

# 博士学位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

第 49 号

2022 年 3 月

京 都 産 業 大 学

は し が き

本号は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条の規定による公表を目的とし、令和3年3月19日および20日に本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査結果の要旨を収録したものである。

学位番号に付した甲は学位規則第4条第1項によるもの（いわゆる課程博士）であり、乙は同条第2項によるもの（いわゆる論文博士）である。

---

---

# 目 次

---

---

## 課程博士

1.	<small>キタジマ</small> 北島 <small>ヒロミ</small> 浩三	[博士 (経済学)]	1
2.	<small>タケナカ</small> 竹中 <small>コウヘイ</small> 昂平	[博士 (経済学)]	5
3.	<small>オガワ</small> 小川 <small>ヒロコ</small> 寛子	[博士 (マネジメント)]	9
4.	<small>スギハラ</small> 杉原 <small>コウイチロウ</small> 功一郎	[博士 (先端情報学)]	14
5.	<small>カサイ</small> 葛西 <small>アヤノ</small> 綾乃	[博士 (生命科学)]	17
6.	<small>ヤマシタ</small> 山下 <small>リュウジ</small> 龍志	[博士 (生命科学)]	20

氏名（本籍）	杉原 功一郎（京都府）
学位の種類	博士（先端情報学）
学位記番号	甲先 第3号
学位授与年月日	令和4年3月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	Nomadic Lévy Walk とその応用に関する研究
論文審査委員	主 査 林原 尚浩 准教授
	副 査 秋山 豊和 教授
	〃 荻原 剛志 教授

## 論文内容の要旨

ランダムウォーク~(Random Walk)は計算機科学分野においても重要なトピックとして注目されている。例えばP2Pネットワークの探索、ウィルスの拡散予測シミュレーション、人流解析、無線センサネットワークや遅延耐性ネットワークにおけるデータの収集やメッセージ配送を目的とした移動ノードのルーティングなどが挙げられる。特に、Lévy Walkは人間の狩猟行動や動物の採餌行動のモデルとされており、計算機科学分野のみならず物理学や生物学、医学などの分野においても応用されており注目されている。さらに、それぞれの用途に応じた様々なバリエーションが存在し、その中の一つにHomesick Lévy Walkがある。

Homesick Lévy WalkはLévy Walkの動作に加え、拠点という概念を導入して拠点へ一定の確率で回帰する行動を加えた行動モデルである。これによって人流解析における人と人との遭遇確率がべき乗則に従うという特性を持ち、より実際の状況に近い人流解析のシミュレーションが可能となった。一方で、拠点への回帰を行うことで移動ノードの行動範囲が制限され、本来Lévy Walkが用いられてきた広範囲におけるブラインド探索の性能が大幅に低下することが報告されている。拠点への回帰行動は定期的にバッテリーを充電するような移動ノード（Electric Vehicleなど）などにも応用することが出来るため有用であり、その場合、拠点回帰行動を残したままHomesick Lévy Walkの広範囲探索性能を向上させることが必要である。

本論文では、まず(i) Homesick Lévy Walkを拡張させたNomadic Lévy Walkを提案し、Unit Disk Graph上においてシミュレーションを行い、その特徴を明らかにしている。また、(ii) その応用事例についてシミュレーションを行うことで有効性を実証している。Homesick Lévy Walkが拠点を固定しているが、Nomadic Lévy Walkは拠点を与えられた確率に基づいて移動させることによって移動ノードの広範囲の探索性能を向上させている。また、次回の拠点候補の決定に「拠点再配置戦略」を導入し、その戦略に基づいて拠点を移動させるという特徴がある。(i)においては、Nomadic Lévy Walkの拠点再配置戦略ごとのグラフの被覆割合（カバー率）などの基本性能に関する結果を示している。また、Lévy Walk、Homesick Lévy WalkとともにNomadic Lévy Walkの比較を行い、これらの動作モデルに起因する違いについて考察している。(ii)においては、無線センサネットワークにおける移動ノードによるデータ収集や遅延耐性ネットワークにおけるメッセージフェリーを用いたメッセージ配送において、それぞれ移動ノードやメッセージフェリーのルーティング手法としての有効性についてシミュレーションを行って実証している。

## 論文審査結果の要旨

ランダムウォークの一種であるLévy Walk（レヴィ・ウォーク）はコンピュータ科学のみならず、生物学、物理学、医学などの様々な分野で応用されており、特に、生物の行動パターンの統計的な性質に対する近似が報告されているため注目されている。また、ブラインド探索において優れた性能を示すことも報告されており、コンピュータ科学的な応用も活発に行われている。

