

令和元年度
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

理学専攻

応用理学コース 情報科学分野

重み付きバイナリ計算機合成ホログラムを用いた 階調表現可能なリアルタイム電子ホログラフィ

応用理学コース 情報科学分野

坂口 朋哉

「究極の 3D テレビ」になるものと考えられている電子ホログラフィは、計算機合成ホログラム (CGH : Computer-generated hologram) の画像を空間光変調器 (SLM : Spatial Light Modulator) に表示し、それに再生光を照射することで三次元物体を再生する技術である。SLM として、プロジェクタに搭載された LCD パネルやデジタル・マイクロミラー・デバイス (DMD : Digital Micromirror Device) を用いることができる。これらの SLM は比較的安価であるが、256 階調の CGH 画像によって再生される像は暗くなってしまう。そこで、明るい像を再生するために、2 値化した CGH (バイナリ CGH) を白と黒の 2 色で描画した CGH 画像を用いる。しかし、バイナリ CGH を用いた場合、階調を持つ三次元像を再生することは容易ではない。

当研究室では、バイナリ CGH を活用して階調を持つ三次元物体を再生するために、重み付きバイナリ CGH (BW-CGH : Binary-weighted CGH) を考案した。バイナリ CGH 画像において白の階調値を下げ、灰色と黒で描画すると光の透過率を下げるができる。灰色の階調値を変更することで再生像の明るさを調整することが可能となる。この灰色と黒で描かれたバイナリ CGH が BW-CGH である。三次元物体を構成する物体点の輝度値により、それぞれの物体点をビットプレーンに割り当てる。BW-CGH をビットプレーンとして用い、ビットプレーンに割り当てられた物体点から計算により BW-CGH を作成する。複数枚の BW-CGH を時分割表示し、階調を持った三次元物体を再生する。再生像の明るさを調整するには、BW-CGH の灰色の輝度値だけを変更すればよく、再計算は不要である。

本研究では、BW-CGH を用いて 8 階調を持つ三次元物体のリアルタイム再生を実現することを目的とする。8 階調では 3 枚のビットプレーンを用いるため、BW-CGH も 3 枚必要となり計算量は 3 倍となる。SLM として DMD を 1 台使用し、120Hz のリフレッシュレートで動作させた。3 枚の BW-CGH の計算と DMD への表示を 8.3 ms 以内に行う必要があるため、BW-CGH の計算と表示に 7 枚の GPU を用いた。当初は 3 ノード構成のマルチ GPU クラスタシステムを用いた。2 ノードは BW-CGH を計算するノードであり、残りの 1 ノードは BW-CGH を表示するためのノードである。各 BW-CGH 計算ノードには 3 枚の GPU を搭載し、BW-CGH 表示ノードでは DMD に接続された 1 枚の GPU を搭載した。しかし、システムの規模は大きくなり、コストも高くなる。再度検討した結果、パッキング処理により BW-CGH 画像のデータ量が低減されるため、GPU 間の通信速度がそれほど必要ではないことがわかった。そこで、BW-CGH 計算ノードに、マイニング用マザーボードに 6 枚の GPU を搭載したマルチ GPU 環境 PC を用いてマルチ GPU クラスタシステムを構築した。システムは小規模になり、コストパフォーマンスにも優れている。

最終的に、3 枚の BW-CGH のそれぞれに割り当てられた物体点数が 8,192 点からなる 8 階調を持つ三次元物体を、マイニング用マザーボードに 6 枚の GPU (NVIDIA GeForce RTX 2080 Super) を搭載した BW-CGH 計算ノード 1 台と 1 枚の GPU (NVIDIA GeForce GTX TITAN) を搭載した 1 台の BW-CGH 表示ノードから構成されたマルチ GPU クラスタシステムにより、120Hz のリフレッシュレートでリアルタイム動画再生できることがわかった。

マルチ GPU クラスタシステムによる膨大な物体点からなる 三次元物体のリアルタイム動画再生

応用理学コース 情報科学分野

三宮 廣海

コンピュータで作成したホログラム（計算機合成ホログラム：Computer-Generated Hologram (CGH)）による三次元物体の再生技術（電子ホログラフィ）は「究極の三次元テレビ」になるものと期待されている。しかし、CGH の計算量は膨大であり、これを実現することは容易ではない。

