

広さ感の客観評価尺度に基づく音場制御手法

A sound field control method based on an objective measure of spatial impression

太田 佳樹, 三橋 孝, 小谷野 進司

Yoshiki Ohta, Takashi Mitsuhashi, Shinji Koyano

要旨 狭い空間における音響再生において、広さ感を制御するための手法を開発した。容積の異なるさまざまな空間から得られたインパルス応答を積み込んだ音を用いた主観評価実験により広さ感に対応する心理尺度値を求めた。次に、広さ感に関する心理尺度値と対応するインパルス応答の物理的特徴量との関連性の検討をした。心理尺度値が時間周波数軸上でのエネルギー分布の線形結合で表すことができることが分かった。また、この客観尺度に基づく音場制御法を考案し、実音場での適用実験から本手法の有効性を明らかにした。

Summary A method to control the spatial impression in sound reproduction within a small space has been developed. We found that a psychological scale can be represented by a linear combination of energy distribution on a time-frequency plane calculated from an impulse response. We have developed a sound field control method based on objective measurement and tested the validity of this method through experiments on an actual sound field.

キーワード : 音場制御法, 音響再生環境, 心理尺度, 物理指標, 客観尺度, インパルス応答, 空間知覚, 音像定位, 主観評価, 時間周波数構造

1. まえがき

新しいオーディオメディアの出現などにより、音響再生環境のバラエティが増えてきている。どのような環境においても、適切な音響再生が提供可能な技術が生まれてくることが望まれている。あらゆる環境で適切な音響再生を実現するために、2つの検討課題を取り上げた。第一に、人の聴覚における「空間知覚」に関する知見を得ること、第二に「空間知覚」と「再生環境」を同時に考慮した「再生方式」を創造することである。

空間知覚に関しては物理量との関連について

の報告が盛んに行われている。近年になって音による空間印象をいくつかの属性に分類する提案がされ始めている。例えば、Masonは再生音の空間印象が、物理量と対応する主観的判断の関係に基づき、ある階層構造で表現できると提案した⁽¹⁾。彼は、空間印象は“Source”と“Environment”という二つの属性に分類できると提案した。一方、建築音響の分野では、「みかけの音源の幅(ASW:Auditory Source Width)」と「音に包まれた感じ(LEV:Listener Envelopment)」という二つの属性に分ける考え方が広い支持を得ている⁽²⁾。ASWとLEVは主に、

原音場の評価を目的として用いられているため、必ずしも再生音場の評価にそのまま利用できるとは限らない。我々は、“Source”と、“Environment”が音の知覚に大きな影響を与えている点で共感している。

しかし、我々が対象としている家庭や車などのような通常の再生環境に目を向けた場合には、空間固有の“Environment”に関わる問題が支配的となってくる。そこで、まず“Environment”のうち「部屋サイズ」の知覚的を絞り研究をスタートさせた。福島らは、従来から建築音響の分野で用いられているさまざまな物理指標と「広さ感」との関連を詳細に調査した。その結果、「広さ感」は響きに関わる物理指標（たとえば残響時間、初期残響時間、時間重心）が支配的であることを見つけた⁽³⁾。そこで、本稿では「広さ感」と響きの時間周波数構造との関連についてさらに詳細に調査した。

従来、「広さ感」を制御する方式として、Reverberatorが数多く提案されてきた⁽⁴⁾。しかし、その多くは設計者の勘と経験に頼ったものであり、最適設計されているとは言いづらい。一方、トランスオーラル再生に代表される逆フィルタを使用する方式が数多く存在している。これらは狭い空間での逆フィルタ設計の困難さ、スイートスポットの狭さなどが問題点としてあげられる。それらの多くは、「距離感」や「方向定位」という音像定位を制御する目的で利用され、「広さ感」を制御するまでには到っていない。そこで以下で、「広さ感」に関わる物理量のみを制御する再生方式について言及していく。

