

(302) ネットワーク

複数メトリックを考慮したコスト算出法の提案と OpenFlow への適応性の評価

Proposal of cost calculation method considering multiple metrics and evaluation of adaptability to OpenFlow

大柿 かほる[†]

高野 知佐[†]

前田 香織[†]

Kaoru Ogaki[†]

Chisa Takano[†]

Kaori Maeda[†]

[†] 広島市立大学大学院 情報科学研究科

1 はじめに

情報ネットワークを取り巻く環境の変化に伴い、従来のネットワーク制御では実現できない、柔軟な転送制御やネットワークリソース管理（負荷分散や QoS 制御）手法が求められている。我々はこれまで、ネットワークリソースの有効利用や安定運用を目的に、リンクとノードの特性という複数メトリックを動的に考慮するコスト算出手法を提案し、負荷分散、データ転送効率といったネットワーク性能を局所的に向上させることができることを示した。本稿では、さらにネットワーク全体のリソースの負荷分散とデータ転送効率の向上できるように、リンクとノードの特性に加え、ネットワークトポロジを考慮したコスト算出法を提案する。具体的には、グラフ理論的に定式化されているノード中心性という概念を利用する。また提案方法の OpenFlow ネットワークへの実装方法を検討するとともに、シミュレーション実験により適用可能性を評価する。

2 関連研究

2.1 ノード中心性

ノード中心性とはネットワークを構成するノードがネットワーク内でどれほど中心的であるかを示す指標であり、ノードの重要性を評価、比較するために用いられる。ノードが中心的であると判断する要素によって様々な種類があり、代表的なものとして、次数中心性、近接中心性、媒介中心性[1]-[3]、情報中心性[4]、PageRank[5]が挙げられる。これらのうち、ノード間の「経路」に関する中心性指標は媒介中心性と情報中心性である。媒介中心性は、他のノードどうしをつなぐ最短経路上に位置し、ノードを通過する最短経路の数が多いほど高くなる指標である。

一方、本研究のコスト算出で利用する情報中心性[4]は、ネットワークに含まれるノード間の経路長を重みとして最短経路以外の経路も考慮した中心性指標である。ノード i とノード j の対に対して、1つの経路上のリンクコストの総和の逆数を経路の情報量とすると、各経路の情

報量の総和がノード対の情報量 I_{ij} ($I_{ii} = \infty$) となる。情報中心性はノード対の情報量 I_{ij} の調和平均をとることで求められる。ノード数 n のグラフのノード i の情報中心性は式(1)で表される。

$$CINF_i = \frac{n}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{I_{ij}}} \quad (1)$$

ノード間の複数ある経路に対して、媒介中心性は最短経路のみに注目しているのに対し、情報中心性は迂回経路も含めノード間の全ての経路を考慮しており、一般的に次数が大きく他のノードとの距離が近いノードほど高く評価される。

2.2 既存コスト算出法

自律システム(AS)内の経路制御を行うリンクステート型プロトコルの OSPF(Open Shortest Path First)[6]は帯域幅を考慮したコストの設定が可能であり、現在 AS 内の経路制御として主流に使われている。しかし、リンク帯域幅のような静的な値をコスト算出に利用した場合、最適経路上のリンクやノードにトラヒックが集中する欠点があり輻輳の要因になる。

この問題に対し、OSPF のコスト決定アルゴリズムとして B.Fortz[7]らや吉田[8]らの研究が提案されている。[7]では現在のノード（ルータ）数、リンク数、リンクの帯域幅、end-to-end での帯域利用率をパラメータとし、ネットワーク全体の負荷分散を行うものである。また、[8]は[7]のようにトラヒックの負荷を分散させるのではなく、パケットを流す経路をネットワーク管理者が自由に設定できるようその要求をポリシーとして記述し、それらを反映させたコストを設計する。しかし、どちらの研究もノード特性（転送能力や CPU 使用率）は考慮されておらず、ノードの負荷集中を回避することができない。そのためネットワークの有効利用と安定運用には、ノード特性も合わせて考慮する必要がある[9]。

