IPv6 ネットワークにおけるフィードバック制御を用いた高品質なリアルタイム DV 転送システムの設計および実装

植田 和憲 † 大崎 博之 †† 下條 真司 ‡ 宮原 秀夫 ††

† 大阪大学 大学院国際公共政策研究科
〒 560–0043 豊中市待兼山町 1–31
Tel: 06–6850–5837 Fax: 06–6850–5656
ueda@osipp.osaka-u.ac.jp

‡ 大阪大学 サイバーメディアセンター
〒 567–0047 茨木市美穂ヶ丘 5–1
Tel: 06–6879–8790 Fax: 06–6879–8794
shimojo@cmc.osaka-u.ac.jp

†† 大阪大学 大学院基礎工学研究科
〒 560–8531 豊中市待兼山町 1–3
Tel: 06–6850–6587 Fax: 06–6850–6589
{oosaki,miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし: 本稿では、フィードバック制御を利用することにより、ネットワークの輻輳状況に応じて動的に映像の品質を調整する、リアルタイム DV (Digital Video) 転送システムを設計する。本システムでは、受信側ホストから送信側ホストへ、フィードバック情報 (送信側ホスト–受信側ホストのパケット伝送遅延およびパケット棄却率) を通知する。送信側ホストは、このフィードバック情報にもとづいて映像の品質を動的に変更し、映像データの送出レートを調整する。これにより、ネットワークの利用可能帯域を有効に活用しながら、ネットワーク内で棄却されるパケット数が減少する。その結果、高品質なリアルタイム動画像転送が可能となる。さらに、既存の DVTS (Digital Video Transmssion System) を一部変更することにより、本システムのプロトタイプを実装する。また、プロトタイプを用いた実験結果を示し、さらに現在実行中の実証実験について説明する。

キーワード: DV (Digital Video)、DVTS (Digital Video Transmission System)、映像ストリーミング、フィードバック制御

Design and Implementation of Real-Time Digital Video Streaming System over IPv6 Network using Feedback Control

UEDA Kazunori† OHSAKI Hiroyuki†† SHIMOJO Shinji‡ MIYAHARA Hideo††

† Osaka University, Osaka School of Internaltional Public Policy
1–31 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, JAPAN
Tel: +81–6–6850–5837 Fax: +81–6–6850–5656
E-mail: ueda@osipp.osaka-u.ac.jp

‡ Osaka University, Cybermedia Center
5–1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, JAPAN
Tel: +81–6–6879–8790 Fax: +81–6–6879–8794
shimojo@cmc.osaka-u.ac.jp

†† Osaka University, Graduate School of Engineering Science
1–3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, JAPAN
Tel: +81–6–6850–6587 Fax: +81–6–6850–6589
{oosaki,miyahara}@ics.es.osaka-u.ac.jp

abstract: In this paper, we design a real-time DV (Digital Video) streaming system, which dynamically adjusts its packet transmission rate according to the feedback information from the network. In our DV streaming system, the destination host continuously notify the source host of the network status (i.e., the end-to-end packet transmission delay and the packet loss probability in the network). The source host dynamically adjusts its packet transmission rate by changing the quality of the video data using a feedback control. Our DV streaming system achieves efficient utilization of network resources as well as prevention of packet losses in the network, and enables high-quality and real-time video streaming services. By partly modifying the existing DVTS (Digital Video Transmission System), we implement a prototype of our real-time DV streaming system, and report some experimental results.

keywords: DV (Digital Video), DVTS (Digital Video Streaming System), Video Streaming, Feedback Control

1　はじめに

近年のインターネット技術の発展や情報インフラの整備によって、多量なデータをネットワーク上で扱うことがより容易になってきている。特に、エンドユーザが利用するネットワーク環境において CATV や ADSL などの普及が進むにつれ、一般利用者でも高速な転送を必要とするようなサービスを受けることができるようになっている。このような高速なデータ転送を必要とするアプリケーションの代表として、VoD (Video on Demand) システムなどの映像配信が挙げられる。

