



深度情報に基づくダイナミックプロジェクションマッピングへの 高速 RGB+IR プロジェクタの導入に関する検証

浦川雄気¹⁾, 渡辺義浩¹⁾

Yuki URAKAWA, Yoshihiro WATANABE

1) 東京工業大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-31, urakawa.y.ab@m.titech.ac.jp)

概要: 高速な IR カメラ, IR プロジェクタを用いて深度情報を取得し, RGB プロジェクタで映像投影するダイナミックプロジェクションマッピングが実現された. しかし, IR カメラ, IR プロジェクタ, RGB プロジェクタの3つのデバイス導入によるシステムの大規模化や, IR と RGB のプロジェクタの投影方向や範囲が異なる点が問題であった. そこで, IR と RGB のプロジェクタを同軸化した高速 RGB+IR プロジェクタを導入し, システムのコンパクト化や投影条件の一致による品質の向上について検証した.

キーワード: 高速プロジェクタ, ダイナミックプロジェクションマッピング, 深度計測

1. はじめに

近年, 拡張現実の研究が盛んであり, エンターテインメントをはじめとする様々な分野で応用されている. なかでも, プロジェクションマッピングは, ユーザーがデバイスを装着することなく複数人で同時に体験できる拡張現実技術として注目されている. 特に, 建物のような静止した物体だけでなく, 人間のような動く物体も対象とするプロジェクションマッピングはダイナミックプロジェクションマッピングと呼ばれる. ダイナミックプロジェクションマッピングは, 物体の運動から映像投影までの遅延をユーザーが知覚しないために高速で実行する必要がある.

ダイナミックプロジェクションマッピングに必要な高速性を達成するために, 従来研究では手法にいくつかの制限を設けていた. そこで本稿では, 対象にマーカを設置する必要がない, すなわちマーカの制限がないマーカレスのダイナミックプロジェクションマッピングに注目する.

例えば, Miyashita らはシーンの法線を高速に取得することで, マーカレスでモデルレスのダイナミックプロジェクションマッピングを実現した [1]. ここでのモデルレスとは, 形状がわからない物体を対象とするものを指す. しかし, 同手法では完全なトラッキングは行っていないため, テクスチャマッピングの手法が tileable texture に限られ, 表現の幅が狭まる問題があった.

また, Siegl らは ICP アルゴリズムに基づいたトラッキングにより, マーカレスでモデルベースのダイナミックプロジェクションマッピングを実現した [2]. ここでのモデルベースとは, 形状を事前に把握している物体を対象とするものを指す. しかし, ICP アルゴリズムは低速であるため, 同手法での物体の運動は低速である必要があった.

さらに, Hisaichi らはマーカレスでモデルレス・モデルベースを両立するダイナミックプロジェクションマッピング

を実現した [3]. 同手法では, 高速な IR (Infrared) カメラ, IR プロジェクタからなるシステム下で, 位相シフト法を用いて高速に高解像度な深度情報を取得する. つづけて, フレーム間の微小運動に基づく高速なモデルベーストラッキングを行う. 最後に, 深度情報 (モデルレス) とトラッキング結果 (モデルベース) を組み合わせることでダイナミックプロジェクションマッピングを実現するものである. しかし, 同手法では, IR カメラ, IR プロジェクタ, RGB (Red, Green, and Blue) プロジェクタの3つのデバイスが必要なため, システムが大規模化する問題があった. また, IR プロジェクタと RGB プロジェクタの投影方向, 位置, 焦点距離 (まとめて投影条件とする) が異なることにより, ダイナミックプロジェクションマッピングが可能となる範囲が小さくなる問題もあった.

そこで本稿では, IR と RGB のプロジェクタを同軸化した高速 RGB+IR プロジェクタを, モデルレス・モデルベースを両立した Hisaichi らの手法に新たに導入することを提案する. システム構成は変わるが, 同じ処理でダイナミックプロジェクションマッピングを実現できる. さらに高速 RGB+IR プロジェクタの導入により, デバイス数が減少し, システムが単純化・小型化 (まとめてコンパクト化とする) するとともに, 2つのプロジェクタの投影条件を一致させることができる. 実験では, 従来システムと比較して, 性能向上を検証した.

