

低遅延により自然な遠隔コミュニケーションを実現する映像 配信システムの提案

徳差 雄太¹ 松谷 健史^{†1} 空閑 洋平^{†1} 村井 純¹

概要：遠隔地間における自然な映像コミュニケーションの実現には、終端装置間の総遅延を第一に考えた映像システムと配信ネットワークが必要になる。本論文では、現在のインターネットを転送インフラとして最大限に利用した低遅延かつ高解像度映像システムの実現を目指し、現在普及している映像コミュニケーションツールのコーデック、ネットワーク、映像インタフェース装置を含む総遅延の計測を行った。その結果、各家庭に普及しているインターネットや、ディスプレイ、ビデオカメラの映像インタフェースを利用することによって、低遅延による自然な映像コミュニケーションが十分実現可能なことが明らかになった。一方で、自然な映像コミュニケーションの実現のためには、既存の映像符号化手法および映像伝送プロトコルには未だ技術課題があることを整理して示した。また、FPGAを用い、フレームを細分化した単位でパイプライン処理を行低遅延映像配信システム設計を提案し、そのシステム設計を議論した。

Improving the Naturalness of Internet Video Conversation using a Low-Latency Pipeline

YUTA TOKUSASHI¹ TAKESHI MATSUYA^{†1} YOHEI KUGA^{†1} JUN MURAI¹

1. はじめに

広帯域なインターネットが整備され、映像を用いた遠隔コミュニケーションが広く行われるようになった。また、最新のテレプレゼンスシステムでは、HD品質の映像配信、音響環境、部屋のレイアウトまでを総合的に考慮することで会議の臨場感を演出し、遠隔地間を接続したことによって発生する、コミュニケーションの不自然さの低減を実現している。

遠隔コミュニケーションにおける会話の不自然さは、映像の画質や、映像と音声の同期のずれといった、対面で行う会話とは異なる振る舞い等も原因として考えられるが、最大の原因の1つに相手との会話応答までの遅延がある。会話応答までに発生する遅延は、ネットワークの伝搬遅延、映像コーデックの処理遅延、ビデオカメラの処理遅延、ディスプレイの表示遅延、といった終端間で経過する遅延

の合計値である。対面同士で会話しているような、自然な遠隔コミュニケーションの実現には、会話相手に違和感を与えない程度の超低遅延なシステムが必要である。

2. 自然なコミュニケーション

本論文では、自然にコミュニケーション可能な遠隔映像配信環境の実現を目指し、既存の映像配信アプリケーションやテレプレゼンスシステムの終端装置間の総遅延を計測した。そして、その結果を基にFPGAを用いた低遅延映像システムの提案をおこなう。本論文における自然なコミュニケーションとは、対面で直接会話している状況である。このようなコミュニケーションを遠隔地の間で実現するためには、フルHDのような高画質による映像と終端装置間の低遅延な映像配信、およびネットワーク障害が発生した場合の映像が速やかに復旧されるシステムが必要である。

2.1 快適な会話のための目標遅延時間

本論文で目指す映像配信の遅延は、ITU-Tの勧告であるG.114で述べられている。電話における快適な会話の目標

¹ 慶應義塾大学環境情報学部

5322 Endo, Fujisawa-shi, Kanagawa 252-0882 Japan

^{†1} 現在、慶應義塾大学 政策・メディア研究科

Presently with 5322 Endo, Fujisawa-shi, Kanagawa 252-0882 Japan

値である片方向遅延 150 ms を一つの指標とする [1]. この目標値は、音声会話のための指針であるが、映像と音声合わせた遠隔コミュニケーションにおける快適な会話環境でも同様以下の遅延が求められると考えている. 特に遠隔による協調作業では、会話ごとに発生する遅延によって作業のインタラクティブ性が著しく低下すると考えられる.

本論文では、まず現行のアプリケーションがどの程度遅延を伴っているか、映像コミュニケーションを実現している代表的アプリケーションの遅延を計測することにした. ITU-T 勧告の目標値である 150msec を実現するために、現行のアプリケーションがコミュニケーションで発生する遅延を計測して、現状の把握を行った.

