

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19H04146
研究課題名（和文）超低レイテンシ映像ディスプレイの研究

研究課題名（英文）Study on Super-Low-Latency Video Displays

研究代表者

鏡 慎吾（Kagami, Shingo）

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90361542

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：映像フレーム時間とは独立に遅延時間を短く取ることができる超低レイテンシ映像ディスプレイシステムとその応用の研究を行った。表示素子としてデジタルマイクロミラーを用いるプロジェクタ及びレーザ走査型プロジェクタを中心に開発を進めた。フレーム時間と遅延時間それぞれの変化が運動追従プロジェクションマッピングに及ぼす影響を調査するとともに、インタラクティブに操作可能なプロジェクションマッピング、水滴群への位置依存ストロボ投影、ユーザ操作部可変バーチャルエアホッケー等の応用を通じて有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素早く動く対象物へのプロジェクションマッピング等の応用を可能とする高速プロジェクタが近年相次いで行われている。そのような映像表現の成否には高フレームレートであることと遅延（レイテンシ）が小さいことの両方が関わっているが、両者を区別して議論している研究例は少ない。本研究では、フレーム時間とは独立に遅延時間を小さく取れる性質を超低レイテンシ性と定義し、この点に着目した開発、評価、応用開拓を行った。特に応用システムの構成によっては、レイテンシを適切に制御することによりフレームレートを上げることなく即応性を体感させることが可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：We investigated super-low-latency video display systems that achieve shorter latency time independently from the video frame time as well as their applications. We focused on development of a projector based on a digital micromirror device and a projector based on galvanometric laser scanning. The effects of changes in frame time and latency time on a dynamic projection mapping application were investigated. The effectiveness of the proposed concept was verified through applications such as interactive projection mapping, position-dependent strobe projection on water droplets, and augmented-reality air hockey with a transformable mallet shape.

研究分野：計測工学

キーワード：ディスプレイ バーチャルリアリティ 画像、文章、音声等認識 ユーザインタフェース

1. 研究開始当初の背景

本研究は、素早く動く対象物へのプロジェクションマッピングや、動きを伴う対象への映像投影によるディスプレイシステムの実現に取り組むものである。本研究課題の開始までの数年の間に、本課題の研究代表者らのグループも含む国内外の研究機関や企業によって映像を高速投影するプロジェクタの研究開発が相次いで行われ、前述のような運動体を介する映像表現を観察者に遅れを感じさせずに実現することが可能となった。

前述のような映像表現の成否には、高フレームレートであることと遅延 (レイテンシ) が小さいことの両方が関わっている。しかし当該研究分野の専門家も含めて一般にこれらが明確に区別して議論されることは少なく、両者を合わせて漠然と「映像表示が高速であることが重要である」と捉えられているのが実情であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、フレーム時間と遅延時間を独立して設定可能な映像ディスプレイおよび運動体の高速計測システムを開発し、それらの効果および応用の検討を行う。特に、フレーム時間とは独立に遅延を十分に短く取れる特性を持つディスプレイを超レイテンシディスプレイと呼ぶこととし、この原理に基づく新しい映像表現の探索を行う。

3. 研究の方法

フレーム時間とは独立に遅延時間を短く取ることが可能なディスプレイシステムとして、研究代表者らがかねてより開発してきたデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を用いるプロジェクタと、新たに取り組むレーザ光の走査に基づくプロジェクタの2方式を検討した。計測システムに関しては、DMDによって変調されるレーザ光の空間積分に基づく濃淡縞パターン生成を利用する3次元計測システムを検討した。

開発したシステムに基づき、運動体への追従プロジェクションマッピングの精度およびその観察者の知覚がフレーム時間と遅延時間の変化によりどのように影響を受けるかを調査するとともに、応用事例の開拓を行った。

4. 研究成果

(1) DMD 型の超低レイテンシディスプレイ

DMD を表示素子として使用する市販の DLP プロジェクタは、入力画像を多数の2値画像 (バイナリフレーム) に分解しそれらを高速に表示することで多値カラー画像を表現しており、1 ビデオフレームは数十から数百時刻分のバイナリフレームで構成される。

