

高速プロジェクタによる投影コンテンツとの動的インタラクション

鏡 慎吾^{1,a)} 橋本 浩一¹

概要: 我々は、高フレームレートのプロジェクタ・カメラ間フィードバックによって、素早く動く対象に追従投影するプロジェクションマッピングシステムの開発を行っている。これまでは主として、対象物にぴったりと貼りついていくような映像提示を行うことでその有効性を示してきたが、エンタテインメント応用を考える際は、ユーザの動きに反応する動的なコンテンツの実現も重要となる。本稿では、その実装方法と効果について議論する。

Dynamic Interaction with Projected Contents by a High-Speed Projector

KAGAMI SHINGO^{1,a)} HASHIMOTO KOICHI¹

Abstract: This paper reports an implementation of high-speed projection mapping onto a moving surface in which the pose of the projected content in the surface coordinate frame is determined by physical simulation to enable user interaction through surface motions.

1. はじめに

実空間内の物体表面上にプロジェクタによる投影像を重畳するプロジェクションマッピング技術が注目を集めるようになって久しい。我々は、高フレームレートのプロジェクタ・カメラ間フィードバックによって、素早く動く対象に追従投影するプロジェクションマッピングシステムの開発を行っている [1]。

これまでは、主として基本技術の確立と検証を目的として、動く平面内の固定位置にコンテンツがぴったりと貼りついていくような映像提示を行うことが可能であることを示してきた。一方、例えばエンタテインメント応用などを考える際は、ユーザの動きに反応する動的なコンテンツの実現も重要となる。

例えば、慣性センサつきのタブレット端末やスマートフォンの上では、端末の傾きや動きに応じてコンテンツの物理的挙動を変化させることが広く行われている [2]。プ

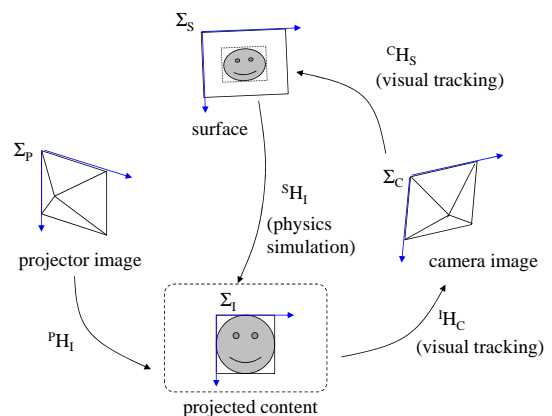


図 1 座標系の定義

Fig. 1 Definitions of coordinate systems

ロジェクションマッピングにこのような仕組みを持ち込むことができればその表現の可能性は大きく広がる。特に、高速フィードバックに基づく衝突・反発などを含む動的インタラクションの実現は、エンタテインメント応用への展開のための重要な要素となり得る。本稿では、そのようなインタラクションシステムの実装例について報告する。

¹ 東北大学
Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan
^{a)} swk(at)ic.is.tohoku.ac.jp

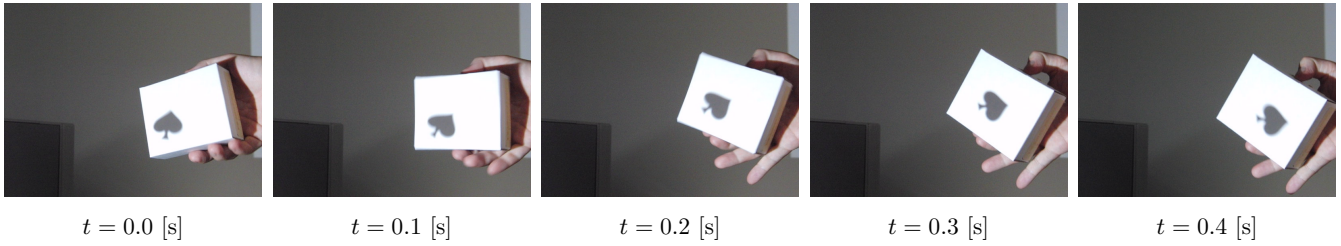


図 2 提案システムの動作例

Fig. 2 Snapshot sequence from experimental results.

