

高速・低遅延プロジェクションとその応用

東北大学 大学院情報科学研究科

鏡 慎吾

映像およびパターンを高速あるいは低遅延で投影することが可能なプロジェクタ技術について、Digital Micromirror Device (DMD) を利用する方法を中心として、高速 3 次元計測や動的プロジェクションマッピングを含む応用事例とともに紹介する。

1. はじめに

ビデオプロジェクタが普及するとともに、単純な映像表示装置としての利用を超える幅広い活用が行われるようになった。視覚情報提示の範疇の例としては、固定平面以外の物体表面を利用した映像提示やその応用により物体の見えを変えることなどが挙げられ、しばしばプロジェクションマッピングと呼ばれる。視覚情報提示以外の応用としては、計測、加工、データ通信等のための光学パターン投影への利用などが挙げられる。

これらの応用の多くでは、投影対象物や投影反射光の計測が同時に行われる。そもそもの応用が計測用途の場合はもちろんであるが、それ以外でも多くの場合に位置合わせが欠かせないため計測は重要となる。この際、投影と計測に要する時間は、目的とする処理のスループットや対象物の動的な変化への適応能力に大きく影響する。

計測に関しては、数百フレーム毎秒 (fps) 程度の高速カメラが高々数万円で手に入り、リアルタイム高フレームレート画像処理が PC でも比較的手軽に実行できるようになって久しい [1]。一方、プロジェクタによる高フレームレート・低遅延投影技術もここ数年で急速に発展しており、前述のような高スループットの計測や動的シーンへの適応が実現できるようになっている。

本稿では、Digital Micromirror Device (DMD) を利用する方法を中心として、高速投影および低遅延投影を実現する技術とその応用例を紹介する。

2. 高速プロジェクタの実現技術

現在流通しているプロジェクタの多くは、光源からの光を反射型もしくは透過型の空間光変調素子 (ライトバルブ) を経由して投影光学系に導き、空間光変

調素子上のパターンをスクリーンに結像させる。透過型素子の代表的なものが液晶パネルであり、反射型素子の代表的なものが DMD [2] である。これらを使用するプロジェクタはそれぞれ液晶 (LCD) プロジェクタ、DLP (Digital Light Processing) プロジェクタと呼ばれ、プロジェクタ市場の大半をこれらが占めている。

特にこのうち DMD は高速駆動が可能なデバイスであり、最近実現されている高速プロジェクションマッピングシステムのほとんどがこれを利用している [3, 4, 5, 6, 7]。DMD は画素に対応する微小なミラーが 2 次元に配置された MEMS デバイスである (図 1 左)。各ミラーの向きをスイッチすることで、光源から投影光学系に至る光路を画素ごとにオン・オフすることができる。これにより 2 値パターンが投影される。スイッチング周波数はデバイスによるが数 kHz から数十 kHz のオーダーであり、ヒトの視覚の臨界フリッカ融合周波数より十分に高い。そのため、多値画像やカラー画像を複数の 2 値パターンの時間積分によって表現することができる。

DMD 以外のデバイスを用いる高速プロジェクタの実現例としては、LED アレイを用いるもの [8]、フィルムマスクと複数 LED 光源を用いるもの [9, 10]、反射型液晶 (LCoS) を用いるもの [11] などが挙げられる。一方、透過型液晶は高速駆動に向いていないとされてきたが、近年はゲーミング用途のディスプレイとして数百 fps のリフレッシュレートを謳うものも市場に投入されており、高速プロジェクタへの応用が期待される。

以下本稿では、DMD の利用に的を絞って詳述する。



図1 DMD (Texas Instruments DLP7000BFLP) の外観 (左) と DMD を用いた多値画像表示法の例 (右)

3. DMD による 2 値パターンの高速投影

(1) DMD の利用

既に述べた通り DMD は本来的に 2 値パターンの表示を行うデバイスであり、目的とする投影内容が 2 値パターンであれば高速投影への応用は素直に実現できる。

ただし、市販の DLP プロジェクタをそのまま使用するのには一般には難しい。市販プロジェクタは HDMI 等から入力されたカラー映像信号を内部的に 2 値パターンに分解しそれらを高速投影する仕組みであり、目的とする 2 値パターン系列を外部から直接与えられるわけではないからである。

そのため通常は、DMD の供給元である Texas Instruments (TI) 社が用意している開発キット・評価ボードや、サードパーティ製の同様の製品を利用するか、TI が供給するチップセットを用いて独自システムを開発する必要がある。比較的低コストで高速投影を可能とする方法として、内蔵メモリに事前にロードされたパターン系列を繰り返し投影する方法 [12] と、映像インタフェースから供給される 8 ビットフルカラー (24 bit per pixel) の画像を 2 値パターンの集合と解釈し直して順次投影する方法 [13, 14] が挙げられる。

