

目 次

研 究 課 題 名	学 年	氏 名	頁
小型AUVによる水中マッピングデータ取得と マルチモーダル深層学習に基づく物体分類	博士後期課程 3 年	大川 博史	1
IGAに基づいたFEMによるコンクリート構造物の損傷を 考慮した流体-構造連成解析	博士前期課程 2 年	吉田 也真都	5
バックグラウンドメッシュを用いた Space-Time 有限要素法による高潮解析	博士前期課程 2 年	中村 光太郎	9
CIP法に基づく吸音効果を考慮した 道路交通騒音シミュレーション	博士前期課程 2 年	堤 蘭	13
地震による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システムの構築	博士前期課程 2 年	中村 麻菜美	17
MR 技術に基づく可視化システムの構築と その有効性の検討	博士前期課程 2 年	川越 健生	21
防災教育のための VR 津波疑似体験システムの構築	博士前期課程 2 年	王 博	25
地下埋設物に対する施工・維持管理支援のための AR可視化システムの構築	博士前期課程 2 年	洲崎 文哉	29
点群深層学習を用いた 水中構造物の分類と可視化に関する研究	博士前期課程 2 年	八木 笙太	33
IGAを用いた2次元移流解析	博士前期課程 1 年	安井 太一	37
有限要素法と境界要素法による遮音壁周辺の音場解析比較	博士前期課程 1 年	深澤 一志	41
津波避難シミュレーションシステムにおける 地理情報の設定に関する検討	博士前期課程 1 年	藤山 麗	45
GNSSデータを用いたARによる流れの可視化システム	博士前期課程 1 年	鈴木 雅大	49
安定化有限要素法による瀬戸内海の津波解析	学部 4 年	鶴藤 優太	53
河川遡上を考慮した 安定化有限要素法による東京湾の高潮解析	学部 4 年	常包 真里菜	55

VR技術を用いた超音速機騒音評価システムの構築	学部 4 年	中田 裕徳	57
マルチエージェントモデルに基づく 自動車による避難シミュレーションに関する研究	学部 4 年	西村 匡史	59
VRS-GNSS による位置合わせ手法を用いた AR可視化システムに関する研究	学部 4 年	李 可心	61
スマートフォンによる津波のAR可視化システムの構築	学部 4 年	横尾 圭亮	63
ドローンとCADを用いた 高精度な都市モデルの作成手法の構築	学部 4 年	方 言	65

小型 AUV による水中マッピングデータ取得と マルチモーダル深層学習に基づく物体分類

*Underwater Mapping Data Acquisition by Small AUV and
Object Classification Based on Multimodal Deep Learning*

都市人間環境学専攻 博士後期課程 3 年 大川 博史
Hiroshi OKAWA

1. はじめに

近年の測量・測位技術や無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) に代表される自動制御ロボット技術の発展により、陸上マッピング技術は飛躍的に向上し、水中マッピング技術も発展の一途をたどっている¹⁾。近年の計測機器や水中ロボットの発達により分解能の高い音響探査装置を利用した高品質な水中マッピングが実現可能となった。これらによって得られる水中マッピングデータは、音の反射の強弱によって表されるため、色彩情報は持たない。その結果、獲得したデータから物体判別を行う際、専門技術員による判読に依存し、直ちに自動的かつ迅速に判別するといった行為は困難であるだけでなく、作業員の経験の差や定型作業による人為的ミスを伴うという懸念がある。このため、水中音響反射強度画像に基づく自動分類は、以前より取り組まれており²⁾、音響反射強度画像のみを入力データとして、その分類アルゴリズムの検証が行われている。

著者らは、これらの背景を鑑み、小型 AUV によって取得される水中マッピングデータの 1 つである水中音響反射強度画像から任意サイズに分割した画像データを入力データとし、水中に存在する物体を自動判別することで、迅速かつ正確に水中の現況把握を行う手法の構築を行った³⁾。自動判別手法として畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network : 以後「CNN」とする) による画像分類タスクを適用し、物体の局所的な特徴から画像分類が可能であることを確認した。

本論文では、より正解精度の高い水中物体分類を目指し、これまで使用してきた水中音響反射強度画像に加え、水深データおよび後方散乱強度データを用いる。マルチモーダル深層学習に基づく CNN を適用することにより、これらの異種データの各モダリティを融合させた画像物体分類手法を提案する。各モダリティ別の学習データに対するテストデータの精度評価指標 (正解率・マクロ平均 F 値および再現率) を比較・評価した。また、使用する入力データに対し、データの特性を解析し、新たな入力値として付加することで、さらなる正解精度の向上を目指すものである。

2. マッピングデータおよびデータ取得方法

(1) マッピングデータ

マッピングデータとは、地理的な位置座標に基づき、様々な情報を付加させたデータと定義される。なかでも水

中マッピングデータは、水中で獲得した画像や地形、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。また、水中マッピング手法として、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、図-1 に示す Autonomous Underwater Vehicle (AUV) とよばれる自律航行型無人潜水ロボットをプラットフォームとして、各種計測機器を搭載することにより必要なデータを取得している。なお、AUV ではサイドスキャンソナー (インターフェロメトリ音響測深機) を用いて、3 種類のデータ (音響反射強度画像/水深データ/後方散乱強度) を同時に取得することが可能である。

(2) 水中音響計測技術について

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。直接的手法とは、水中カメラなどの光学技術によって可視画像を撮影する方法である。一方、間接的手法とは、超音波を用いた音響測深技術を用いる方法である。本研究では、間接的手法の 1 つで、前節の AUV に搭載した音響測深機によって音響反射強度画像/水深データ/後方散乱強度を取得する。なお、取得したマッピングデータの分布図を図-2 に示す。音響反射強度画像は各セルに値をもつ連続データであり、図中の緑のポイントで示される水深データおよび後方散乱強度は共通の平面座標に特徴量を持った離散データである。また、特徴比較のためにラスタ表示した取得データ例を図-3 に示す。なお、図中には、砂礫中に人工構造物である漁礁が点在する様子が示されており、取得データによって各々異なった特徴が確認できる。

各データの詳細については次項にて説明する。

a) 水中音響反射強度画像

水中では反射する音波の強弱が水底面の地質等によって異なるため、強弱を濃淡でラスタ表示することにより、白黒画像のように水底面の様子を面として捉えることが可能となる。本論文では、次項に示す水深データ計測用シ



- ・名称 : i3XO ECO Mapper AUV (YSI 社)
- ・寸法 : 152~216cm (センサー類による)
- ・重量 : 31.5kg
- ・航行時間 : 14 時間 (最大)
- ・運行速度 : 0.5~2.0m/s
- ・耐水深 : 100m

図-1 使用 AUV 諸元

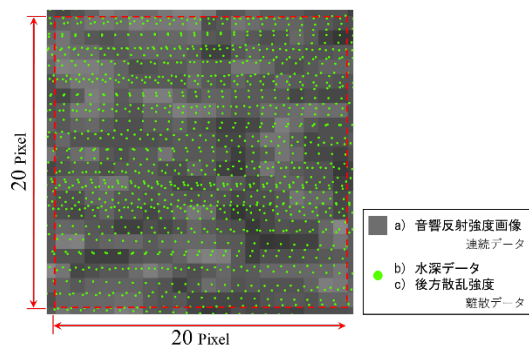


図-2 使用マッピングデータ分布

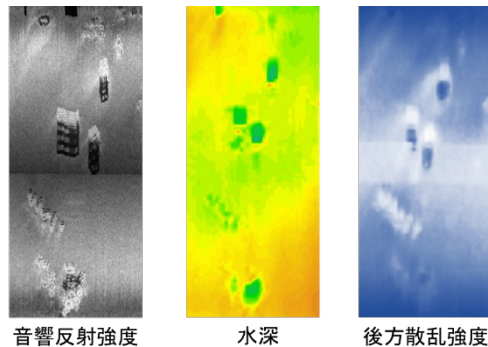


図-3 取得データ（※比較のためラスタ化したもの）

システムとは独立した2周波同時発振型のイメージングサイドスキャンソナーを用いる。これにより、特徴量の異なる独立したデータを有した高解像度なデータを取得している。

採取された表層土を解釈の指標とし、一般には判読基準を基に専門技術員の目視によって判読される。砂漣や砂堆といった波型の模様は砂質土に限定された模様であり、そのような模様があれば、容易に砂質土と断定可能である。

b) 水深データ

送波器から放射された音波が、海底に到達して後方散乱し、その音波を複数の受波器で受信する。それぞれの受波器での音波の到達時刻が到来角によって微妙に違うことを利用して、その到来角と散乱点までの往復距離を算出することで測深点の情報を取得し、各点において後方散乱強度も同時に保存可能である。

c) 水中後方散乱強度

水深データを計測するために発射された音波が水底面等で散乱した後、発射した方向に戻る音波の強さを後方散乱強度と呼ぶ。インターフェロメトリ測深の場合、前述の水深データと同時に副次的に後方散乱係数として取得可能である。後方散乱係数は散乱面の粗さに応じた入射角依存性がある。後方散乱強度と水中音響反射強度画像は類似の関係にあり、位置座標におけるスカラー値自体には意味を持たず、常に周囲との相対的な差において意味をなすものである。本論文において、後方散乱強度は受波ビームごとの信号強度を収録している数値データとし、水中音響反射強度画像は後方散乱強度と異なる周波数帯2波を用いて高解像度なサンプリングを実施した音響画像と定義する。

3. マルチモーダル深層学習による物体分類

(1) マルチモーダル深層学習と物体分類について

深層学習とは、深層学習とは人工ニューロンの層が多段に組み上げられた Neural Network (NN) のことであり、人工ニューロンの各層では複数の抽象化によるデータ表現が獲得され、直下の層が獲得した表現を直上の層が別の独自表現を獲得するように学習が進行するものと定義されている。深層学習は、特に大規模画像解析に優れた性能を発揮しており、すでに深層学習がヒトの認識性能を超えたことが報告されている。

深層学習を用いた画像解析は、現在幅広い分野において実用化されており、「認識 (Recognition)」、「分類 (Classification)」、「検出 (Detection)」、「領域検出 (Semantic Segmentation)」等に代表される技術が一般的である。なお、本報告に際しては「分類」技術を採用した。

深層学習による画像解析方法は、まず、NN のモデルを選択し、未学習の NN に「正解」のラベル付けをした大量の学習用画像を入力し、NN の結果の認識誤差により各ニューロンの重み係数を微調整する。次に、得られた NN に「正解」のラベル付けした学習用画像とは別に用意されたテスト用画像を与えて、正答率を調べる。これを繰り返すことにより、適切な学習曲線を持つ学習済み NN を得るものである¹⁰⁾。

また、深層学習を画像認識の問題に応用する際、多くの場合で用いられるのが CNN である。CNN はニューラルネットワークの中でも情報が一方にしか伝達しない順伝播型ニューラルネットワークの一種であり、その中でも一般に畳み込み層とプーリング層によって構成されるネットワークを指す。

CNN では入力層で画素値を入力値として扱い、入力した画素値から畳み込みとプーリングの処理によって特徴抽出し、最終的に識別する。畳み込み層では、画像上にフィルタを埋め込み、フィルタ内でフィルタのもつ重みと画像のもつ画素値の間で積和演算を行うことで画像の特徴を抽出する。例えば、白黒画像の場合では画像の濃淡のパターンを抽出することになる。一方、プーリングとは畳み込み層の出力をもとに画像の解像度を低下させる作業を意味する。

本報告では、入力層でテンソルの連結を行った後、畳み込みニューラルネットワークを特徴抽出器として用いることにより、複数のモダリティを扱うこととした。データ入力に際し、図-4 に示すように連続データのグリッドサイズを基に、離散データに対し最近傍法によりグリッド化した後、音

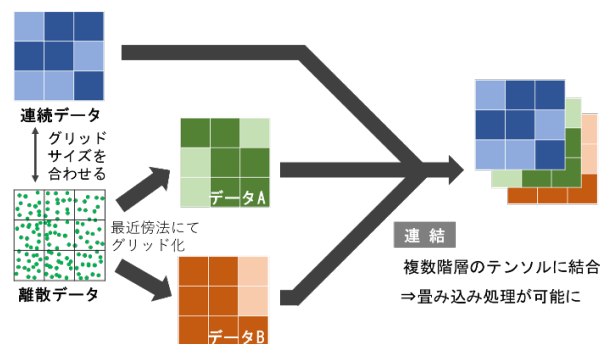


図-4 入力データの融合方法

響反射強度画像、水深、後方散乱強度の3データをチャンネル方向に積み重ねることにより、高さ×幅×3chのテンソルとして結合した。これらの処理を行うことにより、異種のデータであっても、位置座標に基づいたデータの特徴を表現でき、データ間に相関関係を持たせることが可能となる。すなわち、水中マッピングデータのように共通の地理空間

座標を有するデータを取り扱う場合、データ位置の調整処理を行うことなく、CNN処理を行うことができる。

(2) 深層学習モデルの構築

本研究では、画像分類の高精度化を目指し、複数種類の水中マッピングデータとCNNを組み合わせたマルチモーダル深層学習を行うことで、任意のピクセルサイズ単位に分割されたデータを3クラス（人工構造物 / 岩石 / その他（砂礫等））に分類するものである。本論文にて提案するモデル構成および構造を図-5に示す。

本モデルは、大別すると入力層・中間層・出力層に分類され、入力層では各モダリティの入力データに対し連結層において、音響反射強度画像および水深データ・後方散乱強度の各テンソルを融合する。次いで中間層で融合したデータに関して特徴量の抽出を行った後、最後に出力層にて特徴量に基づいたクラス分類を行う。中間層では、図-5に示すとおり、畳み込み層・プーリング層・ドロップアウト層・アクティベーション層の4層を1セットとし、2度繰り返すことにより特徴量の抽出を行っている。なお、ドロップアウト層とは、ニューラルネットワークの学習時に、一定割合のノードを不活性化させながら学習を行うことで過学習を防ぎ、精度を向上させるための層である。また、アクティベーション層とは、畳み込みによって生成されたデータを活性化関数と呼ばれる関数によって特徴づける層である。なお、活性化関数として正規化線形関数（Relu: Rectified Linear Units）を採用した。一方、出力層においては、全結合層およびドロップアウト層での処理後、活性化関数を用いることによりクラス分類を行っている。全結合層では上記の層を通して特徴部分に取り出された画像データを一つのノードに結合し、活性化関数によって変換された値を出力する。活性化関数には、多クラス分類問題に一般的に使用されるソフトマックス関数を採用し、クラス分類を行った。

本深層学習モデルにおける最適化アルゴリズムには、適応モーメント推定を採用し、損失関数として交差エントロピーを用いている。

4. 入力データ特性値および物体分類

本論文では、従来の入力データに対し、さらに特性値の解析データを付加することにより、正解率の向上を目指す。前章に示した3種類の入力データのうち、水深データの特徴値を解析し、これを新たに入力値として付加することとする。地形の形態的特徴はそれぞれの地形の面積・傾斜・起伏・曲率などによって量的に表現される。このような形態的特徴を量的に表現した場合の数値を「地形特性値⁵⁾」と呼ぶ。

本研究では、これらの地形特性値を水深データへ適用し、格子点での標高値から勾配（ノルム）および曲率（ラプシアン）を求める。地形特性値の定義・特徴ついて、表-1に示すとともに、実際に使用する20×20pixel(10cm/px)の水深データおよび勾配、曲率の解析例をそれぞれ図-6に示す。

表-1 地形特性値の定義

地形特性値	定義	特徴および地形学的な意味
標高 u	格子点における標高値	基本となる数値データであり、スカラー量である。
勾配 (ノルム) s	標高の一次微分ベクトルの絶対値 $s = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2}$	標高の変化の割合を表す。対象格子点と隣接する点の距離と標高差から算出
曲率 (ラプシアン) L	勾配の微分つまり、標高の二次微分 $L = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$	方向に依存しないスカラー量。地形の凹凸を表す。

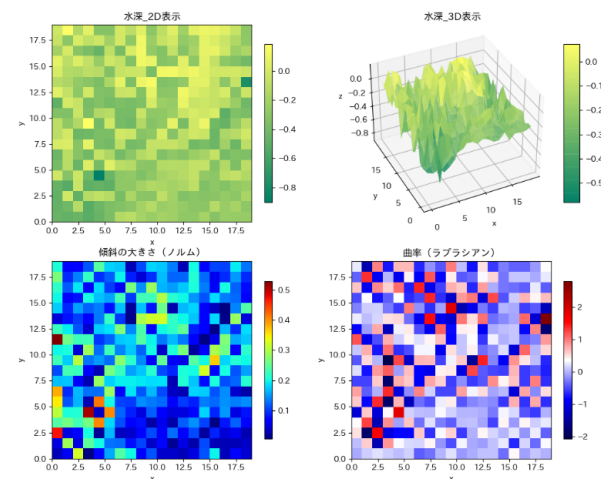


図-6 水深および傾斜の大きさ・曲率の解析例

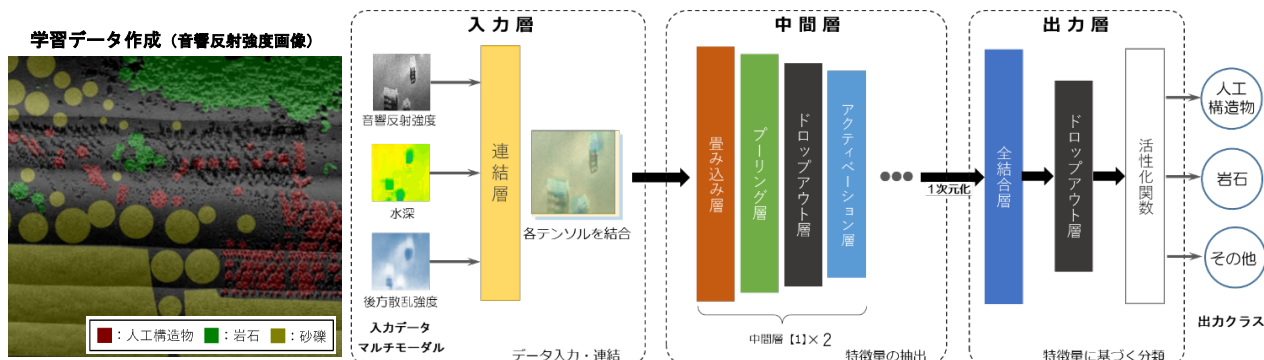


図-5 CNNモデルの概略

本研究の調査対象として、人工構造物・岩石・その他（砂礫等）を採用し、対象地域としてこれらの混在する水域であり水深 20m 程度の海域を有する三重県熊野沖を採用した。画像分類には実際に取得した音響反射強度画像からブランクゾーンを除去・編集の後、GeoTiff 形式にて保存した。編集した水中音響反射強度画像・水深データ・後方散乱強度データおよび本稿にて解析した勾配および曲率を用いて、前章の CNN によるマルチモーダル深層学習モデルにより学習させることによって物体分類を行う。また、作成したデータからトレーニングデータとバリデーションデータの精度を検証することによりハイパーパラメータを設定した。

5. 分類結果および考察

水深データにおける特性値を入力データとして付加した画像分類の結果および考察を示すものである。データ組み合わせ別回答数における混同行列および適合率・再現率を表-2 に、評価指数（正解率およびマクロ平均 F 値）を表-3 にそれぞれ示す。また、図-8 に正解率およびマクロ平均 F 値を棒グラフで示し、ケース毎のクラス別再現率の推移を折れ線グラフで表示する。正解率に関しては、本対象水域においても正解率 0.8 以上となっており、概ね高い数値を保持していることがわかる。また、データ融合数が 1 種類であるケース①が 0.82 であったのに対し、5 種類であるケース⑥では 0.96 となり大幅に向上しただけでなく、地形特性値を使用前と比較しても 2 ポイント向上していることが確認できる。マクロ平均 F 値において比較しても正解率とほぼ同様な値を示していることから信頼性のある分類精度であると判断できる。全 5 種類を融合したケース⑥に次いで、ケース⑤の値が高いが、全体の正解率の上昇率を比較してみると水深データおよび勾配が正解に寄与しているものと考えられる。また、全体の正解率が大幅に向上しただけでなく、各クラスにおける正解の様相も変化した。再現率および適合率はケースによって様相が異なるが、ケース⑥に関しては総じて 0.90 以上の値を示しており、これらの特性値を与えることが精度向上への寄与が期待される。

6. おわりに

本研究では、サイドスキャンソナーを利用して取得した音響反射強度画像を入力データとして、深層学習による画像分類タスクを適用した。深層学習モデルの判断が水中物体によって異なることが確認でき、物体固有の特徴をより際立たせる処理を行うことで精度の高い物体分類を実現できると考えられる。

今後の課題として、対象物による学習データの最適な画像分割サイズおよび入力データ処理方法による分類精度の検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会水中維持管理部会：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 水中維持管理技術の現場検証・評価の結果。平成 28 年 3 月 30 日<<http://www.mlit.go.jp/common/001125345.pdf>>, (入手 2018. 6. 6)
- 2) Wang, Q., Wu, M., Yu, F., Feng, C., Li, K., Zhu, Y., Rigall, E., and He, B.: RT-Seg: A Real-Time Semantic Segmentation Network

表-2 混同行列および適合率・再現率

実 際		予 測				予 測			
		人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R	人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R
	人工 構造物	143	111	14	0.53	238	15	15	0.89
	岩石	21	279	56	0.78	34	321	1	0.90
	その他 (砂礫)	0	4	496	0.99	8	16	476	0.95
	適合率P	0.87	0.71	0.88		0.85	0.91	0.97	

①音響画像のみ

実 際		予 測				予 測			
		人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R	人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R
	人工 構造物	183	23	62	0.68	235	25	8	0.88
	岩石	24	260	72	0.73	14	341	1	0.96
	その他 (砂礫)	0	2	498	1.00	7	11	482	0.96
	適合率P	0.88	0.91	0.79		0.92	0.90	0.98	

②水中音響画像 + 水深

実 際		予 測				予 測			
		人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R	人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R
	人工 構造物	183	23	62	0.68	235	25	8	0.88
	岩石	24	260	72	0.73	14	341	1	0.96
	その他 (砂礫)	0	2	498	1.00	7	11	482	0.96
	適合率P	0.88	0.91	0.79		0.92	0.90	0.98	

③水中音響画像 + 散乱強度

実 際		予 測				予 測			
		人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R	人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R
	人工 構造物	238	0	30	0.89	262	0	6	0.98
	岩石	7	342	7	0.96	0	321	35	0.90
	その他 (砂礫)	2	4	495	0.99	0	3	497	0.99
	適合率P	0.96	0.99	0.93		1.00	0.99	0.92	

④水中音響画像 + 水深 + 散乱強度

実 際		予 測				予 測			
		人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R	人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R
	人工 構造物	238	0	30	0.89	262	0	6	0.98
	岩石	7	342	7	0.96	0	321	35	0.90
	その他 (砂礫)	2	4	495	0.99	0	3	497	0.99
	適合率P	0.96	0.99	0.93		1.00	0.99	0.92	

⑤水中音響画像 + 水深 + 散乱強度 + 勾配

実 際		予 測				予 測			
		人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R	人工 構造物	岩石	その他 (砂礫)	再現率R
	人工 構造物	238	0	30	0.89	262	0	6	0.98
	岩石	7	342	7	0.96	0	321	35	0.90
	その他 (砂礫)	2	4	495	0.99	0	3	497	0.99
	適合率P	0.96	0.99	0.93		1.00	0.99	0.92	

⑥水中音響画像 + 水深 + 散乱強度 + 勾配 + 曲率

表-3 データ組み合わせ別評価指標

データ 融合数	組み合わせパターン	正解率 A	マクロ平均F値 F _{macro}
1	①：音響画像のみ	0.82	0.78
2	②：音響画像+水深	0.92	0.91
3	③：音響画像+散乱強度	0.84	0.82
4	④：音響画像+水深+散乱強度	0.94	0.93
5	⑤：音響画像+水深+散乱強度+勾配	0.95	0.93
6	⑥：音響画像+水深+散乱強度+勾配+曲率	0.96	0.94

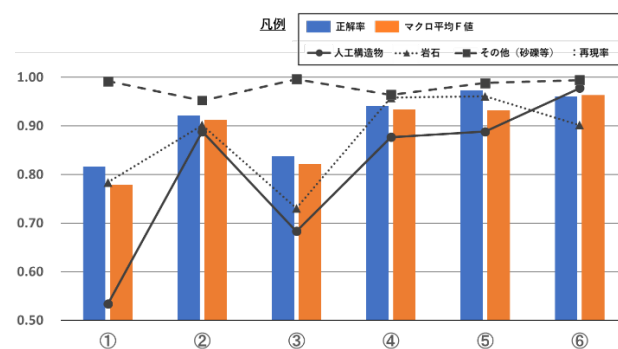


図-7 正解率・F 値および分類クラス別再現率

for Side-Scan Sonar Images., Sensors 2019, vol.19 Issue 9, p.1985, 2019.

- 3) 大川博史, 宮本崇, 檜山和男: 小型 AUV による水中マッピングデータ取得と深層学習に基づく物体判別, 土木情報学シンポジウム講演集, vol. 45, pp. 217-220, 2020.
- 4) Ngiam, J., Khosla, A., Kim, M., Nam, J., Lee, H., and Ng, A.Y.: Multimodal deep learning. In Proceedings of the 28th international conference on machine learning (ICML-11), pp. 689-696, 2011.
- 5) 太田岳洋, 八戸昭一: 数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例. 応用地質, vol.46, No.6, pp.347-360, 2006.

IGA に基づいた FEM によるコンクリート構造物の損傷を 考慮した流体-構造連成解析

FSI analysis considering the crack propagation of concrete structure solved by IGA based on FEM

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 吉田 也真都
Yamato YOSHIDA

1. はじめに

地震大国である日本では、津波によるコンクリート構造物の甚大な被害が想定されており、流体力の衝突による構造物の破壊メカニズムを解明することは極めて重要な研究課題である。そこで我が研究室の既往の研究として、有限要素法 (FEM) によるコンクリート構造物の損傷を考慮した流体-構造連成解析手法の構築¹⁾が行われてきた。しかし FEM では用いる基底関数によって要素分割を行うため、CAD の Spline 関数によって設計される構造物の曲面は近似的に表現されてしまう。近年この問題を解決する手法として Isogeometric Analysis (IGA)^{3) 4)}が注目を浴びている。IGA では CAD の形状表現に使われる Spline 関数を形状関数に用いることで、CAD で設計された曲面を有する構造物に対しても形状誤差なく解析が行われる。

本研究では、構造解析に IGA に基づいた FEM を適用することで、複雑な自由曲面を有するコンクリート構造物に対する損傷を考慮した流体-構造連成解析手法を構築することを目的とした。数値解析例として、円柱片持ち梁における振動解析と角柱を有する三次元ダムブレイク問題における角柱の損傷解析を取り上げることで、IGA による動的構造解析の有効性、及びコンクリート構造物の損傷を考慮した流体-構造連成解析手法の妥当性を検証する。

2. IGA による動的構造解析手法

本研究では、IGA に用いる形状関数として NURBS 関数を用いる。

(1) NURBS 関数

NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) 関数は Cox de Boor Algorithm(1) によって定義される三方向の B-Spline 基底関数を用いて、式 (2) のように定義される。

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

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

$$R_{i,j,k}^{p,q,r}(\xi, \eta, \zeta) = \frac{N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) L_{k,r}(\zeta) w_{i,j,k}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l N_{i,p}(\xi) M_{j,q}(\eta) L_{k,r}(\zeta) w_{i,j,k}} \quad (2)$$

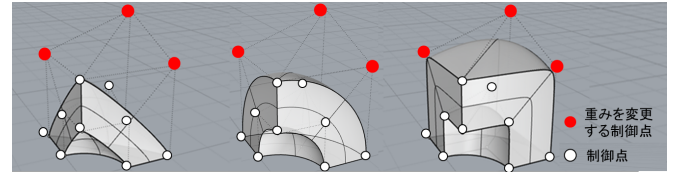


図-1 NURBS 関数における重みの効果

ここで、 ξ, η, ζ はそれぞれの方向の B-Spline 基底関数 N, M, L を決定するパラメータ空間の座標であるノット、 i, j, k は N, M, L を表現する物理空間の座標である制御点の番号、 p, q, r は N, M, L の次数、 w は各制御点における重みである。なお、 ξ_i は CAD で描いた形状から得られるノットベクトルの成分値である。

NURBS 関数は制御点に付与される重みの値を変えるだけで、要素数を保ったまま様々な形状を表現できる特徴を持ち、図-1 にこの特徴を示す。図中の赤丸の制御点における重みの値のみを変更することで、形状を様々表現することができている。この特徴により、IGA では解析領域となる構造物を少ない要素数で表現することが可能となる。

(2) 定式化

動的構造解析の支配方程式は運動中の平衡方程式 (3)、歪み-変位関係式 (4)、応力-歪み関係式 (5) である。なお、本研究では物体力と減衰は考慮しないものとする。

$$-\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (5)$$

ここで、 ρ は構造物密度、 u は変位、 σ は応力、 ε は歪み、 c_{ijkl} は弾性係数テンソルである。従来の有限要素法と同様に支配方程式に対して、仮想仕事の原理を適用し有限な要素に分割することで各要素での仮想仕事式 (6) を導く。

$$\int_{\Omega_e} \rho (\mathbf{R}_e^T \mathbf{R}_e) d\Omega \ddot{\mathbf{d}}_e + \int_{\Omega_e} (1 - D) \mathbf{B}_e^T \mathbf{D}_e \mathbf{B}_e d\Omega \mathbf{d}_e = \int_{\Gamma_e} \mathbf{R}_e^T \mathbf{t}_e d\Gamma \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{R}_e は形状関数行列、 \mathbf{d}_e は制御点変位ベクトル、 Ω_e は要素領域、 $\mathbf{B}_e \mathbf{B}$ マトリックス、 \mathbf{D}_e は弾性係数行列、

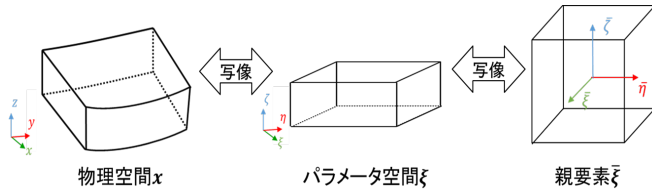


図-2 IGA における変数変換

Γ_e は要素境界, \mathbf{t}_e は表面力ベクトルである.

形状関数となる NURBS 関数は式 (2) で示したように物理空間 $\mathbf{x}(x, y, z)$ の関数ではなく, パラメータ空間 $\boldsymbol{\xi}(\xi, \eta, \zeta)$ の関数であるため, 式 (6) の積分を行う際, 物理空間とパラメータ空間の変数変換を施す必要がある. また, 各要素での積分を親要素に写像して数値積分で行うため, パラメータ空間 $\boldsymbol{\xi}(\xi, \eta, \zeta)$ と親要素 $\bar{\boldsymbol{\xi}}(\bar{\xi}, \bar{\eta}, \bar{\zeta})$ の変数変換を施す必要がある. このように IGA では二度の変数変換を行う必要があり, この関係を図-2 に示す. なお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 (7), (8) に示す通りである.

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^{n_{np}} R_i(\xi, \eta, \zeta) \mathbf{B}_{x_i} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\xi} = \frac{1}{2} \{ (\boldsymbol{\xi}_{i+1} - \boldsymbol{\xi}_i) \bar{\boldsymbol{\xi}} + (\boldsymbol{\xi}_{i+1} + \boldsymbol{\xi}_i) \} \quad (8)$$

ここで, n_{np} は制御点の総数, \mathbf{B}_x は制御点の座標である. 本研究では数値積分法として Gauss 求積法を用いる. 本研究では数値積分として Gauss 求積法を適用するが, NURBS 関数は有理多項式であるため, 積分点数を NURBS 関数の次数 +1 点とする必要があるとされている. 各要素で積分を行い, 行列を解析領域全体で重ね合わせることで, 空間方向に離散化された式 (9) を得る.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}\mathbf{d} = \mathbf{F} \quad (9)$$

ここで, \mathbf{M} は質量行列, \mathbf{K} は剛性行列, \mathbf{d} は制御点変位ベクトル, \mathbf{F} は外力ベクトルである. 式 (9) に対して時間方向の離散化委 Newmark の β 法を適用することで時間方向の離散化を行い, 未知数である変位を求める.

