

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300027

研究課題名(和文) 光ネットワーク制御を用いた進化型高速情報転送基盤の研究

研究課題名(英文) Research on Evolutionary and High-Speed Information Transfer Platform Using Optical Network

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) 13,600,000円、(間接経費) 4,080,000円

研究成果の概要(和文)：IP-光統合網において、IPレベル網の規模を動的に変更可能なアメーバ網アーキテクチャを提案した。相互に離れて配置された複数の光クロスコネクタ/IPノードを結合することで仮想ノード機能を柔軟に構築し、規模の縮退並びに網負荷分散を実現する。アメーバノードの総数や内部メンバー選択に加え、アメーバノード内・間の光リンクをも同時に設計する手法を遺伝的アルゴリズムをベースとして新たに提案し、その有効性を多面的な計算機シミュレーション実験により実証した。

研究成果の概要(英文)：In future IP-layer/Optical-layer integrated network, two-layer optical network architecture that can change IP-level network scale dynamically, was proposed by making virtual node function composed of several distantly positioned optical cross-connect nodes, named "Ameba Node". Two-layer optimization method based on Genetic Algorithm was newly proposed to locate optical paths configuring such networks, and verified its effectiveness through extensive computer simulations.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワークアーキテクチャ 光ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

光ネットワークの実現に向けた研究は、NICTの「アクセス・ユーティリティプロジェクト」、ユニバーサルリンクプロジェクトをはじめとする研究プロジェクトなど、将来の日本の基軸となる技術として総務省主導により着実に進展しつつある。現状では、光バッファや光演算・制御系など光デバイス・回路系のブレークスルーを必要としている段階ではあるが、デバイス制約を考慮に入れつつ、交換方式、スイッチ構成、RWA(Routing and Wavelength Assignment)、GMPLS に代表される制御プロトコルなど、日本は世界の先頭に立って積極的な研究を展開している。

しかし、コンテンツを流通させるための情報基盤としては、未だ光ネットワークを十分には使い切れていない。実際、光パスをデマンドに応じて設定するといったアプローチにとどまっており、アプリケーションと密接に連動した研究としては光グリッドなどが挙げられるものの、極めて限定的である。

一方、コンテンツ配信技術に関しては、IP 放送サービスを含め、CDN(Content Distribution Network)やP2P(Peer-to-Peer)ベースのコンテンツ配信ネットワークに関する研究など、IP ネットワーク基盤を中心に活発に研究されている。しかし、インターネット関連研究の視点からも、光ネットワークの特徴を積極的に活用し有機的に結合させることを指向したコンテンツ配信基盤を研究開発している事例は未だ見当たらない。

このような現状に対し、光ネットワークの要素技術の進歩を待つのではなく、ネットワーク層以上の上位レイヤ、特にアプリケーション層も含めて光ネットワークをより現実的に利用する枠組みを確立する必要がある。さらに、シンプルな光ネットワークを効率的に動作させるための自律分散的な枠組みとして、GAなどの進化計算を利用した柔軟な制御系を取り入れることが望ましい。

上記の背景の下、本研究では、光 WDM ネットワークをより高度に利用した総合的なネットワークシステムの構築を目指している。

2. 研究の目的

(1) 光 NW 基盤とオーバーレイルーチング制御系との連携

本研究では、多数のノードから構成されるネットワークトポロジに対し、多段な経路ではなく、少数段数の IP レベル経路を設定するため、光ネットワーク基盤とリンクした総合的経路選択制御を実現することを目的とし、地理的に分散した複数の光ノードを光パスで結合し、当該光ノード集合に対し IP ネットワーク層では1つのノードの機能をもたせる。つまり、物理層からみるとアメーバ状にノード集合が構成され、これが相互に密接に結合して、NW 層のトポロジとしては非常にシンプルな仮想論理構造を構築する。このよ

うなアメーバノードの構成法や結合パターン決定法を明らかにし、IP 統合網のための情報転送基盤の実現法を確立する。

また、本課題に対し、基本的な方式は構築可能であるが、基本提案アルゴリズムをより自律分散的かつ高度に進化させるための枠組みを検討する。具体的には、提案アルゴリズムを設計する上で GA (Genetic Algorithm) をベースとする進化型計算を利用して制御システム系に自己成長能力を具備させ、状況に応じた知的な制御動作を実現するための制御機構を明らかにする。

