

II-13 VR 技術を用いた道路交通騒音評価システムの構築

Development of a Road Traffic Noise Estimation System
Using Virtual Reality Technology田近伸二¹・樫山和男²・志村正幸³

Tajika Shinji, Kashiya Kazuo, Shimura Masayuki

抄録：本論文では、道路交通騒音の予測結果を VR 空間において映像と音を用いて観察者に提示するシステムを提案する。具体的には、自動車の動きを CG アニメーション化し、その動きに合わせて幾何音響理論に基づき観察者の聞く道路交通騒音を計算し、それを聴覚情報として再現して、没入型投影技術に基づき構築した VR 空間において観察者に提示するものである。また、VR 空間内で道路の周辺環境や自動車の走行条件を簡便に変更することを可能にするためのインターフェイスを作成した。なお、道路交通騒音の計算結果と、VR 空間に出力される音の大きさを一致させるために騒音計を用いた実測に基づくキャリブレーションを行った。

キーワード：道路交通騒音、幾何音響理論、バーチャルリアリティ

Keywords : road traffic noise, geometric acoustic theory, virtual reality

1. はじめに

道路交通騒音は、心理的不快感や睡眠障害などの影響を人体に及ぼす可能性があるため、道路や遮音壁の設計を行う際にその大きさを考慮する必要がある。近年、道路交通騒音を予測するために、波動音響理論や幾何音響理論に基づく数値シミュレーションが行われており、それらの結果は CG（コンピュータグラフィックス）を用いて可視化されるのが一般的である。しかしながら、そのようにして提示される情報は視覚情報のみであり、実際の現象のように聴覚情報の提示が行われないため、騒音の予測結果を直感的に把握することは困難である。計画・設計段階においては、計算結果を観察者がその場所で聞く音を映像（視覚情報）ではなく音（聴覚情報）として再現することは、計画・設計者及び住民間の合意形成を得るためにも重要である。

聴覚情報を用いて道路交通騒音を表現しようとする既往の研究に、永野ら¹⁾の研究がある。これは、録画・録音したビデオを再生し、その再生レベルを操作することにより、騒音を体感できるシステムである。一方、蒔苗ら²⁾は交通流シミュレーションと連動して騒音を体感できるシミュレータの開発を行った。しかしながら、様々な条件下における道路交通騒音の聴覚情報と、現実のように実スケールでか

つ立体視に基づく視覚情報を、同時に観察者に提示できるようなシステムの構築は行われていない。

そこで本研究では、道路交通騒音の予測結果を、VR（Virtual Reality）空間において音と映像を用いて提示することが可能なシステムの構築を試みる。具体的には、没入型投影技術³⁾に基づき構築した VR 空間において、幾何音響理論に基づき予測した道路交通騒音の結果、及び自動車の CG アニメーションを同期をとり同時に提示する。また、道路の周辺環境や自動車の走行条件を観察者が変更できるようにするために、VR 空間内にインターフェイスを表示する機能を作成した。なお、VR 空間で提示される聴覚情報と騒音の予測結果を一致させるために、騒音計を用いた実測に基づくキャリブレーションを行った。

2. VR 技術を用いた道路交通騒音評価システム

図-1 に本システムのイメージ図を示す。本システムは、没入型投影技術に基づき構築した VR 空間内で、自動車の CG アニメーションと、アニメーションに同期した自動車騒音の聴覚情報を観察者に提示するものである。本システムは以下の3つの特徴を有している。

