

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11940

研究課題名（和文）不確実ネットワークにおける時間制約の下での重要ノード・リンク抽出に関する研究

研究課題名（英文）Extraction of Important Nodes/Links under Time Constraints in Uncertain Networks

研究代表者

大原 剛三（Ohara, Kouzou）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：30294127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、広域道路ネットワークにおける災害時避難問題などを前提に、一定の制限時間の下での特定の目標ノード集合への可到達性（連結性）に基づいたノード・リンクの重要性指標を定義し、その指標の下で重要な既存もしくは潜在的なノード・リンクを効率的に同定する手法を提案した。具体的には、ネットワーク中のリンクが一定の確率で機能しなくなる可能性をもつ大規模不確実ネットワークにおける重要リンクの同定法、大規模ネットワークにおける潜在的な重要リンクの同定法を提案し、その枠組みをコンビニエンスストアチェーンのような競合店舗グループの出店・閉店ダイナミクスの分析に応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究課題における大きな軸として我々が提案した時間制約付き目標ノード指向中心性指標は、避難施設などの特定のノード集合に一定の制限時間内に到達できるノード数に基づいており、災害時避難問題、緊急搬送問題、情報拡散問題などの実タスクに対して現実的な解を提供する重要な指標となる。そして、その指標の下で完全・不完全ネットワーク中のノード・リンクを順位づけることで施設配置、道路整備などの社会的施策に対する指針の提供に貢献し得る技術と言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we defined novel centrality measures of nodes or links based on reachability (connectivity) to a specific set of target nodes under a certain time constraint, and proposed methods to efficiently identify existing or potential nodes/links that are important in the centrality measures. The evacuation problem in a disaster is a typical example of the application tasks the proposed methods can be applied to. Specifically, under the presence of the time constraint, we proposed a method for identifying important links in a large-scale uncertain network in which some links may fail to function with a certain probability and a method for identifying potentially important links in a large-scale network. Furthermore, we applied this framework to the analysis of store opening and closing dynamics of competing shop groups such as convenience store chains.

研究分野：知能情報学

キーワード：時間制約付き目標ノード指向中心性指標 大規模ネットワーク 不完全ネットワーク 重要リンク抽出  
重要ノード抽出

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究が対象とする大規模複雑ネットワークは、広域道路ネットワークやインターネット上の社会ネットワークを含め、実世界の様々な分野において重要な役割を果たしており、近年、その構造的、機能的特徴の分析に関する研究が盛んに行われている。それらの分析には、従来から中心性指標と呼ばれる評価指標が多用されてきた。たとえば、媒介中心性は、ネットワーク中の任意の 2 ノード間の最短経路が通る回数の多いノードもしくはリンクほど高い値となるように定義される。また、近年では、社会ネットワーク上での情報拡散という観点から、対象ノードから発信された情報が伝わるノード数の期待値に相当するノード期待影響度などの指標も提案されている[引用文献]。しかし、これらの多くは固定的なネットワークを対象として定義されているが、実世界の問題を前提とした場合、その定義は必ずしも十分ではない。たとえば、災害時の避難問題を考えた場合、道路ネットワーク上のすべての道路が災害時に通行可能とは限らない。そのため、現実問題を想定した場合、リンクもしくはノードが一定の確率で機能しなくなる不確実グラフ(uncertain graph)により対象ネットワークを表現することが必要と言える。不確実グラフ上での中心性指標は、一般的には対象グラフを確率モデルで表現し、その確率モデルの下での期待値として定義される。しかし、その期待値を厳密に求めるには、モンテカルロ法を用いて確率的に生じ得るネットワーク構造(サンプル)を膨大な数だけ列挙する必要があるが、実世界中の大規模複雑ネットワークにはそのまま適用することは困難である[引用文献]。

一方、現実問題の多くは、対象ネットワークのもつ性能を基準に構成要素となるノード・リンクの重要性を議論する。たとえば、災害時避難問題では、一定の時間内に特定の避難施設に避難できる人数がその問題におけるネットワークの性能の基準となり得る。また、傷病者の緊急搬送問題では、一定の時間内に特定の救急施設に搬送できる世帯数がその基準となり得る。すなわち、「一定の時間内」という時間制約の下、「特定の」目標ノードに到達できる、もしくは目標ノードから到達できるノード数がネットワーク性能の基準となり、そのネットワーク性能を大きく阻害する、もしくは大きく改善するノード・リンクほど重要と考えることができる。しかしながら、「特定のノード」を考慮したグループ中心性の概念は理論的には提案されているものの、不確実ネットワークを対象に時間制約も考慮したネットワーク性能に基づいてノード・リンクの重要性を定量的に評価する指標は存在しない。

