

卒業論文 2016 年度（平成 28 年度）

ネットワークを活用した  
高解像度映像伝送システムの設計と実装

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

# ネットワークを活用した 高解像度映像伝送システムの設計と実装

## 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<sup>1</sup>を行う。

本研究では、4K 映像キャプチャボード、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

# Abstract Of Bachelor's Thesis Academic Year 2016

## Design and Implementation of Delivery System for High Resolution Video Utilizing Network

### Summary

Eigo ga dekinai node Roma-ji de soreppoi hunniki wo daseruto iina.

Murippoi desu ne.

Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here.

Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here. Write down your abstract here.

Write down your abstract here. Write down your abstract here.

### 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	本論文が着目する課題	2
1.3	本論文の目的	2
1.4	本論文の構成	2
第2章	映像伝送システム	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	3
2.5	帯域	4
2.6	インターフェース	4
2.6.1	VGA	4
2.6.2	DisplayPort	5
2.6.3	DVI	5
2.6.4	HDMI	5
2.6.5	SDI	6
2.7	伝送手法	7
2.8	まとめ	7
第3章	ネットワークを活用した映像伝送	8
3.1	仮説	8
3.1.1	Ethernet を活用するメリット	8
3.2	目的	8
3.3	構成	8
3.4	関連研究	8
第4章	システムの設計・実装	9
4.1	UoIP	9
4.2	システム構成	9
4.3	ソフトウェアによる実装	9
4.4	ハードウェアによる実装	9

4.4.1	FPGA の回路設計 . . . . .	9
第 5 章	評価 . . . . .	13
5.1	評価手法 . . . . .	13
5.2	計測 . . . . .	13
5.2.1	トラフィック . . . . .	13
5.2.2	遅延 . . . . .	13
5.2.3	重量 . . . . .	13
5.3	考察 . . . . .	13
第 6 章	結論 . . . . .	14
6.1	本研究のまとめ . . . . .	14
6.2	今後の課題と展望 . . . . .	14
	謝辞 . . . . .	15
	参考文献 . . . . .	16
付 録 A	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 . . . . .	17
A.1	実験の構成 . . . . .	17
A.2	遠隔スイッチング . . . . .	17
付 録 B	ORF2016 での実証実験 . . . . .	18
B.1	実験の構成 . . . . .	18

## 図 目 次

2.1	YUV のピクセルあたりの色情報の構造 . . . . .	3
2.2	HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:4:4 方式における TMDS マッピング . . . .	6
2.3	HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:2:2 方式における TMDS マッピング . . . .	6
2.4	HDMI 2.0 で定義されている YCbCr 4:2:0 方式における TMDS マッピング . . . .	7
4.1	ソフトウェアによる実装の構成 . . . . .	9
4.2	Blackmagic Design Intensity Pro 4K キャプチャーボード . . . . .	9
4.3	ハードウェアによる実装の構成 . . . . .	10
4.4	TED HDMI 2.0 FMC カード (TB-FMCH-HDMI4K) . . . . .	10
4.5	Video Stream to Ethernet Packet Subsystem Diagram . . . . .	11
4.6	Ethernet Packet to Video Stream Subsystem Diagram . . . . .	11
4.7	Video Packet Structure . . . . .	11
4.8	Video Packet Structure . . . . .	12
4.9	Video Packet Structure . . . . .	12
4.10	Video Packet Structure . . . . .	12
A.1	Video Stream to Ethernet Packet Subsystem Diagram . . . . .	17

## 表 目 次

2.1	解像度、フレームレート、色空間による帯域の変化 . . . . .	4
2.2	HDMI 1.4 と 2.0 での 4K(3840x2160) 映像の対応状況 . . . . .	5
4.1	HDMI RX Subsystem の Axi4-Stream インターフェース [1] より抜粋 . . . . .	10
4.2	HDMI TX Subsystem の Axi4-Stream インターフェース [2] より抜粋 . . . . .	11

# 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、より太くより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。

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伝送する、Video over IP 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 [8]。

- 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も可能である。
- 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 10G や 400G 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。



## 1.2 本論文が着目する課題

Video over IP における伝送規格は、SMPTE 2022 とソニーの NMI が主流となっている [7] が、その他にも多くの規格が提唱され、市場では