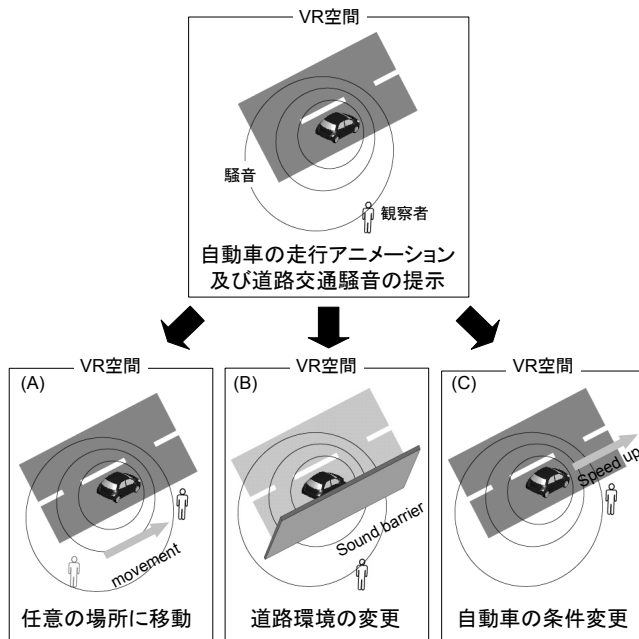
1) 観察者の任意の場所で道路交通騒音の大きさを体感できる（図-1 中(A)）。これは、VR 空間内の観察者と自動車の位置情報を入力データとして、リアルタイムに道路交通騒音レベルの算出及び可聴化を行って

1： 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27, Tel : 03-3817-1815, E-mail : shin-t@civil.chuo-u.ac.jp)

2： 正会員 工博 中央大学 教授 理工学部 都市環境学科

3： 正会員 工博 (株)建設環境研究所 技術本部



図－1 システムのイメージ

いるためである。2) 遮音壁の高さ、道路の舗装の種類、舗装の経過年数などの道路の周辺環境を、VR空間内で観察者が変更できる(B)。3) 自動車の種類、自動車の速度などの自動車の走行条件を、VR空間内で観察者が変更できる(C)。本システムではVR空間内にインターフェイスを表示する機能を有しており、表示されたインターフェイスを観察者が操作することで、道路の周辺環境及び自動車の走行条件を変更することができる。

(1) 自動車のCGアニメーションの作成

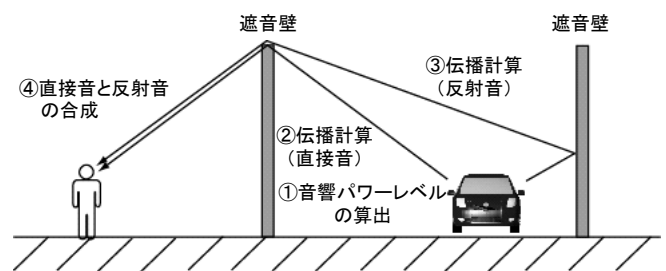
本システムで提示する自動車のCGアニメーションの作成方法について記す。CGアニメーションを作成する際にはまず、三次元CG作成ソフト(3dsMax: Autodesk)を用いて自動車と遮音壁の作成を行う。そして次に、VR空間内でのCGの描画速度を高速にするために、ポリゴン数の削減を行う。そして最後に、ポリゴン数削減後のデータをOpenGLの書式に変換し、OpenGLを用いて自動車の走行アニメーションを作成する。なお本システムでは、後述する没入型VR装置が有するコントローラーを観察者が操作することで、自動車が走行を開始するように設定しており、観察者の任意のタイミングで道路交通騒音を体感することができる。

(2) 道路交通騒音の可聴化

本システムでは、日本音響学会が作成した道路交通騒音予測モデルのASJ RTN-Model2003⁴⁾を用いて道路交通騒音レベルを算出している。また、ドップラー効果による周波数の変化についても考慮している。これらは、観察者と自動車の位置情報を入力データとしてリアルタイムに計算されており、算出した道路交通騒音レベル及び周波数は音響プログラミングソフトMAX/MSP (Cycling'74)を用いて可聴化される。

a) ASJ RTN-Model2003

ASJ RTN-Model2003は幾何音響理論に基づいており、



図－2 ASJ RTN-Model 2003

高速に計算を行うことができる。計算手順は図－2に示すように、まず自動車のA特性音響パワーレベルを算出し、次に伝播計算を行う。伝播計算では、自動車から直接伝播する直接音と遮音壁に反射して伝播してくる反射音の二種類の音を計算している。そして最後に直接音と反射音を合成することによって、観察者の位置におけるA特性音圧レベルを求めている。

