

トポロジ情報を用いた Loose Source Routing による 省電力経路制御の性能評価

上村尚史^{†1} 田村瞳^{†2}

^{†1} 福岡工業大学大学院 工学研究科, ^{†2} 福岡工業大学 工学部

インターネットにおける画像・動画共有サイトの普及や高機能モバイルの普及により大容量の通信をいつでもどこでも楽しめる状況となっているため、インターネットで収容するトラフィック量が増加し続けており、それに伴いネットワーク関連機器による消費電力も増加している。現在ネットワーク機器の電力消費量の削減を目的として、通信経路を可能な限り集約して使用されない経路上の機器を省電力モードに切り替える経路制御手法に関する研究が行われているが、その提案の多くはトラフィックに応じて転送経路の切替えを行うものであるため、通信性能への悪影響や頻繁な経路の切替えにより消費電力を大きく削減できないことが予想される。本研究では、トラフィック主導型ではなく、ネットワークトポロジに適した経路集約を実現するため、ネットワークトポロジ情報を利用した Loose Source Routing による通信経路の集約手法を提案し、提案手法適用時の省電力性能と通信性能について考察する。

Performance Evaluation of Loose Source Routing with Topological Characteristics for Power-Saving Wired Core Networks

TAKAFUMI KAMIMURA^{†1} HITOMI TAMURA^{†2}

For energy efficient networking, the arrival traffic to the network should be efficiently accommodated to the smallest as possible number of paths in the network. This paper proposes the Loose Source Routing with the some topological information for route aggregation in intra-AS networks. Some simulation results show the effectiveness of route aggregation by our proposed loose source routing considering with topological information of the controlled networks, and the energy efficient networking will be achieved.

1. はじめに

インターネットは社会基盤と言えるほどに普及し、従来のようにパソコンからのインターネット接続だけでなくテレビやハードディスクレコーダ等の家電製品、スマートフォンや携帯電話によるインターネット接続が多く利用されるようになった。また、画像・動画共有サイトやライブ動画配信サイトの普及により、個々のユーザが要求するトラフィック量が増加しており、インターネット上で交換されるトラフィック総量は増加し続けている。そこで、ユーザが通信中にストレスを感じることなく、また、その通信が途切れることが無いように ISP (Internet Service Provider) は、ネットワーク内で取り扱うことのできるトラフィック総量を増加させるための対策として、ネットワーク中継機器の高性能化や中継機器を増設しネットワーク経路や帯域の増加などの対応を行っている。このようにバックボーンネットワークで利用される処理性能が高い機器への置き換えにより、既設の機器よりも電力消費量が大幅に増加する。また、ネットワーク機器が増設されることで、ネットワーク機器による総電力消費量はさらに増加してしまう。そこで、ネットワーク機器全体の電力消費量の削減を目的としたネットワーク機器の省電力化やトラフィック制御手法に関する研究が盛んである[1]。

ネットワーク機器自体の省電力化については、ハードウェアレベルでの省電力化に加え、機器に入出力されるトラフィック量に応じて機器の稼働モード(通常の稼働モードであるアクティブ状態/低消費電力状態であるスリープ状態)を動的に切り替える技術について研究開発が進行しており、2010 年 11 月に IEEE 802.3az として標準化された [2]。一方、このような機器単体の省電力制御を活用し、トラフィックの転送経路をネットワークの一部の通信資源に集約させることでネットワークワイドな省電力化を図る省電力トラフィック制御技術が多く研究されている [3][4]。これらの提案の大部分はトラフィック主導型であり、制御対象であるネットワーク内において、トラフィックの発生量が少ない場合の転送経路、多い場合の転送経路を予め定めておき、トラフィック量が閾値を越えるかそうでないかで経路を切り替える手法やトラフィック発生量に応じた転送経路決定手法が主流である。しかし、これらの手法では、トラフィックの発生状況によって転送経路が頻繁に切り替わる可能性があり、経路上のネットワーク機器の状態遷移が頻繁になり、消費電力を大きく削減できないことが予想される。また、経路の頻繁な切り替えにより、通信品質が低下する可能性もある。

