

令和5年度  
修士論文要旨集

高知大学大学院 総合人間自然科学研究科

理工学専攻 情報科学コース

ホログラフィは、参照光を三次元物体に照射し、その物体から発せられる物体光を光学フィルムなどの二次元媒体(ホログラム)に忠実に記録・再生する技術である。記録の際に使用した参照光をホログラムに照射することで、記録された物体光が忠実に再現され、元の三次元物体が映像として再生される。このように、ホログラフィによって再生される立体像は、視覚疲労が生じず、様々な角度から眺めることが可能である。しかし、光学フィルムを用いたアナログのホログラフィでは CGH の書き換えができず、動画再生を実現できない。

三次元動画再生を行うために、コンピュータで計算された計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, CGH) と、CGH の電子表示デバイスである空間光変調器 (Spatial Light modulator, SLM) を用いる。SLM 上に表示される CGH は計算により書き換えることができる。このことから、CGH によって電子化されたホログラフィ(電子ホログラフィ)は、“究極の三次元テレビ”になると考えられている。また、CGH には振幅型と位相型がある。振幅型 CGH の計算量は、位相型 CGH の計算量の半分である。しかし、振幅 CGH に参照光を照射すると、再現された物体光による再生像と、再生像と CGH に対して対称の位置にある共役像が再生される。そのため、鮮明な再生像を得るには、共役像と重ならないようにする必要がある。一方、位相型 CGH は、計算量が振幅型 CGH の 2 倍となるが、再生像は振幅型に比べて明るい。さらに、位相型 CGH では共役像が再生されないため、再生像が共役像と重なることはない。振幅型および位相型 CGH は共に計算量が膨大であり、実用化を妨げている。CGH の解像度が増えると、記録できる物体点数が増え、鮮明な再生像が得られるものと考えられる。しかし、解像度に比例して計算量も増え、さらにリアルタイム三次元動画再生を困難にする。

三次元物体モデルとして点群で構成されたポイントクラウドモデルを用いる。ポイントクラウドモデルの位相型 CGH は、画素ごとに独立した計算が可能であり、並列計算に向いている。また、計算された位相型 CGH は、画像として SLM に表示させることから、Graphics Processing Unit (GPU) に向いている。当研究室では、GPU を用いた CGH 計算高速化の研究を行ってきた。さらに、複数の GPU を搭載したマルチ GPU クラスタシステムによる CGH 計算高速化の研究も行っている。このシステムでは、CGH 計算を行う計算ノードと、計算された CGH を空間光変調器に表示する表示ノードからなる。計算ノードでは、1 ノードに複数の GPU を搭載する。三次元動画の各フレームの CGH 計算を各 GPU に割り当てパイプライン計算を行う。このようにして、スケーラビリティが高く顕著な計算高速化を実現している。

本研究では、マルチ GPU クラスタシステムによる 4K 解像度位相型 CGH のリアルタイム三次元動画再生を目的とする。CGH の解像度が 4K (3840×2048) となると、三次元モデルを記録できる領域が増え、1 画素の大きさも小さくなる。よって、高精細な三次元動画再生が期待できる。しかし、4K 解像度を持つ 1 枚の位相型 CGH のデータ量は約 64 Mbit となる。従来の Gigabit Ethernet を用いたマルチ GPU クラスタシステムでは、CGH の転送時間が 1 枚当たり 64ms となり、ボトルネックが発生してしまう。そこで、10 Gigabit Ethernet を用いたマルチ GPU クラスタシステムを構築し、ボトルネックを解消する。最終的に、NVIDIA GeForce RTX 3080 を計算ノードに 12 枚、表示ノードに 1 枚搭載し、ネットワークに 10 Gigabit Ethernet を使用したマルチ GPU クラスタシステムにより、4K 解像度位相型 CGH で約 10 万点からなる三次元物体を 30fps の速度でリアルタイム三次元動画再生することに成功した。

近年、新型コロナウイルス感染症が猛威を振るい、感染症予防対策のため、非接触タイプの空中ディスプレイが注目を浴びている。空中ディスプレイとは、光源からの光を光学系によって集束させ、空中に実像を結像させるディスプレイのことである。光源からの光を集束させる光学素子として、再帰性透過光学素子や再帰性反射材が用いられる。空中ディスプレイによる再生像は実像であり、裸眼で空中像を観察することが可能となる。しかし、現在実用化されている空中ディスプレイは、液晶ディスプレイなどの平面画像を光源とし、そのまま空中に投影するものが主流となっている。再生される空中像は二次元映像のため、視野角が狭く、正面から眺めるものとなっている。そのため、複数の観察者が同時に様々な方向から眺めることはできない。

