

媒介中心性を考慮したレジリエントな自律的ネットワークの構成法 -災害時に破損した道路網復旧への応用-

A Construction Method of Resilient Network Considering Betweenness Centrality
-Application to Restoration of Road Network Damaged by Disaster-

有澤 俊裕*¹ 大沢 英一*²
Toshihiro Arisawa Ei-Ichi Osawa

*¹公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

*²公立はこだて未来大学 システム情報科学部 複雑系知能学科
Department of Complex and Intelligent Systems, School of Systems Information Science, Future University Hakodate

The purpose of this paper is to propose a method for determining the recovery order of roads damaged by disaster. Thus, we provide a decision method that takes the betweenness centrality into account. We regard the road network as a mathematical network. And, this method decide the recovery order by observing the change of betweenness centrality of the road network due to damage.

We evaluate that effects of recovery order on traffic. We conducted a comparative experiment that two decision method. One is proposed method. The other is method of determining the recovery order at random. We used Multi-Agent System to examine, and measured average of travel time. The results of experiment shows that those of proposed method are faster with respect to reduction of travel time than a random method.

1. はじめに

実世界には様々なネットワークが存在する。それは WWW などの情報ネットワークだけでなく、電力網、道路網、人間関係と幅広く、それぞれが我々の生活の中で重要な役割を果たしている。そのようなネットワークには共通する様々な特性が見られ、“複雑ネットワーク”という学問分野がここ数十年の間で急速に発達してきた。

複雑ネットワークの観点から見れば、実世界に存在するネットワークの多くには、スケールフリー性という性質が見られる。スケールフリー性は、そのネットワークの特性(平均経路長や平均次数など)がその規模に関わらず不変であるという性質であり、その性質はネットワーク内にハブと呼ばれる高次数のノードが存在することが大きく影響している。このハブはネットワークの平均経路長の短縮などに寄与するが、同時にネットワークの弱点ともなるため、選択的攻撃などに対して脆弱である。

近年では、ネットワークの構造を工夫することによって、ネットワークの頑健性を高める研究がなされている [1][2][3][4][5]。特に東日本大震災以降、レジリエンスという、「想定外」の事象から柔軟かつ自律的に回復する能力を表す言葉も注目されはじめており、耐故障性と高い復元力を合わせた“レジリエンス性”を向上させることがネットワーク分野だけでなく、様々な分野で重要な課題となっている。

筆者らはこれまで、ネットワークのレジリエンス性向上を目的として、複雑ネットワークの統計的指標である媒介中心性を用いたアプローチを研究してきた [5]。具体的には、ネットワークのハブなどを対象とした選択的攻撃を受けた大規模分散システムを想定し、ネットワークの構造を変化させることで性能の回復を試みるものである。この時、ネットワーク構造を変化させる時の指標として用いたのが媒介中心性である。情報の橋渡しをする度合いを示す媒介中心性を指標としてネットワー

連絡先: 有澤 俊裕, 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科, 北海道函館市亀田中野町 116-2, 0138-34-6448, g2114002@fun.ac.jp

クのリンクを張り替えることによって、ネットワークの情報伝達効率や、平均経路長の維持が可能であることがわかった。

ところで、首都直下型地震が 30 年以内に 70% の確率で起こるとされている [8]。このような大規模災害が発生した際には道路網にも大きな被害が及ぶことが考えられるが、復旧には解決すべき課題が多い。その中でも、「道路網の復旧順序をいかにして決定するか」ということは重要な課題である。災害現場では迅速な道路復旧が求められるが、すべての道路を同時に修復することは困難であり、復旧資材に限られている。また、闇雲に復旧を行った場合、道路網の構造によってはかえって渋滞を引き起こし、社会全体として時間的な損失を生む可能性もある。よって、適切な復旧順序が求められる。

この課題に対し、媒介中心性を用いた手法を応用して解決を試みた。道路網の交差点と道路を、それぞれノードとリンクとして捉え、数理的に解を導出するものである。これにより、複雑なシミュレーションを用いることなく復旧順序を決定することができる。

本研究では、大規模災害時に破損した道路網における媒介中心性を用いた復旧順序決定法を提案し、その効果を検証する。検証にはマルチエージェントシステムを用いた実験を行い、道路復旧の過程で交通がどのように変化するかを観測した。

