - 同じ場所で合奏
 - 本当は違う場所
 - 目の前に相手がいる
 - 本当はいない
- 波面合成法が有効？



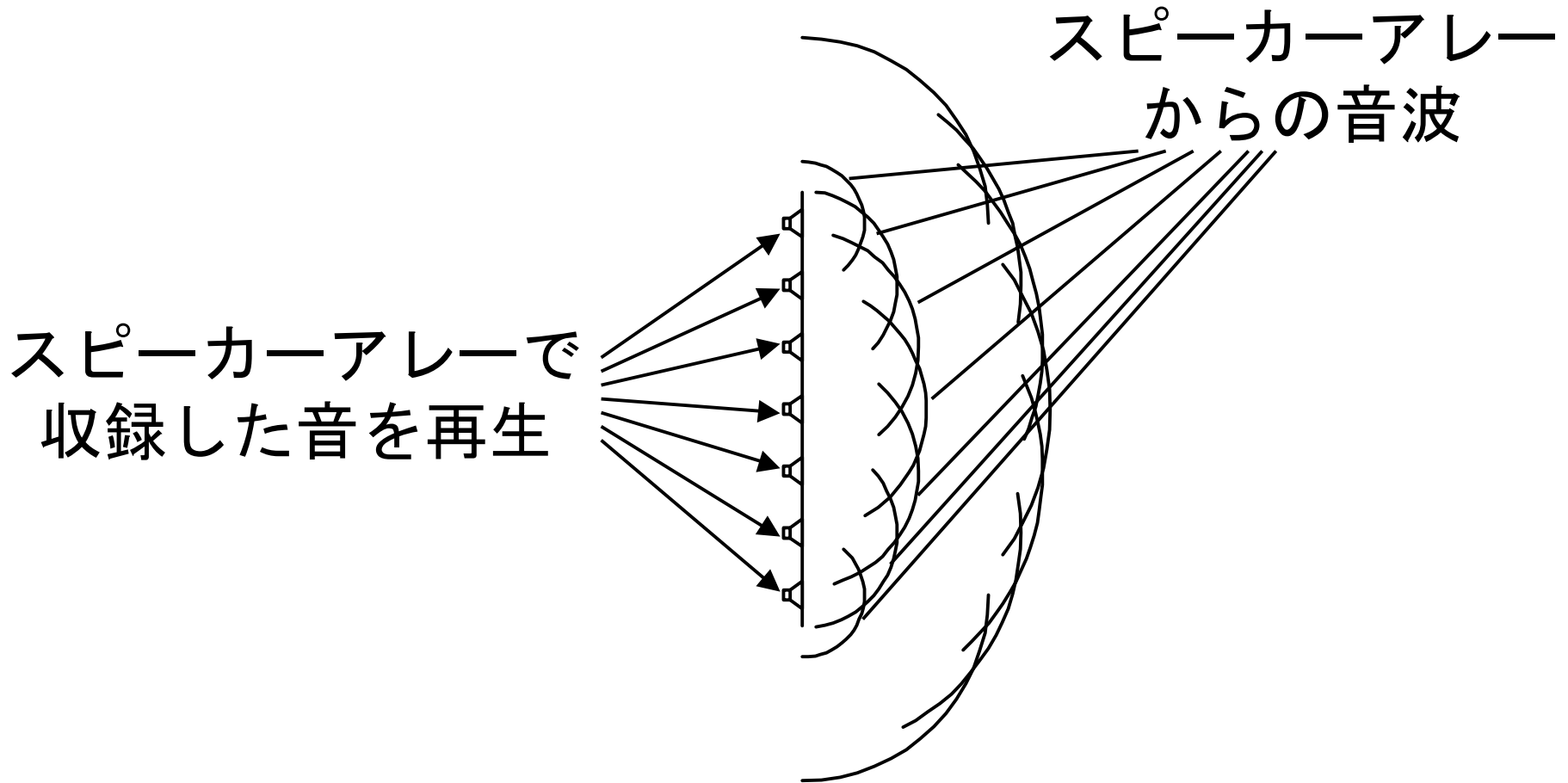
波面合成法

1. マイクロホンアレーを配置し、音を収録



波面合成法

2. スピーカーアレーを配置し，収録した音を再生

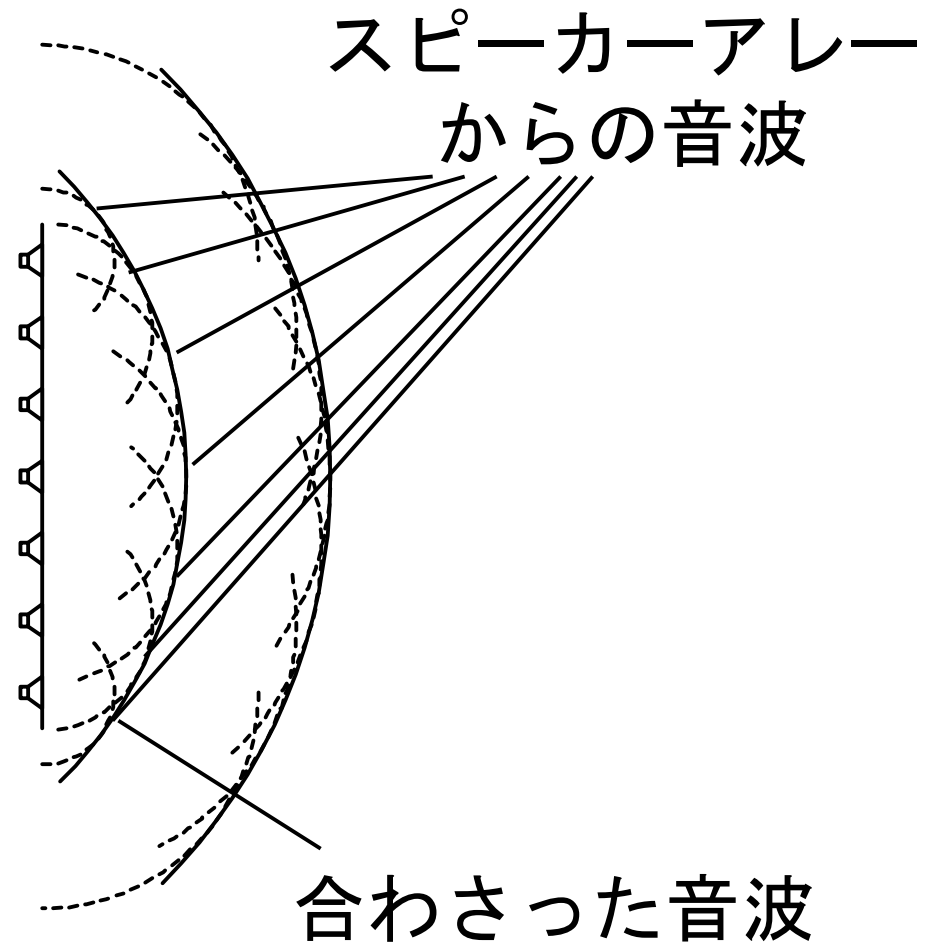


波面合成法

3. スピーカーアレーからの音波が合わさって、もう一つの別の音波が合成(ホイヘンスの原理)

