



VarioLight: 高速プロジェクタ及び光軸制御による 非対称な移動物体への投影型拡張現実感システム

三河祐梨¹⁾, 末石智大¹⁾, 渡辺義浩²⁾, 石川正俊¹⁾

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, Yuri_Mikawa@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京工業大学 工学院 情報処理系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, watanabe.y.cl@m.titech.ac.jp)

概要: 近年注目を集めるプロジェクションマッピングにおいて、動的対象への拡張は、運動範囲や解像度、投影可能な対象に課題があった。本稿では高速低遅延なプロジェクタと高速光軸制御系の連携によって、回転変形を伴い広範囲に動き回る対象へ、画角と解像度のトレードオフを解消した、ダイナミックプロジェクションマッピングの実現手法を提案する。複数のドットマーカの高速トラッキングに基づき、両装置の独立動作の場合より高い追従投影性能を実現し、本手法の有効性を実験的に示した。

キーワード: 投影型拡張現実感, 高速プロジェクタ, 高速トラッキング, ガルバノミラー

1. はじめに

近年、拡張現実 (Augmented Reality) に向けた研究が活発であり、その技術の一つにプロジェクションマッピングがある。ユーザーの装着を要さない、一度に観覧できる人数に制限がないといった特徴は、他にはないプロジェクションマッピングならではのものであり、これの拡充に向けた様々な研究や実用がある。

近年は、投影対象を動的物体に拡張しようとする動きが盛んであり、ダイナミックプロジェクションマッピング (Dynamic Projection Mapping; DPM) に関する様々な研究がある。例として、これまでに、顔面や体、紙、衣服、ボールといった動的対象へのプロジェクションマッピングが実現されてきた [1]。投影対象を動的物体に拡張しようとする動きの高まりに伴い、画像処理を含む情報処理技術・コンピューティングの進展の他、高速プロジェクタ [2] や高速ミラー制御技術 [3] 等が登場した。それらの技術による研究例として、動的球体への高精度・広範囲なトラッキング技術 [4][5] や、衣服や紙等の変形体へのトラッキング・マッピング技術 [6] がある。動体・変形体にも適用できる等、プロジェクションマッピングの自由度が上がることによって、従来では考えられないレベルでのエンターテインメントの拡充が期待できるという利点は大きい。他方で、前者は広範囲の投影が難しい、後者は非剛体対象には適用できないという問題があり、解決には至っていない。

本研究では、上に述べた 2 つの動的対象へのトラッキング技術を組み合わせることで、双方の弱点を打ち消し合い、多種多様な場面で可能な真に動的なプロジェクションマッピングの実現を目指す。

2. 先行研究

2.1 DynaFlash

1000[fps] の速度、最小 3[ms] 遅延で 8-bit 画像を投影可能な高速プロジェクタ: DynaFlash [2] を用いて、様々な変形体への投影技術の研究が為されてきた。成田ら [7] は、紙や衣服などの非剛体曲面に赤外インクから成る小さなマーカを複数付与し、赤外光を照射しながら対象の変形をトラッキングする手法を実現した。赤外インクは可視性が低く、マーカレスにはほぼ近いと言えるプロジェクションマッピングを可能としている。また近年、新型の高速プロジェクタ: DynaFlash v2 (3-LED+1-DMD) が研究開発され、難しいとされていたカラー映像の高速投影が 947[fps] の速さで実現された [6]。一方で、広範囲に対応するため固定広角レンズを利用しており、動的対象への投影解像度が相対的に低くなるという課題を有する。

2.2 るみべん: 動的球体へのプロジェクションマッピング

2軸のガルバノミラーと瞳転送系と呼ばれるレンズ群から成り、内部にハーフミラーを設けることで、カメラによる撮像軸とプロジェクタからの投影軸を同軸とするサッカーボールシステムのシステム [3] を採用している。ガルバノミラーはおよそ $\pm 30[\text{deg}]$ の光軸変更まで対応し、Pan/Tilt それぞれわずか 3.5[ms] で $\pm 20[\text{deg}]$ の光軸変更が可能である。このミラーを高速ビジョンにより 1,000[fps] で制御することで、対象への高速なトラッキングとプロジェクションマッピングを同時に可能としている。るみべんでは更に、球体を対象とし、背景に再帰性反射材を貼る手法を採用しており、これによりマーカレスなプロジェクションマッピングを実現している。一方で、汎用のプロジェクタ (例として、60[fps]、遅延 60[ms] 以上) を使用しているため、映像更新が対象の姿勢変化や変形などの動きに追いつかず、回転対称な球体に限定されるという問題を持つ。

