

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02074

研究課題名（和文）3次元超解像を活用した乱流熱輸送の超高速予測

研究課題名（英文）Three-dimensional super-resolution for realtime prediction of turbulent heat transport

研究代表者

大西 領 (Onishi, Ryo)

東京工業大学・学術国際情報センター・教授

研究者番号：30414361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,700,000円

研究成果の概要（和文）：都市街区の微気象を対象とした3次元超解像の技術的フィージビリティを明らかにした。複数のGPUボードを利用することで現実的な時間で深層ニューラルネットワークを学習させることができた。さらに、実際に、実在街区を対象とした3次元超解像シミュレーションを開発した。まず高解像度の微気象シミュレーションを実行することで学習データセットを作成した。そのデータセットを使い、3次元超解像ニューラルネットワークの学習と評価を行った。さらに、開発した超解像シミュレーションシステムを使えば、十分な先行時間を有した予測システムを構築できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気象よりも身近な微気象スケールの予測情報が簡単に手に入るような未来社会では、「気象災害による死者ゼロ」が実現されるだろう。そのような安全・安心社会の構築のためには、あらゆるネットワーク機器がアクセスできる、微気象に関する過去・現在情報および予測情報に関する情報インフラ（微気象情報インフラ）が必要不可欠である。そのような情報インフラを構築する上で、微気象予測シミュレーションの計算コストが甚大であり、リアルタイム予測が困難であるというボトルネックがあった。本研究で開発した超解像シミュレーション技術により、そのボトルを解消できる目処を立てることができた。

研究成果の概要（英文）：This research first demonstrated the technical feasibility of 3D super-resolution for urban micrometeorologies (micro-weather). We have clarified that, by utilizing multiple GPU boards, a deep neural network can be trained within a realistic timeframe. Additionally, we have developed a 3D super-resolution simulation for an actual urban area. We began by creating a training dataset through a high-resolution micrometeorology simulation. Using this dataset, we trained and evaluated the 3D super-resolution neural network. Furthermore, we demonstrated that the developed super-resolution simulation system can provide a high-resolution forecast with sufficient lead time.

研究分野：環境流体工学

キーワード：超解像 微気象 乱流 深層学習 環境流 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

気象よりも身近な微気象スケールの予測情報が簡単に手に入るような未来社会では、「気象災害による死者ゼロ」が実現されると考えられる。そのような安全・安心社会の構築のためには、あらゆるネットワーク機器がアクセスできる、微気象に関する過去・現在情報および予測情報に関する情報インフラ（微気象情報インフラ）が必要不可欠である。そのような情報インフラを構築する上で、微気象予測シミュレーションの計算コストが甚大であり、リアルタイム予測が困難であるというボトルネックがあった。具体的には、1時間先までの微気象予測を実施するのに、スーパーコンピュータを用いても数時間かかってしまい、十分な予測先行時間を有した予測情報を得ることができなかった。リアルタイム予測サービスを実現するためには、1時間先までの予測を数分内に得る必要がある。

そのような超高速予測を実現する技術として、物理シミュレーションと深層学習技術を融合した“超解像シミュレーション”技術 (Onishi et al., Super-Resolution Simulation for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology, SOLA, Vol. 15, 178-182, 2019) が挙げられる。超解像とは、格子状の情報を高精細化する技術であり、画像データを対象として発展してきた技術である。超解像シミュレーション技術では、その技術を物理シミュレーションにより得られた情報に適用することで、低解像度シミュレーションのコストで高解像度情報を得られる。その技術の性能と速度は、超解像技術に依るところが大きい。超解像技術は、画像分野をはじめ、これまで主に 2 次元データに適用されてきた。近年は、3 次元データ（時間+2次元空間=3次元時間空間）である動画への適用や、自動運転分野での 3 次元空間への適用など、3 次元データへの適用が盛んになりつつある。しかし、物理方程式を学習させた 3 次元超解像シミュレーション法はまだ開発されていなかった。そもそも、核となる 3 次元超解像に関して、その推論精度だけでなく、学習に要する計算コストや、推論に要する時間も明らかでなかった。

