

危険認知に有効な音像定位を用いた 自動車車室内のパーソナル音場制御

Personal Sound Field Control in Vehicle Interior using Sound Image Localization for Effective Danger Recognition

精密工学専攻 50号 矢嶋 雅貴
Masataka Yajima

1. はじめに

近年、自動車の自動運転化が進み、国土交通省による自動運転レベル3まで、運転手による危険把握およびブレーキ操作が必要である。運転手に対する適切な危険報知は、事故を減らす上で重要な役割を担う。そのため、危険接近方向から音を放射することで危険察知時間を短縮する研究⁽¹⁾が行われてきた。また、運転手がナビゲーションを明瞭に聞き取ることや、車室内の快適性の向上を目的に各座席に異なる音響空間を提供する研究⁽²⁾が行われてきた。

そこで本研究では、運転手のみに危険方向の認知を可能とし、同時にパーソナル空間の生成を実現するシステムの構築を目指す^{(3),(4)}。このシステムの実現により、運転手は迅速な危険方向の認知、同乗者は必ずしも必要でない音情報の伝播を回避でき、安全性と快適性の両立が図れる。そのために、理論式の提案、数値解析、無響室および車室内における実験を通して目的の音響空間の生成を目指す。

なお、本研究における評価において、被験者に十分なインフォームド・コンセントを行っている。

2. 最適化理論と音圧差評価指標

本章では、最適化理論とシステムの評価を行うための二つの領域間の音圧差の評価式について解説する。

2.1 多領域音場制御の理論

2.1.1 従来手法

多入力多出力系において、音場分離を実行する手法は複数存在が、本研究では音像定位によって危険方向を認知させるため、式(1)に示す最小二乗法によって入力信号を最適化する。

$$\mathbf{q} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{P}_t \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{q} は各入力の相対的な位相差と振幅比を示す入力ベクトル、 \mathbf{G} は各入力と応答間の伝達関数で構成される伝達関数行列、 λ は正則化係数、 \mathbf{I} は単位行列、 \mathbf{P}_t は各制御点に対して任意に設定できる目標値、上付Hは共役転置を意味する。

2.1.2 提案手法

従来手法の最小二乗法による音場制御では各制御点に対する近似の計算重みは均一であった。そのため、近似が難しい点が増加すればその分音像を与える位置(Sound Image Localization Position : SILP)の再現精度は損なわれる。そこで、最小二乗法の理論式に重み関数を導入することで、SILPの再現性を向上させる手法を提案する。重み関数 \mathbf{W} を式(1)に追加したものを式(2)に示す。

$$\mathbf{q} = (\mathbf{G}^H \mathbf{W} \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{W} \mathbf{P}_t \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{W} の各対角成分は各制御点に対しての重みを意味し、マイクロホン数の対角行列で構成されている。

2.2 領域間音圧差の評価方法

音場分離の性能評価指標として、式(3)に示す加算音圧パ

ースペクトルの比である Acoustic Contrast を用いる。

$$\text{Acoustic Contrast} = \frac{L_D \mathbf{p}_s^H \mathbf{p}_s}{L_S \mathbf{p}_D^H \mathbf{p}_D} \quad (3)$$

ここで、 L は制御点数、 \mathbf{S} と \mathbf{D} はそれぞれ SILP と静寂に保つ領域(Dark Zone : DZ)を意味する。この評価指標によって、二つの領域間の相対的な音圧差を算出できる。また、この値が大きいほど領域間の音圧差が大きく、より音場を分離できていることを示す。

2.3 詳細設定

式(4)に \mathbf{G} の構成を示す。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_S \\ \mathbf{G}_D \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、式(5)に \mathbf{P}_t を示す。

$$\mathbf{P}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_S \\ \mathbf{p}_D \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_S = \begin{bmatrix} H_R \\ H_L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_D = \vec{\mathbf{0}}, \quad \vec{\mathbf{0}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで、 H は目標方向の音像を与えるための頭部伝達関数(Head-Related Transfer Function : HRTF)、 R と L はそれぞれ右耳と左耳を意味する。