2. 先行研究

以下に示す先行研究は、ネットワークの構造に着目することでネットワークの頑健性向上を試みたものである。

2.1 カスケード故障

ネットワーク内のあるノードの故障から過負荷故障が連鎖し、最終的に大規模な故障に至る現象をカスケード故障と呼ぶ。あるノードが担っていた負荷を周辺に肩代わりさせることによって、肩代わりしたノードも過負荷によって故障してしまい、さらにそれが連鎖することを表している。

林らはこの問題に対し、結合相関の正負がカスケード故障に与える影響について調査した上で、隣接ノード間のリンク張り

替えによる防御戦略を提案した [1]. 結果として, ネットワークの結合相関はカスケード故障に対し影響を与えるが, それだけでは被害規模は単純に決まらないことを示唆した. また, 防御戦略についてはノードの負荷容量に関する耐久性に応じて, 提案手法と従来手法を使い分けることが効果的であると論じている.

2.2 ネットワークの機能不全と構造最適化

谷澤は故障と攻撃の双方に強いネットワークについて考察している [2]. 結論として, 故障と攻撃の双方に対して最も頑強であるネットワーク構造は, 二極次数分布構造を持つネットワークであるとしている. 二極次数分布とは, 2つの次数 k_1, k_2 のみの次数分布である. しかし, このような極端な次数分布を持つネットワーク構造を持つネットワークは実世界に多く存在しているとは言いがたく, 応用面での難点を持つ.

2.3 自律的ネットワークにおける選択的攻撃の影響と媒介中心性を考慮した修復手法

有澤らはハブやネットワーク内で重要な役割を担うノードを攻撃する選択的攻撃が, ネットワークにどのような影響を与えるのかを調査した上で, 媒介中心性に着目した修復手法を提案した [5]. この修復手法は, 攻撃されたノードそのものを復旧させるのではなく, ネットワーク構造の変化(すなわち, リンクの張り替え)によって攻撃前のネットワークの性能に近付けることを目標としている. 実験の結果, 媒介中心性の高いノードに対して優先的にリンクの張り替えを行った場合, 平均経路長や情報伝達効率の回復や維持が可能であることを示している.

3. 提案手法

本章では, 提案手法について詳述する. [5]では, 媒介中心性に着目したネットワーク修復手法を提案したが, 本研究では各ノードの媒介中心性の変化に着目した復旧順序決定手法を提案する. また本章以降, 道路網を数理的なネットワークとして表現し, 交差点をノード(その集合を $N = \{n_1, n_2, \dots, n_a\}$)とし, 道路をリンク(その集合を $L = \{l_1, l_2, \dots, l_b\}$)と表す.

3.1 媒介中心性

まず, 媒介中心性について述べる. 媒介中心性は, 情報を橋渡しすることに関与している度合いを示すものである. ネットワーク内の任意の2ノードを選び, それぞれの組み合わせの最短経路内にあるノードが存在する確率によって決定される. ノード n_i の媒介中心性 B_i は, 始点 n_{i_s} から終点 n_{i_t} の最短経路の中で n_i を通るものを $g_i^{(i_s i_t)}$ とし, 最短経路の総数を $M_{i_s i_t}$ とした時, 以下の式で算出する.

$$B_i = \frac{\sum_{i_s=1; i_s \neq i}^a \sum_{i_t=1; i_t \neq i}^{i_s-1} \frac{g_i^{(i_s i_t)}}{M_{i_s i_t}}}{(M-1)(M-2)/2} \quad (1)$$

3.2 復旧手順

Step1 通常時における媒介中心性の把握

復旧順序を決定する前に, 通常時(破損がない, すべての道路が通行可能な状態を指す)の各ノードにおける媒介中心性を計算する. 計算方法は(1)式に従い, その集合を $Bn = \{bn_1, bn_2, \dots, bn_a\}$ とする.

Step2 破損箇所の把握

破損箇所を全て把握する. ここでは破損をネットワークからリンクを削除することで表現し, その破損箇所の集合を $DL = \{dl_1, dl_2, \dots, dl_c\}$ (ただし, $c \leq b$) とする.

