

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00314

研究課題名（和文）大規模ネットワークでの情報フロー損失最小化のためのクリティカルリンク発見

研究課題名（英文）Identifying Critical Links for Minimizing Loss of Information over Large 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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、インターネット上の社会ネットワークを流れる情報、実世界の道路網を移動する人・車などの大規模ネットワーク上を移動する対象を情報、その流れを情報フローとし、欠損時にその情報フローを大きく阻害するクリティカルリンクを正確、効率的に発見する手法を実現した。具体的には、リンクが不変である静的ネットワークにおけるクリティカルリンク、および災害時の道路寸断のように確率的にリンク切断が生じ得る不確定ネットワークの下でのクリティカルリンクを効率的に同定できる手法を実現した。加えて、これらの手法の実現過程で得られた知見に基づき、従来の媒介中心性指標などを効率的かつ精度よく推定する近似計算手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で導入した、道路ネットワークなどの空間ネットワークを対象とし、その中の避難施設などに相当する特定ノードへの可到達ノード数に基づいた重要性指標は、空間ネットワークを対象とした新たなグループ中心性指標とも位置付けることができ、グラフ理論やネットワーク分析などの学術分野における意義は大きい。また、提案手法では、通行できなくなると、一定時間内に最寄りの避難施設に避難できなくなる住民数が大幅に増える道路など、現実問題に即した重要なリンクを同定することができ、その意味で、社会に与える影響も大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed methods of identifying critical links that would substantially degrade the network performance if they do not function. The network performance is defined as the amount of information flow over given networks. We consider objects that propagate over networks as information, and typical examples are articles posted on a social network and people traveling over a road network. We devised several methods of identifying critical links: ones for static networks and ones for uncertain networks in which links probabilistically disconnected. In addition, we further proposed a method of accurately and efficiently estimate the value of traditional centrality measures such as the betweenness centrality. We applied those methods to actual networks and confirmed that the links identified by our methods cannot be detected by using traditional centrality measures and our methods can efficiently identify them compared to the traditional approaches.

研究分野：知能情報学

キーワード：クリティカルリンク 複雑ネットワーク 社会ネットワーク分析 道路ネットワーク 中心性指標

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、大規模複雑ネットワークの構造的、機能的特徴の分析に関する研究が盛んにおこなわれている。そのような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などをはじめ、多様な分野、我々の身近な分野においてその存在が明らかになりつつある。それらの分析には、従来は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、次数中心性はネットワーク中の各ノードのもつ入/出リンク数を表すものであり、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のうち対象リンク/ノードを通るものの割合の平均として定義される。これに対し近年では、社会ネットワーク上での情報拡散という観点から、各ノードが情報源となり情報を発信した場合、どの程度のノードがその情報を受け取るかを表す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]。期待影響度の計算では、各ノードを情報源とみなし、そのノードからの可到達ノード数を数え上げることが基本演算となるが、対象ネットワークが大規模化するにつれ、その厳密計算は膨大な時間を要することになるため、各ノードからの可到達ノード数を  $k$  個の近傍ノードの情報から近似的に求める bottom-k sketch と呼ばれる技術を応用して情報拡散における期待影響度の近似値を効率的に求める手法も提案されている[引用文献]。

一方、実世界の問題を想定したネットワークの分析においては、与えられたネットワークをそのまま分析するだけでは必ずしも十分ではない。たとえば、インターネット上の社会ネットワークを想定した場合、重要なリンクの指標としては、そのリンクを削除した場合に、本来は情報を受け取れるノードがどれだけ減少するののかというものが考えられる。これは各ノードからの可到達ノード数を用いて定量化することができ、道路ネットワークにおける避難施設などの特定の施設への可到達性に基づく評価にも適用可能な指標である。このような指標の計算には、元のネットワークと各リンクが削除されたネットワークそれぞれでの各ノードの可到達ノード数の計算が必要であり、明らかに、ネットワークが大規模化するにつれ、その計算量もまた膨大なものとなる。そのため、このような現実的な観点からの重要リンク(クリティカルリンク)の同定のさらなる計算の効率化が急務となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、前述の背景の下、インターネット上の社会ネットワークを流れる投稿記事、実世界における道路網を移動する人・車など、多様な大規模複雑ネットワーク上を移動する様々な対象を情報、その流れを情報フローと位置づけ、欠損した場合にその情報フローを大きく阻害するクリティカルリンクを正確に発見する、効率的、かつスケーラブルな手法の実現を目的とする。さらに、提案法を多様な実ネットワーク分析へ適用し、発見されたクリティカルリンクとリンク評価指標およびネットワークの構造的特徴との関係性などを明らかにするとともに、提案法で発見されるクリティカルリンクの実問題での有用性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、対象とする複雑ネットワークを、与えられたリンク構造が不変である静的なネットワークと、確率的にリンクの切断が生じる不現実ネットワークの2つに分けたうえで、それぞれにおけるクリティカルリンクの同定手法を検討する。後者の不現実ネットワークにおいて存在していたリンクが確率的に切断されることは、自然災害時にある道路が封鎖されて通行できなくなる状況に相当するものであり、より現実的な状況を想定した問題設定となる。また、本研究におけるクリティカルリンクを、従来の中心性指標が高いリンクと比較することは、その特徴を知るうえで重要であるが、対象ネットワークが大規模化するにつれて近接中心性や媒介中心性の計算には膨大な時間を要するようになるため、その近似解を精度よく求める手法も同時に検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 静的ネットワークにおけるクリティカルリンクの同定

