

受信者の要求に基づいたマルチキャストストリーム間 レート制御アーキテクチャ

川田 雅人 森川 博之 青山 友紀

東京大学大学院情報理工学研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3番1号

Tel: 03-5841-6710 Fax: 03-5841-6776 E-mail: kawada@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし: ビデオ会議などのネットワークコラボレーションでは、受信者は各データに対して多様な品質要求を持つため、受信者は各自の使用可能帯域幅の中で要求度に適応した伝送レートでデータを受信することにより、受信者の満足度を高めることが望ましい。本稿では、可変帯域を実現する階層型マルチキャスト技術、及び複数のマルチキャストストリームに共通な制御メッセージを用い、アプリケーションを構成するストリーム間・受信者間で協調的に受信レート制御を行うアーキテクチャを提示する。本手法により、複数のストリームを統括した迅速な輻輳制御、及び、受信者のストリームに対する要求度を受信レートに反映させるレート制御が行えることを示す。

Request-based Rate Control Architecture for Multi-stream Multicast Applications

Masato KAWADA, Hiroyuki MORIKAWA, and Tomonori AOYAMA

School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

Tel: +81-3-5841-6710 Fax: +81-3-5841-6776 E-mail: kawada@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract: In multicast applications such as video conference which consist of multiple streams, not all streams are of equal interest to all receivers. In this case we believe that this disparity in receiver's interest should be reflected in the rate adaptation. This paper presents the collaborative rate management architecture, named CRM, for layered multicast streams. CRM finds both streams sharing the same bottleneck link and receivers under the bottleneck link from congestion results. By using the bottleneck link information CRM achieves collaborative rate control of receiving streams which satisfies user's request for them in the constraint of network resources.

1 まえがき

昨今のネットワーク環境の広帯域化に伴い、従来の電子メール・Web 中心の断続的通信から、動画像などのリアルタイムストリーミングデータ通信に注目が移行し始めている。そのアプリケーションとして、インターネット放送、VoD などの配信型のみならず、ネットワークビデオ会議のような双方向コミュニケーションを行う参加型（ネットワークコラボレーション）も今後需要が高まることが予想される。特に多人数の参加型アプリケーションは複数のストリーミングデータ（例：各自の動画）で構成され、各データにはアプリケーションにおける役割や参加者の注目度・要求度に多様性が生じる。この多様性に適応した伝送レートでデータを伝送すると、対人間コミュニケーションの臨場感を高め、参加者の使用可能帯域を効率的に利用できると考えられる。

多数の参加者にデータを伝送する場合、マルチキャスト通信が帯域の効率利用の点で有効である。マルチキャスト

トにおいて可変レートを実現する技術として、送信者が元データを複数の階層に分割するよう符号化し、各受信者が使用可能帯域に応じていくつかの階層を受信する階層型マルチキャスト [1, 2] がある。これまでに、各受信者がパケットロス率などの情報から空き帯域を推定し受信階層数を決定する、受信者主導のレート制御手法がいくつか提案されている [2, 3, 4, 5]。しかし、階層分けされている故の受信レートの非連続性、及びストリーム間におけるレート制御の独立性から、複数の階層型ストリームがボトルネックリンクの帯域を競合する場合、受信レートの公平性、安定性の達成が困難である [6, 7, 8] ことが報告されている。また、ストリームの経路及び使用可能帯域幅が既知という前提のもとで、各データに対する受信者の要求を集め、データへの要求度と使用可能帯域幅の双方に応じて各受信者の受信階層を決定する手法 [9, 10] が提案されているが、帯域予約されている状況を除けば前提条件を知ることは容易でない。

これらの問題点を解決する手段として、筆者らは各受信者が購読する複数のマルチキャストストリームを統合的に管理し、レート制御を行う手法について検討を行ってきた [11]。しかし、マルチキャストツリーは複数の受信者によって共有されること、データに対する要求度は時々刻々と変化することから、参加者の結びつきを強くし、さらに強力な協調制御を行う必要がある。

