

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 9 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02150

研究課題名（和文）メトロネットワーク群における適応的全光経路制御と統合制御手法の研究開発

研究課題名（英文）Adaptive and Integrated Control of Optical Routing Metro Networks

研究代表者

長谷川 浩（Hasegawa, Hiroshi）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40323802

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：メトロネットワークを中心に光ネットワークの効率的な大容量化と制御について検討した。ネットワーク内で局所的に容量が不足している領域を見出し、その領域を中心に光信号の多重度を高める方式を提案した。これにより既存設備を最大限に活用しつつ、既設ネットワークの容量を効率よく高める。また、光ノードの大容量化・低廉化を実現する、光ファイバ単位のスイッチングを行うノードを導入したネットワークについてその構成法を提案し、また性能を解析した。将来の動的制御環境下では性能低下が顕著であるものの、設計法の洗練や光信号の周波数変換器の導入により比較的小規模なネットワークにおいて効果的に導入可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ネットワークは現在の情報通信社会の基盤をなしており、その継続的な大容量化を実現しつつ、膨大な装置コスト及び敷設コストを抑制することが急務である。本研究では、既存ネットワーク設備の効率的な利用により、最低限の投資により光ネットワーク容量を拡大すること、および新たに敷設するネットワークについて、簡素なノード装置を利用した場合における性能レベルを世界で初めて明らかにし、将来の光ネットワークのあるべき姿について一定の知見を与えている。

研究成果の概要（英文）：Cost-effective network upgrade methods for current optical networks and dynamic control of next-generation fiber-granularity routing optical networks were studied. In order to resolve the first issue, an optical network architecture with heterogeneous WDM-Density was proposed; optical signal density in a fiber is adaptively changed according to traffic concentration in a network. The architecture enables us to upgrade current optical networks while keeping existing facilities as much as possible. For the second issue, a fiber-granularity routing network architecture was studied and its performance evaluation was conducted. The fiber-granularity routing significantly simplifies optical nodes in a network and thus its cost-effectiveness is crucially important for metro networks. The performance degradation in dynamic control environment can be suppressed by the introduction of wavelength converters and the use of sophisticated network design and control methods developed in the project.

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 ネットワーク制御 波長経路割り当て 超高密度波長多重 ファイバ粒度ルーティング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

全国レベル・地域レベルの規模を問わず、広域をカバーするネットワークは一般に、通信拠点（ノード）に設置される接続装置（現在は電気ルータ・将来的には光クロスコネクタ）、接続装置に付帯する光送受信器、およびノード間を接続する光ファイバおよび増幅器を含むリンクから構成される。現在の通信方式は IP (Internet Protocol) ベースのものが主流であり、データは IP パケットと呼ばれる 1500 バイト程度の小さな単位に区切られて送受信される。IP パケットを中継するルータ装置では、IP パケットに記された宛先アドレスを巨大なテーブルから検索して、適切なリンクに送り出す。ルータ装置での宛先検索処理を行うにあたり、光ファイバ中の光信号(光パス)を一度電気信号に変換し再度光信号に変換する、負担の大きな処理が必要である。また宛先テーブルが記憶すべき項目(経路数)は、ネットワーク境界のルータ装置に於いては 10 万を超えており、信号変換及び宛先検索の電力消費は膨大で、かつ大きな遅延も発生する。ルータ装置に搭載される各種プロセッサは、高性能コンピューターのそれと同様、リーク電流増大をはじめとするシリコン半導体の技術革新の困難により性能向上を阻まれている。故に全世界での通信トラフィックが 15 年間で 100 倍以上に増加している現状では、電力消費よりも性能を重視した大型ルータ装置を導入し、かつ複数台を相互接続して擬似的に所望の規模を達成する等の非効率な対応を迫られている。実際、日本やドイツなどの先進国において、NTT・ドイツテレコム等の通信キャリアが消費する電力は国家の総消費電力の 1-2% を占め、更にその通信ネットワークの主要な消費電力が大型ルータ装置に由来することになると、ドイツテレコムにより報告されている。

