2M-05

シャープレー値を用いた相互依存ネットワークの脆弱性評価

Cai Wenxi† 土屋 達弘‡
大阪大学† 大阪大学‡

1 はじめに

本論文では, 電力ネットワークのように, ネットワークの構成要素が正常動作するために, 電力や通信など, 他の構成要素が提供するサービスに依存しているような相互依存ネットワークを考える. このような相互依存ネットワークにおいて, 故障や攻撃に対する構成要素の脆弱性を定量化するために, シャープレー値を用いることを提案する.

具体的には, 初期状態で障害状態にある構成要素(ノード)によって, 相互依存ネットワーク全体に障害が伝播することでネットワーク全体への影響が決定される状況を, ゲーム理論における協力ゲームとしてとらえる. シャープレー値は, 協力ゲームにおいて得られた利得のプレイヤーへ公正な配分を与える. したがって, 障害の影響を利得と考え, ノードのシャープレー値を求めることで, 各ノードの障害の影響の大きさを定量化することが可能となる.

2 相互依存ネットワーク

相互依存ネットワークをペア $(\mathcal{C}, I)$ で表す. ここで, $\mathcal{C}$ はノードの集合であり, I は $c \in \mathcal{C}$ に, c に対する IIM 式 [1] $I(c)$ を割り当てる関数である. ノードの状態は, 正常か障害のいずれかであり, 障害から正常に遷移することはない. IIM 式はノードがどのように他のノードに依存しているかを積和形のブール式で表す. 図 1 に

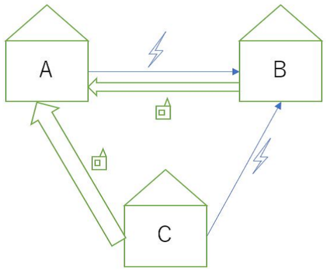

図 1 相互依存ネットワークの例. A は B と C 両方と通信できる必要がある. B は, A または C からの電力を必要とする.

具体例を示す. この例では, $\mathcal{C} = \{A, B, C\}$ であり, I は次のようにノードに IIM を割り当てる.

$$A \mapsto BC \qquad B \mapsto A + C \qquad C \mapsto True$$

A は, B と C に依存しており, いずれかが障害状態となると A も障害状態となる. B は, A と C の両方が障害状態になると障害状態となる.

初期状態において障害状態のノード集合が $S \subseteq \mathcal{C}$ の場合に, 最終的に障害状態となるノードの集合を $f_{(\mathcal{C},I)}(S)$ で表す. 上の例では, A, B が正常, C が障害のとき, まず A が障害となり, 次に B が障害となるため, $f_{(\mathcal{C},I)}(\{C\}) = \{A, B, C\}$ である.

3 ゲームとシャープレー値

協力ゲームは, ペア (N, v) であり, N はプレイヤーの集合である. $v : 2^N \to \mathbb{R}$ は特性関数であり, N の部分集合が連携 (coalition) であるときの報酬を与える. 相互依存ネットワークゲームを, 協力ゲームとして, 以下のように定義する.

相互依存ネットワークゲームとは, 3 つ組

Shapley value-based vulnerability evaluation of interdependent networks
† Wenxi Cai, Osaka University
‡ Tatsuhiro Tsuchiya, Osaka University

$(\mathcal{C}, I, v)$ で表される, 相互依存ネットワークシステム $(\mathcal{C}, I)$ の下での協力ゲーム $(\mathcal{C}, v)$ のことである．ただし, v は, 任意の $S \subseteq \mathcal{C}$ について $v(S) = v(f_{(\mathcal{C},I)}(S))$ を満たす．つまり, v は $S \subseteq \mathcal{C}$ のノードが初期状態で障害のとき, I に従って起こった状態遷移の結果, 最終的に障害のまま残ったノードに依存して定まるものとする．たとえば, 障害のまま残ったノードの数を, 初期状態で障害だったノードから構成される連携への報酬とした場合, $v(S) = |f_{(\mathcal{C},I)}(S)|$ である．以降, 本稿ではこの特性関数を用いる．

シャープレー値とは, 協力ゲーム (v, N) におけるプレイヤーへの貢献度を与える方法の 1 つであり, プレイヤー i へのシャープレー値は次のように表される．

$$\sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!}(v(S \cup \{i\}) - v(S))$$

先の例における相互依存ネットワークゲームでのシャープレー値は, 以下の通りとなる．

$$A : 0.33 \quad B : 0.83 \quad C : 1.83$$

シャープレー値は各ノードがネットワーク全体に与える影響を表現しており, 値が大きいノードほど障害の影響が大きく, したがって, ネットワーク全体にとっては故障や攻撃に対して脆弱な点となる．

4　応用例

ここでは, シャープレー値を用いた応用として, k 台のノードを防御できる場合に, どのように防御するノードを選ぶかという問題 [1] を検討した. 防御するノードの選び方として, 2 つの方法をシミュレーションにより比較した.

- シャープレー値の大きいノードを選ぶ方法
- 初期障害ノードの数を増やしながら, もっとも障害の影響が大きいノードを 1 つずつ選ぶグリーディー手法

1 回のシミュレーションでは, 防御した k 台以外のノードから無作為に選ばれた k 台に初期障害が生じると仮定した．異なる k $(= 1, 2, \ldots, \lfloor|\mathcal{C}|/2\rfloor)$ と手法の組合せぞれぞれについて, シミュレーションを 10000 回実施した.

表 1　実験結果 (括弧内はノード数)

モデル	シャープレー値	グリーディー法
1 (11)	8.115×10^{-1}	9.263×10^{-1}
2 (17)	8.750×10^{-4}	1.0875×10^{-3}
3 (18)	2.552×10^{-1}	3.652×10^{-1}
4 (18)	2.168×10^{-1}	3.539×10^{-1}
5 (34)	3.281×10^{-1}	4.144
6 (58)	1.623×10^{1}	1.625×10^{1}

実験対象となる相互依存ネットワークのモデルには, 文献 [1] のものを使用した．シャープレー値はモンテカルロ法で近似的に求めた．各ネットワークモデルに対し 2 つの手法でそれぞれ実験を行い, 初期障害の伝播によって障害状態となったノード数の平均値を集計したものを表 1 に示す．いずれのモデルに対しても, シャープレー値を用いた場合の方が, 平均として障害ノードが少なくなることが分かった.

5　おわりに

本研究では, 相互依存ネットワークにおけるノードの障害の影響をシャープレー値によって定量化し, ネットワーク上の脆弱な点を明らかにする手法を提案した．応用例として, 故障や攻撃に対する防御への利用を考え, 実験結果を示した．今後の課題としては, 今回は近似的に行ったシャープレー値の計算方法の改良, および, 他の手法との比較・融合が挙げられる.

参考文献

[1] J. Banerjee, K. Basu, and A. Sen. On hardening problems in critical infrastructure systems. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, pages 153–164, 2018.