2. 主観評価実験

2.1 実験手順

広さ感の Cue を探る手始めとして、さまざまな部屋のインパルス応答を用いて主観評価実験を行うことにより心理尺度値を算出した。実験手順は以下の通りである。

容積の異なる 15 室でダミーヘッドを用いて

測定したインパルス応答を準備した。このインパルス応答を音源に畳み込むことにより主観評価実験用の刺激音を作成した。なお、各刺激音の音色の変化を最小限に抑えるため、全てのインパルス応答は可聴帯域で周波数特性がほぼフラットになるようにイコライザで補正した。実験で使用したインパルス応答と残響時間(RT)をまとめて表1に示す。表1の中で、No.3, No.5 ~ No.15の12種類は千葉工大の柳川教授から提供していただいたもので、No.1, No.2, No.4の3種類は我々が独自に測定したものである。

主観評価実験では、これら15種類の刺激音のうち2音を一对にして、ヘッドフォンを通してランダムな順で再生し、2音のうちどちらが広いイメージか被験者に答えてもらう。ボリュームは、実験中に各自に自由に操作させているので、再生レベルは被験者ごとによって異なっている。被験者は正常な聴力を有する成人男性で、当社のオーディオ技術者8人とした。

表1 実験で用いたインパルス応答

No	部屋の名前	残響時間 RT[s]
1	車	0.039
2	視聴室 1	0.095
3	押し入れ	0.130
4	視聴室 2	0.252
5	和室	0.321
6	視聴室 3	0.351
7	研究室	0.472
8	実験室	0.437
9	教室 1	0.413
10	教室 2	0.392
11	教室 3	0.742
12	教室 4	0.759
13	教室 5	0.659
14	教室 6	0.739
15	教室 7	0.954

2.2 実験結果

実験中で、音源による結果の差も吟味するために、性質が全く異なる音声(source1)とドラム(source2)の2種類を用いた⁽⁵⁾。上記の手順を2種類の音源に施すことで、2通りの主観評価結果が得られた。それぞれの結果に対して、サーストンの比較判断の法則(ケースV)を適用して心理尺度値を算出した。得られた心理尺度値を表2に示す。

結果から、音源の差による若干の違いが現れるものの、大まかな傾向はどれも似通っている。予想していたように心理尺度値とRTとの相関も高そうであるが、実際に残響のどの部分がキーになっているかを次章で明らかにしていく。

表2 音源ごとに得られた心理尺度値

No	心理尺度値(source1)	心理尺度値(source2)
1	-3.28	-2.44
2	-2.74	-2.82
3	-2.72	-2.68
4	-2.39	-2.27
5	-0.94	-0.87
6	-0.68	-0.20
7	-0.29	0.49
8	0.08	0.22
9	0.35	0.88
10	0.41	-0.13
11	1.72	0.60
12	2.07	1.42
13	2.29	1.97
14	2.73	2.85
15	3.38	2.99

3. 広さ感の客観尺度

3.1 予備検討

従来、広さ感は響きに関する物理量と密接な関連があるといわれてきた。しかし、帯域ごとの響きとの関連性は未だ明らかにはなっていない。ここでは、2章で述べた実験結果で得られ

た広さ感の心理尺度値と、帯域ごとに算出した物理量との関連を調査した。

響きに関わる物理量としては、残響時間(RT)、初期残響時間(EDT)、時間重心(Ts)を取り上げた。また、帯域は63Hzから8kHzまでを1/1オクターブ幅で8分割とした。心理評価実験で用いた15種類のインパルス応答を、8バンドで帯域分割し、それぞれの帯域について3つの物理量を算出する。その後、帯域ごとに心理尺度値と各物理量の相関係数を計算した。結果を音源ごとにまとめ、図1(source1:音声)と図2(source2:ドラム)に示す。図から、音声では500Hzから2kHzで高い相関を示し、ドラムでは500Hz以降で高い相関を示すことが分かった。このことから、傾向はどの物理量に対しても同様で、このことから広さ感が響きの帯域に依存していることが示される。さらにインパルス応答の時間周波数構造との関連について、次節で述べていく。

