

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26280029

研究課題名(和文) 疎粒度ルーティングによる複数ネットワークの有機的結合に関する研究

研究課題名(英文) Studies on dynamic interconnection of multiple optical networks by coarse granular optical path routing

研究代表者

長谷川 浩(Hiroshi, Hasegawa)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40323802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：粗粒度ルーティングを用いた光パスネットワークのアーキテクチャ及び設計法の提案を行った。粗粒度ルーティングが定義する光パイプを複数同時に設立しつつ、ネットワーク内の光パスを収容する手法を提案し、ネットワーク全体で必要となる光ファイバ数を大幅に削減している。粗粒度ルーティング光ネットワークの運用期間を通じての設備増設手法等もあわせて示している。また、学習データが限られ、かつインフラストラクチャとして判定失敗時のペナルティが重大であるネットワークにおける機械学習の適切な導入法についても検討を進め、電気ルータでの消費電力削減や受信器での信号判定境界最適化等の成果を得ている。

研究成果の概要(英文)：Architectures and design methods for coarse granular optical path routing networks were studied throughout the period. One of proposed design method optimizes multiple coarse granular optical pipes according to the optical path distribution in a network and numerical experiments on real network topologies elucidated the validity of the method. Network expansion throughout the lifetime of a coarse granular optical path routing network was also studied. Moreover, the introduction of machine learning techniques to optical path networks was studied where the penalty caused by misjudgements is crucial as the infrastructure of ICT society. Proposals in this area include a power consumption reduction for electrical large scale routers, a signal boundary optimization for optical receivers, and a dynamic optical path control method according to traffic variation.

研究分野：フォトニックネットワーク

キーワード：フォトニックネットワーク 粗粒度ルーティング

1. 研究開始当初の背景

<背景>

(1)ネットワーク大容量化の要求・フォトニックネットワークの導入
2000年以降のブロードバンドアクセス(ADSL, FTTH等)の普及により、全世界的にネットワーク上を流れる通信量が年率+40-60%という増加を続けている[1]。従来型ネットワークでは、データをIPパケットと呼ばれる小さな単位に分割し、これを伝送している。通信ノード毎に各パケットの経路探索を行うが、ノード間を結ぶ光ファイバ内の光信号を一端電気信号に変換した上でパケットの宛先を識別する。光・電気信号変換装置の高コストと、電気処理による経路探索での電力消費の大きさ及び高速化の困難さが、大容量化の障害となっている。これを解決するために、光ファイバ中に多数(40-100波)の異なる波長の光信号が多重されていることに着目し、波長をラベルとして、電気信号に変換することなく、波長信号(波長パス)毎に光スイッチによる経路制御を行う「フォトニックネットワーク[2]」が研究され、日本や北米等の一部で導入が開始されている。フォトニックネットワークでは中継ノードでの電気処理を基本的に行わず(光ルーティング)、送受信ノードのみでの最小限の光・電気信号変換に限定することで超低消費電力と大容量を両立させている。しかし、今後さらに急増する通信量に対応するために大容量化する上では、より多くの波長を制御する機能をノードに持たせる必要があるものの、大規模な光スイッチは極めて高価であるばかりでなく、一定以上の大規模化に技術的な困難を抱えている。

(2)光ファイバネットワークの構造

日本・北米・ヨーロッパを問わず、都市間を結ぶバックボーンと呼ばれる網目状の大容量ネットワークの配下に、メトロと呼ばれる環状の都市内ネットワークが接続される構造をとる。メトロの配下には、利用者と接続するためのアクセスと呼ばれる放射状のネットワークが多数設置される。各ネットワークは必ずしも同一の会社により所有されているわけではなく、また同一会社による所有であっても、保守・運営・管理は独立して実施される。このため、ネットワークの接続点には大規模な電気処理装置を設置して、接続される全てのネットワークからの膨大なトラフィックを一度電気信号に変換し、行き先や優先度種別を判別した上で、再度各ネットワークへ光信号に変換し送り出すという手続きを踏んでいる。この装置は上記(1)で述べたように極めて高価かつ大きな電力を消費するものであり、ネットワーク全体の大容量化のボトルネックになっている。