特に通信が集中する全国レベルのネットワーク（コアネットワーク・図 1 参照）では、通信ノードを通過する光信号は、その波長をラベルとして宛先を決め、光クロスコネクタ中の光スイッチにより転送を行う方式（以降光ネットワークと記載・図 2）が順次導入され、低消費電力化、ルータ装置の低コスト化、高価な光送受信器数の削減、最小遅延の達成、が実現されている。この数年来、超高速移動体通信を実現する 5G サービスの導入、Akamai に代表されるネットワークキャッシュサービスの普及、および都市型データセンターの増加により、メトロエリアネットワーク内で完結する通信が大きく増加している。実際、Cisco 社に依れば移動体通信の通信量は年率+46% で増加しており、また ALU Bell Lab. はメトロエリアおよびデータセンター由来の通信量急増を 2010 年代の当初に予想していた。このため、コアネットワークに続き、メト

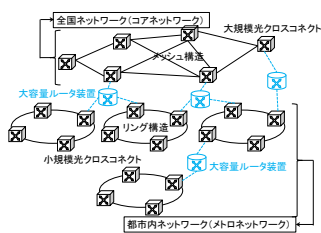


図 1. ネットワーク階層 (コア・メトロ)

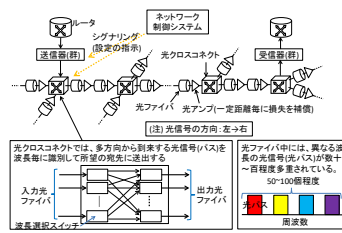


図 2. 基本的な光ネットワーク

ロネットワーク内への光クロスコネクタによる全光経路制御の導入が求められている。

光ネットワーク全体の容量を増やす上では、そこで用いられる送受信器（通信インターフェース）の容量を増加させることが有効であった。この 14 年程の間にも、10Gbps, 40Gbps, 100Gbps と容量が増大し、特に現在主流の 100Gbps においてはデジタル信号処理による高精度な劣化補正を受信器側に搭載することで、大容量・長距離伝送を両立させることに成功している。しかし更なる大容量化には信号劣化への敏感さに直結し、伝送可能距離を著しく短くする。そこで主要な信号劣化である、通信ノード装置を経由する際の帯域通過フィルタリング (図 3 参照) を効果的に抑制するネットワークを構成することが重要である。

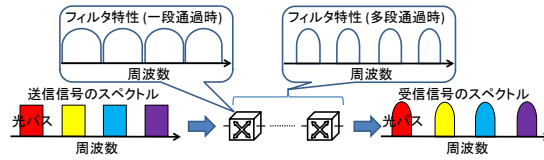


図 3. ノード内の波長選択スイッチにおける帯域狭窄化

2. 研究の目的

本研究で目指すのは、次世代大容量送受信器の信号劣化への脆弱性を補償し、同時に複数メトロネットワーク間での全光経路制御を実現しうる、ネットワーク相互接続装置アーキテクチャと複数ネットワークの統合制御アルゴリズムの開発である。複数メトロネットワーク間での通信を光経路制御に変更することにより、電気信号に変換するために必要であった光送受信器を廃することができ低コスト化に貢献するばかりでなく、ルータ装置を小型化することで低消費電力化も達成される。信号劣化に脆弱な次世代大容量送受信器を用いるにあたっては、帯域通過フィルタリング効果が小さい相互接続装置の構成を提案するほか、各ネットワーク内での帯域通過フィルタの形状を最適化することで、通信ノード装置の最大経由可能数を増加させ、複数ネットワークをまたがる通信を可能とする。これにより、より多くのメトロネットワークを統合的に制御・運用可能とする。

3. 研究の方法

小規模ネットワークおよびそれらを複数統合した際の大規模ネットワークをグラフとしてどのように捉えるべきか、その際に性能のボトルネックとなるところはどこであるかを見出すことを目指して検討を開始し、ネットワーク構造から普遍的にボトルネックとなる箇所が導かれることを明らかにした。その箇所の容量拡大に注力しつつ、他のトレードオフを最小化する方式を開発した。一方、フィルタリングの軽減と、ノード装置の簡素化を同時に実現すべく、信号を可能な限りの本数束ねた場合に取りうるスイッチング方式の検証を進め、光ファイバ内の信号をすべて一括でスイッチングする方式をノード装置の構造として採用した。この方式では、経路制御の自由度が極めて低くなることから、ネットワーク全体の経路設定を同時に最適化して自由度の低下を極力補うものとした。また、その際でも補うことができない性能低下を定量的に評価した。さらに、新たなハードウェアの導入により性能低下を補う方式を提案したうえで、最終的な性能低下が限定的であることを示した。

