

制御領域内の音圧ばらつきを考慮した 自動車車室内のパーソナル音場制御 Personal Sound Control Systems in Vehicle Interior in Consideration of Robustness of Sound Pressures in Controlled Zone

精密工学専攻 59 号 柳 館 直成
Naomichi Yanagidate

1. はじめに

近年、高級車の自動車車室内では 16 個のスピーカを用いるなどサウンドシステムが搭載されることもあり、車室内の音環境が重要視されている。しかし、従来のシステムは全搭乗者が同一の音を聞くことを前提とし、各搭乗者のニーズに応えることができていない。例えば、運転者は運転に関する情報を得るためにナビゲーションやラジオからの交通情報、または運転に集中するために静粛な音環境を必要とする。一方、同乗者は音楽など別の音情報を好む。この問題を解決する方法として個々の領域に音情報を伝搬する音場制御(以後、パーソナル音場制御と記す)が提案されている^(1,2)。

これまでのパーソナル音場制御における評価指標として重要視されてきたのは、Acoustic Contrast(制御領域間加算音圧パワースペクトルの比)と Array Effort(入力パワー加算値)である。しかし、これらの指標だけでは空間を制御しているにも関わらず、空間の音圧分布を定量的に評価していない。そこで、制御領域の音圧ばらつきに着目する必要がある。以下 2 点の理由で低減することが望ましい。

1. 人の聴覚はバイナリティであり、2 つ耳の入力に差が少ない。

2. 制御領域内で耳位置が動いても音圧が一定である。

多くの従来法がパラメータ設定を必要とし、パラメータと構成される音場関係が不明確なため、設定に多大な時間を必要とする。

このような背景に基づき、本研究ではパラメータ設定が容易で、かつ音圧ばらつきの少ない個別の音環境を各搭乗者に提供する音場最適化法について述べる。まず、2 章でパーソナル音場制御の評価指標、従来法と提案手法について説明する。次に、3 章で実車実験にて各音場最適化法を検証する。最後に、結論を述べる。

2. 音場制御理論と最適化方法

2.1 音場制御理論

別々の音情報を各制御領域に提供するためには空間内に複数のスピーカを配置し、これらから再生する音をそれぞれ信号処理する必要がある。例えば、Fig. 1 の空間で領域 A のみ音が聞こえるという信号と、領域 B のみ音が聞こえるという信号を生成し、これらを加算しスピーカから再生することで別々の音を伝搬することが可能となる。

音を伝搬する領域をブライトゾーン(BZ)、音を伝搬せずに静粛に保つ領域をダークゾーン(DZ)とすると、システムの性能は式(1)に示す BZ と DZ の加算音圧パワースペクトルの比である Acoustic Contrast で表せる。ここで、下付きの B と D は BZ と DZ を意味し、 p は音圧ベクトル、 Z は各入力-応答で構成される伝達関数行列である。 q は各入力の相対的な位相差と振幅比を表す入力ベクトルである。

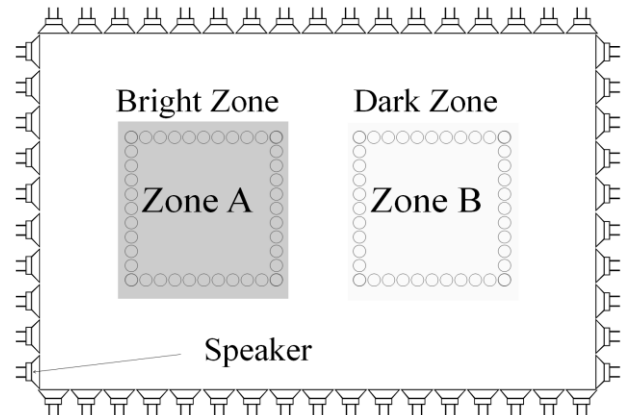


Fig. 1 Theory of personal acoustics

$$\text{Acoustic Contrast} = \frac{L_D p_B^H p_B}{L_B p_D^H p_D} = \frac{L_D q^H Z_B^H Z_B q}{L_B q^H Z_D^H Z_D q} \quad (1)$$

