

幾何音響理論に基づく高速鉄道騒音のリアルタイム可聴化システムの構築

中央大学理工学部都市環境学科 学部 4 年 増田 樹
Tatsuki Masuda

1. はじめに

リニア中央新幹線に代表される浮上式高速鉄道は、国家的プロジェクトとして本州を横断する形で建設が進められている。しかし、このような大規模プロジェクトは沿線住民の理解と合意形成なくしては成り立たない。特に、住民が抱える大きな不安の一つに「騒音問題」が挙げられる。

そこで本研究室では、騒音問題を工学的に評価し、効果的な対策の立案や住民への説明に資することを目的として、騒音シミュレーション技術の開発に取り組んできた。既往研究では、据え置き型の大型 VR システム (CAVE) を用いることで、没入感の高い騒音評価環境を構築してきた。しかし、このシステムは体験場所が限定されるという課題があった。

そこで近年、HMD(ヘッドマウントディスプレイ)である Meta Quest 3 を用いた携帯型騒音評価システムの基盤構築が進められてきた。しかし、Meta Quest 3 での高音圧騒音シミュレーションにおいて深刻な音割れ問題が発生し、実用化の大きな障壁となっていた。

本研究では、この音割れ問題の根本的解決に取り組み、実用的なシステムの構築を目的とする。これにより、騒音問題に対する合意形成プロセスへの貢献が期待される。

2. 浮上式高速鉄道騒音評価システム

2.1 システム概要

本システムは、HMD (ヘッドマウントディスプレイ) として Meta Quest 3 を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムである。従来の据え置き型大型 VR システム (CAVE) とは異なり、Meta Quest 3 を使用することで場所を選ばずに手軽に騒音体験が可能な環境を提供する。本研究では、このシステムにおける音割れ問題を解決し、実用的な高品質音響出力を実現した。

2.2 開発環境

本研究では、統合開発環境として Unity を使用し、開発キットとして XR Interaction Toolkit を使用した。デバイスには、HMD として Meta 社製の Meta Quest 3 を使用した。Unity のバージョンは、開発過程において音響処理の改善のため段階的に移行を実施した。

2.3 システム構成

本システムのフローチャートを図 1 に示す。入力データとして車両走行条件、音源の音響パワーレベル、構造物や軌道の形状が設定され、時間ループ内で音源位置と観測者位置が Meta Quest 3 の内蔵トラッキング機能から取得され、幾何音響理論に基づき騒音レベルが計算される。

可視化システムでは、Unity と XR Interaction Toolkit で VR 空間を構築し、観測者位置で音圧レベルを評価できる。可聴化システムでは、幾何音響理論を基に音圧を計算

し、Meta Quest 3 の内蔵スピーカーまたはヘッドフォンを通じて立体音響信号として出力される。

VR デバイスには図 1 に示す Meta Quest 3 を使用する。この装置は、4 つのアウトサイドイン・トラッキングカメラ、高解像度ディスプレイ (片目 2064 × 2208)、Snapdragon XR2 Gen 2 プロセッサ、空間オーディオスピーカーから構成される。Meta Quest 3 は完全ワイヤレスでの動作が可能であり、6DoF (6 自由度) トラッキングにより高精度な位置・姿勢検出を実現している。