## 1.3 本論文の目的

本論文では、  
ネットワークを [6]  
着目し、IP を利用するメリットが得られるはずである。

## 1.4 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、汎用的な映像伝送システム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、本論文の要となるネットワークを活用した映像伝送システムについて、本論文での実装との違いを踏まえ紹介する。4 章では、ネットワークを活用した映像伝送システムを、ソフトウェアとハードウェアで設計、実装したことについて解説をする。5 章では、4 章で実装した映像伝送システムを、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。6 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 A 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 B では、ORF2016 での実証実験についてまとめる。

## 第2章 映像伝送システム

本章では、映像伝送システムを構成する技術要素の仕組みについて解説する。

### 2.1 ビデオカメラ

### 2.2 ディスプレイ

### 2.3 インターレース

### 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 が使われるが多い。[要出典] 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、色の变化には鈍感である」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。

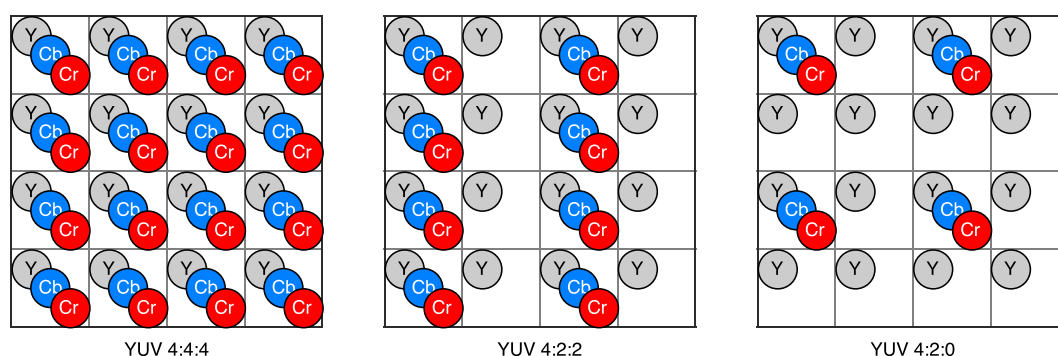


図 2.1: YUV のピクセルあたりの色情報の構造

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 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。

表は次のように出力される。(表 2.2) 色深度は 8bit とする。

また、1920x1080、1920x1080p/60 2200x1125 148.5 SMPTE 274M

$$1\text{Channel} = 2200 * 1125 * 3 * 8 * 60 * 1.25/3$$

表 2.1: 解像度、フレームレート、色空間による帯域の変化

解像度	フレームレート	色空間	ピクセルクロック	帯域	同期区間を含んだ帯域
3840x2160	60p	RGB	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
3840x2160	60p	YUV422	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
3840x2160	60p	YUV420	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
3840x2160	30p	RGB	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
3840x2160	30p	YUV422	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
1920x1080	60p	RGB	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
1920x1080	60p	YUV422	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
1920x1080	60i	RGB	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps
1920x1080	60i	YUV422	1.485MHz	XX Gbps	YY Gbps

## 2.6 インターフェース

### 2.6.1 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。

## 2.6.2 DisplayPort

DisplayPort は、VESA<sup>1</sup> 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。

## 2.6.3 DVI

DVI( Digital Visual Interface ) は、Transition Minimized Differential Signaling、TMDS VESA ( Video Electronics Standards Association ) によって標準化された デジタル映像信号の伝送規格。であり、赤、緑、青、クロックの 4 つのツイストペアケーブルで構成される。

## 2.6.4 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 2.0 では、帯域を 18Gbps に拡大し、4K@60p に対応また、HDMI 2.0 1.4 / 2.0

HDMI 2.0 からは、YCbCr 4:2:0 方式によるピクセルエンコーディングの規格が追加され、1/2 のデータレートで転送することが可能となった。

表 2.2: 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

<sup>1</sup> ビデオ周辺機器に関する業界標準化団体

HDMI 1.4[3] では、RGB、YCbCr 4:4:4、YCbCr 4:2:2 の色空間がサポートされており、HDMI 2.0[4] では、新たに 4K 解像度向けの YCbCr 4:2:0 がサポートされた。

また、YCbCr 方式

TMDS 0	[7:0]	Cb <sub>0</sub>	Cb <sub>1</sub>	Cb <sub>2</sub>	Cb <sub>3</sub>	Cb <sub>4</sub>	...
TMDS 1	[7:0]	Y <sub>0</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	...
TMDS 2	[7:0]	Cr <sub>0</sub>	Cr <sub>1</sub>	Cr <sub>2</sub>	Cr <sub>3</sub>	Cr <sub>4</sub>	...

