

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K15988

研究課題名(和文) 全光環境と将来ネットワーク技術の融合を図る新たなネットワーク設計

研究課題名(英文) Design of new generation networks combining all-optical networking and future networking technologies

研究代表者

平田 孝志(Hirata, Kouji)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：10510472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、下位レイヤとして全光ネットワークを伝送基盤とし、上位レイヤとしてコンテンツ指向ネットワーク技術やSDNといった将来ネットワーク技術を用いる新しいネットワーク設計方法を確立することを目的として研究を行ってきた。上位レイヤの技術として、コンテンツ指向ネットワークではコンテンツ配置やキャッシング手法等を用いたネットワーク設計の確立を、また、SDNではフローエントリ制限を考慮したネットワーク設計を行った。また下位レイヤでは、エラスティック光パスネットワークの設計を、複数の観点から行った。本研究では、シミュレーション実験及び数値実験により、これらのネットワーク設計の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：This research aims at establishing a new network design approach that adopts future networking technologies such as content-centric networking and software-defined networking (SDN) as upper layer technologies while using all-optical networks as lower layer networks. As the upper layer technologies, we proposed network design methods including content allocation and caching methods for the content-centric networking. Also, we proposed network design considering flow entry constraints for SDN. Furthermore, as the lower layer architectures, we focused on elastic optical path networks and designed them from multiple perspectives. In this research, we showed the effectiveness of our network design through simulation and numerical experiments.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：全光ネットワーク コンテンツ指向ネットワーク SDN

1. 研究開始当初の背景

近年の Web や動画配信、クラウドサービスといったアプリケーションの発展に伴い、コンテンツ配信がインターネットの主流用途となりつつある。そのようなユーザの要求の変化に対応するため、データを送受信するホストを主体とした IP ネットワークに替わる新たな上位レイヤの技術として、送受信されるデータ(コンテンツ)を主体としたネットワーク(コンテンツ指向ネットワーク)が注目されている。また、サービスの多様化によってトラフィック特性がよりダイナミックに変化するようになったことに伴い、Software-Defined Networking (SDN) に代表されるように、物理ネットワーク上に構成される論理ネットワークをソフトウェアで柔軟に制御するネットワーク仮想化技術が急速に発展している。これらの将来ネットワーク技術の発展によって、まさに現在、ネットワークは上位レイヤの形態が変化していく過渡期にある。

一方、下位のレイヤにおいては、将来の伝送基盤として、全光ネットワークが提唱されている。全光ネットワークでは波長分割多重により、互いに干渉しない異なる波長(周波数)の光信号を用いて同時に複数のデータを同一の光ファイバ上で送信することが可能である。また、ネットワーク内部のスイッチング等の全ての処理を光信号のまま行うことで、中間ノードにおける電気処理のボトルネックをなくし、大容量伝送を実現する。さらに、全光ネットワークで使用されるネットワーク機器は、従来の電氣的なネットワークにおけるネットワーク機器よりも消費電力が少なく、エコロジーの観点からも非常に注目を集めている。本研究ではこのような背景のもと、下位レイヤとして全光ネットワークを伝送基盤とし、上位レイヤとして将来ネットワーク技術を用いる新しいネットワーク設計を行ってきた。

2. 研究の目的

ネットワークサービス品質の向上を図るためには、上位レイヤと下位レイヤの相互作用を明らかにした上で、これらの協調動作を考慮したネットワーク最適設計が有効であると考えられる。しかし、これまでの多くの全光ネットワークに関する研究は、他のレイヤ、特に上位レイヤの影響を考慮せず、レイヤ毎の独立した振る舞いのみを対象としている。また、将来ネットワーク技術に関する研究は伝送基盤として従来の電氣的なネットワークを想定してきた。そのため、全光ネットワークを基盤として将来ネットワーク技術を用いた場合、互いにどのような影響が出るのかが明らかにされていなかった。このような背景のもと、本研究では全光ネットワークと将来ネットワーク技術の相互作用を明らかにした上で、これらの相互作用を考慮した統合的なネットワーク設計手法を確立することを目的として研究を遂行してきた。

