

目次

研究課題名	学年	氏名	頁
三次元点群深層学習に基づく水中構造物の物体分類	博士後期課程 4 年	大川 博史	1
Isogeometric Analysisの任意局面境界を有する 流れ問題への適用性に関する検討	博士前期課程 2 年	安井 太一	5
有限要素法による遮音壁周辺の音場解析とその可聴化	博士前期課程 2 年	深澤 一志	9
マルチエージェントモデルに基づく 津波避難シミュレーションの適用性向上に関する研究	博士前期課程 2 年	藤山 麗	13
水域環境における GNSS データを用いた ロケーションベース AR 可視化システムの構築	博士前期課程 2 年	鈴木 雅大	17
VR 技術を用いた超音速機騒音評価システムの構築	学部 6 年	江口 大智	21
2次元弾性体解析における IGA の適用性に関する検討	学部 4 年	坂井 祐仁	23
有限要素法による津波解析における 遡上域の精度向上に関する研究	学部 4 年	田部井 優奈	25
有限要素法による風速を考慮した騒音電波解析手法の構築	学部 4 年	宮内 暖季	27
VR技術を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムの構築	学部 4 年	田丸 ゆめ乃	29
GNSSデータに基づく ロケーションベースMR可視化システムの構築	学部 4 年	中祖 諒大	31
スマートフォンを用いた ロケーションベースAR可視化システムの構築	学部 4 年	鎌田 理紗	33
航空写真を用いた深層学習による 土地利用分類モデルの構築	学部 4 年	羽物 裕人	35

三次元点群深層学習に基づく水中構造物の物体分類

Object Classification of Underwater Structures Based on 3D Point Cloud Deep Learning

都市人間環境学専攻 博士課程後期4年 大川 博史
Hiroshi OKAWA

1. はじめに

三次元計測機器の普及により、陸上の点群計測技術の飛躍的な発展を端緒として、水中においても音響機器を活用した点群計測技術は発展の一途をたどっている。

水中の新しい点検技術として、これまでの潜水士による目視点検等に代わり、自律航行型無人ロボット (Autonomous Surface Vehicle: 以後 ASV とする) に音響測深機を装着・計測することで、広範囲を簡易・安全かつ高精細なデータを取得することが可能となった。一方で、これらの取得された水中マッピングデータ¹⁾の問題点として、データ量が極めて膨大となること、色彩情報を持たず判読性の低いデータであることが挙げられる。そのため、水中マッピングデータは計測データ分析時に専門技術員の判読が必要であるだけでなく判読に時間がかかり、その過程で人為的ミスも発生しやすいといった課題がある。

本研究は、これらの課題に対応するため、陸上点群データにおいて利用されている PointNet++²⁾ を水中点群データへ適用し、点群深層学習に基づくセマンティックセグメンテーションモデルによる点群データの色付けを行うことで自動的かつ高精度な判別を目標とする。なお、深層学習を行うにあたり、水中を対象とした学習データセットは皆無であるため 既製の水中構造物については 3DCAD モデルに点群を発生させ、学習データとすることでデータ収集の効率化と精度の向上を実現する方法を提案する。本手法で生成した学習データを用いて、点群深層学習フレームワークにて水中点群データを分類し、正解率を比較することで影響評価を行った。

2. 水中点群データおよびデータ取得方法

(1) 使用機材

水中マッピングデータは、水中で取得した画像や地形、水質や時間などのデータと位置座標を付加したデータである。これらの水中マッピングデータの取得方法として、船舶にサイドスキャンソナーやマルチビームエコーサウンダーなどの音響探査装置を搭載し、計測するのが一般的である。

本研究では、ASV (図-1 参照) をプラットフォームとして搭載されたセンサーのうち、マルチビーム音響測深機 (iWBMSH; Norbit 製) を用いることで、点群データを取得することが可能である。

(2) 水中点群データの取得

水底面を把握する手法には、直接的手法と間接的手法があるが、本研究では、間接的手法の1つで、マルチビーム深浅測量はミルズクロス方式により計測されている。この

方式はソナーから扇状の送波ビームを横方向に発振し、水底に反射して戻ってくる受波を縦方向のスリットで受信するものである³⁾。このマルチビーム測深機を ASV に搭載することによって点群データを取得しており、実際に取得した点群データ例を図-2 に示す。なお、水中点群データは色彩情報を持たないため、三次元の座標値のみを取り扱う。

(3) 水中点群データの取得

点群 (Point Cloud) とは、一般にレーザースキャナー等で計測される点の集合データである。各点は位置情報や、色彩、反射強度といった情報を持つことができ、物体表面や形状についても全て位置情報のみで表現され、その物体内部の状況は反映しない。また、点群データの特性として、順序がなく隣接関係が不明瞭であるといった順不変性や点群の移動や回転といった処理が施された場合においてもその物体の種類が変化しないといった移動不変性をもつ。そのため、深層学習モデルの構築において、点群データを入力データとして用いる場合、これらの特性に留意する必要がある。

本研究にて使用する水中点群データは、前節に記述のとおり、三次元の位置情報のみを有する。そのため、陸上で計測された点群データのように RGB の色彩情報等から特徴量を抽出することは不可能である。



マルチビーム測深機の諸元

名称: iWBMSH (Norbit 社製)

- ・スワ幅: 7-210°
- ・測深分解能: 10mm 未満 (Acoustic)
- ・ビーム数: Min 256 ~ Max 512
- ・測深レンジ: 0.2-275m

図-1 ASV およびマルチビーム測深機諸元

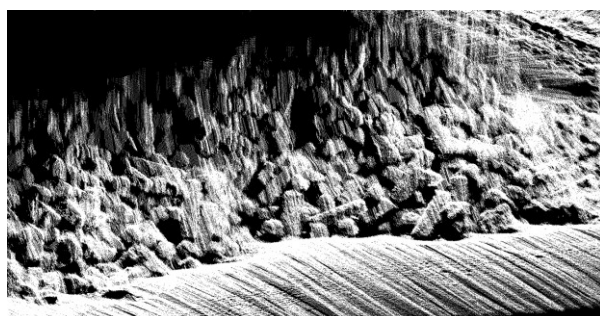


図-2 取得データ

3. 三次元点群深層学習による物体認識

(1) 三次元点群深層学習について

三次元点群は前述の通り三次元座標情報を持った多数の点によって三次元モデルを形成する。一方、三次元点群は単なる点の集合であるため、これらの点には順序が存在しないという性質がある。また、各点は一定の間隔で分布しているとは限らない。点の密度が一定ではないため、点同士の隣接関係が不明瞭である。しかしながら、単一の点では特に意味を持たず、近接した複数の点によって三次元形状を表現するため、近接する点同士の位置関係が極めて重要である。このような性質を考慮し深層学習を行うには、三次元点群を特定の手法によって画像変換し、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) で学習を行うという画像ベースの手法が一般的であった。しかし、三次元データを二次元データに変換という処理によって、本来の詳細な幾何学的・空間的情報が失われたり、変化したりする。そのため近年では、三次元点群を画像化せずに直接入力・学習させる三次元点群ベースの手法が主流となっている。

(2) 学習モデルについて

三次元点群を直接入力データとして扱うためには、前節で述べた三次元点群の特性を考慮した処理をどのように行うかが課題であった。PointNet⁴⁾は、三次元点群の点に順序がないという性質を考慮し、三次元点群データを直接入力可能にするニューラルネットワークである。PointNetは、入力の順番が変わっても出力が変わらないという性質を持つ対称関数に着目し、対称関数の1つであるMax poolingを取り入れることで点の順序不同性に対処している。一方、PointNet++ (図-3 参照) は、PointNetの改良版としてQiらが提案したニューラルネットワークで、PointNetは三次元点群の集合を直接入力することで学習できるが、局所的な特徴を抽出できないという問題があった。この問題を解消するため、PointNet++では、局所領域ごとに特徴が抽出される階層的なネットワーク構造を有している。局所特徴量の抽出部は、サンプリング層、グルーピング層、PointNet層の3層から構成される。サンプリング層は入力した三次元点群を抽出し、グルーピング層はサンプリング点を中心とした近傍点をグループ化する。また、PointNet層は抽出された近傍点から特徴量を計算する。これらの処理によ

って入力された三次元点群の局所的な特徴を学習することができる。上記の理由から、本研究では、PointNet++を採用することとした。PointNet++ではPointNetで課題であった入力点群データの局所構造を考慮するため、新たに点密度に応じてマルチスケール情報を得る二つの抽象層を含むネットワークを構築している。1つ目はサンプリング層であり、距離空間におけるサンプリングを行う。サンプリング方法にはFPS (Farthest Point Sampling)⁵⁾を用いて、入力点群から均等感覚に代表点となる点を選択する。次に2つ目のグルーピング層では、FPSによって選択されなかった点群に対して、FPSで選ばれた代表点群の中で最も近い代表点群のグループに振り分ける。PointNet++ではグルーピング手法として、一つの距離でグルーピングを行うSSG (Single Scale Grouping) と複数距離を考慮するMSG (Multi Scale Grouping)があるが、本研究では計算コストの低いSSGを採用した。これら二層とPointNetを再帰的に適用することで、マルチスケール情報を集約し、点群の局所構造を考慮した深層学習フレームワークを構築している。図-3に示すように、PointNet++は入力データの情報の集約を行う特徴抽出箇所は、クラス分類およびセマンティックセグメンテーションモデルの双方で同一である。

4. トレーニングデータ作成省力化と高品質化

本研究では、教師あり学習の手法に基づき、データセットの作成を行う。トレーニングデータとテストデータの作成を行い、点群深層学習モデルとしてPointNet++を使用し、分類およびセマンティックセグメンテーションにより学習結果を評価する。トレーニングモデルの作成方法、テストデータの取得方法および学習結果について次節に記述する。

(1) CADモデルについて

河川や海岸などの水中における代表的な既設構造物として、消波根固めブロックが挙げられる。これらの構造物は既製品であるため、その形状を忠実に再現可能である。本研究では、実際に沿岸で使用されている消波根固めブロックの二次元平面図から三次元CADモデルを作成した。また、点群情報はモデル表面のみを必要とし、内部情報を必要としないため、サーフェスモデルを作成した。

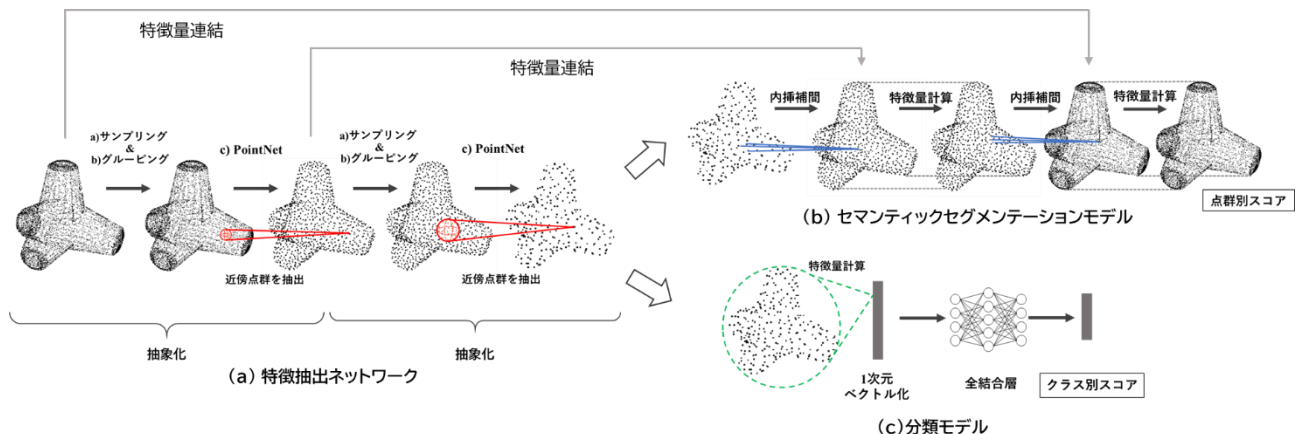


図-3 使用ネットワーク (PointNet++) 構成図

(2) 点群データ作成方法

前節において作成したモデル表面に点群を生成後、トレーニングデータとして利用する。なお、点群の生成には点群処理ソフトウェア(Cloud Compare)を使用し、任意の点数を指定することで点群生成した。点群密度に関しては前章にて記述した特徴抽出ネットワーク内のサンプリング並びにグルーピングにて別途設定する。また、トレーニングデータとして使用するためには、実測した点群データと類似したトレーニングデータを作成するのが望ましい。そこで、可能な限り類似したデータとなるように作成したデータに以下のような処理を施した。

a) 点群データの加工 (カット処理)

分類モデルにおけるトレーニングデータには、図-5 に示す作成した個別の点群モデルを用いる。水中点群データはその取得方法の都合上、水面から影や死角となる部分が欠損しているブロックデータが数多く含まれる。そのため、元のトレーニングデータを一部切断することにより分類精度を高める工夫を施した。

b) 回転処理

前項にて処理されたモデルに対し、データ拡張を目的として、回転処理を施す。回転角はX,Y,Z軸の各軸に対し6度刻みで360度まで回転させ、各ブロックに付き180倍となるように設定した。実際に処理したデータ例を図-6 に示す。

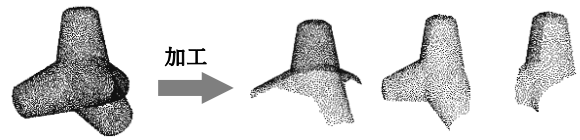


図-6 点群モデルの一部をカットしたモデル例

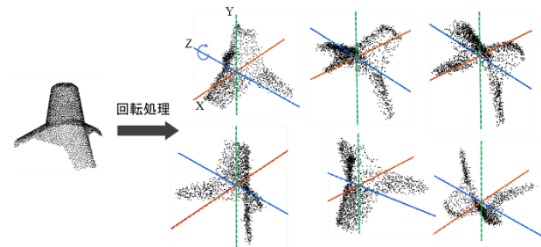


図-6 回転処理

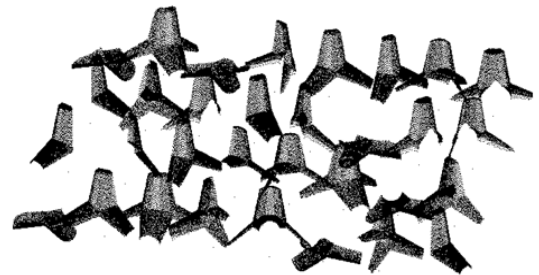


図-7 トレーニングデータ (セマンティックセグメンテーション用)

(3) トレーニングデータセットの作成

本研究では、PointNet++のネットワークを用いて分類およびセマンティックセグメンテーションを行うが、それぞれに対しトレーニングデータセットを準備する必要がある。しかし、セマンティックセグメンテーション用のトレーニングデータ作成については、分類用データを再利用できる。各データの詳細を次項に記述する。

a) 分類用データセット

前項にて作成された点群モデルは分類モデルにおけるトレーニングデータとして用いる。各モデルは約 5,000 点以上で構成され、PointNet++の特徴抽出ネットワークにおけるサンプリング・グルーピング層にて点数制御が行われる。

b) セグメンテーション用データセット

セマンティックセグメンテーション用データセットはルールに基づいて分類用のトレーニングデータを任意に選択・配置することにより作成される。なお、本データセットの作成には三次元CGソフト(Blender)を用いた。作成した領域データの一例を図-7 に示す。

(4) トレーニングデータの検証

PointNet++を水中点群データに適用するにあたり、トレーニングデータセットの検証を行う。なお、PointNet++の局所領域抽出ネットワークは分類とセマンティックセグメンテーションの両方に共通であるため、検証においては分類データセットに対して行うこととした。テストデータとして、実測した水中点群データから抽出し、そのデータに対する評価とする。前節の手法を用い、使用するトレーニングデータおよびテストデータは表-1 に記載するとおりである。

表-1 使用データ

ブロック種別		A	B	C
トレーニングデータ	形状 CADモデルより生成			
	モデル数 (カット処理)	5	3	4
	モデル数 (回転処理)	900	540	720
	領域数 セマンティック セグメンテーション用	20	20	20
テストデータ	抽出例			
	モデル数 分類用	254	55	54
	領域数 セマンティック セグメンテーション用	5	3	4

5. 適用例

(1) 解析対象：ブロック A・B・C

本研究の解析対象として、消波根固ブロックが点在する水深 10m 以浅の海域 (島根県浜田市浜田港周辺・島根県隠岐郡来居港周辺・高知県幡多郡黒潮町佐賀港周辺) にて実測した点群データを採用した。また、分類およびセマンティックセグメンテーションの対象として消波根固ブロックを取り上げ、対象ブロック A・B・C は図-11 に示すとおりである。

(2) トレーニングデータ・テストデータ

分類モデルにおけるテストデータには、データの取得領域から抽出した点群データを用いる。一方、セマンティックセグメンテーションモデルにおけるテストデータには取得した領域データを直接使用している。

分類対象の消波根固ブロックは既製品であることから、設計図面に基づいた3DCADモデルを作成し、点群モデルに変換することで、トレーニングデータの作成を行う。作成した各ブロックのトレーニングデータの一例を図-12に示す。各ブロックモデルを構成する総点数は約5,000点とし、代表的なパラメータは、点数制御1,024点、学習回数500回とした。

(3) 解析結果

上記のトレーニングモデルを用いてテストデータの分類を行った結果（混同行列）を表-2に示す。なおF値0.85であり、非常に精度の高い分類結果となった。また図-19にセマンティックセグメンテーションにより着色した結果を示す。なお、異なるブロックとして分類されている箇所があるものの、mean-IOUも0.812と非常に高い結果となった。

(4) 考察

3クラス分類において、正解率・mean-IOUのそれぞれ80%以上であり、多クラス分類においても高い精度が維持された。このように、PointNet++の特徴抽出層における点数制御に加え、水中点群の特徴を適切に処理することで、高精度な分類とセマンティックセグメンテーションを実現できたと考えられる。一方、クラス数を増やすことにより正解率の低下がみられる。また、水底面との境界部分において誤答が多く確認できるが、これらはモデル形状の類似性によるものであるとため検討の余地がある。

6. おわりに

本論文では、ASVにより自動取得された水中点群データを利用した構造物分類と現況把握を自動的かつ迅速に行う手法の構築を目的とし、点群深層学習による水中点群の自動物体分類を可能とした。また、水中点群の特性を考慮し、既製の水中構造物において三次元CADモデルから点群を生成することで、効率的なトレーニングデータ作成手法を構築し、以下の結論を得た。

- 水中点群データにPointNet++を適用し、点群深層学習に基づくセマンティックセグメンテーションを用いて点群データに着色を行うことで自動的かつ高精度な分類が容易となった。
- 三次元CADモデルから生成した点群データを部分的に加工したデータを用いることで、トレーニングデータ作成効率と分類性能が飛躍的に上昇したとともに、実測データへの適用性が確認された。

今後は、底面付近における分類性能の向上とさらなる適用事例の増加と分類クラスの細分化および転移学習を用いた水中構造物の分類について検討を行う予定である。

表-2 学習結果（混同行列）

		予測			再現率
		A	B	C	
実際	A	231	3	7	0.96
	B	5	50	5	0.83
	C	18	1	43	0.69
適合率		0.91	0.93	0.78	正解率 0.89

平均適合率:0.83 / 平均再現率:0.87 / 平均F値:0.85

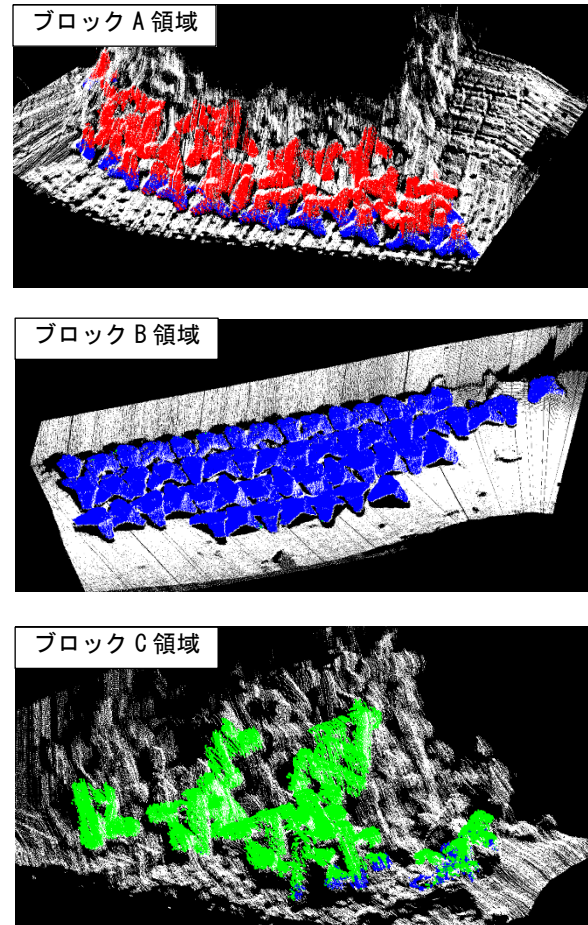


図-8 セマンティックセグメンテーション結果

参考文献

- 1) 澤隆雄, 大木健: 海底マッピングにおける海洋音響技術, 日本音響学会誌, 第75号1巻, pp.29-34, 2019.
- 2) Qi, C.R., Yi, L., Su, H. and Guibas, L.J.: PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space, *Advances in neural information processing systems*, pp. 5099-5108, 2017.
- 3) 浅田昭: マルチビームソナーによる海底地形の可視化, 日本音響学会誌, 第10号第55巻, pp. 717-722, 1999.
- 4) Qi, C.R., Su, H., Mo, K. and Guibas, L.J.: PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation, *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 652-660, 2016.
- 5) Moenning, C. and Dodgson, N. A.: Fast Marching farthest point sampling for implicit surfaces and point clouds. Computer Laboratory Technical Report University of Cambridge, UK, No.565, 2003.

Isogeometric Analysis の任意曲面境界を有する流れ問題への適用性に関する検討

Studies on Applicability of Isogeometric Analysis to Flow Problem with Arbitrarily Boundary

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 安井 太一
Taichi YASUI

1. はじめに

IGA (Isogeometric Analysis) ^{1) 2)} は医療分野, 自動車や精密機械の分野の数値解析において, 近年盛んに研究と適用が行われている手法である IGA は CAD (Computer Aided Design) の形状表現に用いられる Spline 関数を基底関数として用いるため, CAD で描いた形状モデルから直接解析メッシュを作成することができる. そのため, 一般の有限要素法で実施されるメッシュの作成プロセスを削減でき, 曲線等も CAD で描いた形状モデルと一切の誤差なく表現することができる.

そこで本研究では, タンクや橋梁, 建物等をはじめとする任意の曲線形状を有する構造物を対象とした, IGA による流体-構造連成解析手法の構築を目的とした. その基礎的検討として, 2 次元移流問題と 3 次元円管流れ問題に対し IGA を適用し解析を行った. また, 厳密解や実験結果との比較によりその適用性を検討した.

