

卒業論文 2016 年度（平成 28 年度）

映像制作現場における
高解像度映像 IP 伝送システム NG-HDMI-TS の
実装と評価

慶應義塾大学 環境情報学部

山中 勇成

徳田・村井・楠本・中村・高汐・バンミーター・植原・三次・中澤・武田
合同研究プロジェクト

2017 年 1 月

卒業論文 2016年度（平成28年度）

映像制作現場における 高解像度映像IP伝送システム NG-HDMI-TS の実装と評価

論文要旨

近年、現行のハイビジョン放送を超える超高繊細な画質による、4K・8K 映像の普及が世界中で加速している。4K 映像の帯域は 2K 映像と比較すると約 4 倍、現行のハイビジョン放送と比較すると約 8 倍にもなり、伝送方法とそのコストが課題である。そのため、映像業界では、映像機器と比べて比較的安価なネットワークリソースを活用して伝送する、Video over IP 化が進んでいる。

本研究では、汎用的なビデオインターフェースである HDMI から、映像を IP パケット化し、非圧縮の 4K 映像を伝送するシステムを設計、実装し、ネットワーク活用した映像伝送システムについて、評価?を行う。

本研究では、4K 映像キャプチャーボード、10Gbps ネットワークインターフェースカードを備えた汎用的なコンピューターで実装したソフトウェアと、Xilinx の 7-Series FPGA ボードで実装したハードウェアの両方を実装した。

評価として、4K 非圧縮映像の伝送を行う既製品である PFU QG70、実装したソフトウェア、実装したハードウェアのそれぞれにおいて遅延、重さ、XXX を計測し、XXX という結果となった。

キーワード

4K, IP 伝送, 映像配信システム, FPGA

慶應義塾大学 環境情報学部

山中 勇成

Abstract Of Bachelor's Thesis Academic Year 2016

Implementation and Evaluation of Delivery System for High Resolution Video at Video Production Site

Summary

In recent years, the spread of 4K / 8K images is accelerating all over the world. The bandwidth of 4K video is about 4 times as compared with 2K video, and it is about 8 times as compared with the current high vision broadcasting, and the transmission method and its cost are the issues. For this reason, in the video industry, Video over IP is advancing, utilizing relatively inexpensive network resources compared to video equipment, to transmit.

In this research, we evaluate video transmission system using network using HDMI which is a general-purpose video interface, designing and implementing a system for IP packetizing video, transmitting uncompressed 4K video, and implementing it.

And we implemented both software implemented on a general-purpose computer equipped with 4K video capture board and 10 Gbps network interface card and hardware implemented with Xilinx's 7-Series FPGA board.

Keywords

4K, Over IP, Video Streaming, FPGA

Bachelor of Arts in Environmental Information
Keio University

Yusei Yamanaka

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 本論文の背景	1
1.2 本論文の目的	2
1.3 本論文の構成	2
第 2 章 IP 伝送装置の技術要件	3
2.1 ビデオカメラ	3
2.2 ディスプレイ	3
2.3 インターレース	3
2.4 色空間と色深度	4
2.5 インターフェース	5
2.5.1 VGA	5
2.5.2 DisplayPort	5
2.5.3 DVI	5
2.5.4 HDMI	5
2.5.5 SDI	8
2.6 帯域	8
2.7 IP 伝送規格	9
2.7.1 SMPTE 2022	9
2.7.2 SMPTE 2110	10
2.7.3 NMI ネットワーク・メディア・インターフェース	10
2.7.4 NDI ネットワーク・デジタル・インターフェース	10
2.8 まとめ	11
第 3 章 IP 伝送装置の性能要件	12
3.1 映像制作現場の構成	12
3.2 映像制作現場における遅延の許容値の調査	13
3.2.1 実験方法	13
3.2.2 計測結果	15
3.2.3 考察	15
3.3 まとめ	16
第 4 章 ソフトウェアによる実験	17

4.1 考察	17
第 5 章 システムの設計・実装	19
5.1 実装の概要	19
5.2 FPGA の回路設計	20
第 6 章 評価	27
6.1 概要	27
6.2 トラフィック	27
6.2.1 計測手法	27
6.2.2 計測結果	27
6.3 遅延	30
6.3.1 計測手法	30
6.3.2 計測結果	30
6.4 YCbCr 4:2:0	33
6.5 考察	33
第 7 章 結論	34
7.1 本研究のまとめ	34
7.2 本研究の結論	34
7.3 今後の課題と展望	35
謝辞	36
参考文献	37

図 目 次

2.1 YUV のピクセルあたりの色情報の構造	4
2.2 HDMI ブロックダイアグラム	6
2.3 HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:4:4 における TMDS マッピング	7
2.4 HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:2:2 における TMDS マッピング	7
2.5 HDMI 2.0 で定義されている YCbCr 4:2:0 における TMDS マッピング	8
3.1 現在の映像制作現場における機器同士の接続図	12
3.2 将来的な映像制作現場における機器同士の接続図	13
3.3 今回の実験で Web ページ上に再現したマルチビュー映像	14
3.4 実際の中継現場で利用されているマルチビュー映像	14
3.5 映像制作現場における遅延の許容結果のグラフ	16
4.1 ソフトウェアによる実装の構成	17
4.2 Blackmagic Design Intensity Pro 4K キャプチャーボード	17
5.1 ハードウェアによる実装の構成	19
5.2 TED HDMI 2.0 FMC カード (TB-FMCH-HDMI4K)	19
5.3 FPGA 回路全体のブロックダイアグラム (図は後ほど書く)	20
5.4 Independent Clocking FIFO	21
5.5 Video Stream to Ethernet Packet Subsystem Diagram	22
5.6 Ethernet Packet to Video Stream Subsystem Diagram	22
5.7 UDP データの構造	22
5.8 映像データの流れ	24
5.9 ILA による IP 伝送時の HDMI 入出力のデータのダンプ	25
6.1 ソフトウェア実装における伝送中の受信バイトのグラフ	29
6.2 ソフトウェア実装における伝送中の受信パケットのグラフ	30
6.3 ハードウェア実装における伝送中の受信バイトのグラフ	31
6.4 ハードウェア実装における伝送中の受信パケットのグラフ	31
6.5 遅延の計測手法	32
6.6 ソフトウェア実装による遅延計測のキャプチャー画像	32
6.7 ソフトウェア実装による遅延計測のキャプチャー画像	32
6.8 ハードウェア実装による遅延計測のキャプチャー画像	33

表 目 次

2.1	HDMI 1.4 と 2.0 での 4K(3840x2160) 映像の対応状況	6
2.2	解像度、フレームレート、色空間による HDMI のデータレートの変化	9
2.3	SMPTE 2022 の 7 つの規格の概要	10
2.4	IP 伝送装置の技術要件	11
3.1	映像制作現場における遅延の許容結果	15
3.2	IP 伝送装置の性能要件	16
4.1	ソフトウェアによる実装を検証した PC の構成	17
5.1	10 Gigabit Ethernet Subsystem、及び、Video Processing Subsystem の接続のために実装したモジュール	21
5.2	Video Processing Subsystem の Axi4-Stream インターフェース	23
5.3	論理合成後のリソース	26

第1章 序論

1.1 本論文の背景

近年、現行のハイビジョン放送を超える超高繊細な画質による、4K・8K 映像の普及が世界中で加速している。また、日本でも東京 2020 オリンピック・パラリンピックに向け、総務省が 4K・8K 映像の普及を後押しをしている。

現在の放送業界では、同軸ケーブルを使用する SDI と呼ばれる伝送規格で映像を伝送する事が一般的である。また、ハイビジョン放送の制作では、1080i と呼ばれる有効走査線数 1080 本のインターレース方式が一般的である。現行のハイビジョンと比較すると、4K 映像の帯域は約 8 倍にもなり、伝送方法とそのコストが課題となっている。

SDI では 4K 映像の伝送を目的として、SMPTE ST-2081 および SMPTE ST-2082 により、6G-SDI と 12G-SDI が定められている。しかし、現行のハイビジョンで使用される HD-SDI と比較すると、高周波による減衰を少なくするために、太く短い同軸ケーブルを使用しなければならず、現場での扱いづらさが課題である。

多くの放送局のスタジオなどで使用しているカメラでは、カメラ本体と CCU (カメラコントロールユニット) を光ファイバーで接続する主流となっている。しかし、その接続方式は機器やメーカーごとに独自のものであり、光ファイバーのメリットを活用できていないのである。

そのため近年では、映像機器と比べて比較的安価なネットワークリソースを活用して、映像を IP パケットにして伝送する、Video over IP 化が進んでいる。

SDI の伝送と比較して、IP 伝送には次のようなメリットがある [18]。

- 1 本のケーブルで複数や双方向の映像が可能

同軸ケーブルとは異なり、双方向での通信が可能なため、双方向の映像の伝送が 1 本のケーブルで可能である。SDI では、単一の映像伝送を目的としているが、IP 伝送では帯域が許す限り複数の映像が伝送可能である。また、IP であるため、他のソフトウェアのデータなどの付加情報の伝送が可能である。

- 伝送スピードの向上

SDI では、一般的に銅線を使用した同軸ケーブルを使うため、高周波を扱う場合に限界がある。しかし、IP 伝送で用いられる光ケーブルでは、より高周波を扱うことが可能である。

- コストダウン

ネットワーク機器は、映像業界よりも先に 40G や 100G などの帯域に対応し、高速化が進んでいる。そのため、それらのリソースを活用することで映像機器に比べて、コストを飛躍的に抑えることが可能である。

また、IP 伝送の規格であるソニーの NMI[10] では、次のようなメリットがある。

- ライブシステムとファイルベースシステムを統合
リアルタイムなライブ映像の伝送だけではなく、ファイルベースのシステムと統合することが可能である。
- システムの柔軟性
ネットワーク機器を利用しているため、帯域が許す限り HD から 4K へのマイグレーションもスムーズに行なうことができる。
- 経路の多重化
ルーティングシステムに障害が発生した場合、今までケーブルの差し替えやパッチなどで対応することが一般的であったが、IP 伝送により経路を変更することにより、インフラ設備に対しての可用性を高めることができる。

このように Video over IP 化によるメリットは大きく、映像制作現場において、Video over IP 化が今後進んでいくことは明確である。

1.2 本論文の目的

Video over IP は拠点間の接続として IP 伝送装置が主に使われてきた。本論文では、映像制作現場などの拠点内における IP 伝送に着目する。まず、映像制作現場において IP 映像伝送に必要な要件をまとめる。次に、評価をおこなうため、ハードウェアによる 4K IP 伝送装置の NG-HDMI-TS を実装し、実験を行う。NG-HDMI-TS が拠点内の映像制作現場で必要となる要件を満たすことができるかどうかを検証する。