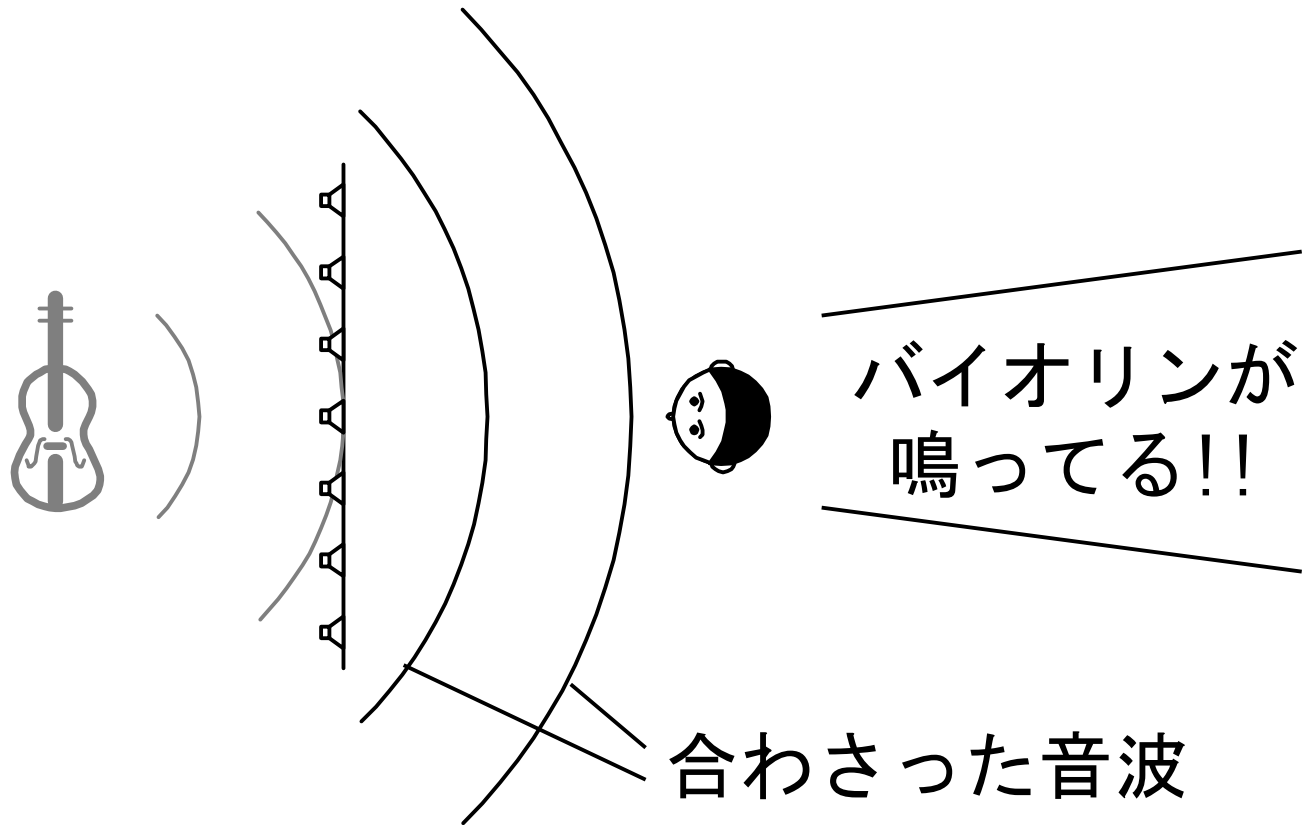


クリスティアーン・ホイヘンス
(1629-1695)



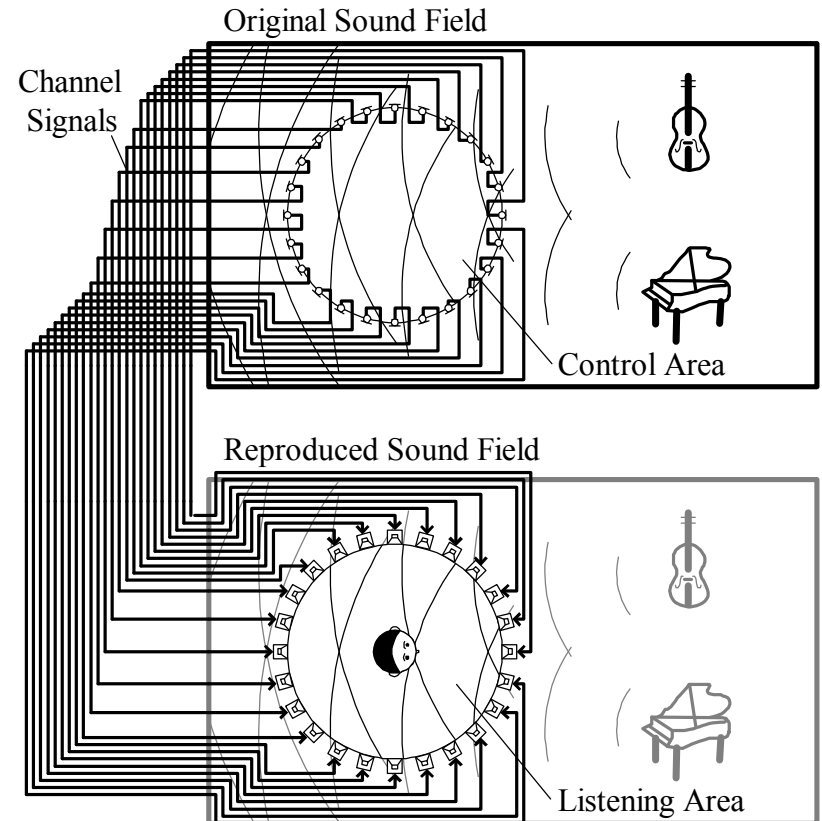
波面合成法

4. スピーカアレーの前で聞くと、まるで目の前で音が鳴っているように感じる



波面合成法による立体音場再生

- 原音場
 - マイクロホンで音を収録
- 再生音場
 - スピーカで音を再生
 - ホイヘンスの原理によって原音場の波面を合成
- 特徴
 - 聴取者は頭部を動かしたり席を移動したりできる
 - 制御領域を広くすれば、多人数でも聴取が可能



本研究の目的

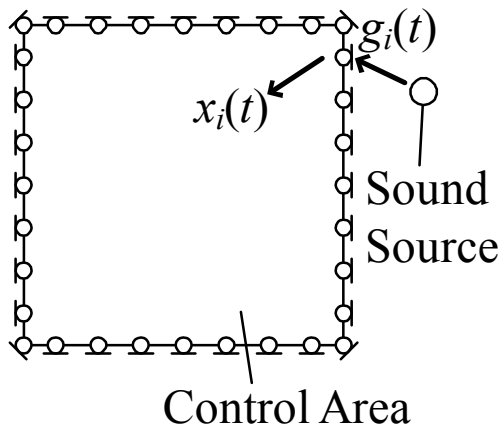
- 波面合成法による立体音場再生システム
 - 聴取者の聴感に基づけば必要なマイクロホンやスピーカの数減らせる[木村ら, 2005]
 - 半径2 mの円の場合, 24個(従来は数百個)
 - 聴取実験により実用的なシステムが構築できる
- しかし,
 - 聴取実験を実施するには多大な時間と労力を要する
 - 聴取実験の結果を予測できないか？
- そこで,
 - 聴取実験結果を予測する定位モデルを構築
 - 構築したモデルの予測性能を評価

2. 合成音像定位モデルの原理

定位方向の予測手順(1)

- マイク信号 $x_i(t)$ から両耳信号 $y_{L(R)}(t)$ を作成

Original Sound Field



$$y_{L(R)}(t) = \sum_{i=1}^M p_i D_{is} \{h_{iL(iR)}(t) * x_i(t)\}$$

$$= \sum_{i=1}^M p_i D_{im} D_{is} a_i a_{iL(iR)} s(t - t_i - t_{iL(iR)})$$

$s(t)$: 音源信号

$h_{iL(iR)}(t)$: スピーカから両耳までの頭部伝達関数

a_i : 音源からマイクロホンまでの振幅

$a_{iL(iR)}$: スピーカから両耳までの振幅

t_i : 音源からマイクロホンまでの到達時間

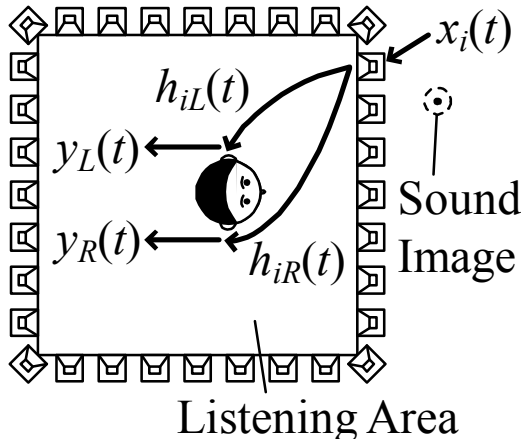
$t_{iL(iR)}$: スピーカから両耳までの到達時間

D_{im} : マイクロホンの指向特性係数

D_{is} : スピーカの指向特性係数

p_i : スピーカの先行音効果係数

Reproduced Sound Field

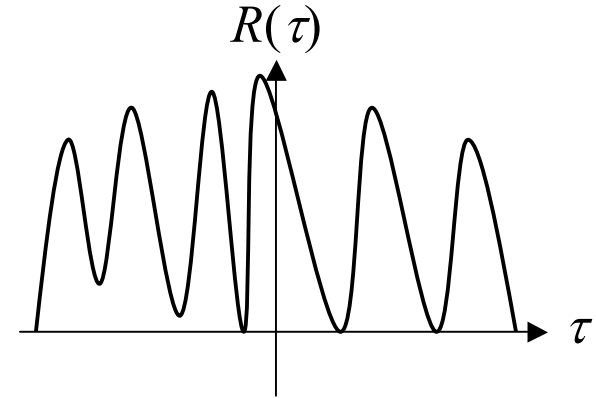


定位方向の予測手順(2)

