

マルチキャスト通信連続メディア再送制御方式 MRVTR とそのアプリケーションレベル QoS

布目 敏郎[†] 伊藤 健二^{†*} 田坂 修二[†] 石橋 豊[†]

A Retransmission-Based Error Recovery Scheme MRVTR for Multicast Communications of Continuous Media and its Application-Level QoS

Toshiro NUNOME[†], Kenji ITO^{†*}, Shuji TASAKA[†], and Yutaka ISHIBASHI[†]

あらまし 本論文では、QoS 非保証型ネットワーク上で、ライブ音声・ビデオをマルチキャスト通信する場合を対象とし、エンドツーエンド再送による誤り回復の一方式である MRVTR を提案している。MRVTR では、中規模のイントラネット環境を想定する。MRVTR は、再送トラフィックを抑制するために、ネットワーク負荷に応じて NACK の送信を制御する。また、各受信端末が、再送ストリームのためのマルチキャストグループへ動的に参加・離脱を行う方式を提案している。本論文では、アプリケーションレベル QoS の観点から提案方式の有効性を示す。まず、実験により、提案方式の実現可能性を確認するとともに基本性能を明らかにする。更に、提案方式が対象とする中規模のネットワークでのアプリケーションレベル QoS をシミュレーションにより評価する。キーワード マルチキャスト通信、再送制御、ライブメディア、QoS、メディア同期、実験

1. ま え が き

インターネットの急速な普及とネットワークの広帯域化に伴い、インターネット上で音声やビデオなどの連続メディアを扱う分散マルチメディアアプリケーションへの要求が高まっている。更に、企業などにおいて、インターネット技術を利用した LAN (Local Area Network) であるイントラネットが広く普及している。こちらにおいても、分散マルチメディアアプリケーションが急増している。

分散マルチメディアアプリケーションの例として、映画やライブコンサートのストリーミング配信やマルチメディア通信会議などがあげられる。これらのアプリケーションは、一対多や多対多の通信形態をとっており、ネットワーク資源を有効に利用するためにはマルチキャストの技術が有効である。

現在のインターネット及びイントラネットにおけるマルチキャスト通信には、IP マルチキャスト [1] の技

術が広く利用されている。これはベストエフォート型の配送方式を用いているので、信頼性を保証する機能をもっていない。このため、マルチメディア通信のサービス品質 (QoS: Quality of Service) が必ずしも保証されない。したがって、このような問題を解決するための QoS 制御技術が必要となる。

QoS 制御技術は、ネットワーク階層の観点から、アプリケーションレベル、エンドツーエンドレベル、ネットワークレベル、ノードレベルなどに分類できる [2]。

エンドツーエンドレベル、ネットワークレベル及びノードレベルでの QoS 制御技術として、パケット欠落や誤りを回復する誤り制御 [3] がある。その一つに、送信端末が欠落パケットを再送する ARQ (Automatic Repeat reQuest) がある。これまで、音声やビデオなどのリアルタイムメディア転送の際には、再送制御による誤り回復は得策ではないと考えられてきた。しかし、最近では、その有効性が示され、数多くのプロトコルが考案されている [3]。

マルチキャスト通信においては、再送制御を行うリライアブルマルチキャストプロトコルの研究が近年盛んに行われている [4]。これには、ファイル転送を対象とした RMTP (Reliable Multicast

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市
Department of Electrical and Computer Engineering,
Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan
^{*} 現在, 株式会社豊田中央研究所

Transport Protocol)[5] や、連続メディア転送に対応した STORM (Structure-Oriented Resilient Multicast)[6], LVMR (Layered Video Multicast with Retransmission)[7], RMTTP-II [8] などがあげられる。RMTTP は、ACK (ACKnowledgement) を用いることによって、送信端末がパケット欠落を検出し、再送を実現している (Sender-initiated Protocol)。一方、STORM と LVMR では、受信端末が NACK (Negative ACK) を用いて再送を要求し、欠落からの回復を図っている (Receiver-initiated Protocol)。RMTTP-II では、RMTTP がもつ ACK によるパケット欠落検出に、NACK による再送要求を組み合わせることにより、連続メディア転送に対応している。これらのプロトコルでは、送信端末にフィードバック情報が集中する feedback-implosion [3] の問題を解決している。その代表的な解決方法としては、ネットワークをいくつかのサブネットワークに分け、サブネットワークごとにフィードバック情報を処理する方法がある。

このように、リライアブルマルチキャストプロトコルに関しては、既に多くの研究が行われている。しかし、これらの研究のほとんどは、ネットワークレベル若しくはエンドツーエンドレベルの QoS, すなわち、パケットレベルのスループットや遅延・遅延揺らぎなどを評価対象としている。一方、メディアの最終的な受け手となるユーザの満足度は、これらより上位に位置するアプリケーションレベル QoS との相関が高い。しかし、従来の研究のなかに、アプリケーションレベル QoS に関する議論が行われているものはない。

音声やビデオといった連続メディアは、時間構造をもっている。したがって、連続メディアを扱うアプリケーションでは、その時間構造に関する QoS の評価が不可欠である。このため、本論文では、アプリケーションレベル QoS の一つとして、メディア同期品質 [2], [9] を考える。連続メディア転送に再送制御を適用すると、遅延揺らぎが増大する。このため、メディア同期問題の検討は不可欠となる。

メディア同期に関しても、既に数多くの研究が行われている。筆者らは以前に、VTR (Virtual-Time Rendering) メディア同期アルゴリズム [10] を考案し、蓄積メディアだけでなく、ライブメディアに対しても実験を行い、その性能を明らかにしてきた。また、マルチキャスト通信において、各端末の出力タイミングを同期させる端末間同期制御のために、VTR メディア同期アルゴリズムを拡張し、その有効性を確認して

いる [11]。しかし、これらの研究では、再送によるパケット欠落の回復は考慮されていなかった。

そこで、文献 [12] では、VTR アルゴリズムを拡張し、再送により誤り回復を行う RVTR (Retransmission with VTR) を提案している。文献 [12] では、簡単なネットワークを用いて音声・ビデオの転送実験を行うことにより、アプリケーションレベル QoS を評価し、その有効性を明らかにしている。更に、RVTR のインターネット環境における振舞いを調査し、アプリケーションレベル QoS の測定も行っている [13]。しかし、これらは、ユニキャスト通信を前提として考えており、マルチキャスト通信を考慮していない。したがって、RVTR をそのままマルチキャスト通信に適用すると、複数端末からの再送要求により、再送トラヒックが不必要に増加し、メディアの出力品質が大きく劣化するおそれがある。

そこで、本論文では、RVTR をマルチキャスト通信における問題に対処できるように拡張した MRVTR (Multicast based on RVTR)[14] を提案する。MRVTR では、中規模のイントラネット環境を想定する。また、MRVTR は、特別な中間ノードやルータを必要としないエンドツーエンドの制御方法を採用する。このため、既存のネットワークへの適用が容易である。本論文では、ビデオと音声を転送する場合を対象として、アプリケーションレベル QoS の観点から MRVTR の有効性を明らかにする。更に、他の受信端末の再送要求により生じる再送トラヒックの影響を大きく軽減するための一方式を提案する。この方式を再送スケリング方式と呼び、その有効性を確認する。

本論文では、まず、小規模ネットワークの実験により、提案方式の実現可能性を確認するとともに基本性能を明らかにする。更に、提案方式が対象としている中規模のネットワークでの QoS をシミュレーションにより評価する。

以下では、まず、RVTR をマルチキャスト通信に拡張した MRVTR を 2. で提案する。3. では、再送スケリング方式を導入する。更に、4. で QoS 評価方法を説明する。5. で実験結果とその考察を示し、6. でシミュレーション結果の考察を行う。

