

時間域 BIEM による音場解析結果の VR 空間での可聴化について

An auralization of the acoustic field computed with time domain BIEM in a VR space

石床 竜一¹⁾, 吉川 仁²⁾

Ryuichi ISHITOKO and Hitoshi YOSHIKAWA

- 1) 京都大学大学院情報学研究科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町, E-mail: ishitoko.ryuichi.52m@st.kyoto-u.ac.jp)
 2) 京都大学大学院情報学研究科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町, E-mail: yoshikawa.hitoshi.5u@kyoto-u.ac.jp)

An auralization of the computed acoustic field in a VR space is considered. In particular, the sound that a walking person hears in the VR space is considered. The boundary values of the acoustic problem are computed with time domain BIEM and stored previously and then the sound at the moving point is computed from the location of the moving point and the boundary values. The procedure of the auralization In the VR space using the game engine, Unity, is shown in this paper.

Key Words: auralization, VR, TD-BIEM

1. はじめに

本研究では 3 次元のヴァーチャルリアリティー空間 (VR 空間) 内の音場の再現と、VR 空間内を移動する人が聞く音を数値的に再現するための可聴化について考える (Fig.1)。樫山らの先行研究^(1, 2)では、幾何音響理論に基づき、音源から受音点までの距離と音の伝播経路から音圧パワーレベルを算出し、複数の伝播経路から算出される音圧レベルを加えることで受音点での音を作り出し、リアルタイム可聴化を実現している。しかし、様々な形状の複数の散乱体が存在するような音場では、音の伝播経路を見出すことは困難であり正確な音場の再現には限界があった。この問題を解決するために波動音響理論に基づく音場解析を考える。波動方程式の初期値境界値問題を解く数値解析手法は様々存在するが、本研究では、時間域の境界積分方程式法を用いる⁽³⁾。境界積分方程式法は波動解析に有効な手法といわれており、また、境界値を予め境界積分方程式法で計算してメモリーに記憶しておけば、領域内部の任意の点での音圧は、たたみ込み演算のみで計算できるという特徴を持つ。本研究では、こういった境界積分方程式法の利点を生かし、VR 空間内を歩行する人を模した移動する受音点におけるリアルタイム可視化、可聴化の実現を目的とする。

2. 時間域境界積分方程式法による音場解析

ある閉じた 3 次元領域の外部領域 D における、位置 \mathbf{x} ,

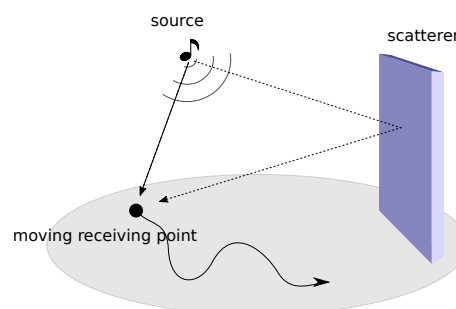


Fig. 1 VR 空間を移動する受音点

時刻 t での音圧 $u(\mathbf{x}, t)$ について次の初期値境界値問題を考える。

$$\ddot{u}(\mathbf{x}, t) - c^2 \Delta u(\mathbf{x}, t) = 0, \mathbf{x} \in D, t > 0 \quad (1)$$

$$u(\mathbf{x}, 0) = \dot{u}(\mathbf{x}, 0) = 0, \mathbf{x} \in D \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x} \text{ on } S, t > 0 \quad (3)$$

$$u(\mathbf{x}, t) \rightarrow u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t), |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (4)$$

ここに、 c は音速、 $u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$ は入射波、 $\bar{q}(\mathbf{x}, t)$ は既知関数、 S は D の境界である。また、 (\cdot) は $\frac{\partial}{\partial t}$ を、 $(\cdot)_{,i}$ は $\frac{\partial}{\partial x_i}$ を、 $\frac{\partial}{\partial n} = n_i(\mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial x_i}$ であり、 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ は $\mathbf{x} \in S$ における外向き単位法線ベクトルを表す。式 (1) ~ 式 (4) から得られる境界積分

方程式は次の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{u(\mathbf{x}, t)}{2} &= u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) + \int_S \int_0^t \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ &\quad - \int_S \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) ds dS \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 Γ は 3 次元波動方程式の基本解

$$\Gamma(\mathbf{x}, t) = \frac{\delta(t - |\mathbf{x}|/c)}{4\pi|\mathbf{x}|} \quad (6)$$

