



# 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

上田龍幸<sup>1)</sup>, 岩井大輔<sup>1)</sup>, 佐藤宏介<sup>1)</sup>

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

**概要:** 焦点ボケを用いることで背景情報を残した自然な隠蔽や特定領域への視線誘導といった効果が得られる。そこで我々は、焦点ボケを自在に操作することによりこうした効果を実現したいと考えた。本研究では、光学的な焦点ボケの操作による拡張現実感の実現を目的とし、高速プロジェクタと同期した可変焦点レンズを観察者が装着し使用することで、空間非一様な焦点調節可能システムを提案する。

**キーワード:** 身体拡張, 拡張現実感 (AR)

## 1. はじめに

自然な視覚情報抑制の代表例にボケ表現が挙げられる。ボケ表現には、観察者から特定領域を隠蔽する効果や、注目させたい領域を浮き立たせる効果があり、多くの写真や映像において焦点ボケを用いた表現が効果的に用いられている。焦点ボケは、背景にある情報を完全に隠さず、その文脈情報を残すことから自然な視覚の操作を行うことができると考えられる。

本研究では、焦点ボケを光学的にかつリアルタイムに制御することで、人の視覚情報を操作する AR システムの開発を目指す。光学的な仕組みを採用する AR ディスプレイである、光学シースルー HMD やプロジェクション型 AR では、焦点ボケを再現するような表現の実現は困難である。光学シースルー HMD では、多くの場合焦点位置が実対象とずれてしまう。プロジェクション型 AR では、解像度が充分でないため、実対象の高周波成分を抑制できない。こうした理由から、実対象と提示情報をピクセル単位でブレンドするようなアプリケーションの実現は原理的に難しい。また、両者に共通する点として、どちらも輝度値の足し合わせしかできないため、輝度の表現幅の限界により、目標とする焦点ボケを再現する保証はない。そこで既存の AR システムに焦点ボケを適応することができれば、場面に応じた AR の選択肢の増加につながると考えられる。

しかしながら、一般的なレンズでは単一の深度にある対象のみへの合焦は可能だが、特定の深度にある対象のみをボケさせ、他の複数の深度にある対象に対し同時に合焦させるといったことは不可能である。そこで、高速プロジェクタと液体可変焦点レンズ (Focus Tunable Lens: FTL) を組み合わせることでこの問題に取り組む。空間非一様な、すなわち異なる距離にある複数の領域に対し焦点調節可能な手法を提案し、実験によってその有効性を示す。

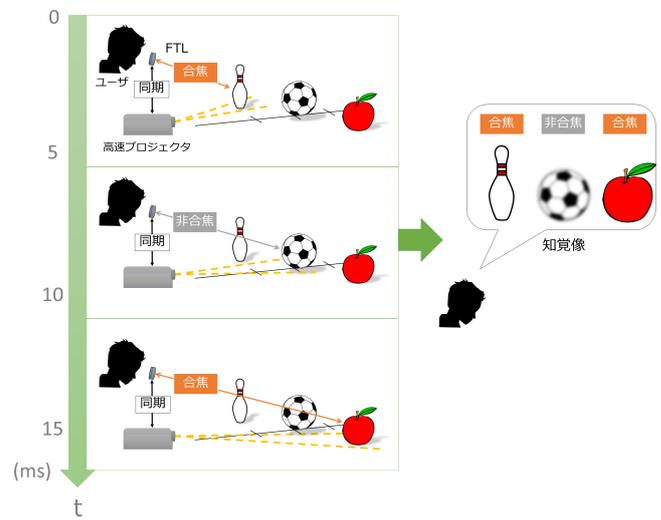


図 1: 提案手法概要

## 2. 提案手法

本研究では、電流値の制御により合焦距離を変調できる FTL と、光源として使用する高速プロジェクタを用いた合焦距離変調手法を提案する (図 1)。FTL を人の眼に装着し、制御することで周期的に合焦距離を前後に変調する。対象領域に FTL が合焦したときに光をあてることで、装着者は合焦シーンを観測する。一方、対象領域に FTL が非合焦したときだけ光をあてることで、装着者は非合焦シーン、すなわちボケの生じたシーンを観測する。これらの焦点制御を高速に繰り返すことで、臨界融合周波数を超える高い時間周波数の光変化を人が知覚できないという特性 (Talbot-Plateau の法則 [1]) により、対象領域に対する見え方が平均化されて知覚されることを利用したシステムを構築する。臨界融合周波数とは、視覚刺激をコントラスト反転した際にフリッカーが知覚されなくなる周波数である。人の眼の臨界融合周波数は明順応の度合いによるが、およそ 60 Hz である。