- 両耳信号 $y_{L(R)}(t)$ から両耳間相関関数 $R(\tau)$ を算出

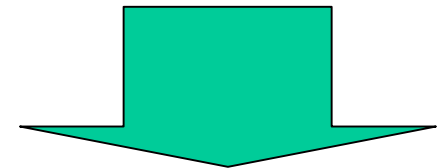
$$R(\tau) = E\{y_L(t)y_R(t-\tau)\}$$

$$= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{ij} D_{ij} A_{ij} E\{s(t-T_{iL})s(t-T_{jR}-\tau)\}$$



- $s(t)$ を無相関性とするとき、

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{ij} D_{ij} A_{ij} \delta(\tau - T_{ij})$$

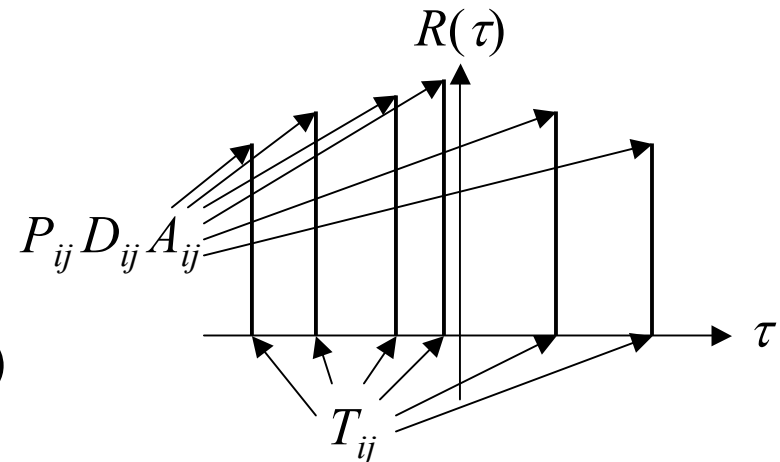


$$P_{ij} = p_i p_j$$

$$D_{ij} = D_{im} D_{jm} D_{is} D_{js}$$

$$A_{ij} = a_i a_j a_{iL} a_{jR}$$

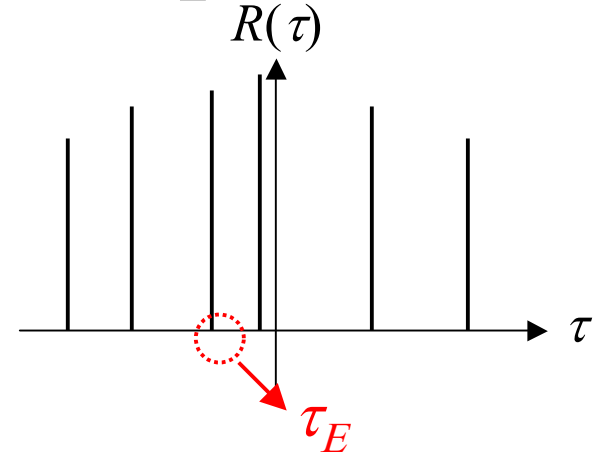
$$T_{ij} = T_{iL} - T_{jR} = (t_i + t_{iL}) - (t_j + t_{jR})$$



定位方向の予測手順(3)

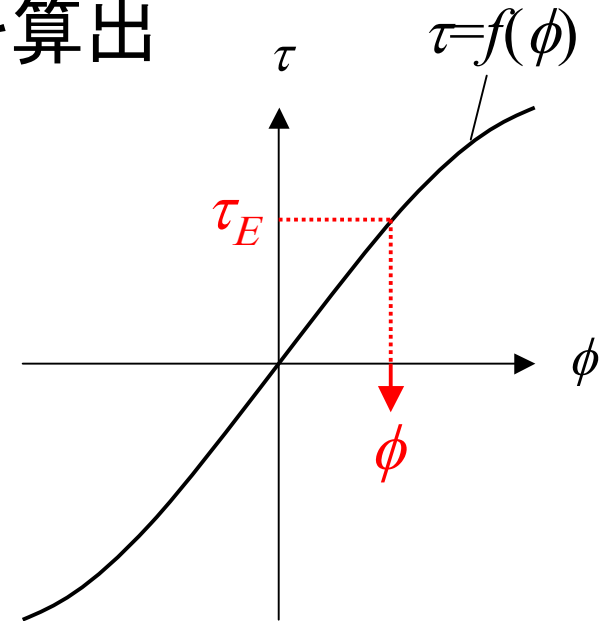
- $R(\tau)$ のピーク重心から両耳間時間差 τ_E を算出

$$\tau_E = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{ij} D_{ij} A_{ij} T_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{ij} D_{ij} A_{ij}}$$



- 両耳間時間差 τ_E から定位方向 ϕ を算出

$$\phi = f^{-1}(\tau_E) = f^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{ij} D_{ij} A_{ij} T_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{ij} D_{ij} A_{ij}} \right)$$



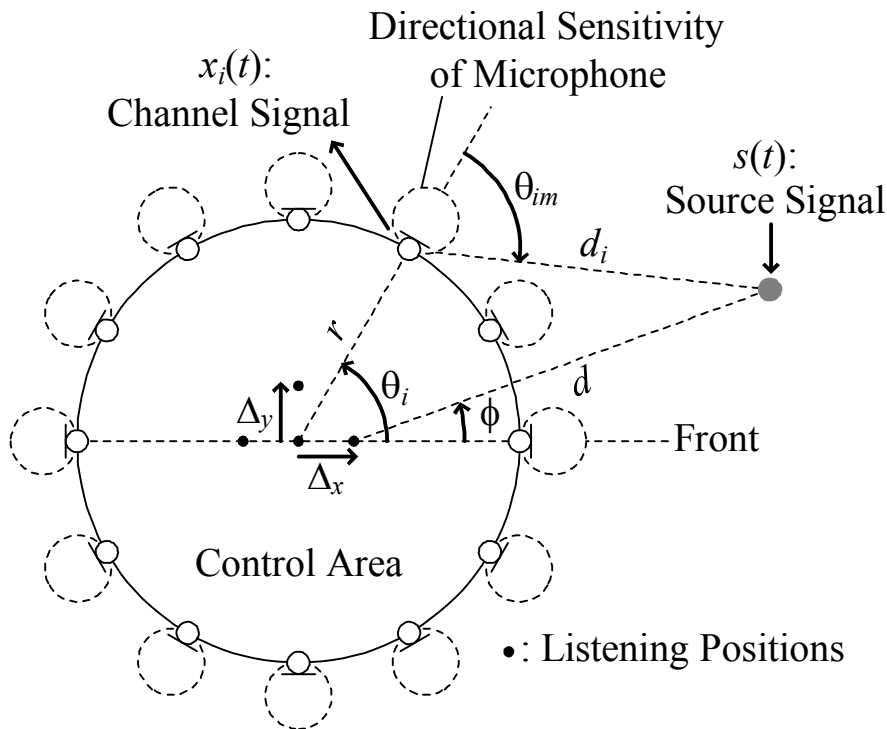
3. モデルパラメータの設定

チャンネル信号の作成

- 制御領域...半径2 mの円
- 聴取位置...4ヶ所(中心, 前方, 後方, 側方)

