

# 時間域 BIEM を用いたゲームエンジンによる 3次元空間を移動する受音点のリアルタイム可聴化

## A REAL-TIME AURALIZATION ON A MOVING POINT IN 3D SPACE VIA A GAME ENGINE USING TIME DOMAIN BIEM

吉川 仁<sup>1)</sup>, 鈴木 賢人<sup>2)</sup>

Hitoshi YOSHIKAWA and Kento SUZUKI

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: yoshikawa.hitoshi.5u@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)

A numerical computation of a sound that a character moving in the 3D virtual space hears is considered. We consider wave acoustics for a computation of the accurate sound field in the 3D domain having scatterers. We solve the scattered wave problem of the incident fundamental wave 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 and the convolution between the numerical solution and the incident wave in real time using Unity3D.

**Key Words:** game sound, real-time auralization, BEM, BIEM, Unity

### 1. 序論

近年、バーチャルリアリティ機器の発達によりプレイヤー自身がバーチャル空間を動き回るゲームや、ゲームのキャラクターが3次元のオープンワールドを自由に移動できるゲームが数多く開発されている。ファーストパーソン・シューター(FPS)などの対戦シューティングゲームにおいては、「敵」の発砲音を利用して「敵」の位置情報を得るテクニックなども存在する<sup>(1)</sup>。バーチャル空間での小さな音を聞き取る必要があると同時に、バーチャル空間での散乱波動音場を正確に表現することが求められている<sup>(2)</sup>。そこで、本論文では、Fig.1 に示すような3次元バーチャル空間の音場を正確に数値的に作り出し、バーチャル空間内を移動するキャラクターが聞く音をリアルタイムに再現することを目的とする。

樫山ら<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>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。Raghuvanshiら<sup>(6)</sup>も音波の伝播経路を直達音と反射音に分けてリアルタイム可聴化を実現しているが、こちらも音の波動性を考慮しておらず、正確な音場を再現しているとは言い難い。

著者ら<sup>(7)</sup>はこれまでに、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きた。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た<sup>(8)</sup>。境界積分方程式法には、領域の境界上での境界量を予め計算しておけば、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た。しかし、キャラクターのバーチャル空間内の移動に合わせた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。なお、波動音響理論に基づいた数値解析によってリアルタイム可聴化を実現した研究例は、著者らの知る限り存在しない。

そこで、本論文では、リアルタイム可聴化の実現のために、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事前に計算し、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。なお、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<sup>(9)</sup>を用いる。従来法では、Unityを用いた可聴化において、数値データから音声ファイル(wav形式など)への変換に時間を要していた。そのため、本研究では、音声ファイルを作らずに音を鳴らす動的波形を形成する<sup>(10)</sup>。

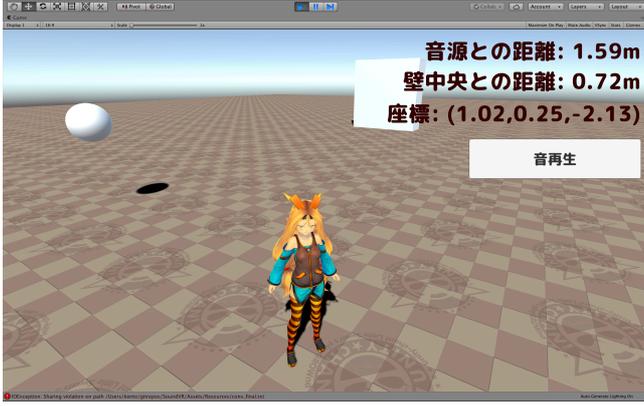


Fig. 1 The character, Unity-chan<sup>(3)</sup>, moving in the virtual space.