Graphics Processing Unit (GPU) は、グラフィックス処理用プロセッサである。近年、GPU の浮動小数点演算性能とコストパフォーマンスは著しく向上している。CGH 計算はデータ量に比べ演算量が多く並列化しやすい。また、電子ホログラフィは計算された CGH を画像として空間光変調器 (Spatial Light Modulator (SLM)) に出力するため GPU に適しており、GPU を用いた CGH 計算高速化の研究は盛んに行われている。さらに、複数の GPU を搭載した PC をノードとして用いた PC クラスタ (マルチ GPU クラスタ) システムによる CGH 計算高速化に関する研究も報告されている。その多くは膨大な画素数からなる CGH の計算高速化を目的としている。膨大な画素数からなる CGH を複数に分割し、分割された CGH を GPU に割り当て計算される。マルチ GPU クラスタに搭載された各 GPU に SLM を接続すると、各 GPU で計算された後、分割された CGH の画像を直接表示することが可能となる。ノード間転送は生じず、高いスケーラビリティが実現される。しかし、SLM は非常に高価でありシステムも大規模となる。複数の SLM を用いるため光学系の位置調整も容易ではない。これに対して、マルチ GPU クラスタに SLM を 1 つだけ接続したシステムはコストパフォーマンスに優れており、光学系も小規模で取り扱いが容易である。

本研究では、1 つの SLM を接続したマルチ GPU クラスタシステムにおいて汎用的な Gigabit Ethernet を用い、リアルタイム三次元動画再生を実現する。本システムは、1 台の CGH 表示ノードと複数の CGH 計算ノードから構成される。CGH 表示ノードは SLM に接続した GPU を 1 つ搭載し、各 CGH 計算ノードは複数の GPU を搭載する。再生される三次元動画の各フレームを CGH 計算ノードに搭載されたそれぞれの GPU に割り当てる。各 GPU は割り当てられたフレームの CGH を計算する。CGH 計算結果は 32bit の単精度浮動小数点数で表され、その計算結果を 2 値化してパッキング処理を行う。これにより CGH 計算結果に比べて 1/32 に低減された CGH データが作成され、CGH 表示ノードへ転送される。CGH 表示ノードでは、パッキングされた CGH データを三次元動画のフレーム順に受け取る。GPU でアンパッキング処理が行われ、2 色で表された CGH 画像 (バイナリ CGH 画像) が作成される。そして、バイナリ CGH 画像が SLM へ出力され、SLM に一定時間表示される。本手法により、13 枚の NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti を搭載したマルチ GPU クラスタシステムを用いて約 20 万点からなる三次元物体のリアルタイム再生に成功した。このとき、約 96TFLOPS の実効性能を達成した。

また、計算高速化を目的とした時空間分割多重法が提案されている。三次元物体を複数に分割し、そのうち一つに対して CGH 計算を行う。物体点数が減るため、CGH の計算時間は短縮される。CGH を高速に次々と表示することで残像効果により物体点が補完され、元の三次元物体に近い像を再生することができる。しかし、三次元物体の点数が多くなるとバイナリ CGH の画質が劣化することが知られている。時空間分割多重法により、1 枚のバイナリ CGH に割り当てられる物体点数は抑えられるため、画質の劣化を低減させることができる。時空間分割多重法とマルチ GPU クラスタシステムを組み合わせ、膨大な物体点数からなる三次元物体のリアルタイム再生を試みた。最終的に、100 万点を超える三次元物体に対して高精細なリアルタイム三次元動画再生に成功した。

センシング画像からの注目領域に基づく知識発見の研究
—はやぶさ2着陸候補点画像解析と気象監視カメラからの漏斗雲抽出—

応用理学コース 情報科学分野

藤井 祐貴

近年、様々な分野で大量のデータが蓄積され、いわゆるビッグデータとしてその利活用が期待されている。画像データについても、人工衛星から監視カメラに至るまで、様々なセンサーによって捉えられた画像が、従来は考えられなかった規模と速度で蓄積されるようになってきている。このようにして蓄積されたセンシング画像は障害物の検知、不審者検出、自然情報の解明などの幅広い分野で利用されているが、一般的にはタスクごとに注目領域が設けられ、その注目領域に焦点を絞った解析が行われることが多い。本研究ではこうした大規模なセンシング画像からの特徴抽出と知識発見支援のために、特に注目領域の空間分布や時間的发展を抽出するシステムを開発した。また、テキストベース、オブジェクトベースの2種類のアプローチとして、それぞれはやぶさ2着陸候補点探索と気象監視カメラによる漏斗雲の抽出を実例として検討を行なった。