##### 平均可到達ノード数に基づくクリティカルリンクの同定

ここでは、ネットワーク中の各ノードから到達可能なノード数の平均(平均可到達ノード数)をそのネットワークの性能指標とし、対象リンクが機能しなくなることによって生じる平均可到達ノード数の減少量をそのリンクの重要度として定義し、その重要度のもとでのクリティカルリンクを効率的に同定する手法を提案した。具体的には、Redundant-Link Skipping (RLS)、Marginal Node Pruning (MNP)、Burn-Out Following (BOF)と呼ぶ冗長(不必要)な計算を回避するための3つの技術を提案した。評価実験では、2つの実ネットワーク(文献引用ネットワーク、P2P 通信関係ネットワーク)と2つの人工ネットワークを用いて提案手法の性能を評価した。その結果、提案手法は、リンク削除による性能(平均可到達ノード数)低下を、bottom-k sketch を利用した近似計算法と同等以内の計算時間で、いかなる近似も用いずに厳密に計算できることを確認した。さらに、入/出次数中心性、媒介中心性、PageRank などの従来の中心性指標に基づいた指標では、平均可到達ノード数に基づくクリティカルリンクを同定できないことを確認した。本研究における情報フローを大きく阻害するクリティカルリンクの定義は、現実的な問題を想定した場合、自然かつ合理的な定義に基づいており、この結果は、従来の中心性指標がそのようなクリティカルリンクを求めるための代替指標になり得ないことを示すものといえる。その

意味において、その同定を効率化する提案手法が各応用分野に与える影響は大きいと言える。この研究成果は、国際会議 ISMIS2017 および国際ジャーナル JIIS にて発表している。

一方、この研究過程において、静的な空間ネットワーク（ノードに座標、ノード間のリンクに物理的な距離が割り当てられているネットワーク）に対して最大長制限のある  $k$  本のリンクを追加する場合に、ネットワーク性能を最大化する  $k$  本のリンクを貪欲探索に基づいて効率的に同定する手法を提案した。提案手法は、既存ネットワークからのクリティカルリンクの同定と同様に、探索領域を効率よく絞り込むことで計算コストの大幅な削減を実現している。なお、ここでの性能評価指標は、実際の災害時避難などを想定し、特定のノード集合  $U$  に対する近接中心性（グループ近接中心性）を用いた。これは、ノード集合  $U$  に含まれないノード  $w$  からパス上の物理的距離において最も近くにある  $U$  中のノード  $u$  までの最短距離の重み付き総和として計算され、ここでの重みは、実際の道路ネットワークにおけるノード周辺の住民数などとなる。実際の国内 3 都市の道路ネットワークを利用した評価実験では、各リンクを削除した場合のグループ近接中心性の变化を素直に計算するベースライン手法と比較し、提案手法は  $10^3 \sim 10^6$  倍ほど高速に  $k$  本のリンクを同定できることを確認した。この研究成果は、国際会議 DSAA2017 にて発表している。

#### 制限時間内グループ可到達ノード数に基づくクリティカルリンクの同定

ここでは、より現実的な問題設定として、前述のリンク追加問題と同様に、道路ネットワークなどの静的な空間ネットワークを対象に、事前に指定した特定のノード集合に所与の制限時間内に到達可能なノード数（制限時間内グループ可到達ノード数）に基づいてネットワーク性能を定義した。これは、大地震後の津波からの避難、救急指定病院への緊急搬送、火災現場への消防車の派遣などの実問題を想定した問題設定である。特定のノード集合は、避難問題の場合は避難施設、緊急搬送の場合は救急指定病院、消火活動の場合は消防署となり、ここでのネットワーク性能指標は、それらの施設のいずれかに制限時間内に到達可能な住民数と考えることができる。この場合、通行不能になった場合に、その制限時間内グループ可到達ノード数を大幅に減らしてしまうリンクはクリティカルリンクとなることから、その重要性指標として当該リンクが削除された場合（通行不能になった場合）における制限時間内グループ可到達ノード数の減少数をリンクの重要性指標とした。このような問題設定に対して本研究では、特定ノード集合  $U$  の各ノードを根ノードとし、根ノードから  $U$  に含まれないノードへの制限時間内最短経路をパスとする経路木をまず構築し、その経路木集合を走査することで、制限時間内グループ可到達ノード数を最も減らすクリティカルリンクを効率よく同定するアルゴリズムを提案した。東京都の道路ネットワークを用いた評価実験では、提案アルゴリズムによる全リンクに対する前述の重要性指標の計算時間は、従来の媒介中心性を計算する時間の約  $1/5,000$  程度（100 秒以内）となること、客観的にみて合理的な（説明可能な）リンクが同定されていることを確認した。前述のような問題では、このようなクリティカルリンクが通行不能になった場合、人命にかかわる大きなリスクを負うことになり、そのリスクを軽減するために、提案法のような事前に重要な道路を効率よく同定できる技術は重要となる。この研究成果は国際会議 PRICAI2019 にて発表している。