単純に映像データを利用者側へすべて転送した後に再生を行う方法では、データ転送のための待ち時間が利用者のストレスにつながる、もしくは受信側ホストに非常に大きなディスク容量が必要となる、といった問題がある。このため、多くの映像配信アプリケーションでは、ストリーミングと呼ばれる方式を用いてこの問題の解決を試みている。ストリーミング方式では、受信側ホストにおいて全データの到着を待つことなく再生を行いながらデータを受信する。映像配信においてストリーミング方式を用いれば、データがすべて転送されるのを待つ必要がなく、利用者の待ち時間が大幅に減少する。また、映像をあらかじめ受信側ホストに保管しないため、大きなディスク容量を確保する必要もない。

このようにストリーミング方式を用いることによって、上記の問題を解決することができるが、ストリーミング方式では異なる問題が発生する。例えば、ストリーミング方式による映像配信では、映像データを逐次転送するだけの帯域がネットワークに必要となる。また、ネットワークにおけるパケット伝送遅延やジッタにより再生される映像の品質が劣化してしまう。ネットワークの帯域が十分でなければ、必要なデータの到着が映像の再生に追いつかず、映像が途中で途切れてしまうことになる。また、遅延やジッタの値が大きくても、帯域が不足している時と同様の現象が現れる。

ストリーミング方式を用いた、音声/映像配信システムでは、このような問題に対処するため、さまざまな研究開発が行われてきた。例えば、(1) ネットワークの帯域が不十分な場合には、送信側ホストにおいて転送する映像の画質を下げることにより、映像データの転送に必要となる帯域を減らす [1-4] 、(2) ネットワーク中での遅延の変動を吸収するために、受信側ホストにおいてある程度のバッファを設ける [5, 6] 、といった方式が提案されている。しかし (1) に関しては、現在実装されている映像配信システムのほとんどは、映像データを調整する粒度が荒いため、ネットワークの空き帯域を十分に活用できない、(2) の場合には、受信側ホストにバッファを設けることにより、受信側ホストにおいて映像データの到着から再生までに遅延時間が発生する、といった問題がある。

そこで本稿では、フィードバック制御を利用することにより、ネットワークの輻輳状況に応じて動的に映像の品質を調整する、リアルタイム DV (Digital Video) 転送システムを設計する。本システムでは、受信側ホストから送信側ホストへ、フィードバック情報 (送信側ホスト–受信側ホストのパケット伝搬遅延およびパケット棄却率) を通知する。送信側ホストは、このフィードバック情報にもとづいて映像の品質を動的に変更し、映像データの送出レートを調整する。これにより、ネットワークの利用可能帯域を有効に活用しながら、ネットワーク内で棄却されるパケット数を減少させることができる。その結果、高品質なリアルタイム動画像転送が可能となる。さらに、既存の DVTS (Digital Video Transmssion System) [7] を一部変更することにより、本システムのプロトタイプを実装する。

本稿の構成は以下の通りである、まず、2 章において既存の映像配信システムの現状と問題点について述べ、3 章においてその問題を解決するために設計するシステムについての概要を述べる。4 章において今回行ったシステムの実装の詳細について述べ、5 章においてそのシステムを使用して行った実験とその結果について述べ、6 章においてまとめとする。

