

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2006 年度～2008 年度  
 課題番号：18760282  
 研究課題名 (和文) インターネットトラフィックの削減を実現する新しいパケット転送方式  
 研究課題名 (英文) Novel Packet Forwarding Mechanism to Reduce Internet Traffic  
 研究代表者  
 三好 匠 (MIYOSHI TAKUMI)  
 芝浦工業大学・システム理工学部・准教授  
 研究者番号：40318861

**研究成果の概要：** 本研究では、動画配信などの広帯域同報配信型サービスにおいて、マルチキャストと同様のトラフィック削減を実現するパケット転送方式「ミューズキャスト」に着目し、本技術を広域ネットワークに適用するための研究開発を実施した。具体的には、複数拠点間でのトラフィック削減を実現する動的経路制御機能、更なるトラフィック削減を実現する類似パケット統合手法、及びさまざまなアプリケーションで利用可能な TCP 対応型ミューズキャストの研究開発を行った。

#### 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,400,000	0	1,400,000
2007 年度	1,300,000	0	1,300,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	240,000	3,740,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：ネットワーク・LAN・インターネット

#### 1. 研究開始当初の背景

近年のインターネットの急速な普及とブロードバンドの進展に伴い、動画ストリーミング配信やネットワークゲームのように、同一データを複数の受信端末へ配信する広帯域同報配信型サービスが急増している。同報配信型サービスを効率的に伝送できるマルチキャスト方式は、中継伝送路上のトラフィックを大幅に削減することができ効率的である。しかし、マルチキャストを実現するためには、すべてのネットワーク機器がマルチキャストに対応していることが必須条件であり、またアプリケーションにもマルチキャストに対応した実装が必要である。よって、広域のインターネットにおいてマルチキャストを利用することは困難であり、同報配信

型サービスのほとんどが従来方式であるユニキャストを利用している。

このような問題に対し、研究申請者は「ミューズキャスト」(以下、 $\mu$ SEcast と表記)と呼ぶ新しいパケット転送方式を考案した。 $\mu$ SEcast では、 $\mu$ SEcast に対応したルータ(以下、対応ルータと表記)を通過するすべてのパケットを監視し、同一データ部をもつ複数のパケットが同一方向へ転送される場合には、パケットの統合を行ってから転送する。受信側の対応ルータでは、統合パケットから元のパケットを復元して受信端末へと転送する。図 1 に示すように、 $\mu$ SEcast はネットワークの入口でパケット統合を行うことで、網内を流れるトラフィックをマルチキャスト並みに削減することができる。また、対応ル

ータで自動的にパケットの統合、復元を行うため、その処理は端末から完全に隠蔽されており、従来方式による同報配信型サービスでもμSEcast のメリットを享受することが可能である。

## 2. 研究の目的

μSEcast を広域のネットワークで利用するためには、解決しなければならない課題が残されている。

まず第1に、現在のμSEcast は2台の対応ルータ間でしか動作しない。これは、経路制御機能が実装されていないためである。本研究申請の第1の目的は、経路制御機能の研究開発である。任意のパケットに対してμSEcast が効果的に動作するためには、動的経路制御機能を組み入れる必要がある。動的経路制御機能を実装できれば、ネットワークの任意の場所に対応ルータを設置するだけでトラフィック削減が実現される。

第2の課題として、トラフィック削減可能性の向上が挙げられる。現在のμSEcast は、データ部が完全に一致したパケットに対してのみ統合処理を行うが、このようなパケット群の発生はそれほど多くないため、μSEcast の適用領域は小さい。そこで、本研究の第2の目的として、データの一部が異なるパケット群に対してもμSEcast を適用するための手法を開発する。従来の情報配信型サービスでは、受信端末 ID などをデータ部に書き込むことがあり、同報ではあるがデータの一部が異なるパケット群が送信されることがある。μSEcast の適用領域拡大により、このようなパケット群に対してもトラフィックの削減が実現できる。

第3の課題は、現在のμSEcast が UDP のみを統合の対象としている点である。μSEcast を考案した当初の目的は、ユニキャストを利用する同報配信型サービスに対して、マルチキャスト同様のトラフィック削減を実現することにあった。そのため、従来のμSEcast では、同一データ部をもつ UDP パケット群のみがパケット統合の対象となる。一方、より広範囲なトラフィック削減を実現するには、Web などで利用される TCP 通信にも対応することが望ましい。そこで本研究の第3の目的として、TCP にも対応したμSEcast の研究開発を実施する。これにより、インターネットでやりとりされるほとんどのトラフィックを統合対象とすることが可能となり、マルチキャストを超えるパフォーマンスを発揮できると考えられる。

