

多重化不可視映像技術 (第2報)

—FPGA を用いたハードウェア化—

田口 裕起[†] 鈴木 久貴[†] 白井 暁彦[†]

[†] 神奈川工科大学 〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030

E-mail: [†]{taguchi,hisataka}@shirai.la, ^{††}shirai@ic.kanagawa-it.ac.jp

あらまし 本論文は多重化不可視映像を実現する FPGA 画像合成ハードウェアについて報告する. この技術は民生用パッシブ 3D ディスプレイの新しい付加価値創出技術である, 多重化不可視映像生成アルゴリズム「ExPixel」に基いている. このアルゴリズムは, 自然画像とは別に, 裸眼には視認できない映像を生成することができるが, 同時にその映像は円偏光フィルターによって選択的に同時に視聴可能である. この技術は, いかなるハードウェア改造や電子的特殊デバイスを使用せず, 物理現象とソフトウェア, 高解像度パッシブ 3D ディスプレイによって実装可能である. 本論文では ATYLS プラットフォームにおける, 2つの HDMI からフル HD 解像度で 1つの HDMI 出力をする ExPixel FPGA 実装を報告する. 本ハードウェアは幅広い機器でのハードウェア接続試験を行い, 従来の PC ベースのアプリケーションから, 家電, 放送, ビデオゲーム機器といった組み込み機器への多重化不可視映像の応用可能性を拡張した.

キーワード 画像処理, 多重化, 3D, 実時間処理, FPGA, 回路設計

Multiplex hidden imagery technology (II)

Implement on FPGA based hardware

Hiroki TAGUCHI[†], Hisataka SUZUKI[†], and Akihiko SHIRAI[†]

[†] Kanagawa Institute of Technology 1030 Shimogino, atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 Japan

E-mail: [†]{taguchi,hisataka}@shirai.la, ^{††}shirai@ic.kanagawa-it.ac.jp

Abstract This article contributes to develop multiplex-hidden image generation hardware implementation on FPGA. The technology is based on a new use of consumer passive 3D displays. The proposed algorithm, which named as ExPixel, can be realized hidden image and prior natural image for naked eyes, but it can be shown by a circular polarization filter selectively and simultaneously. The technique can be implemented in software and physical phenomenon thanks to high resolution of current passive 3D high definition displays, instead of any modified hardwares and/or special electronic devices. In this article, we reported a prototype of FPGA implementation of ExPixel on ATYLS platform with two HDMI input and one HDMI output in full HD resolution. It could tested on various hardware connectivity and it can enlarge new applications of multiplex hidden imagery, not only PC applications but also embedded platform like home electronics, broadcasting materials and video game consoles.

Key words Image Processing, Multiplex Image, 3D, Real-time Operation, FPGA, Circuit Design

1. はじめに

近年, 3D ディスプレイの一般化とともに映像表示機器の高解像度化が進んでおり, 人間の知覚限界に近づいてきている. そのため, 表示機器には高解像度化以外の付加価値が求められている. 付加価値には様々なアプローチがあり, 色域を広げるためサブピクセルの色数を4色としたディスプレイや, 液晶の

倍速駆動に対応したディスプレイなどがある.

立体表示対応のディスプレイが2010年頃から流行している, しかし, 過去の歴史からも立体映像の流行は長期的には続かず数年で鎮静化する傾向にあるとされている[1]. そこで, さらなる付加価値を与える技術として, 2つの異なる映像を同時に表示する多重化不可視映像技術が提案されている[2].

この技術は, スタック式3Dプロジェクタやパッシブ式3D

フラットディスプレイなど、立体表示装置の多くと互換のある技術であり、既存の市場との親和性も高い。現状では CPU および GPU をベースとした PC によるソフトウェア処理により実現されるため、様々な種類のコンテンツへの対応が可能である。一方で PC を中心としたコンテンツを専用に開発、または変換する必要がある、PC 以外をプラットフォームとしたコンテンツへの対応には課題が残る。

上記の課題を解決するため、多重化不可視映像がハードウェアにより実現することが望まれる。本稿では、プラットフォームに依る制限を緩和することで、技術自体の適用範囲を広げ、コンテンツを模索し、市販のディスプレイに新たな付加価値を与えることを目的としている。

