連続的に変形する投影面における実時間光学的補正

Real-Time Radiometric Compensation for Continuously Deforming Projection Surfaces

吉村 一真[†], 正会員 橋本 直己[†]

Kazuma Yoshimura[†] and Naoki Hashimoto[†]

あらまし 映像を投影するプロジェクタは、本来のスクリーンだけでなく、様々な場所や物に対して映像を投影する応用が進んでいる。近年では、人が着ている衣服等の非剛体への投影も試みられているが、色や模様が付いているだけでなく、形状が自在に変化するため、十分な補正効果が実現されていない。本論文では、一般的に室内に設置されているカーテンに着目し、連続的な形状の変化に対応した実時間光学的補正手法を提案する。カーテンの変形に伴って変化する画素間対応を、投影面の反射率の尤もらしさに基づいて更新し、GPUを用いることでカーテンの揺れに追従可能な実時間補正処理を実現する。また、様々な素材のカーテン及び投影画像の組み合わせに対して、カーテンの動きと補正精度の関係を定量化することで、提案手法の有効性を示す。

キーワード： 光学的補正, 画素間対応, 応答関数, 反射率, 非剛体, 形状変化

1. ま え が き

スクリーンに映像を映し出す装置として普及したプロジェクタは、プロジェクションマッピングに代表されるように、多様な場所への投影応用が進んでいる。近年では、持ち運び可能な低価格モバイルプロジェクタが普及し、手軽にプロジェクションマッピングを体験できる製品¹⁾も登場していることから、スクリーンへの投影以外での応用がさらに進んでいくと予想される。このような投影の応用の一つとして、色や模様が付いているだけでなく、自在に変形する非剛体への投影が試みられている^{2)~5)}。代表的な例としては、人の衣服や室内で用いられているカーテンが挙げられ、これらの色や模様を動的に補正することが可能になれば、舞台演劇のような空間演出やテーマパークでのエンターテインメント等において、高い効果が期待される。投影面の色や模様による影響を打ち消す技術として、Projector-Camera (ProCam) システムを使った光学的補正が数多く提案されているが、高精度な画素間対応に基づくため、連続的に変形する投影面上では十分な補正精度が実現されていない。

そこで本論文では、身の回りに存在する非剛体としてカーテンに着目し、それが連続的に変形する状況にも対応可能な実時間光学的補正手法の実現を目指す。そして、実際に連続的に揺れ動くカーテンにおける光学的補正効果を定量的に評価し、提案手法の有効性を示す。

2. 関 連 研 究

投影面の色や模様の影響を打ち消す光学的補正は、投影面の反射特性とプロジェクタの出力特性を画素毎にモデル化した応答関数を用いて実現される⁶⁾⁷⁾。応答特性は画素毎に異なるため、プロジェクタとカメラの全ての画素間に対して、応答関数を求める必要がある。多くの従来手法⁸⁾⁹⁾は、パターン画像を投影した様子を撮影することで、事前に画素間対応を取得可能な空間コード化法を用いている。そして応答関数は、一般的に知られた指数関数の形を採るものが多いが、DLP プロジェクタのような特殊な応答特性への対応も行われている¹⁰⁾。また、補正誤差を低減するため、フィードバック制御モデル⁷⁾¹¹⁾や、人間の知覚および視覚特性に基づいて応答関数を拡張する手法¹²⁾¹³⁾も提案されている。さらに近年では、畳み込みニューラルネットワークによる、応答関数の学習手法¹⁴⁾も提案されている。

以上のように、光学的補正技術は、事前に取得した画素間対応を前提として成り立っている。そのため、投影対象は常に静止していることが求められており、本研究のように、連続的に変形する投影面を対象とする場合には、画素間対応の維持が最大の問題となる。これに対して、ハーフミラーを用いて、プロジェクタとカメラの光軸を光学的に同軸上に配置した同軸系システムを利用することで、画素間対応を固定する手法¹⁵⁾¹⁶⁾が提案されている。しかし、初期校正の煩雑さや、ハーフミラーによってプロジェクタの光量が半減されることによる、光学的補正能力の低下が問題となる。加えて、カメラ位置がプロジェクタ位置に固定されるため、観察視点が大きく制限されてしまう。

