

温度と風の影響を考慮した大気中の音の伝播シミュレーション

土橋 宜典¹ Doug James²

概要: リアルな仮想環境の構築はCGにおける重要な研究目的の一つである。そのためには、リアルな効果音の生成が重要な役割を果たす。本研究では、大気中の音波の伝播のシミュレーションに着目する。屋外における音波の伝播では、大気温度や風、湿度の空間的な変化に伴い、音速や大気の粘性が変化し、音波に屈折や減衰が生じる。そのため、音波は複雑な曲線経路に沿って伝播し、温度や湿度など大気の状態に応じて周波数ごとに異なった減衰が生じる。本稿では、これらの影響を考慮した効率的な伝播経路の計算方法を提案する。提案手法では、音波の伝播経路をフェルマーの原理に基づく最適化問題に置き換えて高速かつ正確に計算する。いくつかの実験により提案法の有効性を検証する。

Simulation of Atmospheric Sound Propagation Taking into Account Temperature and Wind Distribution

Abstract: Synthesizing a realistic virtual environment is an important research goal in computer graphics. An indispensable factor to achieve this goal is realistic sound effects. This paper focuses on the simulation of propagation of sound in the atmosphere, namely, atmospheric acoustic effects. Sound does not propagate along a straight line between a pair of points in the atmosphere; it follows a curved path due to the refraction caused by non-uniform distribution of temperature. Besides, a complicated, frequency-dependent attenuation of sound occurs depending on both the temperature and humidity distributions. We present a fast method for computing the curved path to render atmospheric acoustic effects efficiently.

1. はじめに

CG分野においては、画像だけでなく音の計算に関する研究も数多く行われている。音の計算に関する研究は、音源のモデリングと音波の伝播に関する研究に分類できる。本研究は後者に属し、なかでも大気中の音の伝播に着目する。特に、航空機等の効果音の生成を目的とする。

音波の伝播解析では、音は直進するものと仮定するケースが多い。しかし、屋外では、この仮定は成り立たない。なぜなら、大気温度や湿度、また、風速が場所によって異なるため、屈折が生じ、音波は複雑な曲線経路に沿って伝播する。同時に、大気の状態に応じた減衰が生じ、音波の周波数分布も変化する。さらに、本研究の目的である航空機等の効果音の生成においては、時間的に変化する複雑な大気の状態を考慮して、音源から観測点に到達する音波の

伝播経路を正確に求める必要がある。

大気特性を考慮した音波の伝播解析に関する研究は音響工学や騒音工学の分野で行われている [1]。しかし、これらの研究では、温度分布や風速分布は高度に比例するなど、単純なモデルが仮定されており、例えば、飛行機やヘリコプターなどの音をリアルに再現することには向いていない。

CG分野においては、大気音の伝播に関する研究はMoらが行っている [2][3][4]。これらの方法では、レイトレーシング法を拡張した方法が採用されている。しかし、大気状態が複雑かつ時間的に変化する場合には、レイトレーシング法によって音源と観測点を結ぶ音波の伝播経路を正確に求めることは難しい。また、レイトレーシング法によってドップラー効果を表現することは難しく、したがって、航空機等の効果音を再現することもまた難しい。

本研究では、フェルマーの原理(変分原理)に基づいて音波の伝播経路を求めることでこれらの問題を解決する。大気状態が複雑で時間的に変化する場合でも音源と観測点

¹ 北海道大学
Hokkaido University
² Stanford University

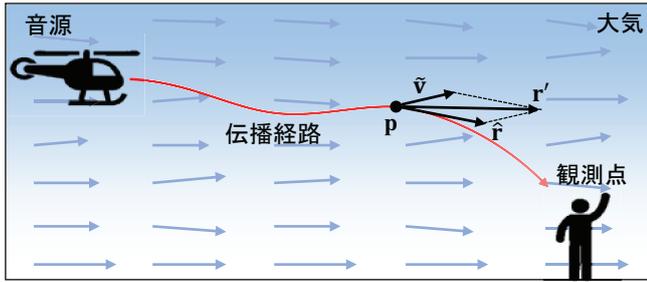


図 1 風を考慮した音波の伝播方向.

