

境界音場制御の原理に基づく三次元音場再現システムとその逆フィルタ設計時の正則化パラメータ決定方法

李 容子[†] 伊勢 史郎^{††}

[†] 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
京都市西京区京都大学桂

^{††} 京都大学大学院工学研究科 / (独) 科学技術振興機構 CREST

E-mail: [†]{ae-yoko-lee,ise}@archi.kyoto-u.ac.jp

あらまし 近年、三次元の音場を保存・伝送するための技術である立体音響再生に関する研究がさかんに行われている。三次元音場再現の手法としては、受聴者の耳もとの音圧信号を制御する方法と受聴者の頭部の周囲に波面をつくり出し空間内の領域全体を制御する方法があげられる。我々は、任意の三次元原音場の領域内全体の音場を収録し再現室内の再現領域内に提示する境界音場制御の原理に基づく三次元音場再現システム (BoSC システム) を提案してきた。BoSC システムにおいては、原音場と再生音場で境界面上の音響物理量が等しくなるように逆フィルタを設計できるかどうか重要なポイントとなる。これまで実現してきた BoSC システムは逆フィルタを設計する際に正則化法を用いているが、正則化パラメータを合理的に決定する方法は提案されていない。本稿では、境界音場制御の原理に基づく三次元音場再現システムの逆フィルタ設計時の正則化パラメータを決定する方法を提案し、その定量的な評価を行う。

キーワード 三次元音場再現, 境界音場制御の原理, BoSC システム, 正則化パラメータ, 遺伝的アルゴリズム

The three-dimensional sound field reproduction system based on the boundary surface control principle and the determination of the regularization parameter on designing of the inverse filter

Yoko LEE[†] and Shiro ISE^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Kyoto University,
Kyoto daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8530, Japan

^{††} Graduate School of Engineering, Kyoto University / JST CREST

E-mail: [†]{ae-yoko-lee,ise}@archi.kyoto-u.ac.jp

Abstract Stereophonic sound reproduction technologies for recording and communicating three-dimensional sound field are enthusiastically studied in recent years. The Methods for three-dimensional sound field reproduction can be classified into two types: one is the method in which we control the sound pressure signals about the listener's ears, and another is that in which we control the entire area around the listener's head by making wave surface of sound. We proposed the three-dimensional sound field reproduction system based on the boundary surface control principle (BoSC system), which can record any three-dimensional original sound field and reproduce it in the sound reproduction room. In the BoSC system, design of the inverse filter to cancel the crosstalk from each speaker to each microphone and reverberation in the sound reproduction room is a material factor. However regularization method is used on designing the inverse filter for BoSC system, how to decide the optimum value of regularization parameter on designing the inverse filters for a reverberant room had not been proposed. In this paper, we report the three-dimensional sound reproduction system based on the boundary surface control principle and how to decide the regularization parameter on designing of the inverse filter.

Key words Three-dimensional sound field reproduction, Boundary surface control principle, BoSC system, Regularization parameter, Genetic algorithm

1. はじめに

近年、情報技術の発展により、大量の情報を伝送することが可能になった。最近では情報の量だけでなく質を重視し、視覚や聴覚だけでなく、触覚や嗅覚の情報を伝送する技術も盛んに研究されている。聴覚に関しては、音声情報のみを伝送するのではなく、三次元音場の空間情報を含めて収録・再生する技術が注目されている。その手法を大別すると、受聴者の耳もとの音圧を制御する手法と三次元波面を生成し、空間領域を制御する手法にわけられる。前者はバイノーラル [1] やトランスオーラル [2] などがあげられるが、これらの方法は、頭部伝達関数の個人差の問題や原理的に受聴者は頭部を動かさないという問題が含まれる。後者は波面合成法 [3]、境界音場制御の原理に基づく方法等があげられる。これらの手法は空間的に波面を作り出し領域を制御するため、受聴者の頭部伝達関数に依存しないが、システムの規模が大きくなるという問題があげられる。そこで我々は、受聴者の頭部の周囲に波面を合成するシステムで、原音場に制限がなく、また再現室として無響室等の大規模な装置を必用としないシステムを目指し、境界音場制御の原理に基づく三次元音場再現システム (BoSC システム [4]) を提案してきた。BoSC システムは、各制御点位置で原音場の音を高い精度で再生するための逆フィルタの設計が重要となる。これまで実現してきた BoSC システムは、逆フィルタ設計時に正則化法を用いているが、正則化パラメータの値は設計者が経験的に決めてきた。そこで、本稿では、多チャンネル逆フィルタを遺伝的アルゴリズムを用いて最適に決定する方法を提案する。また、提案手法を用いることにより、BoSC システムの再現精度が向上することを確認する。