1.3 本論文の構成

本論文における以降の構成は次のとおりである。

2 章では、本論文を理解するための前提となる、映像機器の要素技術についての解説をする。色空間と帯域の関係などにも触れる。3 章では、本論文の要となる、映像制作現場における IP 伝送装置について、その要件をまとめる。また、要件を元に実装した IP 伝送装置、NG-HDMI-TS についての解説をする。4 章では、IP 伝送装置を、NG-HDMI-TS とは異なるソフトウェアで実装したことについて、その実装内容と評価、問題点をまとめる。5 章では、IP 伝送装置の NG-HDMI-TS を実装したことについて、その実装内容をまとめる。6 章では、5 章で実装した NG-HDMI-TS を、4 章で実装したソフトウェアの IP 伝送装置や既存の IP 伝送装置と比較をし、評価を行い、その結果について考察する。7 章では、本論文のまとめと今後の展望についてまとめる。

また、付録??では、ORF2015 での 100Gbps 回線を使用した映像伝送と遠隔スイッチングの実証実験についてまとめる。付録??では、ORF2016 での実証実験についてまとめる。

第2章 IP伝送装置の技術要件

本章では、映像伝送システムを構成する技術要素とその仕組みについて解説する。また、本研究でIP伝送装置を実装するにあたり、技術要件をまとめる。

2.1 ビデオカメラ

ビデオカメラは、映像の入力機構である。撮影素子であるイメージセンサは、多数の受光素子によって構成されており、それぞれの受光素子は、光エネルギーの明暗に従い電荷を発生する。撮影対象部から反射される光をカメラのレンズを通して、この撮影素子の受光部にあてることで、その明暗を電荷量を光電変換する。変換された電圧値を順次読み出し、電気信号に変換することでアナログ値である光情報をデジタル値に変換する。

ビデオカメラによる出力インターフェースとしては、デジタル信号としてはSDIやHDMIのインターフェースを使用するのが一般的である。

2.2 ディスプレイ

ディスプレイは、映像の表示機構である。ディスプレイには大まかに、アナログディスプレイとデジタルディスプレイに二分できる。

アナログディスプレイでは、CRT、すなわちブラウン管を用いた描画方式である。管面全体を走査線とよぶ固定パターンでスキャンしつつ、映像信号の輝度成分に従って電子ビームの強さを変調して描画する。このように、画面上の任意の点の明るさを制御することにより画像を作り上げている。

一方、デジタルディスプレイでは、薄い板状の液晶パネルを用いた描画方式である。偏光フィルタから入ってきた光を、電極によりピクセルのカラーごとに電荷をかけることにより、配向膜を光が通り抜け描画する。ブラウン管の走査方式を後継しており、映像の制御信号として、水平同期信号と垂直同期信号が使われている。

2.3 インターレース

画像伝送において、データレートを増やすずに描画回数を増やす技術である。この方式の特徴は、「人間の視野は動くものの細部を捉えられない」という性質に基づいている。飛び越し走査とも呼ばれ、奇数番目の走査線を先に送り、偶数番目の走査線をその後に送る。

デジタル化が進んでいる現在でも、走査線を1ラインに割り当て、データレートを減らす際の手段として利用されている。また、インターレースではない、画像をプログレッシブと呼び、インターレースからプログレッシブに変換する処理を、デインターレースと呼ぶ。

主な例として、日本のテレビジョン放送では、アナログテレビ放送、デジタルテレビ放送のどちらでも使われている。幸いなことに、4K・8K映像ではインターレース方式は使われることはない。

2.4 色空間と色深度

一般的に液晶ディスプレイでは、1ピクセルを赤、緑、青、すなわちRGBの3つの色信号で表現する。多くのPCやゲーム機の出力ではRGBの色空間が使われ、RGBそれぞれ8bit、1ピクセルあたり24bitで表現する。1ピクセルあたりを表現するビット数を色深度といい、色解像度、色分解能とも言われる。24bitの色深度では、16,777,216色を表現することができる。

一方、ビデオカメラでは、輝度信号Yと2つの色差信号を使って表現される色空間であるYUVが使われることが多い。この方式の特徴は、「人間の目は明るさの変化には敏感だが、色の変化には鈍感である」という性質に基づいて、色度信号の情報量を減らすことができるという点にある。

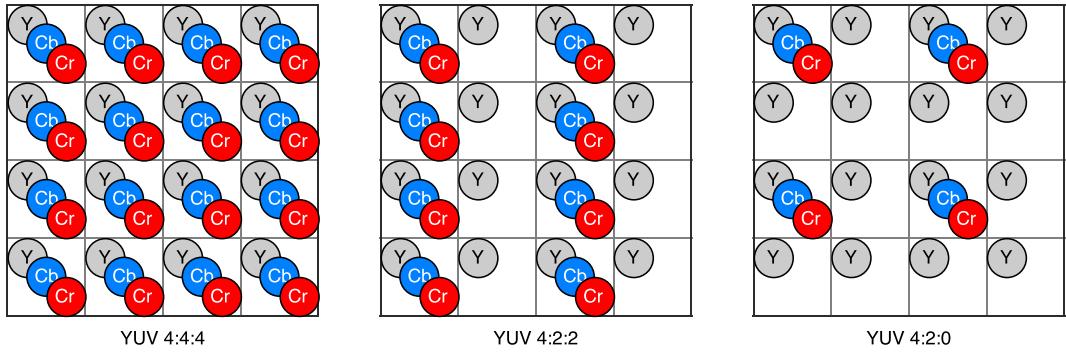


図 2.1: YUV のピクセルあたりの色情報の構造

YUV 4:4:4では、輝度信号、色差信号共に1ピクセル毎である。YUV 4:2:2では、輝度信号は1ピクセル毎、色差信号は2ピクセル毎であり、同じ色深度のYUV 4:4:4と比べ、帯域はおよそ $2/3$ となる。YUV 4:2:0では、輝度信号は1ピクセル毎、色差信号は4ピクセル毎であり、同じ色深度のYUV 4:2:2と比べ、帯域はおよそ $3/4$ となり、同じ色深度のYUV 4:4:4と比べ、帯域はおよそ $1/2$ となる。

なお、図2.1で示した、UV成分であるCb、Crの色のサンプリング方法は、伝送方式の規格によって定められている。

2.5 インターフェース

2.5.1 VGA

VGA (Video Graphics Array) は、IBM が発表したアナログ映像信号の伝送規格、または、同社が開発した VGA 表示回路用のチップのことを指す。DE-15 コネクタを使用し、赤、緑、青、垂直同期、水平同期の 5 つのアナログ信号で映像を伝送することができる。DDC (VESA Display Data Channel) 信号を使用することで、接続機器の対応する解像度を送信することができ、最近では 1080p の映像を伝送する機器も多い。PC での映像出力方式として普及したが、アナログ信号であることや、音声伝送の手段が別途必要となるため、HDMI や DisplayPort などのインターフェースに移行が進んでいる。

2.5.2 DisplayPort

DisplayPort は、VESA¹ によって標準化された映像伝送規格であり、主に超解像度向けのインターフェースとして普及している。DisplayPort 1.3 からは、32.4 Gbps のデータレートに対応し、8K 映像の伝送にも対応している。

2.5.3 DVI

DVI (Digital Visual Interface) は、VESA¹ によって標準化された デジタル映像信号の伝送規格である。物理層として、Silicon Image が開発した TMDS (Transition Minimized Differential Signaling) を使用している。TMDS は、データの 3 チャネルとクロックの 1 チャネルを備えた 4 つのツイストペアケーブルで構成され、主に高速シリアル通信で使用されている。TMDS では、データの 8b/10b 符号化が行われ、データレートは 20% のロスとなるが、DC 成分の偏りを押さえ、プランギング区間などでも I/O の遷移を増やしてデータの境界検出を用意している。

2.5.4 HDMI

HDMI (High-Definition Multimedia Interface) は、映像、音声をデジタル信号で伝送する通信インターフェースの規格である。DVI を基に、音声伝送機能や著作権保護機能を加えたものであり、物理層は DVI と同じ TMDS を使用している。

HDMI のシステム構成は大きく分けて、映像を送る機器 (Source) 映像を受け取る機器 (Sink) ケーブルの 3 つに分類することができる。

HDMI 2.0 では、帯域を 18Gbps に拡大し、4K@60p に対応している。また、CES 2017 に合わせ、HDMI 2.1 が発表され、帯域を 48Gbps に拡大し、8K@60p に対応した。

¹Video Electronics Standards Association ビデオ周辺機器に関する業界標準化団体

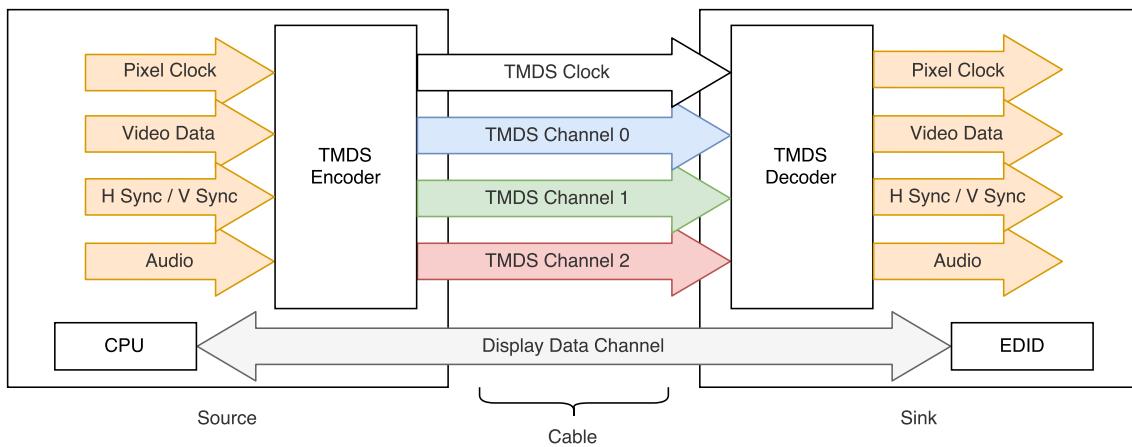


図 2.2: HDMI ブロックダイアグラム

表 2.1: HDMI 1.4 と 2.0 での 4K(3840x2160) 映像の対応状況

フレームレート	ピクセルあたりの色深度	HDMI 1.4	HDMI 2.0
30Hz	24bit	対応	対応
	30bit	対応	対応
	36bit	対応	対応
	48bit	非対応	対応
60Hz	24bit	非対応	対応
	30bit	非対応	対応
	36bit	非対応	対応
	48bit	非対応	非対応

HDMI 1.4[12] では、RGB、YCbCr 4:4:4、YCbCr 4:2:2 の色空間がサポートされている。HDMI 2.0[13] では、4K 解像度向けに YCbCr 4:2:0 の色空間がサポートされた。YCbCr 4:2:0 によるピクセルエンコーディングの規格では、YCbCr 4:2:2 と比べ、1/2 のデータレートで転送することが可能となった。これにより、一部の機器では 4K 解像度への対応をソフトウェアだけで行なうことが可能である。

YCbCr 4:4:4、YCbCr 4:2:2 の TMDS データのマッピングを、図 2.3 と図 2.4 に示す。

TMDS 0 [7:0]	Cb ₀	Cb ₁	Cb ₂	Cb ₃	Cb ₄	...
TMDS 1 [7:0]	Y ₀	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	...
TMDS 2 [7:0]	Cr ₀	Cr ₁	Cr ₂	Cr ₃	Cr ₄	...