(3)ネットワークをまたぐ光ルーティングの

困難さ

各ネットワーク単位で導入されつつある光ルーティングを、上記(2)のネットワーク接続点でも実施し、容量・電力のボトルネックを解消する提案は、若干ながら存在する。しかし、2つのネットワークを相互接続する程度に留まっている。これは、フォトニックネットワークでは、光ルーティングにより通信ノード装置を通過する際の信号劣化及び光ファイバでの信号劣化の累積が、受信側の補償能力を超えてはならない本質的制約があること、および所有・運営主体の異なる多数のネットワークをまたいで光ルーティングする場合の信号品質の保証が難しいという運用上の制約が存在する為である。また、上記(1)で述べたように複数ネットワークを接続する大規模な光ルーティング装置は極めて高価かつ実現が難しい為、コストセンシティブなメトロネットワークでは導入が困難である。

(4)疎粒度光ルーティングネットワークの研究

「(1)ネットワーク大容量化の要求」で述べたように、小規模スイッチで多数の波長パスを制御することが求められている。複数の波長パスを論理的に束ねた「波長群パス」の概念を導入し、基本的に波長群パス単位で経路制御し、必要な場合のみ波長パス単位に分解しての経路制御を行うことでスイッチ規模の削減を目指す、「多階層光パスネットワーク」が提唱された[4]。我々の研究グループでも、波長パスが固定的に運用されるネットワークについてその効果を実証し(例:9x9格子網状ネットワークでスイッチ規模は半分以下[5])、実現上鍵となる、波長群パス単位での経路制御を可能にするデバイスの世界で初めて実現した[6]。我々は最近「波長群パス」の機能を更に推し進めた「グループ化光パイプ(GRE(Grouped Routing Entity) pipe)」の概念とこれを可能にするノード装置のアーキテクチャを提案した[7]。このグループ化光パイプでは、波長パスの挿入・抽出が端点でのみ可能な波長群パスとは異なり、任意の地点で波長パスの挿入・抽出を実施できる。波長パス処理の自由度の高さによりネットワークの性能を引き上げる一方で、波長パス単位に分解しての高コストな経路制御処理を不要とすることで、装置を極めてコンパクトなものとしている(光スイッチエレメント数の比較で1/10程度に縮小)。

参考文献

- [1] Japan Internet Exchange, <http://www.jpix.ad.jp/en/technical/traffic.html>
[2] K. Sato, "Advances in Transport Network Technology: photonic networks, ATM, and SDH," Artech House, Norwood, 1996, (ISBN 0-89006-851-8).

[4]K. Harada, K. Shimizu, T. Kudou, and T. Ozeki, "Hierarchical optical path cross-connect systems for large scale WDM networks," Proc. OFC, pp. 356-358, Feb. 1999.

[5]I. Yagyu, H. Hasegawa, and K. Sato, "An efficient hierarchical optical path network design algorithm based on traffic demand expression in a Cartesian produce space," IEEE J. Sel. Areas Commun., Supplement on Optical Communications and Networking(OCN), vol. 26, no. 6, pp. 22-31, Aug. 2008.

[6] K. Ishii et al., "Monolithically integrated waveband selective switch using cyclic AWGs," ECOC2008, Mo.4.C.5., Sep. 2008

[7] Y.Taniguchi, H.Hasegawa, K.Sato, "Coarse Granular Optical Routing Networks Utilizing Fine Granular Add/Drop," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Volume:5, Issue:7, pp. 774 - 783, Jul. 2013.

