

# 積層型導光プリズムによる疑似空中像型 タンジブルユーザインタフェースの研究

室井克仁<sup>†1</sup> 大島登志一<sup>†1</sup>

本研究では、光学的な部品による新しいタンジブルユーザインタフェース (以下 TUI) を提案する。従来の TUI での体験はテーブル状の平面ディスプレイの事例が多い。そこで本研究では、アクリルなどの透明版における内部の全反射の性質を用いた「積層型光学プリズム」を試作した。これにより、平面ディスプレイからの光を屈折でプリズム内部に浮いているように見えることで空中像を提示する。またこれにより、複数のユーザが各視点で正しいパースペクティブで見ることができる。

## 1. はじめに

これまでタンジブルユーザインタフェース (TUI) [1]を用いた多くの研究がなされている。これまではプロジェクションによる投影方法が多く用いられていたが、近年では水平に置かれたディスプレイを用いた Tabletop 型が多く用いられる。Tabletop 型ではビジュアルのデザイン性の利点などにより、透明な物質を用いた TUI の例が多い。そこで本研究では、透明な物質であるアクリル板に着目し、アクリル板の持つ全反射による導光の性質を用いて、TUI 内部に疑似的な空中像を提示することができる積層導光プリズムの設計を行った。また、このプリズムはこれまでの TUI にはなかった透明な TUI 内部に像を出力することができる可能性を持っていると考える。

## 2. TUI の関連研究

本章では、タンジブルユーザインタフェース (TUI) の概要と課題について述べる

### 2.1 TUI によるディスプレイ方式

TUI を用いた表現する方法は大きく分けて二つある。一つ目はプロジェクタによる投影方法である。「CARMEL: 電子ブロックと投影型 AR を用いて 電気の基礎を学ぶインタラクティブ理科教材の研究 (2) 電気回路認識インタフェースの試作」[2]や「Senseable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces」[3]では、入力情報やインタラクションによって起こった結果を TUI やその周りに投影し出力している。二つ目の方法として、水平に置かれたディスプレイを用いて、TUI の情報や出力結果を表示する方法である。この方法の例として「The reactable」[4]などがある。ディスプレイを用いた方法では、プロジェクション型に比べて、表示される情報が明るく、明るい環境下であっても映像が見にくくなることは比較的少ない。また、真上から投影しているタイプのプロジェクションのものに比べてディスプレイから映像を直接出力しているため、ユ

ーザの動作によって映像が途切れるということがないといった利点がある。

### 2.2 透明な TUI

透明または半透明な TUI 様々な利点がある。[5] 通常の TUI を用いたコンテンツでは、TUI の周りに情報を表示する。しかし、透明な TUI はその周りに情報を表示するのではなく、TUI オブジェクトの下に情報を視覚化することができる。これにより、映像表示スペースの削減となり、よりコンパクトなデザインをすることが可能である。また、透明な TUI の表面をレーザややすりを使って損傷させ、その面で光を拡散させることで TUI の底部だけでなく、上面、側面、内部へとディスプレイ情報を表示することができる。TUI を透明化することによる利点はビジュアルのほかに、インタラクションをより高度なものへと拡張することもできる。透明な TUI を通じて指の動きをトラッキングし、TUI に接触することでインタラクションをしたり、[6][7] また、TUI 同士を重ねてより高度なインタラクションを可能にする。[8] 光ファイバを用いて、映像を拡張する例もある。これは光ファイバの全反射による導光の性質を用いており、光ファイバを通じてディスプレイの映像を出力する。この方法を用いることにより、水平面だけで表示されていたディスプレイの映像をあらゆる方向へと拡張することができる。透明な TUI では上記のようなことが可能となり、直接触ることのできない可変であるデジタルの情報を物理空間に存在するオブジェクトと結びつけ、デジタル世界と物理世界の結びつきをよりシームレスにすることができる。

### 2.3 TUI における課題

2.2 で述べたように、TUI への情報投影方法はプロジェクタによるものとディスプレイによる方法の二つがある。しかし、これらには課題が残っている。まず、プロジェクタ型には三つの課題があると考えられる。一つ目は、外光などの環境的要因によって投影映像が暗くなってしまうという点である。プロジェクタの光は明るい場所には適していないため、プロジェクタ型を使う場合、暗い環境で体験をする

<sup>†1</sup> 立命館大学映像学部  
Ritsumeikan University College of Image Arts And Sciences

必要がある。二つ目は、TUI が初めから固有の情報を保持しており、印字してある場合、投影によってそれらの情報が見にくくなってしまいう点である。これはユーザだけでなく、TUI に張り付けているマークがカメラに認識されにくくなるという点も含まれる。三つめは、体験の拡張のために平面から垂直面に対して投影した場合、ユーザの体験位置が固定されてしまう点である。「Tablescape Plus: インタラクティブな卓上映像シアター」[9]のような例では、プロジェクタの位置が固定であるため、ユーザの体験箇所も固定されてしまう。