L_B と L_D は各ゾーンの応答点の数、 H は共役転置を意味する。

システムを構成する場合に、効率的な制御が必要であり、その指標はシステムが必要とする入力パワーである Array Effort 表される。

$$\text{Array Effort} = \frac{q^H q}{q_r^H q_r} \quad (2)$$

ここで、 q_r は全ての入力点から同位相の入力をした場合に、次節で説明する各最適化法で得られる BZ の平均音圧と同じ値を得られる入力を意味する。

BZ 内の音圧ばらつき σ を評価するために式(3)で定義し、 p_{ave} は BZ の平均音圧、 $\{p\}_n$ は p の n 番目の要素を意味する。また、 $*$ は共役を意味する。

$$\sigma = \left(\frac{1}{L_B - 1} \sum_{n=1}^{L_B} \left(10 \log_{10} \frac{\{p\}_n^* \{p\}_n}{p_{ave}^* p_{ave}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

2.2 音場最適化方法

2.2.1 Acoustic Contrast Optimization (AC)

Acoustic Contrast Optimization (AC) は Acoustic Contrast を最大にする最適化法である⁽¹⁾。この最適化法の評価関数は以下で与えられる。

$$J_{AC} = q^H Z_D^H Z_D q + \lambda_c (q^H Z_B^H Z_B q - B) + \lambda_M (q^H q - E_m) \quad (4)$$

ここで、 B は BZ の加算音圧パワースペクトルに対する制約条件であり、 E_m はシステムが必要とする入力パワーに対する制約条件である。 λ_c と λ_M はラグランジュの未定乗数である。式(4)の評価関数に従って最適化を行うと、最適な入力条件は固有値問題から式(5)で与えられる。

$$\lambda_C \mathbf{q} = (\mathbf{Z}_B^H \mathbf{Z}_B)^{-1} (\mathbf{Z}_D^H \mathbf{Z}_D + \lambda_M \mathbf{I}) \mathbf{q} \quad (5)$$

従って、最適入力とは式(6)の最小固有値の固有値ベクトルに比例する。

$$(\mathbf{Z}_B^H \mathbf{Z}_B)^{-1} (\mathbf{Z}_D^H \mathbf{Z}_D + \lambda_M \mathbf{I}) \quad (6)$$

2.2.2 Least Squares Optimization (LS)

Least Squares Optimization (LS) は入力により構成される音場と目標音場との誤差を最小にする最適化法である⁽²⁻⁴⁾。誤差ベクトルは式(7)で定義する。

$$\mathbf{e} = \mathbf{p}_T - \mathbf{p} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{p}_T$ は任意に設定できる目標音場である。式(7)を用いて評価関数は式(8)で表される。

$$J_{LS} = \mathbf{e}^H \mathbf{e} + \lambda_M (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E_m) \quad (8)$$

式(8)の評価関数に従って入力ベクトルの最適化を行うと式(9)が与えられる。

$$\mathbf{q} = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z} + \lambda_M \mathbf{I})^{-1} \mathbf{Z}^H \mathbf{p}_T \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{Z}$ は BZ と DZ の伝達関数行列で構成され以下で定義する。

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_B \\ \mathbf{Z}_D \end{bmatrix} \quad (10)$$

LS では $\mathbf{p}_T$ の設定が構成される音場が決定するが、 $\mathbf{p}_T$ の設定と Acoustic Contrast に直接的な関係がないことが問題となる。

2.2.3 Acoustic Contrast with Limited Sound Differences (ACLD)

前項までの最適化法は Acoustic Contrast を最大にすることや、目標音場との誤差を最小化することに重点を置いていた。しかし、AC では Acoustic Contrast のみ最大化するので、空間を制御しているのに関わらず BZ 内の音圧ばらつきが大きいことが知られている。また LS は目標音場の設定により、BZ 内の音圧ばらつきを抑えることができるが、十分な Acoustic Contrast が得られない。この問題の解決方法として AC と LS を合わせたハイブリット最適化法や Planarity Control^(5,6)などが提案されているが、BZ 内の音圧ばらつきを直接的に低減できる方法ではない。またどちらの最適化法もパラメータの設定が多く、パラメータスタディに多大な時間が必要となる。