2. MRVTR

本章では、RVTR をマルチキャスト通信に適用できるように拡張した MRVTR を提案する。

まず、2.1 で文献 [12] の RVTR の概要を述べる。次に、2.2 では RVTR のマルチキャスト通信への拡張を説明する。

2.1 RVTR の概要

RVTR は、VTR アルゴリズム [10] をパケット欠落からの回復に対応できるように拡張し、エンドツーエンドの再送制御機能を付加したものである。本論文では、メディア発生源でリアルタイム入力された音声とビデオが、それぞれ独立したストリームとして転送され、メディア出力先で同期・出力される場合を考える。メディア同期制御は、メディアユニット（以下、MU と略記；音声パケットやビデオフレームに相当する）単位に行われる。このとき、メディア内同期誤差に敏感な音声をマスタメディアとし、ビデオをスレーブメディアとする。

VTR アルゴリズムは、受信端末に最初の MU が到着した際、遅延揺らぎを吸収するために、その最大値の大雑把な推定値 J_{\max} 秒の間バッファリングを行う。そして、負荷状況に応じて MU の目標出力時刻を変更することによって、バッファリング時間を動的に変化させる。ここで、目標出力時刻とは、受信端末が MU 出力の目標とする時刻を意味する。MU の到着が大きく遅れた場合は、ネットワーク遅延の揺らぎを吸収するために、バッファリング時間を増加させる。これは、目標出力時刻を遅らせることによって実現される。ただし、最大許容遅延 Δ_{a1} を定義して、遅延がこれを超えないように目標出力時刻を制御することによって、リアルタイム性を保持する。このため、MU が目標出力時刻よりも早く到着し、目標出力時刻が遅れている場合には、出力間隔を縮めることにより目標出力時刻を早める。目標出力時刻の変更は、マスタメディアである音声のみによって起動される。スレーブメディアは、マスタメディアと連動して同量の時間変更を行う。

拡張 VTR アルゴリズムは、再送のための時間を作るために、MU が遅れて到着した場合だけでなく、欠落した場合にも目標出力時刻を遅らせる。

RVTR は RTP/RTCP [15] 上に実装される。受信端末は、各 MU に付与されているシーケンス番号の不連続性により、欠落した MU を検出し、NACK を送信端末に返送する。欠落 MU の再送は、送信端末が、拡張 VTR アルゴリズムによって決定される受信端末での最大待ち時刻までに間に合うと判断した場合のみ行われ、MU 単位で再送される^(注1)。

2.2 マルチキャスト通信への拡張

MRVTR について、まず、フィードバック情報及び再送パケットの送信方法を説明する。本論文では、受信端末からのフィードバック情報については、文献 [16] の結果に基づいて、NACK をユニキャストで送信端末に返送する方法を用いる。更に、MU の再送については、全受信端末にマルチキャストする方法 [17] を使用する。

マルチキャスト通信に起こりうる問題として、feedback-implosion がある。これまでの多くの研究では、ネットワークを階層化し、サブネットワーク化することにより、この問題の解決を図っている。しかし、本論文ではエンドツーエンドでの制御方法を対象としているので、この方法は用いないこととする。また、これとは別の解決方法として、フィードバック情報を送出する時刻を分散させる方法 [18] や、複数のパケットに対するフィードバック情報を集約する方法 [5] が考えられる。しかし、これらの方法では、フィードバック情報に遅延を与えることになるため、リアルタイム性が要求されるアプリケーションには適さない。したがって、本論文では、エンドツーエンドで、NACK トラフィック量を制御する方法として、受信端末で再送パケットが間に合うか否かの判断をして、NACK を送信する手法 [7] を用いる。更に、再送トラフィック量を制御することも重要である。そこで、マルチキャスト通信への拡張機能は、NACK トラフィック量の軽減機能と再送トラフィック量の軽減機能の二つに分けられる。

2.2.1 NACK トラフィックの軽減

2.1 で述べたように、文献 [12] の RVTR では、処理の簡単のため、受信側での最大待ち時刻に間に合うか否かの推定を送信端末でのみ行っている。したがって、受信端末は NACK を送信しても間に合わない欠落 MU についても再送を要求するので、NACK トラフィックが不必要に増加するおそれがある。そこで、受信端末においても最大待ち時刻に間に合うか否かの推定を行うことにより、NACK 送信の是非を判断する。

受信端末が、一つのストリームの m ($= 1, 2, \dots$) 番目の MU を受信し、それより前に受信した最後の MU

(注1): 本論文では、RTP を使用しているため、1 ビデオ MU は複数の RTP パケットに分割される。そこで、RTP パケット単位の再送を行うことにより、更に性能が向上すると考えられる。しかし、本論文の実験環境において、実際に RTP パケットの欠落状況を調査した結果、RTP パケットが連続して欠落する機会が多いことを確認した。したがって、本論文では、RTP パケット単位の再送ではなく、実装の簡単な MU 単位再送で十分であると考えた。

番号を k ($k < m$) とする．ここで， k と $m-1$ が異なる場合，受信端末は $k+1$ から $m-1$ 番目の MU が欠落したと判定する．音声メディアストリーム 1，ビデオメディアストリーム 2 とし， $A_m^{(j)}$ ， $P_m^{(j)}$ ， $T_m^{(j)}$ ， $t_m^{(j)}$ を，メディアストリーム j ($= 1, 2$) の m 番目の MU の，それぞれ，到着時刻，送信時刻，タイムスタンプ及び目標出力時刻とする．また，受信端末における $t_m^{(j)}$ の推定値を $\hat{t}_m^{(j)}$ で表し，ラウンドトリップ時間の最小値を R_{\min} で表す．更に， m 番目の MU を受信する直前に出力された MU の番号を h ($h \leq k$) とする．このとき，これらは次式で与えられる．

$$R_{\min} \leftarrow \min((A_m^{(j)} - P_m^{(j)}) \times 2, R_{\min}) \quad (1)$$

$$\hat{t}_m^{(j)} = t_h^{(j)} - T_h^{(j)} + T_m^{(j)} \quad (2)$$

更に， $Interval$ を新しい MU の発生間隔の推定値とする．推定の対象としている MU を n ($k+1 \leq n \leq m-1$) 番目の MU と仮定する．このとき， $k+1$ 番目から $m-1$ 番目の MU まで順に，次式が満たされているか否かを判断する．

$$A_m^{(j)} + R_{\min} \leq \hat{t}_m^{(j)} - (m-n-1) \times Interval \\ (n = k+1, \dots, m-1) \quad (3)$$

式 (3) の左辺は，再送 MU の到着時刻の推定値を示している．一方，右辺は $n+1$ 番目の MU の目標出力時刻の推定値を表しており，これを n 番目の MU の最大待ち時刻としている．したがって，式 (3) は，最大待ち時刻に間に合うか否かの判断をしている．ビデオの時間的解像度制御などを適用すると，新しい MU の発生間隔は動的に変更され，一定値にはならない．そこで，この場合，受信端末は以下の式により，新しい MU の発生間隔を推定する．

$$Interval = (T_m^{(j)} - T_k^{(j)}) / (m-k) \quad (4)$$

式 (4) は，MU 間隔が変動しない場合には，連続する二つの MU のタイムスタンプの差 $\sigma^{(j)} \triangleq T_m^{(j)} - T_{m-1}^{(j)}$ ($m = 1, 2, \dots$) と等しくなる．

式 (3) を満たす n が存在する場合は， n から $m-1$ 番目の MU は再送が間に合う可能性があると考えられる．そして，これらの MU 番号を NACK の情報に含める．

2.2.2 再送トラヒックの軽減 (NACK 送信制御)

本項では，受信端末がネットワーク状態を監視し，再送が間に合うと判断した場合でも NACK の送信を抑制する NACK 送信制御を提案する．前項の NACK

トラヒック量の制御では，NACK トラヒックが送信端末に集中する量を軽減することを目的としているのに対して，NACK 送信制御は，更に再送トラヒック量を制御することを目的としている．