4. 研究成果

小規模ネットワークを結合した大規模ネットワークの容量限界を、リンクカットセットと、その両側に始点・終点が分布する光パスの数との比率をカットセット負荷として、その負荷が高いカットセットに着目したネットワーク構成及び光パス収容アルゴリズムを提案した。負荷の高いカットセットの大半に特定のリンクが含まれることから、そのリンクをボトルネックリンクと名付け、この容量を最大化することを目指した。

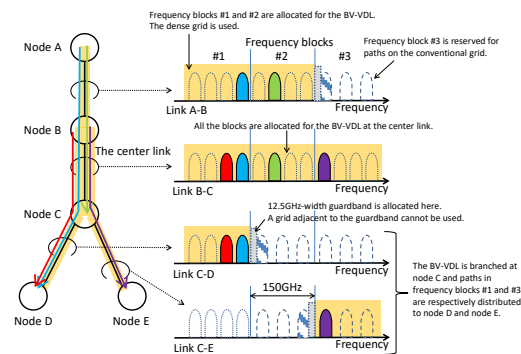


図 4. ボトルネックリンクを中心とした木構造と超高密度波長多重

ボトルネックリンクの容量を最大化する上では、そこでの波長多重密度を通常よりも高くする必要はあるが、一方で経路制御が制約されるというトレードオフが存在するため、ボ

トルネックリンクにかかわる光パスのみに超高密度波長多重を適用するネットワーク構成を提案した。図 4 はその概念図であり、ボトルネックリンクから両側に木構造が広がり、その木構造の上では、超高密度波長多重を行う周波数領域が定義されている。この領域以外については、ネットワーク上では通常の高密度波長多重が適用され、経路制御の制約から解放される。この領域を、我々は「可変周波数帯域幅バイパスリンク」と呼称している。

ボトルネックリンクの特定は、直接的には全カットセットの負荷の評価を行うことになるが、カットセット数が膨大であることから大規模ネットワークでは現実的ではない。そこで、高い使用率のリンクを推定する上では全てのカットセットを必ずしも求める必要はない点に着目し、現実的な時間内に十分のカットセットを得ることとした。カットセットがグラフを二分することに着目し、「一筆書き」が可能な部分グラフに対して残りの領域が連結かどうかを判定することでグラフが二分されたか否かを決定し、二分されたならばその境界をカットセットとする発見的手法を開発した。この部分グラフを順次拡張することで様々なカットセットを抽出することに成功している。48ノードの日本全国網の大規模トポロジにおいても、十分短い時間で多くのカットセットを取り出すことができている。光パス容量をアップグレードしない状況においても、ネットワーク容量を最大3割程度拡大することが示された。可変周波数帯域幅バイパスリンク内で信号劣化が抑制される状況下では、200Gbps などより高いビットレートの光パスを用いることができるため、実際のネットワーク容量拡大率は3割を大きく上回るものとなる。

続いて、光ファイバ単位で経路制御を行うネットワークの実現に向けた検討を行った。これは究極的な経路制御の単純化と、それに伴う伝送特性の改善を狙ったものである。前者の単純化はコストを重視するメトロネットワークにおけるノード装置削減に寄与する他、後者の伝送特性の改善はより高いビットレートの光パスの導入を容易とし、一般にはビット当たりの単価を抑制することができる。図 5 は、光ファイバ単位で経路制御を行うノード構成の基本形であり、光パスへの割当周波数を変更して別のファイバに出力する波長変換機能も備えている。