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では、広域道路ネットワークにおける災害時避難問題やインターネット上の社会ネットワークにおける情報拡散問題などを前提に、ネットワーク中のノード・リンクが一定の確率で機能しなくなる可能性をもつ不確実ネットワークに対して、一定の制限時間の下での特定の目標ノード集合への可到達性(連結性)に基づいたノード・リンクの重要性指標を定義し、大規模かつ不確実な複雑ネットワークからその指標の下で重要なノード・リンクを一定の精度を保証しつつ効率的に同定する枠組みの実現、ならびに、現実タスクにおいて実際に同定されたノード・リンクがどのような特性をもつのかを明らかにすることを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では、先に挙げた目的を達成するにあたり、時間制約付き目標ノード指向中心性指標を定義したうえで、一定の時間制限の下での目標ノード集合への連結性を大幅に阻害する実在するノード・リンクを重要ノード・リンク、その連結性を大幅に改善することのできる追加ノード・リンクを潜在的な重要ノード・リンクとする。そのうえで、ノード・リンクが固定的な大規模ネットワークにおける各重要ノード・リンクの同定・抽出を基礎として、不確実ネットワークにおけるそれらの同定・抽出を試みる。また、不確実ネットワークに関しては、予測シミュレーション技術を利用した分析基盤を構築する。また、評価においては、多様な実ネットワークを利用し、特に、同定・抽出したノード・リンクの特性解析に関しては、広域道路ネットワーク、インターネット上の社会ネットワークなどに絞り、災害時避難問題、緊急搬送問題、情報拡散問題などのタスクを主に対象として分析する。

### 4. 研究成果

本研究における主要な研究成果は以下の通りである。

#### (1) 大規模不完全ネットワークにおける重要リンクの同定

大規模不完全ネットワークにおいて、目標ノード指向中心性指標が高い重要リンクを効率的に同定する手法を提案した。この手法では、所与のネットワークに対して確率的に一部のリンクが切断されたネットワークを複数サンプリングし、それらに対してグラフ理論におけるブリッジ同定手法を利用することで、効率的に潜在的な重要リンクを同定することを可能としている。その計算利用は、サンプリングするネットワーク数を  $H$ 、対象ネットワークのリンク集合を  $E$  としたとき、 $O(H \times |E|)$ となる。提案手法を電子メール送受信者ネットワーク、ワシントンの道路ネットワークという 2 つの実データに適用した評価実験では、従来の媒介中心性の同定と比較して 2~3 桁ほど少ない計算時間で目標ノード指向中心性指標が高い重要リンクを不完全ネットワークから同定できることを確認した。また、同定した重要リンクは、媒介中心性により同定で

きる重要ノードとは異なっており、特定の目標ノードに到達するという意味での重要なリンクは、従来の媒介中心性では必ずしも同定できないことを明らかにした。この成果は、国際ジャーナルである Intelligent Data Analysis にて発表している。

(2) 時間制約付き目標ノード指向中心性指標の下での大規模ネットワークにおける潜在的な重要リンクの同定

ここでは、大規模ネットワークにおいて時間制約付き目標ノード指向中心性指標の高い  $k$  本の潜在的な重要リンクを効率的に同定する手法を提案した。この研究では、ネットワーク上の各ノードに対して一定数の利用者（住人）の存在を仮定し、一定の時間制約の下で目標ノード集合のいずれかに到達できる人数を最大化することを目的とし、そのために最も効果の高い  $k$  本の潜在的なリンクを同定する。提案手法では、所与のネットワークでは課された制限時間内に目標ノードに到達できない人が潜在的なリンクの追加により移動時間が短縮されることで当該制限時間の下でも到達可能になる場合にのみ、目標ノード集合への到達人数の増加が生じる点に着目し、隣接するすべてのノード間の潜在的なリンクを探索するのではなく、制限時間内での目標ノード集合への到達可能人数を増加させる見込みのない潜在的なリンクを探索候補から除外することで、探索空間の大幅な枝刈りを実現している。実際の道路ネットワークを対象とした災害時避難問題、緊急搬送問題、消防活動問題に提案手法を適用した評価実験では、提案手法による枝刈りを導入しない場合と比較して、計算時間を約 2 桁削減できることを確認し、また、同定された潜在的なリンクの位置も直感的に説明可能な合理的なものであることを確認した。この成果は、大規模実ネットワークにおける時間制約が潜在的な重要リンクを同定するうえで重要になることを示す意義のあるものであり、国際会議 DS2020 で発表している。