図 2.3: HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:4:4 における TMDS マッピング

TMDS 0 [3:0]	Y ₀ [3:0]	Y ₁ [3:0]	Y ₂ [3:0]	Y ₃ [3:0]	Y ₄ [3:0]	...
	Cb ₀ [3:0]	Cr ₀ [3:0]	Cb ₂ [3:0]	Cr ₂ [3:0]	Cb ₄ [3:0]	...
TMDS 1 [7:0]	Y ₀ [11:4]	Y ₁ [11:4]	Y ₂ [11:4]	Y ₃ [11:4]	Y ₄ [11:4]	...
TMDS 2 [7:0]	Cb ₀ [11:4]	Cr ₀ [11:4]	Cb ₂ [11:4]	Cr ₂ [11:4]	Cb ₄ [11:4]	...

図 2.4: HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:2:2 における TMDS マッピング

2.4 節では、同じ色深度の場合 YUV 4:2:2 は YUV 4:4:4 と比べ帯域が 2/3 になると述べたが、HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:2:2 では、1 ピクセルあたりの色深度は変わらず、Y および CbCr のサンプリング解像度が 8bit から 12bit になる。そのため、HDMI では色空間の YCbCr 4:4:4、YCbCr 4:2:2 のどちらであっても帯域には影響しない。

YCbCr 4:2:0 の TMDS データのマッピングを、図 2.5 に示す。

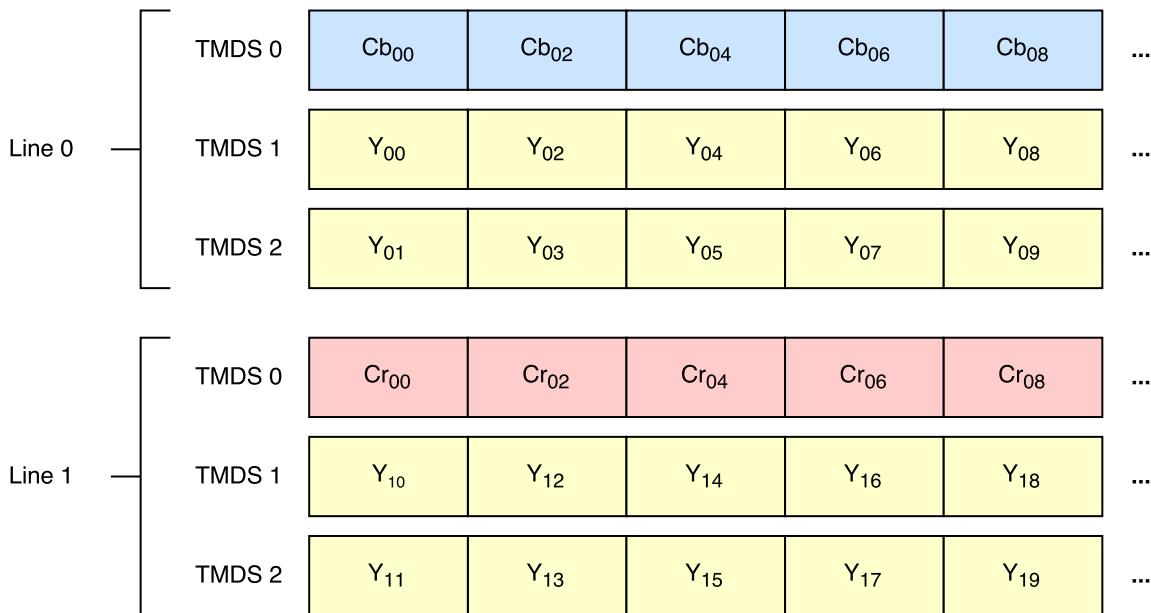


図 2.5: HDMI 2.0 で定義されている YCbCr 4:2:0 における TMDS マッピング

HDMI では、24bit の他に、30bit、36bit、48bit の色深度に対応しているが、YCbCr 4:2:0 では、24bit のみの対応である。

2.5.5 SDI

SDI (Serial Digital Interface) は、SMPTE² によって標準化された映像伝送規格であり、主に業務機器向けの規格である。

同軸ケーブルを使用しているため、HDMI と比べて距離に対する減衰が少なく、HD-SDI では、およそ 100m 遠方に伝送することができる。BNC 端子を使用することが一般的であり、抜け落ち防止のためのロック機能があるため、放送局や中継現場で使われる。

解像度や帯域に応じて、SD-SDI、HD-SDI、3G-SDI、6G-SDI、12G-SDI など複数の規格が定められている。また、4K・8K 映像を伝送するために、HD-SDI や 3G-SDI を 2 本 1 組や 4 本 1 組で使用して伝送する規格も定められている。

2.6 帯域

帯域は解像度の他にも、インターレース、色空間、色深度により変化する。また、伝送するインターフェースの規格によっても、物理層での扱いにより若干の違いがある。ここでは、HDMI

²米国映画テレビ技術者協会

で色深度を 8bit とした場合の解像度、フレームレート、色空間別に見たピクセルクロック、データレートを表 2.2 に示す。

同期区間を含めた垂直ピクセルを p_w 、水平ピクセルを p_h 、ピクセルあたりのビット数を b 、フレームレートを f としたとき、HDMI のデータレート r は次のようにして求めることができる。HDMI の物理層である TMDS では、8b/10b 変換が行われるため、データレートとしては 1.25 倍となることに注意していただきたい。

$$r = 1.25bfp_w p_h$$

表 2.2: 解像度、フレームレート、色空間による HDMI のデータレートの変化

解像度	フレームレート	色空間	ピクセルクロック	データレート
3840x2160	60p	RGB	594MHz	17.82 Gbps
3840x2160	60p	YUV422	594MHz	17.82 Gbps
3840x2160	60p	YUV420	297MHz	8.91 Gbps
3840x2160	30p	RGB	297MHz	8.91 Gbps
3840x2160	30p	YUV422	297MHz	8.91 Gbps
1920x1080	60p	RGB	148.5MHz	4.455 Gbps
1920x1080	60p	YUV422	148.5MHz	4.455 Gbps
1920x1080	60i	RGB	74.25MHz	2.2275 Gbps
1920x1080	60i	YUV422	74.25MHz	2.2275 Gbps

2.7 IP 伝送規格

Video over IP における映像の IP 伝送規格は、SMPTE 2022 と NMI が主流となっている [17]。しかし、その他にも多くの規格が提唱され、市場ではどの規格で統一されるかが静観されている。

IP 伝送規格は、SDI などの標準化を行っている SMPTE や、映像制作現場などの機器を制作している会社が製品とともに規格化を行う事が多い。この節では、抜粋して幾つかの IP 伝送規格について解説する。

2.7.1 SMPTE 2022

SMPTE 2022 は、SMPTE が提唱、標準化した IP 伝送規格であり、表 2.3 に示す 7 つの規格に分かれている。

SMPTE 2022-1/2/3/4 では、MPEG2 圧縮をベースとした IP 伝送について規格化され、SMPTE 2022-5/6 では、非圧縮であり SDI のペイロードを基とした IP 伝送について規格化されている。

表 2.3: SMPTE 2022 の 7 つの規格の概要

規格	概要
SMPTE 2022-1	IP 伝送でのリアルタイムビデオ/オーディオ転送の FEC 訂正
SMPTE 2022-2	IP 伝送での固定ビットレート MPEG-2 TS の単方向転送
SMPTE 2022-3	IP 伝送での可変ビットレート MPEG-2 TS の単方向転送
SMPTE 2022-4	IP 伝送での非ピース単位の可変ビットレート MPEG-2 ストリームの単方向転送
SMPTE 2022-5	IP 伝送での高ビットレートメディア信号の伝送のための前方誤り訂正
SMPTE 2022-6	IP 伝送でのネットワークを介した高ビットレートメディア信号の伝送
SMPTE 2022-7	IP データグラムのシームレスな保護スイッチング

2.7.2 SMPTE 2110

SMPTE 2110 は、SMPTE が制定中の規格であり、VSF (Video Services Forum) に提出された TR03、TR04 の内容を取り込んでいる。

SMPTE 2022-5/6 では SDI のペイロードを基としているため、IP パケットにする際には SDI をカプセル化している。そのため、映像と音声データを IP レイヤーから識別することができず、制御に利用しにくいなどの問題がある。この問題を回避するため、SMPTE 2110 では、ビデオデータの伝送には RFC 4175[11] の RTP、音声データの伝送には AES 67 を使用するなど、より効果的な IP 伝送規格になるよう設計されている。

2.7.3 NMI ネットワーク・メディア・インターフェース

NMI[10] は、ソニービジネスソリューションが提唱、規格化した IP 伝送規格である。

非圧縮ではなく、低遅延高画質のコーデックであり、Visually Lossless な LLVC[16] によって圧縮されている。また、機器間の同期にはナノ秒レベルの高精度同期が行える、SMPTE ST2059 を使用している。

2.7.4 NDI ネットワーク・デジタル・インターフェース

NDI[15] は、NewTek が提唱、開発したオープンな IP 伝送規格である。

多くの IP 伝送規格は商用向けであり、詳細な仕様はオープンになっていないが、NDI では SDK やプラグインなどを公開し、ユーザーを集めている。同社では IP ワークフローとして、NDI を利用したスイッチャーや入出力システムなどを提供している。

2.8 まとめ

本章では、IP 伝送装置における技術要素について解説した。

映像制作現場では、インターフェースとして SDI が用いられることが多い。しかし、SDI をインターフェースとする開発環境を整えるためには、コストが問題となる。そのため、本実装ではコストをより抑えつつ、映像制作現場でも使われている HDMI をインターフェースとする。

計算上では、10Gbps の帯域で 4K 30P の映像だけでなく、色空間と色深度を YCbCr 4:2:0 とすることで 4K 60P の映像も伝送することが可能であった。本実装では、4K 30P の他に、YCbCr 4:2:0 方式で 4K 60P の映像が伝送できることを要件とする。

IP 伝送規格については、SMPTE 2022 と NMI が主流であったが、どちらもオープンな規格ではなく規格に沿った実装をすることは困難である。そのため、今回の実装では独自方式のプロトコルを用いる。

