

# エンドホストの動画画像フィルタリングを用いたアプリケーション層 QoS マルチキャストの実現

中村嘉隆 山口弘純 廣森聡仁<sup>†</sup> 安本慶一<sup>‡</sup> 東野輝夫

大阪大学 大学院情報科学研究科 <sup>†</sup> 大阪大学 大学院基礎工学研究科

<sup>‡</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

## QoS-Aware Multicasting on Overlay Networks with End hosts' Video Filtering

Yoshitaka Nakamura, Hirozumi Yamaguchi, Akihito Hiromori<sup>†</sup>,

Keiichi Yasumoto<sup>‡</sup> and Teruo Higashino

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>†</sup>Graduate School of Engineering Science, Osaka University

<sup>‡</sup>Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

### 1 はじめに

高速ネットワークや計算機の普及により、近い将来、比較的小規模（数人から数十人程度）の多数のグループによるビデオチャットのようなグループ通信が一般的になると予想される。しかし、そのようなグループ通信におけるデータ交換を限られた数のサーバが処理することは、ネットワーク資源及び接続数数の制限の観点から現実的ではない。

グループ通信は主にグループ内ユーザへの同報通信からなるため、特定のサーバを必要とせず、ネットワーク資源の利用効率も高いマルチキャストが有用な通信技術の一つであると考えられる。しかし、特に広域網でのインフラストラクチャの整備の問題から、現状での利用は難しい。一方、すべての 2 ユーザ間のユニキャストでそのような同報通信を実現することは、グループサイズのスケールの点で非効率的である。このような問題に対する現実的な解として、マルチキャストをアプリケーション層で実現する通信形態であるアプリケーションレベルマルチキャスト (ALM) が注目を集めており、近年、多くの研究がなされている [6, 7, 8, 11]。

ALM はエンドホスト間ユニキャストトンネリングによるオーバーレイネットワーク上で、それらエンドホストがマルチキャスト配信木を管理し、トンネリング間のパケット複製及び転送を行なうことで実現される。トンネリングであるために特定のインフラストラクチャを必要としないこと、ユニキャストトランスポートプロトコルの制御機能（信頼性、フロー/レート制御など）が利用可能であるなど利点が多い。しかしその一方で、エンドホスト付近での帯域制約や実リンク上でのパケット重複など、オーバーレイネットワーク上での制約やオーバーヘッドを考慮した性能のよいプロトコルが要求される。さらに、アプリケーション層のプロトコルであることから、ユーザアプリケーションの特性を考慮した柔軟な設計が望まれる。

我々は、各ホストがそれらデータストリームに対し指定する優先度要求（プライオリティ）に基づき、限られたオーバーレイリンク容量や各ホストのストリーム転送能力の中で、どのデータストリームを優先的に配信するかを動的かつ分散で制御できる新しい ALM である Emma (End-user Multicast for Multi-Party Applications) を提案している [2]。例えばビデオ会議システムのユーザは、中心となる話者達の映像に対しより強い興味を持つなど、ユーザが映像に対する優先度要求を持つ状況はごく自然であることから、Emma の制御機能は、ユーザ満足度を向上させるための機能として有用であると考えられる。しかし、ユーザ満足度をさらに高めるためには、より公平かつ QoS を意識したオーバーレイネットワーク制御が望まれる。各ノードがマルチキャスト転送及びフィルタの役割を担当し、なるべくユーザの充足率を高めるために品質やユーザの優先度要求に応じて各データ

