

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2014

課題番号：23650030

研究課題名(和文) 新世代光ネットワーク基盤におけるコンテンツベース交換方式

研究課題名(英文) Content-based Switching Network for New-Generation Optical Network Infrastructure

研究代表者

戸出 英樹 (Tode, Hideki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20243181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：光回線/光パケット/光バースト交換網などの将来ネットワークに対し、それらをコンテンツ転送という視点から統一的に扱うことが可能な新たな光・電気融合ネットワーク基盤を提案し、拡張設計を行った上で、仕様を作成した。全光の交換処理ではなく、特定の中継ノードで光電変換を伴うトランスルーセント(半透明)な光ネットワークにおいて、転送コンテンツのサイズと各中継ノードにおける波長・メモリなどのネットワーク資源の利用状況に基づき光電変換処理及び蓄積転送処理を行うべき必要最低限の中継点を自律的に決定する制御を確立し、そのシグナリング規律を拡張設計した。シミュレーション評価により性能改善効果を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：As for future networks like optical circuit/packet/burst switching networks, new unified network infrastructure called Content Switching Network(CSN), which deal with optical/electrical switching behavior in terms of content transfer, has been proposed. CSN was specifically designed and described its behavior in the specification. In particular, this flexible paradigm shift solves an issue that translucent networks are facing concerning physical impairments (e.g. signal degradation) over long-haul transmissions: signal regeneration is expensive and it is difficult to decide where transponders should be installed. CSN allows regeneration on the fly everywhere, thanks to our proposed algorithms. Through the computer simulation made by Omnet++, it was demonstrated that the proposed CSN outperforms the conventional Optical Circuit Switching Networks.

研究分野：総合領域-情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：コンテンツベース交換網 光ネットワーク 波長分割多重 ハイブリッドネットワーク

1. 研究開始当初の背景

新世代ネットワークへの発展に向けて、全光ネットワークは超高速・大容量伝送、電力消費の問題を解決する技術として精力的に研究されている。全光ネットワークを指向した場合、特に長距離伝送では波長分散・偏波依存分散、四光波混合など、信号劣化要因が大きくなる。さらに、波長変換器・光バッファ制約、マルチファイバ環境への拡張に伴うスイッチングシステム全体の複雑性増大など、広域なネットワーク全体を全光処理で交換転送するには解決すべき問題が山積されている。これに対し、電気的な交換ノードを疎に配置したトランスルーセントな光ネットワークは上記の制約を緩和する上でも実現性の高い解の一つと言える。

一方、TCPの生みの親であるVan JacobsonがContent-Centric Networkを提唱し、UC-BerkleyのScott ShenkerらがI³やDONAを提唱するなど、キャッシング技術とコンテンツベースのネーミング技術をベースとしコンテンツの配信を効率的に行うネットワークに関する研究がにわかに活発化しはじめている。こうしたコンテンツ指向ネットワークの研究では、コンテンツ名に基づいて如何にルーチングを行い、キャッシュを効率的に配置して如何に取得時間を軽減するかに焦点が置かれており、依然として前提となる交換基盤はパケット交換である。このように、将来の基盤ネットワークとして全光パケット交換網が理想的ではあるが、上述の通りその実現に向けての課題は多い。これに対し、コンテンツ指向ネットワークとも親和性が高く、高い実現性を有するネットワーク基盤を構築可能な新たな交換原理を見出せば、光ネットワークの高速・広帯域伝送の利点とコンテンツ配信性能の面からの利点の双方を併せ持つ魅力的な技術となる。

2. 研究の目的

本研究では、将来の全光ネットワーク基盤と連携可能であるコンテンツ配信指向のフレキシブルなネットワーク基盤のあり方に関して、情報の交換・転送単位を敢えてコンテンツそのものに拡張した「コンテンツベース交換網」という新たなパラダイムを提唱し、技術的課題を抽出するとともに、有効性を定量的に明らかにすることを目的としている。本方式では、経路に沿ったシグナリングを経て適切なコンテンツ交換ノード間で、互いに独立なコンテンツ単位の蓄積・交換・転送を行う。一方、波長・メモリ資源に余裕があれ

