

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700065

研究課題名(和文) 超大容量通信のための新たな全光ネットワーク制御技術に関する研究

研究課題名(英文) A study on all-optical network management technologies for ultra large capacity communication

研究代表者

廣田 悠介 (Hirota, Yusuke)

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：20533136

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：超大容量通信のための新たな全光ネットワーク制御手法の開発を目的とし、多重化技術がネットワーク資源割当に与える影響を調査するとともに、高効率に光パスを収容可能な資源割当アルゴリズムの開発及びノードアーキテクチャの設計を行った。具体的には、周波数分割多重化技術を用いた光パス設定アルゴリズムの開発、空間分割多重化技術に適した光スイッチングノードアーキテクチャの設計、及び、ノードアーキテクチャの処理を簡素化するネットワーク制御方式などを開発した。

研究成果の概要(英文)：This project aims to develop network control and management systems for ultra large capacity all-optical networks. I investigated the impact of multiplexing technologies against network resource allocation and design the resource allocation algorithms and optical switching node architecture. For more detail, I developed (1) an efficient path provisioning algorithm with frequency division multiplexing technology, (2) switching node architecture with spacial division multiplexing technology, and (3) a network resource allocation method which simplifies switching process of nodes.

研究分野：光ネットワーク

キーワード：全光ネットワーク ネットワーク制御 資源割当 経路選択 周波数割当 空間分割多重 マルチコア  
ファイバ ノードアーキテクチャ

1 . 研究開始当初の背景

近年ネットワークを流れる通信トラフィック量が急増する中、新世代のネットワークインフラとして、全光ネットワークが期待されている。全光ネットワークを実現するためには、スイッチを全光で処理し、光の高速性を妨げない自律的システムの研究が必要である。これまでに超大容量通信を実現するための光ファイバやデバイス技術、変調方式などの研究は盛んに行われており、中でも本研究と関連が深い技術として、デジタルコヒーレント技術及びエラスティック光パスネットワークが挙げられる。エラスティック光パスネットワークは、光ファイバの周波数資源を利用しつくすことを目指したものであり、その特徴は、これまでの固定的な周波数グリッドでの波長割当に対して、伝送距離やデマンドに応じて様々な変調方式を適用し、必要最小限の周波数資源を割り当てて通信するというものである。10G-EPON などアクセス系に関しても研究が進められているなか、それらのトラフィックを收容するコアネットワークに関しても早急に高効率なネットワーク制御手法を確立する必要がある。超高精細映像配信や遠隔医療などの実現に向けて、End-to-End で安定した超大容量通信を実用化するためには、物理レベルの改善だけでなく、ネットワークレベルの技術発展も必要不可欠である。

2 . 研究の目的

光スイッチングのアーキテクチャを原理分解してその要求条件を明確化するとともに、End-to-End で QoS が完全に保証される超大容量全光通信の実現に向けてのシステム制御手法を確立することを目的とする。デジタルコヒーレント通信やエラスティック光パスネットワークの多様なデバイス要件及び変調方式を考慮し、それらを基礎とする超大容量光通信ネットワークを目指して、ネットワーク資源を柔軟に利活用する周波数資源割当アルゴリズムの確立及びノードアーキテクチャの開発を行う。

3 . 研究の方法

- (1) エラスティック光ネットワークにおけるネットワーク制御の課題抽出と基礎検討を行う。特に、物理特性劣化や周波数連続性制約が資源割当に与える影響を調査し、抽出された課題を解決する周波数割当アルゴリズムを確立する。
- (2) 交換処理を行う中継ノードのアーキテクチャの実現可能性を追求し、動的なトラフィック変動に対応可能なノードアーキテクチャの提案と基礎評価を行う。
- (3) スwitchingノードで行う交換処理は、設定される光パスによってその処理内容が異なる。超大容量通信を実現するためには、

交換処理やネットワーク制御をそれぞれ別々に設計・動作させるのではなく、それらを協調動作させることが望ましいと言える。そこで、ノードアーキテクチャ設計とネットワーク制御として特に周波数割当手法を有機的に結び付け新たな交換処理ノード及び周波数割当アルゴリズムの提案・確立を行う。

