

音響インテンシティを用いた閉空間音場の評価手法に関する検討*

古賀千晶, 鈴木久晴, 福島欣尚, 庄村真智子, 尾本章 (九州大)

1 はじめに

スタジオや車室内などの比較的小規模な閉空間音場を評価するため, 先行研究により, 音源位置や音の反射の様子を可視化する音場評価ツール V.S.V.(Virtual Source Visualizer) が提案された [1]。

V.S.V. では, 音場の空間情報を把握するために, 近接した四点において測定したインパルスレスポンスから, 三軸方向 (x, y, z 方向) の音響インテンシティを算出し, それらを合成した三次元インテンシティの大きさのピークを, 室内における有効な反射音 (仮想音源) と考え, 室の写真画像を球に貼り付けたものに投影する。

しかし, 反射音の算出, つまり音響インテンシティのピーク検知の方法は様々であり, 信号処理の方法によって, 結果に差が出てくることが考えられる。

そこで本報では, 反射音を求めるためのいくつかのピーク検知の方法について比較検討を行う。

2 V.S.V.(Virtual Source Visualizer) について

2.1 近接四点法について

本研究では, 音場の空間情報を把握するのに有効な近接四点法 [2] によって, 閉空間における反射音情報を得る。近接四点法では, 直交座標軸上の近接する四点 (o, x, y, z) にマイクロホンを配置し, 有限差分近似を用いて各点間 (o-x, o-y, o-z 間) での音圧と粒子速度を求め, 三方向 (o-x, o-y, o-z) の瞬時インテンシティ, さらにヒルベルト変換により, その包絡を取ったエンベロープインテンシティを算出する [3][4]。包絡を取ることで, 反

射音のエネルギーの大きな流れを掴むことができるのである。このエンベロープインテンシティを元に, 室内の反射音を検出する。

Fig.1 に測定に使用したマイクロホンプローブ, Fig.2 は三方向の瞬時インテンシティ (細線) とエンベロープインテンシティ (太線) の例を示す。

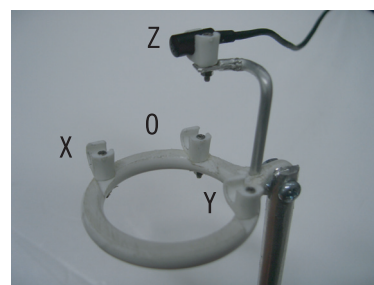


Fig. 1 Microphone probe used for measurement

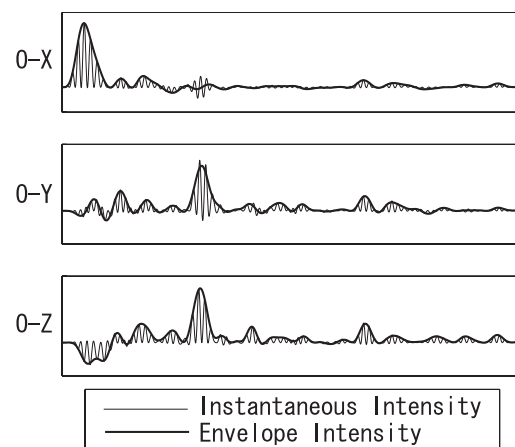


Fig. 2 Instantaneous intensity and Envelope intensity

2.2 ピーク検知方法について

これまでは, 三方向のエンベロープインテンシティレベルを合成した三次元インテンシティレベルについて, 最初のピークレベル (つまり直接音) から任意のレベル (-30 ~ -40dB) までの範囲における局所的なピークを検出して

* Study on evaluation method of sound fields in enclosures using sound intensity. by CHI-AKI Koga, Hisaharu Suzuki, Yoshinari Fukushima, Machiko Shomura, Akira Omoto (Kyushu University)

また、任意の周波数を切り出すための FIR フィルタを畳み込んだインパルスレスポンスから、上記の手順で算出したエンベロープインテンシティレベルを、そのままピーク検知の対象としていた。