NACK 送信制御では，軽負荷時と重負荷時において，各受信端末が NACK の送信をしないようにする．これは，軽負荷時には，受信状態が良好であるためパケットの欠落が少なく，欠落パケットを回復しなくても，出力品質を高く保つことができるためである．一方，重負荷時には，欠落するパケット数が多く，欠落からの回復が困難であると考えられる．また，軽負荷ネットワークの端末へ悪影響を与えるのを避けるためでもある．特に，本論文で扱うような，音声よりもビデオのビットレートが大きい場合には，ビデオトラヒックを制御することが必要となる．そこで，ビデオの再送トラヒックを制御することにより，音声のメディア同期品質を向上させる．

この制御では，各受信端末がネットワークのふくそう状態を推定して NACK を送信するか否かを決定する．本論文では，欠落したパケットの再送トラヒック量を制御する方式を考えるため，初回送信 MU 欠落率を用いてネットワーク状態を推定する．ここで，初回送信 MU 欠落率は，初回送信 MU について，5 秒間^{注2)}で欠落を検出した MU 数の本来受信すべき MU 数に対する割合である．これをネットワーク状態の推定に用いるのは，アプリケーションレベル QoS に応じた制御を行うためである．また，実装の簡単のためでもある．この推定は，ビデオストリームについてのみ行われる．

ネットワーク状態を，初回送信 MU 欠落率に基づいて，CONGESTED，LOADED，UNLOADED の三つに分類する．そして，ネットワーク状態及び NACK を送信するか否かは，二つのしきい値 (L_{low} ， L_{high}) を用いて以下の方法により判定される．

- $L_{\text{low}} \leq$ 初回送信 MU 欠落率 $< L_{\text{high}}$
ネットワーク状態：LOADED
NACK の送信は，2.2.1 の方法に基づいて行われる
- 初回送信 MU 欠落率 $< L_{\text{low}}$ または $L_{\text{high}} \leq$ 初回送信 MU 欠落率
ネットワーク状態：UNLOADED または

(注2): これは，RTCP パケット送出間隔の標準値が 5 秒であることを合わせている．

CONGESTED

NACK の送信は行われない

3. 再送スケーリング方式

再送スケーリング方式では、一つのビデオストリームを初回送信 MU ストリームと再送 MU ストリームの二つのストリームに分割し、それぞれ、異なるマルチキャストグループに割り当てる。各受信端末は、ネットワーク状態によって、動的にマルチキャストグループへの参加・離脱を行う。文献 [19] でも、同様の方式が提案されているが、連続メディアを対象としていない。そこで、本論文では、MRVTR の特徴を考慮した再送スケーリング方式を提案する。ネットワーク状態の推定には、2.2.2 の NACK 送信制御と同様に、初回送信 MU 欠落率を用いる。

マルチキャストグループへの参加・離脱を行う際には、ルータのルーティングテーブルを書き換えるための処理時間が発生する。このため、参加・離脱に要する時間が、メディア同期品質に及ぼす影響を考慮する必要がある。文献 [20] では、MPEG ビデオを対象にして、階層化マルチキャストの応答特性を調査している。これによると、ルーティングプロトコルとして PIM-SM (Protocol Independent Multicast-Sparse Mode) [21]、グループ管理のために IGMPv2 (Internet Group Management Protocol, version 2) [22] を使用した場合、参加に必要とする時間は、約 0.07 ~ 約 0.1 秒である。しかし、同じ環境において離脱に要する時間は、約 3.6 ~ 約 9.3 秒と時間がかかる。ここで、離脱する場合のほうがより長い時間を要するのは、ルータは、受信端末からの離脱信号を受信した後、一定時間待ってからルーティングテーブルを変更するためである。したがって、ネットワーク状態の判別を頻繁に行くと参加・離脱を繰り返してしまう可能性がある。そこで、5 秒間隔で、定期的にネットワーク状態の判別をする。

NACK 送信制御では、各受信端末がネットワーク状態を CONGESTED, LOADED, UNLOADED の三つの状態のいずれかであると判定する。そして、LOADED と判定した場合のみ、欠落ビデオ MU に対する NACK を送信端末に返送することができる。したがって、このネットワーク状態の場合は、再送 MU を受信する必要がある。そこで、LOADED の場合のみ再送 MU ストリームのためのマルチキャストグループに参加し、他の状態の場合には離脱する。

4. QoS 評価方法

本論文では、アプリケーションレベル QoS の一つとして、メディア同期品質に注目している。このため、連続メディアの時間的構造の観点から、再送制御方式の有効性を明らかにする必要がある。このとき、ネットワーク遅延や干渉トラフィックだけでなく、端末やルータでの処理遅延なども QoS に影響を及ぼす重要な要因となる。この場合の QoS 評価方法には、シミュレーションと実験とが考えられる。

これまでのマルチキャスト通信に関する多くの研究では、シミュレーション手法による QoS 評価がほとんどである。しかし、シミュレーションではすべての要因を含めた評価は難しい。そこで、本論文では、まず、受信端末数を 2 とした簡単なネットワークを用いた実験により、提案方式の実現可能性を示すとともに基礎的な性能を明らかにする。

一方で、端末数が更に多い場合の検討も必要である。しかし、これを実験により行うことは、実験機材の都合や実施の複雑さなどのため、容易ではない。そのため、本論文では、この場合の QoS 評価にはシミュレーションを使用する。

以下では、4.1 で、実験におけるシステム構成を説明し、4.2 に、シミュレーションにおけるシステム構成を示す。更に、4.3 では、本論文で使用する QoS 評価尺度について述べる。

4.1 実験システム構成

実験では、図 1 のように 7 台のワークステーション (以下、WS と略記) を、三つのルータ (Cisco Systems 社製 2514) と一つのデータリンクシミュレータ (ADTECH SX/12) からなるネットワークに接続する。メディア発生源の WS5 から、メディア出力先の WS3 (受信端末 1) と WS6 (受信端末 2) に、JPEG

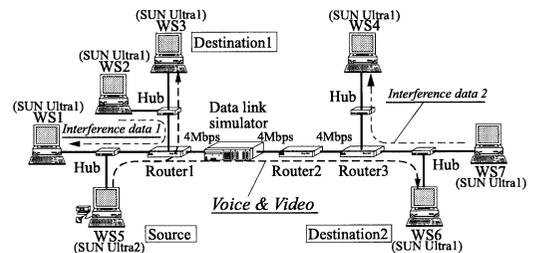


図 1 実験システム構成

Fig. 1 Configuration of the experimental system.

ビデオと音声をマルチキャスト送信する。マルチキャスト通信は IP マルチキャストにより実現され、トランスポートプロトコルとして RTP/UDP を用いる。各ルータは、IGMPv2 を用いており、ルーティングプロトコルとしては、複雑なルーティングプロトコルを用いたときの実現可能性を確認するために、PIM-SM を使用する。WS5 は、ビデオボード (Parallax Graphics 社製 PowerVideo) を搭載しており、ビデオデッキにより入力された音声とビデオ (表 1) をリアルタイムに符号化し送信する。

干渉トラヒックとして、WS2 から WS1 (負荷データ 1), WS7 から WS4 (負荷データ 2) に向けて負荷データの転送を行う。この送信には UDP を用いて、固定長 (1,472 バイト) のメッセージを指数分布に従う間隔で送信する。この指数分布の平均を変化させることによって、ネットワークにかかる負荷の量を調節する。また、送信した負荷データの総ビット数を送信にかかった時間で割った値を平均負荷とする。なお、本論文の実験における負荷データ量は、UDP レベルで測定されるものとする。