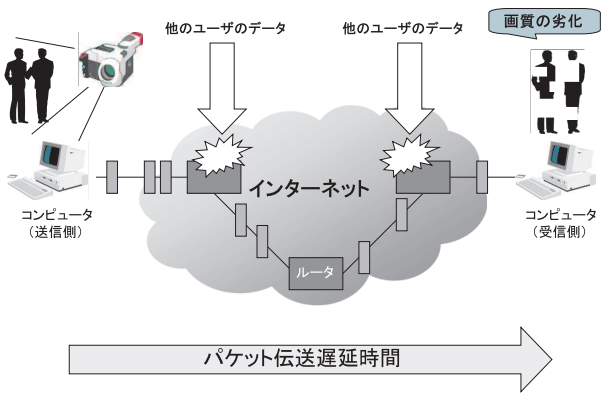

図 1: ネットワークの輻輳による映像品質の劣化

2　既存の映像配信システム

今日では、さまざまな映像配信システムが普及している。特に、RealNetworks 社の RealSystem [8]、Microsoft 社の Windows Media Technology [9]、Apple 社の QuickTime [10] が広く普及している。これらの映像配信システムは、WWW のポータルサイトなどで広く利用されている。また、フリーソフトとして利用できる映像配信システムも存在し、今後、個人レベルでの映像配信がさらに進むと予想される。より高画質な映像を配信できるシステムとして、ストリーミング方式を用いた MPEG 映像配信システム [11] や、デジタルビデオカメラと IEEE1394 インターフェースの組み合わせにより、ストリーミング方式を用いて DV 映像を配信する、DVTS (Digital Video Transmission System) [7] などが存在する。特に、DVTS はオープンソース・ソフトウェアとして開発が進められている。

DVTS は、映像のフレームレートを静的に変更することにより、送信側ホストからのパケット送出レートを調整する機能を有する。しかしインターネットは、すべてのユーザがネットワークの帯域を共有する、ベストエフォート型のネットワークである。あるユーザの利用可能帯域や、エンド–エンド間のパケット伝送遅延時間は、他のユーザのふるまいによって大きく変化する。このため、静的なフレームレートの調整では不十分であり、ネットワークの輻輳によってブロックノイズが発生してしまうという問題がある (図 1)。

例えば、近年活発に研究が行われている QoS (Quality of Services) 制御 [12] を用いれば、他のユーザのふるまいによる影響を排除し、比較的容易に高品質な動画像配信が実現できると考えられる。しかしそのためには、送信側ホスト–受信側ホスト間のすべてのルータが QoS 制御に対応していなければならないが、これには非常に時間がかかると予想される。そのため、高品質なリアルタイム動画像配信を実現するためには、QoS 制御を補間する、フィードバックにもとづいた映像配信技術が必要である。

3　DV 転送システムの設計

本章では、フィードバック制御を用いた、高品質なリアルタイム DV 転送システムを設計する。設計する DV 転送システムでは、ネットワークの輻輳状況に応じて、映像データの転送レートを動的に変更することにより、ネットワークの利用可能帯域を有効に活用し、かつ高品質なリアルタイム映像配信を実現する。

3.1　設計するシステムの概要

設計する DV 転送システムは、以下のような 4 種類の機能ブロックから構成されている (図 2)。

- ネットワーク計測ブロック
- フィードバック制御ブロック
- フィルタリングブロック
- プロトコル変換ブロック

設計する DV 転送システムの、基本的な動作アルゴリズムは以下の通りである。

1. 送信側ホストのネットワーク計測ブロックにおいて、パケットごとにエンド–エンド間のパケット伝送遅延およびパケット棄却率を計測する。これらの値を、フィードバック制御ブロックへ渡す。
2. 送信側ホストのフィードバック制御ブロックにおいて、現在のネットワークの状況 (パ

