

## ホログラフィの超高速 3 次元イメージングへの応用

研究分担者 栗辻 安浩  
大学院 工芸科学研究科  
電子システム工学部門 助教授

### 【研究目的】

これまで不可能であったフェムト秒オーダーで進展する光の伝搬の様子を連続動画像として観察する技術をホログラフィを用いて開発する。また、被写体の一瞬の 3 次元像を取得・計測する技術をホログラフィを用いて開発する。各技術を超高速現象の 3 次元像の観察・計測および超高速光デバイスの設計・評価に応用することを目的としている。

### 【今までの成果】

#### [I] フェムト秒光パルス伝搬の動画像記録・観察技術の開発

ピコ秒、フェムト秒の超短光パルスでホログラムを記録すれば、速すぎて決して見ることが出来ない光の伝搬の様子を、あたかも水面の波紋がゆっくり広がってゆくのを見るかのように可視化することができる。この技術は Light-in-flight recording by holography (Light-in-flight ホログラフィ)と呼ばれており、我々はピコ秒パルスレーザーおよびフェムト秒パルスレーザーを用いたホログラフィにより、本研究プロジェクトの期間で以下の成果を得た。

##### (1) ホログラム光デバイスの設計および作製

我々の研究グループでは計算機支援ホログラム設計ツール(ホログラム CAD ツール)の開発を行っている。このツールは、ホログラムの再生特性、結像特性の解析、また無収差結像を実現するホログラムの設計が可能であり、ホログラムを使った新しい光デバイスの設計に利用できる。このツールの機能拡張を行っており、多重再生光源による最適結像のためのホログラムの設計を行った。設計で得られたレンズを 2 光束干渉露光により作製した。作製したレンズの再生特性、結像特性を解析し、本ツール内の計算で得られた結果と一致することを実験的に確認し、本設計手法と設計で得られたデバイスの有効性を確認した。

##### (2) フェムト秒光パルス用ホログラフィック光学素子の設計と製作

パルス幅 130fs, 中心波長 720nm フェムト秒光パルス集光用の軽量薄型レンズをホログラム CAD ツールを用いて設計した。本設計のために、多波長光源を扱えるようにホログラム CAD ツールの機能拡張を行った。機能を拡張されたホログラム CAD ツールを用いて設計したレンズを 2 光束干渉露光で作製した。光源にモードロック Ti:S レーザーを用いて、作製したレンズの再生特性、結像特性を実験的に調べた。その結果、ホログラム CAD ツールを用いて計算した結果と一致し、本設計の有効性を示した。また、Ti:S レーザーが連続波発振モードの場合とパルス光発振モードのそれぞれの場合において、本レンズの集光特性を実験的に調べた。実験結果は、ホログラム CAD ツールを用いて計算した結果と一致し、設計の有効性を示した。また、パルス光発振モードでは像がぼけることを実験により確認した。実験結果はホログラム CAD ツールを用いて計算した結果と一致し、本ホログラム CAD ツールがフェムト秒光パルスを光源とした場合にも適用可能であることを示した。

### (3) 超短光パルスに対する種々の光学現象の2次元像の観察

Light-in-flight ホログラフィを利用して、超短光パルスの種々の光学現象の2次元像の記録・観察に成功した。また、光導波路中を超短光パルスが全反射を繰り返しながら進んでゆく様子、平板ガラスに対してスネルの法則として知られている屈折の現象、レンズによりパルス面が集光・発散する様子の観察に成功した。また、中心波長 720nm、パルス幅 130fs のモードロック Ti:S レーザーから発せられるフェムト秒光パルスがプリズムによりパルス面が屈折する様子の観察に成功した。

### (4) 集積型アレイイルミネータにより生成されるフェムト秒光パルス列の発生と伝搬の観察

集積型アレイイルミネータは、超高速光通信や並列光コンピューティングシステム、大容量光メモリシステムなどに有用なアレイ状にビームを発生させるナノ構造グレーティングカプラを有する光デバイスである。このアレイイルミネータから発生する多数の平行なフェムト秒光パルス像の観察に成功した。本技術で得られた再生像の動画では、参照光パルスと同方向に進行する出射パルスの方が、参照光パルスと逆方向へ進行する出射パルスよりも傾き、かつ、伝搬速度が速い再生像となることがわかった。パルスが伝搬する過程のモデルを立ててパルスの形状、伝搬速度の解析を行った。このモデルに基づいて計算した結果が、実験結果と一致することがわかり、モデルの正当性を示した。