3. 数値解析

本章では二次元平面上の数値解析により、SILP と DZ の両立について検証する。

3.1 システムセットアップ

3.1.1 実験条件

Fig. 1 にシステムのセットアップを示す。半径 1.0 m 上に 22.5° 刻みで 16 個の点音源、SILP は 2 点と DZ は 25 点の計 27 点の制御点でシステムを構成する。DZ の制御点は左に 0.5 m を中心とし、左右に 0.03 m 間隔で配置する。また、実車室内の座席間隔を考慮し SILP は右に 0.385 m を中心に、ダミーヘッドの左右耳位置間隔を考慮し左右に 0.075 m の間隔で設置する。

3.1.2 パラメータ設定

SILP の目標値は MIT メディア研究所がインターネット上で公開している HRTF を用いる。本研究では水平面の前方を 0° とし、時計回りに 0°, 45°, 90°, 135°, 180° ,

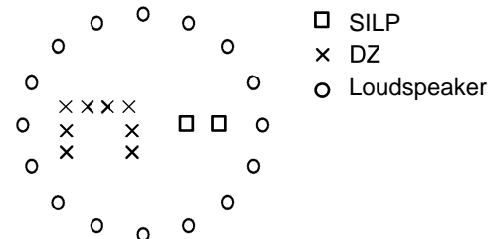


Fig. 1 Setup of experiment

225°, 270°, 315° の計 8 方向を目標値とする。

次に式(6)に示すように、重み関数のパラメータを SILP は 1, DZ は 0.1 となるよう設定する。

$$W_{0.1} = \text{diag}(1, \dots, 1, 0.1, \dots, 0.1) \quad (6)$$

3.2 重みの有無による制御結果の比較

代表として、目標値を 270° の右耳とした場合に式(1)と式(2)で最適化した結果を Fig. 2 に示す。式(1)よりも式(2)で最適化した結果が目標値に近いことがわかる。ここから、重み関数を理論式に導入することで、SILP の制御結果をより目標の周波数特性に近づけることができると言える。

3.3 頭部位置ずれによる誤差が重み関数の効果に与える影響把握

本節では頭部位置ずれが、無反射場と反射場で重み関数の効果に与える影響を検討する。

3.3.1 実験条件

システムは Fig. 1 と同様で、反射場は鏡面反射により 1 次反射のみを再現する。ここで、頭部の位置ずれは前方に 0.05 m とする。

3.3.2 解析結果

Fig. 3 に目標値を 0° とした場合、無反射場と反射場における右耳の制御結果を示す。無反射場および反射場の両条件において、耳位置がずれることで目標値との差が生じることがわかる。また、反射場は無反射場と比べて各周波数でばらつきが大きくなっている。これは、周波数特性のノッチが音像に影響を与えていると言われている音像定位にとっては望ましくない特性を表している。さらに、このばらつきによって重みの効果が薄れる原因ともなり得る。そのため、無反射場よりも反射場で頭部位置ずれが発生した場合、音像認知性は低下することが示唆される。

4. 無響室における検証実験

3 章で行った数値解析と同様のシステムを無響室で構築し、SILP と DZ の同時制御を行い、スピーカ数による性能の変化について検討する。また、被験者本人毎の HRTF を使用した場合とダミーヘッドの HRTF を用いた場合の制御性能に

