

# 境界面を持つホログラフィックディスプレイにおける傾きを入力としたインタフェース

深谷 陸<sup>†1</sup> 福地 健太郎<sup>†1</sup>

**概要**：3DCG を裸眼で立体視可能なホログラフィックディスプレイにおいて、投影された 3DCG にユーザが直接働きかけられるインタフェース技術が多数提案されている。しかしディスプレイが投影面や保護容器などの境界面を持つ場合、それに阻害されて映像に直接働きかけることが出来ない。本研究ではディスプレイ自体を操作して中身に働きかけ、間接的なインタラクションを可能とするインタフェースを提案した。具体的には、レンチキュラーレンズ方式のホログラフィックディスプレイと加速度センサを組み合わせ、ディスプレイを傾けることで入力とする。応用例として、左記のディスプレイを容器と見立て、その中に液体が満たされているという想定の下に、ディスプレイに対する操作を反映した流体シミュレーションの結果をリアルタイムに投影するシステムを作成した。その結果、あたかも液体の入った容器を操作しているような感覚を提供することができた。

## 1. はじめに

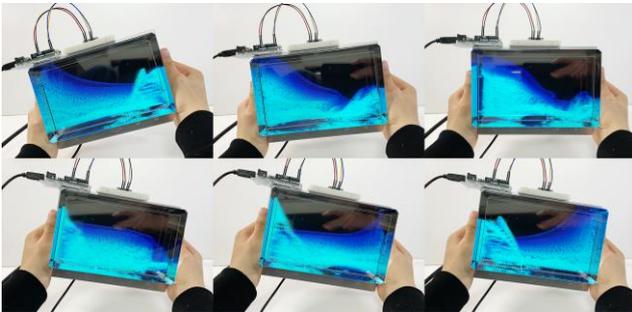


図 1 提案システムが動作している様子

ホログラフィックディスプレイとは、裸眼での両眼立体視による 3 次元的な映像提示を行うことのできるディスプレイのことである。その中でも本研究では、ユーザの視点位置に応じて対応する角度からの 3DCG を提示することにより運動視差による立体感を提示できるもの(light-field display)で、さらにレンチキュラーレンズを用いたものに代表されるような複数ユーザの同時閲覧に対応するものを対象とする。こうしたディスプレイは 3 次元映像を介しての協調作業を可能とし、3DCAD や分子構造の可視化、構造解析などの分野で用いられている。

3DCG として投影された対象物を操作・編集するためのインタフェースとして、対象物が立体的に提示されるホログラフィックディスプレイでは、対象物に対して手指で直接働きかけるインタフェースが期待される。しかし、ホログラフィックディスプレイには投影面や保護容器などの境界面を持つために対象物に直接働きかけることが出来ないものがある。

本研究では、この境界面を持つホログラフィックディス

プレイ自体を操作することで間接的にディスプレイ内部に投影されている対象物へ働きかけることのできるインタフェースを提案する。具体的にはディスプレイに加速度センサをとりつけることで、ディスプレイを傾けて操作ができるようにした。応用例として、ディスプレイを容器に見立て、中に液体が満たされているという想定の下に、容器を傾けた際の液体の動きを流体シミュレーションによってリアルタイムで生成し表示するシステムを構築した。その結果、あたかもディスプレイ内部に液体の入った容器を操作しているような感覚を提供することが出来た(図 1)。

## 2. 関連研究

Ravin Balakrishnan らはホログラフィックディスプレイのうち、境界面を持つものを対象に、境界面内に投影された対象物の操作方法について、境界面の外に設けられた入力空間の次元や性質、そしてそこへの入力をいかに対象物への操作に反映するかを軸に分類をしている[1]。そのいずれにおいても境界面外での操作を対象物への直接的な操作へと変換する過程が含まれる。例えば左記文献で Ravin らは境界面上でのスタイラス操作を利用した研究を紹介している。同研究ではスタイラスの長軸の延長線と対象物との交点を操作の対象点とすることで、スタイラスがあたかも境界面からディスプレイ内部へと伸びているかのように用いることのできるインタフェースを提案しているが、実際の入力空間と出力空間との隔たりをユーザは常に意識することになる。一方で Ravin らは同文献において球状のホログラフィックディスプレイにおいて境界面を手で直接回転させることで対象物を異なる角度から閲覧する手法を提案している。これは本研究の提案するインタラクション手法と近いが、左記文献では提案のみで実装については報告されていない。