ストリームの転送レートを制御することが望ましい。そこで本稿では、データストリーム転送の QoS 制御を分散制御で行う機能を Emma に追加した Emma/QoS を提案する。Emma/QoS では、あるユニット単位で分割されたオーバーレイリンクの帯域に対し、複数ユニット分の帯域を消費するストリームが複数配信されている状況で、これらの転送レートを中間ノードで、エンドホストのフィルタリング機能を用いてユニット単位で削減することにより、新たなユニットの確保要求を受け入れることができる。その際、ストリームの特性およびユーザのプライオリティを考慮して、システム全体でのリソースの配分効率ができるだけ良くなるよう制御する。例えば、あるリンクでの容量が不足し、新たなユニットの確保要求を受け入れることが出来なかった場合に、既に配信しているストリームのうち、転送レートを下げた場合の各ユーザのプライオリティ損失が最も小さくなるようなストリームを選択し、新たなユニットを確保した場合のプライオリティ利得より小さいならば、そのストリームの転送レートを下げるといった制御を行う。また、各ストリームに対するプライオリティは、そのストリームが確保しているユニットに応じて変化するユーティリティ関数を与え、それに従って設定する。

この機能を追加した結果、Emma/QoS では、システムワイドでの効率を考慮しつつ、新たなストリームの配信要求を高い確率で受け入れることが可能になる。この Emma/QoS に対しシミュレーション実験を行い、その効率、性能を単純な方式のプロトコルとの比較により評価した。

### 2 Emma/QoS プロトコル

#### 2.1 セッションへの参加

Emma/QoS は複数のエンドホスト（以下ノードと呼ぶ）とそれらの IP アドレス等を管理する一つのロビーサーバからなる。各エンドホストは潜在的なデータストリームの送信者であり、他のいくつかのノード間にユニキャストコネクションを確立する。これをオーバーレイリンクと呼ぶ。オーバーレイリンクは、参加時にロビーサーバから入手したノードリスト上で、ノード間遅延時間が最も短い数ノードと確立する。

また、各ノードでは、そのノードが確立可能なオーバーレイリンクの最大数、及び、オーバーレイリンクで利用可能な帯域ユニットの最大数等の制約を持つ。この制約値は、自身の計算機資源、LAN の帯域、測定した遅延時間、セッションポリシーから決定される。ここで、帯域ユニットとは、あるリンクで利用可能な帯域を単位帯域で分割したものであり、これを用いることにより、

Emma/QoS で用いる帯域制御が容易になる。

## 2.2 経路木構築

Emma/QoS では、オーバーレイネットワーク上で、各ノードを根とするソーススペースのスパニング木を継ぎ木方式で構築し、これを経路木とする。この際、セッションポリシーで定められた遅延制約及びホップ制約を満足しながら、キャパシティをメトリックとする。ただし、新規参加ノードの経路木やノードの離脱や故障時の経路木の再構築に対応するため、定期的なフラッディングによって経路木再構築を行う。

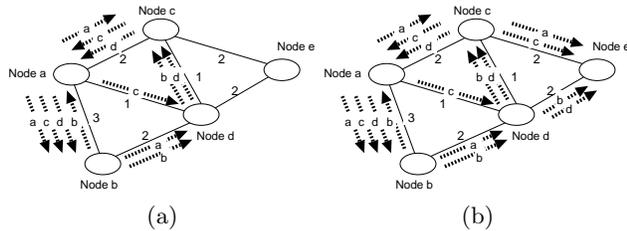


図 1: ノードの参加に伴う経路木の拡張

継ぎ木による経路木の構築を図 1 に示す。図 1(a) においては、ノード  $a, b, c, d$  はそれぞれ他のノードを含むスパニング木を経路木として持っている。このもとで、ノード  $e$  がノード  $c, d$  とオーバーレイリンクを構築して新たに参加したとする。ノード  $e$  はオーバーレイリンクのキャパシティを考慮し、経路木の重なりがなるべく各オーバーレイリンクのキャパシティに収まり、かつ遅延制約及びホップ制約を満たすように、ノード  $c, d$  のいずれから各経路木を接続するかを決定する。図 1(b) では、ノード  $a, c$  の経路木をノード  $c$  から、ノード  $b, d$  の経路木をノード  $d$  から延長する。また、ノード  $e$  の経路木はノード  $e$  によるフラッディングに基づく経路探索により決定する。