表 2.4: IP 伝送装置の技術要件

インターフェース	HDMI
対応解像度	4K 3840x2160 30P
	4K 3840x2160 60P (但し YCbCr 4:2:0 方式)
プロトコル	独自規格

第3章 IP 伝送装置の性能要件

映像の IP 伝送については既に多くの先行研究があり、映像を拠点間などで伝送するための製品なども存在している。しかし、本論文では拠点間の IP 伝送だけにとどまらず、拠点内の設備までもを IP 伝送する、Video over IP をテーマとしている。

そのため、実際の映像制作現場で IP による映像伝送を普及させた際に、現在の拠点間の IP 伝送が抱える課題を洗い出し、拠点内でも快適に IP 伝送を利用できることができる要点をまとめ、それが可能であるかについて検証する。

3.1 映像制作現場の構成

現在の映像制作現場には、カメラ、スイッチャー、ディスプレイなどをはじめとする多くの機器がある。現在の中継現場における、機器同士の接続図を図 3.1 に示す。実際の中継現場では、映像の記録を行うためのレコーダー、映像の入出力を切り替えるためのルーターなどあることが多いが、ここでは割愛する。

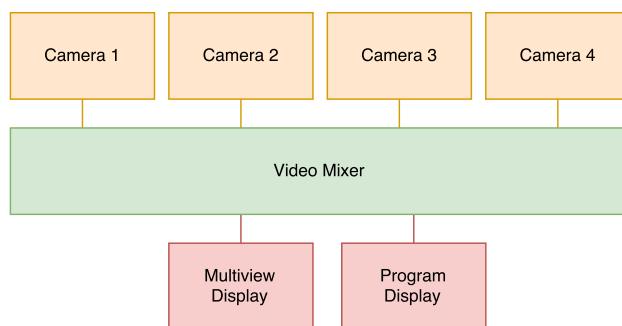


図 3.1: 現在の映像制作現場における機器同士の接続図

4 台のカメラを 1 台のスイッチャーに入力し、本線映像が出力される。入力されたソースの映像が複数並んだマルチビュー映像を見てオペレーターが操作することが一般的である。カメラとスイッチャー、スイッチャーとディスプレイは、それぞれ SDI で伝送を行う。

Video over IP 化が進んだ将来、理想的な中継現場における機器同士の接続図を図 3.2 に示す。

カメラとスイッチャー、スイッチャーとディスプレイは、それぞれ IP で伝送を行う。カメラからスイッチャーには 1 本の光ファイバーで接続されているが、スイッチャーからはソース映像、本線映像、マルチビュー映像のために 3 本の光ファイバーで接続されている。設定解像度の使用する帯域によっては、1 本で全ての映像を伝送できる場合もある。

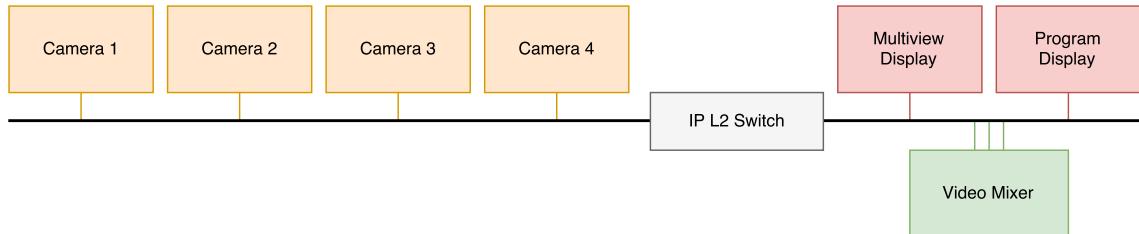


図 3.2: 将来的な映像制作現場における機器同士の接続図

3.2 映像制作現場における遅延の許容値の調査

中継現場で拠点間の映像の IP 伝送であれば、ある程度の遅延を許容することができる。屋外での中継で、外にいるリポーターと局内にいるキャスターとの音声に遅延があり、やり取りに間がある光景を見ることは少なくない。しかし、拠点内での映像の IP 伝送では、映像と音声が同期している必要があり、遅延はシビアな問題となる。

これを実証するために、映像制作現場において、オペレーターが許容できる遅延の範囲を調査する実験を行った。

3.2.1 実験方法

ブラウザ上で、キーボードの入力を利用した擬似的なスイッチャーの操作を行い、マルチビュー映像の出力を行うプログラムを開発した。音声は出力されない。プログラムで出力されるマルチビュー映像を図 3.3 に示す。これは、実際の中継現場で利用されているマルチビュー映像とほぼ同じである。

実験では、 $0ms$ から $499.99ms$ までを、 $1/30$ 秒である $33.33ms$ 間隔で分けた 16 段階のステップにわけ、各段階で入力から表示までの遅延を与える。各段階で与える遅延については、心理的な判断を避けるため実験終了後まで表示を行わない。また、各段階で与える遅延は、実験ごとにランダムになっている。各段階では、被験者からの入力を 15 秒間受け付ける。各段階の終了後、被験者に「遅延を許容できる」か「遅延を許容できない」かを問う。

この実験では、図 3.2において、スイッチャーとマルチビュー映像を表示するためのディスプレイ間での遅延が許容できるかについて調査したことと同義である。なお、実験では、ブラウザのレンダリングによる遅延も発生するため、キー入力からブラウザのレンダリングによる遅延も計測した。

被験者の対象は、映像制作現場に関わったことがある人で、マルチビュー映像に理解がある人と限定した。被験者は 38 人である。



図 3.3: 今回の実験で Web ページ上に再現したマルチビュー映像

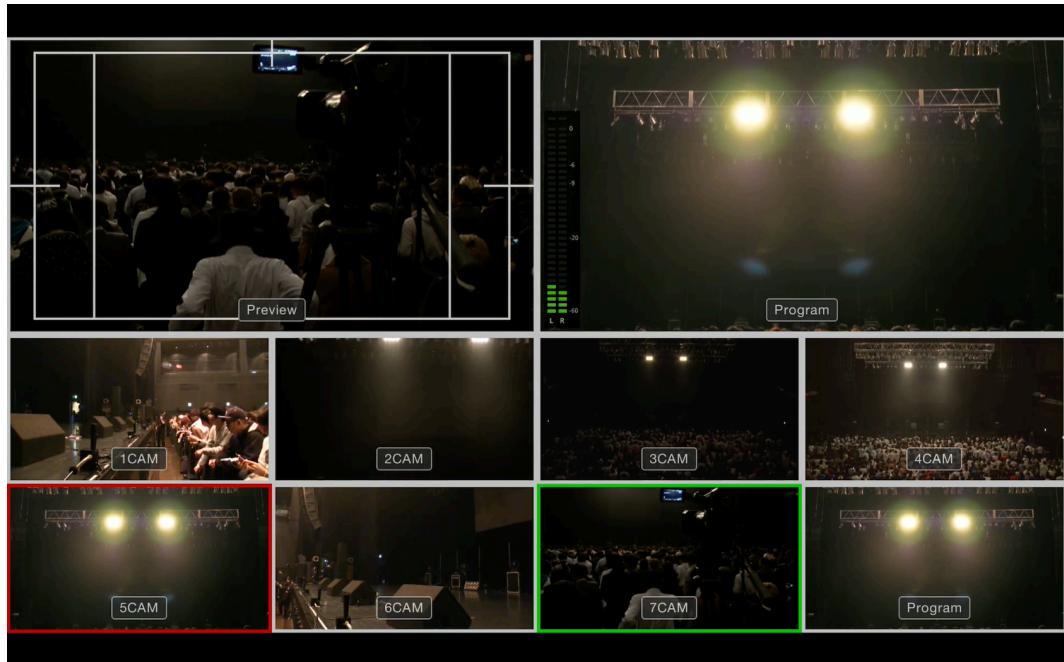


図 3.4: 実際の中継現場で利用されているマルチビュー映像

3.2.2 計測結果

全被験者からの総入力回数は、10645回であった。キー入力からブラウザのレンダリングによる遅延の平均は、8.6889msであった。ブラウザのレンダリングによる遅延は、60FPSにおける1フレーム未満であるため、ここでは無視できるものとした。

遅延時間における「遅延を許容できる」と回答した人数を表3.1に示す。

表3.1: 映像制作現場における遅延の許容結果

遅延時間	「遅延を許容できる」と回答した人数
0 ms	37
33.33 ms	38
66.66 ms	36
99.99 ms	35
133.33 ms	35
166.66 ms	31
199.99 ms	28
233.33 ms	26
266.66 ms	18
299.99 ms	13
333.33 ms	14
366.66 ms	15
399.99 ms	15
433.33 ms	14
466.66 ms	13
499.99 ms	10

3.2.3 考察

映像制作現場における遅延の許容結果のグラフを図3.5に示す。

133.33msまでの遅延では、被験者の9割以上が「遅延を許容できる」と回答しているが、166.66msの遅延では、8割を下回った。また、233.33msから266.66msの遅延になると、被験者の過半数が「遅延を許容できない」と回答した。

その他、グラフから読み取れる点として、299.99msから366.66msで人数が多少増加している。この原因としては、前述の通り各段階で与える遅延の順番はランダムであるため、前段階の遅延よりも短かった場合に体感的に「遅延を許容できる」と回答してしまった人がいるのではないかと考える。

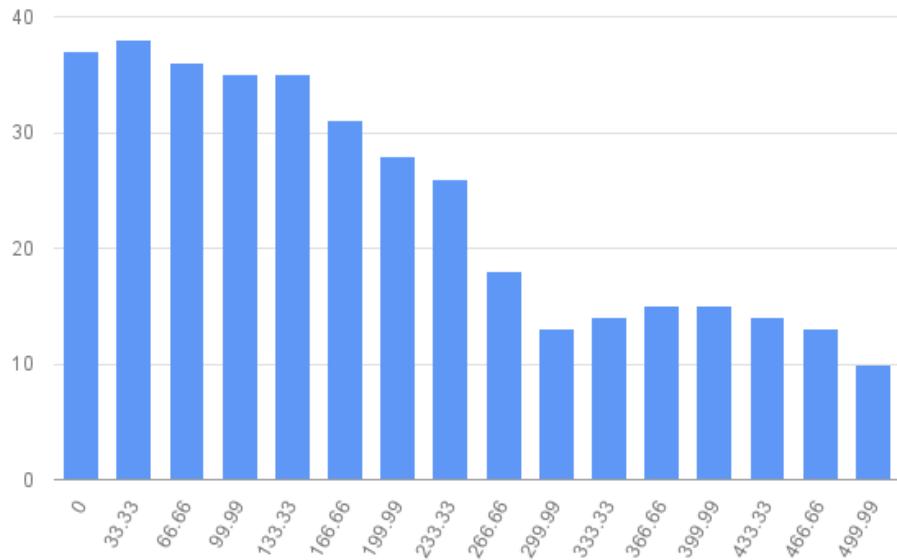


図 3.5: 映像制作現場における遅延の許容結果のグラフ

遅くとも 133.33ms の遅延であれば、9 割以上が遅延を許容できるため、過酷な映像制作現場に遅延が許容できると考えられる。133.33ms は、30FPS で 4 フレーム、60FPS で 8 フレームである。

