

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00141

研究課題名(和文) 長期近接遭遇特性を反映する標準移動モデルの開発と遅延耐性通信の安定性評価

研究課題名(英文) Development of Standard Mobility Model Reflecting Long-term Proximal Encounter Patterns and Stability Evaluation of Delay Tolerant Networking

研究代表者

藤原 明広 (Fujihara, Akihiro)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70448687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：人の移動や近接遭遇の統計的な性質を再現する数理モデルの研究が行われている。また、人の移動データと移動モデルを同化する研究も行われているが、データ自体が非常に少なく十分な学習が行えない状況でもデータと移動モデルを同化する手法を検討する必要がある。機械学習の一つの分野として強化学習があるが、これを活用した人の移動モデルの生成法については十分に検討されていない。本研究では強化学習を用いて人の移動データを学習することで、人の移動モデルを自動生成する手法について研究した。その結果、人の移動データの分析から知られている帰還者の移動パターンを生成する移動モデルが自動生成できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果より、災害時の人の移動のように、学習するデータが非常に少ない状況における人の移動モデルの自動生成を行うための土台となる枠組みを構築できた。これに加えて人の移動から報酬モデルを自動生成する枠組みを構築することにより、現実の人の移動パターンに近い移動モデルを生成することができ、これを用いた様々な社会シミュレーションを行うことが可能になると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Mathematical models that reproduce the statistical properties of human mobility and encounter patterns have been studied. Some researches have also been undertaken to assimilate human mobility data and human mobility models. But, it is necessary to consider a method to assimilate the data and the model even when the amount of data itself is very small and sufficient learning cannot be performed. Reinforcement learning is known as one of machine learning methods, but a method of generating a human mobility model using reinforcement learning has not been sufficiently studied. In this study, I studied a method to automatically generate a human mobility model by learning human mobility data by reinforcement learning. As a result, it was found that the method tends to generate a returner's mobility model.

研究分野：人の移動

キーワード：人の移動 確率モデル 強化学習 ネットワーク科学

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 人の移動や近接遭遇の統計的な性質を再現する数理モデルの研究が行われている。また人の移動に関する様々なデータを利用することで、人の移動や人同士の近接遭遇パターンの統計的性質が分かってきている。携帯電話の通信履歴やGPSデータ等を用いた研究により、人の移動パターンは帰還者 (Returner) と旅人 (Explorer) の二種類に分類可能であることが分かっている。この性質を反映した移動モデルの研究も行われており、人がよく行く場所へ定期的に帰る移動パターンを表現するホームシック・レヴィ歩行も提案されている。これらの単純な移動モデルは少数のパラメータを与えることで、確率的な移動パターンを生成することができる。しかしデータからモデルのパラメータを決定する汎用的な方法論は確立されていない。

人の移動データと移動モデルを同化する研究も行われている。パーティクル・フィルタを用いた災害時の人流を推定する手法の研究が行われている。またデータ自体が非常に少なく、十分な学習が行えない状況でのデータ同化も検討する必要がある。一方、機械学習の一つの分野として強化学習がある。人の移動パターンの統計的性質を教師なし学習することで移動モデルを生成する研究は検討されているが、強化学習に基づいた人の移動モデルの生成法については十分に検討されていない。

(2) ネットワーク科学の研究により、人間の交友関係ネットワークはスケールフリー性があることが知られている。この性質を移動モデルと近接遭遇による交友関係の生成によって説明しようとする研究が行われている。例えば、移動を友人や知り合いに会いに行くことと捉え、移動先で確率的に周囲の人達と交友関係ネットワークを構築することを確率を用いて数理モデル化する研究が行われている。しかし、このような単純なモデル化のみでは、交友関係ネットワークの構造にスケールフリー性が現れないことが知られている。