2. 先行研究：多重化不可視映像

本章では多重化不可視映像技術「ExPixel」の概要、不可視アルゴリズム及び、既存の実現方法について述べる。

2.1 多重化隠蔽映像「Scritter」と「ScritterH」

液晶フラットパネルにおける多重化不可視映像技術の前身として、DLP プロジェクタを 2 台スタックし 1 枚のスクリーンに複数のコンテンツを多重投影することで、視聴者が偏光板を用いて選択的にコンテンツを視聴できる技術が第 1 世代の多重化隠蔽映像「Scritter」[3]～[5]である。Scritter 方式では、スタックプロジェクタによるステレオ立体視と同様の構成で、偏光状態が異なる 2 台のプロジェクタから異なるコンテンツを重畳上映している。

このようなプロジェクタを用いた多重化は、液晶シャッターメガネを使った時分割による方法は、3D ディスプレイとの互換方式も含めて数多く提案されているが[6]、Scritter 方式はユーザー側に電気的デバイスを使用しない、輝度が高く高解像度という利点があるが、偏光板を通さず、裸眼でスクリーンを見た場合に「2 種類のコンテンツが重なって見える」という問題があった。この問題を解決したのが宇津木らによる「ScritterH」[7]、[8]で、2 つの映像の一方にキャンセル画像を生成することで合成して任意の映像を表示するアルゴリズムである。「2x3D」[9]～[11]は ScritterH の応用で、一般的な 3D 上映ディスプレイの弱点である、専用の 3D 眼鏡を着用していない視聴者には左右視差画像が交じり合った「多重像」が見えてしまうという課題を「2D+3D ハイブリッド上映」により解決した技術である。また多重化隠蔽技術には隠蔽を実現するためにコントラストが低減するデメリットがあるが、ScritterHDR [12]は多数のプロジェクタを用いてこれを解決している。

プロジェクタを使用した多重化隠蔽映像では他にカラオケの多重化などのエンタテインメントシステムへの応用も提案されている[13]、[14]が、装置構成が大きくなるという点が一般家庭等に普及しづらい要素であるため、一般的な液晶フラットパネルにおいて、多重化と不可視を実現を検討し、円偏光を用いたパッシブ 3D 液晶フラットパネルにおいて実験的成功を確認している[15]。

2.2 多重化不可視映像技術「ExPixel」

多重化不可視映像技術「ExPixel」は民生品のパッシブ 3D フ

ラットパネルにおいて、同時に複数の映像をシームレスに多重化・不可視化する技術の総称である[2](図 1)。



図 1 東芝「REGZA 42Z8」における多重化不可視映像表示

異なる視聴者が同じディスプレイで別々のコンテンツを同時に視聴することが可能となる点は、多重化隠蔽映像と同様の機能であるが、プロジェクタによる多重化隠蔽技術とは異なる技術である。特にフラットパネルによる実現は、家電、特にリビングルームにおいてテレビ番組とゲームを同時に映すといった使用用途がより具体的になり、またデジタルサイネージ、ビジネス用途、モバイル用途といった可能性が広がっている。

2.3 ExPixel の生成アルゴリズム

なお本稿では、文献[2]の手法を用いて行う多重不可視化処理を「ExPixel 化」と呼称し、その処理後の画素セットを単に「ExPixel」と呼び、生成アルゴリズムを「ExPixel 生成アルゴリズム」と呼称する。

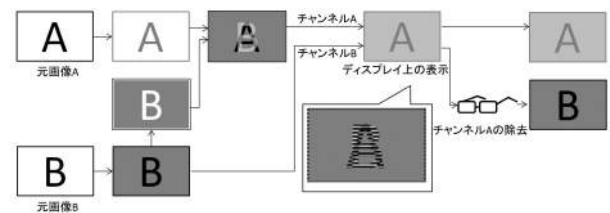


図 2 多重化不可視映像技術 ExPixel 生成アルゴリズム

ExPixel 生成アルゴリズムを説明する。コントラストの圧縮は式 (1, 2) を用いて行われている[2]。実装上、ピクセルの輝度値は、負の値をとることができない。また同一のデバイスで表現するため、A 画像と B 画像すべてのピクセル値 (a, b) において $a > b$ かつ $a + b$ が最大ピクセル深度よりも少ないという関係が成り立っている必要がある。そのため 2 つの画像のコントラスト比を制御する閾値 a_{min} を設けられている。輝度値の処理を行った画像を A' , B' (ピクセルの輝度値は a' , b') とする。

