

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H01739

研究課題名(和文) 情報投影基盤技術の確立に向けた画素単位での通信を可能にする映像投影システムの実現

研究課題名(英文) Realization of a Video Projection System with Pixel-by-Pixel Data Transfer Function for Establishing Data Projection Technology

研究代表者

苗村 健 (Naemura, Takeshi)

東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・教授

研究者番号：90292896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,100,000円

研究成果の概要(和文)：映像プロジェクタをベースに、ビット情報を画素の高速点滅による不可視情報として投影する「情報投影技術」の確立のため、以下の3つに取り組んだ。(1)インタラクティブ性の向上：プロトコルを精査し、FPGAによる高速処理を実現した。(2)情報通信の効率化と情報投影の高画質化：高効率符号化手法をソフトウェアで実現した。LEDバックライトの制御で全画面同期の画質劣化を抑えた。赤外光源による画質劣化抑制手法の可能性を明らかにした。(3)情報投影基盤技術の確立：FPGAとLED光源制御を統合したシステムを構築した。また、一般のLCDに色変調をかけることで、情報投影技術の思想を汎用性の高い機器に拡張した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報投影技術の確立は、これまでソフトウェアでデータを生成することで得てきた知見を集大成するものであり、さまざまなトレードオフの関係を体系化する学術的な意義がある。また、情報投影技術の基盤となるハードウェアが完成することで、拡張現実感を始めとするヒューマンインタフェース技術の発展に与える影響は少なくない。特に、デジタルサイネージやミュージアムでの展示物に対する情報提示、テーブルトップインタフェースなどの大画面映像において、複数の受信機(個人のスマートフォンから、今後の研究が期待されるロボット群まで)をキャリブレーションなしで使えるようになるメリットは大きい。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel projector system that projects bit data as invisible information by means of high-speed blinking of pixels. To establish "data projection technology," we have worked on the following three topics: (1) Improvement of interactivity: The protocol was refined and high speed processing was realized using FPGA. (2) Improvement of data communication efficiency and image quality of data projection: High-efficiency coding method was realized by software. The image quality degradation of full screen synchronization was suppressed by controlling the LED backlight. The possibility of suppressing image quality degradation by using infrared light sources was demonstrated. (3) Establishment of data projection technology: We developed a system that integrates FPGA and LED backlight control. In addition, we extended the concept of data projection technology to general-purpose devices by applying color modulation to ordinary LCDs.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：拡張現実感 プロジェクターシステム ユビキタス情報環境

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

現実世界に情報を重畳提示する拡張現実感（AR）は、直観性の高い情報メディア技術として盛んに研究開発が進められていた。しかし現状では、現実が拡張された感覚をディスプレイの中に提示するに留まっているものが大勢を占めていた。

これに対して、映像と機械が混在した環境を調和的に機能させるために、従来「人間」に対して視覚情報を提示する装置であったディスプレイを「機械」への情報提示手段として利用する **Display-Based Computing** の概念が提案された。この研究では、機械に提示するマーカーを映像として投影するというアプローチがとられてきた。つまり、投影映像が、人間のための領域と機械のための領域に区切られていた。このために、映像の見た目が損なわれたり、機械のための初期化やキャリブレーションが必要になったりという問題点があった。

これに対して申請者は、映像のすべての画素に高速点滅でビット情報を埋め込む空間分割型可視光通信（**PVLC: Pixel-level Visible Light Communication**）の概念を提唱し、検討を進めてきた（図1）。これにより、人には映像だけを提示しつつ、受信機（フォトセンサ）をかざすだけでキャリブレーションの必要なくビット情報を読み出すことが可能になった。これは、プロジェクタの画素数（ 1024×768 ）だけの並列な通信チャンネルを実世界に投影するものであり、実世界中の特定の場所に高い空間分解能で必要な情報を届けることができる。ここではこれを「情報投影技術」と呼ぶ。実装は、Texas Instruments社の **DMD (Digital Micro-mirror Device)** を採用し、各画素に対応する微小な鏡の ON/OFF を制御するパターン（バイナリフレーム群）を PC で作成してから、プロジェクタにアップロードし、それを繰り返し再生することで実現してきた。