(2) 光ネットワーク(NW)基盤とコンテンツ配信基盤との連携

光 NW ベースコンテンツ配信基盤として、P2P/CDN のオリジンやピアノード間の動的な光ネットワークパス設計を密結合した配信メカニズムを確立する。具体的には、ピアノードの負荷を動的に判定して光パスの設定解放を行う。また、高性能で優先度の高いピアを同定して当該ピアに対するパス設定を強化する。さらには、ピアを能力や状況に応じてグループ化し、当該グループ間のパス設定をより広帯域に密結合化し、Seeder ノードを増加させることにより配信性能の向上を図る。

3. 研究の方法

(1) 波長パス設定に基づくアメーバノードを相互に結合した超密結合型光/IP ネットワーク基盤の構成技術と進化型自律分散ネットワーク制御アルゴリズムの確立

光 WDM ネットワークと IP 処理などネットワーク層以上のより高密度な連携により、ネットワークのトポロジ形態自体を自在に変更する新世代ネットワーク基盤の確立を目指し、以下の設計を行う。

- アメーバノードを構成するハブノードの決定規律
- アメーバノード数の決定法
- アメーバノードのメンバ数の決定法
- アメーバ内メンバノードの接続先決定規律

上記の項目を具体化するに当たり、まず最適な形態を構築するための「目的関数」を明確に規定する。負荷分散を図りつつ、総パスのネットワークレベルの中継数や光レベルの中継数の平均値最小化、同指標の分散値の最小化を総合的に判断しつつ、適切な解を発見する手法を確立する。

自律分散的に動作し、状況に応じて学習を繰り返し進化する性質を有するネットワーク制御機構の確立を目指し、進化計算の一種である Genetic Algorithm をベースとした進化型制御機構を構築し、光/IP ネットワーク基盤を構築するための適用を目指す。特徴ある制御系を確立するために、以下の項目を詳細に設計する。

- 進化型アルゴリズムの継続的な計算
初期化入力・計算・結果出力のプロセスを

明確に区分するのではなく、運用中の状況の変化を入力パラメータの変化と捉え、継続的に解を更新するシステムとする。

- 解変更の頻度抑制
過度に敏感な解の変更は制御の複雑さ、動作コスト増加につながる。そのため、ネットワーク制御のトリガ頻度を抑制するとともに、同様の解候補が複数存在する場合には、解変更の差分が少ないものを優先する。
- 進化型計算における目的関数、ならびに各種計算用パラメータの最適化
進化型計算の過程で目的関数の選択は極めて重要であり、制御の有効性を大きく左右する。各制御対象に適した目的関数を選別するとともに、アルゴリズムパラメータを適切に設定する。

(2) P2P/CDN コンテンツ配信機能と光 WDM ネットワーク制御との効率的な連携機構の確立

CDN のオリジンサーバと P2P のピア相互間の情報配信スケジューリング規律を確立する。ベースは汎用性の高い BitTorrent 型を想定する。ピースのアップロード、ダウンロードに伴う Choke/Unchoke 戦略を変更することにより、各ピアノードの受信状況に応じた効率的な配信制御を実現する。特に、従来の戦略に加え、光ネットワーク基盤の特徴を活かして Seeder ノードに近い特性をもつピアに対して、光 WDM パスを効果的に設定する戦略を新たに導入する。光波長 WDM パスをピア相互間、CDN オリジン・ピア間に設定するにあたり、以下の項目を具体的に設計する。

- 設定タイミング
コンテンツ配信の受信状況を考慮に入れて、適切に光 WDM パスの設定要求を発行する。
- 設定相手の選択法
光 WDM パスを設定する際の相手先に関して、光 WDM パスの接続状況が良好なピアを選択することが情報転送容量の増大を反映することになるため、パートナー集合の中でもより多くの割合のコンテンツを保持しているピアを選択することに加えて、光 WDM パスの設定情報も積極的に利用する。
- パス設定形態
オリジン・ピア相互間の光 WDM 設定形態を 1 対 1 に限定する必要はなく、マルチキャスト型の光 WDM パスを積極的に利用する。特に、従来の IP 網上のマルチキャストとは異なり、光 WDM パスは分岐処理に関する親和性が高く、光レベルで多地点への送信が可能になる。
- 選択数の調整法
実効帯域やコンテンツ取得状況の観点からピアをグループ化し、そのグループに対して光パス設定本数に対する差別化を図る。上記のマルチキャスト光 WDM パス設定とも関連が深い。本手法では、ピアの能力を細分化し、パートナー選択レベルでグループ間連携の強化を図る。これにより、無駄のない相互配信基盤を構築する。

