

論文の内容の要旨

氏名：华 杭波

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Image Quality Improvement of Volume Hologram Printer with Digital Filter
(体積型ホログラムプリンタのデジタルフィルタによる画質改善に関する研究)

コンピュータ技術と光電イメージング技術の発展に伴い、計算機合成ホログラムとデジタルホログラフィは、今日のホログラフィックディスプレイ研究のホットスポットになりつつあります。一方、1,000億ピクセルを超える3Dオブジェクトの計算機合成ホログラム（以下CGH）の計算も普通のデスクトップコンピュータで可能になりました。CGHは、3Dオブジェクトの波面と参照ビームによって作成される計算された干渉縞パターンであり、記録された波面を忠実に再生できます。必要なピクセルピッチは可視光の波長とほぼ同じであるため、通常のプリンタでは実用的な3D表示のためのホログラムは出力できません。CGH用のプリンタについては多くの研究が行われていますが、これらのプリンタに共通する問題は、透過型の薄いホログラムであるため回折における波長選択性がなく、白色光による再生像に色収差によるぼけが発生し、フルパララックスとフルカラー画像を実現するのが難しいことです。

そのため、体積型ホログラフィックステレオグラムを出力するホログラフィックステレオグラムプリンタが開発されました。これらのホログラフィックステレオグラムは、3Dオブジェクトのレイトレーシングによって計算された、またはビデオカメラによって撮影された多数の2D画像から作成されます。これにより、フルパララックスとフルカラー画像を提供することはできますが、3Dオブジェクトの波面を再生することはできません。3Dオブジェクトのサンプリング光線が不十分なため、深度の大きい画像にぼけが生じます。これを改善するには、波面再生型の体積反射ホログラムを使用する必要があります。体積型ホログラムは波長選択性があるため、白色光照明で簡単にフルカラー画像を得ることができます。

CGHから体積型ホログラムを出力するプリンタについて多くの研究があります。ポリウムホログラムプリンタでは、最終的なホログラムはタイル状に並べた小さなホログラムで構成されており、X-Y電動ステージを使用したタイリング方法では、位置合わせの誤差等でつなぎ目が見えるなど画質に影響を与えることがよくあります。画質を向上させることを目的として、最近、完全に重ね合わせた印刷方式が提案されました。その研究では、各要素ホログラムは垂直方向と水平方向の両方で50%オーバーラップしています。そのため、ホログラムは各領域で4回印刷する必要があります。印刷速度が4倍遅くなります。本研究では、印刷速度への影響を少なくして画質を向上させるために、部分的に重ねて印刷することを提案しています。部分的にオーバーラップしている場合、各要素ホログラムは垂直方向と水平方向の両方で10%オーバーラップしています。単に、要素ホログラムを部分的に重ね合わせると、強度の不均一性が強くなり（重なり合っていない部分よりも重なり合った部分の強度が高くなり）、分割線が発生して品質が低下します。これを改善するには、重なり合った部分の強度の不均一性を相殺して、それを継続させる必要があります。これを考慮して、デジタル空間フィルタを重なり合う部分に適用し、画像の強度ムラを補償します。デジタル空間フィルタを使用して、異なる部分的にオーバーラップしたホログラムが計算し、オーバーラップしていないホログラムと再生像を数値シミュレーションで比較しました。本論文は6つの章で構成されています。

第1章は、主にホログラフィの紹介をしています。ホログラフィの基本原理は、干渉の記録と回折による再生です。ホログラムを実現するためのアイデアからホログラフィの開発を述べています。後半では、日常生活の幅広い分野でのホログラフィ技術の応用と、将来の体積型ホログラムの展望を紹介します。最後の部分には、この論文の概要が含まれています。

第2章は、主に背景知識についてです。ホログラフィック光学系は、あらゆるタイプのホログラフィック技術の基盤です。光学ホログラフィは、光の干渉を使用して波面を干渉縞にエンコードし、回折を使用して波面を再現します。次に、基本的な原則と手順の詳細について説明します。ホログラフィの理論の後に、いくつかのタイプのホログラフィが言及されています。干渉縞をコンピュータ上で計算するCGHは、

物体の光波をデジタル合成することでホログラムを形成できる技術の一種です。物体の光波の数学的情報がコンピュータに入力され、コンピュータのコーディング後にデジタルホログラムが取得され、直接表示するために空間光変調器に入力される限り、実際の物体は必要ありません。このように計算された CGH は透過型で波長選択性が無いため、CGH プリンタを使用して出力したホログラムを白色光によって再生すると、色収差により画像にぼけが生じます。この問題を解決するため、体積型ホログラムとして光学転写すれば、白色光照明でフルパララックスとフルカラーの再生像を取得できます。次に、フルカラー体積型ホログラムについて説明します。最後に、ホログラムの特徴を紹介します。