$$x_i(t) = D_{im} a_i s(t - t_i)$$

$$a_i = \frac{d - r}{d_i}, t_i = \frac{d_i}{c}$$

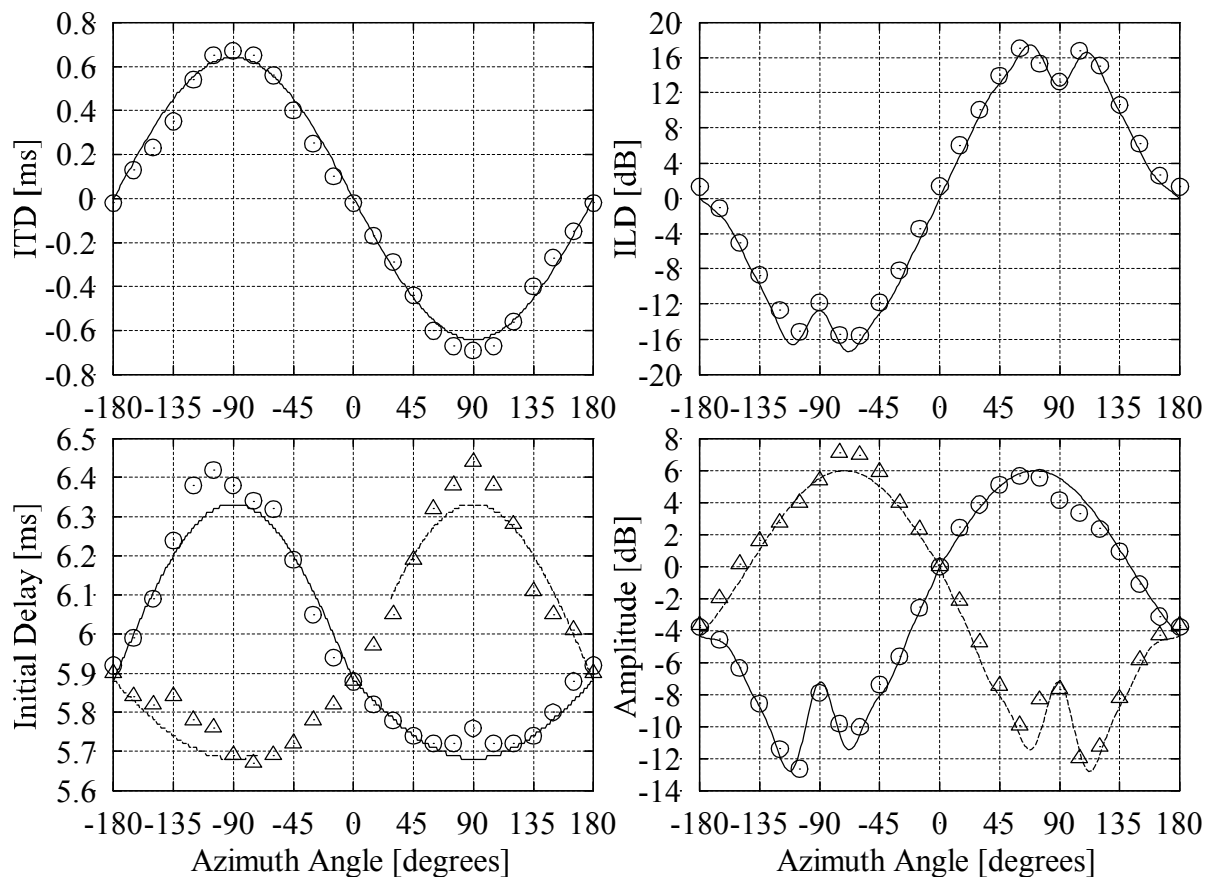


- a_i : 音源からマイクロホンまでの振幅
- t_i : 音源からマイクロホンまでの遅延時間
- $c (= 340 \text{ m/s})$: 音速
- r : 制御領域の半径
- d : 音源から聴取位置までの距離
- d_i : 音源からマイクロホンまでの距離
- D_{im} : マイクロホンの指向特性係数

$$D_{im} = \begin{cases} \cos \theta_{im} & (|\theta_{im}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{im}| > 90^\circ) \end{cases}$$

頭部伝達関数パラメータの推定

- 測定した頭部伝達関数から推定
- 頭部伝達関数パラメータ
 - ITD, 初期遅延時間, ILD, 振幅レベル



その他のパラメータ設定

- 先行音効果係数 p_i

$$p_i = \exp\{\alpha(t_{\min} - t_i - t'_i)\}$$

$$t_{\min} = \min_i(t_i + t'_i)$$

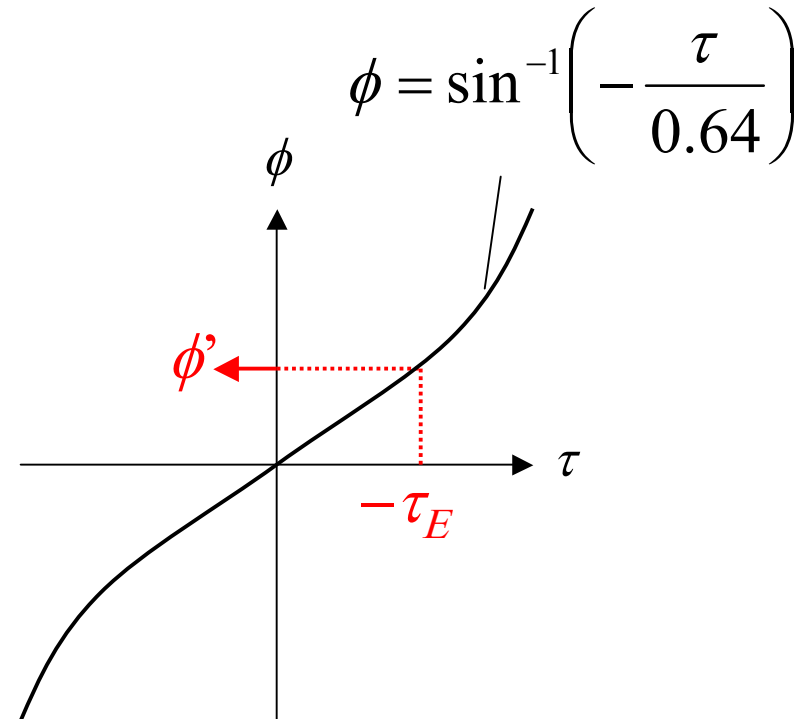
t_i : 音源からマイクロホンまでの到達時間
 t'_i : スピーカから聴取位置までの到達時間
 $\alpha(=5.25 \times 10^3)$: 重み付けの係数

- 音像予測方向 ϕ'

$$\phi' = \sin^{-1}\left(-\frac{\tau_E}{0.64}\right) \quad (-90^\circ \leq \phi' \leq 90^\circ)$$

$$\text{If } -\frac{\tau_E}{0.64} < -1, \quad \phi' = -90^\circ$$

$$\text{If } -\frac{\tau_E}{0.64} > 1, \quad \phi' = 90^\circ$$

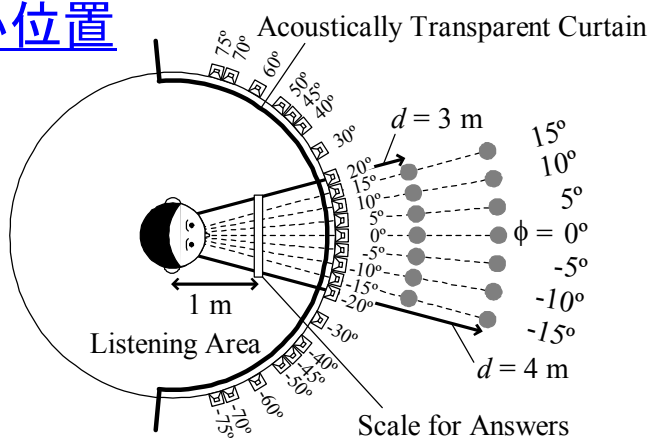


4. 定位実験結果との比較

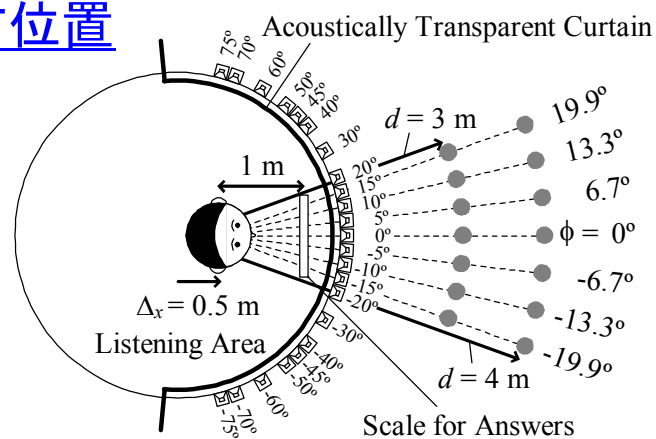
定位実験環境

- 聴取領域は半径2 mの円, 4箇所の聴取位置
 - 部屋の残響時間...約80 ms 音圧レベル...約70 dB(A)
 - 暗騒音レベル...25.0 dB(A) 音響カーテンで被覆