## 2.3 オーバレイネットワークにおける QoS 制御

**QoS 制御の概要** Emma/QoS では、1 本あたり複数ユニットを消費する複数ストリームが配信されている状況で、これらの転送レート（消費帯域）を中間ノードで削減することにより、新たなストリーム配信要求を受け入れることができる。その際、ストリームの特性およびユーザのプライオリティを考慮して、システム全体でのリソースの配分効率ができるだけ良くなるよう制御する。今、図 2(a) において、ノード  $c, d, e$  が新たに、ノード  $b$  からのストリーム配信（2 ユニット消費）を要求する場合を想定する。要求が出される時刻はほぼ同時と仮定する。図 2 において、 $a(3)$  などの表示は、ノード  $a$  からのビデオストリームが 3 ユニットの帯域を使用していることを表し、リンク上の数字はリンク容量を表している。

Emma/QoS では、アルゴリズムの単純化のため、1 ユニットずつ帯域を確保するよう要求を出す。まず、ノード  $c, e$  からの 1 ユニット帯域の確保要求はノード  $d$  で集約され、ノード  $b$  に配送される。この場合、リンク  $b-d, d-e, d-c$  において、リンク容量が不足する。そのため、例えば、リンク  $b-d$  では、ストリーム  $a$ （3 ユニット消費）あるいは、ストリーム  $e$ （2 ユニット消費）のいずれかの転送レートを下げることで、新たに 1 ユニットの帯域を確保する。この際、転送レートが下がることによるストリームの特性の変化、及び下流で受信しているユーザのプライオリティの低下を考慮し、どちらのストリームの転送レートを下げるか、あるいはこの要求を受け入れないかを決定する。他のリンク  $d-e, b-d$  についても同様の手順を適用し、例えばリンク  $b-d, d-e, d-b$  でそれぞれ、ストリーム  $a$ 、ストリーム  $e$ 、ストリーム  $d$  の転送レートを下げることを決定し、ストリーム  $b$  を受け入れるための 1 帯域ユニット分の確保要求が終了する。

次に、ストリーム  $b$  に対し、さらに 1 帯域ユニット分の確保

要求を出すことができる。この場合、リンク  $b-d$  では、ストリーム  $e$  の転送レートが上流リンクの  $d-e$  で既に削減されているため 1 ユニット確保でき、リンク  $d-e$  では、ストリーム  $d$  の転送レートを下げることで 1 ユニット確保する。また、リンク  $d-b$  で、ストリーム  $d$  の配信を停止したくない場合（ストリーム特性およびユーザプライオリティで指定）、ストリーム  $b$  への帯域の追加割り当ては行われない。

この場合の最終的な帯域割り当ての結果を図 2(b) に示す。

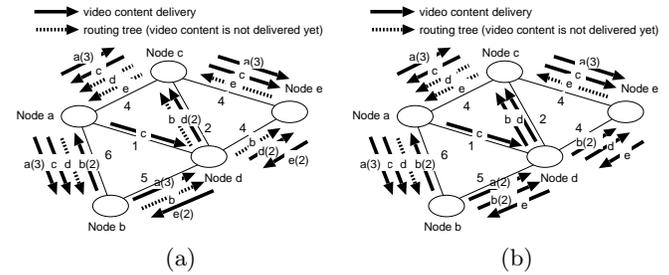


図 2: 転送レートの調節

**gain 関数・loss 関数** gain 関数と loss 関数は、現在配信されているストリームに対し帯域ユニットの追加、削減が行われた際に、ストリーム品質の利得、損失がどれだけ増減するかを表す関数である。文献 [17] では、レート適応型アプリケーションにおけるユーティリティ関数が図 3(a) のように定義されている。Emma/QoS では、帯域幅  $h$ （帯域ユニット）毎にオーバーレイリンク帯域を管理しているため、与えられたユーティリティ関数に対し、図 3(b) のような近似関数を利用する。これを用いて、現在  $k$  ユニットの帯域ユニットを使用して配信しているストリーム  $i$  に対し、新たに 1 ユニットの追加した場合のユーザ利得を返す関数  $gain_i(v, k)$  を生成する。

$$gain_i(v, k) = \begin{cases} U_i(h(k+1)) - U_i(hk) & (k = 0, 1, \dots, \lfloor \frac{Bmax_i}{h} \rfloor - 1) \\ 0 & (k = \lfloor \frac{Bmax_i}{h} \rfloor) \end{cases}$$

