

# 研究報告書

## 「時空間超解像のための時空間畳み込み技術の研究」

研究期間：2018年10月～2020年3月

研究者番号：50176

研究者：竹内 孝

### 1. 研究のねらい

省コスト・省エネルギーなシステムで観測された実時空間データは、コストや物理制約のため、例えば高価なGPS観測装置の高密度設置や、電池駆動型センサによる高頻度高ビットの長期観測は困難であり、スパースかつ低解像度となり情報が不足しデータ解析が十分に行えない。本研究では、同一地域・時刻を観測した複数の異種低解像度時空間データはリッチな時空間情報を持つという着想から、データに共通する特徴を抽出し時空間超解像を行う時空間畳み込み技術を提案する。超解像は、低解像度画像を高解像度化する技術で多くの企業が実用化している。しかし、時空間データは、画像と異なり観測点が空間上に散在に存在する性質を持つため、超解像技術の直接転用は困難である。そこで、複数の低解像度の異種時空間データから高解像度の時空間データを推定する技術を新たに提案し、本技術によって時空間データの予測、欠損値推定、および潜在パターン抽出などの高精度な時空間データ分析を実現する。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、同一地域・時刻を観測した異種時空間データはリッチな共通の時空間情報を持つという着想から、空間解像度とサンプリング周波数の異なる時空間データに共通する特徴を抽出し時空間超解像を行う技術の開発を行う。

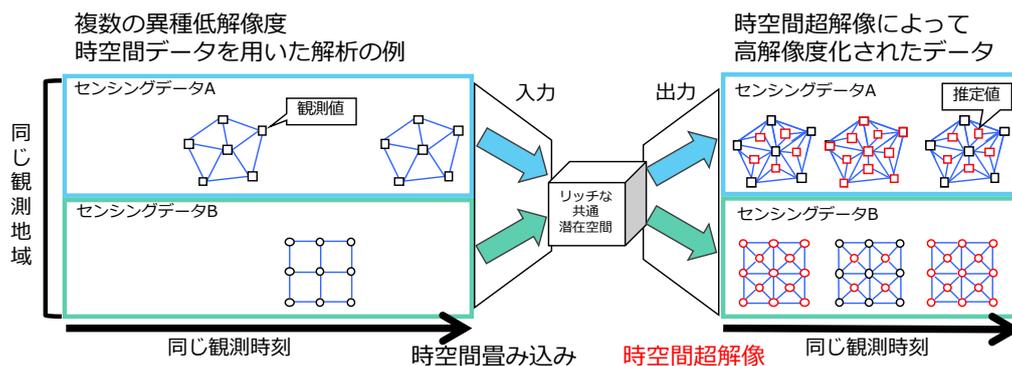


図 1 時空間超解像の概要

サブテーマとして、(A)異種の空間解像度の異なるデータから特徴抽出する空間畳み込み技術、(B)異種のサンプリング周波数の異なるデータから特徴抽出する時間畳み込み技術、および、(C)時空間同時畳み込み技術による時空間超解像について詳細検討を行い、実データを用いた実験によって提案技術の有効性を実証する。提案技術の有効性を定量評価するため、

オープンデータとして利用可能な同一地域を観測した異種の空間解像度の異なるデータを用いた実験を実施する。

## (2) 詳細

### サブテーマ A「空間解像度の異なるデータから特徴抽出する空間畳み込み技術の開発」

都市や自然環境などの状態把握を目的として設置されるセンサは、様々な位置に設置されるため、空間上に散在し、空間密度に粗密が生じる。さらにセンサの種類によって、設置位置が異なる場合も存在する。このような条件下で観測される時空間データへ柔軟に対応し、データの空間的な偏在傾向を捉えるための特徴量抽出技術を開発した。