3. 損傷を考慮した流体-構造連成解析手法

本研究では VOF 法を用いた安定化有限要素法で自由表面流れ解析を行い, 等方性損傷モデルを考慮した IGA に基づいた FEM で構造物の損傷解析を行うことで連成解析を行う.

(1) 自由表面流れ解析

VOF 法による自由表面流れ解析の支配方程式は, 流れ場の支配方程式である Navier-Stokes 方程式 (10), 連続式 (11), そして VOF 関数の支配方程式である移流方程式 (12) である.

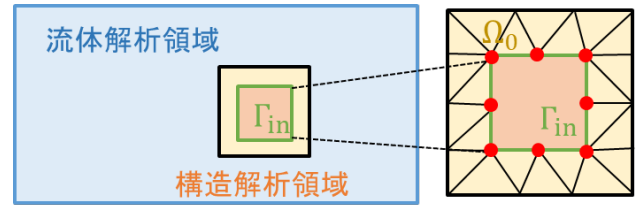


図-3 流体力の計算

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

ここで, ρ は密度, u は流速, f は物体力, p は圧力, μ は粘性係数, ϕ は界面位置を表現する VOF 関数である. ここで, VOF 関数はその節点が液体であれば 1, 界面であれば 0.5, 気体であれば 0 と定義される関数である.

本研究では, これらの支配方程式に対して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適用し, 時間方向の離散化に Crank-Nicolson 法を適用することで, 自由表面流れ解析を行う.

(2) 流体力の計算

構造物に作用する流体力の算出については, 図-1 に示すように, 流体力を求めたい構造物周りの領域 Ω_0 において流れ場の支配方程式 (10), (11) に重み付き残差法を適用することで弱形式 (13) を導く.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_0} w_i \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) d\Omega - \int_{\Omega_0} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} p d\Omega \\ & + \int_{\Omega_0} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \int_{\Omega_0} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_{in}} w_i \left(-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) n_j d\Gamma \quad (13) \end{aligned}$$

ここで, w, q はそれぞれ式 (10), (11) に対する重み関数, Γ_{in} は構造物の要素境界, δ はクロネッカーのデルタ, n_j は Γ_{in} に対して外向きの法線方向ベクトルである. 式 (13) の右辺項が構造物に作用する流体力となるため, 左辺項に流れ場の計算で求まる流速と圧力を代入することで構造物に作用する流体力を算出する. ここで, 右辺の流体力は分布荷重として求まるが, FEM の要素と IGA の要素が異なるために一度等価節点力として流体力を算出する. そして, 構造解析に外力として受け渡す際には, 構造物が曲面を持つ場合に流体力を点荷重として受け渡しが行えないため, 各要素での等分布荷重として流体力の受け渡しを行う.

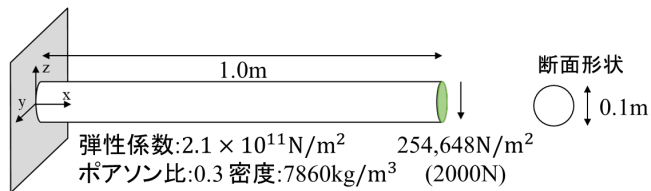


図-4 解析モデル

表-1 解析メッシュ

メッシュ	要素数	自由度数	要素分割と断面形状
a IGA	20	1,107	
b IGA	80	1,968	
c IGA	320	4,428	
d ANSYS	60	1,428	
e ANSYS	260	4,089	

なお、本研究では微小変形を仮定しており、流体解析において構造物の変形は考慮しない片方向連成解析とする。

(3) 損傷解析手法

本研究ではコンクリート構造物の損傷解析手法として、車谷らによって提案された等方性損傷モデル⁴⁾を導入する。等方性損傷モデルでは、式(14)で定義される損傷変数を応力-歪み関係式(5)に組み込むことで、損傷の様子を弾性係数の低下によって間接的に表現する。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f}(\kappa - \kappa_0)\right) \quad (14)$$

ここで、 κ は変形履歴における等価歪みの最大値、 κ_0 は破壊発生歪み、 E は弾性係数、 h_e は要素サイズ、 G_f は破壊エネルギーである。 D は 0 から 1 の値を取り、0 であれば損傷していない、1 であれば完全に損傷している状態を示す。等方性損傷モデルの詳細は参考文献⁴⁾を参照されたい。

4. 数値解析例

数値解析例として、円柱片持ち梁の振動解析と構造物を有する三次元ダムブレイク問題を取り上げる。

(1) 円柱片持ち梁における振動解析

図-4 に示す解析モデルにおいて、梁先端での鉛直方向変位を商用解析ソフトによる結果と比較し、荷重除荷後の振動解析を行うことで、IGA の有効性を検証する。

(a) 解析条件

表-1 に解析メッシュを示す。IGA のメッシュは二次の NURBS 要素でメッシュ a, b, c はそれぞれ断面を 1 要素、4 要素、16 要素で表現し、各メッシュで Gauss 積分の積分点数を 2~6 として解析を行う。商用解析ソフトとの比較として六面体二次要素(メッシュ d, e)を用いて ANSYS で解析を行う。また、振動解析の時間増分は 10^{-4} s とした。

表-2 各条件での変位と理論値との相対誤差

積分点	メッシュ a	メッシュ b	メッシュ c
2	-4.409×10^{-4} m (31.82%)	-6.568×10^{-4} m (-1.59%)	-6.464×10^{-4} m (0.05%)
3	-6.680×10^{-4} m (-3.29%)	-6.422×10^{-4} m (0.69%)	-6.449×10^{-4} m (0.28%)
4	-6.220×10^{-4} m (3.82%)	-6.429×10^{-4} m (0.59%)	-6.449×10^{-4} m (0.28%)
5	-6.262×10^{-4} m (3.17%)	-6.429×10^{-4} m (0.59%)	-6.449×10^{-4} m (0.28%)
6	-6.249×10^{-4} m (3.37%)	-6.429×10^{-4} m (0.59%)	-6.449×10^{-4} m (0.28%)

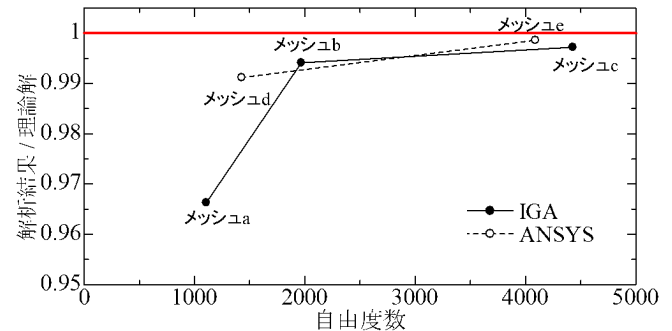


図-5 商用解析ソフトとの比較

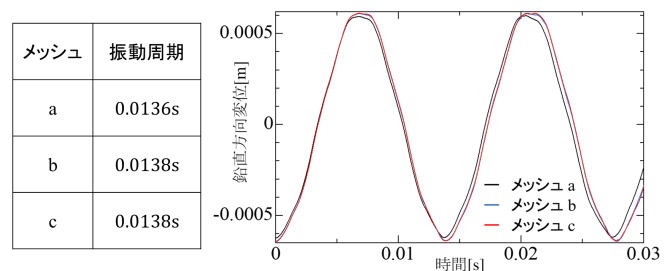


図-6 各メッシュでの振動の様子

(b) 解析結果

表-2 に各メッシュ、各積分点数で梁先端の鉛直方向変位の理論値との相対誤差を示す。円を 1 要素で表現しているメッシュ a で安定した解析を行うには積分点が 4 点以上必要であったが、円を 4 分割以上したメッシュ b, c では 3 点積分で安定した解析を行えたことに加え、相対誤差が 1% 未満となる高精度な解析を行うことができた。

図-5 に積分点を 4 点とした IGA の結果と ANSYS による結果の比較を示す。この図から、IGA では断面を 4 分割以上することで、商用解析ソフトと同等に高精度な解析を行えることが確認できる。

そして textbf 図-6 に IGA による、荷重除荷後の梁先端での振動の様子を示す。本例題における振動周期の理論値は 0.0138 s であるが、いずれのメッシュにおいても解析結果が理論値と良い一致を示した。以上より、IGA では円の断面を 1 要素として解析しても相対誤差が 3% 程度の精度で解析を行うことが可能で、円の断面を 4 分割以上することで、一般的な商用解析ソフトと同等の高精度な解析を行えることが確認できた。

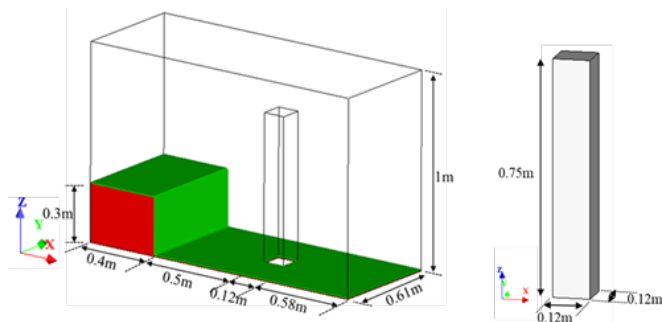


図-7 解析モデル

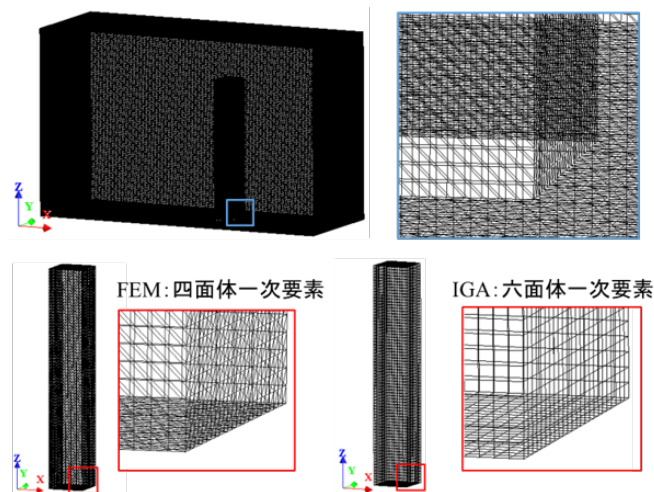


図-8 解析メッシュ

表-3 角柱の材料定数

弾性係数	ポアソン比	圧縮引張強度比	破壊発生ひずみ	破壊エネルギー
30GPa	0.2	10	1.0×10^{-7}	100N/m

(2) 角柱を有する三次元ダムブレイク問題

図-7 に示す解析モデルにおいて、既往の研究で構築された FEM による解析結果と比較することで IGA による損傷を考慮した連成解析手法の妥当性を検証する。

(a) 解析条件

図-8 に解析メッシュと拡大図を示す。要素幅は流体領域、構造領域ともに 0.005 m である。既往の研究では構造解析に四面体一次要素を用いており、IGA では一次の NURBS 要素、六面体一次要素を用いている。流体解析の境界条件には、壁面、底面及び構造物周りに Slip 条件を適用する。また、液体と気体の密度と粘性係数は標準大気圧下で 20 °C の値を用いる。

構造解析の境界条件は、構造物の底面における変位を全方向固定。また、構造物の材料定数は表-3 に示す通り、一般的なコンクリートの値を用いるが、破壊発生歪みに関しては、損傷を確認するために通常の値よりも 10^{-3} 小さく設定する。時間増分は流体解析、構造解析ともに 10^{-3} s とする。

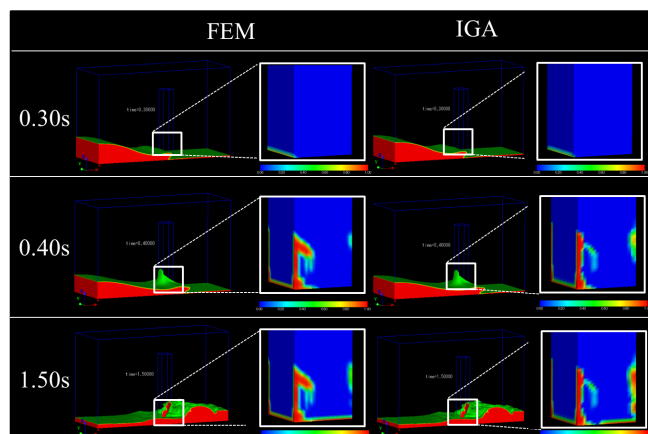


図-9 解析結果

(b) 解析結果

に各時刻における流体の挙動と角柱の損傷の様子を示す。図中のコンター図は損傷係数を示している。0.3 s 時点で流体が角柱に衝突し、角柱前面の下端が損傷。1.5 s 時点では角柱の裏側から流体が衝突することで、角柱底面部に損傷が進展している様子が両手法で見られ、IGA に基づいた FEM によるコンクリート構造物の損傷を考慮した流体-構造連成解析手法の妥当性を確認できた。

5. おわりに

本研究では、IGA による動的構造解析の有効性の検証、及び IGA によるコンクリート構造物の損傷を考慮した流体-構造連成解析手法の妥当性の検証を行ったことで、以下の結論を得た。

- IGA では少ない要素で解析領域を表現し、高精度な解析を行うことが可能。
- 既往の研究による結果と概ねの定量的な一致を確認し、IGA に基づいた FEM による損傷を考慮した流体-構造連成解析手法の妥当性を確認。

今後の課題として、実験解との比較による本手法の定量的な評価、及び複雑な曲面形状を有するコンクリート構造物での損傷を考慮した連成解析が挙げられる。

参考文献

- 1) 金澤功樹, 凌国明, 車谷麻緒, 榎山和男: 等方性損傷モデルを用いた三次元流体-構造連成解析手法の構築, 第 47 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-19, 2020.
- 2) 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.
- 3) J.A.Cottrell, T.J.R. Hughes and Y.Bazilevs, Isogeometric analysis: Toward integration of CAD and FEA, Wiley Publishing, 335p, 2009.
- 4) M. Kurumatani, K. Terada, J. Kato, T. Kyoya and K. Kashiwayama, An isotropic damage model based on fracture mechanics for concrete, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 155, pp.19-66, 2016.

バックグラウンドメッシュを用いた Space-Time 有限要素法による高潮解析

Storm Surge Analysis using Space-Time Method with Background Mesh

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 中村 光太郎
Kotaro NAKAMURA

1. はじめに

近年、台風被害が頻発化・激甚化し、加えて気候変動による海面上昇等により、将来さらに高潮による災害リスクが高まるおそれがある。また、高潮による被害は沿岸域における護岸からの越水だけでなく、河川を逆流した海水の氾濫など、被害は内部にまで至るため、氾濫域を高精度に表現可能な計算手法が必要となる。このような移動境界問題に対し高精度な解析が可能である界面追跡法の一つとして Space-Time 有限要素法が知られている。しかし、時々刻々と解析メッシュが変化するため、メッシュ更新時に形状が破綻してしまうなどの問題がある。

そこで本研究では、Space-Time 法による界面追跡法においてメッシュが破綻する問題を克服し、陸域の地形情報を損なうことなく解析を行うためにバックグラウンドメッシュに基づくメッシュ再構築手法¹⁾を適用し、高潮解析を行った。

2. 数値解析手法

(1) 基礎方程式

高潮解析の支配方程式として、以下に示す浅水長波方程式を用いる。

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

各ベクトル、各マトリックスは以下ようになる

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -c^2 \frac{\partial(z-\zeta_0)}{\partial x_1} - \frac{u_1 H C_D \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} + \frac{\rho_a C_D \sqrt{w_1^2 + w_2^2} w_1}{\rho} \\ -c^2 \frac{\partial(z-\zeta_0)}{\partial x_2} - \frac{u_2 H C_D \sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{H} + \frac{\rho_a C_D \sqrt{w_1^2 + w_2^2} w_2}{\rho} \end{bmatrix}$$

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

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

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

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} H \\ u_1 H \\ u_2 H \end{bmatrix}, C_f = \frac{gn^2}{H^{\frac{1}{3}}}$$

ここで、 H は全水深、 w_i は風速、 c は波速、 z は河床高さ、 ρ, ρ_a は、それぞれ水の密度、空気の密度、 u_i は各方向の流速、 g は重力加速度、 ν は渦動粘性係数、 n はマンシングの粗度係数、 ζ_0 は気圧低下に伴う水位上昇量、 C_D は抗力係数

であり本多・光易の式²⁾を用いる。また、 \mathbf{U} は未知ベクトル、 \mathbf{R} は勾配及び摩擦ベクトル、 \mathbf{A}_i は移流行列、 \mathbf{K}_{ij} は拡散行列である。

(2) 台風モデル

台風の気圧分布は次式に示す Myers の式で与えた。

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2)$$

ここに、 $P(r)$ は台風中心から距離 r だけ離れた地点での気圧、 P_c は台風の中心気圧、 ΔP は気圧の深度、 r_0 は台風内の最大風速地点の台風中心からの距離である。このような気圧分布の下で、傾度風速 V_{gr} は次式で与えられる。

$$V_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (3)$$

なお、 f はコリオリ係数、 ρ_a は空気の密度である。ここで、 V_{ti} を台風の移動速度、 x_{ci} を台風の中心座標とすると風速 w_i は次式で与える。

$$w_1 = C_1 V_{t1} \exp\left(-\frac{r\pi}{500 \times 10^3}\right) - C_2 V_{gr} \frac{(x_1 - x_{c1}) + \sqrt{3}(x_2 - x_{c2})}{2r} \quad (4)$$

$$w_2 = C_1 V_{t2} \exp\left(-\frac{r\pi}{500 \times 10^3}\right) + C_2 V_{gr} \frac{\sqrt{3}(x_1 - x_{c1}) - (x_2 - x_{c2})}{2r} \quad (5)$$

また、 C_1, C_2 は風速の低減係数であり、藤井・光田のモデル³⁾を用いる。式 (1) の気圧低下に伴う水位上昇量 ζ_0 は次式で与える。

$$\zeta_0 = 0.991(1013 - P(r)) \times 10^{-2} \quad (6)$$

(3) Space-Time 有限要素法

Space-Time 法は、空間と時間の双方に対して有限要素法を適用する手法であり、時間・空間領域 (Space-Time slab) 毎に独立に離散化を行う。Space-Time slab とは、図-1 に示すように、時刻 t_n での空間領域 Ω_n と時刻 t_{n+1} での空間領域 Ω_{n+1} を連結したものであり、ここで t_n^+ と t_{n+1}^- の \pm は slab 内での上下を表している。その後、一つ前の Space-Time slab の情報をもとに slab 内での節点における未知量を求め、解き進んでいく方法である。このため時間

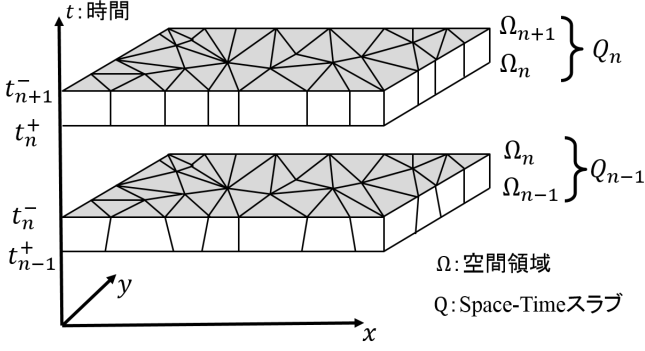


図-1 Space-Time slab

刻み毎のメッシュ同士が幾何学的に連続である必要はない。

(4) 定式化

式(1)に対し, Space-Time slab 毎に有限要素法の適用を行う。いま, t_n^+ と t_{n+1}^- に囲まれた領域に着目して, 時間方向の不連続量を含む形を考えると次式のようなになる。

$$\begin{aligned}
 & \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega} \mathbf{U}^* \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) + \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) d\Omega dt \\
 & + \int_{\Omega} (\mathbf{U}^*)_n^+ ((\mathbf{U})_n^+ - (\mathbf{U})_n^-) d\Omega \\
 & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_e} \tau \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial t} + \mathbf{A}_i^T \frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_j} - \mathbf{K} \frac{\partial^2 \mathbf{U}^*}{\partial x_i^2} \right) \\
 & \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \mathbf{K} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial x_i^2} - \mathbf{R} \right) d\Omega_e dt \\
 & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_e} \delta \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) \\
 & = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{\Omega_e} \mathbf{U}^* \cdot \mathbf{R} d\Omega_e dt
 \end{aligned} \quad (7)$$

ここに, 左辺第1項は通常の Galerkin 項, 第2項は時刻 $t = t_n$ における解の連続性を弱く要求するものであり, 第3項は GLS 法による安定化に寄与する項である。また, 第4項は衝撃捕捉項である。ここで τ, δ は安定化パラメータである。

(5) メッシュ再構築手法

本研究では, 移動境界を表現する際に, あらかじめ流体が移動する領域全体にバックグラウンドメッシュを設置し, それに基づいて解析メッシュの再構築を行う。図-2に示すように, メッシュを再構築するための領域をバックグラウンドメッシュから定義する。その際, 定義された計算領域は水域を包含するように定義する。その後, 水際線に割り当てられた節点は, その節点から最も近い水域の水際線上に移動させ, その移動量を境界条件とし, 線形弾性方程式を解くことにより, 内部節点の移動量を求め, 新たにメッシュが再構築される。

また, 再構築されたメッシュの節点上には物理量は配置

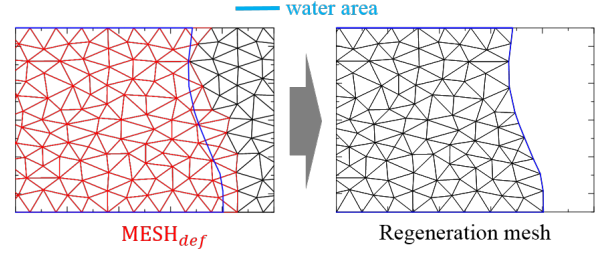


図-2 メッシュの再構築

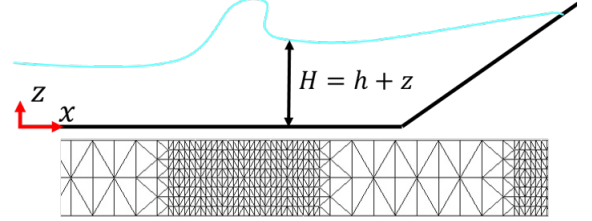


図-3 AMR 法 細分化の様子

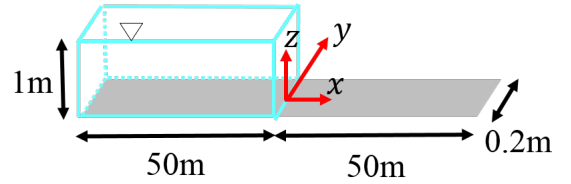


図-4 ダムブレイク問題 初期条件

されていないため水域の節点の物理量を再配置する必要がある。この再配置には, 面積座標に基づく CIVA 法⁴⁾で用いられる3次補間式により補間を行っている。

$$\begin{aligned}
 \phi(X_n^{RG}) = & \sum_{i=1}^3 a_i L_i + d \sum_{j,k=1}^3 b_{jk} (L_j^2 L_k + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$a_i = \phi_i$$

$$b_{jk} = \phi_j - \phi_k + (x_k - x_j) \cdot \nabla \phi_j$$

また, AMR 法を適用することで, 局所的に細分化し, より高精度な解析が可能となる。この手法では, バックグラウンドメッシュも細分化する必要があるが, 物理量に関する値は持っていないため, 解析メッシュとバックグラウンドメッシュの要素を対応させ, バックグラウンドメッシュの要素に対する細分化を計算によって得られた水位 H の二階微分値を参考にする。また, 水際線に隣接している要素も細分化すると図-3に示すようになる。

3. 数値解析例

(1) ダムブレイク問題

まず本メッシュ再構築手法の精度を検証するため, 図-4に示すようなダムブレイク問題で解析を行い通常の FEM

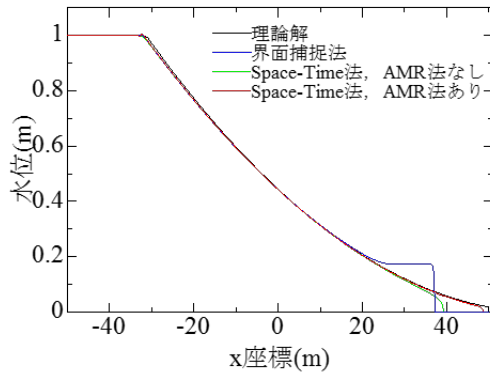


図-5 解析結果（水位分布）

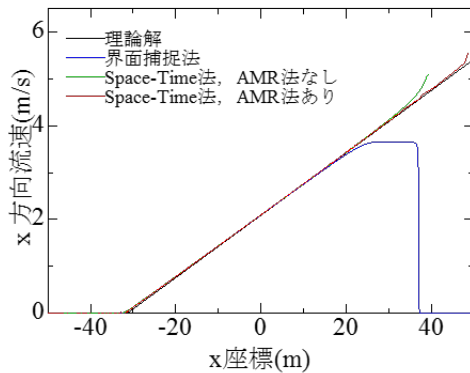


図-6 解析結果（流速分布）

の界面捕捉法との比較を行った。

(a) 解析条件

メッシュはユニオンジャック型の構造格子メッシュであり、分割幅は 0.1m である。時間増分 Δt は 0.002s であり、境界条件は壁面に Slip 条件を与えている。

(b) 解析結果

図-5 に水位分布の比較グラフを示す。図-6 に流速分布の比較グラフを示す。これらの結果から Space-Time 法が理論解と良い一致を示していることが確認できる。

(2) フラスコ湾での高潮氾濫解析

本手法の高潮解析への適用性を確認するために、図-7 に示すような仮定の湾と陸部において高潮氾濫解析を行った。

(a) 解析条件

初期条件として湾部に水深 10m を与え、陸部まで 1/10 の勾配を与えた。境界条件は青線部に Non-Slip 条件、赤線部に Slip 条件、緑線分に開境界条件を与えた。時間増分 Δt は 1s である。台風のパラメータは伊勢湾台風を参考にし、中心気圧は 940hPa、最大風速半径は 100km を与え、最大

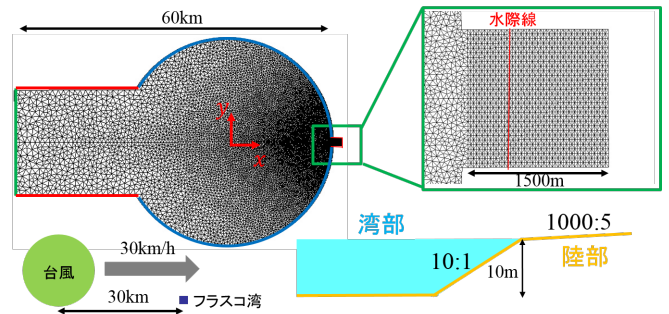


図-7 フラスコ湾 解析条件

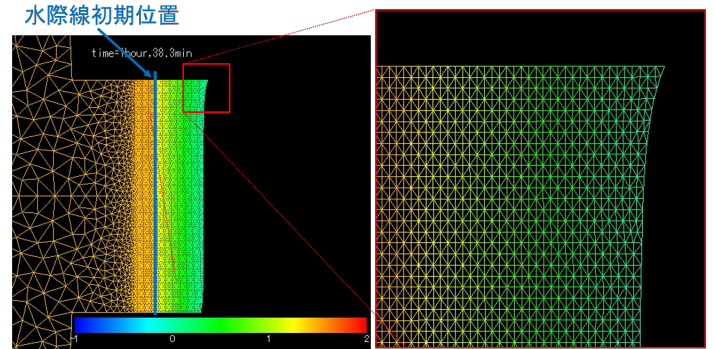


図-8 フラスコ湾 解析結果

風速部が湾にかかるように左から右へ通過させた。また、最小メッシュ幅は 10m である。

(b) 解析結果

図-8 に、台風通過に伴う遡上の様子を示す。これらの結果から本メッシュ再構築手法において高潮氾濫解析を行い、水際線を滑らかに表現できていることが確認できる。

(3) 東京湾での高潮解析

実際の地形での高潮現象と比較し、高潮解析の妥当性を検証するために図-9 に示すような東京湾での高潮解析を行った。比較する高潮現象として 2019 年の台風 19 号による高潮を対象とし、東京港での潮位偏差の実測値との比較を行った。

(a) 解析条件

台風のパラメータとして中心気圧は各時刻において、観測データを参考にし、最大風速半径も同様に観測値をもとに計算し 95km とした。台風経路は図-10 に示すような経路で、10 日 3 時から 13 日 9 時までの解析を行った。また、境界条件として下部境界に表-1 に示すような主要 4 分潮を以下のように与えた。

$$\eta = \sum_{m=1}^4 a_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_m}t + k_m\right) \quad (9)$$

また、河川端には開境界条件、その他の境界には Non-Slip 条件を与えた。時間増分 Δt は 10s であり、最小メッシュ幅は 10m である。

表-1 主要4分潮

Code	Amplitude $a_m[m]$	Period $T_m[h]$	Phase delay $k_m[rad]$
M2	0.3592	12.42	2.5543
S2	0.1699	12.00	3.0423
K1	0.2322	23.93	3.0852
O1	0.182	25.82	2.7583

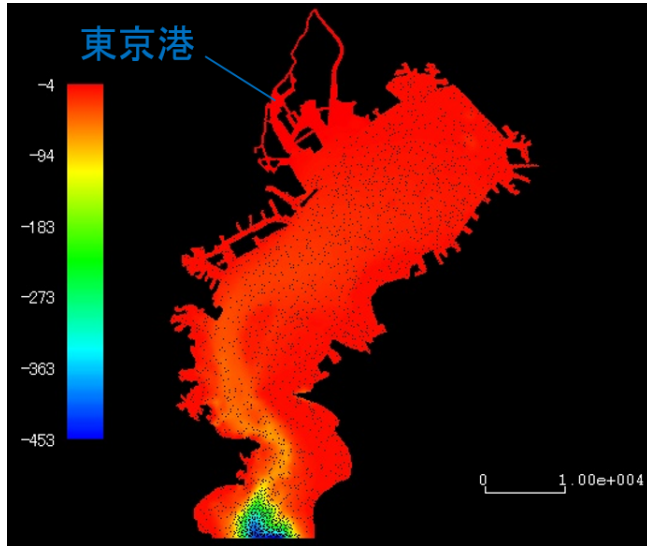


図-9 東京湾メッシュ分割図

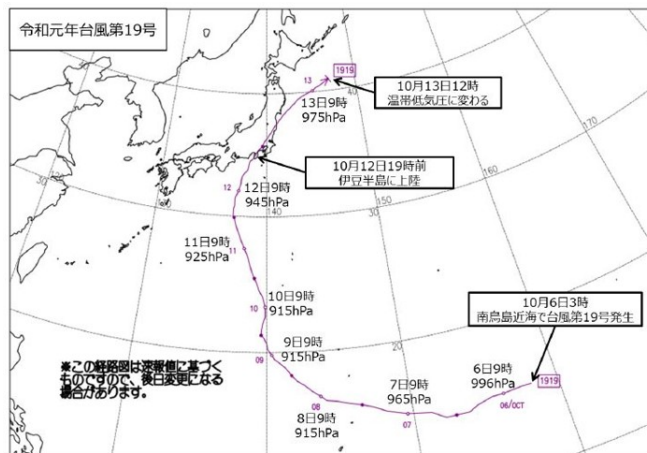


図-10 台風経路（気象庁より引用）

(b) 解析結果

図-11に、潮位偏差の比較グラフを示す。また、図-12にピーク時のコンター図を示す。これらの結果から、概ね高潮の挙動を再現できていることが確認でき、潮位偏差のピークを概ね捉えられていることが確認できる。また、ピーク時の東京港付近から隅田川、荒川に対して波が遡上し、水位が高まっていることが確認できる。

4. おわりに

本研究では界面追跡法におけるメッシュ破綻を避け、地形情報を正しく考慮するために、バックグラウンドメッシュに基づくメッシュ再構築手法を適用し Space-Time 法による高潮解析を行い、以下の結論を得た。

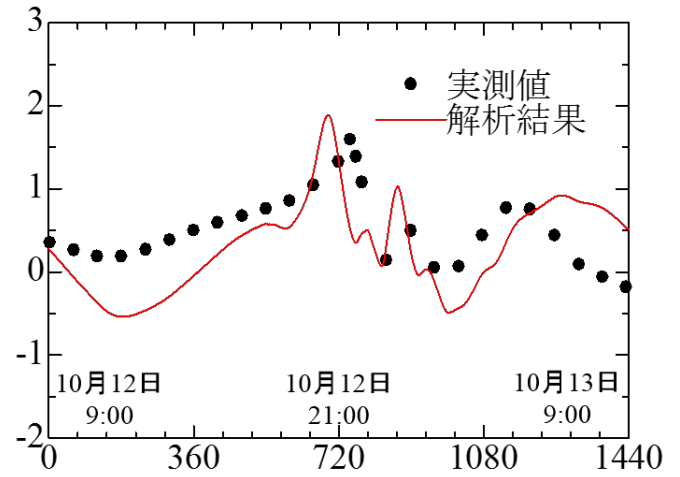


図-11 潮位偏差グラフ

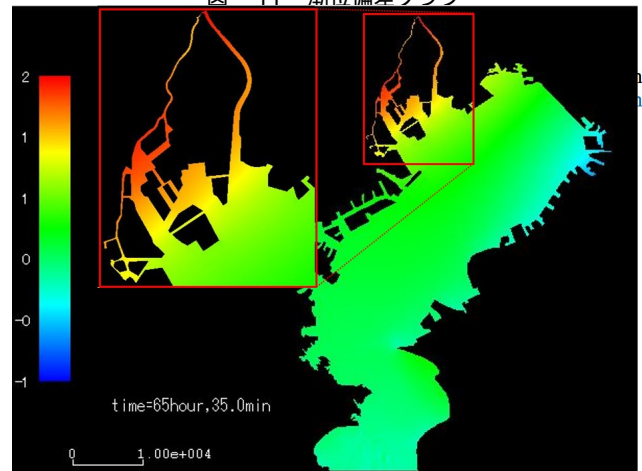


図-12 潮位偏差コンター図

- バックグラウンドメッシュを用いた Space-Time 法は界面捕捉法に比べ、精度良く移動境界の位置及び周辺の物理量を求められた
- 仮想的なフラスコ湾での高潮氾濫解析において、滑らかに水際線を表現することができた
- 東京港での実測値との比較により高潮解析の妥当性を示すとともに、河川遡上の危険性を確認することができた

今後の課題として実地形での高潮氾濫解析が挙げられる。

参考文献

- 1) Shinsuke, T., Seizo, T., Kazuo, K. and Tayfun, E. T., Space-Time SUPG finite element computation of shallowwater-flows with moving shorelines, Comput Mech, 48, pp.293-306, 2011.
- 2) Mitsuyasu, H. and Honda, T., The High Frequency Spectrum of Wind Generated Wave, J. Oceanog. Soc. Japan, 30, No.4, 1974.
- 3) 藤井健, 光田寧, 台風の確立モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 29, B-1, pp.229-239, 1986.
- 4) Tanaka, N., The CIVA method for mesh-free approaches: improvement of the CIP method for nsimplex, Computational Fluid Dynamics JOURNAL, 8, no.1, pp.121-127, 1999.

