

境界積分方程式法を用いた 移動する受音点での可視化・可聴化について

京都大学大学院 非会員 石床 竜一
京都大学大学院 正会員 ○ 吉川 仁

1. はじめに

本報では3次元空間上での音場の再現と可聴化について考える。檜山らの先行研究 [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搬経路から音圧パワーレベルを算出し、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、音の伝搬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。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、境界量を予め境界積分方程式法で計算しておけば、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。本研究は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し、領域内部の音圧のたたみ込み演算の計算時間の短縮を試みる。

2. 時間域境界積分方程式による音場解析

(1) 対象とする問題

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。

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

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

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

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

ここに、 $u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$ は入射波、 $\bar{q}(\mathbf{x}, t)$ は既知関数、 S は D の境界である。

(2) 解の積分表現

式 (1)～式 (4) の初期値境界値問題の解は、3次元波動方程式の基本解 $\Gamma(\mathbf{x}, t) = \delta\left(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c}\right) / 4\pi|\mathbf{x}|$ を用いて

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

と表すことができる。ここに $\delta(t)$ は Dirac のデルタ関数である。式 (5) を数値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。

$$u(\mathbf{x}, t) \simeq \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} \{u_m\}_j M_S^j(\mathbf{x}) M_T^m(t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) \simeq \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} \{q_m\}_j M_S^j(\mathbf{x}) M_T^m(t) \quad (7)$$

境界量 $\mathbf{u}_m, \mathbf{q}_m, m = 1, \dots, N_T$ 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。

$$u(\mathbf{x}, n\Delta t) = u^{\text{in}}(\mathbf{x}, n\Delta t) + \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} \{q_m\}_j \int_S \int_0^{n\Delta t} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS - \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} \{u_m\}_j \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, n\Delta t - s) M_S^j(\mathbf{y}) M_T^m(s) ds dS \quad (8)$$

3. 移動する受音点での音圧の計算

本研究では、考えている波動方程式の初期値境界値問題は境界積分方程式法を用いて予め解き、全ての境界量は既知とする。つまり移動する受音点 $\mathbf{x}$ に対する内点計算式 (5) をリアルタイムで実行することが目的である。ここに、境界積分方程式法において、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。内点計算 (式 (8)) の計算時間短縮のために次の近似を考える。

・式 (5) 右辺第2項について

$$\int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\delta(n\Delta t - s - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}{c})}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) ds dS \simeq \sum_{j=1}^N \frac{1}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|} \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{p}^j, n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c}) H(n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c}) |S_j| \quad (9)$$

Key Words: time domain BIE analysis, acoustic simulation

〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 京都大学大学院 情報学研究科 先端数理科学専攻

ここに, $\frac{\partial u}{\partial n} \left(\mathbf{p}^j, n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c} \right)$ は時刻 $n\Delta t - \text{int} \left(\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c\Delta t} \right) \Delta t$ と時刻 $(n+1)\Delta t - \text{int} \left(\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c\Delta t} \right) \Delta t$ との $\frac{\partial u}{\partial n}$ の値を線形補間することで求める. また $H(t)$ 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.

・式(5) 右辺第3項について

$$\begin{aligned} & \int_S \int_0^{n\Delta t} \frac{\partial}{\partial n_y} \left(\frac{\delta \left(n\Delta t - s - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}{c} \right)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \right) u(\mathbf{y}, s) ds dS \\ & \simeq \sum_{\substack{1 \leq m \leq n \\ 1 \leq j \leq N}} -n_i(\mathbf{p}^j) |S_j| \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{M_T^m \left(n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c} \right)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|} u(\mathbf{y}, m\Delta t) \\ & H \left(n\Delta t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{p}^j|}{c} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

今回の解析では, 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線形関数を用いているため, 式(20)の添字 m についての総和は2項の足し算のみとなる. 近似式(9), (10)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.

4. 可視化・可聴化

(1) 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受音点での音の再現には, ゲームエンジンである Unity Version 2017.3.0f3 Personal を用いた. 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を用いた. これを f とする. 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/s] 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. 一方, 音圧の計算はサンプリング周波数 8000[Hz] とした.

(2) 問題設定

本研究での問題設定は以下の通りである. 3次元領域上に, 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 ($\frac{\partial u}{\partial n} = 0$) 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/s] 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

$$u^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} \frac{1 - \cos \frac{2\pi}{\Lambda} \left(t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|}{c} \right)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|}, & \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}^s|}{c} < t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

を発生させた. ここに, $\Lambda = 1.25 \times 10^{-3}$ [sec] とした. 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を用いて $\Delta t = \frac{1}{8000} = 1.25 \times 10^{-4}$ [sec] とし 16000step(2[sec]) のデータを求めておく.

(3) 数値結果

壁による音の散乱の影響を示すため, 図1に示すような経路で受音点が移動した場合に観測される音圧を図2に図示する. 図1上の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] とした.

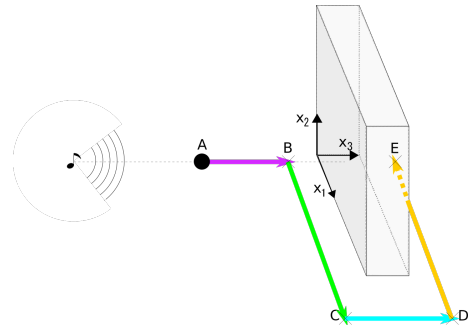


図-1 受音点の移動経路図

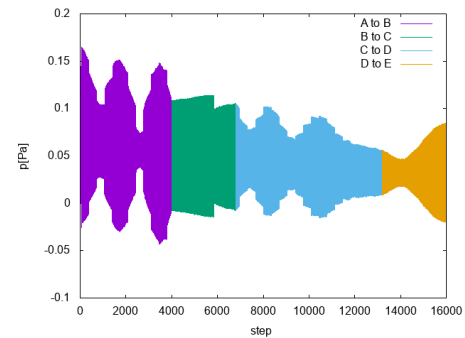


図-2 移動する受音点での音圧

5. 結論

本報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, 移動する受音点でのリアルタイム可視化・可聴化の実現を目的とした. 近似手法を用いることで十分な精度で内点計算を実行でき, Unity で可視化・可聴化を実現できた. 可視化・可聴化については講演で示す. しかし計算時間が十分に短縮されたとは言えず, リアルタイム化は実現に至らなかった. 今後は可視化, 可聴化を Unity 以外のソフトウェアを用いて行い, 速度面の再評価をする. 速度面の向上が見られればより複雑な構造を持つ散乱体の存在する空間での音圧変化を求めることを, 速度面の向上が見られない場合はより優れた近似手法の提案を課題としたい.

参考文献

- 1) 田近伸二; 檜山和男; 志村正幸. VR 技術を用いた対話型道路騒音評価システムの構築. 応用力学論文集, 土木学会, 2010, 13: 231-240.
- 2) 谷川将規, et al. VR 技術を利用した道路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), 2013, 69.2: I_155 - I_162.