まず、空間畳み込み技術の手法として、角度依存グラフ畳み込み技術を提案した。タクシー乗降履歴データ、シェアバイクの出入車データを用いた空間内挿実験を行い、時空間データの分野で盛んに研究されているグラフ畳み込みニューラルネットワークよりも、提案手法が高い性能を示すことを確認した。本研究の実験結果を NIPS2018 Spatiotemporal ワークショップに投稿、採録、ポスター発表した。

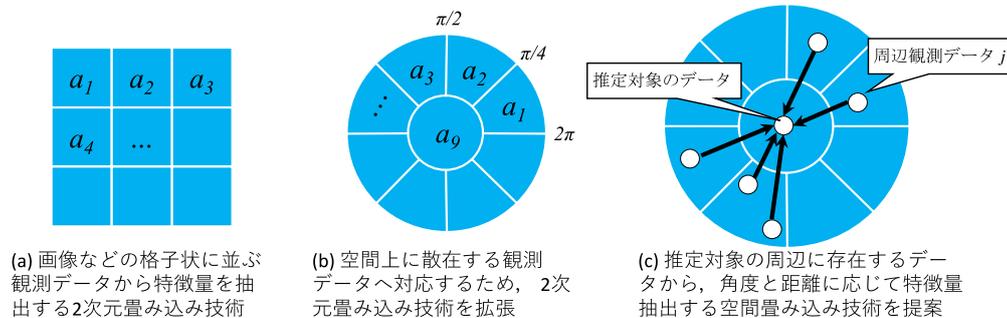


図 2 角度依存グラフ畳み込み技術

前述の角度依存グラフ畳み込み技術では、観測位置間の類似性を表現するグラフを予め作成する必要がある。しかし、現実のデータは複雑な空間相関を持つため、解析対象のデータに合わせたグラフの作成に大きな困難である問題が発見された。そこで、コンピュータビジョン分野で提案された点群深層学習を取り入れ、位置間の類似関係をデータから学習する、より柔軟なモデルの検討を行った。

点群深層学習とは、レーザースキャナを用いて物体から観測した3次元点群から物体の認識を行うニューラルネットワーク技術である。2017年にPoint Netが提案され、以来、膨大数の関連技術が提案されており、空間上に散在する点群からのパターン認識技術の研究が急速進められている。これを飛躍させ、都市空間に散りばめられたセンサを空間上に存在する点群としてみなすことにより、点群深層学習を時空間データの解析に使用できるのではないかという独創的な着想から、時空間データ解析のための新たな点群畳み込み型の深層学習技術を提案した。

次に、これをさらに発展させ、観測位置のメタ情報、すなわち都市であればセンサ周辺に存在するPoint of Interests(公共交通機関や商業施設など)のカウント情報などを利用することで、空間的に離れているが周辺環境の類似したセンサを発見

できるのではないかという着想から、位置情報とメタ情報を低次元空間に埋め込み、特徴量抽出する技術を提案した。

#### サブテーマ B「時間解像度の異なるデータから特徴抽出する空間畳み込み技術の開発」

センサから一定時刻毎に観測される時系列データから、ある時刻での傾向把握を目的とした特徴量抽出を行う技術として、時間畳み込み手法を提案した。この際には、信号処理分野で研究されている一次元時間畳み込み技術を用いた。この技術は、あらかじめ定めた時間窓に対する特徴量抽出、つまり様々な周波数帯域に対する積分器や微分器をデータから学習するものであり、学習型のフィルタバンクとみなすことができる。都市データに含まれる周期性を利用するために、例えば観測データと観測時刻情報を同時に入力する時間畳み込みを行うことで、データ解析に有効な特徴量の抽出が可能であると確認された。

#### サブテーマ C「時空間同時畳み込み技術による時空間超解像」

上述の研究テーマ A および B から得られた空間と時間における畳み込み技術を組み合わせることで、時空間畳み込み技術の提案を行った。空間畳み込みと時間畳み込みを交互に繰り返すことで、時空間データの空間内挿に有効な特徴量の抽出が可能となった。まず、本技術を用いて単一種類の時空間データの空間内挿実験を行った結果を発表する予定である。また、国際会議への投稿を予定している。