そこで本研究では、BZ 内の音圧ばらつきを低減し、高い Acoustic Contrast が得られ、かつパラメータ設定が容易な Acoustic Contrast with Limited Sound Differences (ACLD) を提案する^(7,8)。BZ 内の音圧ばらつきの低減方法は式(11)で示すように BZ 内の各応答点の音圧差を制限することで可能となる。

$$\sum_{n=1}^{L_B-1} (\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_{B-n})^H (\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_{B-n}) \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{B-n}$ は BZ の音圧シフティングベクトルであり、式(11)は各応答音圧と他の応答点の加算値となる。したがって ACLD の評価関数は以下で定義される。

$$\begin{aligned} J_{ACLD} = & \mathbf{q}^H \mathbf{Z}_D^H \mathbf{Z}_D \mathbf{q} + \lambda_C (\mathbf{q}^H \mathbf{Z}_B^H \mathbf{Z}_B \mathbf{q} - B) \\ & + \lambda_M (\mathbf{q}^H \mathbf{q} - E_m) \\ & + \lambda_{LD} \sum_{n=1}^{L_B-1} \mathbf{q}^H (\mathbf{Z}_B^H - \mathbf{Z}_{B-n}^H) (\mathbf{Z}_B - \mathbf{Z}_{B-n}) \mathbf{q} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{if } i \geq n+1 \quad \{\mathbf{Z}_{B-n}\}_{i,j} &= \{\mathbf{Z}_B\}_{i+n-1,j} \\ \text{if } i \leq n \quad \{\mathbf{Z}_{B-n}\}_{i,j} &= \{\mathbf{Z}_B\}_{i+L_B-n,j} \end{aligned}$$

ここで、 λ_{LD} はラグランジュの未定乗数で i と j は伝達関数行列の i 番目の行と j 番目の列を表す。式(12)の最終項および式(11)の任意の加算値は式(13)を意味する。

$$\mathbf{q}^H (\mathbf{Z}_B^H - \mathbf{Z}_{B-n}^H) (\mathbf{Z}_B - \mathbf{Z}_{B-n}) \mathbf{q} = \begin{pmatrix} p_{B_1} - p_{B_{L_B-n+1}} \\ \vdots \\ p_{B_{n-1}} - p_{B_{L_B-1}} \\ p_{B_n} - p_{B_{L_B}} \\ p_{B_{n+1}} - p_{B_1} \\ \vdots \\ p_{B_{L_B}} - p_{B_{L_B-n}} \end{pmatrix}^H \begin{pmatrix} p_{B_1} - p_{B_{L_B-n+1}} \\ \vdots \\ p_{B_{n-1}} - p_{B_{L_B-1}} \\ p_{B_n} - p_{B_{L_B}} \\ p_{B_{n+1}} - p_{B_1} \\ \vdots \\ p_{B_{L_B}} - p_{B_{L_B-n}} \end{pmatrix} \quad (13)$$

式(12)の評価関数に従って最適化を行うために、 $\mathbf{q}$ で偏微分すると式(14)となる。

$$\frac{\partial J_{ACLD}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Z}_D^H \mathbf{Z}_D \mathbf{q} + \lambda_C \mathbf{Z}_B^H \mathbf{Z}_B \mathbf{q} + \lambda_M \mathbf{q} + \lambda_{LD} \mathbf{\Xi} \mathbf{q} \quad (14)$$

ここで $\mathbf{\Xi}$ は以下で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{\Xi} = & (\mathbf{Z}_B - \mathbf{Z}_{B-n})^H \mathbf{Z}_B \\ & + \sum_{n=1}^{L_B-1} (\mathbf{Z}_{B-n}^H \mathbf{Z}_{B-n} - \mathbf{Z}_B^H \mathbf{Z}_{B-n} - \mathbf{Z}_{B-n}^H \mathbf{Z}_B) \quad (15) \end{aligned}$$