## 2. 時間域境界積分方程式による音場解析

本節では、数値解析に用いる時間域の境界積分方程式法<sup>(8)</sup>について説明する。

### 2.1. 波動方程式の初期値境界値問題

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

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

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

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in S_D, t > 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in S_N, t > 0 \quad (4)$$

$$u(\mathbf{x}, t) \rightarrow u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t), \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (5)$$

ここに、 $c$  は音速、 $u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$  は入射波、 $S$  は  $D$  の境界であり、境界  $S$  の一部で Dirichlet 境界条件が課せられる境界を  $S_D$ 、Neumann 境界条件が課せられる境界を  $S_N$  とする。なお、 $S = S_D \cup S_N$  である。また、 $(\cdot)_{,i}$  は空間に関する微分  $\frac{\partial}{\partial x_i}$  を表す。 $\frac{\partial}{\partial n} = n_i(\mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial x_i}$  であり、 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$  は  $\mathbf{x} \in S$  における領域  $D$  より外に向けた単位法線ベクトルを表す。 $\bar{u}(\mathbf{x}, t)$ 、 $\bar{q}(\mathbf{x}, t)$  は既知関数である。

本研究では、入射波  $u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$  として、静止した1点の点音源  $\mathbf{x}^o$  から発信される音  $u^o(t)$  を考える (Fig.2)。入射波  $u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$  は、波速  $c$  の球面波として次の様に与えられる。

$$u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) = \frac{u^o(t - r_o/c)}{4\pi r_o} \quad (6)$$

ここに、 $r_o$  は点音源  $\mathbf{x}^o$  と観測点  $\mathbf{x}$  との距離であり

$$r_o = |\mathbf{x}^o - \mathbf{x}| \quad (7)$$

である。

### 2.2. 境界積分方程式法による境界量の計算

波動方程式の初期値境界値問題 (式 (1) ~ (5)) を時間域の境界積分方程式法を用いて解くことを考える。初期値境界値

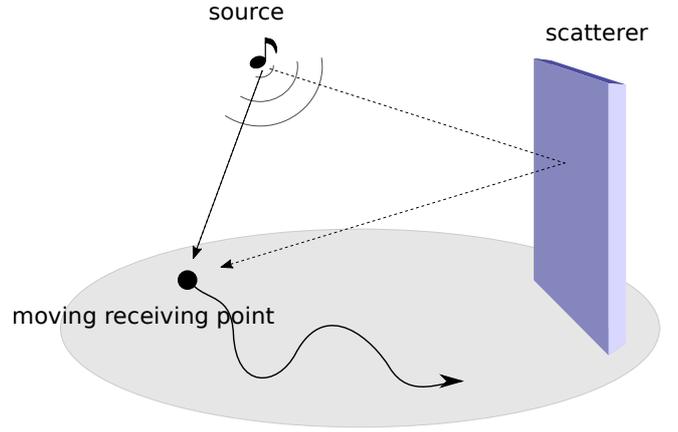


Fig. 2 The scattering sound field of the incident wave from the point source.

問題 (式 (1) ~ (5)) より得られる境界積分方程式は次の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u(\mathbf{x}, t) = & u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \\ & + \int_{S_0} \int_0^t \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & - \int_{S_0} \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n_y}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) ds dS, \end{aligned} \quad \mathbf{x} \in S, t > 0 \quad (8)$$

ここに、 $\Gamma$  は3次元波動方程式の基本解であり、

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

$\delta(t)$  は Dirac のデルタ関数である。境界積分方程式 (8) を未知な境界値である  $u(\mathbf{x}, t)$ 、 $\mathbf{x} \in S_N$  と  $\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$ 、 $\mathbf{x} \in S_D$  について解く。境界積分方程式法では、境界  $S$  を複数の境界要素  $S_j$ 、 $j = 1, \dots, N$  に分割し、境界積分方程式 (8) 右辺の積分を数値的に計算し、未知境界量を求める。

### 2.3. 解の積分表現を用いた内点計算

境界積分方程式を解くところで、境界  $S$  上の  $u(\mathbf{x}, t)$ 、 $\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$  が全て得られるため、領域  $D$  内の任意の点  $\mathbf{x}$  での解が、解の積分表現

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, t) = & u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \\ & + \int_{S_0} \int_0^t \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & - \int_{S_0} \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) ds dS \end{aligned} \quad \mathbf{x} \in D, t > 0 \quad (10)$$