例えば TI 製の評価ボード DLP LightCrafter 4500 は、これら両方のパターンデータ供給が可能である。内蔵メモリへの事前ロードの場合、最大 48 時刻分の 2 値パターンを指定したシーケンスに従って最大 4,225 fps で投影することができる。外部からのフルカラー画像供給の場合、最大 2,880 fps の 2 値パターンとして投影することができる。RGB LED 光源や投影光学系も内蔵されており比較的使いやすい。

より柔軟な動作や高速な 2 値パターンレートが必要な場合は、もう少し高価格帯の開発キットの使用

を検討する必要がある。例えば TI 製の開発キット DLP Discovery 4100 を XGA サイズ (1024 × 768 画素) の DMD と組み合わせて使うと、最大 22,614 fps の 2 値パターン投影が可能となる。実際に使用するにはキット内に搭載されているアプリケーション FPGA にロジックを独自実装するか、サードパーティ製の FPGA ロジックを導入する必要がある。ViaLUX 社製のキット V-7001 は USB 3.0 ポートを備えており、PC 等からオンライン供給されるデータを Discovery 4100 と同等の最大パターンレートで投影できる。ただし、USB 3.0 の帯域の制限があるためデータは圧縮して送信される。パターン系列が圧縮向きか否かによってデータ供給がボトルネックになる場合がある。これらのキットには光源・光学系は付属していないため、独自に用意するかサードパーティ製のものを使用する必要がある。

(2) 応用例と留意点

具体的な応用例としては、グレイコード構造化光などに代表される 2 値パターンの投影に基づく 3 次元計測が挙げられる。これらの応用では、あらかじめ決められた一定枚数のパターン投影を繰り返し行う場合が多く、パターン系列をプロジェクタ内のメモリに事前保存しておく方式が有効である。

例えば 10 枚のパターンの投影と計測を 4,000 fps で行うことができれば 400 rangemap/s の形状計測が可能である。光沢物体や半透明物体のような難計測物体を扱うためにより多数の、例えば数十枚のパターン投影・計測を要する場合でも、ビデオレート程度での形状計測を実現できる。

計測レートが高速になると、時間方向の連続性 (隣接時刻で対象物体がほとんど変化しないという仮定) を活用できる場合がある。例えば一連のパターンの投影・計測をすべて終えてから形状を計算する代わりに、1 枚の投影・計測結果が得られる度に前時刻の計測結果に統合していくアプローチを取ると、2 値

パターン投影レートのオーダでの形状計測が実現できる [15].

2 値パターンレートが高速であることと低遅延であることは必ずしも一致しない点には注意を要する. 例えば LightCrafter 4500 のように外部からのフルカラー映像信号を 24 枚に分解して高速投影する方式の場合, 入力映像フレーム時間のオーダの遅延が生じるのは避けられない. V-7001 のようにデータ圧縮を利用する場合も, データ転送時間のほかに圧縮・伸展にかかる時間を考慮することが必要となる.

4. DMD による多値画像の高速投影

(1) PWM による画像表現

DMD を用いて多値画像 (カラー画像を含む) を表示するには, 通常, 前述のように 2 値パターンの時間積分として表現する. 最も基本的な表現法として, 1 ビデオフレーム内でミラーがオンである時間とオフである時間の割合によって画素値を表す方法が挙げられる. これを Pulse Width Modulation (PWM) 法と呼ぶ.

具体的には, 目的とする多値画像をビットプレーンに分解し, 最下位ビットプレーンから順に, 1 単位時刻, 2 単位時刻, 4 単位時刻…と表示期間を指数的に増大させながら表示する. すなわち, 最下位を第 1 ビットとして, 第 k ビットプレーンを 2^{k-1} 単位時刻だけ表示する. 分解の様子を図 1 右に示す. ただし, 同じビットプレーンの継続時間が長すぎると観察者の視線移動に伴ってアーティファクトが知覚されるため, 上位ビット側は適宜分割されシャッフルして表示するのが通例である. ビットスプリッティングと呼ばれる.

例えば 8 ビットのグレイスケール画像は合計 255 時刻の 2 値パターンから構成できる. カラー表示を行う場合, DMD を 1 素子だけ用いるシングルチップ DLP 構成では, 光源を切り替えながらこれを 3 原色分繰り返す. そのため, 数十 kHz でスイッチング可能な DMD を使用しても, フルカラー映像の表示はビデオレート程度に留まる.