ば、適当なノードを光レベルでカットスルーする。ノード構成法、シグナリング、コンテンツサイズや多重波長利用を考慮に入れた転送スケジューリングなどを新たに提案し性能の限界を見出す。本方式では、原理的には全光レベルのスイッチング機能を必須要件とせず、光信号劣化の補償機能を劇的に軽減できる。さらに、原理的にトランスポート層プロトコルを軽減したシンプルなアーキテクチャが実現可能となる。

3. 研究の方法

(1) 基本方式や原理の詳細化と確立

①「コンテンツベース交換方式に基づく光ネットワーク」の基本性能の評価と性能問題の抽出

- 各種パラメータの変化に対する提案方式の基本性能を定量的に明らかにする。変化させるパラメータは、波長チャネルの伝送速度（インタフェース速度）、ファイバ当りの多重波長数、リンク当りのファイバ数、コンテンツ当りのデータサイズ、印加負荷である。また、評価指標を、ノード内滞留情報量、ノード内遅延特性、End-to-End遅延特性とする。これらの基礎評価を通じて、新たな交換原理の性能面での課題を浮き彫りにする。
- シグナリングプロトコルを設計する。コンテンツ転送に先立ちシグナリングプロトコルによりメモリ確保や波長リンクの予約を行う必要がある。上記の物理資源を確保できない場合にコンテンツ交換ノードでの大容量蓄積部での蓄積を遂行する。効率的なシグナリングスキームを設計する。

② ノード構成に関する検討・基礎評価

- 並列ファイル転送が可能なノードの構成法、つまり、コンテンツ単位で並列に出力させる交換原理を明確化する。大容量の蓄積機能、もしくは超高速な一時蓄積メモリ機能を状況に応じて使い分け、コンテンツ単位での交換転送が可能なノードの構成を見出す。特に、複数蓄積メモリ配置法、並列送受信法、シグナリングに応じた処理手順について明確にする。

(2) 主要機能の確立

- コンテンツレベル転送スケジューリングの提案と評価を行う。典型的な優先制御規律に基づくコンテンツレベル転送スケジューリングを取り上げ、その有効性を明らかにする。コンテンツ交換方式に適した新たな転送スケジューリング方式を提案

し、その有効性を評価する。

- ノード内カットスルー方式の適用に関する有効性を評価する。波長・バッファメモリといった物理資源の利用状況に応じて Cut Through 方式を適用した場合の処理方法について詳細検討を行い、その有効性を定量的に明らかにする。
- 並列転送とコンテンツ分割の連携手法の提案と評価を行う。コンテンツサイズが大きすぎる場合には、必要最低限のサブコンテンツに分割し、隣接ノード間で複数の波長を一括使用して並行転送を行う方式の詳細を設計し、シミュレーション評価を通じてその有効性を明らかにする。

(3) 拡張機能の確立

- 高性能を実現する総合的な提案方式を確立する。各基本提案方式を総合化し、最終形としての提案方式を確立し、総合的な性能を計算機シミュレーションにより明らかにすることにより、その実現可能性、他方式に対する優位性についての最終評価を行う。
- 提案方式を実装したノードが部分的に普及された段階に適用可能な具体的な方式の改良と有効性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) コンテンツベース交換網のネットワーク設計

① 構成要素

コンテンツベース交換網(CSN)は、ユーザ、アクセスノード、コアノードの3つの構成要素からなる(図1)。

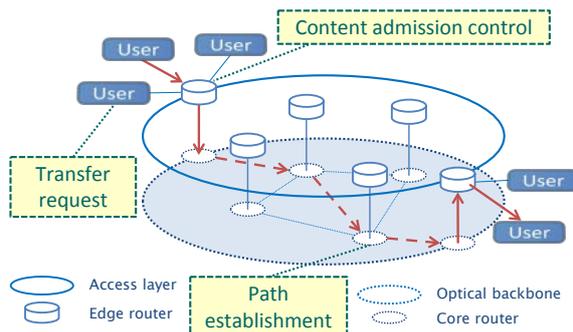


図1 コンテンツベース交換網の概要

各コアノードにおいて次の3種類の交換パラダイムが利用可能であり、網資源の利用状況に応じて適応的に適用される。

- 光バイパス(OB)

光バイパスは、光スイッチを用いることで利用可能である。コンテンツは、同一の波長を用いて転送される。

- 電気バイパス(EB)