最適な入力条件は固有値問題から以下の最小固有値の固有値ベクトルに比例する。

$$(\mathbf{Z}_B^H \mathbf{Z}_B)^{-1} (\mathbf{Z}_D^H \mathbf{Z}_D + \lambda_M \mathbf{I} + \lambda_{LD} \mathbf{\Xi}) \quad (16)$$

この方法では Acoustic Contrast と直接的な関係があり、BZ の音場に条件を与えているが、ラグランジュの未定乗数 λ_{LD} と λ_M で最適な入力条件を求めることができる。

3. 自動車車室内への適用

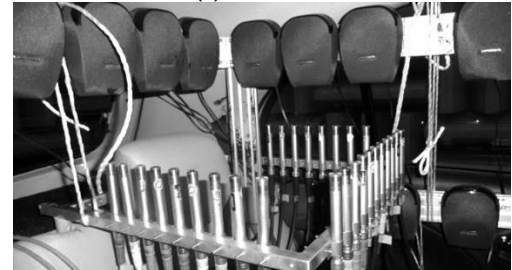
3.1 周波数応答関数の測定とパラメータの設定

2 章の理論を車室内へ適用するために搭載したシステムを Fig. 2 に示す。まず、天井およびインパネ付近に 2 段組みフレームを設置することでスピーカを任意の位置に固定可能とし、そのフレームに 22 個のスピーカを設置する。なお、この設置位置は 71 箇所の候補から、線形的に独立な音源を選出する Effective Independent Method により選出している^(9,10)。次に Fig. 3 に示した各制御対象領域にコの字型の 0.03 m 間隔のマイクロフォンアレイ (29 箇所×2 座席) を設置し、各スピーカ - マイク間の伝達関数を測定する。本実験では使用する λ_M は 0 とする。 λ_{LD} は Fig. 4 を使用し、 10^{-9} 以下の λ_{LD} 値は 0 とする。また LS の $\mathbf{p}_T$ は式(17)である。

$$\mathbf{p}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{T,B} \\ \mathbf{p}_{T,D} \end{bmatrix}, \begin{cases} \mathbf{p}_{T,B} = \mathbf{Z}_B \vec{\mathbf{1}} \\ \mathbf{p}_{T,D} = \vec{\mathbf{0}} \end{cases}, \vec{\mathbf{0}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{\mathbf{1}} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$



(a) Front zone



(b) Rear zone

Fig. 2 The system in a car cabin

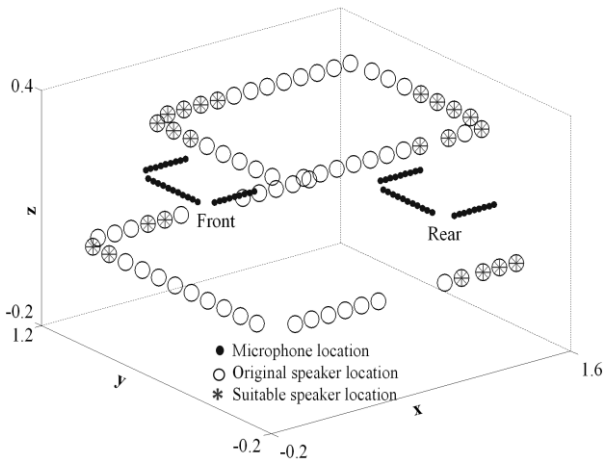


Fig. 3 Geometry of the audio system in cabin

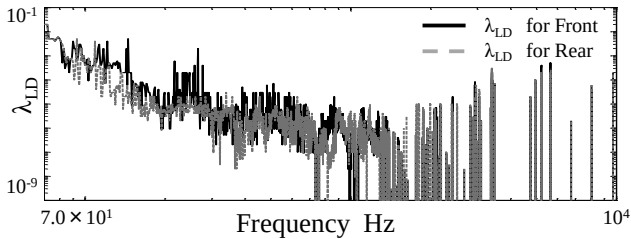


Fig. 4 λ_{LD} for this experiment defined by algorithm

3.2 実車適用でのシステムの性能

3.1 節で測定した伝達関数から入力ベクトルを求め、各最適化法による実車システム性能を比較した。Fig. 5 に Array Effort, Fig. 6 に Acoustic Contrast, Fig. 7 に BZ 内の音圧ばらつきの比較を示す。