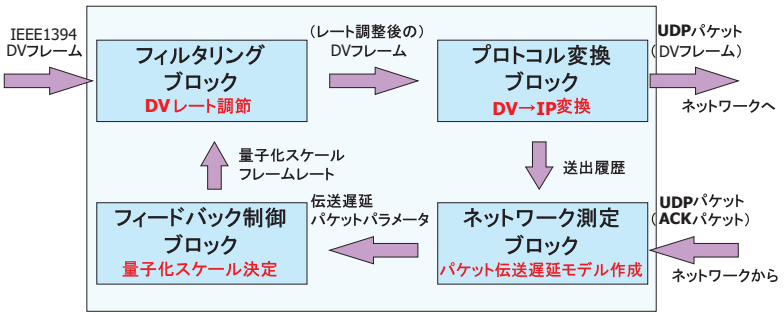

図 2: システムのブロック図

ケット伝送遅延およびパケット棄却率) と、目標とするネットワークの状態との差を計算し、量子化スケールもしくはフレームレートを再計算する。

3. 送信側ホストのフィルタリングブロックにおいて、DV 映像をフィルタリングし、パケット送出レートを調整する。DV 映像のフィルタリングは、(1) 量子化スケールの変更による再符号化、もしくは (2) フレームレートの調整、により実現する。

4. 送信側ホストのプロトコル変換ブロックにおいて、DV 映像の 1 フレームを複数の UDP パケットへ変換する。

現在、圧縮率の高い映像データの符号化方式として、MPEG (Motion Picture Expert Group) [13] が広く普及している。しかし、以下のような理由により、本システムでは、映像フォーマットとして DV を採用している。

- DV は汎用の IEEE 1394 インターフェースを用いて、ビデオカメラなどから手軽に取り込むことが可能である。
- IEEE 1394 インターフェースは、一部のノート型コンピュータでも利用できる。
- MPEG2 のリアルタイム圧縮は、現時点では専用のハードウェアが必要である。
- DV であれば、オープンソース・ソフトウェアの DVTS をベースとして利用できる。

ただし、設計する DV 転送システムは、映像のフィルタリング部分を変更すれば、MPEG2 など他の動画像圧縮方式にも容易に適用できると考えられる。

以下では、それぞれの機能ブロックについて詳細に説明する。

3.2 ネットワーク計測ブロック

ネットワーク計測ブロックでは、受信側ホストから送信側ホストに返送されるフィードバック情報をもとに、送信側ホスト–受信側ホストの伝送遅延およびパケット棄却率を測定する。具体的なアルゴリズムは以下の通りである。

まず、送信側ホストから受信側ホストに向けて映像データの送信を行う時に、各パケットにシーケンス番号 n およびパケット送信時刻 T_s を記録しておく。受信側ホストでは、送信側ホストから到着した各パケットに対して、送信側ホストへ ACK (確認応答) パケットを返送する。この時、ACK パケットには、受信したパケットのシーケンス番号 n およびパケット送信時刻 T_s を記録する。さらに、受信側にパケットが到着した時刻 T_d もあわせて記録する。

送信側ホストでは、到着した ACK パケットに記録されている、シーケンス番号 n、パケット送信時刻 T_s、パケット受信時刻 T_d をもとに、一定期間 T 中の平均伝送遅延 τ およびパケット棄却率 p を計算する。以下では、T をサンプリング周期と呼ぶ。一般に、送信側ホストおよび受信側ホストの内蔵時計が一致していることは

仮定できないため、$\overline{\tau}$ は、実際のエンド–エンド間の伝送遅延とは一致しない。しかし、フィードバック制御ブロックでは、$\overline{\tau}$ の変動をもとに制御するため、絶対的なずれの影響は無視することができる。

伝送遅延やパケット棄却率の一時的な変動の影響を除くために、$\overline{\tau}$ や p をそのまま使用するのではなく、以下のようなローパスフィルタによって高周波成分を除去した値である、$\overline{\tau}$ や p を用いる。

$$\begin{aligned} \overline{\tau}^* &\leftarrow \gamma_1 \overline{\tau}^* + (1-\gamma_1)\overline{\tau} \\ p^* &\leftarrow \gamma_2 p^* + (1-\gamma_2) p \end{aligned}$$

ここで、γ_1 および γ_2 は、カットオフ周波数を決定するパラメータであり、$0 < \gamma_1, \gamma_2 < 1$ である。

3.3 フィードバック制御ブロック

フィードバック制御ブロックでは、ネットワーク計測ブロックが計算した、伝搬遅延 $\overline{\tau}^*$ およびパケット棄却率 p^* をフィードバック情報として利用し、量子化スケールもしくはフレームレートを再計算し、フィルタリングブロックに通知する。