著者らは、ホログラフィックプロジェクタと再帰反射材を用いて三次元映像を空中に再生する手法を提案している。これをホログラフィック空中ディスプレイと呼ぶ。ここで、ホログラフィックプロジェクタとは、コンピュータで作成された計算機合成ホログラム（CGH）に平行光を照射させ、その回折光により三次元映像を実像として投影することができるプロジェクタのことである。1台のホログラフィックプロジェクタで、レンズを用いずに、距離や形状が異なる複数の立体スクリーンに焦点のあった三次元映像を投影することができる。ホログラフィック空中ディスプレイでは、ホログラフィックプロジェクタによって、透過拡散材で作成された立体スクリーンに焦点のあった三次元映像を投影する。立体スクリーンに投影された三次元映像は透過しながら拡散する。その拡散光はハーフミラーを通過して、再帰反射材に入射する。再帰反射材に入射した光は、入射方向へ再帰反射され、立体スクリーンへ集光しようとする。立体スクリーンへ集光しようとする光が、ハーフミラーで反射され、空中に三次像が結像される。つまり、三次元の実像が空中に表示される。この三次元空中像は、ハーフミラーから観察者側の離れた位置で空中に浮かぶ。複数の観察者が、同時に、裸眼で空中に浮かぶ三次元映像を様々な角度から眺めることができる。

本研究では、観察者の目の前と遠くの広い空間に、三次元映像の実像と虚像を空中表示することを可能とする空中ディスプレイ装置の開発を目的とする。本装置は、ホログラフィックプロジェクタにより、透過拡散材料で作られた立体スクリーンと、ハーフミラー上方に設置された反射材で作られた立体スクリーンに焦点のあった三次元映像を投影する。前者の立体スクリーンからの透過拡散光によって三次元映像の実像が空中表示される。一方、ハーフミラー上方に設置された反射材で作られた立体スクリーンからの反射光はハーフミラーへ照射され、その反射光が観察者の目に入る。これにより、観察者はハーフミラーの奥に浮かぶ三次元映像を虚像として視認することができる。このようにして、観察者の目の前と遠くの広い空間に、三次元映像の実像と虚像が同時に空中表示される。

4K 解像度の CGH による三次元映像のリアルタイム投影を可能とするホログラフィックプロジェクタを用いてホログラフィック空中ディスプレイ装置を開発した。最終的に、本研究で開発したホログラフィック空中ディスプレイ装置を用い、最大 22,955 点からなる 3 つの三次元動画を、観察者の目の前と遠くの広い空間に実像と虚像として、リアルタイムで空中表示することに成功した。

# 階調表現と高精細化が可能なリアルタイム時空間分割電子ホログラフィ

情報科学コース

成島佑華

ホログラフィとは、三次元物体からの光の波面を忠実に記録・再生できる唯一知られた技術である。この光の波面を、干渉縞としてフィルムなどの媒体に保存したものをホログラムという。ホログラムからの再生像は、裸眼で様々な角度から見ることができ、視覚疲労もなく長時間利用可能である。コンピュータによって作成されるホログラムを、計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)という。CGH からの再生像もアナログなホログラフィと同様に眺めることができる。よって、ホログラフィを電子化した電子ホログラフィは、「究極の 3D テレビ」になると考えられている。しかし、未だ実用化には至っていない。

実用化を妨げている主な要因に CGH の計算量が膨大であることがあげられる。本研究では、点群データで構成された三次元物体から CGH を計算する。この CGH 計算は、Graphics Processing Unit(GPU)による並列計算に適している。当研究室では、GPU を用いた CGH 計算高速化の研究を行っている。具体的には、最新の GPU アーキテクチャに適した高速 CGH 計算手法の開発、同じ GPU を複数枚搭載したホモジニアス型マルチ GPU クラスタシステムによる CGH 計算高速化の研究が行われた。また、異なる GPU で構成されたヘテロジニアス型マルチ GPU クラスタシステムによる CGH 計算高速化の研究も行われた。

実用化に向け、電子ホログラフィの階調表現性の向上が望まれている。当研究室では、重み付きバイナリ CGH(BW-CGH: Binary-weighted CGH)をビットプレーンとして用い、3 枚のビットプレーンによる 8 階調を持つ三次元物体のリアルタイム動画再生に成功している。ここで、BW-CGH とは、白と黒の 2 値の振幅型バイナリ CGH において、白色部分を灰色で表した CGH のことである。BW-CGH において、灰色の階調値を変えるだけで再生像の明るさを自在に調整することが可能となる。さらに、複数枚の BW-CGH 計算において、重複計算を除去した効率的なアルゴリズムも提案している。本手法をマルチ GPU クラスタシステムに実装し、約 18 万点からなる 8 階調を持つ三次元物体のリアルタイム動画再生に成功している。しかし、実用化のためには、膨大な物体点で構成された階調を持つ三次元物体のリアルタイム再生が望まれる。