3.3 まとめ

本章では、IP 伝送装置における性能の要件について調査した。

映像制作現場では、遅延が 133.33ms 以内であることが望まれる。

表 3.2: IP 伝送装置の性能要件

遅延時間	133.33ms 以内
トラフィック	10Gbps 以内

第4章 ソフトウェアによる実験

ソフトウェアによる実装では、汎用的な PC に 10Gbps 対応した NIC、4K 対応キャプチャーボード Blackmagic Design Intensity Pro 4K を用いて行った。本実装の概要を、図 4.1 に示す。

表 4.1: ソフトウェアによる実装を検証した PC の構成

OS	Ubuntu 14.04 Desktop
CPU	Intel Core i7-4770 @ 3.40GHz
RAM	8GB

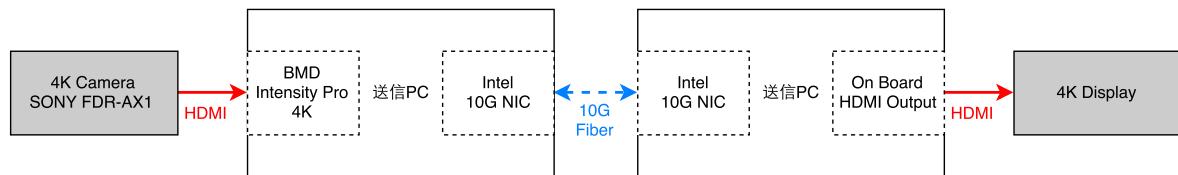


図 4.1: ソフトウェアによる実装の構成



図 4.2: Blackmagic Design Intensity Pro 4K キャプチャーボード

送信プログラムでは、キャプチャーボードのデータを Blackmagic DeckLink SDK[14] を用いて取得し、IP 経由で伝送するプログラムを作成した。受信プログラムでは、IP 経由で受信したデータを Linux 汎用的なメディアプレーヤーである mplayer で再生するプログラムを作成した [8]。

4.1 考察

ソフトウェアによる実装ではいくつかの改善点がある。

今回の評価ではダークファイバー環境での想定のため、順序制御、再送制御の実装を省くため、TCPで実装を行った。

第5章 システムの設計・実装

本章では、3章で述べた、映像制作現場におけるIP伝送装置について評価するため、4K映像を非圧縮でIPで伝送するシステムであるNG-HDMI-TSをハードウェアで実装したことについて実装の解説をする。

5.1 実装の概要

IP伝送装置は、Xilinx KC705評価ボード[7]、HDMIインターフェースカードであるTED HDMI 2.0 FMCカード[6]を使用した。本実装の構成を図5.1に示す。

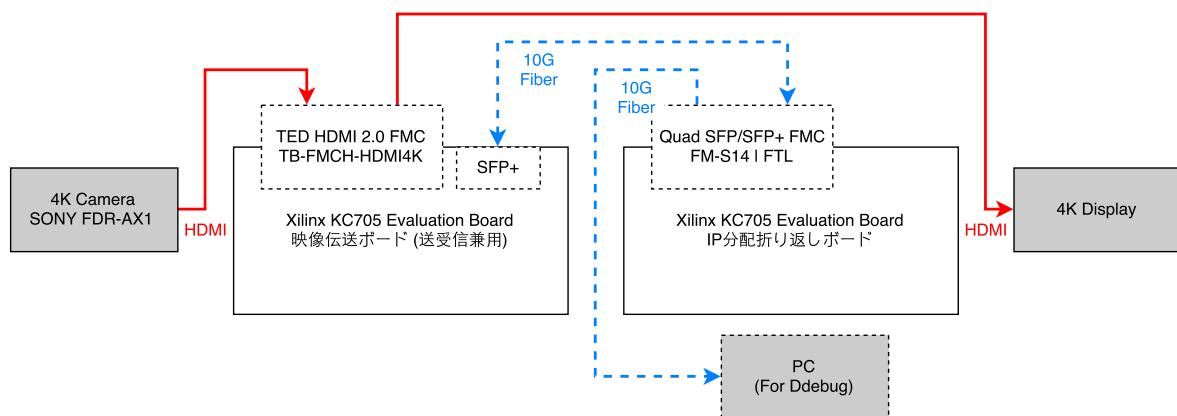


図 5.1: ハードウェアによる実装の構成



図 5.2: TED HDMI 2.0 FMC カード (TB-FMCH-HDMI4K)

今回の構成では、IP 伝送装置とは別に 1 台の Xilinx KC705 評価ボード、Quad SFP/SFP+ カードを用いて、送信した IP パケットを折り返しする装置を使用した。IP パケットを折り返しする装置について、IP 伝送装置と直接の関係はないため、ここで解説は割愛する。

本実装では、論理合成ツールとして Xilinx Vivado 2016.2 を使用した。また、開発言語として Verilog HDL を使用した。

5.2 FPGA の回路設計

本実装は、Xilinx が提供している Kintex-7 シリーズ向けの HDMI 2.0 のリファレンス実装である xapp1287[5] をベースとしている。Xilinx の提供する IP である 10 Gigabit Ethernet Subsystem[1]、Video PHY Controller[9]、HDMI 1.4/2.0 Transmitter Subsystem[4]、及び、HDMI 1.4/2.0 Receiver Subsystem[3]、FIFO Generator[2] が使用されている。本研究のために、新たに実装をした箇所は、これらの IP に対してデータを受け渡しするモジュールとなる。FPGA の回路全体のブロックダイアグラムを図に示す。

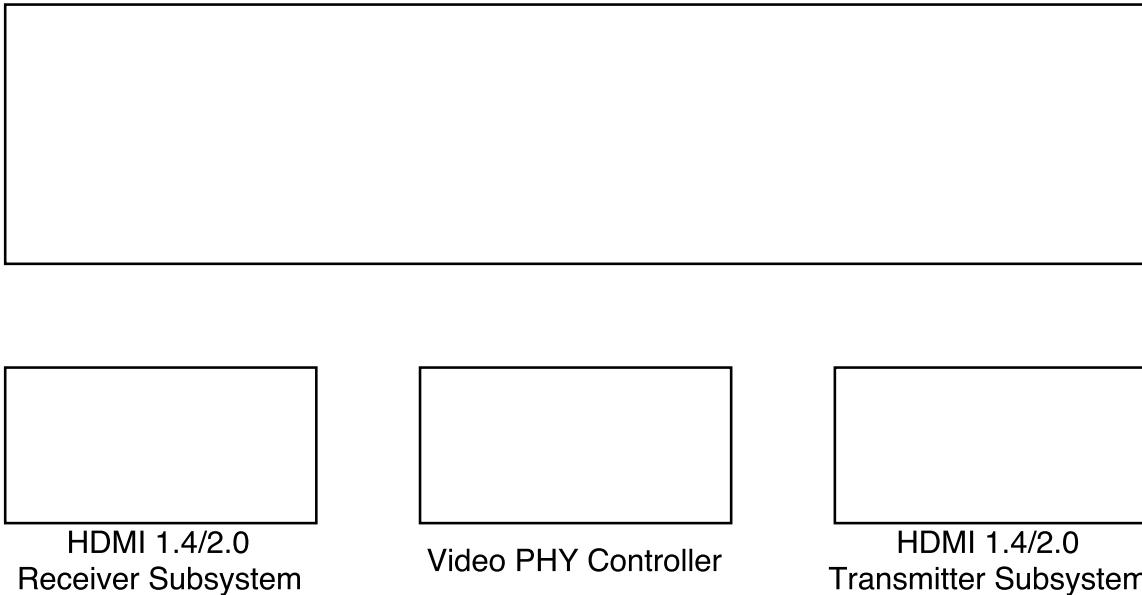


図 5.3: FPGA 回路全体のブロックダイアグラム（図は後ほど書く）

受信側と送信側で、10 Gigabit Ethernet Subsystem と Video Processing Subsystem 間の受け渡しを行うため、表 5.1 に示す 4 つのモジュールを実装した。

10 Gigabit Ethernet Subsystem の基準クロックは 64bit 幅の設定で 156.25MHz となり、Video Processing Subsystem の基準クロックは 300MHz となる。互いの基準クロックが異なるため、データをそのまま受け渡しすることはできない。

この問題を解決するため、読み書きで独立したクロックに対応した Independent Clocking FIFO を FIFO Generator で作成する。今回の IP 伝送装置の送信側で用いた、FIFO のモジュールを図 5.4 に示す。

表 5.1: 10 Gigabit Ethernet Subsystem、及び、Video Processing Subsystem の接続のために実装したモジュール

Name	Description
v_axi4s_eth2fifo.v	Ethernet Subsystem のクロックで、Ethernet Subsystem から送られてきた映像データを FIFO に書き込むモジュール
v_axi4s_fifo2eth.v	Ethernet Subsystem のクロックで、FIFO から読み込んだ映像データを Ethernet Subsystem に送るモジュール
v_axi4s_vid2fifo.v	Video Processing Subsystem のクロックで、Video Processing Subsystem から送られてきた映像データを FIFO に書き込むモジュール
v_axi4s_fifo2vid.v	Video Processing Subsystem のクロックで、FIFO から読み込んだ映像データを Video Processing Subsystem に送るモジュール

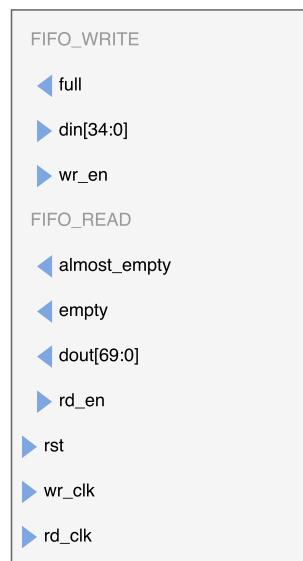


図 5.4: Independent Clocking FIFO

読み書きで独立したクロックの他に、入出力のデータ幅が異なっており、入力のデータ幅は35bit、出力のデータ幅は倍の70bitとなっている。理由は後述する。Video Processing Subsystemは300MHzで35bitのデータを書き込み、10 Gigabit Ethernet Subsystemは156.25MHzのデータを読み込む。10 Gigabit Ethernet Subsystemのクロックが早いため、FIFOがフル状態になることはない。また、almost_empty フラグを使用しており、emptyになる1クロック前に知ることが可能である。