2.2 高画質な映像解像度

自然な遠隔コミュニケーションを実現するため、まるで対面しているかのような高画質な映像が必要である. 本論文では、高画質な映像解像度としてフル HD(1920x1080)の解像度を用いる. さらに、1ピクセルあたりの色階調は 24bit フルカラーとする. また、デジタル放送対応のテレビの場合、ディスプレイのリフレッシュレートは 29.97Hz で行われる. また、PC 用のディスプレイの場合、59.97Hz で同期される. 本論文では、フレームレートは 30Hz を想定とする.

ギガビットイーサネットにおけるデータレートを求める. F [Mbyte] をフレームデータ, D [Mbps] を映像のデータレートとすると、

$$\begin{aligned} F &= 1920(\text{dot}) \times 1080(\text{dot}) \times 24(\text{bit}) \\ &= 6075(\text{KByte}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} D &= F \times 30(\text{Hz}) \\ &= 1424(\text{Mbps}) \end{aligned} \quad (2)$$

と示される. 式 (2) により、フル HD の解像度 1920x1080 とその色階調 24bit フルカラーとしてフレームデータを計算すると、6075Mbyte となった. また、式 (2) より、この時のデータレートは 1424Mbps となった.

2.3 パケット欠損時からの映像復旧時間

自然なコミュニケーションを実現するためには、ネットワークの障害時の対応策を考慮しなくてはならない. 障害時に発生するパケット欠損により、映像が回復されない事は望ましくない. 例えば、遠隔医療の現場では、遅延に対して厳しい環境が想定される. ネットワークの障害で 1 秒でも映像が受信できなければ医療現場では危険である. したがって、自然なコミュニケーションを維持するためにも、時間軸圧縮を行うフレーム間圧縮は用いない.

3. 関連技術と問題

映像コミュニケーションを実現しているアプリケーションは、遅延に着目したもの、映像の解像度や品質に着目したものと多岐にわたっている. 本章では、低遅延を実現している既存アプリケーションの技術を取りあげ、これらのアプリケーションの遅延を計測して、本論文が求める 150msec の遅延が課題である事を議論する.

3.1 関連技術

• Skype

現在では、マイクロソフト社が提供している P2P 技術を利用した、コミュニケーション・ソフトウェアである [7]. 映像とリアルタイムな音声を用いて、双方向な会話を可能とした. 映像品質を極小に抑え、会話に影響のない程度の低遅延を実現している.

• DVTS

WIDE プロジェクトが開発した、低遅延で DV フォーマットの映像を伝送できる技術の一つである [3]. IEEE1394 インターフェイスを用いて、カメラから PC に直接接続する. DVTS というソフトウェアを使ってインターネットによる低遅延映像配信システムを実現している.

• Polycom

Polycom 社によって、提供されている IP ビデオ会議システムである. 製品として、遠隔地とのビデオ通話を可能とし、企業や教育機関に取り入れられ、遠隔地コミュニケーションツールとして、多用されている [6].

• FUJITSU IP シリーズ

既存に存在するギガビットイーサネットを用いた映像伝送技術である. 製品として FUJITSU 社が提供する IP シリーズ [4].

• i-Visto

NTT 未来ねっと研究所が開発した、非圧縮 HDTV(High Definition Television)10 本を IP ネットワークで同時総受信可能なシステム i-Visto がある [5]. これは HD-SDI のインターフェイスを用いており、1.5Gbit/s の伝送速度を必要とする非圧縮 HDTV を低遅延で伝送が可能となった.

• WebRTC

HTML5 の普及と、ブラウザでの端末間のカメラ情報のやり取りを可能とした. 現在では、Chrome と Firefox が対応している. webAPI として提供しており、PeerConnection を確立して、通信を行う事が出来る [8].