しかし、この方法では、

(A). 三方向のインテンシティが合成されてしまうため、各方向ごとの反射音の情報が分からなくなる。

(B). ピーク検知の際にフィルタのサイドロープの影響 (重ね合わせ) によって誤ったピークが生じ、それが反射音として検出される。

という問題点があった。

そこで今回は、以上の二点を踏まえて

(A). 三方向のエンベロープインテンシティレベルごとに独立にピークを検知し、各方向でピークが一致したら一つのピークとして合成、一致しなければ別のピークとして分離する。

(B). エンベロープインテンシティとフィルタのヒルベルト変換との相互相関を求め、その後半部を反射音の情報と考え、ピーク検知の対象とする。

という新たなピーク検知の方法を導入する。

ここで (B) について、実関数 $f(t)$ のヒルベルト変換 $g(t)$ は次式で与えられる [5]。

$$g(t) = f(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

すると、解析信号 $Z(t)$, $f(t)$ の振幅包絡 $r(t)$, 瞬時位相 $\theta(t)$ はそれぞれ次式で定義される。

$$Z(t) = f(t) + jg(t) = r(t) \cdot e^{j\theta(t)} \quad (2)$$

$$r(t) = \sqrt{f(t)^2 + g(t)^2} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{g(t)}{f(t)} \quad (4)$$

よって $f(t)$ は次式で表される。

$$f(t) = r(t) \cos \theta(t) \quad (5)$$

このように、ヒルベルト変換を用いることで $f(t)$ のエンベロープ $r(t)$ を求めることができるのである。

例えば、本報で用いた、中心周波数 500Hz, 9 次のおクターバンドパスフィルタの時間応答 (細線) とそのヒルベルト変換 (太線) の振幅特性は Fig.3 のようになる。

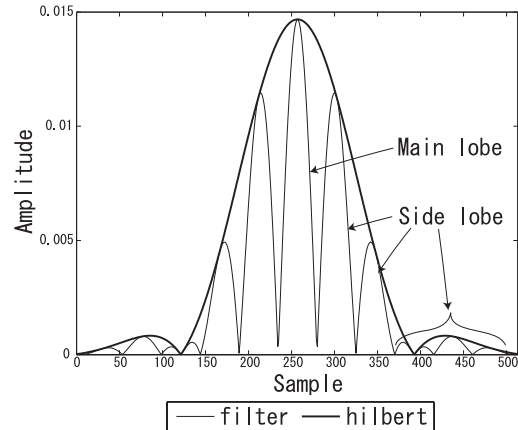


Fig. 3 Amplitude of filter coefficients and its hilbert transform

このように、ヒルベルト変換により、フィルタのサイドロープの影響が取り除かれるため、誤ったピークが検知されにくくなる。

また、信号 $x(t)$ に対して $y(t)$ を τ だけ遅延させたとき、両信号の相互相関関数 $r_{xy}(\tau)$ は次式で求められる [6]。

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (6)$$

相互相関関数は、二つの信号の相関関係を求めるためのものであり、二信号間の類似度や時間差の推定に用いられる。もし、二信号が完全に異なり、互いに独立ならば、 τ に関わらず相互相関関数は 0 に近づく。

ここでは、相互相関関数を求めることが、フィルタのインパルスレスポンスが波形の中にどのような割合で含まれているかを推測することになる。

つまり、

- ・合成インテンシティか方向別インテンシティか

- ・エンベロープインテンシティとフィルタのヒルベルト変換との相関をとるか否か

という二点に着目して、ピーク検知方法の比較検討を行う。

3 実験

無響室内のある特定の場所に音源（スピーカ）を、そこから約 1.4m の位置、正面方向にマイクロホンプロブを設置し、近接四点法による測定を行った。上記のような信号処理の結果、音源位置が正しく推定されるか、反射音の情報がピーク検知の方法の違いによってどのように算出、表示されるかを確かめる。測定には tsp 信号を用い、サンプリング周波数は 48kHz、マイク間隔は約 2.7cm とした。

4 結果及び考察

測定したインパルスレスポンスからエンベロープ強度レベルを算出し、比較を行うため、以下の四通りの方法でピーク検知を行った。

- (a). 合成強度レベルを用い、フィルタとの相関を取らない
- (b). 方向別強度レベルを用い、フィルタとの相関を取らない
- (c). 合成強度レベルを用い、フィルタとの相関を取る
- (d). 方向別強度レベルを用い、フィルタとの相関を取る