Step3 仮計算

Step3-1 仮復旧

破損箇所の集合 DL から任意のリンクを1つ(仮に dl_i とする)復元する. 復元した後, 全てのノードについて媒介中心性を再計算し, その集合を $Bd = \{bd_1, bd_2, \dots, bd_a\}$ とする.

Step3-2 二乗誤差の計算

通常時の媒介中心性 Bn と Step3-1 で計算した Bd を比較し, 二乗誤差を計算する. その計算結果を r_j とした時,

$$r_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^a (Bn_i - Bd_i)^2}{a}} \quad (\text{ただし, } j \leq c) \quad (2)$$

とする.

Step3-3 計算結果集合の作成

Step3-1 と Step3-2 を dl_c まで繰り返し, その計算結果の集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_c\}$ を作成する.

Step4 復旧順序の決定

二乗誤差の集合 R の中から, 最も数値の低いもの r_{min} を復旧順序第一順として採用する. その後, r_{min} を DL から削除する. 以下, Step3~4 を DL が空になるまで繰り返し, 第二順, 第三順と決めていく.

4. 実験モデル

4.1 概要

本実験モデルでは, 道路網を数理的なネットワークで表現する. 自動車に見立てたエージェントをこのネットワーク上で動作させることにより, ネットワーク構造の変化(すなわち, 道路の破損や復旧)が, 旅行時間等にどのように影響するかを観測するものである.

4.2 設定の詳細

4.2.1 ネットワーク構造

ネットワークの構造は, 実験として提案手法の効果を確かめるようなものが望ましい. 具体的には, (1) エージェントが移動するための距離が一定以上ある(少なくとも, 距離1でない)こと, (2) 媒介中心性の差が明確に現れること, 以上2点を満たす必要がある. そこで, 以下の様にネットワークを構成した.

1. ノード数が, 生成したいネットワークの40%であるようなBAモデルのネットワークを2つ用意する.(それぞれネットワーク S , ネットワーク E と呼称する)
2. 残りの20%のノードを用いて, 図1のようなネットワークを作成する. 本研究ではこれをブリッジと呼称する. ただし, 図中の三角形と四角形はそれぞれネットワーク S および E のノードを表す.
3. ブリッジを用いてネットワーク S とネットワーク E を接続する. 接続先は S , E からランダムで選択する.

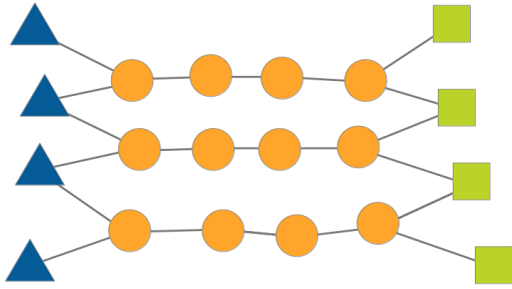


図 1: ブリッジの例

ネットワーク S および E を BA モデルで生成する理由は、(1) スケールフリー性を有すること、(2) ハブを有するその構造上、各ノードの媒介中心性の差が明確であること、の 2 点が挙げられる。さらに、エージェントの出発地をネットワーク S から、目的地をネットワーク E から選択することにより、出発地と目的地のどの組み合わせでも少なくともブリッジの距離以上の移動距離を設定することができる。よって、実験での旅行時間の差をより明確にすることが可能である。生成したネットワークの例を図 2 に示す。

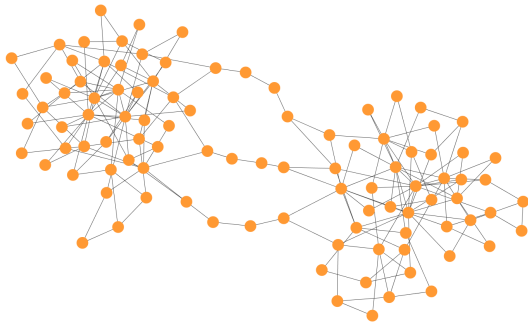


図 2: ネットワークの例

4.2.2 破損箇所の決定とその割合

破損箇所は実験の意図から、リンクの媒介中心性(ノードではないことに注意されたい)を事前に計算し、その上位 40% からランダムで選択するものとする。ただし、ネットワークの連結性を保持するため、ネットワークを分断したり、あるノードが孤立するようなリンクの切断は行わないものとする。また、破損箇所数は参考文献 [8] を基に、ネットワークのリンクの 10% とした。