そこで本稿では、同一アプリに属するストリーム群・受信者群が協調してレート制御を行うアーキテクチャを示す。これは、各受信者においてすべてのストリームを統合して監視し、制御命令を発動する CRM (Collaborative Rate Manager)、及び、各受信者の CRM を結ぶ制御用マルチキャストチャンネルから構成される。CRM は、制御チャンネルを通じて輻輳時における各ストリームの輻輳状況をストリーム間・受信者間で比較することにより、ボトルネックを共有するストリーム群・受信者群を推定する。そしてこの共有状況と各ストリームへの要求度を元に、共有受信者群で各ストリームの伝送レートを決定し、ストリーム間で安定した受信品質を保つための統合的な輻輳制御、及び受信階層数調整を行う。

以下、2章ではマルチキャスト環境におけるストリーム間レート制御に対する要求事項を検討し、要求事項を満たすための協調型アーキテクチャについて説明する。3章において、本アーキテクチャによるストリーム間・受信者間協調レート制御アルゴリズムについて説明する。4章においてシミュレーションによる本手法の動作検証を行い、最後に5章でまとめを行う。

2 協調制御アーキテクチャ

2.1 階層型マルチキャストのレート制御

階層型マルチキャストの代表的な受信レート制御手法として、各受信者が各階層への参加 / 脱退 (join/leave) を行う受信者駆動型がある。図 1 に RLM[2] のレート制御の様子を示す。各受信者は、第 1 階層から順に一定間隔 (T_j) ごとに上位階層を join 命令により受信する。このときに輻輳が生じたならば、直ちに leave 命令を出して受信する最上位階層から脱退し、 T_j を指数的に大きくして空き帯域を学習する。この一連のレート決定手続きを join-experiment と呼ぶ。さらに、外的要因により使用可能帯域が減少して輻輳を検出した場合は、パケットロス率に応じて受信最上位階層から leave し、輻輳を解消する。

また、同一ボトルネックリンクの下流に存在する他の受信者も同等の輻輳の影響を受けることを考慮し、受信者は join-experiment を行う際にその実行報告 (join-report) を他の受信者にマルチキャストし、他の受信者はその輻輳結果から同様に T_j を調整して受信レートを共有学習することができる。

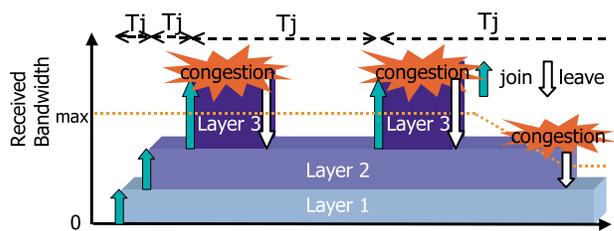


図 1: 階層型マルチキャストのレート決定手法

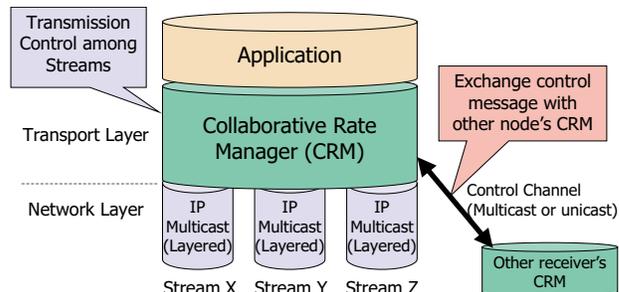


図 2: 協調レート制御アーキテクチャ

2.2 協調型アーキテクチャの導入

複数のマルチキャストストリーム間でレート制御を行うために、ボトルネックリンクにおける 2 種類の共有状況について考察する。まず、複数のストリームがあるボトルネックリンクの帯域を共有使用している場合 (以降、共有ストリーム群と呼ぶ)、この共有ストリーム群は当該リンクにおいて同様の輻輳影響を受けるため、使用可能帯域の推定 (T_j の学習) 結果を共有することができる他、共有ストリーム同士であるストリームのレートを増やす代わりに他方のレートを減らすことにより、レートの割当を変更することができる。また、あるマルチキャストデータの受信者がボトルネックリンクの下流に複数存在する場合 (以降、共有受信者群と呼ぶ)、全ての共有受信者で受信レートを決定し、そのツリーをボトルネックリンクから取り除く場合は、その階層から脱退 (leave) する必要がある。これらの共有状況は、階層型マルチキャストにおいて、ストリーム間レート制御を行うためには不可欠な情報である。なぜならこの情報は、どの受信者と協力すればどのストリーム間でレート割当の変更ができるかを示しているからである。