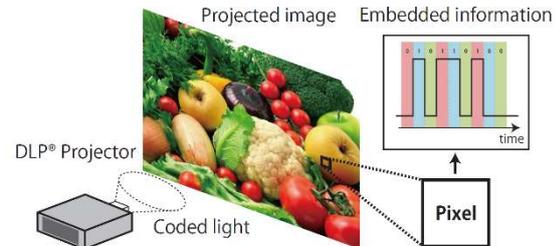


図1 可視光通信プロジェクタ

しかし、PC内でデータを生成してプロジェクタに転送するというソフトウェアアプローチや、固定的な光源を用いてきたことに起因する問題が課題として浮かび上がってきた。DMDは $32,552 \text{ binary frame/sec}$ で投影できる性能を持っているが、PCからプロジェクタへのデータ転送性能は $3,000 \text{ binary frame/sec}$ に留まっていた。このため、一度生成したデータを繰り返し再生することになり、投影映像や付加情報が時々刻々と変化するようなインタラクティブ性が得られていなかった。また、可視光源のみでデータの送信と同期処理をするために、投影映像の画質劣化が生じてしまっていた。さらに、個別のアプリケーションの開発においては、統一的なフレームワークが確立されておらず、基盤技術としての応用展開に限界があった。

しかし、PC内でデータを生成してプロジェクタに転送するというソフトウェアアプローチや、固定的な光源を用いてきたことに起因する問題が課題として浮かび上がってきた。DMDは $32,552 \text{ binary frame/sec}$ で投影できる性能を持っているが、PCからプロジェクタへのデータ転送性能は $3,000 \text{ binary frame/sec}$ に留まっていた。このため、一度生成したデータを繰り返し再生することになり、投影映像や付加情報が時々刻々と変化するようなインタラクティブ性が得られていなかった。また、可視光源のみでデータの送信と同期処理をするために、投影映像の画質劣化が生じてしまっていた。さらに、個別のアプリケーションの開発においては、統一的なフレームワークが確立されておらず、基盤技術としての応用展開に限界があった。

2. 研究の目的

上記の背景に対して本申請課題では、データ転送と光源制御のハードウェア化によって、情報投影技術の基盤となるシステム構築をその目的とした。特に下記の3つの観点を重視した。

- (1) インタラクティブ性の向上
- (2) 情報通信の効率化と投影映像の高画質化
- (3) 情報投影基盤技術の確立

3. 研究の方法

(1) インタラクティブ性の向上

CPUで行っていた映像とデータの統合を、FPGAで実装するためのアルゴリズムを検討し、仕様を策定した。この仕様によって、画素ごとの色情報の効率的伝送が可能になることを確認した。さらに、高速かつ効率的なデータ転送プロトコルを検討し、FPGA上で実装した。以上によって動的なデータ重畳を可能にし、インタラクティブ性が向上した。

(2) 情報通信の効率化と投影映像の高画質化

固定長データフレームの考え方から、可変長での柔軟なデータ転送を許容することで、特に暗部と明部における画質向上が可能になることが確認した。ハードウェア実装では、LED光源による画面全体の制御を可能にした。ミラー制御による画素ごとの低速点滅制御に対して、LED光源による画面全体の高速点滅制御によって同期処理を効率的に行う基盤技術を確立した。また、赤外光源を追加することで可視光映像の画質劣化を抑える手法についても実現した。

(3) 情報投影基盤技術の確立

FPGA による適応的な制御を可能にするために、光学設計および電子制御設計を行い、実験用に FPGA を搭載したプロジェクタシステムを設計・実装した。また、一般の LCD に色変調をかけることで、情報投影技術の思想を汎用性の高い機器に拡張する検討を進めた。LCD 映像をスマートフォンで撮影することで、不可視の色変調を検出してマーカーなどのパターン情報を読み出すことが可能になった。

4. 研究成果

(1) インタラクティブ性の向上

これまで、図 2 の左に示すように、Users は Devices の位置や向きをインタラクティブに操作することは可能であった。しかし、Devices の動きに応じて Projector が投影する映像や不可視情報を動的に変化させることができなかった。これに対して、図 2 の右に示すように、Users が Devices を介して、Projector の投影映像や不可視情報もインタラクティブに操作できるようにした。