送信側のモジュールの接続を図5.5に示す。

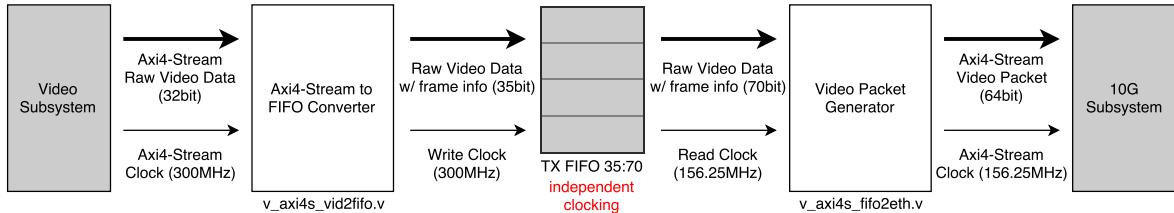


図5.5: Video Stream to Ethernet Packet Subsystem Diagram

受信側のモジュールの接続を図5.6に示す。

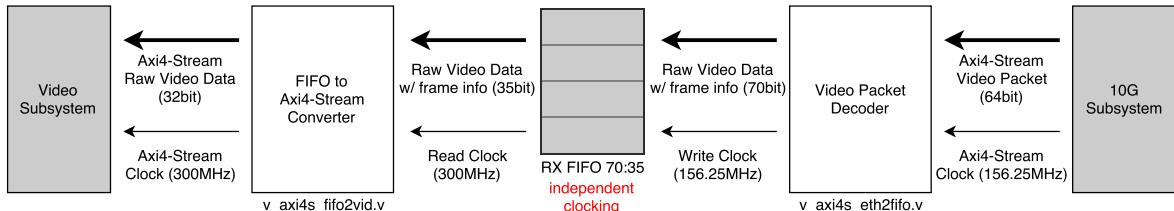


図5.6: Ethernet Packet to Video Stream Subsystem Diagram

Video Processing Subsystemが出力するAxi4-Streamのtdataは映像データを表し、有効データ幅は32bitである。また、表5.2に示すとおり、tlastがラインの終了、tuserがフレームの開始を表す。FIFOに映像データだけを書き込んだ場合、ラインの終了、フレームの開始のタイミングが失われることとなる。この問題を解決するため、FIFOにはAxi4-Streamのtdataの他に、tlast、tuser、tvalidも書き込む。

図5.7に、本実装で用いたUDPデータの構造を示す。



図5.7: UDPデータの構造

表 5.2: Video Processing Subsystem の Axi4-Stream インターフェース

Name	Width	Description
tdata	$3*BPC^1*PPC^2$	Data
tlast	1	End of line
tready	1	Ready
tuser	1	Start of frame
tvalid	1	Valid

UDP データの映像データより前のヘッダー区間は 6byte となっている。これは、FPGA 内部で Ethernet パケットを構築していく際に、データの先頭 6byte が丁度 64bit の区切り目となるためであり、FPGA で処理する際に効率が良い。UDP のパケットは FIFO にデータがある間生成され続けるため、IP パケット上の長さは 00 としている。映像データによってはジャンボフレームとなる場合もある。

各モジュールで映像データがどのように扱われるかを波形イメージとして、図 5.8 に示す。

HDMI 1.4/2.0 Receiver Subsystem から出力されるデータは、v_axi4s_vid2fifo.v によって、1 クロック遅れて FIFO に書き込まれる。FIFO はある程度のバッファリングが行われるため、一定クロック経過後に empty が立ち下がり、データが読み取れる状態となる。v_axi4s_fifo2eth.v によって、empty の立ち下がりの 1 クロック遅れで、Ethernet、IP、UDP ヘッダーの生成を行う。ヘッダーの生成中にも映像データが FIFO にたまり続ける。ヘッダーの生成があわる 1 クロック前に rd_en を立ち上げ、FIFO のデータを読み取る。UDP データとして映像データを書き込み、almost_empty の立ち下がりで rd_en を立ち下げる。

図 5.9 では、本実装を稼働させたときの ILA (Integrated Logic Analyzer) とよばれる、FPGA の内部信号をモニターするためのツールを使った際に、HDMI の入力と出力を検証した様子である。前述の通り、almost_empty の立ち下がりを合図に、パケットを生成してから映像データを書き込むまでに一定のクロックが経過するため、FIFO への書き込みがバッファリングされる。hdmi_rx_tvalid が頻繁に立ち上がりと立ち下がりを繰り返しているのに対し、hdmi_tx_tvalid はある程度まとまった周期で立ち上がりをしている様子が確認できる。

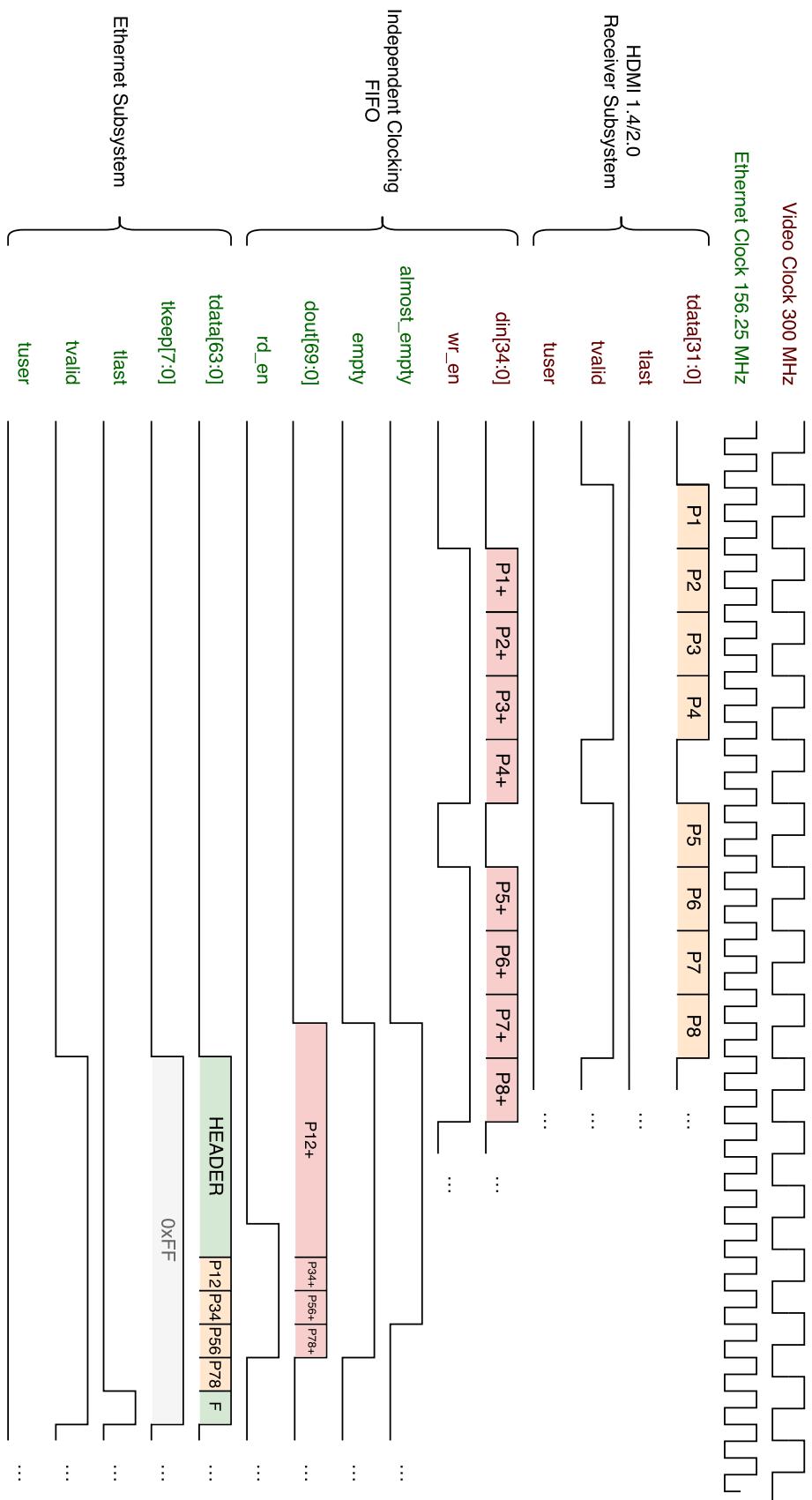


図 5.8: 映像データの流れ

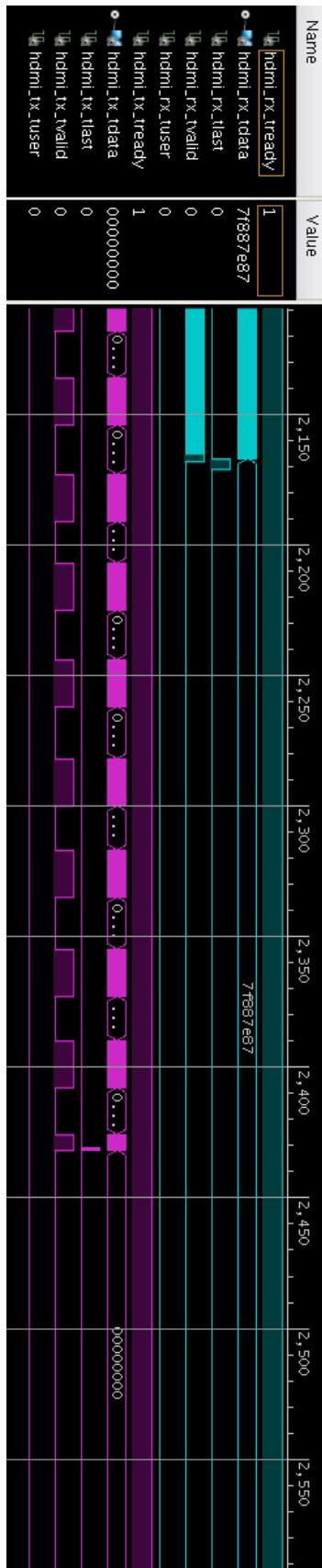


図 5.9: ILA による IP 伝送時の HDMI 入出力のデータのダンプ

表 5.3: 論理合成後のリソース

リソース	使用	全体	使用率
LUT	48474	203800	23.79%
LUTRAM	4696	64000	7.34%
FF	55768	407600	13.68%
BRAM	310.50	445	69.78%
DSP	23	840	2.74%
IO	40	500	8.00%
GT	4	16	25.00%
BUFG	20	32	62.50%
MMCМ	3	10	30.00%
PLL	1	10	10.00%

第6章 評価

3章での映像制作現場におけるIP伝送装置の要件に基づいて、ソフトウェア、ハードウェアそれぞれIP伝送装置の実装を行った。本章ではアプローチが有効な手法であるか、それぞれの項目について評価する。