階層型マルチキャストにおいて、上記の共有状況を取得し、所望のレート制御を実行するためには、同一アプリケーションを構成する参加者及びデータストリームが協調して制御できるよう、相互認識が可能な構造が各受信者に必要となる。しかし既存のプロトコルスタックでは、各ストリームが独立にレート制御を行い、送信者以外の他の参加者と制御情報の交換をすることはない。

この問題を解決するのが本稿で提案する協調レート制御アーキテクチャ (図 2) である。各受信者においてアプリケーション毎に存在する Collaborative Rate Manager (CRM) は、受信するすべてのストリームの状況を同時に

監視し、また join/leave による受信階層数の増減を行う機能を持つ、複数ストリームにまたがる統括的トランスポート制御機構である。また、同一アプリケーションに属する各受信者の CRM を結び制御用マルチキャストチャンネルは、CRM 間で制御情報の交換を行う環境を提供し、共有受信者群で連携したレート制御を可能にする。これらのストリーム間・受信者間協調制御を可能にする環境に、アプリケーション層から API を通じて得られる受信者の要求度を加味することにより、アプリケーションに属する受信者全体の満足度を高める柔軟なレート割当を目指す。

3 ストリーム間レート制御アルゴリズム

提案する CRM アーキテクチャでは、主に (1) 複数ストリームを考慮した統括的レート制御 (join/leave) アルゴリズム、(2) 輻輳結果の解析によるボトルネック共有状況推定アルゴリズム、(3) 共有受信者群による要求適応型レート制御アルゴリズム、の 3 つのアルゴリズムにより、ストリーム間における協調的レート制御を行い、参加者の全体の満足度を高めることを目指す。なお、すべての受信者はストリームに関する情報 (階層数、各階層の伝送レートとアドレス) を何らかの手段で取得しているものとする。

3.1 統括的レート制御アルゴリズム

CRM は、2.1 節で示した受信レート制御を、受信するストリーム“群”で実行することにより、効率的な使用可能帯域の共有学習、及び敏感な輻輳制御を実現する。なお、受信者がセッションに参加してから最初に輻輳を検出するまでは、空き帯域を迅速に使用するために各ストリームが独立に join-experiment を行うことにしている。

図 3 は、join-experiment を実行する受信者の CRM (以降、CRM_{ex} とする) と他の受信者の CRM における、協調型 join-experiment の具体的な手続きを示している。CRM においてあるストリームの T_j が切れたときに、受信する全てのストリームにおいて輻輳がなく、join-experiment が行われていない場合、その CRM は CRM_{ex} となり、join 報告 (JOIN(StreamID, #Layer, NodeID, T_j)) を制御チャンネルを用いてマルチキャスト配信し、一定時間待機する (図中の Step1)。待機時間中に複数の報告を受け取った場合、受信階層数 (#Layer) が小さく、かつ T_j の値が小さい join-experiment が実行を許されてそのまま CRM_{ex} になり、同時に全ての CRM は受信ストリームの輻輳検査を開始する (図中の Step2)。この join-experiment が輻輳を引き起こした場合、CRM_{ex} は直ちに実験階層から脱退し、全ての CRM は輻輳を検出したストリームの T_j を増やす (図中の Step3)。この一連の手続きにより、ストリーム間における join の重複に起因する重度の輻輳を回避するだけでなく、単一ストリームの join-experiment による輻輳結果をストリーム・受信者間で共有することによ