①A特性音響パワーレベルの算出

自動車走行騒音のA特性音響パワーレベル L_{WA} は次式で与えられる。

$$L_{WA} = a + b \log_0 V + C \quad (1)$$

ここで、 a は車種別に与えられる定数、 b は速度依存性を表す係数、 V は走行速度、 C は基準値に対する補正項を示す。なお、基準値に対する補正には、排水性舗装等による騒音低減に関する補正、道路の縦断勾配による走行騒音の変化に関する補正、自動車走行騒音の指向性に関する補正、その他の要因に関する補正がある。各補正量の詳細については参考文献4)を参照されたい。

②直接音の伝播計算

受音点における直接音のA特性音圧レベル L_A^d は以下のように示すことができる。

$$L_A^d = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_{cor} \quad (2)$$

ここで、 L_{WA} は自動車走行騒音のA特性音響パワーレベル、 r は自動車から受音点までの直線距離、 ΔL_{cor} は自動車から受音点に至る音の伝播に影響を与える各種の減衰要素に関する補正量を示す。なお補正には、回折に伴う減衰に関する補正、地表面効果による減衰に関する補正、空気の音響吸収による減衰に関する補正がある。各減衰量の詳細については参考文献4)を参照されたい。

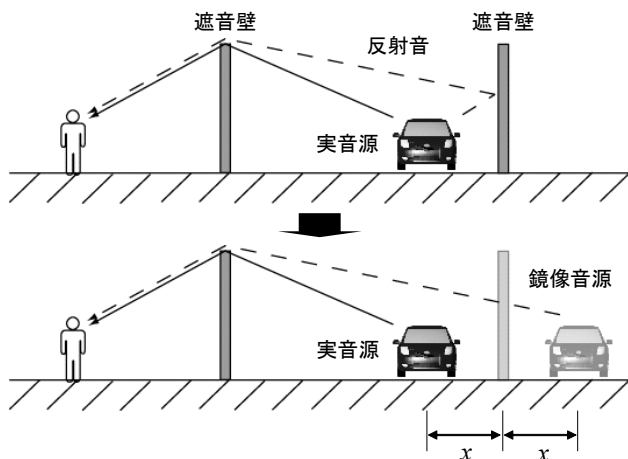
③反射音の伝播計算

反射音のA特性音圧レベル L_A^r は鏡像音源を用いて計算される。鏡像音源は、図－3に示すように実音源の対称となる位置にあると想定され、実音源と同様に式(1)、(2)を用いて算出される。

④直接音と反射音の合成

観察者の位置におけるA特性音圧レベル L_A は次式を用いて算出される。

$$L_A = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_A^d}{10}} + 10^{\frac{L_A^r}{10}} \right) \quad (3)$$



図－3 反射音の計算

ここで、 L_A^d と L_A^r はそれぞれ、直接音と反射音の A 特性音圧レベルを示す。

b) ドップラー効果

本システムでは、ドップラー効果による周波数の変化についても考慮している。ドップラー効果による周波数の変化は以下のように示すことができる。

$$f' = f \left(\frac{U}{U - u_s \cos \theta} \right) \quad (4)$$

ここで、 f は音源の有する周波数、 U は音速、 u_s は音源の移動速度、 θ は音源と観察者を結ぶ直線と音源の移動方向の間の角度を示している。

c) 道路交通騒音の可聴化

本システムでは、音響プログラミングソフトの MAX/MSP⁵⁾ を用いて道路交通騒音予測結果の可聴化を行っている。すなわち、計算された騒音の結果を観察者が実際に耳にする音により再現する。MAX/MSP に入力するデータは、観察者の位置における道路交通騒音の A 特性音圧レベル、周波数、そして自動車騒音の wave データである。なお、データの入力は常に繰り返し行っているため、騒音レベルや周波数の変化に対応した音を出力することが可能となっている。