2. IGA に基づく数値解析手法

(1) NURBS

本研究では基底関数に用いる Spline 関数として, 制御点に付与される重みによって, 少ない要素数で様々な形状を表現することができる NURBS 関数を用いた. (図-1 参照) 3 次元の NURBS 関数は, 3 方向の B-Spline 基底関数と制御点に付与される重み, 制御点の位置ベクトルによって表現される. B-Spline 基底関数は, 式 (1) の Cox de Boor の漸化式によって定義される関数である.

$$p = 0$$

$$N_{i,0}(\xi) = 1 \quad \text{if } \xi_i \leq \xi \leq \xi_{i+1}$$

$$N_{i,0}(\xi) = 0 \quad \text{otherwise}$$

$$p = 1, 2, 3 \dots$$

$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi) \quad (1)$$

ここで, N は ξ 方向の B-Spline 基底関数, i は制御点番号, p は B-Spline 基底関数の次数, ξ_i はパラメータ空間の座標であるノットであり, 以下に示すようなノットベクトルと呼ばれる一様増加する数列によって与えられる.

$$\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}) \quad (2)$$

ノットベクトルは, CAD で描いた形状モデルから得られる数列で, B-Spline 基底関数と IGA における要素を定義するパラメータである. 式 (1) で表される B-Spline 基底関数を

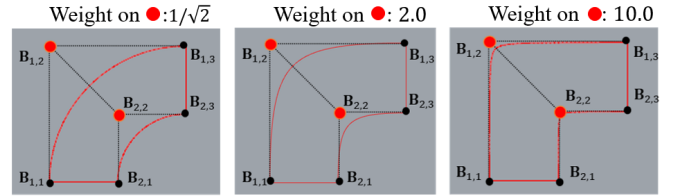


図-1 NURBS 曲面における重みの効果

用ると, NURBS 関数の基底関数 $R_{i,j,k}^{p,q,r}(\xi, \eta, \zeta)$ と NURBS ボリューム $S(\xi, \eta, \zeta)$ は式 (3), (4) のように表される.

$$R_{i,j,k}^{p,q,r}(\xi, \eta, \zeta) = \frac{N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) L_{k,r}(\zeta) w_{i,j,k}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) L_{k,r}(\zeta) w_{i,j,k}} \quad (3)$$

$$S(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l R_{i,j,k}^{p,q,r}(\xi, \eta, \zeta) B_{i,j,k} \quad (4)$$

ここで, M, L は η, ζ 方向の B-Spline 基底関数, j, k は η, ζ 方向の B-Spline 基底関数の制御点番号, q, r は η, ζ 方向の B-Spline 基底関数の次数, $w_{i,j,k}$ は物理空間の座標である制御点に付与される重み, $B_{i,j,k}$ は制御点の位置ベクトルである. この NURBS 関数を用いて, ある要素 e 内における任意の点の物理量 ϕ^e は以下のように表される.

$$\phi^e(\xi, \eta) = \sum_{I=1}^{nen} R_I^e(\xi, \eta) \phi_I^e \quad (5)$$

ここで, nen は一つの要素に含まれる制御点の個数, R_I^e は要素 e における I 番目の制御点に関する NURBS 関数を表す.

(2) IGA に基づく移流問題の離散化手法

移流問題の支配方程式は, 以下に示す移流方程式を用いる.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (6)$$

ここで, ϕ は物理量, c は移流速度である.

境界条件としては, 領域の境界部に以下のように Dirichlet 境界条件を与える.

$$\phi = g \quad \text{in } \Gamma_g \quad (7)$$

支配方程式 (6) に対し, 空間方向の離散化に SUPG 法に基づく安定化有限要素法を適用し, 時間方向に 2 次精度である Crank-Nicolson 法を適用し離散化を施すと, 以下の有限

要素方程式を得る.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t} (\mathbf{M} + \mathbf{M}_s) + \frac{1}{2} (\mathbf{A} + \mathbf{A}_s) \right) \phi^{n+1} \\ & = \left(\frac{1}{\Delta t} (\mathbf{M} + \mathbf{M}_s) - \frac{1}{2} (\mathbf{A} + \mathbf{A}_s) \right) \phi^n \end{aligned} \quad (8)$$

ここに, \mathbf{M} , \mathbf{A} はそれぞれ時間微分項, 移流項の係数行列を表す. 添字 S は SUPG 項に起因する行列である.

このようにして離散化して得られた式 (8) は, 連立一次方程式であり, これを解くことにより各制御点における物理量 ϕ の値を求めることができる. 連立一次方程式の解法としては, 反復解法である Bi-CG stab 法を用いる.

(3) IGA に基づく非圧縮性粘性流れ問題の解析手法

3次元非圧縮性粘性流体の支配方程式には, 以下に示す無次元化した Navier-Stokes の運動方程式と連続式を用いる.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (10)$$

ここで, Ω は境界 Γ で囲まれた解析領域であり, u_i は流速, p は圧力, Re はレイノルズ数である.

Dirichlet 境界条件, Neumann 境界条件はそれぞれ以下のように表される.

$$u_i = g_i \quad \text{in } \Gamma_g \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(-p\delta_{ij} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) n_j = h_i \quad \text{in } \Gamma_h \quad (12)$$

ここで, Γ_g , Γ_h は, Dirichlet 境界条件, Neumann 境界条件を表し, g_i , h_i はそれぞれの境界上で規定される流速とトラクションである. また δ_{ij} は Kronecker のデルタ, n_i は外向き単位法線ベクトルである.

支配方程式 (9), (10) に対し, 空間方向の離散化に SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法を用い, 時間方向の離散化手法として, 流速に対して二次精度である Crank-Nicolson 法を適用し, 連続項の流速と圧力に関しては陰的に取り扱う. また, 移流速度 $\bar{\mathbf{u}}_i$ は, 式 (13) に示す 2 次精度の Adams-Bashforth 法により近似を行い, 線形化する.

$$\bar{\mathbf{u}}_i = \frac{3}{2} \mathbf{u}_i^n - \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^{n-1} \quad (13)$$

以上により式 (14) に示すような有限要素方程式を得る.

$$\begin{aligned} & (\mathbf{M} + \mathbf{M}_S) \frac{\mathbf{u}_i^{n+1} - \mathbf{u}_i^n}{\Delta t} + (\mathbf{A} + \mathbf{A}_S) \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) \\ & - (\mathbf{G}_i - \mathbf{G}_{Si}) \mathbf{p}^{n+1} + \mathbf{D}_{ij} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) \\ & + \mathbf{C}_j \mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{M}_{Pj} \frac{\mathbf{u}_j^{n+1} - \mathbf{u}_j^n}{\Delta t} \\ & + \mathbf{A}_{Pj} \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^{n+1} + \mathbf{u}_i^n) + \mathbf{G}_P \mathbf{p}^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

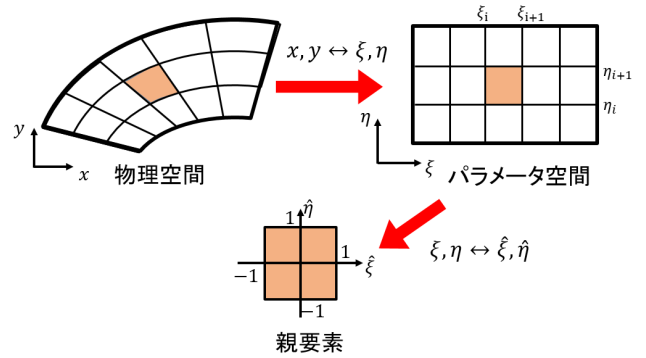


図-2 変数変換

ここに, \mathbf{M} , \mathbf{A} , \mathbf{G} , \mathbf{D} , \mathbf{C} はそれぞれ時間微分項, 移流項, 圧力項, 粘性項, 連続項の係数行列を表す. 添字 S , P は SUPG 項, PSPG 項に起因する行列である. 有限要素方程式の解法としては反復解法である GPBi-CG 法を用いる.

(4) IGA における変数変換

Spline 関数を定義するノットはパラメータ空間の関数であり, 数値計算はパラメータ空間において行われる. そのため, 物理空間 $\Omega_e(x, y)$ とパラメータ空間 $\Omega_e(\xi, \eta)$ で変数変換を行う必要がある. また, 数値積分の手法として, 式 (15) に示す Legendre-Gauss の積分公式を用いるため, パラメータ空間 $\Omega_e(\xi, \eta)$ から親要素 $\hat{\Omega}_e(\hat{\xi}, \hat{\eta})$ にさらに変数変換を行う.

$$\begin{aligned} & \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(\hat{\xi}, \hat{\eta}, \hat{\zeta}) d\hat{\xi} d\hat{\eta} d\hat{\zeta} = \\ & \sum_{i=1}^{ngp} \sum_{j=1}^{ngp} \sum_{k=1}^{ngp} F(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_j, \hat{\zeta}_k) w_i w_j w_k \end{aligned} \quad (15)$$

ここで, ngp は積分点数, $\bar{\xi}_i, \bar{\eta}_j, \bar{\zeta}_k$ は親要素における積分点の座標, w_i, w_j, w_k は積分点に付与される重みである. また, 積分点数については本研究では NURBS 関数の次数 +1 とした.

図-2 に IGA における変数変換について, その概要を示す. 以上のように IGA では二度の変数変換を行う必要がある. ここで, 物理空間とパラメータ空間の写像関係式, パラメータ空間と親要素の写像関係式は式 (16), 式 (17) に示す通りである.

$$x = \sum_{i=1}^{n_{np}} R_i^e(\xi, \eta) B_{x_i} \quad (16)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \left[(\xi_{i+1} - \xi_i) \hat{\xi} + (\xi_{i+1} + \xi_i) \right] \quad (17)$$

ここで, n_{np} は領域内の制御点の総数, B_{x_i} は i 番目の制御点の座標である.

(5) IGA における解析の後処理

通常の有限要素法では, 未知量は各節点において求まる. IGA においても連立一次方程式を解いた結果得られる解は制御点の未知量である. しかし, 制御点の未知量は, 厳密にはその制御点がある物理空間の座標における物理量では

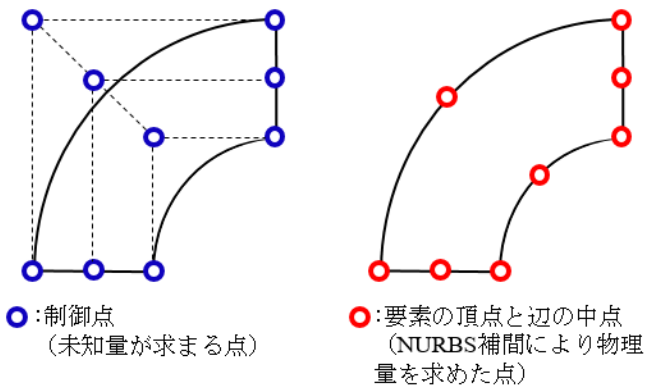


図-3 制御点 (左) と要素の頂点・辺の中点 (右)

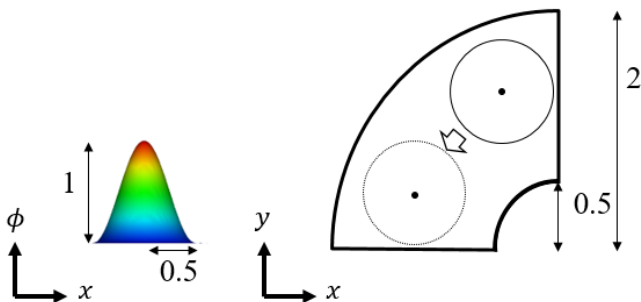


図-4 解析モデル

表-1 解析メッシュ (2次元移流問題)

要素数	FEM		IGA	
	512	2048	256	1024
要素分割数	16×16	32×32	16×16	32×32
補間関数	三角形 1次要素	三角形 1次要素	2次, 3次の NURBS	2次, 3次の NURBS

ない。そのため、IGA において結果を評価する際は物理空間上でのある点の物理量を NURBS 補間により求める必要がある。

図-3 に IGA における解析結果の後処理の概要を示す。本研究では要素の頂点と各辺の中点における物理量を NURBS 補間により求め、可視化の際は 2 次要素として処理を行った。

3. 数値解析例

本研究では、2次元移流問題と3次元円管路流れ問題の二つの例題を取り上げ、IGAにより解析を行い、線形要素を用いた有限要素法による解析結果と比較した。

(1) 2次元移流問題

曲がりを含む領域において解析を行い、IGA における NURBS 関数の次数と精度について検討した。

(a) 解析条件

図-4 に解析モデルと初期条件、移流させるコーン形状を示す。境界条件としては、領域の全境界において物理量 $\phi = 0.0$ を与えた。また、微小時間増分量 Δt は $\pi/400$ 、総

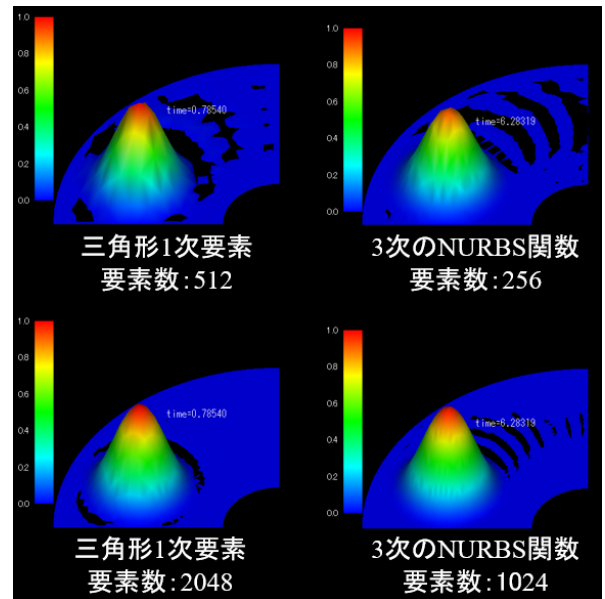


図-5 最終ステップでの可視化結果

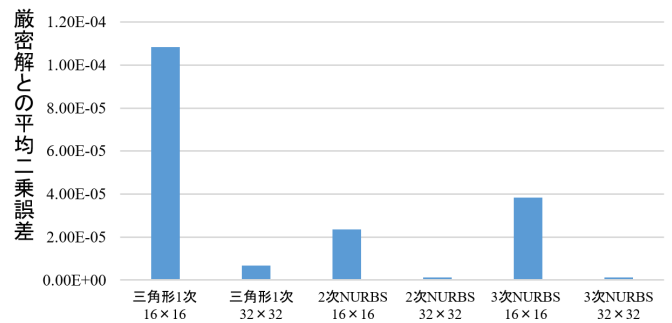


図-6 厳密解との平均2乗誤差

ステップ数を 100 とした。

解析メッシュは表-1 に示すように、補間に 2 次、3 次の NURBS 関数を用い、2 種類の要素分割で解析を行った。また、補間に三角形一次要素を用い、要素数を等しくした有限要素法による結果との比較も行った。IGA の積分計算の際の積分点数については、前章で述べた通り、NURBS の次数 +1 としている。

(b) 解析結果

解析結果として、図-5 に補間に三角形一次要素を用いた有限要素法と補間に 3 次の NURBS 関数を用いた IGA での各解析メッシュの最終ステップにおける可視化結果を示す。また、図-6 に各解析の最終ステップにおける全節点・制御点での厳密解との平均 2 乗誤差を示す。これらから以下ことが確認できた。

- 図-5 から、IGA により 2 次元移流問題について解析を行う必要ができており、有限要素法による結果とも定性的に一致している。
- 図-6 から、補間に三角形一次要素を用いた結果に比べ、同じ要素分割数の IGA において誤差が小さくなった。

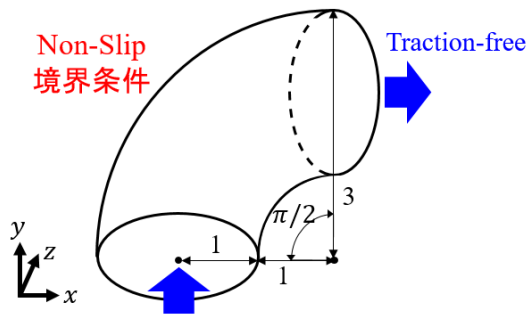


図-7 解析モデル

表-2 解析メッシュ (3次元円管路流れ)

要素数	FEM		IGA	
	四面体1次要素	2次のNURBS	四面体1次要素	2次のNURBS
要素数	384	3072	64	512
要素分割数	4×4×4	8×8×8	4×4×4	8×8×8
補間	四面体1次要素	四面体1次要素	2次のNURBS	2次のNURBS

(2) 3次元円管路流れ問題

曲がりをもつ円管について3次元非圧縮性粘性流れ解析をIGAにより行った。

(a) 解析条件

解析モデルと境界条件を図-7に示す。境界条件としては管の側面に対しNon-slip条件を与え、流入条件として最大値1.0[m/s]の放物状に流速を与えた。また、微小時間増分量 Δt は0.01[s]、総ステップ数を50とし、レイノルズ数 $Re=1.0$ の層流状態で解析を行った。

解析メッシュは表-1に示すように、IGAと補間に四面体1次要素を用いた有限要素法において同様の領域分割数で解析を行い、結果の比較を行った。IGAの積分計算の際の積分点数についてはNURBSの次数+1=3としている。

(3) 解析結果

解析結果として、図-8に各メッシュにおける最終ステップでの流れ方向流速の可視化結果を示す。また、図-9では最終ステップでの管出口における流速分布を示す。これらから以下の結果を得た。

- 図-8から、IGAにより3次元円管路流れ問題について解析を行う必要ができており、有限要素法による結果とも定性的に一致している。
- 図-9から、補間に2次のNURBS関数を用いることで、少ない要素数でも曲線的な流速分布をよく表現できている。また、管の曲がりによる非対称性も同様の分割数の補間に四面体1次要素を用いた結果よりも出ていることがわかる。

4. おわりに

本研究では、2次元移流問題と3次元円管路流れ問題に対しIGAを適用し解析を行った。厳密解、補間に線形要素を用いた有限要素法による結果との比較により、以下の結論を得た。

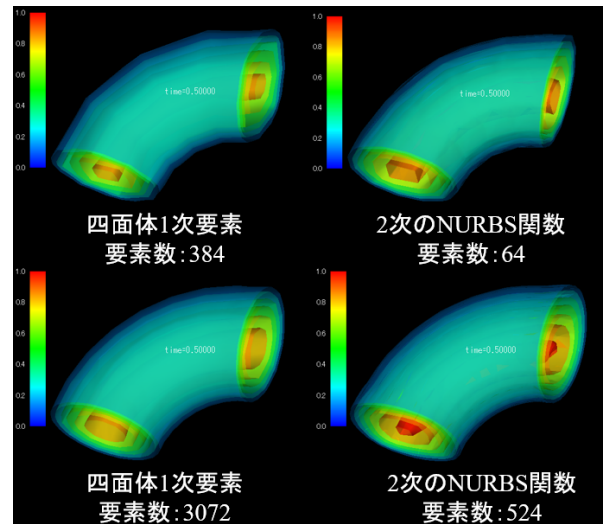


図-8 最終ステップでの流れ方向流速

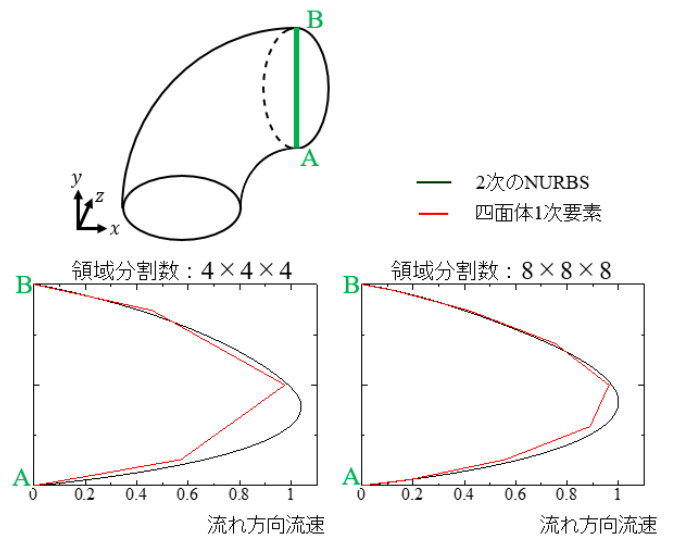


図-9 最終ステップでの管出口の流速分布

- 高次のNURBS関数を用いることにより、補間に線形要素を用いた有限要素法による結果と比べ同一の要素分割数においても良い結果を得た。
- NURBS補間を用いることで、少ない要素数についても曲線的な物理量分布を表現可能である。

今後の課題としては以下のことがあげられる。

- 複雑形状における実験結果との比較
- 流体-構造連成解析へ向けたNEFEM (NURBS-enhanced finite element method) による解析

参考文献

- 1) Thomas.J.R.H, John.A.C and Yuri.B : Isogeometric analysis : CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and meshrefinement, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.194, pp.4135-4195, 2005
- 2) John.A.C, Thomas.J.R H and Yuri.B. : Isogeometric Analysis :Toward Integration of CAD and FEA, Wiley Publishing. 335p, 2009

有限要素法による遮音壁周辺の音場解析とその可聴化

Acoustic Analysis around Sound Barrier based on Finite Element Method and its Auralization

都市人間環境学専攻 博士前期課程2年 深澤 一志
Kazushi FUKAZAWA

1. はじめに

近年の都市開発や都市部の活性化に伴い騒音被害は増加している。騒音の評価には、コンピュータ技術の向上に伴い、幾何音響理論や波動音響理論に基づく数値シミュレーションが広く用いられている。本研究では、高精度かつ複雑な幾何形状を考慮が可能な、波動音響理論に着目して解析を行う。

著者の研究では、これまで高速多重極境界要素法を用いた解析を行ってきたが、より複雑な幾何形状を有する問題に対しては適用性に問題があった¹⁾。そこで本研究では有限要素法(以下 FEM)に基づく手法の構築について研究を行った²⁾。しかし、FEMは無限遠方で課される放射条件を厳密に考慮することが困難なため開境界処理が必要になる。また、解析対象は工事騒音などの固定音源問題を対象としており、交通騒音などの移動音源に対する騒音問題への適用が不十分であった。

そこで本研究では、開境界手法として Perfectly Matched Layer Method(以下 PML 法)を適用し、遮音壁設計標準書³⁾に準じた遮音壁モデル周辺の音場解析を行った。また、移動音源の考慮に対しては時変畳み込み演算手法の導入を行った。さらに、その結果を VR 技術を用いて可聴化し、交通騒音シミュレーションシステムの構築を行った。

2. 数値解析手法

交通騒音伝播解析のような開空間を対象とした問題を扱う場合、有限な領域で計算を行う FEM では、仮想的に打ち切った開境界の処理を考慮する必要がある。本研究では高精度な開境界処理が可能な PML 法⁴⁾⁵⁾を用いた解析を行う。

2.1 支配方程式

支配方程式の 3 次元非定常修正波動方程式と移流方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \beta p - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_j^2} - c^2 \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{in } D, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \Phi_i + \mathbf{B} \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } D_{\text{pml}}, \quad (2)$$

ここで、 D は解析領域を、 D_{pml} は PML 領域を、 x_i, x_j は 3 次元空間の座標を、 t は時間を、 c は音速を、 p は音圧を表す。また、それぞれの変数と行列を以下に示す。

$$\begin{aligned} \alpha &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z, \\ \beta &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x, \end{aligned}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y - \sigma_z - \sigma_x & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \end{bmatrix},$$