であり、 $\delta(t)$ は Dirac のデルタ関数である。式 (5) を数值的に計算するために、境界 S を境界要素 $S_j, j = 1, \dots, N$ に分割し、さらに境界量 $u(\mathbf{x}, t), \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$ を空間内挿関数 $M_S^j(\mathbf{x})$ と時間内挿関数 $M_T^m(t)$ を用いて離散化する。

$$- \mathbf{u}_n^{\text{in}} = \sum_{m=1}^n \mathbf{U}_{n-m+1} \mathbf{q}_m - \sum_{m=1}^n \mathbf{W}_{n-m+1} \mathbf{u}_m \quad (7)$$

$$\{\mathbf{u}_n^{\text{in}}\}_i := u^{\text{in}}(\mathbf{p}^i, n\Delta t) \quad (8)$$

$$\{\mathbf{u}_m\}_i := u(\mathbf{p}^i, m\Delta t) \quad (9)$$

$$\{\mathbf{q}_m\}_i := \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{p}^i, m\Delta t) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \{\mathbf{U}_{n-m+1}\}_{ij} \\ := \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\mathbf{p}^i - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \{\mathbf{W}_{n-m+1}\}_{ij} \\ := \int_S \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \Gamma}{\partial n_y}(\mathbf{p}^i - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、点 \mathbf{p}^j は境界要素 S_j の代表点で、 Δt は時間増分、 $\frac{\partial}{\partial n_y} = n_i(\mathbf{y}) \frac{\partial}{\partial y_i}$ である。この代数方程式 (7) を各時間ステップにおいて逐次的に解き境界値 $\mathbf{u}_m, \mathbf{q}_m, m = 1, \dots, N_T$ を得る。ここに、 N_T は時間ステップ数である。

境界値 $\mathbf{u}_m, \mathbf{q}_m, m = 1, \dots, N_T$ を用いることで、領域 D 内の任意の点 \mathbf{x} での時刻 $n\Delta t$ での値が次式で計算できる。

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, n\Delta t) &= u^{\text{in}}(\mathbf{x}, n\Delta t) \\ &\quad + \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} \{\mathbf{q}_m\}_j \\ &\quad \int_S \int_0^{n\Delta t} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS \\ &\quad - \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} \{\mathbf{u}_m\}_j \\ &\quad \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\partial \Gamma}{\partial n_y}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS \end{aligned} \quad (13)$$

なお、数値解析を行う上で、空間内挿関数 $M_S^j(\mathbf{x})$ を区分一定、時間内挿関数 $M_T^m(t)$ を区分線形とした。

3. 近似を用いた内点の音圧計算

本研究では、対象となる波動方程式の初期値境界値問題は時間域境界積分方程式法を用いて予め解いておき、全ての境界値は離散データとしてメモリに保存されているとする。その状態から、VR 空間内を移動する人が聞く音をリアルタイ

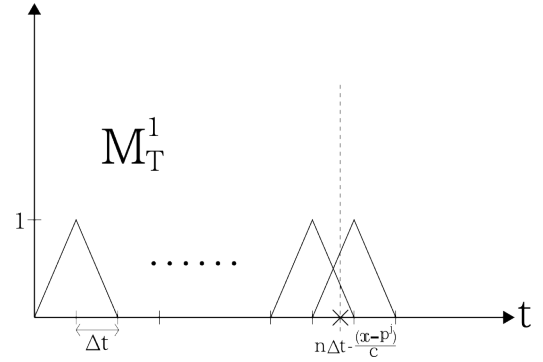


Fig. 2 時間内挿関数 $M_T^m(t)$

ムで作り出すことを目的とする。そのため、受音点 \mathbf{x} における音圧の計算に近似を施し計算を単純化する。内点計算 (式 (13)) の計算時間短縮のために次の近似を考える。

・式 (13) 右辺第 2 項について

時間積分を解析的に行い、空間積分は 1 点近似により計算する。

$$\begin{aligned} \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\delta(n\Delta t - s - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}{c})}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ \simeq \sum_{j=1}^N \frac{1}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|} \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{p}^j, n\Delta t - \tau_j) H(n\Delta t - \tau_j) |S_j|, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\tau_j = \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c} \quad (15)$$