より求まる。この計算は内点計算とも呼ばれ、境界積分方程式法では、式 (10) 右辺の境界積分も数値的に計算する。

## 3. 境界積分方程式法によるリアルタイム可聴化

本研究では、時刻  $t$  とともにバーチャル空間内を移動するキャラクター位置  $\mathbf{x}(t) \in D$  での音  $u(\mathbf{x}(t))$  をリアルタイムで作り出すことを目的とする。そのため、キャラクター位置

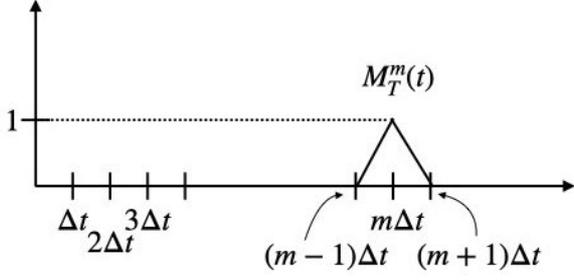


Fig. 3 The piecewise linear interpolation function  $M_T^m(t)$

に依存しない値については可能な限り予め計算をしておき、メモリにストアしておく。キャラクターの移動と共にリアルタイムで行う計算については、リアルタイムで音を作り出すために計算量を減らす工夫を行う。以下では、予め行う計算を「事前計算」、キャラクターの移動に伴い行う計算を「リアルタイム計算」と呼ぶことにする。

### 3.1. 事前計算

#### (1) 基本波に対する境界での応答の計算

点音源から発信される音  $u^o(t)$  を Fig.3 に示すような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。

$$u^o(t) \simeq \sum_{m=1}^{N_T} u^o(m\Delta t) M_T^m(t) \quad (11)$$

$$M_T^m(t) = \begin{cases} \frac{t}{\Delta t} - m + 1, & (m-1)\Delta t \leq t < m\Delta t, \\ \frac{t}{\Delta t} + m + 1, & m\Delta t \leq t < (m+1)\Delta t, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

ここに、 $\Delta t$  は時間増分であり一定であるとする。 $N_T$  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。

まず、点音源から基本波  $M_T^1(t)$  が発信されたときの次の初期値境界値問題を考える。

$$\ddot{u}^M(\mathbf{x}, t) - c^2 u_{,ii}^M(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in D, t > 0 \quad (13)$$

$$u^M(\mathbf{x}, 0) = \dot{u}^M(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \mathbf{x} \in D \quad (14)$$

$$u^M(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in S_D, t > 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in S_N, t > 0 \quad (16)$$

$$u^M(\mathbf{x}, t) \rightarrow M_T^1(t - r_o/c), \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (17)$$

なお、 $\Delta t$  は一定であり、また考えている問題は線形の問題であるため、解の重ね合わせの原理より式 (10) 右辺の時間積分を離散化して求まる数値解  $u(\mathbf{x}, n\Delta t)$  は、式 (13) ~ 式 (17) に示した初期値境界値問題の解  $u^M(\mathbf{x}, n\Delta t)$  を用いて、

次の畳み込みの形で計算できる。

$$u(\mathbf{x}, n\Delta t) = \sum_{m=1}^n u^o(m\Delta t) u^M(\mathbf{x}, (n-m+1)\Delta t) \quad (18)$$

メモリにストアするデータ量を少なくするために、サポートが短い関数である  $M_T^1$  を入射波とする問題の境界値を数値的に求めてメモリにストアする。

境界  $S$  上での  $u^M(\mathbf{x}, t)$ ,  $\frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{x}, t)$  を時間域の境界積分方程式法により数値的に求める。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u^M(\mathbf{x}, t) = & M_T^1(t - r_o/c) \\ & + \int_{S_0} \int_0^t \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & - \int_{S_0} \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n_y}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u^M(\mathbf{y}, s) ds dS \end{aligned} \quad (19)$$