本提案手法において、臨界融合周波数を満たす投影、す

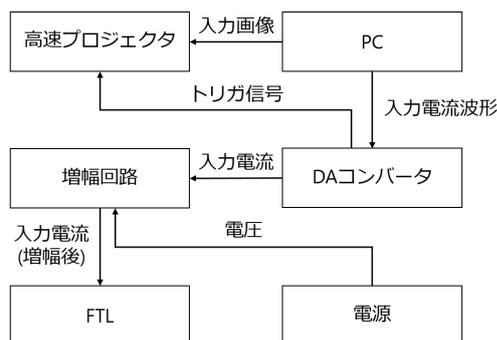


図 2: システム概要

なわちリフレッシュレートが 60 Hz の投影を行いたい深度それぞれに対し FTL が所望の合焦距離となるタイミングで行う必要がある。そのため、少なくともプロジェクタには投影を行いたい深度の数の 60 倍の周波数が求められる。なるべく早いリフレッシュレートのプロジェクタが必要であるため、1,000 Hz で投影画像の切り替えが可能である高速プロジェクタを光源として使用する。この手法によりプロジェクタのピクセルごとに焦点調節が可能となり、深度に依存しない焦点ボケの制御が行うことができると考えられる。

### 3. システム概要

提案システムは、焦点を变調する FTL、FTL と同期した投影を行う高速プロジェクタ、FTL の入力電流及び同期信号を送出する DA コンバータ、DA コンバータの出力電流を FTL に対応した電流値へと増幅する増幅回路、電源、そしてこれらを制御する PC から構成される (図 2)。さらに、システムの評価のためユーザの視覚の代わりに FTL を装着したカメラを使用する。

FTL は、電流値の制御により合焦距離を变調可能で、液体 FTL の中で比較的大きい口径を持つ EL-16-40-TC (Optotune 製) を用いる。高速プロジェクタは、1,000 Hz で投影可能な DynaFlash (東京エレクトロニクス製) を用いる。プロジェクタと FTL の同期には、DA コンバータ NI USB-6211 (National Instruments 製) を用いる。DA コンバータが出力するトリガ信号を FTL の遅延に合わせ変形したのち、プロジェクタに入力することで FTL とプロジェクタ間の同期を行う。この応答速度についての測定を 3.1 節で行う。また、提案システムでは FTL に正弦波電流を送ることでレンズの周期的な制御を実現し、その駆動周波数は臨界融合周波数に基づいて 60 Hz とする。所望の合焦距離を得るための FTL の最適制御を 3.2 節で行う。

#### 3.1 FTL の応答速度測定

高速プロジェクタと FTL 間の制御ではミリ秒単位の同期が重要となる。そのため、FTL の応答速度を求め、同期に使用するトリガ信号を補正する。

FTL の応答速度測定の手法を述べる。FTL を通過したレーザー光線をフォトダイオードの受光部に当て、FTL の合焦距離を变調する。FTL の合焦距離の振動によりレーザー径の大きさが変化するとともに光の強度に変化が生じるため、

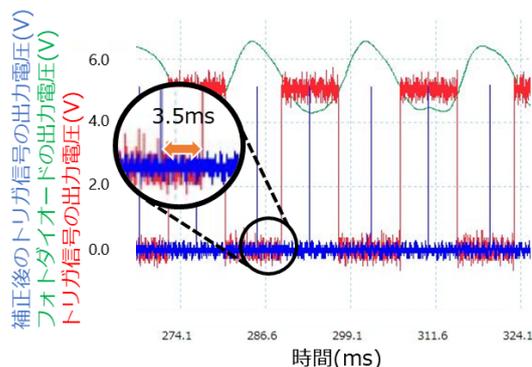


図 3: FTL の応答速度測定

これをフォトダイオードで計測する。ボケが小さいときはフォトダイオードの受光部に入射する光の強度が上がる一方、ボケが大きいとフォトダイオードの受光部に入射する光の強度は下がる。フォトダイオードは受光部に入射する光子数に対して線形な電流を出力する。この電流を電圧に変換し、このフォトダイオードの出力電圧を測定することで、間接的にレンズの状態を計測することができる。