(3) 没入型 VR 装置

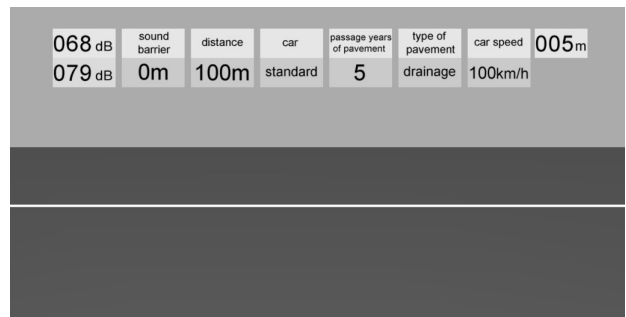
本システムでは、没入型投影技術に基づき VR 空間の構築を行っている。本稿で使用した没入型 VR 装置は、3 面の大型平面スクリーンとそれぞれのスクリーンに対応した高性能プロジェクターにより構成されている。また、本装置は 7.1ch の音響スピーカーが設置されており、映像とともに音を用いて VR 空間を構築することが可能である。本装置の詳細については参考文献 6) を参照されたい。

(4) インターフェイス機能

VR 空間内で観察者が道路の周辺環境や自動車の走行条件を容易に変更できるようにするために、インターフェイス機能の作成を行った。インターフェイスは、没入型 VR 装置に付属しているコントローラーを観察者が操作することによって、VR 空間上に表示させることが可能である。なおインターフェイスを表示する



図－4 インターフェイス(条件の変更画面)



図－5 インターフェイス(条件等の確認画面)

位置は、観察者が見やすいように没入型 VR 装置の前面スクリーンに固定している。

観察者が変更できる道路の周辺環境と自動車の走行条件は、遮音壁の高さ (0～5m)、舗装の種類 (密粒性アスファルトコンクリート舗装、排水性舗装)、舗装後の経過年数 (0～20 年)、自動車の種類 (乗用車、小型貨物車、中型車、大型車)、自動車の速度 (50～100km/h) である。なお、インターフェイス機能を用いて変更された条件は、リアルタイムに聴覚情報や CG に反映される。また、道路の周辺環境や自動車の走行条件、観察者の位置における騒音の A 特性音圧レベル、A 特性音圧レベルのユニットパターンの最大値、車線から観察者の位置までの水平距離を確認できるようにするために、それらの情報を提示するインターフェイスの作成も行った。図－4、5 に VR 空間内で表示されるインターフェイスを示す。

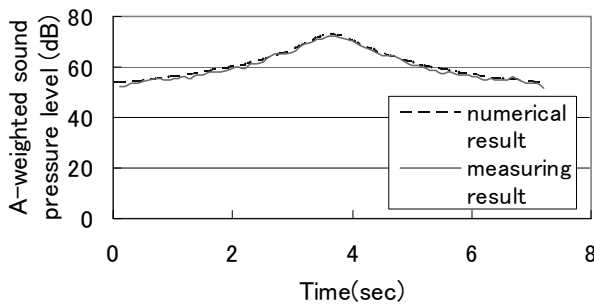
3. VR 空間の構築

(1) 聴覚情報のキャリブレーション

道路交通騒音の計算結果と VR 空間において出力される音の大きさを一致させるためにキャリブレーションを行い、その後騒音計 (LA-2560：小野測器) を用いて出力された音の計測を行った。なお、キャリブレーションは MAX/MSP に入力する騒音レベルに対して行っており、出力される音と予測結果が一致するように設定した。なお、騒音計を用いて出力された音を計測する際の道路の周辺環境及び自動車の走行条件は表－1 に示すとおりに設定した。計算結果と騒音計による計測結果のユニットパターンを図－6 に示す。図より、計算結果と計測結果がほぼ一致していることがわかる。この結果より、本システムが道路騒音レベルの