3.2.1 Array Effort の性能比較

Fig. 5(a) は BZ がフロントゾーンの場合、Fig. 5(b) は BZ がリアゾーンの場合の Array Effort である。Fig. 5(a) より 70~1k Hz の範囲において、AC が最も低い Array Effort を示しており、次に ACLD、最後に LS の順番に高くなる。この傾向は Fig. 5(b) でも同様である。実験結果では最適化によって再現する制御領域の音場条件の重みによって順位付けされていることがわかる。LS では各応答点に目標音圧を設定しているので、Array Effort が高い値を示す。ACLD では Acoustic Contrast の最大化と BZ 内の音圧差の低減をしているため、AC よりも高い値となる。高周波になるにつれ Array Effort が下がる理由は、波長が短くなるために、音の干渉で音場を構成するのではなく、制御領域に近いスピーカを効率的に使うようになるので、必要な入力パワーが低くなるからである。

3.2.2 Acoustic Contrast の性能比較

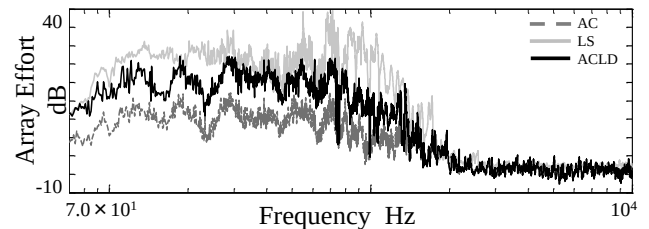
Fig. 6(a) は BZ がフロントゾーンの場合、Fig. 6(b) は BZ がリアゾーンの場合の Acoustic Contrast である。Fig. 6(a) から 1k Hz 以下では AC が最大の Acoustic Contrast が得られ、高周波数になるにつれて AC と ACLD の値に差がなくなることがわかる。LS では十分な音圧差が得られないことがわかる。各最適化による 70~10k Hz の平均 Acoustic Contrast は AC が 19.7 dB, LS が 14.0 dB, ACLD が 18.2 dB である。Fig. 6(b) でも傾向は同様であり、平均 Acoustic Contrast は AC が 19.0 dB, LS が 11.5 dB, ACLD が 17.1 dB である。

3.2.3 音圧ばらつきの算出とブライトゾーン内の音圧マップ

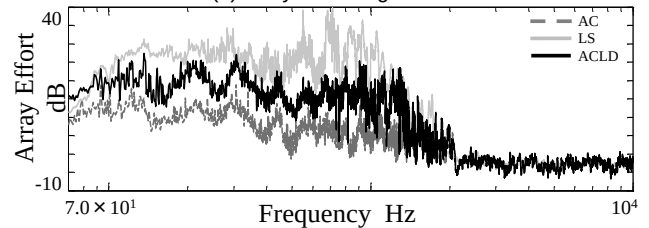
Fig. 7(a) は BZ がフロントゾーンの場合の BZ 内の音圧ばらつきを示し、Fig. 7(b) は BZ がリアゾーンの場合の BZ 内の

音圧ばらつきを示している。Fig. 7(a) の 70~1k Hz に着目すると、BZ 内の音圧ばらつきは AC と LS と比較して、ACLD は十分に低減できる。LS では 100 Hz 付近では低減できているが、高周波数になるにつれ、音圧ばらつきが大きくなる。AC では音圧ばらつきが非常に大きい。これは、AC は Acoustic Contrast のみ最大化する最適化方法であり、構成される音場環境については考慮されていないためである。70~1k Hz の平均音圧ばらつきは AC が 5.6 dB, LS が 5.1 dB, ACLD が 2.1 dB である。1k Hz 付近から ACLD でも BZ 内の音圧ばらつきが上昇するが、これは実験のスピーカ間隔と数、マイクロフォン間隔が影響している。スピーカ数を多くし、間隔を狭めることで制御限界周波数を上昇することが可能となると考えられる。本実験では最小スピーカ間隔が約 0.1 m であるため、半波長が 0.1 m の 1.7k Hz が制御で音圧ばらつきを低減できる上限周波数となることが原因である。この傾向は Fig. 7(b) でも同様で、AC が 5.7 dB, LS が 4.1 dB, ACLD が 2.0 dB である。