ここで、 $U_i$  はストリーム  $i$  のユーティリティ関数であり、 $Bmax_i$  はストリーム  $i$  の使用できる最大ビットレートである。同様に、 $loss_i(v, k)$  は、

$$loss_i(v, k) = \begin{cases} U_i(hk) - U_i(h(k-1)) & (k = 1, \dots, \lfloor \frac{Bmax_i}{h} \rfloor) \\ 0 & (k = 0) \end{cases}$$

のように定義される。これらとユーザが持つストリームへのプライオリティ（文献 [1] 参照）を用いることで、単位帯域ユニットが追加、削減された場合のユーザ利得値を表すことができる。

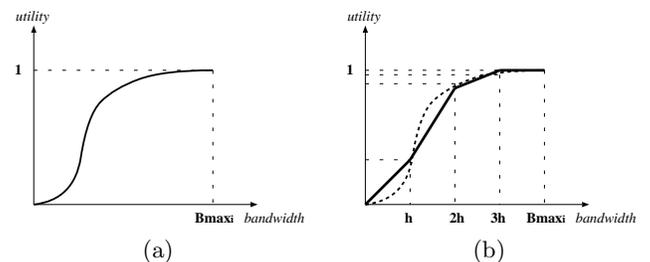


図 3: ユーティリティ関数

帯域の調節 上のように定義した gain 関数, loss 関数を用いて帯域の制御を行う。

既に配信されているストリーム  $i$  の loss 値 (ストリームの利用帯域と loss 関数から導出する) は,  $MEDIA/Keep$  メッセージと呼ばれるメッセージを用いてノード  $v$  まで集約され,  $Loss_i(v)$  に総和が格納される。また, gain 値の総和  $Gain(v)$  も同様に, 帯域要求メッセージである  $MEDIA/Join$  を用いて集約する。集約されたこれらの  $Loss_i(v)$  値,  $Gain_i(v)$  を比較することで, 配信中のストリームで帯域を削減すべきであるもの, 新たに要求ストリームを流すべき帯域を決定し, 配信の制御を行う。このあたりの計算法は文献 [1] を参照されたい。

### 3 シミュレーションによる性能評価

オブジェクト指向スクリプト言語 Ruby[5] を用いて Emma/QoS のシミュレータを実装し, Emma/QoS の性能評価を行った。

#### 3.1 シミュレーションシナリオ

ネットワークは LAN, MAN, WAN より生成される階層型トポロジを tiers モデル [4] に基づいて生成した。LAN, MAN, WAN の帯域はそれぞれ 6Mbps, 50Mbps, 100Mbps と仮定した。これはユーザ付近のリンクの帯域がボトルネックリンクとなることを表す。各ストリームの最大ビットレートは 1Mbps とし, ユーザは 256kbps 毎にストリームをフィルタリングできる, すなわち 1 帯域ユニットは 256kbps と仮定した。

ノード数が 200, ユーザ数が約 55 である場合について評価を行った。セッション参加時に 3 つのオーバレイリンクを構築し, 利用できるオーバレイ帯域の総量は, LAN の帯域の半分と仮定する。各ストリームのユーティリティ関数は 2.3 節で定義した関数にしたがって定義する。

シミュレーションでは, 以下のシナリオで実験を行った。

- ユーザは順次セッションに参加して, オーバレイネットワークを構築する。
- 各ユーザはランダムに選択した 4 つのビデオの受信要求を行う。
- 要求を出しながら, 1 ユニットも獲得できていないビデオの要求は, 繰り返して出し続ける。
- 全ユーザの参加後, ランダムにユーザを選択して, 元のユーザの 10% にあたる数まで参加離脱を繰り返す。