3 複数メトリックを考慮したコスト算出法

3.1 従来手法

本節では、リンク特性だけでなく、ノード特性も考慮したコスト算出法（従来手法）[9] について述べる。この手法はグラフ理論で扱われるラプラシアン行列の対称化を利用している。

n ノードからなる有向グラフ $G(V, E)$ を考える。 V はノード集合、 E はリンクの集合であり、ノード i からノード j に向かうリンク ($i \rightarrow j$) の重みを w_{ij} とする。このとき、 (i, j) 成分が w_{ij} である $n \times n$ 正方行列を、隣接行列 $\mathcal{A}$ と呼ぶ。有向グラフの場合、隣接行列 $\mathcal{A}$ は非対称な行列である。また、ノード i の重み付き出次数を d_i とすると、 $d_i = \sum_{j=1}^n w_{ij}$ で表され、出次数を対角成分にもつ対角行列を次数行列 $\mathcal{D}$ と呼ぶ。

Laplacian 行列 $\mathcal{L}$ は

$$\mathcal{L} := \mathcal{D} - \mathcal{A} \quad (2)$$

で定義され、有向グラフの場合、Laplacian 行列は非対称行列である。 $\mathbf{m}$ を $\mathcal{L}$ の固有値 0 に属する左固有ベクトルであるとする、左固有ベクトル $\mathbf{m}$ の全ての成分 $m_i > 0$ が $m_i w_{ij} = m_j w_{ji}$ を満たす場合、非対称な Laplacian 行列 $\mathcal{L}$ は対称な Laplacian 行列 $\mathbf{L}$ を用いて以下のように表わせる。

$$\mathcal{L} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{L} \quad (3)$$

ここで $\mathbf{M} := \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$ はリンクの非対称性をノードの特性に還元するための「ノードのスケールングファクター」であり、ノード特性を表す行列と言い換えることができる[10]。従来手法では式(3)を用いてノード特性を有向グラフのリンク特性に変換する。ノード i の特性 m_i を CPU 未使用率 c_i と転送処理能力 s_i [bps] を用い、式(4)で表す。

$$m_i = c_i \frac{s_i}{\max_{1 \leq i \leq n} s_i} \quad (4)$$

ノード特性 m_i は無次元数である。次に、ノード特性をリンク特性に還元することを考える。式(3)の Laplacian 行列 $\mathcal{L}$ の成分を 1（つまり、 $w_{ij} = w_{ji} = 1$ ）としたとき、式(4)を使って非対称な Laplacian 行列 $\mathcal{L}$ を求めることができる。リンク ($i \rightarrow j$) のコスト $Ncost_{ij}$ は行列 $\mathcal{L}$ の (i, j) 成分 $\mathcal{L}_{ij}$ を用いて式(5)で表される。

$$Ncost_{ij} = -\mathcal{L}_{ij} \quad (5)$$

また本来のリンク ($i \rightarrow j$) の特性を表すコスト $Lcost_{ij}$ をリンクの帯域未使用率 bp_{ij} とリンクの帯域幅 bw_{ij} [bps] を用いて、

$$Lcost_{ij} = \frac{\max_{(i,j) \in E} bw_{ij}}{bp_{ij} \times bw_{ij}} \quad (6)$$

で表す。従来手法ではノード特性と本来のリンク特性を統合するコスト $NLcost_{ij}$ を以下のように定義する。

$$NLcost_{ij} = Ncost_{ij} \times Lcost_{ij} \quad (7)$$

3.2 提案手法

前節で述べた従来手法では、対称な Laplacian 行列 $\mathcal{L}$ の左から行列 $\mathbf{M}$ の逆行列をかけることでノード特性をリンク特性に還元している。これは、ノードから出ている全てのリンクにノード特性の逆数をコストとして与え

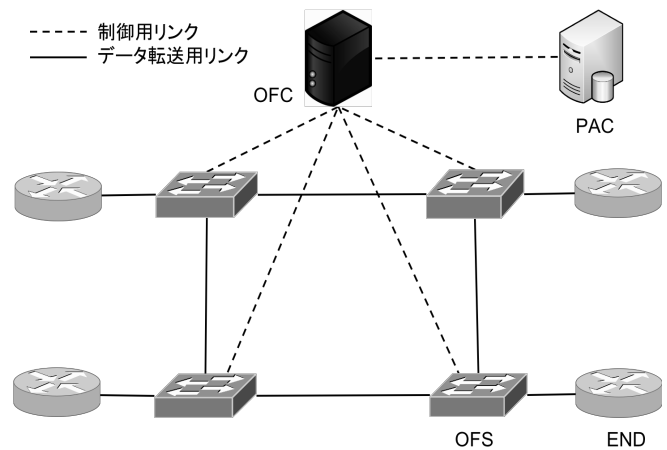


図 1 プロトタイプシステム構成図

ているに過ぎない。つまり、従来手法で算出されたコストは、ノードおよびリンクにおける複数のメトリックを反映したものではあるが、ネットワークトポロジを考慮していないため、ネットワーク全体の性能向上にはつながらない可能性がある。