2. BoSC システム

境界音場制御の原理 [5] によると、原場における制御領域 V と再現音場における制御領域 V' 、原音場における領域 V を囲む境界面 S と再現音場における制御領域 V' を囲む境界面 S' がそれぞれ合同であるとき、境界面 S 上の離散化された制御点における音圧と粒子速度と、境界面 S' 上の制御点における音圧と粒子速度を等しくすることができれば、領域 V 内の音場を領域 V' 内に再現することができる。そこで、原音場において境界面 S 上の制御点で収録した信号 $[X]$ に、フィルタ $[H]$ を畳み込んでスピーカに入力する。スピーカに入力された信号 $[H][X]$ には再現室内の伝達関数 $[M]$ が畳み込まれて再現音場における制御点で得られる信号 $[Y] = [M][H][X]$ となる。ここで $[X] = [Y]$ とすれば良いので、フィルタ $[H]$ は

$$[H] = [M]^{-1} \quad (1)$$

とすれば良い。

そこで、我々は、C80 フラレーンの各ノードの位置に制御点を配置したマイクロホンアレー (70ch) を用いて原音場を収録し、ドーム状にスピーカを配置したスピーカアレー (62ch) を設置した BoSC 再生室内で再現を行う BoSC システムを提案してきた。Fig. 1 に BoSC システムの構成を、Fig. 2 に BoSC シス

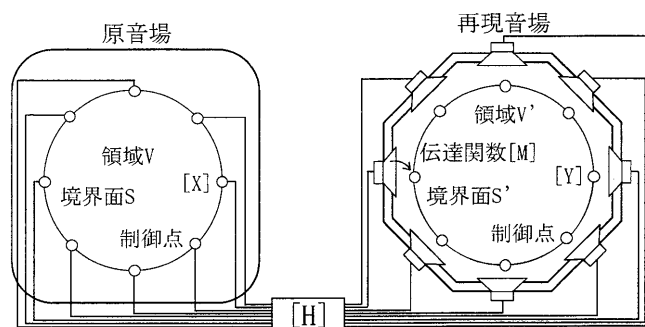


図 1 Configuration of BoSC system.

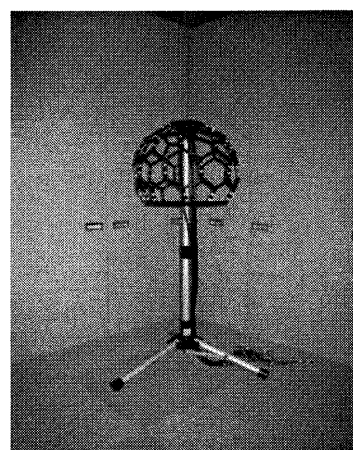


図 2 Microphone array for BoSC system.

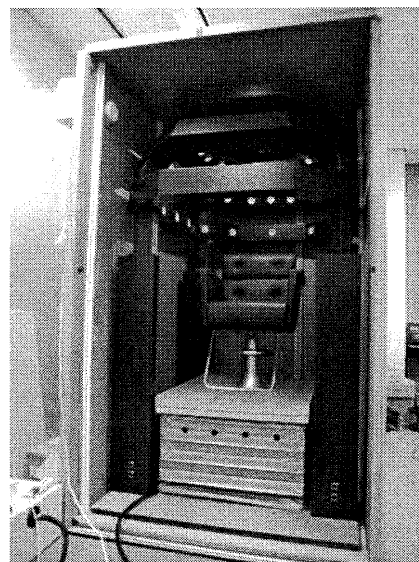


図 3 BoSC sound reproduction room.

