

変幻灯—錯覚を利用した光投影による実物体のインタラクティブな動き編集—

吹上 大樹¹ 河邊 隆寛¹ 西田 眞也¹

概要: プロジェクションマッピングは実物体の見た目を編集する光投影技術として注目されており、これまで対象のテクスチャや色味、ダイナミックレンジ、質感などの編集に利用されてきた。こうしたプロジェクションマッピングの新たな応用例として、著者らは対象に動きの情報を付加する手法（変幻灯）を提案した。変幻灯では、輝度信号の視覚運動パターンのみを投影するため、投影対象物が本来もつ見た目やテクスチャの質感には一切影響せず、非常に現実感の高い動き印象を知覚させることが可能となる。本研究報告では、変幻灯の基本的な仕組みを解説すると共に、変幻灯の応用例として、インタラクティブに実物体に見かけの動きを付与し、編集することができるアプリケーションを紹介する。

1. はじめに

プロジェクションマッピング（あるいは Spatially Augmented Reality と呼ばれる）は、主にプロジェクターを用い、実物体の表面上に静止画もしくは映像を投影することで、投影対象の見た目を変化させる技術である。近年この分野における研究が盛んに行われており、実物体に対してテクスチャのマッピングを行うもの [17] から、色味や質感を操作するもの [2], [20], ダイナミックレンジを引き上げるもの [4] まで様々な応用がなされている。こうしたプロジェクションマッピングの新たな応用例として、河邊ら [11] は実物体に動きの印象を与える手法（以下、「変幻灯」と呼ぶ）を提案した。変幻灯では、輝度信号パターンの映像を投影することで、投影対象そのものが動いているかのようなリアルな運動印象を与えることができる。

動く映像を投影する手法としては過去の研究にもいくつか例があるが、これらの研究はいずれも、動きを含んだシーンやテクスチャの映像で投影対象の表面を塗り替えることを目指していた。一方で変幻灯は、投影対象がもつ（静的な）見た目やテクスチャは保ったまま、視覚系が検出するのに足るだけの運動信号を加えることを意図している。

こうした方略をとることで、変幻灯にはこれまでのプロジェクションマッピングに比べ、いくつかの利点が存在している。まず、視覚系の運動信号検出メカニズムが検出可能な信号さえ与えられればよいから、部屋を暗くしなくても十分な効果を与えられる。また、運動検出メカニズムの空間解像度はそれほど高くないため、プロジェクタの解像

度が低くても違和感を生じにくい。さらに、既存の静止対象物に動きをつけるだけで新鮮な視覚体験を生み出せるため、コンテンツ作成にかかるコストが比較的小さい。これらの利点により、変幻灯は日常シーンにおける使用を想定した際のハードルが低くなっており、店舗内外での広告やインテリアなど、様々な応用が期待できる。

本研究報告では、変幻灯の基本的な仕組みを解説すると共に、変幻灯のための自動キャリブレーションおよび動き編集機能が一体となったアプリケーションの実装例を紹介する。

2. 関連研究

これまでのプロジェクションマッピング手法は、主に投影対象の見た目を別のものに塗り替えることに主眼が置かれてきた。例えば [17] や [9] は、白色または模様のある実物体に対し、全く別の模様・素材の反射光を再現するように投影光を調節する手法を提案した。その後も、動的な対象に同様の手法を適用できるよう計算速度を向上させたもの [7], [19], 相互反射の影響まで考慮して精度を向上させたもの [5], [18] など多くの研究がなされている。同様の手法を用いて静止対象を動かして見せた研究もあり、例えば [3] では、ヒューマノイドの顔の表面に皺を含むテクスチャが動く映像を投影することで、表現力を向上させることに成功している。

一方、投影対象の見た目を全く変えずに動かして見せるような手法はこれまで提案されてこなかった。これは、プロジェクタのダイナミックレンジ等の制約により、ある環境光下での見た目を空間的にずらした位置で再現すること