これらのプロジェクタ型の課題に対して、Tabletop 型は明るさやユーザの体験位置の問題について解決しているように思われる。しかし、水平に置かれたディスプレイの映像を用いて映像の表示面を拡張する方法は、解像度が荒い。これは「Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices」[10]のように光ファイバを用いているものが多く、光ファイバの本数とディスプレイのピクセル数を比べると明らかに光ファイバの本数が少ない。また、映像を光ファイバの表面で表示するために、表面を削り、光を拡散する設計になっているのも原因と思われる。

これらの課題に対して、本研究では、アクリル板を積層させる構造を設計し、光ファイバに比べて解像度が高いプリズムを作成した。

### 3. 積層型導光プリズム

本章では、アクリル板を積層した積層型導光プリズムについて述べる。

#### 3.1 積層導光プリズムの特徴

アクリルは透明な材料の中で比較的安易に手に入れやすく、加工しやすい。また、ガラスなどに比べて軽いのも特徴である。また、アクリルは内部で全反射する特性を持っており、光ファイバと同様にディスプレイの映像を導光し、出力することができる。また、内部で全反射した光は外に出ないため、アクリル板を積層しても隣り合うアクリル板には影響しない。

また、積層導光プリズムは複数のユーザがそれぞれ一つ以上持ち体験する。これにより、各ユーザの視点に合わせて正しいパースペクティブで映像を観ることが可能となる。

作成した様々な積層プリズムのプロトタイプの中から現段階で最適な構造を用いた積層導光プリズムを説明する。

#### 3.2 積層導光プリズムのデザイン

積層型導光プリズムはアクリル板を積層させてプリズムを形成している。このプリズムはアクリル板の側面から映像を入射させ、アクリル板内部を全反射し、反対側の側面にて映像を出力する。

プリズムは複数のユーザが体験できるディスプレイの

大きさに合わせ、大きさを設計した。アクリル底面の大きさが 30mm×60mm(W×L)、上面が 8mm×60mm(W×L)となるように底面から上面まで 2mm ずつ幅が小さくなるように 12 枚のアクリル板を面の中心がそろるように積層した。また、映像表示面と反対側の面に AR マークを設置する。

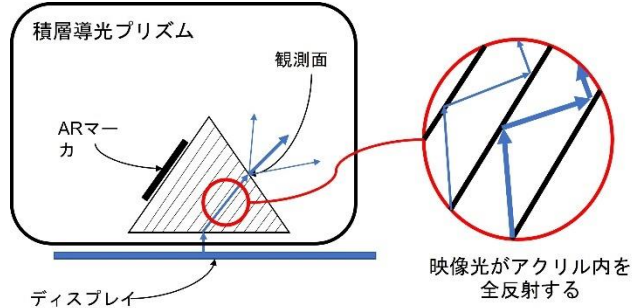


図 1 積層導光プリズムの構成図

#### 3.3 積層導光プリズムの造作

積層導光プリズムは、積層した側面の形と同じアクリル板を、UV レジンを用いて接着する。これは、積層したアクリル同士に接着剤をつけてしまうと内部の屈折率が変化してしまう可能性があることを考慮した結果である。その後、側面に張り付けたアクリル板からはみ出ているアクリルを研磨し、形を整える。これにより最終的な積層プリズムは底面 30mm×60mm(W×L)、上面 8mm×60mm(W×L)、高さ 24mm の三角柱である。

#### 3.4 積層導光プリズム用の映像生成

3.1 で示した積層導光プリズムを Tabletop 上のディスプレイにおいたとき、元の画像とプリズムを通して見る画像の大きさを同一にするため、次の式で画像を変換する必要がある。

$$I = H \times \frac{T \times N}{C}$$

I は変換後の画像の縦サイズ、H は変換前の画像の縦サイズ、T はアクリル板の厚さ、N はアクリル板の積層枚数、C はプリズムの断面積の縦サイズである。この変換を行うことで、元の画像サイズと同じ大きさの画像を、プリズムを通して見るができる。3.1 で示したプロトタイプのプロトタイプはプリズムの幅の大きさは変わらないため、断面積の縦の大きさの比率で考える。また、ディスプレイとの接地面と映像表示面はどちらも同じ面積であるため、それぞれの断面積の割合は考慮しないものとする。

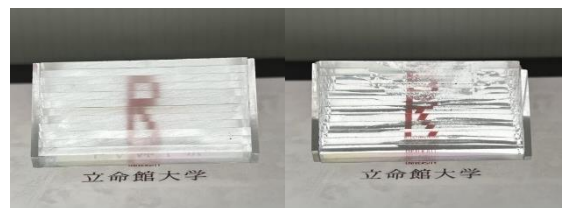


図 2 光の拡散性の高いもの（左）と拡散性の低いもの

(右)