4. 研究成果

(1) 波長パス設定に基づくアミーバノードを相互に結合した超密結合型光/IP ネットワーク基盤の構成技術と進化型自律分散ネットワーク制御アルゴリズムの確立

アミーバノード

アミーバノードとは、光ネットワーク基盤を前提とし、地理的に分散したノード集合を波長パスで結合し、連携させることにより IP レベルで 1 つの仮想ノードを構成したものである。アミーバノードを構成するノードをアミーバノードの「サブノード」と呼ぶ。サブノード間を結ぶ波長パスの中継ノードでは光クロスコネクタ (OXC) を用いた光スイッチングにより、ネットワーク層におけるパケット処理を介在させることなく高速に交換処理を行う。ネットワーク層では、複数のサブノードからなるアミーバノードを 1 つのルータと見なし、当該アミーバノードに新たなアドレスを割り振ることで、仮想ノードの機能を実現する。「(アミーバノード内)サブノード間を結ぶ波長パス」と、「アミーバノード間を結ぶ波長パス」は両方共に、共通の光ネットワーク基盤を利用して作られているため、性質による違いはない。このように、アミーバノードを構成要素にもつアミーバネットワークでは、共通の光ネットワーク基盤を利用し、波長パスを動的に変更することで、ネットワークのリンクやノード構成などといった論理トポロジを目的に合わせて自由に変更する (図1)。既存の光ネットワークでは波長パスをノードとノードを結ぶための外部リンクとしてしか利用していなかったが、アミーバノードによるアプローチでは波長パスをサブノード間の内部リンクとしても利用できる。これにより、光伝達層と上位層のより柔軟な階層化構造を作ることができる。

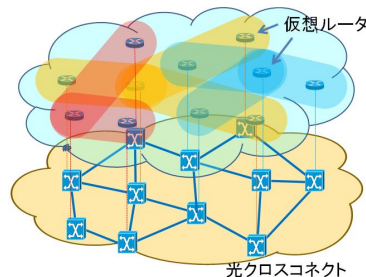


図1 アミーバネットワーク

アミーバネットワークの利点として、複数のノードを 1 つのアミーバノードとして扱うため、図2 のように IP ネットワークの規模が縮退する。つまり、IP レベルでの処理の低減や、ルーティングアルゴリズムの簡素化などが可能となる。また、動的に波長パスを変更することで、ネットワークトポロジを通信量に合わせて最適な形に変えていくことができる。例えば、通信量の多いエリアを 1 つのアミーバノードの内部に閉じ込めることで、ネットワーク全体の IP 処理の低減を図ることができる。さらにアミーバノードでは、地理的に離

れた場所にあるノード同士でさえも、波長パスで接続すれば同じアメーバノードとして扱われるため、元々のネットワークトポロジに依存しないという特徴をもつ。

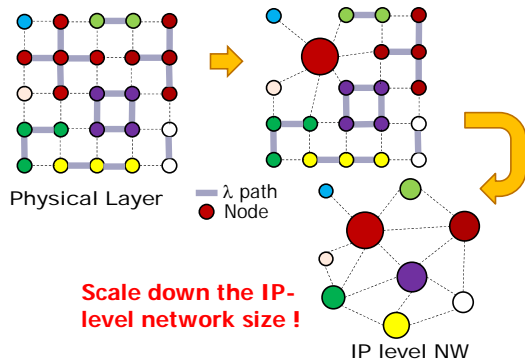


図2 アメーバノードの構成例

提案方式

a. 方針

アメーバノードを構成するにあたって最適化するべき項目を以下に示す。

- アメーバノード配置 (アメーバノードにするノードの組み合わせ) の決定
- アメーバノード内の波長パス配置 (サブノード間を結ぶ波長パス配置) の決定
- アメーバノード間の波長パス配置の決定

本提案方式では、上記3つの最適化を同時に行う。最適化にはGAを使用し、個体表現方法、突然変異アルゴリズム、目的関数等を詳細設計したが、特に重要な個体表現方法について以下に記述する。

b. 個体表現方法 (コーディング)

本アルゴリズムの個体表現方法では、ある2つのノード間において、 K 個ある経路 (K -Shortest Paths) の中から、どの経路を選ぶべきかを1~ K の自然数により表現している (図3)。図3の1番左の遺伝子座では、ノードIとノードII間を、経路IDが1となっている経路を通り、波長パスが接続されていることを意味している。また、経路IDの値が0となっているのは、そのノード間では波長パスが存在しないことを意味する。