これを高速化するには, 2 値パターン 1 枚の表示にかかる時間を短縮するか, 多値画像を構成する 2 値パターンの枚数を減らすかが必要となる. パターン 1 枚の表示にかかる時間は, DMD のデバイス固有のミラースイッチング動作の速さによって制限されており, 現状の下限である数十 μs (数十 kHz のレート) からの劇的な短縮は望めない.

(2) 照明光変調によるパターン数削減

一方, 2 値パターン枚数を減らすことはいくつかの手段で可能である. 古くから知られている方法としては, ミラーアレイの特殊な制御 (Reset and Release, R&R) を行うことで, あるパターンを表示している期間の途中で全ミラーを一斉にオフにできることを利用するものが挙げられる [2]. 第 1 (最下位) ビットプレーンをこの方法により半分の明るさで 1 時刻だけ表示し, 第 k ビットプレーン ($k \geq 2$) を通常の方法で 2^{k-2} 時刻だけ表示するようにすれば, 同じ画像を表示するために必要な 2 値パターン数は約半数になる. すなわち, ビデオフレームレートを 2 倍速にできる.

この方法の要点は, ビットプレーンの「重み」を表示時間の長さの違いによって表現する代わりに, 時間当たりの明るさの違いによって表現できるようにした点にある. この考え方を一般化して, 各ビットプレーンを表示する際の光源からの照明光に変調を施すことができれば, 必要な 2 値パターン数をさらに減らすことができる [16]. 旧来のメタルランプと回転カラーホイールの組み合わせによる照明系でこれを実現するのは困難であったが, LED 光源の導入により照明光の高速輝度変調が可能となり, 実現できるようになった. TI 社のデータシートにも, 2012 年頃から照明光変調を前提とした多値ビデオフレームレートが記載されるようになり, 同社やサードパーティの評価キットでも数百 fps の多値映像投影がサポートされている.

n ビットグレイスケール画像を表示するための最小時間は n 時刻である. 具体的には, すべてのビットプレーンを 1 単位時刻だけ表示するようにした上で, 第 k ビットプレーンの照明光を第 1 ビットプレーンの 2^{k-1} 倍にする. すなわち, PWM 法においてビットプレーンごとの表示期間を指数的に変化させていたのに代わり, 照明光を指数的に変化させればよい. 以降ではこれを Binary Light Modulation (BLM) 法と呼ぶ [17].

BLM 法の弱点として, 光源の発光能力の利用効率が犠牲になることが挙げられる. 常に最大の明るさで照明できる PWM 法と比べて, BLM 法で表示される画像の明るさは $\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} 2^{-k}$ 倍に低下する. $n = 8$ の場合は約 $1/4$ になる. すなわち高速性と明るさの間にトレードオフが生じるといえる. このトレードオフを考慮してバランスを取るため, 上位

の数枚のビットプレーンに PWM 法を，残りの下位ビットプレーンに BLM 法を適用することも可能である．以降では Hybrid Light Modulation (HLM) 法と呼ぶ [17]．前述の R&R による方法は HLM 法の一実現例と見ることができる．

(3) 応用例と留意点

東京大学と東京エレクトロニクスデバイスが共同開発した DynaFlash は，HLM 法の一つにより 22.6 kHz の DMD 駆動で 8 ビットグレイスケール映像の 1,000 fps 投影を実現している [4]．その後，BLM 法によりシングルチップ DLP 構成でのフルカラー表示も可能となっている [7]．技術詳細は公表されていないものの，パナソニックが CES 2016 や InfoComm 2017 等で展示した高速プロジェクション技術 [18] や，Disney Research 等による顔への高速プロジェクションマッピング [5] においても，BLM 法あるいは HLM 法に類した表示方法が使用されていると推測される．

これらの方法による高速多値画像投影は，素早く運動する対象物へのプロジェクションマッピングのほか，多値パターンを用いた 3 次元計測等にも有効である．正弦波縞パターンを利用する位相シフト法などが代表的な応用例として挙げられる．一連の 2 値パターン投影を行っている間，カメラのシャッターを開いておくことで時間積分が実現される．

位相シフト法も含めて，多値パターン投影による 3 次元計測は，パターンの輝度の線形性，すなわち，実際に投影される輝度が画素値に正確に比例するかが計測結果に顕著に影響する場合が多い．DLP プロジェクタを用いた PWM 法による多値表示は，液晶プロジェクタ等に比べて線形性を確保しやすいとされる．これは，ミラースイッチングの時間制御が液晶透過率の制御よりもばらつきが小さく安定していることに起因する．