(3) 空間ネットワークにおける競合店舗グループの出店・閉店ダイナミクスの分析

ここでは、時間制約付き目標ノード指向中心性指標の実問題への応用の 1 つとして、コンビニエンスストアチェーンのような競合する店舗グループの出店・閉店戦略の分析を行った。ここでは、複数の競合店舗グループを仮定し、それぞれが顧客シェアを最大化することを目的に、道路ネットワーク（空間ネットワーク）上で新たに開店すべき場所（ノード）、既存店舗を閉店すべき場所（ノード）を同定することを考える。また、ネットワーク上の各ノードには一定数の住人の存在を仮定し、定量化した各店舗に対する魅力度に基づいた来店確率から各店舗の来店者数の期待値を計算する。この魅力度を構成する指標の 1 つとして、店舗への移動時間の上限（時間制約）を設ける。提案手法では、この問題を時間制約付き目標ノード指向中心性指標の下での重要ノード同定問題ととらえ、出店・閉店により期待されるシェアの増減を各ノードの中心性指標として利用し、それらの位置を同定する。また、単位時間ごとに、ランダムに選択した店舗グループが既存店の閉店と新店の出店を行う動的確率モデルを構築した。国内 4 都市における道路ネットワークとその中でコンビニエンスストアチェーンの店舗位置、ならびに、国勢調査人口統計データに基づく各ノードへの住人割り当てを行ったデータを利用した評価実験では、提案手法における中心性指標による既存店舗位置の全ノードにおける順位が、時間制約を考慮しない既存の gravity model による順位と比較して高くなることから、時間制約を考慮することで既存モデルよりも合理的な店舗位置を同定できることを確認した。また、各チェーンの総店舗数を固定したうえでの動的モデルによる出店・閉店シミュレーションを通して、合理的な移動時間の上限が約 10 分となり、時間経過とともに各グループのシェアが微増する一方、グループ内のシェアは均一化されることを観察した。この成果は、ノードの重要性を考慮するうえで時間制約が重要であることを示すものとして重要であり、国際会議 ASONAM2020、および国際ジャーナル Social Network Analysis and Mining にて発表している。

< 引用文献 >

D. Kempe, et al.: "Maximizing the spread of influence through a social network," Proc. of KDD 2003, pp.137-146 (2003).

Chenxu Wang and Ziyuan Lin: "An Efficient Approximation of Betweenness Centrality for Uncertain Graphs," IEEE Access, Vol. 7, pp. 61259 - 61272 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fushimi Takayasu, Saito Kazumi, Ohara Kouzou, Kimura Masahiro, Motoda Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 General framework of opening and closing shops over a spatial network based on stochastic utility under competitive and time-bounded environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Social Network Analysis and Mining	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） 10.1007/s13278-021-00778-4	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 Kazumi Saito, Takayasu Fushimi, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, and Hiroshi Motoda	4. 巻 25
2. 論文標題 Efficient Computation of Target-Oriented Link Criticalness Centrality in Uncertain Graphs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Intelligent Data Analysis	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） なし	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kouzou Ohara, Takayasu Fushimi, Kazumi Saito, Masahiro Kimura, and Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Maximizing Network Coverage Under the Presence of Time Constraint by Injecting Most Effective k-Links
3. 学会等名 The 23th international conference on Discovery Science (DS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayasu Fushimi, Kazumi Saito, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, and Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Opening and Closing Dynamics of Competing Shop Groups over Spatial Networks
3. 学会等名 The 2020 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayasu Fushimi, Kazumi Saito, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, and Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Efficient Computing of PageRank Scores on Exact Expected Transition Matrix of Large Uncertain Graph
3. 学会等名 The 2020 IEEE International Conference on Big Data (IEEE BigData 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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	斉藤 和巳  (Saito Kazumi)  (80379544)	神奈川大学・理学部・教授   (32702)	
研究分担者	木村 昌弘  (Kimura Masahiro)  (10396153)	龍谷大学・先端理工学部・教授   (34316)	
研究分担者	伏見 卓恭  (Fushimi Takayasu)  (80755702)	東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・講師   (32692)	

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
---------	---------