Yuri MIKAWA, Tomohiro SUEISHI, Yoshihiro WATANABE, and Masatoshi ISHIKAWA

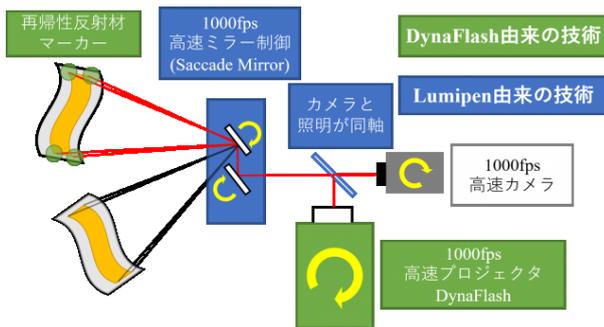


図 1: VarioLight のシステムの模式図。

3. 本研究の提案システム：VarioLight

本稿では、DynaFlash とるみぺんを組み合わせ、双方の欠点を解消するシステム：VarioLight を提案する。VarioLight システムの最大の特徴は、2つの既存手法がそれぞれ持つ利点のみを残し、欠点は組み合わせることで互いに打ち消すことが可能である点である。提案システムの模式図を図 1 に、実際の様子を図 2 に示す。

3.1 システム詳解

るみぺんが採用したサッカドミラーの投影・撮像の同軸制御をベースとし、従来用いていた市販のプロジェクタを DynaFlash[2] に変更する。また、投影対象は回転変形体とし、DynaFlash のシステム [7] の手法を参考に、小さな再帰性反射材マーカーを変形対象に付与する。

このシステム構成により、以下に示すように、前述の互いの欠点の打ち消し合いが可能となる。

DynaFlash の場合

高速ビジョンでの赤外マーカーの検出のため広範囲に赤外光を焚く必要があり、場所は室内に限定される上、エネルギー効率が悪いといった欠点を持つ。しかしこれは、るみぺんの光軸・撮像軸の同軸制御により、付与するマーカーを赤外マーカーから再帰性反射材マーカーとし、対象を含んで狭い範囲に照射することで解消され、屋外利用も可能となる。またプロジェクタ 1 台で広範囲の動きに対応するように投影するため、投影像の解像度が下がり鮮明でなくなるとい



図 2: VarioLight のシステムの様子。

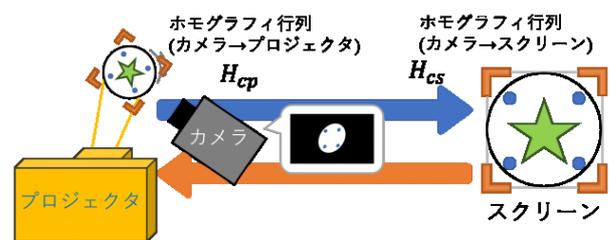


図 3: 複数マーカー認識アルゴリズムの模式図。カメラによる取得画像からマーカー位置を計算し、ホモグラフィ行列を利用して変形に対応した投影を行う。

う問題がある。これに対しては、るみぺんの高速光軸制御により常に対象の中心にミラーを向けることで、常に高解像なトラッキングが可能となる。

るみぺんの場合

低速高遅延の汎用プロジェクタを利用するため、対象の回転変形に対応できないという問題を持つ。この問題は、高速低遅延のプロジェクタを利用し、DynaFlash のシステムで実現されていた回転変形のトラッキングが行われることで解決される。

3.2 高速トラッキング処理

トラッキング対象を画像認識（マーカー認識の詳細は後述）し、ミラー制御（対象中心を画像中心に PID 制御を用いて一致させる）と投影像制御（後述のドットマーカー・ホモグラフィ行列を用いる）を並列で行う。この一連の処理を 1[ms] 毎に行うことで高速トラッキングを実現する。すなわち、高速ミラー制御によって運動対象に光軸を向け続けることで高解像度性を維持し、高速投影像制御によって非対称物体の見掛けの回転・変形に合わせたプロジェクションマッピングを実現する。