3. 研究の方法

本研究では、研究目的達成のために、課題を複数の小課題に分け、段階的に検討を行った。具体的には、(a)コンテンツ指向ネットワーク設計、(b)SDNによる仮想ネットワーク設計、(c)新世代光ネットワーク設計、の3つの小課題を扱った。

課題(a)では、コンテンツ指向ネットワーク技術を用いたネットワーク設計を、コンテンツ配置、キャッシング、コンテンツ選択といった観点から行った。課題(b)では、SDNを用いた仮想ネットワーク設計を、ルールキャッシングおよびルーチングという観点から行った。また、課題(c)では、上記の課題から得られた結果、知見、考察をもとに、さらなる伝送効率拡大のための新世代の全光ネットワーク設計を行った。

4. 研究成果

以下、それぞれの課題に対する研究成果を述べる。なお、以下の評価はシミュレーション実験もしくは数値実験により行っている。

(a)コンテンツ指向ネットワーク設計

コンテンツ指向ネットワークでは、データであるコンテンツを中心にネットワーク制御が行われる。この際、コンテンツをどこに配置するのか(コンテンツ配置)、どのような基準でコンテンツをキャッシュするのか(キャッシング)、どのキャッシュからコンテンツをダウンロードするのか(コンテンツ選択)といった、コンテンツ指向ネットワーク独自の設計問題が重要となる。また、これらの設計思想に応じたトラフィックエンジニアリングが必要となる。

本研究ではまず、コンテンツ選択に着目し、効率的なコンテンツダウンロードを行うための、キャッシュ管理手法を提案した。本提案手法では、ネットワーク内に複数の管理ノードを用意し、分散ハッシュテーブルを用いて各ルータに格納されたコンテンツの位置情報を管理させる。ユーザはコンテンツをダウンロードする際、ハッシュ値に基づき、コンテンツの位置情報を保持する管理ノードにコンテンツ要求を送信する。管理ノードは自身が保持するコンテンツの位置情報に従って、対象コンテンツのキャッシュを保持するルータにコンテンツ要求を転送する。その結果、ルータのキャッシュを効率的に利用することができる。図1に、シミュレーション実験によって得られた、提案手法のコンテンツ管理範囲を決定するパラメータ k に対する、キャッシュヒット率を示す。図より、提案手法を用いることで既存手法と比較してキャッシュヒット率を効果的に上昇させることができることがわかる。

次に、コンテンツ配置およびトラフィックエンジニアリングに着目した。ここでは、コンテンツの配置場所の決定と、コンテンツダウンロードの経路および使用帯域を同時に決定

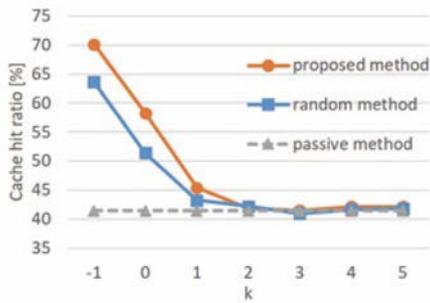


図1 キャッシュヒット率

する最適化問題として、コンテンツ配置とトラフィックエンジニアリング手法の定式化を行った。本手法の特色は、コンテンツの断片を効率的にルータに配置するコンテンツ配置、およびコンテンツダウンロードにおいて従来は考慮されていなかった複数パスによるダウンロードを行うことである。本研究では、複数のネットワークモデルを使用して、提案手法が効果的にネットワークのリンク負荷を削減することを示した。

これらの研究成果は、複数の国際会議や国内研究会において、発表を行った。また現在、最終的にまとめた研究成果を英文論文誌に投稿する予定である。

(b) SDNによる仮想ネットワーク設計

SDNでは既存のIPネットワークとは異なり、転送機能（データプレーン）を担うSDNスイッチと、経路制御機能（コントロールプレーン）を担うSDNコントローラが分離している。スイッチは自身が保持するフローテーブルに記載されたフローエントリに従いパケットの転送を行う。フローエントリはパケットの処理方法を定めたもので、ネットワークの状況等を基にコントローラによって作成される。