ネットワークワイドな省電力化を実現するためには、転送経路の決定において、いつネットワークの内部のどのノードでどのノード宛に発生するか予測することが不可能なトラフィックを、可能な限り少ないネットワーク機器を稼働させた集

約経路上において、トラヒックの転送性能が劣化することなく、電力消費量を抑制して転送する、という要求を満足しなければならない。そこで本研究では、トラヒック主導ではなくネットワークのトポロジに基づく経路設定について検討する。

近年の研究成果より、インターネットにおけるトポロジについて、スケールフリーと呼ばれる性質があることが議論されている。スケールフリー性を持つネットワークでは、ノード次数（ノードの接続リンク数） k がべき乗則 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ に従う。これはネットワーク内に多数のリンクを有する（すなわち、多数の隣接ノードと接続する）ノードがわずかに存在する一方、少数のリンクを有するノードが多数存在する特徴を示している。また、多数のリンクを有するノード（ハブノードと呼ばれる）が存在することによりネットワーク内の任意の2ノード間の通信距離が短くなる、という特徴を持つ。さらに、スケールフリー性を有するネットワークにおける通信特性が過去の研究から明らかにされており、ハブノードが多く、トラヒックを仲介することが明らかになっている [7]。

本研究では、このようなインターネット・トポロジのスケールフリー性を利用し、トラヒックの発生状況に依存して経路上のノードやリンクがアクティブ状態とスリープ状態との間で頻繁に状態遷移を繰り返すことのない、比較的長期的にアクティブ状態としておける集約経路を利用するため、ノード次数やノードの近接中心性といったネットワークトポロジ情報を利用した経路制御手法を提案する。そして、様々なネットワークトポロジにおいて、提案手法による省電力性能を示し、集約経路の利用のために適切なトポロジ情報について議論する。

2. ネットワークトポロジを表現する指標

本研究では、ネットワークトポロジの特徴とネットワーク上の幹線との関係を調査するため、ネットワークトポロジを表現する各種指標について紹介する。

2.1 Degree Centrality

Degree Centrality (DC, 次数中心性) とは、ノードが有するリンク数、すなわち、あるノードの隣接ノード数を Degree (次数) と定義して、各ノードの次数の大小により、そのノードのトポロジ上での性質を表現しようとするものである [7]。Degree Centrality は次数が多いものがネットワークの中心である、という考え方に基づく指標である。

2.2 Betweenness Centrality

Betweenness Centrality (BC, 媒介中心性) とは、ネットワークにおける任意の2点間の最短経路に関して、ある頂点の関与の度合いを示す尺度であり、次式で定義される [7]。

$$BC(v) = \sum_{s \in V, t \in V, t \neq s} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ_{st} ($s \in V, t \in V, V$ は全ノード集合) は、始点 s から終点 t までの最短経路総数、 $\sigma_{st}(v)$ は、そのうちノード v を通過する最短経路数である。このように、BC は最短経路として利用されやすいノードをネットワークの中心とする考え方を表現する指標である。

2.3 Closeness Centrality

Closeness Centrality (CC, 近接中心性) とは、あるノードから他のノードへの情報の伝達度を表現するものである [7]。定義式は、以下の通りである。

$$CC(v) = \left\{ \sum_{t \in V, t \neq v} d_{vt} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 d_{vt} はノード v からノード t までのホップ数である。以上のように他のノードとの距離が近いノードほど Closeness Centrality が大きくなる。

3. 提案手法

ISP 内ネットワークでは、経路制御プロトコルとして OSPF (Open Shortest Path First) が利用されることが多い。OSPF では宛先ノードまでのコストが最小となる経路を利用する。ここで、コストをホップ数とすれば任意の2ノード間で最小限のネットワーク資源を利用して通信できるため、通信経路上の消費電力は最小限のように見える。しかし、ネットワーク全体で様々なノードペア間の通信が行われている状況を考えると、様々なノードやリンクが稼働状態となり利用される状況になってしまう [5]。つまり、ネットワーク全体の発生トラヒックの収容と総電力消費量の観点から考えると、任意の2ノード間における最小コスト経路を利用するよりも効率よくトラヒックを収容できる余地が残されている。