ここに、 $H(t)$ はヘビサイド関数であり、 $|S_j|$ は境界要素 S_j の面積である。なお、境界値 $\frac{\partial u}{\partial n}$ は Δt の整数倍の時刻の離散データしか保持していないため、 $\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{p}^j, n\Delta t - \tau_j)$ は時刻 $(n - \text{int}(\tau_j/\Delta t))\Delta t$ と時刻 $(n + 1 - \text{int}(\tau_j/\Delta t))\Delta t$ との $\frac{\partial u}{\partial n}$ の値を線形内挿することで求める。

・式 (13) 右辺第 3 項について

デルタ関数の微分を含むため、区分線形の時間内挿関数 $M_T^m(t)$ を導入に、微分を時間内挿関数 $M_T^m(t)$ に移す。あとは、右辺第 2 項と同様である。

$$\begin{aligned} \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\partial}{\partial n_y} \left(\frac{\delta\left(n\Delta t - s - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}{c}\right)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \right) u(\mathbf{y}, s) ds dS \\ \simeq \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} -n_i(\mathbf{p}^j) |S_j| \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{M_T^m\left(n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c}\right)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|} u(\mathbf{y}, m\Delta t) \\ H\left(n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

なお、時間内挿関数 $M_T^m(t)$ として $2\Delta t$ のサポートを持つ区分線形関数を用いているため、Fig.2 に示すように式 (16) の添字 m についての総和において非ゼロの項は 2 項のみである。近似式 (14)、(16) を用いて、移動する内点 \mathbf{x} の各時間ステップ毎の音圧を計算する。

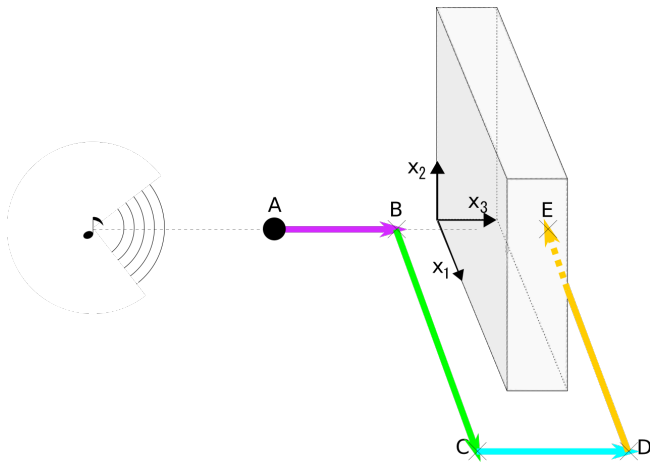


Fig. 3 受音点の移動経路図

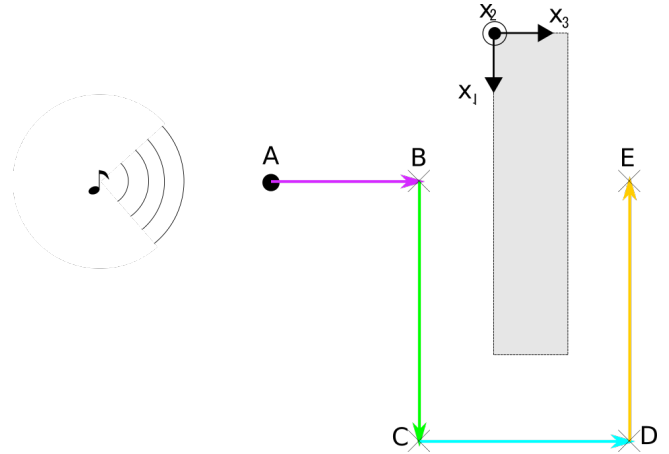


Fig. 4 上から見た受音点の移動経路図

4. 可視化・可聴化

4.1. 問題設定

本研究での数値計算に対する問題設定は以下の通りである。3次元領域上に、Fig.3, 4に示すような各辺がデカルト座標軸に平行な中心 $(0.25, 0.25, 0.075)$ [m] で、辺の長さが x_1, x_2, x_3 軸方向に $0.5, 0.5, 0.15$ [m] の壁と、点 $\mathbf{x}^s = (0.25, 0.25, -2)$ [m] に音源が存在する3次元領域を考える。壁の境界条件として完全反射 $\left(\frac{\partial u}{\partial n} = 0\right)$ を仮定し、一辺の長さが 0.05 [m] の三角形要素を用い境界を要素数 640 でメッシュ分割した。波速は $c = 340$ [m/sec] とし、音源は初期位置から動かないものとし、音源から入射波

$$u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} \frac{1 - \cos \frac{2\pi}{\Lambda} \left(t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|}{c} \right)}{4\pi |\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|}, & \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|}{c} < t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