4.2.3 出発地・目的地の組み合わせと経路

前述の通り、エージェントの出発地と目的地はネットワーク S および E からそれぞれランダムで決定する。目的地までの経路はダイクストラ法を用いて算出した最短経路とする。ただし、道路の復旧によってより最適な経路が選択可能な場合は更新する。また、ノード間を移動するための時間的なコストは一律で 10 単位時間かかるものとする。

5. 実験

本実験では、提案手法の性能評価を行った。以下にその詳細を示す。

5.1 実験の概要

提案手法の性能評価の方法として、エージェントが出発地から目的地まで移動するのに要した旅行時間を計測することとした。道路の復旧は一定時間ごとに行い、その都度旅行時間の平均を算出する。復旧順序は提案手法を用いて決定したものと、ランダムで決定したものの 2 通りを用意して比較した。

5.2 実験のパラメータ

実験は 10 回行った。1 回の実験に用いるパラメータは以下のように設定した。

- ネットワークのノード数: $N = 100$
- 出発地と目的地の組み合わせ数: $D = 10000$
- エージェント (自動車) の数: $A = 100$

また、道路復旧にかかる時間は考慮せず、復旧のタイミングは $T = D / (\text{破損箇所数})$ とした時、 T 単位時間経過ごとに 1 箇所復旧させることとした。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 道路復旧による旅行時間の変化

道路復旧ごとの (すなわち、 T 単位時間ごとの) 旅行時間の平均を図 3 に示す。この図を見ると、道路網の復旧順序をランダムで決定した場合の旅行時間が直線的に減少しているのに対し、提案手法を用いた場合は修復回数が少ないうちから急激に減少していることがわかる。また、提案手法は破損箇所の 1/3 程度を復旧した時点で通常時の旅行時間に大きく近づけることが可能であり、ランダムの場合と比較して効率的であると言える。

次に全体の平均旅行時間を表 1 に示す。提案手法とランダムの旅行時間の差が 4.2% であり、一見小さく見えるかもしれないが、自動車 1 台あたりの値であるため実世界の社会全体として考えた場合には十分大きな値と言える。また、差が最大となったのは 3 箇所目を修復した時で、その差は 8.5% であった。

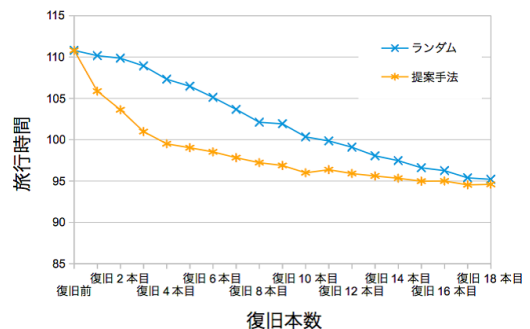


図 3: 道路復旧ごとの平均旅行時間の変化

5.3.2 道路網の構造による差異

今回の実験では、道路の破損箇所をリンクの媒介中心性上位 40% の中からランダムで選択している。よって、破損後のネットワーク構造は実験ごとに異なることとなる。ここではある 2 回の実験で得た結果を例にして述べる。便宜上それぞれ、結果 A、結果 B と呼称する。結果 A および B のグラフを図 4、図 5 に示す。またそれぞれの平均旅行時間を表 2 に示す。

結果 A では、提案手法とランダムの場合の平均旅行時間の差が 2.5% に対し、結果 B では 7.0% と 2 倍以上の違いが見ら

表 1: 平均旅行時間

復旧順序	旅行時間	通常時との比較 (%)
通常時	94.25	-
復旧前	110.8	+17.6%
提案手法	98.06	+4.0%
ランダム	101.94	+8.2%

表 2: 結果 A, B の平均旅行時間

復旧順序	結果 A	結果 B
通常時	95.35	97.30
復旧前	109.84(+15.2%)	119(+22.3%)
提案手法	99.16(+4.0%)	100.81(+3.6%)
ランダム	101.53(+6.5%)	107.64(+10.6%)