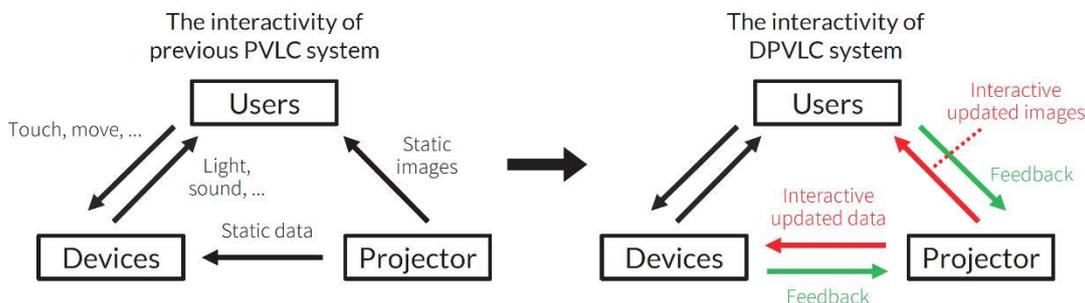


図 2 インタラクティブ性の向上

図 3 に実装したシステム構成を示す。これまでは PC の中で映像 (images) に情報 (data arrays) を埋め込む処理を実施し、2 値フレーム (binary frames) を生成していた。2 値フレームは、同期フレーム・データフレーム・輝度補正フレーム・映像フレームからなる。例えば、64-bit のデータと 2^8 階調の 3 色カラー画像の場合には、896 binary frames の転送を行っていた ($896 = 64 \times 2 + 2^8 \times 3$, 同期フレームは除く)。この Projector への転送によって生じる遅延がボトルネックであった。これに対して、2 値フレームの生成を Projector 内の FPGA で実施するのが提案手法である。この場合、転送すべきデータは、88 binary frames ($88 = 64 + 8 \times 3$) まで削減することができる。

実装には DynaFlash projector の機構を応用した。FPGA には Kintex UltraScale XCKU040-2FFVA1156E, Xilinx を採用した。後述する全画面による高速点滅同期処理のための LED 光源の実装もこの中で行っている。ここでは、インタラクティブ性の向上の観点から行った実験結果を述べる。

XGA 解像度 (1024×768), すなわち 786,423 チャンネルの並列度で 64-bit 情報を PC から転送して FPGA で binary frames を生成する処理に要した時間は、200 回の試行を通じて平均 8.36ms であり、およそ 120Hz での映像更新を達成することができた。

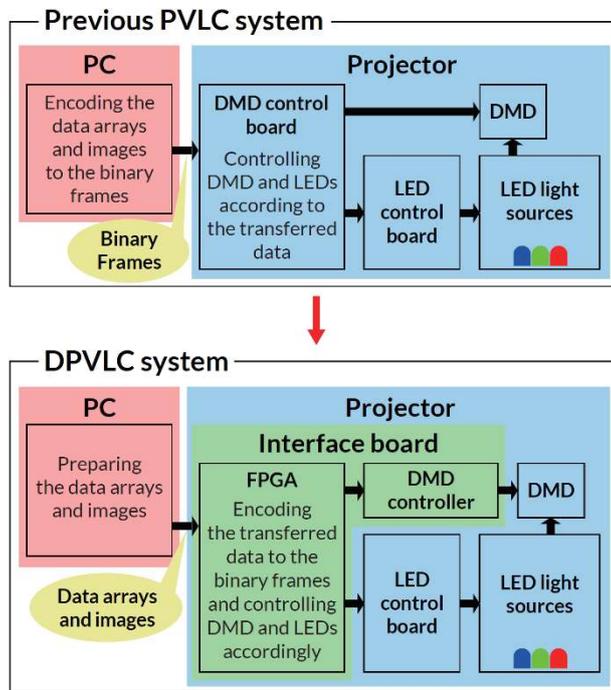


図 3 システム構成

(2) 情報通信の効率化と投影映像の高画質化

これまで、各画素の輝度に依らず、一定量のデータを割り振ってきた。このため、低輝度画素や高輝度画素には一切データを埋め込めなくなるため、原画像のダイナミックレンジを狭めるなどの工夫をした結果、画質を損なうという問題が生じていた。そこでまず、図4に示すように、画素の輝度に応じて埋め込む情報量を可変にする方法を提案した。画素の輝度が128すなわち、中間色の場合には、マイクロミラーのonとoffの並べ順に最も自由度があり、多くのデータを転送できる。一方で、暗い画素(offが大半を占める)や明るい画素(onが大半を占める)でも、少しずつデータを送る事ができる。受光端末では、画素の輝度に応じて、数フレームにまたがってデータを受信するなど処理が複雑になるが、画質を劣化を抑えるという目的には適した手法である。