本論文の実験では、データリンクシミュレータによる付加遅延の値を 0 ms とする。これは、MRVTR では、イントラネット環境での利用を想定しているためである。なお、本論文には示さないが、0~80 ms までの範囲で付加遅延を変更した場合の実験も行っている。この結果、付加遅延が 40 ms 程度の大きさまでは、提案方式が有効に動作することを確認している。

本論文における実験では、NACK 送信制御及び再送スケール方式で使用する初回送信 MU 欠落率に対するしきい値を、 $L_{low} = 5\%$, $L_{high} = 10\%$ とする。これらの値は、 L_{low} と L_{high} について大雑把に選択した次の 5 通りの組合せを用いて予備実験を行った結果、最も優れた品質を示していた (2) を採

用したものである。(1) $L_{low} = 0\%$, $L_{high} = 0\%$, (2) $L_{low} = 5\%$, $L_{high} = 10\%$, (3) $L_{low} = 5\%$, $L_{high} = 20\%$, (4) $L_{low} = 5\%$, $L_{high} = 30\%$, (5) $L_{low} = 0\%$, $L_{high} = 100\%$ 。なお、これら二つのしきい値の最適値は、ネットワークの負荷状態やメディアの種類によって変化する。本論文の予備実験では、大雑把な選択による限られた組合せを用いていることから、これら以外にも適したしきい値が存在しうる。

また、初期バッファリング時間 J_{max} 及び最大許容遅延 Δ_{al} は、それぞれ 100, 300 ms とする。それ以外の RVTR に関するしきい値は、文献 [12] と同じ値を使用する。

4.2 シミュレーションシステム構成

本論文では、中規模なイントラネット環境における MRVTR 及び再送スケール方式のアプリケーションレベル QoS を評価するために、シミュレーションを用いる。シミュレーションには、ns (Network Simulator) [24] を使用する。

本論文では、1 台のメディア発生源端末に対してメディア出力先が 16 端末存在する場合を考える^(注3)。そのネットワーク構成を図 2 に示す。

図 2 における、 R_k ($k = 1, 2, \dots, 16$) は、ルータノードを表している。また、MS はメディア発生源端末ノードであり、MR l ($l = 1, 2, \dots, 16$) はメディア出力先端末ノードである。更に、LS1, LS2 を負荷送信端末ノードとし、LR1, LR2 を負荷受信端末ノードとする。各ルータノード間は、伝送速度 2Mbps, 伝送遅延 1ms の全二重回線で接続される。また、すべ

表 1 実験における音声とビデオの仕様
Table 1 Specifications of the voice and video in experiment.

項目	音声	ビデオ
符号化方式	ITU-T 勧告 G.711 μ -law	JPEG 符号化 圧縮方式
表示サイズ [ピクセル]	—	320 × 240
平均 MU サイズ [バイト]	400	3,883
平均 MU レート [MU/s]	—	20.0
平均 MU 間隔 [ms]	—	50.0
平均ビットレート [kbps]	64.0	621.2
測定時間 [秒]	—	120.0

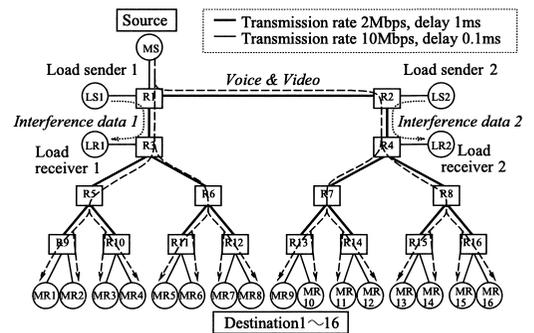


図 2 シミュレーションにおけるネットワーク構成
Fig. 2 Network configuration in simulation.

(注3): 1 台のメディア発生源端末に対して、メディア出力先を 2 端末とした場合についてもシミュレーションを行った。その結果は、実験における結果と同様の傾向であった。

てのルータノード・端末ノード間の接続については、伝送速度 10 Mbps、伝送遅延 0.1 ms の全二重回線としている。ノード間を接続しているすべてのリンクは、その入口に FIFO (First-In First-Out) の待ち行列をもつ。この最大待ち行列長は IP データグラム 8 個分としている。

メディア発生源端末ノード MS は、音声とビデオを、メディア出力先端末ノード MR1 へ、MU を単位としてマルチキャスト配信する。ns では、PIM-SM に相当するマルチキャストプロトコルである Centralized Multicast が用意されている。しかし、このプロトコルは、参加・離脱信号に関する実装が十分ではない。このため、シミュレーションでは、マルチキャストルーティングプロトコルとして、ns に用意されている Dense Mode を使用する。これは、PIM-DM [25] に近いものである。Dense Mode におけるパラメータである prune メッセージのタイマの値は 500 ms とする^(注4)。Dense Mode では、このタイマがタイムアウトすると、ルーティングテーブルを作り直す。

本論文のシミュレーションの際に想定した音声及びビデオの仕様を表 2 に示す。ここでは、4.1 の実験システムに比べてネットワーク規模を拡大していることから、ビデオの平均ビットレートを、表 1 のそれより低く設定する。シミュレーションには、実際の音声とビデオから作成されたトレースファイルを使用する。音声の各 MU は 400 バイトの固定長とし、ビデオ MU は長さが可変となる。

音声とビデオへの干渉トラヒックとして、負荷送信端末ノード LS1、LS2 から、それぞれ、負荷受信端末ノード LR1、LR2 に向けて負荷データの転送を行う。負荷送信端末ノードは、1,500 バイトの IP データグラムを指数分布に従う間隔で送信する。ここで、端末 LS1 が送信する負荷を負荷データ 1、端末 LS2 が送

信する負荷を負荷データ 2 と呼ぶ。なお、本論文のシミュレーションにおける負荷データ量は、IP レベルで測定されるため、IP ヘッダの大きさが含まれる。

シミュレーションでは、NACK 送信制御、再送スケーリング方式、及び RVTR に関する各種しきい値を 4.1 と同じ値に設定する。シミュレーションにおいても、実験の場合と同様、五つの L_{low} 、 L_{high} の組合せを用いた予備検討を行った結果、(1) $L_{low} = 0\%$ 、 $L_{high} = 0\%$ または (2) $L_{low} = 5\%$ 、 $L_{high} = 10\%$ とした場合の品質が優れていた。そのため、本論文では、実験の場合と同じ値を採用した。ただし、ネットワークにかかる負荷の大きさによっては、(1) の値を用いたときの品質が、主観品質には影響のない範囲で (2) の場合のそれを上回ることがある。したがって、しきい値の最適化については、更なる検討が必要である。

4.3 評価尺度

提案方式のアプリケーションレベル QoS を評価するために、メディア同期品質やアプリケーションレベルの転送効率を表す評価尺度が必要となる。

メディア内同期品質を示す尺度には、MU の出力間隔の変動係数を用いる。これは、MU の出力間隔の標準偏差を平均出力間隔で割った値と定義される。本論文で扱う周期メディアでは、この値が小さいほどメディアの出力が滑らかであり、メディア内同期品質が高いといえる。

メディア間同期品質についても測定したが、本実験の結果では、メディア間同期品質は常に良好であったため、この測定結果については省略する。このことは、ライブメディアの特性である [23]。

転送効率の評価には、平均 MU レート及び MU 欠落率を用いる。平均 MU レートとは、各メディア出力先で単位時間 [秒] 当りに出力される MU 数の平均である。また、MU 欠落率は、最大待ち時刻までに到着が間に合わず出力されなかった MU が全体の MU に占める割合を示している。

5. 実験結果と考察

本章では、まず、MRVTR の実現可能性を示すため、QoS 評価実験を行った結果を示す。次に、MRVTR の性能を更に改善する再送スケーリング方式の QoS 評価実験の結果を示す。

表 2 シミュレーションにおける音声とビデオの仕様
Table 2 Specifications of the voice and video in simulation.