### 3.5 表面の研磨具合による見え方の違い

本項では、積層導光プリズムを透明な TUI にするため、表示面を磨き、表示面の光の拡散性が高いものと低いものを図 3 に提示する。これらを比較し、どのように見え方が変わったかについて考察する。

表面を研磨し、プリズムの透明度を上げることで次のことが分かった。まず、プリズムの透明度が増せば増すほど、表示される像が明るく、解像度が高いということである。これは表面の傷にて光が拡散しないため、導光された光がダイレクトに表示されるためである。解像度が上がる一方で、表面の透明度を上げると内部の積層構造や熱によって変形したアクリルが見えてしまうという欠点も見られた。ユーザの視点の位置が積層されたアクリルの直線上にない場合、積層された層により像に積層されたアクリル板が映り込んでしまう。

### 3.6 プリズム内部の空中像

Tabletop のディスプレイ映像がプリズム内部を全反射することで平面の映像がプリズム内部で起き上がったように見える。これにより、プリズム内部に像が浮いているように見える。この現象を利用することにより、透明な TUI の内部に映像を疑似的な空中像として表示することができる。

## 4. コンテンツの検討

### 4.1 システム構成図

積層導光プリズムを用いたシステム構成図は図 4 に記載する。

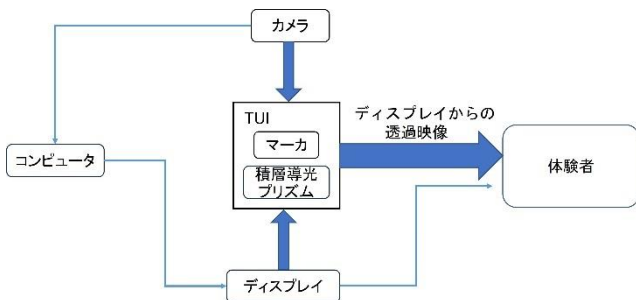


図 3 システム構成図

### 4.2 描画アルゴリズム

ディスプレイに出力される映像はすべてのユーザが同様の映像を観る映像を生成する。また、プリズムに出力される映像は各ユーザの視点位置からの映像をプリズムの置かれているディスプレイの下に重畳する形で生成する

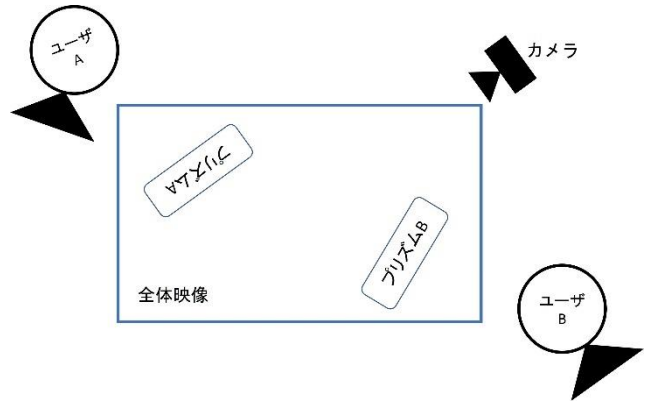


図 4 映像出力と体験の概要図

### 4.3 コンテンツの例

積層導光プリズムは水平面に表示された映像を垂直方向へと拡張することができる。これを用いたコンテンツの例として、2つほど上げる。

一つ目は平面ディスプレイ上のオブジェクトを、積層導光プリズムを用いて捕まえ、別の場所へと移動するようなもの。例えば、金魚すくいのような、上から2次元平面を泳いでいる魚に対して、プリズムを置く。プリズムの中に入った魚はプリズムの中の三次元空間を泳ぐことができる。そしてプリズムを持ち、別の場所へ移動すると、捕まえた魚も一緒に移動することができる。このように二次元平面から三次元へと拡張したオブジェクトを操作できる。二つ目の例として、「metaDESK」[11]のような二次元平面地図と三次元地図を同時に扱うようなコンテンツである。Tabletop のディスプレイでは、上から見た 2D の地図を表示する。そこに積層導光プリズムを置くと置いた位置の地図が 3D 地図へと拡張される。これにより、ある地形の標高を把握することなどができる。また地図の上にプリズムを置くとプリズムの映像がストリートビューのような実際に歩いているときの風景を見ることができるようコンテンツが可能である。

上記であげた例のように、積層導光プリズムはこれまでの TUI と違い、二次元と三次元双方のビジュアル化が可能であり、二次元的な表現と三次元的な表現の両方を組み合わせたコンテンツが可能となる。