## 3. 研究の方法

### (1) 動的経路制御機能の研究開発

μSEcast における経路制御では、対応ルータに入力されるパケットの宛先をチェック

し、μSEcast 適用可能な宛先であると判断された場合にのみパケットの統合を行っている。ここで、μSEcast 適用可能な宛先は、対応ルータが所持する経路表に登録されているとする。従来のμSEcast は、2台の対応ルータで動作するように設計されているため、経路表を動的に変更できないのみならず、複数の宛先にも対応していない。

そこで、以下の手順により段階的にμSEcast 経路制御機能を拡張する。

- ① 複数の対応ルータ間でμSEcast が動作するように、プロトコルの改良を行う（静的経路制御の実現）。
  - ② 対応ルータが追加されると自動的に経路表が更新されるように、μSEcast ネットワークの管理方式を検討する（動的経路制御手法の考案）。
  - ③ 構築されるμSEcast ネットワークの最適化手法を検討する（動的経路の最適化）。
- 本研究申請では、動的経路制御に係わる②と③の部分を重点的に検討する。考案したプロトコルを PC ルータ上に実装し、性能評価を行う。

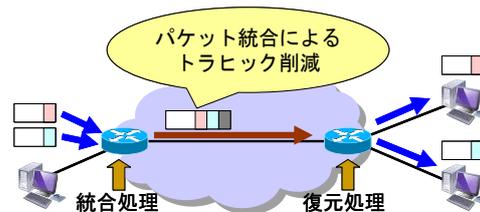


図1 μSEcast の概要

### (2) 類似パケット統合手法の研究開発

μSEcast では、対応ルータを通過するすべてのパケットを監視し、データ部が同一であるパケット群に対してパケット統合を行っている。類似パケット群に対してμSEcast を適用するためには、統合、復元の両方の処理に対して大幅な変更が必要である。

そこで本研究では、以下の手順により類似パケット統合手法の研究開発を実施する。

- ① 類似パケットの統合、及び復元を実現するために必要とされる機能を分析し、μSEcast プロトコルの詳細設計を行う（類似パケット統合手法の考案）。
- ② 効率的な類似パケットの統合を実現するために、パケット統合手法の最適化を行う（類似パケット統合の最適化）。

考案した類似パケット統合手法を PC ルータ上に実装し、性能評価を行う。

### (3) TCP 対応型μSEcast の研究開発

従来のμSEcast では、対応ルータを通過する UDP パケットのみを統合の対象としている。UDP, TCP の両方に対応させるためには、(2)と同様に統合、復元の両方の処理に対して

大幅な変更が必要である。また、コネクションの管理を一切行わない UDP に対し、TCP では再送制御や輻輳制御などの複雑な処理がエンドエンド間で行われるため、これらの処理を考慮したうえでパケットの統合、復元処理を行わなければならない。例えば、 $\mu$ SEcast によりパケット統合が行われると、受信端末においてパケットの到着順序が入れ替わり、TCP の再送制御が働いて余剰トラヒックが発生する可能性がある。よって、TCP の特徴を考慮した  $\mu$ SEcast の対応が必要となる。

そこで本研究では、以下の手順により TCP 対応型  $\mu$ SEcast の研究開発を実施する。

- ① UDP と TCP の両パケットの統合、復元ができるように、 $\mu$ SEcast プロトコルの改良を行う (TCP 対応型  $\mu$ SEcast の考案)。
- ② パケットの到着順序が変化しないようにするための順序制御手法を検討する (パケット順序制御手法の考案)。

考案した TCP 対応型  $\mu$ SEcast を PC ルータ上に実装し、性能評価を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 動的経路制御機能の研究開発

$\mu$ SEcast において動的な経路制御を実現するためには、ネットワーク内に存在する  $\mu$ SEcast 対応ルータの所在とアドレスを自律的に把握して、経路表を動的に書き換える必要がある。そこで本研究では、図 2 に示すように管理サーバを導入し、対応ルータ間に論理的な  $\mu$ SEcast ネットワークを構築する手法を考案した。新たに開発した対応ルータと管理サーバ間の接続手順の概略を以下に示す。