¹ NTT コミュニケーション科学基礎研究所

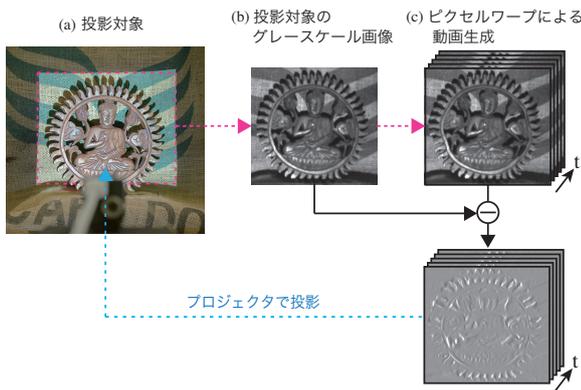


図 1 運動誘導パターンの生成例.

が難しいためであると考えられる。変幻灯では、物理的に正しい反射光を再現することを目標とせず、人間の視覚系を錯覚させるのに必要十分な情報を投影することで、リアリティの高い動きの表現を実現する。

3. 変幻灯の概要

変幻灯は、視覚的な動き知覚を誘導する「運動誘導パターン」の映像信号を投影対象に投影することで、対象そのものが動いているかのような見た目を生み出す。本章ではまず、運動誘導パターンの生成方法について述べ、次に変幻灯が利用している人間の視覚特性について説明する。

3.1 運動誘導パターンの生成

カメラ-プロジェクタ系を用いた場合の運動誘導パターンの生成方法を図 1 に示す。まずカメラで投影対象を撮影し、投影対象を観察者側からみた時のグレースケール画像 I_G を取得する。次に、取得した画像 I_G を動的に変形した画像列 $I_D(t)$ を生成する (t はフレームを表す)。最後に、変形画像列と元のグレースケール画像との差分の画像列を次式によって計算することで、運動誘導パターン $M(t)$ が得られる。

$$M(t) = W(I_D(t) - I_G) + G \quad (1)$$

投影光は負の値を取れないため、画像の差分に対して定数 G を加算している。 W は運動誘導パターンの輝度値 (コントラスト) を調節する重みである。変幻灯では I_D の反射光を実世界上で正しく再現することは目標としないが、表面反射率等を考慮して W を調節することで効果を高めることができる。

生成した運動誘導パターンの映像を投影対象に正しく位置を合わせて投影することで、対象が動いているかのような印象が得られる。ただし、多くの場合知覚される動きのサイズは I_D よりも小さくなる。投影結果については、動きを錯覚的に誘導するという性質上、静止画で示すことはできないため、Youtube (<https://www.youtube.com/watch?v=wIHwJm5398>) な

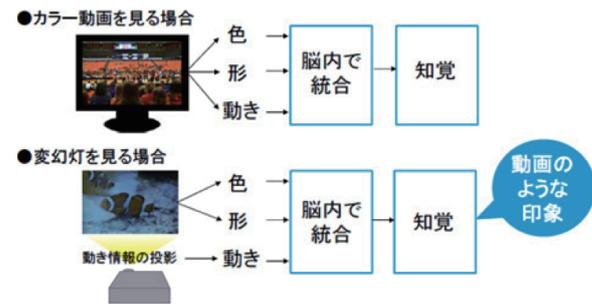


図 2 変幻灯の仕組み.