2021年1月13日受付, 2021年6月18日再受付, 2021年7月12日採録

[†]電気通信大学 大学院情報理工学専攻 情報学専攻

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1 西 9-603, TEL 042-443-5345)

一方、カメラを利用することで、画素間対応をオンライン計測する手法が提案されている。橋本ら³⁾は、変化する投影面を深度カメラで実時間計測する手法を提案しているが、十分な解像度、精度及び速度が得られないことから、補正精度の低下が懸念される。Li ら¹⁷⁾は、撮影画像から推定した画像特徴量によって画素間対応を修正する手法を提案している。しかし、光学的補正は考慮されておらず、非白色な投影面では特徴量の推定が困難である。Zollmann ら¹⁸⁾は、投影映像の歪みに応じて、可視な構造化パターン画像を十数枚投影及び撮影することで、画素間対応を動的に修正する手法を提案している。しかし、可視なパターン画像をオンラインで投影するため、観察者にパターン画像が視認されることが問題となる。同著者らは、120FPS で投影可能な DLP プロジェクタの使用を前提として、パターン画像を不可視化する手法⁴⁾も提案しているが、パターン画像を投影している間に補正を行うことができない制約は解消されておらず、連続的に変形する投影対象では、補正精度の維持が困難である。これらの研究の課題を解決する手法として、Hashimoto ら⁵⁾は、一度の撮影結果から、画素間対応を推定する手法を提案した。しかし、カーテンの動きが大きい場合の推定精度が十分でないため、補正結果にアーチファクトが生じており、補正精度に課題が残っている。また、カーテンの揺れの定量化が行われておらず、連続的にカーテンが揺れ動いている状況における補正精度が十分に示されていない。

3. 提案手法

本論文では、一般的に市販されている 60FPS で動作する機材で構成された ProCam システムの利用を前提として、連続的に変形する投影面に対して、高い補正精度の維持が可能な実時間光学的補正手法を提案する。投影面としては、日常空間でよく用いられている模様付きのカーテンを用いる。Hashimoto らのアルゴリズム⁵⁾に基づき、変形した際の画素間対応のずれ量の候補を求め、それらの候補を基に推定した投影面の反射率の尤もらしさから、ずれ量を決定する。Hashimoto らの手法⁵⁾において十分な推定精度が得られなかった原因を、リアルタイム処理を実現するために計算対象とする画素を限定していた点であると考え、本提案では補正処理の全てを GPU 上で実行することで全画素に対する画素間推定を行い、また、応答関数の即応性を高めることで、補正の高精度化を目指す。画素間対応の推定は、Hashimoto らと同様に、投影面の反射率の尤もらしさを用いて行うが、対応探索の範囲を見直し、カーテンのより速い揺れにも対応させる。以降では、これらの処理について具体的に述べる。

3.1 光学的補正のモデル化

投影面の反射特性及びプロジェクタの出力特性を、Fujii らの手法¹⁵⁾に基づきモデル化する。C をカメラ観測値、P をプロジェクタ入力値、A を投影面の反射率、V を色混合

行列、E を環境光とすると、プロジェクタとカメラの入出力を表す応答関数は式 1 で表される。

$$C = A(VP + E) \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_R \\ P_G \\ P_B \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} E_R \\ E_G \\ E_B \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_R & 0 & 0 \\ 0 & A_G & 0 \\ 0 & 0 & A_B \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} V_{RR} & V_{RG} & V_{RB} \\ V_{GR} & V_{GG} & V_{GB} \\ V_{BR} & V_{BG} & V_{BB} \end{bmatrix}$$