を結ぶ経路を正確に求めることができる。温度や風速分布の変化に伴う曲線経路を算出すると同時に、屈折にともなうコースティクスの効果と音波の減衰を合わせて計算し、リアルな効果音の生成を可能とする。音源と観測点を結ぶ経路を正確に計算できることから、ドップラー効果も表現できる。

本稿では、提案法の有効性を確認するため、2次元でのシミュレーションを用い、地面での反射は考慮しない。

2. 提案手法

提案手法は、大気の状態（温度・湿度・風速）を考慮して、航空機などの効果音を生成することである。以下の二つの課題を解いてこれを実現する。

- 音源から観測点までの音の遅延時間と減衰の計算
- 屈折による音のコースティクス効果の計算

以下、それぞれについて、説明する。

2.1 遅延時間と減衰の計算

音源から発せられた音波が受信点においてどのように観測されるかは、音波の伝達関数を求めることで計算できる。音波の伝達関数は、伝播経路に応じた音波の遅延時間と減衰により表現される。以下、伝播経路と減衰の計算方法について述べる。

音波の伝播経路は大気温度分布と風速分布に依存する。提案法では、フェルマーの原理に基づく最適化問題を解くことで伝播経路を求める。大気温度と速度を考慮した場合のフェルマーの原理は文献 [5] にて導出されており、ここでは、その結果のみを示す。大気中の一点 \mathbf{p} の音速を $c(\mathbf{p})$ 、大気速度を $\tilde{\mathbf{v}}(\mathbf{p})$ とする。 $\hat{\mathbf{r}}$ を波面に垂直な方向の単位ベクトル、 $\mathbf{v} = \tilde{\mathbf{v}}/c$ を音速で正規化した大気速度とする (図 1 参照)。このとき、音波が経路 S を通過するために掛かる時間 Δt_S は次式によって表される。

$$\Delta t_S = \int_S \frac{ds}{c(\mathbf{p}(s))q(\mathbf{p}(s))} \quad (1)$$

ただし、 q は次式で表される。

$$q = \mathbf{r}' \cdot \mathbf{v} + R \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{r}' はレイの伝播方向、 R は次式で与えられる。

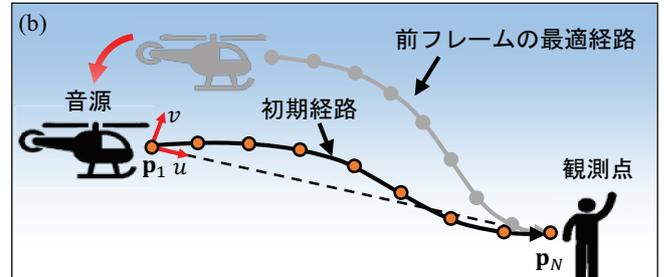
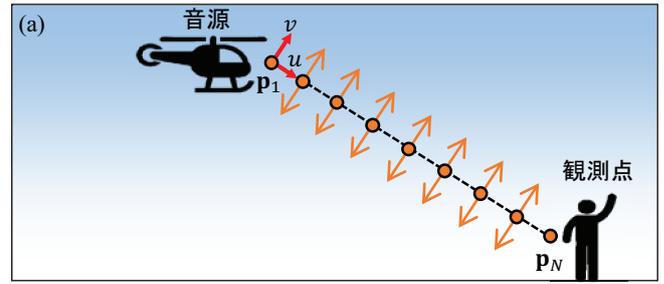


図 2 最適化による伝播経路の計算. (a) 局所座標系 uv の定義とサンプル点の生成. (b) 初期経路の生成.

$$R = [1 - |\mathbf{v}|^2 - (\mathbf{r}' \cdot \mathbf{v})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

