

フレネルホログラムを用いた波長分布検出システムの開発

奈良工業高等専門学校 ○川西晶太, ◎西田茂生, 飯田賢一

要旨

本研究では、フレネルホログラムを用いた光源の中心波長の変化を測定するシステムの開発を行っている。前報において、本システムで光源波長が測定可能であることを示した。しかし、システムは完全には自動化されておらず、理論に合致したガウス分布が得られなかった。そこで、設計したホログラムの再生像に画像処理を加え、相関値を比較することで中心波長の自動検出が可能となった。また、理論に合致したガウス分布を確認した。

1. 緒言

本研究では位相型フレネルホログラムを用いた光源の波長分布測定システムの開発を行う。光源の波長分布を求めるには通常分光計を用いるが、この場合分光計を組み込むため光学系が複雑になり実時間でインラインでの測定が困難となる。そのため現状ではカタログ値に則してその光源を使用することとなり、光源使用中における温度変化などによる光源の波長分布変化を無視することとなる。そこで、フレネルホログラムの波長選択性を利用した波長分布検出手法を提案する。この方法を用いることで、フレネルホログラムを多重化した、多重フレネルホログラム一枚を光学系に組み込むだけで光源の中心波長の変化と波長分布が簡単にインラインで実時間測定が可能となり、光源を使用しながら波長分布の変化を知ることができる。

本稿では波長分布検出システムを開発するために、光源の中心波長をホログラムの回折像の鮮明さによって評価する手法をとる。前報の報告においては、回折像の輝度値を計算することによる手法を提案し、その有用性を示した。しかしながら、輝度値の分布は理論に合致したガウス分布をとる結果とならなかった。そのため、本実験では CCD カメラにより回折像を撮影し、ホログラムの設計に用いたオリジナル画像との相関値を求め、光源の中心波長およびそれ以外の波長で設計したフレネルホログラムの回折像の相関値と比較する。検証実験には、設計したフレネルホログラムの性能を迅速に評価するため、実際に多重フレネルホログラムを作製するのではなく、空間光変調器を用いる。

2. 理論

(1) 計算機合成位相型多重フレネルホログラム

波長分布を測定するためのホログラムを光学系に組み込むにはホログラムと回折像面を有限距離にする必要があるため、フレネル回折を用いる必要がある。本研究では、波長分布検出手法として位相型の多重フレネルホログラムを用いる。また、回折像を任意に設定する必要があるため計算機合成ホログラムの手法を用い、計算機合成多重フレネルホログラムを設計し、その位相分布を空間光変調器で実現することにより波長分布検出手法の評価を行う。

(2) 波長分布検出システムの原理

波長分布の検出方法としてフレネルホログラムの波長選択性を用いる。これは異なる設計波長で異なる回折像を設定できるという性質であり、この性質を用いることでフレネルホログラムを多重化できる。先行研究で波長分解能 10nm の多重フレネルホログラムが設計可能であること、回折像の回折効率はフレネルホログラムの設計波長と光源の中心波長が一致するとき、図 1 に示すように最大となり、ガウス分布をとることがわかっている。これらの性質を利用することで波長分布および中心波長の変化を検出できる波長分布検出システムを設計可能となる。

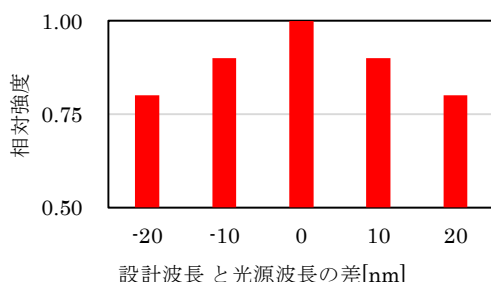


図 1 光源波長と設計波長の差による強度分布

3. 位相型多重フレネルホログラムの設計

本研究では、位相型多重フレネルホログラムの設計アルゴリズムとして、GS 法を用いている。この方法では入射光がホログラムを通過した直後の波面とその光波が結像距離だけ回折伝播したときの像面での波面に制約を課し、ホログラムと像面との間を反復的に伝播と逆伝播を繰り返す行い、所望の回折像を得るための位相分布に収束させる。多重フレネルホログラムを設計するためには、GS 法を応用し、設計波長ごとに波面を一往復伝播させた後、フレネルホログラム透過直後の光波の複素振幅の線形和を求めることによってフレネルホログラムを多重化させる。