音圧ばらつきが低減されていることをより明確に確認するために Fig. 8 に示す BZ がフロントゾーンの各最適化法による 290 Hz の音圧マップをみると、(a) と (b) は BZ の音圧が一定に保たれていないが、(c) の ACLD では一定に保つことができています。

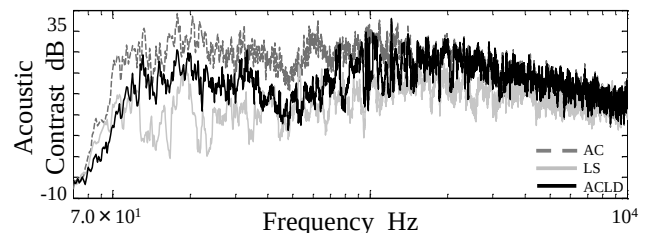


(a) Array effort bright front

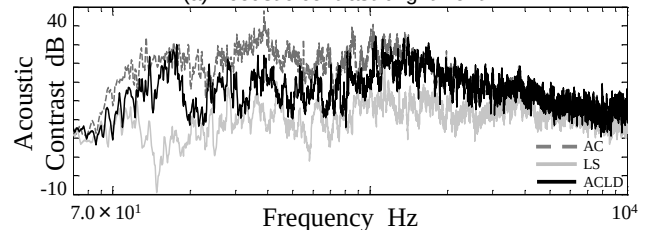


(b) Array effort bright rear

Fig. 5 Array effort bright for each zone



(a) Acoustic contrast bright front



(b) Acoustic contrast bright rear

Fig. 6 Acoustic contrast bright for each zone

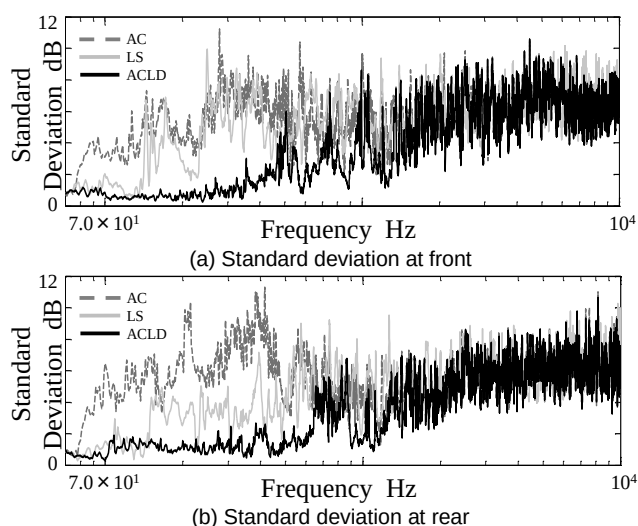


Fig. 7 Standard deviation at each bright zone

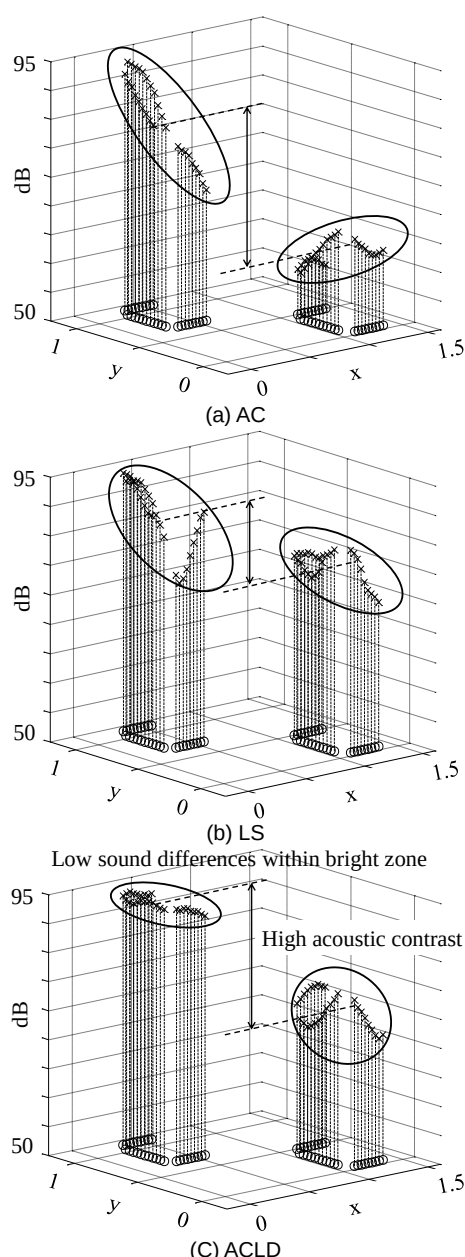


Fig. 8 Sound pressure bright for front optimized by three methods at frequency 290 Hz

4. 結論

パーソナル音場制御, 別々の音情報を各制御領域に伝搬する方法および制御された音環境の評価方法について検討した. 従来の方法である AC や LS では Acoustic Contrast を最大にすることや目標音場と構成される音場との誤差を最小にすることに重点を置いていた. しかし, 音で空間を制御するには制御領域内の音圧を一定にすることが望ましく, 音圧ばらつきを低減する必要がある. そこで, パラメータ設定も容易な ACLD を提案した. また, 実際に車室内にシステムを構築する場合に問題となる音源位置の選出方法についても提案した.

自動車車室内において運転者と同乗者に別々の音環境を提供するために, 実車実験によって従来手法と性能比較した. 従来手法の AC では高い Acoustic Contrast が得られるが, BZ 内の音圧ばらつきが大きいことを示し, LS では目標音場の与え方と Acoustic Contrast に直接的な関係がなく, 十分な Acoustic Contrast が得られないことを示した.

提案手法の ACLD ではラグランジュの未定乗数のみの設定で, 十分な Acoustic Contrast を保ち, かつ制御領域内の音圧ばらつきを低減できることを示した. 実車実験においても 1k Hz 以下の音圧ばらつきを 2.1 dB 以下に低減でき, 平均 Acoustic Contrast を 17 dB 以上と高い値を得られることを実証し, 提案手法の有用性を確認できた.

参考文献