境界面を持たない空中投影方式向けのインタフェースとして、落合らは Fairy Lights[2]を提案している。従来ナノ

<sup>†1</sup> 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科

秒レーザーを使用していた部分にフェムト秒レーザーを用いることで安全性を高めた上でユーザの手指と投影映像との衝突を光学的に判定することで、空中に結像した 3DCG に直接働きかけることができる。

投影面自体を手を持って傾けることで操作できるインタフェースの例としては、Augmented Reality (AR) 技術を用いたものやプロジェクションによるものが提案されている。Julian Oliver の levelHead[3]では、立方体のすべての面に AR マーカを張り付けたものを操作するインタフェースを提案している。ユーザは立方体を手を持ち、カメラが撮影した映像をディスプレイ越しに見て操作する。AR マーカはゲーム画面に置換され、このゲームの進行をユーザは立方体を傾げることで制御する。Martin Spindler らの PaperLens[4]は、ユーザは手に矩形スクリーンを持ち、スクリーンを移動させたり傾けたりして操作する。スクリーンの位置姿勢はカメラによって認識され、その操作を反映した映像をプロジェクタによってスクリーンに投影している。その応用として Magic Lens[5]を三次元的に拡張したものを提案しており、例として CT スキャンによって得られた三次元医療画像の、任意の位置の断面を表示するアプリケーションを実装している。

ディスプレイを傾けて操作するインタフェースは加速度センサを内蔵したスマートフォン向けのアプリケーションではよく見られるが、ホログラフィックディスプレイでの利用例は見当たらない。その主な障害としては、ホログラフィックディスプレイは一般に大型で重く、傾けての操作に不向きであることが考えられる。我々は後述する小型のホログラフィックディスプレイを用いてこの問題を回避している。

### 3. 提案システム

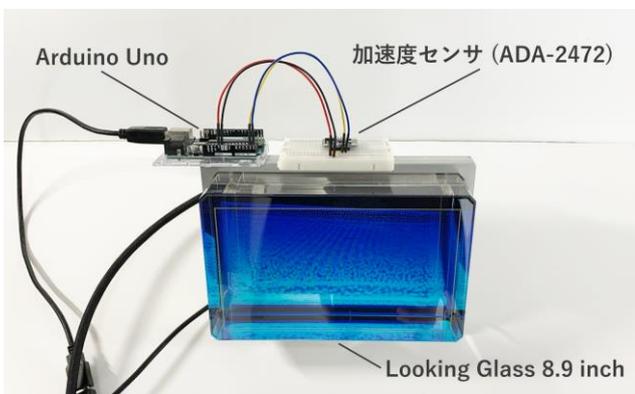


図 2 作成したシステムの全容

#### 3.1 概要

本システムの全容を図 2 に示す。まず、傾けることができるような大きさで境界面をもつホログラフィックディスプ

レイとして、大きさ 210W×98.5D×155H(mm)、重量 2.2kg の Looking Glass 8.9 inch (Looking Glass Factory 社) を使用した。この Looking Glass の傾きを入力とするために、9 自由度の加速度センサとして Adafruit BNO055 搭載 9DoF 方位/慣性計測モジュール ADA-2472 を本体上部に設置した。センサからの出力は Arduino Uno を用いて取得し、USB 経由で PC に送信している。流体シミュレーションは後述するように 3次元 SPH 法を用いたプログラムにより実現した。シミュレーション結果はゲームエンジンである Unity を利用して可視化し、Looking Glass に投影している。具体的なインタラクションの流れについては後述する。PC は Intel Core i9 9900K CPU 3.60GHz、NVIDIA GeForce RTX 2070 GPU、DDR4 32GB メモリを搭載したものをを用いた。