本研究で扱う多重フレネルホログラムでは設計波長を任意に設定することが可能であるため、提案手法では光源の中心波長を波長分解能 10nm の波長分布検出システムとして設計する。

4. 実験方法

設計波長の異なる、複数の位相型フレネルホログラムを設計し、それぞれに中心波長が既知である光源を照射し回折像を得る。得られた回折像を比較し、用いた設計波長のホログラムから光源の中心波長を特定する。実験を行う際に使用するフレネルホログラムの設計条件は空間光変調器のスペックに準ずる。空間光変調器のスペックを表 1 に示す。

表 1 空間光変調器のスペック

Active Area	26.6mm×20.0mm(1.3")
Number of image pixels	832×624
Image format	800×600
Pixel Pitch	32μm

実験に用いる光学系を図 2 に示す。図において、光源から出た発散球面波は平面波に変換され、Beam expander で SLM (空間光変調器) 全面に照射されるよう光波が拡大される。SLM を透過した光波は Screen 上で結像され、その回折像を CCD カメラにより撮影する。SLM と Screen 間の距離は結像距離であり、これを一定にして実験を行う。撮影された回折像を MATLAB により解析し数値化を行う。光源には赤、緑、青の 3 種のレーザを用い、設計像に '●' を用いた。

実験に用いた装置は以下の通りである。SLM は、HOLOYE 社製 LC2002、強度計は ADVANTEST 社製 TQ8210 を用いた。CCD カメラには Mintron 社製 MTV-64G5DN を用い、RGB24bit、解像度 640×480 のビットマップ画像を撮影する。赤色光源には波長 632.8nm の He-Ne レーザ、緑色、青色光源にはそれぞれ、波長 532.8nm 波長 440nm の DPSS レーザを用いている。

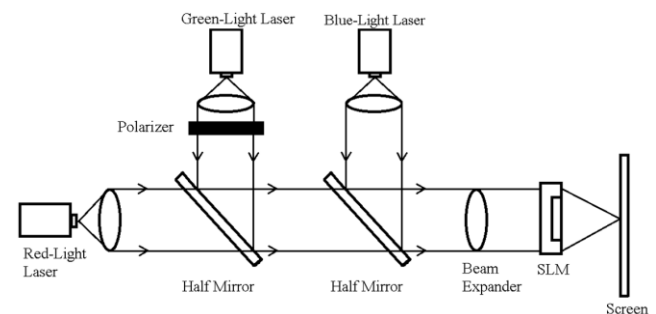


図 2 光学系の概略図

(1) 強度計による原理の検証

各設計波長のフレネルホログラムによって得られた回折像を強度計により測定し、設計波長と回折像強度の関係を調べ、光源の中心波長が測定可能であることを検証する。実験に使用するホログラムは 610~650nm まで 10nm 刻みで変化させたホログラムを用いる。

(2) テンプレートマッチングと相関を用いた波長検出実験

撮影した図 3 の画像に対して、設計の元になるオリジナル画像(図 4)とするテンプレートマッチングを行い、像を切り出す。その後、切り出した画像に対してオリジナル画像との相関を求め最大値をとった設計波長を検出波長とする。

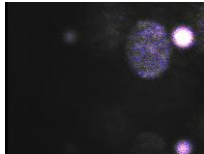


図 3 再生像例



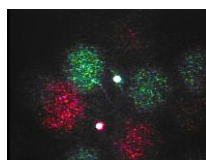
図 4 オリジナル画像

(3) 複数波長同時検出実験

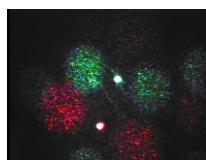
多重フレネルホログラムを用いて同様の実験を行う。表 2 の R,G の設計波長を持つ 2 重ホログラムに対して同時に赤と緑 2 個のレーザを照射し得られた図 5 に示す回折像から光源波長を特定する。また、表 2 の R,G,B の波長成分を持つ 3 重ホログラムに対しても得られた図 6 に示す回折像に対して同様の実験を行う。

表 2 複数波長検出に用いた多重ホログラム

ホログラム	設計波長[nm]		
	R	G	B
1	610	510	410
2	620	520	420
3	630	530	430
4	640	540	440
5	650	550	450