ここで、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は各方向の減衰パラメータを表し、PML 領域では非 0、非 PML 領域では 0 となり音波を吸収する役割をもつ。また、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は次式により求まる。

$$\sigma_i(x_i) = \begin{cases} 0, & |x_i| < a_i \\ -\frac{3c \ln R}{2L_i} \left(\frac{x_i - a_i}{L_i}\right)^2, & a_i \leq |x_i| \leq a_i + L_i \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 L_i, a_i は各方向における PML 層の厚さ、PML 領域と非 PML 領域の境界座標値を、 R は反射の理論係数を表す。また、計算領域内では $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 及び Φ_i が 0 となるので通常の波動方程式を解くことに等しい。

2.2 有限要素法に基づく数値解析

式 (1), (2) に対して Galerkin 法に重み付き残差法を適用し、導いた弱形式に対し、空間方向に四面体 1 次要素を用いた有限要素法を適用し、以下の方程式を得る。

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \mathbf{M}_e \frac{\partial p}{\partial t} + \beta \mathbf{M}_e p + \mathbf{K}_e p - \mathbf{S}_e \Phi_j = \mathbf{F}_e, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \mathbf{M}_e \Phi_i + \mathbf{B} \mathbf{S}_e p = 0, \quad (5)$$

ここで $\mathbf{M}_e, \mathbf{K}_e, \mathbf{S}_e, \mathbf{F}_e$ はそれぞれ各要素の質量行列、拡散行列、移流行列、境界積分項を表す。また、本解析では陽解法を用いるため質量行列に集中化を施す。

時間方向の離散化には中心差分を用い、音圧と補助変数を求める。

2.3 インパルス応答解析

本研究では、インパルス応答解析手法を用いて可聴化音を作成し、遮音効果の比較や騒音体験システムの構築を行う。インパルス応答解析における入力波としては、一定の周波数特性を持つ Dirac のデルタ関数を用いることが望ましいが、波形が急峻であることから安定した伝播計算は困難である。そこで本研究では、畳み込み積分の近似解法である Lubich の CQM(Convolution Quadrature Method)⁶⁾で提案された以下の式をもとに生成した波を入力波として使用する。

$$\omega_n(\Delta t) = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{\alpha}{c} r} \right) e^{(-2\pi i \frac{nL}{L})}, \quad (6)$$

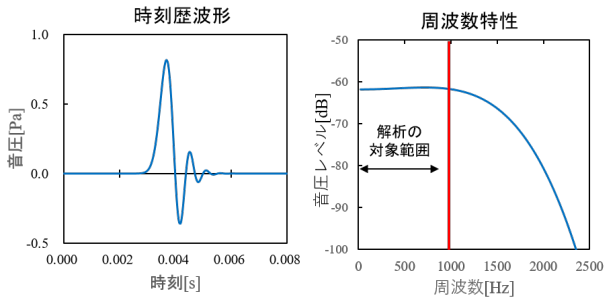


図-1 Lubichの擬似インパルス

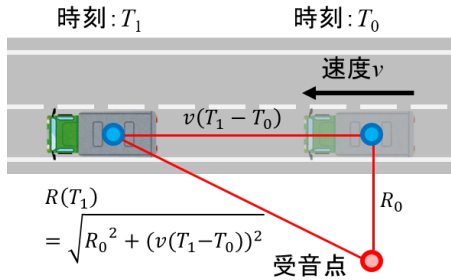


図-2 距離減衰式を用いたインパルス応答の推定

式(6)において、 $L = 500$, $r = 1.2\text{m}$, $\Delta t = 6.67 \times 10^{-5}\text{s}$ として生成した波形とその周波数特性を図-1に示す。図に示すように、Lubichの擬似インパルスの周波数特性は、ある周波数まではほぼ平坦に推移しその後急激に低下するという特徴を持つ。周波数特性が平坦な領域の上限の周波数は、式中のパラメータに連動して変更することができる。本研究ではピーク値から3dB減少する周波数までを一定の周波数特性であるとし、1.0kHz付近まではほぼフラットな特性を持つ擬似インパルスを使用する。

2.4 時変置み込み演算

移動音源の各位置を $x(t)$ 、各時間 t からのインパルス応答を $h(t, x(t))$ 、音源信号を $s(t)$ とすると、各位置、各時間における受音点での音圧 $p(t)$ は移動音源の波動方程式より次式で与えられ、近似的に式(7)で表せることが示されている⁷⁾。

$$p(k) = \sum_{k_s=0}^{\infty} s(k_s)h(k - k_s, x(k_s)), \quad (7)$$

また、式(7)は行列の演算の形で次式で表せる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{s}, \quad (8)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(1, \mathbf{x}(1)) & 0 & \cdots & 0 \\ h(2, \mathbf{x}(1)) & h(1, \mathbf{x}(2)) & \ddots & \vdots \\ \vdots & h(2, \mathbf{x}(2)) & \ddots & 0 \\ h(L_h, \mathbf{x}(1)) & \vdots & \ddots & h(1, \mathbf{x}(L_s)) \\ 0 & h(L_h, \mathbf{x}(2)) & \ddots & h(2, \mathbf{x}(L_s)) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h(L_h, \mathbf{x}(L_s)) \end{bmatrix}$$

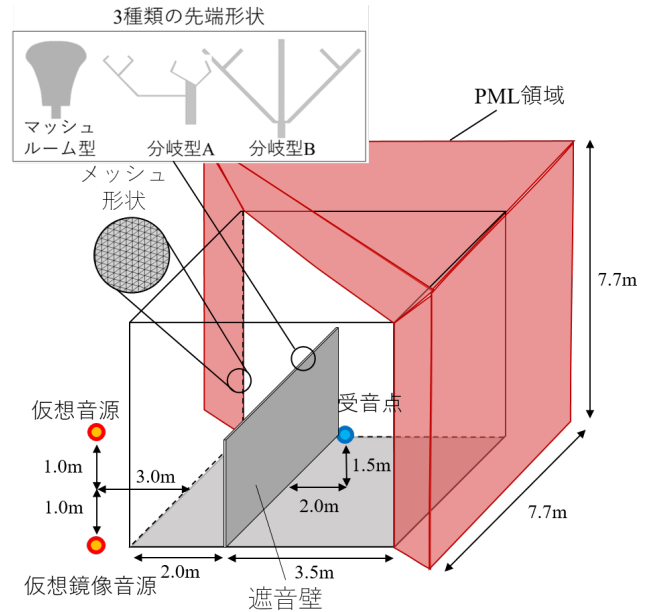


図-3 解析モデル

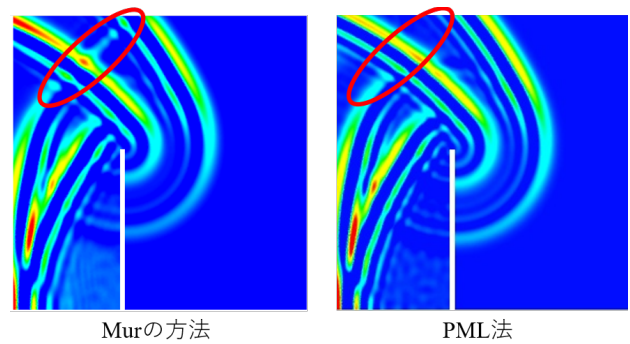


図-4 開境界処理の違いによる比較

式(8)における \mathbf{s} は音源信号ベクトル、 \mathbf{p} がは受音信号ベクトル、 \mathbf{H} は時変置み込み行列、 L_s は音源信号長、 L_h はインパルス応答長である。時変置み込み行列の作成にあたっては、すべての音源位置からのインパルス応答を求める必要があるが、求められるインパルス応答にも限界があるため、図-2に示す方法で基準点からの距離減衰によって各位置でのインパルス応答を求めた。ここで、図-2内の v は音源の想定速度、 R_0 音源と受音点の距離、 T_0 は基準の時刻、 T_1 は任意の時刻を表す。これにより、推定されたインパルス応答を時変置み込み行列に代入するが、その際に到達距離の差による到達時間差も考慮して代入する⁸⁾。そして、時変置み込み行列と、音源データとの演算により移動音源の可聴化音を再現する。

3. 数値解析例

PML法による開空間処理の妥当性、有効性の検証のため、既往のMurの方法による開空間処理の解析結果と比較を行う。また、4種類の遮音壁における解析、比較を行う。

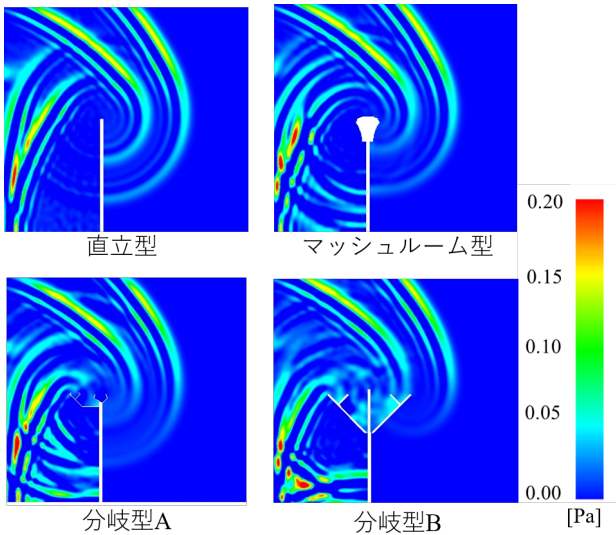


図-5 遮音壁と直交する断面上のインパルス波の音圧分布 ($t = 0.021344[s]$)

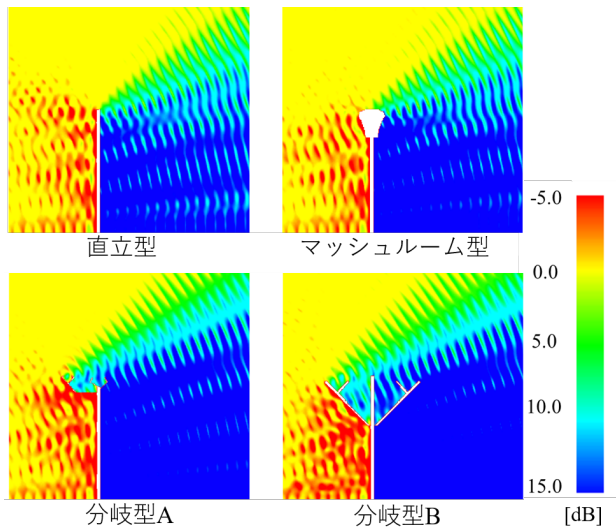


図-6 音圧分布の比較

3.1 解析条件

図-3に解析モデルを示す。遮音壁の形状は直立型遮音壁と3種類の先端改良型遮音壁を用い、寸法は遮音壁標準設計書に従い作成した。音速、時間増分幅、メッシュ幅はそれぞれ340m/s、 $6.67 \times 10^{-5}s$ 、0.022mとし入射波にはLubichの擬似インパルスを使用した。境界条件は、遮音壁、地面部ともに完全反射とし、PMLのパラメータは $L_i = 1.1m$ 、 $R = 10^{-6}$ としている。なお解析に使用したコンピュータは、東京大学のスーパーコンピュータシステム、Oakbridge-CXであり、8ノード(448cores)を使用し、領域分割に基づく並列計算を行っている。自由度は概ね8,000万である。

3.2 解析結果

遮音壁と直交する鉛直中心断面のインパルス応答の可視化結果を図-4に示す。Murの方法では上面の解析境界で波を吸収しきれず、赤枠内に存在する反射波が生

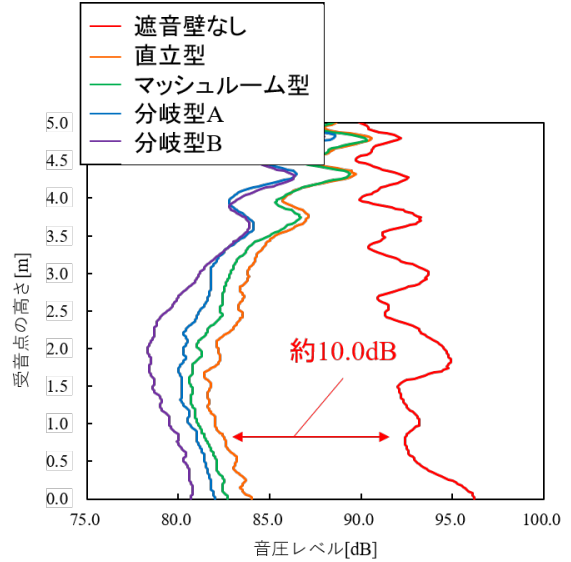


図-7 受信点の高さと音圧レベルの関係

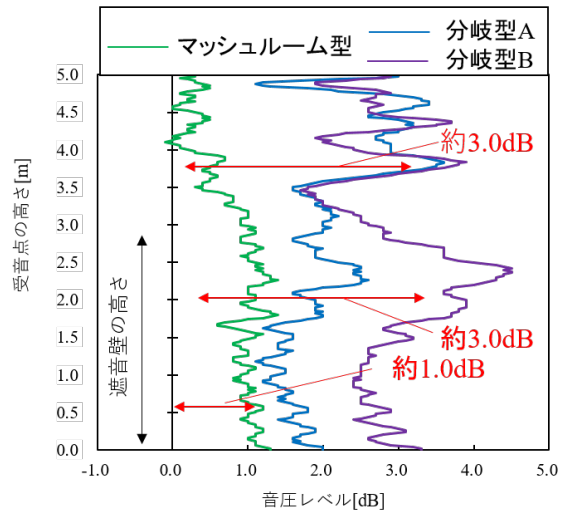


図-8 直立型遮音壁を基準とした音圧レベルの低減差

じている。一方PML法ではそのような現象は見られないことから高精度な解析が行えていることが確認できる。図-5に4条件それぞれのインパルス波の音圧分布を示す。波の伝播の様子が確認され、分岐型の遮音壁は他の遮音壁に比べ回折波を低減できていることが確認できる。また、図-6に各遮音壁モデルの音の低減量の分布図を示す。これらの図はインパルス応答に対して実音源(杭打機音)を畳み込み、各点における二乗平均平方根をdB変換したものである。図のコンターは青色に近いほど音が低減できていることを示し、分岐型Bの遮音壁が最も音を低減できていることがわかる。ここで、FEMは任意断面での数値データを取得することが難しいため、3次元可視化結果に任意に作成した2次元断面を、商用ソフト(AVS Express)を用いて重ね合わせることで断面上の数値データを取得している。

次に、高さに評価を行うため遮音壁の後方の2.0mの地点に高さ0.0~5.0mの地点で0.02mごとに受信点

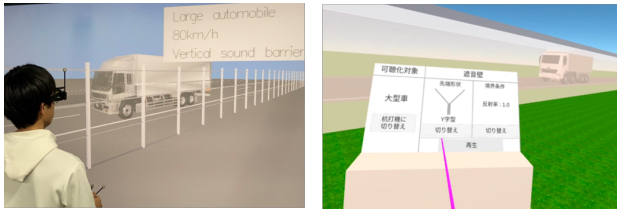


図-9 システム体験中の様子 (左: 没入型 VR 装置, 右: HMD)

を設け実音源を畳み込み、dB 変換を行った。図-7 に各遮音壁における、受音点の高さと音圧レベルの関係を示す。遮音壁により音の低減効果が確認でき、遮音壁のない場合に比べ 10dB 以上の音の低減が確認される。先端形状の違いによる比較を行うため、直立型遮音壁との音圧レベルの差と受音点の高さの関係を図-8 に示す。図より先端形状の違いにより音の低減差が異なり、分岐型は広範囲で音が低減できていることが確認できる。これは、先端形状の分岐により音を回折させないこと、遮音壁形状の寸法が横方向に長いことが理由として考えられる。

4. VR 装置を用いた可聴化

受音点において時変畳み込み演算を行い、得られた結果を用いて VR 技術を用いた可聴化を行い、交通騒音シミュレーションシステムの構築を行った。可聴化に用いたデバイスは没入型 VR 装置の Holostage と HMD(ヘッドマウントディスプレイ)の Meta Quest2 である。可聴化システムの詳細は既往の文献を参照されたい¹⁾⁸⁾。可聴化対象としては、大型車の走行音を用いた。大型車は時速 80km の速度で 150m を走行するものとし、音源には大型車の走行音を定常音化したデータを使用した。システム利用中の様子を図-9 に示す。VR 空間内において、計算結果通りの音場が再現できているかどうかの検証を行うため、計算結果と VR 空間内での測定値との比較を行った。図-10、図-11 にそれぞれの装置おける比較を示す。没入型 VR 空間の測定は受音点位置に騒音計を設置し測定を行った。遮音壁がある場合、一部乖離が見られる原因はプロジェクターの駆動音に起因する暗騒音の影響であると考えられる。また、可搬型 VR 空間の測定には装置の録画機能を用いた。取得データの時間幅が異なることから、わずかな差は生じるものの計算結果を良く再現できていることが確認できる。

5. おわりに

本研究では、PML を用いた有限要素法により、複雑な幾何形状を有する遮音壁周辺の音場解析を行った。また、VR 技術を用いて計算結果を可聴化するシステムの構築を行い、計算結果と VR 空間内での測定値と比較を行った。以下に結論を示す。

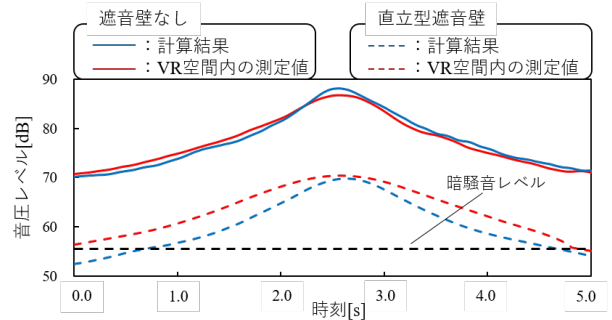


図-10 計算結果と没入型 VR 空間内の測定値と比較

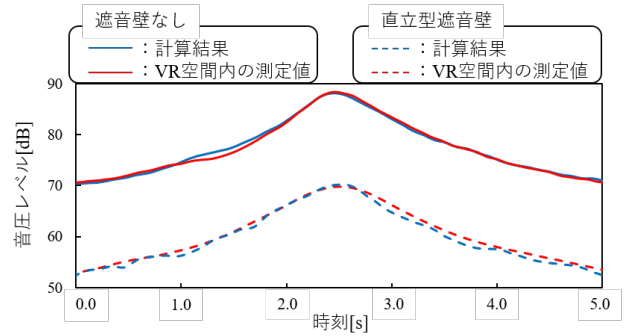


図-11 計算結果と HMD の空間内の測定値と比較

- PML 法は Mur の方法に比べ、開境界処理を高精度に行えることを確認した。
- 騒音評価システムによる可聴化結果は計算結果をよく再現できていることを確認した。

今後の課題として、実測値との比較が挙げられる。

参考文献

- 1) 庄子諒, 深澤一志, 吉川仁, 高橋徹, 榎山和男: インパルス応答解析に基づく高速多重極境界要素法による音場解析とその可聴化, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.77, No.2, pp. I.171-I.182, 2021.
- 2) 深澤一志, 榎山和男, 吉川仁: インパルス応答解析に基づく有限要素法を用いた音場解析手法の構築, 計算工学講演会論文集, 計算工学会, Vol.27, E-10-03, 2022.
- 3) 株式会社高速道路総合技術研究所: 遮音壁標準設計図集, 創英, 2017.
- 4) Kaltenbacher, B. Kaltenbacher, M. and Sim, I., "A modified and stable version of a perfectly matched layer technique for the 3-d second order wave equation in time domain with an application to aeroacoustics," *J. Comput. Phys.*, Vol.235, pp.407-422, 2013.
- 5) Zhou, F. Ma, Q. and Gao, B., "Efficient unsplit perfectly matched layers for finite-element time-domain modeling of elastodynamics," *J. Engng. Mech.*, Vol.142, No.04016081, pp.1-12, 2016.
- 6) Lubich, C. Convolution quadrature and discretized operational calculus. I. *Numerische Mathematik* (1988) Vol.52, pp.129-145.
- 7) 中島弘史, 中臺一博, 長谷川雄二, 辻野広司: 時変拡張ビームフォーミングによる移動音源の抽出, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.21, 3C8-4, 2007.
- 8) 今井啓太, 吉町徹, 榎山和男: 吸音モデルを考慮したインパルス応答解析手法の構築と VR 技術を用いた可聴化, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.75, No.2, pp.I.259-I.267, 2019.