ただし，DLP プロジェクタに照明光の高速変調を導入した場合には，事情はそれほど単純ではないことに注意を要する．LED に与える電流量により輝度を変調する場合はもちろん，点灯時間の制御により変調する場合も，点灯時の立ち上がりや消灯時の立ち下がり時間が線形性に影響する．各ビットプレーンの重みが 2 のべき乗倍から乖離すると，線形性どころか単調性すら危うくなる．照明光の挙動をよく確認することが肝要である．

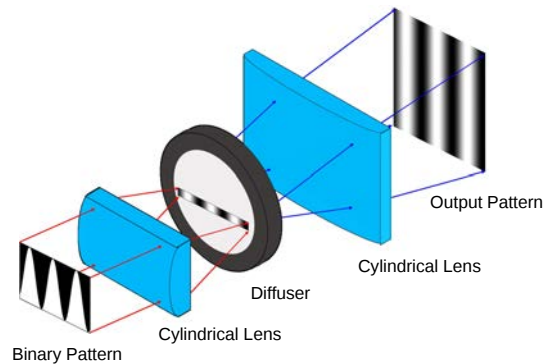


図2 空間積分に基づく多値パターン生成光学系の模式図

(4) 時間積分によらないアプローチ

DLP プロジェクタによる多値画像の表現は，以上で見てきたように時間積分を利用するのが基本であるが，目的とする多値画像の持つ性質を利用することで，それ以外の手段が取れる場合もある．時間積分を避けることで DMD のスイッチングの高速性をそのまま享受することができる．例えば，位相シフト法に用いられる正弦波縞に近いパターンを生成するために，2 値の縞パターンを敢えて合焦させずに投影することが提案されている [19]．

より柔軟な多値パターンの生成を可能とするため，筆者らは光学的な空間積分を利用することを試みている [20]．着眼したのは，3 次元計測に用いられるパターンのうちエポコーラ拘束の利用を前提とするものの多くは実質的に 1 次元パターンである点である．すなわち，投影パターンの座標 (x, y) における輝度 $I(x, y)$ が適当な 1 次元関数 $f(x)$ によって $I(x, y) = f(x)$ と表せる場合を想定する．

このとき，DMD を平行光で照明し，反射される 2 値パターンを図 2 のようにシリンドリカルレンズにより拡散板上の 1 直線に集光してこれが 1 次元輝度分布 $f(x)$ となるようにする．これを第 2 のシリンドリカルレンズによって x 方向に関してのみ計測対象面上に結像させ， y 方向は拡散するに任せる．これにより多値パターン $I(x, y)$ の投影が行える．LightCrafter 4500 を用いて最大 4,225 fps の多値縞パターンを投影できるシステムの実装例を図 3 に示す．同様に，V-7001 を用いて最大 22,614 fps の投影が可能なのも確認している．

5. DMD による多値画像の低遅延投影

(1) 高フレームレート化の問題点

素早く動く対象物へのプロジェクションマッピングを考える際，前節で述べたようなアプローチで映

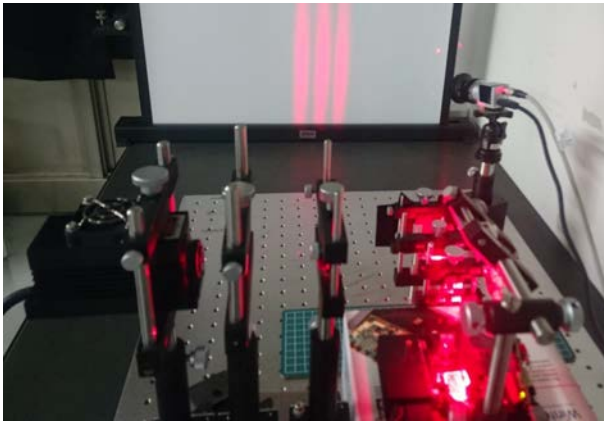


図3 空間積分に基づく正弦波縞の投影例

像フレームレートを向上させることが正攻法である。一方、既に述べたように高速性と明るさにはトレードオフの関係があり、両立するためには高価な光源技術が必要となる。

DMD の駆動周波数も、ほぼ上限に近い領域 (数十 kHz) で動作させる必要があり、いわゆるピコプロジェクタやモバイルプロジェクタに多用されるような数 kHz 駆動のローエンド DMD への適用は難しい。

また、プロジェクタへの高フレームレート映像の供給もコストの高い技術である。運動計測に応じて高フレームレートの映像をレンダリングすること自体が高性能なハードウェアと高い技術力を要するものであり、データ転送にも高いコストが付随する。

(2) 超低レイテンシ投影

ここでそもそもの目的に立ち返ると、物体上に提示されるべき映像はヒトが視認するためのものであり、高フレームレートであることが必要なわけではない。本当に必要なのは、運動が提示映像に反映されるまでの遅延時間が十分に小さいことである。