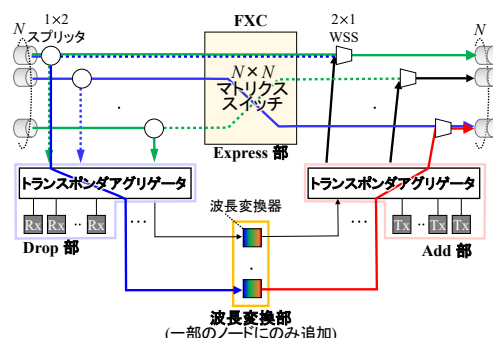


図 5. 波長変換器を装備したファイバ粒度ルーティングノード

光ノード構成を用いたネットワークは、光ファイバ内の信号が一括で同一経路に流れるので、ネットワーク内に仮想的な環状ないし直線状の部分ネットワークを構築することとなる(図 6)。しかし、部分ネットワークを複数決定し、全ての送受信ノード間で通信が可能となるようなアルゴリズムは存在しなかった。そこで、規模が小さくトラフィック量が少ない領域においては整数線形計画法を用いて評価し、規模が大きい、トラフィック量が多いという状況であれば、グラフ探索に基づく発見的手法を用いるものとする。

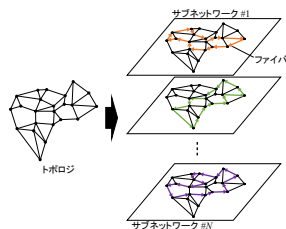


図 6.部分ネットワークへの分割

続いて、数値シミュレーションにより各提案法の性能評価を行った。

(1) バイパスリンク

北米 USNET, 欧州 COST266, 日本 JPN25 ネットワーク上で通信トラフィック量を変化させて光パスの設立がブロックされる比率を評価した。その変動を図 7 に示す。目標ブロッキング率を 0.001 としたときの通信トラフィック量は、各トポロジで 20/33/13% 増大しており、効果的にネットワーク容量が増加していることが見て取れる。

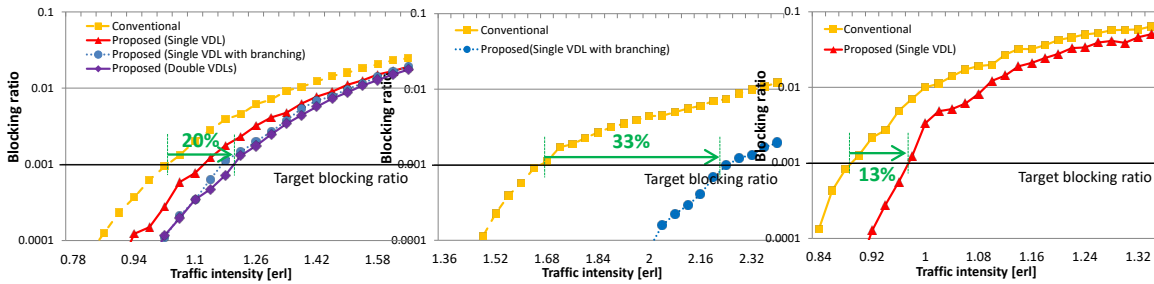


図 7 ブロッキング率変動 (USNET, COST266, JPN25)

(2) ファイバ粒度ルーティング

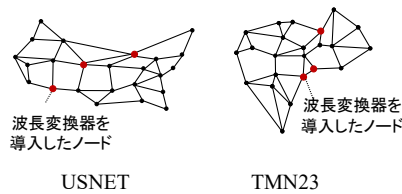


図 8. トポロジおよび波長変換器配置位置

図 8 に使用したトポロジ及び波長変換器の配置位置を示す。この上で通信トラフィック量を変化させてパスのブロッキング率の変動を評価した(図 9)。まず変換器がない場合には、従来型ネットワーク(WXC)に対する性能低下が著しく、トポロジによってはネットワーク容量がおおむね半減することが見て取れる。一方で、波長変換器を送信器に対して 5/10/15% 程度追加することで、ネットワーク容量は大きく増大し、従来型ネットワークとの相対値で 9% 程度の容量減にまで変化することがわかる。つまりファイバ粒度ルーティング単体では、光パスが動的に設立・削除される状況においては経路制御能力が不十分であるが、波長変換器を戦略的に配置することでその不十分な経路制御能力をおおむね補うことができるといえる。