なお (R, G, B) は各色チャンネルを示す。ここで、プロジェクタとカメラの画素間の対応を明示化すると、式 1 は、プロジェクタ画像上の画素 (u, v) とカメラ画像上の画素 $(\tilde{u}, \tilde{v})$ の画素間対応を表す対応 m を用いて式 2 及び 3 で表される。

$$C_{m(u,v)} = A(VP_{(u,v)} + E_{m(u,v)}) \quad (2)$$

$$(\tilde{u}, \tilde{v}) = m(u, v) \quad (3)$$

ここで、投影対象が変形する場合、時間経過に伴い、式 2 において画素間対応 m 及び、反射率 A 、環境光 E が逐次変化する。Fujii らの手法¹⁵⁾に基づき、補正目標となるカメラ観測値 $\bar{C}$ を実現するように補正されたプロジェクタ入力値 $\bar{P}$ は、経過時間 t を導入して式 4 で表される。

$$\bar{P}_{(u,v)} = V^{-1} \left(\left(A^{(t-1)} \right)^{-1} \bar{C}_{m(u,v)} - E_{m(u,v)}^{(t-1)} \right) \quad (4)$$

環境光 E は、変化が極微小なことから初期計測値で近似することができる。反射率 A は、従来手法⁵⁾では Recursive Least Squares Algorithm を用いて推定していたが、過去の推定結果を使うことで安定化を目指す手法であるため、カーテンの動きが速くなると十分な対応ができない状況が事前評価で確認できた。そこで本提案では、従来手法⁵⁾では限定的だった推定対象画素が、3.3 で述べる高速化によって全画素へと拡張されることによる推定処理の高精度化を前提とし、現在の状況に対して即応性の高い閉ループ手法¹⁵⁾を用いて反射率 A の推定を行う。

$$A_K^{(t)} = \frac{C_{K,(\tilde{u}^{(t)}, \tilde{v}^{(t)})}^{(t)}}{\bar{C}_{K,(\tilde{u}, \tilde{v})}} A_K^{(t-1)}, \quad (K = R, G, B) \quad (5)$$

$$(\tilde{u}^{(t)}, \tilde{v}^{(t)}) = m^{(t)}(u, v) \quad (6)$$

式 5 は、一般に光学的補正で用いられているモデル式であり、1 つのカメラ観測値から反射率を求めることができる。しかし、対応 m は時間変化するため、式 5 から反射率を求めるには、別途対応 m を推定する必要がある。

3.2 動的な画素間対応推定

光学的補正においては、投影光とカーテンの様子が同時に観察されるため、画像特徴量等によって画素間対応 $m^{(t)}$

図 1 変形する投影面における画素間対応のずれ

図 2 形状変化に対応した光学的補正処理の流れ

を逐次推定することは困難である。そこで、応答関数を用いて推定されるカーテンの反射率に着目する。

図 1 に示すように、時間 t の経過に従って、カーテンが後方に揺れて形状が変化した場合、プロジェクタ画素 p に対応するカメラ画素 c^t も変化し、時刻 $t+1$ における対応画素を c^{t+1} とする。ProCam システムをステレオカメラと見做した際に成り立つエピソード幾何を考慮すると、カメラ画素 c^{t+1} は ProCam 間に成立するエピソード線上に限定される。このエピソード線に沿って新たな c^{t+1} を探索することで、効率的な画素間対応の推定が可能となる。

そこで、エピソード線上でカメラ画素が移動した距離をずれ量とし、このずれ量を探索によって求めることで画素間対応を推定する。具体的には、エピソード線に基づいてずれ量候補を求め、各ずれ量から推定される反射率の妥当性から、尤もらしいずれ量を決定する。ずれ量推定処理の流れを図 2 に示す。本研究では、3.3 で述べる高速化を前提として、推定対象となる画素を全画素へと拡張する。そのため、図 2 に示す処理では、従来手法⁵⁾で行っていた、補正対象を誤差の大きな画素のみに限定する処理を省略している。以降に、図 2 中の各処理について示す。これらは基本的に従来手法⁵⁾を同じ構成となっている。

