

時間域境界積分方程式法を用いた

バーチャル空間を移動する受音点でのリアルタイム可聴化について

A study on real-time auralization on a moving point in the virtual space using time domain BIEM

吉川 仁 (京大・情報) 鈴木 賢人 (京大・情報)

Hitoshi YOSHIKAWA, Kyoto University

Kento SUZUKI, Kyoto University

FAX:075-753-5870, E-mail: yoshikawa.hitoshi.5u@kyoto-u.ac.jp

A numerical computation of a sound that a character moving in the virtual space hears is considered. We solve the initial-boundary value problem of wave equation using time domain BIEM and store the computed boundary values in advance. We compute the sound of the moving point with the integral representation formula in real time using Unity3D.

1. 序論

Fig.1 に示すような3次元バーチャル空間における移動するキャラクターが聞く音の再現を考える。檜山ら¹⁾²⁾は幾何音響理論に基づく解析を行い、音響のパワーレベルを算出し、バーチャル空間でのリアルタイム可聴化を実現している。しかしながらこの手法では音の特性である波動性が失われてしまうことや、複雑な散乱体形状に対応しづらいといった問題点があり、正確な音場の再現には限界があった。石床ら³⁾は、この問題を解決すべく波動方程式を解くことにより波動音響理論に基づく数値解析を行い、複雑な散乱体形状に対応できるモデルを構築している。波動音場の数値解析手法として時間域の境界積分方程式法を用いている⁴⁾。境界積分方程式法は、領域の境界上での境界量を予め計算しておくことで、任意の内点での解は簡単なベクトル積演算を行うだけで求まるという特徴がある。この特徴を利用し、境界量とのベクトル積演算のみをリアルタイムで実行する実装を試みている。しかし、リアルタイム可聴化には至らず、更なる計算時間の短縮が必要とされている。そこで本論文では、リアルタイム可聴化のために、点音源から発生する基本となる音波に対する観測点での応答を時間域境界積分方程式法を用いて計算し、その応答と実際の点音源での音の波形を畳み込むことで計算時間の短縮を試みる。バーチャル空間の再現には複数のプラットフォームに対応するゲームエンジンであるUnityを用いる。

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 x 、時刻 t での音圧 $u(x, t)$ について次の初期値境界値問題を考える。簡単のため斉次 Neumann 境界条件を考える。

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial n}(x, t) = 0, \quad x \in S, \quad t > 0 \quad (3)$$

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

ここに、 c は音速、 $u^{\text{in}}(x, t)$ は入射波、 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、 $\frac{\partial}{\partial n} = n_i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}$ であり、 $n(x)$ は $x \in S$ における外向き単位法線ベクトルを表す。なお、入射波 $u^{\text{in}}(x, t)$ は1点の点音源 x^o から発信される音 $u^o(t)$

$$u^{\text{in}}(x, t) = \frac{u^o(t - r_o/c)}{4\pi r_o}, \quad r_o = |x^o - x| \quad (5)$$

とする。



Fig. 1 バーチャル空間を移動するキャラクター

3. 解の積分表現によるリアルタイム可聴化

点音源から発信される音 $u^o(t)$ を区分線形の内挿関数 $M_T^m(t)$ を用いて次のように近似する。

$$u^o(t) \simeq \sum_{m=1}^{N_T} u^o(m\Delta t) M_T^m(t) \quad (6)$$

ここに、 Δt は時間増分、 N_T は時間ステップ数である。なお、 $M_T^m(t)$ は時刻 $t = m\Delta t$ で1、その他の時刻 $t = n\Delta t, n \neq m$ でゼロとなる区分線形な関数である。

VR空間内を移動するキャラクター位置での音をリアルタイムで作り出すことが目的であるため、リアルタイムで行う計算量を減らす工夫を行う。まず、点音源から $M_T^1(t)$ が発信された時の解 $u^M(x, t)$ を求める。その後、次のように $u^o(m\Delta t)$ と畳み込むことで解 $u(x, t)$ を求める手順を踏む。

$$u(x, n\Delta t) = \sum_{m=1}^n u^o(m\Delta t) u^M(x, (n-m+1)\Delta t) \quad (7)$$

S 上の $u^M(x, t)$ は次の境界積分方程式を解き得られる⁴⁾。

$$\frac{1}{2} u^M(x, t) = M_T^1(t - r^o/c) - \int_{S_0} \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n_y}(x - y, t - s) u^M(y, s) ds dS \quad (8)$$

ここに、 Γ は3次元波動方程式の基本解であり、

$$\Gamma(x, t) = \frac{\delta(t - |x|/c)}{4\pi|x|} \quad (9)$$

であり、 $\delta(t)$ は Dirac のデルタ関数である。また、領域 D 内の任意の点 $\mathbf{x}$ での解は、

$$u^M(\mathbf{x}, t) = M_T^1(t - r^o/c) - \int_S \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u^M(\mathbf{y}, s) ds dS \quad (10)$$