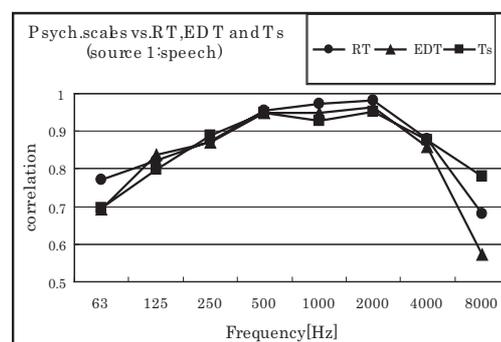


図1 心理尺度値と[RT, EDT, and Ts]の相関係数(source1:音声)

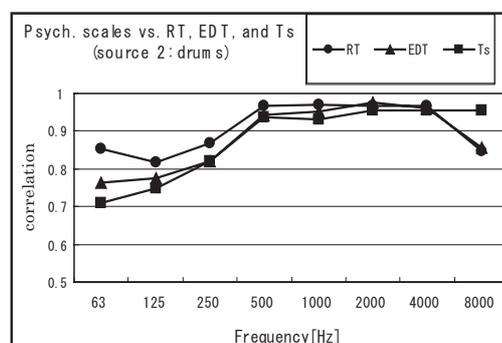


図2 心理尺度値と[RT, EDT, and Ts]の相関係数(source2:ドラム)

3.2 広さ感の定式化

前節での結果から、残響の広さ感への影響が周波数帯域によって異なっていることが分かった。そこで本節ではさらに時間構造との関係を詳細に調べていくことにする。

15種類のインパルス応答を時間周波数解析し、エネルギー分布を求める。ここでは大まかな傾向を掴むために、時間軸方向には4分割、周波数軸方向に3分割の計12分割した。図3に分割方法を示す。図3中で、時間“0[ms]”は直接音が到来する時刻として定義する。 E_{ij} はその領域に含まれるインパルス応答のエネルギーを示している。

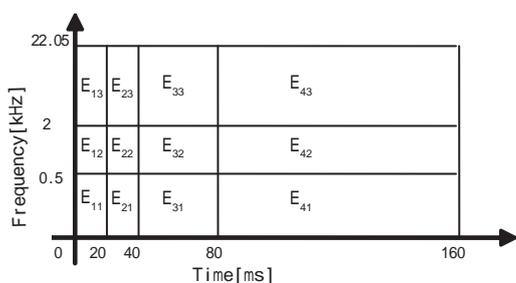


図3 時間周波数平面上での分割

E_{ij} の求め方の一例として、 E_{22} を算出する手順を以下に示す。

解析するインパルス応答を $p(t)$ とする。 E_{22} は500Hzから2kHzまでの成分なので、対応するバンドパスフィルタ $h_2(t)$ を用意する。 $h_2(t)$ は直線位相FIR型とした。

まず、 $p(t)$ を式(1)のように $h_2(t)$ でフィルタリングし、帯域幅で正規化することで、エネルギー系列 $e(t)$ を算出する。

$$e(t) = \frac{1}{2000-500} \cdot \left(\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot p(t-\tau) d\tau \right)^2 \quad (1)$$

$e(t)$ からを時間軸上で式(2)のように積分し、時間幅で正規化することで E_{22} とを算出する。式(2)中で t_0 は直接音の到来時刻と定義する。

$$E_{22} = \frac{1}{0.04-0.02} \cdot \int_{0+20ms}^{0+40ms} e(t) dt \quad (2)$$

他のエネルギーについても同様に計算する。全て算出された後に式(3)に基づき、 E_{ij} を正規化する。

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 E_{ij} = 1 \quad (3)$$

ある部屋のインパルス応答 $p(t)$ が得られているとき、上述のようにエネルギー分布 E_{ij} が容易に計算される。その部屋の広さ感に関する心理尺度値 R が、 E_{ij} の重み付き和で表されると仮定する。

$$R = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 W_{ij} \cdot E_{ij} \quad (4)$$

実験で得られた心理尺度値を目的変数とし、対応するインパルス応答の E_{ij} を説明変数とする。このとき、統計処理ソフトSPSSで重回帰分析し、 W_{ij} を算出する。実験に用いた2種の音源に対する W_{ij} が得られたので表3に、これをプロットしたものを図4と図5に示す。参考のために、表3にそれぞれの重相関係数を示す。どちらも極めて高い値を示し、推定精度は十分に得られている。分散分析によるとsource1では有意確率.009となり、source2では.001であった。従って、重回帰結果の有意水準は1%未満である。