- (1) S.J. Elliott, J. Cheer, J.-W. Choi, and Y. Kim, "Robustness and regularization of personal audio systems," *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Proc.* 20, pp. 2123-2133, (2012).
- (2) M. Poletti, "An investigation of 2-d multizone surround sound systems," in *Proceedings of the 125th Audio Engineering Society Convention*, San Francisco, CA, (2008).
- (3) 柳館直成, 曹浣豪, 戸井武司, "領域に応じた自動車車室内の音場制御," *自動車技術会*, No. 109-12, p. 15-18 (2012)
- (4) 伊勢史郎, "キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理," *日本音響学会誌*, Vol. 53, No. 9, p. 706-713 (1997)
- (5) Philip Coleman, Philip Jackson, Marek Olik, and Abildgaard Pedersen, "Optimizing the planarity of sound zones," *AES 52nd International conference*, Guildford UK, (2013).
- (6) Philip Coleman and Philip J. B. Jackson, "Planarity panning for listener-centered spatial audio," *AES 55th International conference*, Helsinki Finland, (2014).
- (7) Naomichi Yanagidate, Jordan Cheer, Stephen Elliott and Takeshi Toi, "Car Cabin Personal Audio: Acoustic Contrast with Limited Sound Differences," *AES 55th International conference*, Helsinki Finland, (2014).
- (8) 柳館直成, 有光哲彦, 戸井武司, "制御領域内のばらつきを考慮した自動車車室内パーソナル音場制御," *音講論集*, pp. 729-732, (2014).
- (9) Kammer D. C. "Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 14, pp. 251-259 (1991).
- (10) P. A. Nelson and S.J. Elliott, "Active Control of Sound," Academic Press, pp. 310-355 (1995).