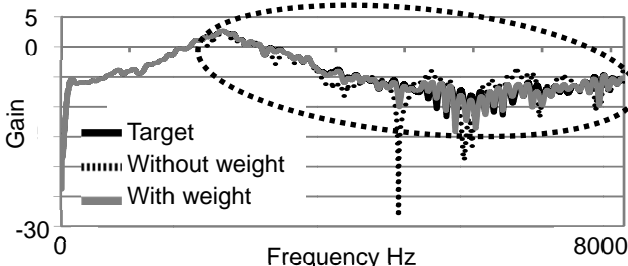


Fig. 2 Frequency characteristic of 270 degree

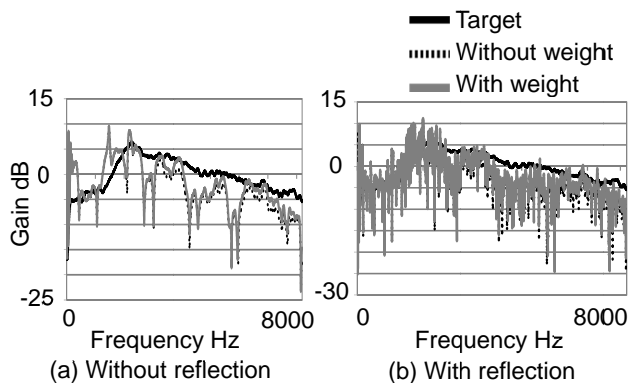


Fig. 3 Frequency characteristic of 0 degree with the position gap of 0.05 m at right ear

についても検証する。

4.1 被験者本人の HRTF を用いた実験

本人以外の HRTF による音像定位は、頭部形状や体格の違いから HRTF に誤差が生じ音像の誤認知が生じる。そこで、本節では本人の HRTF を用いて SILP と DZ の両立を検証する。

4.1.2 実験条件

実験セットアップは Fig. 1 と同様である。目標値とする HRTF は、被験者位置を中心とし 45° 刻みに最も近いスピーカから測定した HRTF とする。

次に、評価音は制御の種類だけあり、以下の通りである。

- Cond. A : スピーカ 2 個, DZ の制御なし
- Cond. B : スピーカ 2 個, DZ の制御あり, 重みなし
- Cond. C : スピーカ 2 個, DZ の制御あり, 重みあり
- Cond. D : スピーカ 4 個, DZ の制御あり, 重みなし
- Cond. E : スピーカ 4 個, DZ の制御あり, 重みあり

評価時に 8 方向の音源をランダムに呈示する。音像 0.5 秒と無音 0.5 秒をセットとし、3 回連続で呈示する。その後、10 秒間の無音時間を設け、感じた音像の方向を 45° 刻みに回答するよう指示した。被験者は本人の HRTF を測定するため、正常な聴力を有する男性 3 名である。

4.1.3 実験結果

Fig. 4 に実験結果を示す。右上に伸びる直線は目標方向、点線は前後誤り、円の大きさは回答数を意味する。Cond. A は DZ を制御していないため、他の条件に比べて正答数が多い。Cond. B では 45° と 90° に回答が集中している。これは SILP と DZ の制御が難しいためであると考えられる。次に、Cond. C では Cond. B に比べて明らかに左側の正答数が上昇している。最後に、Cond. E においても Cond. D に比べ正答数が改善されている。これは、DZ の制御よりも SILP の制御の重みを大きくしたため、音像の認知性が向上したと考えられる。

続いて、Fig. 5 に 70~7000 Hz を対象とした Acoustic Contrast の平均値を示す。目標値を 90° の HRTF とした場合では、Cond. A の値を示す点線よりも高い。これは、スピーカ位置が耳位置に近いことから、耳位置で高い音圧を生成したためであると考えられる。

その他の条件では DZ を制御しなかった条件よりも制御した条件の方が同等か高い値を取っている。これは DZ を考慮することで運転席と助手席間で音圧差が生じる事を意味しており、SILP と DZ の両立が無響室で実現できたことになる。

4.2 ダミーヘッドの HRTF を用いた一般化実験

被験者毎の HRTF は音像を正確に認知するには適しているが、一般的にスピーカから耳位置までの HRTF を個人に合わせて設定することは現実的ではない。そこで、本節ではダミーヘッドの HRTF を用いて最適化した入力信号で制御し、その性能を確認する。なお、HRTF 以外の実験条件は 4 章 1 節と同様である。