テムの収録用マイクロホンアレーを、Fig. 3 に BoSC 再現室の様子を示す。C80 型マイクロホンアレーを用いて収録した原音場信号に、各スピーカと各制御点間のクロストークと BoSC 再生室内の反射音をキャンセルするフィルタを畳み込み、BoSC

再生室内に設置したスピーカアレーに入力する。入力された信号には、室内の伝達関数が畳み込まれ、BoSC 再生室内の制御点において原音場で収録した信号が再現される。これにより、原音場において制御点で囲まれた領域内の音場を収録し、再現室内において制御点で囲まれた領域内に原音場において収録した音場が再現される。

3. 正則化法による逆フィルタの設計

BoSC システムにおいては、正則化法 [6] を用いて逆フィルタの設計を行っている。疑似逆行列の計算式 (2) に含まれる β が正則化パラメータである。正則化パラメータを加えることにより零点を単位円上から遠くに移動させることができ [7]、逆フィルタを FIR フィルタとして設計することが可能になる。また、設計される逆フィルタの条件数が抑えられ、逆フィルタの誤差拡大率を抑えることが可能になる [8]。逆フィルタの計算は周波数領域で行っているが、その場合には周波数毎に正則化パラメータを決定する必要がある。正則化パラメータは 0 から無限大までの値を取り得るため、正則化パラメータを様々に変化させて再現音を聴きながら最適な値を決定していくことはほぼ不可能である。理論上は正則化パラメータを加えることにより逆システムによる再現精度は低下するが、実際は正則化パラメータを加えることによって、音響逆システムをロバストに設計することが可能になり、再現精度が向上する。しかし、正則化パラメータは全ての周波数において 0 から無限大の値を取り得るため、各周波数における全ての正則化パラメータの組合せにおける再現精度を計算し正則化パラメータを決定することは不可能である。そこで、最適な組合せを探索するために遺伝的アルゴリズム [9] を用いて計算時間の短縮をはかる。すなわち、正則化パラメータを加えることにより再現精度が高くなるような各周波数毎の正則化パラメータの組合せを遺伝的アルゴリズムを用いて探索し、最適な正則化パラメータを決定する方法を提案する。

$$[\hat{H}](\omega) = ([M(\omega)]^H [M(\omega)] + \beta[I])^{-1} [M(\omega)]^H \quad (2)$$

4. 遺伝的アルゴリズムによる正則化パラメータの探索

提案するアルゴリズムの流れを Fig. 4 に示す。1 ループ目の初期状態の正則化パラメータ加算回数 β_1 を全ての周波数において 0 とする。 β_1 に対し、遺伝的アルゴリズムを用いて正則化パラメータを 1 回加算するか否かを表す遺伝子 $\Delta\beta_1$ を周波数毎に決定する。2 ループ目の初期状態の正則化パラメータ加算回数 $\beta_2 = \beta_1 + \Delta\beta_1$ とし、更に遺伝的アルゴリズムを用いて $\Delta\beta_2$ を決定する。つまり、 $j-1$ ループ目までで決定した j ループ目の初期値 β_j に対し、遺伝的アルゴリズムを用いて正則化パラメータを 1 回加算するか否かを表す遺伝子 $\Delta\beta_j$ を周波数毎に決定していく。これを繰り返し、正則化パラメータの増分 $\Delta\beta_n$ が全ての周波数について 0 となったとき計算を終了し β_n が提案アルゴリズムにより決定した正則化パラメータ加算回数である。

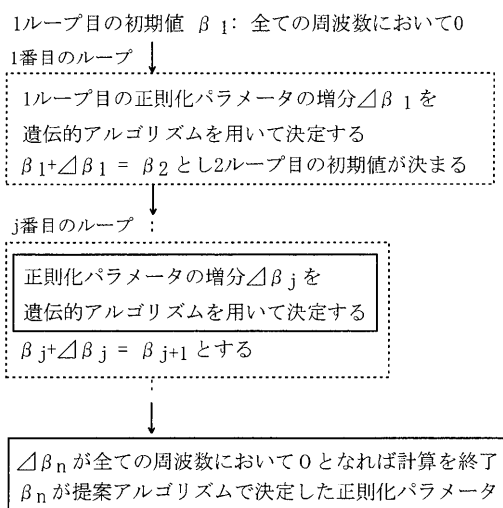


図4 Flow of algorithms for deciding regularization parameter.

4.1 j 番目のループ内の遺伝的アルゴリズム

(i) 遺伝子

1 オクターブバンドに対して正則化パラメータを加える場合は遺伝子を 1, 加えない場合は遺伝子を 0 とする。正則化パラメータの 1 回の加算における増分 $\beta_{\text{increment}}$ は全ての周波数において一定とする。例えば、遺伝子型が [10010011] であった場合、1, 4, 7, 8 バンド目は正則化パラメータの増分 $\beta_{\text{increment}}$ を加え、他のバンドは加えない。