さらにその効率を改善するために、複数のパルスの位置の組合せで情報を表すMPPM方式(Multi-Pulse Pulse Position Modulation)を導入した。図5にその効果を示す。ほとんどの画素で、データ伝送量が増えているが、低輝度と高輝度の画素ではむしろ下がってしまった。

以上の工夫は、PC上での実装まで行ったが、FPGAへの展開には、処理の複雑さが問題となり、適していないという判断に至った。

(1)でFPGAを導入したプロトタイプにおいて、光源のLEDを高速点滅させる機構を実装した。各画素の個別の点滅はこれまで通りDMDで制御するが、同期処理など全画面で統一した処理をする場合は、より高速なLED光源の点滅を利用するという考え方である。同期のための点滅が画質劣化に与える影響を低減する効果が期待できる。図6に実験結果を示す。データ部が44 μ s幅のパルスになっているのに対して、同期は1 μ s幅になっている。想定通りの実装に成功した。

一方、プロジェクタの光源にR・G・Bに赤外LEDを加えることで、データ転送の不可視性を波長によって実現する方法も検討した。図7に概念図を示す。可視光が投影される時間が3/4に減少するため、全体に映像が暗くなることが考えられる。しかし、データがすべて波長的に不可視な状態で送られるため、可視画像の暗部に関しては、黒が引き締まった映像が投影できるものと期待される。

実験結果もこの想定通りになった。これまでの可視光通信プロジェクタが、明部と暗部の両者が失われることによる画質劣化を引き起こしていたのに対して、赤外光源を導入した場合は、明部のみに劣化が集中することになる。図8に投影映像の結果を示す。なおこの実験はFPGA化したシステムとは別に開発した。

