

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500081

研究課題名(和文) 予防的最適化アプローチによるネットワーク制御技術

研究課題名(英文) Network control technologies based on preventive start-time optimization

研究代表者

大木 英司(Oki, Eiji)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：70524156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：IP ネットワークにおいて、故障やトラフィック需要の変動によるネットワーク環境変化に対して、耐久性のある堅牢な予防的ネットワーク最適制御技術の確立が必要となる。本論文は、リンク状態型ルーチングプロトコルを用いるIP ネットワークにおいて、ネットワーク故障やトラフィック変動を考慮したIP ルーチングの予防的最適化手法であるPreventive Start-time Optimization (PSO)を提案した。提案方式は、トラフィック変動とネットワーク故障によるネットワーク環境変化に対する最悪のネットワーク輻輳率が低減されることが示された。

研究成果の概要(英文)：We research on preventive start-time optimization (PSO). PSO determines a suitable set of link weights in an open shortest path network at the network operation start time that can handle any link failure scenario preventively. PSO minimizes the worst-case congestion ratio in case of failure. PSO can avoid both unexpected network congestion and network instability. We formulate the original PSO problem as a mixed integer linear programming problem by extending the start-time optimization model and describe heuristic approaches. We also introduce mathematical programming models for the PSO variations. In addition, we expand PSO into generalized preventive start-time optimization (GPSO) to find a link weight set that balances both congestion ratios under no failure and the worst-case failure.

研究分野：通信ネットワーク

キーワード：IPルーチング OSPF トラフィックエンジニアリング

1. 研究開始当初の背景

IP (Internet Protocol) ネットワークにおいて、トラフィックがある特定のネットワーク資源（リンク等）に集中することにより生じるネットワークの輻輳を回避する必要がある。ネットワーク混雑を回避するために、IP パケットを転送する経路を制御の研究が盛んに行われている。従来、主に研究されてきた経路制御方式は、ネットワーク内の全ての発着ノード間のトラフィック需要を観測し、詳細に予測し、与えられたトラフィック需要予測に基づいて、経路を制御する。

IP ネットワークは、経路選択に必要な標準的なルーティングプロトコルとして、Open Shortest Path First (OSPF) を採用している。OSPF では、各リンクに重みを設定し、発着ノード間の経路は、通過する重みの総和が最小になるように選択される。したがって、IP ネットワークにおける経路制御とは、各リンクの重みを制御することを意味する。

従来のリンク重み制御において、2つのアプローチがある。1つ目は、リンク故障のない通常時のネットワークに対して、最適化なリンク重みを決定する方式（初期最適化）である。リンクの故障が生じた場合、当該リンクは使用不可となり、残りのリンクの重み情報に基づいて経路が最小重みになるように再計算される。残りのリンクの重みは、継続使用されるため、ネットワークは不安定にはならない。これらの重みは、変化後のネットワークに対して必ずしも最適ではないため、輻輳が生じる恐れがある。2つ目は、リンクが故障する度に、リンク故障後のネットワークに対してリンク重みを最適化して、リンク重みを更新する方式（動的最適化）である。リンク重みが更新されると、まず、OSPF により、すべての更新情報がネットワーク内に広告されつつ、経路の再計算が行われるので、すべてのプロセスが完了するまで、ネットワークが不安定になる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、故障やトラフィック需要の変動によるネットワーク環境変化に対して、耐久性のある堅牢な予防的ネットワーク最適制御の基盤技術の確立を目指す。IP ネットワークには、生活基盤に欠かせない情報が転送され、高信頼で安定したサービスが求められるとともに、トラフィック需要が時々刻々と変化し、その予測が困難になってきている。本研究では、安定性に問題があった従来式のネットワーク環境変化に応じた動的な制御アプローチの性能を維持しながら、変化を事前に考慮した予防的な最適制御技術を確立し、ネットワーク運用への適用性を明らかにする。

3. 研究の方法

我々は、予め事前にリンク故障を考慮してお

き、最悪の場合のネットワーク輻輳率を低減することを目的として、予防的にリンク重みを決定するアプローチ（予防的最適化）について検討する。Preventive Start-time Optimization (PSO) と呼ぶ。PSO では、初期最適化で問題であったネットワーク輻輳が回避できる。また、リンク重みは、リンク故障時に更新することはないので、動的最適化で問題であったネットワークの不安的な状態を回避できる。

本研究では、次の点を明らかにする。以下の解決すべき3つの問題が残されている。

- 初期最適化と比較して、ネットワーク輻輳がある程度回避できるものの、ネットワーク輻輳率の最悪値の最小化を与えるという保証はない。
- トラフィック需要が固定的に与えられているという仮定を用いているため、トラフィック需要の変動が考慮されていない。
- ネットワーク輻輳率の最悪値を低減することを目的としているため、確率的には、極めて小さいネットワーク環境変化の事象でも、予防的最適化の決定に強く影響している。このような場合でも、ネットワーク運用者の要求を満足するような PSO の最適化モデルを構築する。

4. 研究成果

(1) PSO の提案とリンク重み決定ポリシーに基づく最適化問題のモデル化

リンク重みを決定する際に、代表的な3つのポリシーとして、Start-time Optimization (S0), Run-time Optimization (R0), 及び、PSO がある。

S0 では、運用開始時のネットワークに対して、リンク重みを最適化し、各リンクに重みを設定する。リンクが故障した場合、ネットワーク内のノードは、当該故障リンクを除外したネットワークに対して、最短経路を再計算し、ルーティングテーブルを更新する。トラフィックは、故障後のネットワークを転送される。しかし、リンク重みは、故障前のネットワークに対して最適化されているため、故障後のネットワークに対して、既に設定されたリンク重みは、必ずしも最適な値ではない。そのため、故障後のネットワークにおいて、迂回トラフィックがあるリンクに集中し、輻輳が生じる恐れがある。

R0 では、リンクが故障する度に、新しいネットワークに対して、リンク重みを最適化する。これによって、S0 で問題であった迂回トラフィックによる輻輳の発生が回避される。しかし、R0 には、2つの問題点がある。1つ目は、リンク重みの移行期に、経路選択が不安定になるという問題である。リンクが故障する度に、リンク重みを変更すると、ノードは、リンク重みの最適化の再計算後、ルーティングテーブルの更新のために、更新メッセージが送出される。更新メッセージを受け取ったノ

ードは、他ノードに伝搬するとともに、自ノードで最短経路計算を行い、ルーティングテーブルを更新する。これらの動作では、各ノードが自律分散的に実施されるため、ルーティングテーブルを更新済みのノードと、まだ更新していないノードが混在する状態が生まれる。そのため、リンク重み変更の移行期には、所望でない経路が選択され、輻輳が生じる恐れがある。2 つ目は、リンク故障が一時的な場合、リンク重みの更新が頻繁に起こり、ネットワークが不安定になるという問題である。数分以内の一時的な故障が、リンク故障の大部分の割合を占めている。この一時的な故障に対して、リンク重みの最適化を行い、リンク故障が回復した際に、再び、リンク重みの最適化を行う、という動作を頻繁に繰り返していくと、経路選択が不安定になり、ネ

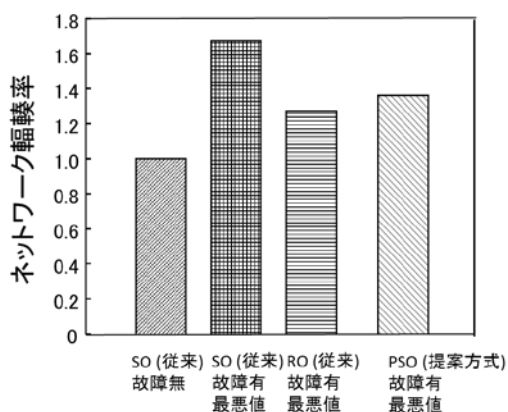


図1 PSOの効果

ットワークの輻輳を招く。

SO と RO の問題を解決するために、PSO を提案した。PSO は、運用開示時に、ネットワークの故障（例えば、あらゆる単一リンク故障）を想定し、予防的に最悪の場合のネットワーク輻輳を最小化するリンク重みを求め、設定しておく。故障が生じた場合でも、予め設定したリンク重みを更新しないで使用する。PSO では、通常時のネットワークに対して、リンク重みが必ずしも最適化されているわけではない。しかし、想定できる故障を考慮してリンク重みを決定しているので、故障時でも輻輳が生じないように設計され、ネットワークが安定的に運用される。PSO の効果を図 1 に示す。

さらに、それぞれのポリシーに対して、リンク重みを決定する問題を、整数混合線形計画問題としてモデル化した。

(2) 広範囲な探索による予防的リンク重み決定法

PSO の目標は、リンク故障のシナリオに対して、最悪のネットワーク輻輳率を最小化することである。PSO は、最悪のネットワーク輻輳率を低減することが示されている。しかし、従来の PSO では、リンク重みを探索する範囲が限定されてきたため、最悪のネットワーク輻輳率を最小化することを保証してい

ない。

そこで、広範囲な探索による予防的リンク重み決定法を提案した。これを、PSO with wide range candidates (PSO-W) と呼ぶ。PSO-W は、可能な限り全てのリンク重みのセットを考慮し、最悪のネットワーク輻輳率を最小化するようなリンク重みのセットを決定する。PSO-W は、最悪のネットワーク輻輳率の最小化を保証している。

(3) ネットワーク条件の変動を考慮した PSO

これまでの PSO の研究では、トラフィック需要がすべて既知とするトラフィック需要モデルを用いていた。

このトラフィック需要モデルをパイプモデルと呼ぶ。パイプモデルでは、詳細なトラフィック情報に基づいて、経路制御を実現できるという利点はあるが、トラフィック変動に弱いという欠点がある。トラフィック変動が生じる毎に、リンク重みを再計算し、経路を変更することはネットワークの不安定性を招き、現実的ではない。

また、ネットワークに対して、流出／流入するトラフィック量の最大値を制限するトラフィック需要モデルをホースモデルと呼ぶ。ホースモデルでは、流出／流入するトラフィック量を測定することは容易、かつ、トラフィック変動に対応できる利点がある。Chu らは、ホースモデルに対して、リンク重みを最適化するルーティング方式を提案した [ChuICC07, ChuTON09]。しかし、Chu らのルーティング方式は、ネットワークの正常時のみを考慮した SO のポリシーに基づいたリンク重みの最適化であり、ネットワークの故障時を考慮していなかった。

我々は、トラフィック変動を考慮し、ホースモデルを用いた PSO (PSO-hose) を提案した。トラフィック変動とネットワーク故障を考慮しながら、リンク重みを決定する計算量を削減する効率的な発見的手法を開発した。発見的手法のイメージを図 2 に示す。その結果、トラフィック変動とネットワーク故障によるネットワーク環境変化に対する最悪のネットワーク輻輳率が低減されることが示された。