通常のビデオレートの市販プロジェクタを用いて、低遅延の運動追従プロジェクションを実現した例として、投影像をパン・チルトミラーで制御することによるプロジェクションマッピング [21] が挙げられる。

筆者らは、DMD が表示する 2 値パターン系列を、それが表現しようとしているビデオフレームの区切りとは独立して低遅延で操作することによる表示手法を提案している [3]。提案手法では、入力映像フレームは通常の DLP プロジェクタと同様にビットプレーンに分解され、PWM 法または HLM 法によって DMD 上に表示される。その際、DMD に転

送される直前に、カメラ等から得られた運動情報に応じて当該ビットプレーンに幾何学的変換を適用する。例えば、投影対象面が 3 次元空間中を任意に運動する平面であるならば、ホモグラフィ変換を適用する。この方法をバイナリフレームワープ (BFW) 法と呼んでいる。

この方法を適用すると、仮に運動追跡誤差や画像変換誤差を無視するならば、投影対象面と DLP プロジェクタが剛体的に結合されて一緒に運動するのと等価な状況を作ることができる。投影対象面の運動を観察者の視線が追跡することにより、知覚される映像は入力映像に近いものになることが期待される。我々の評価実験 [22] によると、60 fps のカラー映像にこの手法を適用することで、500 fps を超える高ビデオフレームレート投影と比べて遜色のない映像提示が可能である。

我々の最初の実装は DLP Discovery 4100 キットを用いて構築された [3]。内蔵 SDRAM に事前保存された 2 値パターン系列に最大 1,388 fps でホモグラフィ変換を適用しながら、XGA サイズの DMD に送出するロジックを同キット上の FPGA に実装した。照明光変調は実装しておらず、PWM 法によるモノクローム映像表示のみを実現した。その後、独自コントローラを開発してフルカラー化を実現している [6]。このシステムは HDMI ポートを備え、60 fps で入力される映像をビットプレーンに分解し、最大 2,470 fps でホモグラフィ変換を適用しながら XGA サイズの DMD に表示するとともに、RGBW LED の点灯を同期制御する機能を持つ。システム構成と概観を図 4 に示す。

ホモグラフィ変換パラメータは USB 2.0 ポートを通じて PC から送られる。PC 側では、通常のビデオレートの映像コンテンツを供給しつつ、運動計測結果に応じて高々 3×3 要素の行列を高速に指示すればよい。DMD の駆動周波数も高々 2.5 kHz でよく、ローエンド DMD にも適用可能な構成となっている。後述するキャリブレーション不要なプロジェクションマッピングへの応用 [23, 24] のほか、バーチャルエアホッケーシステム [25] や、インタラクティブに制御できる位置依存ストロボ照明 [26] などへの応用を展開している。

このように、入力に対して応答が現れるまでの遅延時間をビデオフレーム時間とは独立に短く取れる映像提示システムのことを筆者は超低レイテンシディ

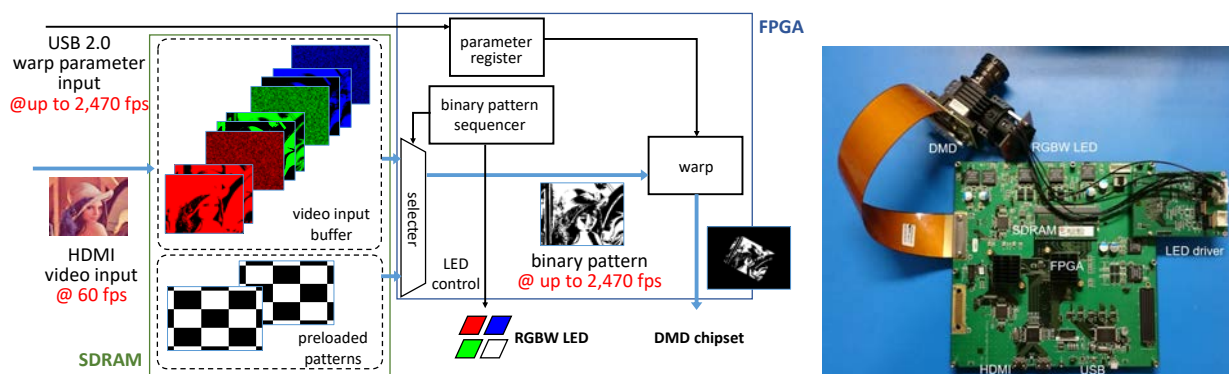


図4 投影パターン・ホモグラフィ変換機能を内蔵するプロジェクタの構成図 (左) および概観 (右)

