

令和元年6月18日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K20931

研究課題名(和文) ロバストなネットワーク構築のための影響最大化に基づくアプローチ

研究課題名(英文) An Approach for Improving the Robustness of Networks based on Influence Maximization

研究代表者

津川 翔 (Tsugawa, Sho)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：40632732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、社会ネットワーク分析の分野で開発されてきた影響力の強いノードを特定する影響最大化アルゴリズムを応用し、将来インターネットのロバスト性を向上させる手法を開発することを目指した。まず、影響最大化アルゴリズムの特性を評価し、影響最大化の発見的アルゴリズムが、ネットワークのごく一部の情報だけでも良好に動作することを示した。さらにこの知見に基づき、ネットワークのロバスト性向上手法として、リンク付加戦略、ならびに免疫付与戦略を提案し、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インターネットは我々の生活を支える重要な社会基盤である。その重要性は将来においてますます高まっていくと予想される。本研究の成果はそのようなクリティカルインフラであるインターネットを安定的に運用することに貢献する。また、影響最大化アルゴリズムが、ネットワークのごく一部の情報だけでも良好に動作するという知見は、より効率的な影響最大化アルゴリズムの設計が可能であることも示唆している。本研究の結果は、影響最大化の研究コミュニティにも貢献する。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop methodologies for improving the robustness of the future Internet using influence maximization algorithms. We have investigated the characteristics of the existing influence maximization algorithms, and found that the algorithms can find influential nodes only from the partial knowledge about the network structure. Based on this finding, we have developed link addition strategies and network immunization strategies for improving the robustness of networks, and have shown the effectiveness of these strategies.

研究分野：ネットワーク科学

キーワード：ネットワーク ロバスト性 影響最大化 中心性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

インターネットの抱える、悪意あるユーザからの攻撃に対する潜在的な脆弱性が、膨大な数のセンサやアクチュエータなどのモノが接続される将来インターネットにおいて、顕在化してしまうことが危惧されている。我が国における新世代ネットワーク戦略プロジェクトを中心として、2020年の将来インターネットにおいて、1兆台を超えるノードを収容する有線/無線統合ネットワークの構築を目指している。このネットワークにおいて、無線区間ではノード間の無線マルチホップ通信によってデータを転送する。この時、データを中継するルータの役割を果たすノードの中には路上に設置された安価なセンサなども含まれる。将来インターネットでは、このような信頼性の低いノードを起点として、悪意のあるユーザがネットワーク全体にウィルスを拡散させることが容易になると想定される。この問題は、IoT (Internet of Things) や M2M (Machine to Machine) ネットワークの分野でも問題視され、解決すべき重要な課題であると認識されている。

この問題を解決するためのアプローチとして、研究代表者は、社会ネットワーク分析の分野において開発された影響力の強いノードを特定する影響最大化アルゴリズムを利用することに注目していた。ネットワーク科学における最新の研究成果によって、(1) 社会ネットワークにおいて多数の人々に影響を与えられる少数の個人を特定する影響最大化問題、(2) 少数のノードの削除によってネットワークを分断する最適パーコレーション問題、(3) ネットワークにおけるウィルスの拡散を防止するために、免疫を持たせる少数のノードを決定する最適免疫ノード決定問題が全て等価であることが明らかになった。2015年8月に Nature において発表された文献 (Morone et al. 2015, Nature) では(1)と(2)の問題が等価であることを利用し、ノードの影響力を測る指標を用いて、最適なネットワークの分断を実現している。一方、問題(1)と(3)が等価であることに注目すると、影響最大化アルゴリズムを用いて特定した影響力の強いノードに免疫を持たせることで、ウィルスの拡散被害を最小限に抑えることができると期待される。

しかしながら、従来の影響最大化アルゴリズムは、ネットワーク全体の構造が既知であることを前提とした集中アルゴリズムであるため、非常に大規模な将来インターネットにそのまま適用することはできない。将来インターネットにおいて、ネットワーク全体の情報を集約することは現実的ではない。一方、研究代表者は研究開始時点において、限られたネットワークの情報のみで利用可能な影響最大化アルゴリズムの開発を進めていた。このアルゴリズムを応用することで、各ノードの局所的な情報のみを用いて、ネットワーク全体の情報を用いた場合と近い効率でウィルスの拡散を防止できることを、小規模なネットワーク上での予備実験により確認していた。

