

主論文の要約

論文題目 **A Study on Efficient Light Field Processing Considering Its Structure**
(光線空間の構造を考慮した効率的な処理手法に関する研究)

氏名 藤田 秀

論文内容の要約

光線空間法は、光線を単位として3次元空間の視覚情報を4次元信号空間上で記述する手法であり、自由視点画像合成やデジタルリフォーカス、裸眼立体視ディスプレイ等の様々なアプリケーションへと使用される。そのため、画像処理やコンピュータビジョン、グラフィックス等の分野において、光線空間は今や基盤的な概念となりつつあり、近年注目が集まっている。

光線空間の信号は、ある基準平面を通過する光線の位置と方向のそれぞれ2次元成分で表す4次元信号により定義され、一般に視点間隔が密な多視点画像として解釈されるため、情報量が大きくなる。その一方で、その信号は冗長かつ特有の構造を持つ。したがって、光線空間を効率的に処理するためには、光線空間特有の構造を考慮して、4次元もの高次元信号をどう処理すべきかが課題となる。その一方で、従来の研究では、2次元画像とほぼ同様に光線空間を扱っているものや、光線空間の構造を厳密に扱っていないもの、十分に活用していないものが多かった。

そこで本論文では、光線空間処理、特に光線空間の取得、修復、表示の三つの問題に着目し、そのそれぞれに対して、光線空間の構造を考慮し、それを十分に活用する手法を検討している。具体的には、3次元空間におけるある一点を通る光線群が光線空間において直線状の軌跡として観測されることに着目し、この直線構造の特性に基づいて手法を設計することで、光線空間特有の構造を効率的に扱う。その結果、従来の手法に比べて高品質な出力結果を得ることに成功した。

本論文は5章で構成されており、以下の各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。まず、光線空間の発展や期待される応用研究、現状の課題などを紹介した。また、光線空間の概念の起源とも言えるプレノプティック関数の定義から、光線空間の詳細な定義を説明した。そして、その定義から光線空間がどういった構造をもつかを議論し、光線空間においては、3次元空間におけるある一点を通る光線群が直線状の軌跡として観測されることを示した。

第2章では、光線空間の取得問題に関して、代表的な光線空間カメラであるプレノプティックカメラの原理と、そのカメラから光線空間信号、すなわち多視点画像を抽出するための基本的な処理手法を述べ、二つの新たな処理手法を提案した。

プレノプティックカメラは、従来のカメラとは異なり、メインレンズとイメージセンサに加え、マイクロレンズアレイから構成される。そのマイクロレンズアレイの働きによりプレノプティックカメラは、光線の空間的な位置情報だけでなく、光線の方向情報、すなわち様々な視点情報を一度の撮影で取得することができる。しかしながら、これは一つの2次元イメージセンサで空間と視点の4次元情報を多重化させることを意味し、イメージセンサの大きさには限りがあるため、空間解像度と視点数の間にはトレードオフの関係が存在する。このトレードオフの影響を抑えるために、プレノプティックカメラ2.0と呼ばれる新たなカメラ方式が提案されたが、この方式は高品質な多視点画像を抽出するためには複雑な処理を必要とする一方で、この処理手法に関する検討は少ない。

したがって、本研究ではまず、プレノプティックカメラ2.0から高品質な多視点画像を抽出するための新たな手法を検討した。そして、プレノプティックカメラ全体の問題である、空間解像度と視点数のトレードオフを緩和するため、プレノプティックカメラから得られる多視点画像の空間解像度を向上させる手法を検討した。これらの手法において鍵となる要素は、プレノプティックカメラが光線空間をどうサンプリングしているかを踏まえ、光線空間特有の構造に即して処理することである。

第3章では、光線空間の修復問題に関して、解析的なアプローチと機械学習によるアプローチの二つの側面から、それらの特徴や従来研究を紹介し、それぞれのアプローチに関して新たな手法を提案した。

光線空間の修復問題は、劣化した信号から劣化前の潜在的な信号を復元する問題であり、解法には大きく解析的なアプローチと機械学習によるアプローチの二つが存在する。解析的なアプローチでは、問題をある最小化問題などで定式化するため、解となる手法の結果に、例えば平滑性やスパース性といった制約を明示的に組み込むことができる。この特徴は、我々が解く問題の本質的な課題を分析する上で、極めて重要である。その一方で、最終的な結果だけを比較すると、近年のニューラルネットワーク技術の目覚ましい発展もあり、解析的なアプローチよりも機械学習によるアプローチの方が優れる場合がある。これは、大量の訓練データを用いて機械学習を行うことで、解析的なアプローチでは対応が困難であった複雑な情報すらも再現できるようになったためであると考えられる。しかし、機械学習的なアプローチは、例えばノイズ除去問題の場合はノイズレベル毎に学習をする

