

研究終了報告書

「リライアブルな意思決定のための時空間因果推論モデルの研究」

研究期間：2020年10月～2024年3月

研究者：竹内 孝

1. 研究のねらい

本研究は、膨大な時空間データの空間的な偏りによって生じる、推論の歪みの重要課題を解決し、高信頼な予測を行い、リライアブルな社会での意思決定に役立つ時空間因果推論モデルの実現を目指す。具体的には、因果推論技術を空間データに対応するよう拡張し、時空間情報を用いる機械学習技術と統合することで、新たなデータ駆動型予測モデルを開発する。そのために、重要な空間的な偏りの問題を解決する、空間偏在を補正したデータ分布の推定モデル、反事実仮想を用いた空間的介入効果推定のモデル、軌跡カーネルによる因果推論モデルの開発を行う。開発した技術をライドシェア、バイクシェア、人流誘導、スポーツ科学、動物生態学などの実問題へ応用することで、社会へのインパクトを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、社会におけるリライアブルな意思決定の実現を目指し、機械学習と因果推論の技術を融合させた新たなデータ解析手法である時空間因果推論モデルの研究を行った。具体的には、空間偏在を補正したデータ分布の推定モデル、反事実仮想を用いた空間的介入効果推定のモデル、軌跡カーネルによる因果推論モデル、実問題へ応用に取り組む中で、新たなデータ解析手法を開発すると同時に、他の組織や企業が現実世界から計測したデータの解析への展開に取り組んだ。学術と社会の双方の領域の発展に貢献しうる一定の成果が得られたと考える。結果として、14件の主要な論文発表、1件の特許出願、3件の主要な学会発表、5件の受賞、プレスリリースにより14件の報道掲載の成果を得た。

(2) 詳細

空間偏在を補正したデータ分布の推定モデル：

空間データから需要推定問題に取り組み、鉄道会社が保有する交通 IC カードシステムから計測されたビッグデータを用いた新駅開設に伴う需要予測を行った。本取り組みでは、1件の論文発表(土木学会 AI・データサイエンス論文集 2022)、1件の学会発表(人工知能学会全国大会 2022)、2件の受賞(土木学会 2022、人工知能学会 2022)の成果を得た。

反事実仮想を用いた空間的介入効果推定のモデル：

時空間データを空間グラフとして表現し、グラフニューラルネットワークと因果推論の介入効果推定法を組み合わせることで、空間的介入効果推定するモデルを提案し、人流誘導シミュレーションや購買活動におけるデータ解析を行った。本取り組みでは、3件の論文発表(ECMLPKDD2023, KDD2023, AAMAS2021)、1件の学会発表(人工知能学会

全国大会 2021)、1 件の受賞(人工知能学会 2021)の成果を得た。

軌跡カーネルによる因果推論モデル：

移動体の軌跡データから表現学習を行うことで、軌跡を分類するモデル、時系列グラフニューラルネットと因果推論を組み合わせることで移動体への介入効果を推定するモデルを提案し、スポーツ科学、動物生態学、自動運転車シミュレーションのデータ解析を行った。本取り組みでは、3 件の論文発表(SIGSPATIAL2021,2022,)、1 件の学会発表(人工知能学会)、1 件の受賞(SIGSPATIAL 2023 Best Poster Award)の成果を得た。

実問題へ応用：多種類の交通量データから将来の渋滞長を予測する問題に取り組み、時空間グラフニューラルネットワークと交通工学を組み合わせた予測モデルを提案した。警視庁交通管制センターが保有する東京都一般道で計測された交通ビッグデータを用いた解析に取り組んだ。本取り組みでは、2 件の論文発表(人工知能学会論文誌, KDD2023)、1 件の特許出願, 14 件の報道掲載の成果を得た。

その他には、階層クラスタリングの安定化、偏りのある集団からの公平な合意形成、動的モード分解を用いた交通データ解析、麻酔投与タイミング予測、電子車載システムへの攻撃検知、異なるドメインのデータを用いたリンク予測、AI と人間の解釈性の比較に関する研究を行った。本取り組みでは、6 件の論文発表(AIES2023, SIADS2022, ITSC2021, ECMLPKDD2021)、1 件の学会発表(人工知能学会全国大会 2023)、1 件の受賞(人工知能学会 2023)の成果を得た。