CIP 法に基づく吸音効果を考慮した道路交通騒音シミュレーション

Road traffic noise simulation considering sound absorption based on CIP method

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 堤 蘭
Ran TSUTSUMI

1. はじめに

近年、航空機・鉄道・道路などの交通騒音や工事騒音などによる騒音の苦情件数が典型 7 公害の中で最も多いものとなっているため、騒音問題に対して数値シミュレーションに基づいた事前予測が必要である。研究室の既往の研究¹⁾においては定量的な騒音影響評価を行うため、CIP 法を用いたインパルス応答解析に基づく数値シミュレーション手法の構築を行い、遮音壁での吸音効果を考慮するために Rayleigh モデルの導入を行ってきた。しかし、実際の道路舗装では排水性舗装が一般的となっており、そのような場合には吸音効果を考慮する必要がある。また、実際の騒音問題への適用例としては、工事騒音などの固定音源問題に限られていた。

そこで本研究では、Rayleigh モデルを用いた地表面に対しての吸音効果の考慮、さらに交通騒音などの移動音源問題への適用を可能とするために時変畳み込み手法の導入を行い、道路交通騒音問題を対象として妥当性の検証を行った。

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式と特性曲線法

空気中の波動伝播は運動方程式 (1)、と連続式 (2) で表され、1 次元の場合は以下ようになる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 p は音圧 [Pa]、 u は粒子速度 [m/s]、 ρ は空気の密度 [kg/m³] である。式 (1) に音速 c [m/s] を掛け、式 (2) との和と差を作ると

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u + p) + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u - p) - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) = 0 \quad (4)$$

と表すことができる。この $\rho c u + p$ 、 $\rho c u - p$ を特性曲線に沿って移流させる。

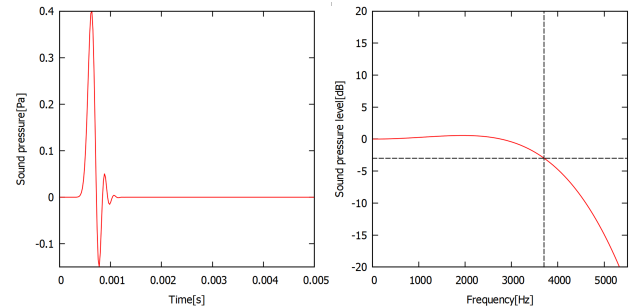


図-1 用いた擬似インパルス (左) とその周波数特性 (右)

2.2 CIP 法

CIP 法は特性曲線に沿って物理量を移流させる移流方程式の差分を用いた高精度の解法である。本論文では三次元伝播問題に対しより高精度な解析が可能な C 型 CIP 法を用いている。詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

2.3 インパルス応答解析

インパルス応答とはインパルスと呼ばれる非常に短い波を入力した時の受音点で得られる応答のことである。音源での入力波形とインパルス応答の畳み込みを行うことによって受音点での出力波形を得ることができる。今回は擬似インパルスとして、畳み込み積分の離散近似手法である Lubich の Convolution Quadrature Method (CQM) で提案された式を擬似インパルスの式として用いる。本報告では、-3dB までフラットとみなせると仮定すると約 3700Hz 付近までフラットとなる擬似インパルスを用いた (図-1)。詳細は参考文献^{3) 4)}を参照されたい。

3. 多孔質型吸音材

防音対策のための設計・計画では、吸音機構の材料特性を考慮することが重要である。本研究では多孔質タイプの吸音材に注目し、その中でも最も簡便で広く用いられている Rayleigh モデルを適用する。このモデルは吸音機構として空気の粘性による粘性減衰を利用した解析モデルであり、例えばグラスウールやロックウールなどの繊維材料に対して内部伝播を考慮して解析を行うことが可能である。詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。

4. 時変畳み込み演算による移動音源

騒音問題は、工事騒音などの静止音源問題と交通騒音などの移動音源問題に大別される。本報告では、移動音

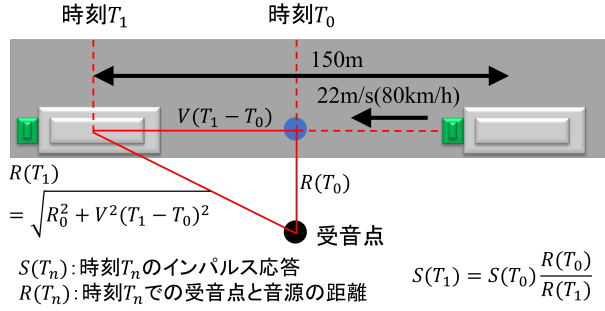


図-2 時変量み込みの補正方法

源問題の再現方法として、時変量み込み演算を適用する。

4.1 時変量み込み行列の作成

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 (5) で表せることが示されている⁵⁾。

$$p(k) = \sum_{k_s=0}^{\infty} s(k_s) h(k - k_s, x(k_s)) \quad (5)$$

また、式 (5) は行列の演算の形で次式で表せる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{s} \quad (6)$$

$$\mathbf{s} = [s(1) \quad s(2) \quad \cdots \quad s(L_s)]^T$$

$$\mathbf{p} = [p(1) \quad p(2) \quad \cdots \quad p(L_s + L_h - 1)]^T$$

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

ここで、 \mathbf{s} が音源信号ベクトル、 \mathbf{p} が受音信号ベクトル、 \mathbf{H} が時変量み込み行列、 L_s は音源信号長、 L_h はインパルス応答長である。音源が移動するすべての点からのインパルス応答を数値解析で求めることは困難であるため、図-2 のように基準点からのインパルス応答を用いてその他の点のインパルス応答を距離減衰による補正で求めている。

5. 数値解析例

本手法の妥当性の検証のため、工事騒音を対象とした固定音源問題と交通騒音問題を対象とした移動音源問題に適用した。

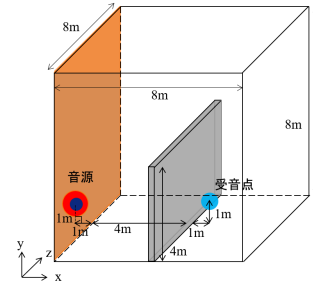


図-3 解析領域

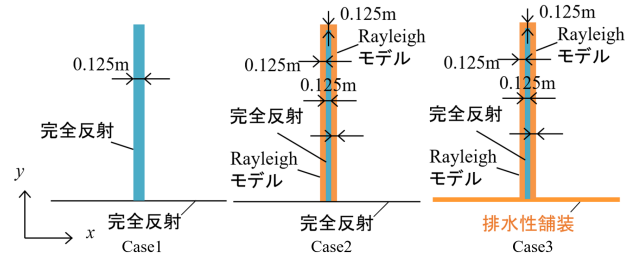


図-4 遮音壁と地表面の詳細図

5.1 解析条件

解析領域は図-3 に示すとおりであり、入射境界から 1m の位置に仮想音源を設定し、遮音壁を領域の中央に設置し、受音点を遮音壁の裏に配置する。媒質を空気とし、媒質密度は 1.205kg/m^3 、時間離散化幅は $\text{CFL}=0.45$ に基づいて求められる。最小空間離散化幅 1.5625cm 、時間離散化幅 0.020525ms の条件において計算を行った。それぞれの Case における遮音壁と地表面の詳細図は図-4 に示す。遮音壁の多孔質吸音材の流動抵抗は $\sigma=15000\text{kg/m}^3\text{s}$ とした。排水性舗装の詳細な構造は上部から順に、排水性舗装面 (流動抵抗 $\sigma=15000\text{kg/m}^3\text{s}$)、不透水面である粗粒度アスファルトコンクリート ($\sigma=2000\text{kg/m}^3\text{s}$)、完全反射面の考慮を行った。

5.2 解析結果

図-5 に受音点における音圧値の時刻歴を、図-6 に遮音壁と直交する断面上の音圧分布を示す。Case2 は Case1 と比べ、遮音壁に吸音材を適用したことによる音圧値の低減、Case3 は Case1、Case2 と比べ、地表面に排水性舗装を考慮したことによって反射波の音圧値の低減が確認できる。図-6 より、遮音壁における球面波の回折、反射及び、地表面における排水性舗装による吸音の様子が確認できる。

6. 実音源との畳み込み及び可聴化

6.1 工事騒音との畳み込み

求めたインパルス応答を用いて、工事騒音との畳み込みを行った。畳み込みに用いた音源を図-7 に示す。受音点における結果の時刻歴を図-8 に示す。図-8 より、

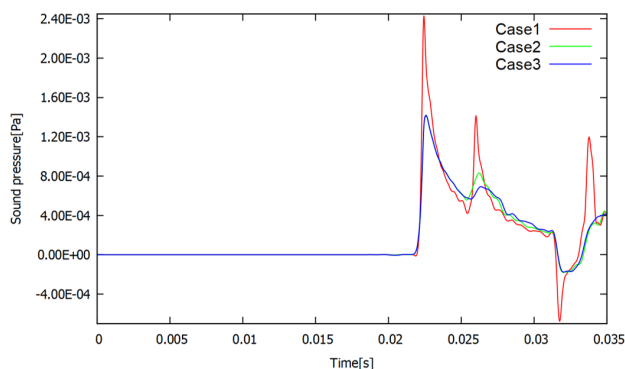


図-5 受音点での時刻歴

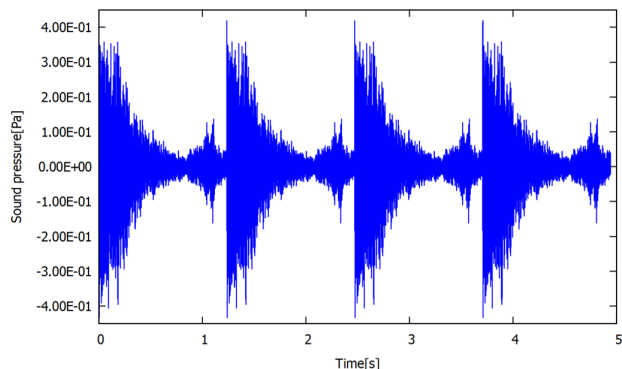


図-7 畳み込みに用いた杭打機の音源

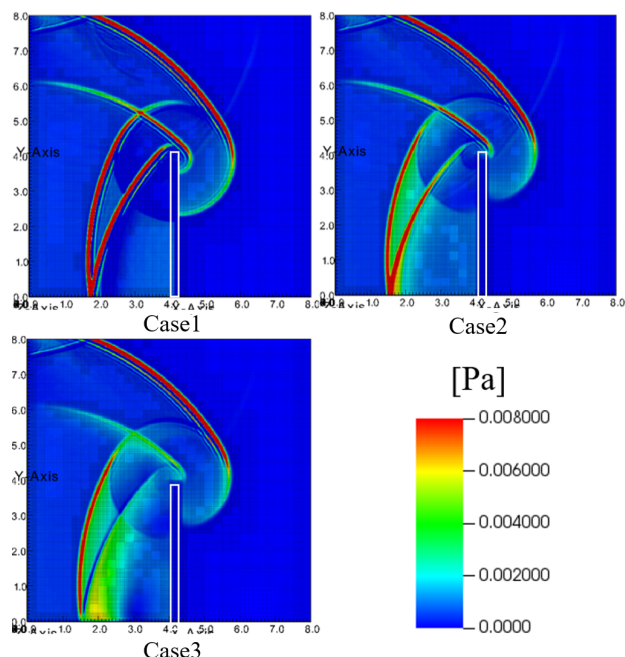


図-6 可視化結果

遮音壁がない状態から完全反射の遮音壁を考慮することで約 15dB の低減，吸音材の考慮を行うことで約 4.5dB の低減が行われていることが確認できる．完全反射の遮音壁の考慮に加え，遮音壁，地表面への吸音効果の考慮によって音響パワーレベルの効果的な低減が行われていることが確認できる．

6.2 移動音源問題 (遮音壁なし)

妥当性の検証のため，時変畳み込み演算による結果と幾何音響による計算結果の比較を行った．求めたインパルス応答とトラックの走行音源を用いて時変畳み込みを行った結果と，幾何音響による計算を行った結果の比較を行った．用いたトラックの走行音源図-9 に，結果を図-10 に示す．遮音壁がない場合には両者は良い一致が見られることが確認できる．

6.3 移動音源問題 (遮音壁あり)

遮音壁が音源と受音点との間にある時は，各点でのインパルス応答の推定の際に距離減衰の影響のみならず，

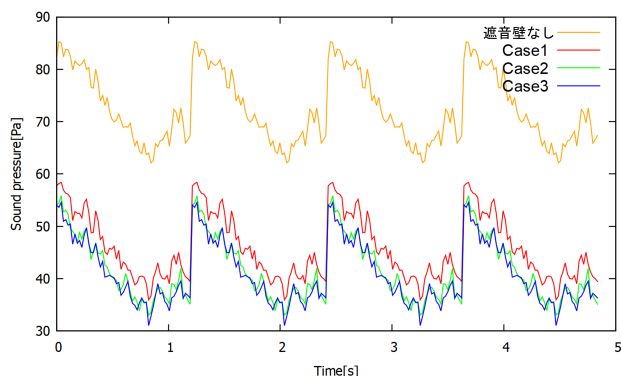


図-8 畳み込んだ結果の時刻歴

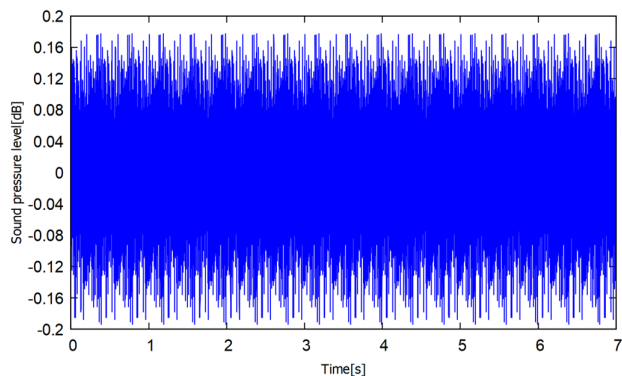


図-9 時変畳み込みに用いたトラックの走行音

回折の影響も考慮する必要がある．

6.3.1 最大値の推定手法

音源からもっとも近い点からのインパルス応答を用いて，他の点でのインパルス応答を求めた際の値と実際の数値解析の結果との比較を行った．解析領域を図-11 に，各受音点でのインパルス応答を図-12 に，受音点1でのインパルス応答を用いて他の点でのインパルス応答を求めた結果と解析結果との比較図-13 に示す．既往の手法 (距離減衰のみ考慮) と比較すると，回折の影響を考慮することによって解析結果に近づくことが確認できる．

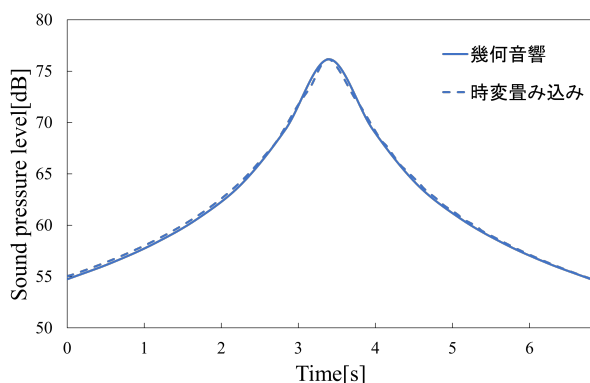


図-10 時変量み込み結果と幾何音響による計算結果の比較

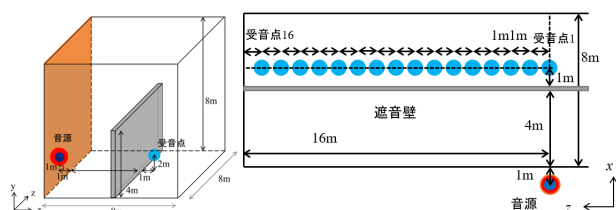


図-11 解析領域

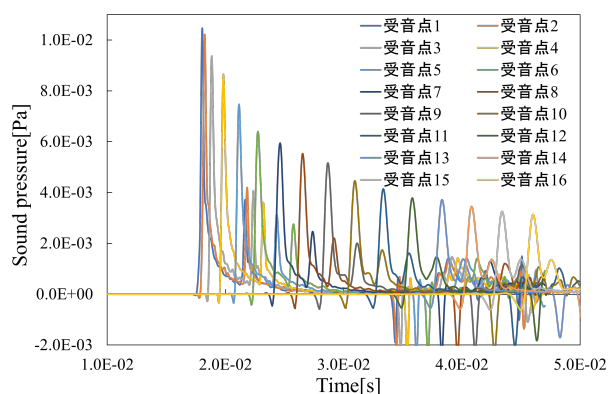


図-12 各受信点でのインパルス応答

6.3.2 時変量み込み

図-14 にトラックの走行音源との時変量み込みを行った結果を示す。遮音壁の考慮を行うことによって、音圧レベルの最大値が約 15dB 低減していることが確認できる。

7. おわりに

本報告では排水性舗装の吸音効果を考慮するために Rayleigh モデルを適用するとともに、道路交通騒音を対象とした移動音源問題に対して時変量み込み手法を導入して、それらの妥当性の検証を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 遮音壁がない状態から完全反射の遮音壁を考慮することで約 15dB の低減、遮音壁及び地表面に対して吸音材の考慮を行うことで約 4.5dB の低減が行われることを確認した

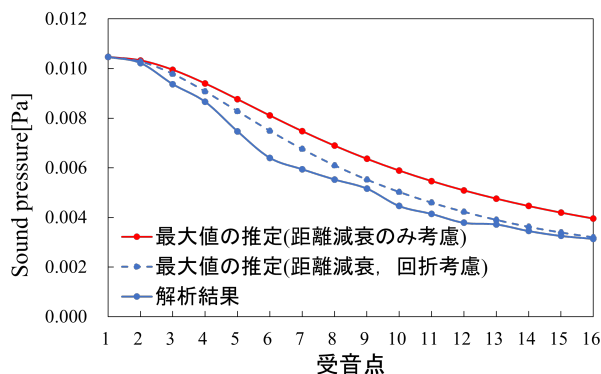


図-13 最大値の推定手法と解析結果の比較

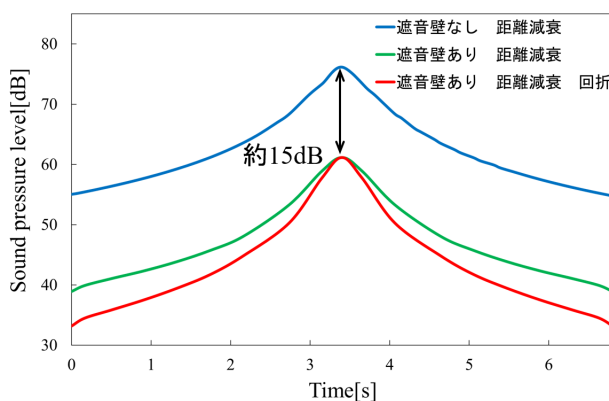


図-14 時変量み込み結果

- 時変量み込みを用いることで、遮音壁がない場合には移動音源問題の定性的な評価が可能であることを示した。
 - 時変量み込み行列作成の際に、回折の影響の考慮を適用し、従来の手法との比較を行った。その結果、解析結果に近いより良い結果が得られた
- 今後は、実測値との定量的な比較に基づく妥当性の検証や没入型 VR 装置への導入を行う予定である。

参考文献

- 1) 今井啓太, 吉町徹, 樫山和男: 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, 応用力学論文集, vol.75, No.2, pp.259-267, 2019.
- 2) H.Takewaki, A.Nishiguchi and T.Yabe: Cubic interpolated pseudo-particle method (CIP) for solving hyperbolic-type equations, J. Comput.Phys., vol.61, pp. 261-268, 1985.
- 3) C. Lubich: Convolution Quadrature and Discretized Operational Calculus.I., Numer.Math.52, pp.129-145, 1988.
- 4) 鹿野洋, 横山栄, 坂本慎一, 笹岡岳陽, 波頭伸哉: 3次元 FDTD 法による車内音場解析一拡張作用境界モデルの適用, 生産研究, vol.63, No.2, pp. 235-240, 2011.
- 5) 斎藤隆泰, 福井卓雄, 石田貴之: 三次元スカラー波動および弾性波動問題における演算子積分時間領域境界要素法, 応用力学論文集, vol.10, pp.217-224, 2007.

地震による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システムの構築

Development of Tsunami evacuation simulation system considering building collapse and fire spread due to earthquake

都市人間環境学専攻 博士前期課程2年 中村 麻菜美
Manami NAKAMURA

1. はじめに

我が国は世界でも有数の災害大国である。特に地震の発生率が高く、大規模地震における犠牲者の死因は、内陸部では建物損壊やそれに伴う火災が、沿岸部では津波による溺死が9割近くを占めており、津波や建物損壊、地震火災が避難者の避難行動や生存率に大きく影響すると考えられる。また、東北地方太平洋沖地震の発生を機に大規模地震に対する防災・減災対策が見直され、ハード面だけでなくソフト面における対策も充実し、その評価及び検討を行う手法の一つとして避難シミュレーションの必要性が高まった。以上により、著者らの既往の研究¹⁾ではマルチエージェントモデルを用いて様々な要素を考慮した避難シミュレーションが行われた。

本研究では、既往のシミュレーション手法に対し、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システムの構築を行った。

2. シミュレーション手法

地理情報に関する必要なデータを ArcGIS を用いて、国土地理院が提供しているデータを基に作成した。対象領域である高知県中土佐町久礼地区での作成例の一部を図-1に示す。シミュレーションにはマルチエージェントモデルを扱うことが可能な NetLogo を用いた。

避難者は初期位置から最短距離にあるノードに移動後、隣接している各ノードに対し次式で表される重力モデルを用いて効用 S を算出し、 S が最大となるノードを選択して移動する。

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

ここで、 s は避難所までの距離、 z は標高、 w は水際線からの距離、 f は出火地点までの距離である。 a, b, c, d 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。 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 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影響度が大きい。

3. 建物倒壊による道路閉塞

地震に伴い建物の損壊が生じることで、避難経路への影響が懸念される。2015年に東京消防庁が提示した手法²⁾を参考に、建物倒壊による道路閉塞確率を算出し、避難者の歩行速度に影響を与える要素として考慮する。道路閉塞確率の算出にあたり、前提条件を図-2を参照して以下に示す。

- 建物は必ず道路を挟んで向かい合っているものとする。

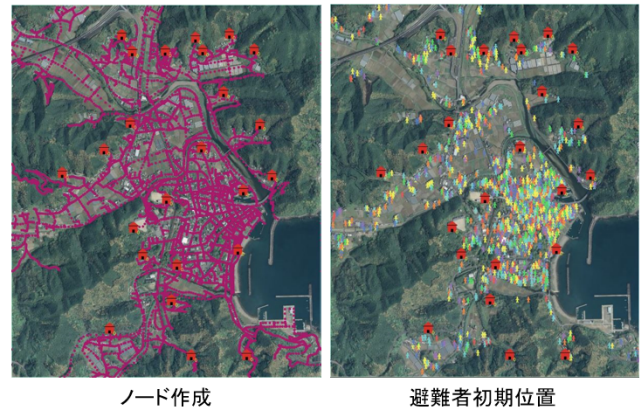


図-1 データ作成の例

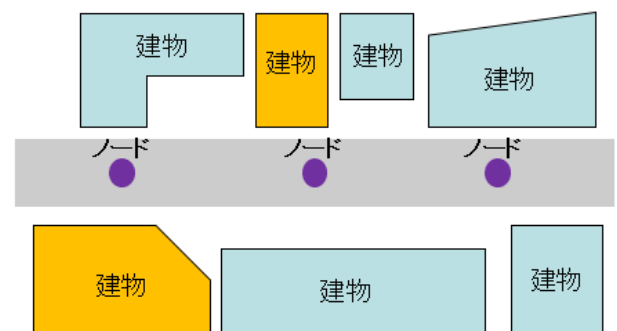


図-2 前提条件

- 建物が層破壊した時の瓦礫幅に関する確率密度関数は正規分布とする。
- 建物の倒壊は互いに影響を及ぼさず独立して発生する。
- 道路閉塞確率は一定区間毎でなく作成したノード毎に算出する。

データの取得には ArcGIS を用いた。また、ここで用いる車両通行幅はポンプ車が通行可能となる幅員である 3 m を用いた。

(1) 道路閉塞確率の算出

2015年に東京消防庁が提示した手法を参考に、建物倒壊による道路閉塞確率を算出する。ノード毎の道路閉塞確率 p は次式で表される。

$$p = 1 - \{ (1 - x_w)^{\alpha_w} \cdot (1 - x_m)^{\alpha_m} \cdot (1 - x_p)^{\alpha_p} \cdot (1 - y_w)^{\beta_w} \cdot (1 - y_m)^{\beta_m} \cdot (1 - y_p)^{\beta_p} \} \quad (2)$$

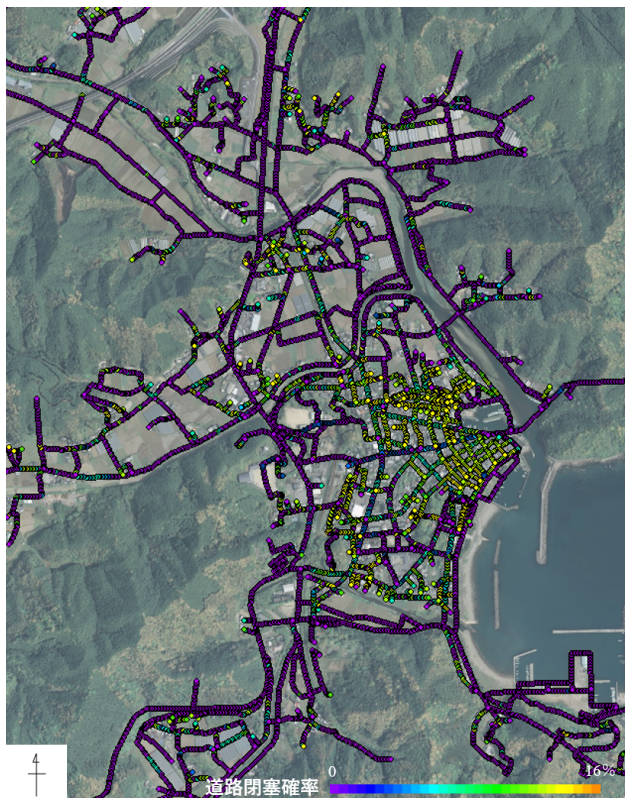


図-3 道路閉塞確率算出結果

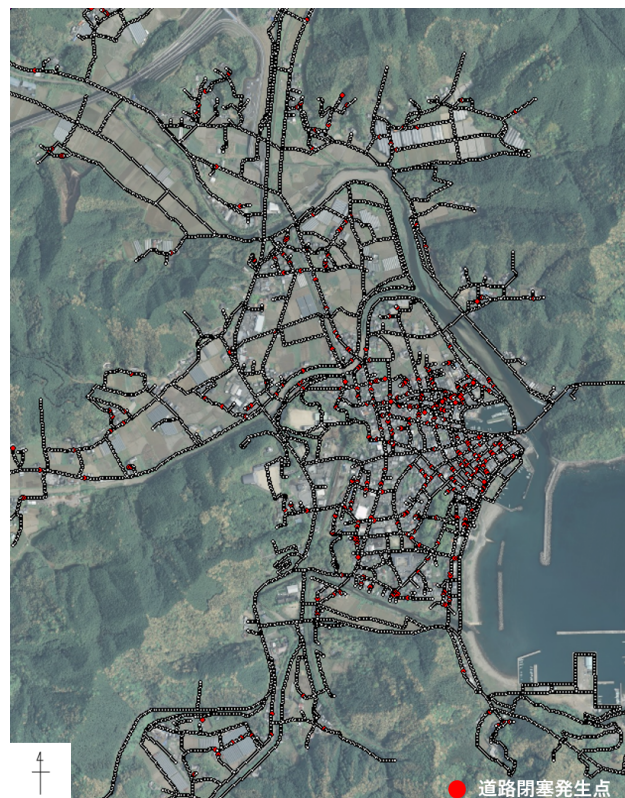


図-4 道路閉塞箇所算出結果

ここで、各変数は以下の通りになる。

- x_w : 一对の正面で向かい合う木造建物間で道路が閉塞する確率
- x_m : 一对の正面で向かい合う木造・非木造建物間で道路が閉塞する確率
- x_p : 一对の正面で向かい合う非木造建物間で道路が閉塞する確率
- y_w : 一对の斜めで向かい合う木造建物間で道路が閉塞する確率
- y_m : 一对の斜めで向かい合う木造・非木造建物間で道路が閉塞する確率
- y_p : 一对の斜めで向かい合う非木造建物間で道路が閉塞する確率
- $\alpha_w, \alpha_m, \alpha_p, \beta_w, \beta_m, \beta_p$: 出現期待値