フローテーブルは一般的に Ternary Content Addressable Memory (TCAM) によって実装される。TCAMは、並列処理によってフローテーブル内のルールを高速に検索することが可能である。しかしTCAMの問題点として、高価なハードウェア、並列処理に伴う大きな消費電力などが挙げられる。このような理由から、スイッチが大量のルールを保持することが困難であり、実際の商用スイッチは数百から数千のフローエントリを格納することしかできないものが多数である。そこで、本研究では、以下のように限られたフローエントリでSDN環境を構築するためのネットワーク設計を行ってきた。

まず、SDNにおけるルーチングに着目し、ネットワーク内の各スイッチにおけるフローエントリ数を削減しながら、同時にネットワーク負荷も削減するような新たなルーチング手法を提案した。提案ルーチング手法は、各フローに対して、数理計画問題に基づきフロー集約を有効に活用することで、ネットワーク負荷とフローエントリ数を削減する経路を決

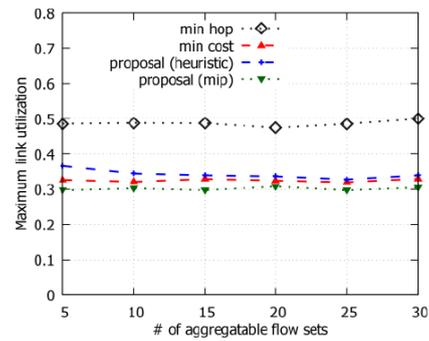


図2 リンク負荷

定するものである。また併せて、計算時間の削減を狙ったヒューリスティック法の提案も行っている。図2に提案手法によるリンク負荷削減の効果を示す。図より提案手法は、既存手法と比較して、効果的にリンク負荷を削減できていることがわかる。

また、TCAMを有効活用するためのフローエントリ置換手法の提案も行ってきた。本提案手法は、TCAMが搭載されているハードウェアスイッチとソフトウェアスイッチで構成されるアーキテクチャを想定する。ソフトウェアスイッチは大量のフローエントリを保持することができるが、パケットの処理速度が遅いという特徴がある。一方TCAMは、保持できるルールの容量は限られているが、パケットを高速に処理することができる。そのため、要求数が多いフローエントリをTCAMにキャッシュして対応するフローを処理し、ソフトウェアスイッチではそうでないフローエントリのフローを処理することで、限られたTCAM容量を活かした効率的なデータ伝送高速な通信が可能となる。本提案手法では、フローエントリ間の依存関係を考慮しながら、ネットワーク状況に応じてTCAMにキャッシュされているフローエントリを置換することで、置換回数を削減しつつ、キャッシュヒット率の上昇が行える。本研究では、シミュレーション実験により提案手法の有効性を示した。

これらの研究成果は、英文論文誌および複数の国際会議および国内研究会においての発表を行っている。

(c) 新世代光ネットワーク設計

新世代光ネットワークとして、ネットワーク資源を柔軟に利用することにより多くのトラフィック需要をサポートする技術としてエラスティック光パスネットワークが注目を集めている。エラスティック光パスネットワークは、伝送に使用する周波数帯域を周波数スロットと呼ばれる周波数単位に細かく分割して利用し、さらに伝送距離に基づいた柔軟な変調方式の選択によって従来の光パスネットワークよりも、光周波数資源の効率的な利用を実現している。

エラスティック光パスネットワークでは、光周波数資源を無駄なく利用し多くのトラフィックの伝送を可能とするために、経路選択及

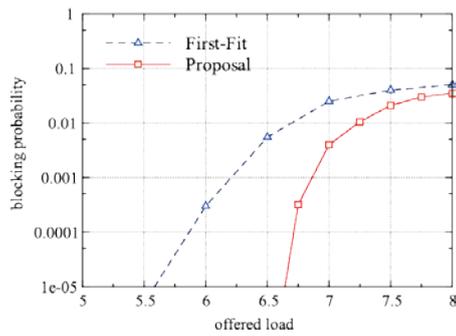


図3 棄却率

び周波数資源割り当てを考慮することが非常に重要である。この問題は RSA (Routing and Spectrum Allocation) 問題と呼ばれる。エラスティック光パスネットワークには周波数スロットの周波数軸上での連続性制約と、送受信経路上のリンク間における連続性制約の二つの連続性制約があり、RSA 問題を考える上ではこれらの制約を満たす必要がある。RSA 問題は、データの送受信経路である光パスを動的に設定するか、静的に設定するかによって二種類に分類される。本研究では、静的な RSA 問題と静的な RSA 問題の両者の側面から、エラスティック光パスネットワークの設計を行ってきた。