4 . 研究成果

(1) H24 年度の成果

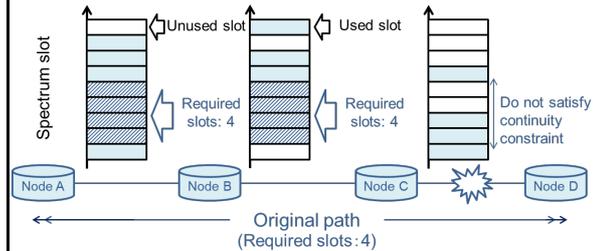


図 1: 長距離ホップ光パスの棄却

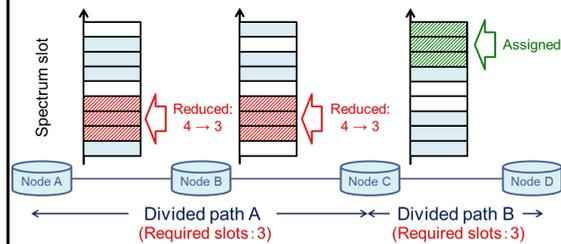


図 2: 提案光パス分割手法

エラスティック光ネットワークでは、ノード間の棄却率の不公平性が、従来の WDM ネットワークよりも大きくなることが分かった。これは、図 1 のように、周波数連続性制約を満たしにくくなることに加えて、伝送距離・ホップ数の大きいコネクションは、物理特性劣化の影響も大きく、よりノイズに強い変調方式を用いる必要があるためである。言い換えると、同じ伝送レートであっても距離が長いほど多くの周波数帯域を割り当てる必要があるためである。そこで、図 2 のように、適応的にコネクション要求を分割し、短い距離でより高度の多値変調方式を用いることで必要となる周波数資源の削減、連続性制約の緩和を行い、長距離ホップの光パス接続要求に対する棄却率の不公平性を改善する資源割当アルゴリズムを開発した。提案アルゴリズムの基本特性を計算機シミュレーションにより評価した結果を図 3, 4 に示す。

図 3 のように提案手法では、ホップ数の大きいノード間のコネクション接続要求に対して、光パスを分割する割当が行われていることを確認した。これにより、従来手法ではホップ数が大きいノード間の棄却率が大幅に悪化しているものの、提案アルゴリズムを用いることで、特にホップ数が大きい光パスの棄却率が改善され、結果として公平性を表す指標である fairness index が改善可能であることを明らかにした。

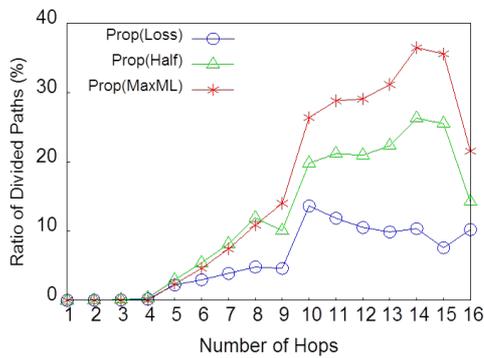


図 3: ホップ数ごとパス分割割合

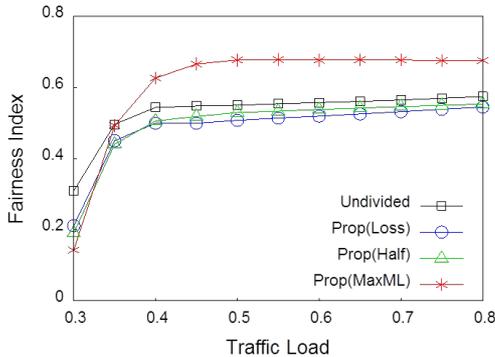


図 4: 負荷と fairness index の関係

また、ネットワーク制御に関連して、SDN(Software Defined Networking)に関する研究が活発化してきている。そこで、SDN の代表的なプロトコルである OpenFlow を用いたネットワーク制御の検討を行った。ここでは、大容量通信サービスの一つとして、動画配信を対象とし、データ伝送のための経路制御アルゴリズムの検討を行った。図 5 に OpenFlow を用いた集中管理の例を示す。