本節では、従来手法で議論したリンク特性とノード特性に加え、ネットワークトポロジを考慮してリンクコストを算出する提案手法を提案する。トポロジ構造がネットワーク全体の性能に大きな影響を及ぼすことを前提にしているものであり、ノード間の全ての経路情報がノード特性に還元される情報中心性を利用してコストを算出する。

提案手法のコスト算出手順は以下のとおりである。すべてのノード対の情報量を $I_{ij} = 1$ とし、式(1)から情報中心性を算出する。また、ネットワークサイズやトポロジによって情報中心性の値の幅（最大値－最小値）が異なるため、式(8)を用いて $[0, 1]$ の範囲にスケールングしておく。

$$CINFS_i = \frac{CINF_i - \min_{1 \leq i \leq n} CINF_i}{\max_{1 \leq i \leq n} CINF_i - \min_{1 \leq i \leq n} CINF_i} \quad (8)$$

また、式(9)のように、スケールングした情報中心性 $CINFS_i$ の逆数を式(4)から算出したノード特性 m_i と掛け合わせることで、情報中心性を考慮したノード特性 m_inf_i を得ることができる。

$$m_inf_i = \frac{m_i}{CINFS_i} \quad (9)$$

最後に、従来手法と同様に、式(9)で得られたノード特性を式(3)を用いてリンクコストに変換し、式(5)(6)(7)の手順でノード特性、リンク特性、トポロジを考慮したリンクコストを算出する。

4 プロトタイプシステム

提案手法を評価するためのプロトタイプシステムについて検討する。プロトタイプシステムの構成を図1に示す。プロトタイプシステムの構築には OpenFlow を用いる。OpenFlow とは SDN (Software Defined Network) を実現する技術の1つであり、複数のネットワーク機器を1つの制御装置で集中管理するプロトコルである。また、OpenFlow では様々な指標を元に柔軟に経路制御を行うことができるため、提案手法のような複数メトリックを考慮したコストによる動的な経路制御が可能である。