図 2.2: HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:4:4 方式における TMDS マッピング

TMDS 0	[3:0]	Y <sub>0</sub> [3:0]	Y <sub>1</sub> [3:0]	Y <sub>2</sub> [3:0]	Y <sub>3</sub> [3:0]	Y <sub>4</sub> [3:0]	...
	[7:4]	Cb <sub>0</sub> [3:0]	Cr <sub>0</sub> [3:0]	Cb <sub>2</sub> [3:0]	Cr <sub>2</sub> [3:0]	Cb <sub>4</sub> [3:0]	
TMDS 1	[7:0]	Y <sub>0</sub> [11:4]	Y <sub>1</sub> [11:4]	Y <sub>2</sub> [11:4]	Y <sub>3</sub> [11:4]	Y <sub>4</sub> [11:4]	...
TMDS 2	[7:0]	Cb <sub>0</sub> [11:4]	Cr <sub>0</sub> [11:4]	Cb <sub>2</sub> [11:4]	Cr <sub>2</sub> [11:4]	Cb <sub>4</sub> [11:4]	...

図 2.3: HDMI 1.4 で定義されている YCbCr 4:2:2 方式における TMDS マッピング

2.4 節では、同じ色震度の場合、YUV 4:2:2 は YUV 4:4:4 と比べ 2/3 となると述べたが、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震度は変わらず、12bit すなわち、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。

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。

### 2.6.5 SDI

SDI ( Serial Digital Interface ) は、SMPTE<sup>2</sup> 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ため、中継現場で活躍する。