- ① 対応ルータは、 $\mu$ SEcast ネットワークへの参加要求を管理サーバへ送信する。
- ② 管理サーバは、動作中の対応ルータと、そのルータに接続された LAN のアドレスの対応関係を更新し、接続情報として全対応ルータに提供する。
- ③ 対応ルータは、受信した接続情報に基づいて経路表を作成し、パケット統合を行う。

$\mu$ SEcast ネットワークの最も簡単な管理方法は、図 2 の実線で示したように、動作中の対応ルータ間にフルメッシュの論理網を構築する方法である。しかし、フルメッシュの論理網を用いると、各対応ルータ宛のトラヒックがそれぞれ独立な経路をとるため、パケット統合率が高くなるという問題がある。パケット統合率を高めて更なるトラヒック削減を実現するためには、複数の宛先に向かうパケットを集束することが望ましい。そこで、 $\mu$ SEcast ネットワークをツリー状に構築する手法を考案した。

新たに開発した対応ルータと管理サーバ間の接続手順を図 3 に示す。新規参加ルータ

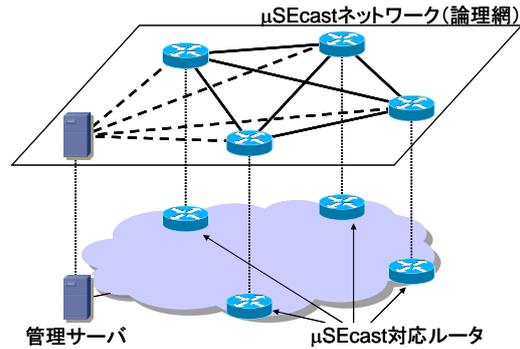


図2 μSEcast ネットワークの構築

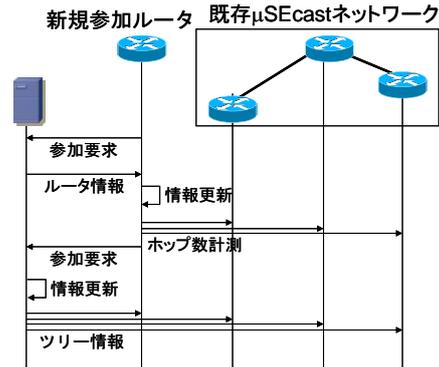


図3 ツリー型ネットワークの構築手順



図4 動的経路制御評価ネットワーク

は、管理サーバから動作中の対応ルータ情報を受信後、それらのルータに対して ICMP を用いて物理ホップ数を計測する。計測結果を管理サーバに送信し、管理サーバで  $\mu$ SEcast ネットワークの再構築を行って、更新されたツリー情報を各対応ルータに送信する。これにより、物理ホップ数を考慮したツリー型  $\mu$ SEcast を構築することが可能となる。なお、対応ルータが離脱した場合にも、 $\mu$ SEcast ネットワークの連結性を損なわないように管理サーバでツリーの再構築を行い、更新情報を対応ルータに通知する。

FreeBSD 5.1 Release が動作する PC ルータ上に提案手法を実装し、図 4 に示すネットワークを利用して性能実験を行った。比較対象は、ユニキャスト、フルメッシュ型経路制御、及びツリー型経路制御の 3 種類とし、ネットワーク対戦型ゲームを用いてデータ量を計測した。実験結果を図 5 に示す。図では、ユニキャストを 100% とし、データ量とパケット数がどの程度削減されたかを表している。実験結果より、同報型サービスの参加者が複数の拠点にいる場合にも、対応ルータ間

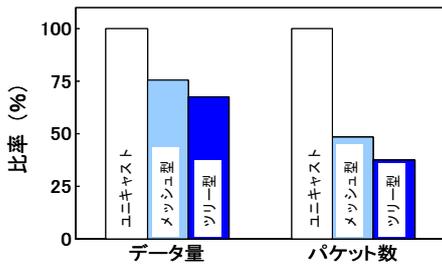


図5 動的経路制御手法の性能評価

で適切な動的経路制御を行ってトラヒックの削減を実現できていることが分かる。

一方、ツリー型経路制御では、中継ルータにおいて、遅延時間の増大が確認された。ルータ 2 では、ルータ 1 から到着した  $\mu$ SEcast パケットの復元処理と同時に、ルータ 3 に転送するための再統合処理が必要となる。これが遅延時間増大の原因となっている。今後、中継転送時の処理を高速化するための検討が必要であろう。