これら確率の詳細については参考文献^{3) 4) 5)}を参照されたい。対象領域における道路閉塞確率の算出結果を図-3に示す。

(2) 道路閉塞による速度低減

前節の道路閉塞確率算出手法を用いた結果、本研究では避難者が避難経路の目印とするノード全 13672 個の内、閉塞する確率を持つノード数は 4161 個となった。道路閉塞による速度低下を考慮するため、算出結果より得られた 4161 個のノードからランダム値を用いて道路閉塞の有無を判定し、全ノード数の約 2.6% に値する 349 個のノードにおいて建物倒壊による道路閉塞が発生するとした。算出結果を図-4に示す。回避行動を行わず、閉塞した避難路を通過す

る場合、瓦礫を超えることによる速度低下が考えられる⁶⁾。本研究では、高知県中土佐町上ノ加江地区において実施された津波避難訓練の結果⁷⁾から得られた低減率を表-1に示すように、年齢別に付与することで閉塞した道路の通過を可能とする。

4. 火災延焼シミュレーション

(1) 出火点の検討

出火件数は内閣府が提示している手法を参考に、以下に示す算出式を用いて出火率及び総出火件数を算出する。なお、得られた値は対象領域における最大出火件数とする。

- 全出火件数：

$$\sum \text{出火件数} = \text{建物数} \times \text{出火率} \quad (3)$$

- 一般火気器具からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.0022 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (4)$$

- 電熱器具からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.0043 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (5)$$

- 電気機器及び配線からの出火率：

$$\text{出火率} = 0.00036 \times \text{建物全壊率}^{0.73} \quad (6)$$

ここで、建物全壊率は 1981 年以前に建設された木造建物に対し 40%、非木造建物に対し 12% を、1981 年以降に建設された木造建物に対し 10%、非木造建物に対し 4% を用

表－１ 年齢別速度低減率

	歩行速度		速度低減率
	男性	女性	
～14歳	1.33	1.29	0.75
15～34歳	1.47	1.44	0.63
35～54歳	1.39	1.36	0.63
55～64歳	1.41	1.46	0.63
65～74歳	1.32	1.48	0.52
75～84歳	1.04	1.32	0.52
85歳～	0.39	0.62	0.52

表－２ 出火件数算出結果

		1981年以前建設	1981年以降建設	計
木造	棟数	1695	1695	3390
	出火件数	5.9566	2.1652	8.1218
非木造	棟数	0	168	168
	出火件数	0	0.1099	0.1099

いる。また、算出に用いた建物数及び総出火件数の算出結果を表-2 に示す。本研究では延焼の対象となる建物総数を3558 棟（木造建物 3390 棟、非木造建物 168 棟）とした。出火点は算出した総出火件数を参考にランダムに設定し、本研究では木造建物 5 棟とした。

(2) 火災延焼シミュレーション

延焼速度式を基とした既存の火災延焼シミュレータ⁸⁾⁹⁾を用いて火災延焼シミュレーションを行う。一例として風下方向、風上方向、風横方向における延焼速度式を以下に示す。なおシミュレーションでは、風に対し風上側、風上側 45 度方向、風下側、風下側 45 度方向、風横方向の 5 種 8 方向が考慮される。

- 風下方向：

$$V_1 = N \frac{1 + 0.1W + 0.007W^2}{c_1 + c_2a + c_3d/D_1} (a + d) \quad (7)$$

- 風上方向：

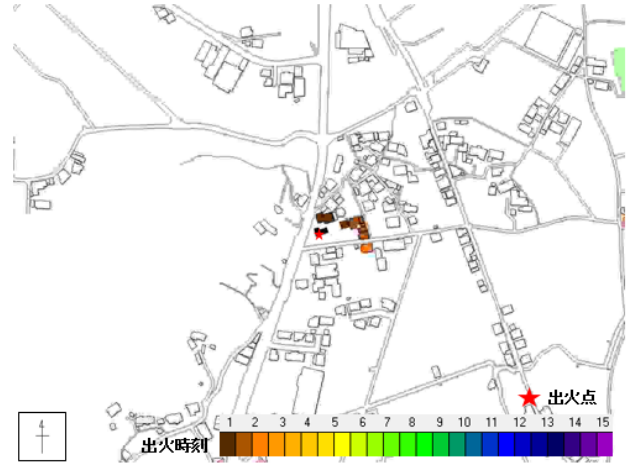
$$V_2 = N \frac{1 + 0.1W + 0.002W^2}{c_1 + c_2a + c_3d/D_2} (a + d) \quad (8)$$

- 風横方向：

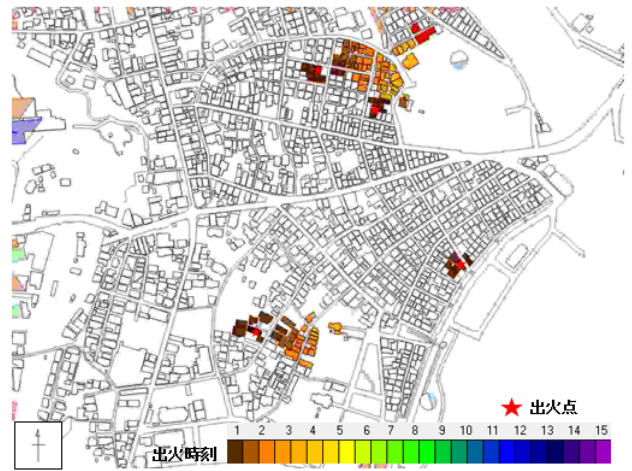
$$V_3 = N \frac{1 + 0.1W + 0.005W^2}{c_1 + c_2a + c_3d/D_3} (a + d) \quad (9)$$

ここで、 V_1 、 V_2 、 V_3 は風向に対する延焼速度、 a は建物長、 d は隣棟間隔、 D_1 、 D_2 、 D_3 は延焼限界距離、 W は風速、 c_1 、 c_2 、 c_3 は係数、 N は延焼速度比である。各値の詳細は参考文献⁸⁾⁹⁾を参照されたい。

出火件数及び出火点は前節において算出した結果を用いて、木造建物 5 棟とする。風向及び風速は、対象領域周辺



図－５ 火災延焼シミュレーション結果 1



図－６ 火災延焼シミュレーション結果 2

における 2020 年の気象データを参考に、風向を西、風速を 2 m/s とした。火災延焼シミュレーションの結果を図-5 及び図-6 に示す。

5. 適用例

想定震災を南海トラフ地震断層モデルケース 4¹⁰⁾，対象地域を高知県中土佐町久礼地区とし、地震による建物倒壊と火災延焼を考慮した津波避難シミュレーションを行う。避難者は歩行避難者 2650 人（年齢及び性別毎の歩行速度、群衆速度、勾配速度、年齢性別毎の体重、避難者の疲労、浸水済み避難経路の回避、避難所の区分け、道路閉塞地点での速度低減を考慮）に限定し、避難開始時刻を地震発生から 0 分、避難所を 25 箇所とした。また、前章より道路閉塞発生件数は 349 件、火災の出火件数及び出火点は木造建物 5 棟、火災の発生時刻は地震発生から 0 分とした。火災延焼の考慮に伴い、避難者は火災が発生した建物の周囲半径 10m 圏内には立ち入らないよう避難するものとする。なお、本研究では火災による被害は考慮しない。既往の研究結果と比較を行うため、シミュレーションは、道路閉塞及び津波の 2 要素を考慮したもの、火災延焼を及び津波の 2 要素を考慮したもの、道路閉塞及び火災延焼、津波の 3 要素を考慮し

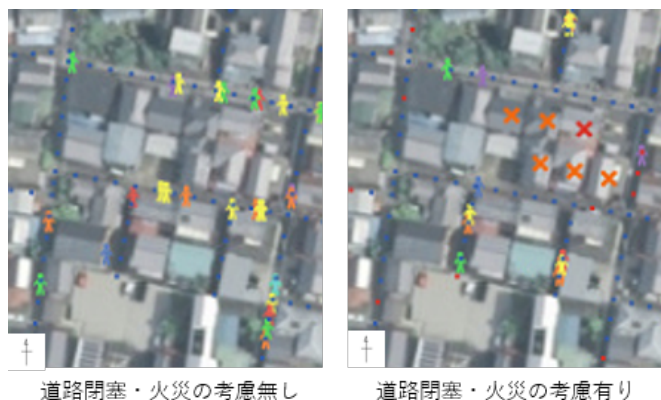


図-7 避難行動の様子

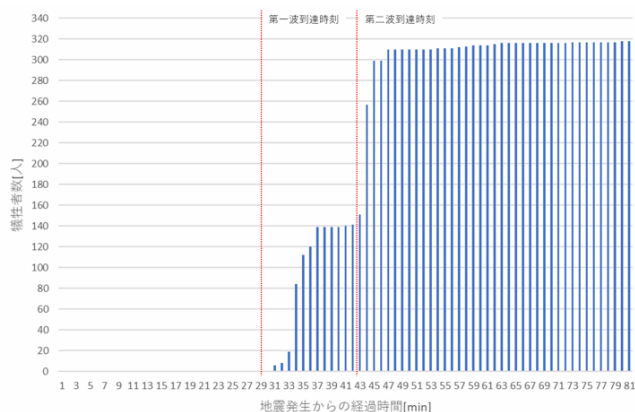


図-8 避難開始からの経過時間による犠牲者数の推移

たものの3種を行う。

(1) シミュレーション結果

避難行動の様子を図-7、津波避難シミュレーションにおける避難開始からの経過時間による犠牲者数の推移を図-8に示す。道路閉塞及び津波の2要素を考慮した場合において、犠牲者数、避難所到達率共に既往の研究結果と差異はなかった。また、避難完了時刻も同様に変化が見られなかった。ここで、前章で示した道路閉塞の条件の他に、道路閉塞確率を持つ全てのノードにおいて道路閉塞が発生すると仮定しシミュレーションを行ったところ、既往の研究結果では避難完了時刻が地震発生から59分であるのに対し、全ての避難者が避難完了する時刻が地震発生から67.2分と、13.8%増加することが確認できた。火災延焼及び津波の2要素を考慮した場合においては、既往の研究結果に対し、地震発生直後からの避難であっても犠牲者数が増加、避難所到達率が低下することが確認できた。これは図-7に示すように、火災延焼を考慮することによって出火点を回避して避難所に向かう避難者や、延焼によって避難路が塞がれ、避難所に到達できない避難者が増加したことが原因として考えられる。道路閉塞及び火災延焼、津波の3要素を考慮した場合においては、図-8に示すように、津波第一波及び第二波到達時刻を境に犠牲者数が急増することが確認できる。これは、前述の火災延焼の考慮による回避行動や避難路を塞がれ避難所に到達できない避難者が津波の影響を受ける

箇所に多く見られたことが原因であると考える。

以上により、道路閉塞及び火災延焼を考慮した津波避難シミュレーションの実施が可能であること、道路閉塞の発生や対象領域における天候状況及びそれに伴う火災の発生により、避難者がより安全に避難することが困難となることが確認できた。また、これらの結果により、対象領域における災害発生時の危険箇所の予測が可能となった。一方で、被害の対象が津波のみであり、建物損壊や火災の発生による直接的な被害を考慮する必要があると考えられる。また、本研究における各シミュレーションの条件がサンプルの一例に過ぎないこと、道路閉塞確率の算出において、考慮していることが建物倒壊のみであり、建物周辺にあるブロック塀等も考慮した道路閉塞確率となっていないことから、シミュレーションの条件を複数個用いて実施することで本システムの有用性を確認する必要があると考えられる。

6. おわりに

本研究では、既往のシミュレーション手法に対し建物倒壊による道路閉塞と火災延焼の考慮を新たに加え、津波避難シミュレーションシステムの機能拡張を図り、以下の結論を得た。

- 建物倒壊による道路閉塞及び火災延焼の考慮が可能となった。
- 本システムにより対象領域における災害時の危険箇所の予測が可能となった。

今後の課題としては、ブロック塀の倒壊を含めた道路閉塞を考慮することによる本システムの拡張、避難者に対する被害判定の検討、様々な条件下におけるシミュレーションの実行による本システムの有用性及び妥当性の確認が挙げられる。

参考文献

- 1) 近真弥：マルチエージェントモデルを用いた津波避難シミュレーションの適応性向上に関する研究，第46回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 I-75，2p.，2018.
- 2) 東京消防庁：地震火災による人的被害の軽減方策火災予防審議会答申，pp74-91，2015.
- 3) 堀江啓等：木造建物を対象とした層破壊被害関数の適用性に関する考察，土木学会地震工学論文集，27巻，1-9項，2003.
- 4) 藤本一雄，翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法，地域安全学会論文集，7巻，pp241-246，2005.
- 5) 土木学会：沿道建物の倒壊を考慮した道路の横断面構成土木学会阪神・淡路大震災調査報告，1998.
- 6) 藤田謙一：津波避難行動でのマクロ的な人的被害評価における道路閉塞条件の考え方，東日本大震災特別論文集 No.7，6p.，2018.
- 7) 高知県海洋局：漁村における津波対策基本方針，2013.
- 8) 二神透他：住民参加のための大震時火災延焼シミュレーション・システム開発，土木情報システム論文集 Vol.17，pp.39-46，2008.
- 9) 木俣昇：大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証，日本オペレーションズ・リサーチ学会 Vol.30 No.1，pp.59-87，1987.
- 10) 内閣府中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会，2012.

MR 技術に基づく可視化システムの構築とその有効性の検討

Development of Visualization system based on MR technology and Investigation of its effectiveness

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 川越 健生
Takeo KAWAGOE

1. はじめに

近年、複合現実 (Mixed Reality, 以後 MR) 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。^{1) 2) 3)} MR による可視化が有効な分野として、地下埋設物などの地下構造物の可視化が挙げられる。その理由として、地下埋設物は地上から見るできないために、その施工や維持管理において、既設埋設物の把握が困難であることが挙げられる。また、現在、土木現場において既設埋設管の確認不足による埋設管破損事故が高い頻度で発生しており、既設埋設管の位置把握が可能なシステムが必要となっている。そこで、本研究では、頭部装着型のホログラフィックコンピュータ (HoloLens) を用いた地下埋設物に対する MR 可視化システムの構築を行った。⁴⁾ これにより、土木現場においてマーカー画像を用いた簡便な地下埋設物モデルの重畳により、既設埋設物の把握を容易に可能にするシステムを構築した。

本報告では、新たな取り組みとして、Hololens 2 を使用することにより、AR 技術と比較しての MR 技術の長所である両手を自由にした状態でシステムを利用することが可能である点に着目し、地下埋設物を対象とした施工、維持管理段階での利用を想定した MR 可視化システムの構築を行った。具体的には、施工管理の支援システムとして、重機による掘削作業のための MR 可視化システムの構築を行い、維持管理の支援システムとして、水道の漏水調査のための MR 可視化システムの構築を行った。

2. 開発環境

本研究では、Mixed Reality Toolkit v.2.5.0 (以後 MRTK) を用いた可視化システムの構築を行った。開発環境は、Unity2019.4.11f1 (64-bit) を使用し、プログラミング言語は、C#を用いた。使用デバイスは、HoloLens2 である。MRTK は、MR アプリケーション向けのオープンソースのクロスプラットフォーム開発キットである。また、重畳の位置合わせには、Vuforia SDK ライブラリ (以後 Vuforia) を用いる。Vuforia とは、スマートフォンやタブレット、ウェアラブルデバイスに対応した AR 開発用ライブラリである。

使用した可視化デバイスの HoloLens2 は、HMD 型の MR デバイスであり、ヘッドトラッキング、深度などのセンサーが備えられており、これらのセンサーで装着者の 5 本の指の動きをすべて検出することが可能である。また、センサーにより対象空間の環境について形状を把

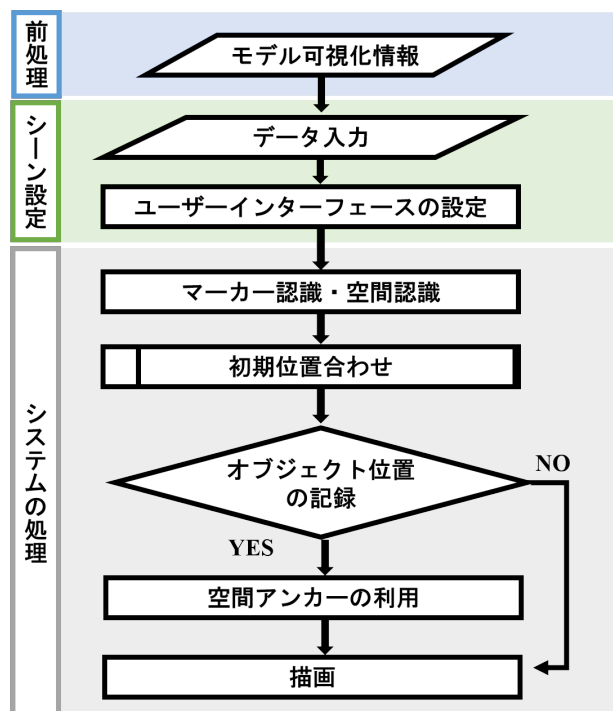


図-1 フローチャート

握することが可能な Spatial Awareness (以降、空間認識) という機能を有している。

3. 本システムの概要

本システムのフローチャートを図-1 に示す。各工程について以下に示す。

3.1 前処理

前処理において、可視化したい 3D モデルと各 3D モデルを重畳し位置合わせをするためのマーカー画像を用意する。

3.2 数値計算

統合開発環境である Unity に全てのモデルとデータを導入し、各モデルとモデル重畳のためのマーカー画像の登録と位置設定や、ハンドトラッキング機能を用いたユーザーインターフェースの作成を行う。

3.3 システムの処理

3.4 空間認識、マーカー認識による位置合わせ

本システムの位置合わせは、登録したマーカー画像を設置し、その後、マーカー画像を MR 装置で読み込み、3D モデルを表示させる。本システムでは、図-2 に示す方法により、初期位置合わせを行っている。具体的に

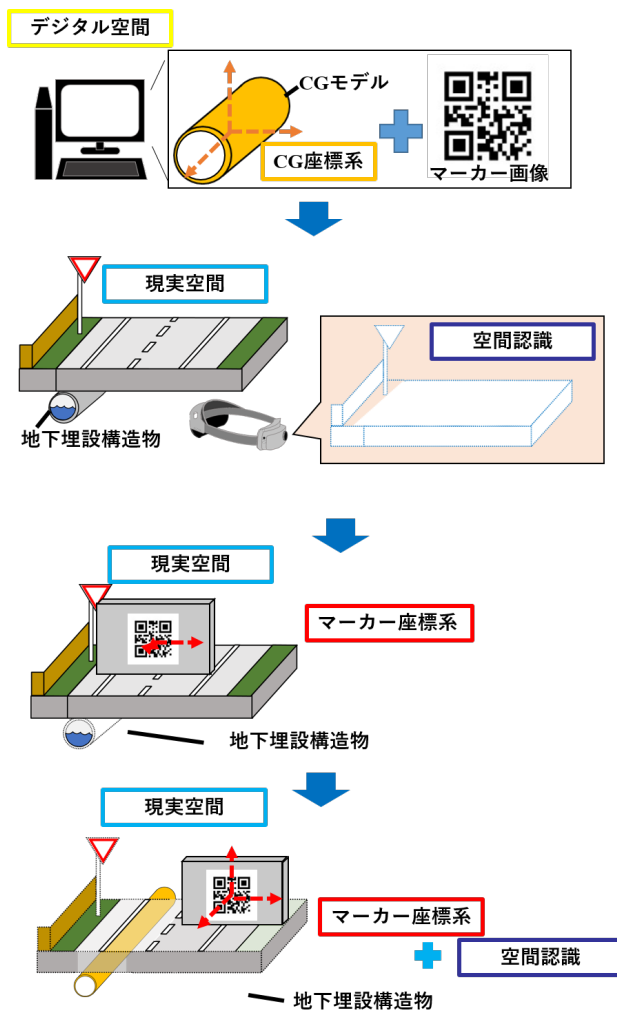


図-2 初期位置合わせ手法

は、デバイスのカメラ映像がマーカーとして設定した任意画像を検出し、マーカーの座標系となるその画像の中心点の座標と角度を取得し、現実空間の座標に置き換える。そして、重畳させたいモデルの位置とマーカー設置地点との距離をあらかじめ設定しておくことで、3Dモデルの座標系をマーカー座標系に合わせ、ワールド座標系における重畳位置を決定する。

また、現実空間に重畳する際には、安定したモデルの重畳のために空間認識の機能を用いている。図-2に示すように空間認識では、周辺空間を歩き、周りの空間について、デバイスに学習させることで、その空間内についてを三角形メッシュで把握し、特定の空間の実際の表面を把握することが可能である。

空間認識を使用するには、周辺環境を把握可能な照度が必要であり、周辺に街灯などの照明が配置されている環境での利用、ない場合には懐中電灯などの使用が推奨される。

3.4.1 オブジェクト位置の記録

本システムは、図-3に示すように、オブジェクトを任意の場所に移動させ設置した位置を記録し、その後、

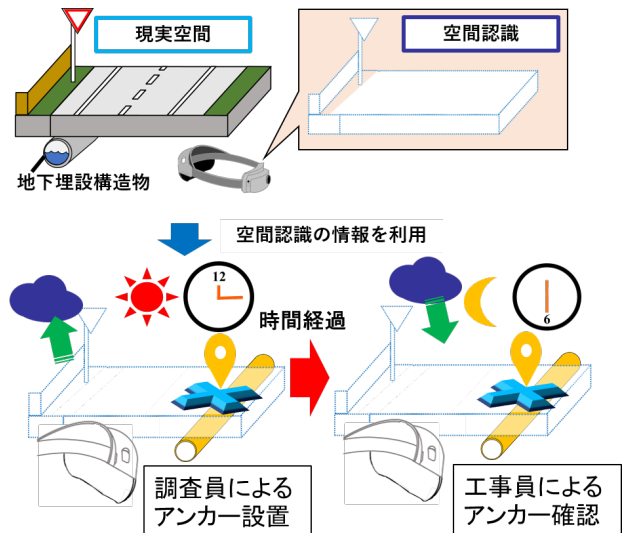


図-3 オブジェクト位置の記録

呼び出しを行うことで再び同位置にオブジェクトを表示することが可能である。具体的には、空間認識を利用して周辺環境の取得を行い、環境内にある特徴点を把握しその後、利用者が配置したチェックオブジェクトに対して同じ場所にオブジェクトを配置可能にするための座標系となる空間アンカーを配置し、それをクラウド上で管理することで、アプリ終了後も、再度周辺環境の空間認識を行い、場所を特定後、空間アンカーを呼び出すことにより、記録した位置にチェックオブジェクトを再配置可能にしている。

4. 重機による掘削作業のためのMR可視化

土木現場の施工・維持管理時において既設埋設管の確認不足による埋設管破損事故が高い頻度で発生している点⁵⁾に鑑み、バックホウによる掘削作業時において、本システムを利用した。本システムの利用により、重機操縦者は地下埋設構造物のCGモデルの位置を確認しながら掘削作業を行うことが可能となることが期待できる。以下に実験の適用例を示す。

4.1 可視化情報

可視化情報として、図-4、図-5に示す埋設管モデルと開口部モデルを入力した。使用した埋設管モデルは、直径毎に色分けがされている。

本システムの実験環境として図-6に示すような検証環境を作成し、掘削作業を行った。また、実験の際のモデルを重畳させるためのマーカー画像の設置方法としてマーカー画像を三脚に設置し、実験を行った。本実験は、3人の重機操縦者で行った。埋設管1本ごとに装着や無装着、開口部モデルの表示方法等の条件を変更し、実験を行った。また、実験終了後に、本システムを利用した場合としなかった場合において、重機操縦者に聞き取り調査を行った。本実験における評価として無装着時



図-4 地下埋設物モデル

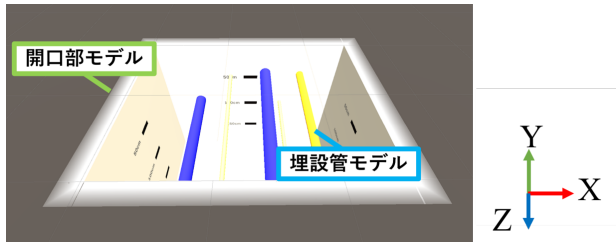


図-5 開口部モデル

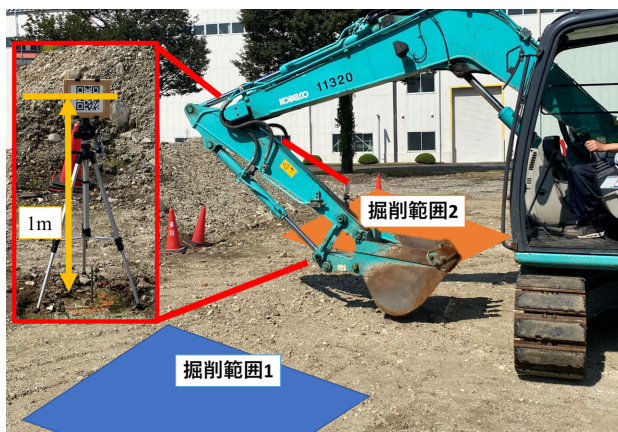


図-6 検証環境

と比較し、掘削が行いやすいかという指標で聞き取り調査を行い、評価をした。なお通常の掘削作業では、ある程度の深さから手掘りを行うが、今回は実験的な取り組みとして最後まで重機で掘削を行っている。

4.2 可視化結果

図-7に重機操縦者目線のMR可視結果を示す。図-7(a), (b)を比較すると掘削作業において、開口部モデルを用いることは深さ方向の位置把握において有効であるといえる。しかし、図-7(b)から分かるように重機操縦者側の埋設管モデルが見切れてしまっており、操縦者目線からでは、埋設管の全体把握をすることが困難であるという課題が挙げられた。そこで、図-7(c)に示すように、開口部モデルの手前の壁を削除し、奥の壁に格子を設けることで埋設管の位置把握の向上を図った。しかし、掘削作業では現実空間の確認が必要であったため、図-7(d), (e)のように奥の壁を削除し、現実空間の確認を確認した状態でシステムを利用した掘削を可能にした。図-7(d)では、50cm毎に赤白で区分けを行っており、図-7(e)では、10cm間隔で格子を設けている。

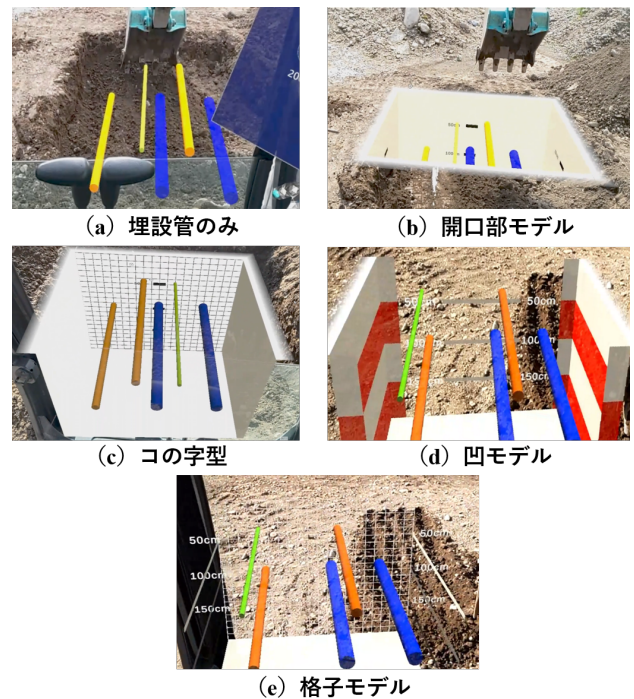


図-7 重機操縦者目線 MR 可視化結果

本実験で行った結果として、図-7(e)が最も評価が高い結果となった。本実験を行った重機操縦者3人の本システムの有効性を示す感想として、重機操縦者3人すべてが

- 埋設管の位置や深さの目盛りを見ながら掘削を行える点は良かった。

という感想を挙げ、重機操縦者2人が

- システムを利用したほうが丁寧に掘削を行えた。

という感想を挙げた。

上記の聞き取り調査より、本システムは、安全でかつ作業時間の短縮の実現が可能となり効率的な施工に寄与する可能性が示された。一方で、課題として、日中における使用の場合、CGモデルが見えづらいや、システム操作時のボタン認識がされづらいといった課題が挙げられた。

5. 水道の漏水調査のためのMR可視化

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。そのため本研究では、漏水調査に対してMR技術の適用を行った。本研究で対象とした漏水調査は、調査員が夜間に水道管が埋設されている真上の道路を歩いて漏水音を捉える音聴法を対象とした、この調査方法に対して本システムを利用することにより、地中の水道管を可視化しながら音調による調査を行い漏水が疑われる場所を記録することを可能にすることにより、漏水調査の効率化が期待できる。以下に適用例を示す。

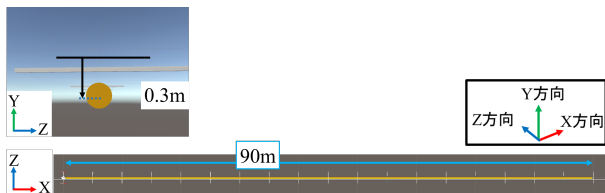


図-8 水道管モデル

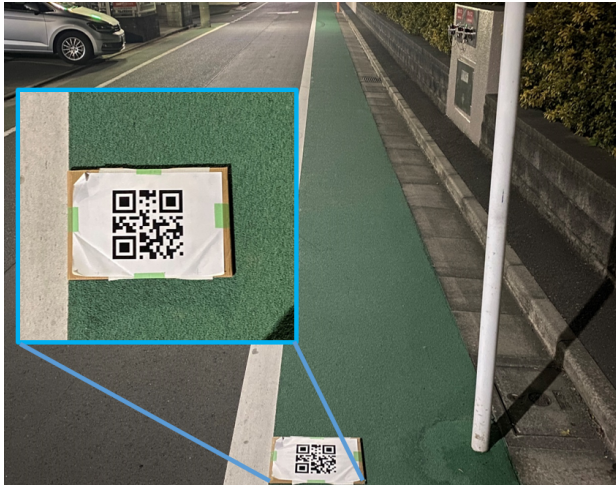


図-9 検証環境

5.1 可視化情報

可視化情報として、図-8に示す3Dモデルとチェックオブジェクトを用いた。本システムの検証環境として図-9に示すような検証環境において、本システムの利用を行った。検証の際のモデルを重畳させるためのマーカー画像は、地面に設置し、検証を行った。

本システムを利用する漏水調査では、夜間に調査を行うため検証時間として22時から深夜2時において本検証を行っており、周辺に街灯が30m間隔で設置されている。

5.2 可視化結果

図-10にMR可視化結果を示す。図-10のように、本システムを利用することにより、水道管を可視化しながら漏水調査を行うことが可能であり、さらに現在の調査手法では、地図を随時確認しながら漏水調査を行っているが本システムでは、方向指示により、進行方向を確認しつつ漏水調査を行うことが可能である。また、漏水調査に関して水道管の可視化により、図面が整備されている現場では、試験掘りを省くことが期待できる。

本システムでは、空間認識を利用した空間アンカーを適用することで、可視化した水道管に対して漏水調査の進捗管理のために、漏水の疑いがある箇所に対して印のオブジェクト（以降、チェックオブジェクト）を配置し、位置を記録した後日、再確認することが可能である。図-10から、チェックオブジェクト設置から1日経過後における検証結果では、設置時と再設置時において概ね同一位置にチェックオブジェクトが設置されることが確認で

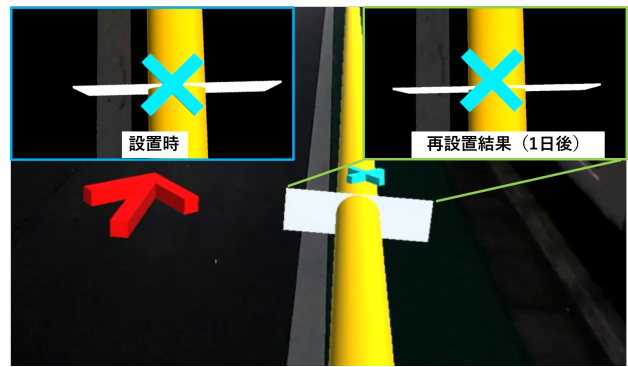


図-10 可視化結果

きた。

この機能により、配置したチェックオブジェクトを調査員、工事員間で共有可能であり、情報共有が容易になることで、効率的な調査、施工が期待できる。

6. おわりに

本研究では、地下埋設物を対象としてMR技術を用いた可視化システムの構築を行った。具体的には、重機による掘削作業と水道の漏水調査に対してそれぞれ適用した。その結果、以下の結論を得た。

- 重機による掘削作業のためのMR可視化システムでは、重機操縦者への聞き取り調査より、本システムを用いることで安全かつ効率的な施工の実現に寄与できる可能性が示された。
- 水道の漏水調査のためのMR可視化では、チェックオブジェクトに対して空間アンカーを適用することにより、漏水疑い位置を記録し、調査員、工事員間での情報共有を可能にしたことにより、効率的な調査、施工が期待できる。

今後の課題として、本システムの実務への応用による使用性の検証が挙げらる。

参考文献

- 1) Paul Milgram, Fumio Kishino: A Taxonomy of Mixed Reality Virtual Displays, IEICE Trans. Information Systems, Vol E 77-D, No.12, pp.I-1321-I-1329, 1994.
- 2) 麻生 隆, 内山 晋二, 山本 裕之: MR技術の実利用化—要素技術と「ものづくり」現場での応用—, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.2, pp.97-101, 2015.
- 3) 千葉慎二: Microsoft HoloLensの技術とその活用, 日本画像学会誌, Vol.58, No.3, pp.I-300-I-305, 2019.
- 4) 膝 飛, 檜山和男, 吉永崇, 琴浦毅, 石田仁: 施工現場における地下埋設物のMR可視化システム, 土木学会土木情報学シンポジウム講演, Vol.45, pp.17-20, 2020.
- 5) 日本建設業連合会: 2020年中における建設工事に伴う地下埋設物・架空線事故の発生状況,
< <https://www.nikkenren.com/anzen/file-chika/R3chika-jiko2.pdf> >, (入手 2022.03.03) .