結果から分かるように、どちらも傾向が似通っているが、若干係数値に差異が表れる。広さ感を推定するための式として用いるためには、テストする音源数をもっと増やしていく必要がある。しかし、広さ感の心理尺度値をインパルス応答から直接推定する可能性が示唆された。広さ感を制御するためには、インパルス応答の時間周波数構造を自由に可変することが必要であると結論づける。次章では、これらの結果を踏まえて広さ感を制御する方法について述べていく。

表 3 回帰係数 (W_{ij}) と重相関係数 (MCC)

	source1(音声)	source2(ドラム)
W_{11}	3.776	7.033
W_{21}	0.357	-2.226
W_{31}	58.169	67.121
W_{41}	-66.992	-59.693
W_{12}	-18.797	-19.896
W_{22}	-10.211	-10.104
W_{32}	111.075	93.919
W_{42}	-250.842	-261.972
W_{13}	3.380	2.891
W_{23}	-4.295	-21.631
W_{33}	-220.529	-85.662
W_{43}	1614.008	1450.233
MCC	.996	.999

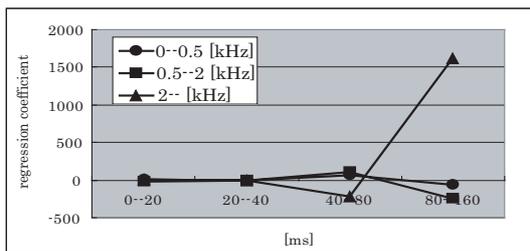


図 4 source1(音声)の回帰係数

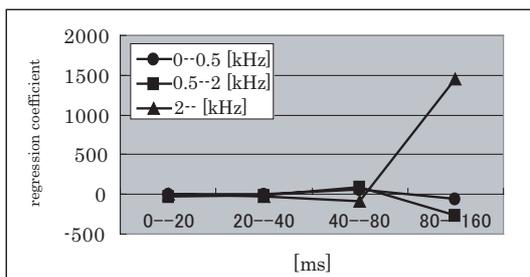


図 5 source2(ドラム)の回帰係数

4. 音場制御手法

4.1 概要

前章までの知見を用いた音場制御法について本章で述べる。広さ感の心理尺度値が時間周波数平面での離散的エネルギー分布から近似的に

推定できる。このことから分かるように、ある部屋の広さ感を別の部屋でシミュレートするためには、そのエネルギー分布を等しくする必要があり、そこで、残響の時間周波数構造を任意に制御するためのアルゴリズムの検討を始めた。ここでの主な目的は、狭い部屋で広い部屋の広さ感を得ることで、その逆のケースは対象としていない。また、反射音を逆フィルタによって消してしまうという発想はなく、足りない反射音だけ適切に付加してやることで広さ感を制御することを基本姿勢としている。結果として、ごく自然な残響感を得ることを可能にしている。

4.2 アルゴリズム

帯域ごとに自由に時間特性を可変する必要がある。そこで、図 6 に示す信号処理系は、オーディオ入力信号をまず狭帯域のフィルタバンク (BPF_1 ~ BPF_N) に通し、それぞれの出力に対して反射音付加フィルタ (FILT_1 ~ FILT_N) に通し、合成する。同定アルゴリズムでは、フィルタバンクを固定し、FILT_1 ~ FILT_N を設計しなくてはならない。FILT_1 ~ FILT_N では、用いるバンドパスフィルタが異なるだけなので、以下では例として、FILT_1 の設計フローに関して述べる。

FILT_1 の設計フローを図 7 に示す。このフローは大きく分けて、4 つのステップから構成されている。STEP1 では制御用フィルタ FILT_1 を単位インパルスとして初期化する。ターゲットとなる広い部屋のインパルス応答を $P_i(t)$ とし、再生対象となる狭い部屋のインパルス応答を $P_s(t)$ とする。このとき図 7 の STEP2 で表されている DIFF を計算する。この DIFF は $P_s(t)$ の FILT_1 に通した後の出力と $P_i(t)$ を BPF_1 に通した出力の差の 2 乗和を表現している。提案したアルゴリズムでは、この DIFF を最小化することで、フィルタを最適化する。STEP3 ではあらかじめ設定しておいた、threshold と DIFF を比較することで、ループ継続の可否を決定する。ここで、DIFF がまだ大きいときには、STEP4