具体的には、一定のサンプリング周期 T ごとに、量子化スケールもしくはフレームレートに相当する x を以下のように決定する。

$$x \leftarrow x + \alpha\,(p_0 - p^*) + \beta\,(\overline{\tau}_0 - \overline{\tau}^*) \quad (1)$$

ここで、p_0 および $\overline{\tau}_0$ は、それぞれパケット棄却率および伝送遅延の目標値である。つまり、このフィードバック制御では、パケット棄却率および伝送遅延を一定とすることを制御目標としている。ただし、p_0 および $\overline{\tau}_0$ の選択は慎重に行う必要がある。パケット棄却率の目標値 p_0 は、定常的なネットワークにおけるパケット棄却率にも依存するが、ネットワークの利用率を高めるために、数 % 程度にすれば良いと考えられる [14]。一方、伝送遅延の目標値 $\overline{\tau}^*$ は、ボトルネックリンクの回線速度にもよるが、(伝送遅延の最小値 + 数パケットのキューイング遅延) 程度にすれば良いと考えられる [15, 16]。ただし、p_0 および $\overline{\tau}_0$ の設定が不適切であれば、フィードバック制御ブロックの動作が不安定になるため注意が必要である。

また、式 (1) における α および β は、パケット棄却率および伝送遅延に関するフィードバックゲインである。α および β が大きいほど、システム全体の過渡特性は向上するが、安定性が低下する。逆に、α および β が小さいほど、システム全体の過渡特性が低下するが、安定性は向上する。式 (1) は PID 制御の一種であるため、フィードバックゲインの決定には、近似的に Ziegler-Nichols の手法が使えること考えられる [17]。

3.4 フィルタリングブロック

フィルタリングブロックでは、フィードバック制御ブロックが決定した量子化スケールもしくはフレームレート x に従い、DV 映像の品質を調整することにより、送出する映像データのパケット送出レートを調整する。DV 映像の品質調整には、以下のような方法が考えられる。

- DV 映像データをブロック単位で廃棄

  この方法は、実装が簡単であり、パケット送出レートの粒度も細かいという利点があるが、再生時に不規則にブロックノイズが発生するため、画質が大きく劣化する。

- DV 映像データをフレーム単位で廃棄

  この方法は、実装が簡単であり、かつ画質の劣化がブロック単位で廃棄する方法に比べて良いという利点がある。しかし、レート変更の粒度が荒いという欠点がある。

- DV 映像データの再量子化

  この方法は、実装が非常に複雑であり、送信側ホストの CPU にかかる負荷が非常に大きい。しかし、DV 映像データをフレーム単位で廃棄する方法に比べて、品質調整による映像の劣化を抑えることが可能である。

これらをふまえ、今回は、DV 映像データをフレーム単位で廃棄する方法と、DV 映像データ

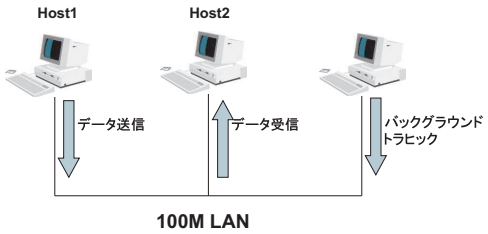

図 3: ネットワークモデル

の再量子化を対象とする。これによって、粒度が細かく、実時間アプリケーションとしての実用性を損なわないレート調整を実現する。

3.5 プロトコル変換ブロック

プロトコル変換ブロックでは、IEEE1394 デバイスから取り込んだ DV 映像データを UDP パケットにカプセル化して、受信側ホストに送出する。本稿では、DVTS [7] で実装されている DV $\rightarrow$ IP の変換機能をそのまま利用する。ただし、パケット送信時刻 T_s およびパケット受信時刻 T_d を、より高い精度 (μ 秒単位) で記録するため RTP のヘッダを一部拡張する必要がある。