2. 研究の目的

本研究では、物理シミュレーションにより得られた 3 次元予測データの超解像を開発し、(応募当時) 世界で初めて、物理方程式を学習させた 3 次元超解像シミュレーション法を開発することを目的とした。具体的には、まず、流体シミュレーションにより得られた 3 次元予測データの超解像器の技術フィジビリティを明らかにしたうえで、実際に、その超解像性能を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、学習に必要な学習データセットの構築と、深層超解像器の開発の大きく二つの研究項目から成る。

学習データセットの構築のために、流体シミュレーションとして、実在都市街区を対象とした大量の微気象シミュレーションを実施した。3 次元データを闇雲に保存すると、データ容量が甚大となり、学習が困難に成るだけでなくデータ保存自体も困難となる。試行錯誤を何度も繰り返し、現実的な時間で学習でき、かつ、一時保存可能なデータセットを構築する。

深層超解像器の開発においては、ニューラルネットワークの開発だけでなく、入力データや損失関数に物理方程式を考慮するなどの試行錯誤を行うことで、物理を考慮した 3 次元超解像による空間補間が、連続の式などの所望の 3 次元物理方程式を満たすのかを定量的に明らかに

する。

4. 研究成果

まず、都市街区の微気象を対象とした 3 次元超解像の技術的フィジビリティを明らかにした。複数の GPU ボードを利用することで現実的な時間で深層ニューラルネットワークを学習させることに成功した。さらに、実在街区を対象とした 3 次元超解像シミュレーションを開発した。まず、高解像度 (5m 解像度) の微気象シミュレーションを実行することで学習データセットを作成した。そのデータセットを使い、3 次元超解像ニューラルネットワークの学習と評価を行った。この一連の作業を、試行錯誤により何度も繰り返した。最終的に、所望の信頼性を有した 3 次元超解像器の開発に成功し、超解像シミュレーション法を用いれば、十分な先行時間を有した微気象の予測システムを構築できることを明らかにした。

図 1 に、東京駅付近の約 300m 四方の領域における、地表から 5m 高さにおける東西風分布の 3 次元超解像結果を示す。左図が、参照とする高解像度 (5m 解像度) 分布、中図が予測された低解像度 (20m 解像度) 分布、そして、右図が 3 次元超解像により推論された高解像度分布 (5m 解像度) である。白抜き部分は建物内部で風速が定義されない領域 (欠損領域) を示す。低解像度 (20m 解像度) 結果では、建物分布が平均化されることで、通りの多くが判別されなくなり、欠損領域が拡大する。多くの欠損領域を抱えた低解像度結果を元にしても、開発した 3 次元超解像器は、通り内の詳細な風分布を再現できる様子がわかる。また、3 次元分布を対象とすることにより、質量保存則を損失関数に組み込んだ物理超解像を実現できた。これにより、ニューラルネットワークの汎用性が高まるとともに、少ない学習セットでも高精度なニューラルネットワークを得ることができた。

以上、本研究で開発した超解像シミュレーション技術により、十分な予測先行時間を有した予測情報を得ることが困難であるというボトルネックを解消できる目処を立てることができた。