#### 3.2 オーバレイネットワークの効率

リンクストレスの分布 図 4 にリンクストレス (1 実リンク上に存在する経路木数) の分布を示す。ここで  $x$  軸はリンクストレスの値を表し,  $y$  軸はリンクストレスが  $x$  軸の値である実リンクの総数を表している。この結果から, Emma/QoS はユニキャストの場合と比較し, 小さなリンクストレスを達成できている。

パスストレッチの分布 図 5 はパスストレッチ, すなわち 2 ユーザ間のオーバレイ上最短経路に含まれる実リンク数と, ユニキャストでの最短経路に含まれる実リンク数の比を累積割合とともに表したものである。 $x$  軸がパスストレッチ,  $y$  軸が経路数を表している。これによると, ほぼ 80% の経路が 4 以下であることが読み取れる。これは, 遅延がほぼ 4 倍であることを示すが, 現在のインターネットのエンド間遅延を考慮に入れば, Emma/QoS で通信を行うのに十分な結果であるといえる。

#### 3.3 経路木の性質

ツリーストレス (1 オーバレイリンクにおける経路木の多重度) が大きければ, 1 つの経路木が利用できる帯域が分散され

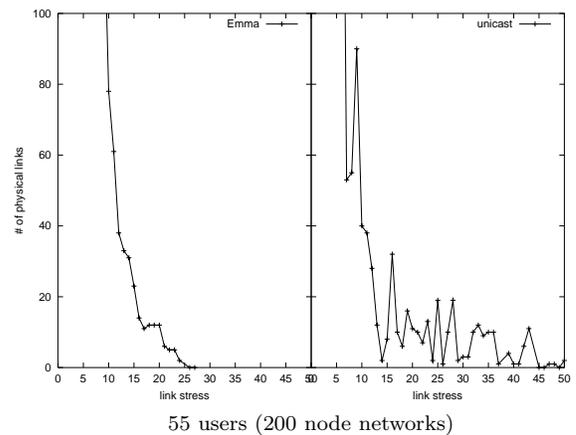


図 4: リンクストレス分布

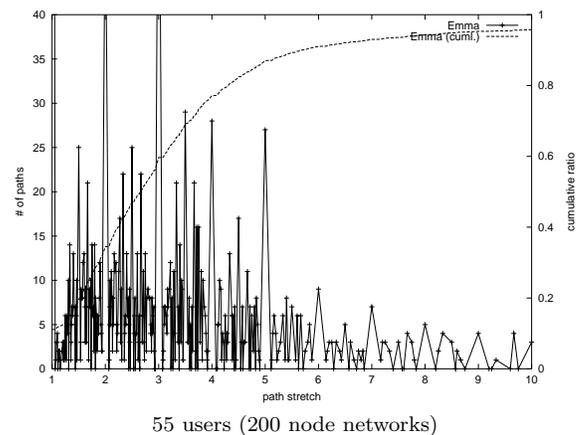


図 5: パスストレッチ分布

ることになる。従って, ツリーストレスは全オーバレイリンクに分散していることが望ましい。

図 6 にツリーストレス分布を示す。この結果から, 約 90% のツリーストレスが最大値の半分程度の値であり, ほぼ公平に分散されていると言える。

#### 3.4 要求満足率の分布

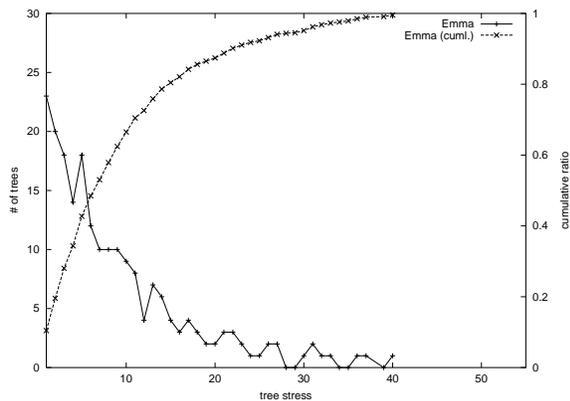
要求していたプリファレンスが, どの程度満足されたかを示す要求満足率をユーザごとに計算し, その分布を測定した。また, 要求順に受け入れ, 空きがない場合は受け入れない方式 (First-Come-First-Serve 方式, FCFS 方式) で行った場合との比較を行った。