1 台のコンピュータに仮想マシンを複数作成し、

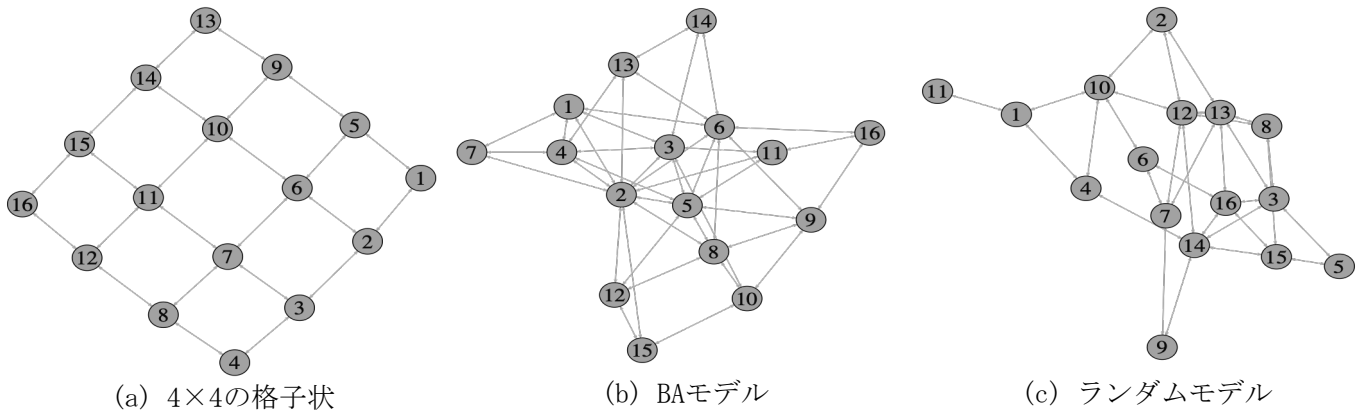


図 2 シミュレーションで利用したネットワークトポロジ

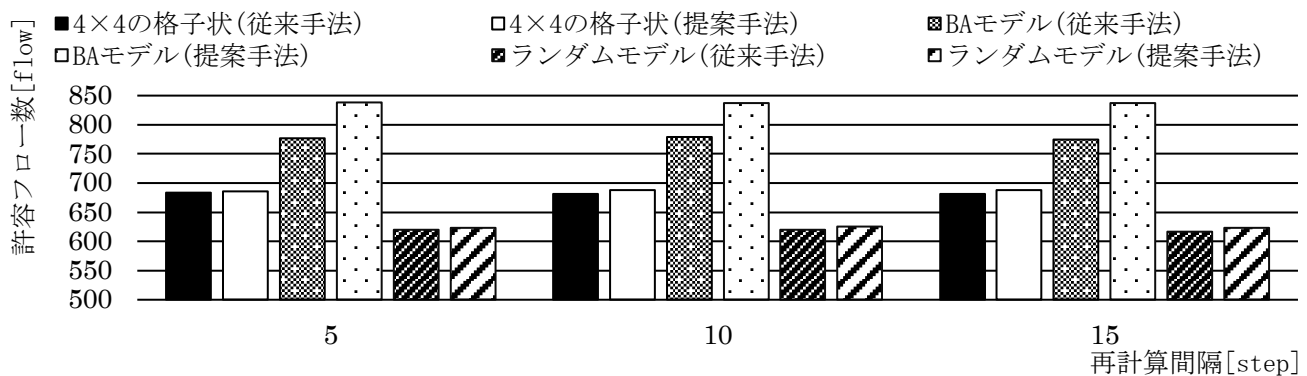


図 3 シミュレーション結果 (許容フロー数)

OpenFlow ネットワークを構築する。OpenFlow スイッチ (OFS) は OpenFlow コントローラ (OFC) の指示に従いパケット転送を行う。OFC は Path Calculator (PAC) から送信された経路を元に OFS に経路を指示する。また、SNMP を用いて OFS の OFS 間の帯域使用率および CPU 使用率などの動的に変わる情報(動的情報)を定期的に収集する。PAC は定期的に動的情報を OFC から取得し、取得した動的情報を元に経路計算を行い、OFC に通知する。End Router (END) は OpenFlow ネットワークから出たパケットが初めに到達するルータであり、OpenFlow ネットワークの評価を行うために作成する。動作手順は以下のとおりである。

1. OFC は動的情報を時間 t_c 毎に収集する
2. PAC は一定時間 $t_p (> t_c)$ 毎に OFC から動的情報を受け取り、END の全組み合わせに対する経路を計算し、OFC に経路情報を通知する
3. OFS は END からパケットを受け取ると、送信元および宛先 END の MAC アドレス、送信元および宛先ホストの IP アドレス、IP プロトコル番号、送信元および宛先ポート番号からフローテーブルにフローエントリが存在するか確認する
4. フローエントリがある場合はそれに従いパケットを転送する。ない場合は OFC にフローエントリを要求し、受け取ったフローエントリをもとにパケットを転送する

PAC の経路計算において提案手法で算出されたコストを用いる。動的情報をノード特性とリンク特性としてリンクコストを算出し、最短経路アルゴリズムを用いて、コストが最小になる経路を計算する。

5 シミュレーションによる評価

提案手法の有用性を検証するため、事前実験としてシミュレーションによるデータ転送効率の評価を行う。[9]におけるシミュレーション実験により、従来手法は OSPF におけるコスト算出法と比較してリソースの負荷分散とデータ転送効率の向上に有効であることが示されている。本稿では従来手法と提案手法におけるデータ転送効率の比較を行った。

シミュレーション条件は以下のとおりである。

- ・ リンクの帯域幅およびノードの転送能力は全て 10[Gbps]とする
- ・ 単位時間[1step]毎に送信元ノード、宛先ノードをネットワーク内からランダムに選択する(プロトタイプシステムにおける t_c に対応)
- ・ ノード間で 20[kbps], 200[kbps], 2[Mbps], 20[Mbps]の中からランダムにフローを流す
- ・ 各ノードの CPU 使用率または各リンクの帯域使用率が 1 つでも 100%を超えたとき、シミュレーションを終了する
- ・ 終了時点でネットワークに収容できたフローの数(許容フロー数)を従来手法と提案手法で比較する
- ・ 経路は 5, 10, 15[step]毎(プロトタイプシステムにおける t_p に対応)に、コスト算出時点の動的情報を元に各提案手法により算出されたコストを用いて再計算される

図 2 は評価に用いたネットワークトポロジである。ネットワークに存在するノード数を 16 個とし、(1) 4×4 の格子状モデル、(2)スケールフリー性 (ハブノード) のある BA モデル[1]、(3)ノード間のリンクがランダムに張られるランダムモデルの 3 つを用いる。

