



目標形状に応じた投影面のオンライン変形と 立体視プロジェクションマッピングによる動的立体表現

Dynamic 3D Representation via Target-Based Online Deformation
of the Projection Surface and Stereoscopic Projection Mapping

中尾都史也¹⁾, 岩井大輔¹⁾
Toshiya NAKAO, Daisuke IWAI

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, nakao.toshiya.28l@ecs.osaka-u.ac.jp, daisuke.iwai.es@osaka-u.ac.jp)

概要: 我々はこれまで、複数台のリニアアクチュエータを用いて投影面を変形し、その上に立体視プロジェクションマッピングを行うことで奥行きのある大きな立体表現を忠実に知覚させる手法を提案してきたが、提示可能な立体表現は静的なものに限られていた。本研究では、時間的に変化する目標立体表現の形状に合わせて投影面の変形と立体視プロジェクションマッピングを行う手法を提案し、知覚に忠実な動的立体表現を目指す。提案手法の実装により動的立体表現の提示に成功し、被験者実験の結果、立体視プロジェクションマッピングに投影面の物理的な変形を伴うことで、目標とする動的立体表現の知覚的な再現度が向上することが示唆された。

キーワード: 立体表現, プロジェクションマッピング, オンライン変形面, 2-pass レンダリング

1. はじめに

プロジェクションマッピング (Projection Mapping: PM) は、実世界のオブジェクトに対してプロジェクタから仮想映像を重畳投影することで、現実空間と仮想空間をシームレスに融合させる技術である。その中でも特に、人間の奥行き知覚特性を考慮した映像を投影することで、あたかも投影対象の形状が変化したかのようにユーザに知覚させる手法を立体視プロジェクションマッピングという。立体視 PM は、投影対象を物理的に変形させなくとも視覚的に変形が可能という利点がある一方で、ユーザが知覚できる変形量には限界がある [1, 2]。これは、目標とする立体表現と投影対象の形状の差が大きい場合にユーザが知覚する視覚情報に矛盾が生じ、正しく立体表現を認識できないことに起因する [3]。したがって、所望の立体表現を提示するには、目標立体表現と投影対象の形状がなるべく近いことが望ましい。

著者らの先行研究 [4] では、この課題に対処するため、目標立体表現に合わせて投影対象面を物理的に変形させ、その上に立体視 PM を行う手法を提案した。この手法により、奥行きのある大きな立体表現を従来よりも忠実に知覚させることに成功したが、提示できる立体表現は静的なものにとどまっており、動的な立体表現は実現できなかった。

そこで本研究では、時間的に変化する目標立体表現の形状に応じて投影面の変形と立体視 PM を動的に行う手法を開発し、知覚に忠実な動的立体表現を目指す。本稿では動的な立体表現の実装と被験者実験による動的立体表現の評価結果について述べる。

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

前述のように、提案手法では、目標立体表現に合わせて投影面を動的に変形させ、その上に立体視 PM を行う。投影面には柔軟性のあるものを用い、複数台のリニアアクチュエータを二次元配置したリニアアクチュエータアレイによって変形を行う。提案手法の概要図を図 1 に示す。提案手法では、まず、目標立体表現の形状に合わせてリニアアクチュエータのパラメータを計算し、そのパラメータに基づいて投影面を変形する [5]。これにより、目標立体表現の形状に近い変形面を実現する。次に、RGBD カメラで変形面の形状を推定し、推定された形状にプロジェクタからの投影像が合うようにレンダリングを行う。レンダリングには、指定した視点から見たときのみ投影像が立体的に見えるような投影画像を生成できる、2-pass レンダリング [6] を用いる。最後に、2-pass レンダリングにより得られた画像をプロジェクタで投影する。以上の処理をリアルタイムで繰り返し行うことで動的な立体表現を実現し、ユーザは変形面への投影像を指定した視点位置から観測することで、所望の立体表現を知覚することができる。

2.2 2-pass レンダリング

2-pass レンダリングの概要図を図 2 に示す。2-pass レンダリングではまず、実世界と全く同じ位置姿勢でプロジェクタ、ユーザ視点、投影対象物体を仮想空間に配置し、実世界を仮想空間上に再現する。次に 1-pass 目では、仮想空間の投影対象物体の位置に目標立体表現の 3D モデルを配置し、