本研究では、約 100 万点の物体点数で構成された 8 階調を持つ三次元物体の高精細なリアルタイム動画再生の実現を目的とする。そこで、2 種類の GPU(NVIDIA GeForce RTX 3080, NVIDIA GeForce RTX 4090)を計算ノードに搭載したヘテロジニアス型マルチ GPU クラスタシステムを構築した。本システムは、4 ノードの CGH 計算ノード(合計 24 枚の GPU)と、1 枚の GPU を搭載した CGH 表示ノードからなる。なお、各 CGH 計算ノードには同一の GPU を 6 枚搭載した。2 種類の GPU に適した計算手法と、複数枚の BW-CGH 作成における重複計算除去法を、共に実装した。なお、計算ノードと表示ノード間の CGH 転送時間によるボトルネックを解消するため、10Gbps の高速なネットワークを用いた。性能評価を行ったところ、1,024,000 点から構成された 8 階調を持つ三次元物体を 50fps で再生できることがわかった。

また、三次元物体の点数が膨大になると、干渉縞がつぶれ、再生像の画質は劣化する。高精細な動画再生を実現するには時空間分割多重法が必要不可欠となる。本手法は、物体を空間に対して分割し、1 枚の CGH において表示する物体点数を減らすことで干渉縞の劣化を防ぐ。しかし、フレーム数が増えるため、高速な CGH 表示が必要となる。本研究では、1,120,000 点から構成された 8 階調を持つ三次元物体モデルを使用して、投影を行った。その結果、モデルを 6 分割して、240Hz のフレームレートを持つ表示デバイスを使い、40fps で高精細な 8 階調の再生像を確認できた。

# 研究授業レビュー支援システムにおける議論フェーズ支援ツールの開発

## 情報科学コース Barriga Swayne Naoto Fernando

高知県では、著しい過疎化の影響により、中山間地域の高等学校の存続維持が困難になっている。平成26年10月に策定された県立高等学校再編復興計画において、過疎化が著しく近隣に他の高等学校がない地域の学校は、特例として1学年1学級20人以上を条件として、最低規模での維持が決定された。しかし、1校あたりの教員数が非常に少ない状況が維持されることとなり、これに加えて、若手教員の授業に対し指導可能なベテラン教員の大量退職・採用の時期を迎えていることから、特に若手教員の早期の指導力向上が求められている。

教員の指導力を維持・向上させる仕組みとしては研究授業が知られている。本授業では、指導担当教員や学校長など、複数の教員が若手教員の授業を評価して助言を与える指導を行う。若手教員はこの指導を受けて、自己の教科指導を振り返り授業改善を行う。その有効性が実感されていることは、先行研究による高知県公立高等学校の教員127名を対象としたアンケート調査の結果からも明らかになっている。しかし、多忙な校務により研究授業に参加する教員の確保が困難であるという人間的な要因や中山間地域特有の学校間の距離があるという距離的な要因により研究授業の形骸化が問題視されている。

そこで本研究では、研究授業レビュー支援システムの構築を目的として、学習指導案の電子化や、授業の様子を収録した動画像の提示などを用いて、同期及び遠隔非同期に研究授業を「再現」する環境と、再現された授業に対するレビュー作業を実現する支援システムの開発を行った。そして、本研究では、本支援システムで作成された電子化指導案や指摘データ、授業動画などのレビューリソースを活用し従来より質の高い検討会を行うための議論支援ツールの開発を行った。一般に実施されている検討会は、実施された研究授業に対する対応策の協議を行う場を指しており、参観者から批評を得ることで、授業者のみならず教師全体の指導力向上を図ることを目的としている。去年、実際に現場で働かれている教員と教育実習生を通して実際に検討会に参加経験のある学生を対象とした「現在の検討会に不満があるか」を問うアンケート調査を実施した。結果、教育分野におけるICT技術がまだ発展途上なためか、現在でも昔ながらのやり方が取り入れられており、それに対し疑問を抱く人は極めて少なかった。しかし、ICT技術を取り入れることに前向きな意見がほとんどであったため、本研究では、ICT技術を検討会に導入することで従来より質の高い検討会の実施を目指す。