### 2. 研究の目的

(1) 強化学習を用いた人の移動モデルの生成法について検討した。人の移動データとその報酬データに基づいたシミュレーション環境を構築し、その上でエージェントが効率的な報酬の獲得を強化学習することで、次に移動する目的地を実データに基づいて選択できるようにモデル化する。この方法により、人の移動データと移動モデルの同化が可能であることを示す。また、最終的に生成される移動モデルがどのような性質を持っているかも検証する。

(2) 人の移動と人同士の近接遭遇によって交友関係ネットワークを動的に生成する移動モデルについて様々なモデルを検討することで、スケールフリー性を満たすネットワーク構造を生成する仕組みの本質について検証した。スケールフリー性は交友関係を保持している人数の格差を意味していることから、人の移動と近接遭遇からネットワーク構造に格差が生まれる原因を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 人の移動データとして、サンフランシスコにおけるタクシーの移動データを利用した。また、客の乗車の有無、運賃データも利用することで、客の乗車位置分布や運賃報酬とガソリン代によるコストを計算し、強化学習を行う為の報酬モデルを構築した。次に移動データに基づいた移動を確率的に選択する移動モデルのシミュレーションの枠組みを構築した。この枠組みに従っ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

て、エージェントが強化学習を行いながら目的地の選択を学習していく。強化学習のアルゴリズムは、 $\epsilon$ -greedy法を用いた。このシミュレーション過程で、エージェントは周囲の環境や報酬モデルから影響を受けて目的地の選択を繰り返し行う。強化学習を十分に長い時間行った結果として、最終的な移動モデルを出力する。探索パラメータを変更することで、探索行動の度合いが報酬の獲得に与える影響について比較した。また、得られた移動モデルを人の移動パターンの統計的な性質の既存研究と比較することで、その性質についても考察した。

(2) 人同士が近接遭遇する頻度における統計的な性質を再現するモデルとしてホームシック・レヴィ歩行モデルが提案されている。また移動モデルから人間の交友関係ネットワークを生成する移動モデルも提案されている。これらの移動モデルを組み合わせたシミュレーションを行うことで、交友関係ネットワークのスケールフリー性を再現する必要条件を検討した。具体的には、ホームシック・レヴィ歩行モデルで定期的に戻る拠点の位置の分布を変化させたり、過去の交友関係の経験が未来の交友関係の作りやすさに影響する経験値を導入するなど、様々な条件でシミュレーションを行い、その結果を比較した。

### 4. 研究成果

(1) 強化学習アルゴリズムにおける探索パラメータを変化させることで、単位時間あたりの獲得報酬の時間変化や総獲得報酬について比較した。その結果、短期的には探索パラメータの値が小さい時の方が報酬が多くなる傾向にあるが、長期的には探索パラメータの値が0、つまり探索による気まぐれな行動を全く行わない方が報酬が多いことが分かった。これはタクシーが客を乗せて移動する行動自体に暗黙の探索になっている、つまり客の目的地が探索ポイントに対応していることが理由であることも分かった。また人の移動データの分析結果から、人の移動は帰還者 (Returner) と旅人 (Explorer) に分かれることが知られているが、今回生成した移動モデルは帰還者に対応するものであることが分かった。以上のことから、今回の強化学習に基づいたデータと人の移動の数理モデルの同化が適切に行えていることが確認できた。

今回の研究でタクシーの移動データを用いた理由は、報酬モデルの構築が容易である為であるしかし実際には、人の移動全てにおいて運賃やガソリン代のように分かりやすい報酬の定量化が行えるかどうか分からない。一方、人の移動は短期的または長期的な報酬を期待したものであることも否定できない。例えば、学校や会社に移動するのは資格や給与所得のような長期的または短期的報酬を期待した行動とも考えられなくない。また、ある場所へ移動することで得られる報酬以外にも、特定の人と会うことで得られる報酬というもの有り得る。これらの報酬のモデル化と今回の強化学習による移動モデルの生成法を組み合わせることができれば、将来的には災害時のような移動データが少ない状況でも、強化学習によって尤もらしい人の移動モデルを生成し、災害シミュレーションをより現実的なシナリオで行えることが期待できる。