スプレイと呼んでいる．単に遅延の絶対値が小さいことを指すわけではないことに注意されたい．

同様の考え方は拡張現実感向けのヘッドマウントディスプレイ (HMD) の設計などにも見られる．UNC at Chappel Hill では DMD を用いた HMD において，運動入力に適応して 2 値パターンを毎時刻新たに生成する方法を提案している [27, 28]．Microsoft HoloLens は空間光変調素子として LCoS を使用する HMD であるが，ビデオフレーム時間 (16.7 ms) ごとではなく色フィールド時間 (4.2 ms) ごとにホモグラフィ変換を適用している [29]．より最近の例として，東工大ではレイトレーシングを利用するプロジェクションマッピング映像の生成に同様の考え方を適用している [30]．

6. プロジェクションマッピングへの応用

既に紹介したように，プロジェクタが投影する映像の制御を高速化することで，運動体へのプロジェクションマッピングを効果的に実現できる．その際，通常は対象物体の動きを計測するカメラをプロジェクタに対して精密に位置合わせしておくか，設置後に精密にキャリブレーションしておく必要がある．

カメラとプロジェクタの位置合わせに関して，多くの高速プロジェクションマッピングシステム [4, 5] で採用されているのが，ビームスプリッタ等を用いて両者の光軸を一致させる同軸光学系構成である．この場合，奥行き計測が不要になるという利点がある．

一方，筆者らはカメラ・プロジェクタ間の位置合わせやキャリブレーションが不要な方法を提案している [23]．基本原理は，カメラによって対象物体の動きだけではなくコンテンツがどこに投影されているかも計測し，両者のずれを最小化するような制御ループを構成することにある．拡張現実感の分野では閉ループ位置合わせと呼ばれることがある．

ここで課題となるのは，対象物体の追跡と投影コンテンツの追跡をどのように両立するかである．閉ループ制御をしない場合は，例えば可視光をブロックする赤外線カメラによって対象物体のみを追跡するといった方策をとることができ，特に同軸光学系構成との組み合わせは効果的である [4, 5]．一方，閉ループ制御をする場合は投影光の影響をカメラ計測から排除するわけにはいかず，相互干渉が問題となる．投影光が物体表面で反射しカメラに入射する過程を詳細にモデル化する [31, 32] のが正攻法であるが，高速化するには負荷が大きい．

提案手法 [23] では，物体表面上のテクスチャをテンプレートとして記憶し，これを手がかりとして投影コンテンツの位置合わせ制御を行う．投影コンテンツを表現する 2,400 fps の 2 値パターン系列の中に 6 フレームに 1 回だけチェスボード状のマーカパターンを埋め込み，カメラは 400 fps でこのマーカパターンフレームのみを撮像する．チェスボード状パターンの各マス目の内部はほぼ一様に照明された物体表面テクスチャであるときみなせるため，画像追跡が可能である．これによりいったん物体表面テクスチャと入力画像の位置合わせができれば，入力画像を正規化してチェスボード状パターンを抽出するのは比較的たやすい．画像追跡処理の概略を図 5 に示す．

動作例を図 6 に示す．同図の上段では，各写真内左側のカメラで画像追跡を行いながら，右側のプロジェクタから運動する紙面上へ動画像を投影している．カメラを手で動かしても遅延なく追従できている [23]．同図下段では，動く紙面上に手描きされた迷路と衝突しつつ，仮想的な重力と慣性力を受けながら運動する多数のパーティクルのアニメーションを投影している [24]．