時間域の境界積分方程式 (19) を数値的に解き、 $u^M(\mathbf{x}^j, n\Delta t)$ ,  $\frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{x}^j, n\Delta t)$ ,  $j = 1, \dots, N$  を得る。ここに、境界要素  $S_j$  の代表点 (境界要素を三角形要素とした場合は重心) を  $\mathbf{x}^j$  とした。なお、数値解析において、時間方向には区分線形の内挿関数を  $M_T^m(t)$ 、空間方向には区分一定の内挿関数  $M_S^j(\mathbf{x})$

$$M_S^j(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} \in S_j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

を用いる。

### 3.2. リアルタイム計算

#### (1) 移動する内点での内点計算

求めた境界値の数値解  $u^M(\mathbf{x}^j, n\Delta t)$ ,  $\frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{x}^j, n\Delta t)$  を用いて解の積分表現より領域  $D$  の任意の内点での基本波  $M_T^1(t)$  に対する応答を求める。

$$\begin{aligned} u^M(\mathbf{x}, t) = & M_T^1(t - r_o/c) \\ & + \int_{S_0} \int_0^t \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & - \int_{S_0} \int_0^t \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u^M(\mathbf{y}, s) ds dS \end{aligned} \quad (21)$$

ここでの、内点  $\mathbf{x}$  はバーチャル空間内を動くキャラクターの位置を表す。キャラクターはバーチャル空間内を時間と共に連続的に動くが、キャラクターが聞く音を作成する周期を  $\Delta\tau$  とし、音を作る上では  $\Delta\tau$  の間はキャラクター位置  $\mathbf{x}$  を固定し内点計算を行うこととする。つまり、 $\Delta\tau$  毎にキャラクター位置を更新し、 $\Delta\tau$  間の音を作成し、それらを繋ぎ合わせることにする。

リアルタイム可聴化を実現するためには  $\Delta\tau$  の間に、 $\Delta\tau$  間の音を計算する必要がある。このため、内点計算式 (21) 右辺の積分計算を次のように近似し計算時間の短縮を試みる (7)。

【式 (21) 右辺第 2 項について】

被積分関数は Dirac のデルタ関数であるため時間に関する積分は解析的に実行する。空間積分については 1 点近似によ

り計算する。

$$\begin{aligned} & \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\delta\left(n\Delta t - s - \frac{r}{c}\right)}{4\pi r} \frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & \simeq \sum_{j=1}^N \int_{S_j} \frac{1}{4\pi r} \frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{y}, n\Delta t - \tau_j) H(n\Delta t - \tau_j) dS \\ & \simeq \sum_{j=1}^N \frac{1}{4\pi |\mathbf{x} - \mathbf{x}^j|} \frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{x}^j, n\Delta t - \tau_j) H(n\Delta t - \tau_j) |S_j|, \quad (22) \end{aligned}$$

ここに、 $H(t)$  はヘビサイド関数であり、

$$r = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|, \quad (23)$$

$$\tau_j = \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}^j|}{c}, \quad (24)$$

$|S_j|$  は境界要素  $S_j$  の面積である。なお、 $t = n\Delta t$  とした。境界値  $\frac{\partial u^M}{\partial n}$  は  $\Delta t$  の整数倍の時刻の離散データしか保持していないため、 $\frac{\partial u^M}{\partial n}(\mathbf{x}^j, n\Delta t - \tau_j)$  は時刻  $\left\{n - \text{int}\left(\frac{\tau_j}{\Delta t}\right)\right\} \Delta t$  と時刻  $\left\{n + 1 - \text{int}\left(\frac{\tau_j}{\Delta t}\right)\right\} \Delta t$  との  $\frac{\partial u^M}{\partial n}$  の値を線形内挿し求める。

