



# 非平面スクリーンへの立体投影における 焦点走査眼鏡による輻輳調節矛盾の軽減

木村宙志<sup>1)</sup>, 岩井大輔<sup>1)</sup>, 佐藤宏介<sup>1)</sup>

Sorashi KIMURA, Daisuke IWAI, and Kosuke SATO

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, kimura@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp)

**概要:** 従来の両眼視差を用いた立体投影では、投影像が提示する奥行によらず常にスクリーン上に固定されているため輻輳調節矛盾が発生する。輻輳調節矛盾はユーザに不快感、眼精疲労、及び奥行知覚精度の低下などの問題を引き起こす。本発表では、高速プロジェクタと可変焦点レンズを用いて、焦点走査眼鏡と同期した時間多重化投影を行う非平面スクリーンへの立体投影システムを提案する。

**キーワード:** 立体・空中像ディスプレイ, プロジェクタ, 拡張・複合現実

## 1. はじめに

投影型複合現実感 (Mixed Reality: MR) はプロジェクタを用いて実物体上に映像を投影し、仮想空間の情報を実空間に融合させる技術である。投影型 MR において、ユーザに対して仮想物体を任意の奥行に提示する手法を、ここでは立体投影と呼ぶ。立体投影では、液晶シャッターなどを用いて両眼に異なる投影画像 (両眼視差投影画像) を提示し物理的な視差と異なる視差を与えることで仮想物体の様々な奥行情報をユーザに提示する。頭部搭載型ディスプレイを用いて仮想物体を実世界に重畳する一般的なビデオシースルー型 MR と比べて、立体投影は実空間に直接投影するため、実空間の質感やスケール感が失われにくいという利点がある。実空間への立体投影は工業製品の形状のデザイン支援やテレプレゼンスなど幅広い分野で応用が期待される [1]。

立体投影では輻輳調節矛盾が発生する。輻輳調節矛盾とは輻輳と焦点調節が一致しないことである。輻輳とは物体を注視する際に両眼を内側に回転させる眼球運動のことで、焦点調節とは水晶体の厚みを変えることで注視物体に焦点を合わせることである。図 1 は実空間と立体投影における輻輳距離と調節距離を示している。ここで、輻輳距離とは両眼の視線の交差点までの距離で、調節距離とは眼が焦点を合わせている面までの距離である。図 1 の左図のように実空間において輻輳距離と調節距離は一致する。しかし、同右図のように立体投影において輻輳距離は両眼視差投影画像により意図する距離に誘導されるが、調節距離は投影像に合焦させないと視認できないため物理的なスクリーン付近となる。そのため、輻輳と焦点調節に不一致が生じる。輻輳調節矛盾は立体投影だけでなく、従来の単純な両眼視差提示方式の立体ディスプレイでも同様に発生する。輻輳調節矛盾はユーザに不快感、眼精疲労、及び奥行知覚精度の低下などの問題を引き起こすため、その解決に向けての研

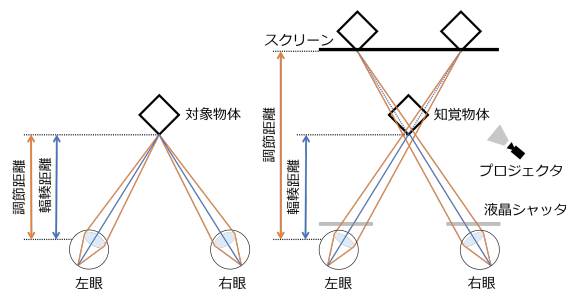


図 1: 輻輳距離と調節距離

究開発が盛んに行われている [2]。一方、これらの研究のほとんどが、ビデオシースルー型 HMD を対象としたものであり、立体投影における輻輳調節矛盾を解決する試みはほとんど行われてこなかった。そこで、本研究では輻輳調節矛盾を軽減する立体投影の手法を提案する。また、投影対象は投影型 MR において一般性のある非平面スクリーンとする。

## 2. 提案手法

本研究では、ユーザに提示したい 3 次元シーンを奥行にに応じて分割し、分割した画像の虚像を目標シーンの奥行と一致した位置に光学的に配置し多重化することで、正しい焦点調節刺激を呈示する。投影像を所望の奥行に光学配置するため、電気式可変焦点レンズ (Electrically Focus-Tunable Lens: ETL) を眼鏡として用いる。ETL の焦点距離を連続的に変化させ、それと同期した高速プロジェクタから分割した画像を順に投影することで、それぞれの虚像を複数の所望の奥行に配置する。ユーザに ETL の焦点距離変化に起因するフリッカを感じさせないためには、高速に焦点距離を変調できる ETL とビデオレートよりも更新レートが数桁以上高い高速プロジェクタを用いる必要がある。また、ETL は眼鏡として用いるため大きな口径が求められる。立体投