電気バイパスは、電気スイッチを用いることで利用可能である。コンテンツは、波長変換を行うためOEO変換されるが、バッファリングは回避される。電気バイパスはパスを拡張したり、光信号の物理的劣化に対処するため(信号の再生成)に利用される。

- Store-and-forwarding (S&F)

到着したコンテンツをパスが拡張されるまでの間バッファリングするために中継ノードで利用される。電気スイッチはパスの下流側のリンクへコンテンツを送信する必要がある。

(2) シグナリング

① 4つのフェーズ

CSN シグナリングはTwo-way シグナリングに基づいている。光パスを予約するために制御メッセージがソースから伝送され、コンテンツ伝送の前にスイッチを設定する。パスが一度生成されるとコンテンツは内部を検査されることなく一括して転送される。セキュリティの確保は、ユーザが原則アプリケーションレイヤで対応することを前提としている。制御メッセージは、経由してきた経路の各リンクにおける利用可能波長および予約済の波長とファイバに関する情報、さらには転送ID、コンテンツサイズ、送受信ノードアドレスを伝達する役割をもつ。さらに、QoS 制御のための情報等を追加的に伝達することも可能である。ソースノードは、波長パスの予約に長時間を要する場合等にコンテンツ転送を中止するためのタイムアウト時間を設定できる。Two-way シグナリングを基にしたCSNシグナリングは4つのフェーズで構成されている。各フェーズの詳細は次のとおりである。

a. 情報収集

このフェーズの間では、制御メッセージが宛先ノードに向けて送信される。その途中の各ノードで資源の可用性が確認され、データが収集される。

b. 資源予約

情報収集フェーズが終了すると、制御メッセージがソースノードの方向へ返送される。途中のノードに到着する度に、先に収集されたデータを基に資源の予約と、指定された交換パラダイムに基づくスイッチの設定が行われる。

c. コンテンツ転送

パスが確立された場合、直ちにコンテンツの転送が開始される。

d. 資源解放

コンテンツ転送が終了し次第、パスの解放のためにソースノードから制御メッセージが送信される。

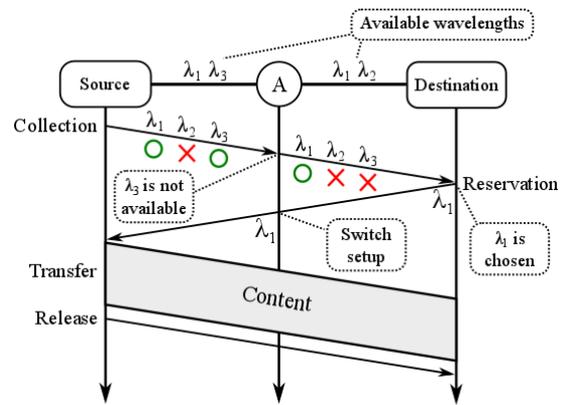
交換パラダイムの選択は事前には行われず、情報収集フェーズの直後に行われる。これにより適正な交換パラダイムを選択することが容易となる。この動作は、パラダイムの選択（回線交換とパケット交換の選択）がシグナリングの前に予め確定している他の一般的なハイブリッドネットワークと、本研究で提案するCSNとで異なっている重要な点である。