### (5) 観察されるパルス面形状に関する理論的解析

基本的な光学系により作製したホログラムからの再生像として観察される光パルスの面の形状は、その原理上実際に生じているパルスの形状とは異なり、実際の光パルスの形状が歪曲された再生像として観察される。その程度は参照光の角度、観察位置などに依存する。この現象について理論的に解析した。この曲線の傾きは、参照光と物体光の光路長がホログラム面上で一致するための物体光点の軌跡として求められ、計算結果は実験結果と一致した。この技術を超高速現象の観察・計測に応用するためには、理論解析に基づいた変換を行って真のパルス面形状を知る必要があることを明らかにした。

### (6) Light-in-flight ホログラフィで観察される超短光パルスの再生像の歪補正

Light-in-flight ホログラフィでは、その原理上、実際の光パルスの形状を歪曲した再生像が観察されることをこれまでに明らかにした。そこで、Light-in-flight ホログラフィで得られる光パルスの再生像の歪みを補正する手法を提案した。コリメートされて伝搬するフェムト秒光パルスを記録したホログラムから再生される像にたいして、提案する歪み補正法を適用した。その結果、再生像がほぼ直線状になり、提案する歪補正方法の有効性を示した。

### (7) Light-in-flight ホログラフィにおける再生像の空間的・時間的分解能の解析

Light-in-flight ホログラフィでは、ホログラムに記録される干渉縞は、パルス幅が狭いほどその領域が狭くなる。そのため再生像の解像力は回折によって低下する。そこで、本ホログラフィで得られる再生像に関して、参照光が記録材料に入射する角度を変化させて記録を行い、各入射角度にたいして、水平および垂直方向の解像力を測定した。また、測定した結果が理論から導かれる結果と同じ傾向を示すことを確かめた。

### (8) 3次元空間を伝搬するフェムト秒光パルスの伝搬の観察

光パルスの伝搬を3次元像として観察できれば現象のより詳しい情報を得ることができる。3次元空間を伝搬する光パルスそのものを観察するため、ゼラチンゼリーを散乱媒体としてその空間を伝搬するフェムト秒光パルスのホログラム記録に世界で初めて成功し、その動画像が得られた。ここで注目すべきことは、得られた再生像は、連続光で記録した場合とは異なり左右が反転するという現象が観察されたことである。これは、物体から出てホログラムに到達するまでのパルス光の時間差を考慮することによって説明できる。この現象についての理論的な解析を行い、シミュレーション結果が実験結果と一致することを確かめた。

#### (9) 回折格子によって回折されるフェムト秒光パルス伝搬の3次元像の観察

ナノ構造光デバイスを通過する3次元空間を伝搬する光パルスの伝搬を観察するために、回折格子によって回折されるフェムト秒光パルスの伝搬の動画記録・観察に成功した。まず、レーザーから照射される狭いビームの伝搬の記録・観察に成功した。回折された光パルスの像は回折効率に応じて像の明暗が観察できた。また、コリメートして画像情報が含まれるフェムト秒光パルスの伝搬の観察にも成功した。ここで注目すべきことは、得られた再生像では、+1次回折光と-1次回折光が斜めに歪んで観察されるということである。これは、物体から出てホログラムに到達するまでのパルス光の時間差を考慮することによって説明できる。

#### (10) 分布屈折率媒質中を伝搬するフェムト秒光パルスの3次元像の観察

水とゼラチンで作製したゼリーに砂糖を混ぜて濃度勾配を形成させ屈折率を連続的に変化させることにより作製した分布屈折率媒質をフェムト秒光パルスの伝搬の3次元像の記録・観察に成功した。中心波長 727nm, パルス幅 226fs のモードロック Ti:S レーザーから発せられるフェムト秒光パルスが分布屈折率媒質によりカーブを描き、緩やかに曲がりながら伝搬する様子の動画観察に成功した。