### 2. 研究の目的

本研究では、将来インターネットに適用可能なネットワークのロバスト性向上手法を開発する。将来インターネットにおける脅威として、攻撃によって一部のノードが停止すること、およびネットワーク上でウィルスが拡散することを想定し、それらへの対策技術を開発する。特に、ネットワークの一部の情報のみしか得られないことを前提として動作するリンク付加戦略、ならびに免疫付与戦略を設計し、それらの有効性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 影響最大化アルゴリズムのロバスト性評価

従来の影響最大化アルゴリズムは、ネットワーク全体の構造を利用する。ただし、超多数のノードで構成される将来インターネット全体の構造を正確に把握することは困難であることが想定される。そこで本研究では、ネットワークの情報が不完全な場合に、従来の影響最大化アルゴリズムを用いてどの程度影響力の強いノードを推定できるかを評価した。ネットワークの情報にランダムな誤りが含まれる場合と、バイアスのあるサンプリングによってネットワークの部分的な構造を取得した場合についてシミュレーションを行い、影響最大化アルゴリズムによって影響力の強いノードを推定した。不完全なネットワークから推定した影響力の強いノードと、ネットワーク全体の情報を用いて求めた影響力の強いノードがどの程度一致するかを調査した。これによって、影響最大化アルゴリズムがネットワークの不完全性に対してどの程度ロバストであるかを評価した。

#### (2) 影響最大化アルゴリズムに基づくリンク付加戦略の設計

悪意あるユーザからの意図的な攻撃によってネットワークからノードが取り除かれると、ネットワークが分断されてしまう可能性がある。インターネットのようなノードの次数分布の偏りの大きなネットワークでは、少数のノードが攻撃を受けるだけでも、ネットワークの連結性が著しく低下してしまうことが知られている。このようなノードの攻撃に対してネットワークのロバスト性を向上させるためには、ネットワーク中に少数のリンクを付加することが有望であると期待されている。そこで本研究では、ノードの影響力を考慮したリンク付加によって攻撃に対するネットワークのロバスト性を向上させる手法を設計した。さらに、シミュレーション実験によって、その有効性を検証した。

### (3) 影響最大化アルゴリズムに基づく免疫付与戦略の設計

ネットワークの安定運用に対する脅威として、攻撃によるノードの離脱だけでなく、ネットワーク上でのウイルスの拡散も存在する。ネットワーク上でのウイルス拡散を抑制するための手法として、本研究では、ネットワーク中の少数のノードに対して免疫を付与する手法を提案した。提案する手法は、影響最大化アルゴリズムによって影響力の強いノードを特定し、それらのノードに免疫を付与することでウイルス拡散を抑制する。さらに本研究では、シミュレーション実験によって、提案手法の有効性を検証した。

## 4. 研究成果

本研究ではまず、影響最大化アルゴリズムの特性評価を実施し、影響最大化アルゴリズムが、将来インターネットに適用する上で有用な性質を有していることを示した (成果 1)。さらにこの知見に基づき、ノードの影響力を考慮したネットワークのロバスト性向上手法として、リンク付加戦略 (成果 2)、ならびに免疫付与戦略 (成果 3)を提案した。これらの手法を、将来インターネットを想定した条件で評価し、その有効性を確認した。以降、それぞれの成果について詳細を説明する。

### (1) 影響最大化アルゴリズムのネットワークの不完全性に対するロバスト性の解明

これまで提案されている様々な影響最大化アルゴリズムが、ネットワークの不完全性に対してどの程度ロバストであるかを明らかにした。影響最大化アルゴリズムは、ランダムなノードの削除に対してはロバストでないが、バイアスのあるサンプリング、具体的には、Sample Edge Count、幅優先探索、深さ優先探索に対してはロバストであることを示した。バイアスのあるサンプリングを用いてネットワーク全体の 10~20%程度のノードをサンプリングするだけで、ネットワーク全体の情報を用いた場合と同程度に影響力の強いノードを特定できることを示した (図 1)。また、ネットワークが不完全な場合には、単純な発見的アルゴリズムが、近似アルゴリズムよりも有効であることも明らかとなった。