4 DV 転送システムの実装

既存の DVTS バージョン 0.9a15 を一部変更することにより、本稿で設計したリアルタイム DV 転送システムのプロトタイプを実装した。今回、プロトタイプの実装においては、計算機として IEEE1394 インターフェースを搭載した IBM 社の ThinkPad s30 を用い、オペレーティング・システムとしては FreeBSD バージョン 4.2-RELEASE を使用した。フィルタリングブロックでは、DV 映像データをフレーム単位で廃棄する方法と、DV 映像データの再量子化を対象としているが、今回のプロトタイプでは、簡単のため DV 映像データをフレーム単位で廃棄する方法のみを実装した。

以下では、実装したプロトタイプを、LAN 環境で動作させた時の結果の例を示す。ここでは、図 3 に示すような、100M イーサネットで接続

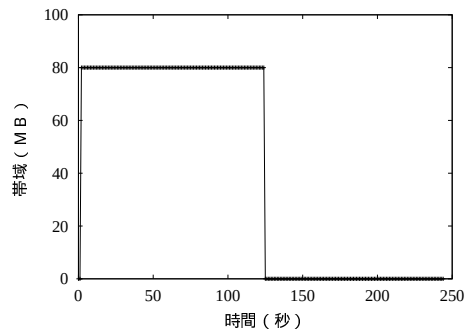

図 4: バックグラウンドトラヒック

された LAN 環境において、送信側ホスト (Host 1) から受信側ホスト (Host 2) に対して、リアルタイム DV 転送システムのプロトタイプを用いて、DV 映像の転送を行った。ここで使用した制御パラメータの値を、表 1 に示す。ここでは、

サンプリング周期	T	1000000 [μ 秒]
目標棄却率	$p0$	0.01
棄却率に関するフィードバックゲイン	α	100000
遅延に関するフィードバックゲイン	β	0

表 1: 実験パラメータ

$\beta = 0$ とし、パケット棄却率のみを制御目標として動作するように設定した。また、バックグラウンドトラヒックが、DV 映像に与える影響を明らかにするため、ネットワーク中に 80 Mbps のトラヒックを発生させた。フレームレートの初期値は 30 [フレーム/秒] とした。

実験結果を図 4–図 6 に示す。これらの図は、それぞれ、ネットワーク中に発生させたバックグラウンドトラヒック量、ネットワーク測定ブロックが計算したパケット棄却率 p、フィードバック制御ブロックが計算したフレームレート x の時間的変動を示している。これらの図から、バックグラウンドトラヒックの増減にあわせて、パケット棄却率が変化し、その結果、フレームレートが変化していることがわかる。ここでは、フィードバックゲイン $\alpha = 100000$ と小さな値に設定しているため、フレームレートの変動が比較的緩やかになっている。