### (2) 類似パケット統合手法の研究開発

$\mu$ SEcast において類似パケットの統合を実現するためには、統合、復元の両方に対して大幅な変更が必要である。統合の際には、パケット群に対してデータの相違部分を抽出し、相違部分のデータと元パケット復元のための情報（復元情報）を合わせて  $\mu$ SEcast パケットを作成する。復元の際には、 $\mu$ SEcast パケットから相違部情報を抽出し、元パケットを再構築する。

本研究では、3 種類の類似パケット統合方式を考案した。これらを図 6 に示す。方式 1 は、パケット群共通の相違部分を抽出する手法である。実際に異なっている部分よりも広範囲のデータを相違部データとして保持する必要があるが、相違部サイズ情報などの復元情報を共通で利用することが可能である。方式 2 は、パケット毎に相違部を抽出する手法である。相違部データを小さくできるが、復元情報をパケット毎に保存する必要がある。方式 3 は、パケットをいくつかのブロックに分割し、ブロックごとに相違部を抽出する手法である。相違部データは増加するが、復元情報を非常に小さく抑えることが可能となる。

(1)と同様に、FreeBSD が動作する PC ルータ上に提案手法を実装し、2 台の  $\mu$ SEcast 対応ルータを用いて性能実験を行った。一方のルータには 1 台の端末を、他方のルータには 7 台の端末を接続し、ネットワーク対戦型ゲームを用いてトラヒックを計測した。結果を図 7 に示す。図では、ユニキャストを 100%とした場合のデータ量とパケット数、及びパケット統合にかかる処理時間を示している。結果より、どの方式を用いてもデータ量削減率

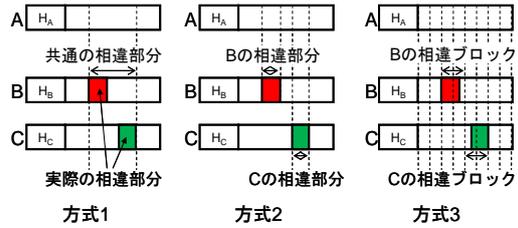


図6 類似パケット統合方式

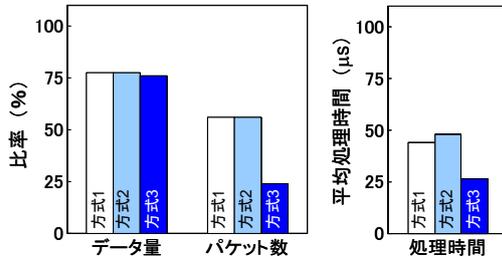


図7 類似パケット統合手法の評価

はあまり変化しないが、パケット数削減率、及び処理時間において方式 3 が最も優れていることが分かる。方式 3 では、パケットをいくつかのブロック（本実験では 32）に分割して相違部分の有無を計算するため、統合、復元とも他の方式と比べて処理が簡単であり、高速化が実現できる。

パケット数の削減率から、パケット統合率の高さが確認できるが、一方でデータ量はあまり削減されていない。これは、復元情報のオーバーヘッドが原因であると考えられる。今後は、パケット圧縮手法との組合せにより、全体的なトラヒック削減を実現する必要がある。

### (3) TCP 対応型 $\mu$ SEcast の研究開発

$\mu$ SEcast において UDP と TCP の両方のパケット統合を実現するため、統合、復元処理のプロトコルを改良し、TCP パケットであっても同一データ部をもつパケット群に対して統合処理を行うように修正した。一方、UDP と TCP のパケットを同一の  $\mu$ SEcast パケットに統合すると、復元の際に元パケットがどちらのパケットであったかを判断しなければならず、処理が複雑になる。また、異なる種類のアプリケーションが同一データ部をもつパケットを送出する可能性は低いと考え、UDP、TCP はそれぞれ独立に統合処理を実行することとした。よって、TCP 対応型  $\mu$ SEcast では、UDP 統合パケットと TCP 統合パケットの 2 種類の統合パケットが送出される。復元の際には、これらの種類を見分けてから、それぞれに応じた処理により元パケットを復元する。

本方式を PC ルータに実装し、動作実験を行ったところ、 $\mu$ SEcast を利用した場合の TCP パケットの再送率が、 $\mu$ SEcast を利用しない