まず、静的な RSA 問題として、省電力エラスティック光パスネットワーク設計を行った。近年の爆発的なトラフィック量の増加に対応するためにネットワークが発展してきたが、ネットワークの規模が大きくなることにより、ネットワーク機器が消費する電力が深刻な問題となっている。光ネットワークで使用される光スイッチは IP ルータと比較して、消費電力が少ない。そのため、光ネットワークは IP ネットワークよりも低消費電力で構成できるが、今後のネットワーク機器の消費電力増加量を考えると、光ネットワークのさらなる省電力化は重要な課題である。本研究では、光ネットワークの中でも特に電力を消費する光ファイバ増幅器に着目し、その消費電力を抑えるような静的 RSA 手法の提案を行った。提案手法では、光ファイバ増幅器の電力制約を考慮した RSA 問題を数理計画法により定式化し、それを解くことで伝送に使用する経路選択および周波数資源割り当てを行う。本研究では、数値実験により、提案手法が効果的にエラスティック光パスネットワークの消費電力を削減することを示した。

また、動的な RSA 問題では、マルチコアファイバに着目した RSA 手法の提案を行った。マルチコアファイバは、ファイバ内に複数のコアを持たせることで、従来の光ファイバ伝送容量の限界を大きく改善することができる。しかし、マルチコアファイバを用いた場合、コアが複数あることによる光信号のクロストークの発生が問題となる。クロストークが発生すると、情報を伝達する信号の雑音が増大し伝送品質劣化の要因となるため、可能な限

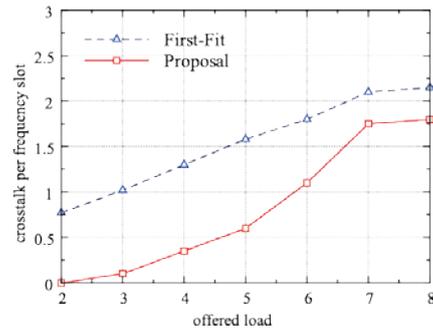


図4 クロストーク発生数

り小さくする必要がある。一方、動的な RSA 問題では、一般に光パス設定の棄却率が性能指標として使用される。そこで本研究では、マルチコアファイバを用いたエラスティック光パスネットワークにおいて、光パス設定の棄却率の低減及びコア間のクロストーク発生の抑制を目的とする RSA 手法を提案した。提案手法では、ボトルネックリンクの発生を防ぐ経路選択と、隣接するコア間で異なる周波数を優先的に利用する周波数割り当てを行うことで棄却率の削減とクロストークの抑制を行う。図3および4にそれぞれ、計算機シミュレーション実験により得られた、ネットワーク負荷に対する光パス設定の棄却率及びクロストーク発生数を示す。これらの図より、提案手法は既存手法と比較して、棄却率及びクロストーク発生数を効果的に削減できていることがわかる。

これらの研究成果は、英文論文誌および複数の国際会議や国内研究会において発表を行った。

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2件)

[1] K. Yoshioka, K. Hirata, and M. Yamamoto, "Flow-based routing for flow entry aggregation in software-defined networking," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E-101B, no. 1, pp. 49-57, 2018. (査読有)

[2] K. Hirata, K. Ito, Y. Fukuchi, and M. Muraguchi, "Design of low power all-optical networks with dynamic lightpath establishment," *IEEE/KICS Journal of Communications and Networks*, vol. 18, no. 4, pp. 551-558, 2016. (査読有)

[学会発表] (計17件)

[1] 森田海, 平田孝志, "クロストークを考慮したエラスティック光パスネットワーク設計," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 117, no. 385, NS2017-164, pp. 117-122, 沖縄県, 2018年.