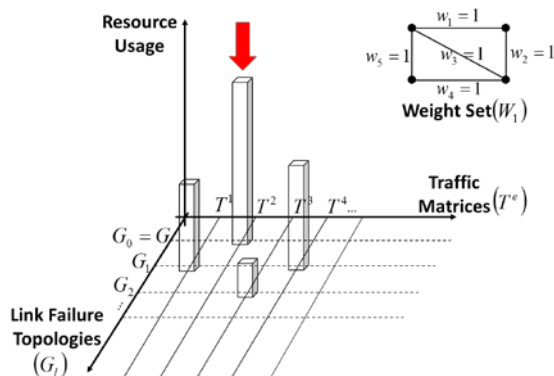


図2 トラフィック変動を考慮したPSOの発見的手法

(4) 正常時と故障時を考慮した PSO

PSO は故障時のネットワーク輻輳を低減するが、正常時（非故障時）の輻輳が従来の S0 と比較し悪化してしまうということが、従来研究において指摘されている。これをペナルティと考える。リンク故障がごく稀にしか生じないネットワークに対して、最悪のネットワーク輻輳率を最小化するように PSO によりルーティングを決定することは現実的でない場合がある。この問題を解決するために、我々は、PSO の考え方を拡張して、PSO-NP (Preventive Start-Time Optimization with No Penalty) を提案した。PSO-NP は、ネットワークの正常時と故障時の両方を想定したルーティング方式である。PSO-NP は、ペナルティを回避し、最悪の輻輳率を軽減する。S0 では、ネットワークの正常時に対して、最適なリンク重みのセットの解は 1 つとは限らず、複数解が存在する場合がある。PSO-NP は、S0 の複数解の中から、故障時の最悪の輻輳率を最も軽減させる解を選択する。この結果、S0 に対するペナルティはなくなり、故障時でもネットワーク輻輳率の軽減が期待できる。性能評価の結果、PSO-NP は、正常時に S0 と同様に輻輳率を与え、最悪の故障時でも PSO に近い輻輳率を与えることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. R.S. Ranaweera, I.A. Ouédraogo, and E. Oki, "Network Optimization for Energy Saving Considering Link Failure with Uncertain Traffic Conditions," IEICE Commun. Trans., vol. 97-B, no. 12, pp. 2729-2738, Dec. 2014. (査読有)
2. R.S. Ranaweera, I.M. Kamrul, and E. Oki, "Preventive Start-Time Optimisation of OSPF Link Weights for Hose Model," IET Networks, vol. 3, no. 2, pp. 143-149, Jun. 2014. (査読有)
3. A.H.A. Muktedir, P.V. Phong, and E. Oki, "A Mathematical Model for Network Coding Aware Optimum Routing in 1+1 Protection for Instantaneous Recovery with Relaxing Destination's Node Degree Constraint," IEICE Commun. Express, vol. 2, no. 12, pp. 512-517, Dec. 2013. (査読有)
4. I.M. Kamrul, I.A. Ouédraogo, and E. Oki, "S-FIR: Smart Failure Insensitive Routing to Enhance Resource Utilization and Robustness," IET Networks, vol. 2, no. 2, pp. 45-52, Jun. 2013. (査読有)
5. N. Kitsuwon, P. Pavarangkoon, and E. Oki, "Design and Implementation of A Scheme based on Link-Load Ranking to Reduce Advertisements in OSPF-TE Networks," IEICE Commun. Express, vol. 2, no. 6, pp. 251-256, Jun. 2013. (査読有)
6. S. Tsunoda, A.H.A. Muktedir, and E. Oki, "Load-Balanced Non-Split Shortest-Path-Based Routing with Hose Model and Its Demonstration," IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 5, pp. 1130-1140, May. 2013. (査読有)
7. M. Honma and E. Oki, "Load-Balanced Routing with Selective Even Traffic Splitting," Progress in Informatics, no. 10, pp. 175-183, Mar. 2013. (査読有)
8. I.M. Kamrul and E. Oki, "Optimization of OSPF Link Weights to Counter Network Failure," IEICE Trans. Commun., vol. E94-B, no. 7, pp. 1964-1972, Jul. 2011. (査読有)

[学会発表] (計 19 件)

1. T. Naito and E. Oki, "Energy-Efficient Software Defined Wireless Access Point with OpenFlow Framework," IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC 2014), Beijing China, Sep. 2014. (査読有)
2. Y. Nakahodo, T. Naito, and E. Oki, "Implementation of Smart-OSPF in Hybrid Software-Defined Network," IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC 2014), Beijing China, Sep. 2014. (査読有)
3. A.H.A. Muktedir and E. Oki, "A Heuristic Routing Algorithm for Network Coding Aware 1+1 Protection Route Design for Instantaneous Recovery," IEEE Conference on High Performance Switching and Routing 2014, Vancouver Canada, Jul. 2014. (査読有)
4. A.H.A. Muktedir and E. Oki, "A Heuristic Routing Algorithm with Erasure Correcting Code Based Instantaneous Recovery Technique," IEEE ICC 2014, Sydney Australia, Jun. 2014. (査読有)
5. E. Oki, "Preventive Start-Time Optimization Against Network Failure," 10th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2014), Ghent Belgium, Apr. 2014. (Invited paper) (査読有)
6. E. Oki and A.H.A. Muktedir, "A Routing