主要な研究成果：

・ Causal Effect Estimation on Hierarchical Spatial Graph Data, *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, pp. 2145–2154, 2023 年, Koh Takeuchi*, Ryo Nishida, Hisashi Kashima, Masaki Onishi

・空間上で実行される介入による結果の変化分を介入効果として推定する深層学習を提案し、新国立劇場からの**避難誘導を行う際に誘導地点の選択が数千人の観客の避難時間分布をどのように変化させるかを予測する問題**において、介入効果の予測精度を約 30% 改善した。

・移動者の位置と介入地点の空間的な関係性の抽出が困難であった。さらに過去の誘導地点の選択にバイアスが存在すると低頻度の誘導地点を選択した場合の予測が劣化する

る問題が存在した。

・階層的な構造を持つ空間グラフから多段階の特徴量抽出を行うことで移動者と介入の関係性を高効率に抽出可能にし、さらに選択バイアスを除去する正規化技術により予測の高精度化を実現した。

・ QTNet: Theory-based Queue Length Prediction for Urban Traffic, *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, pp. 4832–4841、

2023 年, Ryu Shirakami*, Toshiya Kitahara, Koh Takeuchi, Hisashi Kashima

・これから起きる渋滞の場所と長さを予測する新たな時空間深層学習を提案し、警視庁から提供されたデータを用いた、東京都内 1098 箇所の道路における「1 時間先の渋滞長を予測する実験」で、平均して誤差 40m 以下という高精度な予測を達成した。本技術は警視庁で本格導入された。

・深層学習による予測は高精度であるが解釈性が低く信頼性が低いことが実用上の問題となっていた。

・交通工学の知見に基づいて、混雑の変化と道路網の関係を学習する機能を提案することで、まず多数の道路の混雑状況と道路網のデータから、深層学習によって交差点ごとの平均速度と交通量を予測、次に交通工学で利用される交通流モデルを補正しつつ渋滞長を予測する 2 段階方式予測を行うことで、最先端の深層学習を使用しつつも交通工学の知見と合致する渋滞予測を実現した。交通量、平均速度、渋滞長の関係性を表す交通

流モデルを用いることで予測結果の一部の解釈が可能となった。

3. 今後の展開

AI分野は、いまだに急速な変化が続いており、本研究提案時とはまた大きく様変わりしており、現在では基盤モデルが世界中で注目を集めている。それにも関わらず、AI応用の重要課題である時空間データ解析と意思決定においては、複雑な時空間と意思決定の関係性理解の困難さが障害となり、未だ決定打となるAI技術は存在していない。そこで、本研究で開発した時空間因果推論モデルを継続的に研究し、さらに発展させていくことで、世界を驚かせ、そして社会で確実に役に立つような、信頼されるAI技術として育てていくことが肝要であると考えます。また、他の組織や企業とのオープンかつ信頼性の高いネットワークを今後も構築していくことで、データ科学の発展と技術的な応用の実践に取り組んでいきたい。

4. 自己評価

当初の予定を大きく上回る研究成果と社会インパクトを生み出したと考える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数： 17件

1. Travel Demand Prediction with Application to Commuter Demand Estimation on Urban Railways, *Proceedings of the ACM on Web Conference 2024 (WWW)*, 2024年, pp. 762–765, Yohei Kodama*, Yuki Akeyama, Yusuke Miyazaki, Koh Takeuchi
2. Estimating Counterfactual Treatment Outcomes Over Time in Complex Multiagent Scenarios, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024年, pp. 1–15, Keisuke Fujii*, Koh Takeuchi, Atsushi Kuribayashi, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Kazuya Takeda
3. 交通理論に基づいた深層学習による渋滞長予測, *人工知能学会論文誌*, 2024年 39巻 2号 p. C-N92_1-12, 2024年, 白上龍*, 北原稔也, 竹内孝, 鹿島久嗣
4. Estimating Treatment Effects Under Heterogeneous Interference, *Proceedings of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECMLPKDD)*, pp. 576-592, 2023年, Xiaofeng Lin*, Guoxi Zhang, Xiaotian Lu, Han Bao, Koh Takeuchi, Hisashi Kashima
5. Causal Effect Estimation on Hierarchical Spatial Graph Data, *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, pp. 2145-2154, 2023年, Koh Takeuchi*, Ryo Nishida, Hisashi Kashima, Masaki Onishi
6. QTNNet: Theory-based Queue Length Prediction for Urban Traffic, *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, pp. 4832-4841, 2023年, Ryu Shirakami*, Toshiya Kitahara, Koh Takeuchi, Hisashi Kashima