2. 高速プロジェクションマッピングシステム

本節では、本稿で述べる手法の基盤となる高速プロジェクションマッピングシステム [1] について簡単に説明する。システムは、高速 USB 3.0 カメラ、投影画像のホモグラフィ変換機能を内蔵する高速 DLP プロジェクタおよび PC からなる。高速プロジェクタは、入力コンテンツ画像に対して毎秒 1300 回以上のホモグラフィ変換 (2 次元射影変換) を適用しながら投影する。PC からは 3×3 要素のホモグラフィ行列のみを高速に送信するだけで、空間内を任意に運動する平面への映像マッピングが可能である。コンテンツ映像の高速生成を PC が行う必要はない。

プロジェクタ・カメラ対の前で、投影対象面として四角形のスクリーンを動かす場合を考える。 $\Sigma_P, \Sigma_C, \Sigma_S, \Sigma_I$ をそれぞれプロジェクタ画像、カメラ画像、投影対象面、投影コンテンツ画像の上に定義された 2 次元座標系とする。座標系間の関係を図 1 に示す。ここで、任意の 2 座標系 Σ_A と Σ_B でそれぞれ表示された同次ベクトル ${}^A\mathbf{x}$ と ${}^B\mathbf{x}$ の間のホモグラフィ変換を ${}^B\mathbf{x} \simeq {}^B H_A {}^A\mathbf{x}$ と表す。ただし \simeq はスケール倍を除いて等しいことを表す。

このとき、時刻 $n+1$ に高速プロジェクタに送信するホモグラフィ行列は

$${}^P \tilde{H}_I(n+1) = {}^P H_I(n) {}^I H_C(n) {}^C H_S(n) {}^S H_I$$

として計算する。右辺の ${}^P H_I(n)$ と ${}^S H_I$ は既知であり、 ${}^I H_C(n)$ と ${}^C H_S(n)$ は画像追跡により取得できる。このように投影制御は、カメラやプロジェクタの内部・外部キャリブレーションに全く依存せずに実行することができる。なお実際には、撮影と投影の間に遅延があることを考慮して、 ${}^P \tilde{H}_I(n+1)$ を目標値とした PD 制御により送信するホモグラフィ行列を制御する。

3. 動的インタラクションの実現

ここで ${}^S H_I$ を時間とともに変化させることで、対象平面内でコンテンツを任意に運動させることができる。本稿では、コンテンツに形状や質量などを定義し、投影対象面の向きや動きに応じた重力や慣性力をコンテンツ座標系 Σ_I においてはたらかせることを考える。

これを正確に行うためには、対象平面の 3 次元空間内で

の運動を知る必要があり、そのためにはプロジェクタ・カメラ系のキャリブレーションが必要となる。一方、前述のプロジェクションマッピング手法はキャリブレーションが不要である点がメリットの一つであり、このメリットを保ったままの実装が可能であることが望ましい。

そのため、キャリブレーション情報を用いない簡易な実装を試みた。具体的には、カメラ画像座標系 Σ_C の下向きが重力方向であることを仮定し、これを ${}^I H_C$ によってコンテンツ座標系 Σ_I に投影する。同様に、 Σ_C 上での投影対象面の中心点の加速度を計算し、 Σ_I に投影して慣性力を定めることとした。

この方法によるコンテンツ制御の動作例を図 2 に示す。この実験では、Basler 社の USB 3.0 カメラ acA640-750um を 500 fps で動作させ投影画像を制御した。物理シミュレーションには Box2D を使い、コンテンツのバウンディングボックスと投影対象面の四辺との間で弾性衝突と摩擦を生じさせた。シミュレーションにかかる計算時間は画像処理時間と比べると無視できるほど小さい。図 2 は下側でコンテンツを叩き上げた瞬間を示している。コンテンツにはたらく重力と慣性力は、前述のように物理的には全く正確なものではないが、違和感のない動きを呈している。

4. おわりに

本稿では、物理シミュレーションを介して投影対象面の運動によって動的に制御されるプロジェクションマッピングを報告した。今後の課題として、より正確な物理計算を行った場合とのユーザ体験の比較や、タッチ操作を含む他のインタラクションの導入が挙げられる。

謝辞 本研究の一部は科研費 16H02853, 16H06536 および JST ACCEL JPMJAC1601 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Kagami, S. and Hashimoto, K.: "Sticky projection mapping: 450-fps tracking projection onto a moving planar surface," *SIGGRAPH Asia 2015, Emerging Technologies*, Article no. 23 (2015).
- [2] Sandholt, M.: "Sylvester's Band: A GPU-accelerated, interactive children's book for tablets and smartphones," *Adobe Developer Connection* (2011), <http://www.adobe.com/devnet/games/postmortems/articles/sylvesters-band.html> (as of 2017.7.28).