2. 高速 RGB+IR プロジェクタを導入したダイナミックプロジェクションマッピング

2.1 システム構成

Hisaichi らのシステム [3] では, 高速な IR カメラ, IR プロジェクタで深度情報を取得し, 高速な RGB プロジェクタで映像を投影する. そこで本稿では, IR プロジェクタと RGB プロジェクタを同軸化した高速 RGB+IR プロジェク

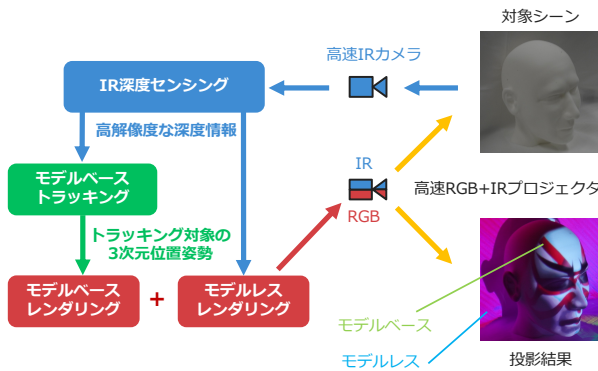


図 1: システム処理の流れ

タ [4] を導入した, 図 1 に示すシステム構成を提案する. これによりシステムのコンパクト化が達成される. 投影条件の一致がもたらす利点については次節で詳述する.

2.2 投影条件の改善

本システムでは, IR カメラによる撮像, IR プロジェクタによる投影のうち, いずれかの範囲外の場合は深度情報を取得できない. また, RGB プロジェクタの投影範囲外の場合はマッピング映像を投影できない. 一方, 図 1 に示すように, 投影映像はモデルレス部分とモデルベース部分によって構成されている. そこで, モデルレス・モデルベース部分それぞれについて, 2つのプロジェクタの同軸化の影響を考える.

まず, モデルレス部分については, IR カメラによる撮像, IR プロジェクタ, RGB プロジェクタによる投影のうち, いずれかが不可能な被マッピング部分は映像投影できない. したがって, 図 2 に示すように, 2つのプロジェクタの同軸化により映像投影可能範囲が大きくなる. また, 図 3 に示すように, 前景と背景の2つの対象があった場合, 同軸化により影を3つから2つに減らすことができる.

次に, モデルベース部分については, IR カメラによる撮像, IR プロジェクタによる投影がどちらも可能な被マッピング部分の深度情報を元にトラッキングを行う. また, RGB プロジェクタによる投影が不可能な被マッピング部分は映像投影できない. モデルの一部が深度情報を取得できない範囲にあるとしても, 他の部分の深度情報でトラッキングでき, RGB プロジェクタが投影可能な範囲にあれば, 映像投影可能である. したがって, 図 4 に示すように, 2つのプロジェクタの同軸化により映像投影可能範囲が大きくなる.

以上のように, IR カメラの撮像範囲, IR プロジェクタ, RGB プロジェクタの投影範囲が重なっていることは重要である. 本システムでは, IR プロジェクタと RGB プロジェクタを同軸化することで2つのプロジェクタの投影条件が一致し, 投影範囲が常に重なるので, モデルレス・モデルベース部分のどちらにおいてもダイナミックプロジェクションマッピングが可能となる範囲を大きくすることができる.

また, 2つのプロジェクタを同軸化することでシステム構成がコンパクトになる. 従来システムでは, 必要なデバイスの数は3つであったが, RGB+IR プロジェクタの導入に

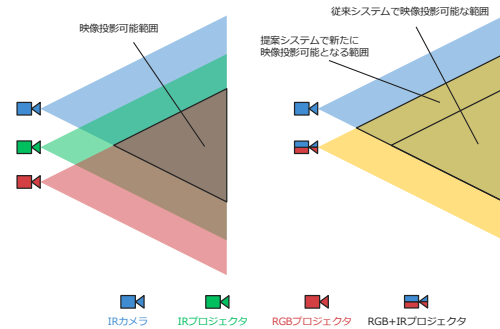


図 2: モデルレス部分に対する映像投影可能範囲. 左が従来システム, 右が提案システム. 提案システムの RGB+IR プロジェクタは従来システムの IR プロジェクタの位置に配置している.

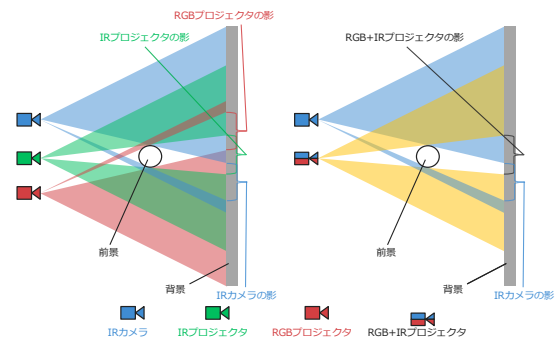


図 3: モデルレス部分に対する影. 左が従来システム, 右が提案システム. 提案システムの RGB+IR プロジェクタは従来システムの IR プロジェクタの位置に配置している. IR カメラの撮像, IR プロジェクタ, RGB プロジェクタ, RGB+IR プロジェクタの投影による前景の影がプロジェクションマッピングの影となる.