本学位論文では、Lévy Walkの一種であるHomesick Lévy Walkを拡張したNomadic Lévy Walkを提案し、その性質について有限グラフ上のシミュレーションを行うことで明らかにしている。Homesick Lévy WalkはLévy Walkに基づく行動パターンが本来の人と人が遭遇する確率と乖離していることに着目し、人間の生活パターンにより近い、「拠点」を中心とした行動パターンをLévy Walkに取り入れている。しかしながら、Homesick Lévy Walkで設定される拠点は固定のため、本来、Lévy Walkが持つ広範囲の探索性能を限定してしまうという欠点を持っている。一方で、拠点への回帰という行動パターンは、バッテリー搭載車などが充電ステーションへ帰還するような行動パターンなどと類似しており、幅広い応用が考えられる。そのため、本論文では、拠点への回帰行動と広範囲の探索性能を両立するNomadic Lévy Walkを提案している。

本学位論文は、二部構成となっており前半部分で幾何学的性質を持つ有限グラフ上でのNomadic Lévy Walkのアルゴリズムに関する提案とユニットディスクグラフ上でのシミュレーションによりグラフのカバー率やリンク密度との相関関係について実証している。また、後半部分はNomadic Lévy Walkを無線センサネットワークにおけるセンサノードの収集や探索を行う際の移動ノードの経路制御アルゴリズムとして、また遅延耐性ネットワーク（DTN）におけるメッセージフェリーの経路制御アルゴリズムとしての有効性を検証している。

Nomadic Lévy Walkは、Homesick Lévy Walkの特徴に加え、拠点を与えられた一定の確率 $\gamma$ に基づいて移動させることと、拠点の移動先を与えられた「戦略」に基づいて決定するという特徴

を加えている。これにより、拠点へ一定の確率で帰還しながら、拠点とともに移動するため、広範囲な探索やDTNなどにおけるメッセージフェリーなどの経路制御手法としても用いることができる。

Nomadic Lévy Walkによって行動する移動エンティティ (Agent) は拠点から出発し、Lévy Walkの行動パターンに基づいて行動する。また、Agentは一定の確率 $\alpha$ によって再び拠点へ戻る。拠点へ戻った際に確率 $\gamma$ に基づいて拠点を他の位置へ移動させる。次の拠点を決定するための戦略を、「拠点再配置戦略」と呼んでおり、本論文では以下の拠点再配置戦略を提案した。

- Lévy Walk Strategy (LWS): 次の拠点位置については、過去の情報を持たず、Lévy Walkの移動先決定アルゴリズムに基づいて決定するステイトレスな戦略。
- Reverse Prevention Strategy (RPS): 次の拠点位置については、過去の一定数の拠点位置を考慮し、過去の拠点位置とは異なる方向へ拠点を移動するための戦略。
- Clustering-based Reverse Prevention Strategy (CRPS): 次の拠点位置については、過去の一定数の拠点位置を階層型クラスタリングアルゴリズムによってクラスタ化し、そのクラスタから一定の距離を保つように拠点を移動するための戦略。

シミュレーション結果より、Nomadic Lévy Walkはユニットディスクグラフ上でLévy Walkに相当するカバー率を示し、無線センサネットワークやDTNのメッセージフェリーの経路制御アルゴリズムとしても有効性があることを示している。特に、CRPS戦略ではユニットディスクグラフのリンク密度が低い場合でも高いカバー率を示していることを実証している。これは、災害時に分断された道路網などを想定したときに同様の状況になることから、災害時の通信手段としてNomadic Lévy Walkを用いたメッセージフェリーを活用できることを示唆している。

本学位論文では、Nomadic Lévy Walkという新たな行動パターンを提案し、グラフ上での性能を明らかにしている。また、Nomadic Lévy Walkの有効性を検証するために、無線センサネットワークにおけるセンサノードのカバー率やDTNにおけるメッセージ配送率などに関するシミュレーションを行っており、その結果として、バッテリー駆動の自動走行車が電源車 (拠点) との組み合わせで動作するシステムにおいては経路制御アルゴリズムとして有用であることを確認している。つまり、学位論文として提案、実装、評価、実用性検証という一連の流れを網羅 (self-contained) しており、学術的な価値はあると考えている。また、学位論文の内容については査読付き国際会議6報 (採録決定含む)、英文論文誌2報に採録されており、国際的な評価も得られている。

以上のことから、博士学位論文審査は合格とする。