2. 研究の目的

本課題の目的は以下の通りである: 1)グループ化光パイプ単位での経路制御を行うネットワーク接続ノードのアーキテクチャ 2)ノードを構成する光デバイスのアーキテクチャ 3)伝送実験によるデバイス及びノードの特性の実証 4)提案ノードにより接続された複数ネットワークへのグループ化光パイプおよび波長パスの効率的な収容法 5)ダイナミックなサービスに適應する為の動的なネットワーク再構成

本研究課題の実施により、現在はそれぞれのネットワーク毎に導入されてきた光ルーティングが、複数ネットワークを束ねた「広義のネットワーク」全域で利用され、結果として装置コスト・容量・消費電力等のあらゆる面で現状のネットワークを超える、将来のインフラストラクチャが効果的に構築できることが期待される。

3. 研究の方法

粗粒度ルーティング(提案時点では「疎」と誤記していたため、本報告の冒頭部では提案時の記述になら「疎」とし、本節以降では「粗」と記載する)を採用する上では、粗粒度ルーティングでのメリットを損なわないよう GRE パイプへのパス収容を効率的に行う必要がある。すなわち、光ファイバに直接光パスを収容する従来型ネットワークの場合には、未割当である周波数領域は後に設立される光パスが経路に関して制限なく利用できるのに対し、GRE パイプではパイプ単位で経路が決まっているため、仮に未割り当てである周波数領域が存在した場合であって

も、そのパイプが光パスの始点・終点を通わなければならない光パスを収容できない。よって、GRE パイプは空き容量がほぼゼロとなるように運用されることが理想的であるが、逆に光パスの始点・終点を適切に通過しない限りそれを収容できないため、空き容量を削減することが相対的に難しいという課題を抱えている。

以上を踏まえて本課題では、複数のドメイン・ネットワークをまたぐルーティングを考える上ではホップするノードが多くなること、およびドメイン・ネットワークの境界は必ずしも密ではないことから、インフラで要求される高信頼化の要件も付帯して満足しつつ、光パスを集約して収容する手法について検討した。これらの条件下ではパイプに収容可能な光パスの経路・始点と終点ノードの位置の条件がより厳しくなるため、複数のパイプを組み合わせた状態で、高信頼化の付加的要件を満足しつつ、多くの光パスを収容するための検討を実施した。また、多くのノードをホップするための伝送特性の改善についても、手法の検討・伝送実験・フィードバックとを重ねた。

ネットワークはその運用期間の間に、通信量の増加に対応するための設備増設を数度にわたって行う。設備増設条件下に於いても、粗粒度ルーティングのネットワークを有効なものとするための検討も行っており、GRE パイプへの増設光パス収容の戦略と、そのインパクトの評価を行った。

また、機械学習の急速な進展と、光ネットワークに接続される電気ルータの消費電力の多さ、および光パスのよりダイナミックな制御への期待に鑑みた検討を実施した。限られた観測値から安定した判定結果を得るための学習方式の検討やその学習の枠組み、およびシミュレーターによる実証を行った。

4. 研究成果

粗粒度ルーティングは多くのノードをホップしつつ、伝送特性を維持することが可能であることが研究実施期間中に本学及びイタリア等の他国研究機関等の検討により明らかになってきた。粗粒度ルーティングの実現手法として GRE パイプを用いたネットワークに於いては、複数のドメイン・ネットワークをまたぐ様な大規模なネットワークにおけるルーティング設計を可能にする計算複雑度の制限内で、粗粒度ルーティングが定義するパイプへの効果的な収容を実現するルーティング手法を開発した。提案手法では複数のパイプを同時に設計し、パイプ間の交差点の配置を、光パス需要に応じて変化させることで所望の要求を実現している。特に、パイ

ブ内に高密度に光パスを収容する際に問題となる、光パスの終端処理で避けられない信号劣化の回数を一定数以下に抑制し、更にパイプ切り替え処理を単純化する構造を提案し、同一光パスをネットワークに収容する上で、従来型ネットワークに比べて最大2割程度光ファイバ数を削減できることを示している。