- [2] 飯尾 将光, 平田 孝志, 山本 幹, ``インネットワークキャッシングのための分散型キャッシュ管理手法,’’ 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 117, no. 385, NS2017-152, pp. 47-52, 沖縄県, 2018 年.
- [3] 佐藤 勇樹, 木村 共孝, 平田 孝志, 村口 正弘, ``エラスティック光パスネットワークにおけるサービス時間を考慮した事前予約型光パス設定,’’ 電気学会通信研究会, 沖縄県, CMN-18-003, 2018 年.
- [4] M. Iio, K. Hirata, and M. Yamamoto, ``Distributed cache management considering content popularity for in-network caching,’’ in Proc. the 23rd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2017), Perth, Australia, 2017.
- [5] 三吉 優太, 平田 孝志, ``マルチパスルーチングのための協調インネットワークキャッシング手法,’’ 電気学会通信研究会, 大阪府, CMN-17-073, pp. 87-90, 2017 年.
- [6] Y. Sato, T. Kimura, K. Hirata, and M. Muraguchi, ``Dynamic lightpath establishment method based on maximum spectrum utilization for elastic optical path networks,’’ in Proc. the 13th Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2017), Venice, Italy, 2017.
- [7] Y. Miyoshi, T. Wada, and K. Hirata, ``Collaborative in-network caching for multi-path routing,’’ in Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (IEEE ICCE-TW 2017), Taipei, Taiwan, 2017.
- [8] M. Iio, K. Hirata, and M. Yamamoto, ``Content download method with distributed cache management,’’ in Proc. the 25th International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2017), Hong Kong, 2017.
- [9] K. Morita and K. Hirata, ``Dynamic spectrum allocation method for reducing crosstalk in multi-core fiber networks,’’ in Proc. the 31st International Conference on Information Networking (ICOIN 2017), Da Nang, Vietnam, 2017.
- [10] M. Takezaki and K. Hirata, ``Static lightpath establishment method with multi-path routing in elastic optical networks,’’ in Proc. the 31st International Conference on Information Networking (ICOIN 2017), Da Nang, Vietnam, 2017.
- [11] K. Yoshioka, K. Hirata, and M. Yamamoto, ``Routing method with flow entry aggregation for software-defined networking,’’ in Proc. the 31st International Conference on Information Networking (ICOIN 2017), Da Nang, Vietnam, 2017.
- [12] 飯尾 将光, 平田 孝志, 山本 幹, ``分散的キャッシュ管理を用いたコンテンツダウンロード手法,’’ 電気学会通信研究会, CMN-17-014, pp. 63-68, 沖縄県, 2017 年.
- [13] 森田 海, 平田 孝志, ``マルチコアファイバネットワークにおけるクロストーク低減のための動的周波数割当法,’’ 電気学会通信研究会, CMN-16-024, pp. 51-56, 北海道, 2016 年.
- [14] 吉岡 晃一, 平田 孝志, 山本 幹, ``SDN における最大リンク利用率を考慮したフローエントリ削減手法,’’ 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 483, NS2015-172, pp. 25-30, 宮崎県, 2016 年.
- [15] 竹崎 正晃, 平田 孝志, ``複数経路を考慮したエラスティック光パスネットワーク設計,’’ 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 483, NS2015-190, pp. 129-132, 宮崎県, 2016 年.
- [16] K. Hirata, K. Ito, Y. Fukuchi, and M. Muraguchi, ``Dynamic lightpath establishment for achieving low power all-optical networks,’’ in Proc. the 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS 2015), Busan, Korea, 2015.
- [17] K. Hirata, Y. Fukuchi, and M. Muraguchi, ``Design of all-optical networks considering power consumption and four-wave mixing,’’ in Proc. the 2015 International Conference on Computer, Information, and Telecommunication Systems (CITS 2015), Gijon, Spain, 2015.
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)
- [その他]

ホームページ等

<http://www2.itc.kansai-u.ac.jp/~hirata/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 孝志 (HIRATA, Kouji)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：10510472

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし