



液体可変焦点レンズと高速プロジェクタを用いた ダイナミックフォーカシング投影の基礎検討

Preliminary Experiment of Liquid lens based Dynamic Focusing Projection Using High-speed Projector

徐 鴻金¹⁾, 王 立輝²⁾, 渡辺 義浩¹⁾, 石川 正俊²⁾

Hongjin XU, Lihui WANG, Yoshihiro WATANABE, and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京工業大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

2) 東京大学 情報理工学系研究科 システム情報学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

概要: 本稿ではプロジェクタのフォーカシングに注目する。従来のプロジェクタのレンズは、ダイナミックに焦点距離を制御することが難しかった。そこで、高速なプロジェクタと液体可変焦点レンズを統合したシステムを新たに検討する。今回は本システムに基づく投影によって、異なる奥行きに配置された複数の対象面に、フォーカシングされた像が同時に提示されているように見える実験について報告する。

キーワード: オプティクス, 高速プロジェクタ, 焦点距離制御

1. はじめに

従来のプロジェクタの光学系は、大きな開口で設計されることが多かった。これは、光源から放射される光の損失を最小にするとともに [1], 高い解像度を達成するためである。しかし、このような設計の場合、プロジェクタの被写界深度 (Depth of Field) は浅くなる。このため、投影面は静止した平面のスクリーンであることが望ましかった。

一方、近年ではプロジェクションマッピングを始めとした投影型の拡張現実 (Spatial Augmented Reality) が注目されている [1]。このような応用では、非平面かつ動的に運動する物体への投影が求められている。このようなニーズに対し、既存のプロジェクタは被写界深度が浅いため、大きく奥行きが異なる面へ投影した場合、画像がぼけてしまう問題を抱えていた。

このような要請にこたえるために、被写界深度を広げる様々な手法が提案されている [1]。特に有効な手法として、プロジェクタと液体可変焦点レンズ (FTL, Focus Tunable Lens) を統合することで、被写界深度を拡大する研究がある。液体可変焦点レンズとは、液体間の境界面を変化させる原理で高速に焦点を変更することができるものである。この手法の例として、液体可変焦点レンズを高速かつ周期的に変調するとともに、ぼけ補償画像を投影することで、被写界深度を拡大する手法がされている [2]。しかし、この手法は事前にぼけ補償画像を準備する必要がある。このほかの事例として、本稿と同様に、従来のフレームレートを大幅に超える高速なプロジェクタと可変焦点レンズを組み合わせた事例がある [3]。一方、同事例はプロジェクタによる映像投影のフォーカシングを目的としたものではなかった。具体的には、液体可変焦点レンズを視聴者の眼鏡に搭載し、プロジェクタを照明として利用したものであった。このほ

か、対象までの距離をセンシングしながら、プロジェクタの焦点距離をダイナミックに制御する事例がある [4]。しかし、同事例では、センシングとプロジェクタの速度が遅い問題があった。

本稿では、液体可変焦点レンズと高速プロジェクタ [5] を用いたダイナミックフォーカシング投影について報告する。具体的には、[4] のレンズ制御方法の下、プロジェクタを高速化した点が従来と異なる。今回の報告では、動的シーンのダイナミックフォーカシング投影に向けて、異なる奥行きに配置された複数の対象面に、フォーカシングされた像が同時に提示されているように見える実験を行った。実験の結果、システムから 1.3m, 1.0m, 0.6m 離れた 3 つのフォーカシング面に同時にフォーカシングしているよう提示することが可能であることを確認した。

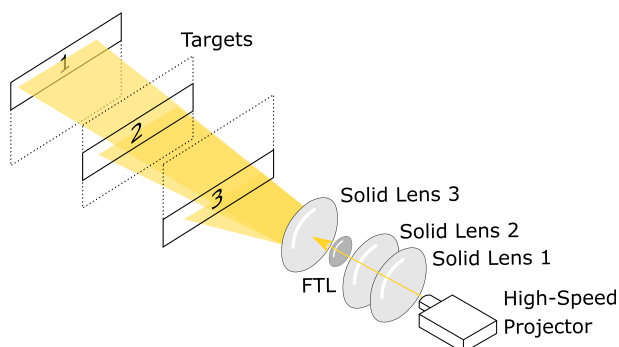


図 1: 提案システムの構成

2. 液体可変焦点レンズと高速プロジェクタを用いた ダイナミックフォーカシング投影

2.1 システム概要

図1に提案するシステムを示す。図では3つの対象面へ数字1, 2, 3を投影している様子を示している。本システムは、液体可変焦点レンズを含む光学系と高速プロジェクタから構成される。本システムでは、異なる奥行きの方へフォーカシングするように、焦点距離を変化させながら、同期して映像を投影する。この焦点制御と映像投影を高速化することで、異なる奥行きに同時にフォーカシングしているような投影を実現する。これを実現するためには、各投影面での投影画像の更新頻度が、臨界融合周波数 [6] を超える必要がある。本稿の実験では同周波数として 60Hz を採用した。

2.2 液体可変焦点レンズを含む光学系

提案する光学系は図1に示されるように、3つの固体レンズと1つの液体可変焦点レンズの4つから成る。同光学系が、プロジェクタの投影光学系の前に設置されている。焦点距離が 50mm, 60mm である2枚の固体レンズは、液体可変焦点レンズの口径に投影光が収まるように画角を小さくするためのものである。焦点距離が 100mm である固体レンズ1枚は、液体可変焦点レンズからの光を集光するものである。

2.3 高速プロジェクタの投影制御

プロジェクタの映像投影と、液体可変焦点レンズの制御は同期している必要がある。この同期は様々な方法が考えられる。今回は、液体可変焦点レンズが変化するレートよりも、プロジェクタのフレームレートが高いことを利用した手法を採用する。具体的な動作の例を図2に示す。

図2は投影周期の一部を示している。液体可変焦点レンズは時刻 t_1 に焦点距離を変化させる。また、液体可変焦点レンズを調整する時間を Δt とした。投影像は時刻 $(t_1 + \Delta t) \sim t_2$ に投影される必要がある。本稿では、この時刻の間に1枚だけ映像を投影し、それ以外のタイミングでは全面黒の画像を投影する。この黒画像を投影する枚数を調整することによって、高速プロジェクタの1フレーム時間の分解能で同期をとる。1枚の映像投影に要する時間を t_p 、 i 番目の焦

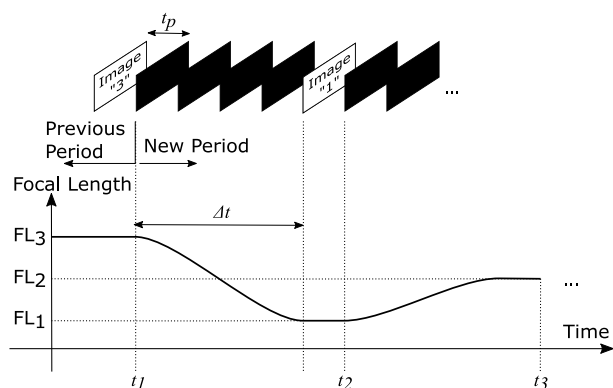


図2: 投影シーケンス

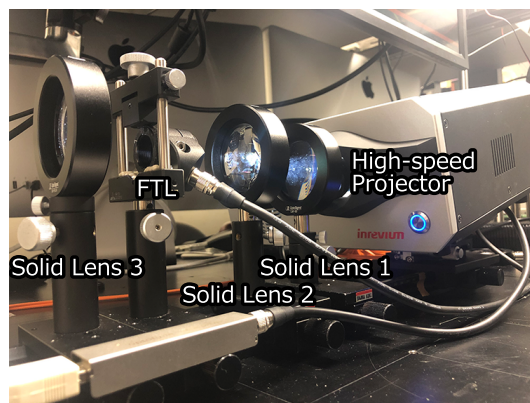


図3: 試作したシステム

点距離のための黒画像を投影する枚数を N_{bi} とする。各パラメータの具体的な値は3節で説明する。

3. 試作システム

図3に試作したシステムを示す。また、試作に用いたデバイスの仕様を表1に示す。光軸に沿って高速プロジェクタ、固体レンズ、液体可変焦点レンズを置く。液体可変焦点レンズの焦点距離は、コンピュータから制御される。また、映像もコンピュータから同レンズの制御と同期してリアルタイムに転送される。

2節で述べた各パラメータの値は、次の通りとした。今回用いた液体可変焦点レンズの場合、焦点距離の変化に要する時間が約 $\Delta t = 4\text{ms}$ 程度であった。 $t_p = 1\text{ms}$ の映像投影と組み合わせた場合、1枚の対象面の投影に要する時間は合計で約 5ms となる。一方、臨界融合周波数 60Hz 程度を満たすためには、 $T = 16\text{ms}$ 程度ですべての対象面への投影を完了する必要がある。以上より、今回は投影する対象面の数を3とした。2番目の画像を投影するとき、レンズ面の振動が1番目と3番目の画像より顕著なので $N_{b1} = 4$, $N_{b2} = 5$, $N_{b3} = 4$ とした。以上で述べたパラメータは以下の数式を満たす。

$$T = (N_{b1} + N_{b2} + N_{b3}) \times t_p + 3 \times t_p \quad (1)$$

液体可変焦点レンズをより高速に制御できると 1000fps で投影できる高速プロジェクタを使うより以上の理論のような拡張性を持っている。

表1: システムの仕様

デバイス	仕様
High-speed Projector	1024×768, 1000fps
Solid Lens 1	Focal Length = 50mm
Solid Lens 2	Focal Length = 60mm
Solid Lens 3	Focal Length = 100mm
Variable Focus Lens	Optoune, EL-10-30

4. 実験

4.1 実験環境

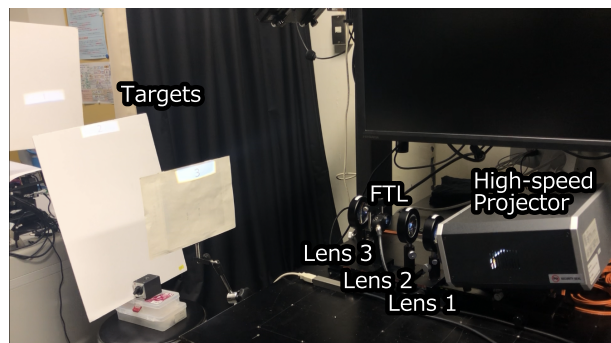


図 4: 深度設定

実験環境を図 4 に示す。本実験では 3 つの異なる位置に投影対象面を設置した。対象はそれぞれ平面である。また、焦点距離が 100mm である固体レンズからそれぞれの面までの距離は、1.3m, 1.0m, 0.6m である。

4.2 ダイナミックフォーカシング投影結果

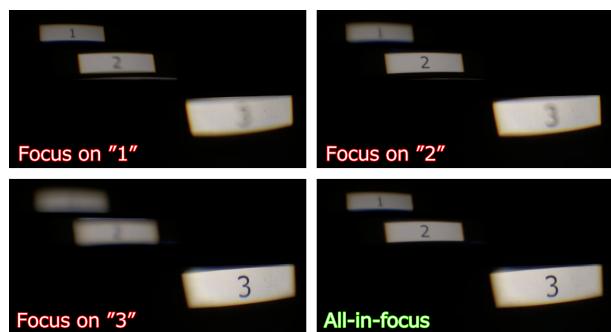


図 5: ダイナミックフォーカシング投影の比較結果

比較により、ダイナミックフォーカシング投影の結果を検証した。図 5 に結果を示す。図 5 左上, 右上, 左下の順に、それぞれ奥行き 1.3m, 奥行き 1.0m, 奥行き 0.6m でのみフォーカシングするように、液体可変焦点レンズの焦点距離を設定した結果である。このため、それぞれ設定していない奥行き位置では投影像がぼけていることが確認できる。このことから、各投影面間の距離はプロジェクタ単体の被写界深度よりも広いことが分かる。図 5 右下にはダイナミックフォーカシング投影の結果を示す。右下図より、ほかの結果とは異なり、すべての位置で投影像がフォーカシングしていることが分かる。

5. まとめ

本稿では、高速プロジェクタと液体可変焦点レンズを統合し、液体可変焦点レンズによるダイナミックフォーカシング投影について報告した。実験では、臨界融合周波数を満たす速度で、3 つの異なる深度を持っているターゲットに投影し、ダイナミックフォーカシング投影の結果を検証した。その結果、同時にフォーカシングしたように見える投影画像を得たことを確認した。

一方、今回の実験により、本稿の制御方式では、液体可変焦点レンズに振動が生じることが分かった。これは、投影面を増やすうえで問題となる。同レンズの動作安定化に向けた制御方法の改善が今後の課題である。

参考文献

- [1] Grundhöfer A., Iwai D.: Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and applications, Computer Graphics Forum, Vol. 37, No. 2, pp. 653–675, 2018.
- [2] Iwai D., Mihara S., Sato K.: Extended depth-of-field projector by fast focal sweep projection, IEEE transactions on visualization and computer graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 462–470, 2015.
- [3] 上田龍幸, 岩井大輔, 佐藤宏介: 高速プロジェクタと可変焦点レンズを用いた空間非一様な焦点ボケ操作による拡張現実感, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会予稿集, pp. 14D-2, 2018.
- [4] Wang L., Xu H., Hu Y., Tabata S. and Ishikawa M.: Dynamic Depth-of-Field Projection for 3D Projection Mapping, Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. INT021, 2019.
- [5] Watanabe, Y., Narita, G., Tatsuno, S., Yuasa, T., Sumino, K., Ishikawa, M.: High-speed 8-bit Image Projector at 1,000 fps with 3ms Delay, J. Gen. Physiol., The International Display Workshops, pp. 1064–1065, 2015.
- [6] Hecht S., Schlaer S.: Intermittent stimulation by light: The relation between intensity and critical frequency for different parts of the spectrum, The Journal of General Physiology 19, J. Gen. Physiol, Vol. 19, pp. 965–977, 1936.