(ii) 適合度の計算

再現精度を式 (3) を用いて計算し、各個体の適合度とする。ここで、 C_o はインパルスであり、 C_r は C_o を原音場における信号としたときに BoSC システムにより再現される信号 (振幅の正規化、遅延の補正を行った) である。

$$R = -10 \log_{10} \frac{\int_0^L |C_r(t) - C_o(t)|^2 dt}{\int_0^L |C_o(t)|^2 dt} \quad (3)$$

(iii) 収束判定

子集団の適合度の平均が親集団の適合度の平均より低くなることが 5 世代続けば収束したとみなす。

(iv) j 番目のループ

初期状態 ($j-1$ 回目のループまでで決定した正則化パラメータを加えた時) の逆フィルタの再現精度 (適合度) R_{j-1} を計算しておく。

手順 1. 1 世代目を発生させる。遺伝子型をランダムに決定し m 個の親を作成する。

手順 2. 集団内の m 個の各個体の適合度を計算する。

手順 3. 適合度の平均を求め、収束の判定を行う。1 世代目に対する収束の判定時には R_{j-1} と適合度の平均の大小を比較する。

手順 4. 集団の中で適合度の高い m 個体を個選択し、次世代を作成するための親とする。

手順 5. 次世代を作成する。親集団中の 2 個体の全ての組み合わせ mC_2 組の中からランダムに半数を選びだし、交叉確率 P_{cross} で交叉させる。突然変異確率 P_{mutation} で遺伝子座の一つを遺伝子が 0 ならば 1, 1 ならば 0 に突然変異させる。交叉も突然

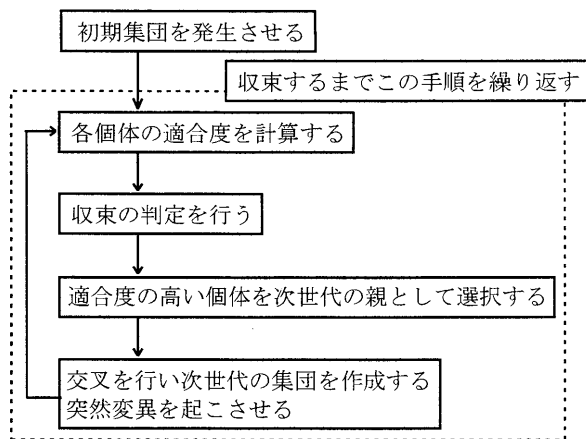


図5 Flow of Genetic algorithm.

変異も起こさせない場合は親の遺伝子型をそのまま次世代にコピーする。手順2から手順5を解 $\Delta\beta_j$ が決定するまで繰り返す。一般的な遺伝的アルゴリズムの流れをFig. 5に示す。

5. BoSC システムにおける正則化パラメータの決定

提案するアルゴリズムを BoSC システムに適用することで、提案アルゴリズムの妥当性の検証を行った。スピーカ 11 個、制御点 14 個をできるだけ幾何的に均等な配置になるように選出して、各スピーカから各制御点間のインパルス応答をサンプリング周波数 48000 Hz で収録を行った。逆フィルタの設計は周波数領域で行い、FFT ポイントは 4096 で計算を行った。正則化パラメータは 1 オクターブバンド毎に決定したため、遺伝子長は 8 であった。正則化パラメータの 1 回の加算における増分 $\beta_{\text{increment}}$ は 0.001 と 0.0005 の 2 種類を用いた。親集団の個体数は 24 とし、親集団中の 2 個体の全ての組み合わせ 276 組の中からランダムに 138 組を選び出し、交叉確率 $P_{\text{cross}} = 0.6$ で交叉させた。突然変異確率 $P_{\text{mutation}} = 0.01$ で遺伝子座の一つを遺伝子が 0 ならば 1, 1 ならば 0 に突然変異させた。交叉も突然変異も起こさせない場合は親の遺伝子型をそのまま次世代にコピーした。1 回目のループにおいて、初期状態の適応度 $R_0 = -1.97$ dB であった。各回のループにおいては、3 から 6 世代で収束し、解が求まった。

5.1 決定された正則化パラメータと再現精度

正則化パラメータの 1 回の加算における増分が 0.001 及び 0.0005 のいずれであった場合も提案アルゴリズムによって決定された正則化パラメータの結果はほぼ同じ値であった。提案アルゴリズムにより決定された正則化パラメータの値を Fig. 6 に示す。正則化パラメータが 0 の場合の再現精度は -1.97 dB、提案アルゴリズムによって決定された正則化パラメータ β_n を用いた (正則化パラメータの増分 $\beta_{\text{increment}} = 0.0005$) 場合の再現精度は 5.25 dB であった。Fig. 7 に正則化パラメータが 0 ($\beta_{\text{increment}} = 0$) の場合の、Fig. 8 に正則化パラメータ β_n を用いた場合の時間領域のフィルタをしめす。正則化パラメータが