項目	音声	ビデオ
符号化方式	ITU-T 勧告 G.711 μ -law	MPEG1 符号 化圧縮方式
ピクチャパターン	—	Iピクチャのみ
表示サイズ [ピクセル]	—	176 × 128
平均 MU サイズ [バイト]	400	1,905
平均 MU レート [MU/s]	—	20.0
平均 MU 間隔 [ms]	—	50.0
平均ビットレート [kbps]	64.0	305.0
測定時間 [秒]	—	90.0

(注4): これは ns の Dense Mode における標準の設定値である。

5.1 MRVTR の QoS 評価実験

実験では、まず、MRVTR の有効性を示すために、メディア同期制御、再送制御、マルチキャスト通信への拡張の有無による組合せからなる 4 方式の QoS 比較を行う。

表 3 において、NC (No Control) は再送制御及びメディア同期制御を行わない方式を示す。VTR は文献 [12] に示される拡張 VTR メディア同期アルゴリズムによるメディア同期制御のみを行う方式を示している。つまり、この方式では、再送制御は行われない。RVTR は文献 [12] にある RVTR をそのままマルチキャスト通信に適用したものである。この方式は、MU の再送をマルチキャストにより行うものの、2.2 で説明している NACK トラフィック量の軽減機能及び NACK 送信制御を用いない。したがって、RVTR は feedback-implosion などのマルチキャスト通信における問題に対応していない。一方、MRVTR は、そのような問題に対処するために、2.2 の拡張機能をすべて適用した方式を表す。

マルチキャスト環境では、様々なネットワーク状態が考えられるが、本論文における実験では、両受信端末でのネットワーク負荷が等しい場合を想定する^(注5)。これは、負荷の影響を受ける端末が多い環境における MRVTR の有効性を確認するためである。図 1 の負荷データ 1 及び負荷データ 2 については、平均負荷を 5.5~8.0 Mbps まで同じように変化させる。

平均負荷に対する音声の出力間隔の変動係数を図 3 に示し、音声の平均 MU レートを図 4 に示す。これらは、受信端末 1 における測定結果である。

図 3 より、平均負荷が約 6.0 Mbps 以上の範囲において、再送制御を行う MRVTR と RVTR の音声の出力間隔の変動係数が VTR のそれよりも小さくなっていることがわかる。このことから、その負荷領域においては、再送制御が有効に働いているといえる。更に、平均負荷が約 7.0 Mbps 以上の範囲では、MRVTR の変動係数が、RVTR のそれよりも小さくなっている。

表 3 QoS 比較を行う 4 方式
Table 3 Four schemes for QoS comparison.

方式	メディア同期制御	再送制御	マルチキャスト拡張
NC	無	無	無
VTR	有	無	無
RVTR	有	有	無
MRVTR	有	有	有

これは、欠落したビデオ MU に対する NACK の送信制御を行うことによって、ビデオ MU の再送トラフィックをおさえ、音声 MU の欠落を防いでいるためである。

図 4 では、平均負荷が 6.0~7.7 Mbps 程度するとき、再送制御を行う MRVTR と RVTR の MU レートは、再送制御を行わない VTR のそれよりも大きくなっている。これは、音声 MU の再送により、出力される MU の数が多くなっているためである。更に、平均負荷が約 7.0 Mbps 以上になると、RVTR よりも MRVTR の MU レートが大きくなっている。これは、NACK 送信制御によりビデオの再送量が減少し、再送トラ

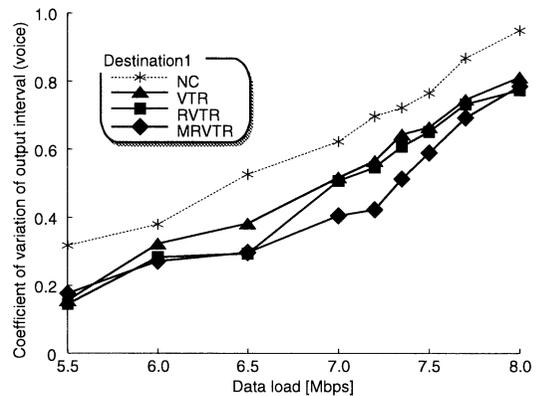


図 3 音声の出力間隔の変動係数 (実験結果)
Fig. 3 Coefficient of variation of output interval for voice (experimental result).

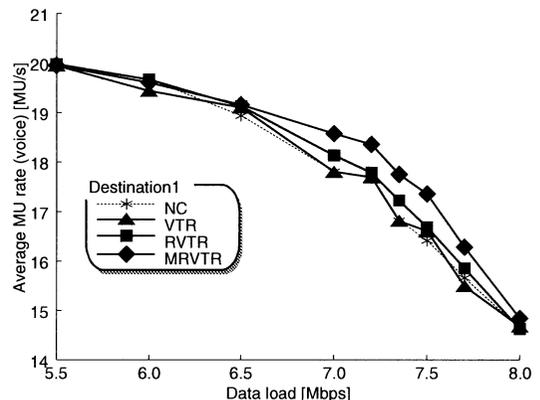


図 4 音声の平均 MU レート (実験結果)
Fig. 4 Average MU rate for voice (experimental result).

(注5): ネットワーク負荷が異なる場合の実験結果は、文献 [14] に示している。

ヒックの影響を軽減しているためである。

なお、ビデオについても同様に測定を行ったが、四つの方式間に差はほとんど見られなかった。

主観評価では、ビデオに関しては、MRVTR、RVTR、VTRの3方式間に差は感じられなかった。一方、音声については、平均負荷が約7.3Mbps以上のとき、3方式間に差が認められた。VTR、RVTR、MRVTRの順に途切れの発生頻度が少なくなり、MRVTRの音声出力が最も良好であった。

更に、受信端末2についても測定した結果、全体的に受信端末1よりも品質が低下していたが、方式間の関係については、同様の結果であった。

5.2 再送スケール方式の性能評価実験

前節の結果から、マルチキャスト通信に対応できるMRVTRの実現可能性と有効性を確認した。しかし、MRVTRでは、マルチキャスト再送を用いているため、他の受信端末の再送要求により生じる再送トラヒックの影響を大きく軽減することができない。そこで、本節では、この問題点を解決する再送スケール方式の品質を実験により評価する。

本節で比較対象とする方式は、前節で最も優れた品質を示していたMRVTRと、それに再送スケール方式を適用した方式であるMRVTR/RSの2方式とする。

実験では、負荷データ1の平均負荷を6.5Mbpsと固定し、負荷データ2のそれを6.5~8.0Mbpsまで変化させた。負荷データ2の平均負荷に対する受信端末2での音声出力間隔の変動係数を図5に示す。

図5から、今回測定したすべての平均負荷において、

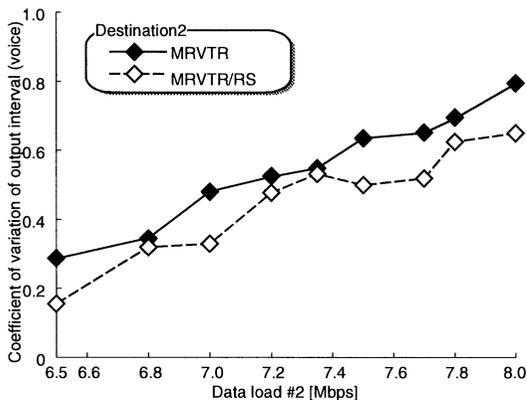


図5 音声の出力間隔の変動係数(再送スケール方式)

Fig. 5 Coefficient of variation of output interval for voice (the retransmission scaling scheme).