(1) 候補生成

エピソード線を用いることで、画素間対応のずれの方向を拘束できる。従来手法⁵⁾では、サブピクセル単位での探索を組み合わせたずれ量候補の推定を実践していたが、速い動きに対応するにはあまり効果がなかったため、本提案ではこれらを見直して簡易な実装とする。具体的には、事前計測で取得した初期画素間対応を、画素毎に予想されるずれ量 $-d \sim d[\text{pixel}]$ の間で $1[\text{pixel}]$ ずつずらした $2d+1$ 個のずれ量候補を生成する。またエピソード線は、プロジェクタとカメラの配置関係に依存する固定パラメータであるため、事前処理にて算出する。

図 3 シェーダを利用した実時間光学的補正の実装

(2) 反射率推定

尤もらしい画素間対応を実現するずれ量候補の選択には、変形や投影映像の影響を含む撮影画像そのものを利用することは困難である。そこで、この撮影画像から、応答関数の要素の一つであり、投影映像の影響を受けない反射率を推定して用いる。反射率は、生成された画素間対応の候補を用いて、式 5 で示した閉ループ手法によって推定する。

(3) ずれ量推定

投影映像の影響を受けない反射率も、大きく変形する布類では、そのまま特徴として利用することは困難である。そこで、従来手法⁵⁾で示されているように、画素間対応が誤っている場合、推定された反射率にはアーチファクトと呼ばれるノイズが多数発生することに加え、近傍領域における反射率は比較的一定であることに着目する。また、処理量を抑えるため、カーテンの様に前後に揺れる場合においては、近傍領域での画素毎のずれ量は同じであると近似する。各ずれ量候補に対して生成した反射率の、近傍領域における分散値が最小であるものを、本手法では尤もらしい反射率であると判定する。そして、この際のずれ量を最終的な推定結果とし、画素間対応を更新する際には、現在までに推定されたずれ量を累積した値を初期画素間対応に足し合わせたものを用いる。

3.3 実時間処理の実現

本研究では、全画素に対して実時間で画素間対応の推定を行うために、OpenGL のシェーディング言語である GLSL を用いて、補正処理の全てが GPU 上で動作するように実装した。本実装は、図 3 に示すように、画素間対応の推定と閉ループによる光学的補正の 2 つで構成されている。これらの処理はフラグメントシェーダを用いて実装し、CPU と GPU 間のデータ転送を抑えるために、撮影画像を除く計算に必要なデータを、CPU を介することなく GPU 上で全てテクスチャとして保持させた。各処理を行うシェーダへの入力、保持したテクスチャからとし、フレームバッファオブジェクトを利用したオフスクリーンレンダリングによって、出力もテクスチャとして保持した。

図 3 の実時間光学的補正は、初めに図 3 右の画素間対応の推定処理が実行され、その結果を基に図 3 左の光学的補正処理が実行される。図 3 右における画素間対応の推定処理では、まず撮影画像をカメラ座標系からプロジェクタ座標系へ変換する。この際、ずれ量候補でずらした画素間対

図 4 構築した投影環境

図 5 使用したカーテン

図 6 使用した画像

応を用いる。そして、変換済み撮影画像を用いて反射率を推定し、その反射率から分散値の計算及びずれ量の推定を候補の数だけ実行することで、最終的なずれ量を推定する。続く図 3 左の光学的補正処理では、推定されたずれ量に基づいて更新した画素間対応を用いて撮影画像を座標変換し、補正画像を生成する。

以上のように、全ての画素に対する補正処理を GPU によってリアルタイム実行可能にすることで、従来手法⁵⁾で行っていたように、補正対象画素を目標から大きく外れた画素に限定する必要がなくなり、補正画像全域において補正精度の向上が期待できる。また、補正精度が安定したことにより、従来手法のような逐次最小二乗法を用いた推定ではなく、閉ループ手法を用いることが可能になり、最新の撮影結果のみを使った即応性の高い補正が期待できる。

4. 評価実験

本論文では、提案手法の補正精度を、実際に揺れ動くカーテン上で評価する。複数種のカーテン及び画像の組み合わせに対して、モーションキャプチャを用いて計測した実際のカーテンの動きと補正精度の関係を定量的に評価し、従来手法に対する有効性について議論する。