本成果によって、大規模なネットワークでもバイアスのあるサンプリングを用いれば、部分的な情報だけから影響力の強いノードを特定できることが明らかとなった。これによって、研究成果 (2)、(3) で提案したネットワークのロバスト性向上手法の、大規模な将来インターネットへの適用の可能性を明らかにした。

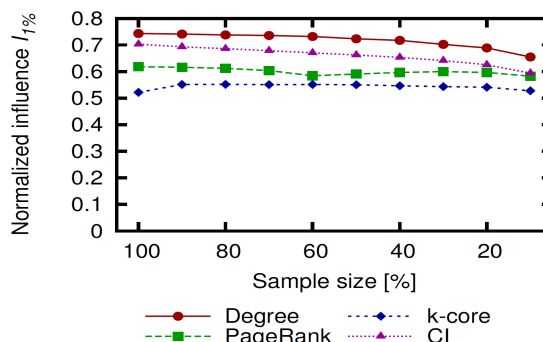


図 1: サンプルサイズと特定されたノードの影響力の関係 [主な発表論文 3 より引用]: 10-20%程度のサンプルから推定した影響力と全体から推定した影響力は同程度

### (2) ネットワークの攻撃に対するロバスト性を向上させるリンク付加戦略の開発

本研究では、ネットワークからノードが離脱した際にネットワークの連結性を維持するためのリンク付加手法を開発した。開発した手法は、影響力の弱いノード間にリンクを接続することで、影響力の強いノードが攻撃を受けた際にネットワーク全体の接続性が著しく低下してしまうことを防ぐことを狙っている。特に様々な種類のノードで構成される多層構造を有するネットワークにおいて、提案する手法が有効であることを明らかにした。これまで単層のネットワークに対するリンク付加手法の研究は活発に行われていたが、多層ネットワークのリンク付加手法の研究はほとんど行われてこなかった。多層ネットワークのロバスト性を向上させるのにリンク付加が有効であることを示した本研究によって、多層ネットワークのリンク付加の研究がさらに活発化されることが期待される。また、将来インターネットでは様々な種類のノードが接続されることが想定されるため、提案するリンク付加手法は、将来インターネットのロバスト性を向上させる上でも有用であると期待される。

### (3) ネットワーク上のウイルス拡散を抑制する免疫付与戦略の開発

影響最大化アルゴリズムに基づく免疫付与戦略を開発した。研究成果 (1) の知見が示唆していた通り、発見的影響最大化アルゴリズム Collective Influence (CI) に基づく免疫付与戦略を用いることで、ネットワーク全体の 10~20% 程度の情報のみを用いて免疫を付与するだけでも、十分にウイルスの拡散を抑制できることを示した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