表－１ 道路周辺環境及び自動車の走行条件

遮音壁の高さ	:0m
車種	:乗用車
自動車の速度	:50km/h
舗装の種類	:排水性舗装
舗装後の経過年数	:5年
観察者～車線までの水平距離	:5m



図－６ ユニットパターン

予測結果を忠実に再現できることが確認できた。

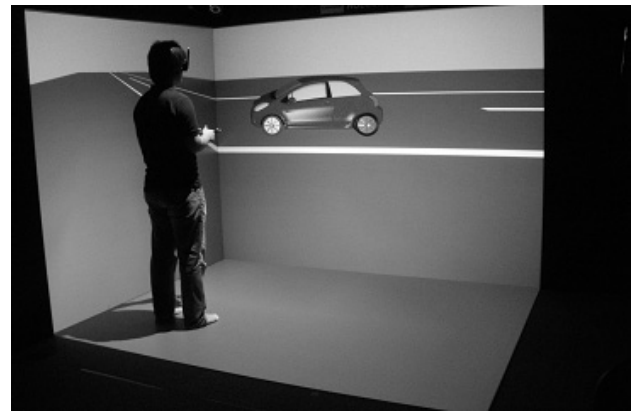
(２) VR 空間の構築

本システムを用いて VR 空間の構築を行い，道路交通騒音を体感した結果について記す．VR 空間内で道路交通騒音の大きさを体感している様子を図－７に示す．観察者は，自動車が近づくにつれて大きくなる騒音を体感することができる．また，観察者は VR 空間内を自由に移動することができるため，任意の位置から騒音の大きさを体感することができる．また，本システムは VR 空間を構築するために没入型投影技術を採用しているため，騒音の聴覚情報とともに現実のように実スケールかつ立体視による視覚情報を得ることができる．さらに，本システムでは道路の周辺環境や，自動車の走行条件を変更し，変更した条件下での騒音を体感することも可能である．図－８に遮音壁の高さを変更した際の様子を示す．観察者は遮音壁により，聞こえる騒音の大きさが小さくなったことを確認できる．またその他にも，各種の条件を変更することで，聞こえる騒音の大きさが変化することを確認できた．このように本システムは，様々な条件下において騒音の大きさを体感できるため，騒音の比較・検討ツールとして有効であるといえる。

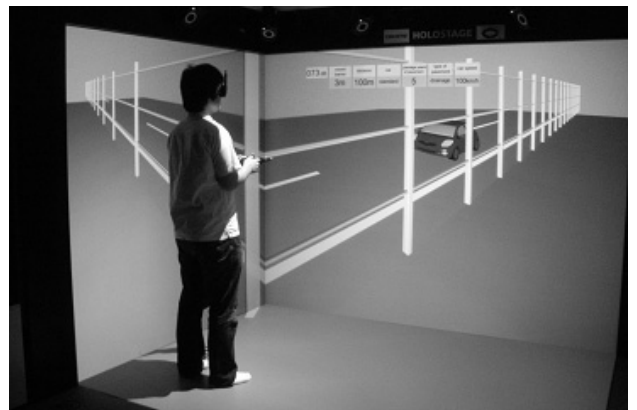
４．おわりに

本論文では，道路交通騒音の大きさを聴覚情報として体感することができる道路交通騒音評価システムの構築を行った．本システムを用いて VR 空間の構築を行った結果，以下の結論を得た．

- 1) 道路交通騒音レベルの予測及びその可聴化をリアルタイムに行うことが可能なため，観察者や自動車の位置に応じて変動する道路交通騒音を体



図－７ 道路交通騒音を体感している様子



図－８ 遮音壁により減衰した道路交通騒音を体感している様子

感することができる。

- 2) インターフェイス機能を作成したことで，VR 空間内で道路環境や自動車の走行条件を変更することが可能となり，様々な条件下における道路交通騒音の大きさを体感することができる。

今後は，本システムをより複雑な道路構造や道路周辺環境に適用可能とする予定である。

参考文献

- 1) 永野剛，安田徳興，降旗建治，柳沢武三郎：騒音体験用バーチャルリアリティシステムの検討，電子情報通信学会技術研究報告，EA99-56，1999年10月
- 2) 蒔苗耕司，高橋幸治：3次元サウンドを用いた道路交通騒音予測・聴感シミュレータ，土木情報利用技術論文集，Vol.12，pp.133-138，2003年
- 3) E.J.Wegman and J.Symanzik：Immersive Projection Technology for Visual Data Mining，Journal of Computational and Graphics Statistics，Vol. 11，pp.163-188，2002.
- 4) 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 2003”，日本音響学会誌，Vol.60，pp.192-241，2004年
- 5) ノイマンピアノ(赤松正行，左近田展康)：2061：Max オデッセイ，リットーミュージック，2006年
- 6) 高田知学，樫山和男，谷口健男，浜田秀敬：都市大気環境シミュレーションのための三次元都市モデリング手法とプリ・ポスト処理への VR 技術の適用研究，土木情報利用技術論文集，Vol. 17，pp.279-286，2008年11月