を発生させた。ここに、 $\Lambda = 1.25 \times 10^{-3}$ [sec] とした。また、電話のサンプリング周波数である 8000 [Hz] を参考に $\Delta t = \frac{1}{8000} = 1.25 \times 10^{-4}$ [sec] とし、この初期値境界値問題の未知量である $u(\mathbf{x}, t) \in S, t > 0$ を予め境界積分方程式 (7) を用いて $16000 \text{ step}(2[\text{sec}])$ のデータを求めておく。

4.2. Unity を用いた可視化、可聴化について

3次元空間内で移動する点での視界と音の再現には、VRにも応用可能なゲームエンジンである Unity Version 2017.3.0f3 Personal を用いる⁽⁴⁾。可視化については、画面硬直低減のため描画フレーム 60 [fps] を基準とする可変フレームレート f [fps] を用いる。Unity で作られた空間の様子を Fig.5 に示す。受音点の移動速度は一般的な人の歩行速度を参考に 1.25 [m/sec] とし、各描画フレーム毎に受音点を $\frac{1.25}{f}$ [m] 移動させる。

リアルタイムでの可視化可聴化のために、ある描画フレームでの受音点位置において約 $\frac{8000}{f} \approx 133$ 個の音圧データを近似された内点計算式 (14), (16) を用いて境界データより求め、これら 133 個のデータを wav データに変換する。次の描画フレームでは受音点位置を更新し、その点での音圧デー

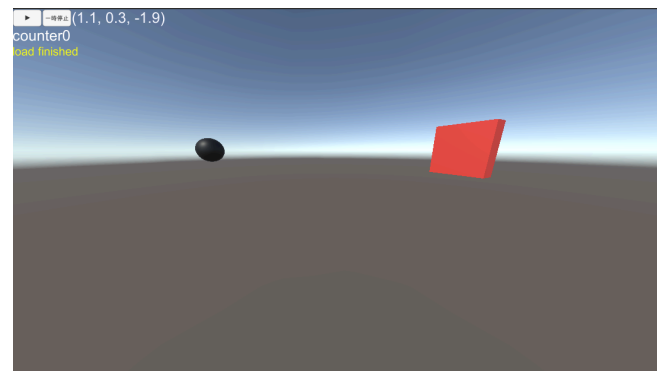


Fig. 5 Unity の出力画面 (黒球:音源位置、赤色:壁)

