

物理的実体を知覚可能なインタラクティブボリュメトリックディスプレイ

石原 慎一* 真鍋 宏幸*

概要. 既存のボリュメトリックディスプレイは、仮想オブジェクトの操作に媒介的な手法を用いる必要があり、実物体を扱うのとは異なる入力動作が要求される。また、見かけ上の動作を一致させたとしても、仮想オブジェクトからの抗力を提示することができない。そのため、現実と同じような、仮想オブジェクトとの物理的インタラクションは実現できていない。本研究では、仮想オブジェクトに対し素手で直接触れることができ、かつ触れた位置で仮想オブジェクトからの抗力を知覚できる体積表示手法を提案する。提案手法では、適度な曲げ弾性を持つスクリーンを連続的にたわませることで仮想オブジェクトを表示する。これにより安全に触れることができ、触れた際には仮想オブジェクトからの抗力を知覚できる。

1 はじめに

ボリュメトリックディスプレイは、実空間中に実際に光点を配置して立体映像を提示する3次元ディスプレイである。両眼視差や運動視差、焦点調節などの視覚特性が再現できるため、ユーザは補助機器の装着なしに、実物体と同じように立体を観察できる。そのため、ユーザは観察された立体に対し、実空間上と同じ動作および触覚を用いて操作できると期待する。しかし実際には、3次元ポインティングデバイスやジェスチャなどの媒介的な操作が介入し、これらの多くは、実物体を自身の手で操作するのとは異なっている。また、入力動作を、実物体を扱う動作と見かけ上で一致させたとしても、仮想オブジェクトからの抗力は存在しない。そのため、ユーザが期待する、物理的な相互作用を伴った仮想オブジェクトへの直接触覚は実現できていない。

本研究では、適度な曲げ弾性を持つスクリーンを連続的にたわませることで、仮想オブジェクトに対して直接、素手で安全に触れることができ、仮想オブジェクトからの抗力を提示可能な、体積表示手法を提案する。

2 関連研究

触覚を伴う立体映像の実現に向けて、様々な研究が行われている。例えば、HaptoMime [2] は、空間光変調器を用いて物体光の波面を再生するホログラフィックディスプレイの描画空間と、空中超音波触覚デバイスの触覚提示空間を実空間上で重ねたものであるが、超音波により提示できる力は非常に弱い。

Fairy lights [3] は、レーザを用いて空気をプラズマ化し、プラズマ光の点群として空中に立体を映し

出す。フェムト秒レーザにより励起されたプラズマは触れることが可能であり、プラズマとの接触時にショック波が発生するため、物理的な触覚を提示することができる。しかし、レーザにより皮膚が焼けるなど安全性に問題があり、表示できる映像も単色に限定される。

従来の、走査機構を用いて残像効果により立体を描画する体積走査型のボリュメトリックディスプレイは、硬質なスクリーンが高速で回転または往復運動するという特性から、描画空間に対して素手で触ることができなかった。FlexiVol [1] は、高速で往復するスクリーンの素材として、数本のエラストマバンドを横並びにすることで、この問題を解決した。しかしこの手法では、スクリーンに空いたスリットと、エラストマバンドの伸縮性により、仮想オブジェクトからの抗力を知覚することはできない。

3 提案手法

提案手法では、スクリーン素材として適切な曲げ弾性を備えた一枚のプラスチック板を採用し、これを高速で前後にたわませることで、安全性を保ちつつ、指先を押し返すほどの強い抗力の提示を可能とする。スクリーンには立体の断面が次々に表示され、残像効果により、ユーザは立体を観察できる(図1(a))。スクリーンに対して指が衝突すると、スクリーンは変形して危険ではない程度に指先への衝撃を和らげる。ユーザは、指先に受けた衝撃を仮想オブジェクトからの抗力として受け取る(図1(b))。

4 実装

提案手法の実装方法として、フレキシブルディスプレイを用いる方法と、プロジェクタを用いる方法がある。前者の場合、高速な曲げ伸ばしを繰り返しても壊れない耐久性と、指などが接触しても壊れない耐衝撃性、高いリフレッシュレートを備えたフレ

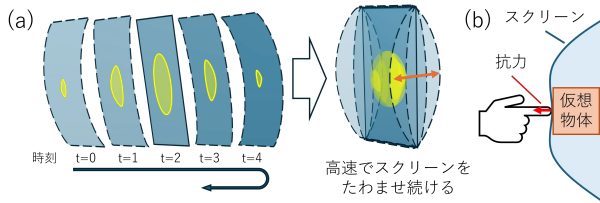


図 1. (a) 残像効果による体積表示. スクリーンを高速で前後にたわませ、連続して断面を描画する. (b) 仮想オブジェクトからの抵抗力

キシブルディスプレイが必要となる. しかし, 現在一般に入手可能なフレキシブルディスプレイで, これら全ての条件を満たす製品は存在しない. 一方, 後者の場合, 高リフレッシュレートのプロジェクタは一般に入手が可能である. そのため, 本研究ではプロジェクタを用いる方法を採用した. システム構成を図 2(a) に示す.