4.1 実験環境

本実験で用いる環境を図 4 に示す。使用するプロジェクタは Canon WUX450 (液晶プロジェクタ、解像度 1920 × 1200, 出力 4500lm)、カメラは Point Gray GS3-U-236S-C (解像度 1920 × 1200) とした。ただし、プロジェクタ画素に対するカメラ画素が、最低 1 つは存在するように、プロジェクタ解像度を 1280 × 800 に設定した。補正処理を行った PC の CPU は Intel®Core(TM)i9-7900X @3.30GHz, RAM は 32GB, OS は Windows10Pro 64bit,

表 1 提案手法の処理時間 ([ms])

処理項目	$d = 1$	$d = 7$
GPU への撮影画像の転送	1.61	1.48
候補生成	1.12	3.96
反射率推定	0.38	1.87
ずれ量推定	2.27	6.75
補正画像生成	0.73	0.60
合計	6.12	14.67

GPU は NVIDIA GeForce 2080 Ti とした。

評価に用いる実際のカーテンの動きは、カーテンの裏面に反射マーカを貼り付けて、光学式モーションキャプチャ (OptiTrack Flex3) を使用して計測した。投影対象のカーテンは、図 5 に示す 3 種類を使用した。それぞれのカーテンの特徴として、uniform は、細かな鏡面性のある素材で、一様な色が広い範囲に分布した模様を持つ。repeat は、比較的拡散反射する素材で、規則性のある市松模様を持つ。edge-less は、repeat と同様に拡散反射する素材で、色の境界がぼやけた模様を持つ。カーテンはサーキュレータの風によって揺らし、障害物によって風量を抑えた場合を弱風、風量を抑えない場合を強風として、2 つの揺らし方を用意した。またカーテンは自己遮蔽せず、カメラから見て主に前後に揺れるように設定した。投影画像は、図 6 に示すように、それぞれ異なる特徴を持つ 4 種類を使用した。また、反射率の分散を求める際の近傍領域は 13×13 画素とした。

4.2 比較手法

補正精度の評価は、カーテンの表面に、その模様を打ち消すように補正した映像を投影し、元画像の再現度を用いて行う。比較する手法は、補正なし・補正あり (従来手法 1¹⁸⁾、従来手法 2⁵⁾、及び提案手法) の計 4 種類を用いた。従来手法 1 は、Zollmann らの提案手法と同様に、不可視投影マーカを用いて動的に画素間対応を推定する手法を想定した。ただし、実験で使用するプロジェクタの更新レートの制約から、マーカの不可視投影が実現できないため、可視マーカを用いて実現した。可視マーカを投影している期間を評価対象から除外すると共に、不可視投影マーカが投影されていて、補正画像が更新されない期間を再現した。加えて、光学的補正の精度差が評価結果に大きく影響しないようにするため、反射率推定手法は提案手法と同様の手法を用いた。また、従来手法 2 は、提案手法の元となった手法であるが、補正対象とする画素が限定されており、また反射率推定に逐次最小二乗法を用いていることから、完全な実時間補正が実現されていない点が異なっている。

4.3 システムの処理速度

提案システムにおける主な処理時間を表 1 に示す。 d はエピソード線上での距離、即ちずれ量の探索範囲を示している。探索は $-d \sim +d[\text{pixel}]$ の間で 1[pixel] ずつずらした各地点を対象とする。探索範囲を拡大するにつれて処理時間が増加するが、より大きなカーテンの動きに対応可能となる。 d の最小値は 1 であり、プロジェクタの更新レートである 60FPS 以上で処理可能な d の最大値は 7 であった。

それぞれにおける処理時間を表 1 に示す。本評価実験における探索範囲は、弱風の際は $d = 1$ とし、強風の際は、補正が安定し、かつ d の最大値に近い $d = 6$ とした。従来研究⁵⁾ における探索数は $d = 4$ 相当だったため、本提案では補正画素を全画素に拡張しながら、探索範囲の拡張を実現することができた。