4.2.1 実験結果

Fig. 6 に実験結果を示す。Cond. A では DZ を制御していないため、他の条件に比べて正答数が高い。次に、4.1 節と同様に Cond. B は回答が 90° に集中しており目標の方向に音像を与えられていない。Cond. C も 4.1 節と同様に Cond. B よりも正答数が増加し、目標の方向に音像を与えられている。最後に、Cond. D と E においても、重みなしよりも重みありの条件の方が正答数が増加している。

続いて、Fig. 7 に 70~7000 Hz を対象とした Acoustic Contrast の平均値を示す。Cond. C 以外では 90° 以外の音像を提示した際にはいずれの角度を提示しても Cond. A の値を示す点線よりも高い値を保っており、4.1 節と類似した傾向となった。また、最低でも 5 dB 以上の Acoustic Contrast

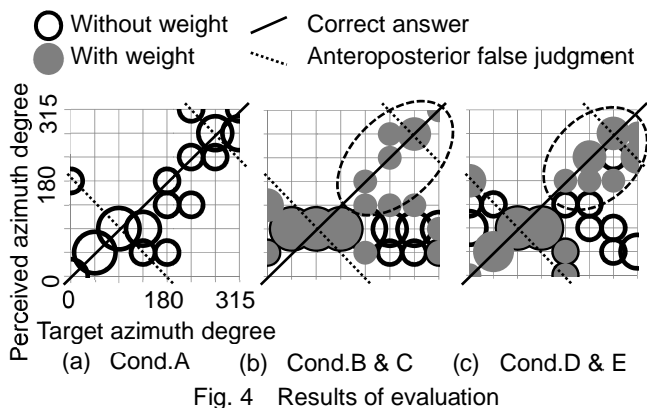


Fig. 4 Results of evaluation

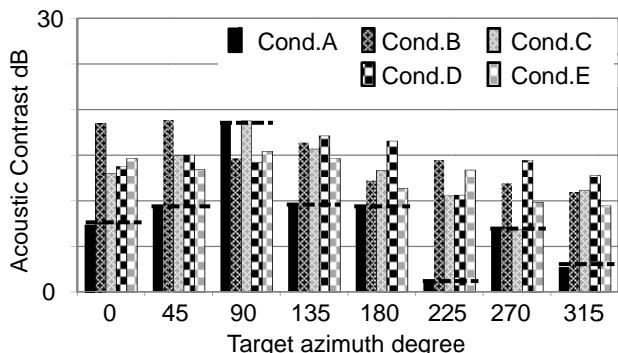


Fig. 5 Acoustic Contrast in 70~7000 Hz using HRTF of the each subjects

を保つことが可能であった。さらに、Cond. D と E においては、いずれの方向を提示したとしても、10 dB 以上の値を保つことが可能であった。

以上より、無響室内で SILP と DZ の両立が可能であることがわかった。また、本人とダミーヘッドの HRTF を用いた評価結果に大きな差がないため、今後はダミーヘッドで測定した HRTF を用いて実験を行う。

5. 車室内における検証実験

本章では車室内で SILP と DZ の両立の実現に向けて検証する。さらに、本章で挙げられる課題の解決にも取り組む。

5.1 ダミーヘッドの HRTF を用いた実験

車室内においてもダミーヘッドの HRTF を用いた評価実験を行い、音像の認知精度と音場分離性能を検証する。

5.1.1 実験条件

Fig. 8(a)に実験車両、Fig. 8(b)にDZ、Fig. 9に車室内セットアップを示す。DZはマイクロホン25本を0.03 m間隔で、両耳をマイクロホン2本、水平面にスピーカ24個を横0.17 m、縦0.22 m間隔で配置し、システムを構築する。車室内は反射環境であり、無響室よりも制御が難しいと考えられたため、以下の制御条件をCond. A~Eに追加する。