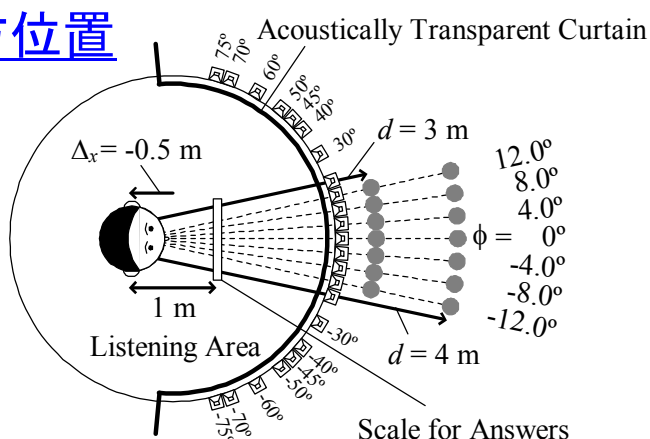
中心位置



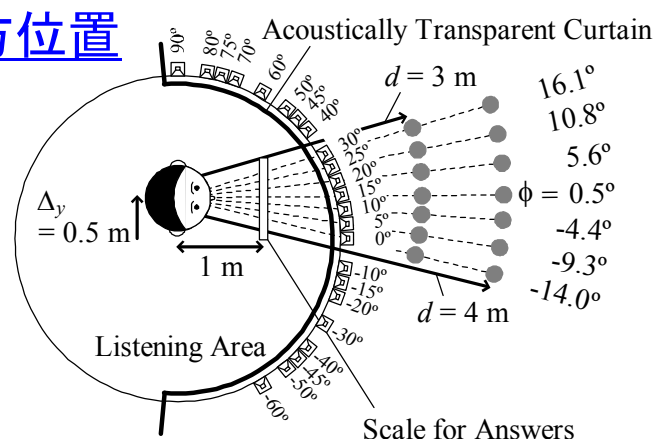
前方位置



後方位置



側方位置



定位実験条件

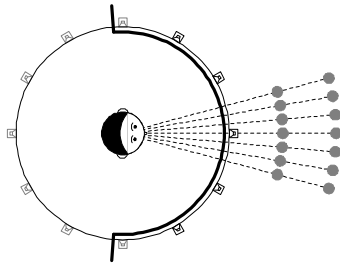
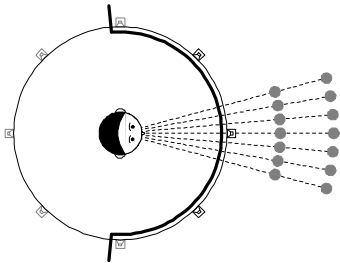
- 統制条件...従来の音源定位
- その他の条件...複数のスピーカを同時再生

中心位置

側方位置

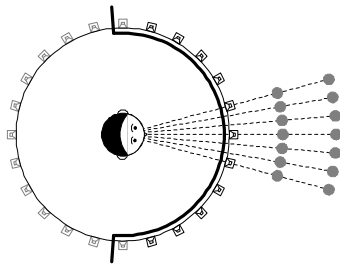
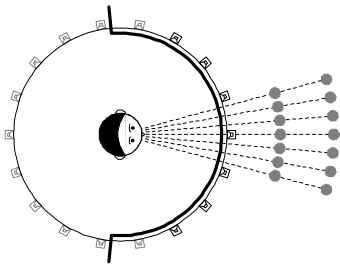
(a) 8 Channel Signals

(b) 12 Channel Signals



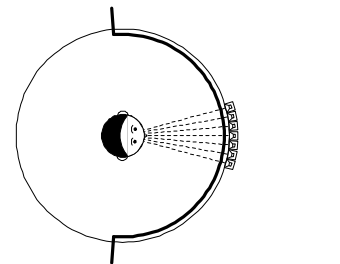
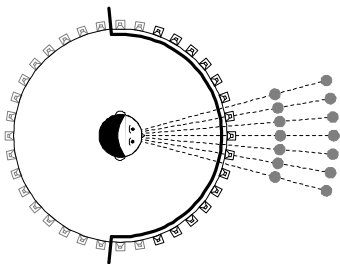
(c) 18 Channel Signals

(d) 24 Channel Signals



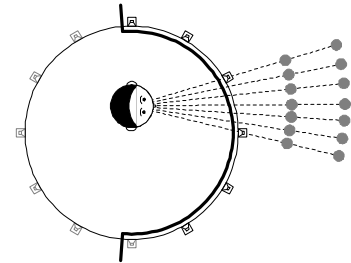
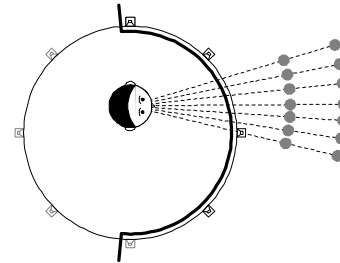
(e) 36 Channel Signals

(f) Control Condition



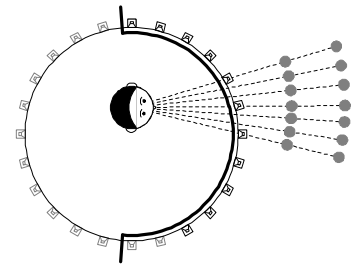
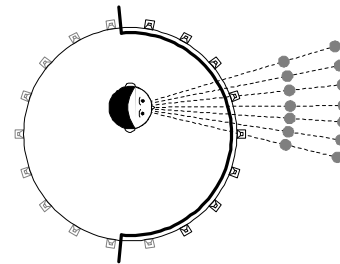
(a) 8 Channel Signals

(b) 12 Channel Signals



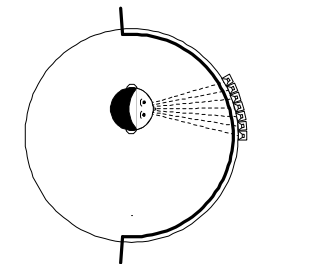
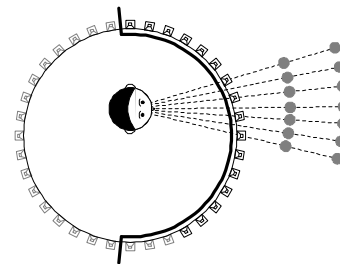
(c) 18 Channel Signals

(d) 24 Channel Signals



(e) 36 Channel Signals

(f) Control Condition



定位実験計画

- 被験者...12名の学生
 - 男性10名, 女性2名
 - 1箇所あたり3名ずつ

Subjective Assessment

Session 1	Session 2
Order...Randomized (White Noise or Speech)	

Session

Practice (21 trials)	Main (308 trials)			
	(77)	(77)	(77)	(77)

Trial (Procedure)

Stimulus (1 s)	Answer (4 s)
-------------------	--------------

定位実験手順

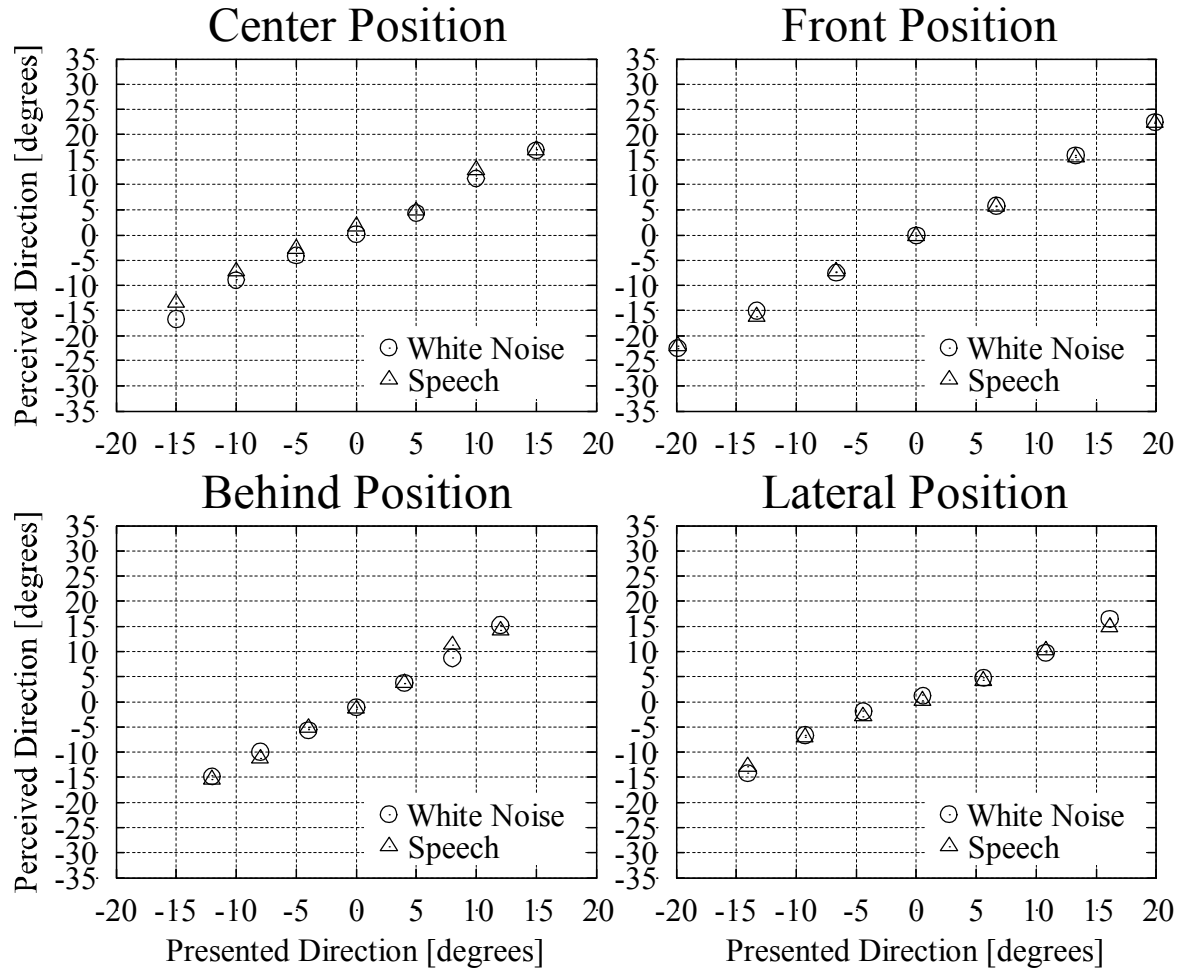
- 音の聞こえた方向を手持ちの回答用紙に記入
 - 回答方法...被験者の正面に配置した目盛りの番号で
 - 目盛り... -25° から 25° まで 2.5° 間隔でマーキング