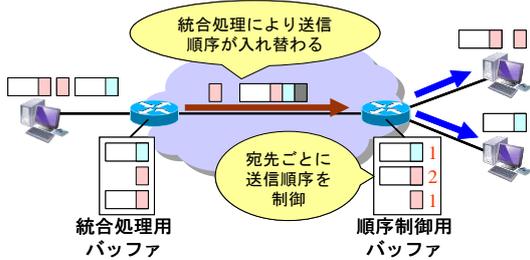


図 8 TCP 対応型μSEcast におけるパケット順序制御方式

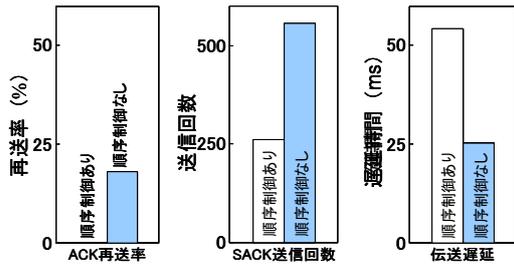


図 9 TCP 対応型μSEcast の性能評価

場合の約 2 倍に増加することが分かった。更に詳細に調査したところ、再送パケットのほとんどが ACK パケットであることも分かった。これは、TCP 型μSEcast によって TCP パケットの統合を行う際、パケットの順序が入れ替わり、ACK の後着が頻発することに起因する。

そこで本研究では、パケット到着順序が入れ替わらないようにするための制御手法を考案した。具体的には、図 8 に示すように、μSEcast パケットを復元する際に順序制御用バッファを用い、元パケットのシーケンス番号を参照して正しい順序に並べ替える処理を実現した。

(1)、(2)と同様に、FreeBSD が動作する PC ルータ上に提案手法を実装し、2 台のμSEcast 対応ルータを用いて性能実験を行った。各ルータに 4 台、合計 8 台の端末を接続し、TCP で 1 対 1 接続を行うネットワーク対戦型ゲームを用いてトラフィックを計測した。このとき、4 組の独立した対戦接続がすべて対応ルータを通過するようにした。

評価結果として、順序制御を行った場合と行わなかった場合の ACK 再送率、SACK (Selective ACK) 送信回数、及び伝送遅延を図 9 に示す。図より、順序制御を実現することにより、ACK 再送率をほぼ 0 にすることが可能となった。また、パケット損失やデータの到着順序逆転が生じた際に受信側端末から送出される SACK に関しても、送信回数を半分以下に減少させることに成功している。このことから、考案した順序制御機構により、パケットの到着順序を修正できていることが確認できる。

一方、受信側対応ルータに到着したμSEcast パケットは、順序制御のため、バッファで一時的に待機する必要がある。そのため、エンドエンド間の遅延時間が大きくなり、順序制御なしの場合と比べて約 2 倍の遅延を生じることとなる。今後は、順序制御遅延を削減する手法や、バッファを用いずに順序制御を行う手法についての検討が必要である。

#### (4) まとめ

本研究では、ユニキャスト通信を利用する同報配信型アプリケーションにおいて、マルチキャストと同様のトラフィック削減を実現するμSEcast 方式に着目し、本方式の適用領域を拡大するための技術開発を行った。特に、動的経路制御技術は、広域ネットワークでμSEcast を利用するための基盤技術であるが、μSEcast に類似したパケット転送方式においても流用可能な技術であると考えられる。また、類似パケット統合技術や TCP 対応型μSEcast 技術は、インターネットで利用されるさまざまなアプリケーションにおいて、トラフィック削減の可能性を示唆する重要技術となり得るであろう。

今後は、本研究により得られた技術や知見を元に、さまざまな技術領域におけるトラフィック削減に挑む予定である。

### 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 13 件)

- [1] 尾上正紀, 浅井淳志, 三好 匠, “μSEcast におけるパケットヘッダ削減手法の実装とその評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, 108(359), 2008, pp. 23-28 (査読無)
- [2] 奥澤尚佳, 三好 匠, “グリッドミドルウェアを利用した動的なサービス連携手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, 108(258), 2008, pp. 37-42 (査読無)
- [3] 尾上正紀, 安達洋介, 三好 匠, “UDP に基づく μSEcast プロトコルの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, 108(91), 2008, pp. 13-18 (査読無)
- [4] 安達洋介, 三好 匠, “μSEcast におけるツリー型ネットワーク構築法”, 電子情報通信学会技術研究報告, 107(524), 2008, pp. 239-244 (査読無)
- [5] 沖田智嗣, 安達洋介, 三好 匠, “μSEcast におけるパケット順序制御手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, 107(445), 2008, pp. 13-18 (査読無)
- [6] 安達洋介, 三好 匠, “μSEcast における動的オーバーレイネットワーク構築手法”,