音速 c については次式の近似表現を用いる。

$$c(\mathbf{p}) \approx 331.5 + 0.6T(\mathbf{p}) \quad (4)$$

$T(\mathbf{p})$ は点 \mathbf{p} の温度を表す。提案法は Δt_S を最小にする経路 $\mathbf{p}(s)$ を計算する。

伝播経路を点列 $\mathbf{p}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ により表し、 Δt を数値的に計算する。すなわち、

$$\begin{aligned} \Delta t_S &= E(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N) \\ &\equiv \sum_{i=1}^{N-1} \frac{|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i+1}|}{cq((\mathbf{p}_i + \mathbf{p}_{i+1})/2)} \end{aligned} \quad (5)$$

これらのサンプル点の位置は以下の最小化問題を解くことで決定する。

$$\min_{\mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \dots, \mathbf{p}_{N-1}} E(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N) \quad (6)$$

ただし、 \mathbf{p}_1 および \mathbf{p}_N は、それぞれ、音源位置と観測点位置に固定する。

最小化については、最急降下法を使用する。まず、音源と観測点を結ぶ線分上に等間隔に初期サンプル点を配置する (図 2(a) 参照)。そして、これらのサンプル点の位置を uv 座標を用いて表現する。 uv 座標の原点は音源位置、 u 軸は音源と観測点を結ぶ方向、 v 軸は u 軸に垂直な方向にとる。提案法では、各サンプル点の v 座標のみ最適する。最適化には最急降下法を用い、次式によって v 座標を更新する。

$$v_j^{(k+1)} = v_j^{(k)} - \beta \frac{\partial E}{\partial v_j}$$

ここで、 β は更新の速度を決定するパラメータである。次

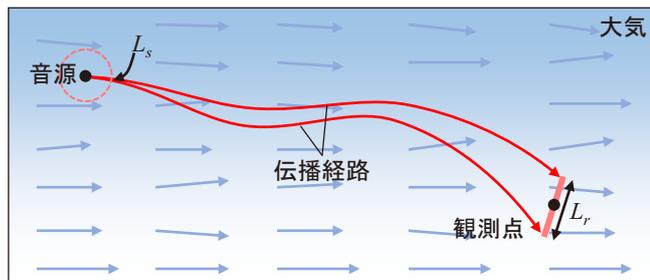


図 3 コースティクスの計算.

式を満たすまで更新処理を行う.

$$\sum_{j=2}^{N-1} \left(\beta \frac{\partial E}{\partial v_j} \right)^2 < \epsilon, \quad (7)$$

ϵ はユーザの指定する閾値である. E の微分については, 数値的に計算する.

一般に, 最急降下法は収束に時間がかかる点が問題となる. しかし, 音源や観測点, あるいは, 大気の状態の変化が微小である場合には, 最適経路はほとんど変化しない. そこで, 最適な経路をインクリメンタルに更新することで計算の効率化を図る. すなわち, あるフレームに対して得られている最適経路を次のフレームの最適化処理の初期値として用いる (図 2(b) 参照). 最急降下法における繰り返し回数を格段に削減することができる.

伝播経路 S が求まれば, 音波の減衰は次式によって表される.

$$g_S(f) = \exp \left(- \int_S \alpha(f, T(s), \tau_h(s)) ds \right) \quad (8)$$

ここで, f は音波の周波数である. T および τ_h は, それぞれ, 経路上の点 s における温度および湿度を表す. 減衰率 α は文献 [1] を参照していただきたい.

2.2 コースティクスの計算

屈折がない場合は, 音響エネルギーは音源からの距離に比例して減衰するが, 屈折がある場合は近傍の音響レイが集中し, 音響エネルギーが増大する. 大気の状態が時間的に変化する場合は, このような音響エネルギーの増減も時間的に変化する. 観測点での音の大きさも時間的に変化する. 提案法では, 隣接する二つの経路を求めることでこの増減の割合を計算する (図 3).