研究代表者らは、このバイナリフレームのそれぞれに幾何学的変換を随時加えることによって超低レイテンシを実現するプロジェクタを本課題開始以前から開発してきた。本課題でもその研究開発を継続し、当該研究期間内には、キャリブレーション不要、マーカ貼り付け不要の高速プロジェクションマッピングや、図1に示すように投影対象とする紙面の動きを利用してインタラクティブに操作可能なプロジェクションマッピング等を開発した。後者では、紙面の動きへの追従を低遅延で行いつつ映像コンテンツの更新はビデオレートで行うという、超低レイテンシ性を生かしたシステム実現例を示した。



図1 インタラクティブに操作可能な
プロジェクションマッピング

(2) レーザ走査型の超低レイテンシディスプレイ

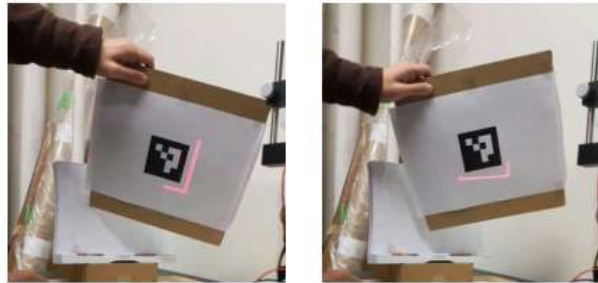
2軸ガルバノミラースキャナによるレーザ投影光の走査を行うことで、ラインアートを表示するタイプのレーザプロジェクタにおいては、1枚のラインアートを描画するのにかかる時間をフレーム時間とみなすことができる。したがって、投影対象物の動きをリアルタイムで計測し、フレーム時間の終了を待たずにガルバノミラーの制御に反映することにより超低レイテンシを実現することができる。

本研究では、平面上の図形として定義されたラインアートパターンに対して逐次的に平面射影変換を適用する FPGA 上のロジックを開発することでこれを実装した。さらに、3次元物体上への投影も可能とするため、任意の投影目標座標からミラー角度を高速に逆算するためのキャ

リブレーションアルゴリズムを開発した。運動する物体へのラインアート投影の様子を図 2 に示す。

(3) 空間積分型の濃淡縞パターン投影プロジェクタ

プロジェクタ・カメラ系による 3 次元形状計測の手法として位相シフト法がよく知られており、その高速化のためには 2 値ではなく濃淡値の縞パターンを高フレームレートで生成する必要がある。DMD の標準的な利用法である時間積分の代わりに空間積分を導入することで 20 kHz での縞投影とその高速カメラ計測を実現した。



(a) $t = 0$ [s]

(b) $t = 1$ [s]

(4) 運動追従プロジェクションマッピングの精度および知覚の評価

制御レートや遅延時間を変えながら運動体へ 2 値画像のプロジェクションマッピングを行うシステムを構築し、追従性能と観察者による知覚を評価した。追従性能の指標として定常的な位置ずれと時間的揺らぎを測定した結果、位置ずれには制御レートと遅延時間の両方が影響する一方、揺らぎに対する遅延時間の影響はわずかであることがわかった。また、観察者による主観評価には位置ずれが大きく影響することがわかった。

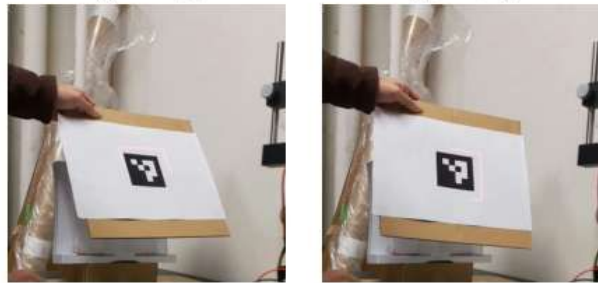


(c) $t = 2$ [s]

(d) $t = 3$ [s]