【式 (21) 右辺第 3 項について】

被積分関数に Dirac のデルタ関数の微分を含むため、区分線形の時間内挿関数  $M_T^m(t)$  を導入し、部分積分によりデルタ関数にかかっている微分を時間内挿関数  $M_T^m(t)$  に移す。微分を移すことで時間積分はデルタ関数の積分となり、積分は解析的に行える。空間積分は 1 点近似により計算する。

$$\begin{aligned} & \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\partial}{\partial n_y} \left( \frac{\delta\left(n\Delta t - s - \frac{r}{c}\right)}{4\pi r} \right) u^M(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & \simeq \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} -n_i(\mathbf{x}^j) |S_j| \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{M_T^m(n\Delta t - \tau_j)}{4\pi |\mathbf{x} - \mathbf{x}^j|} \\ & \quad u^M(\mathbf{p}^j, m\Delta t) H(n\Delta t - \tau_j) \quad (25) \end{aligned}$$

ここに、

$$u^M(\mathbf{x}, t) = \sum_{m=1}^{N_T} \sum_{j=1}^N u^M(\mathbf{x}^j, m\Delta t) M_S^j(\mathbf{x}) M_T^m(t) \quad (26)$$

とした。

## (2) 基本波の応答と入射波との畳み込み

内点計算式 (21) で求めた  $u^M(\mathbf{x}, n\Delta t)$  と  $u^o(m\Delta t)$ ,  $m = 1, \dots, N_T$  とを式 (18) により畳み込むことで、点音源からの入射波に対する散乱波動場である  $u(\mathbf{x}, n\Delta t)$  を求める。

## 4. 内点計算の精度検証

内点計算の近似式 (22), (25) の精度検証のため、次の解析解を持つ Neumann 境界値問題を解き、内点における解析解と近似解との誤差を求める。点音源を  $\mathbf{x}^o = (0.5, 0.5, 0.5)\text{m}$  とし、各辺がデカルト座標軸に平行で中心が  $\mathbf{x}^o$  の辺の長さ 1m の立方体の外部領域を考える。また、入射波、Neumann

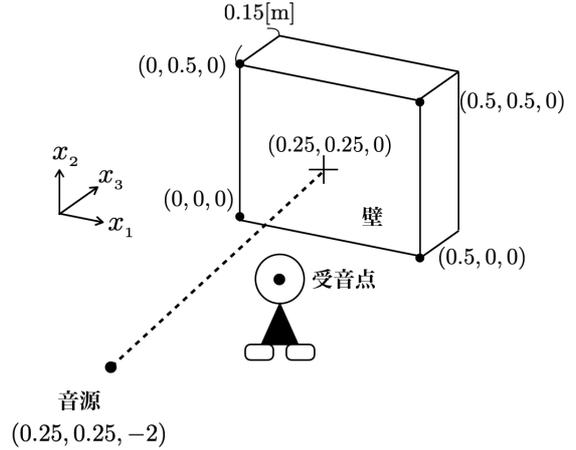


Fig. 4 The domain having the scatterer.

境界条件は下記の通りである。

$$u^o(t) = \left(1 - \cos \frac{2\pi}{\Lambda} t\right) H(t) \quad (27)$$

$$\bar{q}(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial u^o(t - r_o/c)}{\partial n} \quad (28)$$

ここに、 $\Lambda = 3 \times 10^{-3}\text{sec}$  とした。境界  $S$  をを 1 辺の長さが 0.1m の三角形要素に分割し、 $\Delta t = 3 \times 10^{-4}\text{sec}$ 、波速は  $c = 340\text{m/sec}$  とする。近似式 (22), (25) を用いて  $\mathbf{x} = (-0.5, 0.5, 0.5)\text{m}$  での内点を計算したところ、解析解と近似解との 2 ノルム誤差は、 $2.4 \times 10^{-2}$  となり許容できる誤差であった。

## 5. Unity を用いたリアルタイム可聴化のゲームアプリへの実装

Fig.4 に示すような中心が  $(0.25, 0.25, 0.075)\text{m}$  で、 $x_1, x_2, x_3$  軸方向に平行で、辺の長さがそれぞれ 0.5, 0.5, 0.15m の散乱体を持つ 3 次元無限領域を  $D$  とし、静止した点音源を  $\mathbf{x}^o = (0.25, 0.25, -2)\text{m}$  とする。点音源から発信する音  $u^o(t)$  を

$$u^o(t) = 1 - \cos \left( \frac{2\pi}{\Lambda} t \right), \quad t > 0 \quad (29)$$