4.4 連続的に変形するカーテンにおける評価

連続的に変形するカーテンにおける、提案手法及び従来手法の補正精度を、計測したカーテンの動きと合わせて定量的に評価する。画素間対応の真値を動的に求めることは困難であるため、精度評価には人間の視覚特性を考慮した画像評価指数である Structural Similarity (SSIM)¹⁹⁾ を用いる。また、1 フレームあたりにカーテンが動く距離の絶対値をカーテンの速度とし、カーテンの動きを表す指標として計測する。比較的動きが激しいカーテン右下部において、実時間輝度補正による補正精度とカーテンの速度が時間変化する様子を図 7 に示す。図 7 では、カーテン repeat、投影画像 city の組み合わせに対して強風を用いて揺らした様子を代表として示す。

図 7 における縦軸は、左側が補正精度を示す SSIM 値、右側がカーテンの速度 [mm/frame] を示し、横軸は経過フレームを示す。なお、投影は 60FPS で行うものとする。また、従来手法 1 のグラフにおいて、可視マーカ投影中は補正が行われなことから、該当するフレームにおける SSIM 値は除外している。そして、可視マーカによる幾何対応推定が終了した後は、本来の不可視マーカ投影期間を想定して、幾何対応が更新されない状態を一定期間継続している。

図 7 では、補正無しの場合には、カーテンの速度によらず、全体を通して SSIM 値が低い結果となった。これは、光学的補正を行わないことから、常にカーテンの模様が浮き出た状態になっていた様子と合致する。従来手法 1 では、SSIM 値が計測されていない期間に、マーカを用いて幾何対応を計算しており、幾何補正が終了して SSIM 計測が開始した直後は、高い補正精度が実現できていることがわかる。しかし、その後は不可視マーカ投影期間となるため、幾何対応が更新されず、SSIM 値が徐々に低下していく様子が確認できる。カーテンの揺れ方が大きくなると、SSIM 値の低下の度合いも大きくなり、場合によって補正を行わない状態と同程度まで低下する。従来手法 2 では、カーテンの速度が小さい場合の SSIM 値は高いが、不安定な様子が確認でき、カーテンの速度が大きい場合には SSIM 値が大きく低下している。これらに対して提案手法では、他の手法と比較して、弱風においては全体を通して高い SSIM 値を維持している。また、いずれの手法も、強風の場合はカーテンの速度が大きい際に SSIM 値が低下しているのに対して、提案手法ではその低下が大きく抑えられている。

次に、以上で示した実験過程における補正精度を、実際の補正の様子から定性的に評価する。カーテンの速度が大きく変化した時点を図 7(b) 中に白丸で示し、その際の補正

結果を図 8 に示す。図 8(a) から、時間経過に伴い、従来手法 1 では映像を投影している期間において幾何対応が更新されないため、カーテンの市松模様が全面に浮き出ている。これは図 7(b) において、SSIM 値が大きく低下する結果とも合致する。一方、図 8(c) に示した提案手法では、この影響が大きく抑えられている。このことから、連続的に変形するカーテンにおいて、実時間光学的補正の効果が高いことが確認できる。また、図 8(b) から、時間経過に伴い、従来手法 2 では画素間の誤対応に起因する多数のアーチファクトが発生していることが確認できる。従来手法 2 のような補正対象画素の限定を行わない提案手法は、補正対象の全域において高い補正精度を実現したと考えられる。

4.5 カーテンの速度域毎の評価

より多様な投影画像及びカーテンの速度における補正精度を評価するために、カーテンの速度域毎の補正精度を図 9 に示す。図 9 は箱ひげ図であり、縦軸は SSIM 値、横軸はカーテンの速度域を示す。図 9 では、図 6 に示した全ての画像を用いてカーテン毎に補正を行い、補正対象領域の全ての画素に対して SSIM 値を算出した。また、カーテンを動かすために強風及び弱風の両方を用いて、多様なカーテンの速度を再現した。