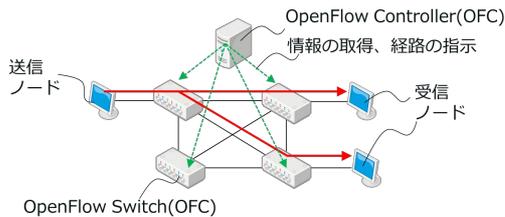


図 5: OpenFlow による集中制御

集中管理による経路制御は、光ネットワークにおいても適用可能であり、SDN 技術を用いた集中管理によって分散処理よりも高効率なネットワーク制御が可能であることを確認した。

## (2) H25 年度の成果

エラスティック光ネットワークでは、様々な帯域幅のトラフィックを柔軟に收容することで周波数資源利用率の向上、通信容量の増加を実現している。一方で、様々な帯域幅の光信号を扱うため、交換処理ノードは高性能な帯域可変フィルタを用いる必要があるなど、大規模、高コスト化してしまう。

Architecture on Demand (AoD) ノードは、トラフィックのスイッチング要求に応じて入

出力ポートと周波数選択スイッチ (SSS: Spectrum Selective Switch) などの構成モジュールを動的に相互接続することで、ファイバ毎、コア毎や帯域毎などの多様なスイッチング粒度に対応可能な光ノードアーキテクチャである。AoD ノードは実装されているポートやモジュール間の接続構成を動的に作り替えることで高い柔軟性を発揮する。一方で、与えられたスイッチング要求に応じて AoD ノードの構成に必要なモジュールの種類や数は異なるため、AoD ノードが具備すべきモジュールの集合はトラフィック要求だけでなく AoD ノードの構成アルゴリズムや周波数資源割当手法に応じて適切に設定されなければならない。

超大容量通信を実現する有望な次世代ファイバであるマルチコアファイバを具備するエラスティック光ネットワークを対象とし、ネットワーク全体がエラスティック光ネットワークの柔軟な帯域幅のサービスを要求する場合であっても、AoD ノードが要求するモジュールのコストを改善可能な周波数及びコア割当手法を提案した。提案方式は、MCF のそれぞれのコアに特定の帯域幅のコネクションだけが收容されるように割当を行うことで、各コアの信号を固定帯域幅のモジュールを用いて分離多重することを可能とする。提案方式の周波数割当の例を図 6 に示す。

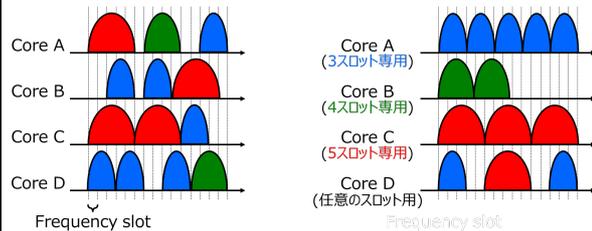


図 6: 周波数割当の例

図 6(左) に示すように、エラスティック光ネットワークにおいて、従来の周波数割当では distance-adaptive で多様な帯域幅のコネクションの設定及び解放が繰り返されることにより周波数帯域の断片化が発生し、周波数利用率が低下する。周波数断片化を経路の再設定及び周波数帯域の再割り当てによって解決する手法が多く研究されているが、このようなアプローチではネットワークの再設定に伴うコネクションの中断が問題となるため、コネクションに対する資源割当の段階でなるべく周波数断片化が発生しないようにすることが望ましい。提案方式では、MCF の空間チャネルを利用し、特定のコアに特定の要求帯域幅のコネクションを收容するように周波数割当を行うことで周波数断片化を抑制するとともに、AoD ノードにおいて信号の多重分離を行う構成モジュールの大部分を帯域可変 SSS から固定幅の MUX/DEMUX に置き換えることで AoD ノードのコストを削減可能となる(図 6(右))。