観測点位置を中心とし, 音源点方向に垂直な微小な長さ L_r の線分を生成する. この線分の両端と音源を結ぶ経路を前節の方法により生成する. この二つの経路と音源位置を中心とする単位円との交点によって決まる円弧の長さ L_s を求める. コースティクスによる音の増減は L_s/L_r によって計算される.

3. 音の生成

前節の方法により, 音源と観測点を結ぶ音波の伝播経路

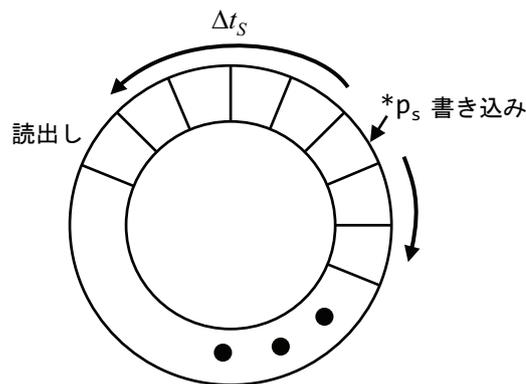


図 4 リングバッファによる遅延効果の表現.

に対応する遅延時間 Δt_S および減衰率 $g_S(f)$ が求まる. 音源で発せられる音を表す波形 $s(t)$ はユーザにより与えられるものとする. 遅延効果については, リングバッファを用いて表現し, 減衰効果については, FIR フィルタを用いて表現する. 以下, それぞれについて説明する.

リングバッファは, 配列の先頭と末尾の要素が繋いだ環状のバッファである (図 4 参照). リングバッファは配列同様, 高速なランダムアクセスが可能であり, 先頭および末尾への要素の追加・削除が一定時間で行えるという利点を持つ. ただし, 先頭と末尾以外への要素の挿入・削除には時間がかかる. リングバッファを用いれば遅延効果の表現は容易に実現できる. リングバッファに対して, 書き込み先の要素へのポインタ $*p_s$ を用意する. シミュレーションの各タイムステップにおいて, 音源波形から一サンプル取り出した値を $*p_s$ が指し示す要素に書き込み, ポインタを一つ進めておく. 同時に, $*p_s$ から遅延時間 Δt_S 分だけ引き算した要素位置の値をリングバッファから読み出し, 出力用の配列へと書き込む. これにより, 非常に簡単かつ高速に遅延効果を表現することができる.

次に, 減衰効果の表現方法について述べる. $g_S(f)$ は周波数空間での減衰特性を表している. $g_S(f)$ を離散化し, 離散時間逆フーリエ変換を施すことによって時間領域での離散インパルス応答表現に変換する. 大気の影響特性は, 一般に, 低域通過フィルタであり, その周波数特性は低次の周波数成分のみで十分表現できる. そこで, 指定された低次の周波数成分まで打ち切って時間領域の表現に変換する. この際, 打ち切り誤差によりリップルの発生を抑制するために, 周波数特性に窓関数を乗算した後に, 逆フーリエ変換する. 時間領域での離散インパルス応答を $g_k, (k = 0, 1, \dots, N-1)$ で表すと, サンプル時刻 i の出力音声 y_i は次式によって計算される.

$$y_i = \sum_{k=0}^{N-1} x_{i-k} g(k) \quad (9)$$

ただし, x_i はリングバッファから出力された遅延を考慮した値を格納した配列の値を表す.

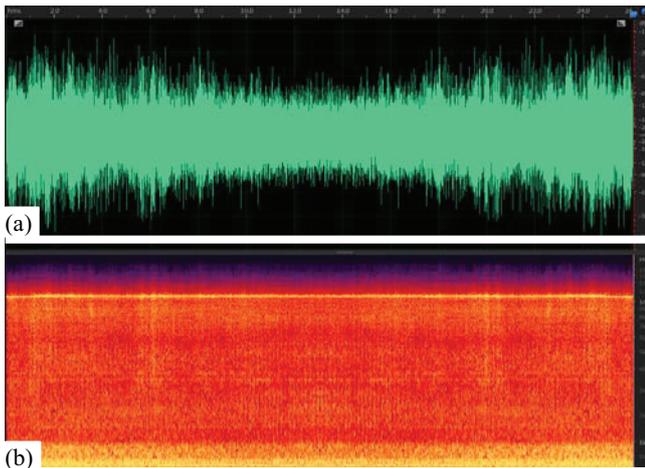


図 5 入力波形 (a) とそのスペクトログラム (b).