6.1 概要

4章と5章で実装したIP伝送装置を動作させ、それぞれの項目について評価を行う。

6.2 トラフィック

本節では、実装したIP伝送装置が理想通りにパケットの送信を行っているかを確認するために、Linux PCを用いてトラフィックを計測した。

6.2.1 計測手法

ソフトウェア実装の場合はにおける受信PC、ハードウェア実装の場合はIP分配折り返しボードに接続されたデバッグ用のPCで、受信バイト数、受信パケット数、破棄パケット数を計測した。ネットワークインターフェースの情報は`/proc/net/dev`を監視した。`rrdtool`を使い集計し、グラフとして出力した。

6.2.2 計測結果

ソフトウェア実装における計測結果を、図6.1と6.2に示す。

図6.1で示した受信バイトのグラフでは、平均489Mbpsとなっている。ソフトウェア実装での映像データはYCbCr 4:2:2の色深度が16bitであるため、ピクセルあたり2bytesとなる。理想的な1秒あたりの受信バイト数は、次のように求められる。

$$3840 * 2160 * 2 * 30 = 497664000$$

理想的な1秒あたりの受信バイト数を満たしていない。この原因としては、送信PCがデータの送信に追いつかない場合に自動的にフレームをドロップさせる処理によるものだと考えられる。

ハードウェア実装における計測結果を、図 6.3 と 6.4 に示す。

図 6.4 で示した受信パケットのグラフでは、パケットがドロップしている事が確認できる。これは、カーネルのネットワーク処理が、FPGA のハードウェアによる出力の速度に追いつかなかったためだと考えられる。ハードウェア実装での映像データは YUV 422 でピクセルあたり 12bit となる。理想的な 1 秒あたりの受信バイト数は、次のように求められる。

$$3840 * 2160 * 3/2 * 30 = 373248000$$

1 パケットあたりの平均バイト数は、次のように求められる。

$$694800066.36 / 5437845.10 = 127.77$$

そのため、本来 PC が受信してたであろうバイト数は、次のように求められる。

$$(5437845.10 + 1494269.10) * 127.77 = 885716231$$

127.77-56

0.5617

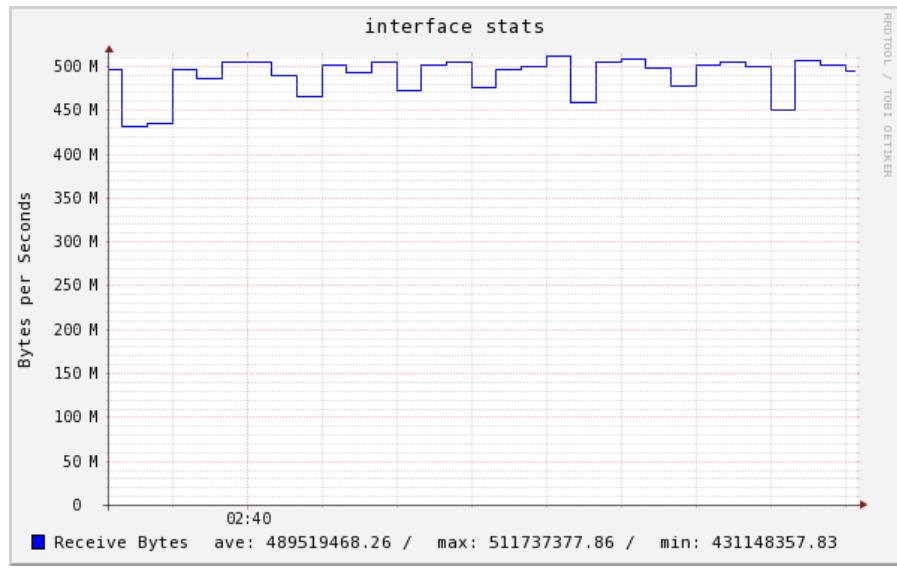


図 6.1: ソフトウェア実装における伝送中の受信バイトのグラフ

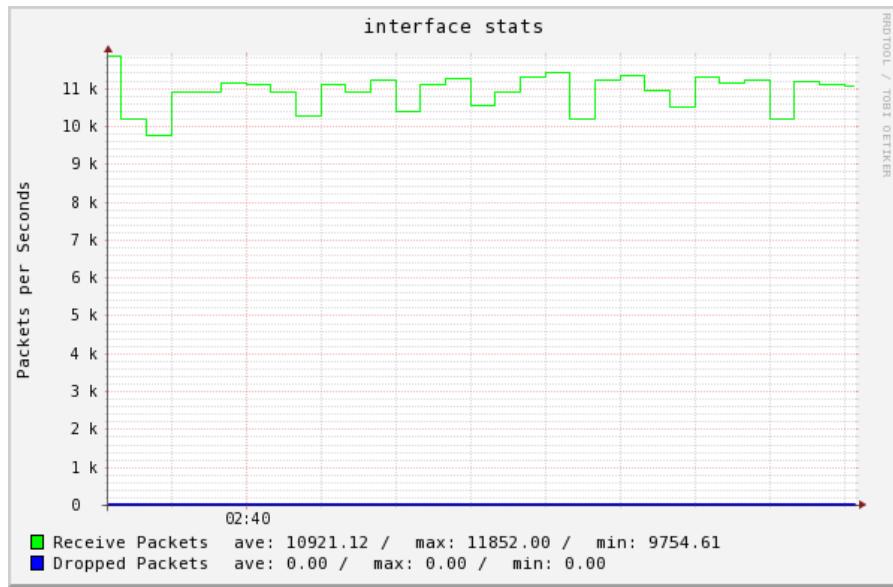


図 6.2: ソフトウェア実装における伝送中の受信パケットのグラフ

6.3 遅延

遅延を計測した

6.3.1 計測手法

映像機器の遅延を計測するため、テスト信号生成、マルチビューワー生成、画面キャプチャの機能を有する機器を用意した。遅延を計測した機器の構成を図 6.5 に示す。

テスト信号生成では、フレーム単位のタイムコードが表示された同じソースの映像を 2 つの信号として出力する。一方をスイッチャーへ入力し、もう一方を検査対象となる機器に入力し、その出力をスイッチャーへ入力する。これにより、2 つの信号の遅延は、検査対象となる機器で発生した遅延に抑えることができる。スイッチャーに入力された 2 つの信号はマルチビューワーとして 1 つの画面に表示され、その画面をキャプチャすることにより、ある瞬間の 2 つの信号を 1 つの画像で確認することができる。このスイッチャーには、フレーム同期の機能があり、1 フレームより短い期間でバッファリングされるため、計測できる粒度はフレーム単位となる。