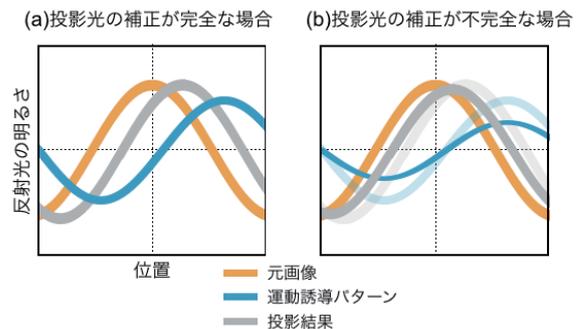


図 3 運動誘導パターンのコントラストと移動量の関係. (a) 投影光の補正が完全な場合、投影対象を物理的に正しくシフトさせることができる。(b) 投影光の補正が不完全で運動誘導パターンのコントラストが必要量に満たない場合、移動量は減少するが運動方向は影響を受けない。

どで動画をご確認いただきたい。

3.2 変幻灯が利用する視覚特性

人間の視覚系は、色や形・動き (運動) の情報などがそれぞれ独立に分析され、後で統合されることで外界を理解している [12]。変幻灯はこの視覚系の性質を利用し、運動情報だけを独立にプロジェクタから与える。これにより、投影対象の色や形といった元の見た目を一切変えることなく、リアルな動きの印象を生むことが可能となっている (図 2)。

変幻灯が用いる運動誘導パターンは、視覚系の低次の運動検出メカニズムを刺激することを目標としている。低次の運動検出メカニズムは、輝度信号中の局所的な時空間的な傾き (運動エネルギー) を検出し [1], [13], 比較的低い空間周波数帯に高い感度を持つ。一方、色味で定義された運動や高空間周波数の刺激にはあまり応答しない。したがって、運動誘導パターンはグレースケールで出力することで必要十分な効果を発揮する。また、プロジェクタの解像度が投影対象のパターンよりも十分低くても、運動印象を与えるのに不足することはない。

運動誘導パターンのコントラストが物理的に正しい位置シフトを再現できる量に満たない場合、投影によって生じる位置シフトの量は I_D におけるシフト量よりも小さくなる (図 3)。この場合でも、運動方向、つまり運動エネルギー

ギーの空間分布パターンは変わらない。 I_D におけるシフト量が周期の半分を超える高空間周波数成分についてはこの限りではないが、運動検出メカニズムは元々そうした成分にあまり応答しないため影響は少ない。よって、コントラストの低下は知覚される変形サイズを減らすだけで、与える動きの質的な印象には大きく影響しない。

また変幻灯では、運動誘導パターンは色情報を含んでおらず、また多くの場合その空間解像度も投影対象と比べると粗い。にもかかわらず、投影対象がその色や解像度を保ったまま、本当に動いているかのように知覚される。この効果は、視覚系が独立に処理して得られた運動・色・形などの情報を統合する過程で、それらの間の不整合が最も小さくなるような一貫した解を得ようとしてもたらされると考えられる。過去の視覚科学分野の研究でも、輝度運動が色で定義された刺激の見かけの位置や形を変化させる錯視 [8], [15] や、輝度定義の静止パターンの位置が低空間周波数の輝度運動パターンと一緒に動いて見える錯視 [14], [16] などが知られている。

3.3 変幻灯の制約

変幻灯は現実感の高い動きの印象を与えられる反面、動かせる範囲に対して大きな制約がある。運動誘導パターンで与える動きがあまりに大きいと、視覚系は投影対象物の持つ色や形の情報と運動情報との間の不整合を無視できなくなり、対象物の見た目と投影情報が分離された状態で知覚されてしまう。また、動かせる範囲の最大値は観察距離や環境光、投影対象が持つパターンの空間周波数、コントラストなどに大きく依存し、最適な効果をつけるために試行錯誤を要するという課題もある。

4. 変幻灯によるインタラクティブな実物体の動き編集

変幻灯は錯視を利用しているため、投影結果がどのような見た目になるかが予測しづらく、意図した動きを作成するまでに時間がかかってしまう。本章では、こうした問題を緩和するために開発したインタラクティブな動き編集アプリケーションを紹介する。本アプリケーションはカメラ-プロジェクタ系をベースとして設計されており、以下のような点を特色とする。