4. 遅延計測

本章では、終端装置間の総延時間を 150msec に収めるために、既存のコミュニケーションツールのネットワーク上の伝搬遅延、などを分析して遅延時間の構成を議論する。

4.1 遅延計測の目的

そこで、現在普及している映像コミュニケーションツールと、その遅延時間を計測し、現状のサービスが自然なコミュニケーションをどの程度実現しているのかを分析した。

遅延は大きく分けて、カメラから処理用 PC までの伝送時間、エンコード時間、ネットワーク伝送時間、デコード時間、ディスプレイ表示時間に分類される。カメラから処理用 PC までの伝送時間、ネットワーク伝搬時間、ディスプレイ表示時間は、選択したデバイス、インターフェイスに依存している。したがって、本論文では、カメラから処理用 PC までの伝送時間とディスプレイ表示時間を含めた HDMI 及び DVI 映像インターフェイスの遅延時間、各アプリケーションの終端装置間の総合的な遅延時間、ネットワークの伝搬時間を計測した。

4.2 HDMI 及び DVI 映像インターフェイスの遅延

HDMI 映像インターフェイスの遅延を計測する。外部出力インターフェイスとして HDMI を採用しているカメラを用いて、HDMI 伝送によって、撮影した映像を HDMI で接続したディスプレイに表示されるまでの時間を計測した。民生用 HDV カメラの Sony 社の HXR-70J、及び表示用ディスプレイには ASUS 社 VG236H を使用した。撮影した被写体とディスプレイに表示される映像の遅延時間を分析する。この遅延には、カメラが受光素子から、アナログデジタル変換を経て、HDMI で映像を送り、ディスプレイに表示される時間が含まれている。計測した以下の時間はカメラとディスプレイの性能に依存している。

カメラの撮影モード	フレームレート	遅延フレーム	遅延時間
1080p	29.97Hz	3 フレーム	100msec
720p	29.97Hz	2 フレーム	66msec
480p	29.97Hz	2 フレーム	66msec

表 1 カメラの撮影モードと HDMI の伝送によるディスプレイ表示遅延

この計測では、表 1 に示す通り HDMI がフル HD 解像度 (1920x1080) を伝送し、ディスプレイに表示するまで 100ms かかった。

4.3 アプリケーションの総合遅延時間

ネットワーク伝送を目指した映像による遠隔コミュニケーションを行うために、各々のアプリケーションは様々

な映像コーデックを採用している。しかし、コーデックの選択はアプリケーション次第であり、アプリケーションの目的によって、遅延時間が異なる。エラー検出など意図的なバッファによる遅延が想定される。そこで、本章では、ネットワークにおける遅延、カメラ及びディスプレイ表示にかかる遅延、アプリケーションの総合的な遅延を計測した。

4.3.1 計測手法

図 1 のように 3 台のディスプレイを用意した。被写体のディスプレイ、送信 PC(カメラプレビュー)用のディスプレイ、受信 PC のディスプレイである。計測手法は、ネットワークに接続された 2 台のマシンを用意し、それぞれ送信 PC、受信 PC とする。計測に先立って、あらかじめ用意した静止画像のスライドショーの動画を作成し、被写体ディスプレイでこの動画をリピート再生している。計測用のデータ映像を分析する際に、静止画像のスライドショーはシーンの切り替えが明確であるため、遅延の計測において利便性がある。

以下のように計測の流れを順番に説明する。

- (1) 被写体ディスプレイが静止画像のスライドショーを再生する。
- (2) 配信用カメラで被写体ディスプレイを撮影する。
- (3) 送信 PC に映像を取り込み、各アプリケーションで受信 PC に対してビデオ通話を行う。
- (4) 受信 PC では配信された映像を受信し、再生している。

この流れを計測用カメラで図 1 のように全体が映るよう撮影し、計測を行う。処理用の PC に取り込み、Apple 社の Quick Time で計測する。被写体ディスプレイで再生されている映像において、あるシーンを選択し、シーンの変わり目で一時停止させる。他のディスプレイは、被写体ディスプレイに比べ、一つ前の静止画像が表示されているはずである。Quick Time では、フレーム毎のコマ送りが可能であるため、送信ディスプレイが被写体ディスプレイに追いつくまで、フレームをコマ送りしていき、そのフレーム数を計数する。同様に受信ディスプレイが被写体ディスプレイと一致する静止画像までフレームの計数を継続していく。