6.3.2 計測結果

aaa

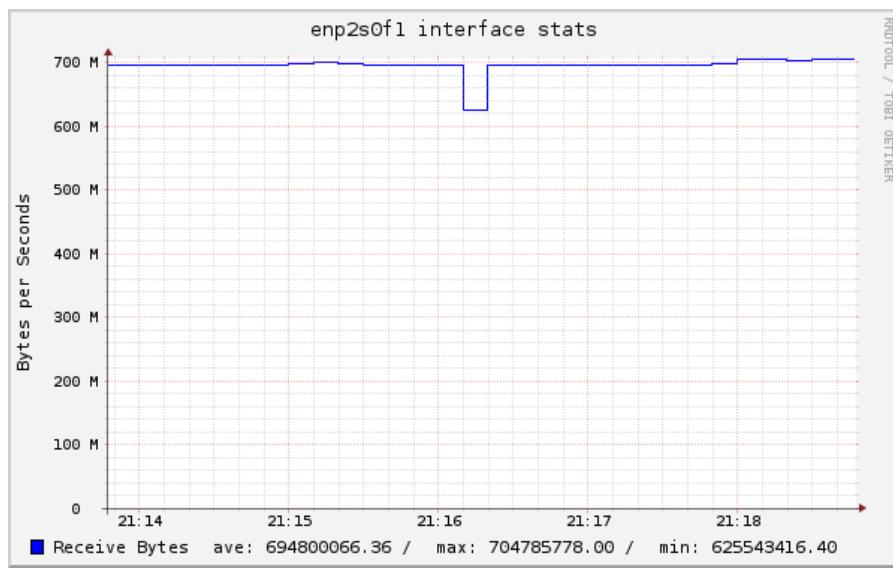


図 6.3: ハードウェア実装における伝送中の受信バイトのグラフ

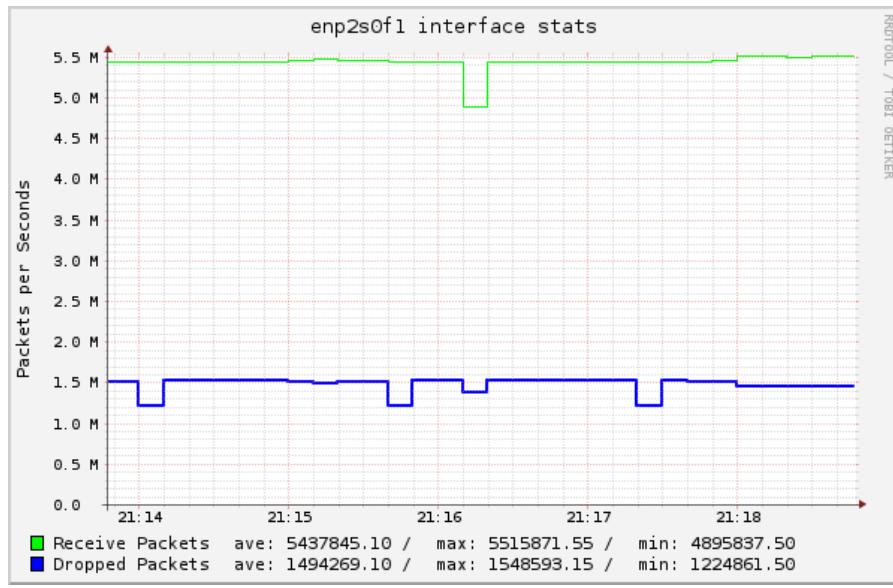


図 6.4: ハードウェア実装における伝送中の受信パケットのグラフ

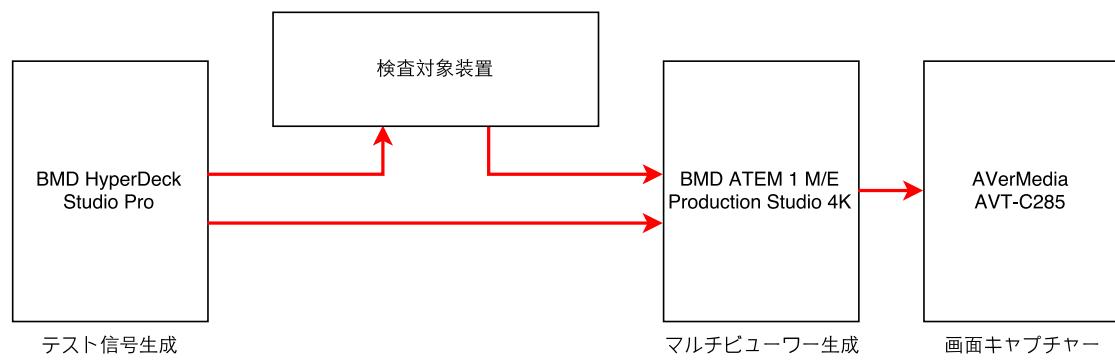


図 6.5: 遅延の計測手法

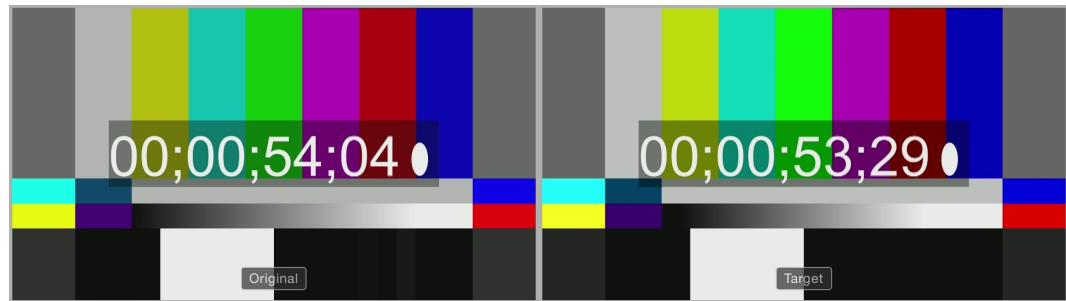


図 6.6: ソフトウェア実装による遅延計測のキャプチャー画像 左がオリジナルの信号、右が検査対象の信号

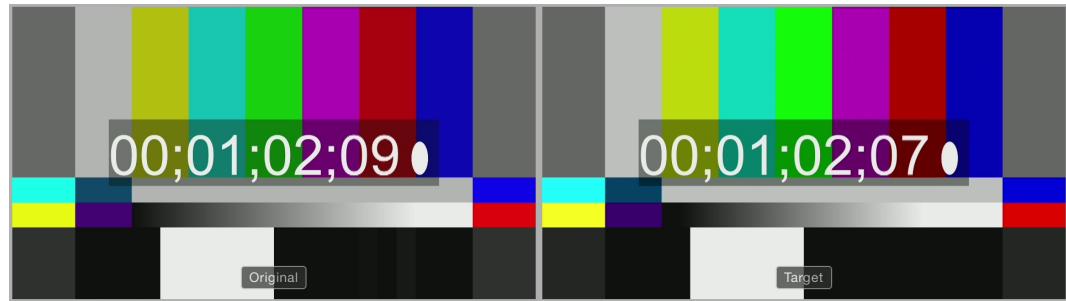


図 6.7: ソフトウェア実装による遅延計測のキャプチャー画像 左がオリジナルの信号、右が検査対象の信号

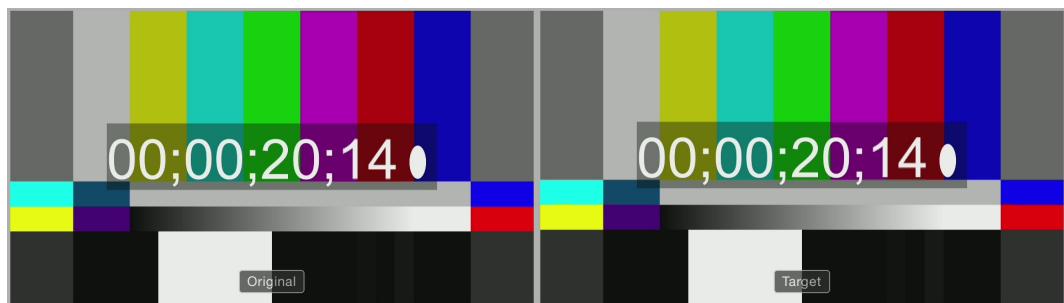


図 6.8: ハードウェア実装による遅延計測のキャプチャー画像 左がオリジナルの信号、右が検査対象の信号

6.4 YCbCr 4:2:0

あああ

6.5 考察

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

本研究では、映像制作現場におけるIP伝送の優位性を示すために、現状の映像伝送における必要条件と課題点を洗い出し、IP伝送でその必要条件を満たすことができ、さらに課題点をクリアすることができるかを証明した。

まず、映像伝送における重要な要件の1つである遅延の許容範囲を満たすために、映像制作現場においてどれほどの遅延が許容できるのかを調査した。平均的にXmsの遅延があると、許容できないという被験者がN割を超えた。この調査から、IP伝送ではXms以内の遅延に抑えるべきと結論づけた。

次に、4K映像をIP伝送するシステムを、ソフトウェアとハードウェアで実装し、それについて要件が満たせるかについて検証と評価を行った。

ソフトウェアによる実装では、汎用的なPCでもキャプチャーボードと10GbpsのNICがあれば4K映像のIP伝送が行えることがわかった。評価では、遅延がXms発生し、安定性が低い結果となった。

ハードウェアによる実装では、XilinxのKC705とTEDのHDMIインターフェースカードを使い、EthernetとHDMIのシステムの変換を担う回路を設計した。評価では、遅延はXmsであり、安定性も高い結果となった。

7.2 本研究の結論

ハードウェアの実装では、最初に示した映像伝送における重要なポイントうち、画質、音節の劣化を防ぎ、遅延を一定以下にし安定させて稼働することが可能であった。また、コスト面については、量産化されてきた映像機器や同軸ケーブルなどに比べて高価となってしまった。

これらの点をまとめると、映像伝送における重要なポイントが満たせ、IP伝送によるメリットも生まれることから、IP伝送を制作現場における優位性が立証できた。また、映像制作現場における高解像度映像IP伝送システムが活用することが可能であった。

7.3 今後の課題と展望

本研究では、IP 伝送による映像配信システムの設計をした。

ソフトウェアによる実装では、TCP で実装したが UDP で実装すべきである。

また、ハードウェアによる実装では、クロックを同じハードウェアで共有しているため、クロックについての考慮をしていない。そのため、他のハードウェアでもクロック情報を共有する必要がある。

また、IP 伝送のためのプロトコルがいくつか普及ってきており、それに合わせた実装も行いたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導いただきました慶應義塾大学 環境情報学部教授 村井純博士、同学部教授 中村修博士、同学部准教授 Rodney D. Van Meter III 博士、同学部准教授 植原啓介博士、同学部准教授 中澤仁博士、SFC 研究所 上席所員（訪問）斎藤賢爾博士に感謝致します。

研究について日頃からご指導頂きました政策・メディア研究科博士課程 松谷健史氏、政策・メディア研究科特任助教 空閑洋平氏、理工学研究科開放環境科学専攻 後期博士課程 徳差雄太氏に感謝致します。研究室に所属したばかりの頃から本研究に至るまで、特定の分野にこだわらない広い視点で何年生の時であっても妥協のない姿勢で向かい合い、絶えず多くのご指導をいただきました。本研究を卒業論文としてまとめることができたのも両氏のおかげです。重ねて感謝申し上げます。

本研究の評価に必要な伝送装置の助言、機材を運搬していただいた一般社団法人 Mozilla Japan 工藤紀篤博士に感謝いたします。評価に必要な伝送装置を借用させていただいた慶應義塾大学デジタルメディア・コンテンツ統合研究センターの皆様に感謝いたします。長期の間、開発、実験用に 4K カメラなどの機器を借用させていただいた慶應義塾大学湘南藤沢メディアセンターマルチメディアサービスの皆様に感謝いたします。

研究室を通じた生活の中で多くの示唆を与えてくれた XXXX 氏、および Arch 研究グループの皆様に感謝します。また、徳田・村井・楠本・中村・高汐・バンミーター・植原・三次・中澤・武田 合同研究プロジェクトの皆様に感謝致します。

最後に、私の研究を支えてくれた両親をはじめとする親族、多くの友人・知人に感謝し、謝辞と致します。

参考文献

- [1] 10 Gigabit Ethernet Subsystem v3.0 (PG157). https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/axi_10g_ethernet/v3_0/pg157-axi-10g-ethernet.pdf.
- [2] FIFO Generator v12.0 (PG057). https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/fifo_generator/v12_0/pg057-fifo-generator.pdf.
- [3] HDMI 1.4/2.0 Receiver Subsystem v2.0 (PG236). https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/v_hdmi_rx_ss/v2_0/pg236-v-hdmi-rx-ss.pdf.
- [4] HDMI 1.4/2.0 Transmitter Subsystem v2.0 (PG235). https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/v_hdmi_tx_ss/v2_0/pg235-v-hdmi-tx-ss.pdf.
- [5] HDMI 2.0 Implementation on Kintex-7 FPGA GTX Transceivers. https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp1287-hdmi-on-fpga-gtx-transceivers.pdf.
- [6] HDMI 2.0 カード TB-FMCH-HDMI4K. <http://www.inrevium.com/product/video/index.html>.
- [7] KC705 Evaluation Board for the Kintex-7 FPGA. https://www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/kc705/ug810_KC705_Eval_Bd.pdf.
- [8] sfc-arch/bmd-4k-streaming. <https://github.com/sfc-arch/bmd-4k-streaming>.
- [9] Video PHY Controller v2.0 (PG230). https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/vid_phy_controller/v2_0/pg230-vid-phy-controller.pdf.
- [10] Sony Business Solutions Corporation. ネットワーク・メディア・インターフェース. https://www.sony.jp/products/Professional/c_c/nmi/.
- [11] L. Gharai and C. Perkins. RTP Payload Format for Uncompressed Video. RFC 4175, Internet Engineering Task Force, September 2005.
- [12] HDMI Licensing, LLC. *High-Definition Multimedia Interface Specification*. Version 1.4.
- [13] HDMI Licensing, LLC. *High-Definition Multimedia Interface Specification*. Version 2.0.

- [14] Blackmagic Design Pty. Ltd. Blackmagic Desktop Video SDK. <https://www.blackmagicdesign.com/jp/support/family/capture-and-playback>.
- [15] Inc. NewTek. NDI. <http://www.newtek.com/ndi.html>.
- [16] Society of Motion Picture and Television Engineers. *SMPTE RDD 34*.
- [17] 小寺信良. 【小寺信良の週刊 Electric Zooma!】コンテンツのHDR化、IP伝送による作り手側の混乱。InterBEEで見た理想と現実- AV Watch. <http://av.watch.impress.co.jp/docs/series/zooma/1033618.html>.
- [18] 小寺信良. 【小寺信良の週刊 Electric Zooma!】第733回：裏方の大革命、4K放送に向け、“IP伝送”の道筋が見えてきた「InterBEE 2015」 - AV Watch. <http://av.watch.impress.co.jp/docs/series/zooma/732055.html>.