必要がある等、解析的なアプローチと比べるとスケラビリティに欠けるという短所もあわせ持つ。また、機械学習によって高い性能を得るためには大量の訓練データを用意する必要がある一方で、光線空間の公開データセットは十分と言えるほど豊富にあるとは言えず、また従来の2次元と比べると新たに収集することも簡単ではない。そのため、効率的に学習するためにも、光線空間の構造を考慮したネットワークを設計することは不可欠である。特に、解析的なアプローチで議論されるようなドメイン知識をネットワークへ組み込むことは、更なる性能向上に有用であると考えられる。したがって、解析的と機械学習的なアプローチの二つの側面から光線空間を議論することは、より高品質な復元品質を達成する上で重要であると考えられる。

そのため、本研究では解析的なアプローチと機械学習によるアプローチの二つの側面から手法を提案した。解析的なアプローチでは、直線構造をもつ光線空間信号が離散フーリエ変換 (DFT) ドメインにおいてエネルギーが原点を通る直線状に集中することに着目し、グループスパースコーディングの枠組みを用いた手法を提案した。具体的には、DFTドメインにおいて方向毎にグループを定義すると、光線空間信号はグループスパース性をもつと考えられるため、グループスパース性を評価する正則化項を光線空間の信号修復問題に導入した。また、機械学習によるアプローチでは、光線空間の4次元構造を畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いてどう扱うべきかを考慮し、分割統治法の考えに基づいて、異なる部分空間上で処理を行う二つのCNNを多段に適用する手法を提案した。実験では、提案手法を光線空間の視点補間やノイズ除去に適用し、従来手法に比べて、非常に高い復元精度を達成できることを示した。

第4章では、光線空間の表示問題に関して、代表的な裸眼立体ディスプレイであるテンソルディスプレイを基に議論した。

まず、テンソルディスプレイは、バックライトと数枚の光を減衰するレイヤ (液晶パネル等) から構成されるディスプレイで、見る方向に応じてレイヤの重なり方異なって見えるため、視点位置に応じて異なる画像を提示できるディスプレイである。そのため、レイヤの透過率パターンを適切に制御することで、視聴者は立体的な映像を観測することができる。そのレイヤパターンを計算するためには、従来では非負値テンソル因子分解 (NTF) と呼ばれる手法が用いられてきたが、NTFは計算時間と表示品質の間にトレードオフの関係が存在した。

このトレードオフを解消するために、本研究ではCNNを用いてレイヤパターンを導出する手法を提案した。提案手法において重要となる点は、テンソルディスプレイによって表示される光線空間が、どういった成分を重点的にもっているかを考慮することである。本研究では、テンソルディスプレイで表示される光線空間は数枚のレイヤパターンから再生される光線空間の積であることを踏まえ、各レイヤパターンが再生する光線空間が持つべき成分に着目し、その成分を入力的光線空間から効率的に抽出できるように全層CNNを設計した。具体的には、各レイヤパターンが高品質に再現可能な視差範囲は限られており、

そのレイヤ位置に対応する視差範囲を効率的に抽出しやすくするために、光線空間の直線構造を観測可能な四つの視点集合を入力とし、処理後に統合するマルチストリーム構造を採用した。実験では、従来手法を用いて高品質な結果を得たときと比べて、それとほぼ同等の表示品質を一割程度の計算時間で達成できた。

第5章では、本論文を総括し、今後の展望を述べた。今後の展望としては、大きく分けて二つのことが考えられる。まず一つに、本論文では、光線空間の取得、修復、表示問題に特に着目し、それぞれ独立に議論を行っていたが、実際のシステム開発を考えると、各処理は最終的な出力を踏まえて総合的に設計されるべきである。これは、最終的な出力に求められるものを踏まえて各処理を最適化することで、システム全体としての処理の効率化が期待できる。二つ目としては、本論文では、いくつかの提案においてCNNを用いたが、CNNを用いた手法については改善の余地が多く残っていると考えられる。例えば、CNNの学習のための損失関数には平均二乗誤差（MSE）を用いていたが、MSEは信号の全体の平均的な近似精度を評価できても、光線空間の構造や性質を踏まえた信号の尤度は評価できない。さらに、ネットワークに全体の設計においても、光線空間の構造を考慮した設計をしたとはいえ、解析的なアプローチで議論されているより高度なドメイン知識を組み込む検討はまだ十分とは言えない。このように、学習やネットワーク設計の段階で、より高度な知識を生かすことができれば、光線空間の構造を考慮したより効率的な学習ができ、更なる性能改善が期待できる。