1. S. Tsugawa, "A survey of social network analysis techniques and their applications to socially aware networking," IEICE Transactions on Communications, Vol.E102-B, No.1, pp.17-39, Jan. 2019. doi: 10.1587/transcom.2017EB10003 (査読有)
2. S. Tsugawa, and H. Ohsaki, "Robustness of influence maximization against non-adversarial perturbations," In: Kaya M., Alhajj R. (eds) Influence and Behavior Analysis in Social Networks and Social Media. ASONAM 2018. Lecture Notes in Social Networks. Springer, Cham, pp 193-210, Dec. 2018. doi:10.1007/978-3-030-02592-2\_10 (査読有)
3. S. Tsugawa, and K. Kimura, "Identifying influencers from sampled social networks," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol.507, No.1, pp.294-303, Oct. 2018. doi: 10.1016/j.physa.2018.05.105 (査読有)
4. Y. Kazawa, and S. Tsugawa, "Proposal of strategic link addition for improving the robustness of multiplex networks," in Proceedings of the 9th International Conference on Complex Networks (CompleNet 2018), pp.75-84, Mar. 2018. doi: 10.1007/978-3-319-73198-8\_7 (査読有)
5. S. Tsugawa, and H. Ohsaki, "On the robustness of influence maximization algorithms against non-adversarial perturbations," in Proceedings of the 2017 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2017), pp. 91-94, Aug. 2017. doi: 10.1145/3110025.3110070 (査読有)
6. Y. Kazawa, and S. Tsugawa, "On the effectiveness of link addition for improving robustness of multiplex networks against layer node-based attack," in Proceedings of the 41st Annual IEEE International Computers, Software, and Applications Conference (Student Research Symposium) (COMPSAC 2017), pp.697-700, Jul. 2017. doi: 10.1109/COMPSAC.2017.180 (査読有)
7. S. Mihara, S. Tsugawa, and H. Ohsaki, "On the effectiveness of random jumps in an influence maximization algorithm for unknown graphs," in Proceedings of the 31st International Conference on Information Networking (ICOIN 2017), pp. 395-400, Jan. 2017. doi: 10.1109/ICOIN.2017.7899466 (査読有)
8. K. Kimura, and S. Tsugawa, "Estimating influence of social media users from sampled social networks," in Proceedings of the Workshop on Social Influence (SI 2016) in conjunction with ASONAM'16, pp. 1302-1308, Aug. 2016. doi: 10.1109/ASONAM.2016.7752 (査読有)

〔学会発表〕(計 14 件)

1. 尾上 洋一, 津川 翔, "攻撃戦略予測に基づくリンク付加によるネットワークのロバスト性向上効果に関する一考察," 電子情報通信学会総合大会 Mar. 2019.
2. 津川 翔, 大崎 博之, "不完全なネットワークにおける最小 p-メジアン問題 - 定式化と実験的評価 -," 電子情報通信学会 CQ 研究会, Jan. 2019.
3. 津川 翔, 大崎 博之, "未知のネットワークの最小 p-メジアン問題に関する一考察," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 Sep. 2018.
4. 大塚 桃子, 津川 翔, "不完全なネットワークの情報に基づく免疫付与戦略の有効性の評価," 電子情報通信学会 CQ 研究会, Jul. 2018.
5. 上原 みなみ, 津川 翔, "ソーシャルメディアにおける中心的ユーザの影響力変化の分析," 電子情報通信学会 CQ 研究会, Jul. 2018.
6. 竹村 隼平, 津川 翔, "ソーシャルネットワークにおける影響力推定手法の有効性と手法間の関係の分析," 電子情報通信学会 CQ 研究会, Jan. 2018.
7. 賀沢 唯, 津川 翔, "レイヤーノードの次数および層間次数差に基づくリンク付加による多重ネットワークのロバスト性向上効果の検証," 電子情報通信学会 CQ 研究会, Nov. 2017.
8. 大塚 桃子, 津川 翔, "ノード削除によるネットワーク上のウイルス拡散抑制効果に関する一考察," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 Sep. 2017.
9. 賀沢 唯, 津川 翔, "多重ネットワークへの戦略的リンク付加によるレイヤーノードベース攻撃に対するロバスト性向上効果の検証," 電子情報通信学会 CQ 研究会 Jul. 2017.
10. 津川 翔, 大崎 博之, "影響伝搬確率の誤差に対する影響最大化アルゴリズムのロバスト性評価," 電子情報通信学会 CQ 研究会, Apr. 2017.
11. 辻 慎平, 津川 翔, "ネットワークにおけるトラフィックパターンの偏りとノードの耐久度の割当方法がカスケード故障に与える影響の分析," 電子情報通信学会 CQ 研究会, Jan. 2017.
12. 辻 慎平, 津川 翔, "ネットワークにおけるトラフィックパターンの偏りがカスケード故障に与える影響に関する一考察," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 Sep. 2016.
13. 賀沢 唯, 津川 翔, "選択的ノード保護下におけるネットワークのロバスト性の重回帰分析によるモデル化," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 Sep. 2016.
14. 福本 淳一, 三原 正大, 津川 翔, 大崎 博之, "ネットワークにおけるウイルス拡散とカ

スケード故障の相互作用に関する一考察," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 Sep. 2016.

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、研究者個人に帰属されます。