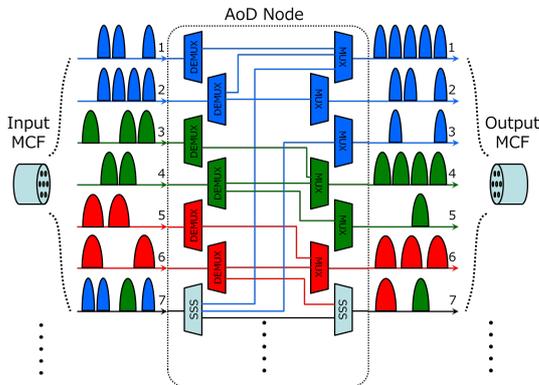


図7: マルチコア対応提案ノード構成の例

提案周波数割当手法によって実現されるAoDノードの構成を図7に示す。入力MCFのそれぞれのコアはそれぞれAoDノードの入力ポートに接続され、コア内を伝送されてきた信号はSSSもしくはMUX/DEMUXによってその信号を分離され、出力ポート方路へスイッチングされた後に多重化されて出力ポートから出力される。入出力ポートと各モジュールのスイッチングはAoDノード内の3D-MEMSを用いて自由に行うことが可能であると仮定し、スイッチングの要求に応じて必要なだけの相互接続が形成される。このとき、SSSとMUX/DEMUXのどちらを用いて信号の多重分離を行うかは、AoDノードの入出力ポートが接続されているコアの状態に依存する。すなわち接続されたコアが特定の帯域幅用のコアである場合、その帯域幅に応じたMUX/DEMUXを使用し、任意の帯域幅用のコアである場合、帯域幅可変のSSSを使用する。

動的に発生するトラフィックに対して、適切にコア・ファイバ・周波数を割り当てるため、各周波数帯域に対して割当コストを設定し、その指標に基づいた動的資源割当アルゴリズムの開発を行った。

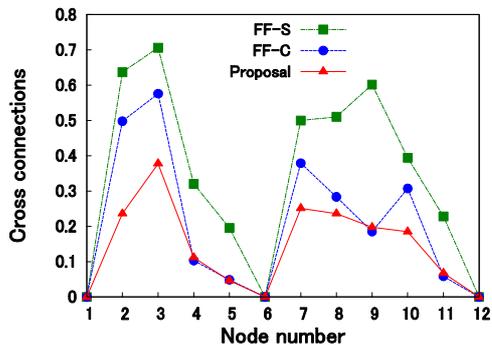


図8: クロスコネクション数(正規化後)

提案方式を計算機シミュレーションにより評価した。図8にクロスコネクションの削減割合を示す。クロスコネクションとは、ノード内の各モジュールを3D-MEMSで繋ぐ内部パスの個数であり、この値が小さいほど、多くのトラフィックを少ないモジュールで接続していることを表し、スケーラビリティの優れたノード構成であることを示している。

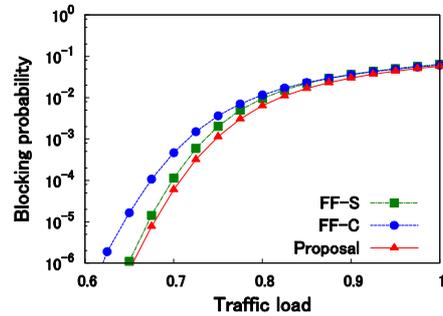


図9: 棄却率の評価結果

提案のアーキテクチャは任意の帯域幅で交換処理可能な高性能デバイスの利用を抑制し低性能デバイスを活用しつつ、動的に大量のトラフィックを収容するものである。一部の高機能モジュールを置き換えて適切な資源割当を行うことにより、クロスコネクション数の削減が可能であることを確認した。図9より、提案のアーキテクチャを用いたとしてもネットワーク全体の棄却率は悪化しておらず、本ノードアーキテクチャがエラスティック光ネットワークに適用可能であることを確認した。

### (3) H26年度の成果

SSSのポート数は有限であるため、ノードの規模が拡大し、ノードの入出力数がSSSのポート数を超過して増加すると、要求されるSSSの数が飛躍的に増加し、消費電力の悪化が問題となる。そこで、消費電力の低減に関して検討を行った。