ノードペア	I-II	I-III	I-IV	I-V	...	II-III	II-IV	II-V	...
経路ID	1	0	0	3		0	0	2	

図3 個体表現方法 (コーディング)

経路IDは、GA計算を行うよりも先に予め決めておく必要がある。具体的には、ノードのペア毎に K -Shortest Pathsアルゴリズムを適用し、算出された K 個のパスそれぞれに経路IDを割り振っておく。例えば、図4のようなネットワークを考えた場合 (それぞれのノードの直下に光クロスコネク機能が設置されている)、ノードIからノードIIへは3つの最短経路パスが存在する。3つの経路、「I-IV-III-V-II」、「I-IV-VI-V-II」、「I-IV-VII-II」のそれぞれに1, 2, 3とIDを割り振った場合、

それが経路IDとなる。そのため、図4のネットワークトポロジで図3の1番左の遺伝子座の波長パス配置を考えた場合、ノードIとノードII間で経路ID1が選択されているため、波長パスが「I-IV-III-V-II」のルートを通って接続されていることになる。また、こうして波長パスが接続されているノード同士を1つの同じアメーバノードとして扱う。つまり、ノードIとノードIIは同じアメーバノードとなる。これにより、波長パスの配置だけでなく、アメーバノード配置の組み合わせも染色体で表現されている。

上記の個体表現方法でGA計算を行った場合、最終的に最適な「アメーバノード配置」、「(アメーバノード内)サブノード間の波長パス配置」の決定は可能であるが、その一方、「アメーバノード間を結ぶ波長パス配置」の最適化は不可能である。そこで、上記の個体表現方法をさらに拡張する。

ノード間に設定する波長パスが「サブノード間を結ぶ波長パス」か、「アメーバノード間を結ぶ波長パス」かを区別する必要がある。そのため、経路IDの値域をマイナスまで拡張し、プラスの値ならば「サブノード間を結ぶ波長パス」として、マイナスの値ならば「アメーバノード間を結ぶ波長パス」として扱う。この時、遺伝子の値の絶対値を取ったものと経路IDを対応させる。例えば、図5では、遺伝子座の左から4番目の値が-3となっている。これは、ノードIとノードII間を経路IDが3の経路 (-3の絶対値) を通り、波長パスが接続されていることを意味している。図3と同じ経路を通り、波長パスが接続されているが、遺伝子の値がマイナスであるため、「アメーバノード間を結ぶ波長パス」となる。

以上の個体表現方法により、最初に挙げた3つの目標項目の最適化が可能となる。

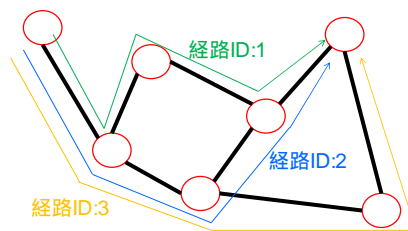


図4 例となるネットワークトポロジ

ノードペア	I-II	I-III	I-IV	I-V	...	II-III	II-IV	II-V	...
経路ID	1	0	0	-3		0	0	2	

図5 拡張された個体表現方法

性能評価

a. シミュレーション条件

ネットワーク内の各ノードの性能は均一であり、全てのノードには波長パスを設定する光スイッチが実装されているものとする。アメーバノード内部におけるサブノード同士のIPレベルでのホップ数は0として扱う (仮想

的に同一ノードとなるため)。また、静的なトラフィック環境を想定しているため、シミュレーション途中でトラフィックが変化することはないものとする。

ネットワーク条件は以下の通りである。ネットワークモデル：10 × 10 の格子モデル、1つのリンクで転送できるトラフィック量：100000、トラフィックデマンド：各ノード間で1 ~ 100 でランダム（シミュレーション中には変化しない）、1つのアムバノード内の最大サブノード数：5、波長パスが接続可能なノード：各ノードは自分から近い順に10 個のノードとしか波長パスで接続することができない、アムバノード内の波長パス配置：先行方式ではアムバノード内部のサブノード間はフルメッシュ接続、提案方式では計算により最適化された波長パス配置。