7. Mitigating Voter Attribute Bias for Fair Opinion Aggregation, *Proceedings of the 2023 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society (AIES)*, pp. 170-180, 2023 年, Ryosuke Ueda*, Koh Takeuchi, Hisashi Kashima
8. 非線形教師あり学習による地理空間情報と IC 定期データからの駅周辺における商圏人口分析, *土木学会 AI・データサイエンス論文集*. 3 巻 J2 号 pp. 848-853, 2022 年, 兒玉庸平*, 朱山裕宜, 宮崎祐丞, 竹内孝
9. Mitigating Observation Biases in Crowdsourced Label Aggregation. *Proceedings of 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 1171-1177, 2022 年, Ryosuke Ueda*, Koh Takeuchi, Hisashi Kashima
10. Estimating counterfactual treatment outcomes over time in multi-vehicle simulation, *Proceedings of the 30th International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL)*, pp. 1 - 4, 2022 年, Keisuke Fujii*, Koh Takeuchi, Atsushi Kuribayashi, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Kazuya Takeda
11. Discriminant Dynamic Mode Decomposition for Labeled Spatio-Temporal Data Collections. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems (SIADS)*, vol. 21, Iss. 2, pp. 1030-1058, 2022 年, Naoya Takeishi*, Keisuke Fujii, Koh Takeuchi, Yoshinobu Kawahara
12. Predicting Anesthetic Infusion Events Using Machine Learning. *Scientific Reports*, vol. 11, 23648, 2021 年, Naoki Miyaguchi*, Koh Takeuchi, Hisashi Kashima, Mizuki Morita, Hiroshi Morimatsu
13. Fréchet Kernel for Trajectory Data Analysis, *Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL)*, pp. 221-22, 2021 年, Koh Takeuchi*, Masaaki Imaizumi, Shunsuke Kanda, Yasuo Tabei, Keisuke Fujii, Ken Yoda, Masakazu Ishihata, Takuya Maekawa
14. In-Vehicle Network Attack Detection Across Vehicle Models: A Supervised-Unsupervised Hybrid Approach. *Proceedings of 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp. 1286-1291, 2021 年, Shu Nakamura*, Koh Takeuchi, Hisashi Kashima, Takeshi Kishikawa, Takashi Ushio, Tomoyuki Haga, Takamitsu Sasaki
15. Inter-domain Multi-relational Link Prediction. *Proceedings of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECMLPKDD)*, pp. 285-301, 2021 年, Luu Huu Phuc*, Koh Takeuchi, Seiji Okajima, Arseny Tolmachev, Tomoyoshi Takebayashi, Koji Maruhashi, Hisashi Kashima
16. Crowdsourcing Evaluation of Saliency-Based XAI Methods. *Proceedings of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECMLPKDD)*, pp. 431-446, 2021 年, Xiaotian Lu, Arseny Tolmachev, Tatsuya Yamamoto, Koh Takeuchi, Seiji Okajima, Tomoyoshi Takebayashi, Koji Maruhashi, Hisashi Kashima
17. Grab the Reins of Crowds: Estimating the Effects of Crowd Movement Guidance Using Causal Inference. *Proceedings of International Conference on Autonomous Agents and*

MultiAgent Systems (AAMAS), pp. 1290-1298, 2021 年, Koh Takeuchi*, Ryo Nishida, Hisashi Kashima, Masaki Onishi

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1件(特許公開前のも含む)