- (1) データベース中の参照画像と撮影画像との画像特徴量マッチングにより、自動的に投影対象を発見し、運動誘導パターンを対象の位置・姿勢に合わせて投影を行う。
- (2) 投影対象に投影された結果を見ながら、ユーザーがインタラクティブに動きの編集を行うことができる。

4.1 アプリケーションの概要

図4にアプリケーション全体の処理の流れを示す。処理

は大きく分けてオフライン部分とオンライン部分とに分かれており、以下でそれぞれの処理について詳述する。

4.1.1 オフライン処理

4.1.1.1 キャリブレーション

まずプロジェクタとカメラを投影対象の前に置いた状態で自動キャリブレーションを行う。ここでは、一般的な構造化光投影手法 [10] を用いてカメラ-プロジェクタ間の座標対応を求め、プロジェクタ視点画像からカメラ視点画像へのマッピング関数 (P2C マップ) を取得する。

4.1.1.2 投影対象画像の取得

自動キャリブレーションが終わったら、ユーザーは変幻灯投影開始ボタンをクリックする。クリックするとプロジェクタは G_1 と G_2 ($G_1 < G_2$) の異なる2種類の明るさ (画素値) の一様光を連続して投影し、その時の投影対象の様子がカメラで撮影される。なお撮影画像 (それぞれ I_{G_1} , I_{G_2} とする) はグレースケールで取得される。

4.1.1.3 画像特徴量マッチングと透視投影変換

投影対象はデータベース中の参照画像と撮影画像 I_{G_2} との間の画像特徴量マッチングに基づいて自動的に検出される。(新規の投影対象を扱う際は、あらかじめデータベースに対象の参照画像を登録しておく必要がある。) 十分な数の対応点が得られたら、参照画像から撮影画像への透視投影変換行列 T が推定される。推定時には RANSAC を用いて誤対応の排除が行われる。その後、対応点が得られた画像領域間の相関を取り、相関係数が一定以上 (例えば 0.5 以上) であれば、その対象を検出したものとみなす。

上述の処理により、検出された投影対象 i それぞれについて透視投影変換行列 T_i が得られる。投影対象画像 I_{G_1} , I_{G_2} は T_i^{-1} によって変換され、撮影画像を参照画像の姿勢に変換した画像 I'_{G_1} , I'_{G_2} を投影対象 i 毎に得る。以降の段落で述べる処理は、投影対象 i 毎に得られたこれらの画像それぞれに対して適用される。

4.1.1.4 投影対象のアルベド推定

投影対象のアルベドを画素毎に推定し、他の多くの研究と同様に投影画像の出力値補正に用いる [6], [20]。変幻灯では反射光の完全な補正は必要でないが、与えられた環境下で最大の錯視効果を得るため可能な範囲までは補正を行う。

プロジェクタの出力光が線形化されているとすると、アルベドが K である投影対象を撮影した再のカメラ画像 C は以下のようにモデル化できる。

$$C = K(FP + E) \quad (2)$$

ここで E は投影対象上で反射してカメラに入射する環境光 (プロジェクタの黒色投影光を含む) を表し、 F は白色面 ($K = 1$) 上への投影光の画素値を 1 上げた際の撮影画像の画素値の上がり幅を表す。