第 3 章は、主に体積型ホログラムプリンタについてです。体積型ホログラムプリンタの主な原理は、平面 CGH から再生された波面を、体積反射ホログラムとして感光性材料に光学的に転写することです。最終的なホログラムは、ミリメートルサイズの多くの要素ホログラムを並べられた大きなホログラムです。要素ホログラムの計算では、仮想ウィンドウを使用してターゲットデータをセグメント化します。仮想ウィンドウは、不必要な計算を避けるために、二次体積型ホログラムと同じサイズと位置になっています。さらに、1つの要素ホログラムには1つの開いた仮想ウィンドウがあります。また、仮想ウィンドウを通過する光波のみを使用して要素ホログラムを計算します。最後に、出力されたホログラムを参照光と共役な照明光で再生すると、再生像は元のオブジェクトの同じ位置に表示されます。

第 4 章は、主にホログラムプリンタシステムについて述べています。最初に、最小構成の体積型ホログラムプリンタシステムについて説明します。レーザー、LCOS (Liquid Crystal on Silicon)、ステッピングモーターといくつかのレンズおよび X-Y 平行移動ステージで構成されています。LCOS に表示された CGH を転写することにより、提案されたプリンタは 3D オブジェクトの波面を記録した体積型ホログラムを出力することができます。分割された 3D オブジェクトを順番に記録する複数の CGH を転写することにより、大容量ホログラムを出力できます。次に、本研究で使用した体積型ホログラムプリンタシステムを紹介します。最小構成システムでは、レンズ L3 の近くに LCOS を配置する必要があります。しかし、偏光ビームスプリッターを LCOS とレンズ L3 の間に挿入する必要があるため、実現が困難です。そこで、4f 光学系で LCOS の像をレンズ L3 上に結像する様に光学系を改良しています。

第 5 章では、主にボリュームホログラムの画質を向上させる方法について説明します。体積型ホログラムプリンタは、波長選択性があり、自然光で再構成できるため、3D ディスプレイとして有用です。しかし、最終的なホログラムはタイル状の小さなホログラムで構成されており、タイリングの方法によって繋ぎ目に線が現れて、画質に影響を与えることがよくあります。この問題を改善するために、この章では要素ホログラムの一部をオーバーラップするアプローチについて説明します。外部の研究機関により、50%オーバーラップする方法がすでに提案されています。ただし、50%オーバーラップでは、同じ場所にホログラムを 4 回印刷する必要があります。印刷速度は通常の 25% になります。そこで、印刷速度の低下が少なく、画質を改善する方法として、部分的にオーバーラップするアプローチ（水平方向と垂直方向の両方で 10%）を適用しました。このアプローチを使用すると、印刷速度係数は通常のほぼ 81% であり、50% のオーバーラップアプローチの速度係数 25% より 3 倍以上も高速です。しかし、転写するホログラムを単純に部分的に重ねると、強度の不均一性が強くなり（重なった部分の強度が重ならない部分よりも高くなり）、分割線が発生して画質が低下します。これを改善するために、重なり合った部分の強度の不均一性を補償する必要があります。そこで、空間デジタルフィルタを設計し、各要素ホログラムに適用しました。フィルタを適用すると、明確な分割線がなく、強度の均一性が保たれます。この部分的に重複するデジタルフィルタによるアプローチに基づいて、2D モデル (USAF-1951 解像度チャート) と 3D モデル (頭蓋骨) の数値シミュレーションを実行しました。3つの異なる種類の結果：(a) オーバーラップなしの通常の出力、(b) フィルタなしで 10% オーバーラップ、(c) フィルタありで 10% オーバーラップ、を比較しました。その結果、提案したアプローチは、体積型ホログラムプリンタの画質を改善するのに効果的であることが明らかになりました。

第 6 章はこの論文の結論です。この論文では、基本原理と改良されたボリュームホログラムプリンタシステムが紹介されています。単純にオーバーラップすることによって引き起こされる問題を修正するために、デジタルフィルタを使用した部分的にオーバーラップするアプローチが提案され、シミュレーションに適用しました。そして、シミュレーションの結果より、提案手法は体積型ホログラムプリンタにより出力するホログラムの画質向上に有効であることを示しました。