#### (11) 伝搬する超短光パルス拡大像動画記録と観察

Light-in-flight ホログラフィを用いて、超短光パルスを拡大して記録したという例は報告されていない。そこで、拡大光学系を用いて、超短光パルスの伝搬の拡大像の記録と観察を行った。拡散板と記録材料との間に凸レンズを1枚挿入して、中心波長 727nm, パルス幅 226fs のモードロック Ti:S レーザーから発せられるフェムト秒光パルスの2倍の拡大像を記録し、その観察に成功した。また、本技術において物体光の拡大像を記録する場合に生じる、再生像の歪みについて解析し、計算機シミュレーションを行ったところ実験で得られる再生像の特性を説明できることがわかった。

### II] 瞬時3次元画像記録・計測技術の開発

電子撮像デバイスとホログラフィを組み合わせた技術により、被写体の3次元像を記録・計測することができる。これはデジタルホログラフィと呼ばれており、従来のデジタルホログラフィでは原理的に避けることができなかった高鮮明かつ瞬時の3次元情報を獲得できる並列位相シフトデジタルホログラフィの開発を行ってきた。本研究プロジェクトの期間で以下の成果を得た。

#### (1) 並列位相シフトデジタルホログラフィの考案

並列に位相シフトを行うことにより動く被写体に対しても適用可能な技術である位相シフトデジタルホログラフィを考案した。本技術は、従来の In-line デジタルホログラフィの記録光学系に対して、

参照光の光に位相シフトアレイデバイスが設けられ、CCD カメラの各画素に位相シフトアレイの各要素が結像される。本技術で用いる位相シフトアレイデバイスは、 $2 \times 2$  の位相シフトデバイスが 1 単位を構成し、この単位が 2 次元アレイ状に配列される。 $2 \times 2$  の位相シフトデバイスでは参照光の位相を  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  遅れを生じさせる。この位相シフトデバイスはガラスの厚みを変化させるか、微小位相板で実現できる。本技術における像再構成の計算手続きは次の通りである。各位相シフト量が等しい部分の CCD の画素を抜き出し、新たに用意した画像上で抜き出した画素と同じアドレスの画素に画素値を複製する。抜き出した以外のアドレスの画素には周囲の画素値から複製または、補間を行うことにより画素値を設定する。4 種類の位相遅れそれぞれについて上記の処理を行い、4 種類の干渉縞画像を作成する。作成した 4 種類の干渉縞画像に対して従来の位相シフト法で用いる計算を行い、撮像素子面での光の複素振幅を計算し、さらに物体の複素振幅を計算する。本技術の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い、その有効性を示した。

### (2) 並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡の可能性試験

並列位相シフトデジタルホログラフィにおいて記録光学系中に顕微鏡に用いる拡大光学系を導入することにより、微小領域の瞬時 3 次元画像計測が可能な光学系を考案した。水生微生物や植物細胞試料にたいして、並列位相シフトデジタルホログラフィが利用可能であることを原理確認実験により示した。

### (3) 集積型デバイスを用いた並列位相シフトデジタルホログラフィの考案

従来の記録光学系において参照光は空間的に位相を変化させる位相シフトアレイデバイスを透過し、レンズによって撮像素子に結像させるため位相シフトアレイデバイスと撮像素子の位置合わせが必要になり光学系が複雑になるといった問題があった。そこで、偏光を利用し、位相シフトアレイデバイスと撮像素子を集積したデバイスを用いた記録光学系を考案した。提案する位相シフトアレイデバイス-撮像素子集積型デバイスを用いた光学系では、レーザーからの光は、偏光ビームスプリッタによって 2 つの偏光に分けられる。ビームスプリッタで重ね合わさった 2 つの光は位相シフトアレイデバイスを通ることで干渉し、4 段階( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ )の位相の異なる参照光で記録したホログラムが得られる。位相シフトアレイデバイスは、 $\lambda/4$ 板、 $\lambda/4$ 板の高速軸と同じ屈折率をもったガラス、直交した偏光軸を持った偏光板からなり、CCD と一体化されている。各素子は CCD の画素と同じように配置され、各素子の 1 区間の大きさも CCD の 1 画素の大きさに等しい。偏光板の偏光軸の方向は、入射する 2 つの光の偏光方向に対し、それぞれ 45 度となるように配置され、 $\lambda/4$ 板の高速軸と低速軸がそれぞれ物体光と参照光の偏光方向と一致するように配置される。本技術の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い、その有効性を示した。