- Algorithm for 1+1 Protection Considering Network Coding Effect with Polynomial-Time Computation,” International Workshop on Optical Networking (iWON 2013), Atlanta USA, Dec. 2013. (Invited paper) (査読有)
7. S. Kaptchouang and E. Oki, “Enhancing Preventive Start-Time Optimization Considering Both Failure and Non-Failure Scenarios,” 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2013), Bali Indonesia, Aug. 2013. (査読有)
 8. P.V. Phong, A.H.A. Muktadir, and E. Oki, “A Mathematical Model for Network Coding Aware Optimal Routing in 1+1 Protection for Destination's Node Degree ≥ 2 ,” the 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (OECC/PS 2013), 京都国際会議場, Kyoto Japan, June/July 2013. (査読有)
 9. R.S. Ranaweera, M.K. Islam, and E. Oki, “Preventive Start-Time Optimization of OSPF Link Weights against Link Failure for Hose Model,” 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2012), Cheju Korea, Oct. 2012. (査読有)
 10. M. Honma, S. Tsunoda, and E. Oki, “Load-Balanced Shortest-Path-Based Routing with Even Traffic Splitting,” 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2012), Cheju Korea, Oct. 2012. (査読有)
 11. A.H.A. Muktadir, A.A. Jose, and E. Oki, “Cost-Efficient Network-Coding-Aware Routing with 1+1 Protection for Instantaneous Recovery,” The 7th Triangle Symposium on Advanced ICT (TriSAI 2012), 電気通信大学, Tokyo Japan, Sep. 2012. (Best Paper Award) (査読有)
 12. I.A. Ouédraogo, M.K. Islam, and E. Oki, “Performance Evaluation of Smart Failure Insensitive Routing,” International Workshop on Modern Science and Technology (IWMST 2012), 電気通信大学, Tokyo Japan, Aug. 2012. (査読有)
 13. A.A. Jose, A.H.A. Muktadir, and E. Oki, “Instantaneous Recovery Scheme with Optimal Traffic Splitting Using Network Coding,” 10th International Conference on the Optical Internet (COIN 2012), 慶應義塾大学, Yokohama, Japan, May 2012. (査読有)
 14. S. Tsunoda, A.H.A. Muktadir, and E. Oki, “Performance Evaluation of Non-Split S-OSPF with Hose Model,” 10th International Conference on the Optical Internet (COIN 2012), 慶應義塾大学, Yokohama Japan, May 2012. (査読有)
 15. A.H.A. Muktadir, A.A. Jose, and E. Oki, “Mathematical Programming Model for Network-Coding Based Routing with 1+1 Path Protection,” World Telecommunications Congress 2012, 宮崎シーガイア, Miyazaki, Mar. 2012. (査読有)
 16. S. Tsunoda, A.H.A. Muktadir, and E. Oki, “Implementation of Load-Balanced Non-Split Shortest-Path-Based Routing with Hose Model,” The 6th Triangle Symposium on Advanced ICT (TriSAI 2011), Beijing China, Aug. 2011. (査読有)
 17. S. Tsunoda, A.H.A. Muktadir, and E. Oki, “Load-Balanced Shortest-Path-Based Routing Without Traffic Splitting in Hose Model,” IEEE ICC 2011, 京都国際会議場, Kyoto Japan, Jun. 2011.
 18. I.M. Kamrul and E. Oki, “Optimization of OSPF Link Weight to Minimize Worst-Case Network Congestion Against Single-Link Failure,” IEEE ICC 2011, 京都国際会議場, Kyoto Japan, Jun. 2011. (査読有)
 19. R. Leepila, E. Oki, and N. Kishi, “Scheme to Find k Disjoint Paths in Multi-Cost Networks,” IEEE ICC 2011, 京都国際会議場, Kyoto Japan, Jun. 2011. (査読有)
- [図書] (計4件)
1. 山中直明(編集), 大木英司, 塩本公平, 岡本聡(執筆協力者), 「インターネットバックボーンネットワーク」電気通信協会, 372 pages, Mar. 2014.
 2. E. Oki, Linear Programming and Algorithms for Communication Networks, CRC Press, Boca Raton, 194 pages, Aug. 2012.
 3. E. Oki, R. Rojas-Cessa, M. Tatipamula, and C. Vogt, Advanced Internet Protocols, Services, and Applications, Wiley, New York, 240 pages, Apr. 2012.
 4. 大木英司, 通信ネットワークのための数理計画法, コロナ社, 162 pages, Mar. 2012.
- [産業財産権]
○出願状況 (計0件)
- [その他]
ホームページ等
<http://oki.ice.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大木 英司 (OKI, Eiji)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
教授

研究者番号: 70524156