#### (2) 不確実ネットワークにおけるクリティカルリンクの同定

前述の(1)では、所与のネットワーク中のリンクはすべて接続していることを前提にリンクの重要性を計算した。これに対し、実際の道路ネットワークなどでは、災害発生時に通行不能になる道路区間が生じ得るため、評価対象リンク以外のリンクも切断される可能性を考慮したうえでクリティカルリンクの同定も重要となる。本研究では、ネットワーク中の各リンクがそのリンクに与えられた確率に従って切断される確率的リンク切断モデルを導入し、そのモデルの下でクリティカルリンクを同定する手法を提案した。ネットワーク性能の定量的評価指標としては、道路ネットワーク中の避難施設のような特定のノード集合を設定し、そのノード集合から到達可能なノード数（グループ可到達ノード数）を用いた。このとき、各リンクの性能、すなわち重要度は、そのリンクが切断されたときに減少するグループ可到達ノード数の期待値として定量的に評価できる。ここでの期待値計算は、モンテカルロシミュレーションに基づき、リンク切断確率に従って各リンクの接続可否を決定してネットワークを確定させる試行を複数回繰り返す、各ネットワークでのグループ可到達ノード数減少数の平均として求められる。このような性能評価指標を用いて各リンクを順位付けし、クリティカルリンクを同定するために、本研究では、前述の(1)における探索領域の効果的な削減技術と同様の技術を導入したアルゴリズムを提案し、さらに、グラフ理論におけるブリッジに着目し、基本的なブリッジ同定アルゴリズム[引用文献]の考えに基づいて所与のネットワークにおける各リンクの性能評価値を効率的に計算するアルゴリズムを提案した。ここで、ブリッジとは連結グラフ中のリンクのうち、それを削除するとその連結グラフを 2 つの互いに疎な連結グラフに分解するようなものを指す。ここでの問題設定では、あるブリッジを削除して得られた互いに疎な連結グラフのうちの 1 つに避難施設のような対象ノードが含まれなければ、そのブリッジは正の評価値をもち、クリティカルリンクの候補となり得る。そのため、提案アルゴリズムでは、ブリッジ同定アルゴリズムに基づいて所与のネットワークからすべてのブリッジを同定しつつ、その評価値を計算する。一般的に知られるブリッジ同定アルゴリズムの計算量は、 $E$  をネットワーク中のリンクの集合とした場合、 $O(|E|)$  であり、提案アルゴリズムはその定数倍程度の計算量でクリティカルリンクの同定を可能とする。2 つの実道路ネットワークに対する災害時避難を想定した評価実験を通して、

ブリッジ同定技術を用いた提案手法の計算時間が、従来の媒介中心性の計算時間の約 1/1,000 ~ 1/100,000 程度となることを確認し、また、媒介中心性、媒介中心性を特定のノード集合を考慮して拡張した中心性指標、次数中心性、PageRank のいずれも、ここで提案した現実的な問題設定における自然かつ合理的な重要性指標(グループ可到達ノード数減少数)の代替指標となり得ないことを確認した。これらの研究成果は、国際会議 PRICAI2018, ISMIS2018 で発表している。

また、この研究過程において、ブリッジと同様に連結グラフを 2 つの互いに素な連結グラフに分解するノード(アーティキュレーションポイント)に着目することで、グループ可到達ノード数を減少させるという意味で重要な不確実ネットワーク中のクリティカルノードを同様のアプローチにより効率的に同定できることを発見し、そのためのアルゴリズムも提案した。この研究成果は国際シンポジウム CANDAR2018 および国際ジャーナル IJNC にて発表している。