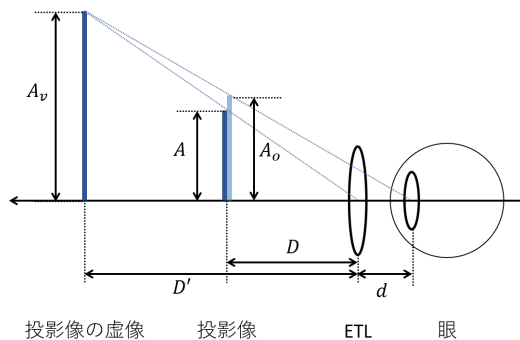


図 2: 光学的配置

影で両眼視差投影画像を提示する手法には最も簡易である時分割アクティブシャッタ方式を用いる。

### 2.1 ETL による投影像の虚像

ETL を通して投影像を観察するとき、ユーザは投影像の虚像位置に焦点調節することで投影像に焦点を合わせる。そのため、投影像の虚像位置を目標の 3 次元シーンに合わせることで輻輳と焦点調節の不一致が解消される。投影像の虚像は ETL の焦点距離と ETL からスクリーン上の投影像までの距離から以下のように表される。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D} - \frac{1}{D'} \quad (1)$$

ただし、 $f$  は ETL の焦点距離、 $D$  は ETL から投影像までの距離、 $D'$  は ETL から投影像の虚像までの距離を表す (図 2)。式 (1) より、ETL から投影像の距離と ETL の焦点距離から、投影像の虚像を所望の位置に配置することができる。ここで、ETL から投影像の距離  $D$  は ETL からスクリーンの距離と同じである。スクリーンが ETL の光軸に垂直な単一平面でない場合、 $D$  はプロジェクタ画素のスクリーン上での位置によって異なる値となる。

また、投影像の虚像は眼に装着した ETL の焦点距離によって ETL の光軸を中心に拡大縮小する。拡大縮小倍率は以下の式で表される。

$$\frac{A_o}{A} = \frac{f(D+d)}{f(D+d) - Dd} \quad (2)$$

ただし、 $A$  は投影像の光軸からの距離、 $A_o$  は観測される投影像の虚像のスクリーンの奥行における光軸からの距離、 $f$  は ETL の焦点距離、 $D$  は ETL から投影像までの距離、 $d$  は ETL から眼までの距離を表している。この拡大縮小倍率から、あらかじめ投影画像において光軸を中心に幾何補正することで正確に多重化することができる。

### 2.2 3次元シーンの分割

立体投影において提示する 3 次元のシーンの奥行は単一ではないことが多い。そこで、提示したい 3 次元シーンを深度に応じて分割する。分割した画像の虚像はそれぞれを所望の奥行に配置し時間多重化投影する。フリッカを感じないように ETL の焦点走査と投影を高速に行うことで、ユーザは分割した投影像の虚像を融合して知覚できる。

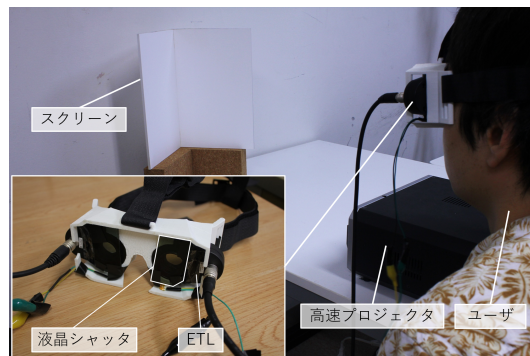


図 3: 実験システム

3 次元シーンの分割には線形深度フィルタリングを用いる。線形深度フィルタリングは、提示する画素の奥行の近傍の 2 枚の画像提示面に、距離に応じて画素輝度を配分させる手法である。線形深度フィルタリングにより画像提示面の間で連続的な焦点調節刺激を呈示できることが示されている [3]。画像提示面の奥行方向の間隔を広げると奥行知覚の精度を低下させることから、線形深度フィルタリングの画像提示面の間隔は  $0.6 D$  以下とすることが推奨されている [4]。これらの先行研究と同様に、本システムでも深度に応じた線形フィルタリングを行う。

## 3. 実験

### 3.1 実験システム

高速プロジェクタとして東京エレクトロデバイス製 TB-UK-DYNAFLASH, ETL として電流値により液体レンズの厚みを変化し焦点距離を変えることができる Optotune 製の EL-16-40-TC-VIS-20D を用いて実験システムを構築した (図 3)。ETL の制御に用いるレンズドライバには、National Instruments 製 NI USB-6211 と増幅回路を用いた。また、時分割アクティブシャッタ方式のため、液晶シャッタは 3D 眼鏡 RV-3DGDLP1 から取り出して用いた。これら機器の同期のためにマイコンボード Arduino Uno を用いた。

図 4 に実験システムの動作タイミングを示す。ETL の屈折力を 60 Hz で周期的に変化させ、それと同期して片眼 6 枚で計 12 枚の分割画像を順に投影する。ETL に装着した液晶シャッタの開閉により、投影像を提示する眼を切り替える。