3.3 複数マーカー認識アルゴリズム

カメラと照明が同軸でミラー制御が可能である本システムでは、対象に貼り付けた 4 つの再帰性反射材マーカーと、ホモグラフィ行列を用いた座標変換により高速トラッキングを実現する。本節では、そこで行われる複数マーカーの認識アルゴリズムについて説明する。認識の流れを図 3 に示す。

1. カメラと照明が同軸であることより、対象表面の再帰性反射材マーカーだけが白く光り、他領域は暗色の画像を得る。
2. 取得画像に対し二値化、輪郭抽出の順に処理を行い、各マーカーの座標を取得する。尚、前フレームの計算結果がある場合、計算区間を前フレームのマーカー推定位置の付近に限定することで高速化を図る。
3. 対象の中心位置を、4 つのマーカー座標の平均を取ることで算出する。この座標はミラー制御に使われる。
4. 事前に計算したカメラからプロジェクタ座標系へのホモグラフィ行列 H_{cp} と、4 マーカー座標を利用してフレーム毎に計算するスクリーン座標系へのホモグラ

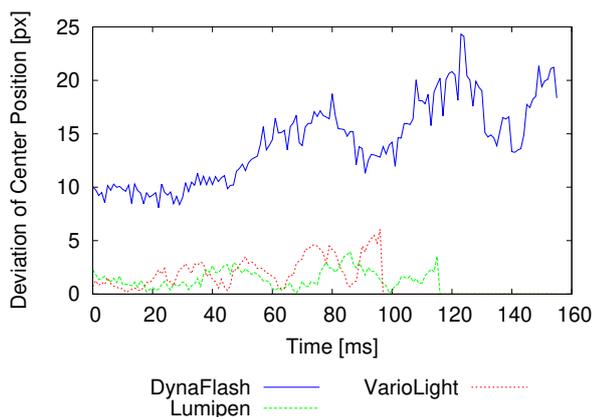


図 4: 中心位置の投影ずれの時間変移を示すグラフ。提案システムの VarioLight とるみべんはほぼ同じずれ値を示す一方で, DynaFlash は投影ずれが大きいことがわかる。

フィ行列 H_{cs} を用い, 対象の回転変形に対応したテクスチャを生成し, 投影する。

4. 評価実験

本節では, 提案システムの投影像の追従精度を先行研究(るみべん [4]・DynaFlash[2])と比較しつつ定量評価を行う。

4.1 実験装置

評価実験には図 1 の装置を用いた。高速カメラには Photron IDP Express R2000 (1,000[fps], 512×512 画素, モノクロ), カメラレンズは FUJINON HF50HA-1B (焦点距離 50[mm]), ガルバノミラーには Novanta M2 (光学走査角±30[deg]), 高速プロジェクタには東京エレクトロニクス DynaFlash (1,000[fps], 最小遅延 3[ms], 1024×767 画素, モノクロ) を用いた。投影結果の評価には高速カメラ Photron Fastcam SA-X2 (最高 13,500[fps], 1,024×1,000 画素) を 1,000[fps] で用いた。

4.2 実験手法

対象は, 4 隅に再帰性反射材マーカーを貼り付けたヨーヨーとした。提案システムのガルバノミラーの真正面に, ヨーヨーが垂直に滑り落ちるように背景となる黒色壁を設置し, 対象の運動の様子を真正面から撮像できる位置に 1,000[fps] の高速カメラを配置した。

図 6 の上段で示すように, ヨーヨーの表面への投影像は, 3.3 で示す方法で認識した 4 つのマーカーの位置を, 4 点の中心を基準として縮小して黒色ドットを描画したものとした。投影はヨーヨーが滑り落ちる間に連続的に行い, その様子を 1,000[fps] カメラにより撮像する。得られた動画を以下の方法で解析し, 実際のマーカーと描画したドットの投影ずれを数値化する。

各フレームにつき画像処理によりマーカー・投影ドットの座標を算出し, ラベリングを行った。各フレームでのヨーヨーの中心座標のずれは, 中心座標の真値 (4 マーカーの平均座標) と推定値 (4 ドットの平均座標) のユークリッド距離とした。角度のずれは, マーカー・ドットの対応点における, それぞれの中心座標を極とした角度の差分の絶対値