### (4) 並列位相シフトデジタルホログラフィにおける干渉縞情報の有効利用法の考案

記録した干渉縞の情報を有効に利用することにより、並列位相シフトデジタルホログラフィで得られる再生像の精度の向上を行うことができる像再構成方法を考案した。考案法で干渉縞の情報を有効に利用する方法の計算手順を次に述べる。記録されたホログラム中で異なる位相を持った参照光で記録された 4 画素に対して位相シフト法の計算を行う。このとき、計算に使われる 4 画素を、鉛直方向には 1 画素ずつ、水平方向には 1 画素間隔で選ぶ。従って計算により得られる実部と虚部の画像は、水平方向に 1 画素間隔、鉛直方向に 1 画素ずつ画素値を持つことになる。欠落した画素を線形補間することで水

平方向，鉛直方向ともに1画素ずつ画素値を持った実部と虚部の画像が得られる．こうして得られた複素振幅分布に対してフレネル変換を行って再生像を求める．本方法の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い，その有効性を示した．

#### (5) 並列3段階位相シフトデジタルホログラフィの考案

参照光の位相を空間的に3段階に変化させて得た1枚の干渉縞から並列に位相シフト法を行い，再生像を得る手法を提案した．提案法を次に述べる．レーザーからの光は，ビームスプリッタによって物体光と参照光とに分けられる．参照光は空間的に $0, 2\pi/3, -2\pi/3$ と3段階の位相分布を持つ位相シフトアレイデバイスを透過し，レンズによって CCD 面上に結像する．このデバイスを透過した参照光の空間的な位相分布は，CCD 面上で CCD の画素の配置と一致し，位相分布の1区間は，CCD の画素サイズと同じである．このような空間的に位相分布を持つ参照光でホログラムを記録する．記録された1枚のホログラムには参照光の位相の異なる3種類の干渉縞の情報が1画素ごとに分布する．本技術において像再生を行う計算手順を述べる．記録されたホログラム中の参照光の位相が0の画素に対して，その4近傍画素を用いて位相シフト計算を行う．次に欠落した画素に対して線形補間により元の画像サイズの CCD 面上での複素振幅分布が得られる．こうして得られた複素振幅分布に対してフレネル変換を行い再生像を求める．本方法の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い，その有効性を示した．

#### (6) 並列カラー位相シフトデジタルホログラフィの考案

色情報の瞬時計測を目的として，赤，緑，青の3色のレーザーを用いた並列位相シフトカラーデジタルホログラフィを提案した．この技術では各色に対して位相を空間的に数段階に変化させることで一度の記録で複数の干渉縞の情報を取り込むことができる．この干渉縞の各色成分に対して並列に位相シフト法による計算を行うことでフルカラーの再生像を得ることができる．提案法を実現する光学系では，光源としては赤，緑，青のそれぞれの光を発する3つのレーザーを用いる．光軸を一致させた3つのレーザーからの光はビームスプリッタによって物体光と参照光とに分けられる．参照光側にはカラーフィルタと位相シフトアレイデバイスが配置されている．レーザーの光はカラーフィルタレイにより各色の光が鉛直方向に並ぶ．位相シフトアレイデバイスは水平方向に空間的に各色に対して $0, 2\pi/3, -2\pi/3$ と3段階に参照光の位相をシフトさせるデバイスが鉛直方向に連結した構造となっている．このデバイスにより各色成分の光の位相が水平方向に3段階に変化する．このように空間的に位相がシフトした光はレンズによって CCD 面上に結像する．その結果，参照光の空間的な位相分布は，CCD 面上で CCD の画素の配置と一致し，位相分布の1区間は，CCD の画素サイズと同じになる．このような空間的に位相分布を持つ参照光でホログラムを記録する．記録した1枚のホログラムには参照光の各色成分の位相が異なった9種類の干渉縞の情報が1画素ごとに分布する．本技術において像再生を行う計算手順を述べる．記録したホログラムに対して同じ波長の参照光で記録した画素をそれぞれ抜き出して3枚のホログラムを得る．各ホログラムには水平方向に参照光の位相が3段階にシフトしたときの干渉縞の情報が含まれている．各ホログラムに対して左右に隣接する3画素を用いて次式で与えられる位相シフト計算を行う．次に，画素を水平方向に1画素移動した3画素のデータを用いて同様の計算を行う．空白部分に対しては求めた値を複製することで補間する．このようにして得られた CCD 面上での物体の複素振幅分布に対して，フレネル変換を行うことで CCD 面からある距離における面での複素振幅分布を得る．以上の処理を各ホログラムに対して行うことで得られた3枚の再生像から各波長の示す色を割り当てて色合成をすることでカラーの再生像を得る．本方法の計算機シミュレーションおよび原理確認実験を行い，その