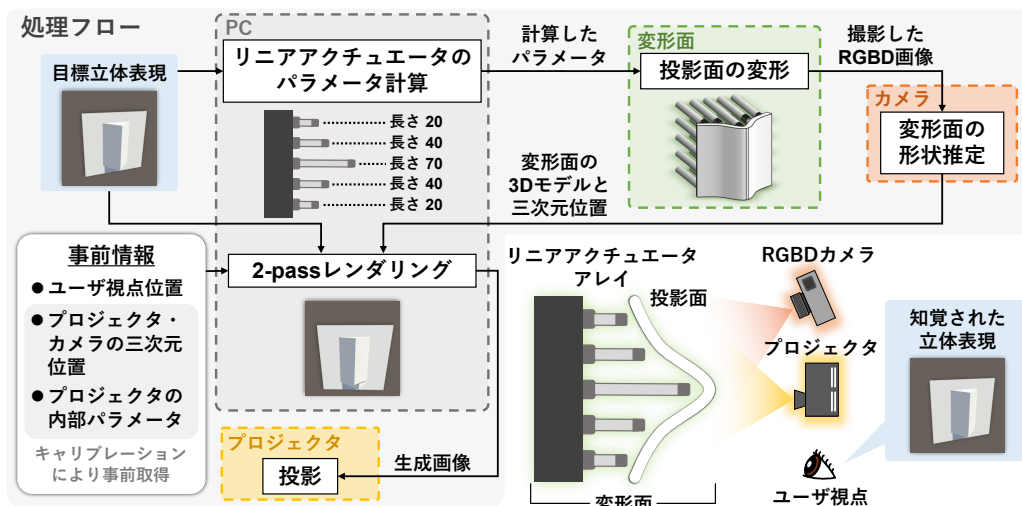


図 1: 提案手法の概要図。

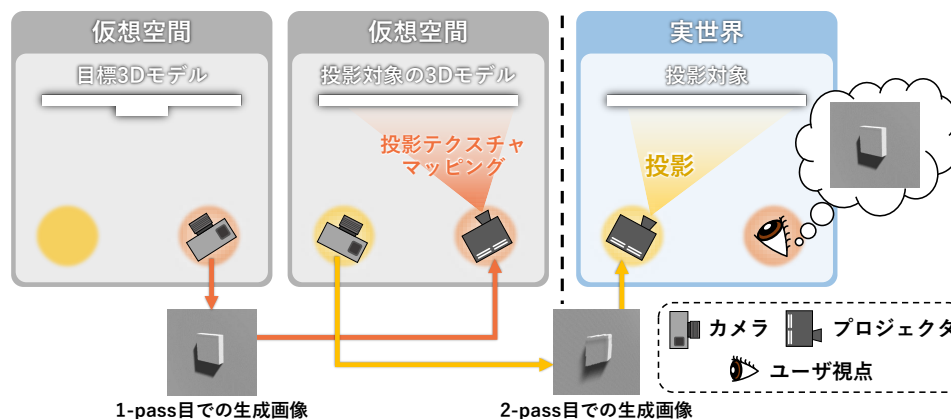


図 2: 2-pass レンダリングの概要図。

ユーザの視点位置に配置した仮想カメラで撮影する。続いて 2-pass 目では、1-pass 目で撮影した画像をユーザの視点位置から投影対象物体の 3D モデルに投影テクスチャマッピングし、その様子をプロジェクタ位置から仮想カメラで撮影する。最後に、2-pass 目で得られた画像を実世界のプロジェクタで投影することで、ユーザは所望の立体表現を知覚することができる。

3. 実装

3.1 変形面の製作

実装した変形面の構成要素を図 3 に示す。これは著者らの先行研究 [4] で実装した変形面と同様のものである。リニアアクチュエータは 4×4 台、計 16 台使用し、これらを二次元配置することでリニアアクチュエータアレイを作成した。このリニアアクチュエータアレイに柔軟スクリーンをかぶせることで変形面を実装した。また、投影面にリニアアクチュエータの先端形状が表出しすぎないようにするため、滑らかな形状のキャップを 3D プリンターで作成して取り付けた。