ここで、任意の2ノード間の通信ホップ数が少ないほどその通信に関わる機器の電力消費量は少ないため、省電力経路制御において2ノード間の通信ホップ数をできる限り少なくすることは重要である。しかし、すでに通信中のノードペアが存在するのであればホップ数が多少増加したと

してもその部分にトラヒックを相乗りさせれば電力消費量の増加量はわずかで済む。そこで、本研究では頻繁にトラヒックを転送すると予想されるノードにトラヒックを集約する手法を提案する。つまり、制御対象ネットワーク内のすべての通信において、頻繁に通信経路として利用される可能性が高いようなあるノードを経由させる Loose Source Routing による経路集約を行う。Source Routing とは、通信における送信元ノードが宛先ノードまでの経路を指定する機能であり、Loose Source Routing は宛先ノードまでの経路において経由する一部のノードのみを指定する機能である。本提案は、この Loose Source Routing を利用して、ある 2 ノード間の通信における中継ノードを敢えて指定することで、そのノードを経由する集約経路を利用するようにするという提案である。なお、始点ノードから中継ノード、また、中継ノードから終点ノードまでの経路は OSPF による最小コスト経路に従うものとする。よって、提案手法による経路集約では、既存のインターネットにおける経路制御プロトコルの大幅な変更は必要ない。

ここで、Loose Source Routing を行うために、どのようにして中継ノードを選択するかが問題となる。本研究では、トポロジに適した集約経路を利用することが目的であるため、通信経路として利用される可能性が高いノードを中継ノードとして利用したい。そこで、中継ノードを選択する指標として 2 章で述べた次数中心性 (DC) と近接中心性 (CC) を利用する。ネットワークトポロジ中の DC、もしくは、CC が最大のノードを中継ノードとすることで経路集約が可能かどうかを計算機シミュレーションにより評価する。

4. シミュレーション

本研究では、計算機シミュレーションにより提案した DC、もしくは、CC を指標とした Loose Source Routing による経路集約の有効性を調査するため、様々なネットワークトポロジにおける全ての最短経路を Matlab により求め、次数中心性 (DC) や近接中心性 (CC) のトポロジ情報に基づき、中継ノードを選択したときの経路を求める。

ネットワークモデルとして、スケールフリー性を有するネットワークであるノード数 1000、リンク数 1997 リンク、最小次数 2 の BA (Barabasi-Albert) モデルを使用する。さらに、実在する ISP におけるルータレベル・トポロジとして Rocketfuel [8] において計測された 3 種類のトポロジを使用する。ISP 名、および、ノード数を表 1 に示す。

次に、性能指標として Stress Centrality (SC) を利用する。Stress Centrality (SC) とはあるリンクを利用する任意の 2 ノ

ード間の経路数で定義される。よって、次式で定義される：

$$SC(l) = \sum_{s \neq t \in V} \sigma_{st}(l)$$
 (3)

ここで、 σ_{st} ($s \in V, t \in V, V$ は全ノード集合) は、始点 s から終点 t までの経路総数、 $\sigma_{st}(l)$ は、そのうちリンク l を通過する経路数である。このように、SC は各リンクにおける経路収容数を示すことができる指標である。

表 1 実際の ISP におけるルータレベル・トポロジ

AS 番号/ISP 名	ノード数	べき指数
1239/Sprint	604	3.18
3356/Level3	624	2.54
7018/AT&T	631	3.45