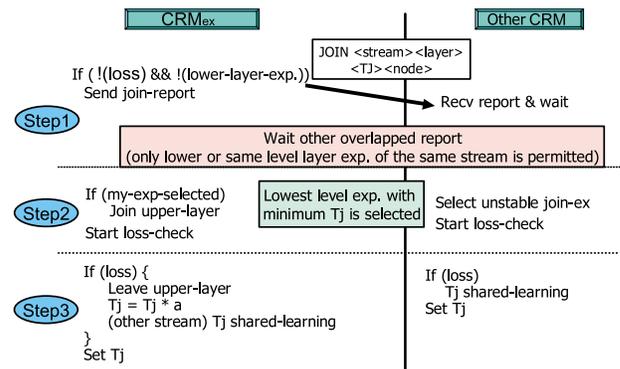


図 3: 協調型 join-experiment

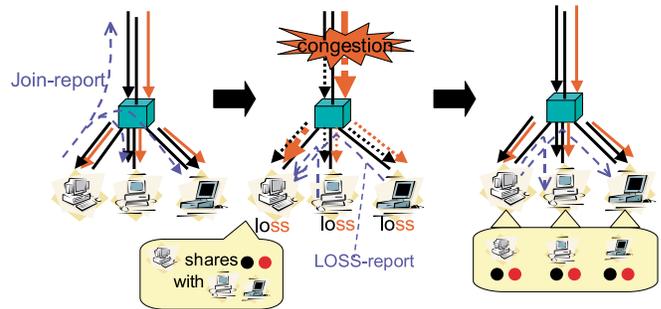


図 4: ボトルネックリンク情報推定の流れ

り、効果的に空き帯域を学習することができる。

また、join-experiment が行われていない際に輻輳が発生した場合、CRM は輻輳したストリーム群でパケットロス率を計測し、そのロス率と各階層の伝送レートから、輻輳が解消するために適切な脱退すべき階層を決定する。これにより迅速で適切な輻輳制御を行うことができる。

3.2 ボトルネックリンク共有状況推定アルゴリズム

2 つのストリームが同一ボトルネックリンクを通過し、そのリンクで輻輳が生じた時、ランダムドロップキュー (Droptail または RED) であれば当該ストリーム間で輻輳時間やパケットロス率などの輻輳結果が似通うと考えられる。また、同一ボトルネックリンクの下流に存在するマルチキャスト受信者群は、同一の輻輳結果を検出する。この 2 つの現象から、ストリーム間・受信者間で輻輳結果の相関を分析することにより、受信するストリームの中からボトルネックリンクを共有するストリーム群を推定することができる。

CRM が join-experiment を行う際に、受信者間で効率的に輻輳結果を分析するアルゴリズム手法を図 4 を用いて説明する。ある CRM_{ex} が join 報告を送信してから join-experiment をした後 (図 4 左) に、図の受信者群の上流リンクで輻輳が発生すると仮定する。このとき、CRM_{ex} は受信する全てのストリームにおけるロスパケットを記録し、join-experiment 中に似通った輻輳結果を検出したストリームを共有ストリーム群 sh_str とみなす。一方、輻輳を検出した他の CRM はロス報告 LOSS(StreamID, Layer,

NodeID, Seq_number) を CRM_{ex} に送信する。もしロス報告中のシーケンス番号と CRM_{ex} が記録したシーケンス番号が一致した場合、 CRM_{ex} はロス報告をした CRM を共有受信者群 sh_rec とみなす (図 4 中央)。輻輳検出が終了した後、 CRM_{ex} は共有情報 (sh_str, sh_rec) を共有受信者群にフィードバックし、結果を共有する (図 4 右)。

本推定手法は輻輳結果を用いているため、推定のために頻繁に輻輳を発生させるのは望ましくない。本アルゴリズムは、共有受信者群のうちのいずれかがあるストリームに対して行った単一の join-experiment の結果によって、全ての共有受信者がボトルネックリンクの共有状況を得られるため、効率的であると言える。

3.3 要求適応型レート制御アルゴリズム

受信者群のアプリケーション全体の満足度を高めるために、受信者間で各ストリームに対する重みを決定し、その重みに応じてストリーム間レート制御を行う。

まず、ボトルネックリンクにおけるレート割当を決定するために、3.2 節で得られた共有受信者群の間で各共有ストリームに対する要求度を交換する。要求度はアプリケーションから API を通して総和を 1 とした割合として CRM に与えられるとし、REQ (NodeID, {StreamID:request}, {StreamID:request}, ...) の形である更新方法 (一定時間間隔など) に従って共有受信者群に報告する。互いに要求を報告したところでそれらの算術平均を求め、これを受信者群としてのストリーム i に対する重み w_i ($i \in sh_str$) とする。