前者のテキストベースのアプローチの事例としては、2018年-2019年に小惑星リュウグウの探査を行った小惑星探査機はやぶさ2の着陸に適した平坦地の評価を実施した。特に到着直後に取得される低解像度のリモートセンシング画像から数画素レベルで平坦領域の候補を網羅的、機械的に抽出して、着陸候補地を絞り込むことを目標とした。ここでの注目領域である平坦領域の抽出には、メディアンフィルタ画像と原画像の差分を用いて凹凸の存在が示唆される領域を画素レベルで抽出し、指定サイズのフットプリント内の凹凸画素の積算値から推定する手法と、ブロックに対するテキストチャクラスタリングの2種類を検討した。その結果、前者の方がより細かい凹凸まで対応可能である一方、後者は前者の手法ではかえって判別しにくくなるスケールの大きい凹凸検出に有効であり、両者を相補的に利用することが有効であることが示された。この手法を実際の小惑星リュウグウの低解像度リモートセンシング画像に対して適用し、専門家が調査した結果を用いて評価したところ平坦領域の検出に有用であることが確認できた。この結果は2回目の着陸にむけた候補点の絞り込みに利用された。

後者のオブジェクトベースのアプローチでは、土佐湾沿岸に配置された気象監視カメラから、竜巻に関わる漏斗状の雲を注目領域として抽出・追跡するシステムを検討した。特に、災害の早期発見、アラートの観点からは、遠方にある微小な特徴まで高精度に捉えることに加えリアルタイム処理が可能なことが重要となる。ここでは、オブジェクトの抽出を行うことができる畳み込みニューラルネットワークの1種、YOLOをベースとして2種類の手法を検討した。この際、固定サイズの入力ユニットをもつネットワーク(YOLO, Redmon et al., 2016)をブロック化、階層化した画像に対して適用し、結果を統合する手法と、ネットワーク内の階層化によりマルチスケール検出性能を高めた手法(YOLOv3, Redmon et al., 2018)を検討した。また、検出された漏斗雲について時間的隣接フレームの比較による同一性判定を行うことで同一の漏斗雲の時間的发展を追跡し、漏斗雲の接近可能性を推測することが可能になった。これらの結果に基づき、Web上でリアルタイムに検出結果を表示、アラートイングできるプロトタイプシステムを構築し、実データで有用性を確認した。

これらの事例によって、様々な分野での注目領域に基づく解析に汎用的に適用できる、テキストとオブジェクトの2種類のアプローチを検討できたと考えられる。

ペアリング暗号の計算時間削減手法の研究

応用理学コース 情報科学分野

牧角 隆宏

現在、AIやビッグデータの研究や活用が盛んに行われ、そこでは個人のさまざまなデータが収集され、例えば医療やビジネスの場でそれが利用されている。そのため、情報漏洩や改竄のリスク対策が益々重要となってきたおり、その有効な方法としてデータの暗号化がある。

本研究室では石田が2017年度に『ペアリングを用いたプロキシ暗号の実装』を行った。プロキシ暗号とは複数人が利用するサーバ上で、サーバ上にいる任意のユーザの暗号化したデータをその都度復号することなく別のユーザに向けて、暗号化する技術である。その都度復号を行わないので、データ運用の安全性や効率性も高まる。ペアリングとは、有限体上で定義された楕円曲線上の2点を引数とする関数のことであり、また、双線形という性質を持っているものである。ペアリングを用いることで三者間鍵共有やIDベース暗号などの新たな暗号が実現出来、今なお実用化に向けた研究が盛んに行われている。

石田の研究では、ペアリングを用いた楕円曲線暗号の計算時間が、既存のペアリングを行わない楕円曲線暗号の計算時間より遅いという課題が指摘されていた。本論文ではその問題点を改善する手法とその実験結果について述べる。