$$a' = a \times (1.0 - a_{min}) + a_{min} \quad (1)$$

$$b' = b \times a_{min} \quad (2)$$

$$c = (a'^{\frac{1}{\gamma}} - b'^{\frac{1}{\gamma}})^{\gamma} \quad (3)$$

一般のディスプレイのラチチュードはリニアでなくガンマを考慮する必要があるため、式 (3) により逆ガンマ補正をかけ、

画像 C (ピクセルの輝度値は c') を生成している [2]. 最後に、画像 B' と画像 C をピクセルライン毎に表示するために式 (4) が用いられている.

$$\text{MultiplexHiddenShader}(y) = \{Out_{even} = (a' - b'), Out_{odd} = b'\}(y \bmod 2) \quad (4)$$

2.4 ソフトウェア・ツールによる ExPixel の実現

神奈川工科大学白井研究室では 2014 年 5 月より株式会社富士通ソーシャルサイエンスラボラトリ (富士通 SSL) との共同開発として、PowerPoint を本技術を用いて多重化するプロジェクトを進めている [16]. このプロジェクトにより CPU ベースの不可視化アルゴリズムが実装され、PC ベースでのプレゼンテーションコンバーター「ExPixel Generator」が開発されている (図 3).

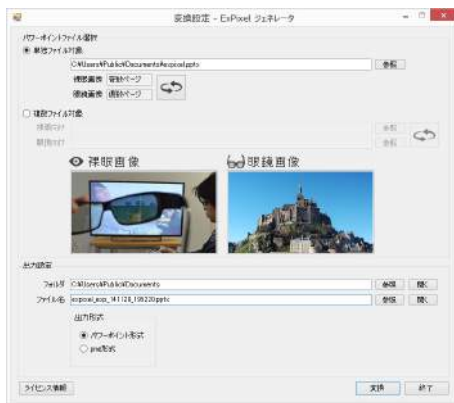


図 3 PowerPoint 多重化用ソフトウェア「ExPixelGenerator」

また動画やゲームをリアルタイムに多重化するため GPU ベースのリアルタイム多重化コンバーターの開発も行われている [13]. ゲームエンジン「Unity3D」[17] で使うことのできるシェーダーが開発され、動画やゲームなどの映像がリアルタイムで多重化処理することが可能となっている [18] [19].

3. FPGA ハードウェア化

現状の課題を解決するための手段として、多重化不可視映像を実現するハードウェアの構築を提案する. この手法により、外部機器の映像リソースを扱うことが可能となる. 映像の入出力に汎用の規格である HDMI を用いることで PC 以外のプラットフォームへの対応が可能となる. また、実装に Field Programmable Gate Array (FPGA) を用いることで実時間での処理が可能となるため、ゲーム等、多様な HDMI ソースへの利用が可能となる.

4. FPGA 実装

本稿で開発したハードウェアは解像度が $1920 \times 1080/60p$ である 2 系統の入力信号を、文献 [2] のアルゴリズムに基づき合成し、 $1920 \times 1080/60p$ の HDMI 信号 1 系統で出力するものである.

4.1 ハードウェアの構成

物理的なデバイスとして、FPGA 評価ボードである DIGILENT 社製 ATLYS (図 4) を用いた. 本ボードに搭載されている FPGA は Xilinx 社製 Spartan-6 XC65LX45 である. 映像信号の入出力にはボードに搭載されている HDMI 端子を用いた.