### (3) リサンプリング法に基づいたノード中心性計算の近似計算手法の提案

上記のようなクリティカルリンク/ノードの同定における研究では、従来の中心性指標に基づいて同定されるリンク、ノードとの比較が、実際に同定されたクリティカルリンクの評価・特徴分析では重要となる。一方、近接中心性や媒介中心性のようなネットワーク全体を走査し、複数のノード間の最短パス長や最短経路数を求め、それらの平均を利用するような指標値は、対象とするネットワークが大規模化するにつれて、その計算時間は膨大なものとなる。そのため、本研究では、上記のクリティカルリンクの同定に関する研究と並行して、それら従来の指標値を効率的に計算する手法も検討した。具体的には、厳密解の計算を断念せざるを得ない場合に、精度の高い近似解を効率的に求めるために、真の指標値とその近似値の誤差の期待値を精度よく予測する不偏推定量を提案した。提案手法では、対象となる指標値の近似解を求める際に、ネットワーク全体のノードを用いずに、ネットワークから無作為にサンプリングした少数のノードのみを利用する。近接中心性と媒介中心性を対象とし、6 つの実ネットワークを利用した評価実験では、従来用いられている独立同分布サンプリングに基づく標準誤差推定量と比較して、提案する不偏推定量がより正確に近似誤差を推定できることを確認した。具体的には、提案する不偏推定量は、全ノード数の 20%程度のノードをサンプリングすることで 95%の信頼度で近似誤差の推定が可能であった。ここでの提案フレームワークは、ネットワーク中のノード間の最短パス長計算などの基本演算を複数回試行し、その平均を求めるような任意の推定問題に適用可能な一般性の高いものであるため、本研究の評価実験で用いた近接中心性や媒介中心性に限らず、他の問題にも適用可能である。この研究成果と関連研究は、国際ジャーナル JDSA および国際会議 DS2019 にて発表している。

### < 引用文献 >

D. Kempe, J. Kleinberg, and E. Tardos: Maximizing the spread of influence through a social network, Proc. of KDD 2003, pp. 137-146, 2003.

E. Cohen, D. Delling, T. Pajor, and R. F. Werneck: Sketch-based influence maximization and computation: Scaling up with guarantees, Proc. of CIKM 2014, pp. 629-638, 2014.

R. E. Tarjan: A note on finding the bridges of a graph. Information Processing Letters, Vol. 2, No. 6, pp. 160-161, 1974.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ohara Kouzou, Saito Kazumi, Kimura Masahiro, Motoda Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Critical Node Identification based on Articulation Point Detection for Uncertain Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Networking and Computing	6. 最初と最後の頁 201 ~ 216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.15803/ijnc.9.2_201">https://doi.org/10.15803/ijnc.9.2_201</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ohara Kouzou, Saito Kazumi, Kimura Masahiro, Motoda Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Resampling-based predictive simulation framework of stochastic diffusion model for identifying top-K influential nodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Data Science and Analytics	6. 最初と最後の頁 175 ~ 195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41060-019-00183-3	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 Saito Kazumi, Ohara Kouzou, Kimura Masahiro, Motoda Hiroshi	4. 巻 51
2. 論文標題 Accurate and efficient detection of critical links in network to minimize information loss	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Information Systems	6. 最初と最後の頁 235 ~ 255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s10844-018-0523-6">https://doi.org/10.1007/s10844-018-0523-6</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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Kazumi Saito, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Efficient Identification of Critical Links Based on Reachability Under the Presence of Time Constraint
3. 学会等名 The 16th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumi Saito, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Resampling-Based Framework for Unbiased Estimator of Node Centrality over Large Complex Network
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Discovery Science (DS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斎藤 和巳, 大原 剛三, 木村 昌弘, 元田 浩
2. 発表標題 確率的リンク切断モデルの下でのクリティカルリンクの同定
3. 学会等名 人工知能学会第114回知識ベースシステム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumi Saito, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Efficient Detection of Critical Links to Maintain Performance of Network with Uncertain Connectivity
3. 学会等名 The 15th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumi Saito, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Critical Link Identification Based on Bridge Detection for Network with Uncertain Connectivity
3. 学会等名 The 24th International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems (ISMIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kouzou Ohara, Kazumi Saito, Masahiro Kimura, Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Critical Node Identification Based on Articulation Point Detection for Network with Uncertain Connectivity
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumi Saito, Kouzou Ohara, Masahiro Kimura, and Hiroshi Motoda
2. 発表標題 An accurate and efficient method to detect critical links to maintain information flow in network
3. 学会等名 The 23rd International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems (ISMIS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kouzou Ohara, Kazumi Saito, Masahiro Kimura, and Hiroshi Motoda
2. 発表標題 Maximizing network performance based on group centrality by creating most effective k-links
3. 学会等名 The 4th IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017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	齊藤 和巳  (Saito Kazumi)  (80379544)	神奈川大学・理学部・教授    (32702)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	木村 昌弘  (Kimura Masahiro)  (10396153)	龍谷大学・理工学部・教授     (34316)	