まず、1次の有限体上での既存手法である、楕円曲線の座標系を変える手法①や、有限体の逆数計算を少なくする手法②を適応する。また、石田の研究では扱わなかった2次以上の有限体上でもこれらの手法が有効かを確認する。

2次以上の有限体上での計算には四則演算ルーチンが必要で、これは法演算に基づく多項式演算を応用したものである。しかし、汎用的なルーチンは最悪計算回数となり、例えば、 n 次の有限体の乗算は法演算の計算回数が n^2 回となる。

そこで、新たな試みとして、このルーチンの計算回数を減らすルーチンを2つ作成する。1つ目は、2次～4次の有限体を対象とするルーチン③である。このルーチンは n 次の多項式同士の計算範囲が $2n$ 次までであることを応用したものである。2つ目は、2次の有限体のみを対象とするルーチン④である。このルーチンは平方非剰余を応用したものである。以上のルーチンを用い、①や②を適応し、比較・実験する。

実験結果として、bit数を上げていくと1次の有限体での計算では256bitから①と②を用いた方法が、2次の有限体では512bitから①と②と④を用いた方法が、3次の有限体では512bitから①と②と③を用いた方法が、4次の有限体ではいずれの手法及びルーチンをも用いない方法が一番高速に計算することが分かった。

これらの結果から1次から3次の有限体には今回の方法が有効であることが確認できた。今回の実験結果によりさらに2次以上の有限体を用いた暗号系の発展があることを願う。

図形と数字を分類する ニューラルネットワークモデルの簡素化と性能についての研究

応用理学コース

情報科学分野

村田 憲哉

令和元年の情報通信白書によると、「我が国はサイバー空間と膨大な現実世界のデータを高度に融合させたシステム(サイバーフィジカルシステム)に基づく産業と社会の発展 (Society5.0) を目指しており、政策において人工知能、IoT(Internet of Things)、クラウドを今後のキーワードとしていく」と述べられている。ここでIoTとは現実世界の情報(画像や温度や音声などのフィジカル情報)を集めるデバイスを指しており、また人工知能とは集められたデータを自動分析する技術を指している。収集したデータにおいて画像は、人の動きや、文字などの大量な情報を含むため特に重要になる。一方、多くの画像を送信すると、回線容量を圧迫するばかりか、収集された画像を分析処理するサーバの負担も膨大になる。よって、データ分析処理のすべてをサーバ側でおこなうのではなく、何らかの方法によりIoT側で分析処理の一部を担わせる必要がある。しかし、従来の分析処理は主にニューラルネットワークで行われており、そのサイズは極めて大きく小規模なIoTに搭載することが困難なため新たなニューラルネットワークモデルが求められる。

本研究は、前述の課題を解決する新たな小規模なニューラルネットワークモデル(NN)2つを提案するものである。第一案 NN モデルは、図形を判別するための「単一フィルタ CNN」である。単一フィルタ CNN とは、「縦」、「横」、「左斜め」、「右斜め」の4つ特徴を強調するフィルタのうち1枚のみを持つ畳み込みニューラルネットワーク (CNN) である。同ネットワークを用いて星型や丸形などの基本図形11枚をベンチマークデータとして判別精度の評価実験をしたところ、4つのフィルタ毎に高い精度で判別できる図形(得意な図形)があることが明らかになった。さらにフィルタを改良して、「輪郭強調」した縦、横、左斜め、右斜め4つのフィルタをもつCNNを提案し、一般画像10種類(車、飛行機、動物など)の画像ベンチマークCifar10で精度評価の実験をしたところ、4つのフィルタ毎に得意とする画像(種類)があること、また、フィルタを2つ組み合わせさせたCNNでは、それぞれのフィルタが得意とする2枚の画像で高い判別精度をもつ1つのCNNが構成できることが判明した。第二案のNNモデルは、手書き数字を判別するための「二次元接続数限定NN」モデルである。二次元接続数限定NNとは、2次元状に並べたノード間を 3×3 毎に次の層へ結線したモデルである。ネットワークを用いて手書き数字0から9の10種類の画像ベンチマークデータ(MNIST)を用いて判別精度の評価実験をしたところ、1万枚の判定用データを92%の精度で判別できることが明らかになった。次により小さなNNを作るためこのモデルを確率的に接続した二次元接続数限定NNを提案し、MNIST1万枚で判別精度を評価したところ、接続数を20%程度まで削減しても判別精度が92%以上であることが判明した。またこのNNモデルに対して、層を超えた接続(前層から確率的に接続を追加したNNモデル)を提案し、MNIST1万枚で判別精度を評価したところ、わずかではあるが精度が向上することがわかった。