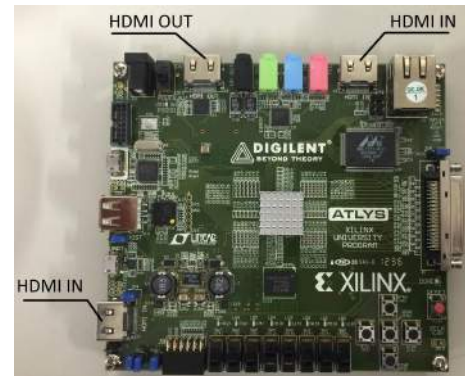


図 4 DIGILENT 社製 FPGA 評価ボード ATLYS

本ハードウェアは Display Data Channel (DDC) 用の回路を実装していないため、ディスプレイ情報の通知を必要とする機器を用いる場合は、Extended Display Identification Data (EDID) の送出機が必要となる. 本プロトタイプでは外部デバイスとして ConnectPRO 社製 TMD5-EDID を用いた.

4.2 システム構成

図 5 で示すように本システムに入力された 2 系統の映像信号は、Decoder にて複合化され、同期信号と映像信号となる. 同期用バッファにて片方の映像信号がもう一方の映像信号に同期される. 同期した 2 つの映像は ExPixel 化回路によって ExPixel 化され、Encoder で符号化し出力される.

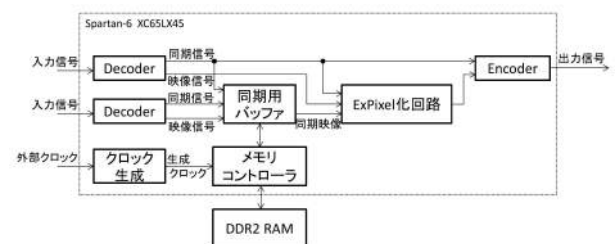


図 5 プロトタイプのブロック図

4.3 入力信号同期用フレームバッファ

別系統から入力される HDMI 信号は、特に前処理がほとんどされていない場合、同期のタイミングが異なる. 後の工程である ExPixel 化回路では同期がとられた映像信号が必要のため、2 系統の映像信号の同期を取るための回路として、1 フレーム分のデータが格納可能なバッファを用意した.

Xilinx 社が提供する Memory Interface Generator (MIG) にて生成した IP コアと、基板上に実装された DDR2 SDRAM を用いたフレームバッファにより垂直方向の同期を、FPGA 内部の記憶素子である BlockRAM を用いたラインバッファによって水平方向の同期を実装している.

4.4 ExPixel 化回路

ExPixel 化回路のなかでコストの高い式 3 と計算順序の近い式 1, 2 は, 計算は事前に行っておき, 計算結果の参照のみを行う Look-Up Table (以下 LUT) によって実装を行った. テーブルデータの計算に必要な定数として, γ は一般的なディスプレイガンマである 2.2 を用い, 裸眼映像と不可視映像の輝度値の閾値である a_{min} は, 理論上の中間値が 0.22 とされている [2].

実際の利用を想定し, 0.20, 0.22, 0.25, 0.27, 0.30 の 5 パターンでデータの作成を行った.

本ブロックにおける LUT は分散 RAM ではなく BlockRAM を用いて実現した. また, 処理の際の色空間は RGB を用い各色は同じ内容のテーブルを持つ.

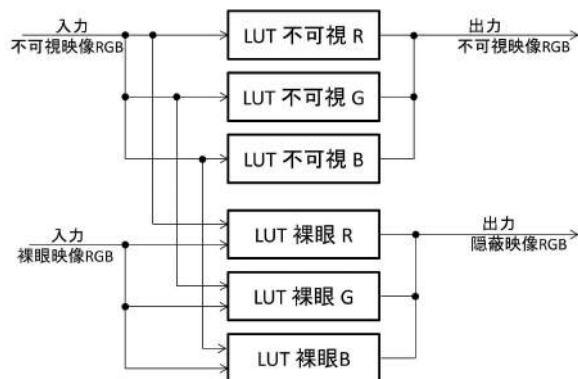


図 6 ExPixel 化回路における LUT 群

5. 実 現

5.1 結 果

図 7 は入力ソースである文字列「AB」と赤基調の模様を HDMI 信号で本プロトタイプに入力し $\{a_{min} = 0.27, \gamma = 2.2\}$ のパラメータで ExPixel 化し, 表示したディスプレイを撮影した顕微鏡写真である. 図 7 左は裸眼映像に赤基調の模様を, 不可視映像に文字列を適用した結果であり, 図 7 右は裸眼映像に文字列を, 不可視映像に赤基調の模様を適用した結果である. どちらもピクセルラインごとに隣接するピクセルどうしで相殺していることが見て取れる.