有効性を示した。

#### (7) 並列位相シフトデジタルホログラフィにおける高画質再生のための位相配置の提案

並列位相シフトデジタルホログラフィで用いられる位相シフトアレイデバイスは、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の位相シフト量を持つ位相シフトを周期的に配列したものである。この位相シフトの基本的な配列方法は全部で 24 通り存在する。そこで計算機シミュレーションにより各配列でのホログラムの記録・再生を行った。入力画像は画像処理の分野で標準的に用いられる画像を用いた。再生像を評価するために各配列における再生像と入力画像との相互相関係数を求めた。この係数により各配列における再生像の画質を比較してホログラムの記録・再生に有効である配列方法を選定した。対角画素の位相シフト量の差が  $\pi$  になるものが 24 通りの配列方法の中で有効な配列であることがわかった。

#### (8) デジタルホログラフィ用像再生ソフトウェアの開発

デジタルホログラフィの像再生計算・表示用ツールはこれまで各研究者が独自に開発しており、汎用の再生・評価ツールはなく、デジタルホログラフィを効率良く研究するためのソフトウェアが必要とされていた。そこで我々は、記録した干渉縞画像を入力ファイルとして、容易な操作で異なる再生方法による物体の再生像を出力し、評価するソフトウェアを開発した。本ソフトウェアは撮像素子で記録したホログラムのデジタルデータ、記録に用いたレーザーの波長、再生像面と撮像素子との再生距離、撮像素子の画素数・画素間距離を入力すると、再生像が出力される。さらに、異なるデジタルホログラフィの方式に対応するために以下の有用な機能を備えた。(1)フレネル変換のみの手法や位相シフト法 2・並列位相シフト法 3 などの異なる記録・計算方法による像の再生(2)一回フーリエ変換かコンボリューション法 4 のフレネル変換の計算アルゴリズムの再生距離に応じた自動選択(3)相互相関係数・誤差平均を用いた再生像の画質評価(4)フルカラー再生像の再生。また、本ソフトウェアは像再生・評価の操作を容易にするために GUI (Graphical User Interface)を備えている。この、GUI 上には機能ごとに操作画面を用意し、タブボタンでそれぞれの画面の切り替えを可能にした。これにより、見易さと操作性、そして今後の機能拡張の容易さを向上した。さらに、実験で得られたホログラムのデジタルデータを用い、本ソフトウェアで像を再生・評価することにより、本ソフトウェアの正常動作を確認した。

#### 【今後の展開と見通し】

この技術は物理学、化学、生物学、またエレクトロニクスにおける未知の超高速現象の 3 次元像の観察・解明や各種工学分野の超高速計測・評価など幅広い分野への応用が期待される。これらの応用と同時に、その成果をふまえた超高速光デバイスの設計と評価へと研究を進める。また、並列位相シフトデジタルホログラフィを行うシステムを実現することが課題である。このシステムを実現するためには並列に位相をシフトさせるための位相シフトアレイデバイスを実現する必要がある。この光デバイスの設計、製作を行う予定である。また、ホログラム CAD ツールを使った新しい光デバイスの設計と超高速現象を解明するための研究を進める予定である。また、Light-in-flight ホログラフィを用いて、相対性理論に基づく現象の記録・観察の可能性についても検討する。さらに Light-in-flight ホログラフィとデジタルホログラフィを組み合わせたデジタル Light-in-flight ホログラフィによる光の伝搬の動画像記録、観察の可能性についても検討する予定である。