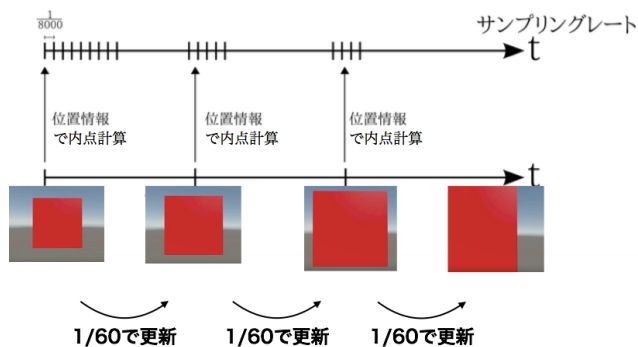


Fig. 6 サンプルレートと描画フレームレート

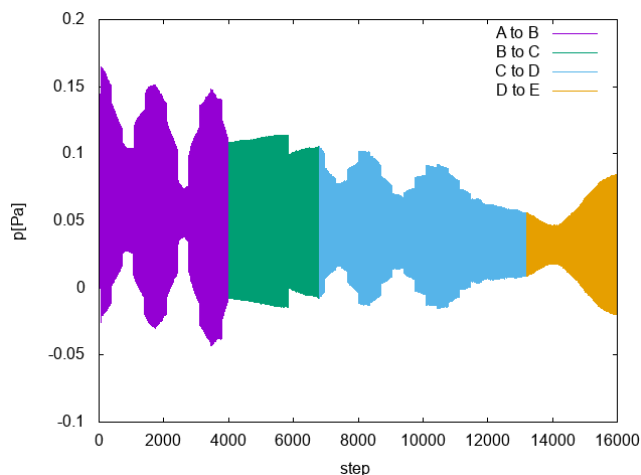


Fig. 7 壁がある場合の移動する受音点での音圧

タを約 133 個計算し wav データに変換する。この操作を繰り返すことで移動する受音点での音圧の時間変動を計算する (Fig.6)。

4.3. 数値結果

壁による音の散乱の影響を示すため、Fig.3, 4 に示す経路で受音点が移動した場合に観測される音圧を Fig.7 に図示する。比較のため、壁がない場合の音圧を Fig.8 に図示する。Fig.3, 4 中の各点の座標はそれぞれ A(0.25,0.25,-0.9), B(0.25,0.25,-0.4), C(0.6,0.25,-0.4), D(0.6,0.25,0.4), E(0.25,0.25,0.4)[m] である。

壁に近づくことによる音の歪みや、壁による遮音効果が再現されていることが Fig.7 より読み取れる。なお、数値計算は Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 v4 @ 3.60GHz のプロセッサ、NVIDIA GTX1050Ti の VGA の計算機で行った。Unity を用いて再現した VR 空間内を移動しながらのリアルタイム可聴化を目指したが、音圧のデータから wav データへの変換に時間がかかり、多少の音の遅れが生じた。今回 2 秒間の VR 空間内を移動する解析を行ったが、音が流れ終わるのが移動を終えてから約 0.4 秒後となった。また、複数個の wav データの繋ぎ目においてノイズが入る結果となった。

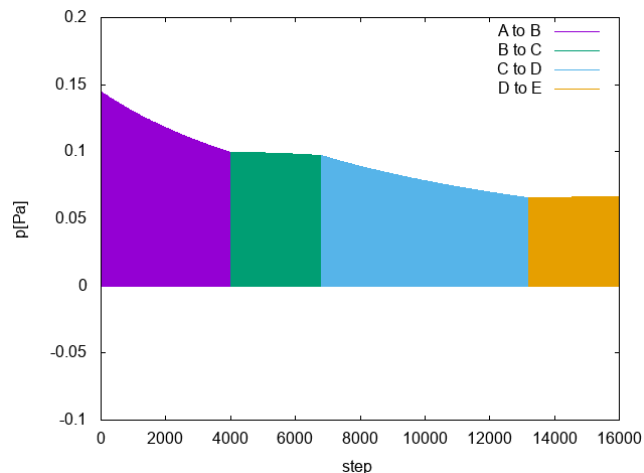


Fig. 8 壁がない場合の移動する受音点での音圧

5. 結論

本研究では時間域積分方程式法の内部計算を近似することで計算を短縮し、また Unity を用いて VR 空間内を移動する受音点での可視化・可聴化を実現した。しかし、リアルタイム可聴化の実現に至らなかった。内点計算の時間短縮はもちろんであるが、wav データの変換の回数やタイミング、またそれらの wav データをどのようにつなぎ合わせるか等が今後の課題である。今回の解析では、60[fps] 毎に位置情報を取得し内点計算を行ったが、受音点の移動速度を 1.25[m/sec] としているため、約 2[cm] 移動する毎に位置情報を取得している。リアルタイム可聴化に向けて、位置情報の取得を複数の描画フレーム毎にするなどの対応が考えられる。また、本解析では移動する受音点での音圧を計算したが、実際は人が聞く音を再現したい。人体による音の散乱や耳の構造なども考慮した解析が今後の課題である。

参考文献

- (1) 田近伸二, 櫻山和男, 志村正幸: VR 技術を用いた対話型道路交通騒音評価システムの構築, 応用力学論文集, 土木学会, 13(2010), pp.231-240.
- (2) 谷川将規, et al.: VR 技術を利用した道路交通騒音評価システムの立体音響化と現実感向上に関する研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 69.2(2013), pp.I155-I162.
- (3) 小林昭一 他: 波動解析と境界要素法, 京都大学学術出版会, (2000).
- (4) <https://unity3d.com/jp>