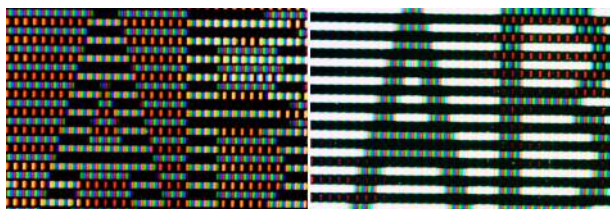


図 7 ExPixel 細部拡大図 (左: 文字を不可視映像に適用した例/右: もじを裸眼映像に適用した例)

5.2 a_{min} の違う LUT

図 8 は a_{min} の値を $\{0.20, 0.22, 0.25, 0.27, 0.30\}$ に変化させて作成した LUT で表示した結果である. 各画像は多重化不可視映像を表示したディスプレイを撮影したものであり, 下

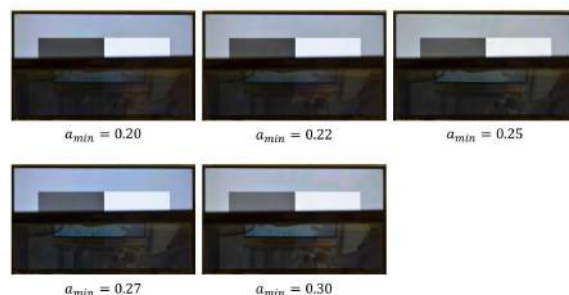


図 8 $a_{min} = \{0.20, 0.22, 0.25, 0.27, 0.30\}$ での表示結果

側に円偏光フィルタをかざしている.

a_{min} の値が大きくなるにつれて不可視画像に割り当てられたコントラストが広がることが見て取れる.

5.3 4K ディスプレイにおける確認

本プロトタイプがサポートする出力解像度は $1920 \times 1080/60p$ のみであるが, 将来的な高解像度化を踏まえて, 東芝社製 4K ディスプレイ REGZA 65Z8X および 4 系統の映像を田の字型に並べて 3840×2160 で出力するアダプタ THD-MBA1 を用いて単体での 4K 解像度での動作テストも行った. 図 9 がその結果であり, THD-MBA1 を用いることで 4K 3D への対応が可能であることを確認した.



図 9 THD-MBA1 と REGZA65Z8X を用いた 4K 出力

5.4 応 用

本稿で開発した回路を用いて 2 つの映像信号を多重不可視化してディスプレイに表示することを確認した. 多重化した結果を図 10,11 に示す.

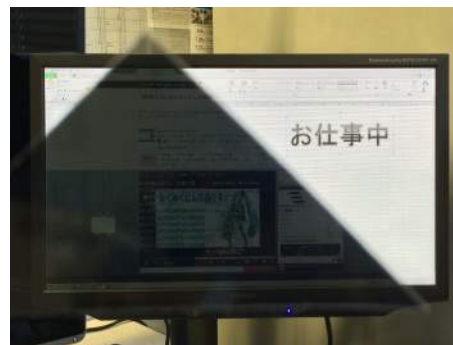


図 10 動画共有サイトと表計算ソフトの多重化

図 10 の例は裸眼では表計算ソフトが見えており, フィルタを通した場合のみ動画共有サイトを視認できる.



図 11 WiiU と Xbox360 の多重化

図 11 の例では市販のビデオゲーム機 2 台が多重化されており、新しいゲームの楽しみ方として、フィルタの有無により異なるゲームを同時に同じディスプレイで遊ぶことが可能となった。



図 12 第 39 回関東博におけるゲーム機 2 台同時利用の公開実験

図 12 は神奈川県立横浜国立大学 第 39 回関東博にて Xbox360 と WiiU のゲームを同時に体験するデモを行った際の様子である。展示と同時に本プロトタイプの連続使用のテストも行い、準備日である前日から最終日である 2 日目終了までの 48 時間、トラブルの発生なく安定して連続使用が可能であることを確認した。