- Cond. F : スピーカ 16 個, DZ の制御あり, 重みなし
- Cond. G : スピーカ 16 個, DZ の制御あり, 重みあり
- Cond. H : スピーカ 24 個, DZ の制御なし, 重みなし
- Cond. I : スピーカ 24 個, DZ の制御あり, 重みあり

5.1.2 実験結果

Fig. 10 に評価結果を示す。Cond. A は無響室の実験に比べ、正答数が減少し後方の音像を認知しにくくなっている。Cond. B と C は、これまでと同様ほとんど音像を認知できていない。Cond. D は Cond. B と C に類似した回答になったが、重みがある Cond. E では前方の正答数が上昇している。しかし、後方の音像が認知できていない。Cond. F では 135°, 180° は認知できたが、225° が認知できなかった。Cond. G

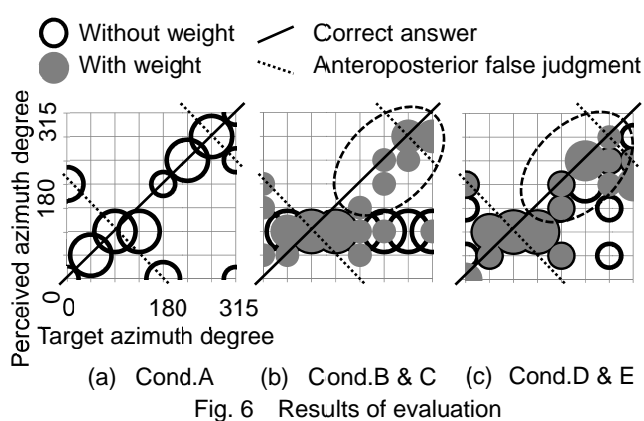


Fig. 6 Results of evaluation

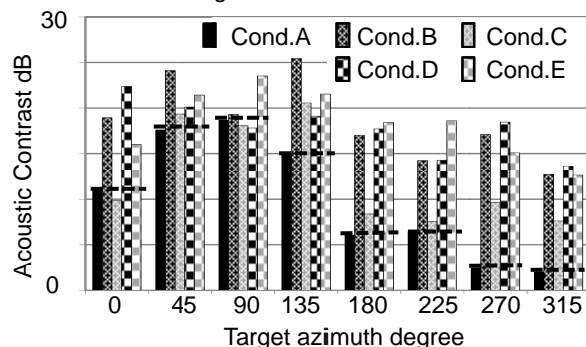


Fig. 7 Acoustic Contrast in 70~7000 Hz using HRTF of the dummy head

では、右側の前方以外は正しく認知できなかった。Cond. H と I は類似した結果となり、前方はよく認知できたが、135° 以外の後方は正しく認知できなかった。

全ての条件を通して、DZ が存在する側の後方の音像は共通して認知しにくいことが確認できた。

続いて、Fig. 11 に 70~7000 Hz を対象とした Acoustic Contrast の平均値を示す。車室内ではスピーカ 4 個以上を用いることで、Cond. A よりも高い値を保つことができていた。以上より、約 10 dB~15 dB の Acoustic Contrast を保つことができるとわかった。