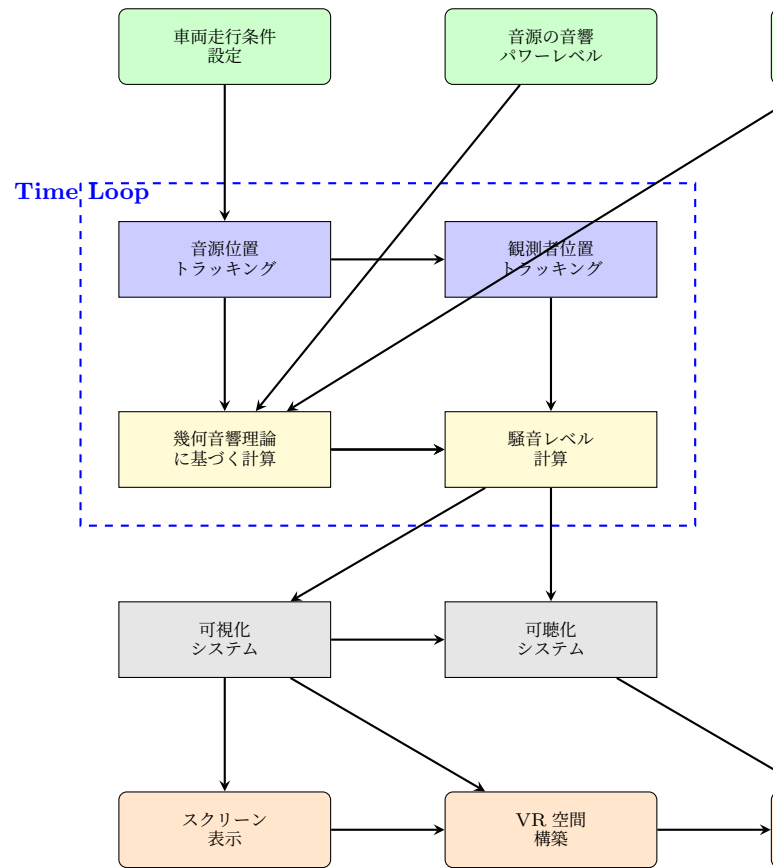


図 - 1 浮上式高速鉄道騒音評価システムの構成

2.4 幾何音響理論に基づく音響計算

本研究では、日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会の ASJ RTN-Model 2018 を用いて音響計算を行う。これは幾何音響理論に基づき、音源を半自由空間の点音源として扱うモデルである。

2.4.1 基本計算式

ASJ モデルにおいて、受音点での音圧レベル L_p (dB) から音源の音響パワーレベル L_W (dB) を算出する式は以下の通りである：

$$L_W = L_p + 20 \log_{10} r + 8 - \Delta L_{cor} \quad (1)$$

ここで r は音源から受音点の距離, ΔL_{cor} (dB) は回折や指向性による減衰の補正量である.

2.4.2 音圧レベルの合成

受音点での音源からの伝播音の圧力レベルの合成値 L_p (dB) は次式で表される:

$$L_p = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n (10^{L_{pi}/10}) \quad (2)$$

ここで i は合成する音源の数である.

2.4.3 物理現象の考慮

本システムでは以下の物理現象を考慮した音響計算を実装している:

- 距離減衰: $20 \log_{10}(r)$ による減衰
- 大気吸収: 空気中での音波エネルギー損失
- 回折効果: 遮音壁による音の回り込み (Maekawa チャートに基づく計算)
- ドップラー効果: $f' = f \cdot \frac{c}{c - v_s \cos \theta}$ による周波数変化

2.4.4 構造物音の考慮

走行時の車外騒音には, 空気圧変動による空力音と, 構造物振動による構造物音が影響を与える. 本システムでは, より現実的な騒音環境を再現するため, 構造物音を明示的に考慮したシミュレーションを実装している.

構造物音は, 走行中に発生する空力音に連動して移動する無指向性の仮想点音源として取り扱う. 各走行音源位置から一定距離下方 (本研究では 1.5m 下) に無指向性の仮想点音源を配置し, 構造物振動による音響寄与を再現する.

構造物音の音響パワーレベル $L_{W, str}$ は走行速度の関数として次式で表される:

$$L_{W, str} = a + 30 \log_{10} V \quad (3)$$

ここで, V は走行速度 (km/h) で, 定数 a は橋種ごとに決定される. 本研究では, コンクリート橋の箱桁構造を想定し定数 a は 35.9 を用いた. 走行速度 500km/h の場合, 仮想点音源の音響パワーレベルは 114.8dB となる.

この構造物音の考慮により, 単純な空力音のみのシミュレーションと比較して, より実際の高速鉄道走行時に近い複合的な音響環境を構築することが可能となった.

3. Meta Quest 3 における音響処理問題と解決手法

3.1 音割れ問題の発見と原因分析

本研究において最初に直面した最大の技術的課題は, Meta Quest 3 でのリニアモーターカー走行音シミュレーションにおいて深刻な音割れが発生することであった. この問題は, システムの実用性を著しく損なう重大な障害となっていた.

詳細な検証の結果, 以下の条件において音割れが顕著に発生することが判明した:

- リニアモーターカーから受音点までの距離が近距離 (5m 以内) の場合

音割れの原因

Unity の問題

図 - 2 音割れ問題の原因仮説分類と検証手法

- 車両編成数が多い場合 (特に 16 両編成時)
- 複数音源が同時に高音圧レベルで再生される状況

詳細な解析により, 音割れの根本原因が Unity の Audio Mixer における音圧レベル範囲制限 (-80dB~0dB) にあることを特定した. この制約により, 高音圧データ処理時にクリッピングが発生し, 音質劣化を引き起こしていた.

3.2 体系的解決手法の検討と効果検証

音割れの根本原因を解明するため, 原因仮説を体系的に分類し, 各仮説に対する検証手法を実施した. 図-2 に音割れ問題の原因仮説分類と検証結果を示す.