表1 シミュレーション終了時のノードの CPU 使用率の平均値と分散値

トポロジ 手法	4×4 の格子状		BA モデル		ランダムモデル	
	従来	提案	従来	提案	従来	提案
CPU 使用率(%)の平均	89.897	89.914	75.842	78.887	72.245	72.956
CPU 使用率(%)の分散	144.866	122.202	236.382	234.864	285.937	270.147

表2 シミュレーション終了時のノードの帯域使用率の平均値と分散値

トポロジ 手法	4×4 の格子状		BA モデル		ランダムモデル	
	従来	提案	従来	提案	従来	提案
帯域使用率(%)の平均	43.598	43.677	18.552	19.331	25.243	25.509
帯域使用率(%)の分散	145.889	144.132	51.797	51.699	76.208	74.779

図 3 にシミュレーションの結果を示す。横軸は動的情報を取得してコストおよび経路を再計算する時間間隔 [step], 縦軸はシミュレーション終了までに入力された許容フロー数[flow]を示す。図 3 の結果をみると、全てのトポロジにおいて提案手法の方が従来手法よりも多くのフローを許容することがわかった。特に、BA モデルの場合、提案手法の方が許容フロー数が多い。これは BA モデルにハブノードが存在していることから、ネットワークトポロジを考慮した提案手法を用いることでハブノードへのフローの集中が軽減されたためである。

シミュレーション終了時のノードの CPU 使用率(%)の平均値 (アンサンブル平均) と分散値を表 1 に、リンクの帯域使用率(%)の平均値と分散値を表 2 に示す。表 1 から、どのトポロジにおいても提案手法の CPU 使用率の平均値は従来手法より高く、提案手法の分散値は従来手法より低くなっている。一方、リンク帯域使用の効率化についても同様に、どのトポロジにおいても提案手法の帯域使用率の平均値は従来手法より高く、提案手法の分散値は従来手法より低くなっていることがわかる。

以上より提案手法がネットワークリソース (CPU およびリンク帯域) を有効に活用し、データ転送に伴う負荷分散および転送効率の向上を実現することがわかった。

6 まとめ

本研究ではリソースの負荷分散とデータ転送効率の向上を目的に、リンクとノードの特性に加え、トポロジを考慮したコスト算出法を提案した。また、シミュレーション実験によりトポロジを考慮した提案手法の有効性を示した。今後の課題としてはプロトタイプシステムを用いて、以下の 3 点の評価を行う。

- ・ データ転送効率の評価
- ・ リソースの負荷分散ができていないかを確認するためにリソースの使用率の分散値の評価
- ・ 経路変更の最短間隔を検証するために計算時間の評価

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K11929 及び 17H01737, 17K06438, 18K11271 より研究費の支援を受けて実施したものです。

参考文献

- [1] A.L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol.286, pp.509-512, 1999.
- [2] L.C. Freeman, "Centrality in social networks: Conceptual clarification," *Social Networks*, vol.1, no.3, pp.215-239, 1979.
- [3] L.C. Freeman, S.P. Borgatti and D.R.White, "Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow," *Social Networks*, vol.13, pp.141-154, 1991.
- [4] K. Stephenson, M. Zelen, "Rethinking centrality: Methods and examples," *Social Networks*, vol. 11, no. 1, pp. 1-37, 1989.
- [5] S. Brin and L. Page, "The Anatomy of a largescale hypertextual web search engine," *Computer Networks and ISDN Systems*, vol.30, Issues1-7, pp.107-117, 1998.
- [6] J. Moy, "OSPF Version2," RFC 2328, April 1998.
- [7] B. Fortz, M. Thorup, "Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF weights," in *Proceeding of the 19th IEEE INFOCOM*, pp. 519-528, 2000.
- [8] 吉田薫, 永見健一, 江崎浩, "OSPF ネットワークにおけるポリシーを考慮したコスト再設計に関する研究," 情報処理学会研究報告, 2004-QAI-10, vol. 2004, no. 8, pp. 49-54, 2004.
- [9] 大柿かほる, 高野知佐, 前田香織, "スペクトルグラフ理論による複数メトリックを考慮する経路制御コスト算出法の提案," 電子情報通信学会信学技報 IN2018-11, vol. 118, no. 6, pp. 59-64, 2018.
- [10] C. Takano and M. Aida, "Revealing of the underlying mechanism of different node centralities based on oscillation dynamics on networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol.E101-B, no.8, pp. 1820-1832, 2018.
- [11] A.L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509-512, Oct. 1999.