②コンテンツの状態

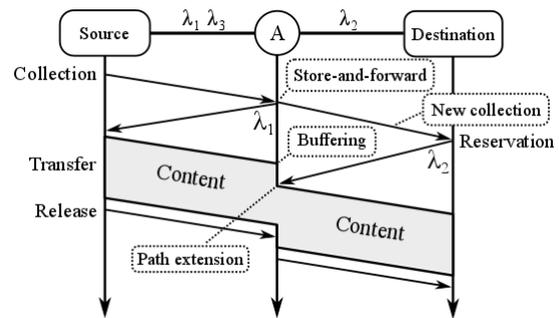
コンテンツの棄却を避けるため、メモリ資源がパス確立中に予約される。例えば、もしコンテンツサイズが1MiBならば、1MiBのメモリが事前に予約される。S&Fが考慮されていないOCSにおいては、経路長が長くなれば、波長資源の枯渇によりEnd-to-Endパスが無事に設定される確率は小さくなる。巨大なコンテンツ（例えば1TiB）の転送はメモリ資源が確保できず蓄積交換ができないため、CSNにおいては特別な取扱いが必要不可欠となる。本研究では、この問題に対し、smallとlargeの2種類のコンテンツ状態を規定することにより解決を図っている。コンテンツ状態はCSNシグナリングの情報収集フェーズの期間中、動的に決定される。基本的にEnd-to-Endのパスは全ての空き資源を用いて確立されるが、largeコンテンツのために特定の専用波長資源が用意されている。情報収集フェーズが開始される時、コンテンツ状態はunknownに設定される。制御メッセージがノードに到着する度に、コンテンツのバッファリングが可能か否かを知るためにメモリ資源がチェックされる。もしバッファに格納可能ならば、コンテンツ状態はsmallに更新される。もし可用波長の不連続が検知されたならば、状態はlargeに更新される。それ以外ならば、状態はunknownのまま維持される。情報収集フェーズの終わりでも状態が未だにunknownであったならば、パス上の任意のノードでS&Fが不可能であることから、自動的にlargeに設定される。シグナリングでは、できる限り各ノードでOBの実行を目指す。資源の不足（例えば、出力波長の空きがなかったり、可用波長の不連続が発生するなど）が検知されたとき、シグナリングはコンテンツの状態に応じて以下の通り異なる動作を指示する。

③パラダイム選択

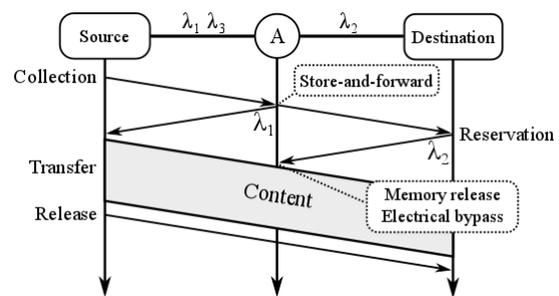
資源予約フェーズの間、制御メッセージはどの波長がパスに沿って利用可能かの情報を搬送する。実際、可用波長の不連続が発生したノードと関連する波長情報のみを記憶しておく。メッセージが中間ノードに到着する度



(a) Optical bypassing



(b) Store-and-forwarding (S&F)



(c) Shift from S&F to electrical bypassing

図2 CSNにおけるパラダイム選択の事例

にそのノードがどのパラダイムを適用するかを決定する。もし入出力波長が同一である場合はOBが選択される。入出力波長が異なる場合はEBが選択される。もしメッセージが代替S&F予約のためのものならば、S&Fが選択される。実際、選択は簡易であり、できる限り後段で確定される。制御メッセージが中間ノードに到着した際に特定の資源が使用不可能であるために所期の予約が完遂できないならば、そのリクエストは棄却される。S&Fの場合、中間ノードはソースアクセスノードのように振る舞い、パス設定要求の管理を行う。もし後続パスの予約が、当該中継ノードまで設定された光パスを通して転送されてきたコンテンツが到着するよりも先に完了したならば、この中間送信元ノードはメモリ資源を解放し、簡素なOBもしくはEBノードとして動作することとなる。図2(a)、図2(b)、図2(c)はシグ

ナリングの異なるケースを例示している。簡単のため、1つの中間ノードのみが示されている。ソースと中間ノードAとの間、ノードAとデスティネーションとの間の各ノードは3つの提案された交換パラダイムのいずれも選択可能である。

④ ノードの内部構成

アクセスノードはユーザから送信されたコンテンツ転送要求に対するフロー制御を行う。アクセスノードと同様に、store-and-forwarding に関して、コアノードはコンテンツ転送要求に対する管理機能を実装している。

(2) 性能評価

①シミュレーションモデル

提案したネットワークを評価するため、OMNeT++ 4.3 を用いて計算機シミュレータを構築し、OCS とCSN における拒否率をそれぞれ測定した。通常のCSN はbacklogged queue を有するため、CSN とOCS を比較するだけでは、コンテンツ交換パラダイムのみの違いによる性能比較はできない。そこで、通常のCSN (CSN With) に加えてbacklogged queue をもたないCSN (CSN Without) に関する評価も行った。なお、CSN はOPS のようなパケット交換方式と比較して、シグナリングにより光パスを予約するという動作を行う点が異なるため、両者の直接的な比較は困難である。そのため、本性能評価において、CSN の比較対象はOCS とする。