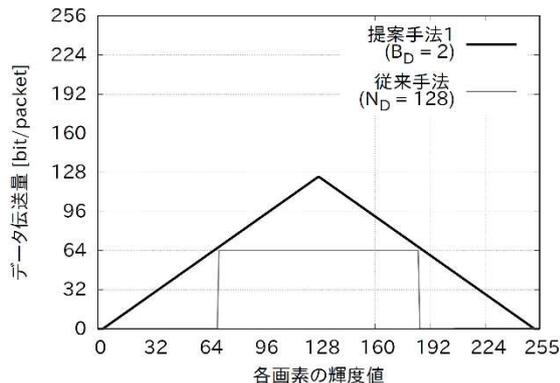


図4 可変長データフレームの提案

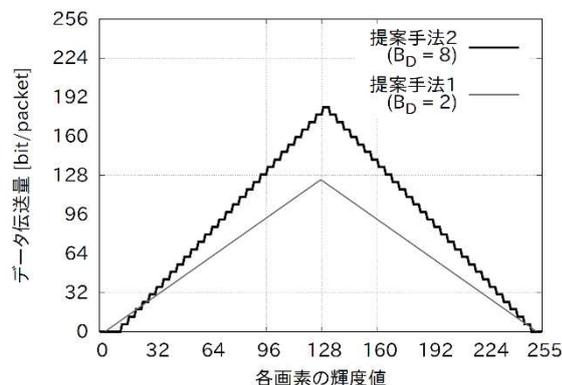


図5 MPPM方式の導入

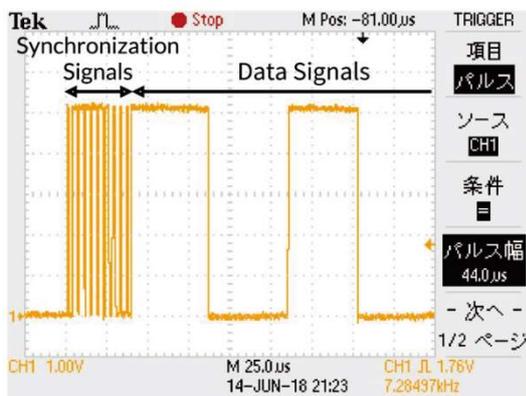


図6 LED光源の高速点滅による同期

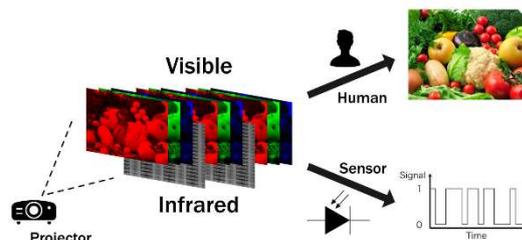


図7 赤外光源の導入

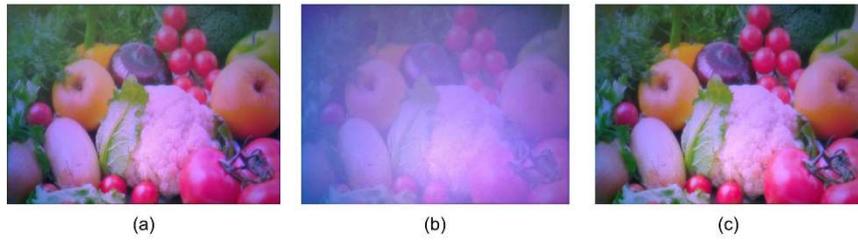


図8 投影映像の比較(a)赤外光源追加(b)可視光通信プロジェクタ(c)データの無い原画像

(3) 情報投影基盤技術の確立

FPGA によるデータ転送と LED 光源による高速同期処理の実現については、(1)(2)でまとめた通りである。各種アプリケーション開発に必要な API を用意し、基盤技術として整備した。

一方、一般の LCD に色変調をかけることで、情報投影技術の思想を汎用性の高い機器に拡張する検討を進めた。図 9 にその概念図を示す。LCD 映像をスマートフォンで撮影することで、不可視の色変調を検出してマーカーなどのパターン情報を読み出す。例えば、図 10 のように、60 fps で映像表示される LCD ディスプレイにおいて、Red と Blue を交互に表示すると、人の目には Magenta に見える。これをスマートフォンを用いて 120 fps で撮影すると、Red・Magenta・Blue の各色が映ることになる。色振動ありの画素ではこのように写るが、色振動なしの画素ではずっと Magenta が写ることになる。このように、色振動ありとなしで 1 と 0 の情報を各画素に埋め込み、複数画素のパターンで AR マーカーや QR コードを表現する。人の目には見えない不可視のマーカーが、スマートフォンで撮影可能になるという提案である。これまでの情報投影技術では、主に、投影映像に近接する形で受光端末をかざすというインタラクションが中心であった。これに対して、離れた位置から撮影するというインタラクションを可能にしたという利点がある。

さらに、図 11 のように、不可視マーカーを画面いっぱいに並べることによって、スマートフォンと LCD ディスプレイの相対的な位置関係を計測することが可能になった。画素単位にさまざまな情報を送るというコンセプトから離れて、あくまで相対的な位置関係を計測する手段として本技術を応用した例となる。

最後に、固定的な映像投影に留まらず、懐中電灯のようにプロジェクタを振り回すようなインタラクションを想定し、ハンディタイプの開発にも取り組んだ。図 12 は、ドローンの制御にこれを応用した例である。投影光には、画面中心に向かうベクトル場が埋め込まれている。ドローンは、このベクトル場の情報を読み取り、プロジェクタの光束の中心に向かって移動する。人は、プロジェクタの向きをコントロールするだけで、ドローンを所望の位置に導くことが可能になる。