FCFS 方式では図 7 で示す通り, 半数近くのユーザが満足率 0, すなわち, 要求したストリームがまったく受けられない。Emma/QoS を用いた場合も, そのようなユーザは存在するが, ほとんどのユーザは 0.8 程度の満足率を達成している。

電子会議のようなアプリケーションでは, ユーザは高品質な単一のビデオよりは, 低品質でも複数のビデオを要求する傾向がある。この点で, Emma/QoS の帯域制御機能は複数のストリームの配信に適しているといえる。

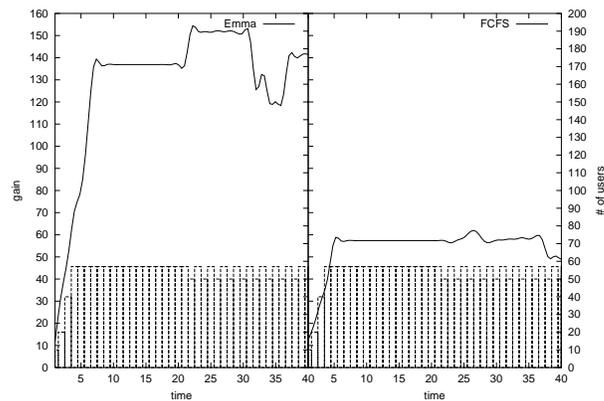
#### 3.5 ユーザ利得の変動

シミュレーション時間毎のユーザ利得値の変動を測定した。ユーザ利得値とは, あるビデオに対して帯域を与えて要求を満たすことで得られるプリファレンスの値である。この変動を見ることにより, ユーザの参加・離脱が行われるような状況での Emma/QoS の振る舞いを表すことができる。結果は図 8 の通



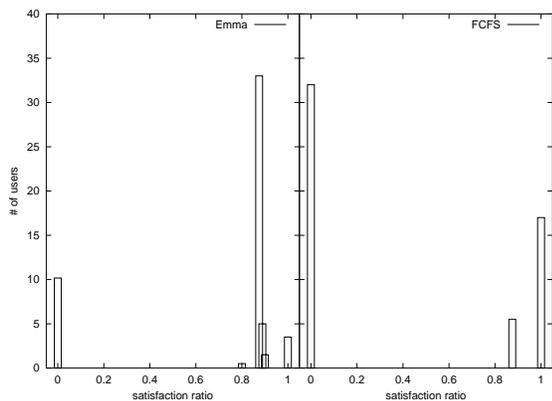
55 users (200 node networks)

図 6: ツリーストレス分布



55 users (200 node networks)

図 8: ユーザ利得の変動



55 users (200 node networks)

図 7: ユーザ要求満足率分布

りである。この結果から、ユーザ利得は FCFS に比べ高い値を達成し、参加離脱を繰り返しても、高い値を維持できていることが読みとれる。

#### 4 まとめ

本稿では、ユーザプリファレンスを考慮したアプリケーションレベルマルチキャスト Emma を基に、オーバーレイ上で複数ビデオを同時配信する際の QoS 制御を可能にした Emma/QoS を提案し、シミュレーションによりその性能評価を行った。シミュレーション実験の結果、グループ間通信として用いるような場合のオーバーレイ効率は維持できており、ユーザの満足度を表す利得値も単純な方式と比較してかなり高い値を持つことがわかった。

今後の課題としては、Emma/QoS によるメディア配信時のジッタやパケットロスの計測等、より詳細なシミュレーション実験による性能評価、Emma/QoS のワイヤレスアドホックマルチキャストへの応用などがあげられる。