5.2 移動音による後方認知精度の向上

これまでの車室内実験において、後方の認知精度の不足が問題として挙げられた。そこで、移動音を使用することで方向を認知する手がかりが多くなり、音像を正しく認知

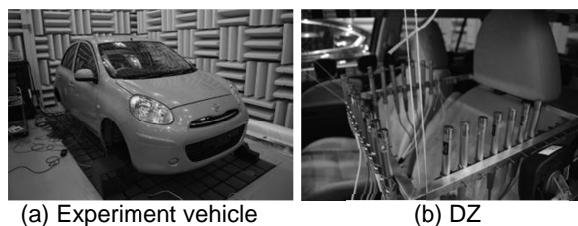


Fig. 8 Experiment vehicle and DZ

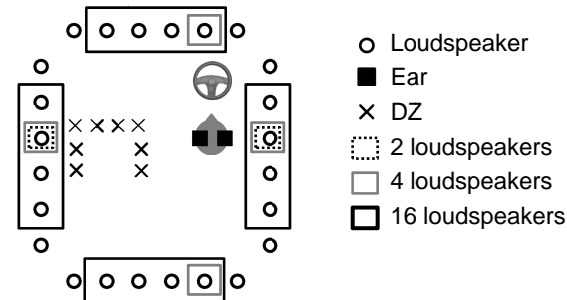


Fig. 9 Experiment setup

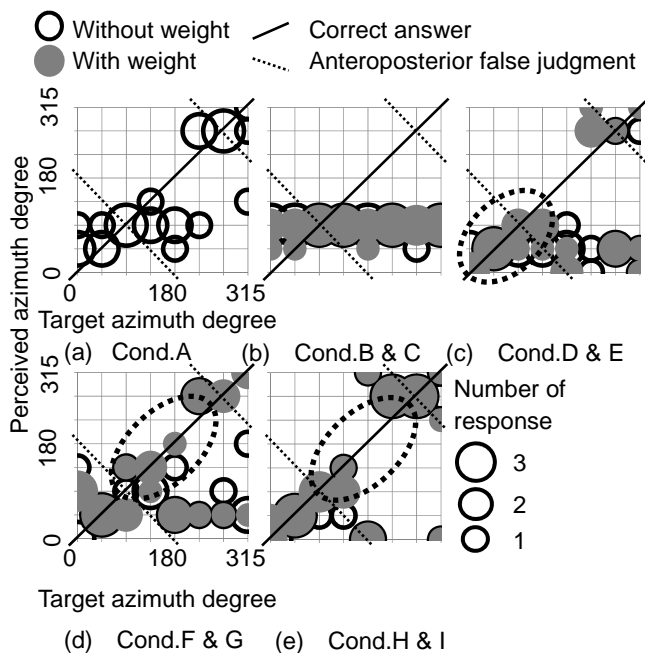


Fig. 10 Results of evaluation

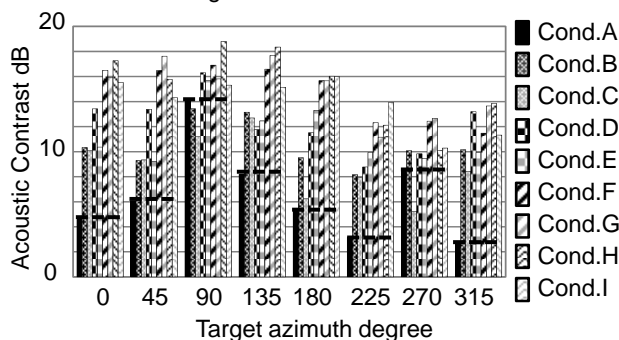


Fig. 11 Acoustic Contrast

すること⁽⁵⁾が車室内においても可能であると考えられるため、本節では移動音を用いて後方の認知精度の向上を図る。

5.2.1 実験条件

本実験では目標方向の音像を中心に時計回り 3 点間の移動音像とする。評価時には移動音を聴取後に移動音の中心方向を回答するよう指示した。

5.2.2 実験結果

Fig. 12 に評価結果を示す。Cond. A では 5.1 節に比べ、 0° の正答数が増加し 45° の正答数が低下した。これは 45° を提示する際に移動音に 90° の音像が含まれることが原因だと考えられる。Cond. B と C はほとんどの方向で正しく音像を認知できていない。Cond. D では 270° の正答数は減少したが、 0° 、 90° 、 180° の正答数は増加した。Cond. E では 0° 、 270° 、 315° の正答数が減少した。Cond. F では 0° 、 45° の正答数が減少し、 $180^\circ \sim 315^\circ$ の正答数が上昇した。Cond. G では 45° の正答数が減少し、 180° 、 225° 、 315° の正答数が増加した。Cond. H では 0° 、 45° 、 270° の正答数が減少し、 $135^\circ \sim 225^\circ$ の正答数が増加した。Cond. I では、 0° の正答数が低下し、 180° 、 225° の正答数が増加した。これらの前方の音像の認知精度が低下した原因として、音像を移動する幅が大きいため、提示した隣の角度と間違えたためだと考えられる。