3.2 システムの仮想空間での再現

2-pass レンダリングを行うため、実世界のシステムを仮想空間に再現した (図 4)。仮想空間には 3DCG ソフトの

Unity を用いた。Unity 空間の原点に RGBD カメラを配置し、Unity の世界座標系を RGBD カメラ座標系と一致するように設定した。プロジェクタは、プロジェクタ-カメラキャリブレーションによりプロジェクタと RGBD カメラの内部・外部パラメータを求め、それに従って Unity 空間に配置した。変形面は、RGBD カメラの撮影画像から点群データを取得し、それを Unity 上でメッシュ化することで再現した。図 4 より、上記の手法で仮想空間に再現したシステムが、実世界のシステムと同様の配置となっていることがわかる。

3.3 リニアアクチュエータの動的パラメータ計算

目標立体表現に合わせて投影面を動的に変形するための、各リニアアクチュエータのパラメータ計算方法について述べる。リニアアクチュエータのパラメータとは、目標長と移動速度の二つである。

目標長の計算は、Unity 上で次のように実装した。まず、変形面が平面のとき、すなわち 16 台すべてのリニアアクチュエータの長さが 0 のときの変形面を基準面と定義し、基準面上の各アクチュエータの位置にサンプル点を配置した (図 5(a))。次に、16 個のサンプル点から垂線を伸ばし、目標 3D モデルの全頂点について垂線からの距離を計算した (図 5(b))。同時に、その距離が閾値以下かどうかを判定し、

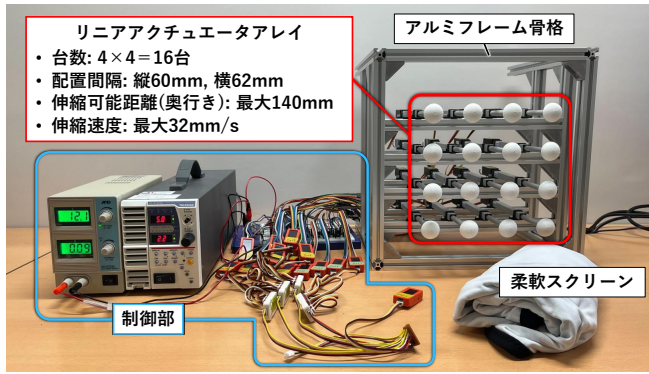


図 3: 変形面の構成要素 [4].

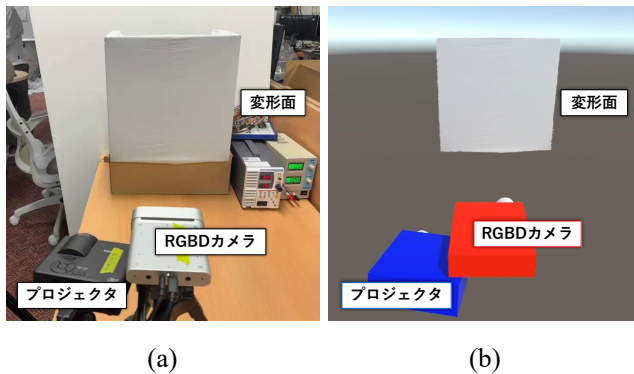


図 4: 実世界システムの仮想空間への再現. (a): 実世界のシステム. (b): 仮想空間に再現したシステム.

閾値以下の頂点を抽出した. 最後に, 閾値以下の頂点とサンプル点間の距離を計算し, その平均を各アクチュエータの目標長とした. 移動速度については, 各リニアアクチュエータの現在の長さとの差を計算し, その差が大きい場合は最大速度 (32mm/s) で駆動し, 差が小さくなるにつれて速度も小さくなるように実装した.

上記の手法で求められたパラメータに基づいてリニアアクチュエータを操作することで, 目標立体表現の形状変化に応じた投影面のオンライン変形に成功した.

3.4 変形面への立体視プロジェクションマッピング

3.2 項で構築した仮想空間のシステムを用いて 2-pass レンダリングを行い, 動的に変形する投影面に対して立体視 PM を行った. その結果を図 6 に示す. 目標立体表現は, 図 6 上段のようにグリッド線が描画された面が正弦波にしたがって波打っているものとした. 図 6 中段は平面に立体視 PM を行ったもの, 図 6 下段は変形面に立体視 PM を行ったものである. 図 6 上段と下段を比較すると, 目標立体表現に近い動的立体表現が実現できていることがわかる.