本アプリケーションでは、 K だけを個別に推定するので

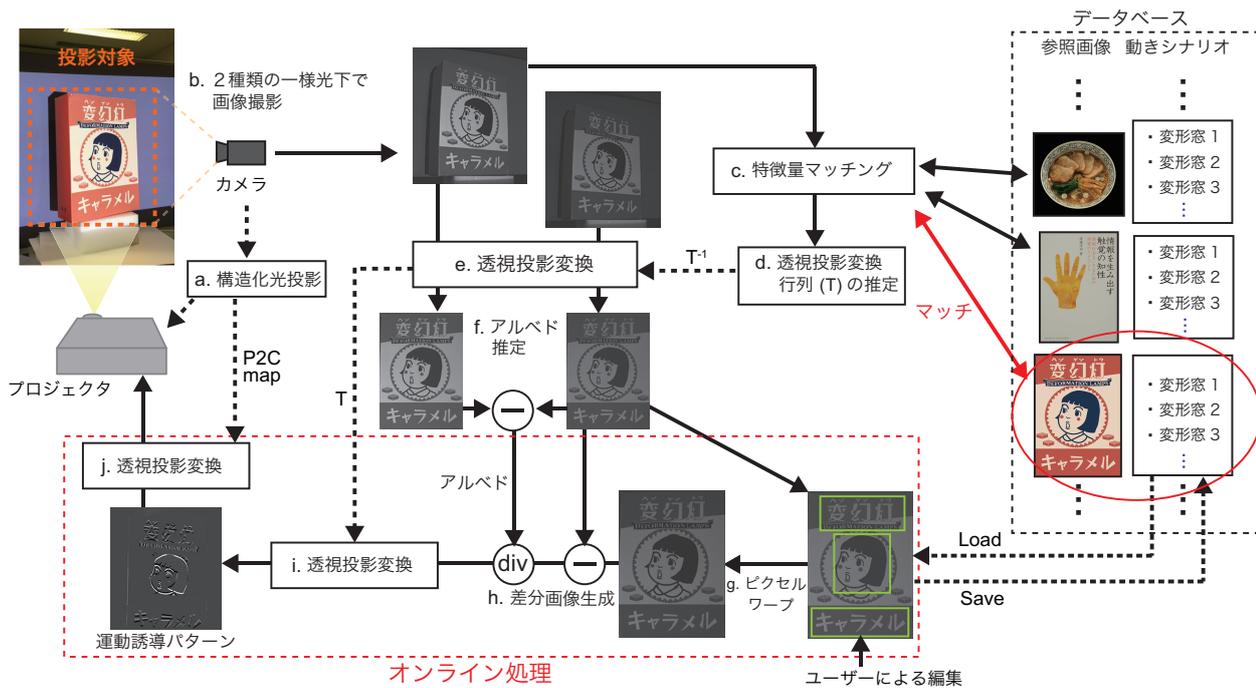


図4 アプリケーションの処理の流れ

はなく、 K と F の積をひとまとまりとして推定する。 KF を推定するため、まず (G_1, I'_{G_1}) と (G_2, I'_{G_2}) をそれぞれ式2に代入し、次の式を得る。

$$I'_{G_1} = K(FG_1 + E) \quad (3)$$

$$I'_{G_2} = K(FG_2 + E) \quad (4)$$

次に式4から式3を差し引くことで、 KF が以下のように得られる。

$$KF = \frac{I'_{G_2} - I'_{G_1}}{G_2 - G_1} \quad (5)$$

4.1.2 オンライン処理

オフライン処理が終わると、オンライン処理が開始される。オンライン処理は毎フレーム実行されるため、GPU上 (OpenGL および GLSL) に実装することでインタラクティブなフレームレートを確保している。

4.1.2.1 変形画像の生成

まず、投影対象画像 I'_{G_1} がデータベース中の動きシナリオ情報に基づいて変形される。動きシナリオ情報はデータベース中の参照画像と紐付けられた形で保存されている。以下、生成された変形画像を I'_D とする。画像変形の詳細は第4.2.1項で説明する。

4.1.2.2 差分画像の生成

投影の結果を I'_D とするための投影光 (運動誘導パターン) P は、 I'_D を式2の C に代入することで、次のように書ける。

$$P = \frac{I'_D - KE}{KF} \quad (6)$$

ここで式3から、 KE は

$$KE = I'_{G_1} - KFG_1 \quad (7)$$

と書けるため、これを式6に代入することで、運動誘導パターン P は次のように求めることができる。

$$P = \frac{I'_D - I'_{G_1}}{KF} + G_1 \quad (8)$$

ここで、 KF は式5で得られたものを用いる。

その後、運動誘導パターン P は透視投影変換行列 T によって元のカメラ視点画像に戻される。最後に、カメラ視点画像から構造化光投影で得られた P2C マップに基づいてプロジェクタ視点画像に変換され、投影対象に向けて投影される。