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 を 4 本 1 組で使用して伝送する

<sup>2</sup>米国映画テレビ技術者協会

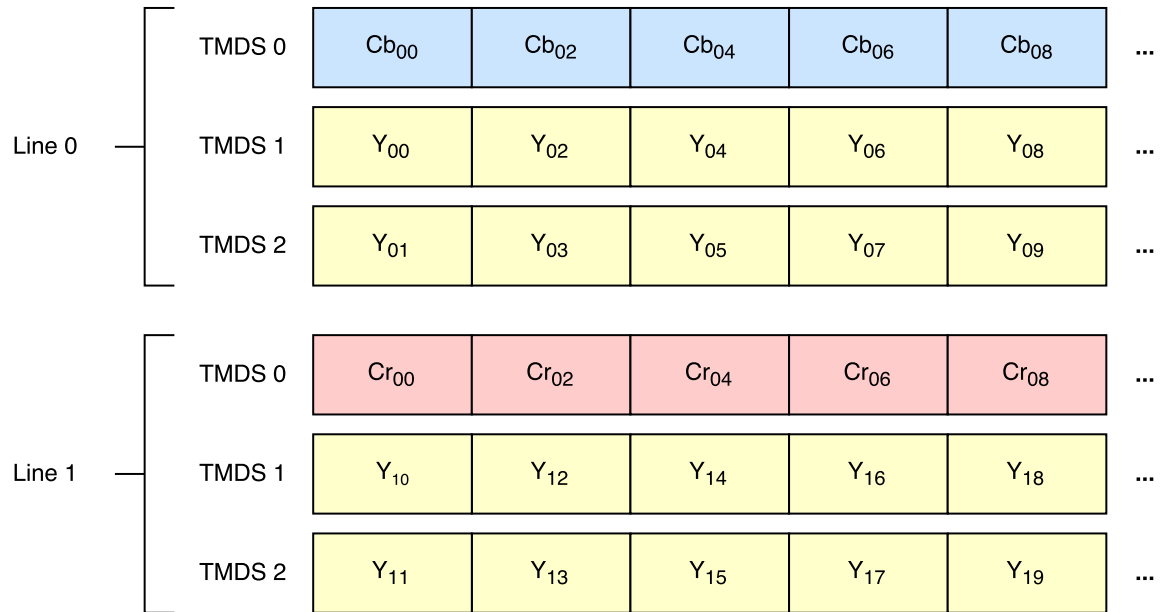


図 2.4: HDMI 2.0 で定義されている YCbCr 4:2:0 方式における TMDS マッピング

事も可能である。

## 2.7 伝送手法

## 2.8 まとめ

## 第3章 ネットワークを活用した映像伝送

### 3.1 仮説

#### 3.1.1 Ethernet を活用するメリット

### 3.2 目的

### 3.3 構成

### 3.4 関連研究

## 第4章 システムの設計・実装

### 4.1 UoIP

### 4.2 システム構成

### 4.3 ソフトウェアによる実装

本実装では、汎用的なデスクトップコンピューター、Intel 10Gbps NIC、Blackmagic DeckLink SDK[5] を用いた。

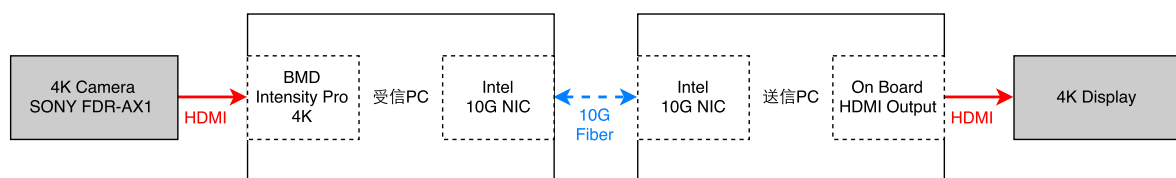


図 4.1: ソフトウェアによる実装の構成

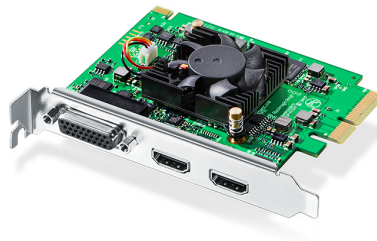


図 4.2: Blackmagic Design Intensity Pro 4K キャプチャーボード

### 4.4 ハードウェアによる実装

#### 4.4.1 FPGA の回路設計

Axi4-Stream、tuser 図 4.5 図 4.6

本実装では、Xilinx の 10 Gigabit Ethernet Subsystem、及び、Video Processing Subsystem を用いた。



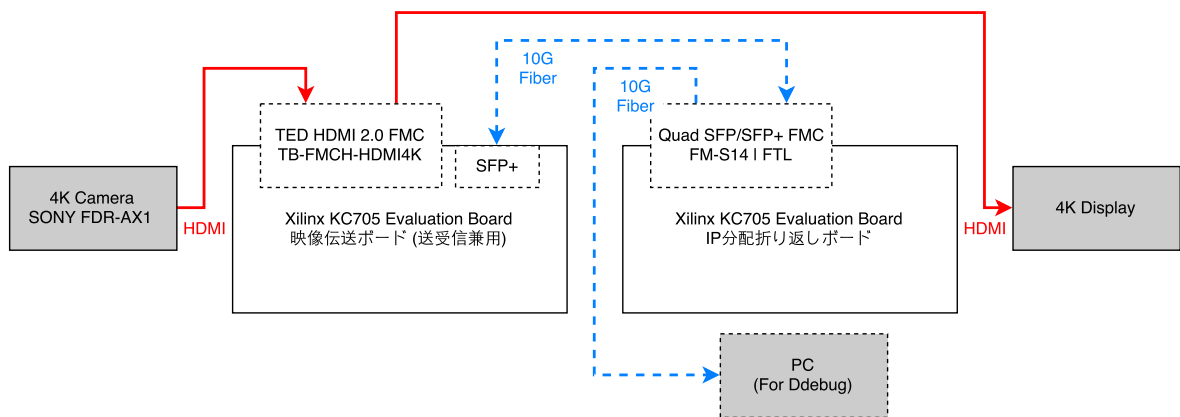


図 4.3: ハードウェアによる実装の構成



図 4.4: TED HDMI 2.0 FMC カード (TB-FMCH-HDMI4K)

表 4.1: HDMI RX Subsystem の Axi4-Stream インターフェース [1] より抜粋

Name	Direction	Width	Description
tdata	Output	3*BPC*PPC	Data
tlast	Output	1	End of line
tready	Input	1	Ready
tuser	Output	1	Start of frame
tvalid	Output	1	Valid

表 4.2: HDMI TX Subsystem の Axi4-Stream インターフェース [2] より抜粋

Name	Direction	Width	Description
tdata	Input	3*BPC*PPC	Data
tlast	Input	1	End of line
tready	Output	1	Ready
tuser	Input	1	Start of frame
tvalid	Input	1	Valid