4.1 適度な曲げ弾性を持つスクリーンと走査機構

仮想オブジェクトとインタラクションを行うため, スクリーンを自己容量方式の静電容量タッチセンサとしても機能させる. スクリーン素材には, 導電面に, 折り曲げに強く耐衝撃性を備えた CNT コーティングを施した, 1mm 厚の A-PET 導電シートを採用した. A-PET は透明度が高く背面投影には適さないため, シート背面を伸縮性のある塗膜を形成するソフトビニール塗料で黒色に塗装した. スクリーンのサイズは縦 65mm, 横 145mm, 走査時の描画空間は奥行が 40mm の紡錘柱形状である.

走査機構の概略図を図 2(b) に示す. Arduino UNO R3 を用いてモータを PWM 制御し, スクリーンを 8Hz で往復走査する. たわみ具合によってスクリーン両端間の距離が変化し, スクリーンの瞬間的な跳ね返りが生じるため, 圧縮ばねを用いてこの変化を吸収する (図 2(c)).

4.2 描画システム

ユーザの手によって映像が遮られることを防ぐため, 映像は, 240fps のプロジェクタを用いて, 背面から投影する. 出力する映像は, Windows PC を用いて次のように生成した. Unity のシーン上に直方体形状の描画範囲を設定し, その内部に仮想オブジェクトを配置する. Unity の仮想カメラをスクリーンと同じ 8Hz で往復走査し, 仮想カメラの位置に対応する仮想描画空間の断面を 240Hz で出力する. 2 基のフォトリフレクタでスクリーンの折り返しタイミングを検出し, 仮想カメラとスクリーンの位置および位相を同期する.

タッチした瞬間の仮想カメラの奥行位置から, スクリーンの押し込み量を推定する. 推定した押し込み量に応じて仮想オブジェクトの変形パラメータを

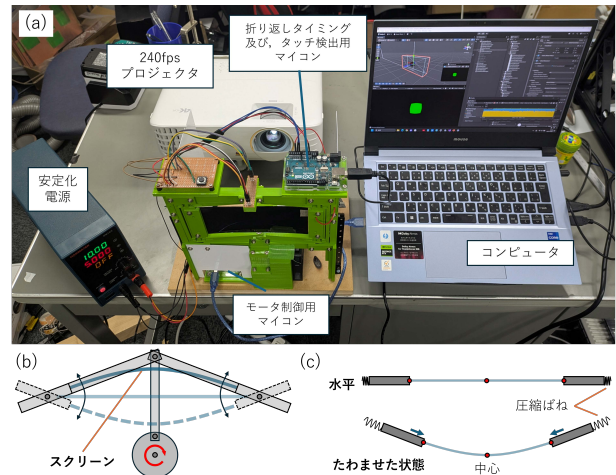


図 2. (a) システム構成. (b) 走査機構の概略図. (c) 瞬間的な跳ね返りの抑制機構

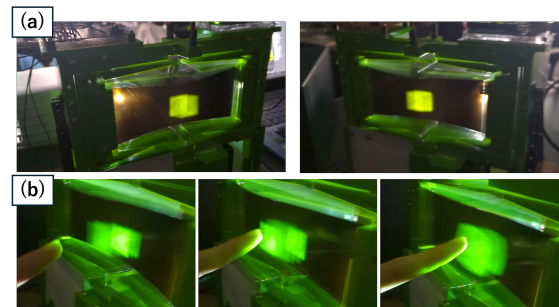


図 3. (a) 運動視差の提示. (b) タッチインタラクション

計算できる. 実装を簡単にするため, 2 次元的なタッチ位置の検出は実装していない. 折り返しのタイミングとタッチの検出には Arduino UNO R3 を使用した.

5 実装結果

本実装を用いて立方体を描画した (図 3(a)). 運動視差が提示されていることが分かる. また, 描画した立方体を, 指先で押し潰し, その際に抵抗力を知覚できることを確認した (図 3(b)).

6 まとめと今後の展望

本研究では, 適度な曲げ弾性を持つスクリーンを連続的にたわませることで, 仮想オブジェクトに対し直接触れることを可能とし, かつ触れた位置で仮想オブジェクトからの抵抗力を知覚できる体積表示手法を提案した. 実装を通じて, 運動視差が提示され, 立体とのインタラクションが可能であることを確認した. 今後は, より高いリフレッシュレートのプロジェクタを用いて映像の鮮明化や動画像表示を行っていく.

参考文献

- [1] E. Bouzbib, I. Sarasate, U. J. Fernández, I. Fernández, M. Lopez-Amo, I. n. Ezcurdia, and A. Marzo. FlexiVol: a Volumetric Display with an Elastic Diffuser to Enable Reach-Through Interaction. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, 2025.
- [2] Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, and H. Shinoda. Hap-
toMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, p. 663–667, 2014.
- [3] Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki. Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields. *ACM Trans. Graph.*, 35(2), feb 2016.