なお、ほとんどの場合 (環境光がほとんどなく、投影対象のコントラストが十分に小さいでない限り)、式8はプロジェクタのダイナミックレンジ外の値を含む。したがって実際に投影されるパターンは、ダイナミックレンジの上限および下限を超えた値を切り捨てたものになる。しかし第3.2章で述べた通り、そうした状況下でも視覚系が検出する運動エネルギーのパターンは大きく変化しないため、十分な効果を与えることができる。

4.2 動きの編集

本アプリケーションでは、ユーザーは実物体に投影された結果を見ながらインタラクティブに動きの編集を行うことができる。編集は以下の手順を繰り返すことで行える。

- (1) 投影対象上の動かしたい空間領域と、動かす時間範囲を選択する。
- (2) 予め用意されている基本変形パターンのうちから1つを選択する。

- (3) 変形パラメータを調節し、動きをチューニングする。
- (4) 変形時に鳴らす効果音を選択する (任意)。

4.2.1 基本変形パターン

複雑な動きをつける手間を減らすため、アプリケーション側でいくつかの基本変形パターンが用意されている。基本変形パターンは変幻灯と相性のよい振動運動になっており、次のような式で定義される。

□ 縦波型振動

$$\begin{cases} dx = \sin \theta \cdot A \cos \{f(x \cos \theta + y \sin \theta) + st + \phi\} \\ dy = \cos \theta \cdot A \cos \{f(x \cos \theta + y \sin \theta) + st + \phi\} \end{cases} \quad (9)$$

□ 横波型振動

$$\begin{cases} dx = \cos \theta \cdot A \cos \{f(x \cos \theta + y \sin \theta) + st + \phi\} \\ dy = \sin \theta \cdot A \cos \{f(x \cos \theta + y \sin \theta) + st + \phi\} \end{cases} \quad (10)$$

□ 回転方向への振動

$$\begin{cases} dx = (x - x_c) \cos \alpha - (y - y_c) \sin \alpha - (x - x_c) \\ dy = (x - x_c) \sin \alpha + (y - y_c) \cos \alpha - (y - y_c) \\ \alpha = A \cos \{f \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} + st + \phi\} \end{cases} \quad (11)$$

□ 放射方向への振動

$$\begin{cases} dx = \alpha \cos (\arctan \frac{y}{x}) \\ dy = \alpha \sin (\arctan \frac{y}{x}) \\ \alpha = A \cos \{f \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} + st + \phi\} \end{cases} \quad (12)$$

変形画像 I'_D は、投影対象の画像 I'_{G_1} の各座標 (x, y) の画素を (dx, dy) 分だけ移動することで生成される。なお、移動させたことで生じた欠損部分はバイリニア補間で埋められる。式中の t は現在の時刻を表し、式 11, 12 中の (x_c, y_c) は変形させる領域の中心座標を表す。 A, s, θ, f, ϕ はそれぞれ振幅、速度、角度、角周波数、位相を表し、これらを調節することで基本変形パターンのチューニングが行える。さらに、これらの基本変形パターンを重ね合わせることで、より複雑な動きを作り出すこともできる。また、基本変形パターンの種類を増やせば、動きの表現の幅は容易に拡張できる。ユーザーの編集結果は、基本変形パターンの種類や変形させる領域を表す座標値、変形パターンのパラメータとしてデータベースに保存される。このため、各コンテンツが占めるデータ容量は非常に小さく抑えられる。

4.2.2 ユーザーインターフェース

図 5 に本アプリケーションのユーザーインターフェース画面を示す。ユーザーインターフェースは PC モニタ上のウィンドウ内に表示される。画面の中央にはカメラで撮影された画像が表示される。青色の線で囲われた領域は、撮影画像中で投影対象として認識された部分を表す。