- 電子情報通信学会技術研究報告, 107(311), 2007, pp. 47-52 (査読無)
- [7] 三好 匠, 山田雅也, 安達洋介, “μSEcast プロトコルの TCP への適用と評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, 107(36), 2007, pp. 33-38 (査読無)
- [8] 唐澤 肇, 寺田真介, 三好 匠, 矢守恭子, 田中良明, “多対多マルチキャストのための複数固定木選択形ルーティングアルゴリズム”, 電子情報通信学会技術研究報告, 106(578), 2007, pp. 149-154 (査読無)
- [9] T. Miyoshi, K. Shioda, and H. Nishi, “Packet Encapsulation and Forwarding Mechanism for Multiple Packet Streams”, 1st South East Asia Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, 2007, pp. 13-18 (査読無)
- [10] 唐澤 肇, 寺田真介, 三好 匠, 矢守恭子, 田中良明, “重回帰分析による多対多マルチキャストコアベースツリーの特性解析”, 電子情報通信学会技術研究報告, 106(280), 2006, pp. 31-36 (査読無)
- [11] H. Karasawa, S. Terada, T. Miyoshi, K. Yamori, and Y. Tanaka, “Evaluation Indices of Many-to-Many Multicast Routing Tree to Represent Delay Performance”, 12th Asia-Pacific Conference on Communications, 2E-6, 2006 (査読有)
- [12] 安達洋介, 圖師尚典, 三好 匠, “類似パケット統合転送方式による擬似マルチキャストの実現とその評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, 106(153), 2006, pp. 7-10 (査読無)
- [13] 安達洋介, 三好 匠, “経路制御機能を実装した μSEcast”, 電子情報通信学会技術研究報告, 106(41), 2006, pp. 45-48 (査読無)

[学会発表] (計 11 件)

- [1] 安達洋介, 三好 匠, “μSEcast 配信ツリー構築手法”, 2008 年電子情報通信学会通信総合大会, 2008 年 3 月 21 日, 北九州学術研究都市
- [2] 尾上正紀, 安達洋介, 三好 匠, “μSEcast の実ネットワークへの導入”, 2008 年電子情報通信学会総合大会, 2008 年 3 月 21 日, 北九州学術研究都市
- [3] 奥澤尚佳, 三好 匠, “優先度を考慮した複数 P2P ネットワークの協調制御手法”, 2009 年電子情報通信学会総合大会, 2009 年 3 月 20 日, 愛媛大学
- [4] 関谷健二, 尾上正紀, 三好 匠, “μSEcast における効率的類似パケット統合手法”, 2009 年電子情報通信学会総合大会, 2009 年 3 月 18 日, 愛媛大学
- [5] 尾上正紀, 三好 匠, “OS 間インターオ

ペラビリティを考慮した μSEcast の開発”, 2009 年電子情報通信学会総合大会, 2009 年 3 月 18 日, 愛媛大学

- [6] 沖田智嗣, 安達洋介, 三好 匠, “ACK 再送を低減する μSEcast パケット順序制御手法”, 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 2008 年 3 月 1 日, 東京電機大学
- [7] 浅井淳志, 安達洋介, 三好 匠, “μSEcast におけるパケットヘッダ削減手法”, 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, 2008 年 3 月 1 日, 東京電機大学
- [8] 安達洋介, 三好 匠, “管理サーバを用いた μSEcast メッシュネットワークの構築手法”, 2007 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 2007 年 9 月 11 日, 鳥取大学
- [9] 山田雅也, 安達洋介, 三好 匠, “TCP 通信に対応した μSEcast”, 2007 年電子情報通信学会総合大会, 2007 年 3 月 22 日, 名城大学
- [10] 唐澤 肇, 寺田真介, 三好 匠, 矢守恭子, 田中良明, “複数の固定木を用いた多対多マルチキャストルーティングアルゴリズム”, 2007 年電子情報通信学会総合大会, 2007 年 3 月 21 日, 名城大学
- [11] 唐澤 肇, 寺田真介, 三好 匠, 矢守恭子, 田中良明, “重回帰分析による多対多マルチキャストツリーコア選択手法の検討”, 2006 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 2006 年 9 月 20 日, 金沢大学

[その他] (計 1 件)

- [1] 三好 匠, 安達洋介, “トラヒック削減を実現するパケット統合伝送方式”, オーバレイネットワークシンポジウム, デモ展示, 2006

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 匠 (MIYOSHI TAKUMI)

芝浦工業大学・システム理工学部・准教授  
研究者番号: 40318861