図 9 では、4.4 で示した結果と同様に、補正無しの場合には中央値が低いのに対して、補正を行うことで補正精度が改善される傾向が確認できる。また、従来手法 1 では、速度に応じた精度低下が顕著であり、従来手法 2 でもわずかにその傾向が確認できる。これに対して、提案手法はどの速度域でも高い中央値を維持している。

これに加えて、補正無し及び従来手法 1 では、どの速度域においても箱ひげ図の四分位範囲が広いことから、カーテンと投影画像の組み合わせによる補正精度のばらつきが比較的大きいといえる。一方で、従来手法 2 及び提案手法は、どの速度域においても四分位範囲が狭いことから、同ばらつきが比較的小さいことが確認できる。さらに、速度域が大きい場合において、提案手法は従来手法 2 よりも中央値が高く、四分位範囲がさらに狭いことに加えて、最小値が高く維持されていることから、局所的に発生する画素間の誤対応や、それに起因するアーチファクトによる補正精度の低下が少ないことが考えられる。

従って、提案手法は従来手法と比較して、様々なカーテンや投影画像の組み合わせであっても、カーテンの速度によらず、高精度な補正が可能であることが確認できる。

4.6 考察

4.4 から、提案手法は従来手法と比較して、連続的に揺れ動くカーテンにおいて高い SSIM 値を維持し、様々なカーテンの速度に対応可能であることが確認された。しかし、図 7 において、他の手法程ではないが、SSIM 値が最大値である 1 よりも少し低い値で安定していることが確認できる。これは、提案手法はカーテンが動いた際の補正誤差を、カメラで観測してから打ち消すため、最低でも 1frame 分の

図 7 連続的に揺れ動くカーテンにおける補正精度変化

図 8 カーテンの動く速度が大きい時点での補正結果

図 9 カーテンの速度域毎の補正精度

補正遅れが生じることが原因として考えられる。これに対しては、ProCam システムの潜在的な遅延を低減させる他に、上下方向に連動して動くカーテンの動きに着目し、これをモデル化することによる遅延補償の導入も考えられる。

また、図 9 から、提案手法における SSIM 値の高い中央値に対して、最小値が比較的大きく低下していることが確認できる。この際の状況を確認したところ、投影面や投影画像の色の境界付近を撮影する際に生じる量子化誤差や、投影画像の黒色部分において投影光が少ないことから、反射率の推定精度が低下することが原因として考えられる。これらの問題に関しては、高解像度なカメラの導入や、人の知覚特性を考慮して、映像に対する印象に影響が生じない範囲で、黒色部分の輝度を引き上げる対応が考えられる。

さらに、本研究における反射率 A に着目すると、これは物理的な反射率の他に、プロジェクタと投影対象の距離及び入射角に依存した輝度減衰による影響が含まれていることが考えられ、実際の反射率と異なっていることが予想される。しかし、連続的に揺れ動くカーテンに対して提案手法が高い SSIM 値を維持できていることから、誤った画素間対応によって生じる、ノイズ状のアーチファクトによる分散変化⁵⁾を利用した本推定手法は、比較的滑らかで連続的であると予想される輝度減衰による影響を受けにくかったと想像できる。この点に関しては、プロジェクタ、カメラ及び投影対象の様々な配置条件において、検証していく

必要があると考えられる。

5. む す び

本論文では、揺れ動くカーテン上への映像投影を可能にする実時間光学的補正手法を提案した。連続的に揺れ動くカーテンにおける補正精度を定量的に評価することで、提案手法の有効性を示した。今後は、4.6 で述べたように、提案手法にも補正精度の改善余地があるため、ProCam の潜在的な遅延による影響への対応も含めて、改善手法を検討したい。また、カーテン以外の非剛体として、動いている人の着衣等へと投射対象を拡張していきたい。

本研究は JSPS 科研費 JP19K22867 の助成を受けた。

(文 献)