5.5 利用方法

本プロトタイプを利用する際の標準的ハードウェア構成を図 13 に示す。「映像リソース A」は EDID によるディスプレイ情報の認証をせずに映像信号の出力が可能な機器の接続例であり、「映像リソース B」は映像信号の出力に EDID が必要な機器の接続例である。A 群は直接接続が可能であり、B 群はプラグアンドプレイに対応している一般的な HDMI 機器であり、EDID 送出機を経由しディスプレイ情報を補った上で接続する必要がある。

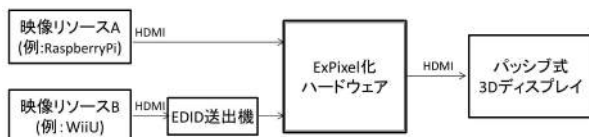


図 13 本プロトタイプのハードウェア構成例

具体的な実験映像リソースとして A 群は組み込み系 Linux である Raspberry Pi, B 群は PC, WiiU, Xbox360, での動作を確認している。なお、本プロトタイプは HDCP に対応していないため、コンテンツ保護が施された機器 (PlayStation3,

ハードディスクレコーダー) は現状、リソースとして用いることができない。また現状ではフル HD 以外の解像度はサポートされていない。

5.6 結果まとめ

今回提案したプロトタイプハードウェアを用いることで、既存のコンテンツやソフトウェアを改変せず多重化不可視映像技術の適用が可能となった。また、HDMI スイッチャやスプリッタと組み合わせることも可能となり、システムを構築する際の自由度が上がった。これらのことから、提案手法に有効性があるといえるだろう。

6. ま と め

本稿では、コンシューマハードウェアに付加価値を与えるため、文献 [2] の理論をもとに、2 つの映像を合成する回路の開発を行い、ExPixel 化を行うハードウェアを作成した。

また、PC やビデオゲーム機からの映像に対し多重化処理を行い ExPixel 化されていることを確認した。

今後の応用として、本プロトタイプがスイッチャやセットトップボックスの機能の一部となり、ScreenTV [20] のような複数の映像の切り替え、画面分割やモザイクを行う機器の選択肢のひとつとして多重不可視化が利用できるだろう。

なお、実装においては多重不可視化を行うアルゴリズムを LUT によって実現したため、ディスプレイガンマや、 a_{min} の変更のために LUT を生成しなおす必要がある。計算回路を実装することで改善できると考えられるが、これは今後の課題である。

7. 謝 辞

本研究はで JSPS 科研費 25330440 「多重化隠蔽映像技術による新たな情報共有空間の創出のための映像制作手法の確立」の助成を受けたものです。また、研究にご協力いただいた東芝ライフスタイル株式会社ご関係者各位、先端技術館@TEPIA ご関係者各位にこの場を借りて謝辞を記させていただきます。

文 献

- [1] 大口孝之, 谷島正之, 灰原光晴, 3D 世紀 驚異! 立体映画の 100 年と映像新世紀, 株式会社 ボンデデジタル, 2012.
- [2] 鈴木久貴, 白井暁彦, “多重化不可視映像技術 (第 1 報) —民生品ステレオ 3D フラットパネルでの実現—,” 第 19 回日本バーチャリアリティ学会大会論文集, pp.116–119, sep 2014.
- [3] H. Takeo, N. Koki, U. Takeru, and S. Akihiko, “Scritter: A multiplexed image system for a public screen,” ACM SIGGRAPH 2010 Posters, pp.321–323, Laval Virtual ReVolution 2010, VRIC, 2010.
- [4] K. Nagano, T. Utsugi, M. Hirano, T. Hamada, A. Shirai, and M. Nakajima, “A new “multiplex content” displaying system compatible with current 3d projection technology,” ACM SIGGRAPH 2010 Posters, pp.79:1–79:1, SIGGRAPH '10, ACM, New York, NY, USA, 2010. <http://doi.acm.org/10.1145/1836845.1836931>
- [5] 白井暁彦, 長野光希, 宇津木健, 濱田健夫, 平野実花, “情報表示装置,” Nov. 2011. 特開 2011-221151.
- [6] S. Scher, J. Liu, R. Vaish, P. Gunawardane, and J. Davis, “3d+2dtv: 3d displays with no ghosting for viewers without glasses,” ACM Trans. Graph., vol.32, no.3, pp.21:1–21:10, July 2013. <http://doi.acm.org/10.1145/2487228.2487229>