(2) モデルにおける様々な条件を検討した結果、殆どの場合でスケールフリー性がないことが分かった。これは人によって移動したり他の人と遭遇する機会のオーダーに大きな差がないことが原因であることが分かった。しかし、近接遭遇時の交友関係の作りやすさとしての経験値を導入することで、ネットワークの作りやすさに格差を与えた場合においてスケールフリー性が現れることが確認できた。以上のことから、移動を厭わずに交友関係を構築する経験値の高い人が社会ネットワークのスケールフリー性を生み出している原因の一つになっていることが分かった。この知見を強化学習を用いた移動モデルの生成法における特定の人と会うことで得られる報酬の

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

モデル化に応用することで、社会ネットワークのデータとも同化した移動モデルを強化学習によって生成することも期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 A. Fujihara	4. 巻 -
2. 論文標題 PoWaP: Proof of Work at Proximity for a crowdsensing system for collaborative traffic information gathering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Internet of Things	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.02.006">https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.02.006</a>	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 T. Ohtsuki, S. Tanimoto, M. Sekiyama, A. Fujihara, H. Yamamoto	4. 巻 382
2. 論文標題 Pareto-Zipf law in growing systems with multiplicative interactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1456-1459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.04.003">https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.04.003</a>	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Akihiro Fujihara	4. 巻 13
2. 論文標題 Proximity-Based Service: An Advanced Way of Extending Human Proximity Awareness	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Smart Sensors Networks: Communication Technologies and Intelligent Applications	6. 最初と最後の頁 293-307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-12-809859-2.00017-6	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Jinattaporn Khumsri, Akihiro Fujihara	4. 巻 16
2. 論文標題 Finding Hidden Location Patterns of Two Competitive Supermarkets in Thailand	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.16.011017	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Yusuke Sakai, Akihiro Fujihara	4. 巻 8
2. 論文標題 Evaluation of How Methods for Creating People Flow Data Affect Performance of Epidemic Routing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 INCoS 2017: Advances in Intelligent Networking and Collaborative Systems	6. 最初と最後の頁 367-379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-65636-6_33	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 深江 政太, 藤原 明広, 巳波 弘佳	4. 巻 117
2. 論文標題 モビリティを考慮した人間関係ネットワーク生成モデル	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Technical Report	6. 最初と最後の頁 87-92
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 -

1. 著者名 藤原 明広	4. 巻 117
2. 論文標題 ブロックチェーン技術を用いた分散型交通情報システムの提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Technical Report	6. 最初と最後の頁 291-296
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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 A. Fujihara
2. 発表標題 Proposing a System for Collaborative Traffic Information Gathering and Sharing Incentivized by Blockchain Technology
3. 学会等名 The 10th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoto Fukae, Akihiro Fujihara, Hiroyoshi Miwa
2. 発表標題 Model for Generation of Social Network Considering Human Mobility
3. 学会等名 The 10th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Sakai, Akihiro Fujihara
2. 発表標題 Evaluation of How Methods for Creating People Flow Data Affect Performance of Epidemic Routing
3. 学会等名 The ninth International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 深江 政太, 藤原 明広, 巳波 弘佳
2. 発表標題 モビリティを考慮した人間関係ネットワーク生成モデル
3. 学会等名 情報ネットワーク研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原 明広
2. 発表標題 ブロックチェーン技術を用いた分散型交通情報システムの提案
3. 学会等名 情報ネットワーク研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

藤原明広のウェブページ ( Akihiro Fujihara 's Webpage )  
<https://sites.google.com/site/akihirofujihara/>

千葉工業大学 教員情報  
<http://www.lib.it-chiba.ac.jp/ci thp/KgApp?kyoinId=ymdbyggoggy>

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
研究協力者	巳波 弘佳  (Miwa Hiroyoshi)	関西学院大学・理工学部 情報科学科・教授	