でFILT_1に微小変動を加え、再設定し、STEP2に戻る。DIFFがthresholdより小さくなったところで、FILT_1を決定する。

$P_s(t)$ が最小位相系であれば、最適解は一意に求めることができる。しかし、我々の主たる目的は、初期反射音が多数存在し、必ずしも最小位相系とは限らない狭い空間での再生である。局所最適解を求める方法を採用することで、安定なフィルタを設計することが可能となり、広さ感を制御するのに十分な精度が確保できている。

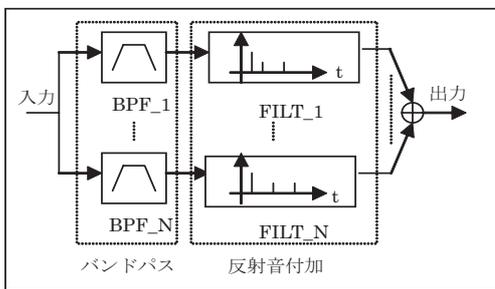


図6 信号処理系

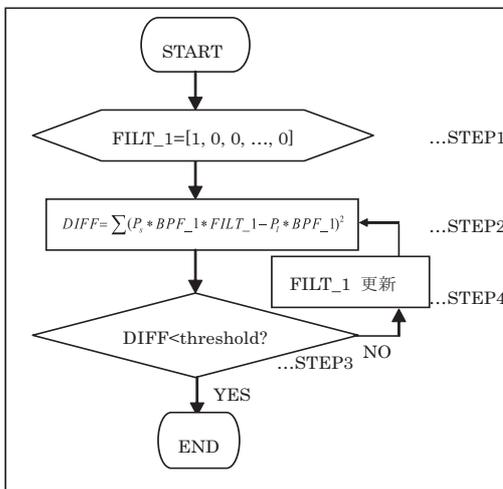


図7 フィルタ設計フロー

4.3 実音場への適用例

前節で提案したアルゴリズムを用いて、実音場への適用実験を行った。今回、狭い部屋の代表例として車を取り上げている。この車は主観評価実験で用いたデータ(No.1)を測定する際に

使ったものである。ターゲットにした広い部屋はパイオニア内の試聴室とした。ここも同様に主観評価実験内のデータ(No.4)を測定した場所である。ガボール・ウェーブレットで解析した結果をコンター表現して、図8, 9, 10に示す。特性上、良好な近似結果が得られていることが分かる。

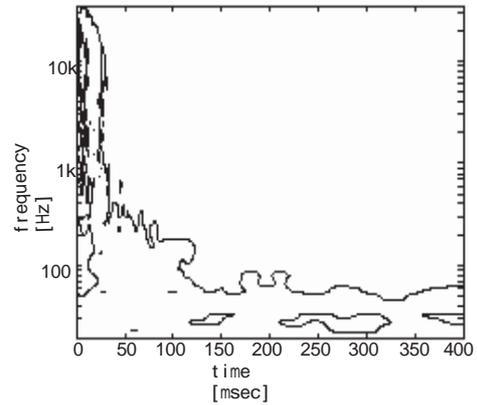


図8 処理前(車)

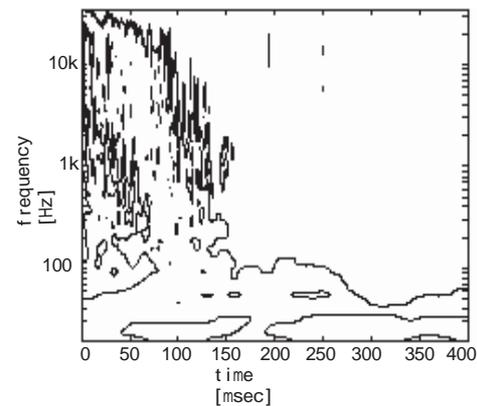


図9 処理後(車)