試行条件

	要因	備考
練習試行 (21)	= 提示方向(7) × [チャンネル信号の数(1) × 距離(2) + 統制条件]	36チャンネル 3 & 4 m
本試行 (308)	= 提示方向(7) × [チャンネル信号の数(5) × 距離(2) + 統制条件] × 繰り返し(4)	8,12,18,24,36 3 & 4 m

定位実験結果

- 統制条件の結果
 - きちんと音源を定位している



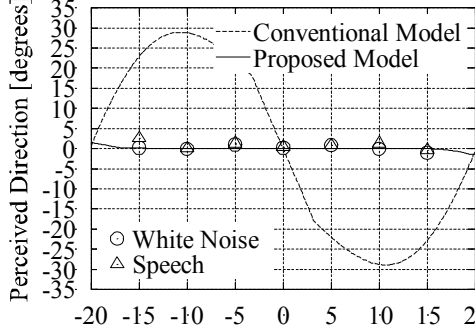
モデルと定位実験結果の比較

- 8チャンネル

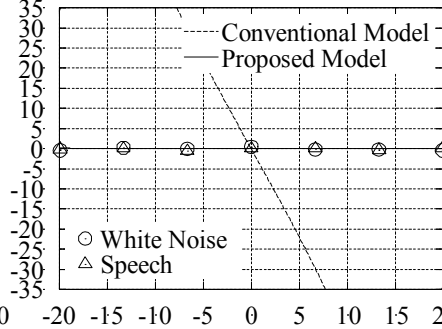
- 従来(先行音効果なし)...全ての聴取位置で予測せず
- 提案(先行音効果あり)...予測結果が改善