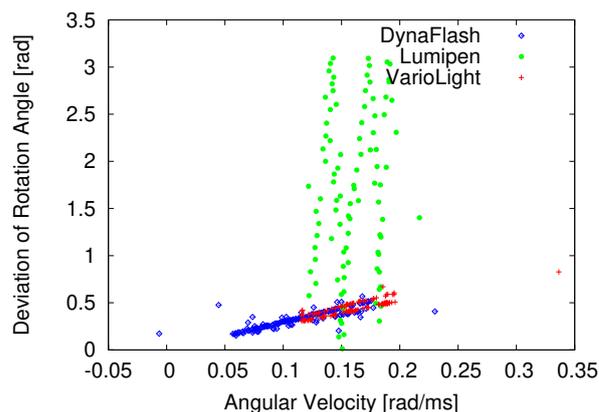


図 5: ヨーヨーの角速度毎の投影時の角度ずれの値を示すグラフ。高速プロジェクタを用いる DynaFlash と提案システムの VarioLight は小さい値を示す一方で, 市販プロジェクタを用いるるみべんは投影ずれが非常に大きい。

(最大 π [rad]) とした。

比較システムは, VarioLight のシステムを一部改変することで仮想的に実現した。DynaFlash はミラー制御をオフとする, るみべんは 50[ms] 遅延して 20[fps] で更新する仕組みとした。

4.3 検証結果

システム毎の中心座標のずれの時間遷移グラフを図 4 に, 角速度毎の角度ずれのグラフを図 5 に示す。各システムについての撮画像と, 画像処理とラベリングを行った結果画像の一例を, 図 6 に示す。

図 4 により, 提案システムの VarioLight と既存手法のるみべんは, DynaFlash と比較して中心位置のずれは小さく, 高い投影追従精度を示した。これは高速低遅延プロジェクタの最小遅延 3[ms] よりも, ガルバノミラーの方が低遅延な応答を発揮するためだと考えられ, 高速光軸制御の優位

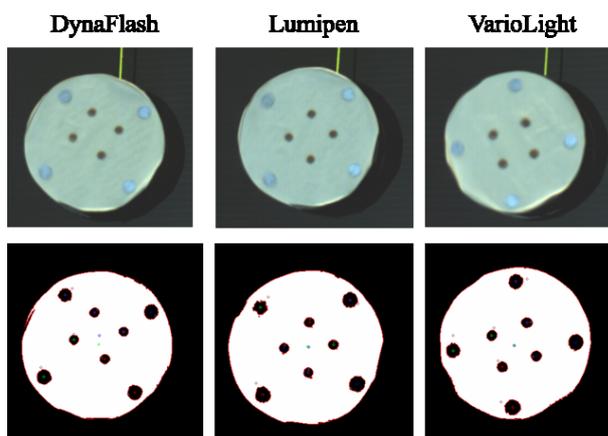


図 6: 各システムについて, 4 マーカーの推定位置を黒ドットとして縮小して投影した様子(上段)と, 画像処理によりラベリングを行った様子(下段)。DynaFlash は並進運動, るみべんは回転運動時の投影課題がある一方で, VarioLight は双方の問題を解決することが分かる。