被写体ディスプレイと受信ディスプレイの両者におけるフレーム遅延が、本稿で求める映像遅延に一致する。また、被写体ディスプレイと送信ディスプレイに生じるフレーム遅延は、映像伝送遅延に影響を及ぼさず、映像のサンプリング、エンコードにかかる遅延時間である。送信ディスプレイと受信ディスプレイにおける遅延は、ネットワーク伝送のために行われる圧縮、ネットワーク遅延、デコード時間が遅延として含まれる。その他、処理 PC のプロセッシング状況が任意の過程で想定される。

以下の表 2 の環境を用いて計測を実施する。

これら 3 つのホストはすべて同一サブネット内に存在

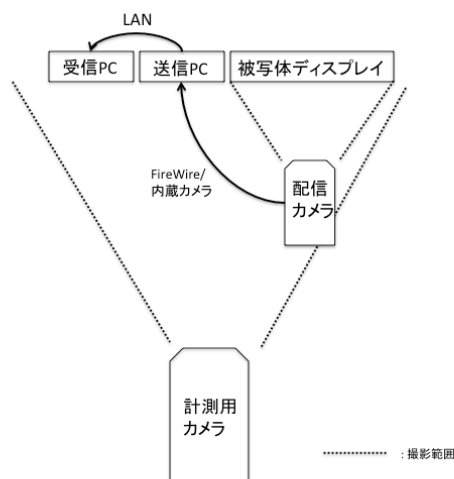


図 1 計測手法

HOST	A	B	C
マシン	HP Compaq6500	LIFEBOOK SH560/5A	MacBook Pro
OS	Windows 7	Windows 7	OSX10.6.8
CPU	Intel Core 2 Duo	Intel Core i5	Intel Core i7
クロック	2.33Ghz	2.40GHz	2.8GHz
メモリ	2GByte	4GByte	8GByte
ネットワーク I/F	100Mbps	100Mbps	1000Mbps
Ethernet Adapter	82566DM-2 Gigabit Network Connection	Broadcom NetLink GbE	Apple BCM5701 Ethernet

表 2 計測環境

し、LAN で計測を行っている。

4.3.2 結果

総合的なアプリケーションの遅延結果を表 3 に示す。

アプリケーション	DVTS	Skype	Polycom	WebRTC
総遅延	800msec	400msec	367msec	233msec
送信 HOST	A	C	HDX8000	C
受信 HOST	B	A	HDX7000	A
配信カメラ	DCR PC350	iSight	EagleEye III カメラ	iSight
コーデック	DV codec	独自コーデック	H.264 HighProfile	VP8

表 3 遅延比較

表 3 の結果は、LAN 環境で測定しており、WAN で接続された相手との遅延を考慮すると、この結果よりも総合的な遅延は大きくなる事が推定される。ローカルエリア内における映像配信コミュニケーションでも、本論文の目指す 150msec よりもかかっており、この数値が達成されていないことを確認した。

4.4 インターネットの伝送時間

映像伝送の総合的な遅延が 150msec を達成するために、

ネットワーク上の伝搬遅延を考える。慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスに設置されているサーバー (sfc.wide.ad.jp) から、奈良先端科学技術大学院大学 (以下 NAIST)(www.naist.jp) までの遅延時間を計測した。PING ツールを使用して、1packet あたり 64byte の 100packet を送った結果から、SFC-NAIST 間で片方向で 5.5ms の遅延が確認された。本論文では、この時間をネットワークの伝搬時間として採用する。

4.5 考察

現行のアプリケーションでは、本論文で目指す 150msec は達成されていない事がわかった。また、図 2 は、本論文が目指す遅延を設計を示している。それを含め、本章の計測での考察をおこなった。

図中の実線は、映像の伝送路を示している。以下では、図中の下に使用される矢印が示している区間について説明する。

- 区間 C : ネットワーク上の伝搬遅延
- 区間 B,D : FPGA ボードで実装されるエンコード、デコードやイーサネットの符号化の処理時間
- 区間 A,E : HDMI で接続されたカメラとディスプレイが伝搬する時間と表示時間の和