#### 3.2 Looking Glass の特徴

本システムで利用している Looking Glass は、視点位置に応じた 3DCG を提示するホログラフィックディスプレイである。同ディスプレイは水平に 45 方向の視点位置から見た映像をそれぞれレンダリングし、それらを統合した映像をレンチキュラーレンズを通して見せることで、両眼視差および運動視差を実現している。レンチキュラーレンズの特性上、1 軸（左右方向）の視点位置の移動にのみ対応しており、上下方向の移動には対応していない。また、厚みのある高屈折率の透明体がディスプレイ面に付加されており、焦点面をディスプレイ表面から透明体内に移動させて 3DCG を提示する仕組みとなっている。本システムでは本稿執筆時に最小のものである 8.9 インチサイズで画面解像度が 2560×1600 ピクセル、透明体の厚みが 45mm のものを利用している。この透明体を液体の容器に見立て、傾けたときの重力情報と 3DCG 内の重力を同期させることでデバイスを傾けるという動作と 3DCG の動作とを対応させている。

### 3.3 流体シミュレーションとその可視化

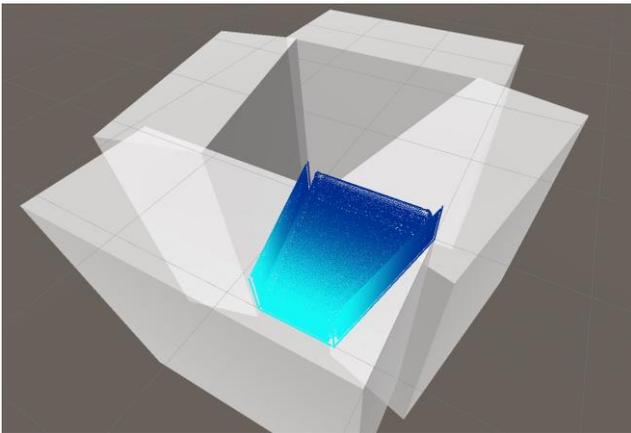


図 3 Unity 上で実行した流体シミュレーションを上から見た様子

提案システムの応用例として我々は Looking Glass を容器に見立て、その中に注がれた仮想液体を揺らすことができるインタフェースを構築した。本節で液体の動きの実装について説明する。

仮想液体の動きの計算は流体シミュレーションによって実装されている。図 3 は Looking Glass に投影される方向とは別角度から流体シミュレーションを見た様子である。

流体シミュレーションには 3 次元 SPH 法を採用している。SPH 法は液体を構成する粒子の運動に基づくシミュレーション手法であり、液面やそこから飛んだ飛沫の挙動を表現しやすく、そのため液体が揺れている様子がユーザーにわかりやすくなるためこれを用いた。

流体粒子の数は 32768 個としており、流体シミュレーションを投影する高屈折率の透明体を容器と見立てた際に容器を半分ほど満たすよう調整した。流体シミュレーションは GPU 上で並列計算により実装しており、これによって応答性能を向上させている。この粒子数でシミュレーションを実行すると、レンダリングにかかる時間を含め、画面書き換え速度は平均 37fps であった。

流体シミュレーションの結果を可視化し Looking Glass へ投影するには、Unity および HoloPlay Unity Plugin for the Looking Glass という SDK を利用した。この SDK では Looking Glass に投影される 3D 領域を視錐台として指定する。そのため、Looking Glass のディスプレイを容器に見立てて利用するためには、この視錐台にシミュレーション領域を合わせる必要がある。そこで、図 3 で白い直方体で示されているように容器の壁を設計した。壁と液体粒子との衝突はペナルティ法を用いて処理している。

加速度センサからは Arduino Uno を介して、重力方向の情報をシリアル通信によって受け取っている。この情報と流体シミュレーションの計算に用いる重力方向とを一致させることで、デバイスの傾きに応じて仮想液体が揺れるよ

うに処理している。なお現在の実装では、9DoF センサの値のうち加速度センサの値のみを使用しており、それ以外の値（ジャイロ・地磁気）は使用していない。

シミュレーション結果の可視化は、流体粒子を円形の平面パーティクルとして表現することで実装した。各パーティクルは仮想カメラから常に真円に見えるようビルボードとして表現している。パーティクルの深度に応じて陰面処理を施し、また奥のパーティクルほど輝度を低くすることで、液体の奥行き感を表現している。なお、流体の可視化において、マーチングキューブ法を使うなど流体表面をレンダリングする手法は計算負荷が高く応答性能を低下させるため今回は採用しなかった。