(5) 落下する水滴群を投影対象とする位置依存ストロボ照明

一定間隔で滴下される水滴群に対して同期ストロボ照明を行うことで、水滴が浮遊しているかのような視覚効果を与えることができることがよく知られている。滴下周期に対してストロボ周期をわずかに変化させることで、ゆっくり上昇または下降するような効果を与えることもできる。これをプロジェクタで実現する場合、ストロボ周期が短いこと、すなわち高フレームレートであることは必要ないが、周期を微調整できることが重要となる。開発した DMD プロジェクタによってこれを画素ごとに行うことで、ジェスチャで指示した領域の水滴のみを動かすといった視覚効果を実現した。



(e) $t = 4$ [s]

(f) $t = 5$ [s]

図 2 動的ラインアート投影

(6) 操作部を形状可変とする拡張現実エアホッケー

プロジェクタ等による映像を用いてエアホッケーゲームを拡張する提案は古くから行われており、例えばパックを映像で置き換える等の例は多い。しかし、ユーザが手に持って操作するマレット部を映像で置き換える例は見られなかった。その理由として、手の動きを予測するのはパックの予測より遥かに難しく、また予測が外れた場合に明確に知覚されてしまうため実装が困難であったことが挙げられる。

開発した DMD プロジェクタを用いて、図 3 に示すようにパックとマレットをすべて映像で置き換えてゲーム自体を再定義することのできる拡張現実エアホッケーシステムを実現した。この実装では、2 人のユーザのマレットおよびパックの合計 3 オブジェクトを約 2.4 ms ごとに時分割で表示している。したがって表示されている映像全体としてはフレーム時間 7.2 ms に相当する。しかし、運動計測を 2.4 ms ごとに行いその結果を各オブジェクトの表示に即時反映することで超低レイテンシ性を実現している。