図中の区間 A と E の合計値は、カメラとディスプレイを直接 HDMI を介して接続した時の映像の伝送遅延と同値と考えられる。慶應義塾大学から NAIST までの遅延は 5.5msec であり、カメラとディスプレイの直接つないだ時の映像の伝送時間は 100msec であるので、本論文では区間 B と D における遅延時間は $150\text{msec} - (100\text{msec} + 5.5\text{msec}) = 44.5\text{msec}$ 以内となるように設計する必要がある。

この結果から、映像の圧縮および、復号の際に生じた遅延が大きな要因であり、この部分を解決することが最も重要であると分かった。

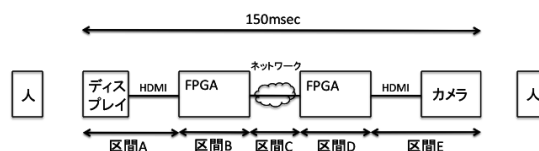


図 2 本論文における理想的な遅延時間

5. 低遅延映像伝送システムの設計

5.1 概要

第 3 章では、従来のアプリケーションの映像伝送の遅延時間を計測し、映像の圧縮処理と復号処理の時間を短縮させる課題について論じた。本章では、その課題を解決するために、HDMI インターフェイスで伝送された映像を

FPGA で圧縮処理を行い、ネットワーク伝送を行う低遅延伝送システムの設計を提案する。従来の圧縮処理では、MPEG 符号化方式を中心にフレーム間圧縮を使用しており、数フレームをバッファに読み込んでから、圧縮処理を行なっている。そのため、数フレームを処理する時間だけ遅延が発生する。

一方で、本論文では1フレームを細分化し、フルHDの垂直解像度である1080ラインのうち1ラインごとにパイプライン処理を行う。その結果として、圧縮処理にかかる遅延時間を1フレームよりも短縮できると考えた。

5.2 映像伝送の方法

5.2.1 映像インターフェイス

本論文では、HDMIを採用する。HDMI(1.4)の伝送速度は最大10.2Gbpsであり、カメラとディスプレイのHDMIケーブルでの伝送の場合、フルHD解像度の24bitカラーで非圧縮で伝送することができる。また、HDMIは民生用のカメラ、及びテレビのインターフェイスとしても採用されており、汎用性が高くなりつつある。大容量の通信が実現できるため、今までと異なり、手軽に高画質の映像を扱う事が出来る。

5.2.2 符号化処理

本論文では、YUVのサブサンプリングの中でも圧縮率が高いフォーマット4:1:1で符号化を行う。本提案手法では、低遅延を実現するためにラインごとにパイプライン処理を行っている。したがって、効率よくデータを圧縮するには、水平方向に4ピクセルごとにカラーサンプリングを行うフォーマット4:1:1を用いる。解像度は符号化前の4:4:4よりも1/4になるが、データの圧縮率は1/2である。

5.2.3 イーサネットフレームの設計

本論文では、広域ネットワークに接続されたFPGAボードがプラットフォームとなり、映像のデータの送受信を行う。ネットワークインターフェイスはギガビットイーサネットを使用する。1.3節では、非圧縮フルHD(1920x1080)のデータレートが1424Mbpsであった。また、符号化処理でデータは1/2となるので、712Mbpsを達成するようにMTUを求める。

ネットワークの効率化を目指すと、フレームは可能な限り最小になるようにMTUを設定する必要がある。

求めるペイロードの合計値をP[Byte]、データレートをD[bps]とする。MTUをX[Byte]とする。イーサネットフレームおよびIPヘッダ、UDPヘッダを使用するので、44Byteをヘッダにあてる。映像のデータレートは712Mbpsであり、イーサネットのペイロード長の合計も712Mbps以上が必要である。イーサネットフレームヘッダおよびIPヘッダ、UDPヘッダを使用するため、44Byteをヘッダに割りあてる。MTUの残りをペイロードとして映像伝送のデータグラムに使用できる。したがって、1Gbpsの帯域