### 3.2 検証実験

非平面スクリーンを対象として、目の位置にカメラを配置して、実験システムの投影像の虚像配置の検証を行った。本実験では、ETL の前方 33 cm から 166 cm に奥行方向に斜めに配置された市松模様の板状の仮想物体を提示する。投影対象の非平面スクリーンとして、図 3 に示す直角のコーナースクリーンを用いた。ETL とスクリーンのコーナー部までの距離は 50 cm とした。実験は暗室下で行った。

図 5 に撮影結果を示す。各画像の破線はスクリーンのコーナー部を示している。図 5(a),(b) は、ETL の屈折力を  $0 D$  に固定し従来手法と同じ条件にして撮影した結果である。図 5(a) は、焦点を ETL の前方 40 cm に合わせて撮影してお

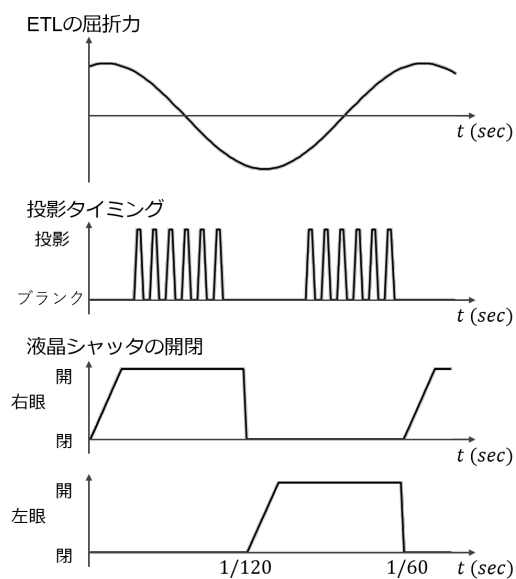
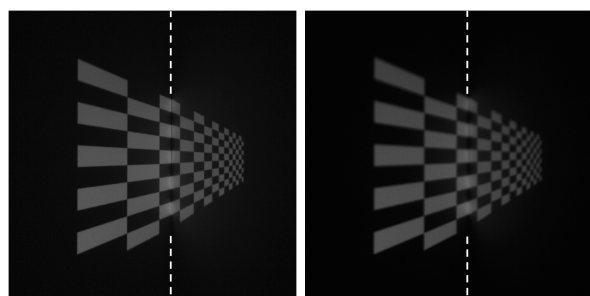
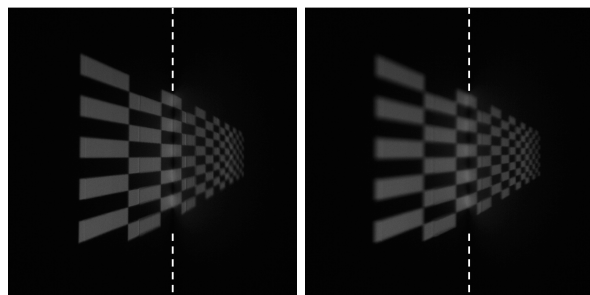


図 4: システムの動作タイミング



(a) 40 cm に合焦 (従来手法) (b) 120 cm に合焦 (従来手法)



(c) 40 cm に合焦 (提案手法) (d) 120 cm に合焦 (提案手法)

図 5: 撮影結果

り、提示物体全体に合焦している。図 5(b) は、カメラの焦点を ETL の前方 120 cm に合わせて撮影しており、提示物体全体で合焦せずにボケている。図 5(c),(d) は提案手法で、従来手法の条件と同様にカメラの合焦距離を変えて撮影した結果である。図 5(c) では、提示物体の手前側が合焦してる。図 5(d) では、提示物体の奥側が合焦してる。提案手法において、提示物体の所望の奥行に合焦していることから、投影像の虚像が所望の奥行に配置されていることを確認した。

#### 4. おわりに

本研究では、輻輳調節矛盾の軽減を目的とした立体投影の手法を提案し、実験システムを構築した。実験システムを用いて、非平面スクリーンを対象とした本システムの所望の動作を確認した。今後、本システムの視点移動や明室条件への拡張に取り組む予定である。

#### 参考文献

- [1] 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. IEEE, 2019.
- [2] David M Hoffman, Ahna R Girshick, Kurt Akeley, and Martin S Banks. Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of vision*, Vol. 8, No. 3, pp. 33–33, 2008.
- [3] Kevin J MacKenzie, David M Hoffman, and Simon J Watt. Accommodation to multiple-focal-plane displays: Implications for improving stereoscopic displays and for accommodation control. *Journal of vision*, Vol. 10, No. 8, pp. 22–22, 2010.
- [4] Simon J Watt, Kevin J MacKenzie, and Louise Ryan. Real-world stereoscopic performance in multiple-focal-plane displays: How far apart should the image planes be? In *Stereoscopic Displays and Applications XXIII*, Vol. 8288, p. 82881E. International Society for Optics and Photonics, 2012.