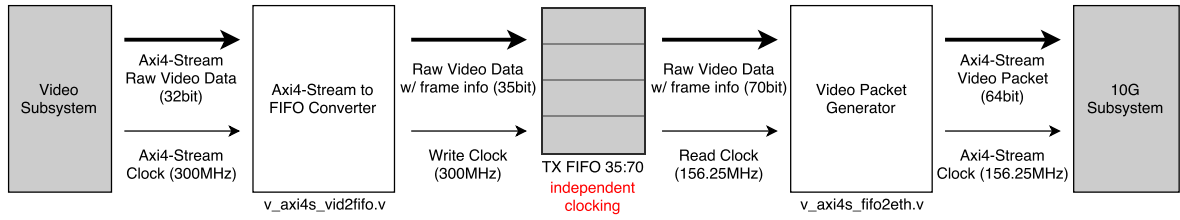


図 4.5: Video Stream to Ethernet Packet Subsystem Diagram

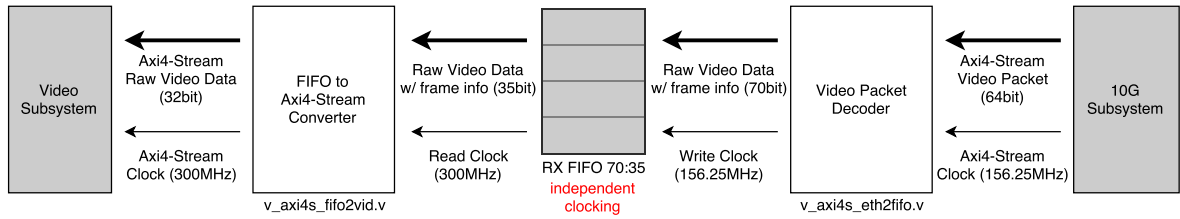


図 4.6: Ethernet Packet to Video Stream Subsystem Diagram

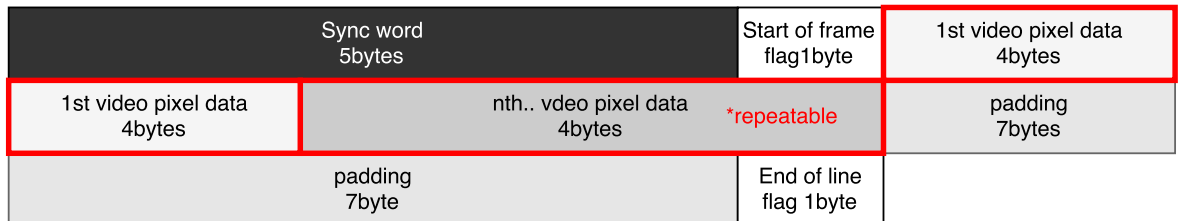


図 4.7: Video Packet Structure

ビデオデータより前の区間が 6byte、Ethernet パケットを構築、64bit ごとに生成するため、tcp のペイロード部分が区切りが

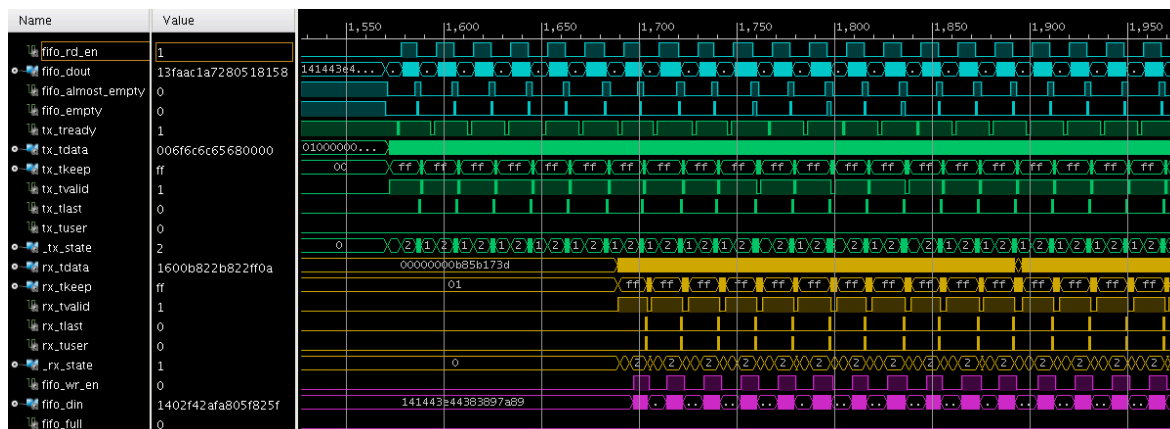


図 4.8: Video Packet Structure

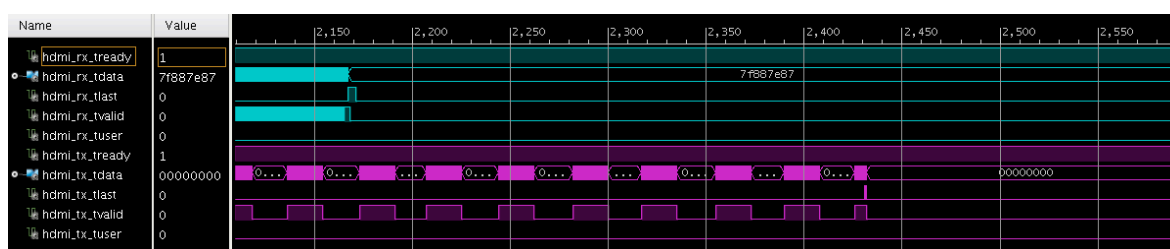


図 4.9: Video Packet Structure

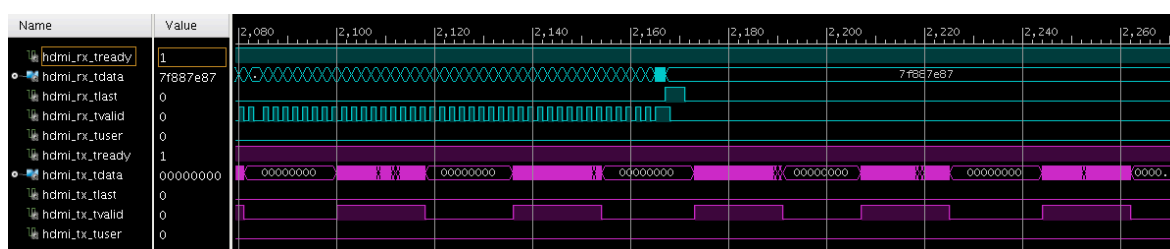


図 4.10: Video Packet Structure

## 第5章 評価

### 5.1 評価手法

### 5.2 計測

#### 5.2.1 トラフィック

#### 5.2.2 遅延

#### 5.2.3 重量

### 5.3 考察

## 第6章 結論

### 6.1 本研究のまとめ

### 6.2 今後の課題と展望

# 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） 齊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、XXXXXX 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は感謝いたします。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は感謝いたします。

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は感謝します。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は感謝致します。