マルチエージェントモデルに基づく 津波避難シミュレーションの適用性向上に関する研究

Improvement of Applicability of Tsunami Evacuation Simulation based on Multi-agent Model

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2年 藤山 麗
Uraraka Toyama

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震による災害を契機とし、津波に対する防災・減災対策として、防波堤の建設やかさ上げ等、ハード対策のみでは限界であるという認識が高まった。そこで、各自治体はソフト面の対策として、ハザードマップの作成・公開や避難訓練等の防災教育に一層の力を入れている。近年、特にソフト対策の評価及び検討を行う手法の一つとして、人的被害の予測が可能となる避難シミュレーションの有用性が高まり、数多くの手法が提案されている。

本研究では、既往の津波避難シミュレーション¹⁾に対し、新たに歩行避難者に視野を与え、津波による被害回避システムの構築を行った。また、建物倒壊シミュレーションの結果を用い、道路閉塞箇所の迂回を考慮した。以上より、本システムの適用性向上を図る。

2. シミュレーション手法

本研究では、マルチエージェントモデルに基づく津波避難シミュレーションを行う。マルチエージェントとは、周囲の環境から情報を取得することにより、自律的な行動が可能となるエージェント（避難者）が多数共存し、相互作用を及ぼす環境のことを指す。

本研究のフローチャートを図-1に示す。地理情報の取得、避難路の作成等、入力データの作成・読み込みにはGISソフトであるArcGISを、避難シミュレーションシステムの構築にはNetLogoを用いる。

2.1 地形データの作成

国土地理院が提供しているデータを基に、避難者初期位置、避難場所、避難路を作成する。また、作成した避難路上に、避難者が経路選択を行う地点であるノードを配置する。

2.2 津波シミュレーション

作成された地形データを基に、浅水長波方程式を用いた安定化有限要素法による津波シミュレーション²⁾を行った。津波の初期条件は、当該地域の津波被害が最大となる条件である、中央防災会議が提供している津波断層モデルケース4から算出された水位変動量を用いた。

2.3 避難シミュレーション

避難開始直後、避難者は初期位置から最短距離のノードを選択し、移動する。以降、ノードに到着する度に、隣接する各ノードに対し、式(1)に示す重力モデル式³⁾を用い、避難経路の選択・移動を行う。

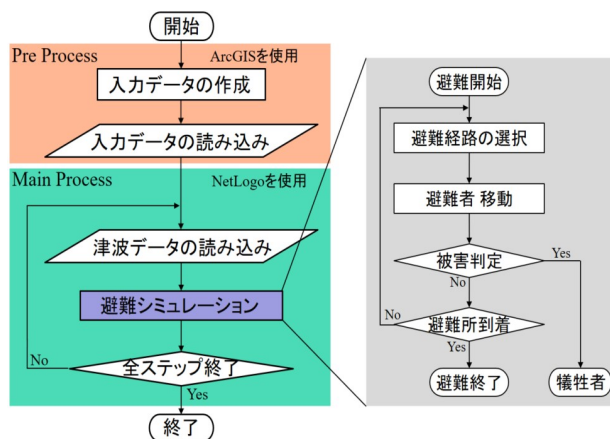


図-1 避難シミュレーションの流れ

$$S = \frac{a}{s^\alpha} - \frac{b}{z^\beta} - \frac{c}{w^\gamma} \quad (1)$$

ここで、 S を効用とし、 s は避難所までの距離、 z は標高、 w は水際線からの距離である。 a 、 b 、 c は変数に対する重みであり、値が大きいほど効用に占める割合が大きくなる。また、 α 、 β 、 γ は変数に対する空間距離の影響度であり、値が小さくなるほど遠くまで影響を及ぼす。避難者は効用 S が最大となる隣接ノードへ移動し、図-1に示す流れの通り、避難経路の選択・移動・被害判定を繰り返す。そして、避難場所に到達または犠牲者判定を受けた時点で、避難行動を終了する。

3. 津波による被害回避

本研究では、三角形の非構造格子を用いる津波シミュレーション結果を、津波情報を持つ等間隔の格子点（津波ノード、図-2参照）に写像することにより、津波を表現する。津波ノードを中心とした半径 D [m]以内の避難者に対し、津波の水深と流速の情報を基に性別毎の被害判定⁴⁾を行う。

3.1 危険認知範囲の設定

津波遭遇時に避難者が前進し続けられないよう、津波を事前に認知・安全な避難路への迂回を考慮する。

3.1.1 円形の危険認知範囲

既往研究¹⁾では、避難者の前方のノードが、津波ノードを中心とした半径 R [m]以内に位置している場合（図-2、(1)参照）、その津波ノードの情報を避難者に与える手法を用いていた。これにより、避難者は津波を目の前に行う経路選択以前に危険を認知し、迂回が可能となる。

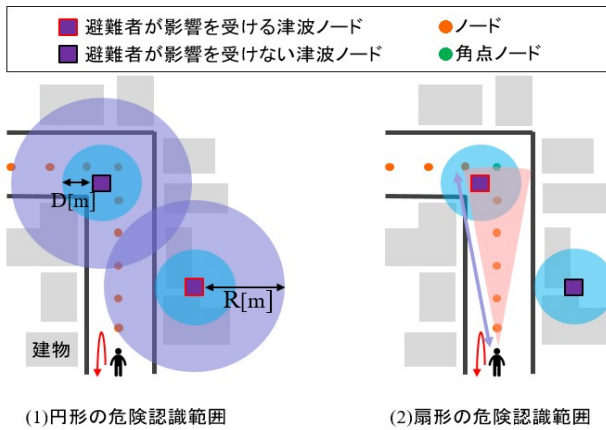


図 - 2 危険認知範囲の設定

しかし、この手法は単純な円形であるため、建物等により現実では認知不可能な位置の情報をも取得する欠点を持つ。そこで、上記を改善する手法を次項に述べる。

3.1.2 扇形の危険認知範囲

認知不可能な位置の情報を取得しないよう、幅員と曲がり角(角点ノード)の情報を用いる。避難者に対しあらかじめ設定する、直線避難路における見通し限界距離と、幅員を維持する角度により構成される扇型を、視野の範囲としてモデル化する(図-2,(2)参照)。

視野内に、角点ノードが存在しない場合(図-3,(I)参照)は、上記の初期範囲を維持し、視野内に角点ノードが存在する場合(図-3,(II)参照)は、その角点ノードまでの距離と幅員を維持する角度により構成される扇型を、視野の範囲とする。

この手法により、同一避難路外等の認知不可能な位置に遡上している津波の影響を受けることなく、避難路の迂回が可能となる。

3.2 危険認知範囲の検討

危険認知範囲の有無及び形状について、シミュレーションを実行し、犠牲者数の差異を確認する。

- ケース 1 : 被害回避の考慮なし
- ケース 2 : 円形の危険認知範囲の考慮(既往手法)
- ケース 3 : 扇形の危険認知範囲の考慮(本手法)

3.2.1 シミュレーション条件

図-4に示すように、ノード間隔 5m、幅員 4m、避難場所 1か所のシミュレーションを実行する。また、円形の危険認知範囲半径 R 、及び扇型の視野を構成する、直線避難路における見通し限界距離を、ともに 30m とする。

上記の条件の下、津波の認知範囲について、以下に示す 3 ケースのシミュレーションを実行する。

3.2.2 シミュレーション結果

ケース 1 では、回避行動を行わないため、前方から津波が接近しているにも関わらず前進を続け、被害判定により犠牲者となる様子が確認された(図-5参照)。

ケース 2 では、津波ノードを中心とした半径 R [m]

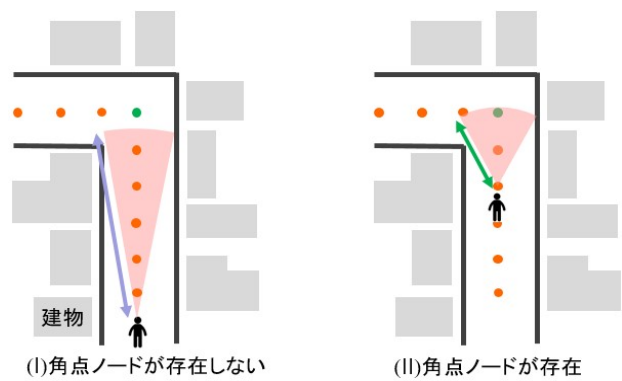


図 - 3 扇形の危険認知範囲の考慮



図 - 4 避難シミュレーションの様子



図 - 5 ケース 1 : 被害回避の考慮なし

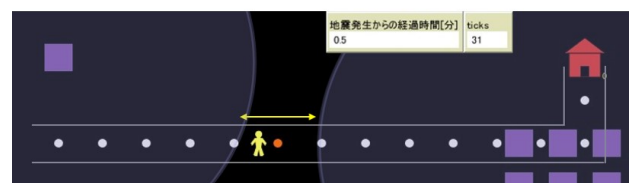
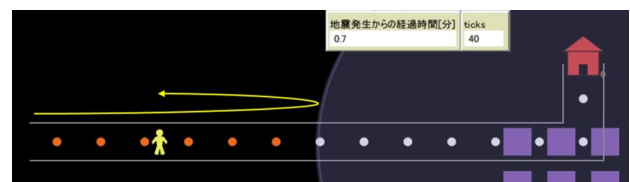


図 - 6 ケース 2 : 円形の危険認知範囲の考慮
(上段:被害回避 下段:避難路外津波の認知)

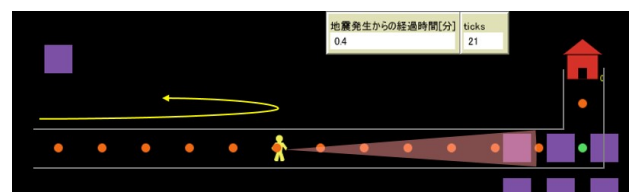


図 - 7 ケース 3 : 扇型の危険認知範囲の考慮

以内に位置しているノードを白色に変化させている（図-6 参照）。図-5 と異なり、避難者は前方の津波を認知したとして引き返したことから、危険認知範囲の効果を確認した（図-6、上段参照）。しかし、単純な円形の危険認知範囲であることから図-6、下段に示すような、同一避難路外等の実際には認知不可能な位置に襲来した津波の影響をも受ける。そのため前方の津波による回避行動を行ったものの、回避先のノードも危険であると判断されたために、避難者は回避経路がなく、右往左往する様子が確認された。

最後に、ケース 3 の結果を図-7 に示す。図-6、下段と異なり、回避行動を行うが様子が確認された。

以上より、扇型の視野を考慮することで、建物等により実際には認知不可能な位置に襲来した津波の影響を受けず、前方の津波による被害回避を行うシミュレーションが可能となった。

4. 建物倒壊による道路閉塞

本研究の対象地域の避難路は非常に狭隘であり、地震の発生に伴う建物の倒壊により閉塞が懸念される。そこで、避難者に対し、建物倒壊による道路閉塞箇所遭遇時に、通行可能な避難路への迂回システムを考慮する。

4.1 一对の建物間の道路閉塞確率

既往研究¹⁾では、建物倒壊は独立して発生するという前提条件の下、建物種別及び幅員から算出される一对の建物間の道路閉塞確率（図-8 参照）を基に、道路閉塞箇所を設定していた。また、全閉塞箇所は瓦礫の超越による通行可能を前提とし、遭遇した避難者に対し、通過に伴う歩行速度の低下を考慮した。

この手法は、容易に道路閉塞の予測が可能となるが、個々の建物の大きさや周囲の環境等、対象地域の特徴を反映できていない。また、対象地域の避難路は非常に狭いため、全閉塞箇所が通行可能とは限らない。そこで、上記を改善する手法を次節に述べる。

4.2 建物倒壊シミュレーションによる道路閉塞率

地域の特徴を反映するため、個々の建物をサイズ・形状・耐震の有無を基にモデル化した、個別要素法を用いた既存の建物倒壊シミュレーション⁵⁾により得られる道路閉塞率の結果を用いる（図-9 参照）。

本研究では、算出された結果を基に、道路閉塞率が0～59.9%の道路は、通過に伴う避難者への影響はなく、60～79.9%の道路は既往手法による歩行速度低下の考慮、80～100%の道路は通行不可として迂回を考慮させる。

また、道路閉塞は避難路に危険を及ぼす要因ではあるが、津波と異なり時間変化に伴う位置移動はない。そのため、閉塞箇所遭遇した避難者は、視野を使用した回避行動ではなく、閉塞箇所を除いた経路選択を再度行うことで、安全な避難路へ迂回する。



図-8 一对の建物間の道路閉塞確率



図-9 建物倒壊シミュレーションによる道路閉塞率

5. 適用例

以上の手法を、南海トラフ地震による甚大な被害が懸念されている地域に適用する。

5.1 シミュレーション条件

対象地域を高知県中土佐町久礼地区とし、沿岸部に位置する南北 2652m × 東西 2076m をシミュレーション領域とする。避難場所は、役場がハザードマップにおいて指定している 25 か所、避難者は歩行避難者 2650 人に限定した。歩行避難者は建物内から避難を開始すると仮定し、建物の重心を初期位置としている。歩行避難者に対しては、年齢性別別歩行速度、年齢性別別体重、勾配速度、群集速度、歩行疲労割引率、避難場所の指定、及び 3 章において検討を行った扇型の危険認知範囲（ケース 3）の 7 要素を考慮している。

また、本システムでは、シミュレーション開始時刻を地震発生時刻とし、避難者は避難開始時刻に、一斉に避難を開始するものとする。

上記の条件の下、建物倒壊による道路閉塞の考慮について、以下に示す 3 ケースのシミュレーションを実行し、比較を行う。

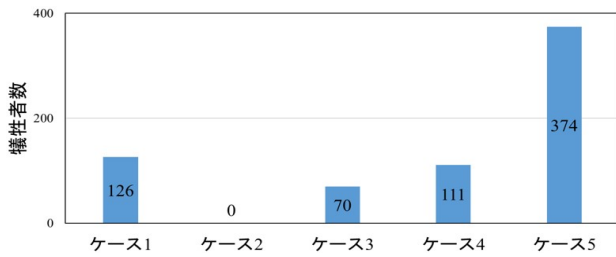


図-10 犠牲者数の比較

- ケース3：道路閉塞の考慮なし
- ケース4：一对の建物間の道路閉塞確率(既往手法)
- ケース5：建物倒壊シミュレーションによる道路閉塞率(本手法)

5.2 シミュレーション結果

津波は、地震発生から29分後に第一波、40分後に第二波が到達した。地震発生から10分後に避難開始した各ケースの犠牲者数を図-10に、同時刻におけるシミュレーションの様子を図-11に示す。道路閉塞を考慮していないケース3に対し、ケース4,5ともに道路閉塞の考慮により避難者の移動が遅れ、犠牲者数が増加する結果を得た。また、ケース4に対し、ケース5の犠牲者数が特に多い原因として、通行不可避難路の考慮が挙げられる。本研究では、道路閉塞率80~100%の道路を通行不可としているため、自身の初期位置である建物前の道路が閉塞率80~100%の避難者は避難行動の開始が不可能となる。また、避難路へ移動できた避難者においても、その後袋小路となり、避難場所への到達が困難となる避難者を多々確認した。

以上より、新たに建物倒壊による道路閉塞を考慮したことによる犠牲者数の差異を確認した。対象地域における個々の建物をモデル化した倒壊シミュレーションの結果を用いることで、より地域の特徴を考慮したシミュレーションが可能となった。また、避難開始不可能な避難者を多数確認したことから、早急な建物の耐震化及び道路の拡張の促進に有用であるといえる。

6. おわりに

本研究では、歩行避難者に視覚情報を与え、津波及び道路閉塞箇所の回避行動を考慮した津波避難シミュレーションシステムの構築を行い、以下の結論を得た。

- 視野及び閉塞箇所の考慮により、現実行動に即した避難シミュレーションが可能となった。
- 対象地域の建物をモデル化した建物倒壊シミュレーションの結果を用いることで、より地域に適用した避難シミュレーションが可能となった。

今後の課題として、閉塞箇所における通行不可の検討が挙げられる。

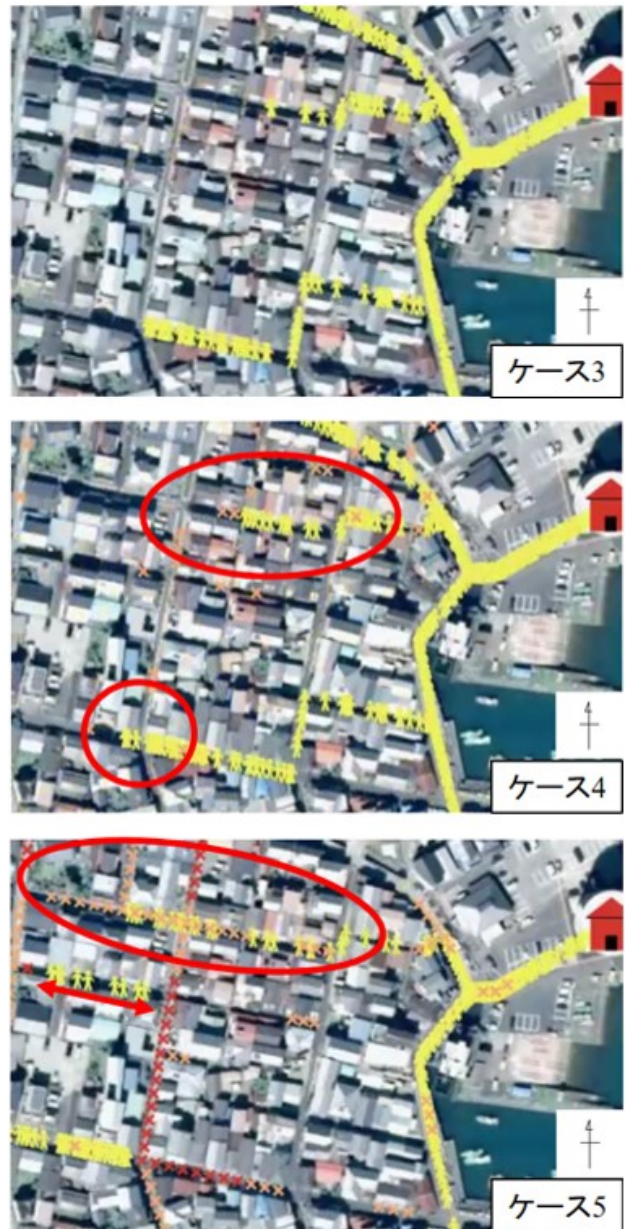


図-11 各ケースにおけるシミュレーションの様子

参考文献

- 1) 中村麻菜美, 藤山麗, 大川博史, 樫山和男: 地震の発生に伴う建物倒壊及び火災延焼を考慮した津波避難シミュレーション, 第49回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-9, 2p., 2022.
- 2) 利根川大介, 樫山和男: 安定化有限要素法による津波遡上及び流体力の解析手法の構築, 応用力学論文集(土木学会), Vol.12, pp. 127-134, 2009.
- 3) 竹下史朗, 小林一郎, 山田文彦, 上野幹夫: マルチエージェントモデルを用いた洪水・避難シミュレータの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.16, pp. 203-212, 2007.
- 4) 有川太郎, 大坪大輔, 中野史文, 下迫健一郎, 高橋重雄, 今村文彦, 松富英夫: 遡上津波力に関する大規模実験, 土木学会海岸工学論文集, 第53巻, pp.796-800, 2006.
- 5) 原忠, 西村大輝, 中村友紀恵, 山田雅行, 羽田浩二, 山崎正明: 個別要素法による海岸平野部に立地する木造住宅の倒壊予測, 地盤工学研究発表会発表講演集, 第54巻, 2p., 2019.

水域環境における GNSS データを用いた ロケーションベース AR 可視化システムの構築

Development of a Location-based AR Visualization System using GNSS Data for Water Environment

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 鈴木 雅大
Masahiro SUZUKI

1. はじめに

近年、可視化技術は建設分野においても、計画・設計・施工・維持管理において有効に用いられている。これらは、合意形成ツールとなるだけでなく、生産性の向上・業務の効率化の面からも有用な方法として普及している¹⁾。可視化技術の中で、AR (Augmented Reality : 拡張現実) がある。現実に対し CG を用いた仮想の空間を重畳する可視化手法であり、現実空間との親和性が高いことから、現場での利用において有用性の高い手法である。AR には様々な仮想空間の重畳手法がある中で、既往研究ではマーカーベース AR の構築を行ってきた²⁾³⁾⁴⁾。マーカーベース AR とは、QR コードのような画像を重畳の基準点として可視化を行う手法である。特徴として、マーカーの設置と、カメラのトラッキングに精度が依存することが挙げられる。そのため、海洋などの周辺に特徴点となる箇所が少ない環境や、マーカーを正確に固定できない環境では、重畳の精度が低下する場合がある。

著者らは以上の点に着目し、位置情報に基づき重畳を行うロケーションベース AR の構築を行った。本研究では、水域環境に対し本システムを適用するとともに、マーカーベースとの比較から本システムの有用性を評価する。

2. ロケーションベース AR 可視化システム

2.1 システム概要

本システムでは、GNSS から取得した高精度な位置情報に基づき仮想空間の重畳を行う。そのため、マーカーによる位置合わせを不要とし、半自動的な重畳を行うことが可能となる。また、リアルタイムに更新する位置情報を基に、移動による重畳のズレを補正するため、カメラ映像によるトラッキングが不要となる。

2.2 可視化デバイスとフローチャート

本システムにて使用する機器とシステムのフローチャートを図-1 に示す。本システムでは、総合開発環境である Unity ver.2020.3.24f にて作成したアプリケーションを用いて AR 可視化を行う。さらに、高精度な位置情報 (NMEA) を取得可能にするため、サブメーター級高精度 GNSS 受信機である CORE 社製の Cohac ∞

QZNEO (図 1 : ②) を 2 台使用する。受信機に接続したアンテナ (図-1 : ①) を可視化デバイス (図-1 : ③) の中心から左右等間隔に設置した。可視化デバイスには Apple 社製の iPad Pro を使用している。

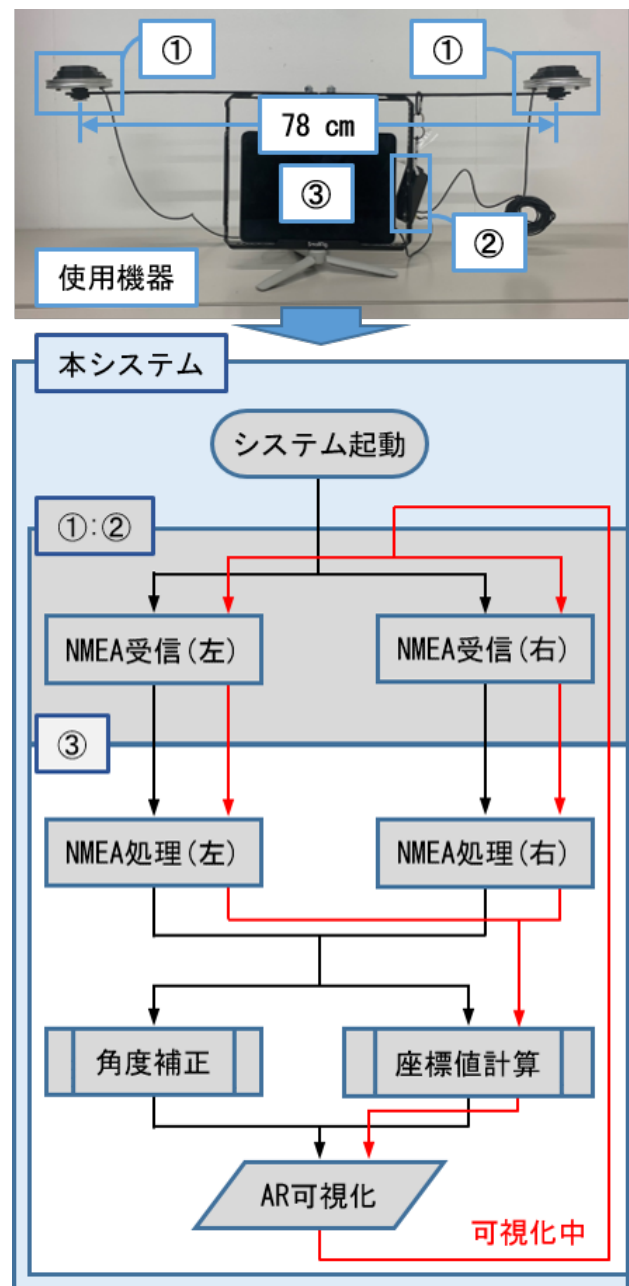


図-1 本システムの概要

また、可視化デバイスと GNSS 受信機は UDP 通信にて接続し、可視化アプリケーションと NMEA の送受信を行う (図-2)。UDP 通信の特徴として、複数機器の接続が可能であり、高速通信が可能であるため採用した。受信した NMEA から重畳に必要な位置情報等を抜き出し、重畳位置計算を行う。

2.3 重畳手法

本システムでは、平面直角座標系に基づき仮想空間を重畳させる。ここで、各 GNSS 受信機が取得する位置情報 (緯度・経度) を平面直角座標系の座標値に変換する必要がある。計算式については参考文献を参照されたい⁵⁾⁶⁾。また、計算条件として世界測地系の GRS80 楕円体に従うとし、長半径 a を $6,378,137.00[m]$ 、逆扁平率 F を 298.257222101 として計算を行う。

これらの計算で求めた各 GNSS 受信機の座標値の平均値を、可視化デバイスの座標値として重畳を行う。なお、各 GNSS 受信機の位置情報は 1 秒ごとに更新を行うため、以上の計算も同様に再計算を行う。

また、重畳計算を行うにあたり、仮想空間の座標軸を平面直角座標系と対応させる必要がある。本システムでは、仮想空間の座標系 (x, y, z) を平面直角座標系の (東, 標高, 北) と対応させる。

2.3.1 角度補正

以上より、仮想空間の設定を行った。しかしながらアプリケーションの性質上、システム起動時に可視化デバイスの位置を原点とし、重力ベクトルの逆方向を y 軸、それに伴いデバイスのカメラ方向を z 軸とした左手系の座標系が構築される。そのため、仮想空間と現実空間に方位のズレが生じる。したがって図-3 に示す通り、設置した 2 台の GNSS 受信機の位置関係から方向角を式 (1) を用いて計算する。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{z_R - z_L}{x_R - x_L} \right) \quad (1)$$