次に、その重みに応じて共有ストリーム群の各階層に優先度を割り当てる。優先度割当アルゴリズムは、「ストリーム $i, j \in sh_str$ の n 階層目の優先度は、 $w_i \geq w_j$ ならば、ストリーム i のほうが高い」という方針の下で、共有ストリーム全体で使用可能な帯域幅を B とすると、以下のルーチンで示される。

1. sh_str の中で、重み w が最大のストリーム i を選ぶ
2. r_i (i の次階層の帯域) $\geq w_i * B$ を満たせば、その階層に優先度を与え、 $w_i \leftarrow w_i - \frac{r_i}{B}$ とする。満たさなければストリーム i は次回から対象外にして 1. に戻る
3. sh_str のストリーム全てが対象外になったとき、重みの大きいストリーム順に次階層に優先度を与え、終了

各階層に優先度が割り当てられたところで、受信者は各階層が優先度順に受信されているかを確認し、優先度順でない場合はストリーム間で受信階層の変更を行う。図 5 は、3 つの共有ストリーム群が重みに従って優先度が割り当てられ、重みや全体の使用可能帯域幅の変化に応じて各階層の優先度、及び受信階層数が調整されている例を示している。

重みの変化の結果、受信者が優先度の高い階層の代わ

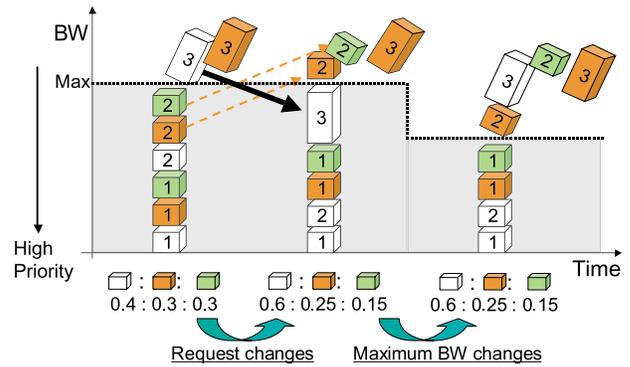


図 5: 優先度に従ったレート制御

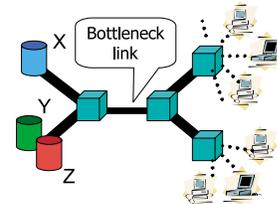


図 6: シミュレーショントポロジー

りにそれよりも優先度の低い階層を受信している場合、CRM は優先度の高い階層へ prior-join-experiment を行う。prior-join-experiment では、輻輳が発生した時に join した階層の帯域の分だけ代わりに優先度の低い階層から leave する (図 5 左)。このとき、通常の join と同様に prior-join 報告を送信して他の受信者に知らせることにより、共有受信者で同期したレート制御を行うことができる。また、外因によってストリーム群全体の使用可能帯域が減少した場合、パケットロス率から使用可能帯域を予測し、階層の優先度を計算して優先度の低い階層から leave する (図 5 右)。

上記の制御中において、共有受信者群は共通の重み・階層への優先度を持ち、制御チャンネルを通じて join/leave の報告を共有するため、要求や帯域の変更に対して同じ手法で、かつ同期して制御を行うため、確実に迅速な連携レート制御がマルチキャストにおいても可能になる。

4 シミュレーション

本章では、提案するレート制御手法の輻輳制御機能、及び、要求の変動に対する受信レートの追従の様子を $ns - 2$ を用いて検証・評価する。なお、共有受信者群・共有ストリーム群の推定、多様なボトルネックリンク配置状況での動作検証に関しては書面の都合上 [12] を参考されたい。

本シミュレーションで用いたトポロジーを図 6 に示す。3 種類のソース S_X, S_Y, S_Z (各階層の帯域幅を $100kbps, 100kbps, 200kbps, 200kbps$ とする) があり、受信者は時刻変化をする要求度を持つとする。中央のリンクがボトルネックリンクで帯域幅は $700kbps$ であり、他のリンクは輻輳が起きないよう $1Mbps$ の帯域幅を持つとする。