- [7] 宇津木健, 長野光希, 谷中一寿, 白井暁彦, 山口雅浩, “多重化映像表示における隠蔽映像生成アルゴリズム (image hiding algorithm for multiplex projection),” 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.1C2–4, sep 2010.
- [8] A. SHIRAI, K. YANAKA, and T. UTSUGI, “Information display device,” Sept. 2011.
- [9] 藤村 航, 小出雄空明, 早川貴奉, 谷中一寿, 白井暁彦, “2x3d : 2d+3d 同時上映可能なハイブリッドシアター,” 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol.17, pp.570–573, sep 2012. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40019621132/>
- [10] W. Fujimura, Y. Koide, R. Songer, T. Hayakawa, A. Shirai, and K. Yanaka, “2x3d: Real time shader for simultaneous 2d/3d hybrid theater,” SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies, pp.1:1–1:2, SA ’12, ACM, New York, NY, USA, 2012. <http://doi.acm.org/10.1145/2407707.2407708>
- [11] 藤村 航, 小出雄空明, 國富彦岐, 田口裕起, 鈴木久貴, 白井暁彦, “直線偏光による多重化隠蔽型ハイブリッド 3d ディスプレイにおける画質評価 (立体映像における人間工学的研究, 及び立体映像技術一般),” 映像情報メディア学会技術報告, vol.38, no.11, pp.35–38, feb 2014. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009809731/>
- [12] K. Nagano, T. Utsugi, K. Yanaka, A. Shirai, and M. Nakajima, “Scritterhdr: Multiplex-hidden imaging on high dynamic range projection,” SIGGRAPH Asia 2011 Posters, pp.52:1–52:1, SA ’11, ACM, New York, NY, USA, 2011. <http://doi.acm.org/10.1145/2073304.2073363>
- [13] F. Wataru, K. Yukua, S. Takuya, R. Songer, K. Takayuki, and S. Akihiko, “Paraoke alpha: a new application development of multiplex-hidden display technique for music entertainment system,” NICOGRAPH International 2012, pp.1–12, NICOGRAPH International 2012, 2012.
- [14] 小出雄空明, 小熊 遼, 坂井拓也, 白井暁彦, “多重化・隠蔽サイネージを用いた次世代カラオケ・エンタテインメントシステムの提案 (ポスター展示 (エンターテインメント・アニメーション), 映像表現フォーラム),” 映像情報メディア学会技術報告, vol.36, no.16, pp.11–12, mar 2012. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009437855/>
- [15] 小出雄空明, 藤村 航, 國富彦岐, 田口裕起, 鈴木久貴, 白井暁彦, “液晶フラットパネルを用いた多重化隠蔽映像の試行と実現 (立体映像における人間工学的研究, 及び立体映像技術一般),” 映像情報メディア学会技術報告, vol.38, no.11, pp.39–40, feb 2014. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009809732/>
- [16] AVWatch, “ExPixel 採用の「多重化・不可視映像」を富士通 SSL らが実用化。年内に第 1 弾ソフト,” Nov. 2014. <http://av.watch.impress.co.jp/docs/news/20140801.660498.html>
- [17] “Unity3D 公式”. <http://japan.unity3d.com/unity/>
- [18] H. Suzuki, R. Hsieh, and A. Shirai, “Expixel: Pixelshader for multiplex-image hiding in consumer 3d flat panels,” ACM SIGGRAPH 2014 Posters, pp.63:1–63:1, SIGGRAPH ’14, ACM, New York, NY, USA, 2014. <http://doi.acm.org/10.1145/2614217.2633393>
- [19] S. Hisataka, L. Yannick, H. Rex, T. Hiroki, F. Wataru, K. Yukua, and S. Akihiko, “FamalinkTV: Expanding the social value of the living room with multiplex imaging technology,” 2014.
- [20] “Skreens TV”. <http://www.skreenstv.com/>