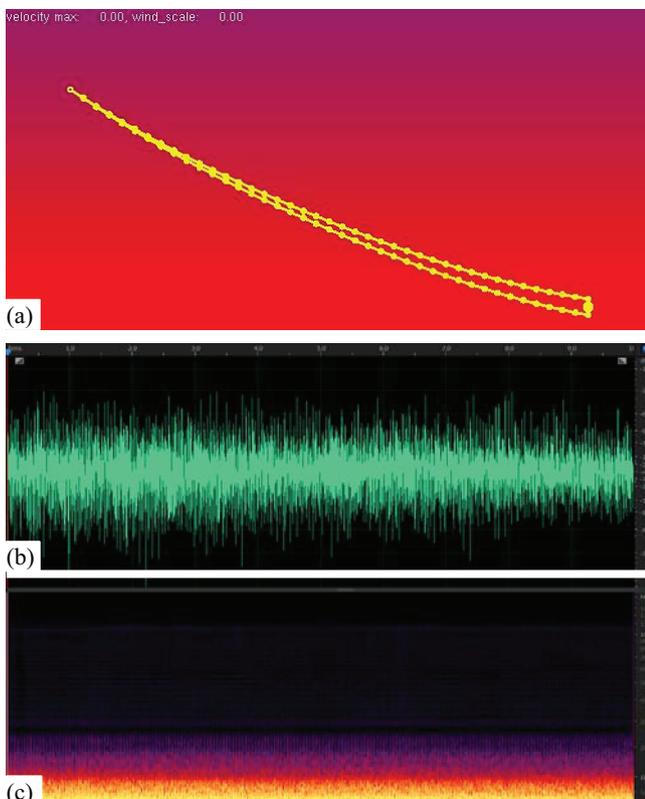


図 6 風の影響を考慮しない場合. 伝播経路 (a) と観測点での波形 (b) およびそのスペクトログラム (c).

4. 実験結果

提案法を用いた実験結果を示す. 温度分布は地面からの高度に応じて線形に変化するものとし, 風は Perlin Noise[6] を用いて生成した. 音源には図 5 に示すヘリコプタの駆動音を使用した. 図 5(a) は時間波形, 図 5(b) はそのスペクトログラムを示している.

図 6 に風の影響を考慮していない場合の結果を示す. 図 6(a) は提案法により計算した音波の伝播経路を示している. ただし, 500mx20m の範囲を示しているため, 鉛直方