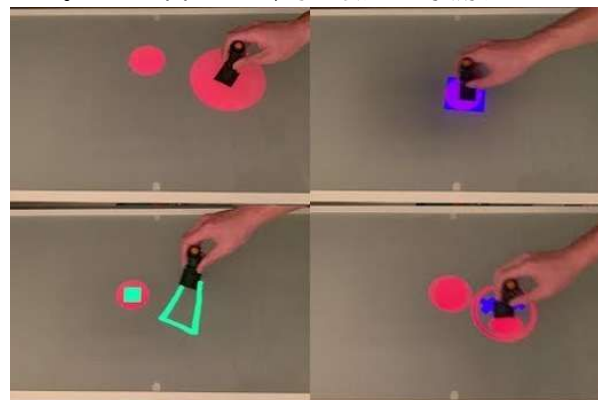


図 3 拡張現実エアホッケー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8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 大城 和可菜, 鏡 慎吾, 橋本 浩一	4. 巻 25
2. 論文標題 DMD プロジェクタを用いた低遅延な運動追従投影手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 108-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.25.2_108	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 Shingo Kagami and Koichi Hashimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Interactive Stickies: Low-Latency Projection Mapping for Dynamic Interaction with Projected Images on a Movable Surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3388534.3407291	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shotaro Narita, Shingo Kagami, and Koichi Hashimoto	4. 巻 33
2. 論文標題 Vision-Based Finger Tapping Detection Without Fingertip Observation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 484-493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p0484	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 Shun Ueda, Shingo Kagami, and Koichi Hashimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 MetamorHockey: A Projection-based Virtual Air Hockey Platform Featuring Transformable Mallet Shapes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2021 Emerging Technologies)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3450550.3465341	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 Shingo Kagami, Kotone Higuchi, Koichi Hashimoto,	4. 巻 -
2. 論文標題 Puppeteered Rain: Interactive Illusion of Levitating Water Drops by Position-Dependent Strobe Projection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2019 Posters)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3306214.3338603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shingo Kagami, Koichi Hashimoto	4. 巻 25
2. 論文標題 Animated Stickies: Fast Video Projection Mapping onto a Markerless Plane through a Direct Closed-Loop Alignment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. ISMAR 2019)	6. 最初と最後の頁 3095-3105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2019.2932248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shunya Fukuda, Shingo Kagami, and Koichi Hashimoto	4. 巻 34
2. 論文標題 Evaluation of Perceptual Difference in Dynamic Projection Mapping with and without Movement of the Target Surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1141-1151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p1141	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 鏡 慎吾	4. 巻 52
2. 論文標題 運動追従プロジェクションを利用する映像コンテンツとの動的インタラクション	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 13-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shingo Kagami and Koichi Hashimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Homography Estimation Using Marker Projection Control: A Case of Calibration-Free Projection Mapping	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC2023)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Shingo Kagami and Koichi Hashimoto
2. 発表標題 Animated Stickies: Fast Video Projection Mapping onto a Markerless Plane through a Direct Closed-Loop Alignment
3. 学会等名 第23回 画像の認識・理解シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 動く投影面と動的に相互作用する低遅延プロジェクションマッピングの実装
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shingo Kagami
2. 発表標題 Imperceptible Projected Marker Codes with Application to Calibration-Free Projection Mapping
3. 学会等名 Laser Display and Lighting Conference 2021 (LDC2021) in Optics and Photonics International Congress 2021 (OPIC2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鏡 慎吾
2. 発表標題 運動追従投影機能を内蔵するインテリジェント高速プロジェクタ
3. 学会等名 日本工業技術振興協会 次世代画像入力ビジョンシステム部会 第193回定例会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鏡 慎吾
2. 発表標題 高速・低遅延プロジェクションとその応用
3. 学会等名 精密工学会 画像応用技術専門委員会 2021年度第3回研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Kagami
2. 発表標題 A Low-Latency Image-Warping Projector with Application to Dynamic Projection Mapping
3. 学会等名 International Display Workshops (IDW'21)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田 舜也, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 投影対象物体の運動の有無による動的プロジェクションマッピングの知覚差異の評価
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東 秀謹, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 輝度伝達行列の推定に基づく3次元計測の高速化
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川 太陽, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 ハンドヘルド高速プロジェクタを利用した大画面ディスプレイとの低遅延なインタラクション
3. 学会等名 エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大城 和可菜, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 DMDプロジェクタにおける運動追従多値画像表示のためのバイナリフレーム更新手法の比較検討
3. 学会等名 第24回バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長沼 朋哉, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 レーザを光源とする縞パターン高速投影プロジェクタを用いた動物体三次元計測システム
3. 学会等名 第25回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長沼 朋哉, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 運動物体三次元計測のための高速編プロジェクタの光学系
3. 学会等名 第13回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yaoyi Bian, Shingo Kagami, Koichi Hashimoto
2. 発表標題 Vision-based Guitar Chord Recognition Using Convolutional Neural Network
3. 学会等名 第13回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鏡 慎吾, 大城 和可菜, 宮口 綾乃, 橋本 浩一
2. 発表標題 運動追従プロジェクションマッピングのためのDMDプロジェクタの色表示技術
3. 学会等名 第40回レーザー学会学術講演会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長沼 朋哉, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 運動物体三次元計測のための高速編プロジェクタのシステム実装
3. 学会等名 第40回レーザー学会学術講演会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鏡 慎吾
2. 発表標題 ロボット工学のためのリー群・リー代数入門
3. 学会等名 日本ロボット学会 第141回ロボット工学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高井 清一, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 鏡像の運動への低遅延追従を実現するミラー型拡張現実感ディスプレイ
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 大吾, 鏡 慎吾, 橋本 浩一
2. 発表標題 運動物体へのラインアート投影のためのガルバノレーザスキャナのキャリブレーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計5件

産業財産権の名称 投影システム、投影システム制御装置、投影方法及びプログラム	発明者 鏡 慎吾	権利者 国立大学法人東北大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-543052	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 Projection System, Projection System Control Device, Projection Method, and Program	発明者 Shingo Kagami	権利者 Tohoku University
産業財産権の種類、番号 特許、US20220201263	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 Projection System, Projection System Control Device, Projection Method, and Program	発明者 Shingo Kagami	権利者 Tohoku University
産業財産権の種類、番号 特許、EP 4 024 385 A1	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 投影システム、投影システム制御装置、投影方法及びプログラム	発明者 鏡 慎吾	権利者 国立大学法人東北大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/032650	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 投影システム、投影システム制御装置、投影方法及びプログラム	発明者 鏡 慎吾	権利者 国立大学法人東北大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-156876	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------