0 の場合には低い周波数でフィルタ長が 4096 ではフィルタが収束していないが、正則化パラメータ β_n を用いた場合、フィルタがフィルタ長の 1/2 の範囲で収束し、FIR フィルタとして設計できている。Fig. 9 に正則化パラメータが 0 ($\beta_{\text{increment}} = 0$) の場合の、Fig. 10 に正則化パラメータ β_n を用いた場合の時間領域における再現音を示す。正則化パラメータが 0 の場合は再現音に低い周波数の成分がうまく制御できずに残っているが、正則化パラメータ β_n を用いた場合は低い周波数における雑音成分がうまく制御できていることが分かる。Fig. 11 に、周波数領域における再現音を示す。正則化パラメータが 0 の場合は 100 Hz 以下の周波数を持ち上げるフィルタが設計されている。また、600 Hz あたりにも大きなピークがある。100 Hz 以下の周波数の音は伝達関数測定時にスピーカから実際にはほとんど出力されておらず、零点となっていることが考えられる。正則化パラメータ β_n を用いた場合この 100 Hz 以下の周波数が抑えられていることが分かる。また、600 Hz あたりのピークも制御できている。

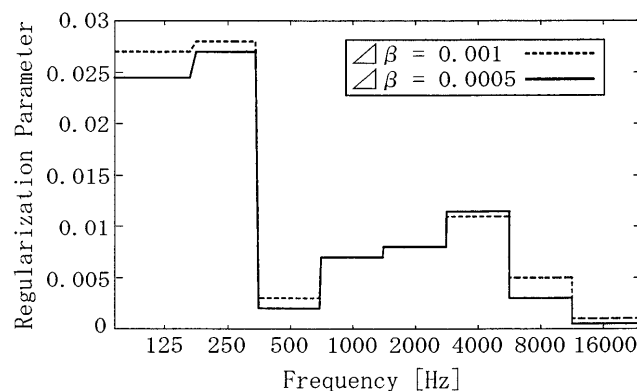


図6 Regularization Parameter.

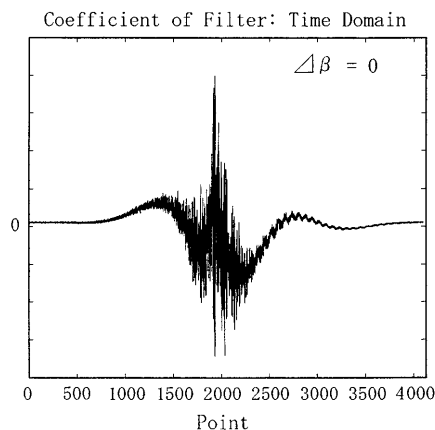


図7 Coefficient of Filter: time domain.

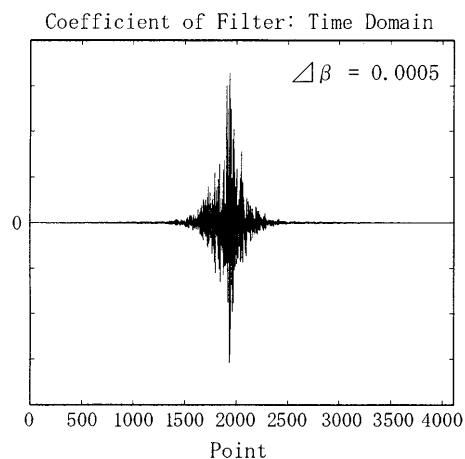


図 8 Coefficient of Filter: time domain.

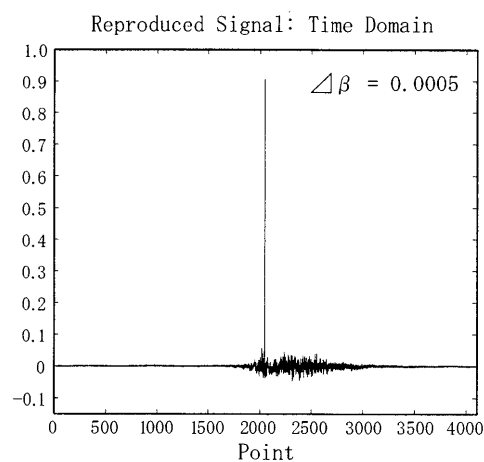


図 10 Reproduced signal: time domain.