本研究では、あるトポロジ上の全ノードペアにおける通信経路を求め、各リンクにおける正規化 SC の値によって経路の集約度合いを評価する。正規化 SC とは、あるリンクに全ノードペアの通信経路が多重される場合に $SC(l) = 1$ となるよう、 $SC(l)$ を正規化した性能指標である。 $SC(l)$ が 0 に近いほどそのリンクは経路として利用されず、 $SC(l)$ が 1 に近いほどそのリンクが経路として利用されやすく経路が集約されていることを示す。

また、 $SC(l)$ が 0 となったリンクは電力消費量を抑制する省電力モードに切り替えることが可能なリンクとみなすことができる。そこで、リンク削減率として全リンク数のうちの正規化 SC が 0 のリンク数の割合で定義する。これによって、省電力性能を示す。

5. シミュレーション結果、および考察

5.1 次数中心性 (DC)を用いた中継ノード選択による

Loose Source Routing の基本性能

最高次数ノードであるハブノードを経由させる Loose Source Routing によるリンク毎の正規化 SC、および、省電力性能について示す。ここでは、基本性能について調査するため、トポロジモデルとして BA モデルを利用した。

図 1 に通常の最小コスト経路制御利用時の正規化 SC とノード次数の関係、図 2 に次数中心性 (DC) を利用した中継ノード選択による Loose Source Routing を適用した場合の正規化 SC とノード次数の関係を示す。図 1 と図 2 の比較より、図 2 において高次数ノードほど正規化 SC が高

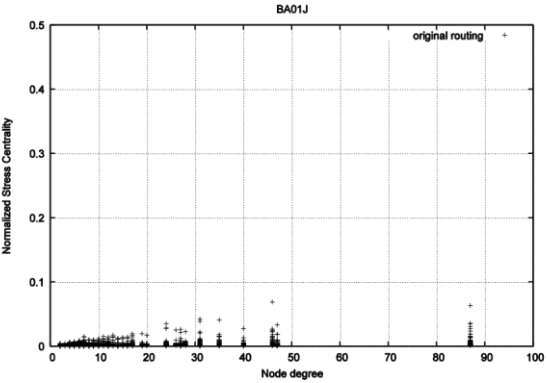
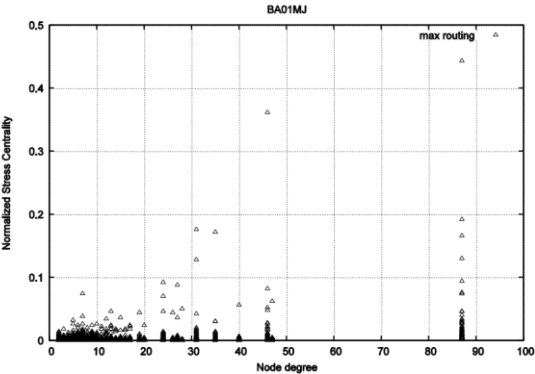


図 1：最小コスト経路適用時の正規化 SC (BA モデル)



くになっており、次数が高いノードに経路が集約されている様子がわかる。また、図 1 では、すべてのリンクにおける正規化 SC が 0 ではなかったが、図 2 では最高次数ノードを経由することで利用されるリンク数が減少し、正規化 SC が 0 となるリンク数が増加し、リンク削減率が 0.499 とトポロジ中の約半数のリンクを省電力モードに遷移させることができるようになった。

5.2 近接中心性 (CC) を用いた中継ノード選択による
Loose Source Routing の基本性能

近接中心性 (CC) とは、あるノードを始点としたすべての経路のホップ数の平均値の逆数であり、CC が大きいほど他のノードとのホップ数が平均的に近いノードであることが示される。本節では、DC ではなく CC の値によって Loose Source Routing における中継ノードを選択する手法の基本性能について示す。

図 2：提案手法適用時 (DC による経路集約) の正規化 SC (BA モデル)

ここでは、基本性能について調査するため、トポロジモデルとして BA モデルを利用したが、BA モデルにおいては CC が最大のノードは DC が最大のノードと一致した。よって、CC によって中継ノードを選択することと DC によって中継ノードを選択することによる結果は一致した。双方において、省電力性能は高く、Loose Source Routing による通信経路の集約が効果的であることが示された。