各転送経路長 (1 - 6 ホップ) における性能を評価するにあたり、ヨーロッパの16都市が光ネットワークで相互されたトポロジであるCOST 266 Core topologyを使用した。このトポロジでは、任意の隣接ノード間に1本あたり5波長が利用可能な4本の入力ファイバと4本の出力ファイバが接続されている。エンドユーザがノードに直接接続されていると仮定し、1波長あたりの伝送速度は1Gbpsに制限した。各ノードにおいて、イングレスラインカードには単一のDDR3 SDRAM PC3-15000 DDR3-1866 デバイスに対応する伝送速度120Gbps、容量2GiBのRAMメモリが含まれている。制御メッセージのサイズは1KiBに固定した。ノード毎に指数分布に従ってトラヒックが発生し、宛先は他の全ノードから一様に選択される。End-to-Endの経路はホップ数が最小になるものを選択することとした。シミュレーション時間は120秒とし、10回の測定値を平均した値を結果としている。コンテンツサイズは対数正規分布 (平均=1, 分散=0.7) を用いて生成した値に1MiBを乗じたものとした。

②数値結果

図3は、各方式における、各経路長に対する発生したコンテンツ転送要求の拒否率 (失敗率) を示している。OCSと比較して、CSNでは異なるホップ数間で拒否率の差が小さいことがわかる。これはCSNの交換パラダイムが経路長に関してOCSよりも高い公平性を有していることを示している。このような特性は特に大規模なネットワークにおいて非常に有効である。OCSの拒否率はCSNより平均的にやや大きいことがわかる。例えば、コンテンツ発生間隔が4msの場合において、backlogged queueを有するCSNでは観測できないほど拒否率が小さく、backlogged queueを有さないCSNでも0.01%程度の拒否率である。この両者の比較より、backlogged queueの利用により、劇的に拒否率を減少させることがわかる。これに対し、OCSでは、拒否率は0.01%から1%を少し下回る範囲に広く分布しており、ホップ数の違いにより性能が大きく変化することがわかる。特に、backlogged queue付きのCSNに対するOCSとの性能差は顕著である。

CSN With とCSN Without を比較した場合、CSN Withの方が小さいホップ数の伝送、特に1ホップ伝送について受信成功率、拒否率ともに性能が良いことがわかる。1ホップ伝送は中継ノードを介さずソースとデスティネーション間に光パスが設定できれば成功するため、特にトラヒック量が多い環境においてより大きなホップ数をもつ伝送より伝送成功する可能性が高く、送信試行を繰り返せば成功率はさらに高まる。そのため、backlogged queueをもつCSN Withにおいて、拒否率が大きく改善される。一方、1ホップ伝送の伝送頻度が増加することで、より大きなホップ数をもつ伝送の頻度は低下する。これにより、ホップ数が大きい伝送については、相対的にCSN Withoutの方がCSN Withより拒否率を改善でき、コンテンツ発生間隔が1から3msの場合においてその傾向が確認できる。

次に、CSN Withoutの方がCSN Withより異なるホップ間での性能差が小さく、異なるホップ間での公平性が高いことがわかる。これは上で述べたCSN Withにおける1ホップ伝送の性能が他ホップ伝送より高いことに起因するものである。

また、CSN Withoutでは、コンテンツ発生間隔の増加に伴い、5ホップ伝送のみ他の伝送より拒否率が急激に減少している。5ホップ伝送はネットワークの端に位置する中継ノードを経由するため、ネットワークの中心付近のノードを経由する経路と比較して、輻輳

しているノードを経由する可能性が相対的に小さい。さらに、CSN Without はbacklogged queue を用いないため、CSN With と比較して上述の1 ホップ伝送の頻度が増加することで多ホップ伝送が影響を受ける可能性も低い。よって、CSN Without においてのみ、5 ホップ伝送の拒否率減少が確認できる。