- 1) Lightform: “Lightform LF2” (2020), <https://lightform.com/lf2>
- 2) Daniel Saakes and Hui-Shoyong Yeo and Seung-Tak Noh and Gyeol Han and Woontack Woo: “Mirror Mirror: An On-Body T-shirt Design System”, CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 6058-6063 (2016)
- 3) 橋本 直己, 渡邊 暁: “環境変化に対応する動的映像補正手法”, 映像情報メディア学会誌, **Volume. 66**, No. 9, pp. 303-309 (2012)
- 4) S. Zollmann, O. Bimber: “Imperceptible Calibration for Radiometric Compensation”, The Eurographics Association (2007)
- 5) N. Hashimoto, K. Yoshimura: “Radiometric Compensation for Non-Rigid Surfaces by Continuously Estimating Inter-pixel Correspondence”, The Visual Computer (2020)
- 6) M. Brown, A. Majumder and R. Yang: “Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **Volume. 11**, Issue. 2, pp. 193-206 (2005)

- 7) S. K. Nayar, H. Peri, M. D. Grossberg and P. N. Belhumeur: "A projection system with radiometric compensation for screen imperfection", IEEE Workshop Projector-Camera Syst (2003)
- 8) S. Jordan and M. Greenspan: "Projector optical distortion calibration using gray code patterns", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshop, pp. 72-79 (2010)
- 9) N. Hashimoto and K. Kosaka: "Photometric compensation for practical and complex textures", SIGGRAPH'15 ACM SIGGRAPH 2015 Posters Article No. 84 (2015)
- 10) A. Grundhofer and D. Iwai: "Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation", IEEE Transactions on Image Processing, **Volume. 24**, pp. 5086-5099 (2015)
- 11) 天野 敏之, 加藤 博一: "モデル予測制御を用いたプロジェクタカメラ系によるアピアランス制御", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), 1368-1375(2010)
- 12) T. H. Huang, T. C. Wang, H. H. Chen: "Radiometric Compensation of Images Projected on Non-White Surfaces by Exploiting Chromatic Adaptation and Perceptual Anchoring", IEEE Transactions on Image Processing, **Volume. 26**, Issue. 1, pp. 147-159 (2017)
- 13) M. Post, M. A. Naiel, Z. Azimifar and M. Lamm: "FRESCO: Fast Radiometric Egocentric Screen Compensation", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshop (2019)
- 14) B. Huang and H. Ling: "End-to-end Projector Photometric Compensation", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshop (2019)
- 15) K. Fujii, M. D. Grossberg and K. Nayar: "A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 814-821 (2005)
- 16) T. Amano: "Projection center calibration for a co-located projector camera system", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops, pp. 443-448 (2014)
- 17) Y. Li, N. Bao and Q. Yuan: "Real-time continuous geometric calibration for projector-camera system under ambient illumination", 2012 International Conference on Virtual Reality and Visualization, pp. 7-13 (2012)
- 18) S. Zollmann, O. Bimber: "Passive-Active Geometric Calibration for View-Dependent Projections onto Arbitrary Surfaces", Journal of Virtual Reality and Broadcasting, **Volume. 4**, No. 6 (2007)
- 19) Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh and E.P. Simoncelli: "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity", IEEE Transaction on Image Processing, **Volume. 13**, Issue. 4, pp.600-612 (2004)

よしむら かずま
吉村 一真 2018 年, 電気通信大学情報理工学部総合情報学科卒業。2020 年, 同大学院 情報理工学研究科博士前期課程 (情報学専攻) 修了。現在は同大学院博士後期課程 (情報学専攻) に在籍中。光学的補正技術に関する研究に従事。修士 (工学)。

はしもと なおき
橋本 直己 1997 年, 東京工業大学工学部情報工学科卒業。1999 年, 同大学院博士前期課程 (計算工学専攻) 修了。2001 年, 同大学院博士後期課程 (計算工学専攻) 修了。同年, 同大精密工学研究所助手。2007 年, 同研究所助教。2008 年, 電気通信大学情報工学科准教授, 2010 年, 同大学総合情報学専攻准教授, 2020 年, 同大学情報学専攻教授, 現在に至る。バーチャルリアリティ, 没入型ディスプレイ, 映像投影技術に関する研究に従事。博士 (工学)。正会員。