防災教育のための VR 津波疑似体験システムの構築

Development of tsunami experience system
using VR technology for disaster mitigation education

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 王 博
Bo WANG

1. はじめに

東日本大震災を契機として、各自治体において新たな津波想定のもとに、ハザードマップの再作成・公開が行われている。また、近年では従来の最大浸水深を表示する静的なハザードマップに代わり、津波被害の進展状況が理解できる動的なハザードマップについても作成・公開が行われている。

著者らはこれまで、バーチャルリアリティ (VR) 技術に着目した VR 津波疑似体験システム¹⁾の構築を行い、津波の来襲が想定される地域の中学校などでの防災教育に利用してきた。その結果、防災教育ツールとしての有用性を確認することができたが、一方で CG モデル品質と操作性の向上が防災意識のさらなる向上に寄与する可能性があることも認識した。

本論文は、従来の津波疑似体験システムの臨場感のさらなる向上を目的として、津波モデル及び都市・地域モデルの品質の改善を行うとともに、インタラクション機能を実装し、解析結果に基づいた津波遡上の様子体験可能な VR 津波体験システムの構築を行った。

2. 開発環境

2.1 ハードウェア

本システムでは主に図-1 に示すように、スマートフォン及び各種 HMD (Head Mount Display) を用いて、臨場感の高い立体映像に基づく VR 体験が可能となる。なお、開発に使用したコンピュータ環境における CPU と GPU は、それぞれ Intel Core i7-8700 (3.2GHz) 及び Nvidia GeForce RTX 2070 を用いた。

2.2 ソフトウェア

システムの開発には、統合開発環境内蔵のゲームエンジン Unity (2020.3.1) を用いた。各プログラムは主に C# で記述し、一部は HLSL で記述した。また、解析結果の処理には科学データ可視化ライブラリー VTK を用いて、VR 可視化及びインタラクション機能の実装には MR ライブラリーである MRTK を使用した。

3. 本システムの概要

本システムは、対象地域の住民の防災意識の向上を促進する津波体験システムの構築を行うもので、その概要を図-1 に示す。本システムは、実際の都市・地域環境を GIS, CAD およびドローンによるマッピングデータを用いて忠実に再現した上で、物理モデルに基づく津波シミュレーションを実施し、その結果をマルチエージェ

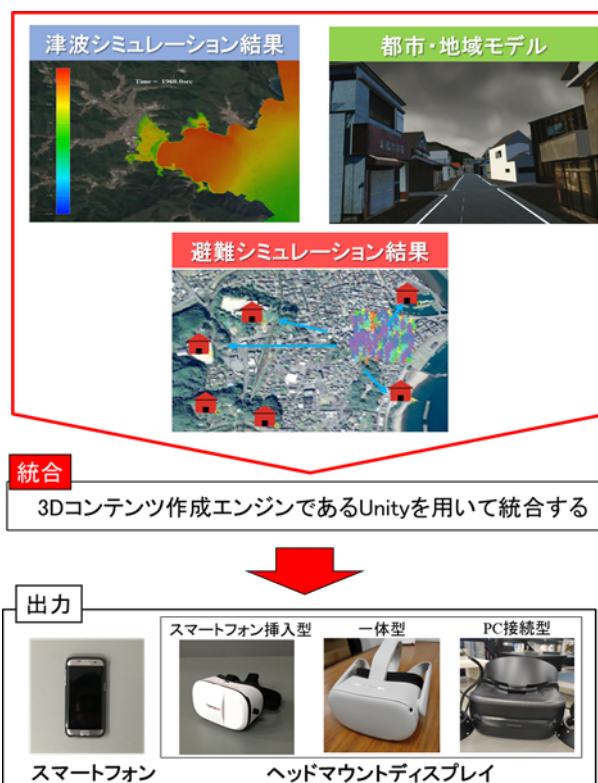


図-1 本システムの概要

ントを用いた避難行動シミュレーションに用いた。そして、それらを統合開発環境内蔵のゲームエンジンである Unity を用いて統合し、VR 技術を用いて 3 次元 CG を立体表示させることで、災害や避難を疑似体験可能なシステムの構築を行うものである。以下に、各プロセスについてその概要を述べる。なお、適用対象地域として、高知県中土佐町久礼地区を取り上げた。

4. 都市・地域モデルの導入

本研究では、モデリング領域を低解像度の大領域 (地形モデル)、中解像度の中領域 (非構造物モデル)、高解像度の小領域 (構造物モデル) に分け、それぞれに対して適切な手法²⁾を用いた。大領域の地形モデルには津波解析メッシュから抽出した高さ情報を、中領域の非構造物モデルにはドローンによる空撮データ及び GIS データを、小領域の構造物モデルには 3D モデリングソフトを用いてモデル化を行った。そして、作成したモデルを Unity により編集および可視化を行うため、FBX 形式

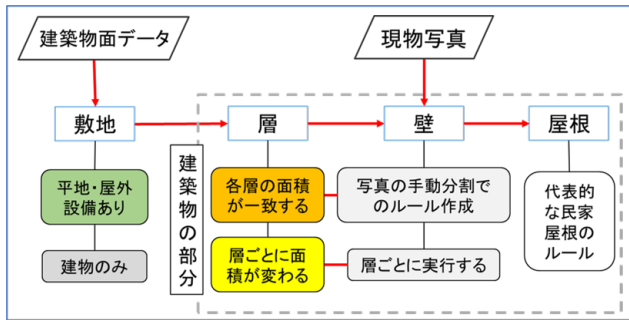


図-2 ルールを用いたモデル作成の流れ

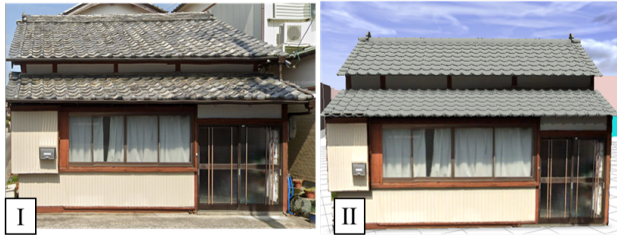


図-3 I：現地写真，II：作成したモデル

に変換して、モデルの統合を行った。以下に、各領域のモデリング方法について示す。

4.1 低解像度領域の作成

津波モデルと重ね合わせる際のずれの発生を避けるために、VTK を用いて津波解析用地形メッシュから抽出した高さ情報を用いて地形モデルを作成した。

4.2 中解像度領域の作成

砂浜や農地等の非構造物及び橋、消波ブロックなどの土木構造物を含めた、可視化において重要でない地域のモデル化を効率的に作成するために、それらの領域においてはドローンを用いて撮影した画像データを SfM (Structure from Motion) /MVS (MultiView Stereo) 技術に基づくソフトウェア (Pix4D) を用いてモデル化を行った。また、ドローン撮影にカバーされていない部分のモデルについては、公開された GIS データよりインフラ設計ソフトウェア (Infravorks) を用いて作成した。

4.3 高解像度領域の作成

避難所、病院、役所、消防署などのランドマーク的な重要構造物及び可視化に重要な民家モデルの作成について各種の 3D モデリングモデル (SketchUp, Blender 等) を用いて作成した。今回はより効率的に作成する手法として、ルールに基づいたモデリング手法図-2 も併用した。図-3-I に示すような民家の正面画像に対し、該当ソフトウェア (ArcGIS cityengine) の機能を用いて、壁面の分割・ルール化を施した後に、あらかじめ作成した屋根を表すルールを適用し、形状や屋根材を再配置することで、僅か数分程度で図-3-II に示すような、再現性の高い民家モデルの作成が可能となる。

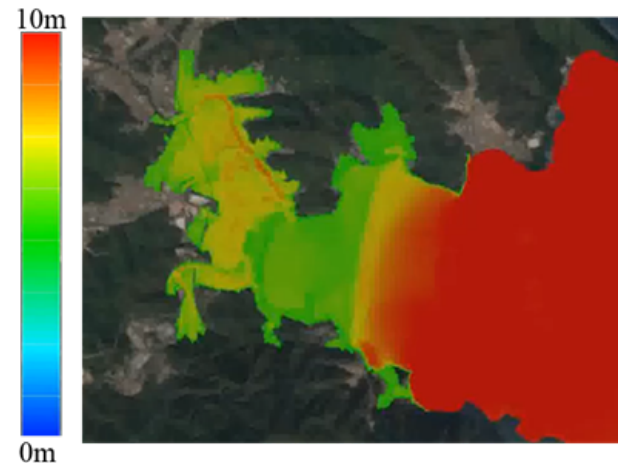


図-4 津波解析結果

5. 津波シミュレーション

5.1 支配方程式と離散化手法

本研究では任意形状への適合性に優れた三角形要素を用いた有限要素法による津波解析手法を用いる。津波解析の支配方程式として、浅水長波理論に基づく浅水長波方程式を用いた。また、支配方程式に対して、SUPG 法に基づく安定化有限要素法を用いて空間方向に離散化、Crank-Nicolson 法を用いて時間方向の離散化を行った。連立一次方程式の解法には Bi-CGSTAB 法を用いた。

津波の初期条件としては、中央防災会議が策定した断層モデル 4 から算出された水位変動量を用いている。図-4 に地震発生後 2400 秒前後の津波が遡上していく様子を示す。このような解析結果を立体感のあるように可視化を行った。

5.2 津波解析結果の可視化

津波の数値解析結果から時系列に変化する CG モデルの作成するために、まず、抽出した波高情報に合わせて、節点を等間隔に配置し、三角形としての結合情報を自動配置するプログラムを用いて等間隔なメッシュの作成を行う。次に、波高情報を入力データとして、高さを置き替えることや白波、水面反射、フレネル反射を表現可能な描画手法 (図-5 参照) を適用することで水の質感を表現可能な津波 CG モデル (図-6 参照) の構築を行った。

6. 避難シミュレーション結果の統合

津波災害に対する早期避難の重要性への理解を促進するために、マルチエージェントを使用した津波避難シミュレーション³⁾の結果を可視化し、避難者視点の映像を提示した VR 体験を実現した。避難シミュレーションでは、避難者エージェントが重力モデル (図-7-I 参照) より計算した効用が最大となる避難路ノードを次第に選択して避難を行う。得られた各性別・年齢層の避難者エージェントの経路情報を用いて、作成した該当する人型モ

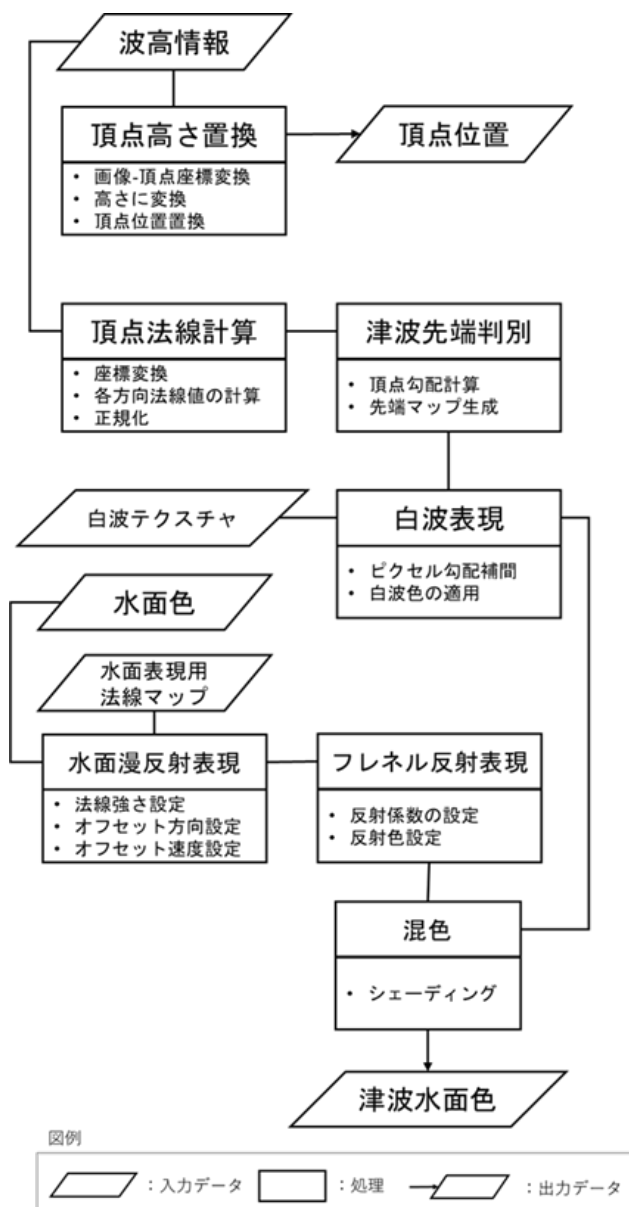


図-5 津波解析結果の可視化

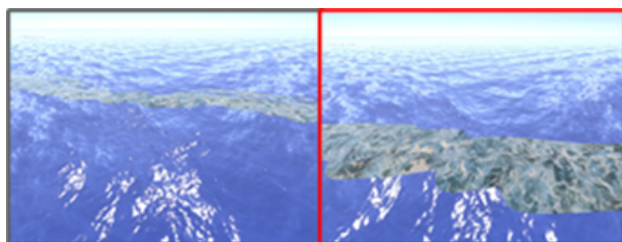


図-6 津波遡上表現

デルを道路モデル上で移動させる機能の実装を行った。人型モデルを作成する際には、人型モデルに特化したモデリングソフトウェア (Daz Studio) を用いた。また、人型モデルにアニメーションを適用するために Adobe 社が提供している Web サービスである mixamo を利用した。アニメーション付きの fbx モデルを Unity 内に導入し、スクリプトで必要なタイミングで歩行等のアニメーションを制御することで、避難している様子を表現できる。

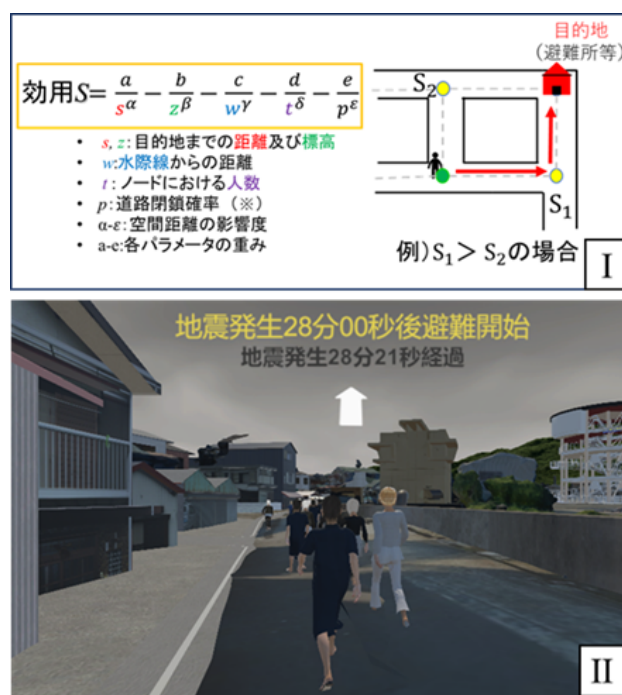


図-7 避難シミュレーション (I: 概要, II: 可視化結果)



図-8 VR 津波避難体験

そして上述機能を利用することで、図-7-II に示すような避難者視点の可視化が可能となる。避難者視点の映像からは、地震発生後何分後に避難路のどこまで到着したかをより直観的に確認することが可能となる。

7. 統合及び VR 可視化

本研究では、Unity で津波モデルと都市モデルを日本の平面直角系座標系で位置合わせした後に、使用性を向上させるため、MRTK を用いて VR レンダリングの実現や、都市・地域モデル内を自由に移動できる機能及び津波モデルの遡上速度を変更するインタラクション機能を実装したことで、任意視点で津波の遡上を確認することを実現した。図-8 にインタラクション機能を利用した津波避難を体験している様子を示す。また、各視点での映像を正距円筒図法で投影した全天球動画を作成した。作成した動画がコンピューター環境に依存せ

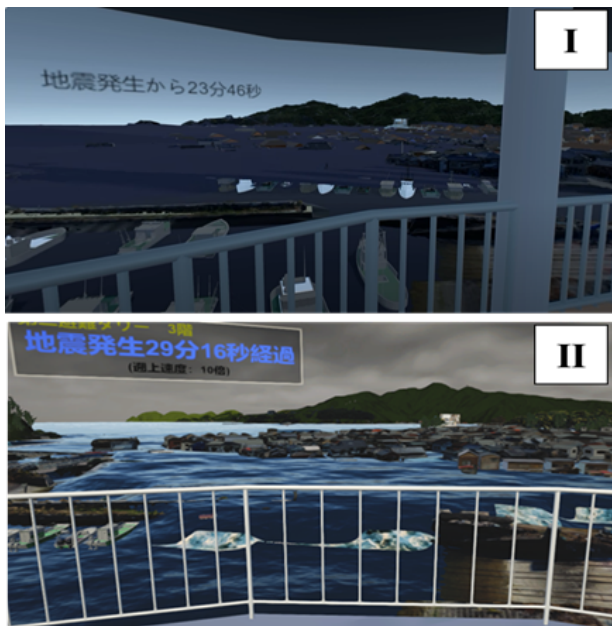


図-9 避難場所視点 (I: 先行研究, II: 本研究)



図-10 避難者視点

ず、VR 用に投影、再生することで手軽にも臨場感のある VR 津波体験が可能となる。

また、各視点での映像を正距円筒図法で投影した全天球動画を作成した。作成した動画がコンピューター環境に依存せず、VR 用に投影、再生することで手軽にも臨場感のある VR 津波体験が可能となる。図-9 に避難場所視点からの映像について、先行研究と本研究の比較を示す。図より、津波モデル及び都市・地域モデルの高品質化が実現できていることが分かる。

8. 統合及び VR 可視化

本研究では、高知県中土佐町の久礼地区を対象として各避難場所からの視点や、避難者視点 (図-9-II, 図-10 参照) の動画コンテンツを作成し、該当地域内にある久礼中学校で行われた防災教育に適用した。

中学 3 年生 35 名を対象してシステムの体験をした後、アンケート調査を行った。避難場所視点動画に関する設問 (Q1: 都市・地域モデルの品質, Q2: 操作性の手軽さ, Q3: 防災意識は向上したか) を設定した。評価は 5 を最高点, 1 を最低点とする 5 段階評価とした。今回のアンケート結果と著者らの先行研究のシステムのアン

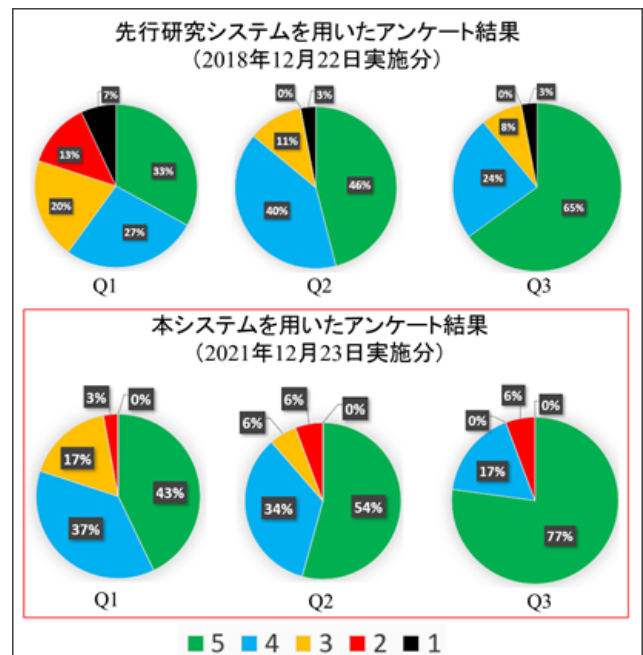


図-11 アンケート結果の比較

ケート結果 (中学 1 年生 37 名を対象) に得点ごとの比率で比較した結果を図-11 に示す。

Q1 において 4 と 5 を選択した人の割合が 20% 増えたことから各モデルの品質向上が確認でき、また、Q3 において 4 と 5 を選択した人の割合が従来の 89% から約 94% と高められる。また、避難者視点の動画に関する設問 (Q4: 避難しているように体験できたか, Q5: 津波体験から早期避難すべきと思ったか) については、4 と 5 を選択した人の割合がそれぞれ約 86% と約 97% であることから、本システムの利用により、早期避難の重要性への理解を深まる効果があると考えられる。

9. おわりに

本研究では、従来の津波疑似体験システムの臨場感のさらなる向上を目的として、津波モデル及び都市・地域モデルの品質の改善を行い、防災教育に適用した。アンケート結果を通じて、提案システムの有効性確認できた。

今後の課題として、インタラクティブなシステムを防災教育に適用することにより、その有効性に対する検証・評価を行うことが挙げられる。

参考文献

- 1) 植野雄貴, 金澤功樹, 陳詩凌, 近真弥, 大川博史, 樫山和男: 防災教育のための VR 技術を用いた津波の疑似体験システムの構築に関する研究, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.44, pp.113-116, 2019.
- 2) 須藤瑞輝, 樫山和男: 高精度かつ簡便な都市モデルの作成手法の構築に関する研究, 第 48 回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集, I-46, 2019.
- 3) 中村麻菜美, 金澤功樹, 大川博史, 樫山和男: 建物倒壊による道路閉塞を考慮した津波避難シミュレーション, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, 2020.

地下埋設物に対する施工・維持管理支援のための AR 可視化システムの構築

Development of AR visualization system for underground structures to support construction and maintenance management

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 洲崎 文哉
Fumiya SUSAKI

1. はじめに

近年，様々な分野において拡張現実感 (Augmented Reality, 以降 AR) 技術¹⁾を用いた可視化の有用性が認識され²⁾，建設分野においても様々な諸活動において活用事例が報告されている^{3) 4)}．AR 可視化が有効な分野の一つに，地上から見るできない地下埋設物などの地下構造物の可視化がある．

著者らはこの点に着目して，タブレット端末を用いて，地下埋設物を対象に施工・維持管理を支援するための AR 可視化システムの構築を行ってきた^{5) 6)}．しかし，3D モデルを AR 可視化した際に，モデルを正しい位置に重畳しても浮いて見えてしまい，現実感を損なってしまうことや従来のマーカーを用いた AR 可視化では，マーカーを底面に設置する場合，マーカーを水平に設置できない場所では，可視化する地下埋設物の CAD モデルも傾いた状態で重畳されてしまうといった問題点が挙げられた．

そこで本研究では，前者の浮いて見える問題に対しては，穴のような描画表現を行う開口部モデルを用いて，違和感ない可視化を行った．後者の傾いて重畳される問題に対しては，デバイスが認識している重力下向きを用いる初期位置合わせ手法を用いて，その問題の解決を行った．また，従来手法との比較によって，本手法の有効性の検証を行い，そして本システムの適用例として，地盤改良の施工に適用し，本システムの施工管理における適用性の検討を行った．

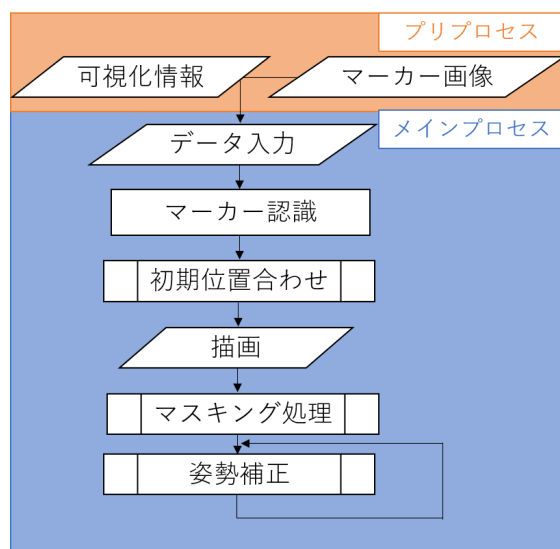


図-1 本システムにおけるフローチャート

2. 本システム概要

本システムのフローチャートを図-1 に示す．

(1) 開発環境

本研究では，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 Unity⁷⁾を用いる．

AR システムの開発キットとして，iOS に対応する ARKit⁸⁾を用いる．ARKit とは，Apple による iPhone と iPad の単眼カメラを使って動作する開発者向けの AR 開発キットである．ARKit の特徴としては，特殊な機器を必要とせず，iPhone や iPad 内の標準搭載のセンサーと画像解析から AR を実現していることが挙げられる．

(2) データ入力

データ入力では，重畳させる可視化情報とマーカー画像を入力する．可視化情報としては，あらかじめ作成した 3D モデルを与える．地下埋設物のモデルについては CAD データから作成を行い，座標と形状情報を持つ地下埋設物の 3D モデルを用いる．

施工日や深さなどの情報は，そのまま 3D モデルへ変換を行うとプロパティ情報は失われる．そこで，その情報ごとで，分けけできるよう工夫し，モデルを Unity に適している FBX 形式へ出力を行い，用いることで，より施工・維持管理支援に有効となることを目指す．

(3) マーカー認識・初期位置合わせ

本システムでは，アプリケーション起動時のデバイスの位置・向きがそのまま原点として設定される．そのため，可視化するモデルの重畳位置を決定する必要がある．

本システムでは，初期位置合わせに ARKit の機能でマーカー画像の特徴点を検出する機能である画像トラッキングを用いる．



(a) 既設構造物への設置

(b) 底面設置

図-2 マーカーの設置方法

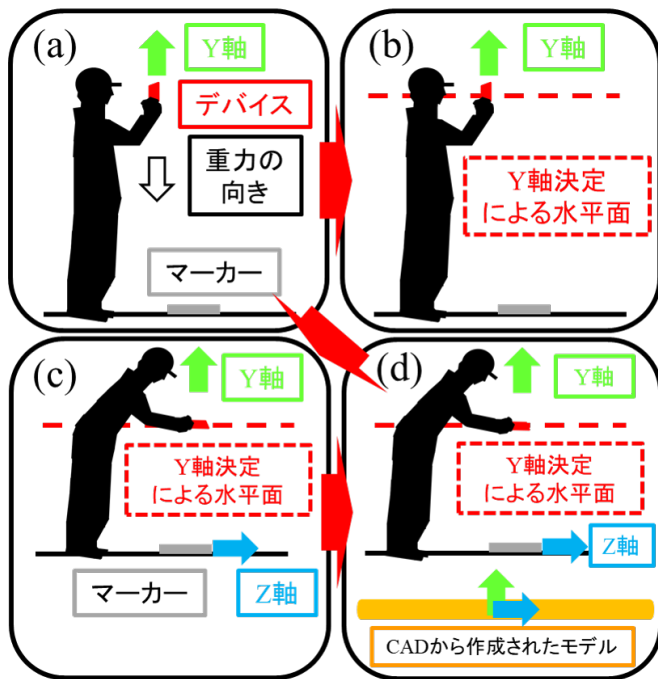


図-3 初期位置合わせ手法

三脚でマーカーを設置する場合、設置個所に制限があり、人の往来があるような場所では利用に難があった。そこで、図-2(a)に示すように、既設構造物の面に対してマーカーを設置することで、マーカー設置の容易化と重畳精度の向上⁵⁾を行ったが、施工場所によっては、座標の変わらない既設構造物がない場合が考えられる。そのため、マーカーを底面に設置する場合があるが、従来のマーカーを用いたAR可視化では、マーカーを水平に設置できない場所では、可視化する地下埋設物のCADモデルも傾いた状態で重畳されてしまう問題点があった。そこで、図-2(b)に示すような底面にマーカーを設置する場合に有効な位置合わせ手法の構築を行った。アプリケーション起動時に取得される重力の下向きを用いて、Y軸を決定することで、水平面を決定する(図-3(a)(b)参照)。そしてマーカーを認識し、その水平面に対し、マーカーが向いている方向を取得することでZ軸が決定し、Y軸とZ軸が決定することで、自動的にX軸も決定する(図-3(c)参照)。マーカー認識時に取得した座標と決定した角度をモデルに与え、重畳位置を決定することで、水平を正しく取得したモデルの重畳が可能になる(図-3(d)参照)。また、三脚などでマーカーを設置する場合、設置できる箇所に制限があったが、平面だけでなくマーカー設置位置が斜面のような場合でも、水平を正しく重畳が可能となり、設置箇所の制限が緩和され、マーカー設置が可能になる。

(4) 描画・マスキング処理

AR可視化する際、可視化するモデルの切り替えや表示非表示の切り替えには、ユーザーインターフェイスとして、ディスプレイ上にボタンを設置し、ディスプレイをタッチすることで、切り替えを行う。

AR可視化においては、重畳されたモデルは現実空間の

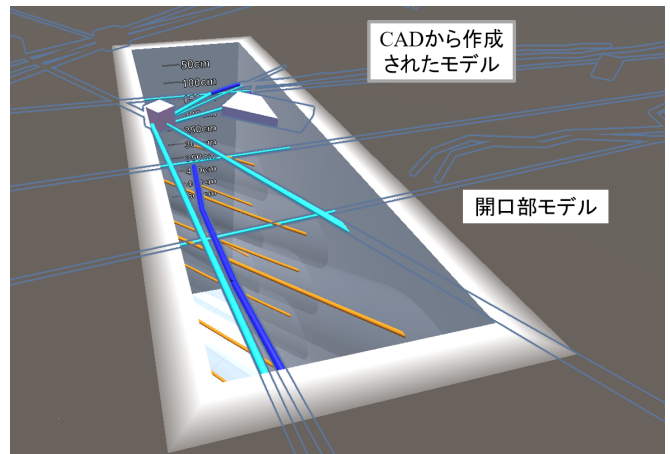


図-4 開口部モデル

物体の前後関係を正しく表現していないため、手前にある(地面に浮いている)ように見える問題が生じる。このため、それを回避するために本研究では、開口部モデルを用いたマスキング処理を施すことで、オクルージョン処理を行う。具体的には、図-4に示す開口部モデルを用いるが、開口部の外側の平面領域においては透明化するマスキング処理を施すことで、開口部モデルの外側の地下埋設物の3Dモデルを非表示にすることができる。また、開口部モデルの縁にグラデーションを入れることにより、現実の映像になじませる工夫を行った。