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] 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](https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/v_hdmi_rx_ss/v2_0/pg236-v-hdmi-rx-ss.pdf).
- [2] 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](https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/v_hdmi_tx_ss/v2_0/pg235-v-hdmi-tx-ss.pdf).
- [3] HDMI Licensing, LLC. *High-Definition Multimedia Interface Specification*. Version 1.4.
- [4] HDMI Licensing, LLC. *High-Definition Multimedia Interface Specification*. Version 2.0.
- [5] Blackmagic Design Pty. Ltd. Blackmagic desktop video sdk. <https://www.blackmagicdesign.com/jp/support/family/capture-and-playback>.
- [6] NTT 未来ねっと研究所. JGN を利用した 6 Gbit/s 4 K 非圧縮映像の IP ストリーム伝送および OXC によるストリーム切替実験. NTT 技術ジャーナル, pp. 36–39, 10 2006.
- [7] 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>.
- [8] 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>.

# 付 録 A    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

## A.1    実験の構成

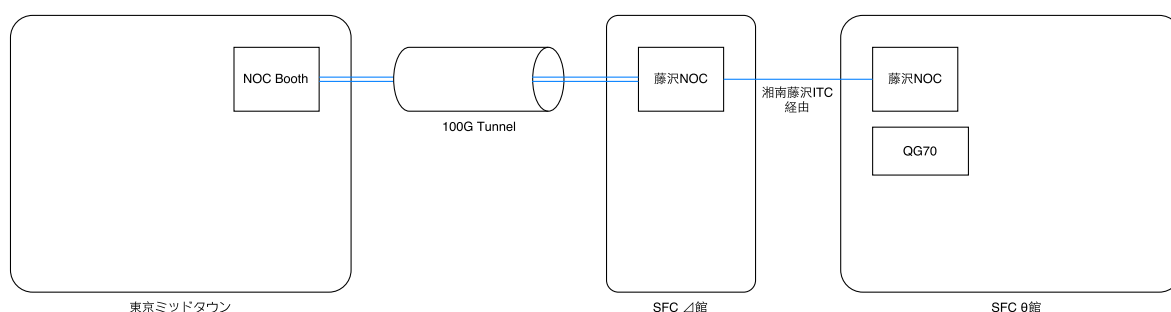


図 A.1: Video Stream to Ethernet Packet Subsystem Diagram

## A.2    遠隔スイッチング



## 付 録 B    ORF2016 での実証実験

### B.1    実験の構成