このように、情報投影技術を基盤とした様々なインタラクションの可能性が開けてきたと自負している。

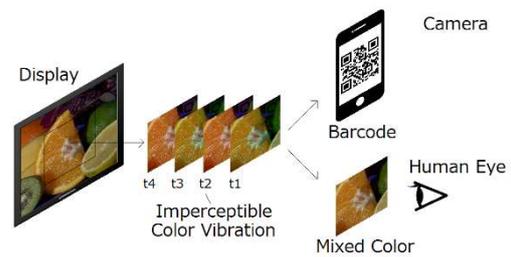


図9 LCDの色振動への情報埋込

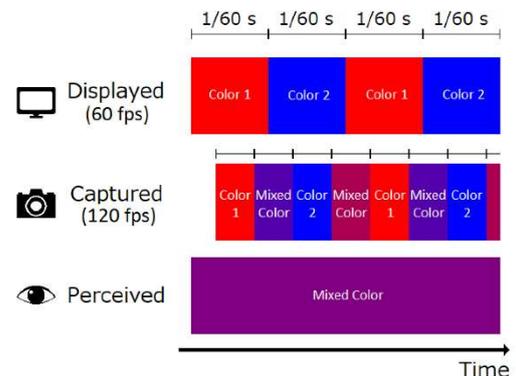


図10 スマホの高速撮影でデータを見る

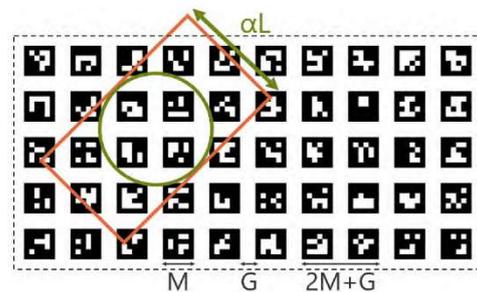


図11 不可視マーカーアレイ



図12 ドローンの制御

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kamei Ikuo, Hiraki Takefumi, Fukushima Shogo, Naemura Takeshi	4. 巻 7
2. 論文標題 PILC Projector: Image Projection With Pixel-Level Infrared Light Communication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 160768 ~ 160778
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2950068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hiraki Takefumi, Fukushima Shogo, Watase Hiroshi, Naemura Takeshi	4. 巻 7
2. 論文標題 [Paper] Dynamic PVLC: Pixel-level Visible Light Communication Projector with Interactive Update of Images and Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 160 ~ 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/mta.7.160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Matsumoto Akira, Abe Satoshi, Hiraki Takefumi, Fukushima Shogo, Naemura Takeshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Imperceptible AR Markers for Near-Screen Mobile Interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 79927 ~ 79933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2921580	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 HIRAKI Takefumi, FUKUSHIMA Shogo, KAWAHARA Yoshihiro, NAEMURA Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Phygital Field: An Integrated Field with Physical Robots and Digital Images Using Projection-Based Localization and Control Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 302 ~ 311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.11.302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, Yoshihiro Kawahara, and Takeshi Naemura
2. 発表標題 NavigaTorch: Projection-based Robot Control Interface using High-speed Handheld Projector
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ikuo Kamei, Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura
2. 発表標題 PILC Projector: RGB-IR Projector for Pixel-level Infrared Light Communication
3. 学会等名 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, Hiroshi Watase, and Takeshi Naemura
2. 発表標題 Pixel-level Visible Light Communication Projector with Interactive Update of Images and Data
3. 学会等名 International Display Workshops (IDW 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Abe, Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura
2. 発表標題 Screen?Camera Communication via Matrix Barcode Utilizing Imperceptible Color Vibration
3. 学会等名 the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takefumi Hiraki, Yoshihiro Kawahara, and Takeshi Naemura
2. 発表標題 Projection-based Localization and Control Method of Robot Swarms for Swarm User Interfaces
3. 学会等名 the 2018 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部 知史, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健
2. 発表標題 不可視の色振動を用いた2次元パターンによるディスプレイ-カメラ間通信
3. 学会等名 映像メディア処理シンポジウム (IMPS 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本 晟, 阿部 知史, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健
2. 発表標題 不可視の色振動を用いたARマーカによるカメラ位置推定の基礎検討
3. 学会等名 VR大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平木 剛史, 福嶋 政期, 渡瀬 宏, 苗村 健
2. 発表標題 映像と情報の動的更新を実現する可視光通信プロジェクトの開発
3. 学会等名 VR大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀井 郁夫, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健
2. 発表標題 赤外線領域まで拡張した可視光通信プロジェクトの開発
3. 学会等名 VR大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Abe, Atsuro Arami, Takafumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura
2. 発表標題 Imperceptible Color Vibration for Embedding Pixel-by-Pixel Data into LCD Images
3. 学会等名 ACM CHI (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿部 知史, 荒見 篤郎, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健
2. 発表標題 不可視の色振動を用いた2次元パターンによるディスプレイ-カメラ間通信の基礎検討
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荒見 篤郎, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健
2. 発表標題 可視光通信プロジェクトの高画質化・高効率化を実現する符号化方式
3. 学会等名 電子情報通信学会, MVE研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

計測自動制御学会計測部門論文賞 受賞(2019.8.30)
電気科学技術奨励学生賞 受賞(2019.3.12)
電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション賞 受賞(2018.12.13)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----