(5) 姿勢補正

本システムでは、初期位置合わせに画像トラッキングを用いた後、画像トラッキングからARKitのワールドトラッキングへ切り替える。ワールドトラッキングとは、カメラ映像から得られる特徴点の変化とデバイスに搭載されているモーションセンサーによりデバイスの加速度・傾き・方向などの慣性測定から現実空間とバーチャル空間との対応関係を推定する機能である。ワールドトラッキングを用いることで、マーカー画像を認識していない場合でも、可視化したモデルは与えられた座標位置に重畳され続けるため、マーカー画像をカメラ映像内にとらえ続ける必要がなくなり、自由な視点でのAR可視化が可能になる。

AR可視化における課題として、移動によって発生するモデルの重畳誤差や低照度による姿勢補正の不安定性が挙げられる。本システムでは、移動における重畳誤差について移動距離にほぼ比例して増大していく傾向があり、照度について約100ルクス程度あれば正しく動作することが確認されている⁶⁾。

3. 位置合わせ手法の比較検証

AR可視化において、位置合わせ手法は3Dモデルを正しい位置へ重畳させるために重要である。本研究では、重力下向きを用いる初期位置合わせ手法を構築し、モデルが傾いて重畳する問題を解決したが、その手法の有効性の検討が不十分であった。そこで、従来のマーカーから三軸(X,Y,Z)の角度と座標の取得を行う手法と本手法との比較・検証を行った。

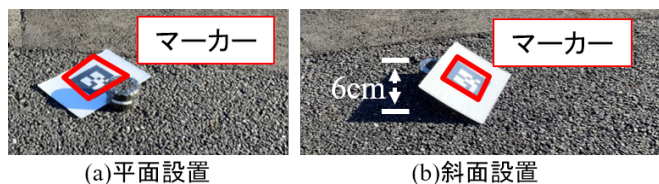


図-5 マーカーの設置方法

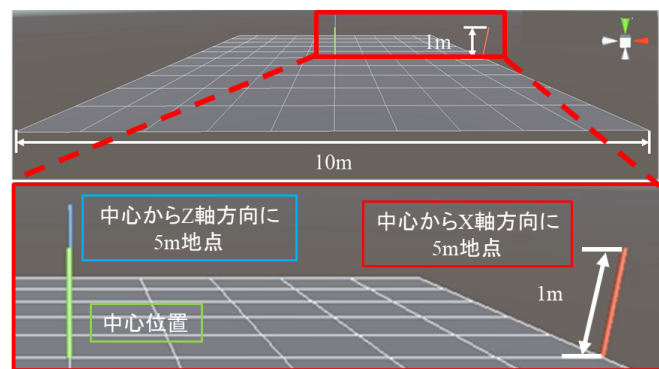


図-6 比較検証用モデル

(1) 検証方法

従来手法と本手法の比較検証を行うために、図-5にマーカーの設置方法を示す。図-5(a)では、平面にそのままマーカーを設置した場合、図-5(b)では、マーカーの片側を6cm高くし、斜面に設置した場合でそれぞれ従来手法と本手法で図-6に示すような10m四方の平面とマーカー中心位置とX軸方向、Z軸方向に中心位置から5m地点にそれぞれ直径5cm・高さ1mの円柱(X軸方向位置：赤色、中心：緑色、Z軸方向位置：青色)を設置したモデルを用いて従来手法と本手法の比較・検証を行う。

(2) 検証結果

検証の結果を図-7に示す。図-7の左側に従来手法、右側に本手法による結果を示している。

図-7(a)に示すように、平面へのマーカー設置の場合、両手法での重畳において差異は見られず、大きな傾きもなく、重畳ができていた。しかし、図-7(b)に示すように、斜面にマーカーを設置した場合、従来手法では、X軸方向を向いた際に、可視化した平面と円柱から大きく傾いて重畳されてしまっていることが分かるが、本手法では大きな傾きもなく、水平に重畳できている。また、図-7(c)に示すように、従来手法では大きく傾いているが、本手法では、図-7(a)の平面に設置した場合と差異が見られなかった。

本手法を用いることで、斜面のような場所でもマーカー設置が可能となり、安定して水平にモデルの重畳が行えるようになることが確認できた。

4. 適用例

適用例として、地中に薬剤を注入することで地盤改良の施工を行う空港でのAR可視化を行った。地盤改良の施工では、薬剤を地中に注入し、浸透させることで、地中内に薬剤によって固められた球体である改良体が生成され、液状化・地震への対策として行われており、こちらの施工の特徴として、構造物・建築物の真下部分へ施工が可能であることが挙げられる。しかし、その際、薬剤注入用の削孔を行う

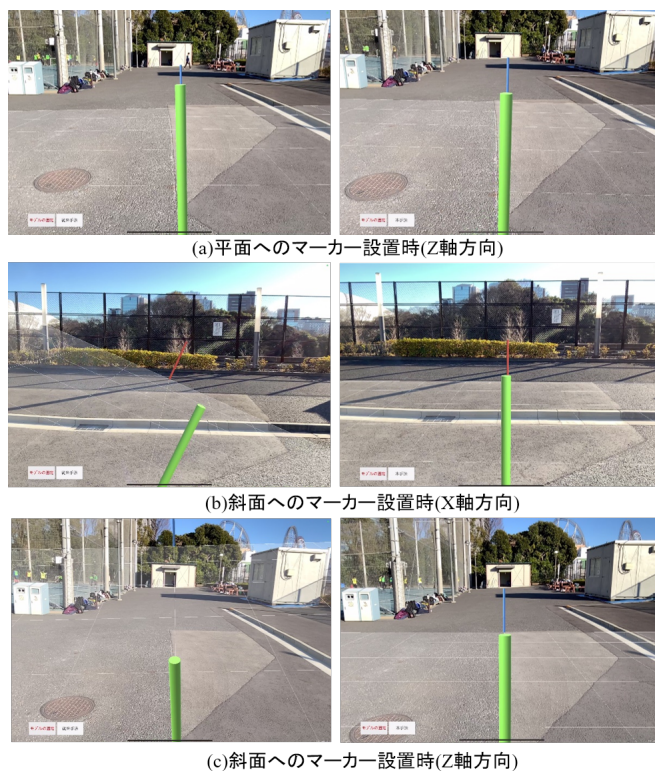


図-7 従来手法(左)と本手法(右)の比較結果

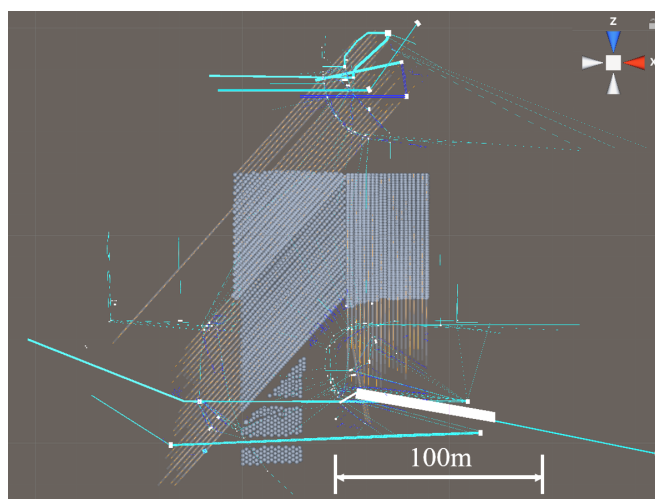
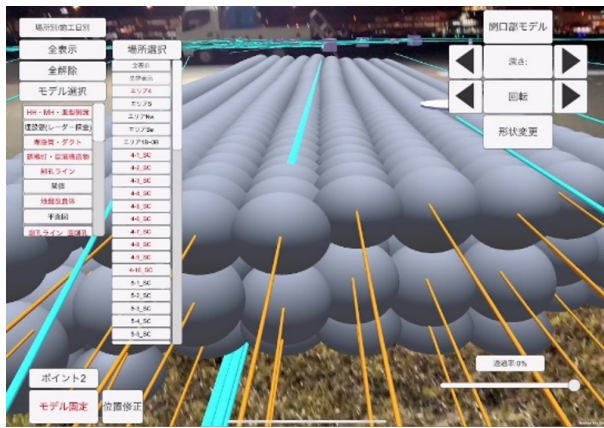


図-8 可視化する3Dモデル

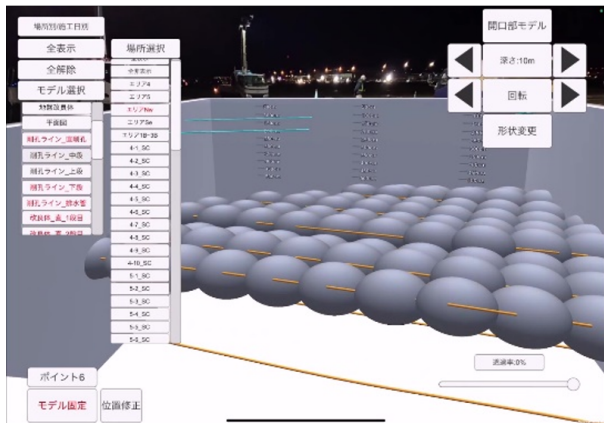
必要があり、埋設物を避け、削孔を行うため、三次元的な理解が求められる。また、薬剤注入時、固まるまでに地表面部分に隆起が生じるため、その隆起量を一定以内に抑える必要があり、改良体の生成場所を施工日別で管理する必要がある。そのため、本適用例では、地下埋設物だけでなく、施工に伴い生じる削孔ラインや改良体といった出来形も合わせて可視化を行い、三次元的な理解・施工日ごとの把握管理を目指す。

(1) 可視化概要

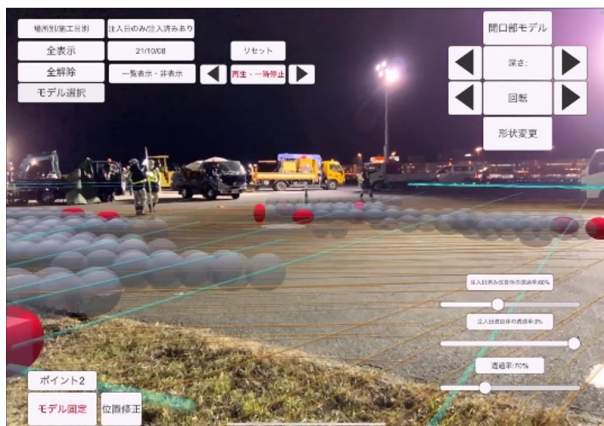
可視化する3Dモデルを図-8に示す。薬剤注入用の削孔を行い、薬剤を注入し、地盤改良体(薬剤によって固められた球体)を生成するため、実際の地下埋設物だけでなく、削孔のラインや地盤改良体のような出来形もモデルとして可視化を行った。



(a)全表示



(b)場所選択と深さ別(下段のみ表示)



(c)施工日別表示

図-9 可視化結果

(2) 可視化結果

実際に現地で可視化を行った結果を図-9に示す。

図-9(a)に示すように、広範囲なモデルを可視化しているが、水平に正しく重畳出来ている様子が分かる。しかし、モデル数が多くあり、情報量が多い。そこで、範囲内のみを可視化できる開口部モデル(横幅20m・奥行30m)と場所選択・深さ層別で表示する機能を用いた様子を図-9(b)に示す。開口部モデルを用いることで、深さ方向に対する違和感の低減が確認でき、目盛りがあることで、より深さ方向への理解が深まることが確認できる。また、開口部モデルの範囲のみ可視化することで、位置の理解が容易になり、場所や深さごとでモデルを確認できることで、見たい情報を抽出して確認でき、より三次元的な理解が深くなることが

確認できる。

施工日別で改良体を確認できる機能を行った結果を図-9(c)に示す。表示している施工日を赤、施工日より前の注入済み透過している。図-9(c)のように、日付と対応した改良体により施工箇所が分かり、注入済みを通り越すことで施工進捗の把握が視覚から可能になる。

一方で、夜間における重畳において、照明が当たらないような暗所では、重畳自体が不安定になり、モデルが動いてしまったり、特徴点の少ない場所では、車などの移動物体の特徴点に反応してしまい、モデルが追従してしまうような問題が挙げられた。

5. おわりに

本研究では、地下埋設物に対する施工・維持管理支援のためのAR可視化システムの構築を行い、以下の結論を得た。

- 本システムの重力下向きを用いる初期位置合わせ手法は、斜面でもマーカー設置でき、モデルを正しく水平に安定して重畳が可能になった。
- 開口部モデルを用いることで、浮いて見える問題を解決し、目盛りによってより深さ方向の理解が深まることが確認できた。
- 可視化するモデルをインタラクティブに操作でき、施工日別で確認できることで、三次元的な理解や施工日ごとでの把握・管理が可能となった。

よって、構築した本システムは、地下埋設物に対する施工・維持管理支援に有効となり得ることが確認できた。

今後は、実務への応用とそのフィードバックによる使用性の向上の検討と時間帯や場所の周辺環境の差異による重畳の安定性と精度に関する検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Sutherland, I. E. :A head-mounted three dimensional display, The AFIPS Fall Joint Computer Conference, pp.757-764, 1968.
- 2) Caudell,T.P.and Mizell,D.W.:Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes,IEEE Hawaii International Conference on System Sciences,pp.659-669,1992.
- 3) 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, Vol. 55, No6, pp. 483-488, 2016.
- 4) 池田 直旺, 花立 麻衣子, 樫山 和男, 車谷 麻緒, 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(土木情報学), Vol. 73, No2, pp. II-48-II-54, 2017.
- 5) 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F3(土木情報学), Vol.77, No.2, pp.I 131-I 139, 2021.
- 6) 洲崎 文哉, 樫山 和男, 琴浦 毅, 石田 仁, 吉永 崇: 地下埋設物に対するAR可視化システムとその重畳の精度と安定性, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.46, pp.209-112, 2021.
- 7) Unity:<https://unity.com/ja>, (入手 2022.2.27).
- 8) AppleDeveloper, <https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/>, (入手 2022.2.27).

点群深層学習を用いた水中構造物の検出と可視化に関する研究

A Study on Detection and Visualization of Underwater Structures Using Point Cloud Deep Learning

都市人間環境学専攻 博士前期課程 2 年 八木 笙太
Shota YAGI

1. はじめに

近年、国土交通省の推進する BIM/CIM, i-Construction といった取り組みにより、漁港・港湾施設における ICT の活用は一層活発化している。また、センシング技術の発展もソフトとハードの両面で著しく、漁港・港湾施設ではセンシング技術を活用した点検技術の検討が数多く行われている¹⁾。例えば、水中マッピングデータの作成においては、音響測深機に加え、ASV(Autonomous Surface Vehicle) といった無人ロボットを用いることで、簡易で安全かつ高精度に行うことが可能となっている²⁾。一方で、水中マッピングデータの問題点として、そのデータ量が膨大となること、色彩情報を持たないといった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の高度な利活用では、計測データの分析において、専門技術員による判読が必要であることや、その過程において発生する人為的ミスが課題とされている。

本研究では、上記の課題に対応するため、水中マッピングデータの中でも位置座標データである点群データに着目し、セマンティックセグメンテーションを用いた点群データのラベリングによる可視化モデルの構築を行った。セマンティックセグメンテーションに基づく可視化モデルの構築にあたり、予め同一の特徴検出機能を有した検出モデルを用いてデータセットの分析と評価を行うことで、計算コストを軽減し、データセットの最適化を行った。

2. 深層学習モデルの設定

本研究における深層学習モデル構築の流れを図-1 に示す。本研究では検証モデルによるデータセットの評価と最適化の後、セマンティックセグメンテーションに基づく可視化モデルを構築する。

(1) 深層学習

深層学習 (Deep Learning) とは、人間の神経細胞の仕組みを模倣したニューラルネットワークを用いて学習する機械学習手法の一つである。本稿では、入力データとして三次元の位置座標情報を持つ点群データを利用するため、三次元データの入力に対応する深層学習モデルである点群深層学習モデルを用いる。

(2) 点群データ

点群 (Point Cloud) とは、レーザースキャナー等で計測可能な点の集合データである。各点は位置情報や、カラー情報、反射強度といった情報を持つことができる。また、点群データの特性には、順序がなく隣接関係が自明でないといった順不変性や、点群で構成される物体は、点群の移動や

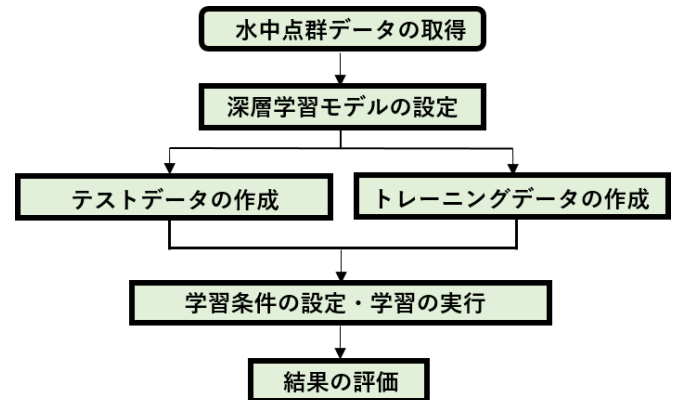


図-1 深層学習モデル構築の流れ

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がある。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。

(3) 点群深層学習モデルの選択

点群データを入力データとして深層学習を行う場合、三次元量込み込みニューラルネットワークやボクセル化といった元の点群データを加工した入力データを用いる手法がある。しかしながら、これらの手法は点群データを入力データとする場合と比較し、情報の欠損があるため精度面で劣る。そのため本研究では、分類精度を重視し、実スケールを扱うことが可能である点群データを直接入力データとする手法を採用する。

(a) PointNet

PointNet³⁾ は、点群データを直接入力データとする点群深層学習手法の一つである。PointNet では、点群の特性を考慮したネットワークを構築するため、二つの特徴を持つ層から構築されている。

一つ目は、ネットワーク全体の構成として、MaxPooling 層や全結合層といった対称関数を用いることである。これらの層は、全ての点群に同一の処理を施すため、点群データ内の順序や隣接関係を考慮する必要がないといった考慮がなされている。二つ目はアフィン変換行列の適用である。これにより点群で構成される物体が移動・回転しても種類が変わらないという移動不変性を獲得している。

しかしながら、ネットワークの構造上、PointNet では入力データの局所構造を把握することが困難であるため、本研究では次項に示す局所構造の情報の獲得に対応した点群深層学習モデルである PointNet++⁴⁾ を用いる。

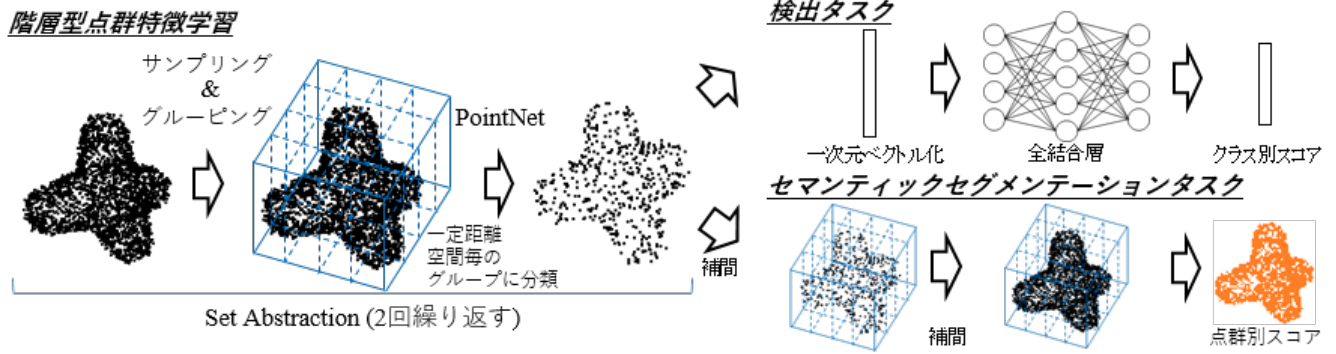


図-2 PointNet++ ネットワーク構成図

(b) PointNet++

図-2 に PointNet++ のネットワーク構成図を示す。

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。

一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、入力点群から均等間隔に代表点となる点を選択する。次に二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 Group-ing) と複数距離を考慮するMSG(Multi Scale Group-ing)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。

また、図-2に示す様に、PointNet++ は入力データの情報の集約を行う特徴抽出箇所は検出タスクとセマンティックセグメンテーションタスクの両方で同一となっている。そのため、本研究では計算コストの低い検出モデルにおいて、データセットの評価を行った後に、セマンティックセグメンテーションによる点群データの可視化モデルの構築を行った。

3. データセットの作成

図-1 中におけるテストデータとトレーニングデータの作成について、以下に述べる。

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。

(1) 水中点群データの取得

本研究では、ASVに搭載したナローマルチビームソナーにより得られる水中マッピングデータから、点群データを使用しデータセットの作成を行う。水中マッピングデータ

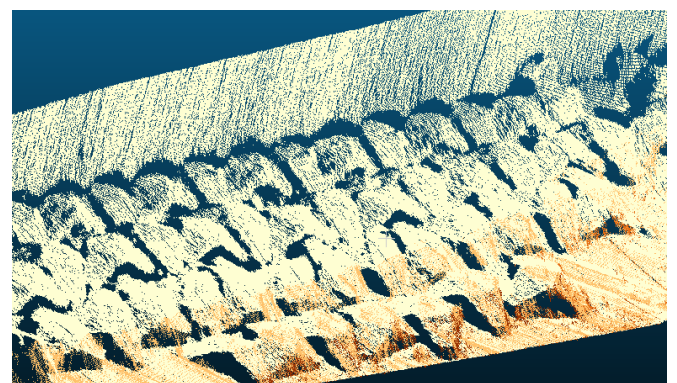


図-3 水中点群データ例 (位置情報 + 反射強度)

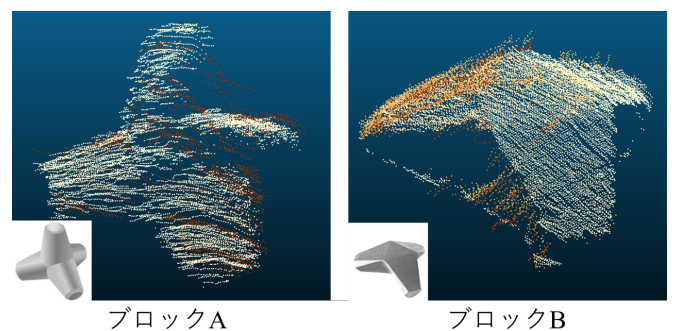


図-4 抽出した検出対象の点群モデル例

の取得対象区域として、鳥取県隠岐島来居港地先および島根県浜田市浜田港地先を取り上げた。取得した水中マッピングデータの位置情報に対し、反射強度パラメータを元に可視化された一部領域を図-3に示す。

ここで、マッピングデータとは、地理的な位置情報に基づき、様々な情報を付与したデータのことを指し、水中マッピングデータとは、水中で取得した位置座標データに加えて反射強度や地形情報、水質や時間などの様々なデータを付与したものである。

本研究では、水中マッピングデータから得られる点群データを使用するが、水中の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用いてデータセットの作成を行う。

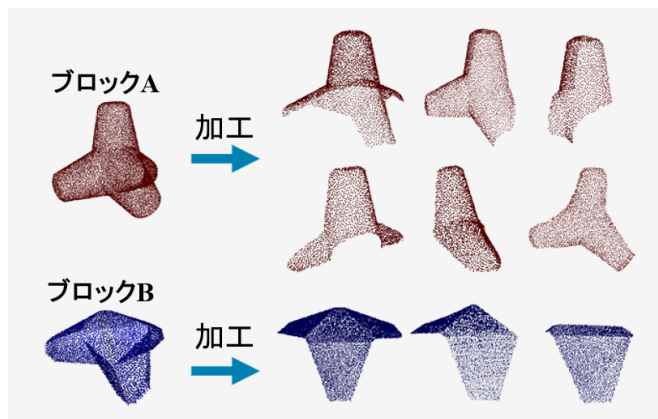


図-5 CAD モデルから作成した点群モデルデータ

(2) 検出対象

検出および色付け対象として二種類の消波ブロックを取り上げる．水中心群データ取得後，点群処理ソフト（CloudCompare⁶⁾）を用いて，一定領域ごとに含まれる各ブロックの点群データ抽出した．抽出したブロックの一例を図-4に示す．分類対象のブロックは図の通り，以後それぞれブロック A，ブロック B とする．

(3) テストデータの作成

検出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個別の点群データを用いる．データ数はそれぞれ，ブロック A が 115 個，ブロック B が 54 個である．

また，可視化モデルにおけるテストデータには取得した領域データの一部を用いる．データ数はそれぞれ，ブロック A が 3 領域，ブロック B が 1 領域である．

(4) トレーニングデータの作成

本研究では，検出対象の消波ブロックが既製品であることから，設計図面にに基づき CAD 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った．作成した各ブロックのトレーニングデータの一例を図-5中の左に示す．各モデルを構成する総点数は約 3,000 点となっている．

(a) 検出モデル

検出モデルにおけるトレーニングデータには，図-5中の左に示す作成した個別の点群モデルを各 50 個用いる．

また，水中心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る，検出精度を高める工夫を施した．元の点群データから一部を切断し，作成した点群モデルデータを図-5中の右に示す．加工した点群モデルデータにおいても各 50 個のデータ数を用いることで，未加工モデルのデータセットとの精度比較を行った．

(b) 可視化モデル

可視化モデルのトレーニングデータとなる領域データは，

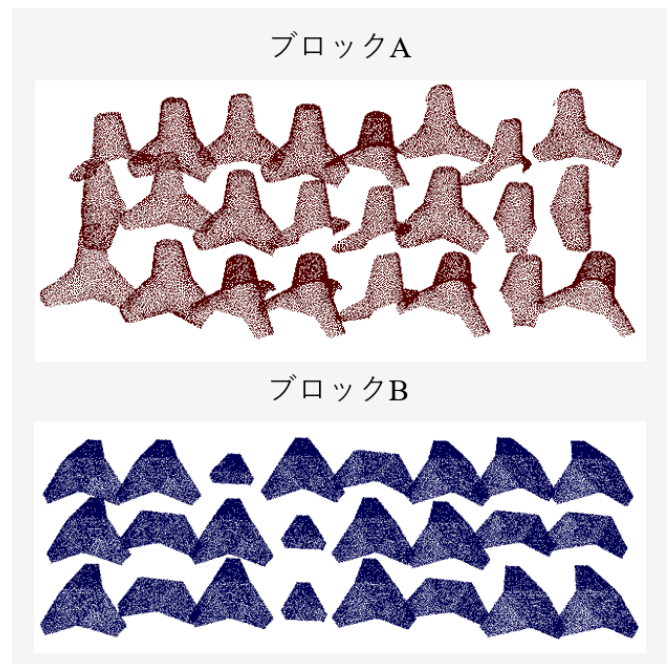


図-6 3DCG ソフトを用いて作成した領域データ例

	トレーニングデータ	テストデータ
検出モデル	① 未加工のデータ(図-5左)を各50個 ② 加工したデータ(図-5右)を各50個	計測領域から抽出した個別データ ブロックA: 115個(図-4左) ブロックB: 54個(図-4右)
可視化モデル	加工したブロックデータ(図-5右)を 同一空間上に24個配置した 領域データ(図-6)を各20個	計測領域から抽出した領域データ ブロックA: 3領域 ブロックB: 1領域(図-3)

図-7 学習条件別のデータセット一覧

検出モデルで用いた加工した個別のブロックデータと 3DCG ソフト (Blender⁷⁾) を用いて作成した．作成した領域データの一例を図-6に示す．24 個のブロックデータが含まれる領域データを，ブロック A，ブロック B において各 20 領域作成した．

4. 適用例

(1) 開発環境

計算開発環境として，OS には Ubuntu20.04 を，計算機となる GPU には GeForce RTX 3090-24G を用いる．

(2) 学習条件の設定

学習に用いるデータセットの一覧を表-7に示す．

検出モデルでは，トレーニングデータとして未加工の点群モデルを用いた場合と加工した点群モデルを用いた場合の学習結果の比較を行う．学習条件として，点群深層学習モデルに PointNet++，入力点数を 1,024 点，バッチサイズを 16，学習回数は 50 回とする．

可視化モデルでは，作成したデータセットに基づく，精度検証を行い，有効性の検討を行う．学習条件として，点群深層学習モデルに PointNet++，入力点数を 2,048 点，バッチサイズを 4，学習回数を 32 回とする．

		正解(教師)		適合率(P) = $\frac{TP}{TP+FP}$ 再現率(R) = $\frac{TP}{TP+FN}$ F値 = $\frac{2PR}{P+R}$ IoU = $\frac{TP}{TP+FP+FN}$
		正解	不正解	
予測	正解	真陽性 True Positive	偽陽性 False Positive	
	不正解	偽陰性 False Negative	真陰性 True Negative	

図-8 混同行列による評価方法

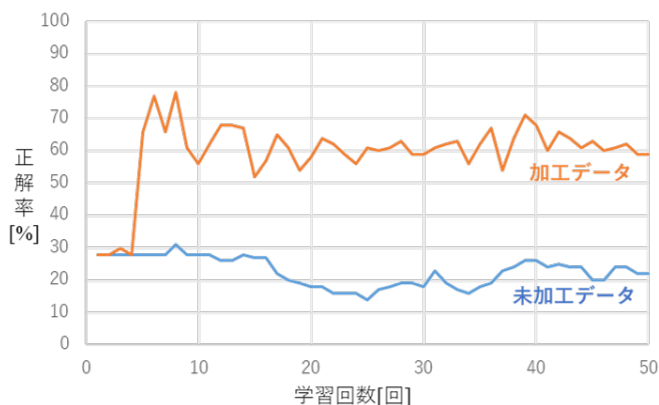


図-9 検出モデルの学習推移

未加工データ		予測[個]		再現率	加工データ		正解[個]		再現率
		ブロックA	ブロックB		ブロックA	ブロックB			
実際[個]	ブロックA	15 /115	100 /115	0.13	予測[個]	ブロックA	93 /115	22 /115	0.81
	ブロックB	10 /54	44 /54	0.81		ブロックB	4 /54	50 /54	0.93
	適合率	0.60	0.31	F値 0.46		適合率	0.96	0.69	F値 0.85

図-10 検出モデルの混同行列による評価

(a) 結果の評価方法

検出モデルの精度評価には、学習の推移状況、および学習終了後に行う図-8に示す混同行列を用いる。混同行列とは、分類問題において用いられる精度評価指標であり、正解率のみならず、過検知を判断する適合率、検出の取りこぼしを判断する再現率、またこれらを均等に判断するF値と呼ばれる指標によって評価を行うことが可能となる。

可視化モデルの精度評価には、ピクセル単位で分類予測の正解率を予測するIoU(Intersection over Union)を全クラスで平均したMean-IoU値を用いる。

(3) 結果

検出モデルの学習結果を図-9および図-10に、各種のブロックに対するセマンティックセグメンテーションモデルの可視化結果を図-11に示す。

検出モデルの結果から、加工データを用いることで、正解率および分類精度が2倍近く向上していることが確認できる。また、セマンティックセグメンテーションによる可視化モデルの結果においても、Mean-IoU値は0.996と高い値を示しており、実用に値することが確認できた。

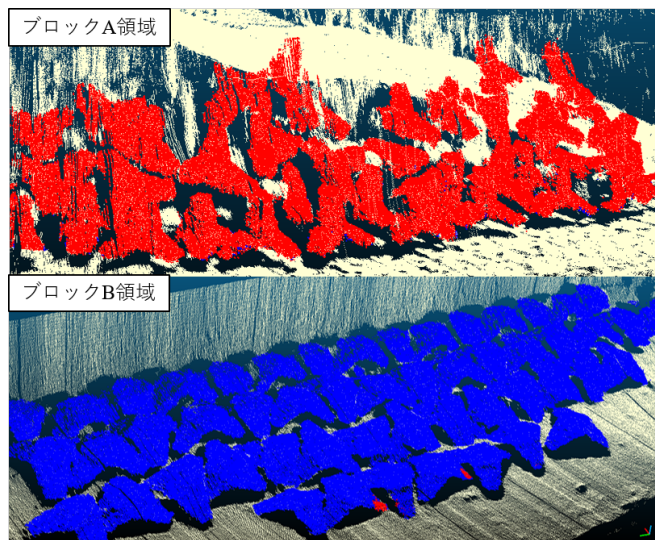


図-11 セマンティックセグメンテーションの結果

5. おわりに

本研究では、点群データで構成される水中構造物の維持管理・点検技術に向けた深層学習モデルの構築を行い、消波ブロックを対象とした検出モデルによるデータセットの評価とセマンティックセグメンテーションに基づく点群データの可視化の有効性の検証を行い、以下の結論を得た。

- 検出モデルから、データセットの適切な加工により検出精度が約2倍向上したことを確認した。
- セマンティックセグメンテーション精度は非常に高く、点群データの可視化に対して実用的であることを確認した。

今後は、作成した学習モデルの汎用性向上を目的とし、他領域へのモデル適用とデータセットの最適化を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 三上信雄, 梅津啓史, 松本力, 完山暢, 大西明夫, 不動雅之, 井上真仁, 漁港施設の水中部の点検手法におけるナローマルチビームソナーの適用性検証, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.75, No.2, L91-L96, 2019.
- 2) 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, pp29-34.
- 3) C.R.Qi, H.Su, K.Mo and L.J.Guibas : PointNet : Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation, Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 652-660, 2016.
- 4) C.R.Qi, L.Yi, H.Su and L.J.Guibas : PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space, In Advances in neural information processing systems, pp. 5099-5108, 2017.
- 5) P.Kamoussi, S.Lazard, A.Maheshwari and S.Wuhrer : Analysis of farthest point sampling for approximating geodesics in a graph, Computational Geometry, Vol.57, pp.1-7, 2016.
- 6) Cloud Compare ver.2.12 alpha, <<https://www.cloudcompare.org/>>, (確認 2022.3.10)
- 7) Blender ver.2.93 LTS, <<https://blender.jp/>>, (確認 2022.3.10)

IGA を用いた 2 次元移流解析

2D-Advection analysis using Isogeometric Analysis

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 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, メッシュの作成プロセスを削減でき, 曲線等も形状誤差なく表現することができる.