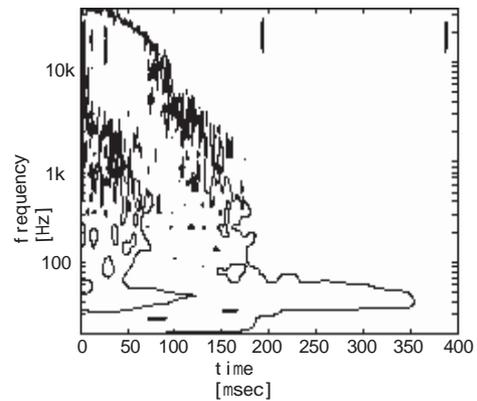


図10 ターゲット(視聴室)

制御フィルタを音源に畳み込み試聴した結果、音質劣化の少ない良好な印象が得られた。正面奥行き方向に音像が遠ざかっていくような印象も得られ、「広さ感」と「奥行き感」が密接に関連していることが明らかとなった。今後はさらに事例を増やし、本手法の有効性を確認していく。

5. まとめ

広さ感に関する客観評価尺度に基づく音場制御法を提案した。まず、さまざまな容積の部屋のインパルス応答を準備し、音源に畳み込んだ。これらを用いた主観評価実験により得られた広さ感の心理尺度値と、対応するインパルス応答の関連性を調べた。その結果、心理尺度値と残響に関わる物理量の相関係数が帯域ごとに異なっていることが分かった。

次に、心理尺度値と時間周波数構造の関連について検討を行った。実験に用いたインパルス応答を解析し、時間周波数軸上での離散的エネルギー分布を算出した。この結果と先に求めた心理尺度値との対応関係から、心理尺度値が時間周波数軸上でのエネルギー分布の線形結合で近似的に表現できると結論付けた。

最後に、上述の実験から求められた広さ感に関する客観尺度を用いた音場制御システムを構築した。試聴結果では、音質をほとんど損ねることのない自然な効果が得られた。

本システムでは、各チャンネルあたり一つのスピーカを配し、制御専用の余計なスピーカを必要としない。そのため、従来の2チャンネルステレオへの適用だけでなく、マルチチャンネルシステムへの展開も容易である。

音源が再生機器、再生空間を通り、リスナーに届くまでを一つの系とし、系の末端にあるリスナーの心理聴覚特性を理解することで、音響再生の新たな可能性を見出すことができた。このアイデアが新たな再生方式創造の一助となれば幸いである。

6. 謝辞

有益な議論をしていただき、インパルス応答の提供をしていただいた千葉工業大学 柳川博文教授に感謝致します。

参考文献

- (1) F. Rumsey, "SPATIAL AUDIO", Focal Press, pp44-45
- (2) M. Morimoto, Z. Maekawa, "Auditory spaciousness and envelopment", 13th ICA, 1989
- (3) M. Fukushima, H. Yanagawa, "A perceptual modeling of acoustic events focused on spatial impression", 17th ICA Proceedings, Vol.4, Psychoacoustics (CD-ROM), September, 2001
- (4) M. R. Schroeder, "Natural-sounding artificial reverberation", Journal of the Audio Engineering Society, vol. 10, no. 3, pp. 219-233, 1962.
- (5) DENON PROFESSIONAL TEST CDs, COCO-75084->86, DISC 2, Track 37 (source 1: 音声), Track 34 (source 2: ドラム), September, 1992.

筆者

太田 佳樹 (おおた よしき)

所属：研究開発本部 モバイルシステム開発センター

入社年月：1996年4月

主な経歴：音場制御，デジタル信号処理の研究開発に従事

三橋 孝 (みつはし たかし)

所属：研究開発本部 モバイルシステム開発センター

入社年月：1988年4月

主な経歴：入社以降スピーカシステムの設計・開発に従事 2000年10月より現職

小谷野 進司 (こやの しんじ)

所属：研究開発本部 モバイルシステム開発センター

入社年月：1975年4月

主な経歴：入社以降スピーカユニット，システムの設計，開発に従事。現在，音場制御，デジタル信号処理，変換器の研究に従事。