緑もしくは黄色で囲われた領域は、変形効果が適用される領域 (以下、変形窓と呼ぶ) を表す。(黄色は現在ユーザーが選択中であることを意味する。) ユーザーは変形窓の形や位置を決めた後、画面右のインターフェースから適用



図 5 PC モニタ上のユーザーインターフェース。

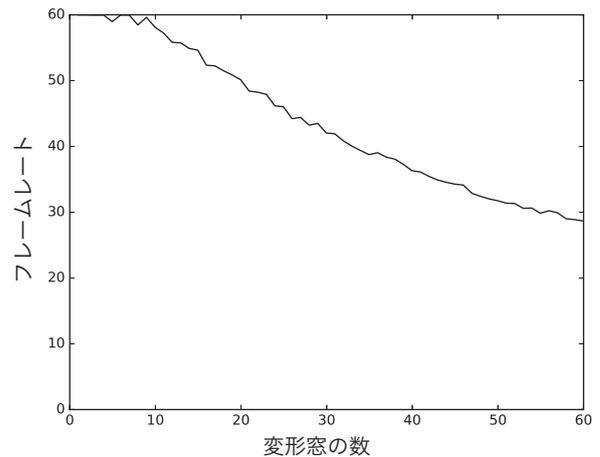


図 6 動作速度の検証結果。

する基本変形パターンの種類やパラメータを設定する。変形効果は変形窓内全体に適用されるが、実際に動いて見えるのはエッジやテクスチャがある部分だけである。このため、ユーザーは動かしたい部分をだまかに囲うように変形窓を設定すればよい。一方、変形窓の輪郭が投影対象上のエッジやテクスチャを跨った際には、突然動きが無くなることで不連続感が生じてしまうため、変形窓の輪郭付近では変形サイズが徐々に小さくなるような処理が加えられる。

画面上部の領域は、動きシナリオのシーケンスの時間軸を表す。白色の垂直なバーは全シーケンス中での現在のフレームの位置を示している。緑あるいは黄色の水平なバーは、各変形窓の変形が適用される時間範囲を表す。動きシナリオのシーケンスの長さや各変形窓が有効になる時間範囲などは、右側のインターフェース上で設定できる。メモリの許す限り、ユーザーは任意の数の変形窓を組み合わせ、好きな動きを作り込むことができる。

4.3 動作速度の検証

本アプリケーションは視覚的な動きの印象を提示する必要があるため、要求されるフレームレートは比較的高い水準となる。アプリケーションの動作速度を検証するため、MacBookPro(13 インチ, Intel Core i7, 3.1 GHz, 16GB

CPU memory, Intel Iris Graphics 6100) でフレームレートの測定を行った。測定時には、各変形窓が画面全体を覆うように設定した。カメラとプロジェクタの解像度はそれぞれ 1900 × 1200 と 1600 × 1200 ピクセルであった。また、データベースの参照画像の解像度は 600 × 400 ピクセルとした。

図 6 に、変形窓の数を変数としたときのフレームレートの計測結果を示す。図に示したように、フレームレートは変形窓が 10 個以下の際は概ね 60FPS を維持できており、50 個まで増やしても 30FPS を下回らなかった。多くの場合、同時に動かす変形窓の数は 10 個未満であると考えられるため、本アプリケーションの動作速度は十分水準を満たしていると言える。

5. まとめ

本研究報告では、変幻灯の仕組みとそれが利用している人間の視覚メカニズムについて解説した。また、変幻灯を利用したインタラクティブな動き編集アプリケーションの実装例の報告を行った。本アプリケーションにより、変幻灯用のコンテンツ作成のハードルが大きく引き下げられ、幅広い場面での利用が期待される。

今後は投影の結果どのような知覚が得られかをモデル化し、それに基づいて運動誘導パターンを自動的に最適化できるようにしていく。これによりさらに利便性が高まり、例えば動画から実物体への動きの転写などが容易に行えるようになると考えられる。