4. 被験者実験による有効性検証

提案手法による動的立体表現の有効性を検証するために, 研究室の 22~26 歳の男性 6 名を被験者として簡易的な実験を行った. 実験では, 図 6 上段の目標立体表現を, 投影面を変形せずに立体視 PM を行う従来手法 (図 6 中段) と投影面を動的に変形して立体視 PM を行う提案手法 (図 6

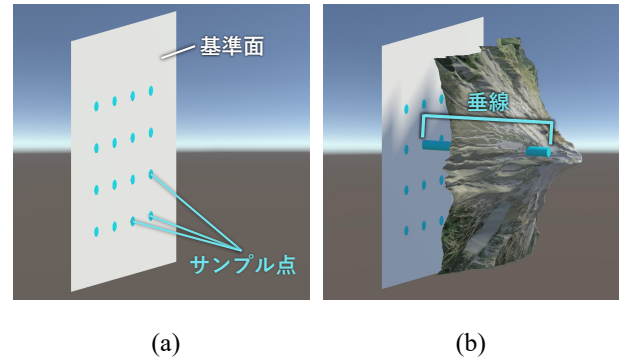


図 5: Unity 上でのリニアアクチュエータの目標長計算.

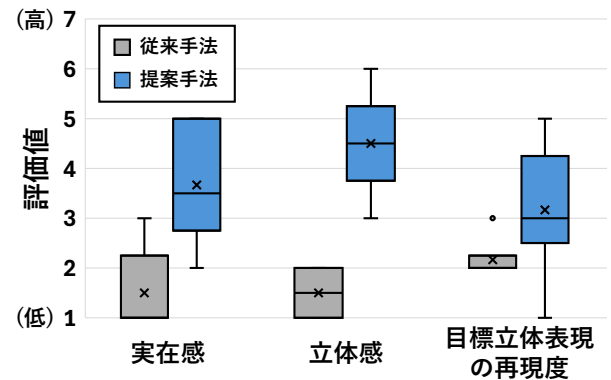


図 7: 被験者実験による動的立体表現の評価結果 (n=6).

下段) の 2 手法でそれぞれ提示し, 被験者には指定した視点位置から両目で観察させた. 観察距離は約 1.7m とした. その後, 知覚された立体表現を, 実在感, 立体感, 目標立体表現の再現度の 3 つの観点から 7 段階で評価させた. 実在感の評価では, 目標立体表現が実際に目の前に存在していると感じた場合を 7, 単に映像が投影されているように感じた場合を 1 とした. 立体感の評価では, 目標立体表現と同等の奥行きを感じた場合を 7, 全く奥行きを感じず平面的に見えた場合を 1 とした. 目標立体表現の再現度の評価では, 総合的に判断して目標立体表現と同じに見えた場合を 7, 全く異なると感じた場合を 1 とした. なお, 目標立体表現は実物を提示することができないため, Unity 上でさまざまな角度から目標立体表現を表示することで被験者に把握させた.

評価の結果を図 7 に示す. ただし, 被験者数が少ないため, 統計的検定は行っていない. 結果として, 提案手法による動的立体表現では全ての観点において従来手法を上回る評価が得られ, 目標立体表現の知覚的な再現度が向上することが示唆された. また, 立体感に関しては特に評価値が高く, 従来手法との差も大きかったことに加え, 自由記述や口頭報告においても「立体感を強く感じた」との意見が多数得られたことから, 目標立体表現に合わせた投影面の変形が, 立体感の知覚生起に強く寄与することが示唆された. 一方, 従来手法との相対的な比較ではなく絶対的な評価値に着目すると, 提案手法は十分に高い評価を得られておらず, 目標とする動的立体表現を忠実に知覚させるには, 現状の実装システムでは不十分であることが明らかとなった.