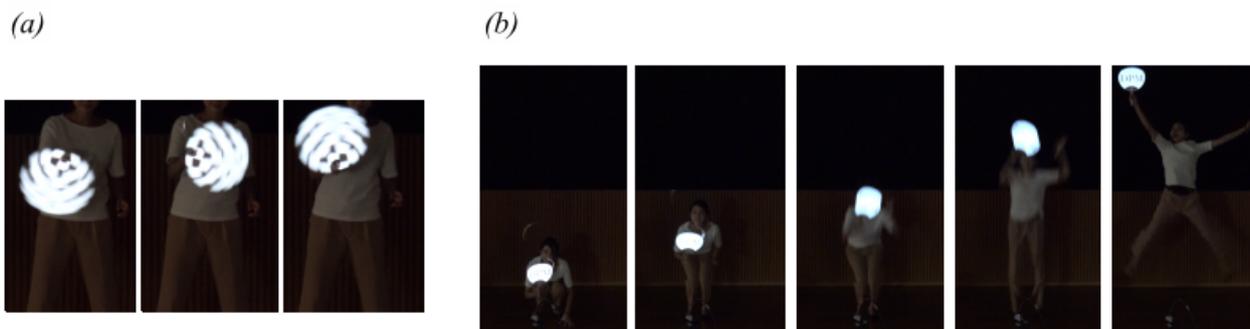


図 7: VarioLight のシステムによるデモ。(a) 高速に回転する円盤に対し、パターンが高い追従精度で投影できている。(b) ジャンプする演者が持つうちわに「DPM」の文字が貼りつくように投影され、ダイナミックな動きへの対応が示される。

性を示した。

図 5 により、提案システムの VarioLight と既存手法の DynaFlash は、高速プロジェクタにより対象の変形情報の高速フィードバックが可能のため、角度ずれは、角速度に比例して増加するものの、最大 $0.7[\text{rad}]$ 未満の推定誤差を達成している。一方でるみべんは汎用プロジェクタを使用し、変形情報のフィードバックの遅延により角度ずれが大きい。したがって高速低遅延プロジェクタの優位性を示した。

図 4, 5 の結果を統合すると、提案システム VarioLight は高速ミラーと高速低遅延プロジェクタの優位性を有し、非対称な移動物体に対し非常に高い投影追従精度を実現可能であることが示された。

5. デモ

VarioLight のシステムを使用したデモの様子を図 7 に示す。デモ中の動作は装置から前方 $5[\text{m}]$ 先で行われている。(a) 円盤の高速回転や (b) ジャンプといった、回転・並進共にダイナミックな動きにも、広範囲に追従してプロジェクションマッピングが可能であることが分かる。

6. 結論

本稿では、高速低遅延プロジェクタ [2][7] と高速光軸制御系 [3][4] を組み合わせたシステム：VarioLight を提案・実現した。高速ミラーによる動的対象への光学的追従により継続的な高解像度性を実現しつつ、高速投影像制御により非対称移動物体の見掛け上の回転・変形に合わせた、遅延による投影像の位置ずれが非常に小さなプロジェクションマッピングを実現した。また、高速光軸制御・高速投影像制御を同時に実現する、再帰性反射材ドットマーカー及びホモグラフィ行列による高速トラッキングも実現した。評価実験により、DynaFlash は並進運動の、るみべんは回転運動の精度が低い一方で、VarioLight は共に高精度であることが実験的に示された。

今後の展望としては、ドットマーカーの一部遮蔽や前後反転するような対象回転への対応、対象の柔軟体への拡張、さらなるアプリケーションの拡充が挙げられる。

参考文献

- [1] A. Grundhöfer and D. Iwai. Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and applications. *Computer Graphics Forum*, Vol. Vol. 37, No. Issue. 2, pp. 653–675, 5 2018.
- [2] Yoshihiro Watanabe, Gaku Narita, Sho Tatsuno, Takeshi Yuasa, Kiwamu Sumino, and Masatoshi Ishikawa. High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay. In *Proc. The International Display Workshops*, pp. 1064–1065, 2015.
- [3] Kohei Okumura, Keiko Yokoyama, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa. 1 ms auto pan-tilt-video shooting technology for objects in motion based on saccade mirror with background subtraction. *Advanced Robotics*, Vol. 29, No. 7, pp. 457–468, 2015.
- [4] Tomohiro Sueishi, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa. Lumipen 2: Dynamic projection mapping with mirror-based robust high-speed tracking against illumination changes. *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 25, No. 4, pp. 299–321, 2017.
- [5] 三河祐梨, 末石智大, 石川正俊. 動的プロジェクションマッピングに向けた輪郭情報に基づく高速球体トラッキング. 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会/論文集, 1E4-03, 2017.
- [6] 遠藤宣明, 天野光, 渡辺義浩, 石川正俊. ダイナミックプロジェクションマッピングのための複数台カメラを用いた高速非剛体 3 次元トラッキング. 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU2017-122) / 信学技報, pp. vol.117, no.391, pp.87–92, 2018.
- [7] Gaku Narita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Dynamic projection mapping onto deforming non-rigid surface using deformable dot cluster marker. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1235–1248, 2017.