以上2つの新モデルとその応用モデルの提案と、判別精度の評価実験を通して、1) フィルタの選択的利用によるCNNの規模と有効性、2) 確率的接続や層を超える接続をもつニューラルネットワークの規模と精度の関係を明らかにし、さらに提案したモデルが小規模かつ90%を超える高精度な判別能力をもつ画像処理ができることを示した。以上の研究を通して、サイバーフィジカルシステムにおいて重要となるIoTに搭載可能な画像処理用の小規模ニューラルネットワークの判別精度や規模などの技術基盤が得られた。これらの技術は、今後、画像処理可能なIoTにより、通信回線の混雑緩和やサーバにおける画像処理の負担軽減への貢献を通じてSociety5.0を支える基本技術となると確信している。

プレゼンテーション・リハーサル支援環境における議論支援システムの構築

応用理学コース 情報科学分野

山田 晏司

主体的学習は教育的に与えられたカリキュラムにしたがった学習ではなく、学習者が主体的に選択した学習対象を自らが任意に選択したWeb上の情報や書籍などの学習リソースを用いて行う学習形態である。しかし、先行研究では、主体的学習には学習者が自身の知識が不十分・不適切な状態であることに気付かずに学習を終えてしまう問題があることが指摘されている。ピアレビューは学習者がピアである仲間・同僚などに学習した知識を外化し、誤りなどが含まれた箇所に対して指摘を受けることで知識の不十分・不適切さに気付きを得る学習効果があることが知られている。こうしたピアレビューは様々な学習を対象に行われている。本研究では、書く・話すという総合的な知識外化を伴うことから、スライド・プレゼンテーションを対象としたリハーサルに着目した。プレゼンテーション・リハーサルでは、プレゼンタはレビューからの発表に対する指摘と、それをもとに行われる議論を通じて得られた知見を活用し、発表資料の改訂作業を通じて自身の知識状態の不十分・不適切さに対する気付きを得ることで知識状態を改善する。したがって、改訂作業はプレゼンタが自身の知識洗練化を促進させる重要な作業であり、よりリハーサルの効果を高めるためには、プレゼンタによる議論内容の十分な理解が不可欠である。

本研究に関する先行研究においては、以上の観点から効果的なプレゼンテーション・リハーサルを行うための支援環境の構築に取り組んで来たが、試験運用を通じてプレゼンタが発表資料に対して誤った改訂を行ってしまう場合があると分かった。この問題の原因としては、(1)プレゼンタが作成された改訂案を確認するだけでは議論内容を正確に想起することが困難である、また、(2)複数箇所に対して改訂が必要な場合に、他の箇所に対して行った改訂作業が影響して作成された改訂案では対応できなくなり、改訂方法をプレゼンタ自身で導き出すことが困難になる、ことの2点が考えられる。(1)に対しては、改訂案によって議論結果を参照するだけでなく、議論内容を正確に想起できるよう、議論の様子を何らかの方法で再現することが必要である。(2)に対しては、一般的にリハーサルは複数回行われることから、次回のリハーサルにおける議論の際、改訂が行われなかったり、改訂作業が誤っている箇所に対する改訂方法の再検討が必要と考えた。

そこで、本研究では、これらの問題を解決するため、議論内容の記録方法と再現する操作を検討し、議論支援システムのユーザ操作を記録・保存して改訂作業時に議論音声と合わせて再現する機能を設計・試作した。また、複数回のリハーサル実施を考慮した2回目以降の議論方式を整理・定義し、2回目以降の議論時に前回の発表資料とそれに対するアノテーション、改訂案を提示する機能も実現した。さらに、本研究では議論支援システムの有効性を検証するため、開発したそれぞれの機能に対する評価実験と考察を行った。