本技術は、空間・時間解像度の不一致を前提としているため、異種低解像度時空間データからの特徴量抽出にも直接の使用が可能である。現在まで、同一地域を観測した空間解像度の異なるデータの時空間データを用いた超解像実験を行うために、ウェブを利用したデータの収集と事前データ処理を終えた。具体的には、オープンデータとして利用可能なニューヨーク市内のシェアバイクの貸出・返却数データ、タクシー乗降履歴データに加えて、これらのデータと関係性を持つと考えられる複数位置の気象データである。これらと研究テーマ A で使用した観測位置のメタ情報を用いた実験を行い、本技術の実用性を検証している。本研究で整備したデータセットは、時空間データ解析分野におけるベンチマークとなりうるものであるため、今後、オープンデータとしての公開を行いたいと考えている。

### 3. 今後の展開

本研究では、時空間超解像という新たな技術課題を掲げ、その解決を行うために時空間畳み込み技術の研究を行った。本技術は、都市内部で観測されるデータのみならず、都市の外部、例えば人工衛星などから得られるデータの解析、あるいは内外で得られたデータの融合解析への応用が可能な汎用的なものである。そのため、都市や環境の状態把握や予測に向けた、AI/IoT 技術の社会実装に貢献しうる可能性を持つと考える。今後は、様々な組織・企業との共同研究の機会を活かし、複数の低解像度の異種時空間データの有効活用を試みていきたい。また、今回開発した技術のソースコードや、収集したデータをオープンソース化することにより、学術分野での技術や課題意識の普及を推し進めていく。

#### 4. 自己評価

ACT-I 期間の研究を通して、新たに掲げた時空間超解像という課題の解決に向けて、時空間畳み込み技術の開発を行った。空間内挿実験での性能評価結果から、当初掲げた目的は概ね達成されたと考える。この際、ACT-I に参加している研究者やアドバイザーの先生たちとのディスカッションから新たな着想を多数得られ、研究遂行に役立てることが出来た。また、ACT-I を基点として、時間や空間の構造に注目した新たな研究テーマの発見や、共同研究、異分野の交流の糸口が生まれ、いくつかの成果が得られた。ただし、空間畳み込み技術の開発に想定外の時間が必要となり、異種データ解析が準備段階に留まった点は、今後のスケジューリングの課題としたい。研究の実施体制及び研究費執行状況は、概ね当初の計画通り行えた。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

該当なし

##### (2) 特許出願

該当なし

##### (3) その他の成果(主要な学会発表, 受賞, 著作物, プレスリリース等)

- ・ 竹内孝, 鹿島久嗣, 上田修功, “点群深層学習を用いた空間データ内挿”, 2020 年度人工知能学会全国大会, 熊本. [発表予定]
- ・ [招待講演] 竹内孝, “機械学習を用いたバイオリギングのデータ解析”, 新学術領域 生物移動情報学研究会, 長崎, 2019/11/11.
- ・ [招待講演] 竹内孝, “テンソル分解を用いたスパース時空間データ解析”, ミニシンポジウム「スパース推定の展開と土木工学」, 東京, 2019/10/15.
- ・ [最優秀論文賞] 越塚毅, 竹内孝, 松林達史, 澤田宏, “グラフを用いた NMF の地域分散高速化”, マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2019)シンポジウム, 福島, 2019/07/04.
- ・ Koh Takeuchi, Yuichi Yoshida, Yoshinobu Kawahara, “Variational Inference of Penalized Regression with Submodular Functions”, Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI), 2019 ,テルアビブ, イスラエル, 2019/06/23.
- ・ Koh Takeuchi, Hisashi Kashima, Naonori Ueda, “Angle-based Convolution Networks for Extracting Local Spatial Features”, 32nd Annual Conference on Neural Information Processing Systems Spatiotemporal Workshop, モントリオール, カナダ, 2018/12/07.