MRVTRの変動係数よりも、MRVTR/RSのそのほうが小さい値を示していることがわかる。これは、再送スケール方式によって、受信端末2が再送MUストリームのマルチキャストグループから離脱し、受信端末1が要求した再送ビデオMUトラヒックの影響を軽減しているためである。したがって、この負荷領域では、再送スケール方式を適用することによって、音声出力を滑かに保つことができる。

なお、ビデオの出力間隔の変動係数についても測定した。その結果、音声と同等の結果が得られた。

以上の結果より、提案方式は実現可能であり、2端末の場合には有効に動作することがわかった。

6. シミュレーション結果と考察

本章では、4.2で述べた16端末に対するシミュレーション結果を示す。

シミュレーションでは、5.の実験で扱った五つの方式に、RVTRに再送スケール方式を適用したRVTR/RSを加えて、計6方式を扱う。

図2の負荷データ1について、平均負荷を1.0Mbpsに固定する。一方、負荷データ2では、平均負荷を1.0~1.9Mbpsまで変化させる。

本論文におけるシミュレーションでは、一つの負荷の設定値に対して10回の測定を行っている。以下に示すシミュレーション結果は、10個の測定値の平均値である。また、これら10個の測定値から算出した95%信頼区間も同時に示している。

図2のネットワーク構成では、端末MR1~端末MR8と、端末MR9~端末MR16とは、それぞれ同じ結果を示す。この理由は次のとおりである。ルータノードR3以下のノードには、ボトルネックリンクが存在しない。また、ルータノードR3より下流に存在する端末MR1~端末MR8は、等しいホップ数でこのルータに接続されている。したがって、これらの端末では、端末間の品質差が発生しない。これと同様に、端末MR9~端末MR16の間にも品質差は存在しない。このことから、本論文では、端末MR1と端末MR9の二つの端末におけるアプリケーションレベルQoSに注目する。

以下では、まず、負荷データの影響が大きい端末MR9の結果について考察する。次に、端末MR1での結果について議論する。

6.1 端末MR9における結果

図6~図10にかけて、端末MR9におけるシミュ

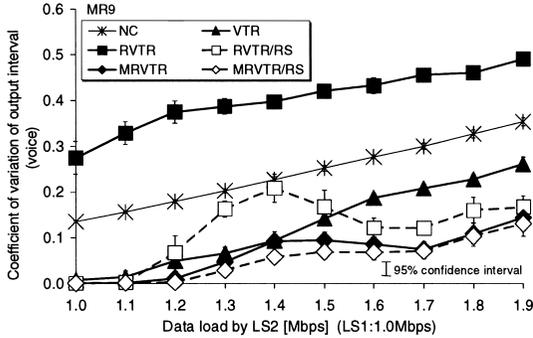


図 6 音声の出力間隔の変動係数 (端末 MR9)

Fig. 6 Coefficient of variation of output interval for voice (Terminal MR9).

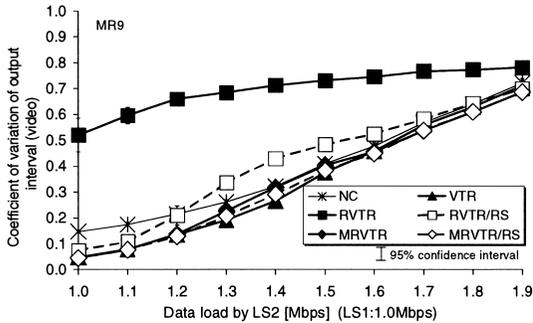


図 7 ビデオの出力間隔の変動係数 (端末 MR9)

Fig. 7 Coefficient of variation of output interval for video (Terminal MR9).

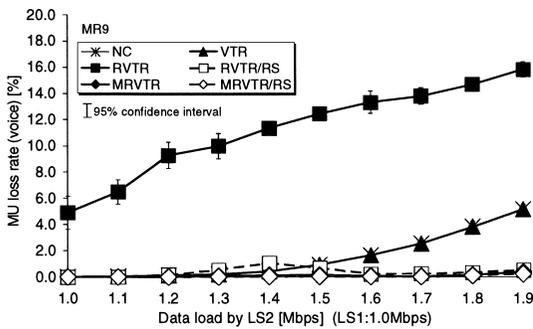


図 8 音声 MU 欠落率 (端末 MR9)

Fig. 8 MU loss rate for voice (Terminal MR9).

レーション結果を示す。

図 6 は、負荷データ 2 の平均負荷に対する音声の出力間隔の変動係数を示している。図 7 に、図 6 と同様にしてビデオの出力間隔の変動係数を示す。また、図 8、図 9 は、負荷データ 2 の平均負荷に対す

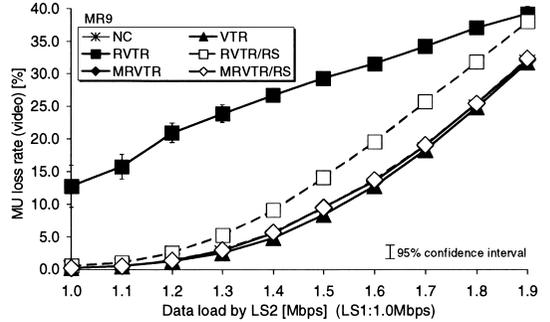


図 9 ビデオ MU 欠落率 (端末 MR9)

Fig. 9 MU loss rate for video (Terminal MR9).

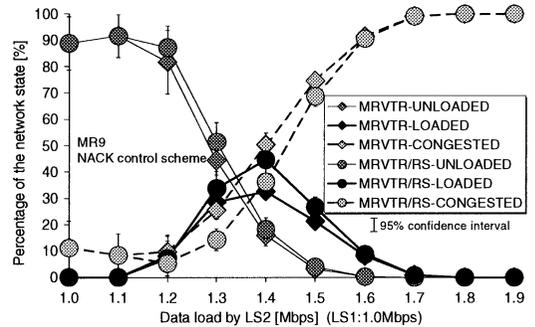


図 10 NACK 送信制御によるネットワーク状態の判定割合 (端末 MR9)

Fig. 10 Percentage of the network state judged by the NACK control scheme (Terminal MR9).

る、それぞれ、音声、ビデオの MU 欠落率を表している。更に、図 10 には、NACK 送信制御を用いる二つの方式 MRVTR 及び MRVTR/RS について、MU 欠落検出時におけるネットワーク状態の判定割合を示す。これは、1 台のメディア出力先端末が検出したすべての MU 欠落に対して、その検出時に、メディア出力先端末が三つのネットワーク状態 CONGESTED, LOADED 及び UNLOADED のうちの状態と判定したかの割合を示すものである。

図 6 から、負荷データ 2 の平均負荷が約 1.5Mbps を超える領域において、MRVTR の音声の出力間隔の変動係数が、VTR のそれに比べて小さくなっていることがわかる。これは、MRVTR では、NACK 送信制御により、ビデオ MU の再送が少なくなることから、音声 MU を再送するための帯域を確保できるためである。これにより、MRVTR では、音声 MU を効率的に回復できる。このことは、図 8 の音声 MU 欠

落率において、MRVTR 及び MRVTR/RS の欠落率が 0%に近い値となっていることからわかる。

一方、図 6 に示されるすべての負荷の領域において、RVTR の音声の出力間隔の変動係数は、他方式のそれよりも大きくなっている。この理由は次のとおりである。RVTR において、メディア出力先は MU の欠落を検出すると、メディア発生源に向けて NACK パケットを送信する。本論文で用いたネットワーク構成では、8 端末が同時にパケット欠落を検出するため、8 個の NACK パケットが連続してメディア発生源に到着する。これを受け取ったメディア発生源では、要求された再送 MU がその出力に間に合うかどうかのみを判定し、NACK の重複は判断しない。このため、同一の再送 MU が八つ連続してメディア発生源から送信される。この再送 MU が、初回送信 MU の転送の妨げとなってしまうため、RVTR では出力間隔の変動係数が大きくなる。