消費電力の削減を行いつつ、超大容量通信を実現するため、提案ノードアーキテクチャ及び割当アルゴリズムを発展させた。改良した光ノードアーキテクチャを図10に示す。

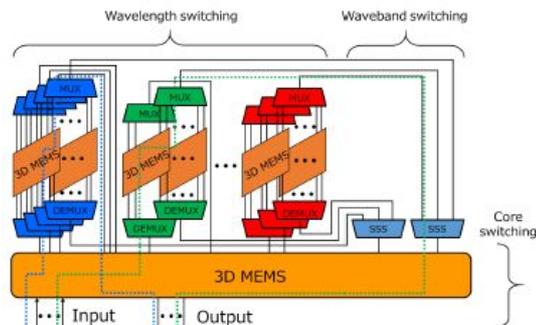


図10: 多様な要求を収容可能な光スイッチングノード構成例

各コアは、コネクションがはじめて割り当てられたとき、そのコネクションの要求帯域幅  $r$  スロット専用コアになり、以降それ以外の要求帯域幅のコネクションを受け入れない。また、 $r$  スロット専用コア内のすべてのコネクションが処理され、コアが空になった場合、そのコアは再びコネクションが割り当てられるまで任意の要求帯域幅のコネクションを受け入れ可能とし、 $r$  スロット以外の専用コアとなりうる。加えて、このような固定的な割当による棄却率の悪化を防ぐため、

任意の帯域幅用のコアをあらかじめ各リンクに一定数設ける．ノードでの消費電力量削減も考慮し，(2)で提案したコスト算出の式を改良した．各コネクション要求に対して周波数資源を割り当てることにより，周波数資源の断片化を抑制すると共に提案ノード構成においてより多くの信号を固定幅のMUX/DEMUXを用いて多重分離することが可能になる．また(2)と比べて要求帯域幅の種類が増加した場合においても，r スロット専用のコアの過剰な形成を抑制可能である．ネットワークデマンドの種類を変化させ，様々な要求に対しての性能評価を行った．

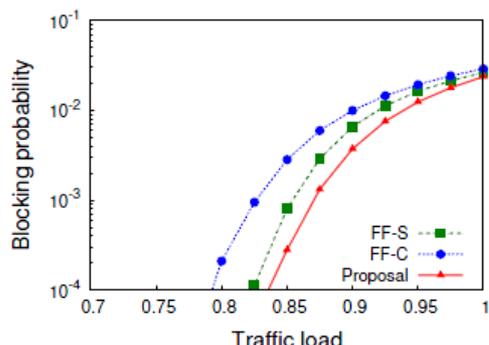


図 11: 負荷と棄却率の関係

JPN-12 型トポロジにおける棄却率の評価を図 11 に示す．図 11 よりトポロジや負荷に関わらず，提案周波数割当手法によってネットワーク全体の棄却率が FF-S と比べて改善された．負荷が中程度(0.85 から 0.9)の領域において提案方式と FF-S との棄却率の差が最も大きく，より低負荷の領域においてはその差が小さくなる．これは，低負荷域では提案方式が形成する専用コアを十分に使い切ることができず，資源利用効率が低下するためであると考えられる．

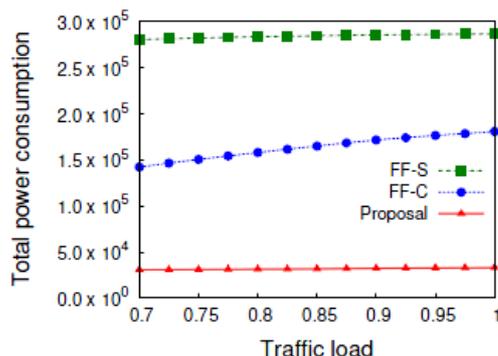


図 12: 消費電力削減効果

JPN-12 型トポロジにおける全ノードの総消費電力の評価結果を図 12 に示す．図 12 より，トポロジや負荷に関わらず，提案周波数割当手法によってネットワークの全ノードの総消費電力が比較方式と比べて劇的に改善された．方式間の相対的な改善度合いはトポロジによらず同等であり，より大規模なトポロジになるほど消費電力削減効果も大きくなることを明らかにした．本成果は，光通信の世界的主要国際会議である ECOC にて採

択されており，世界的に注目を集めている技術の一つであると言える．今後は，要求の種類が多様化する環境下への対応などを行い，学術論文誌での報告を行う予定である．本研究全体として，空間分割多重化技術の一種であるマルチモードファイバに関しては検討段階に留まった．世界的に空間分割多重化技術が活発に研究されはじめており，マルチモードファイバに関する研究も多数発表されるようになってきている．MIMO などの利用による制約条件の変更なども考慮する必要があることが分かっている．

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 14 件)