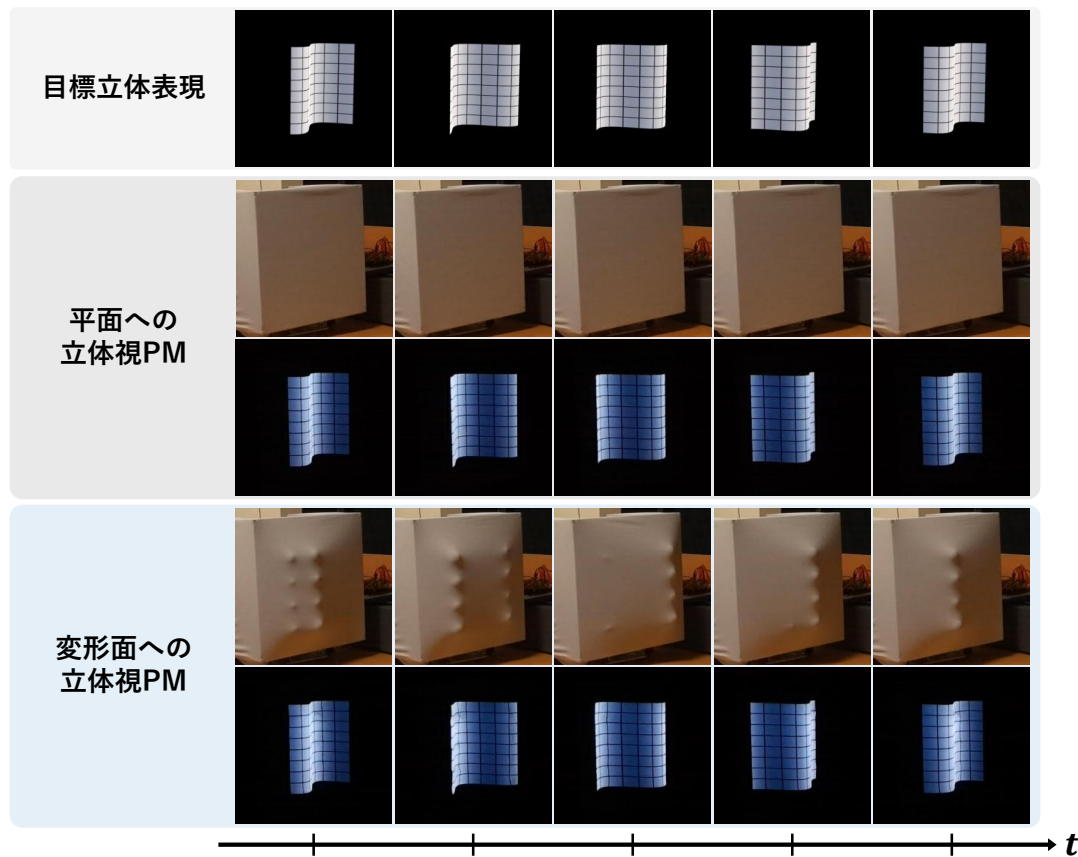


図 6: 動的立体表現の結果. 1 段目が目標立体表現, 2, 3 段目が平面への立体視 PM 時の投影面と投影結果, 4, 5 段目が変形面への立体視 PM 時の投影面と投影結果を表す.

これは主に、投影面の凹凸による投影像の歪みや、変形に対する投影の遅延、投影面の隆起部分による陰の発生に起因したと考えられる。今後は、変形面自体の改良や形状推定的高速化、変形手法の再検討に取り組み、課題の解消を目指す。

5. おわりに

本研究では、知覚に忠実な動的立体表現の実現を目的として、時間的に変化する目標立体表現に合わせて投影面の変形と立体視 PM を行う手法を提案し、その実装と被験者実験による動的立体表現の評価を行った。実験の結果、提案手法による動的立体表現では、従来よりも目標立体表現の知覚的な再現度が向上することが示唆された一方で、目標立体表現を忠実に知覚させるには現状のシステムは不十分であることも明らかとなった。今後は、変形面自体の改良や形状推定的高速化、変形手法の再検討に取り組む。

参考文献

- [1] Nagisa Okutani, Takuro Takezawa, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Stereoscopic capture in projection mapping. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 65894–65900, 2018.
- [2] Takuro Takezawa, Daisuke Iwai, Kosuke Sato, Toshihiro Hara, Yusaku Takeda, and Kenji Murase. Material surface reproduction and perceptual deformation with projection mapping for car interior design.

In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 251–258, 2019.

- [3] Sorashi Kimura, Daisuke Iwai, Parinya Pongpongsanon, and Kosuke Sato. Multifocal stereoscopic projection mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4256–4266, 2021.
- [4] 中尾都史也, 佐藤優志, 佐藤宏介, 岩井大輔. 制御可能な変形面へのプロジェクションマッピングによる動的立体表現. システム制御情報学会 研究発表講演会講演論文集, Vol. SCI25, pp. 984–986, 2025.
- [5] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. inform: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, p. 417–426, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [6] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Stesin, and Henry Fuchs. The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1998*, 07 1998.