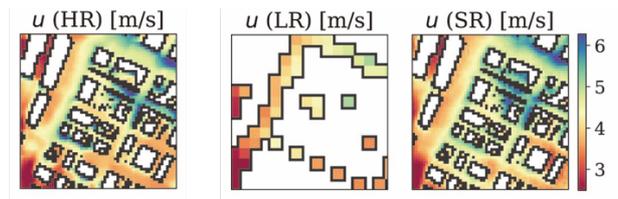


図 1 : 東京駅付近の地上高さ 5m における、東西風分布の 3 次元超解像例。(左) 参照とする高解像度 (5m 解像度) 分布、(中) 予測された低解像度 (20m 解像度) 分布、(右) 3 次元超解像により推論された高解像度 (5m 解像度) 分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yasuda Yuki, Onishi Ryo	4. 巻 1
2. 論文標題 Rotationally equivariant super-resolution of velocity fields in two-dimensional flows using convolutional neural networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Machine Learning	6. 最初と最後の頁 026107 ~ 026107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0132326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yasuda Yuki, Onishi Ryo, Hirokawa Yuichi, Kolomenskiy Dmitry, Sugiyama Daisuke	4. 巻 209
2. 論文標題 Super-resolution of near-surface temperature utilizing physical quantities for real-time prediction of urban micrometeorology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 108597 ~ 108597
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.buildenv.2021.108597	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 大西領、安田勇輝	4. 巻 60
2. 論文標題 深層学習を活用した超解像シミュレーションによる都市街区熱環境のリアルタイム予測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 伝熱	6. 最初と最後の頁 30-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 10件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuki Yasuda, Ryo Onishi, Keigo Matsuda
2. 発表標題 Three-Dimensional Super-Resolution of Passive-Scalar and Velocity Distributions Using Neural Networks for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology
3. 学会等名 WCCM2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Yasuda, Ryo Onishi, Yuichi Hirokawa, Dmitry Kolomenskiy, Daisuke Sugiyama
2. 発表標題 Physics Super-Resolution of Near-Surface Temperature for Urban Micrometeorology Using Convolutional Neural Networks
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野寺孔明、大西領、安田勇輝
2. 発表標題 注意機構付き深層学習による都市街区熱環境マップの物理超解像
3. 学会等名 日本気象学会2022年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野寺孔明、大西領、安田勇輝
2. 発表標題 都市街区熱環境マップに対する注意機構付き物理超解像
3. 学会等名 日本機械学会2022年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田勇輝、大西領、松田景吾
2. 発表標題 畳込ニューラルネットによる都市微気象の3次元物理超解像
3. 学会等名 秋季気象学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田勇輝、大西領
2. 発表標題 回転同変な畳込ニューラルネットによる2次元流体の超解像
3. 学会等名 春季気象学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西領、安田勇輝
2. 発表標題 微気象予測と未来社会サービスの同時実現を目指す超解像シミュレーション法
3. 学会等名 自動車技術会第2回CFD部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西領、安田勇輝
2. 発表標題 ドローンの観測データを用いた微気象予測
3. 学会等名 JAXAワークショップ「ドローン統合情報利用プラットフォームの可能性を探る」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 MSSGモデルの応用と発展
3. 学会等名 MSSGワークショップ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西領、安田勇輝
2. 発表標題 シミュレーション科学とデータ科学の融合技術で挑む”微気象”予測
3. 学会等名 京大情報工学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西領、安田勇輝
2. 発表標題 ローンの観測データを用いた微気象予測
3. 学会等名 JUTM（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 微気象制御学と気象制御
3. 学会等名 ムーンショットセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西領、Dmitry Kolomenskiy、廣川雄一、杉山大祐、松田景吾
2. 発表標題 機械学習技術を活用した都市街区微気象のリアルタイム予測
3. 学会等名 日本機械学会2021年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安田勇輝、大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐
2. 発表標題 ニューラルネットによる都市微気象シミュレーションの物理超解像
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西領、安田勇輝、小野寺孔明、松田景吾
2. 発表標題 微気象 × 機械学習 ~機械学習技術を活用した都市街区微気象のリアルタイム予測~
3. 学会等名 機械学会熱工学部門（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Onishi, Y. Yasuda
2. 発表標題 Super-resolution simulation of urban micro-meteorology for sustainable future society
3. 学会等名 AI Super Resolution Simulation Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 マイクロスケール気象に対する大規模熱流体シミュレーション
3. 学会等名 熱物資流体工学セミナー（化学工学会・熱物質流体工学分科会主催）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西 領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐
2. 発表標題 物理超解像シミュレーションによる都市街区微気象のリアルタイム予測
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西 領
2. 発表標題 生活社会に溶け込む“微気象”予測
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西 領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐、松田景吾
2. 発表標題 AI技術を活用した都市街区微気象のリアルタイム予測
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Onishi
2. 発表標題 Physics-informed super-resolution for real-time prediction of urban micro-meteorology
3. 学会等名 PiAI Seminar Series: Physics informed AI in Plasma Science（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	松田 景吾 (Matsuda Keigo) (50633880)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (地球情報科学技術センター)・副主任研究員 (82706)	数値流体計算設計と実施
研究 分担者	K o l o m e n s k D m i t r y (Kolomenski Dmitry) (00813924)	東京工業大学・学術国際情報センター・特任准教授 (12608)	数値流体計算設計、3次元超解像器の改良

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------