ここで、マイク間隔から適用周波数限界（～約 1kHz）を考慮し、フィルタは中心周波数 500Hz のオクターブバンドパスフィルタとした。

(a)～(d) の信号処理の結果を、それぞれ Fig.4～Fig.7 に示す。

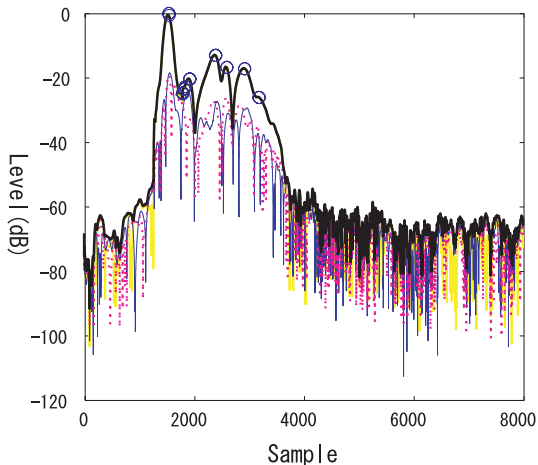


Fig. 4 case(a)

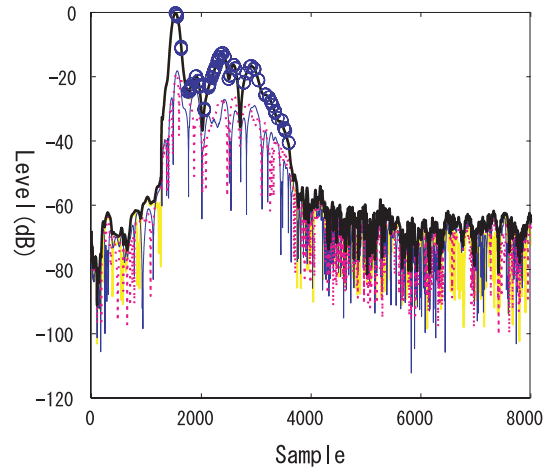


Fig. 5 case(b)

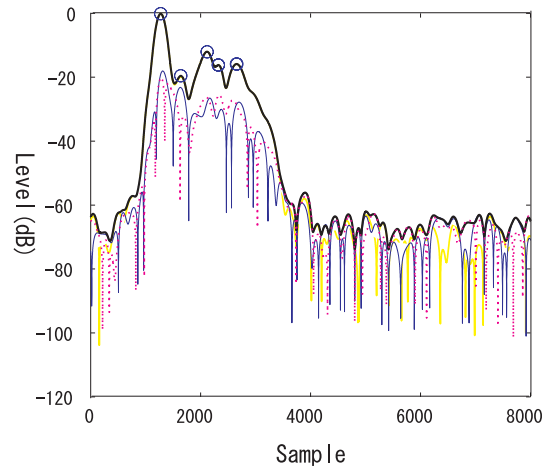


Fig. 6 case(c)

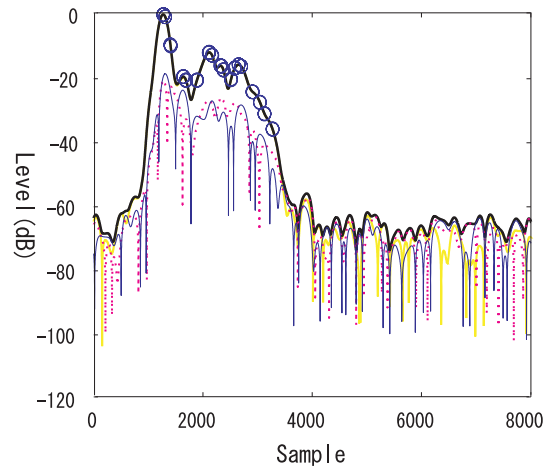


Fig. 7 case(d)

— X-Y-Z — X — Y ····· Z ○ Peak

Fig.4～Fig.7 は三方向の強度レベル (X(薄線), Y(細線), Z(点線)) およびそれらを合成した強度レベル (X-Y-Z(太線)) とピークの位置 (Peak(印)) を示したものである。ここで、三軸の向きは、X