5.3 実在する ISP のルータレベルトポロジにおける提案手法の省電力性能

表 1 に示した ISP トポロジにおいて、次数中心性 (DC)、および、近接中心性 (CC) を用いた中継ノードの選択を行った場合の Loose Source Routing による省電力性能について議論する。表 2 に各 AS について最小コスト経路、最大 DC を持つ中継ノードを経由する Loose Source Routing、最大 CC を持つ中継ノードを経由する Loose Source Routing のそれぞれを適用した場合のリンク削減率を示した。表 2 より、各 AS において最小コスト経路適用時は正規化 SC が 0 となるリンクが存在しなかったが、Loose Source Routing を適用することでリンク削減率を約 7 割～8 割程度と大幅に増加させることができた。また、DC による中継ノード選択と CC による中継ノード選択との比較を行うと、どちらを利用した場合も差がなかった。ここで、各ノードの DC、および、CC の計算に必要な計算量について考慮すると、表 2 各トポロジにおけるリンク削減率

評価対象 トポロジ	最小コスト 経路	DC を利用した 経路集約	CC を利用した 経路集約
AS1239	0	0.742	0.742
AS3356	0	0.882	0.882
AS7018	0	0.697	0.697

次数中心性である DC は各ノード自身が認識することが可能な指標であり、計算量は $O(1)$ である。一方、自身を始点とする他のノードへの全経路のホップ数をベースとする CC では、全経路を計算する計算量が必要であり OSPF を用いる場合、その計算量は $O(M \log N)$ (M はネットワーク内のリンク数、 N はネットワーク内のノード数) となる。同様の省電力性能が得られるのであるならば、指標の計算量が少ない次数中心性を用いた Loose Source Routing による経路集約が省電力経路制御において有効であると言える。

6. まとめと今後の課題

本研究では、スケールフリー性を有する BA トポロジと ISP におけるルータレベル・トポロジにおいて次数中心性 (DC)、および近接中心性 (CC) を利用した中継ノード選択に基づく Loose Source Routing を用いた経路集約による省電力経路制御手法を提案し、その性能を計算機シミュレーションにより示した。結果より、Loose Source Routing における中継ノード選択指標の計算量が少ない次数中心性 (DC) に基づく Loose Source Routing によって、ネットワーク内の約 7～8 割のリンクを省電力モードに遷移できることを示した。謝辞 本研究の一部は日本学術振興会に

おける科学研究費・若手研究(B) (課題番号 24700081) の
支援により実施された。ここに記して謝意を表す。 **参考**

文献

[1] M. Gupta, S. Singh, “Greening of the Internet,” ACM SIGCOMM 2003 (2003).

[2] K. Christensen, et. al., “IEEE 802.3az: the road to energy efficient Ethernet,” IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 11, pp. 50-56 (2010)

[3] A. Cianfrani, et. al., “An Energy Saving Routing Algorithm for A Green OSPF protocol,” Proc. IEEE Infocom ’10 (2010)

[4] J. Restrepo, et. al., “Energy Profile Aware Routing,” Proc. IEEE GreenComm ’09 (2009)

[5] J. Shimada, et. al., ”Node Degree Based Routing Metric for Traffic Load Distribution in the Internet.” IEICE Transactions on Information and Systems, vol. 96, no. 2, pp. 202-212 (2013)

[6] H. Zhuge and J. Zhang : ”Topological centrality and its e-Science applications”, Journal of the American Society for Information Science and Technology, Vol.61, Issue 9, pp.1824--1841 (2010)

[7] A. Shimbel, “Structural parameters of communication networks,” Bulletin of Mathematical Biophysics, vol. 14, no. 4, pp. 501–507, Dec. 1953.

[8] N. Spring, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, “Measuring ISP topologies with rocketfuel,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 12, pp. 2 - 16, Feb. 2004.