ここで、平面直角座標系に変換した左右の GNSS 受信機の座標値をそれぞれ (x_L, y_L, z_L) : GNSS 受信機左, (x_R, y_R, z_R) : GNSS 受信機右と表記している。以上から平面における子午線と z 軸のズレを修正した。さらに、子午線方向と真北のズレ (真北方向角) を計算し、以上を補正角とする。これらの補正計算は、システム起動時に一度行われ、可視化中のデバイスの回転は可視化デバイスのジャイロセンサーによって制御する。

2.3.2 座標値計算

重畳のイメージを図-4 に示す。現実空間における可視化デバイスの位置と可視化対象を重畳する位置が図-4 B) のような関係にある場合、可視化 3 次元モデルの座標値は、現実空間と仮想空間を重ね合わせた場合における

可視化位置を仮想空間の原点とみなした「現実空間における可視化位置から重畳位置までの距離」とする (図-4 A))。これらの計算は 1 秒ごとに実行され、移動による 3 次元モデルの座標値のズレを補正する。

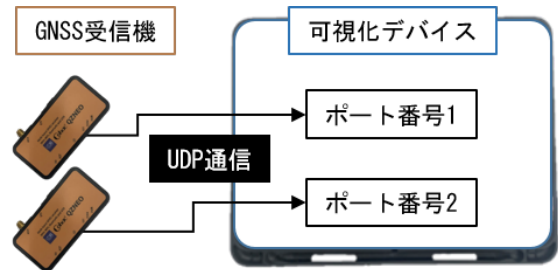


図-2 本可視化機器間の通信

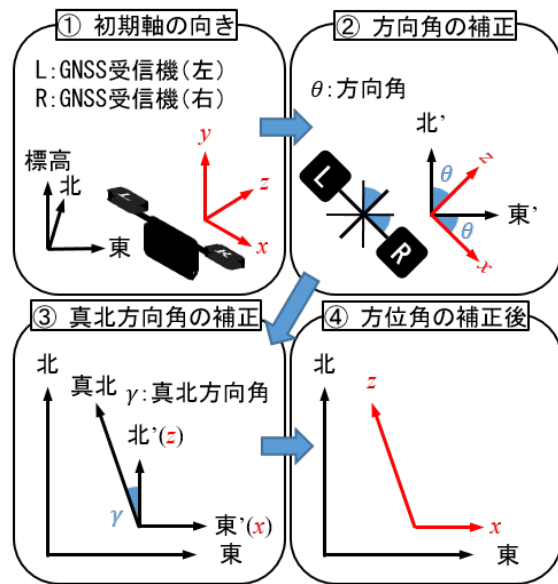
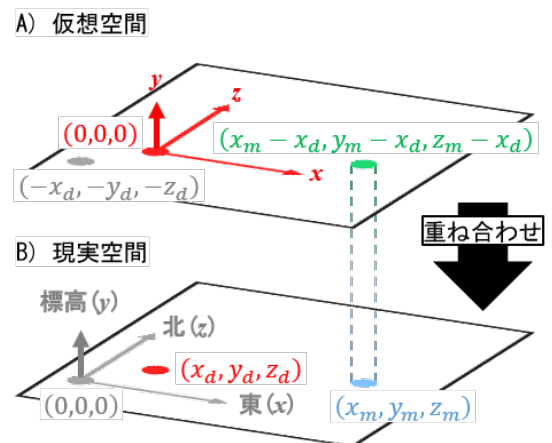


図-3 方位角の補正



- 平面直角座標系原点
- 可視化デバイス位置
- 重畳位置
- 可視化3次元モデル

図-4 重畳位置計算



図-5 可視化対象（河川流れ）

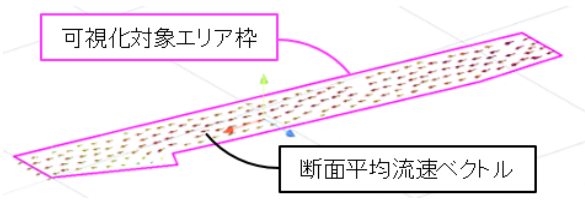


図-6 可視化対象 3次元モデル

3. 適用例

本システムを用いた水域環境における可視化の適用例を示す。ここで、マーカーベース AR と可視化結果の比較から有効性を検証し、適用性の検証として、海岸構造物に適用した可視化結果を評価する。

3.1 河川流れの可視化

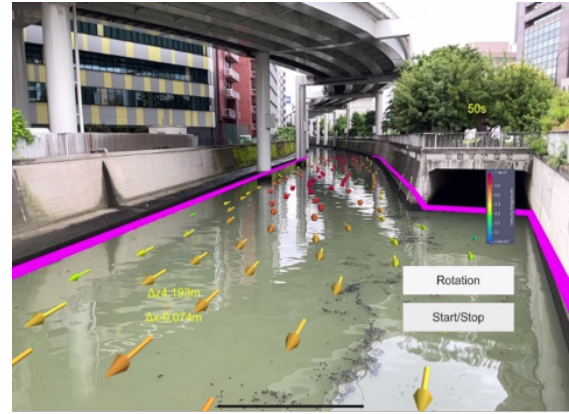
本システムの適用例として、河川流れ解析の可視化を示す。可視化対象は、図-5 に示す東京都文京区に位置する神田川とし、平面直角座標系では9系に従う。可視化に用いる解析データは既往研究⁴⁾にて解析されており、断面平均流速ベクトルとして出力されている。

3.1.1 プリプロセス

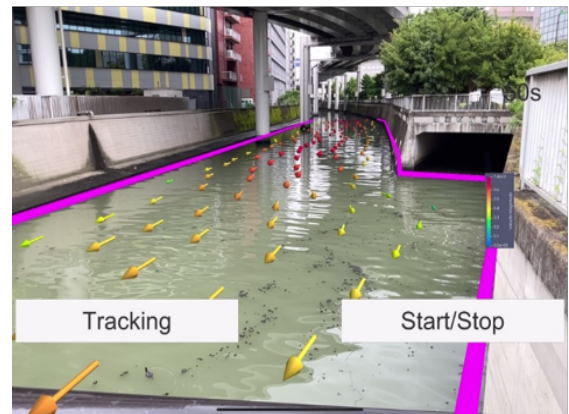
プリプロセスにて本可視化データの3次元モデル化を行った。さらに、AR可視化時に重畳の精度を明確にするため、可視化範囲を示す枠を別途作成し、断面平均流速ベクトルモデルとともに表示する（図-6）。また、本可視化モデルは重畳に用いる地理座標を有していない。そのため、地理院地図⁶⁾及び基準点成果等閲覧サービス⁷⁾を使用し、モデルの任意の点に対し地理座標を付与した。

3.1.2 可視化結果

本システムを用いた可視化結果を図-7 A) に示す。可視化エリア枠と現実空間における可視化対象のズレは小さく、概ね精度良く重畳されていることが分かる。また、本システムの有効性を評価するために、同様の可視化モデルを使用し、マーカーベース AR による可視化を行った。マーカーベース AR による可視化結果を図-7 B) に示す。これらの可視化結果の比較から、マーカー



A) ロケーションベースARの可視化結果



B) マーカーベースARの可視化結果

図-7 可視化結果



図-8 可視化対象（海岸構造物）

ベース AR と同程度の重畳精度を確認している。一方で、ロケーションベース AR については、付与した地理座標が正確であると言えないため、別途検証が必要である。

3.2 海岸構造物の可視化

地理座標を有する3次元データの可視化例として、岡山県岡山市東区宝伝地先に設置されている海岸構造物（消波ブロック）を示す（図-8：左）。平面直角座標系では5系に従う。マルチビーム音響測深機によって点群データと、その地理座標が取得されたものであり、地理座標の付与は不要である。

3.2.1 プリプロセス

今回の可視化では、可視化デバイスへの負荷を考慮し、点群データから作成した TIN により3次元モデル化したものを可視化する（図-8：右）。

本可視化対象の可視化時における課題として、海水面によって目視可能な部分が限定され、重畳の判別が難しい点が挙げられる。本システムでは、この点を解決するため簡易的な海水面のモデルを表示する。消波ブロックモデルが表示される部分を限定することで、より直感的に判別し易くすることを目的とする。また、海水面の上昇・下降に対応するため、海上保安庁のサイト⁸⁾に公開されている観測データ（5分毎瞬間値）をリアルタイムに取得することで、海水面モデルの制御を行う。今回は、可視化対象近海の宇野リアルタイムデータを使用した。

3.2.2 可視化結果

可視化対象と可視化結果を図-9に示す。可視化対象全体的に精度よく重畳されていることを確認した。また、図-9 A) 及び B) は視点の異なる詳細部の可視化結果である。図-9 A) では、複数の消波ブロックに対し3次元モデルの面が重畳されていることが確認できる。図-9 B) は図-9 A) から50m程度移動した可視化視点である。こちらも同様に精度良く重畳されており、位置情報を用いたトラッキングにより、移動によるズレが非常に小さく可視化が行われていることが確認できる。

さらに、図-9 C) に示す海水面を表示した可視化結果では、非表示の可視化結果と比較し、重畳位置を直感的に判断し易いことが確認できる。

一方で、高さ方向の座標値として使用している標高の値は、GNSSの特性上、緯度経度と比較して精度が低いため手動での補正が必要となった。また、可視化中の画面移動により、ジャイロセンサーの誤差が蓄積する課題が挙げられた。

4. おわりに

本研究では、水域環境におけるAR可視化を行うため、GNSSから取得する位置情報を基に重畳を行うロケーションベースAR可視化システムの構築を行った。また、同様の可視化対象を用いたマーカーベースARの可視化結果と本システムの比較を行った。さらに、適用性を評価するため海岸構造物に本システムを適用し、以上の可視化結果から以下の結論を得た。

- 河川流れの可視化に適用した本システムと既往研究を基に構築したマーカーベースARの可視化結果の比較では、同程度の可視化結果を得ることができ、有効なシステムであることを確認した。
- 海岸構造物の可視化に適用した本システムの可視化結果から、周辺に特徴点が少ない環境における可視化においても重畳や移動によるトラッキングが正確に行われ、有効な手法である事を確認した。

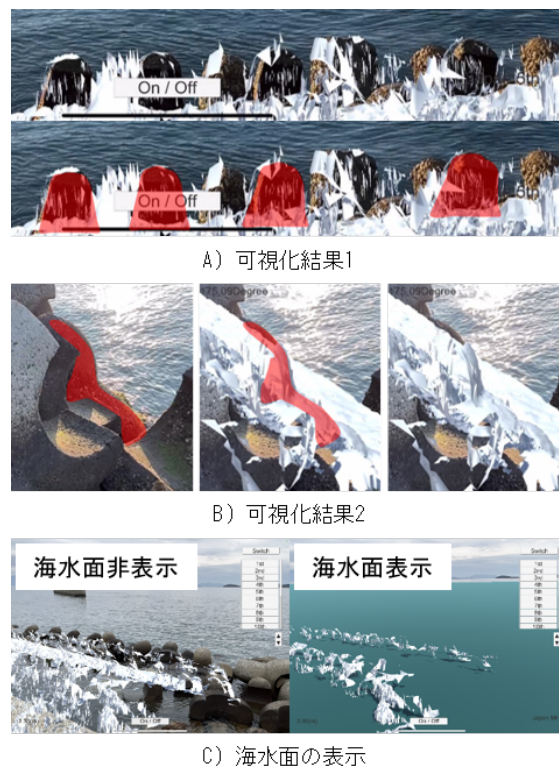


図-9 可視化結果（海岸構造物）

今後の課題として、高さ方向の精度向上と、画面移動によるトラッキングのズレの改善に関する検討を行い、より水深の深い海中構造物の可視化に適用することが挙げられる。

参考文献

- 1) 矢吹信喜：土木建設分野におけるVR/ARの活用に関する研究と実務への適用，計測と制御，55巻，6号，pp.483-488，2016.
- 2) 洲崎文哉，榎山和男，琴浦毅，石田仁，吉永崇：ARKitを用いた地下埋設物のAR可視化システムの構築と重畳の高精度化の検討，土木学会論文集F3，77巻，2号，pp.I131-I139，2021.
- 3) 池田直旺，花立麻衣子，榎山和男，車谷真緒，吉永崇，前田勇司：SLAM技術に基づく空間情報を用いたAR可視化システムの構築とその適用性の検討，土木学会論文集F3，73巻，2号，pp.II48-II54，2017.
- 4) 花立麻衣子，菅田大輔，榎山和男，宮地英生，前田勇司，西畑剛：水環境流れ問題のためのマーカーレスARシステムの構築と適用性の検証，土木学会論文集F3，72巻，2号，pp.I192-I199，2016.
- 5) 河瀬和重：Gauss-Krüger投影における経緯度及び平面直角座標相互間の座標換算についてのより簡明な計算方法，国土地理院時報，121号，pp.109-124，2011.
- 6) 国土地理院：<https://www.gsi.go.jp/>（入手2023.2.1）
- 7) 基準点成果等閲覧サービス：<https://sokuseikagis1.gsi.go.jp/top.html>（入手2023.2.1）
- 8) 海上保安庁宇野リアルタイム観潮データ：<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/TIDE/gauge/gauge.php?s=0115>（入手2023.2.1）

VR 技術を用いた超音速機騒音評価システムの構築

Development of a Supersonic Aircraft Noise Evaluation System using Virtual Reality Technology

都市環境学科 6年 江口 大智
Taichi EGUCHI

1. はじめに

著者らの研究では幾何音響理論手法を用いた航空機騒音評価システムの構築¹⁾を行い、民間航空機の騒音評価においてその妥当性と有効性を示してきた。

本研究では、従来のシステムを、騒音の苦情件数が多い基地周辺の超音速機の騒音評価に適用するための検討を行うものである。超音速機がもたらす騒音の特徴として、音のエネルギーの大きさが方向によって異なる指向性が挙げられる。そこで本報告では、指向性 90 度 dipole モデルを使用した屋内騒音評価システムの構築について検討を行う。

2. 超音速機騒音評価システム

2.1 VR システムの概要

本研究では、没入型 VR 装置 HoloStage を用いた交通騒音の可視化・可聴化システムの構築を行う。本システムは、利用者の位置情報と音源位置から幾何音響理論に基づく音響計算式により、音圧レベルをリアルタイムに計算して、VR 装置に視覚情報と聴覚情報を同時に提示するものである。システムの詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。

2.2 屋外における音響計算

本システムでは、騒音レベルの時間変化を算定するために、幾何音響理論に基づく ASJ RTN-Model 2018(以下 ASJ モデル)を用いる²⁾。受音点での、音響パワーレベルは次式 (1) で算定される。

$$L_P = L_W - 20\log_{10}SD - 11 + \Delta L_{cor} \quad (1)$$

ここで、 L_P は利用者位置での音圧レベル、 ΔL_{cor} は指向性や空気吸収の補正項である。また、 SD (スラントディスタンス) は超音速機の発生音源と受音点との直線距離である。

2.3 屋内における音響計算

屋内における観測者位置における騒音レベル (SPL) は屋外における評価式を基に補正を加えた次式 (2) により算出した³⁾。

$$SPL = L_P - TL - 10\log_{10}\frac{A}{S_{sum}} + 3 \quad (2)$$

ここで、 L_P は建物が無い場合の騒音レベル [dB]、 TL は透過損失 [dB]、 A は全吸音力 [m^2 , メートルセービン]、 S_{sum} は透過する面の総面積 [m^2] である。

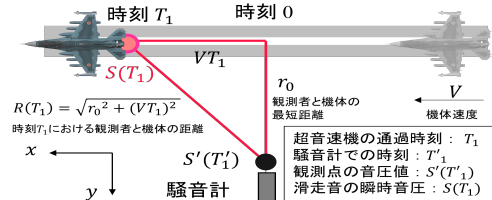


図-1 騒音測定及び平滑化計算の模式図

2.4 指向性

航空機騒音の場合には、後方に強い指向性を持つことが知られており、指向性を考慮することが航空機騒音の場合には重要となる。本研究では以下の極座標方程式 (3) によって表されるダイポール曲線を指向性モデルとして適用している。

$$Q = 4\sin^2\theta\cos^2\left(\frac{\pi}{4}\sin\theta\cos\phi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (3)$$

ここで、 Q は指向係数、 ϕ は音源と受音点における鉛直方向のベクトルが成す角度であり、 θ は進行方向のベクトルが成す角度を表す。上式により得られた指向係数 Q はレベル変換し、式 (1) に加算することで指向性を考慮した音圧レベルが得られる。

3. 音源データの作成

VR 技術を用いた可聴化において、航空機の音源に実装する音源データの品質は重要である。可聴用音源データの実装のための定常音作成の手順を次節に示す。

3.1 可聴音源の採取

茨城県小美玉市の航空自衛隊・百里基地にて、超音速機 (F2) の離陸時の騒音測定を行った。測定は離陸する飛行機を正面に見る滑走路延長線上から約 100[m] 離れたところで実施した。

3.2 定常音の作成

本手法では既往手法⁴⁾に倣い、距離減衰を考慮した音源データの作成を行う。離陸音の実測データから可聴化用の音源データを生成するには、距離減衰の影響の取り除く必要がある。図-1 に示すように滑走路から距離 r_0 にある観測点を設定する。この時、航空機は一定速度 V で滑走するものとし、時刻 T_1 での飛行音の瞬時音圧を $S(T_1)$ とする。この発生音が時刻 $T_1' (> T_1)$ に観測点に達したとき観測点における音圧 $S'(T_1')$ は、距離減衰を考慮して次式で表されるものとする。

$$S'(T_1') = \frac{1}{R(T_1)} \cdot S(T_1) + \alpha \quad (4)$$

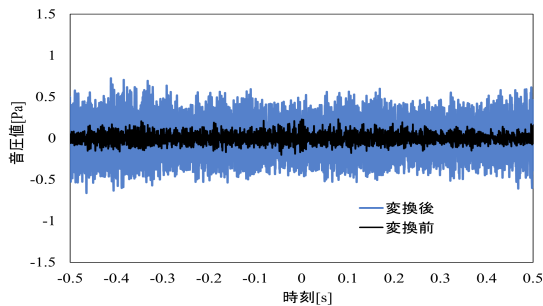


図-2 距離減衰式による変換前後の音圧値の比較

ただし, $R(T_1)$ は次式で得られる.

$$R(T_1) = \sqrt{r_0^2 + (VT_1)^2} \quad (5)$$

上式を用いて, 機体近くの音圧値を求める. なお, 定常音作成の詳細は参考文献⁴⁾を参照されたい.

実際の計算例との結果を図-2に示す. 変換後の音圧値は, 変換前の値よりも大きくなり, 任意の時刻における音圧値がほぼ一樣になることを確認した.

3.3 作成音の比較

作成音の妥当性を確認するべく, 実測音と作成音の周波数分析を行い, その結果を図-3に示す. 図より, 音の特性を変えずに定常音化ができていることが確認できる.

4. 適用例

4.1 実測値と計算値の比較

本システムの妥当性の検証を行うために, 適用例として, 航空自衛隊・百里基地での測定データをもとに, 実測結果と計算結果の比較を行った. それらをグラフ化したものを図-4に示す. この結果から, 計算結果及び実測値の比較では, 指向性無しの結果に比べ, 指向性を考慮することにより機体が観測者を通過した後の音圧レベルの傾向が概ね一致を示していることが分かる. 一方, 2つの結果の最大値に差異が見られ, 音響パワーレベルの設定の見直しが必要である.

4.2 屋内騒音シミュレーション

本報告では, 観測者が屋内にいるときの騒音評価シミュレーションを行った. 図-5に示すように, 通過する機体を屋内で観測する可視化・可聴化を行うことができた. 実測との比較は困難なため, 今後は計算結果通りにVR空間上で出力されているかの確認を行う.

5. おわりに

本報告では, 著者が構築した幾何音響理論に基づく航空機騒音評価システムを超音速機に適用するため, 現地測定データを用いた可聴音の実装および90度dipoleモデルを用いたシミュレーションの妥当性の検証を行った. その結果, 以下の結論を得た.

- 作成音の評価について, 各周波数帯ではほぼ同様

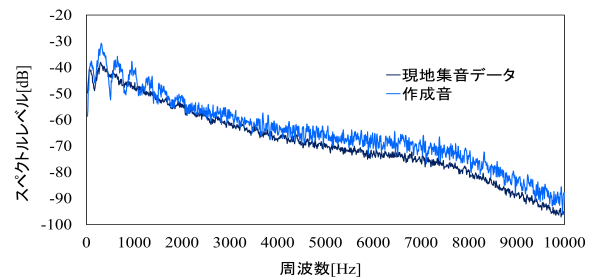


図-3 作成音と音源による周波数分析

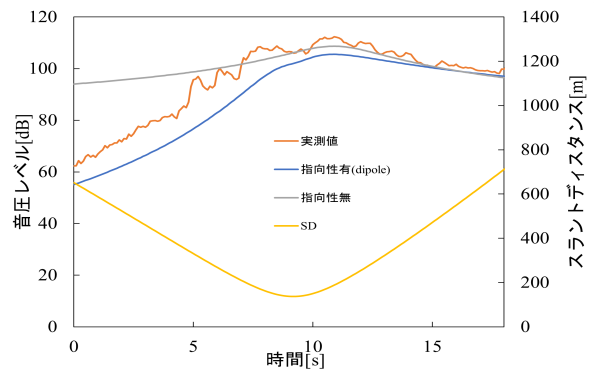


図-4 実測値と計算値の比較

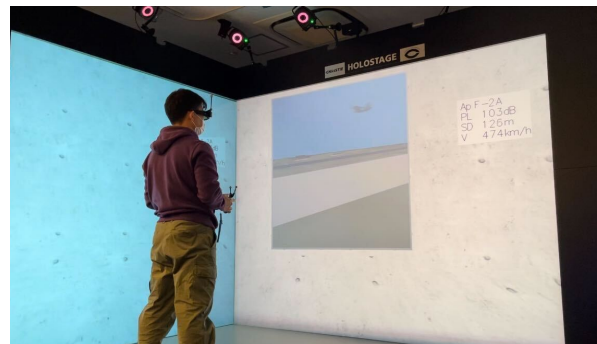


図-5 システムを体験している様子(屋内)

なスペクトル分布が得られたことから妥当性を確認できた.

- 指向性90度dipoleモデルの検討において, 指向性モデルの計算値は指向性無しに比べ, 実測値と計算値で概ね一致が見られた.

今後は, 現在検討中である屋内騒音シミュレーションの構築を行い, 異なる材質での家屋内の可聴化を行う.

参考文献

- 1) 石田安里, 山本恭平, 吉町徹, 樫山和男, 志村正幸: VR技術を用いた体験型航空機騒音評価システムの構築, 土木学会論文集, Vol.72, No.2, pp.I.140-I.147, 2016.
- 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 2018”, 日本音響学会誌.
- 3) 実務的騒音対策指針(第2版), 技報堂出版, 日本建築学会, pp.24-25, 1994.
- 4) 谷川将規, 守屋陽平, 江嶋孝, 樫山和男, 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, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.16, pp.I.155-I.162, 2013.