音割れ問題の原因仮説を「ハードウェア問題」と「ソフトウェア問題」の 2 つに大分類し, 各仮説に対して以下の 6 つの検証手法を実施した:

ハードウェア問題仮説の検証

手法 1: Meta Quest 3 本体音量調整デバイス本体の音量設定を段階的に低下させたが, 音割れの改善は認められなかった (効果: ×).

手法 3: Meta Quest Link PC 出力 PC 接続を通じた外部音響出力を検討したが, 最終的な音響処理が Unity の Audio Mixer を経由するため, 根本的な解決には至らなかった (効果: ×).

ソフトウェア問題仮説の検証

手法 2: 車両音源音圧レベル調整音源の音響パワーレベルを 120dB から 110dB へ変更により音割れは部分的に軽減されたが, 全体的な音圧が不十分となり, リアリティの観点から実用的ではなかった (効果: △).

手法 4: Audio Mixer 回避独自プログラム開発 Audio Mixer を使用しない独自の音源合成アルゴリズムを開発. 音圧レベル (dB) から線形スケール (0~1) への変換処理により, 各音源データの volume パラメータへ直接適用する

手法で、16 両編成車両による近距離シミュレーションにおいて音割れの大幅な改善を確認した（効果：○暫定的解決）。

手法 5：OSC 通信外部デバイス連携 UDP 通信による外部音響デバイスとの連携を検討段階として位置づけた（効果：？検討段階）。

手法 6：Unity 移行 Unity エンジンのバージョン移行により音割れ問題が根本的に解決された（効果：◎根本的解決）。

この検証結果から、音割れ問題の原因は「ソフトウェア問題」であり、特に Unity 2023 年版で実装された AAudio ドライバによる根本的改善が決定的な解決策であることが判明した。

3.3 Unity 移行による根本的解決

多様な対処法を検討した結果、最終的に Unity エンジンのバージョン移行により音割れ問題が根本的に解決された。Unity 2021.2.19f1 から Unity 6000 への段階的移行を実施し、特に Unity 2023 年版で実装された AAudio ドライバが決定的な改善をもたらした。

従来の OpenSL ES アーキテクチャと比較して、AAudio ドライバは以下の技術的優位性を提供した：

- **バッファオーバーフロー防止**：高音圧データ処理時の安定性向上
- **ハードウェア直接制御**：中間層を排除した効率的データ転送
- **低レイテンシ処理**：リアルタイム音響シミュレーションに最適化
- **マルチソース対応**：複数音源の同時高品質再生

Unity 6000 への移行完了後、従来問題となっていた全ての条件（16 両編成・近距離 5m・高音圧レベル）において音割れが完全に解消された。これにより、Audio Mixer 回避や OSC 通信等の複雑な回避策が全て不要となり、シンプルで安定したシステム構成を実現した。

4. おわりに

本研究では、Meta Quest 3 を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムにおける深刻な音割れ問題の根本的解決に取り組み、実用的な高品質 VR 騒音体験システムの構築を実現した。

解析結果として、音割れ問題の根本原因が Unity の Audio Mixer 制約にあることを特定し、5 つの対策手法を体系的に検証した結果、Unity 2021 から 6000 への段階的バージョン移行により問題が完全に解決された。主な要因は 2023 年版で導入された AAudio ドライバによるオーディオ処理の根本的改善と考えられる。

また、本研究により以下の成果が得られた：

- Unity 2023 年版 AAudio ドライバにより 16 両編成・近距離（5m）での安定した高音圧シミュレーションが実現された
- 複雑な回避策（Audio Mixer 回避、OSC 通信等）が不要となり、シンプルで堅牢なシステム構成を確立した

- 幾何音響理論に基づく統合的音響計算エンジン（距離減衰、大気吸収、回折効果、ドップラー効果、構造物音）の実装が完了した
- JR 東海との産学連携による 6 回の技術報告会を通じてシステムの実用性が検証された

本システムは、リニア中央新幹線等の大規模インフラプロジェクトにおける騒音影響の事前評価と住民合意形成において重要な役割を果たすことが期待される。

今後は、Mixed Reality 技術の導入による現実環境との重畳表示、多様な車両編成・運行シナリオへの対応拡張、さらなる音響計算精度の向上等により、実用性の更なる向上を図る予定である。

参考文献

参考文献

- 1) 西航平, 宮内暖季, 樫山和男：VR 技術を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムの高精度化, 第 51 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, VII-15, 2024.
- 2) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル”ASJ RTN-Model 2023”, 日本音響学会誌, 2023.