### 4. 提案手法の主観的評価

本システムの使用風景を図 4 に示す。

著者らが実際に本システムを体験しての主観的な感想としては、傾け操作に応じて液体が滑らかに動き、かつ両眼視差に加えて運動視差によって立体感が得られ、従来手法と比べて強いリアリティを感じることができた。特に、ディスプレイ面がユーザーに対して正面を向くようにデバイスを持った上で yaw 軸回りに傾けた際、相対的には自分がディスプレイを回り込んで見たことになるため自然と運動視差が生じ、立体感が得られた（次節で述べるように Looking Glass の制約により pitch 軸回りの回転では運動視差は得られない）。



図 4 本システムを使用している様子

## 5. 議論

提案手法ではホログラフィックディスプレイ本体を直接手にもって操作することを前提としているが、Looking Glass の場合、一般的な液晶ディスプレイの重量に加えて高屈折率透明体の重量があるため、高速な操作には向かず、また長時間の使用には支障をきたした。Looking Glass Factory 社が計画している次期モデルでは軽量化が図られているが、画面を大きくすることを考えるのであれば、重量の問題の解決は不可避であろう。ジンバルに乗せるなどの工夫が必要となるだろう。

デバイスの重量は別の課題の要因にもなっている。ディスプレイを把持する手に触覚フィードバックを与えることでリアリティを高めることを狙い、ディスプレイに小型振動子である Haptuator Mark II (Tactile Labs 社)を付加し、仮想液体の動きに応じて振動させることを試みたが、試作の段階では振動をほとんど感じるができなかった。この原因としては、振動子の出力に比べて Looking Glass の重量(2.2kg)が重過ぎたことが挙げられる。振動子の出力を上げるのはこの場合デバイス全体をさらに重くしてしまうため採用しにくい。

境界面を持つホログラフィックディスプレイには、今回利用したレンチキュラーレンズ方式のもの以外にも、ユーザの頭部位置を追跡することで視点位置に対応した映像を提示するものも存在する。この方式ではディスプレイは机上に固定され、ユーザの頭部位置が移動することを想定している。しかし提案手法のように傾ける操作をディスプレイに加えた場合、ディスプレイに対して相対的な頭部位置の移動が想定以上に高速になるため、追跡が遅れたり失敗したりする原因となりうる。加速度センサから得られる情報を利用した補正や、高速な追跡技術が必要となろう。

一方で、今回使用したようなレンチキュラーレンズ方式のホログラフィックディスプレイではその仕組み上、運動視差を提示できる回転は1軸に限られる。2軸の回転操作に対応するためには前述の頭部位置トラッキング方式か、マイクロレンズアレイを用いたホログラフィックディスプレイが必要となる。しかし後者の場合、レンダリングしなければならぬ視点位置が増加するため、インタラクションの応答性能がさらに低下することが予想される。

## 6. 結論

本研究では、投影面や保護容器などの境界面を持つホログラフィックディスプレイに対して、ディスプレイ自体を操作して中身に働きかけ、間接的なインタラクションを可能とするインタフェースを提案した。ディスプレイに加速度センサを付加したデバイスを試作した結果、あたかも液体の入った容器を操作しているような感覚を提供することができた。しかし現行の小型ホログラフィックディスプレ

イであっても重さの問題があり、操作性や連続使用時の快適性に課題が見つかった。

## 参考文献

- [1] Balakrishnan, R. and Fitzmaurice, G. W.. User interfaces for volumetric displays. *Computer*. 2001, vol. 34, p. 37-45.
- [2] Ochiai, Y. and Kumagai, K.. Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields. *ACM Transactions on Graphics*. 2016, vol. 35, no. 2, Article No. 17, p. 1-14.
- [3] "levelHead". <https://julianoliver.com/levelhead/>, (参照 2020-12-13).
- [4] Spindler, M. and Stellmach, S.. PaperLens: advanced magic lens interaction above the tabletop. *ITS'09: The ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. 2009, p. 69-76.
- [5] Bier, E. A. and Stone, M. C.. Toolglass and magic lenses: the see-through interface. *SIGGRAPH '93: Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1993, p. 73-80.