とする。ここに、 $\Lambda = 1.33 \times 10^{-3}\text{sec}$  とする。また、境界条件は境界  $\partial D$  全てにおいて斉次 Neumann 条件とした。

時間域境界積分方程式法による数値解析では、散乱体表面を 640 個の三角形要素で分割する。また、サンプリング周波数を 12kHz ( $\Delta t = 8.33 \times 10^{-5}\text{sec}$ ) とする。

バーチャル空間の構築には、Unity Version 2019.2.13f1 Personal を用いる<sup>(9)</sup> 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 48kHz であり、音声出力する関数<sup>(10)</sup> は  $\Delta\tau = \frac{1028}{48000} = 0.021\text{sec}$  毎に呼び出されるため、0.021sec 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 (21)) を用いて移動する内点の音場計算を行った。48kHz の音の作成に必要なデータ数は 0.021sec 毎に 1024 個であるが、本研究では 256 個のデータ

## 参考文献

を計算し、線形補間により 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。また、参考資料<sup>(10)</sup>を元に、数値データを音声ファイルに変換せずに出力することで、変換に要する時間を省略する。

下記 URL に作成したゲームアプリ (Mac 版) をおいた。

<http://gpsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/yskw/SoundVR.app.zip>

Fig.1 はゲーム画面である、見た目に分かりやすいように、点音源を白い球体で表現している。

標準的なスペックのラップトップ PC (MacBook Air 1.7 GHz デュアルコア Intel Core i7) でアプリを起動し、キャラクターをゲーム内バーチャル空間で動かし、キャラクターの移動と共にキャラクターが聞く音がリアルタイムで再現できていることが確認できた。

## 6. 結果・結論

キャラクターをバーチャル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。キャラクターを散乱体である壁の周りを動かすことで、壁からの散乱波も正確に表現できていることが確認できた。しかし、0.021sec 間の音同士のつながり合わせが連続的ではなく、それが原因でノイズを含んだ音が鳴ってしまっている。音を連続的に繋げてノイズを無くすことは今後の課題である。

今回の解析では音源を静止している点音源 1 つとした。解いている問題は線形の問題であるため、音源が複数ある場合は同様の数値解析の結果を重ね合わせることで対応可能である。しかし、移動する音源を扱う場合は簡単では無い。移動する音源に対する応答は事前計算できないためである。移動音源への対応も今後の課題である。

また、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、キャラクターから近い散乱体からの音については波動音響理論を、遠方の散乱体からの音については幾何音響理論を上手く使い分けるなどの対応が必要となる。

## 謝辞

Unity でのゲームアプリ制作に協力頂いた川口功氏に厚く御礼を申し上げ、感謝の意を表します。

- (1) logicool プレスリリース  
<https://www.logicool.co.jp/ja-jp/press/press-releases/12907>
- (2) 岸 智也, 小島 健二, 中原 雅考, 羽入 敏樹, 星 和磨: テレビゲームにおけるサウンドエフェクト: インタラクティブリバーブの開発 (< 小特集 > 音楽制作を彩る音づくりの技術 “エフェクタ”), 日本音響学会誌, 68 巻 7 号 (2012), pp.362-368.
- (3) UNITY-CHAN! OFFICIAL WEBSITE  
<https://unity-chan.com>
- (4) 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, Vol. 13(2010), pp.231-240.
- (5) 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), Vol. 69, No. 2(2013), pp.L155-L162.
- (6) Raghuvanshi, N., Snyder, J., Mehra, R., Lin, M., Govindaraju, N.: Precomputed Wave Simulation for Real-Time Sound Propagation of Dynamic Sources in Complex Scenes, ACM Transactions on Graphics, Vol. 29, No. 4, Article 68(2010), pp.1-11.
- (7) 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, Vol. 18(2018), pp.81-81.
- (8) 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).
- (9) Unity のホームページ  
<https://unity3d.com/jp>
- (10) KAYAC engineers' blog  
<https://techblog.kayac.com/dynamic-waveform-generation-without-audio-clip>