IGA の土木分野への適用例として, 球形タンク内の水のスロッシングによるタンクへの影響等の, 曲線形状を有する領域における流体-構造連成解析が挙げられる. この, IGA を用いた流体-構造連成解析手法の構築を目的とし, 本報告ではその基礎的研究として, 2 次元移流問題に対して NURBS 関数を用いた IGA を適用して解析を行い, 三角形 1 次要素を用いた有限要素法による結果とに比較を行った. また, 補間に用いる NURBS の次数と積分点数による計算結果の比較も行った.

2. 数値解析手法

(1) IGA

本研究では, IGA における形状関数に NURBS 関数を用いた. NURBS 関数³⁾とは, Non-Uniform Rational B-spline (非一様有理 B スプライン) の略であり, NURBS の曲面式 $C(\xi)$ と NURBS の基底関数 R_i^p は次式で表される.

$$C(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{i,j}^{p,q}(\xi, \eta) B_{i,j} \quad (1)$$

$$R_i^p(\xi) = \frac{N_{i,p}(\xi) w_i}{\sum_{\hat{i}=1}^n \sum_{\hat{j}=1}^m N_{\hat{i},p}(\xi) M_{\hat{j},q}(\eta) w_{\hat{i},\hat{j}}} \quad (2)$$

ここで, $B_{i,j}$ は i または j 番目の制御点における座標データ, $N_{i,p}$, $M_{j,q}$ は B スプラインの基底関数, $w_{i,j}$ は i, j 番目の制御点における重みの値, p, q は曲線の次数, n, m は制御点の数である. また, B スプラインの基底関数は式 (3) に示す Cox/de Boor の漸化式によって決定される.

$p = 0$ の場合

$$\begin{aligned} N_{i,0}(\xi) &= 1 & \text{if } \xi_i \leq \xi \leq \xi_{i+1} \\ N_{i,0}(\xi) &= 0 & \text{otherwise} \end{aligned}$$

$p = 1, 2, 3 \dots$ の場合

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

ここで, ξ, η はノットと呼ばれ, 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ノットの列によって与えられる.

$$\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n+p+1}) \quad (4)$$

(2) 流体解析手法

解析例として, 2 次元移流問題を取り扱う. 支配方程式は, 以下に示す移流方程式を用いる.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

ここで, ϕ は物理量, c は移流速度である. この式に対し, 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することにより以下に示す弱形式を得る.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} w \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) d\Omega \\ + \sum_{e=1}^M \int_{\Omega_e} \left(\tau_S \bar{u}_k \frac{\partial w}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) d\Omega_e = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, w は Galerkin 項の重み関数であり, Ω_e は解析領域全体を M 個の要素に分割したときのそれぞれの要素の領域を表す. 式 (6) の要素毎の積分の総和項は SUPG 法による安定化項であり, 移流が卓越することによる数値振動を抑えるものである. また, 式 (6) 中の τ_S は SUPG 法の安定化パラメータであり, 以下のように与えられる.

$$\tau_S = \left(\left(\frac{2}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{2 \|\bar{u}_i^e\|}{h_e} \right)^2 + \left(\frac{4}{Re h_e^2} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Δt は微小時間増分, \bar{u}_i^e は要素移流速度, h_e は要素長であり, 要素長は以下のように表される.

$$h_e = 2 \left(\sum_{\alpha=1}^{n_{en}} \left| \left(\frac{u_i^e}{\|u_i^e\|} \right) \left(\frac{\partial N_{\alpha}^e}{\partial x_i} \right) \right| \right)^{-1}$$

n_{en} は要素の節点数, N_{α}^e は形状関数であり, 本研究では NURBS 関数を用いている.

式 (6) に対し, 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.

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\Delta t} (\mathbf{M} + \mathbf{M}_s) + \frac{1}{2} (\mathbf{A} + \mathbf{A}_s) \right) \phi^{n+1} \\ = \left(\frac{1}{\Delta t} (\mathbf{M} + \mathbf{M}_s) + \frac{1}{2} (\mathbf{A} + \mathbf{A}_s) \right) \phi^n \end{aligned} \quad (7)$$

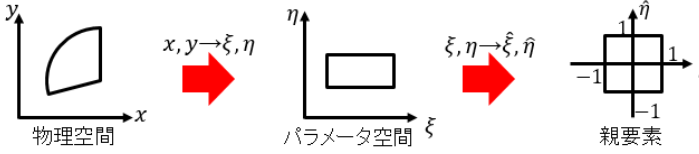


図-1 変数変換

ここで、 \mathbf{M} は質量行列、 \mathbf{A} は移流行列、添え字 s は SUPG 法に起因する行列を示すものである。このようにして離散化して得られた式 (7) 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。

各領域において積分計算を行うために Legendre-Gauss の積分公式を用いて数値積分を行う。また、IGA では解析領域の存在する物理空間 $\mathbf{x}(x, y)$ から、計算を行うパラメータ空間 $\boldsymbol{\xi}(\xi, \eta)$ への変数変換が行われる。そのため、図-1 に示すように、物理空間 $\mathbf{x}(x, y)$ からパラメータ空間 $\boldsymbol{\xi}(\xi, \eta)$ 、パラメータ空間 $\boldsymbol{\xi}(\xi, \eta)$ から数値積分を行うための親要素 $\hat{\boldsymbol{\xi}}(\hat{\xi}, \hat{\eta})$ へと二度の変数変換が行われることになる。ここで、パラメータ空間から親要素への変数変換は以下の式により行われる。

$$\hat{\xi} = -\frac{\xi_{i+1} + \xi_i}{\xi_{i+1} - \xi_i} + \frac{2}{\xi_{i+1} - \xi_i} \xi \quad (8)$$

$$\hat{\eta} = -\frac{\eta_{i+1} + \eta_i}{\eta_{i+1} - \eta_i} + \frac{2}{\eta_{i+1} - \eta_i} \eta \quad (9)$$

以上を考慮すると、式 (7) における各項は以下のように表される。

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^{ngp} \sum_{j=1}^{ngp} \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \left| \mathbf{J}_{x, \hat{\xi}} \left(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_j \right) \right| \rho_i \rho_j \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_s = \tau_e \sum_{i=1}^{ngp} \sum_{j=1}^{ngp} \mathbf{B}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) c \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \left| \mathbf{J}_{x, \hat{\xi}} \left(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_j \right) \right| \rho_i \rho_j \quad (11)$$

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^{ngp} \sum_{j=1}^{ngp} \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) c \mathbf{B}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \left| \mathbf{J}_{x, \hat{\xi}} \left(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_j \right) \right| \rho_i \rho_j \quad (12)$$

$$\mathbf{A}_s = \tau_e \sum_{i=1}^{ngp} \sum_{j=1}^{ngp} \mathbf{B}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) c \mathbf{N}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) c \mathbf{B}_e \left(\xi \left(\hat{\xi}_i \right), \eta \left(\hat{\eta}_j \right) \right) \left| \mathbf{J}_{x, \hat{\xi}} \left(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_j \right) \right| \rho_i \rho_j \quad (13)$$

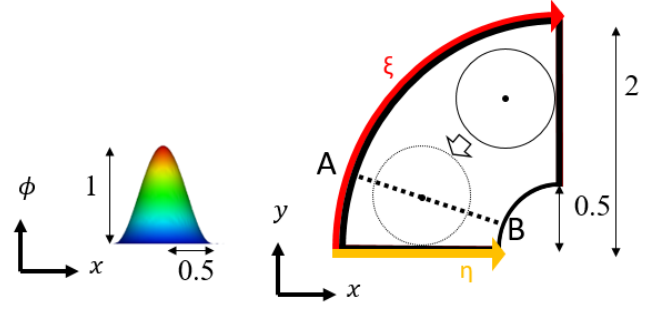


図-2 解析モデル、初期条件

表-1 解析メッシュ

	FEM		IGA (積分点数: 3)	
要素数	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	ξ :2次のNURBS η :1次のNURBS	ξ :2次のNURBS η :1次のNURBS

ここで、 ngp は、Legendre-Gauss の積分公式における積分点数であり、 ρ_i, ρ_j はその重みである。 τ_e は SUPG 法における安定化パラメータであり、 \mathbf{N}_e は、ある ξ, η における形状関数である。 \mathbf{B}_e は \mathbf{N}_e を空間方向に微分したもので、 $\left| \mathbf{J}_{x, \hat{\xi}} \right|$ は x から $\hat{\xi}$ への変数変換の Jacobian である。

3. 数値解析例

本研究では、曲線形状を有する領域における 2 次元移流問題を取り上げ、補間に三角形 1 次要素を用いた有限要素法による解析結果と比較することにより構築したプログラムの妥当性を確認した。また、形状関数の次数、積分点数による比較も行った。

(1) 従来の有限要素法との比較

(a) 解析条件

解析領域を図-2 に示す。境界条件としては、領域の全境界において物理量 $\phi = 0$ を与え、微小時間増分量 Δt は $\frac{\pi}{400}$ 、総ステップ数を 100 とした。

用いた解析メッシュを図-3 に示す。表-1 に示すように、補間に三角形 1 次要素を用いた有限要素法、IGA とともに 2 種類ずつ解析を行い、それぞれ要素分割数を同一とし、比較を行った。なお、IGA の積分点数については、3 点積分を利用し、積分計算を行った。

(b) 解析結果

解析結果として、図-4 に各メッシュにおける最終ステップにおける可視化結果結果を示す。また、表-2 に、各接点または各制御点における厳密解との平均 2 乗誤差と、解析にかかった計算時間を示す。ここで厳密解との平均 2 乗誤差 MSE は以下の式により計算される。

$$MSE = \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{N} \quad (14)$$

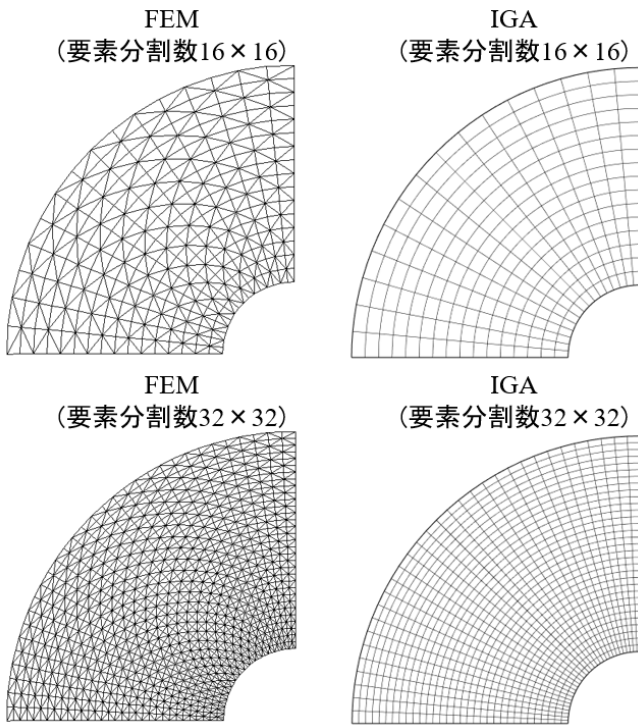


図-3 解析メッシュ

表-2 厳密解との平均2乗誤差, 計算時間

	FEM		IGA (積分定数: 3)	
要素分割数	16×16	32×32	16×16	32×32
厳密解との平均2乗誤差[×10 ⁻⁵]	10.8404	0.6875	2.4933	0.1218
計算時間[s]	0.8906	3.5313	2.8438	11.0625

ここで, O_i は厳密解の節点値または制御点値, P_i は解析解の節点値または制御点値, N は制御点数である. これらの結果から以下のことが確認できた.

- 可視化結果から, 補間に三角形1次要素を用いた解析結果と同様の挙動を表せており, IGA を用いて2次元移流問題を解析できていることを確認した.
- 可視化結果の領域内における黒い領域はアンダーシュートを表し, この結果から, IGA において従来の有限要素法と比較しアンダーシュートが低減されていることが確認できる.
- 同じ要素分割数にした場合, 三角形1次要素を用いた解析結果と比較して IGA による解析結果の方が誤差が小さくなったが, 計算時間は長くなった. これは, 積分計算を行う際, 補間に三角形1次要素を用いた場合は面積座標を用いて計算を行うため計算時間を削減できているのに対し, 補間に NURBS を用いた場合は積分計算に Legendre-Gauss の積分公式を用いるため, その部分で計算時間に差が生まれたためだと考えられる.
- 従来の有限要素法, IGA とともに, 要素分割数を4倍に増加させると, 計算時間も約4倍に増加する結果となった.

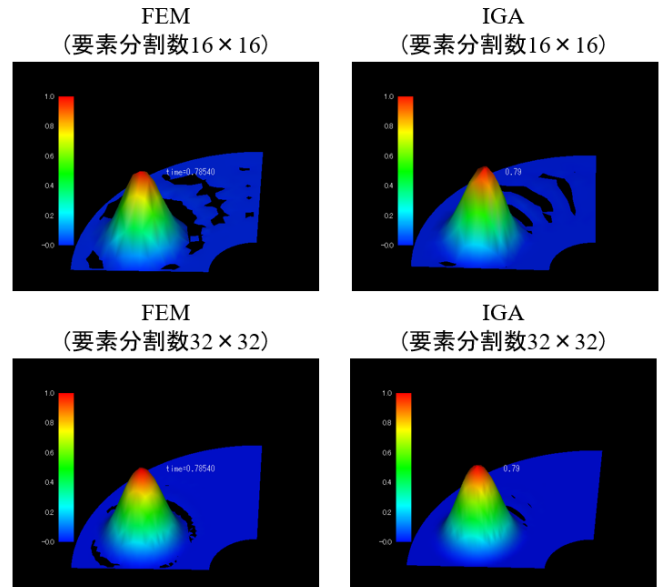


図-4 各解析メッシュにおける最終ステップでの可視化結果

表-3 解析メッシュ

要素数	1024	1024	1024	1024	1024	1024
要素分割数	32×32	32×32	32×32	32×32	32×32	32×32
補間に用いるNURBSの次数	ξ方向:2 η方向:1	ξ方向:2 η方向:2	ξ方向:2 η方向:3	ξ方向:3 η方向:1	ξ方向:3 η方向:2	ξ方向:3 η方向:3
1要素あたりの制御点数	6	9	12	8	12	16

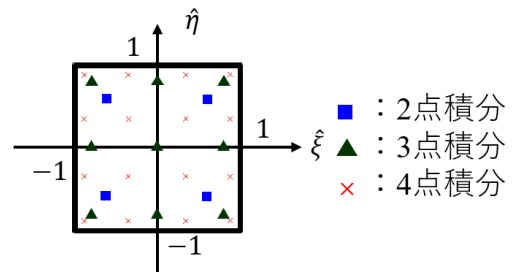


図-5 積分点

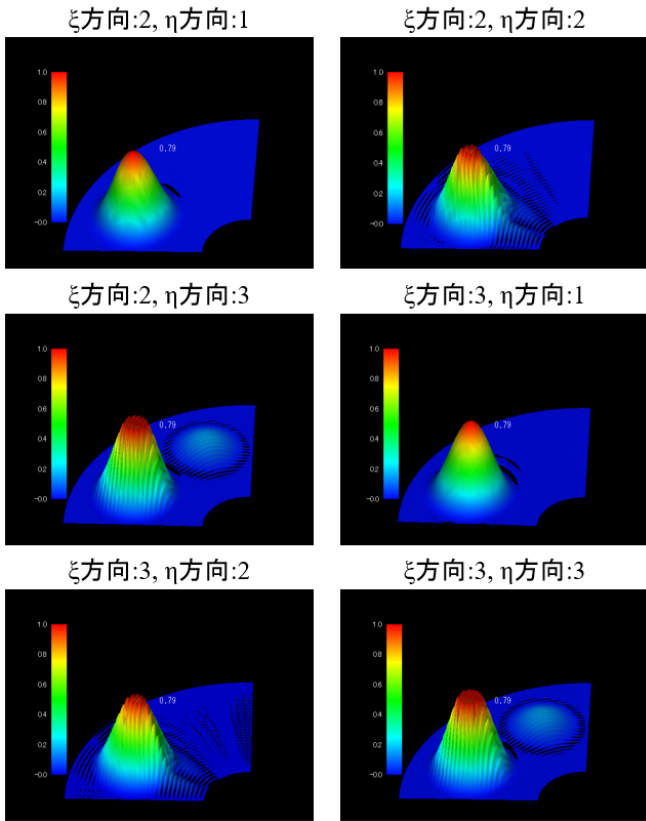
(2) NURBS の次数, 積分点数による比較

(a) 解析条件

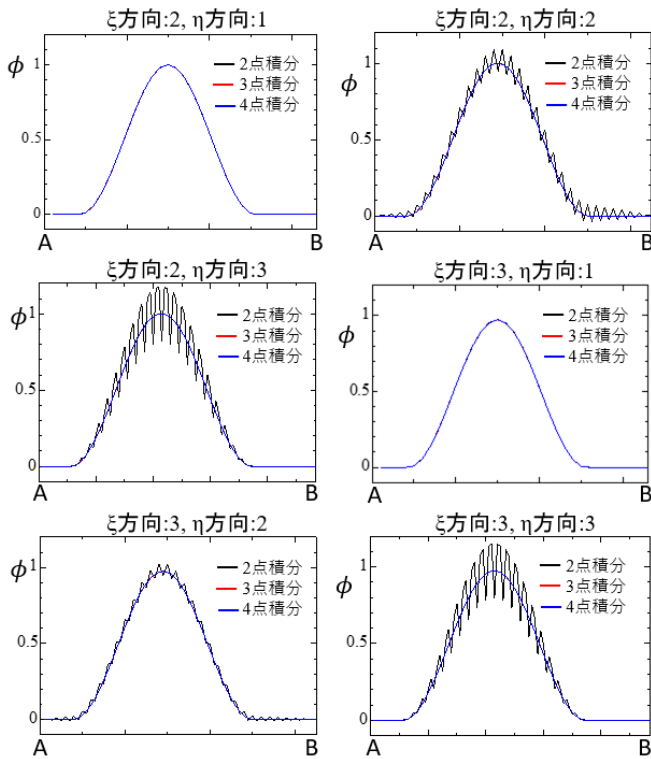
解析領域は図-2 に示したものと同様のものを用い, 境界条件や微小時間増分量, 総ステップも前節と同様とした. 解析メッシュは, 表-3 に示すように要素分割数は変えず補間に用いた NURBS 関数の次数を変更した. 各解析メッシュにおいて, 図-5 に示すように, 2 点積分, 3 点積分, 4 点積分の 3 パターンの積分による解析結果を比較した.

(b) 解析結果

解析結果として, 図-6 に各メッシュにおいて 2 点積分で解析を行った場合の最終ステップ時の結果を, 図-7 に最終ステップにおける AB の断面図を示す. また, 表-4 に各メッシュにおける各積分点での解析結果各制御点での厳密解との平均 2 乗誤差を示す. この結果から以下のことが確認できた.



図－6 積分点数 2 における最終ステップでの可視化結果



図－7 最終ステップにおける AB の断面図

- 表から、 ξ 方向、 η 方向ともに 2 次以上の補間関数を用いた場合、2 点積分で解析を行った場合において、誤差が著しく大きくなっており、これは数値振動が発生しているためのものである。また断面図から

表－4 厳密解との平均 2 乗誤差 $[10^{-5}]$

NURBS の次数	ξ 方向:2 η 方向:1	ξ 方向:2 η 方向:2	ξ 方向:2 η 方向:3	ξ 方向:3 η 方向:1	ξ 方向:3 η 方向:2	ξ 方向:3 η 方向:3
2点積分	0.0642	151.2219	260.7740	0.0852	158.9616	268.6669
3点積分	0.1218	0.12370	0.1332	0.0375	0.0390	0.0393
4点積分	1.0209	1.0407	1.0485	0.0925	0.1069	0.1005

も、同様の場合において振動が発生し不安定な解析となっていることが確認できる。

- ξ 方向に 2 次、 η 方向に 1 次の NURBS を用いた場合では 2 点積分で解析を行った際に最も誤差が小さくなり、それ以外においては 3 点積分において誤差が最も小さくなった。
- ξ 方向の NURBS の次数を上げることで誤差は小さくなり、計算精度は向上するが、 η 方向の NURBS の次数を上げることによる計算精度の向上はみられなかった。

4. おわりに

本報告では、NURBS 関数を用いた IGA による 2 次元移流問題の解析について述べた。補間に用いる NURBS の次数と積分点数を変化させて計算結果の比較を行ったことにより、以下に示す結論を得た。

- 同じ要素分割数で解析を行った場合、IGA による解析では補間に三角形 1 次要素を用いた解析に比べ計算誤差を小さく抑え解析を行うことができるが、計算時間は長くなる。
- 解析を行う領域の形状により、補間に用いる NURBS の次数を上げることで計算精度が向上する方向と向上しない方向がある。
- 積分点数は、補間に用いる NURBS の次数～(次数 + 1)において最も計算誤差が小さくなり、それより少ない積分点数を用いると、数値振動が発生する場合がある。

今後の課題は以下に示すものが挙げられる。

- さらに複雑な形状における積分点数、補間関数の次数による検討
- アイソパラメトリック要素を用いた解析との比較
- 2 次元 Navier-Stokes 方程式について IGA による解析の実施

参考文献

- T.J.R. Hughes, J.A. Cottrell, Y. Bazilevs, Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, pp.4135-4195, 2005.
- J.A.Cottrell, T.J.R Hughes and Y.Bazilevs, Isogeometric analysis: Toward integration of CAD and FEA, Wiley Publishing, 335p, 2009.
- L.Piegl, W.Tiller, The NURBS Book, Springer, 646p, 1997

有限要素法と境界要素法による遮音壁周辺の音場解析比較

Comparison of the large acoustic analysis
using the finite element method and the boundary element method around sound barrier

博士前期課程 1 年 深澤 一志
Kazushi FUKAZAWA

1. はじめに

騒音とは一般に、人にとって不快な音のことを指し、騒音の苦情件数はここ数年、典型 7 公害の中で最多である。特に、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、近年の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。

著者らは、高精度なシミュレーションが可能な波動音響理論に基づき、高速多重極境界要素法による大規模音場解析手法の構築¹⁾を行い、本手法を用いて遮音壁形状の際による影響の検討²⁾を行ってきた。しかし、本手法は解析領域の境界面のみ未知数を求め、その結果を解析領域内部の計算に用いるため、モデル内部を厳密に解くことが難しいという問題があった。

そこで本研究では、領域型の数値解析手法である有限要素法を使用した解析を行い、高速多重極境界要素法との比較を行う。

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式

本研究で取り扱う 3 次元非定常波動問題の支配方程式である 3 次元の波動方程式、放射条件、初期条件、境界条件を以下に示す。

・支配方程式

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(\mathbf{x}, t) = c^2 \Delta u(\mathbf{x}, t) \quad \text{in } D, \quad (1)$$

・放射条件

$$u(\mathbf{x}, t) \rightarrow u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (2)$$

・初期条件

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad \text{in } D, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad \text{in } D, \quad (4)$$

ここで、 D は解析領域を表し、 c は波速、 u は音圧、 u_{in} は入射波を示す。初期条件式 (3)、(4) は初期ステップにおける無音状態を表す。

・Dirichlet 境界条件

$$u = \hat{u} \quad \text{on } \Gamma_u, \quad (5)$$

・Neumann 境界条件

$$\frac{\partial u}{\partial n} = -\frac{\cos \theta}{c} \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, t) \quad \text{on } \partial D_{u'}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \partial D_{u'} \quad (\gamma = 1), \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = -\frac{1}{c} \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{on } \partial D_{u'} \quad (\gamma = 0), \quad (8)$$

ここで、 ∂D_u 、 $\partial D_{u'}$ はそれぞれ、Dirichlet 境界条件、Neumann 境界条件を表し、 \hat{u} は既知の音圧、 n は解析領域からの外向き法線ベクトルである。また、 θ は解析境界に対する音波の入射角を示し、本研究では入射波は境界面に対して垂直に入射する ($\theta = 0$) と仮定する。式 (7) は $\gamma = 1$ とした場合の散乱体での反射境界条件であり、完全反射となる。有限要素法を用いる際の開空間処理は境界条件で行い、式 (8) に示す透過境界条件³⁾ ($\gamma = 0$) で吸収を行う。

2.2 有限要素法に基づく数値解析

式 (1) に対し、Galerkin 法に基づく重み付き残差法により以下の有限要素法が得られる。

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \mathbf{K}_e u = \mathbf{F}_e \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{M}_e 、 \mathbf{K}_e 、 \mathbf{F}_e はそれぞれ質量行列、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る。2 階の時間微分項に対して中心差分、未知量 u に対して前進差分を用いる。また、質量行列 \mathbf{M}_e に対して集中化を施し、陽解法により、未知数である音圧値を求める。

また、本解析では大規模解析をおこなうため、領域分割法に基づく並列計算を行う。本研究では陽解法を使用するため、隣り合う領域同士の 1 対 1 通信のみで並列計算が可能であり、効率の良い並列化が可能である。

2.3 平面入射境界

音源周辺に障害物が存在しない問題では、図-1 に示すように仮想的に設けた音源から球面波として伝播してくる物理量を平坦な入射境界面に与えることで、音源付近のメッシュを必要としない解析が可能となる。本研究での有限要素法では計算コストを削減するため、この手

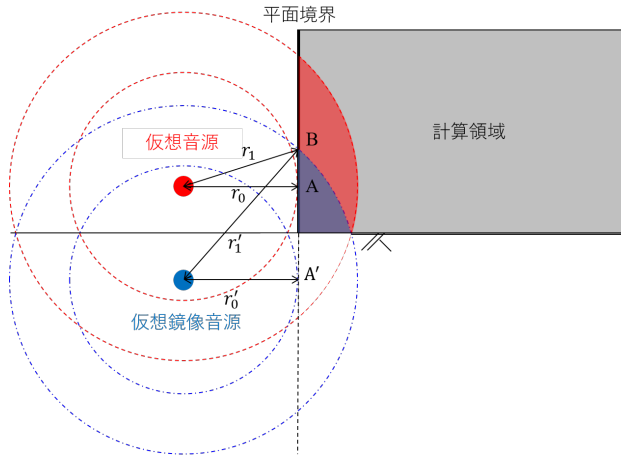


図-1 平面入射境界

法を用いている．以下に入射境界面での音圧を求める計算方法を示す．

$$p^B = \frac{r_0}{r_1} p^A \quad (10)$$

ここで、 r_0 と r_1 はそれぞれ仮想音源点と入射境界の最短距離 (地点 A)、仮想音源点と入射境界の任意距離 (地点 B) を表し、 p^A 、 p^B はそれぞれ地点 A での音圧、平面境界上の任意地点 B での音圧を表す．

また、地点 A と地点 B の到達時間差 Δr は任意点距離と最短距離の差と音速 c の関係から以下の式で得られる．

$$\Delta r = \frac{r_1 - r_0}{c} \quad (11)$$

解析で指定する時間離散化幅 Δt で dh をステップ数 $\Delta n = \Delta r / \Delta t$ で近似すると、時間ステップ n 、地点 B の音圧 p_n^B は距離減衰と到達時間差を考慮した以下の式で表される．

$$p_n^B = \frac{r_0}{r_1} p_{n-\Delta n}^A \quad (12)$$

また仮想音源に対し鏡像音源を設け、上記と同様の計算を行い、両者の和をとることで、地面部での波の反射 (完全反射) を再現することが可能となる．

$$p_n^B = \frac{r_0}{r_1} p_{n-\Delta n}^A + \frac{r_0'}{r_1'} p_{n-\Delta n}^{A'} \quad (13)$$

2.4 境界要素法に基づく数値解析

式 (1) に対し、選点法に基づく重み付き残差法により得られる境界積分方程式を以下に示す．

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u(\mathbf{x}, t) &= \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) \bar{q}(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \\ &\quad - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) u(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \\ &\quad + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad (14)$$

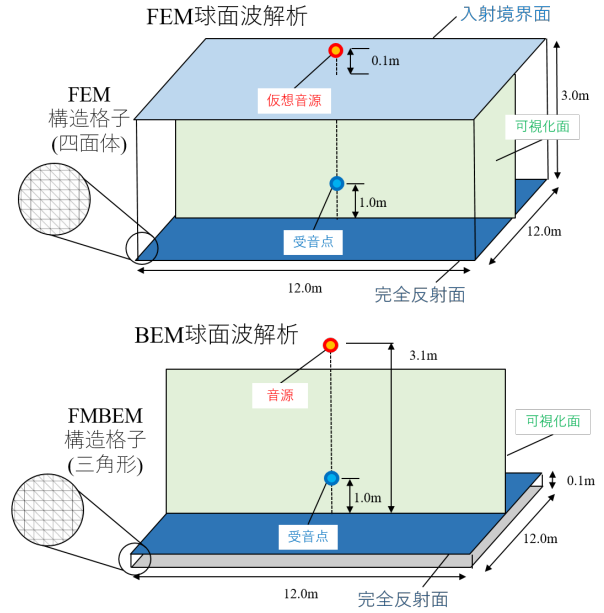


図-2 ベンチマーク問題の解析モデル

式 (14) 中の Γ は以下に示す、3次元波動方程式の基本解である．

$$\Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) = \frac{\delta \left((t - t_0) - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}{c} \right)}{4\pi |\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \quad (15)$$

ここで、 δ は Dirac のデルタ関数を表す．

式 (14) より u の値を求め、それらを以下の式に代入することにより、領域内の任意の点での音圧 u を求める．

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, t) &= \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \\ &\quad - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) u(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \\ &\quad + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad (16)$$

3. 数値解析例

3.1 基本例～ベンチマーク解析

有限要素法による音場解析プログラムの妥当性を検証をするために、図-2 に示す解析モデルでベンチマーク解析を行い、厳密解、参照解との比較を行う．図-2 に示す音源より音を入射させ、モデル下面部の完全反射面での音の伝播を確認する．有限要素法では時間幅は 0.01ms とし 250Hz の cos 波 1 波長を入射波として与える．要素分割幅は 1 波長をそれぞれ 1 波長を約 15 分割した 0.1m としている．