より, 必要なデバイスの数は2つになる.

2.3 手法の流れ

RGB+IR プロジェクタの導入により本システムの構成は従来 [3] と異なるが, 同じ処理でダイナミックプロジェクションマッピングを実現できる. 以下に手法を簡潔に示す.

まず, 高速な IR カメラ, IR プロジェクタを用いて, 高速に高解像度な深度情報を取得する. 具体的には, 正弦波パターンとグレイコードパターンを投影して位相を求め, 三角測量で3次元情報を取得する位相シフト法で深度情報を求める.

次に, 求めた深度情報を元に, フレーム間の微小運動に基づく高速なモデルベーストラッキングを行う. ICP アルゴリズムでは3次元空間における対応点探索と収束までの反復処理に時間を要していた. そこで, 本手法ではセンシングによって得られた深度情報を利用して対応点探索を行

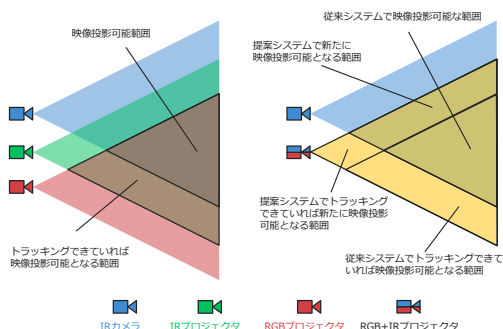


図 4: モデルベース部分に対する映像投影可能範囲。左が従来システム, 右が提案システム。提案システムの RGB+IR プロジェクタは従来システムの IR プロジェクタの位置に配置している。

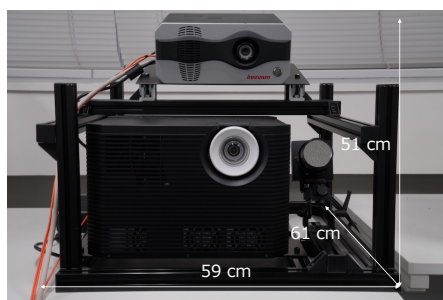


図 5: 従来システム

い, さらに高いフレームレート下でフレーム間差分が小さいことを生かし反復処理を行わないことで高速なトラッキングを実現する。

最後に, 深度情報を元にモデルレスにシェーディングを行なった画像と, トラッキングによって位置姿勢情報を取得したモデルにテクスチャマッピングを行なった画像を組み合わせることでモデルレス・モデルベースを両立したダイナミックプロジェクションマッピングを実現する。

3. 実験

3.1 実験システム

実験では, 図 5 に示す従来システムと, 図 6 に示す提案システムを用いた。従来システムは高速 IR カメラ, 高速 IR プロジェクタ, 高速 RGB プロジェクタ [5] で構成し, 提案システムは高速 IR カメラ, 高速 RGB+IR プロジェクタ [4] で構成した。従来・提案システムともに, CPU は Intel Xeon Gold 6256, GPU は NVIDIA GeForce RTX 3090 を用いた。カメラの解像度は 1280×864 pixels, プロジェクタの解像度は全てにおいて 1024×768 pixels であった。

3.2 システムのコンパクト化

従来システムは図 5 に示すように, 位置を調整する必要があるデバイスの数が 3 つであるため, 治具を使って立体的に設計する必要があったが, 提案システムは図 6 に示す

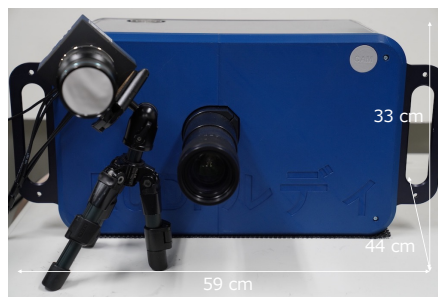


図 6: 提案システム

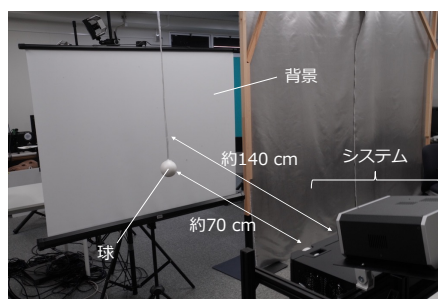


図 7: 影の実験の全体図

ように, 位置を調整する必要があるデバイスの数が 2 つであるため, デバイスを横に並べる程度に簡単に設計できた。必要なデバイス数の減少によるシステムの単純化を確認できた。