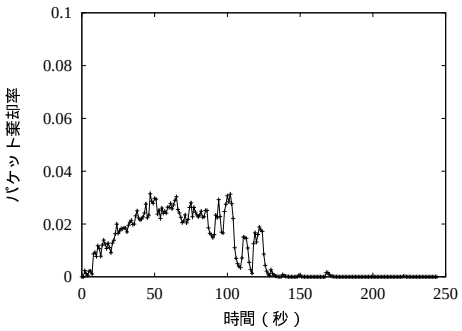

図 5: ネットワーク測定ブロックが計算したパケット棄却率

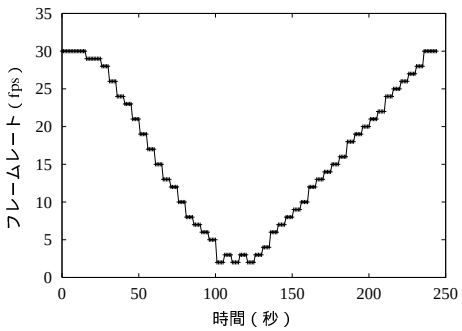

図 6: フィードバック制御ブロックが計算したフレームレート

5 実証実験

今回設計したような、フィードバック制御を用いたリアルタイム映像配信システムは、伝送遅延の大きい、大規模なネットワークで有効性を検証する必要がある。そこで、関係諸機関の協力を得て、高速実験用ネットワークである JGN (Japan Gigabit Network)、APAN (Asia Pacific Advanced Network)、vBNS (very high speed Backbone Network Service) の 3 つのネットワークを経由し、大阪大学–UCSD (University of California San Diego) 間で現在実証実験を行っている (図 7)。この実験ネットワークでは、IPv4 および IPv6 の両方で実証実験を行っている。

設計したリアルタイム DV 転送システムは、遠隔地とのテレビ会議システムとしての利用が可能である。そこで、このシステムを使用して、大阪大学が有する超高圧電子顕微鏡を、SDSC (San Diego Supercomputer Center) の研究者が遠隔操作を行うためのシステム (図 8) としても実証実験を進めている。設計したリアルタイム DV 転送システムは、超高圧電子顕微鏡の遠隔操作を補助するために使用される。なお、より高精細な超高圧電子顕微鏡の映像は、別途 TCP を用いて転送される。

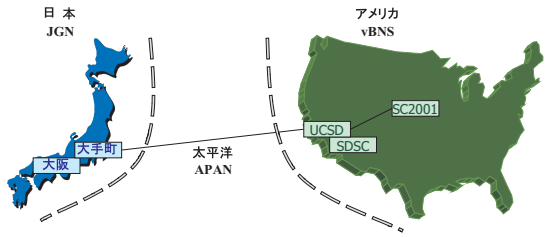

図 7: 実証実験のネットワーク構成図

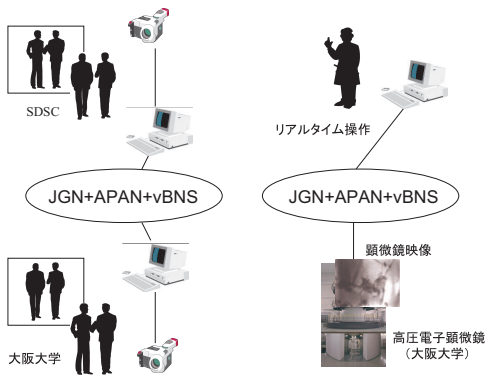

図 8: 実証実験 (遠隔会議、超高圧電子顕微鏡の遠隔操作)

なお、実証実験のネットワークを利用して、2001 年 11 月に米国デンバーで開催された SC2001 (Super Computing 2001) において、今回実装したプロトタイプのデモを行った (図 9)。SC2001 でのデモは、大阪大学のライブ映像を、今回実装したプロトタイプを用いて SC2001 の会場へ配信するというものであった。

6 まとめ

本稿では、フィードバック制御を利用することにより、ネットワークの輻輳状況に応じて動的に映像の品質を調整する、リアルタイム DV 転送

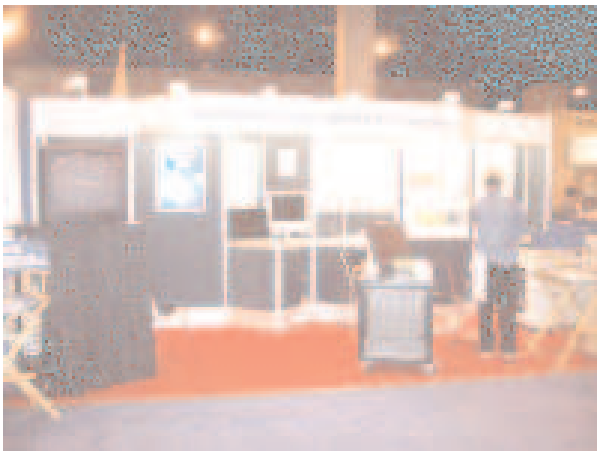

図 9: SC2001 でのデモ

システムを設計した。本システムでは、受信側ホストから送信側ホストへ、フィードバック情報を通知することにより、映像の品質を動的に変更し、送信側からの送出レートを調整する。さらに、既存の DVTS を一部変更することにより、本システムのプロトタイプを実装した。プロトタイプを用いた実験結果を示し、現在実行中の実証実験についても説明した。