3.2 基本例の解析結果

図-3 は下面で波が反射した後の可視化図である．両者の波の挙動は一致しているが、有限要素法の結果は上

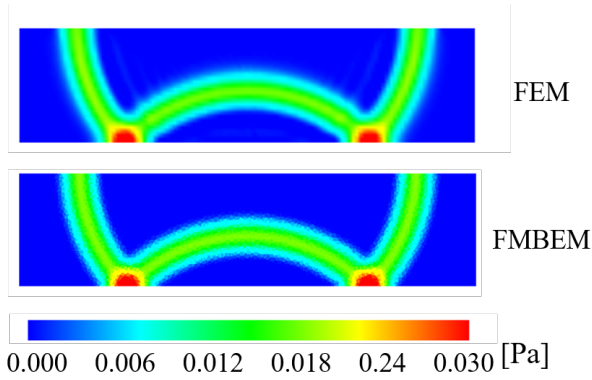


図-3 両解析の可視化結果

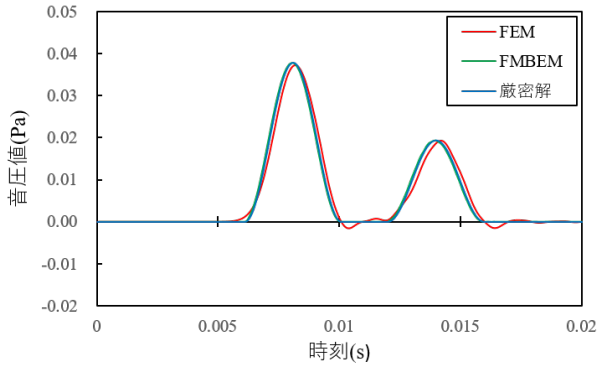


図-4 受信点における解析解と厳密解の比較

面や側面において音が吸収しきれず、反射が起きていることが確認できる。また、受信点で得られるそれぞれの音圧値と厳密解の比較図を図-4に示す。図より、厳密解との概ねの一致が確認できるが、有限要素法の解析結果では、オーバーシュート・アンダーシュートや位相誤差の確認ができる。

これらの結果から、本解析の解析精度において、高速多重極境界要素法の方が有限要素法より優れるといえる。今後は、陰解法を用いた解析を行うなど、有限要素解析の解析精度の向上を目指す。

3.3 応用例～道路騒音解析

応用例として直立遮音壁を設けた解析モデルを図-5に示す。音速、時間増分はそれぞれ、340m/s、0.0512msとし、要素分割幅は入射波の1波長を15分割した、0.034mとする。また、有限要素解析において、領域全体を四面体、非構造格子で分割し、壁面、地面部(底面)の境界条件を完全反射、開空間境界にはMurの吸収境界条件を使用し解析を行う。境界要素解析については、遮音壁表面部を三角形、構造格子で分割し、地面部は鏡像音源を使用することで地面部の反射を再現する。

入力波には以下の式により得られるLubichの擬似インパルス⁵⁾を用いる。生成した入力波とその周波数特性を図-6に示す。図に示すように、このインパルスは、ある周波数まではほぼ一定を保ち、高周波になると急激に減衰するという特徴を持つ。周波数特性が平坦な領域の

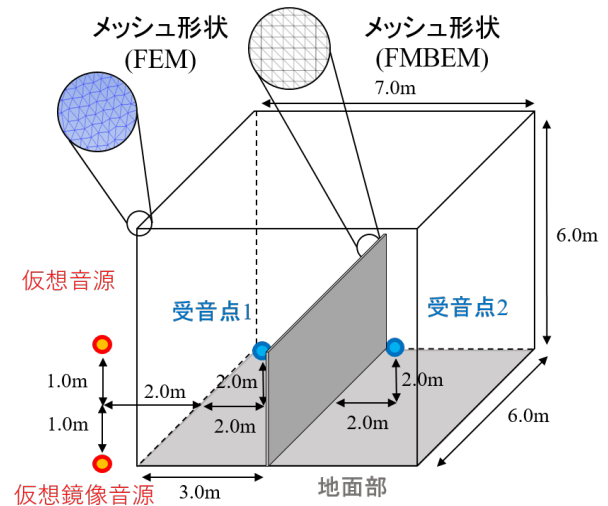


図-5 交通騒音解析モデル

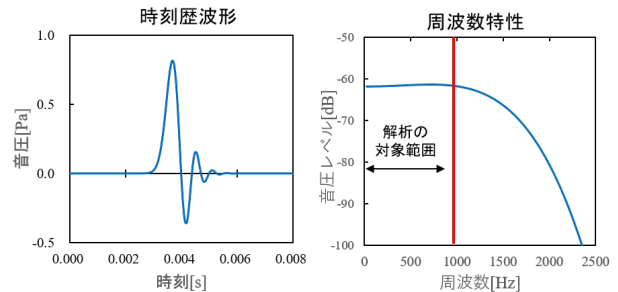


図-6 擬似インパルス

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、 $L = 2000$, $r = 1.2\text{m}$, $\Delta t = 0.0512\text{ms}$ として入力波を生成し、1000Hzまでを対象範囲として解析を行う。

$$\omega_n(\Delta t) = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{s}{c}r} \right) e^{(-2\pi i \frac{nL}{T})} \quad (17)$$

また、解析に使用したコンピュータは、京都大学のスーパーコンピュータシステム、CrayXC40であり、1ノードあたり68コアと90GBのメモリを有する。本解析ではそれぞれ、このコンピュータの8ノード(計544コア)での並列計算を実施し、計算コストの比較を行う。

3.4 応用例の解析結果

図-7に有限要素法の解析結果の3次元可視化を示す。また、図-8に有限要素法、高速多重極境界要素法の可視化比較図を示す。基本例と同様、アンダーシュート・オーバーシュートの現象が見られる。図-9、図-10に図-5内に示すそれぞれの受信点で得られる音圧の時刻歴波形を示す。図-9より、鏡像音源の直達音の到達が境界要素法(厳密解)よりも早く、今後、検討が必要であることを確認した。また、音が回折して到達する受信点2での時刻歴波形においてオーバーシュート・アンダーシュ

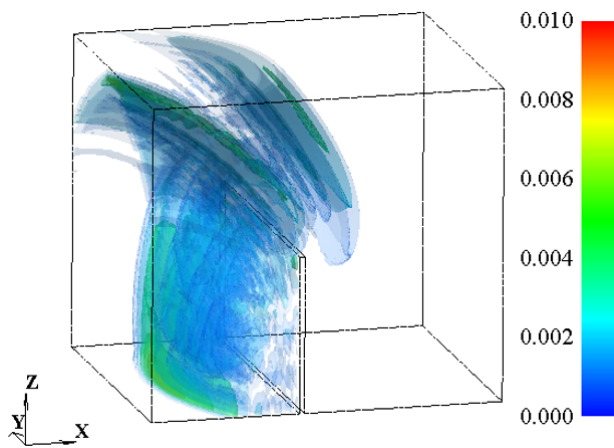


図-7 3次元可視化結果 (t=0.217[s])

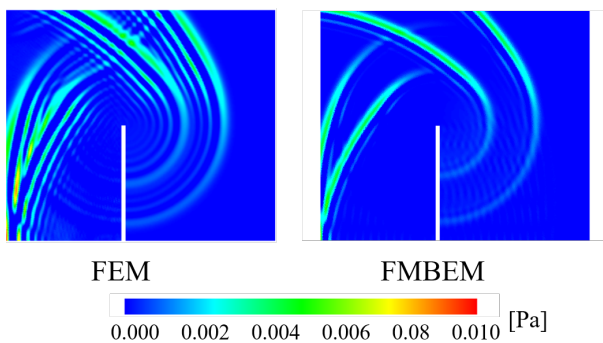


図-8 2次元可視化結果の比較 (t=0.246[s])

トの現象が顕著に見られるを確認した。図-11に両解析の比較図を示す。両解析はCrayXC40の8ノードを使用し、それぞれ解析をおこなっている。任意断面での可視化まで含めると、有限要素法は高速多重極境界要素法よりも計算時間は1/8以下、計算機容量は1/5以下で解析が行えることが確認できる。これらの結果から、効率面において、有限要素法は高速多重極境界要素法に比べ大幅に優れているといえる。

4. おわりに

本報告では、有限要素法に基づく大規模音場解析手法の構築を行い、高速多重極境界要素法との解析比較を行った。結論を以下に示す。

- ベンチマーク解析、大規模音場解析において、有限要素法の解析結果が厳密解、参照解と概ね一致することを確認した。
- 計算精度・安定性の点において高速多重極境界要素法は有限要素法に比べて優れる。
- 計算時間・計算機容量の点において有限要素法は高速多重極境界要素法に比べて優れる。

今後の課題として、任意反射率の考慮、複雑形状を有する解析モデルでの解析結果の比較、境界要素法と有限要素法の結合解析を行うことを予定している。

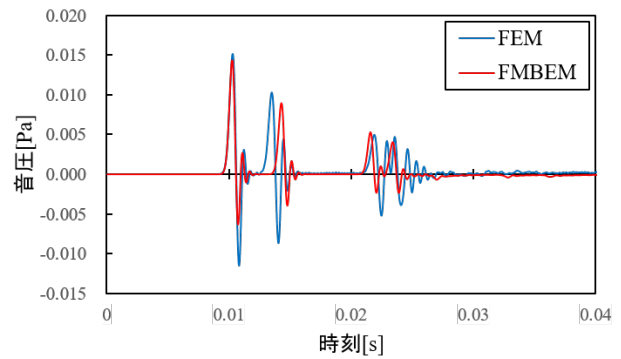


図-9 時刻歴波形 (受音点 1)

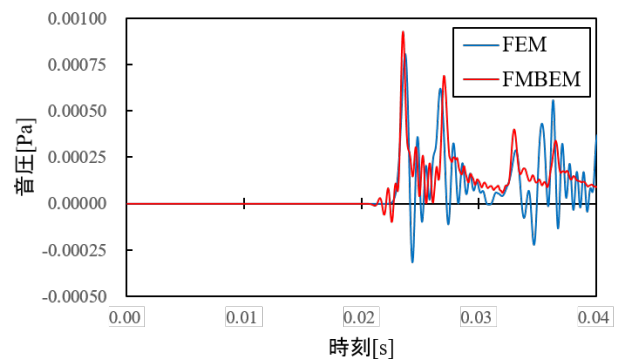


図-10 時刻歴波形 (受音点 2)

	計算時間[分]	解析モデル 使用メモリ[GB]	計算使用メモリ[GB]
FEM	17.6	2.0	17.0
FMBEM[境界値計算]	37.0	0.021	54.4
FMBEM[内点計算]	118.8		37.8

図-11 計算コストの比較

参考文献

- 1) 岡村理一郎, 吉川仁, 高橋徹, 高木貴弘, 樫山和男: 安定化手法を用いた時間域多重極境界要素法に基づく道路交通騒音解析とその可聴化システム, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.72, pp.257-264, 2016.
- 2) 庄子諒, 深澤一志, 吉川仁, 高橋徹, 樫山和男: 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.
- 3) Mur, G. Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* (1981) Vol.23, No.4, pp.377-382
- 4) 吉町徹, 今井啓太, 谷川将規, 樫山和男: 擬似インパルス応答解析に基づく騒音予測手法の構築と 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.72, No.2, pp. I.207-I.216, 2016.
- 5) Lubich, C. Convolution quadrature and discretized operational calculus. I. *Numerische Mathematik* (1988) Vol.52, pp.129-145.

GNSS データを用いた AR による流れの可視化システム

AR Visualization for The Riverflow Velocity Using GNSS

都市人間環境学専攻 博士前期課程 1 年 鈴木 雅大
Masahiro SUZUKI

1. はじめに

近年、情報通信技術 (Information and Communications Technology, ICT) の発達に伴い、土木分野にも ICT の適用が進んでいる。その中で拡張現実 (Augmented Reality, 以降 AR) も例外ではなく、AR 技術を用いた可視化が工事現場などの状況把握やメンテナンス等に利用されている。

土木分野において、AR の可視化方法としてマーカー型 AR¹⁾ と呼ばれるビジョンベース AR の手法が一般的に利用されている。マーカー型とは、QR コードや画像をマーカーとして設定し、それらを読み込むとその位置に可視化するモデルを表示するシステムである。特徴として可視化する場所を自由自在に動かせるといったメリットがある一方で、周辺環境の特徴点の有無や、マーカー設置場所が不安定である場合には精度よく可視化モデルを重畳することができないといったデメリットが存在する。海上での可視化を例として挙げると、周辺の風景に特徴点となる場所が少なく、また、船上で可視化を行う際にマーカーを静止状態にすることが難しく、正確な重畳は非常に困難となることが考えられる²⁾。

そのため、本研究では可視化対象のモデルに対し緯度経度座標を与え、GNSS 受信機を用いて正確な可視化を行うシステム構築を行った。そのため本稿において、地上での比較を行うべく都市河川流れを従来の手法であるマーカー型 AR と比較及び考察を行い、GNSS 型 AR の評価について報告する。

2. GNSS 型 AR

GNSS 型 AR とは、GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球測位衛星システム) から得られる位置情報を元に可視化を行うシステムである。GNSS 型 AR の特徴として、マーカーを設置することが不要となるため、マーカー設置が難しい場所や、随時位置情報の更新を行い自分の場所を正確に取得できるため、周辺に特徴点が少ない場所において有効なシステムである点が挙げられる。一方で、GNSS の電波が取得することが難しい屋内での利用には不向きである³⁾。

3. システム概要

本システムの概要を図 - 1 に示すフローチャートにて示す。

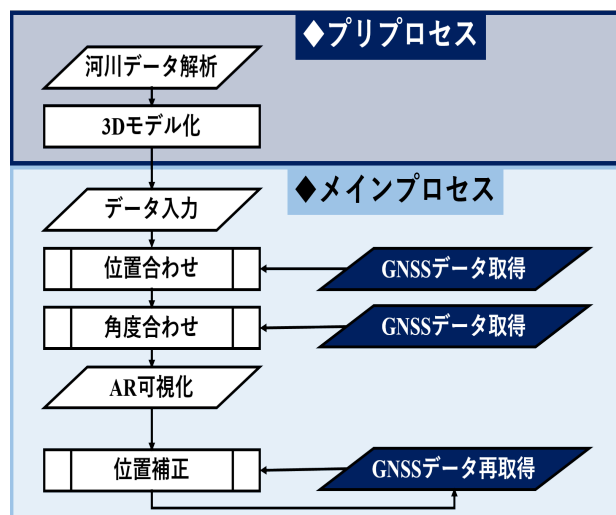


図 - 1 可視化システムのフローチャート

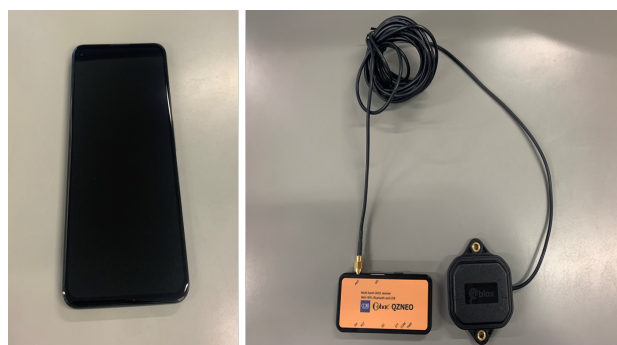


図 - 2 使用デバイス

3.1 開発環境

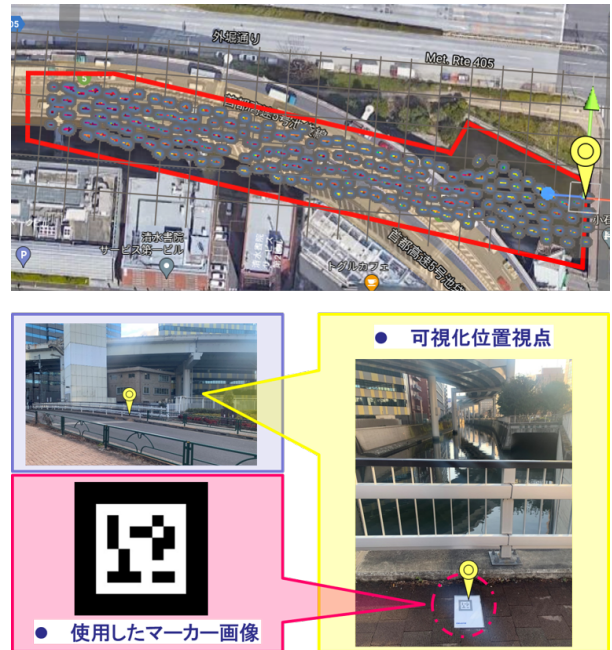
本研究では、統合開発環境として Unity 2020.3.24f1 を用いて可視化用アプリケーションを作成する。可視化用デバイスとして Google 社の Pixel 5a⁴⁾ を使用し、重畳位置・角度合わせに用いる GNSS 受信機は CORE 社 QZNEO⁵⁾ を 2 台使用する (図 - 2)。

3.2 可視化対象

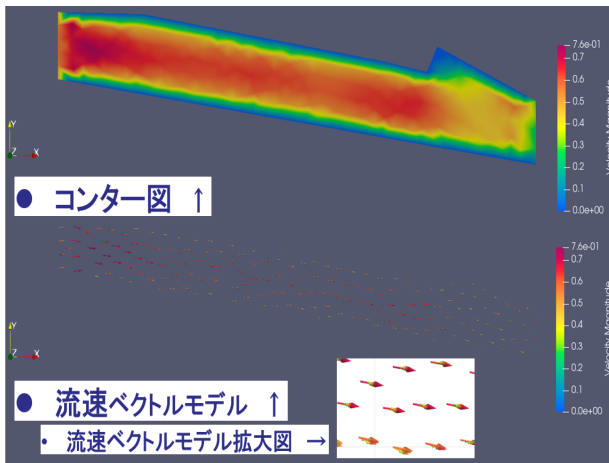
可視化対象は、東京都内を流れる一級河川の神田川とし、東京都文京区に位置する小石川橋上から可視化を行った (図 - 3)。周辺環境として上空に首都高速道路が走り、さらに多数のビル群が立ち並んでいるため、GNSS データの受信精度に関して懸念されたが問題なくデータを受信することができている。



図－3 可視化対象エリア



図－5 マーカー設置位置



図－4 都市河川流れデータの出力

3.3 プリプロセス

3.3.1 河川データ解析

既往研究「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討」⁶⁾において対象エリアの解析が行われている。

3.3.2 3D モデル化

既往研究において解析されたデータの 0 秒目から 99 秒目の合計 100 ステップ分を出力し、3D モデル化を行った。また、河川流れを表現するため 1 秒ごとに表示するステップを切り替えるアニメーション化を施した。

3.4 メインプロセス

3.4.1 データ入力

100 ステップ出力した河川流れの 3D モデルの原点に対して緯度経度座標を与える。GNSS 重畳ではモデルの原点に実世界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。

3.4.2 位置合わせ

位置合わせは、データ入力段階において 3D モデルに与えた緯度経度座標と、可視化デバイスに付属した GNSS 受信機から得られる緯度経度座標を用いて、相対位置を計算することで重畳位置を決定する。

3.4.3 角度合わせ

3D モデルの重畳において位置合わせのみでは正確な重畳位置に 3D モデルを表示することができない。そのため 2 台目の GNSS 受信機とデバイスに付属させた GNSS 受信機との位置情報を用いて角度を補正する。

3.4.4 AR 可視化

以上位置合わせ、角度合わせを行い可視化を開始する。

3.4.5 位置補正

可視化デバイスの移動に伴う重畳位置のズレを補正するため GNSS から得られる位置情報を随時更新し、重畳位置を補正する。

位置合わせ、角度合わせについての詳細な説明は、第 4 章において述べる。

4. 適用例

4.1 マーカー重畳

3 章で述べた通り、マーカー重畳ではモデルの原点の位置に対してマーカーを設置する。実世界におけるマーカーの設置位置は Google Map を使用して決定した(図 - 5)。

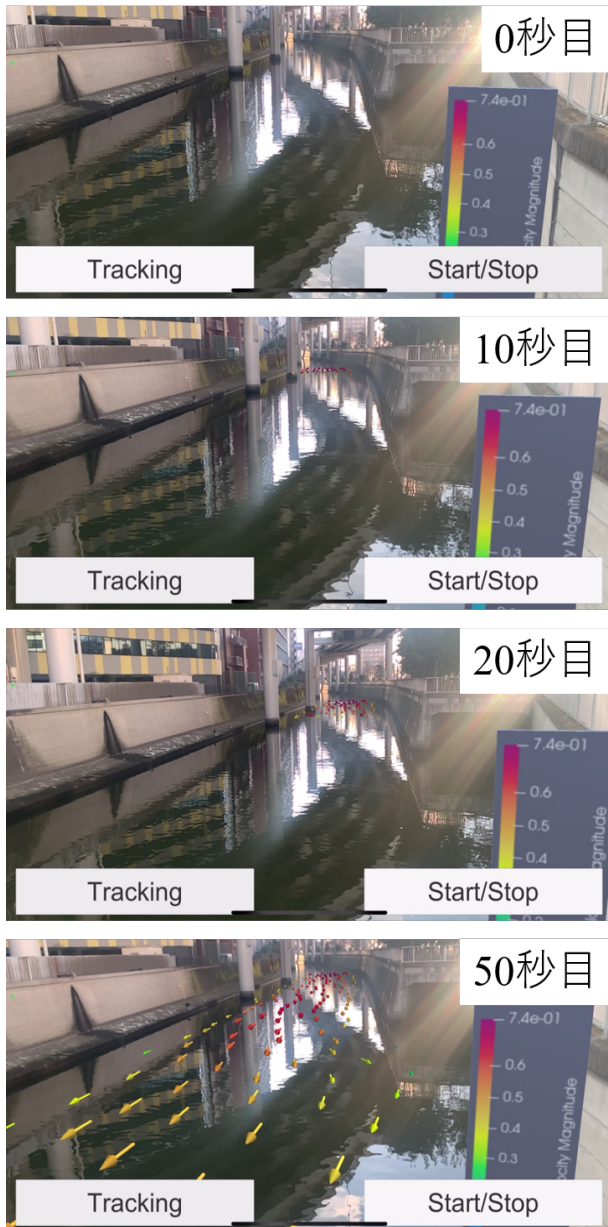


図-6 マーカー重畳可視化結果

4.2 マーカー重畳による可視化結果

(図-6) にマーカー重畳による可視化結果を示す。川幅に沿って精度良く重畳されていることがわかる。

4.3 GNSS 重畳

4.3.1 位置合わせ

こちらも3章で述べた通り、3Dモデルに与えた緯度経度座標と可視化デバイスに付属させたGNSS受信機から得られる緯度経度座標との差を用いて重畳を行う。Unityにおける z 軸を北向き、 x 軸を東向き、 y 軸を高さ方向と設定する。また、Unity内での座標は単位mで設定されるため、モデル-デバイス間の相対距離を緯度経度座標差から計算を行う。計算式は式1に示す。GNSS受信機から得られる座標は1秒ごとに更新され移動による生じる重畳位置誤差を随時補正する。

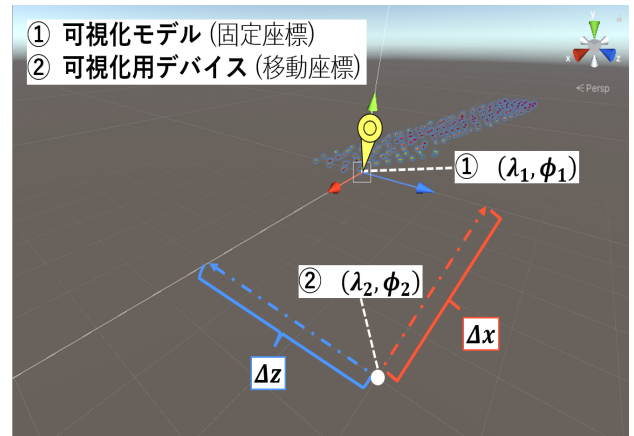


図-7 重畳位置計算

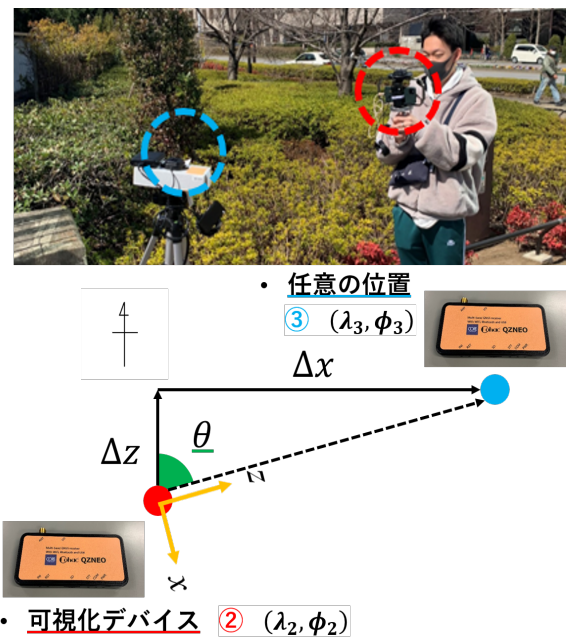


図-8 角度補正

$$\begin{aligned}\Delta x &= 2\pi R \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{360} \\ \Delta z &= 2\pi R \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{360}\end{aligned}\quad (1)$$

4.3.2 角度合わせ

Unityではアプリケーション起動時に正面方向を z 軸に設定するため、相対距離を計算するだけでは正確な位置に3Dモデルを重畳することが出来ない。そのため、アプリケーション起動時の向きと真北との角度差を補正することで正確な重畳を行う。2台目のGNSS受信機を任意の位置に設置し、アプリケーション起動時の可視化デバイスの向きを2台目のGNSS受信機に向けることで2台のGNSS受信機の緯度経度座標差から角度の補正を式2を用いて行う。

$$\theta = \sin^{-1}(\Delta x / \Delta z) \quad (2)$$

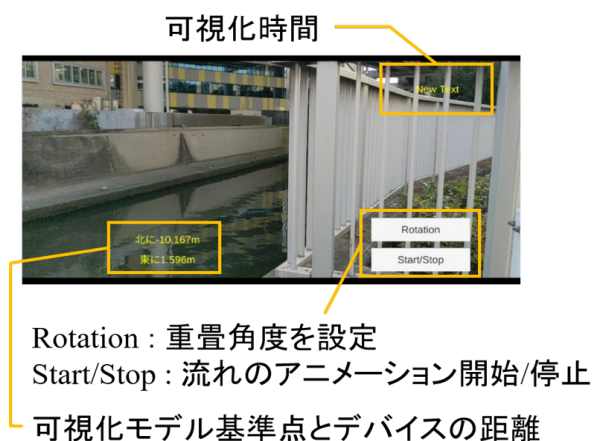


図-9 ユーザーインターフェース

4.4 マーカー重畳による可視化結果

(図-10)にGNSS重畳による可視化結果を示す。マーカー重畳と同程度の精度で重畳されていることがわかる。

4.5 重畳結果の比較

マーカー重畳のメリットとして重畳位置の精度が高いこと、マーカーをかざすことによって可視化するためアプリケーション起動時の可視化デバイスの向きに依存しない重畳ができることが挙げられる。一方のデメリットとして、今回の検証においてマーカー位置の正確な設置において難しさを感じた。一方のGNSS重畳では、マーカー重畳と同程度の精度を確認でき、マーカー設置に関する点では、任意の点にGNSS受信機を設置できる点からも簡易的なシステムとなった。デメリットとしては、屋内での可視化には不向きである点と、現在のシステムでアプリケーション起動時の可視化デバイスの向きに重畳位置が影響されてしまう点がある。

5. おわりに

本稿では、都市河川流れの可視化における従来の手法であるマーカー重畳と本研究において構築したGNSS重畳の比較検討を行った。マーカー重畳では精度よく可視化することができたが、マーカー設置位置決定の難しさが見られた。一方でGNSS重畳では、マーカー設置との差異として任意の点に設置できるというメリットがあり、またGNSSのデータが取得できる屋外においてはマーカー重畳と同程度の緒上精度が得られることが分かった。今後の課題としては、角度補正の自動化、重畳位置誤差の定量的評価を行う。

参考文献

- 1) 池田直旺, 花立麻衣子, 樫山和男, 車谷麻緒, 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, Vol.73 No.2 p.II48-II54, 2017

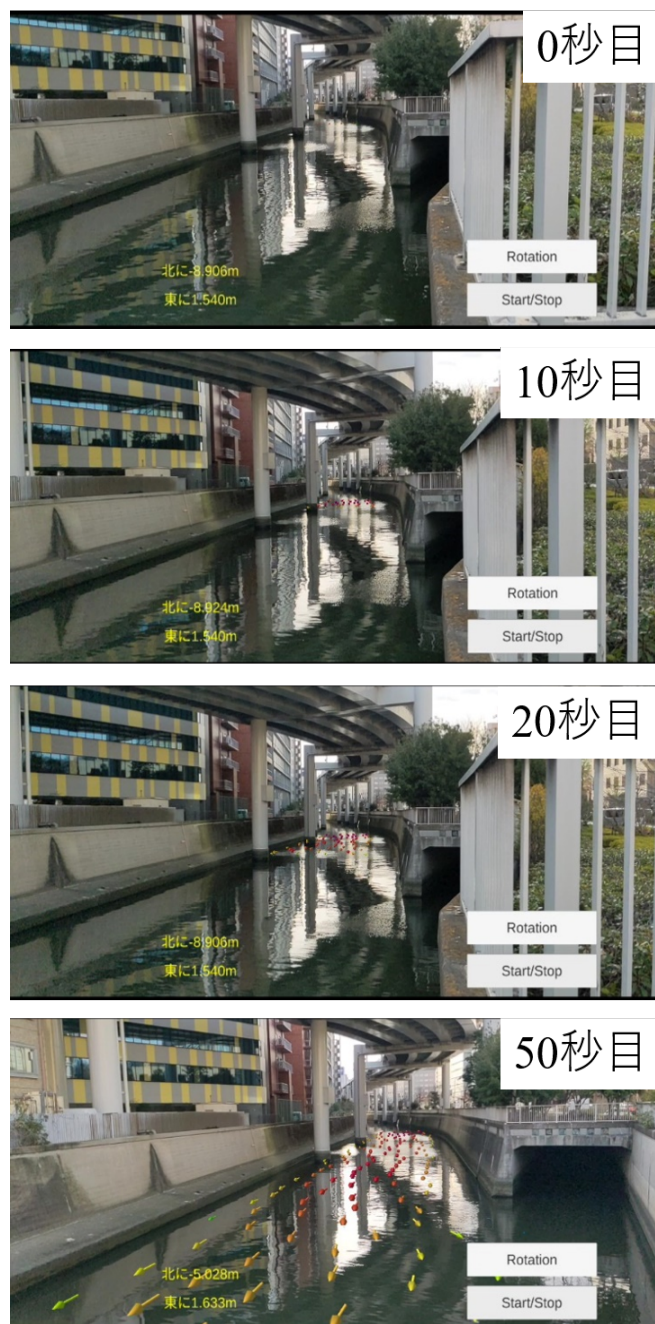


図-10 GNSS重畳可視化結果

- 2) 三木浩, 岡本修, 西原邦治, GNSSを活用したAR技術「地下埋設物可視化システム」, アーバンインフラ・テクノロジー推進会議技術研究発表会, Vol.29, No.B8, 2017
- 3) 山下遼, 湯素華, 小花貞夫, 歩行者事故削減のためのGPSと車両からの電波を用いた歩行者位置の高精度測位方式の提案と評価, 情報処理学会論文誌 Vol.59 No.1 113-123 (Jan. 2018)
- 4) <https://store.google.com> (入手 2022年3月12日)
- 5) https://qzss.go.jp/usage/products/qzneo_200702.html, (入手 2022年1月17日)
- 6) 花立麻衣子, 菅田大輔, 樫山和男, 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討, 土木学会論文集F3, Vol.72 No.2 p.II92-II99, 2016