以上より、OCSに対するCSNの優位性が定量的に示された。特に、CSNは大規模なアプリケーションに適していると言える。

紙面の都合上グラフは割愛するが、本研究では、さらに提案ネットワークの普及問題に焦点を当て、現状の光回線交換網に対し、提案アーキテクチャに従う新規ノードを部分導入した場合の性能を接続要求に対する失敗率の面から定量的に明らかにした。具体的には、適切な負荷領域で60%の新規ノード普及率の場合、導入しない場合に比べて1/10の接続失敗率、100%普及率の場合には、1/100の失敗率を達成することを明らかにした。

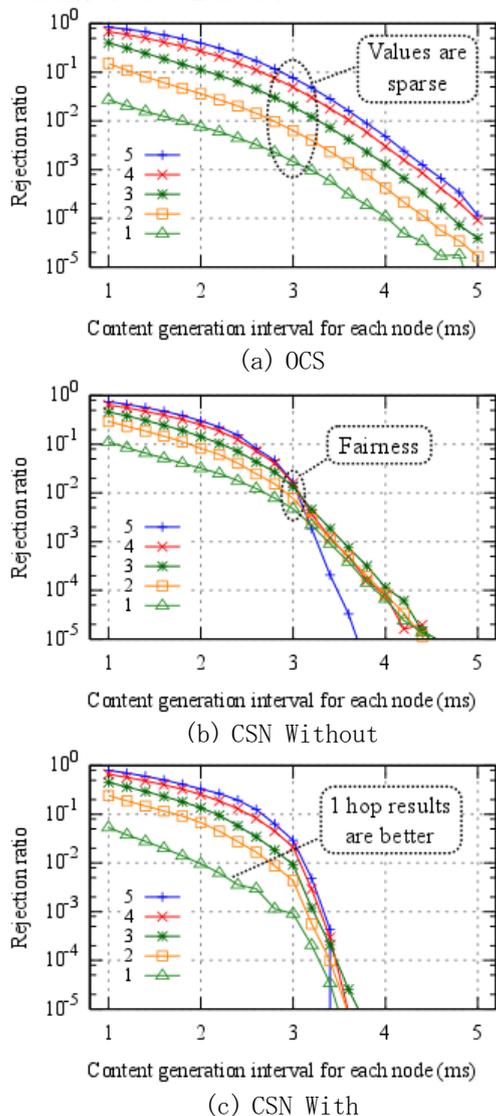


図3 OCSとCSN (backlogged queue有無の両ケース) との性能比較結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① ミシヤル クリstoff, 谷川陽祐, 戸出英樹, “コンテンツベース交換網: 電気的中継処理を抑制する柔軟なトランスルーセント光ネットワークの構成法,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J97-B, No.2, pp.86-98, Feb. 2014. 査読有。
- ② C. Michard, Y. Tanigawa, and H. Tode, “Deployment of the Content-based Switching Network,” Communications and Network, Scientific Research Publishing, vol.6, no.1, pp.29-42, Feb. 2014. 査読有。
- ③ H. Tode, M. Takada, and Y. Tanigawa, “Multi-tiers Route Design Coordinating QoS-specific K Shortest Paths over Optical Network,” Proceedings of *IEEE ICC 2015*, Workshop on Smart Communication Protocols and Algorithms, 6pages, London, UK, June 2015 (Accepted). 査読有。

[学会発表] (計 11 件)

- ① C. Michard, Y. Tanigawa, and H. Tode, “Content-based Switching Network: Enabling Intermediate Buffering in Circuit-switched Networking to Improve Networks Global Efficiency,” Proceedings of World Telecommunications Congress 2012 (*WTC 2012*), Poster Session, PS-12, 6pages, Miyazaki, Japan, Mar. 2012. 査読有。
- ② H. Tode, “Data Distribution Platforms over Optical Networks,” Proc. of *OECC 2011*, Workshop I: What photonic technology will play the leading role in the upcoming cloud era?, II-3, Kaohsiung, Taiwan, July 2011(Invited). 査読無。
- ③ C. Michard, Y. Tanigawa, and H. Tode, “Content-based Switching Network. An Architecture for Future Networks,” Proc. of *OECC 2011*, Poster Session, 7P3-118, pp.761-762, Kaohsiung, Taiwan, July 2011. 査読有。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸出 英樹 (TODE, Hideki)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20243181

(2) 研究分担者

谷川 陽祐 (TANIGAWA, Yosuke)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：90548497