このGREパイプを用いたネットワークでは常に所望の伝送特性を担保する必要があるが、一方でネットワークは運用期間中に設備増設を定期的に繰り返し、通信トラフィックの増加に耐えていく必要がある。光パスや光ファイバを増設することがネットワーク容量増加に貢献するが、その際に既存の光パスに悪影響を与えないことが重要な要求条件となる。そこで、我々は各増設段階に於いて、その増設段階のみにおける効率性だけにとらわれない、新たな粗粒度ルーティングネットワークの増設法を提案した。すなわち、光パスが新たに導入される場合、現在設立されている光ファイバから決まる普遍的な効率性を前提としつつ、その増設段階における効率性を第二のメトリックとして収容設計を行うことで、そのネットワークの運用機能全般にわたり従来型ネットワークに比べて優位性を保つことを現実のネットワークモデルを用いた数値実験により実証している。

また、多くのノードをホップした際の伝送特性の解析と実験によるフィードバックを得つつ、粗粒度ルーティングでの効果的な光パス収容と、伝送特性との維持を両立させるための、粗粒度と細粒度のハイブリッドルーティングを提案した。このルーティング手法では、伝送特性の制限を満たす範囲内で粗粒度ルーティングの利用を最低限とし、細粒度ルーティングを可能な限り多く用いている。この結果、許容伝送特性の制約条件下でネットワーク全体としてのルーティング性能を最大化することに成功しており、またこれまでのGREパイプでの複雑な伝送特性の管理が不要になっている。一定の細粒度ルーティングの利用が許される状況下では、GREパイプを用いたネットワークに比べて同等以上の性能を発揮することを示しており、今後の更なる設計法の進歩により、一層優れた特性を発揮するものと考えている。

以上の検討は光パスを用いた光ネットワークに関するものであるが、通信トラフィックは光ネットワークが扱える粒度に比べて遙かに細粒度なものであり、光ネットワークに接続された電気ルータを経由して光ネットワークの粒度との整合性を取る。電気ルータは、IPアドレスと呼ばれる世界で唯一のアドレスにより受信先を指定する通信を取り扱うため、膨大なアドレス検索を行う結果、電気を大きく消費すること、及び通信容量が制

限されることがネックである。また、その通信の特性から、最大通信速度に応じて電気消費量が決まる性質がある。そこで、機械学習の一種であるサポートベクターマシンを用いて、予想される通信速度の最大値を予測し、事前に電気ルータの最大速度を動的に制御する手法を提案している。相関が高く信頼できる過去の通信変動としては、そのルータが観測した直近の変動に限られることから、限られたデータから判定境界を高速に学習するための正規化の枠組みや、パケット単位で記録された実際の通信データを用い、電気ルータの装備するバッファを再現してのパケット単位での精密なシミュレーションを行って提案手法の動作を検討した。低いパケットドロップ率(10^{-4} ~ 5 程度)と、高い消費電力削減効果(通信量のピークに固定した電気ルータに比べ消費電力を6割程度削減)が実証された。機械学習については更なる展開を検討しており、通信トラフィックに応じた光パスのダイナミックな制御、およびデジタルコヒーレント受信器における判定境界の学習による誤り率低減に応用し、それぞれ成果を得ている。

以上のように、粗粒度ルーティングを提案時より研究の中心に据え、その後の知見により周波数利用効率の向上を得つつ、粗粒度ルーティングにおけるルーティング能力の制限を最大限に緩和し、ネットワーク設備増設についての戦略を提案するなど、総合的な性能向上を最大化するための検討を継続して実施した。現実のネットワークモデル上で、今後見込まれる次世代の伝送フォーマットや大容量トラフィックを想定した数値実験を行い、光ファイバ数削減等のCAPEXに直接貢献する指標を用いてインパクトを明らかにしている。また、学習データが限られ、かつインフラストラクチャとして判定失敗時のペナルティが重大であるネットワークにおける機械学習の適切な導入法についても検討し、可能な方針の一つを示している。