Distance = 3 m

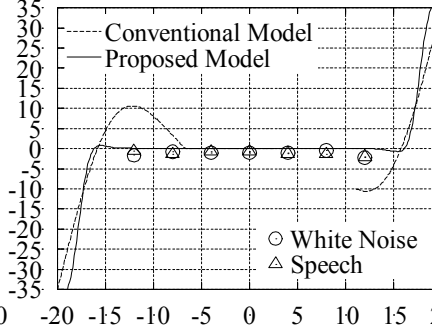
Center Position



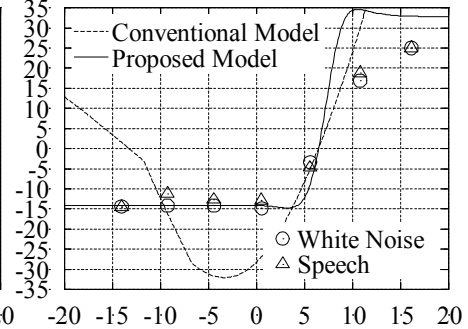
Front Position



Behind Position

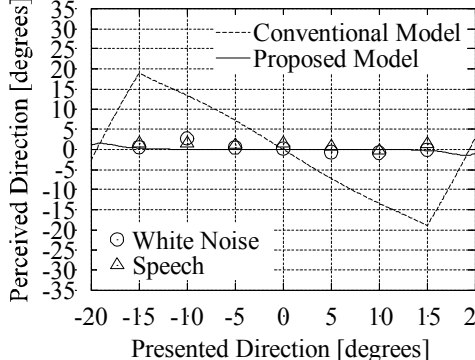


Lateral Position

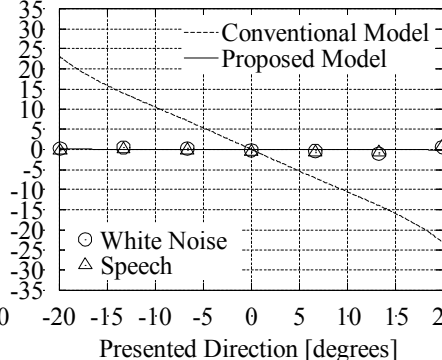


Distance = 4 m

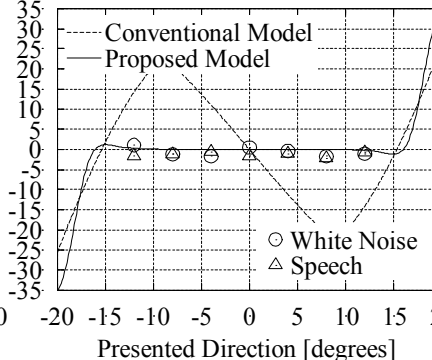
Center Position



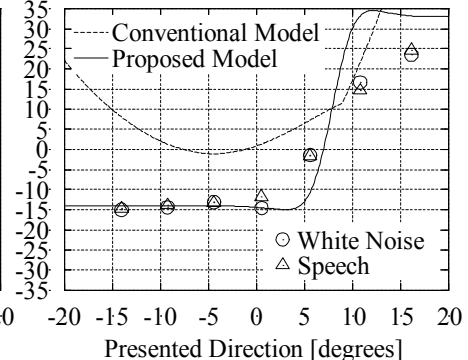
Front Position



Behind Position



Lateral Position

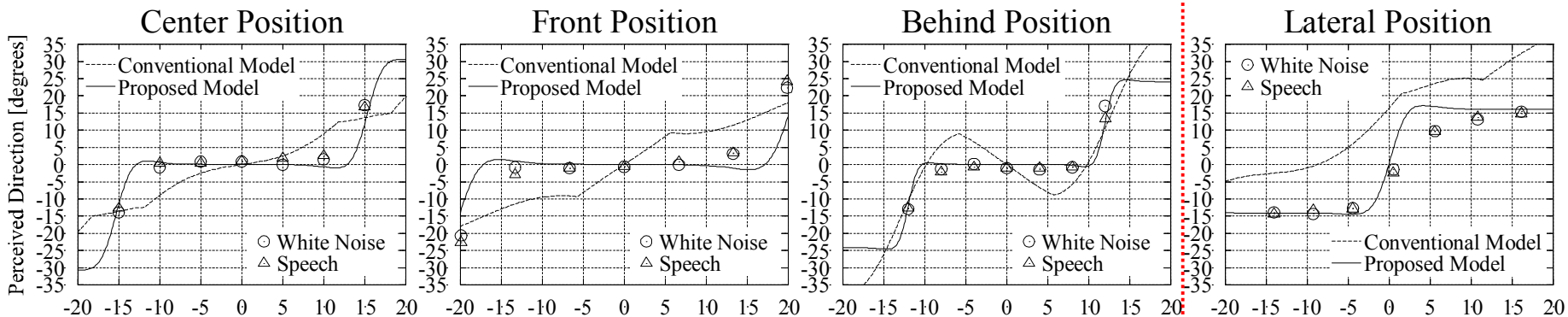


モデルと定位実験結果の比較

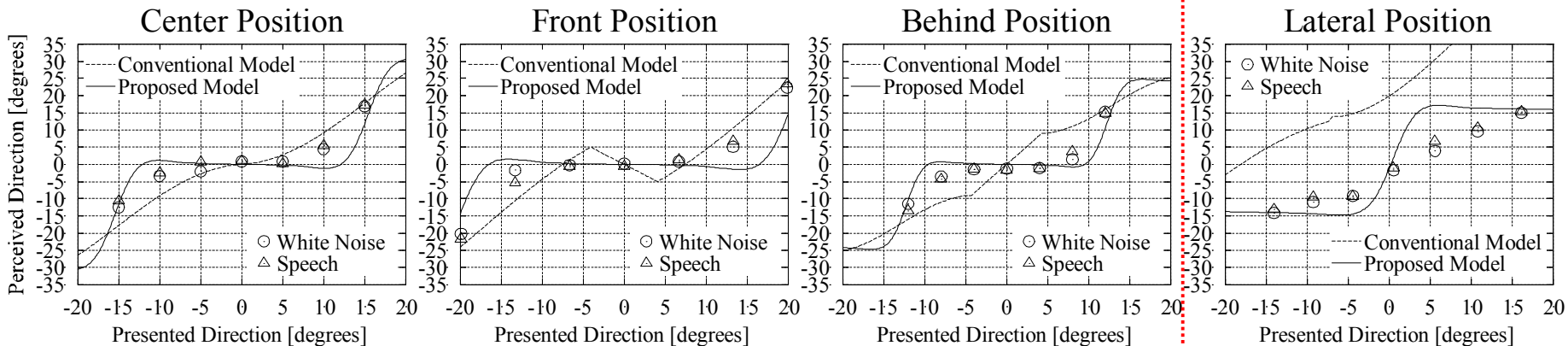
- 12チャンネル

- 従来(先行音効果なし)...特に側方位置で予測せず
- 提案(先行音効果あり)...予測結果が改善

Distance = 3 m



Distance = 4 m

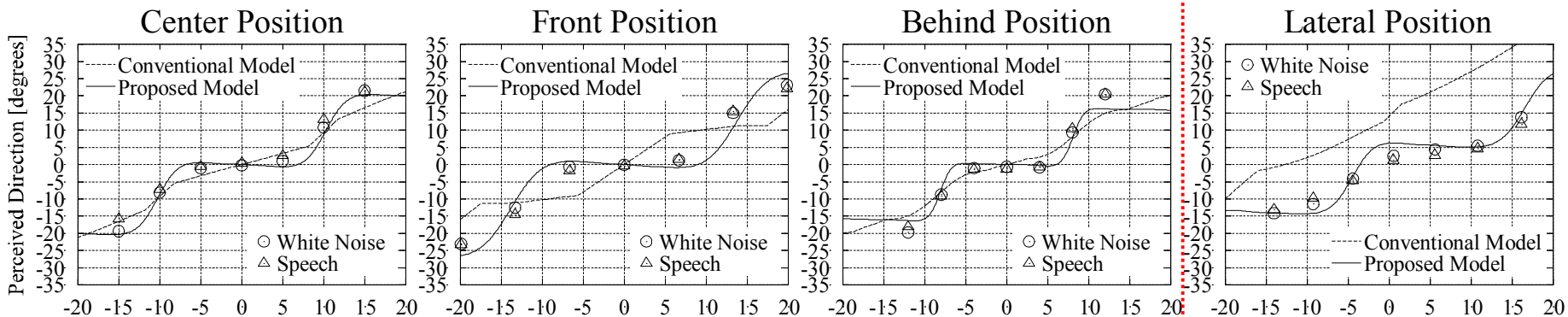


モデルと定位実験結果の比較

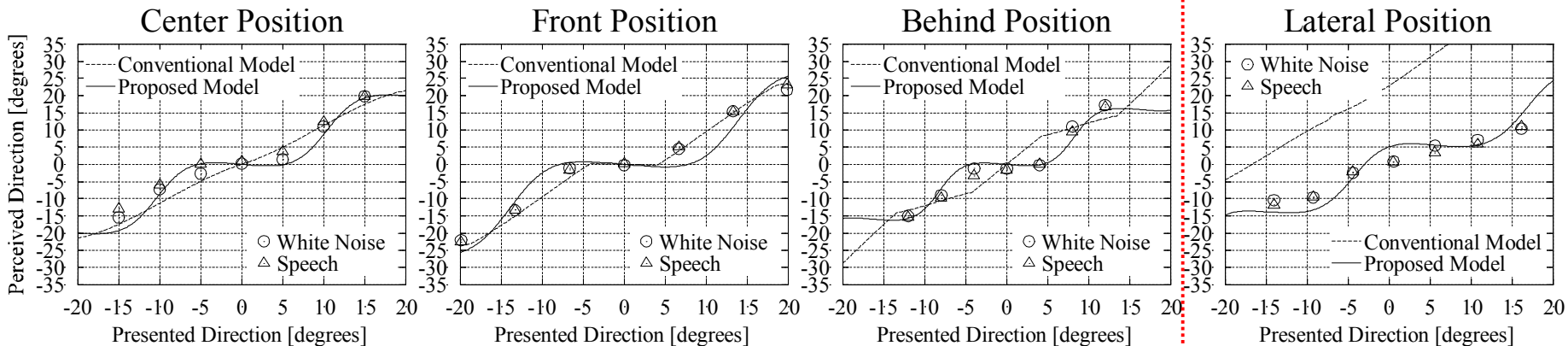
- 18チャンネル