## 5. 現在の積層導光プリズムの考察

現在の積層導光プリズムには三つの問題がある。一つ目は解像度の問題である。3.3 項で述べたように、表面を研磨したところ、視点が積層されたアクリル板と一直線上の位置でない限り、内部の積層構造が見えてしまうという点がある。二つ目は加工時に起こる熱問題である。プリズムを平らにするため、余分な部位を削る際に生じる摩擦熱により、アクリル板が変形してしまう。表示面を荒くし、光を拡散させている状態では目立たないものの、表面を研磨し

透明にした際にアクリルの変形部位が目立ってしまう。また、変形した部位の屈折が変形していない部位と異なるため、映像が歪んでしまう。三つめはユーザの視点位置に対する TUI のインタラクションの問題である。現在、プリズム内部に表示している像は平面であるため、空中にあるように感じられないといった意見がある。

これらの課題に対して次のような解決案が取れるのではないかと考える。一つ目と二つ目の課題に対して、アクリルと同様に導光が起こるような構造を、3D プリンタなどを用いて作成することで解決できるのではないかと考えている。また、三つ目の課題に対して、プリズムの表示面をレンチキュラー構造にし、立体視可能にすることで、ユーザの視点位置に合わせて像が変化し、より空中に浮いているように感じられるのではないかと考える。

## 6. まとめ

積層導光プリズムはアクリルの持つ内部で全反射する性質を用いて水平面のディスプレイ映像を垂直方向へも拡張することができる。これにより、プリズム内部に像があるような疑似的な空中像を再現することができる。また、透明なオブジェクトの内部にインタラクションによって映像が変わるこれまでなかった TUI の可能性も持っている。

最後に、前述の考察を踏まえ、今後次の3つのことを実行する。まずは、現段階の設計を 3D プリンタにより、プリズム作成の簡易化と量産化可能な状態にする。次に、透明なマテリアルを用いて積層構造以外の構造でディスプレイからの光を導光することができる構造がないかを検討し、実装する。例えば、全反射による導光ではなく、リフレクターを用いた導光を行えるような構造を検討する。また、HMDなどに活用されている内部のプリズムの設計を調べ、用いることができないかを調査する。最後に、レンチキュラーシートを用いて、プリズム内部に生成される像が立体視することができないかを実験する。レンチキュラーシートによることで像の明るさや解像度は下がることも想定しうるが、まずは立体視可能なプリズムのプロトタイプを作成する。また、上記であげたような構造を変更するにあたり、元の映像と出力される像を一致させるため、カメラキャリブレーションによる映像の一致などを試みる。これらのことを今後の研究で進めていきたい。

## 7. 謝辞

本研究は、JPS 科研費 JK21K12004 の助成を受けたものです。

## 8. 参考文献

1) Ishii, H., & Ullmer, B. (1997, March). Tangible bits: towards seamless

interfaces between people, bits and atoms. In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems (pp. 234 - 241).

2) 室井克仁, 渡邊竜, & 大島登志一. (2022). CARAMEL: 電子ブロックと投影型 AR を用いて 電気の基礎を学ぶインタラクティブ理科教材の研究 (2) 電気回路認識インタフェースの試作. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2022 論文集, 2022, pp. 212 - 217.

3) Patten, J., Ishii, H., Hines, J., & Pangaro, G. (2001, March). Sensetable: a wireless object tracking platform for tangible user interfaces. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (pp. 253 - 260).

4) Jordà, S. (2010). The reactable: tangible and tabletop music performance. In CHI'10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (pp. 2989 - 2994).

5) Büschel, W., Kister, U., Frisch, M., & Dachselt, R. (2014, May). T4-transparent and translucent tangibles on tabletops. In Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces (pp. 81 - 88).

6) Takada, Y., Nakabayashi, R., & Fukuchi, K. (2012). Ficon: A Touch-capable Tangible 3D Display using Optical Fiber. In Proc. ITS'12 Workshop: Beyond Flat Displays.

7) Williams, C., Yang, X. D., Partridge, G., Millar-Usiskin, J., Major, A., & Irani, P. (2011, May). TZee: Exploiting the lighting properties of multi-touch tabletops for tangible 3d interactions. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1363 - 1372).

8) Baudisch, P., Becker, T., & Rudeck, F. (2010, April). Lumino: tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (pp. 1165 - 1174).

9) 寛康明, 飯田誠, 苗村健, & 松下光範. (2006). Tablescape Plus: インタラクティブな卓上映像シアター (「グラフィックスとアルゴリズム」 特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11(3), 377 - 385.

10) Willis, K., Brockmeyer, E., Hudson, S., & Poupyrev, I. (2012, October). Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices. In Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology (pp. 589 - 598).

11) Ullmer, B., & Ishii, H. (1997, October). The metaDESK: models and prototypes for tangible user interfaces. In Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology (pp. 223 - 232).