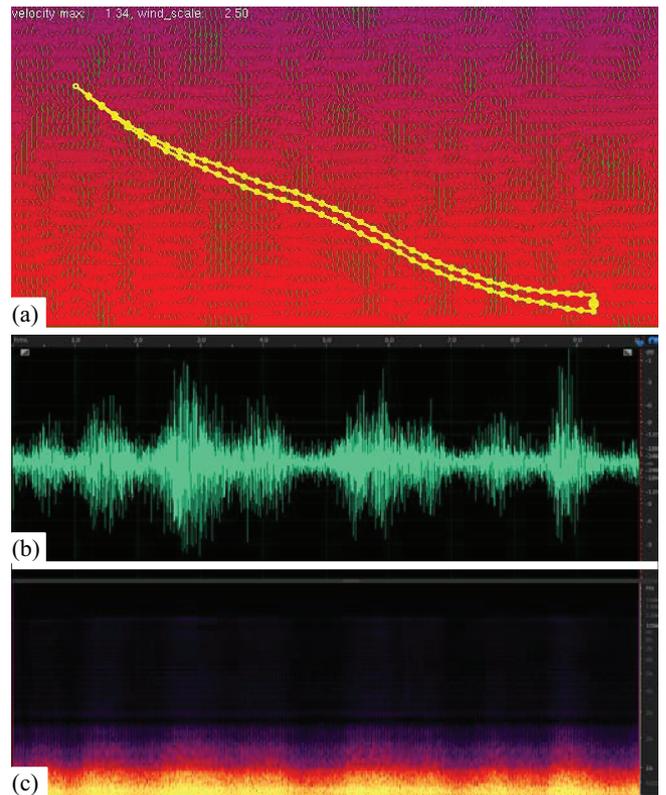


図 7 風の影響を考慮した場合. 伝播経路 (a) と観測点での波形 (b) およびそのスペクトログラム (c).

向は 25 倍拡大された図となっている. 温度分布に応じた音速の変化による屈折が生じることから, 放物線状の伝播経路が求まっている. 音源位置を固定し, ヘリコプタの駆動音を音源として用いた場合の観測点での時間波形およびそのスペクトログラムを図 6(b) および (c) に示している. 音源位置が変化しないため, 音量の変化のない単調な音となる. ただし, 大気による減衰が生じているため, 高周波成分が除去されていることが確認できる.

次に, 風の影響を考慮した場合の結果を図 7 に示す. 風の分布は動的に変化する. 図 7(a) はシミュレーションのある時刻での伝播経路を示している. 緑色の線分は風の色速度分布を表している. 図 7(a) 同様, 鉛直方向は 25 倍拡大されている. 図 7(b) および (c) は, それぞれ, 観測点での時間波形とそのスペクトログラムを示す. 音源情報は図 6 と同様である. 風の影響により伝播経路が複雑に変化し, それによってコースティクスの効果も時間的に変化する. その結果, 観測点での音圧が時間的に変化し, より複雑な表現となっている.

5. まとめと今後の課題

本稿では, 大気の色度と風の色分布を考慮した音波の伝播経路を効率的に計算する手法を提案した. 風の影響を考慮した場合のフェルマーの原理を示し, 最適化問題を解くことで効率的に伝播経路を計算する. また, 音源から観測点への二つの近接する経路を求めることで, 音波の屈折に

よって生じる音圧の変化を計算する方法を提案した。計算された経路から遅延時間と減衰率を求め、リングバッファと FIR フィルタを用いた波形の計算方法を示した。これらの方法によって、時々刻々と変化する大気の状態に応じたリアルな効果音を効率よく計算することが可能となる。

しかし、実際の航空機の飛行音と比較すると、独特のうねりが表現されていない。これについては、その原因もはっきりしておらず、今後、その解明と数値シミュレーション手法を開発したい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15H05924 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Erik M. Salomons. *Computational Atmospheric Acoustics*. Springer, 2001.
- [2] Qi Mo, Hengchin Yeh, and Dinesh Manocha. Tracing analytic ray curves for light and sound propagation in nonlinear media. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(11):2493–2506, 2016.
- [3] Qi Mo, Hengchin Yeh, Ming Lin, and Dinesh Manocha. Analytic ray curve tracing for outdoor sound propagation. *Applied Acoustics*, 104:142–151, 2016.
- [4] Qi Mo, Hengchin Yeh, Ming Lin, and Dinesh Manocha. Outdoor sound propagation with analytic ray curve tracing and gaussian beam. *Journal of Acoustical Society of America*, 141(3):2289, 2017.
- [5] Peter Uginčius. Ray acoustics and fermat’s principle in a moving inhomogeneous medium. *Journal of Acoustical Society of America*, 51(5B):1759–1763, 1970.
- [6] Ken Perlin. An image synthesizer. In *Proc. ACM SIG-GRAPH 1985*, pages 287–296, 1985.