を満遍なく使用する事をふまえて、パケット数をP、MTUをXとすると

$$P = 1[\text{Gbps}] \div (X[\text{Byte}] \times 8[\text{bit}]) \quad (3)$$

で求められる。一秒間に送出できるパケット数Pより、ペイロード長をX - 44とする。この両者の積が映像のデータレートを上回っているとよい。

$$712[\text{Mbps}] = (X[\text{Byte}] - 44) \times P \quad (4)$$

この式の結果、最適なMTUは256Byteであると求められるが、ブランキング時間の処理や、映像と同時に送られる音声のデータを負荷するため、256Byteではなく、便宜的に512Byteとして設計を行う。

5.2.4 提案手法

図3はFPGAで行う送信部でのパイプライン処理の流れを示している。まず、カメラに接続されたHDMIより伝送された入力用映像のフレーム(1920x1080)は、FPGA内のフレームバッファに蓄積される。その流れにおいて、水平ライン1080本のうち、1ラインがフレームバッファに蓄積されると、符号化処理にうつる。図中の1@1080は、1080ラインから上方から1ライン目を示しており、他の数字についても同様である。図3では、HDMI入力の処理のから一段したの符号化の処理に移っている。1ラインの符号化が終了次第、ネットワーク送信部に移行し、イーサネットでの伝送を行う。結果として、図中の矢印が示しているように、送信にかかる遅延は2ラインの遅延で処理が可能と考えられる。

また、受信の処理においても図3と同様にネットワーク受信において、1080ラインのうち1ラインを受信した直後、復号化の処理に移る。復号の直後、ディスプレイに接続された出力用HDMIにフレームを表示するために走査の作業に移る。同様に、ネットワークから映像データを受信して、ディスプレイに表示するためにHDMI出力までの遅延も同様に2ラインでの遅延で処理が行える。結果としては、映像データの処理時間は4ラインの遅延で映像を伝達できると考えられる。

以上の説明のように1フレームの細分化された1ライン単位にパイプライン処理を行うことで遅延時間を短縮させる本手法を提案する。

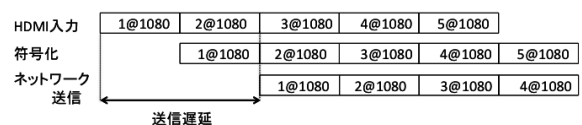


図3 送信部のパイプライン処理

5.3 FPGA 内での送受信機的设计

送受信機ともに Digilent 社の Atlys を使用する [2]. Xilinx の Spartan-6 XC6SLX45 CSG324C という FPGA チップが搭載されている。HDMI の入出力用ポートが各 2 つずつ付属している。

図 4 は、実装予定の FPGA 内部及び外部とのブロックダイアグラムを示している。図中の矢印は処理の順番を示している。また双方向の送受信を行うため、一つの実機に送信機及び受信機が搭載される。

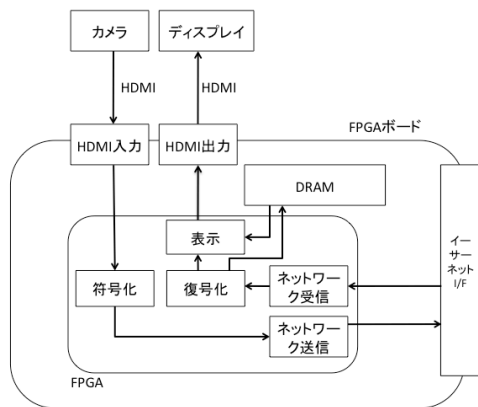


図 4 FPGA ボード上ブロックダイアグラム

5.3.1 送信回路的设计

図 3 での符号化のステージでは、FPGA チップ内に実装する回路では、送信回路および受信回路を設計する。図 4 の送信側カメラから HDMI で接続された実機に HDMI からの映像を入力する。

- (1) カメラから HDMI で接続された実機に HDMI からの映像を入力する。
- (2) バッファに 1/1080 フレームが蓄積された直後、符号化処理に移行。
- (3) 同様に符号化処理が終了後ネットワーク送信部にて、パケット分割
- (4) ネットワーク伝送