- 従来(先行音効果なし)...特に側方位置で予測せず
- 提案(先行音効果あり)...予測結果が改善

Distance = 3 m



Distance = 4 m

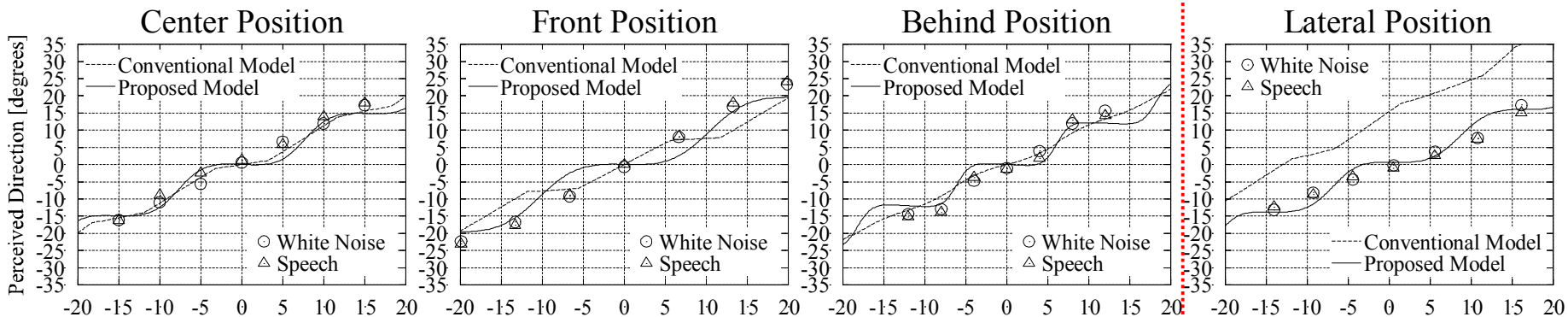


モデルと定位実験結果の比較

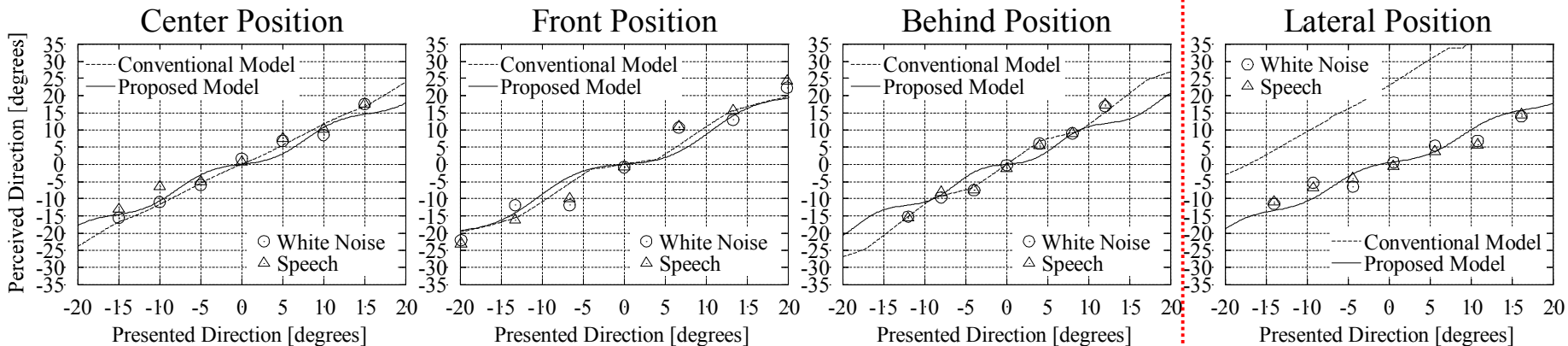
- 24チャンネル

- 従来(先行音効果なし)...特に側方位置で予測せず
- 提案(先行音効果あり)...予測結果が改善

Distance = 3 m



Distance = 4 m

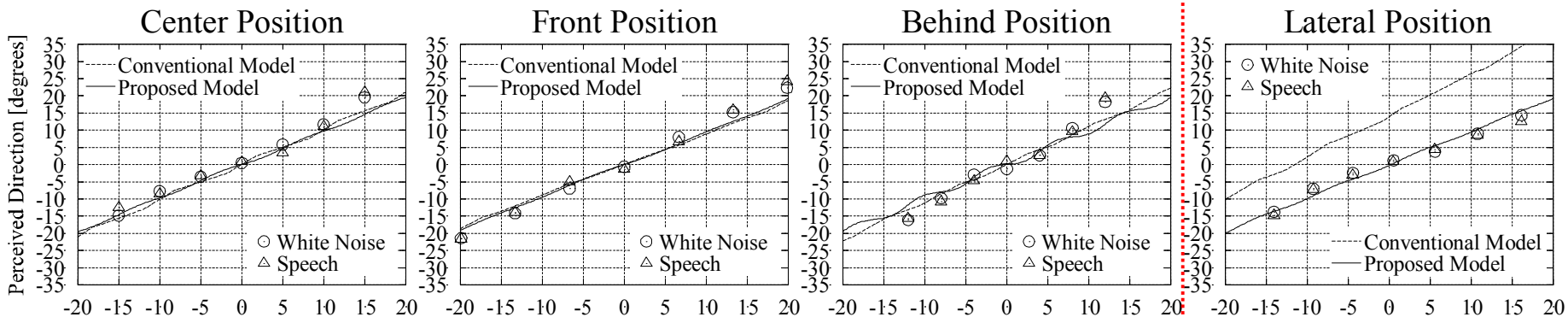


モデルと定位実験結果の比較

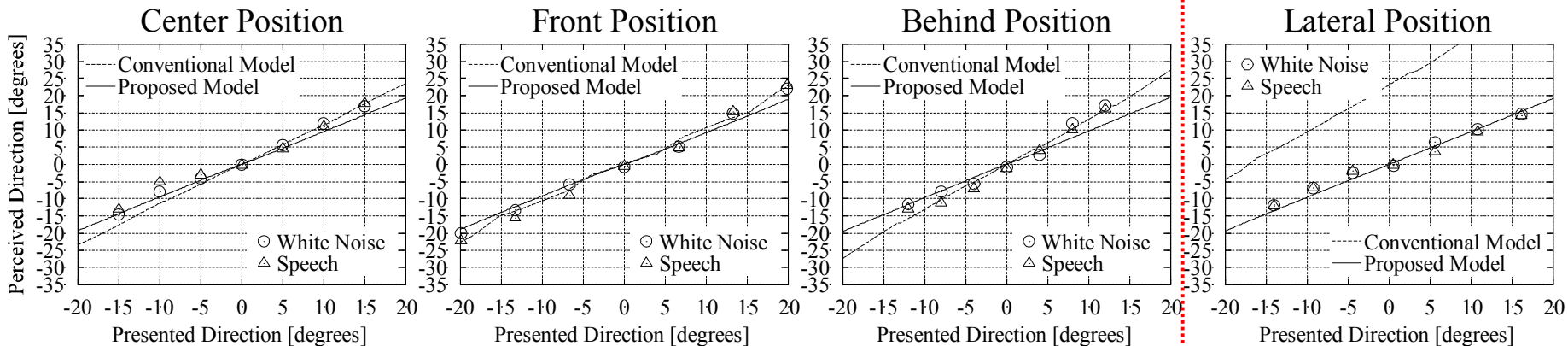
- 36チャンネル

- 従来(先行音効果なし)...特に側方位置で予測せず
- 提案(先行音効果あり)...予測結果が改善

Distance = 3 m

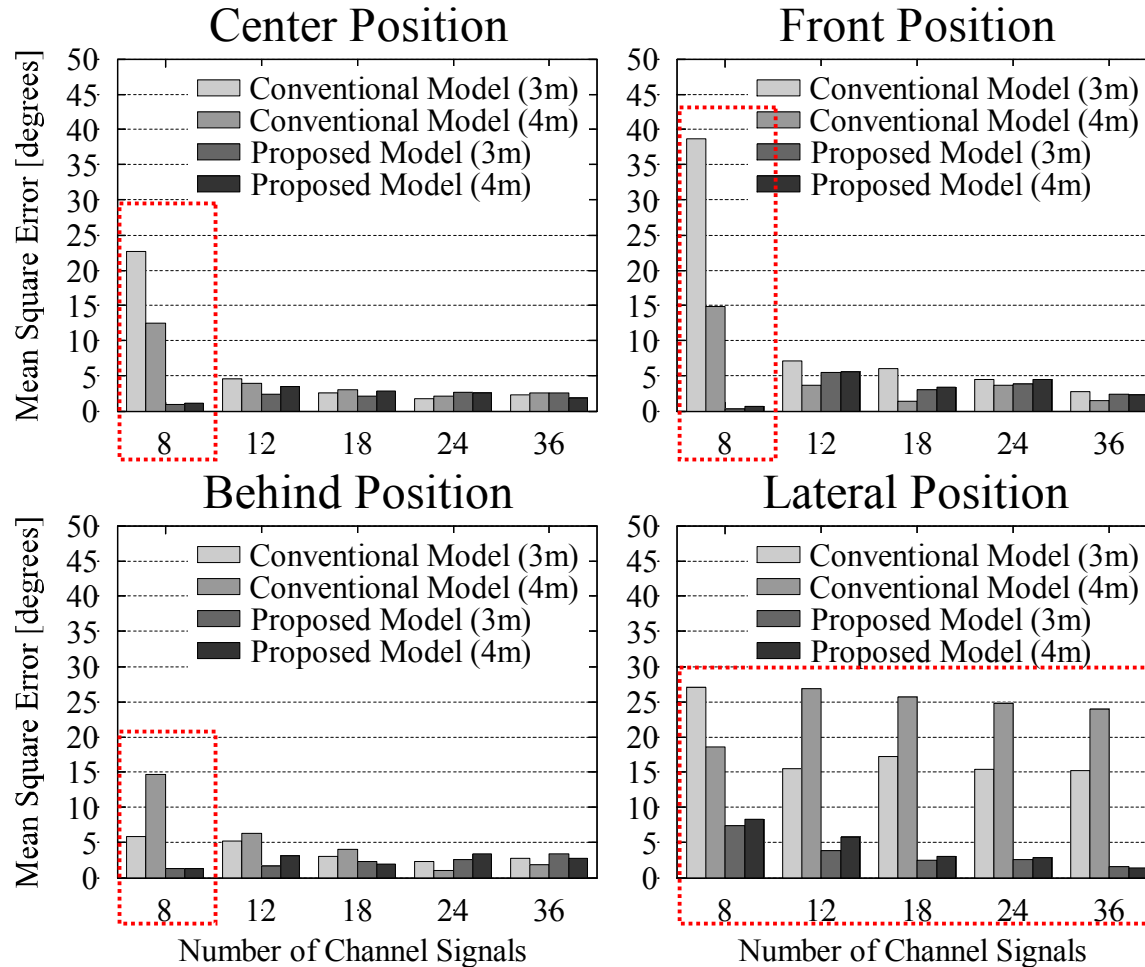


Distance = 4 m



平均二乗誤差による検討

- 提案モデルの方が誤差が小さい
 - チャンネル数が8, 側方位置の場合



5. まとめ

- 波面合成法による立体音場再生において, 定位実験の結果を予測する音像定位モデルを提案
 - 定位モデルに先行音効果を組み込む
 - 両耳間時間差を基に定位方向を予測
- 定位実験結果と比較
 - 十分な精度で実験結果を予測できる
- 今後の予定
 - 今回のモデル...水平面の前方向のみ予測
 - 後方や上方も予測できる定位モデルの検討