今後の課題としては、DV 映像データの再量子化の実装や、数学的解析手法を用いたフィードバック制御ブロックの制御パラメータ設定方法に関する検討などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、通信・放送機構「ギガビットネットワーク利活用研究開発制度」における研究プロジェクト「IPv6 ネットワークにおけるロバスト制御理論を用いた高品質なリアルタイム DV 転送システムに関する研究開発」(JGN-P122561) によっている。

また、米国 SDSC (San Diego Supercomputer Center) の Mark Ellisman 教授、同 Tom Hutton 氏、大阪大学基礎工学部の夏山京大氏、株式会社スーパーステーションの野村卓也氏には、研究を進めるにあたって大変なご尽力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

[1] J.-C. Bolot and T. Turletti, "Experience with control mechanisms for packet video in the Internet," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, pp. 4–15, Jan. 1998.

[2] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An end-to-end rate-based congestion control mechanism for realtime streams in the Internet," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, Mar. 1999.

[3] M. Miyabayashi, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "MPEG-TFRCP: video transfer with TCP-friendly rate control protocol," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications 2001*, vol. 1, pp. 137–141, June 2001.

[4] H. Radha and Y. Chen, "Fine-granular-scalable video for packet networks," in *Proceedings of Packet Video '99*, Apr. 1999.

[5] R. Ramjee, J.Kurose, D. Towsley, and H. Schulzrinne, "Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide area networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '94*, pp. 680–688, Apr. 1994.

[6] S. B. Moon, J. Kurose, and D. Towsley, "Packet audio playout delay adjustment: performance bounds and algorithms," *ACM/Springer Multimedia Systems*, vol. 5, pp. 17–28, Jan. 1998.

[7] K. Sugiura, A. Ogawa, O. Nakamura, and J. Murai, "Design and implementation of dv based video over rtp," in *Packet Video Workshop 2000*, May 2000.

[8] "Realsystem realserver best practices." available at `http://service.real.com/help/library/guides/server8/deploy/htmfiles/no%tice.htm`.

[9] "Windows media technology." available at `http://www.microsoft.com/windows/windowsmedia/wm7/format.asp`.

[10] "Quicktime." available at `http://developer.apple.com/techpubs/quicktime/qtdevdocs/PDF/insideqt_i%ntmov.pdf`.

[11] "MediaBase." available at `http://www.sgi.co.jp/software/mediabase/`.

[12] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Services," *Request for Comments* 2475, December 1998.

[13] "ISO/IEC 13818-1 international standard MPEG-2 systems." available at `http://www.iso.ch/iso/en/CatalogueDetailPage.CatalogueDetail?CSNUMBER=%31537`.

[14] R. Jain, "Congestion control in computer networks: issues and trends," *IEEE Network Magazine*, pp. 24–30, May 1990.

[15] R. Jain, "A delay-based approach for congestion avoidance in interconnected heterogeneous computer networks," *ACM Computer Communication Review*, vol. 19, pp. 56–71, Oct. 1989.

[16] L. S. Brakmo, S. W. O'Malley, and L. L. Peterson, "TCP Vegas: New techniques for congestion detection and avoidance," in *Proceedings of ACM SIGCOMM '94*, pp. 24–35, Oct. 1994.

[17] J. Aweya, M. Ouellette, and D. Y. Montuno, "A control theoretic approach to active queue management," *Computer Networks*, vol. 36, pp. 203–235, 2001.