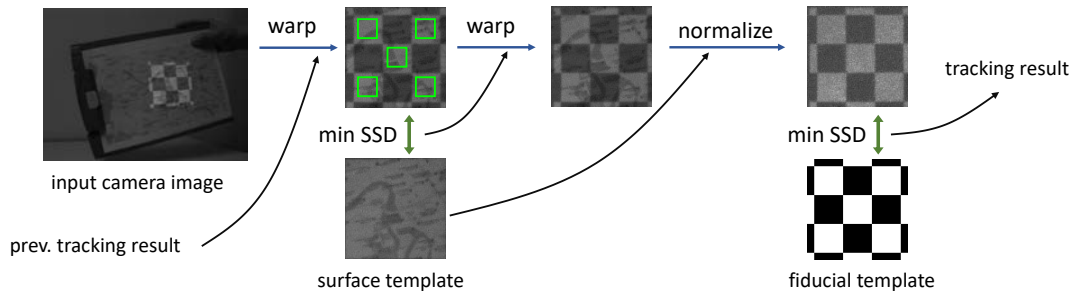


図5 キャリブレーションを不要とするプロジェクションマッピング手法における画像追跡処理

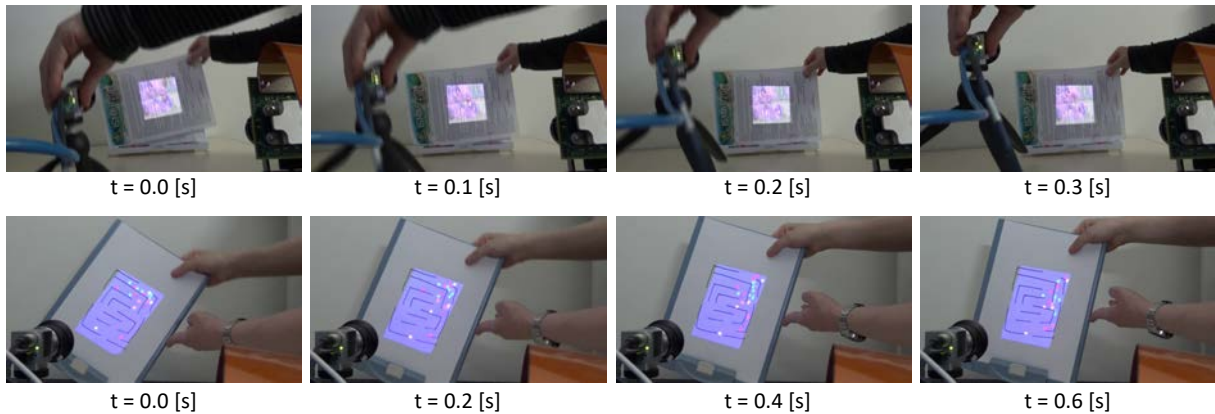


図6 キャリブレーションを不要とするプロジェクションマッピングの動作例

7. おわりに

本稿では、高フレームレート投影および低遅延投影を実現する技術とその応用について、DMD を利用する方法を中心として、実際のシステム構築例や留意点を交えながら紹介した。同様のシステムの研究開発を検討されている方の一助となれば幸いである。謝辞: 本研究の一部は科研費 19H04146, 16H06536 および JST ACCEL JPMJAC1601 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 鏡慎吾. 高速ビジョンのための OpenCV の活用. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 3, pp. 244–248, 2013.
- [2] Peter F. van Kessel, Larry J. Hornbeck, Robert E. Meier, and Michael R. Douglass. A MEMS-based projection display. *Proc. IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1687–1704, 1998.
- [3] Shingo Kagami and Koichi Hashimoto. Sticky Projection Mapping: 450-fps tracking projection onto a moving planar surface. In *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, 2015. Article No. 23.
- [4] Gaku Narita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Dynamic projection mapping onto deforming non-rigid surface using deformable dot cluster marker. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 23, No. 3, pp. 1235–1248, 2017.
- [5] Amit H. Bermano, Markus Billeter, Daisuke Iwai, and Anselm Grundhöfer. Makeup Lamps: Live augmentation of human faces via projection. *Comput. Graph. Forum*, Vol. 36, No. 2, pp. 311–323, 2017.
- [6] Shingo Kagami and Koichi Hashimoto. A full-color single-chip-DLP projector with an embedded 2400-fps homography warping engine. In *SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, 2018. Article No. 1.
- [7] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. MIDAS projection: Markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 6, 2018. Article No. 196.
- [8] Hideaki Nii, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Smart light – ultra high speed projector