1	発 明 者	白上龍, 北原稔也, 鹿島久嗣, 竹内孝
	発 明 の 名 称	交通情報予測装置, 交通情報予測方法および交通情報予測プログラム
	出 願 人	住友電工システムソリューション株式会社
	出 願 日	2023 年 6 月 8 日
	出 願 番 号	特願 2023-094956
	概 要	交通情報の予測結果を容易に取得し、かつ予測結果の精度を高めることが可能な交通情報予測装置、交通情報予測方法および交通情報予測プログラム
2	発 明 者	
	発 明 の 名 称	
	出 願 人	
	出 願 日	
	出 願 番 号	
	概 要	

(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)

主要な学会発表 (3 件)

1. 階層クラスタリングの安定化, 人工知能学会全国大会, 2023 年, 原聡, 竹内孝, 吉田悠一
2. 地理空間情報と IC 定期券データを用いた教師あり学習による駅商圈の異方的推定, 人工知能学会全国大会, 2022 年, 兒玉庸平, 朱山裕宜, 宮崎祐丞, 竹内孝
3. 因果推論を用いた群衆移動の誘導における介入効果推定, 人工知能学会全国大会, 2021 年, 竹内孝, 西田遼, 鹿島久嗣, 大西正輝

受賞 (5 件)

1. 人工知能学会、全国大会優秀賞、2023 年
2. International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL)、Best Poster Award、2022 年
3. 土木学会 構造工学委員会、AI・データサイエンス奨励賞、2022 年
4. 人工知能学会、全国大会優秀賞、2022 年
5. 人工知能学会、全国大会優秀賞、2021 年

プレスリリース・報道掲載 (15 件)

1. 京都大学、住友電気工業株式会社、住友電工システムソリューション株式会社、JST よりプレスリリース (2023/8/8)「渋滞長を予測する時空間 AI「QTNN」を開発— 東京都の 1 時間先の渋滞長予測で誤差 40m 以下を達成—」
2. 日刊自動車新聞 (2023/8/8、紙面 1 面・電子版)「住友電工子会社と京大、渋滞予測の新技术を開発 AI と交通工学で高精度の予測実現」
3. 電気新聞 (2023/8/8、4 面)「AI で渋滞を精密予測 住友電工系 京大など 実運用へ評価試験」
4. 月刊事業構想 (2023/8/8、電子版)、「1 時間先の渋滞長を高精度で予測 京大と住友電工システムが AI 開発」
5. 大学ジャーナルオンライン (2023/8/15、電子版、NewsPicks)「今後起きる交通渋滞を高精度に予測する、時空間 AI 技術「QTNN」開発」
6. 科学新聞 (2023/8/25、紙面)、「渋滞長を正確に予測する AI、京大と住友電工システムが開発」
7. 株式会社官庁通信社 (2023/9/4、電子版)「渋滞長を予測する AI「QTNN」開発 — 東京都の 1 時間先の渋滞長予測で誤差 40メートル以下に—」
8. Science Japan (2023/9/20、電子版)「Kyoto University and Sumitomo Electric Systems Solutions develop AI for accurate traffic jam prediction: High accuracy mapping with less than 40m of error for one hour in advance」
9. 客観日本 (2023/10/2、電子版)「京都大学和住友电工系统开发出可准确预测交通拥堵长度的 AI, 实现“误差小于 40 米”的高精度预测」
10. サイエンスポータル (2023/10/5、電子版), Yahoo!ニュース、マイナビニュース、Lab BRAINS「交通渋滞の長さを精度良く予測、京大などが AI 開発 警視庁のビッグデータで学習」
11. 現代化学 2023 年 10 月号 (78 ページ)「渋滞を正確に予測する AI」
12. 子供の科学 2023 年 11 月号 (2023/10/10)「1 時間先の渋滞を正確に予測できる！」
13. 日経新聞 (2023/10/19、1 面、電子版)「AI 使い信号制御、都内の渋滞対策 警視庁が全国初導入」
14. JSTnews 11 月号 NEWS&TOPICS「交通渋滞を正確に予測する AI を開発警視庁データで学習、1 時間先の誤差 40 メートル以下」
15. 日経新聞 (2023/12/27、紙面、電子版)「住友電工、AI で渋滞予測 京大と開発、物流 24 年問題に対策」