また、遺伝的アルゴリズムの条件は以下のとおりである。各世代での個体数（遺伝子数）：100、次世代個体の選択方法：トーナメント選択、トーナメントサイズ：2、突然変異確率：0.8%、交叉方法：一様交叉、終了条件：1000 世代経過後に終了。

b. 数値結果

図6 にネットワーク上で使用可能な光波長パス資源を順次増加させていった場合の、全対地間のIP レベル経路の平均ホップ数を示す。ここで、Normal IP Network は元々の格子トポロジの各ノードにIP ルータが設置された場合の結果を示している（元々の10 × 10 格子モデルを構成するのに波長パスが180本必要）。また、Virtual Link Design (GA) はアムバノードという概念を使用せずにノード間にカッツルーのための仮想光リンクのみを設計する従来方式による最適化結果を示している。つまり、光資源を使い、IP レベル平均ホップ数が最小になるように、ノード間リンク（厳密には仮想光パス）配置をGA 計算により最適化している。グラフより、アムバノードの概念を導入している本研究初期の先行方式（Previous method）、最終の提案方式（Proposed method）の方が他の方式よりもIP レベル平均ホップ数を低減可能であることがわかる。また、IP レベル平均ホップ数の値は先行方式よりも提案方式の方が低く、ネットワークスケールを効率よく縮退している。設定可能な波長パス数が増えるにつれて、提案方式のIP レベル平均ホップ数の削減効果がより顕著になっている。これは、提案方式がアムバノード内/間の波長パス構成を自由に変化させることができるため、設定可能な波長パスが増えるにつれて、先行方式よりも柔軟な構造がとれるからである。

表1 は使用可能な波長パス数が340本の時の提案方式と先行方式の特徴量を比べたものである。表1から、提案方式の方が先行方式よりもIP 処理の回数が少なく、約28%も削減されることがわかる(551,666 397,936)。また、提案方式の方がノード数（アムバノードを含む）とリンク数（アムバノード間波

長パス数）が少ないことから、平均サブノード数が大きいアムバノードで構成されたネットワークを構築していることがわかる。提案方式では、アムバノード内/間の波長パス構成に関する最適化が可能であるため、先行方式では不必要に張られていた波長パスが提案方式においては排除され、その分の資源がアムバノードを構成するための波長パスへと回される。また、先行方式では、アムバノード内部の波長パス構成は必ずフルメッシュであるため、大きいサイズのアムバノードが作りやすく、無駄な波長パスも多くなる。これらの理由から、提案方式では、先行方式に比べてサブノード数が大きく、リンクとノードの少ない、効率よく縮退されたアムバノードネットワークが構成されている。

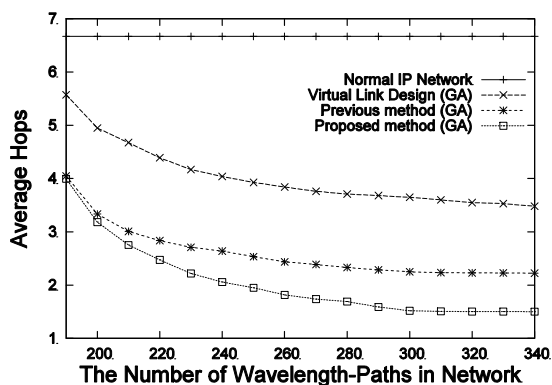


図6 先行方式と提案方式の平均ホップ数比較

	ノード数	リンク数	平均次数	平均サブノード数	IP 処理数
通常 IP 網	100	180	3.6	0	1,650,769
仮想リンク設計法	100	340	6.8	0	855,473
先行方式	33	97	5.879	3.030	551,666
提案方式	22	62	5.637	4.545	397,936

表1 先行方式と提案方式の特徴量比較

(2) P2P/CDN コンテンツ配信機能と光 WDN ネットワーク制御との効率的な連携機構

提案方式 BitTorrent over Optical Network (BT-ON)

a. BT-ONの概要

BT-ONは、OCS 網上での動作を前提とした BitTorrent である。通常の IP 網を想定した BitTorrent との差異は以下の通りである。

- 光パスに適応したデータ転送能力の向上を図るため、データの交換単位であるピースのサイズを拡張し、光パス毎の同時並行ダウンロードを導入する
- 頻繁な波長パス張替えを抑制するため、一度設定した波長パスに対して短時間での張替えを許可しないデータ保持割合が大きなピアに対して優先的にダウンロード用波長の割当てを行う
- データ保持割合が大きなピアからのアップロード波長要求を優先して受諾する
- グループ化によってデータ保持割合が大きなピア、“擬似シード”の作成を促す