- for spatial multiplexing optical transmission. In *IEEE Intl. Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams2005)*, 2005.
- [9] Ramesh Raskar, Hideaki Nii, Bert deDecker, Yuki Hashimoto, Jay Summet, Dylan Moore, Yong Zhao, Jonathan Westhues, Paul Dietz, John Barnwell, Shree Nayar, Masahiko Inami, Philippe Bekaert, Michael Noland, Vlad Branzoi, and Erich Bruns. Prakash: Lighting aware motion capture using photosensing markers and multiplexed illuminators. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 26, No. 3, 2007. Article No. 36.
- [10] Motoharu Fujigaki, Yohei Oura, Daisuke Asai, and Yorinobu Murata. High-speed height measurement by a light-source-stepping method using a linear LED array. *Optics Express*, Vol. 21, No. 20, pp. 23169–23180, 2013.
- [11] Shien Ri, Takashi Muramatsu, Masumi Saka, and Hiroyuki Tanaka. Fast and accurate shape measurement system utilizing the fringe projection method with a ferroelectric liquid-crystal-on-silicon microdisplay. *Optical Engineering*, Vol. 51, No. 8, 2012. 081506.
- [12] Roland Hofling and Enrico Ahl. ALP: Universal DMD controller for metrology and testing. In *Liquid Crystal Materials, Devices, and Applications X and Projection Displays X, Electronic Imaging 2004, Proc. SPIE*, Vol. 5289, 2004.
- [13] I. E. McDowall and M. Bolas. Fast light for display, sensing and control applications. In *IEEE VR 2005 Workshop on Emerging Display Technologies (EDT2005)*, pp. 35–36, 2005.
- [14] 平木剛史, 小泉実加, 周磊杰, 福嶋政期, 苗村健. 可視光通信プロジェクトの表現力向上に向けたデータ転送と光源制御の研究. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 21, No. 1, pp. 197–206, 2016.
- [15] Joji Takei, Shingo Kagami, and Koichi Hashimoto. 3,000-fps 3-D shape measurement using a high-speed camera-projector system. In *IEEE/RSJ Intl. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS2007)*, pp. 3211–3216, 2007.
- [16] Oliver Bimber, Daisuke Iwai, Gordon Wetzstein, and Anselm Grundhöfer. The visual computing of projector-camera systems. *Comput. Graph. Forum*, Vol. 27, No. 8, pp. 2219–2245, 2008.
- [17] Jen-Hao Rick Chang, B. V. K. Vijaya Kumar, and Aswin C. Sankaranarayanan. 2¹⁶ shades of gray: high bit-depth projection using light intensity control. *Optics Express*, Vol. 24, No. 24, pp. 27937–27950, 2016.
- [18] Ryuji Fuchikami. Real-time-measurement projection device and three-dimensional-projection measurement device. International Patent Application, PCT/JP2016/002302, 2016.
- [19] Song Zhang, Daniel Van Der Weide, and James Oliver. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement. *Optics Express*, Vol. 18, No. 9, pp. 9684–9689, 2010.
- [20] 長沼朋哉, 鏡慎吾, 橋本浩一. レーザを光源とする縞パターン高速投影プロジェクトを用いた動物体三次元計測システム. 第 25 回画像センシングシンポジウム, 2019. IS3-12.
- [21] Kohei Okumura, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa. Lumipen: Projection-based mixed reality for dynamic objects. In *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pp. 699–704, 2012.
- [22] 大城和可菜, 鏡慎吾, 橋本浩一. DMD プロジェクトを用いた低遅延な運動追従投影手法. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 25, No. 2, pp. 108–116, 2020.
- [23] Shingo Kagami and Koichi Hashimoto. Animated Stickies: Fast video projection mapping onto a markerless plane through a direct closed-loop alignment. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 25, No. 11, pp. 3094–3104, 2019.
- [24] Shingo Kagami and Koichi Hashimoto. Interactive Stickies: Low-latency projection mapping for dynamic interaction with projected images on a movable surface. In *SIGGRAPH*

2020 Emerging Technologies, 2020. Article No. 16.

- [25] Shun Ueda, Shingo Kagami, and Koichi Hashimoto. MetamorHockey: A projection-based virtual air hockey platform featuring transformable mallet shapes. In *SIGGRAPH 2021 Emerging Technologies*, 2021. Article No. 7.
- [26] Shingo Kagami, Kotone Higuchi, and Koichi Hashimoto. Puppeteered Rain: Interactive illusion of levitating water drops by position-dependent strobe projection. In *SIGGRAPH 2019 Posters*, 2019. Article No. 48.
- [27] Feng Zheng, Turner Whitted, Anselmo Las-tra, Peter Lincoln, Andrei State, Andrew Maimone, and Henry Fuchs. Minimizing latency for augmented reality displays: Frames considered harmful. In *13th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2014)*, pp. 195–200, 2014.
- [28] Peter Lincoln, Alex Blate, Montek Singh, Turner Whitted, Andrei State, Anselmo Las-tra, and Henry Fuchs. From motion to photons in 80 microseconds: Towards minimal latency for virtual and augmented reality. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1367–1376, 2016.
- [29] Georg Klein. Registration on Hololens. In *16th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2017), Keynote Talk*, 2017.
- [30] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara, and Yoshihiro Watanabe. Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing. In *SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, 2020. Article No. 13.
- [31] Samuel Audet, Masatoshi Okutomi, and Masayuki Tanaka. Augmenting moving planar surfaces robustly with video projection and direct image alignment. *Virtual Reality*, Vol. 17, pp. 157–168, 2013.
- [32] Takayuki Nakamura, François de Sorbier, Sandy Martedi, and Hideo Saito. Calibration-free projector-camera system for spatial augmented reality on planar surfaces. In *21st*

International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), pp. 85–88, 2012.