- [1] Y. Hirota, T. Hatada, H. Tode, T. Watanabe, "Dynamic Spectrum Allocation Based on Connection Alignment for Elastic Optical Networks," APSITT, Colombo, Sri Lanka, Aug. 4th, 2015. (to be presented)
- [2] 藤井祥平, 廣田悠介, 戸出英樹, 渡辺尚, "大規模 AoD ノードにおける消費電力を削減可能な周波数資源割当手法," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 518, PN2014-96, pp. 109-114, 沖縄県青年会館 (沖縄県那覇市), Mar. 19th, 2015.
- [3] 杉原盛太郎, 廣田悠介, 藤井祥平, 戸出英樹, 渡辺尚, "エラスティック光ネットワークにおける即時予約と事前予約の公平性を考慮した周波数割当手法の検討," 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会第 11 回学生ワークショップ, pp. 15-17, 沖縄県青年会館 (沖縄県那覇市) Mar. 19th, 2015.
- [4] 藤井祥平, 廣田悠介, 戸出英樹, 渡辺尚, "低消費電力型 AoD ノードのための多様な要求帯域幅を考慮した動的周波数資源割当手法の検討," 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会第 11 回学生ワークショップ, pp. 19-22, 沖縄県青年会館 (沖縄県) Mar. 19th, 2015.
- [5] 廣田悠介, 戸出英樹, "大容量光パスネットワークのための周波数資源割当問題に関する研究," 第 57 回自動制御連合講演会, 2D02-3, pp. 1086-1092, ホテル天坊 (群馬県渋川市), Nov. 11th, 2014.
- [6] S. Fujii, Y. Hirota, H. Tode, and T. Watanabe, "Dynamic Spectrum and Core Allocation Reducing Costs of Architecture on Demand Nodes," in Proceedings of 40th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2014), P.6.23, Cannes, France, Sep. 24th, 2014.
- [7] S. Fujii, Y. Hirota, H. Tode, and T. Watanabe, "Dynamic Spectrum and Core Allocation with Spectrum Region Reducing Costs of Building Modules in AoD Nodes," in Proceedings of 16<sup>th</sup> International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks2014),

wed.s2.3, Madeira Island, Portugal, Sep. 18th, 2014.

[8] 藤井祥平, 廣田悠介, 戸出英樹, 渡辺尚, “エラスティック光パスネットワークにおけるAoDノードのための動的周波数資源割当手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 109, PN2014-10, pp. 53-58, ビーコンプラザ(大分県別府市), June 27th, 2014.

[9] 幡田恵彦, 廣田悠介, 藤井祥平, 戸出英樹, 渡辺尚, “マルチファイバエラスティック光ネットワークにおける優先グリッド整列に基づいた周波数割当手法,” 2014年電子情報通信学会総合大会, B-12-6, 新潟大学(新潟県新潟市), Mar. 19th, 2014.

[10] 藤井祥平, 廣田悠介, 戸出英樹, 渡辺尚, “AoDノードのスケーラビリティを考慮した動的周波数及びコア割当手法の一検討,” 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会第10回学生ワークショップ, pp.25-27, 徳島文理大学香川キャンパス(香川県さぬき市), Mar. 4th, 2014.

[11] Y. Hirota, H. Tode, and K. Murakami “A Study on Path Provisioning with Traffic Aggregation in Optical Packet Switching Networks,” the 8th International Workshop on Optical Signal Processing and Optical Switching (IWOO), Edinburgh, UK, Sep. 30th, 2013 (Invited).

[12] S. Fujii, Y. Hirota, and H. Tode, “Dynamic Resource Allocation with Virtual Grid for Space Division Multiplexed Elastic Optical Network,” in Proceedings of 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), P.5.15, London, UK, Sep. 24th, 2013.

[13] 川住涼, 廣田悠介, 戸出英樹, 村上孝三, “In-network Cacheを利用したマルチキャスト配信システムのOpenFlowによる実装,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 112, no. 463, NS2012-248, pp. 483-488, 沖縄残波岬ロイヤルホテル(沖縄県中頭郡), Mar. 8th, 2013.

[14] S. Fujii, Y. Hirota, H. Tode, and K. Murakami, “Path Division Method for Fairness in Dynamic Elastic Optical Path Networks,” in Proceedings of International Conference on Photonics in Switching 2012 (PS2012), Th-S35-012, Corsica Island, France, Sep. 13th, 2012.

[その他]

ホームページ等

<http://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/hirota/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣田 悠介 (HIROTA, Yusuke)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号：20533136