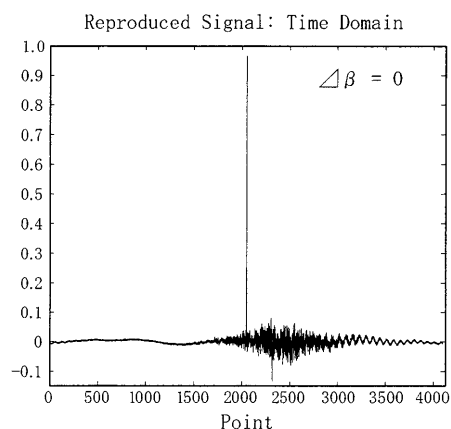


図 9 Reproduced signal: time domain.

6. ま と め

境界音場制御の原理に基づく三次元音場再現システムの逆フィルタを設計する際の最適な正則化パラメータを決定する方法を提案した。提案アルゴリズムは、遺伝的アルゴリズムを用いており、再現精度が高くなるように正則化パラメータを決定していく。それにより再生音場における伝達関数が零点となる周波数においても逆フィルタが収束し、伝達関数行列の線形独立性の低さにより逆フィルタの誤差拡大も抑えることが可能になる。本研究で得られた正則化パラメータの値の最大値は 0.028 程度であったが、同程度の条件化で正則化パラメータの取り得る値の全ての組合せを探索した場合には、提案手法の約 1.6×10^8 倍の時間を要することになり、全ての組合せを探索することはほぼ不可能である。また、この正則化パラメータ決定方法は境界音場制御の原理に基づく三次元音場再現システムの逆フィルタ設計のみならず、トランスオーラルのような他の三次元音場再現手法における逆フィルタ設計時、残響除去のための逆フィルタ設計時等にも有効な方法である。

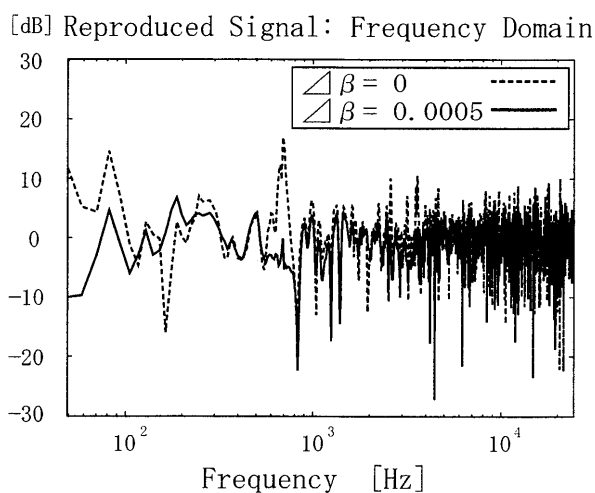


図 11 Reproduction accuracy: frequency domain.

文 献

- [1] 小山内隆, 西原明法, “頭部モデルを用いたトランスオーラルシステムの設計と評価,” IEICE technical report, 105(635), 69-74, 2006.
- [2] Hironori TOKUNO *et al.* IEICE TRANS. FUNDAMENTALS, VOL.E80-A, NO.5 MAY, 1997.
- [3] A.J.Berkhout, *et al.*, “Acoustic control by wave field synthesis,” J.Acoust.Soc.Am., 93, pp.2764-2778, 1993.
- [4] S.Enomoto, *et al.* “Three-dimensional sound field reproduction and recording system based on boundary surface control principle,” in Proceedings of the 14th International Conference on Auditory Display, 2008, France.
- [5] S.Ise, “A principle of sound field control based on the Kirchhoff-helmholts integral equation and the theory of inverse system,” Acta Acustica united with Acustica, vol.85, 75-87, 1999.
- [6] A.N.Tihonov, “Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method,” Soviet Math., vol.4, pp.1035-1038, 1963.
- [7] Hironori Tokuno, *et al.*, “Inverse filter of sound reproduction systems using regularization,” IEICE TRANS. FUNDAMENTALS, Vol.E80-A, No.5 MAY, 1997.

- [8] 日本電気音響学会編, “逆問題のコンピュータアナリシス,” コロナ社, pp. 36-37, 1991.
- [9] 伊庭斉志, “遺伝的アルゴリズムの基礎 - GA の謎を解く -,” オーム社, 1994.