オシロスコープを用いて、フォトダイオードの出力電圧およびアンプより出力されるトリガ信号を測定する。FTL の入力電流は最大電流 50 mA、最小電流-50 mA の正弦波とし、駆動周波数は 60Hz とする。測定結果及びトリガ信号補正後の結果を図 3 に示す。赤色の値がアンプが出力するトリガ信号、緑色の値がフォトダイオードの出力電圧、青色の値がマイコンボードが出力するトリガ信号を示す。アンプが出力するトリガ信号とレンズの合焦距離のピーク時に間に 3.5 ms の遅延が確認できた。よって使用する FTL の応答速度は 3.5 ms である。

この値を用いて補正した例が青色の値である。この例ではレンズの状態が最大の合焦距離を持つ場合、つまりフォトダイオードの出力電圧が下限値となる場合と、最小の合焦距離を持つ場合、つまりフォトダイオードの出力電圧が上限値となる場合にプロジェクタの投影画像を切り替えるようトリガ信号を変形し補正した。

#### 3.2 FTL の最適制御

液体 FTL はレンズ内部の液体を制御することで焦点を变調している。特にレンズの口径が大きくなるにつれ、焦点变調の際に移動する液体量が増え、単純な制御入力では目標となる焦点变調への追従性が低下する。そこで、FTL への入力波形を最適化する。

FTL の入力電流に対する合焦距離の変化は非線形変換であり、その特性は不明である。定常状態での入出力を計測することで、その非線形変換を近似的に導出することができる。FTL の非線形変換をその計測値に適応し入力電流値に変換することで、FTL のステップ応答の線形時不変性を仮定することができる。そのとき、インパルス応答  $f$  はステップ応答と同様に線形時不変とすることができ、入力  $u$  とインパルス応答  $f$  の畳み込みにより出力を計算できる。この