2次元弾性体解析における IGA の適用性に関する検討

Study on the Applicability of IGA in Two-Dimensional Elastic Analysis

都市環境学科 学部4年 坂井 祐仁
Yuto SAKAI

1. はじめに

通常の有限要素法解析における CAD を用いた設計は、Spline 関数を用いて表現されるため、構造物の曲面部で形状誤差が生じてしまう。この問題を解決する手法として、近年 IGA¹⁾²⁾ (Isogeometric Analysis) が注目されている。

本発表では、IGA を用いた流体構造連成解析に向けた第一段階として、IGA を用いた 2次元弾性体解析の精度と計算時間について、従来の有限要素法との比較を行った。

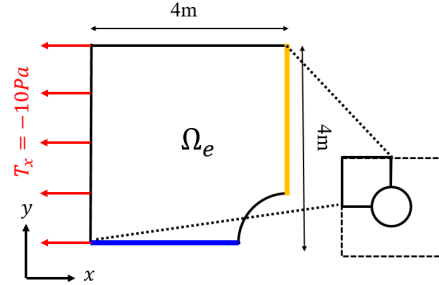


図-1 解析領域

2. 数値解析手法

(1) NURBS

NURBS(Non Uniform Rational B-Splines) は、B-Spline 関数に重みづけをすることで求められる。NURBS を求める際に必要となる B-Spline 関数は以下のように定義される。

$$N_{i,0}(\xi) = \begin{cases} 1 & \xi_i \leq \xi < \xi_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (p=0)$$

$$N_{i,p}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+p} - \xi_i} N_{i,p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\xi) \quad (p=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

i は制御点の番号、 p は B-Spline 基底関数の次数、 ξ はノットを表す。ノットとは B-Spline 基底関数を決定するパラメータで、そのノットの並び、 $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}\}$ をノットベクトルという。このノットベクトルは単調増加する数列である。式 (1) を用いて IGA で解析領域を表現する NURBS 曲面、形状関数となる NURBS 基底関数は式 (2)、式 (3) のように表される。

$$\mathbf{S}(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j}^{p,q}(\xi, \eta) \mathbf{B}_{i,j} \quad (2)$$

$$R_{i,j}^{p,q}(\xi, \eta) = \frac{N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) w_{i,j}}{\sum_{\hat{i}=1}^n \sum_{\hat{j}=1}^m N_{\hat{i},p}(\xi) M_{\hat{j},q}(\eta) w_{\hat{i},\hat{j}}} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{B} は制御点、 w は各制御点における重みを表す。

(2) 支配方程式

2次元弾性体解析における支配方程式は以下に示す応力のつり合い方程式、ひずみ-変位関係式、応力-ひずみ関係式の3式で表される。

$$\partial^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\epsilon} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \partial \mathbf{u} \quad (6)$$

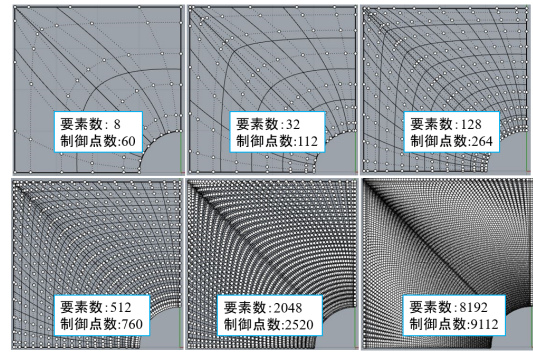


図-2 解析領域

これら 3 式に対して、空間方向に IGA に基づく Galerkin 法を用い、補間関数に NURBS 関数を用いる。

(3) IGA における変数変換

IGA では形状関数である NURBS 基底関数がノット (ξ, η) から決定される関数であるので、物理空間 $\Omega_e(x, y)$ からパラメータ空間 $\tilde{\Omega}_e(\xi, \eta)$ へ変数変換を行う。その後、積分を行うためにパラメータ空間 $\tilde{\Omega}_e(\xi, \eta)$ から親要素 $\bar{\Omega}_e(\bar{\xi}, \bar{\eta})$ へ変数変換を行い、親要素上で積分を行うことで係数行列を求める。また、数値積分には、Gauss の求積法を用いる。

3. 数値解析例

数値解析例として、円孔平板を対象とした 2次元弾性体解析を取り上げ、NURBS の次数と積分点数に関する検討および、IGA と FEM における比較を行った。

(1) NURBS の次数に関する検討

(a) 解析条件

解析領域は図-1 に示し、解析メッシュを図-2 に示す。境界条件として、平板が隣接する部分 (図の黄色、青色) の部分に Dirichlet 境界条件を与えている。今回は、2,3,4 次の NURBS に対して、それぞれ 6 通りの解析メッシュを用いて解析を行っているが、代表して 4 次の NURBS における解析メッシュを示している。

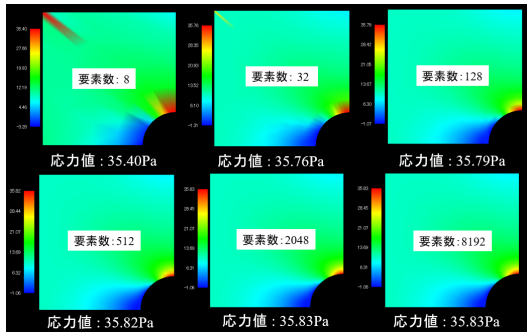


図-3 IGAにおける解析結果と応力の最大値

(b) 解析結果

それぞれの要素における解析結果のコンター図と最大の応力値を図-3に示す。

図-4, 図-5は、それぞれ制御点数と相対誤差, 制御点数と計算時間の関係を表したグラフである。この結果より, NURBSの次数を上げると収束性が向上し, 少ない制御点数で高精度な解析をおこなえること, 0.1%程度の誤差が許容できる場合において, 4次のNURBSは2次のNURBSを用いる際に比べ1/10の時間で解析することが可能であることがわかった。

(2) 積分点数に関する検討

(a) 解析条件

図1に示す解析条件のもと, 2,3,4次のNURBSそれぞれで2要素を用いた解析を行った。

(b) 解析結果

図6は、それぞれのNURBSの次数における積分点数と応力値の関係を表したグラフである。この結果より, 粗いメッシュを用いた解析では, NURBS+2点の積分点数が必要であることがわかった。

(3) IGAとFEMにおける比較

(a) 解析条件

解析領域は先ほどと同様である。NURBSの次数に関する検討より, 4次のNURBS, 6点積分を用いている。比較対象となるFEMはAnsysでのアイソパラメトリック2次要素における解析結果を用いている。

(b) 解析結果

図7は, IGAとFEMにおける自由度数と相対誤差の関係を表すグラフである。この結果より, IGAはFEMに比べて収束性が良く, 少ない自由度数で高精度な解析を行えることがわかった。

4. おわりに

本報告では, NURBSの次数に関する検討およびIGAとFEMでの比較に取り組み以下の結論を得た。

- 4次のNURBSを用いると, 2次のNURBSに比べ1/10程度の計算時間で解析可能である。
- 少ない要素数で解析を行うIGAにおいてはNURBSの次数+2の積分点数が必要。
- IGAは, 従来の有限要素法に比べて収束性が良く, 少

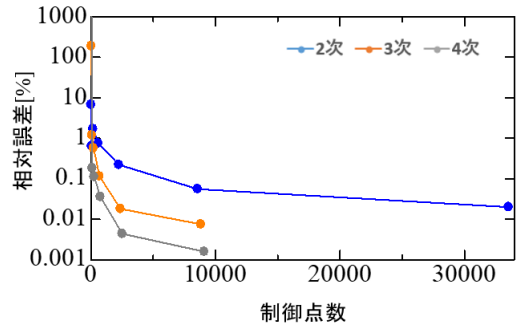


図-4 制御点数と相対誤差の関係

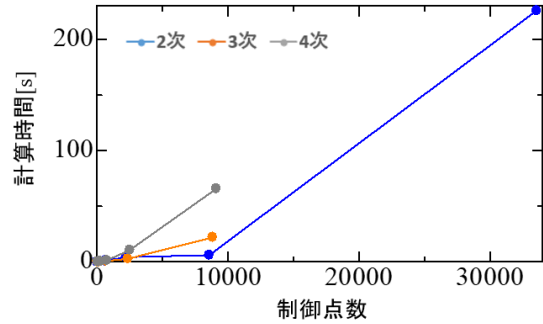


図-5 制御点数と計算時間の関係

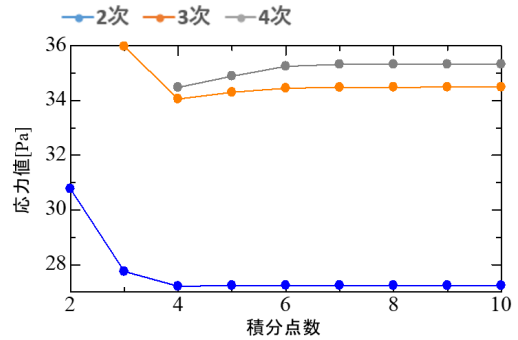


図-6 積分点数と応力値の関係

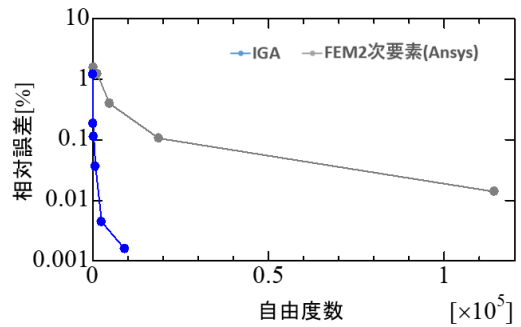


図-7 自由度数と相対誤差の関係

ない自由度数で高精度な解析を行える。

今後は, 動的解析や3次元の問題を対象としてIGAの有効性についてFEMとの比較のもとに行う予定である。

参考文献

- 1) T.J.R.Hughes, J.A.Cottrell and Y.Bazilevs, Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.194, pp.4135-4195, 2005.
- 2) J.A.Cottrell, T.J.R.Hughes and Y.Bazilevs, Isogeometric analysis: Toward integration of CAD and FEA, Wiley Publishing, 335p, 2009.

有限要素法による津波解析における遡上域の精度向上に関する研究

A Study on the Improvement in the Swash Zone Accuracy of Tsunami Analysis using the Finite Element Method

都市環境学科 4年 田部井 優奈
Yuna TABEI

1. はじめに

津波遡上解析において、遡上域の精度を向上させることは非常に重要である。そこで、本研究では水際線の移動境界手法について検討を行った。固定メッシュにおける水際要素の陸域節点に流速0を与える手法¹⁾と水際要素の陸域節点に流速を与える手法²⁾を用いて遡上域の精度について比較・検討を行うことを目的とする。

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式

津波の支配方程式として、以下に示す浅水長波理論に基づく浅水長波方程式（非線形長波方程式）を用いる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\mathbf{N}_{ij}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} = \mathbf{R} - \mathbf{G}\mathbf{U} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} H \\ u_1 H \\ u_2 H \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_1} \\ -c^2 \frac{\partial z}{\partial x_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c^2 - u_1^2 & 2u_1 & 0 \\ -u_1 u_2 & u_2 & u_1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -u_1 u_2 & u_2 & u_1 \\ c^2 - u_1^2 & 0 & 2u_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}_{11} = \nu_e \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -2u_1 & 2 & 0 \\ -u_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_{12} = \nu_e \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -u_1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}_{21} = \nu_e \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -u_2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_{22} = \nu_e \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -u_1 & 1 & 0 \\ -2u_2 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_f \sqrt{u_i^2 + u_j^2}}{H} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_f \sqrt{u_i^2 + u_j^2}}{H} \end{bmatrix}$$

\mathbf{U} は未知ベクトル, \mathbf{R} は勾配ベクトル, \mathbf{A}_i は移流マトリックス, \mathbf{N}_{ij} は拡散マトリックス, \mathbf{G} は摩擦マトリックス, H は全水深, u_i は各方向の流速, h は静水深, c は波速, z は河床高さ, ν_e は渦動粘性係数, n はマンシングの粗度係数である。

2.2 解析手法

空間方向の離散化には SUPG 法に基づく安定化有限要素法を, 時間方向の離散化として, 2次精度を有する Crank-Nicolson 法を用い, 連立一次方程式の解法には, Element-By-Element 処理による Bi-CG STAB 法を用いる。

2.3 移動境界手法

津波の遡上挙動の表現のために, 任意形状への適応性に優れ, アルゴリズムが比較的容易な Euler 的手法に基づく移動境界条件 (図-1) を適用する。領域分割に伴い, 以下のように移動境界処理を施す。

(1) 各節点における全水深 H と微小水深 ϵ とを比較し, 3 節点全ての全水深 H が微小水深 ϵ 以下であれば, その要素は陸域要素とみなし, 計算領域から除外する。このとき, 流速 $u_i^n = 0$ とする。

(2) 各節点における全水深 H と微小水深 ϵ とを比較し, 3 節点のうち, 1 つもしくは 2 つの全水深が ϵ 以上であれば, その要素は水際要素とみなし, 計算領域に含める。また, 陸域節点の流速 $u_i^n = 0$ とする。

上記の手法は, 水際線上の流速を 0 にしていることから水際線上の移動時に抵抗が生じる。そこで, 水際要素において流速が減衰しないように水際要素の陸域節点に図-2 のように流速を与える手法を適用する。また, 陸域節点に与える流速を式 (2) に示す。

$$u_i^n = \sum_{l=1}^k \frac{u_l}{k} \quad (u_i > 0) \quad (2)$$

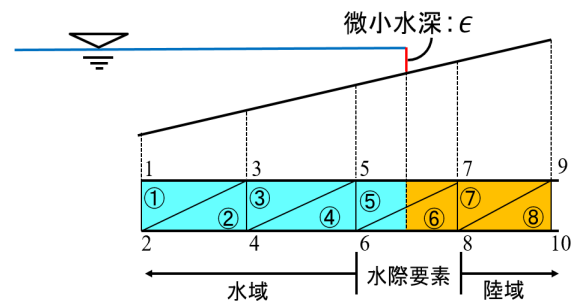


図-1 移動境界手法

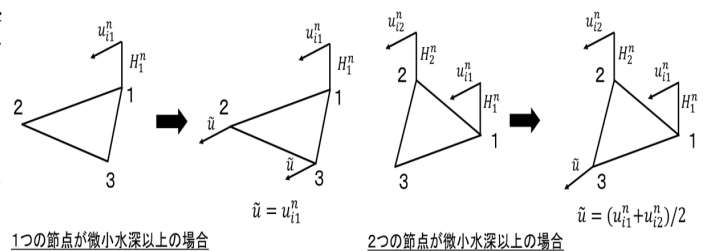


図-2 水際要素での流速に対する境界条件の処理

3. Synolakis の水理実験

本解析手法における水際線の移動境界手法の精度検証のため、実験解と解析結果を比較として Synolakis の水理実験³⁾を取り上げる。

3.1 解析条件

解析モデルを図-3に示す。この問題において、実験解は Synolakis の水理実験結果を用いる。解析メッシュに関しては、 $x_1 = 0$ から $x_1 = 50.3$ で $\Delta x_1 = 0.05m$ 、 $x_1 = 50.3$ から $x_1 = 90$ で $\Delta x_1 = 0.025m$ のメッシュで解析を行った。微小時間増分量は $0.005s$ とし、微小水深は $0.01m$ とした。境界条件として水際線は移動境界、その他には slip 条件を与えた。

3.2 解析結果

解析結果として $t' = t\sqrt{g/h}$ (無次元化した各時刻) において、 x_1/h (x_1 を h により無次元化したもの) に対する ζ/h (無次元化した水位変動量) を図-4に示す。これらの解析結果から以下のことが考察される。

- caseA の手法では、波が遡上していく時、流速 0 を含みながら進行するため、水際要素の先端で水面が上がっている。
- caseB の手法は水際要素の先端に流速をいれていることから、波の先端が波が遠くまで遡上し、実験解に近づくことが確認できた。
- caseB の手法の方が水際要素の先端に流速をいれていることから、波がはやく引くことが確認できた。

4. おわりに

本研究では、固定メッシュにおける水際線の移動手法において、水際要素の陸域節点に流速 0 を与える caseA の手法と流速を与える caseB の手法の 2 パターンで津波遡上解析を行い、以下の結論を得た。

- Synolakis の水理実験において、caseB の手法の方が遡上域が実験解に近づき、有効性が高いことが実証された。
- caseB の手法の方が水際要素の先端に流速をいれていることから、より遠くまで遡上し、波がはやく引くことが確認できた。

今後は、caseB の手法を実地形に適用し、caseA の手法との比較を行う。

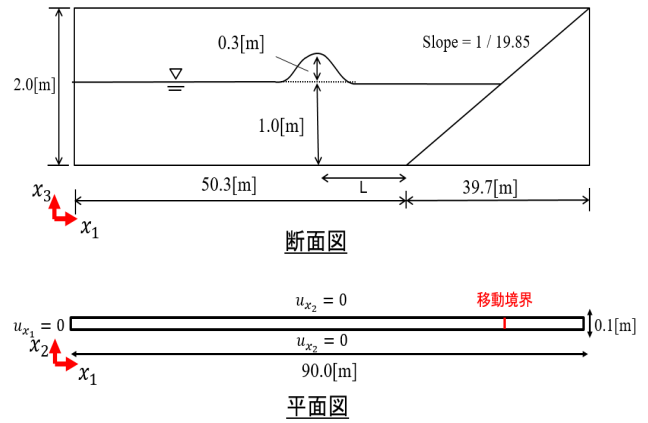


図-3 解析モデル

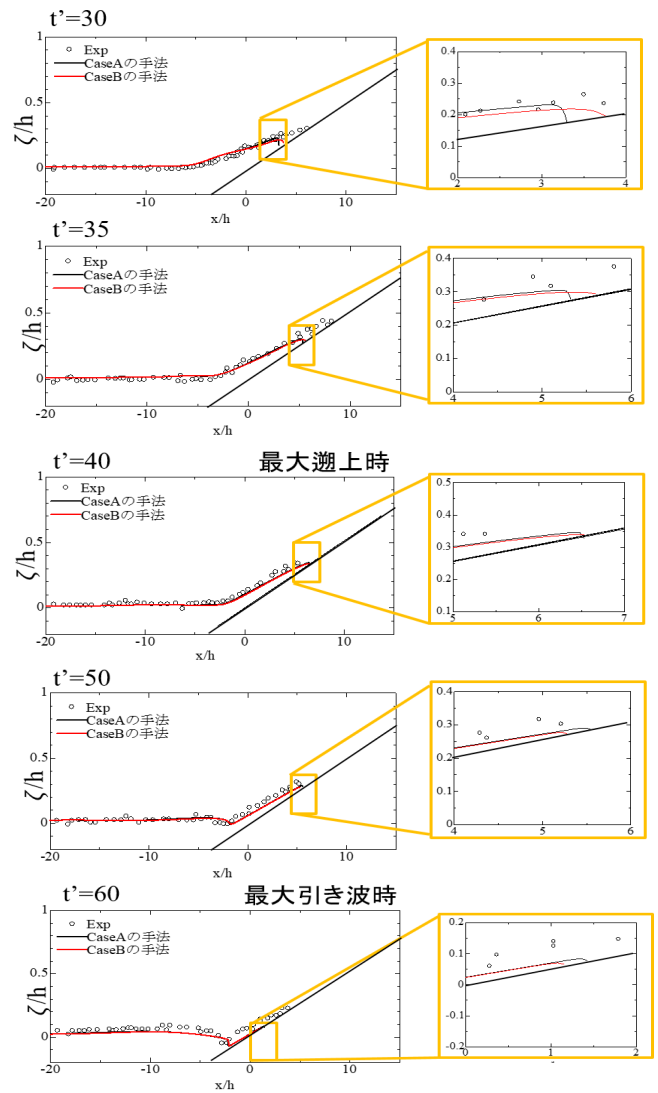


図-4 解析結果

参考文献

- 1) M.Kawahara and T.Umetzu : Finite element method for moving boundary program in river flow, *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol.6, pp.365-386, 1986.
- 2) Junichi Matsumoto, Abdul A. Khan, Sam S. Y. Wang and Mutsuto Kawahara : Shallow water flow

analysis with moving boundary technique using least-squares bubble function, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol.16(2), pp.129-134, 2002.

- 3) C. E. Synolakis : The runup of solitary wave, *J. Fluid Mech.*, Vol.185, pp.523-545, 1987.