が音源方向, Y が左壁方向, Z が天井方向である。

インテンシティレベルに着目してみると, 方向別の方が合成よりもピーク数が多く, 各方向の反射音情報が抽出されていることが分かる。しかし, Fig.5のように, フィルタとの相関を取らずに各方向の反射音情報を抽出しようとする, ピーク数が増大し, その中には先に述べたようなフィルタのサイドローブによって生じたピークが含まれている。特に, 全体的な波形の減衰部にも多数のピークが現れており, その影響が出ていると考えられる。

次に, (b), (d) の場合の V.S.V. による表示結果を, それぞれ Fig.8, Fig.9 示す。

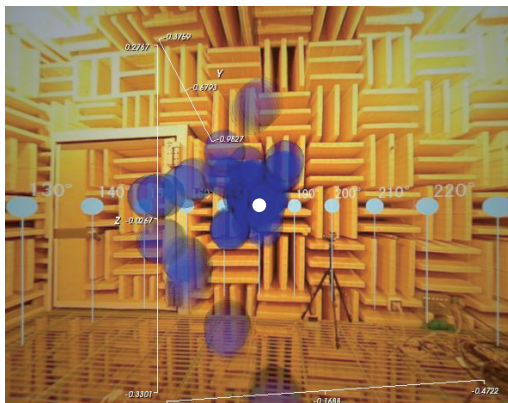


Fig. 8 case

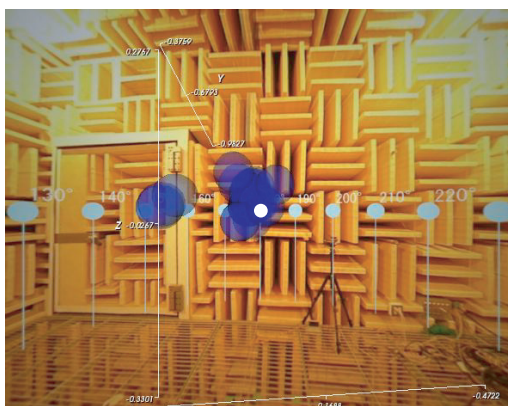


Fig. 9 case

Fig.8, Fig.9 はそれぞれ (b), (d) の場合のピーク検知結果を V.S.V. で表示させたものであり, 中心付近に多数見られる黒丸が仮想音源, 中心部の小さな白丸が音源位置である。四つのどのピーク検知方法の場合も, 仮想音源は白丸の位置に集中しており, おおよその音源位置の推定が可能である。しかし, 仮想

音源数は多い順に (b), (d), (a), (c) となり, 方法によってばらつきが見られる。特に (b) に関しては, Fig.5, Fig.8 から明らかなように, 他の三つの方法に比べて仮想音源数が著しく多い。無響室内であるため, ほぼ音源位置にしか存在しないはずの仮想音源が壁面に多数投影されており, これは正しい結果とは言えない。

フィルタとの相関に着目してみると, やはり相関を取った方が取らない場合と比較して, 波形全体が滑らかで, フィルタのサイドローブの影響が減じられていることが分かる。

5 むすび

四つのピーク検知方法について比較検討を行った。その結果, 方向別にピークを検出し, エンベロープインテンシティとフィルタとの相関を取る方法が, 合成及び方向別の反射音情報の抽出, 及びフィルタのサイドローブの影響の軽減が可能で, 音源情報も得られるやすいということが示された。

今後の課題としては, 鏡像法によるシュミレーションや相関法を用いたピーク検知の方法について検討し, 反射音の可視化手法の精度を上げることが挙げられる。

参考文献

- [1] Akira Omoto and Harunori Uchida 'Evaluation Method of Artificial Acoustical Environment: Visualization of Sound Intensity'
- [2] Yoshio Yamasaki and Takeshi Itow 'Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method'
- [3] F.J.Fahy, 橘 秀樹 'サウンドインテンシティ 理論と応用' オーム社, 1998
- [4] R.W.Guy and A.Abdou 'A Measurement System and Method to Investigate the Directional Characteristics of Sound Fields in Enclosures'
- [5] http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/tech_term/cf_fft/cf3.htm
- [6] 三上直樹 'デジタル信号処理の基礎' CQ 出版社, 1998