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) H. Kawase, Y. Mori, H. Hasegawa and K. c. Sato, "Dynamic Router Performance Control Utilizing Support Vector Machines for Energy Consumption Reduction," in IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 13, no. 4, pp. 860-870, Dec. 2016. doi: 10.1109/TNSM.2016.2605640 (査読有)

(2) H. Hasegawa, Y. Mori, and K. Sato, "Survivable Grouped Routing Optical Networks with Dedicated Path Protection,"

Vol. E99-B, No.7, pp.1435-1444, Jul. 2016.
(査読有)

〔学会発表〕(計 15 件)

(1) 石川智啓・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "多重故障を考慮した高信頼化 Grouped Routing ネットワーク設計法," 電子情報通信学会 2017 年総合大会, 2017 年 3 月

(2) 齋藤裕・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "粗粒度ルーティング光ネットワークの設備増設設計とその性能評価," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 116, no. 307, PN2016-28, pp. 13-18, 2016 年 11 月.

(3) 石川智啓・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "Spectrum Utilization Maximization in Coarse Granular Optical Routing Networks that Employ Fine Granular Shared Protection," DRCN2016, 2016 年 3 月 15-17 日

(4) H. Kawase, Y. Mori, H. Hasegawa and K. Sato, "Cycle-Slip-Tolerant Decision-Boundary Creation with Machine Learning," ICP2016, 2016/3

(5) 川瀬弘嗣・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "[奨励講演] 機械学習制御に基づくルータの低消費電力化," 電子情報通信学会 技術研究報告, PN2015-111, pp.47-51,2016/3/7.

(6) H. Kawase, Y. Mori, H. Hasegawa and K. Sato, "Real-time Optical Path Control Method That Utilizes Multiple Support Vector Machines for Traffic Prediction," Photonics West 2016, 2016 年 2 月 13-17 日, Moscone Convention Center, SanFrancisco, USA

(7) 長谷川浩・森洋二郎・佐藤健一, "高信頼化粗粒度ルーティング光ネットワーク," 電子情報通信学会 技術研究報告, PN2015-63, pp. 181-187, 神戸, 2016 年 1 月.

(8) 石川智啓・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "Shared Protected Grouped Optical Path Routing Network Design Employing Iterative Path Group Relocation," RNDM2015, Oct. 5-7, 2015.

(9) 川瀬弘嗣・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "機械学習に基づく動的な光パス容量制御," 2015 年ソサイエティ大会, B-12-16, 2015/9/9.

(10) 川瀬弘嗣・森洋二郎・長谷川浩・佐藤

健一, "機械学習制御によるルータの低消費電力化," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 115, no. 204, PN2015-16, pp. 31-35, 2015 年 8 月.

(11) 伊東優作・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "Grouped Routing 仮想光リンクを導入した大規模光パスネットワークの動的コントロール," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 115, no. 204, PN2015-19, pp. 49-53, 2015 年 8 月.

(12) 長谷川浩・森洋二郎・佐藤健一, "Resilient Grouped Routing Optical Networks With Finely Granular Protection," ONDM2015, May 11-15, 2015.

(13) 石川智啓・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "繰り返し再配置に基づく高信頼粗粒度ルーティング光パスネットワーク設計法," 電子情報通信学会 2015 年総合大会, 2015/3/11, 立命館大学(滋賀県).

(14) H. Kawase, H. Hasegawa and K. Sato, "Router power reduction by active performance control realized with support vector machines," 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), pp. 530-535, Feb. 2015.

(15) 石川智啓・森洋二郎・長谷川浩・佐藤健一, "共有型プロテクションを導入した粗粒度ルーティング光パスネットワーク," 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会 学生ワークショップ, 2014/11/28, NTT 武蔵野研究開発センター(東京都). [図書] (計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 浩 (HASEGAWA HIROSHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40323802

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()