サイズについて, 従来システムは幅 59 cm, 奥行き 61 cm, 高さ 51 cm であったが, 提案システムは幅 59 cm, 奥行き 44 cm, 高さ 33 cm であった。提案システムを従来システムと比べると, 幅はほぼ同じだが, 奥行き・高さが小さくなっており, システムの小型化を確認できた。

3.3 投影条件の一致による品質向上

IR プロジェクタと RGB プロジェクタの同軸化によるダイナミックプロジェクションマッピングの品質向上の例として, 投影範囲の向上による影の数の減少が挙げられる。本稿では, 前景と背景の 2 つの対象があった場合の影の数について検証した。

図 7 に示すように, 前景として直径 8 cm の球体を用意し, システムから約 70 cm の位置に設置した。背景として白色のスクリーンを用意し, システムから約 140 cm の位置に設置した。これらに対して, 深度をカラー化するモデルレスマッピングを行なった際の影の数を検証した。

従来システムでは, 図 8 に示すように 3 つの影が確認できたが, 提案システムでは, 図 9 に示すように 2 つの影が確認できた。IR プロジェクタと RGB プロジェクタの同軸化により, ダイナミックプロジェクションマッピング可能範囲が大きくなっていることが確認できた。

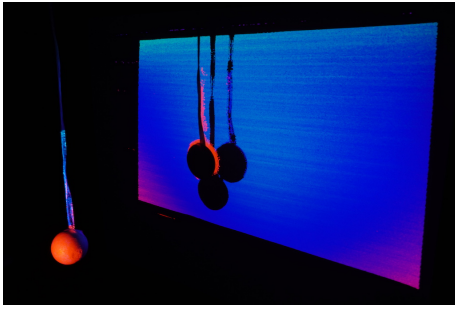


図 8: 従来システムによる投影

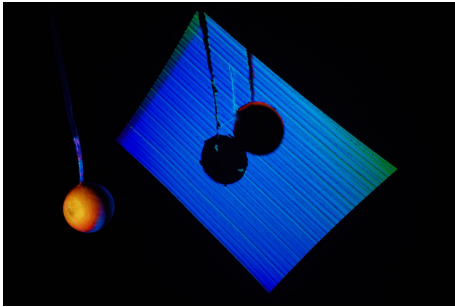


図 9: 提案システムによる投影

4. まとめ

本稿では, Hisaichi らのシステム [3] に IR プロジェクタと RGB プロジェクタを同軸化した高速 IR+RGB プロジェクタを導入することを提案した. 本手法により, システムのコンパクト化, 投影条件の一致によるダイナミックプロジェクションマッピング可能範囲の拡大を達成した.

参考文献

[1] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi

Ishikawa. MIDAS projection: Markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 37, No. 6, pp. 1–12, 2018.

- [2] Christian Siegl, Matteo Colaianni, Lucas Thies, Justus Thies, Michael Zollhöfer, Shahram Izadi, Marc Stamminger, and Frank Bauer. Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 6, pp. 1–11, 2015.
- [3] Sora Hisaichi, Kiwamu Sumino, Kunihiro Ueda, Hidenori Kasebe, Tohru Yamashita, Takeshi Yuasa, Uwe Lippmann, Petra Aswendt, Roland Höfling, and Yoshihiro Watanabe. Depth-aware dynamic projection mapping using high-speed RGB and IR projectors. In *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2021.
- [4] Roland Höfling Kiwamu Sumino Kunihiro Ueda Yoshihide Ono Hidenori Kasebe Tohru Yamashita Takeshi Yuasa Yoshihiro Watanabe Uwe Lippmann, Petra Aswendt. High-speed RGB+IR projector based on coaxial optical design with two digital mirror devices. In *International Display Workshops*, pp. 636–639, 2021.
- [5] Yoshihiro Watanabe and Masatoshi Ishikawa. High-Speed and High-Brightness Color Single-Chip DLP Projector Using High-Power LED-Based Light Sources. In *International Display Workshops*, pp. 1350–1352, 2019.