以上より、移動音を使用することで $0^\circ \sim 90^\circ$ の正答数の減少が多くみられた。しかし、後方と左方向の正答数の増加も確認できた。ここから、移動角度を小さく調節する

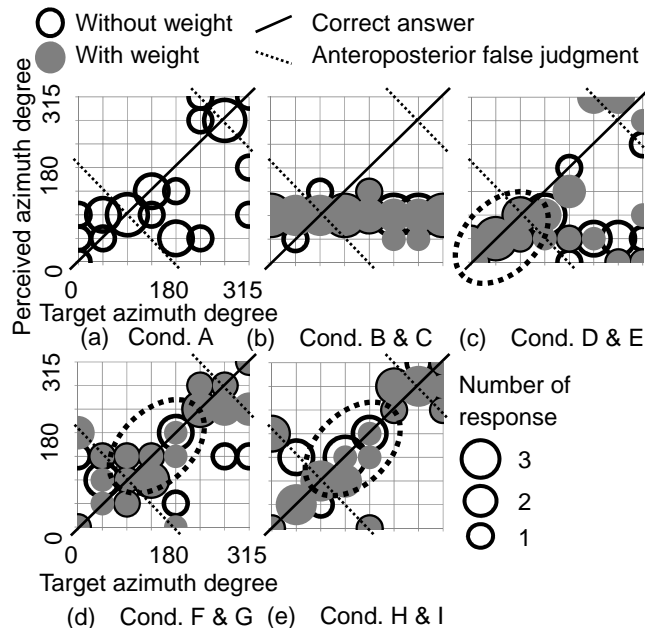


Fig. 12 Results of evaluation

か、前方の音像は単一方向の音像のみを提示し、後方は移動音を用いるなどの工夫が必要であることが示唆される。また、SILP と DZ の同時制御時も、移動音を用いることでより正しい方向の音像の認知が可能であることがわかった。さらに、Acoustic Contrast においても制御方法が同一のため、Fig. 11 と同様の傾向を示すものと考えられ、音場分離も同時に達成できる。この際に、スピーカを 16 個以上用いることで、音像を正しく認知しやすいこともわかった。

6. 研究成果

- (1) 数値解析および無響室の評価実験において、重みによる正答数の上昇を確認した。
- (2) 後方の音像を認知しにくい問題に対し、車室内で移動音を用いて認知性の向上を図り、正答数の上昇に繋がることを確認した。移動音を用いる場合に、正しく音像を認知するためにはスピーカを 16 個以上用いることが望ましいと示唆された。
- (3) 車室内における SILP と DZ の同時制御が可能である事を示した。

参考文献

- (1) 茂木勇祐, 佐藤歩, 有光哲彦, 戸井武司, “脳活動計測に基づく車室内警報音の音像定位による危険認知支援”, 自動車技術会論文集, **46-6** (2015) pp. 1093-1098.
- (2) 有光哲彦, 曹浣豪, 戸井武司, “自動車車室内における逆問題的接近法に基づく多領域音場制御”, 自動車技術会論文集, **45-5** (2014) pp. 909-915.
- (3) 矢嶋雅貴, 有光哲彦, 戸井武司, “音像定位を有する多領域音場制御”, 日本音響学会講演論文集(春), (2016) pp. 1409-1410
- (4) 矢嶋雅貴, 有光哲彦, 戸井武司, “自動車車室内の多領域音場制御による音情報の音像定位”, 日本音響学会講演論文集(春), (2017) 2-4-4
- (5) 樋口寛, 工藤彰洋, 穂刈治英, 島田正治, “音像スウィング法を用いた定位制度改善の検討”, 信学技報, **104-497** (2004) pp. 31-36.