なお、RVTR において、初回送信音声 MU が欠落する確率は、負荷データ 2 の平均負荷が 1.0 Mbps のときに約 19%、1.9 Mbps のときに約 33%であった。一方、他方式では、それが 10%を超えることはなかった。

また、図 6 では、今回調べたほぼすべての負荷の範囲で、MRVTR/RS の音声の出力間隔の変動係数は、他方式と同等あるいはそれより小さな値をとっている。これは、MRVTR/RS では、NACK 送信制御に加えて再送スケーリング方式を採用しているためである。これにより、ビデオ再送 MU によるトラヒックの影響を MRVTR 以上に受けにくくなる。

更に、図 6 から、RVTR/RS の音声の出力間隔の変動係数は、負荷データ 2 の平均負荷が 1.4 Mbps 程度のときに最も大きな値をとっていることがわかる。これは、RVTR/RS では、この負荷状態のときに、再送 MU のためのマルチキャストグループに参加するためである。これにより、再送トラヒックが増えるため、初回送信 MU の転送が妨げられてしまう。

図 7 から、今回調べたすべての負荷の範囲で、RVTR のビデオの出力間隔の変動係数は、他方式のそれに比べて大きな値となっていることがわかる。これは、音声の場合と同様の理由による。図 7 において、RVTR/RS のビデオの出力間隔の変動係数が、RVTR のそれに比べて小さくなっているのは、RVTR/RS では、再送スケーリング方式により、初回送信 MU の欠落が多く発生するときには、ビデオ再送 MU のためのマルチキャストグループに参加しないためである。この場合には、

ルータノード R2・R4 間に、RVTR の場合ほどはビデオの再送 MU が流れないことから、初回送信 MU に対する干渉トラヒックが RVTR の場合に比べて少なくなる。

図 9 では、図に示されるすべての負荷領域で、RVTR/RS のビデオ MU 欠落率が、RVTR のそれに次いで高くなっている。これは、ns 上のマルチキャストルーティングプロトコルである Dense Mode では、prune メッセージのタイマの設定値である 500 ms ごとに、ルーティングテーブルを作り直すからである。ルーティングテーブル更新時には、ルータは、マルチキャストグループに含まれるパケットをすべての下流ノードにブロードキャストする。そして、ルータは、そのパケットを必要としないノードが送信する prune メッセージにより、そのノードをルーティングテーブルから削除し最適化する。RVTR/RS では、このときブロードキャストされるパケットが干渉トラヒックとなるため、MU 欠落率が高くなる。

また、図 9 からは、今回調べたすべての負荷領域において、再送制御を行わない NC 及び VTR のビデオの MU 欠落率が、他方式のそれと同等かそれより小さくなっていることがわかる。このことから、ネットワーク状態によっては、MU の再送を行わないことが、ビデオ品質の面で有利に働くということが出来る。

図 10 から、負荷データ 2 の平均負荷がおおよそ 1.2~1.6 Mbps 程度までの範囲で、MRVTR 及び MRVTR/RS は、ネットワーク状態を LOADED と判定し、欠落ビデオ MU に対する NACK を送信することがわかる。また、LOADED と判定される割合は、MRVTR、MRVTR/RS とともに、負荷データ 2 の平均負荷が 1.4 Mbps あたりのときに最大となっている。一方、負荷データ 2 の平均負荷が 1.7 Mbps 程度以上のときには、MRVTR 及び MRVTR/RS のいずれも、ネットワーク状態をほぼ常に CONGESTED と判定していることがわかる。また、MRVTR と MRVTR/RS とを比較すると、負荷データ 2 の平均負荷が約 1.2~1.5 Mbps あたりまでの範囲で、MRVTR/RS の CONGESTED と判定される割合は、MRVTR のそれに比べて小さくなっている。これは、MRVTR/RS では再送スケーリング方式を併用していることから、不必要な再送トラヒックを MRVTR に比べて更に削減できるためである。

一方、MRVTR と RVTR について、各シミュレーション期間において、初回送信されるビデオトラヒッ

量(オリジナルのビデオ情報量)と、再送ビデオトラフィックの発生量を調査した。その結果、負荷データ2の平均負荷が1.4Mbps程度以上の領域で、RVTRでは、初回送信されるビデオトラフィックに対して約10倍ものビデオ再送トラフィックが発生することがわかった。一方で、MRVTRにおいては、負荷データ2の平均負荷が1.4Mbps程度の場合に、最もビデオ再送トラフィックが多くなり、その量は初回送信されるビデオトラフィックの1/4程度であった。また、MRVTRでは、図10からネットワーク状態がLOADEDと判定されることがほとんどないといえる、負荷データ2の平均負荷が約1.1Mbps以下若しくは1.7Mbps程度以上の範囲で、ビデオ再送トラフィックはほとんど流れていなかった。これらのことから、MRVTRは、RVTRに比べてビデオ再送トラフィックの発生を大幅におさえることができているといえる。

6.2 端末MR1における結果

図11は、負荷データ2の平均負荷に対する端末MR1における音声の出力間隔の変動係数を示しており、図12は、ビデオのそれを示している。

図11、図12から、今回調べたすべての負荷の範囲で、RVTRの音声及びビデオの出力間隔の変動係数が、他方式のそれに比べて大きくなっていることがわかる。これは、RVTRでは、負荷の影響が大きい端末MR9~端末MR16によって送出されたNACKパケットに対する再送MUの影響を受けるためである。一方、RVTR/RSでは、端末MR1は置かれている負荷状態においては、再送のためのマルチキャストグループに参加しないことから、そのような再送MUの影響を小さくできる。

更に、図11では、今回測定したすべての負荷の範囲で、VTR、MRVTR、MRVTR/RSの音声の出力間隔の変動係数は、ほぼ0となっている。これは、MRVTR及びMRVTR/RSでは、音声の出力品質に影響するほどには再送MUが発生しないためである。また、VTRについては、端末MR1の負荷状態では、初回送信音声MUの欠落がほとんど発生しないことによる。

図12では、負荷データ2の平均負荷が1.2Mbps程度を超える領域で、MRVTR及びMRVTR/RSのビデオの出力間隔の変動係数が、VTRのそれに比べてやや大きくなっている^(注6)。この理由を説明する。MRVTRにおいて、このような負荷状態では、端末MR9~端末MR16でビデオMUの欠落が発生する。このこと

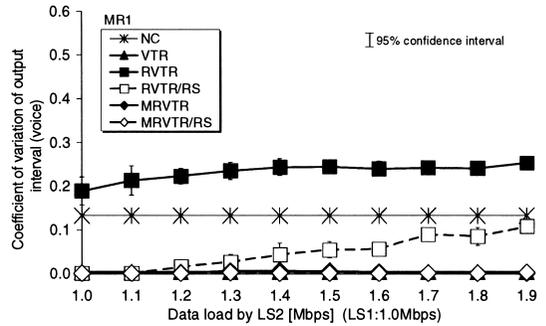


図11 音声の出力間隔の変動係数(端末MR1)
Fig. 11 Coefficient of variation of output interval for voice (Terminal MR1).

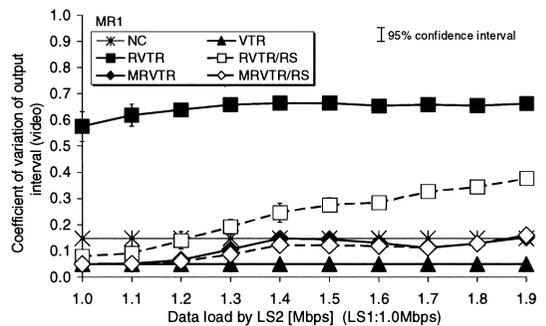


図12 ビデオの出力間隔の変動係数(端末MR1)
Fig. 12 Coefficient of variation of output interval for video (Terminal MR1).

