JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	ノードの高次元的な相関関係に基づいた頑健なネットワーク構造を構築する手法
Author(s)	KIM, JAEHO
Citation	
Issue Date	2024-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/19077
Rights	
Description	Supervisor: 林 幸雄, 先端科学技術研究科, 博士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

氏　　名	KIM JAEHO
学位の種類	博士（融合科学）
学位記番号	共博融第 2 号
学位授与年月日	令和 6 年 3 月 22 日
論文題目	ノードの高次元的な相関関係に基づいた頑健なネットワーク構造を構築する手法
論文審査委員	林　幸雄　北陸先端科学技術大学院大学　教授
	由井薗　隆也　同　教授
	郷右近　英臣　同　准教授
	坂本　二郎　金沢大学　教授
	藤田　聡　広島大学　教授

論文の内容の要旨

Various infrastructure networks in modern society form the basis of many social and economic activities and are continually increasing in complexity and importance. Network science plays an important role in simplifying them as networks consisting of nodes and links and in analyzing information, resources, or their flow within networks. In fact, network science has revealed that real networks commonly have a scale-free (SF) structure. The most important feature of SF networks is that their degree distribution follow a power-law. This indicates that a few nodes (called hubs) have a lots of links, and most nodes have relatively few links. Since almost all nodes are connected to hubs, the network has a high efficiency in disseminating information because the hub can shorten the paths between nodes in the network. Although SF networks are robust against random failures, they are extremely vulnerable to malicious attacks targeting hubs. Therefore, hubs are advantageous for information dissemination, but they are also structural weakness. Moreover, many real networks are frequently threatened by natural and man-made disasters. Since infrastructure networks support our society, it is necessary to overcome their inherent weaknesses and construct robust structures.

Conventional studies for network robustness have mainly focused on degree correlations. For example, it is shown that onion-like structures with positive degree correlation have optimal robustness to malicious attacks. However, with too high degree correlation, networks have low robustness. Therefore, it is necessary to find new principles to construct a robust structure. Recently, it is shown that loop structures are more important than degree correlations to construct robust networks. The reason is that a network without loops become a weak tree structure. Thus, in order to construct robust structure, it is important to enhance loops so that prevent the network from becoming a tree structure. Several rewiring methods based on enhancing loops have been proposed. These methods construct more robust networks than the method increasing the degree correlation. Furthermore, it is commonly confirmed that the networks rewired by such methods have small width of degree distributions. Having small width of degree distributions corresponds to decreasing the gap between the maximum and the minimum degrees. Thus, as an extreme example,

a random regular graph with the zero gap has optimal robustness. Such optimal robustness of a regular graph is verified by perturbation analysis.

Based on the above backgrounds, this paper has the following three objectives. First, we propose a self-healing method based on enhancing loops and reducing the width of degree distribution. Then, we clarify the effect of community structure on network robustness. Finally, we propose a method to make configurations of data-centers that has robust and even load distribution.

keywords: Robustness of connectivity, Enhancing loops, The minimum gap of degree distribution, Distributed self-healing, Community structure, Data-center configuration.

論文審査の結果の要旨

本論文審査委員会は、提出学位論文に対する論文指導会を令和 5 年 12 月 6 日に、公聴会を令和 6 年 2 月 6 日に行い、これら口頭発表の結果を踏まえ、以下のように判定した。

現代社会を支える重要インフラとして、電力網・通信網・物流網など多くのネットワークにはスケールフリー(SF)と呼ばれる共通のつながり構造が存在するが、悪意のある選択的なハブ攻撃に対して極端に脆弱で分断されやすい。一方、同程度の次数のノード同士が結合しやすい正の次数相関を持つとき、攻撃に対する結合耐性が改善されるものの強すぎる相関は逆効果で、ループ強化が結合耐性（頑健性）により本質的であり、特に次数分布の幅を狭くすることの重要性が近年示唆されている。そこで、ループ強化と次数分布の均等化に基づく自己修復、モジュール構造の頑健性への影響、情報拡散の拠点配置について、処理分散、構造分離、負荷分散の観点から以下検討した。

1）システム工学や環境生態学におけるレジリエンス（復活力）の具現化として、攻撃後に元の SF 構造に復帰するより再構築して結合耐性を強化できる自己修復法を考え、輪形成と輪上の最小次数ノード間結合により従来法を凌駕する数値結果を明らかにし、メッセージ伝搬に基づく分散アルゴリズム記述とその非同期処理を実現した。これらは主に無線通信等に応用可能である。

2）社会学等において強すぎる結束を持つコミュニティ（モジュール）化が与える悪影響を、最適なランダムレギュラーグラフのイントラ（内）結合からインター（間）結合へのリワイヤリング率に対して調べ、頑健性の激減現象を定量的に明らかにし、工学設計にも重要な指針を得た。

3）災害時等の代替アクセス拠点となり得る拠点（データセンター）の分散的配置を、NP 困難ではあるが組合せ的な頂点被覆問題と捉えて近似解法で可能解を求め、従来の貪欲法と負荷分散や平均アクセス距離など比較分析した。特に、決定論に基づく従来法にはない、複数可能解の存在による標的隠蔽の点で優れていることを示した。

これらの研究成果を、2 報の国際学術論文（1 報査読中）と 5 報の国際会議予稿集（2 件口頭発表）に掲載している。統計物理学とコンピュータ科学の分析法を駆使して、分散処理が可能な自己修復の実現法を新規提案しつつ、コミュニティ（モジュール）化による頑健性低下の解明や、標的隠蔽可能な拠点配置への応用展開も行い、有用かつ学術的に十分価値があると言える。また、システム工学、環境生態学、社会学の観点からの独自の考察も行い、博士（融合科学）として認められる。