#### 参考文献

- [1] 中村嘉隆, 山口弘純, 廣森聡仁, 安本慶一, 東野輝夫, 谷口健一, “映像による複数人のコミュニケーションシステム向けのアプリケーションレベルマルチキャスト Emma の性能評価,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル ( DICOMO2002 ) シンポジウム論文集, pp253-256, 2002.
- [2] Y. Nakamura, H. Yamaguchi, A. Hiromori, K. Yasumoto, T. Higashino and K. Taniguchi, “On Designing End-user Multicast for Multiple Video Sources,” To appear in Proc. of 2003 IEEE Int. Conf. on Multimedia & Expo, 2003.
- [3] C. Diot, W. Dabbous and J. Crowcroft, “Multipoint Communication: A Survey of Protocols, Functions, and Mechanisms,”

*IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 15, No. 3, pp. 277-290, April 1997.

- [4] K.L. Calvert, M.B. Doar and E.W. Zegura, “Modeling Internet Topology,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 160-163, 1997.
- [5] “Ruby Home Page.” <http://www.ruby-lang.org/en/>
- [6] Y.-H. Chu, S. G. Rao, S. Seshan and H. Zhang, “Enabling Conferencing Applications on the Internet using an Overlay Multicast Architecture,” *Proc. of ACM SIGCOMM*, 2001.
- [7] Y.-H. Chu, S. G. Rao and H. Zhang, “A Case for End System Multicast,” *Proc. of ACM SIGMETRICS*, 2000.
- [8] D. Pendarakis, S. Shi, D. Verma and M. Waldvogel, “ALMI: An Application Level Multicast Infrastructure,” *Proc. of 3rd Usenix Symp. on Internet Technologies & Systems*, 2001.
- [9] J. Jannotti, D.K. Gifford, K.L. Johnson, M.F. Kaashoek and J.W. O’Toole, “Overcast: Reliable Multicasting with an Overlay Network,” *Proc. of the 4th Usenix Symp. on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, 2000.
- [10] V. Roca, A. El-Sayed, “A Host-Based Multicast (HBM) Solution for Group Communications,” *Proc. of 1st IEEE Int. Conf. on Networking (ICN’01)*, 2001
- [11] R. Cohen and G. Kaempfer, “A Unicast-based Approach for Streaming Multicast,” *Proc. of IEEE INFOCOM 2001*, 2001.
- [12] S. Ratnasamy, M. Handley, R. Karp and S. Shenker, “Application-level Multicast using Content-Addressable Networks,” *Proc. of 3rd Int. Workshop on Networked Group Communication*, 2001.
- [13] Y. Chawathe, S. McCanne and E. A. Brewer, “RMX: Reliable Multicast for Heterogeneous Networks,” *Proc. of IEEE INFOCOM 2000*, 2000.
- [14] S.Q. Zhuang, B.Y. Zhao, A.D. Joseph, R.H. Katz and J. Kubiatowicz, “Bayeux: An Architecture for Scalable and Fault-tolerant Wide-area Data Dissemination,” *Proc. of ACM NOSS-DAV 2001*, 2001.
- [15] F. Baccelli, D. Kofman and J.L. Rougier, “Self Organizing Hierarchical Multicast Trees And Their Optimization,” *Proc. of IEEE INFOCOM2001*, 2001.
- [16] N. Yeadon, F. García, D. Hutchison and D. Shepherd, “Filters: QoS Support Mechanisms for Multipeer Communications,” *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No. 7, pp. 1245-1262, 1996.
- [17] S. Shenker, “Fundamental Design Issues for the Future Internet,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communication* Vol. 13, No. 7, pp. 1176-1188, 1995.
- [18] D. Xu and K. Nahrstedt, “Finding Service Paths in a Media Service Proxy Network”, *Proc. of SPI/ACM Conf. on Multimedia Computing and Networking (MMCN2002)*, 2002.