は、図9に示される端末MR9のビデオMU欠落率で確認することができる。このとき、端末MR9~端末MR16は、ネットワーク状態がLOADEDと判断した場合に、ビデオMUの再送を要求する。しかし、ネットワークがそれほど混雑していない場合でも、MUの再送時には、8個の再送MUが連続してルータノードに入力されることから、初回送信MUの転送に影響を及ぼしてしまう。したがって、ビデオの出力間隔の変動係数が大きくなる。

7. む す び

本論文では、RVTRをマルチキャスト通信に高効率に対応できるように拡張したMRVTRを提案した。そして、実験及びシミュレーションによるアプリケーションレベルQoS評価を通じて、メディア同期制御、

(注6): ただし、この差は、主観的にはほとんど認められない程度である。

再送制御、及び拡張機能の一つである NACK 送信制御の有無が QoS に及ぼす影響を調査した。その結果、MRVTR が他方式よりも音声のメディア同期品質に優れていることがわかった。また、NACK 送信制御は、受信状態が良好な端末への負荷トラヒック及び再送トラヒックの影響を軽減できるだけでなく、高負荷時には、ネットワーク負荷の大きい端末の QoS を改善できることも確認した。

更に、一つのビデオストリームを初回送信 MU ストリームと再送 MU ストリームの二つに分割し、再送 MU ストリームのマルチキャストグループへ動的に参加・離脱を行う再送スケリング方式を提案した。そして、実験及びシミュレーションにより提案方式の QoS を測定した。その結果、再送スケリングを適用することによって、再送トラヒックの影響を軽減し、音声及びビデオのメディア同期品質を向上させることができた。

今後の課題としては、ユーザレベル QoS の評価、及び今回用いたアプリケーションレベル QoS とユーザレベル QoS との関係の調査があげられる。また、より現実的なネットワーク環境での QoS 評価も必要である。更に、複数の音声・ビデオを扱うアプリケーションへの拡張も今後の課題である。そのとき、音声以外のメディアをマスタメディアとする場合についても検討が必要である。

謝辞 本研究は、平成 13 年度放送文化基金一般援助・助成援助金により行われた。

文 献

- [1] S. Deering, "Host extensions for IP multicasting," RFC1112, Aug. 1989.
- [2] 田坂修二, 石橋 豊, "分散マルチメディアアプリケーションにおける QoS と QoS マッピング," 信学技報, CQ2001-40, July 2001.
- [3] G. Carle and E.W. Biersack, "Survey of error recovery techniques for IP-based audio-visual multicast applications," IEEE Network, vol.11, no.6, pp.24-36, Nov./Dec. 1997.
- [4] K. Obraczka, "Multicast transport protocols: A survey and taxonomy," IEEE Commun. Mag., vol.36, no.1, pp.94-102, Jan. 1998.
- [5] S. Paul, K.K. Sabnani, and J.C. Lin, "Reliable multicast transport protocol (RMTP)," IEEE J. Select Areas in Commun., vol.15, no.3, pp.407-421, April 1997.
- [6] X.R. Xu, A.C. Myers, H. Zhang, and R. Yavatkar, "Resilient multicast support for continuous-media application," Proc. NOSSDAV'97, May 1997.
- [7] X. Li, S. Paul, P. Pancha, and M. Ammar, "Layered video multicast with retransmission (LVMR): Evaluation of error recovery schemes," Proc. NOSSDAV'97, May 1997.
- [8] B. Whetten and G. Taskale, "An overview of reliable multicast transport protocol II," IEEE Network, vol.14, no.1, pp.37-47, Jan./Feb. 2000.
- [9] 田坂修二, "ネットワーク環境におけるメディア同期," 信学誌, vol.84, no.3, pp.177-183, March 2001.
- [10] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications," Proc. IEEE INFOCOM'95, pp.1010-1019, April 1995.
- [11] Y. Ishibashi, A. Tsuji, and S. Tasaka, "A group synchronization mechanism for stored media in multicast communications," Proc. IEEE INFOCOM'97, pp.693-701, April 1997.
- [12] S. Tasaka, T. Nunome, and Y. Ishibashi, "Live media synchronization quality of a retransmission-based error recovery scheme," Conf. Rec. IEEE ICC2000, pp.1535-1541, June 2000.
- [13] 布目敏郎, 田坂修二, 石橋 豊, "インターネットにおける連続メディア再送制御方式 RVTR の性能測定," 信学技報, CQ99-56, Dec. 1999.
- [14] 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, "連続メディア再送制御方式 RVTR のマルチキャスト通信への拡張," 信学技報, SSE2000-12, April 2000.
- [15] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RTP: A transport protocol for real-time applications," RFC 1889, Jan. 1996.
- [16] D. Towsley, J. Kurose, and S. Pingali, "A comparison of sender-initiated and receiver-initiated reliable multicast protocols," IEEE J. Select Areas in Commun., vol.15, no.3, pp.398-406, April 1997.
- [17] S. Pejhan, M. Schwartz, and D. Anastassiou, "Error control using retransmission schemes in multicast transport protocols for real-time media," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.4, no.3, pp.413-427, June 1996.
- [18] S. Floyd, V. Jacobson, C. Liu, S. McCanne, and L. Zhang, "A reliable multicast framework for light-weight sessions and application level framing," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.5, no.6, pp.784-803, Dec. 1997.
- [19] S.K. Kaser, G. Hjálmtýsson, D. Towsley, and J. Kurose, "Scalable reliable multicast using multiple multicast channels," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.8, no.3, pp.294-310, June 2000.
- [20] Y. Ishibashi, Y. Tachibana, and S. Tasaka, "Responsiveness of layered multicast and feedback control for video traffic in the Internet," Conf. Rec. IEEE ICC2000, pp.846-852, June 2000.
- [21] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. Liu, P. Sharm, and L. Wei, "Protocol independent multicast-sparse mode (PIM-SM): Protocol specification," RFC 2362,

June 1998.

- [22] W. Fenner, "Internet group management protocol, version 2," RFC 2236, Nov. 1997.
- [23] S. Tasaka and Y. Ishibashi, "A performance comparison of single-stream and multi-stream approaches to live media synchronization," IEICE Trans. Commun., vol.E81-B, no.11, pp.1988–1997, Nov. 1998.
- [24] The Network Simulator — ns-2 —, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [25] A. Adams, J. Nicholas, and W. Siadak, "Protocol independent multicast – dense mode (PIM-DM): protocol specification," draft-ietf-pim-dm-new-v2-01, Feb. 2002.

(平成 14 年 4 月 5 日受付, 9 月 30 日再受付)



石橋 豊 (正員)

昭 56 名工大・工・情報卒。昭 58 同大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現, NTT)入社。NTT ヒューマンインタフェース研究所主任研究員を経て, 平 5 より名工大・電気情報助教授。現在, 同教授。平 12~13 南フロリダ大客員教授。分散マルチメディアアプリケーションの研究に従事。工博。IEEE, ACM, 情報処理学会, 映像情報メディア学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。



布目 敏郎 (正員)

平 10 名工大・工・電気情報卒。平 12 同大大学院博士前期課程了。同年バイオニア(株)入社。平 14 より名工大・電気情報助手。マルチメディア転送方式, リライアブル通信プロトコルの研究に従事。



伊藤 健二 (正員)

平 11 名工大・工・電気情報卒。平 13 同大大学院博士前期課程了。現在(株)豊田中央研究所勤務。在学中, リライアブルマルチキャスト通信プロトコル, パケットスケジューリング方式の研究に従事。



田坂 修二 (正員:フェロー)

昭 46 名工大・工・電気卒。昭 51 東大大学院博士課程了。同年名工大・情報勤務。現在, 同大・電気情報教授。昭 59~60 UCLA 客員研究員。マルチメディア通信, 無線ネットワークの研究に従事。工博。IEEE, ACM, 情報処理学会, 画像電子学会各会員。

会各会員。