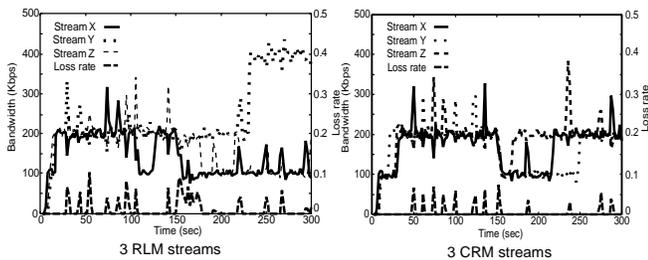


図 7: RLM vs CRM

Type	A	B
0-100[sec]	0.33:0.33:0.33	0.33:0.33:0.33
100-300[sec]	0.5:0.25:0.25	0.5:0.25:0.25
300-400[sec]	0.66:0:0.33	0.66:0.33:0
400-600[sec]	0.33:0.33:0.33	0.33:0.33:0.33

表 1: 要求度 ($S_X : S_Y : S_Z$)

4.1 輻輳制御

図 7 は、ボトルネックリンクの下流の 3 人の受信者が S_X, S_Y, S_Z を、RLM[2] で独立に受信した場合 (図左) と CRM で統括して受信した場合 (図右) において、ボトルネックリンクを通過する各ストリームのレート、及び全体のパケットロス率をそれぞれ計測したグラフである。CRM を用いた場合の各ストリームへの要求度は $0.33 : 0.33 : 0.33$ で固定した。さらに、時刻 150~200 秒の間に無関係な UDP フロー (300kbps) をボトルネックリンクに流して意図的に輻輳を発生させている。

双方を比較すると、CRM は RLM に比して輻輳の継続時間が短く、ロスパケットの総量が小さい。これは、CRM が輻輳したストリーム群のパケットロス率から、脱退すべき階層 (数) を求めて、適切な輻輳制御を行っていることの結果であると考えられる。さらに輻輳解消後も CRM では $0.33 : 0.33 : 0.33$ の要求された帯域幅に復帰している。

4.2 要求適応型レート制御

シミュレーション結果を見る前に、アプリケーションを使用する受信者の「満足度」に関して考察を行う。一般的に受信者は、データの品質 (高ビットレート, 低ロス率) が高いほど満足度が高いが、さらに遠隔ビデオ会議などでは、アプリケーションの臨場感を高めるため、受信者が各ストリームに対して持つ要求の比率と伝送レートの比率が対応していると満足度が高まると考えられる。本稿では、ストリーム群で使用可能帯域を求め、その範囲内で要求度に適応したレート割当を目指すことから、後者の満足度を評価値として用いる。

受信者の満足度 S は、受信する各ストリーム i の要求の割合 $w_i (0 \leq w_i \leq 1)$ と受信レートの総受信レートに対する割合 $r_i (0 \leq r_i \leq 1)$ の対応度の和であると考えられる。このとき、要求以上のレートで受信しても、受信者にとって要求度以上の満足度は得られないと考えて、各スト

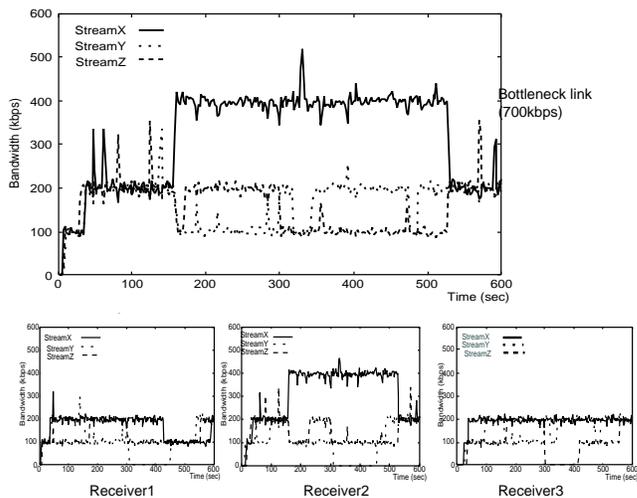


図 8: 受信レートの変動 (受信者 3 人)