検討会にICT技術を導入することで新たに得られる利点は素早いコメントデータの収集、そして、収集したコメントデータの確認・整理が容易であり、授業動画や電子化指導案、指摘データなどのレビューリソースを用いることで授業の再現が可能だということである。したがって、それらの要素を取り入れたツール開発に努め、本支援ツールの活用を考慮した議論方式を定義した。また、定義した議論方式における本支援ツールの有用性を検証するため、実際に模擬検討会を行い議論を通して得られた全指摘数に対するグループ数の比較や事後アンケート調査による評価実験を行った。検証の結果、「時間情報を整理し順に指摘を表示する機能」や「指摘のグループ化機能」により指摘データを整理することでスムーズな議論進行に大きく貢献でき議論の質をより高めることができることが明らかになり、被験者へのインタビューとアンケート結果からも、研究授業レビュー支援システムにおける議論支援ツールの有用性を示すことができた。

# 習慣化支援アプリにおける試行錯誤を支援するための推薦機能及びシミュレーション環境の開発

情報科学コース

中村 丈太郎

自己実現のための学習は継続して行うことが重要であり、そのためには学習の習慣化が求められる。近年では習慣化を支援するためのアプリやシステムが増加しており、著者が所属する研究室においてもユーザがチームを作り、互いを励まし合うことでやる気の向上を図る習慣化支援アプリの開発を行っている。

しかし、習慣付けのためには励まし合うだけでなく自身に適した取り組み方を試行錯誤し模索することも重要である。そこで本研究では習慣化支援アプリに将来的に追加することを目指し、ユーザのシステム利用履歴データを利用したユーザ適応型の推薦機能を実装した。

始めに、本研究室が開発してきた習慣化支援アプリでは「英語を勉強する」などのユーザが習慣化したいことを「ワーク」と呼び、アプリにワークを登録した後、ワークに取り組む予定日時を登録する。その際にワークを達成するために取り入れる手段や道具である「工夫」があれば設定する。予定時刻が来るとユーザはそのワークに取り組み、実施結果をアプリに登録できる。例えばワークを「英語を勉強する」とすれば「図書館で実施する」、「参考書 A を使う」などが工夫になる。しかし、ユーザが選んだ工夫がそのユーザに適した工夫とは限らない。そこで本研究ではユーザに適した「工夫」を推薦することを目指して取り組む。

推薦機能の実装のためにはアプリを使用したユーザの利用履歴データが欠かせないが、現在はアプリを一般公開していない為データは存在しない。そのためシミュレーション環境を開発する。シミュレーション環境では複数ユーザのダミーの利用履歴データを生成でき、利用履歴データを用いて推薦をさせ、各ユーザが推薦を受けたその後もモニタリングできる。本研究ではシミュレーション環境の構築をメインに取り組み、完成したシミュレーション環境を用いて推薦手法の簡易的な検証を行なった。

推薦手法として協調フィルタリングを活用した手法とユーザの特性を考慮した手法を考案した。協調フィルタリングはユーザの購買履歴や視聴履歴などの嗜好情報をベクトルデータとして持たせベクトル間の類似度計算により、類似したユーザや類似したアイテムを導出する手法である。開発したシミュレータではこれらの推薦アルゴリズムを扱えるように設計した。

シミュレーションではユーザ、ワーク、工夫のデータモデルを定義し、ユーザ 1, ユーザ 2, 工夫 1, 工夫 2, ... など、それぞれ任意の数のデータを生成する。データモデルはそれぞれの個性をパラメータで表せるようにしたもので、例えばユーザのモデルであれば初期モチベーション、ワークや工夫を見直す閾値（どの程度うまくいかなかったら変更するか）などをパラメータで持たせておき、機械的で単調な動きではなく日によって「調子が悪く予定に取り組めなかった」、「調子が良かったので取り組めた」など、現実性のある動きを表現できるようにした。また、日が経つに連れて何の推薦も得られないままだと徐々に予定の実施結果が悪くなっていくようなシミュレーションを再現させている。環境の構築には Node.js を用い Web アプリとして実装した。シミュレーションは Web サーバで動作し、実行結果は Web ブラウザから確認できる。

本研究ではシミュレーション環境を開発し、考案した 2 つの推薦手法のうち、協調フィルタリングを活用した推薦手法のシミュレーションを行うことができた。シミュレーション上で推薦された「工夫」は、推薦を受け取るユーザに対して最も類似度が高いユーザの採用した工夫履歴を尊重している様子が窺えた。よって、本研究で開発した工夫の採用履歴を嗜好情報とした協調フィルタリング手法では実際に類似したユーザを正しく計算できていることが確認できた。また、採用された工夫が悪い成績を残してしまう場合があることや、類似度計算に用いるベクトルデータの値域が狭いため、ほとんどのユーザを類似ユーザだと判断してしまっているなど、課題点も確認された。

しかし、推薦アルゴリズムの調整やユーザの特性を考慮した手法のアルゴリズムをシミュレーション上で取り扱う用意はほぼ整っているため、今後、本シミュレーション環境を活用して推薦機能の改良を行うことは可能である。