5.3.2 受信回路的设计

ネットワーク受信したデータの処理を図 4 より解説する。送信回路は、基本的には受信回路と逆の処理を行う。

- (1) ネットワークから受信したデータを 1/1080 フレームごとに復号処理に移行する。
- (2) 復号が終了し、ネットワーク受信部に次の 1/1080 フレームが蓄積されたら表示に移行する。
- (3) 表示と同時に DRAM にフレームを貯める。蓄積された 2 枚分を超過した場合、古いフレームに上書きしていく。
- (4) 表示部分にて、万が一パケットロストが発生して、データがない場合、DRAM から古いフレームから必要な 1

ラインを表示させる。

- (5) 表示部分にて、1 ラインがそろっている場合、HDMI を介してディスプレイ表示を行う。

5.3.3 パケットロスト対策

パケットが喪失した場合に備えて、FPGA ボードの DRAM にフレームバッファとして 2 フレーム分を用意する。パケット喪失により抜け落ちたパケットに相当するピクセルをフレームバッファに蓄積された古いフレームから検出し、代用する。

また、新しいフレームを入力する際、古いフレームに上書きされていくため、フレームバッファの 2 フレームは常に最新のフレーム 2 枚である。

6. 期待される成果

高画質かつ低遅延の映像配信システムは、より自然なリアルタイムコミュニケーションを実現できる。従って、遠隔協調演奏やコンピュータ制御による手術等といった遠隔医療といった遠隔操作など遅延における課題を解決する一つの糸口と成りうる。今後さらに 4K や 8K といった超高精細映像を撮影できるカメラや、表示端末が普及すると思われる。遠隔によるリアルタイムコミュニケーションの場において、自然なコミュニケーションの実現はアプリケーションの使用において重要である。

7. おわりに

本論文では、映像配信システムを用いた自然な映像コミュニケーションを実現するために、既存の映像コミュニケーションアプリケーションの遅延を計測、そして、計測結果を基に低遅延な映像伝送システムを提案した。

現在の映像配信環境では、フレーム間圧縮を用いることでデータ転送容量を削減している。計測結果では、計測したすべてのアプリケーションが目標の片方向遅延値である 150ms を超えており、ハードウェアを用いた遅延を第一に考えた映像配信環境が必要であることがわかった。一般的な圧縮方式では、データ圧縮と遅延はトレードオフの関係にあり、またパケットロスト時における映像修復に時間がかかることから、本提案システムでは、自然な遠隔コミュニケーションを実現するために、現在整備されているインターネット帯域を最大限利用した HDMI 無圧縮の映像配信を行う。さらに、読み込んだビデオ信号のパイプラインによる即時送信と、UDP によるショートパケットを利用することで、終端装置間全体の合計遅延低減を目指す。

本提案システムによって、遠隔地間の映像コミュニケーションがよりインタラクティブになり、今までのアプリケーションだけでは難しかった自然な遠隔協調作業が可能になる。

参考文献

- [1] ITU-T Recommendation G.114 "TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS"
- [2] Digilent : Atlys Board Reference Manual, Digilent available from http://www.digilentinc.com/Data/Products/ATLYS/Atlys_rm.pdf (accessed 2013-04-15)
- [3] WIDE project : Digital Video Transport System available from <http://www.sfc.wide.ad.jp/DVTS/>
- [4] FUJITSU : リアルタイム映像伝送装置 IP シリーズ IP-9500, FUJITSU available from <http://fenics.fujitsu.com/products/broadsight/material/pdf/ip-9500.pdf>
- [5] 君山博之, 川野哲生, 財満和孝, 原田啓司 : インターネット HDTV ビデオスタジオシステム i-Visto, NTT 技術ジャーナル, vol15, No6, pp70-73(2003)
- [6] Polycom 社, available from <http://www.polycom.com/>
- [7] Skype 社, available from www.skype.com/
- [8] Web RTC, available from <http://www.webrtc.org/>