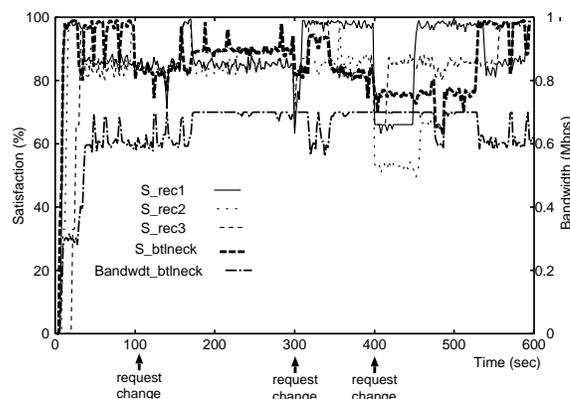


図 9: 満足度の変動 (受信者 3 人)

リーム i の満足度 s_i を以下のように定義する。

$$s_i = \begin{cases} r_i & (r_i \leq w_i) \\ w_i & (r_i > w_i) \end{cases}$$

受信者の満足度は、 $S = \sum_i s_i$ で表される。

図 8 は、ボトルネックリンクの下流に 3 人の受信者を配置し、ボトルネックリンクと各受信者における各ストリームのレートを計測したグラフである。受信者の要求度は、受信者 1, 2 が表 1 の TypeA, 受信者 3 が TypeB を取り、その結果 300-400[sec] における受信者群の共有要求度は $0.66 : 0.22 : 0.11$ となる。このときのボトルネック、及び受信者における満足度を計算したものが図 9 である。

ボトルネックリンクにおいては、図 8 から比較的速く要求に従って受信レートが変動しているのが分かり、図 9 の満足度 (最も太い点線) も要求の変化によって減少した満足度を増加するように動作していることが確認できる。

しかし、各受信者の受信レートは実際の要求の変更とレート変更時間に時間差があり、また必ずしも最大帯域幅を使用していない。これは、今回のシミュレーションでは受信者群の要求の交換を 20 秒間隔で行っているため、join-experiment に関して 2.1 節で示した T_J によるタイマー制

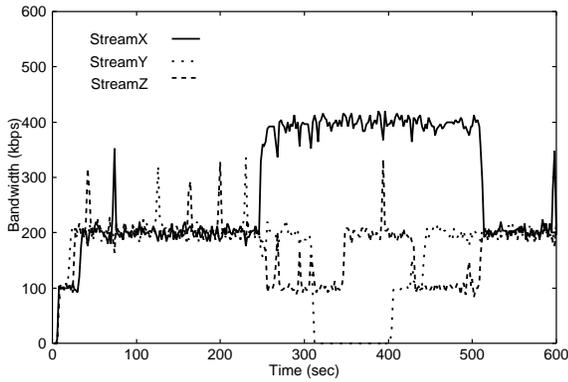


図 10: 受信レートの変動 (受信者数 10 人)

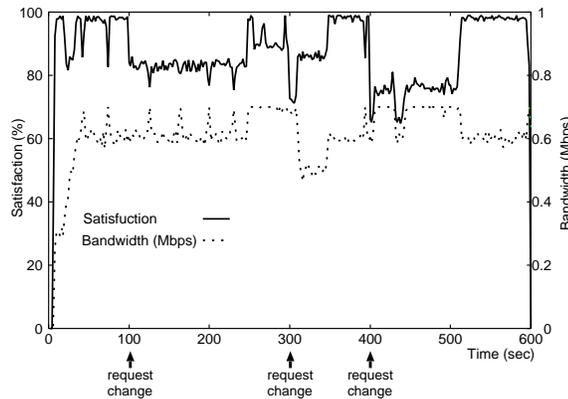


図 11: 満足度の変動 (受信者数 10 人)

御を行っているため、輻輳を検出しているときはレート変更のための prior-join-experiment を許していないためであると考えられる。これらは join-experiment をより協調的に実行させるなどの改良により修正できるであろう。