有限要素法による風速の影響を考慮した騒音伝播解析手法の構築

Development of Computational Method for Noise Propagation considering the Effect of Wind Velocity using Finite Element Method

都市環境学科 4年 宮内 暖季
Haruki MIYAUCHI

1. はじめに

著者らの既往の研究では、任意形状への適合性に優れた有限要素法を用いた大規模音場解析¹⁾を行ってきた。しかし、風の影響の考慮はなされていなかった。

そこで本研究では、有限要素法を用いた風の影響を考慮した音場解析を行い、その妥当性の検証を行った。

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式と条件式

風速の影響を考慮した波動方程式²⁾を以下に示す。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + 2u_i \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial t} + u_i u_j \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_j} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

ここで、 p は音圧、 c は音速、 u_i は各成分における風速、 Ω は解析領域を示す。

次に、初期条件は無音状態とし、以下の式で与える。

$$p = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

また、本研究で用いる Neumann 境界条件は以下のよう表せる。

$$q_n = -\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{1}{c \pm u_i} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{on } \Gamma_q \quad (3)$$

ここで、 n は解析境界からの外向き法線ベクトル、 Γ_q は Neumann 境界条件が考慮される境界である。式 (3) は Mur の吸収境界条件であり、右辺項において風速成分が境界から外向きの場合は正号を、内向きの場合は負号を用い、開空間処理として扱う³⁾。

2.2 有限要素法に基づく数値解析

式 (1) に対して Galerkin 法に基づく重み付き残差法を適用し、Green-Gauss の定理を用いると、以下の弱形式が得られる。

$$\int_{\Omega_e} p^* \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} d\Omega + 2u_i \int_{\Omega_e} \frac{\partial p}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega - u_i u_j \int_{\Omega_e} \frac{\partial p^*}{\partial x_j} \frac{\partial p}{\partial x_i} d\Omega + c^2 \int_{\Omega_e} \frac{\partial p^*}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} d\Omega = (u_i u_j - c^2) \int_{\Gamma_q} p^* q_n d\Gamma \quad (4)$$

ここで、 p^* は音圧 p の重み関数である。 Ω_e は要素の領域である。

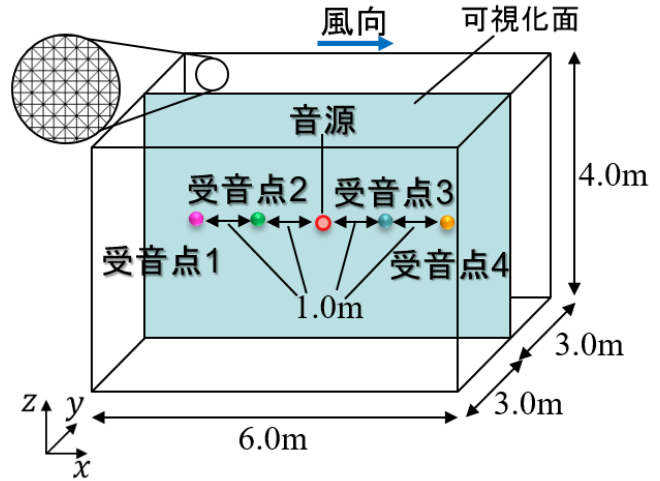


図-1 解析モデル

有限要素として、四面体 1 次要素を用いて得られる各要素における時間に関する常微分方程式を全要素について重ね合わせると、全体の時間に関する常微分方程式は以下のように得られる。

$$\mathbf{M} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \mathbf{D} \frac{\partial p}{\partial t} - \mathbf{K}_v p + \mathbf{K} p = \mathbf{F} \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{M} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{K}_v 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{F} はそれぞれ質量行列、式 (4) における左辺第 2 項によって生じる行列、左辺第 3 項によって生じる行列、拡散行列、境界積分項を表す。

時間方向の離散化には差分法を用い、各時間の微分項に対して中心差分を施し、反復法の一つである BiCGStab 法により未知数である音圧を求める。

3. 数値解析例

3.1 解析条件

ベンチマーク問題として、図-1 に示す解析モデル用い、風速が音の伝播に与える影響と解析精度に与える影響についての比較を行う。解析モデルの中心を音源位置とし、音源位置から 250Hz の cos 波 1 波長を入力させる。風速は一定とし、解析モデルに示す向きに 0.0、20.0、40.0、60.0m/s とし、4 通りの解析を行う。また、音速は 340.0m/s、時間増分量は 0.01ms、要素分割幅は 1 波長を約 27 分割した 0.05m としている。境界条件は、すべての境界で Mur の吸収境界条件としている。なお、自由度は 1,185,921 である。

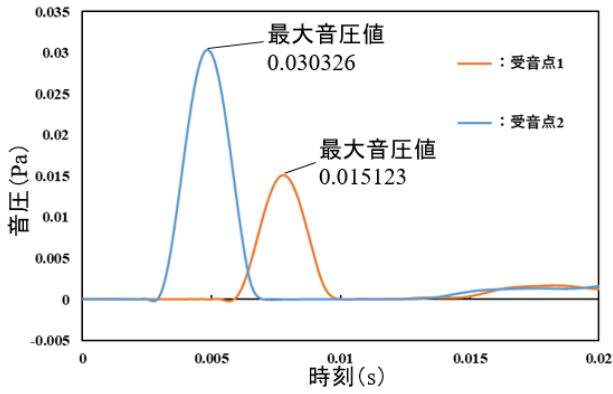


図-2 風速 0.0m/s での受音点 1, 2 における時刻歴波形

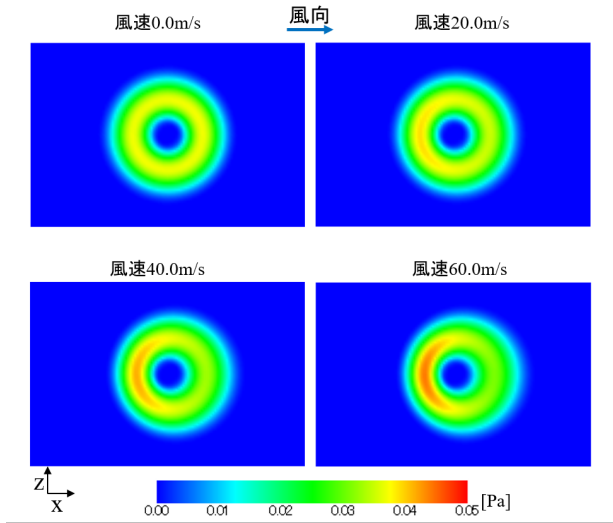


図-3 各風速での可視化結果 ($t = 0.0045[s]$)

3.2 解析結果

解析の妥当性検証のため、2地点での距離減衰による厳密解との比較を行った。図-2に風速 0.0m/s での音源から等間隔に配置した受音点 1, 2 における音圧値の比較図を示す。各受音点での最大音圧値から算出される距離減衰率は 0.49868 であり、厳密解の 0.5 と概ね一致していることから、風速を考慮しない状態で正しく球面波解析が行えていることを確認した。図-3 に各風速での可視化結果、図-4 に受音点 1, 4 における音圧値の比較図を示す。風速の影響により伝播波の到達に差が生じることを確認した。表-1 に解析結果から算出した見かけの音速を示す。見かけの音速 c' の算出方法は以下に示す通りである。

$$c' = \frac{|\text{音源から受音点 1, 2(3, 4) までの距離の差}|}{|\text{受音点 1, 2(3, 4) での最大音圧値の到達時刻の差}|}$$

風下側では音速に風速を足した値、風上側では音速から風速を引いた値が見かけの音速の厳密解であり、各風速で良い一致を示していることを確認した。ただし、図-4 中の円部分に示すように境界面で音が吸収しきれず、反射が発生しており、この点については今後の課題としたい。

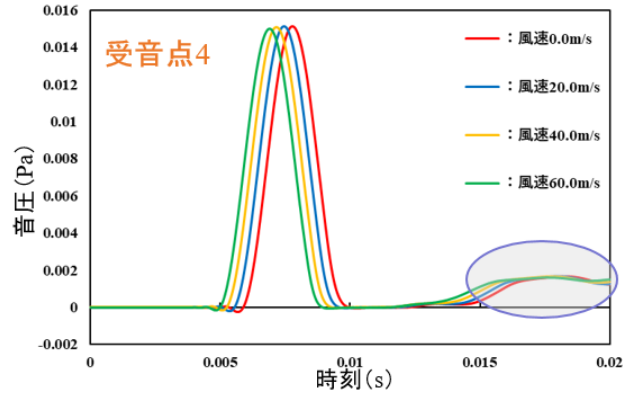
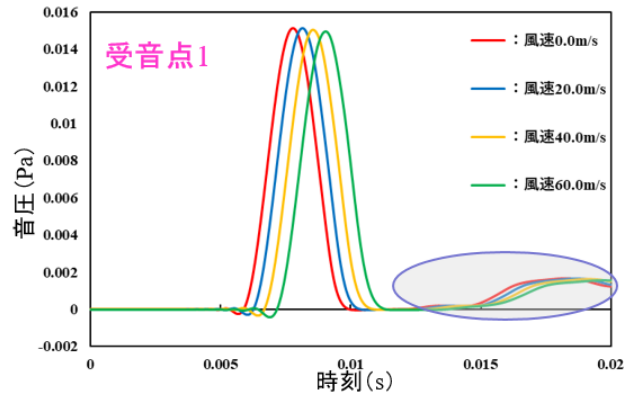


図-4 各風速での受音点 1, 4 における時刻歴波形

表-1 解析結果から算出した見かけの音速

	風速0.0m/s	風速20.0m/s	風速40.0m/s	風速60.0m/s
風下側 見かけの音速[m/s]	340.1	359.7	381.7	401.6
風上側 見かけの音速[m/s]	340.1	320.5	301.2	279.3

4. おわりに

本研究では、有限要素法による風速の影響を考慮した音場解析を行った。結論を以下に示す。

- 風速の影響により、伝播波の到達速度に差が生じることを確認した。
- 解析結果による見かけの音速が厳密解と良い一致を示し、定量的な妥当性を確認した。

今後の課題として、開境界処理方法の検討、遮音壁の内部構造を考慮した解析を予定している。

参考文献

- 1) 深澤一志, 樫山和男, 吉川仁: インパルス応答解析に基づく有限要素法を用いた音場解析手法の構築, 計算工学講演会論文集, 計算工学会, Vol.27, E-10-03, 2022.
- 2) Pierce. A. D.: *Acoustics*, the Acoustical Society of America, 1991.
- 3) 野村卓史, 高木耕平: 気象要因の影響を考慮した音の伝播に関する有限要素解析法, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.9, pp.221-230, 2006.

VR 技術を用いた浮上式高速鉄道騒音評価システムの構築

Construction of Floating High-speed Railway Noise Estimation System using Virtual Reality Technology

都市環境学科 4 年 田丸 ゆめ乃
Yumeno Tamaru

1. はじめに

浮上式高速鉄道は超電導リニアを用いる世界初の陸上交通機関であり、高速性による時間短縮効果によって経済の活性化が期待される。その一方で、一部の地上走行区間では空力音を主因とする騒音問題が懸念されており、騒音の影響を予測することが重要となる。既往研究は、リアルタイムシミュレーションが可能な幾何音響理論による計算手法に着目し、在来線を対象とした VR(virtual Reality) 技術を用いた騒音評価システムを構築し、その妥当性と有効性を示してきた。¹⁾

本研究では、著者らが構築した鉄道騒音評価システムを、空力音や指向性が卓越する浮上式の高速度鉄道に適用するための検討を行った。

2. 鉄道騒音評価システム

2.1 VR 環境

本研究では、没入型 VR 装置 Holostage を用いる。この装置は 3 面（正面、側面、底面）の大スクリーンとそれぞれに対応した高性能プロジェクター、VR 空間内の利用者の動きを捉えるためのワイヤレストラッキング装置およびそれらを制御する並列計算機から構成される。

2.2 システム概要

本システムのフローチャートを図-1 に示す。入力データには車両の走行条件、音源の音響パワーレベル、構造物や軌道の幾何形状を設定する。また、時間ループ内において、車両の音源位置、VR 空間内の利用者（受音点）の位置情報をトラッキング装置より取得する。そして、それらの情報を用いて幾何音響理論に基づくモデル（ASJ RTN Model2018, 以下 ASJ モデル²⁾）により、受音点における騒音レベルを計算する。可視化部では、CAVE ライブラリと OpenGL を用いて鉄道車両や構造物の立体 CG を各スクリーンに描画する。可聴化部では、音響プログラミングソフト Max を用いたプログラムにより計算結果に基づく立体音響信号をスピーカーに出力する。

2.3 走行音の定常音化

VR 技術を用いた可聴化において実装する音源データの品質は現実感を高める上で重要である。固定点における收音データをもとに、距離減衰の影響を取り除く処理を行った上で、実装する定常音の作成を行った。

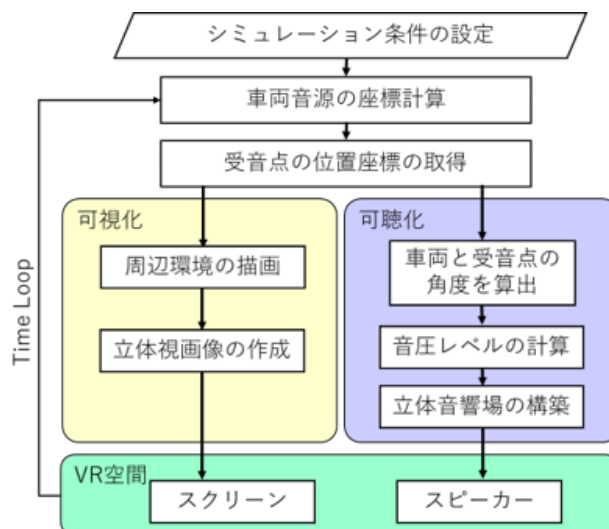


図-1 本システムのフローチャート

2.4 対象地域のモデル化

対象地域のモデル化については、地形モデル作成には設計ソフトウェア (InfraWorks) を用い、国土地理院の地形データから航空写真、鉄道中心線データの読み込みを行った。また、建物モデル作成には 3 次元モデリングソフト (Google SketchUp) を用いた。

3. 音響計算手法

3.1 幾何音響理論による音響計算

本システムでは、騒音レベルの時間的変化を算定するために幾何音響理論に基づく ASJ モデルを用いて、点音源の計算式を使用する。受音点での音響パワーレベルは以下の式で表すことができる。

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

ここで、 L_p は受音点での音圧レベル、 L_W は音源の音響パワーレベル、 r は音源から受音点までの距離である。また、 ΔL_{dir} は指向性による補正量、 ΔL_{dif} は回折減衰による補正量である。

3.2 指向性による補正

鉄道の走行音は走行ライン及び上方よりも側面方向に伝播しやすい双指向性の特徴を持つことが知られている。本研究では、音源を指向性を有する点音源として扱い、以下に示す指向性モデル³⁾を適用する。

$$L_{dir} = 10\log_{10}(\cos^n\theta \cdot (0.1 + 0.9\varphi)) \quad (2)$$

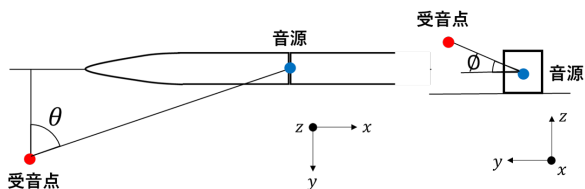


図-2 音源と受信点の角度

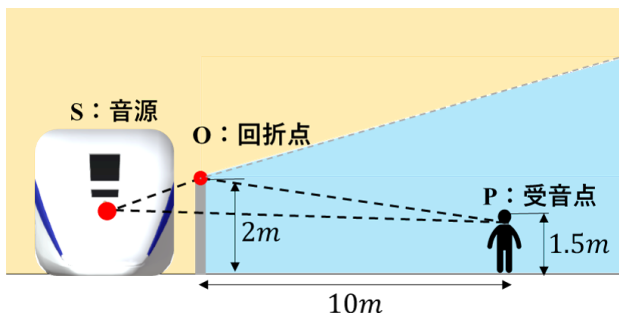


図-3 回折経路差の定義

ここで、 θ は受信点から見た音源への角度、 φ は音源から見た受信点への仰角、 n は指向性係数である。音源と受信点の角度の定義を図-2 に示す。なお、 θ 及び φ の値は音源と受信点の位置座標から算出する。

3.3 回折減衰による補正

遮音壁は音が沿線に直接伝わることを防ぐことができるため、鉄道騒音対策の中でも有効な対策のひとつであるといえる。本研究では、音響計算式に回折補正量項を導入することで遮音壁の考慮を行った。点音源 S 、回折点 O 、受信点 P に関する回折経路差 δ [m] を用いた、回折補正量 ΔL_{dif} の考慮を行った。図-3 に示すように回折経路差は以下の式で表される。

$$\delta = \overline{SO} + \overline{OP} - \overline{SP} \quad (3)$$

また、受信点における各音源からの伝搬音の圧力レベルの合成値は次式で表される。ここに、 i は合成する音源の和である。

$$L_A = 10 \log_{10} \sum (10^{L_{Ai}/10}) \quad (4)$$

4. 適応例

4.1 解析条件

システムの妥当性を検証するため、計算値と VR 装置内で測定した計測値の比較を行う。受信点は音源から 10m 離れた位置とし、人の身長を考慮し地上から 1.5m の高さとしている。なお、車両の CAD データは旧型の試験車両 MLX01 系を用いており、5 両編成としている。車両の速度は 500km/h とし、音源の設定位置を車両の連結部の断面中心に設定した。指向性係数については、先頭音源のみ $n=1.0$ とし、その他の音源箇所については $n=0.1$ としている。

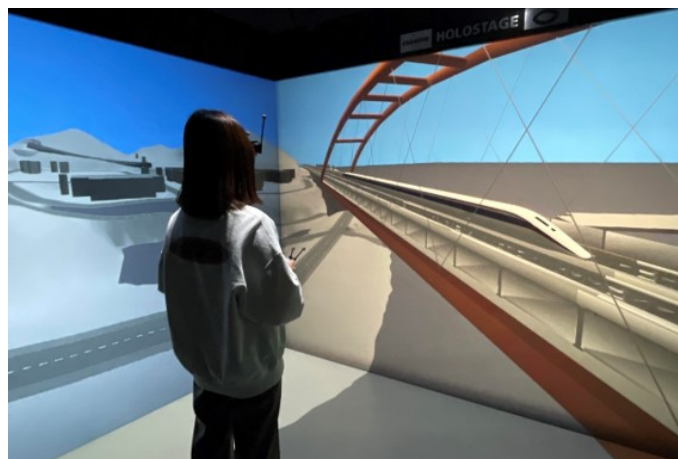


図-4 システムを体験している様子

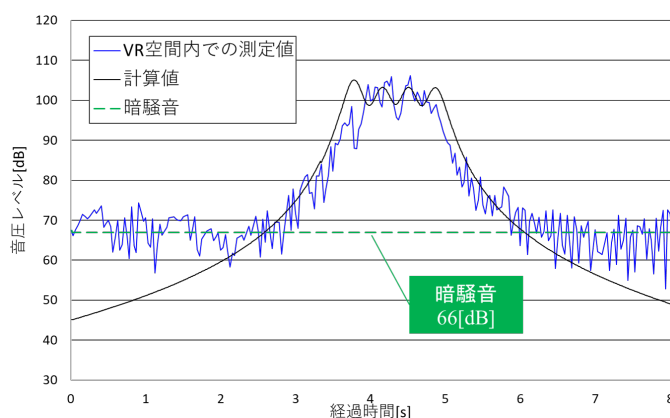


図-5 計算値と VR 装置内での測定値の比較

4.2 解析結果

解析条件での計算値と VR 装置内での測定値の圧力レベルの比較を図-5 に示す。測定環境での暗騒音以上では計算値と測定値が概ね一致することを確認した。

5. おわりに

本研究では、既往研究で構築した幾何音響理論に基づく鉄道騒音評価システムを、浮上式の高速度鉄道に適用するための検討を行った。今後の課題として、計算値と山梨リニア実験線での実測値との比較を行い、本システムの更なる精度向上を目指す予定である。

参考文献

- 1) 木下公二, 吉町徹, 檜山和男, 志村正幸: VR 技術を用いた鉄道騒音評価システムに関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.I 372- I 379, 2017.
- 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 2018”, 日本音響学会誌, 2018.
- 3) D.B.Ward, T.D. Abhayapala: Reproduction of a Plane Wave Sound Field Using an Array of Loudspeakers, IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol.9, pp.697-707, 2001.

GNSS データに基づくロケーションベース MR 可視化システムの構築

Development of a Location-based MR Visualization System based on GNSS Data

都市環境学科 4 年 中祖 諒大
Ryoudai NAKASO

1. はじめに

著者らはこれまで、マーカーベース MR 可視化システムの構築を行ってきた¹⁾。しかし、海上や夜間などマーカーの設置や認識が困難な場合には適用に限界がある。そこで、本研究では上記の問題を解決する方法としてロケーションベース MR に着目した。本研究は、GNSS データに基づく MR 可視化システムの構築を目的とし、本稿では、システムの構築を行うと共に、角度補正と移動時の重畳位置の精度検証をマーカーベース手法との比較により行った。

2. MR 可視化システム

(1) 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 MRTK を使用した。デバイスには、Microsoft 社製の頭部装着型コンピューターデバイスである Hololens2 を用いた。位置情報を取得する GNSS 受信機には、コア社製の QZNEO を用いた。本機は、オープンスカイ環境にてネットワーク型 RTK 測量によりセンチメートル級の測量が可能である。また、GNSS 受信機から Hololens2 に位置情報を送信する際の通信プロトコルは、同時に複数の端末と通信でき、通信速度がより速い UDP 通信とした。

(2) プリプロセス

可視化情報の入力では、可視化するモデルの 3D データを入力する。一方、位置情報の入力ではモデルの重畳位置の緯度、経度、楕円体高を入力する。

(3) メインプロセス

アプリケーション起動時の初期設定では、可視化デバイスの位置を原点とし、鉛直上向きを y 軸の正、それに伴いデバイスの正面方向を z 軸の正とした左手系の座標系が構築される。そのため、アプリケーション起動時のデバイスの方位角を、2 台の GNSS 受信機の緯度経度の差から計算する (図-1)。

求めた方位角から補正角の大きさを算出し座標系を回転させることで、 z 軸と北とが一致し、モデルの可視化位置の計算において緯度が z 軸、経度が x 軸にそれぞれ対応する。この座標系において、2 台の受信機の位置情報の平均値をデバイスの位置情報として重畳位置の位置情報との相対距離を求め、可視化位置を決定する。本システムは、北を z 軸方向、東を x 軸方向、鉛直上向きを y 軸方向とし、それぞれ緯度、経度、楕円体高を対応させている。

3. 角度補正精度検証

受信機が取得する位置情報を基に算出する方位角の精度は 2 台の受信機間の距離に影響される。本研究では、10cm

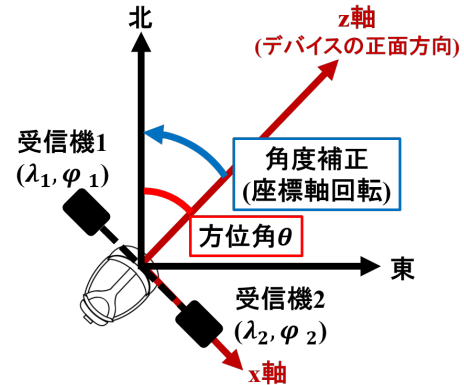
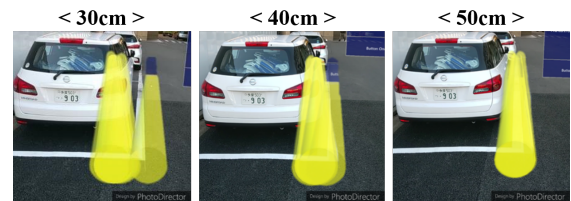


図-1 角度補正



・可視化モデル:管径0.5m, 長さ10mの円管

図-2 可視化結果による角度補正精度の比較

から 50cm までの 5 種類の距離間において方位角の精度の比較を行う。はじめに行った各距離約 20 分間の計測で取得した方位角の精度検証では 10cm と 20cm の場合は、精度が低いことが分かったため、本システムでは不採用とした。

次に、実際に可視化モデルを角度補正することで 30cm, 40cm, 50cm の場合の比較を行った。可視化の際の様子を示す。可視化結果を図-2 に示す。重畳位置は画像奥行き方向に伸びる白線上で、可視化モデルは埋設管を想定した簡易的な円管である。画像から、2 台の受信機の距離が長くなるほどモデルの重畳位置のばらつきは小さくなり、白線上に可視化されていることを確認した。よって、2 台の受信機間の距離を長くするほど角度補正の精度が向上すると考えられる。

4. 移動に伴う重畳位置の精度検証

移動時における可視化モデルの重畳位置の誤差を検証するため 10m 程度の円管を 3 本連結させたモデルを入力データとし、オープンスカイ環境において実施した (図-3)。a から g の計 7 地点において重畳位置の誤差を定量的に比較、評価する。また、既往研究であるマーカーベースの MR 可視化システムとの比較として、同様の可視化モデルに対し 1 枚及び 3 枚のマーカーを用いたマーカー重畳の可視化結果との比較も行い、本システムの有効性を評価する。

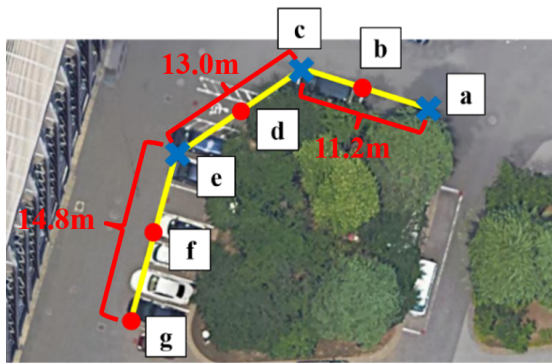


図-3 実施環境

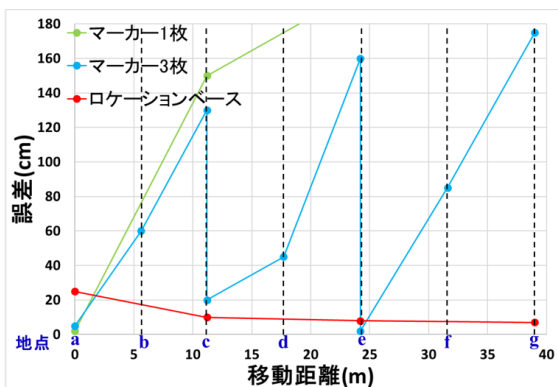


図-4 移動に伴う重畳位置の精度検証

重畳精度の定量的な比較を表したグラフを図-4に示す。マーカーベースはマーカーからの距離が大きくなると重畳位置の精度が大幅に下がることを確認した。一方、本研究であるロケーションベースは、移動距離が大きくなった位置 b, c, d の場合においても、高精度を維持できることを確認した。この結果から、移動が必要になるような可視化モデルを用いる場合、オープンスカイ環境下であればマーカーベース MR と比較してロケーションベース MR の方が有用であると考えられる。