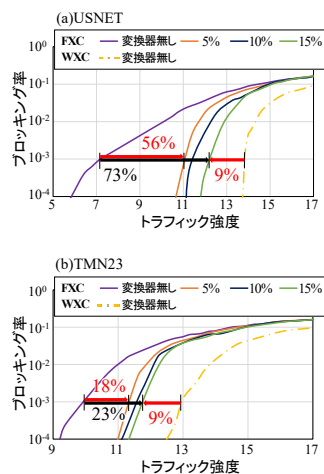


図 9. ブロッキング率変動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 林 和輝, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 可変帯域仮想光リンク上での超高密度波長多重による光ネットワーク大容量化
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾 武, 白木 隆太, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 ファイバスイッチング型光ネットワークにおける超大容量光パスの動的制御
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 和輝, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 可変ルーティング粒度および波長多重密度を導入した光ネットワークの設計法
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾 武, 白木 隆太, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 ファイバ粒度ルーティング光ネットワークの動的制御特性
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 第2種研究会第18回PN研究会学生ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川 浩
2. 発表標題 スケーラブルな空間多重光ノードアーキテクチャ
3. 学会等名 電子情報通信学会 2022 年総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeshi Matsuo, Ryuta Shiraki, Yojiro Mori, and Hiroshi Hasegawa
2. 発表標題 Performance Evaluation of Dynamic Fiber-Granular Routing Networks with Next-Generation Optical Paths
3. 学会等名 OECC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Matsuo, Ryuta Shiraki, Yojiro Mori, and Hiroshi Hasegawa
2. 発表標題 Design and Dynamic Control of Fiber-Granular Routing Networks with Next-Generation Optical Paths
3. 学会等名 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾武, 長谷川浩, 森洋二郎
2. 発表標題 粗粒度ルーティングを導入したダイナミック光ネットワークの特性解析
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川浩
2. 発表標題 フォトニックネットワーク分野の教育・研究のオンライン化～名古屋大学の場合～
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年総合大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾 武，白木 隆太，森 洋二郎，長谷川 浩
2. 発表標題 粗粒度ルーティングネットワークにおける統計多重効果
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 第二種研究会 PN学生ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Hayashi, Yojiro Mori, and Hiroshi Hasegawa
2. 発表標題 Efficient Network Capacity Expansion by Differentiated WDM-Density with Bandwidth-Variable Virtual Direct Links
3. 学会等名 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾武，白木隆太，森洋二郎，長谷川浩
2. 発表標題 ファイバ粒度ルーティングネットワークの設計法
3. 学会等名 2022年東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松尾 武, 白木 隆太, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 大規模ファイバ粒度ルーティングネットワークの設計及び動的制御
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土田 直樹, 久野 拓真, 白木 隆太, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 レーザー特性の常時監視技術
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土田直樹, 久野拓真, 白木隆太, 森洋二郎, 長谷川浩
2. 発表標題 高次多値変調信号を用いたレーザー線幅の常時監視技術
3. 学会等名 電子情報通信学会2023年総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 内田航平, 白木隆太, 森洋二郎, 長谷川浩
2. 発表標題 無瞬断光パス再配置を導入したファイバ粒度ルーティング光ネットワークの動的制御
3. 学会等名 電子情報通信学会2023年総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三ツ矢 拓誠, 落合 匠郎, 久野 拓真, 森 洋二郎, 長谷川 浩, 佐藤 健一
2. 発表標題 データセンタ向け高信頼波長ルーティングスイッチ
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三ツ矢 拓誠, 久野 拓真, 森 洋二郎, 長谷川 浩, 佐藤 健一
2. 発表標題 短距離通信用デジタルコヒーレント受信器を用いたデータセンタ光スイッチネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川誉聡, 白木隆太, 森洋二郎, 長谷川浩
2. 発表標題 スペクトラム狭窄耐力を向上する等化器生成法
3. 学会等名 電子情報通信学会2023年総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 落合 匠郎, 白木 隆太, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 量子化雑音耐力を備えたデジタルコヒーレント受信器
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋口 怜治, 白木 隆太, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 短距離コヒーレント光通信システムに適する変復調方式
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加川功己, 白木隆太, 森洋二郎, 長谷川浩
2. 発表標題 ニューラルネットワークシンボル判定器の特性変動耐性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会2023年総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加川 功己, 白木 隆太, 森 洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 適応的シンボル判定器の特性変動耐性
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 第2種研究会第19回PN研究会学生ワークショップ
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------