図 6 の下流の受信者を 10 人に増やし、先と同様にボトルネックリンクにおける各ストリームのレートを計測したものが図 10、満足度及び総帯域の変動の様子を示したものが図 11 である。要求度の変動は全て表 1 の TypeA に従うものとする。図 10 をみると、250、300、400、500 秒あたりでレート変動が行われ、図 11 の対応した時点で満足度が向上している。受信者が 3 人のとき (図??) と比較して、受信者が増加してもボトルネックリンクのレート変動の様子に大きな違いが無く、共有受信者群が適切に推定され、協調制御を行っていることが確認できる。

以上の結果より、本稿で提案する手法では、共有受信者群で共有された要求度に追従して共有ストリーム群の受信レートの割当を逐次変更し、満足度を高めることができることが示された。また、受信者間の協調制御により、ボトルネックリンクの下流の受信者数には依存せずにレート割当を変更できるが、 T_J を用いた離散的レート制御に従っているため、急峻なレート変更は難しいと考えられる。

5 むすび

本稿では、複数の拠点を結ぶネットワークコラボレーションにおいて、複数ストリーム間・受信者間で協調的に階層型マルチキャストの受信レートを制御するアーキテクチャを提示し、具体的な受信アルゴリズムを示した。本手法により、多様なネットワーク環境、及び多様な受信者の要求に対応して、安定した受信品質を保つ輻輳制御を行うと共に、多様な受信者の要求度に適応したレート制御を行うことで受信者の満足度を高める効果をシミュレーションにより確認した。

現在、より受信者・アプリケーションからの要求に応じた柔軟なレート制御を行うための改良を加えていくとともに、本アーキテクチャを実装したビデオ会議システムを作成中である。

参考文献

- [1] N. Shacham: "Multipoint Communication by Hierarchically Encoded Data", in *Proceeding of INFOCOM '92* (1992).
- [2] S. McCanne, V. Jacobson and M. Vetterli: "Receiver-driven Layered Multicast", in *Proceeding of ACM SIGCOMM '96*, pp. 117-130 (Aug. 1996).
- [3] X. Li, S. Paul and M. Ammar: "Layered Video Multicast with Retransmissions (LVMR): Evaluation of Hierarchical Rate Control", in *Proceeding of IEEE INFOCOM '98* (Mar. 1998).
- [4] L. Vicisano, J. Crowcroft and L. Rizzo: "TCP-like Congestion Control for Layered Multicast Data Transfer", in *Proceeding of IEEE INFOCOM '98* (Apr. 1998).
- [5] A. Legout and E. W. Beiersack: "Fast Convergence for Cumulative Layered Multicast Transmission Schemes", in *Proceeding of ACM SIGMETRICS 2000* (Jun. 2000).
- [6] X. Li, S. Paul and M. Ammar: "Multi-Session Rate Control for Layered Video Multicast", *IEEE Multimedia Computing and Networking* (Jan. 1999).
- [7] R. Gopalakrishnan, J. Griffioen, G. Hjalmtysson and C. J. Sreenan: "Stability and Fairness Issues in Layered Multicast", in *Proceeding of NOSSDAV '99* (Jun. 1999).
- [8] D. Rubenstein, J. Kurose and D. Towsley: "The Impact of Multicast Layering on Network Fairness", in *Proceeding of ACM SIGCOMM '99* (Aug. 1999).
- [9] E. Amir, S. McCanne and R. Katz: "Receiver-driven Bandwidth Adaptation for Light-weight Sessions", in *Proceeding of ACM Multimedia '97* (Nov. 1997).
- [10] H. Yamaguchi, K. Yasumoto, T. Higashino and K. Taniguchi: "Receiver-Cooperative Bandwidth Management for Layered Multicast", in *Proceeding of ICNP '99* (Oct. 1999).
- [11] M. Kawada, H. Morikawa and T. Aoyama: "Cooperative Inter-stream Rate Control Scheme for Layered Multicast", in *Proceeding of The 2001 Symposium of Applications and the Internet (SAINT 2001)* (Jan. 2001).
- [12] 川田, 森川, 青山: "マルチストリーム環境における協調型マルチキャストアーキテクチャ", 電子情報通信学会技術研究報告, SSE2000-245, IN2000-201 (Mar. 2001).