5. 適用例

現在、水道事業では水道管劣化数の増加等の背景から業務の効率化が求められている。その一つである漏水調査は、夜間に漏水音を聞き取って行うものであり、本システムを適用することで作業の効率化が期待できる。可視化モデルは水道管を模した全長約 250m の円管であり、実施環境は実際の街中を想定したオープンスカイではない環境も含まれる中央大学後楽園キャンパスの 1 号館周辺である (図-5)。ここで、fixed とは RTK 測位が完了し、位置情報の誤差が数 cm 以内に収まるオープンスカイ環境を表し、float とは RTK 測位完了の前段階で誤差が数 m 程度のオープンスカイではない環境を表す。また、同様のモデルに対しマーカー重畳の可視化結果との比較も行うことで、本システムの有用性を評価する。

重畳精度の定量的な比較を表したグラフを図-6に示す。結果から、ロケーションベース MR 手法は移動距離の大きさに関係なく精度を維持できること、オープンスカイではない場所では精度が大幅に下がること、一度オープンス

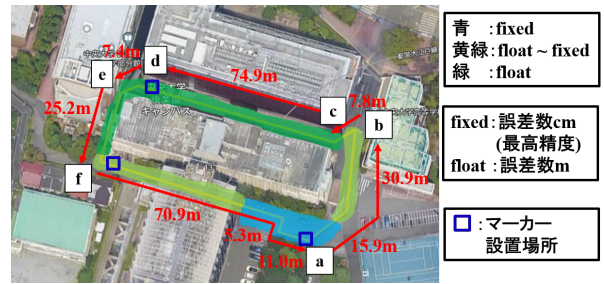


図-5 実施環境

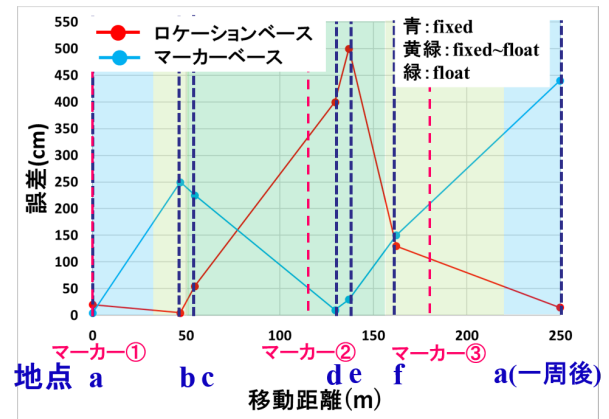


図-6 移動距離と位置情報精度の重畳精度への影響

カイではない場所を通った場合においても再びオープンスカイ環境に戻ると重畳位置の精度も元に戻ることが分かった。また、マーカーベース MR 手法は移動距離の大きさによって精度は大幅に下がるものの、オープンスカイではない場所でもマーカー認識直後ならば高精度を維持できることを確認した。よって、可視化結果の確認に移動が伴う場合やオープンスカイ環境での可視化にはロケーションベース MR 手法が適しており、可視化結果の確認に移動を伴わずオープンスカイではない場所で可視化を行う場合にはマーカーベース MR 手法が適していると考えられる。

6. おわりに

本報告では、GNSS データに基づくロケーションベース MR 可視化システムの構築として、システムの構築及び埋設管可視化への適用を報告し、以下の結論を得た。

- 2 台の受信機間の距離に応じて角度補正の精度が向上する。
- 可視化結果の確認に移動が伴いオープンスカイ環境での可視化ならばロケーションベース MR 手法が適しており、可視化結果の確認に移動を伴わずオープンスカイではない場所での可視化ならばマーカーベース MR 手法が適している。

今後は、実際の地下埋設物の可視化に本システムを適用する予定である。

参考文献

- 1) 川越健生, 藤飛, 樫山和男, 吉永崇, 琴浦毅, 石田仁: MR 技術を用いた地下埋設構造物の可視化システムの構築, 土木学会論文集 F3, Vol.78, No.2, pp.173-181, 2022.
- 2) <https://www.google.com/maps/> (入手 2022.12.20)

スマートフォンを用いたロケーションベース AR 可視化システムの構築

Development of Location-based AR Visualization System Using Smartphone

都市環境学科 4 年 鎌田 理紗
Lisa KAMATA

1. はじめに

近年, 拡張現実感 (Augmented Reality; AR) 技術を用いた可視化は様々な分野において活用されている. AR 可視化技術により, 現実世界では見ることのできない情報の可視化が可能となるとともに, CG モデルとの位置関係を簡単に把握することができる.

既往研究では, マーカーベース AR および GNSS 受信機を用いたロケーションベース AR の可視化システムの構築を行ってきた.^{1) 2)} GNSS 受信機は位置情報を精度よく取得できるが, 専用のデバイスを用意する必要があるという点で課題がある. そこで本研究では, 一般に普及しているスマートフォンを用いる AR 手法の構築を行う.

本報告では, スマートフォンに搭載の GPS と GNSS 受信機の位置情報の精度について比較を行うとともに, 建物および地下埋設物の重畳に本手法を適用し, マーカーベース AR との重畳精度の比較検証を行う.

2. AR 可視化システム

ロケーションベース AR に基づく本システムのフローチャートと開発環境を図-1 に示す.

2.1 開発環境

統合開発環境としてゲーム開発プラットフォームである Unity を用い, プログラミング言語は C# を用いる. また, 可視化用デバイスとして, iOS 端末である iPad Pro を使用し, AR システムの開発キットとして, AR Kit を採用した.

2.2 可視化情報

本研究では, 可視化情報として, 図-2 に示す 3D モデルを用いる. これは, 実在する建物 (中央大学後楽園キャンパス 4 号館) を事前に CAD データで 3D モデル化したものである.

2.3 データ入力

可視化情報として与えた 3D モデルの任意の点に対して, 重畳する位置の緯度経度座標を地理院地図から付与し, 重畳位置を決定する. 本システムでは, Unity 上のモデルの原点に現実空間の緯度経度座標を与えることで現実空間と同じ場所に可視化することが可能となる.

重畳位置の計算に用いる位置情報の取得に関して, 本研究ではスマートフォンに搭載の GPS から位置情報を取得する機能を用いている. これにより, スマートフォン単体での AR 可視化が可能となる.

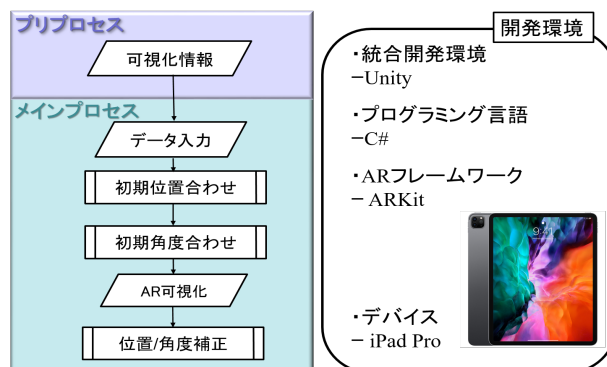


図-1 システム概要と開発環境



図-2 CGモデルと実在する建物

2.4 位置合わせ

データ入力の際, 3D モデルに与えた緯度経度座標と可視化デバイスの緯度経度座標からその差分を計算し, 位置合わせを行う. これを Unity 内で扱うため, Unity 上の x 軸を東, z 軸を北, y 軸を高さ方向に設定することで現実空間における 3D モデルの重畳位置を一致させる.

2.5 角度合わせ

位置合わせのみでは, 正確に重畳を行うことができないため, 3D モデルの角度を調整する必要がある. 本システムでは, アプリ起動時の向きが z 軸と仮定されているため, z 軸を北からの傾き分回転させ現実空間と Unity 上での座標の向きを同じにする必要がある. そこで, スマートフォンのコンパス機能を用いて北からの角度を算出し, 回転角を決定する.

3. 位置情報精度の比較

スマートフォンの GPS と GNSS 受信機との位置情報精度を比較するため, 30 分間緯度経度の取得を行った.

3.1 検証場所

オープンスカイ環境として, 周囲に高い建物等がなく開けた場所である屋上を使用し, 非オープンスカイ環境として, 周囲に遮蔽物のある場所を選択した.

3.2 検証結果

オープンスカイ環境における，取得した緯度経度の分布を図-3に示す．受信機での最大値と最小値の差が，緯度経度ともに数センチ単位なのに対し，スマートフォンでは数メートルとなっており，測定値の分散が大きくなっている．しかし，スマートフォンにおいても誤差が十メートル以内に収まっていることから，ある程度の重畳位置は担保できるといえる．

4. 適用例

適用例を以下に示す．本システムの有効性を示すため，2つの適用事例を用いてAR可視化を行った．

4.1 建物モデルの重畳

検証場所として，中央大学後楽園キャンパスを利用する．図-4に示す可視化位置から，対象物の可視化を行う．手動による位置合わせおよび角度合わせを行うことで，正しい位置・角度での重畳が可能となる．

図-5に，ロケーションベースARにおける可視化結果を示す．本システムでは，図の赤丸で示すようなボタンを作成し，手動でモデルの配置位置や角度を調整する機能を搭載することにより，可視化時の重畳誤差の軽減を図っている．結果から，マーカーベースARと同様，指定した位置・角度に正しくモデルが重畳できており，スマートフォンでも比較的精度よく可視化することが可能であるといえる．

4.2 地下埋設物への適用

既往の研究では，千代田区の飯田橋を対象地域として，マーカーベースARによる地下埋設物の可視化を行ってきた．本研究では，前述のシステムを用いて地下埋設物の可視化を行う．開口部モデルを用いたマスキング処理を行うことにより，現実空間と物体の前後関係が正確に見えるよう工夫している．

現地における開口部モデルの可視化結果を図-6に示す．結果から，開口部モデルを用いたことにより，違和感なく重畳されていることがわかる．

5. おわりに

本研究では，スマートフォンを用いたロケーションベースAR可視化システムの構築を行い，以下の結論を得た．

- 位置情報精度の比較から，計測法による精度の違いを確認した．
- マーカーベースARとの比較から，ロケーションベースARにおいても指定した緯度経度座標と概ね正しい位置にモデルが重畳できることがわかり，本システムの有効性を確認した．

今後の課題として，ユーザーインターフェースの改善によるシステムの利便性の向上や，移動に伴う重畳誤差の軽減などが挙げられる．

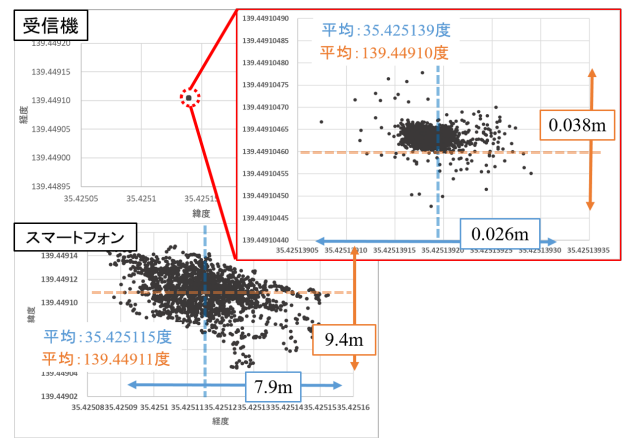


図-3 緯度経度の分布 (オープンスカイ環境)

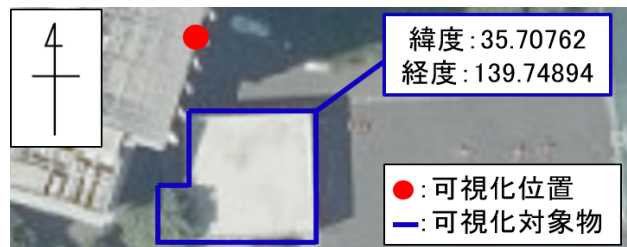


図-4 検証地域



図-5 ロケーションベースの可視化結果

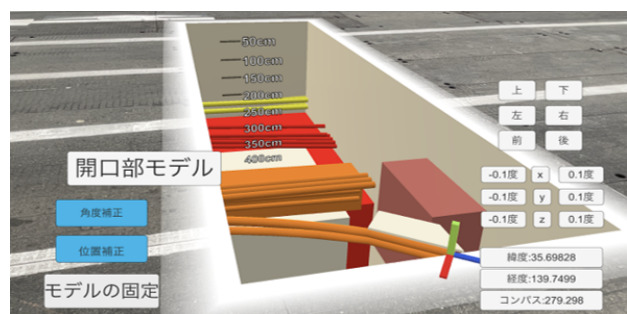


図-6 地下埋設物

参考文献

- 1) 洲崎文哉，樫山和男，琴浦毅，石田仁，吉永崇：ARKitを用いた地下埋設物のAR可視化システムの構築と重畳の高精度化の検討，土木学会論文集，Vol.77，No.2，pp.I131-I139，2021．
- 2) 鈴木雅大，大川博史，樫山和男：小型GNSS受信機を用いた水域環境におけるAR可視化システムの構築，土木情報シンポジウム講演集，Vol.47，pp.309-312，2022．

航空写真を用いた深層学習による土地利用分類モデルの構築

Construction of Land-Use Classification Model by Deep Learning Using Aerial Photographs

都市環境学科 4年 羽物 裕人
Yuto HABUTSUI

1. はじめに

著者らはこれまで二次元津波遡上解析¹⁾を行ってきたが、土地利用区分毎に粗度係数²⁾を与える際には、半自動で行っており労力のかかるものであった。

そこで本研究では、土地利用データを上記の事例に活用することを目指し、航空写真を用いた深層学習により、土地利用の画像分類モデルを構築する。本モデルを一般に公開されている航空写真に転移学習させ、深層学習モデルの精度検証及び評価を行った。

2. 深層学習手法

本研究では、前述のとおり深層学習による画像分類を行う。画像分類手法として最も代表的な手法である畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network; CNN) を採用し、分類モデルを構築する。なお、CNNとは畳み込み層、プーリング層及び全結合層から構成されるディープニューラルネットワークである。

3. データセット作成方法

3.1 入力データの作成方法

本研究は、教師あり学習の手法に基づき、データセットの作成を行う。データ作成と分類モデルの構築の流れを図-1に示す。本研究では、国土地理院が公開している数値地図5000とGISソフトを用い、10mの土地利用細分メッシュを作成する。作成した土地利用細分メッシュで航空写真を分割し、各土地利用種で分類することで、データセットを作成した。トレーニングデータは最新(2008年)の数値地図5000が公開されている近畿圏で作成し、航空写真は数値地図5000の作成年度に合わせて2008年のデータを採用した。なお、テストデータは高知県中土佐町久礼地区を対象地域として、次のように作成した。対象地域では数値地図5000が発行されていないため、10mの格子状に航空写真を分割し、分割した画像を手作業で分類することで作成している。対象地域の航空写真は、トレーニングデータの作成年度に近づくように2014年のデータを使用した。分類項目は、国土地理院が公開している細密数値情報に基づき、建物、田・畑、山林、海・河川、道路の5クラスとした。

3.2 トレーニングデータとテストデータについて

トレーニングデータ・テストデータの詳細及び例は、表-1、図-2に示す。また、図-3のように画像の回転・反転及びグレースケール化によりデータの水増しを行った。データ水増しの条件は、次章に示す。

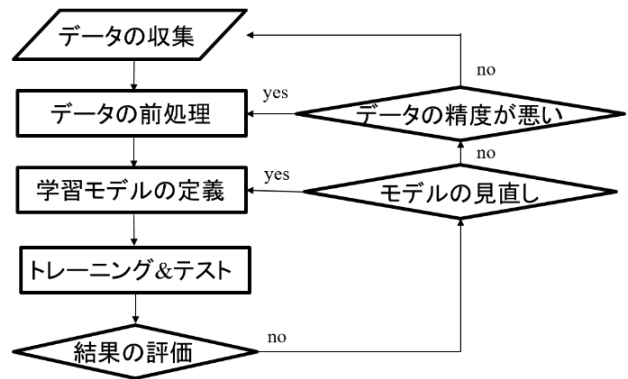


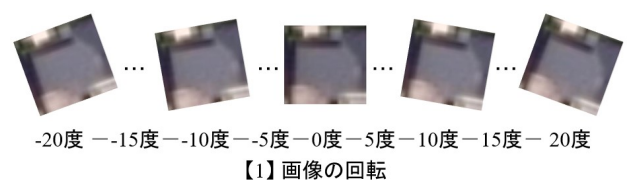
図-1 フローチャート

表-1 トレーニングデータ・テストデータの詳細

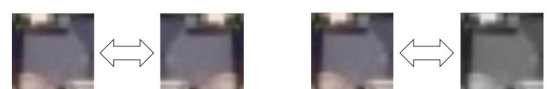
分類項目	土地利用種	粗度係数	トレーニングデータ	テストデータ
建物	一般低層住宅地	0.040	1,000枚	69枚
田・畑	田	0.020	各500枚	201枚
	畑・その他農地			
山林	山林・荒地等	0.030	1,000枚	127枚
海・河川	河川・湖沼等	0.025	各500枚	79枚
	海			
道路	道路	0.025	1,000枚	64枚



図-2 画像データの例



【1】画像の回転



【2】画像の反転



【3】グレースケール化

図-3 画像の回転・反転例

4. 学習条件と学習結果

4.1 学習条件

学習条件は、学習回数を 50 回、画像サイズは 150px*150px とした。データ水増し条件を以下に示す。

- 条件 1：-20 度から 20 度で 5 度ずつ回転，左右反転しトレーニングデータを 18 倍。
- 条件 2：-20 度から 20 度で 5 度ずつ回転，グレースケール化を施しトレーニングデータを 18 倍。
- 条件 3：-20 度から 20 度で 20 度ずつ回転，左右反転及びグレースケール化を施しトレーニングデータを 12 倍。

上記の条件でデータ水増しが施された学習用データを 5:1 の比率でトレーニングデータと検証用データに割り当てた。構築した CNN モデルの概要を図-4 に示す。ドロップアウトの割合は 0.25，最適化手法は Adam とし学習率は 0.001，活性化関数は ReLU 関数を使用した。ただし，出力前の活性化関数は Softmax 関数を使用した。評価方法は，学習実行時の正解率の推移，混同行列及び土地利用図の比較から分類モデルの評価を行う。

4.2 学習結果

学習結果を，表-2 及び図-5, 6 に示す。図-5 より，全ての条件において分類モデルの学習は高い正解率で収束していることが確認できる。表-2 及び図-6 より，学習用データにグレースケール化を施すことで，テスト結果の正解率が 2 倍近く向上していることが確認できる。しかし，全ての学習条件において道路の再現率及び適合率は低い結果となった。これは，道路上に車や白線等の特徴がある画像を道路の学習用データとして使用しているため，対象領域のような道路上に特徴のない画像を分類できていないと考える。

5. おわりに

本研究では，航空写真を用いた深層学習により土地利用の画像分類モデルの構築し，対象地域の分類精度の検証を行った結果，以下の結論が得られた。

- 対象領域において三つの条件でテストを行ったが，条件 2 が最も高い正解率となった。
- 学習用データにグレースケール化を施しデータの水増しをすることは，土地利用種の特徴を捉える上では有効であることを確認した。

今後は，分類精度の向上のため，学習用データのさらなる検証及びセマンティックセグメンテーションを用いた分類モデルの構築を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 利根川大介, 檜山和男, 安定化有限要素法による津波遡上及び流体力の解析手法の構築, 応用力学論文集 (土木学会), Vol.12, pp.127-134, 2009.
- 2) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫, GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, Vol.45, 1998.

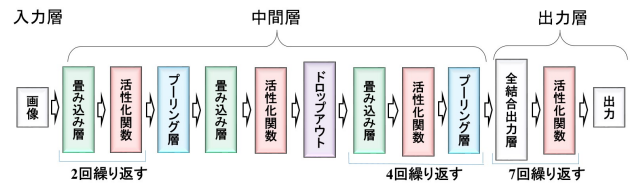


図-4 CNNモデル

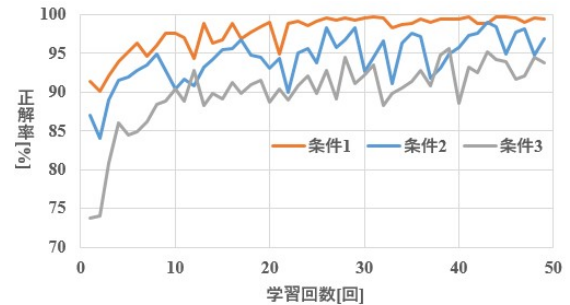


図-5 分類モデルの学習推移

表-2 テスト結果の混同行列

A: 条件1

予測\正解	建物	田・畑	山林	海・河川	道路	再現率
建物	28	15	0	26	0	0.41
田・畑	66	30	7	96	2	0.15
山林	3	6	0	117	1	0.00
海・河川	0	1	0	78	0	0.99
道路	16	28	0	20	0	0.00
適合率	0.25	0.38	0.00	0.23	0.00	正解率 0.25

B: 条件2

予測\正解	建物	田・畑	山林	海・河川	道路	再現率
建物	38	20	4	3	4	0.55
田・畑	26	143	19	9	4	0.71
山林	4	24	91	8	0	0.72
海・河川	0	20	3	56	0	0.71
道路	22	26	13	1	2	0.05
適合率	0.42	0.61	0.70	0.73	0.20	正解率 0.61

C: 条件3

予測\正解	建物	田・畑	山林	海・河川	道路	再現率
建物	39	27	1	0	2	0.57
田・畑	16	154	8	19	4	0.77
山林	1	54	42	30	0	0.33
海・河川	0	37	1	41	0	0.47
道路	11	39	3	5	6	0.16
適合率	0.58	0.50	0.76	0.43	0.50	正解率 0.52

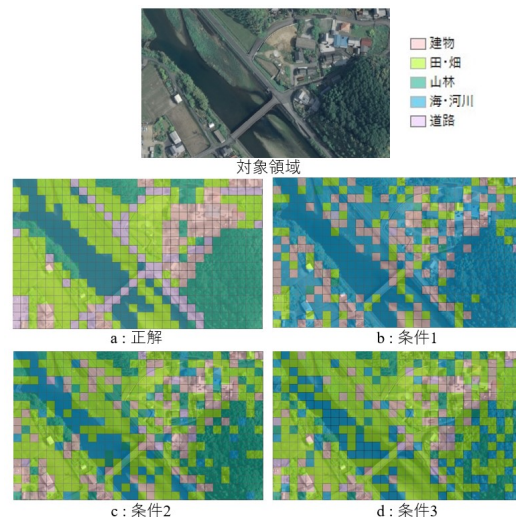


図-6 土地利用図の比較