れた。すなわち、結果 B の場合には提案手法がより効果を発揮しているということになる。ここで道路の破損による平均旅行時間の上昇率を見ると、結果 A が 15.2%増、結果 B が 22.3%増であった。後者のネットワークのほうが、旅行時間の短縮に寄与する道路を多く破損しているため、平均旅行時間が上昇したということである。つまり復旧前後の平均旅行時間の差が大きいような破損の仕方をした場合に、提案手法はより効果を発揮すると思われる。

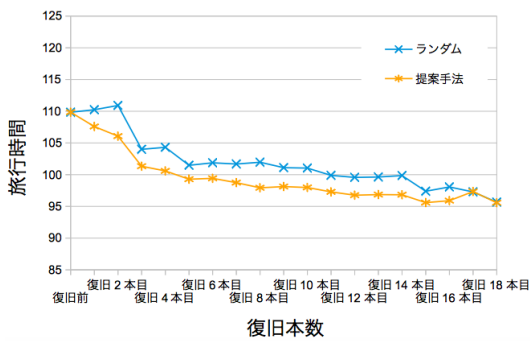


図 4: 結果 A

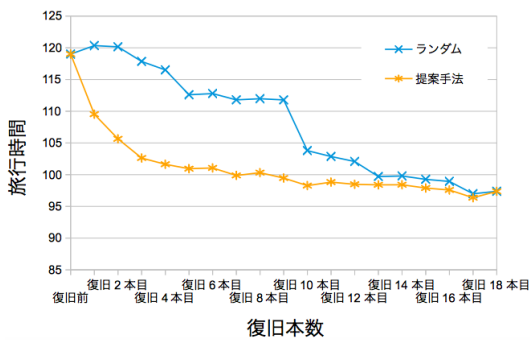


図 5: 結果 B

5.4 考察

以上の結果より、復旧順序がランダムなものより提案手法によるもののほうが、いずれの場合も平均旅行時間が短く優れていると言える。また、その効果は破損後のネットワーク構造により異なることも確認できた。破損後の道路網の状況によっては、新しい復旧順序決定法を考案して適用することにより、さらに効率的な復旧順序を提供できる可能性がある。

6. おわりに

本研究では、大規模災害時の道路網復旧順序の決定という課題に対し、媒介中心性を用いた手法を提案した。マルチエージェントシステムを用いたシミュレーションを行った結果、ランダムな復旧順序と比較して、平均旅行時間を早期に通常時の値に近づけることが可能であったことなどから、本提案手法の有用性を示すことができた。

今回の実験では、提案手法の効果を確認するために実験モデルを極力シンプルに設定した。よって、実世界に適用するためにはより複雑なシミュレーションが必要であると思われる。また、復旧順序の決定に関しても、破損道路の長さや復旧にかかる時間、コスト等を考慮することによって、より実用的かつ効果的な復旧順序を提案することも可能となることが予想される。今後は以上の要素を盛り込み、提案手法を改良するとともに、より現実的な状況に則したシミュレーションを行う予定である。

参考文献

- [1] 林 幸雄, 宮崎敏幸: 結合相関を持つ Scale-Free ネットワーク上のカスケード故障に対する防御戦略, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.3, pp.802-812 (2006) .
- [2] 谷澤俊弘: 故障と攻撃の両方に強い繋がり方とは?—ネットワークの機能不全と構造最適化—, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.3, pp.282-289 (2008) .
- [3] 山本聡彦, 生天目 彰: 進化手法による最適同期ネットワークの設計, 情報処理学会研究報告, Vol.2009-MPS-75, No.10 (2009) .
- [4] 小林直樹, 白山 晋: ネットワークトポロジーの最適化とその過程の分析, JAWS2010 講演論文 (2010) .
- [5] 有澤俊裕, 大沢英一: 自律的ネットワークにおける選択的攻撃の影響と媒介中心性を考慮した修復手法, 情報処理学会北海道シンポジウム 2014 講演論文集, pp.242-247 (2014) .
- [6] 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワーク—基礎から応用まで—, 近代科学社 (2010) .
- [7] Barabasi, A.L. and Albert, R. : Emergence of scaling in random networks, Science, Vol.286, No.5439, pp.509-512 (1999) .
- [8] 東京都防災会議 地震部会: 首都直下地震等による東京の被害想定, 東京都防災ホームページ (オンライン) (http://www.bousai.metro.tokyo.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/000/401/assumption_h24outline.pdf), (参照 2015-03-23)