で求まる。

なお、式 (8) で計算される境界量は移動するキャラクター位置には依存しないため、前もって計算して記憶しておく。キャラクターの移動と共に必要となるリアルタイムでの演算は式 (10) のみとする。さらに、計算時間短縮のため次のような近似を用いて内点計算 (式 (10)) を行う。式 (10) 右辺第 2 項は、デルタ関数の微分を含むため、区分線形の時間内挿 $M_T^m(t)$ を導入し、微分を時間内挿関数 $M_T^m(t)$ に移す。時間積分は解析的に、空間積分は 1 点近似により近似的に計算する。

$$\begin{aligned} & \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\partial}{\partial n_y} \left(\frac{\delta \left(n\Delta t - s - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}{c} \right)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \right) u^M(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & \simeq \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} -n_i(\mathbf{p}^j) |S_j| \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{M_T^m(n\Delta t - \tau_j)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|} \\ & \quad u^M(\mathbf{p}^j, m\Delta t) H \left(n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、

$$u^M(\mathbf{x}, t) \simeq \sum_{m=1}^{N_T} \sum_{j=1}^N u^M(\mathbf{p}^j, m\Delta t) M_S^j(\mathbf{x}) M_T^m(t) \quad (12)$$

であり、 $M_S^j(\mathbf{x})$ は空間内挿関数であり、ここでは区分一定の関数を用いる。また、 $\mathbf{p}^j, |S_j|$ はそれぞれ境界を N 個の境界要素に分割した時の j 番目の要素の代表点と面積である。

3.1 Unity を用いたリアルタイム可聴化

Fig.2 に示すような中心が $(0.25, 0.25, 0.075)$ m で、 x_1, x_2, x_3 軸方向に平行な辺の長さがそれぞれ 0.5, 0.5, 0.15 m の散乱体を持つ 3 次元無限領域を D とし、固定された点音源を $\mathbf{x}^o = (0.25, 0.25, -2)$ m とする。また、波速は $c = 340$ m/sec とする。点音源から発信する音は

$$u^o(t) = 1 - \cos \frac{2\pi}{\Lambda} t, \quad t > 0 \quad (13)$$

とする。ここに、 $\Lambda = 1.33 \times 10^{-3}$ sec とする。

数値解析では、散乱体表面は 640 個の三角形要素で分割し、サンプリング周波数を 12 kHz ($\Delta t = 8.33 \times 10^{-5}$ sec) とする。

また、バーチャル空間の構築には、Unity Version 2019.2.13f1 Personal を用いる⁵⁾を用いる。フレームレートは 30fps を用いる。Unity はサンプリング周波数が 48 kHz であり、音声出力する関数⁶⁾は $\frac{1028}{48000} = 0.021$ sec 毎に呼び出されるため、0.021 sec ごとにキャラクターの位置情報の取得更新を行い、内点計算式 (式 (10)) を用いて移動する内点の音場計算を行った。48 kHz の音の作成に必要なデータ数は 0.021 sec 毎に 1024 個であるが、本研究では 256 個のデータを計算し、線形補完により 1024 個分のデータを作成する。この操作を繰り返すことで、移動するキャラクターが聞く音を計算し出力する。

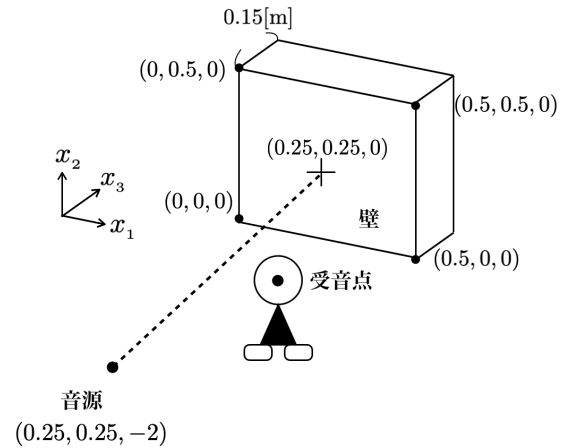


Fig. 2 解析領域

4. 結果・結論

キャラクターを VR 空間内を移動させ音の変化を聞いたところ、キャラクターの移動に伴いリアルタイムでその位置での音が再現できた。また、キャラクターを静止した状態での音場は、これまでの境界積分方程式方による数値解析結果と一致しており、壁の影響を受けた音場を表現できていた。今回の解析では散乱体を 1 つとしたためリアルタイム可聴化が可能であった。より多くの散乱体が存在する領域においては、波動音響理論と幾何音響理論を上手く使い分けなどの対応が、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, pp.231-240, 2010.
- 2) 谷川将規, 守屋陽平, 江嶋孝, 櫻山和男, 志村正幸: 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, pp.L155-L162, 2013.
- 3) 石床竜一, 吉川仁: 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, 計算数理工学論文集, 18, pp.81-81, 2018.
- 4) 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.
- 5) <https://unity3d.com/jp>
- 6) <https://techblog.kayac.com/dynamic-waveform-generation-without-audio-clip>