b. BT-ON の波長パス設定手法

BT-ON では、Choking の動作を利用した波長パス設定を行っている。具体的には、送信側のピアが一定周期ごとに自ピアの波長スロットの空きを確かめる。もし空きがあれば、Unchoke しているピアの中から、ピア選択規律に基づいて選択されたピアに対して波長割当て要求を行う。受信側のピアは、ダウンロード用波長スロットの状況や、波長要求受諾規律に基づき、要求が受け入れ可能か否かを判断する。受け入れ可能であれば、波長コネクションを確立し、データの送受信を開始する。設定された波長パスは一定時間維持された後、再び割当て処理が行われる。ただし、受信側ピアは、ダウンロード用波長がすべて使用中であっても、送信側から新たな波長要求を受けた際、最低波長割当て時間を超えたコネクションがあれば、波長受諾規律に基づいて選ばれた波長パスを開放し、要求ピアに対して波長パスを張り替えることができる。

性能評価

Origin 数を1, Leecher数を60とし, Flash Crowd 到着を仮定する。Leecher はコンテンツ取得完了後, 10 秒間Seeder として機能してネットワークから離脱する。また, OCS 環境で用いるパラメータとしては, 1 波長あたりの帯域を10Gbps, 1ピアあたりの波長数を8(上り4, 下り4), コントロールプレーンの帯域を1Gbps, 波長パス割当て時間 T_a を5s, 最低波長割当て時間 T_{min} を2.5s, 再割当て周期 T_r を $1s \pm 0.5s$ の一様分布としている。

通常のBitTorrent(NORMAL)とOCSネットワーク環境におけるBT-ONを比較した結果を図7に示す。ここでは, 全ピアが上下それぞれ(4Mbps, 4Gbps, 40Gbps)のリンク帯域をもつものとし, コンテンツサイズを1GB, ピースサイズを256KB, ブロックサイズを16KBとする。BT-ONは40Gのリンク帯域を有するNORMALと比較しても1/2以下の性能改善効果が得られている。また, 紙面の都合上, 結果は割愛するが, ブロックとピースサイズの調整により, 1500秒の取得時間が50秒程度まで低減できることを実証している(1/30に低減)。

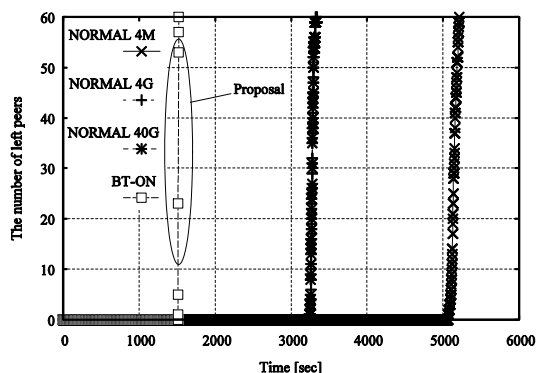


図7 OCS 網と IP 網における BitTorrent のコンテンツ取得性能の比較

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計8件)

ミシャル クリストフ, 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。

元橋智紀, 藤本章宏, 廣田悠介, 戸出英樹, 村上孝三, “多様な配信木により離脱耐性と遅延抑制を向上させる重畳クラスタ木型動画配信システム,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J97-B, No.2, pp.132-142, Feb. 2014. 査読有。

Yohei Okamoto, Y. Tanigawa, H. Tode, “High-Quality P2P Video Streaming System Considering the Cooperation of Constitution Information and Delivery Status,” *IEICE Trans. Commun. Special Section on New Paradigm on Content Distribution and Sharing*, vol.EB94-B, no.10, pp.2732-2740, Oct. 2011. 査読有。

(学会発表)(計47件)

小浜守太, 戸出英樹, “ノード内光パス構成を考慮に入れたアメバネットワーク設計法,” 信学技報, vol. 113, no. 472, NS2013-181, pp. 25-30, 2014年3月6日。Hideki Tode, Kenji Tada, and Shuta Kohama, “Ameba Network Architecture based on Advanced Multi-Layer Network and Its Configuration Algorithm,” Proc. of *IEEE ICC 2013*, NGN, 6pages, Budapest, Hungary, June 6, 2013. 査読有。

Hideki Tode, Syogo Takagi, and Yosuke Tanigawa, “BitTorrent over Optical Network - A Content Distribution Platform in cooperation with P2P and OCS Network -,” Proc. of *IEEE Globecom 2011*, CSWS04, 5 pages, Huston, USA, Dec. 7, 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

(3)連携研究者

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