参考文献

- [1] Adelson, E. H. and Bergen, J. R.: Spatiotemporal energy models for the perception of motion., *Journal of the optical society of America A*, Vol. 2, pp. 284–299 (1985).
- [2] Amano, T.: Projection based real-time material appearance manipulation., *Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 918–923 (2013).
- [3] Bermano, A., Bruschweiler, P., Grundhöfer, A., Iwai, D., Bickel, B. and Gross, M.: Augmenting physical avatars using projector-based illumination., *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, pp. 189:1–189:10 (2013).
- [4] Bimber, O. and Iwai, D.: Superimposing Dynamic Range., *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27(5), pp. 150:1–150:8 (2008).
- [5] Bimber, O., Grundhöfer, A., Zeidler, T., Danch, D. and Kapakos, P.: Compensating Indirect Scattering for Immersive and Semi-Immersive Projection Displays, *IEEE Virtual Reality Conference, VR 2006, Alexandria, Virginia, USA, March 25–29, 2006*, pp. 151–158 (online), DOI: 10.1109/VR.2006.34 (2006).
- [6] Bimber, O., Iwai, D., Wetzstein, G. and Grundhöfer, A.: The Visual Computing of Projector-camera Systems, *ACM SIGGRAPH 2008 Classes, SIGGRAPH '08*, pp. 84:1–84:25 (2008).
- [7] Fujii, K., Grossberg, M. D. and Nayar, S. K.: A Projector-Camera System with Real-Time Photometric Adaptation for Dynamic Environments, *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 814–821 (2005).
- [8] Goda, N. and Ejima, Y.: Moving stimuli define the shape of stationary chromatic patterns., *Perception*, Vol. 26, No. 11, pp. 1413–1422 (1997).
- [9] Grossberg, M., Peri, H., Nayar, S. and Belhumeur, P.: Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance using a Projector-Camera System, *Proceedings of 2004 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 452–459 (2004).
- [10] Inokuchi, S., Sato, K. and Matsuda, F.: Range-imaging for 3-D object recognition, *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, pp. 806–808 (1984).
- [11] Kawabe, T., Fukiage, T., Sawayama, M. and Nishida, S.: Deformation Lamps: A Projection Technique to Make Static Objects Perceptually Dynamic, *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 13, No. 2, pp. 10:1–10:17 (online), DOI: 10.1145/2874358 (2016).
- [12] Livingstone, M. S. and Hubel, D. H.: Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth., *Journal of Neuroscience*, Vol. 7, pp. 3416–3468 (1987).
- [13] Nishida, S.: Advancement of motion psychophysics: Review 2001–2010., *Journal of Vision*, Vol. 11(5), pp. 1–53 (2011).
- [14] Nishida, S. and Johnston, A.: Influence of motion signals on the perceived position of spatial pattern., *Nature*, Vol. 397, pp. 610–612 (1999).
- [15] Ramachandran, V. S.: Interaction between colour and motion in human motion., *Nature*, Vol. 328, pp. 645–647 (1987).
- [16] Ramachandran, V. S. and Cavanagah, P.: Motion capture anisotropy., *Vision Research*, Vol. 27(1), pp. 97–106 (1987).
- [17] Raskar, R., Welch, G. and Low, K.-L.: Shader Lamps: Animating real objects with image-based illumination., *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pp. 89–102 (2001).
- [18] 向川康博, 柿沼孝行, 大田友一: 非平面へのパターン投影のための相互反射の補償, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 48, No. SIG1(CVIM17), pp. 98–106 (2007).
- [19] 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, Vol. 66, No. 9, pp. J303–J309 (オンライン), DOI: 10.3169/itej.66.J303 (2012).
- [20] 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見かけの制御 (光学的解析, 画質改善, <特集>画像の認識・理解論文), 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 94, No. 8, pp. 1368–1375 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008686487/>) (2011).