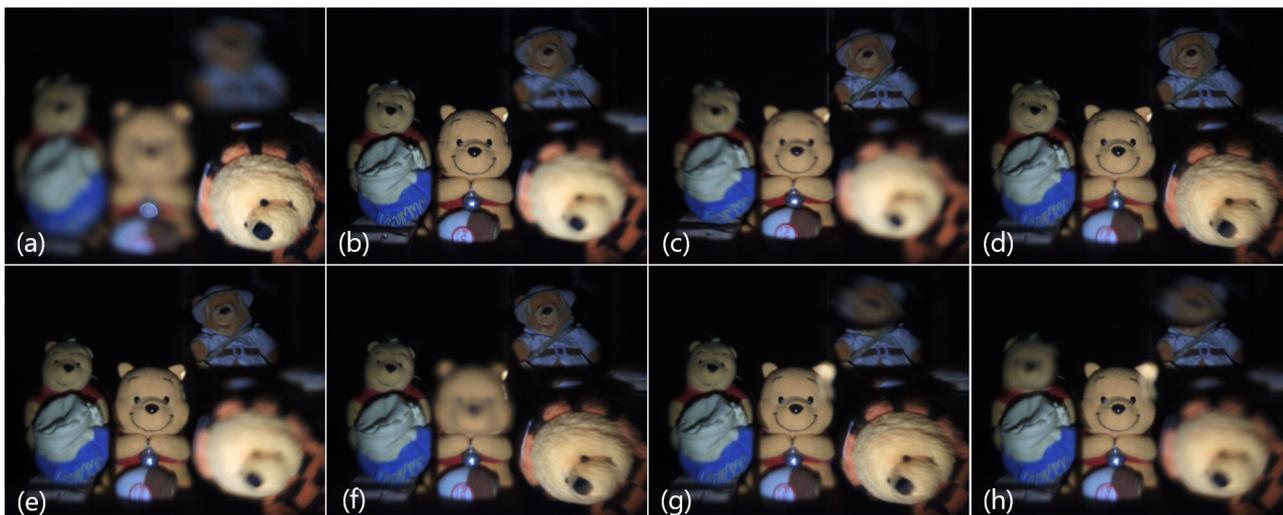


図 4: 焦点ボケの操作結果 (a)A にのみに合焦する様子. (b)B1, B2 にのみに合焦する様子. (c)C にのみに合焦する様子. (d)A, B1, B2, C 全てに合焦する様子. (e)A のみをボケさせた様子. (f)B2 のみをボケさせた様子. (g)C のみをボケさせた様子. (h)B2 のみに合焦する様子.

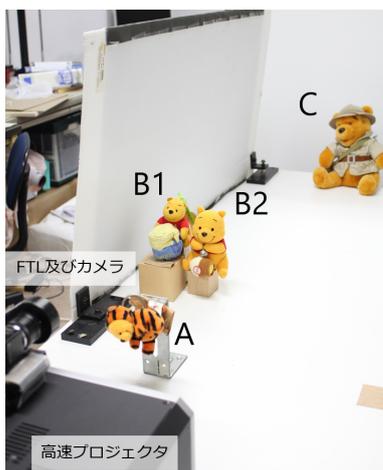


図 5: 実験装置

とき, 目標  $R$  で制御するための最適化問題を定義する.

$$\text{minimize } \alpha \|R - f \otimes u\| + (1 - \alpha) \|u''\| \quad (1)$$

$\alpha$  は目標との差分に対する重み, 第一項は目標との差分, 第二項は入力波形の滑らかさを保証する項となっている. この最適化の評価関数は凸関数となっており, 凸最適化で解くことができる. 本研究では, 3.1 節と同様の手法で FTL のステップ応答を計測し, その後本節で述べた手法で最適制御を行う. 本手法は, 永原のスパースモデリングを参考にした [2].

#### 4. 実験

第 3 章で述べた提案システムによって, 合焦距離変調が実現できていることを確認するため, 実験を行った. プロジェクタから異なる距離に複数の対象を配置する. 今回の実験では投影対象として深度の異なる位置に 4 個のぬいぐるみ A, B1, B2, C を用意する. カメラからの距離は A,

B1, B2, C それぞれ 25 cm, 50 cm, 50 cm, 130 cm とした. FTL, プロジェクタ, カメラ及び投影対象の構成を図 5 に示す. FTL の駆動周波数は 60 Hz とする. なお, 実験は暗室でプロジェクタを光源とする環境で行う. 様々な領域に焦点ボケが生じるようそれぞれ投影画像を作成し投影を行った.

結果を図 4 に示す. それぞれ合焦するよう設定したぬいぐるみがくっきりと見え, ぬいぐるみに合焦していると考えられる. また, ボケるよう設定した位置のぬいぐるみに焦点ボケが生じている. よって, 異なる距離にある複数の領域に対し焦点調節が可能であると言える. ゆえに, 光学的に焦点ボケを自在に操作できることから, 空間非一様な焦点ボケ操作が実現した.

#### 5. おわりに

本研究では, 高い時間周波数の光変化を人が知覚できないという特性により視覚情報を合成した合焦領域の拡張手法を提案し, 合焦距離変調システムを作成した. システムの開発にあたり高速プロジェクタと FTL の制御を行った. 実験結果から, 高速プロジェクタと, これに同期した FTL を用いることで, FTL の合焦領域かつプロジェクタの投影領域である領域において, 空間非一様な焦点ボケの操作が行われていることが示された. 今後はシステムの拡張や人の眼への適応に取り組む.

#### 参考文献

- [1] Thomas M. Nelson and Bartley S. Howard: The Talbot-plateau law and the brightness of restricted numbers of photic repetitions at CFF, Vision Research, Vol. 4, pp. 403-411, 1964.
- [2] 永原正章. "スパースモデリング-基礎から動的システムへの応用", コロナ社