(a) 一致する回折像

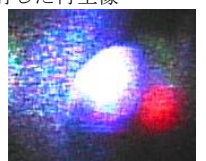


(b) 一致しない回折像

図 5 2波長同時照射した再生像



(a) 一致する回折像



(b) 一致しない回折像

図 6 3波長同時照射した再生像

5. 実験結果

(1) 強度計による原理の検証結果

実験結果を図 7 に示す。横軸は設計波長、縦軸は回折像強度を正規化した値を表す。設計波長と光源波長が一致する点において最大強度となることがわかる。これにより、本手法で光源の中心波長の特定が可能であることが検証できた。

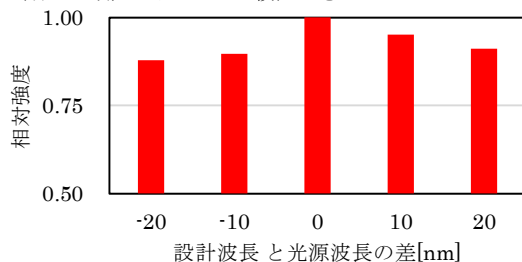


図 7 強度計による光源の中心波長測定

(2) テンプレートマッチングと相関を用いた波長検出

実験結果を図 8 に示す。横軸は設計波長と光源波長の差、縦軸は相関値を表す。なお以降のグラフはすべて同じ軸ラベルとする。図 8 より相関値を用いた画像処理においても図 1 と同様の結果が得られ、波長検出可能であることを示した。

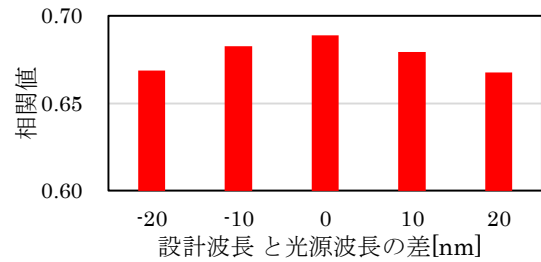


図 8 相関値を用いた光源の中心波長検出

(3) 複数波長検出実験

2 波長同時検出の結果を図 9、3 波長同時検出の結果を図 10 に示す。この結果より、ホログラムを多重化した場合においても同様の結果が得られ、一枚の多重ホログラムから光源を検出可能であると考えられる。また、図 10 の赤、緑波長域は表 2 のホログラム 3、青波長域は光源と一致するホログラム 4 で最大値をとっていることが確認できる。しかしながら、図 9 の 2 波長同時検出実験では相関値がガウス分布を表しているが、図 10 の 3 波長同時検出実験では、緑波長の相関値の分布がガウス分布をとらない結果となってしまった。その原因としては、ホログラムを 3 重化することによりスペックルノイズが増加したためであると考えられる。

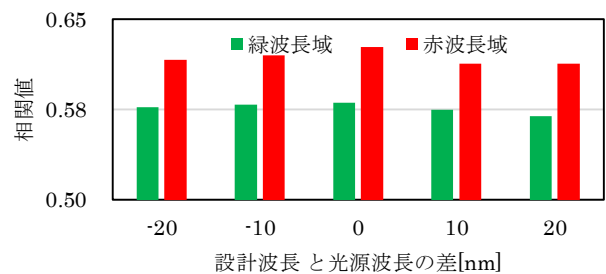


図 9 2波長同時検出の実験結果

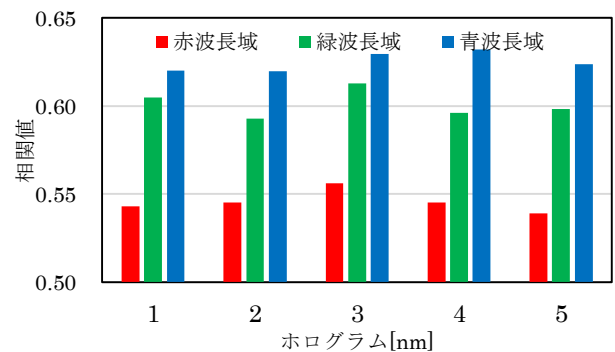


図 10 3波長同時検出の実験結果

6. 結言

フレネルホログラムの波長選択性を利用して、光源の中心波長検出システムを提案し、空間光変調器を用いた検証実験を行った。その結果、回折像に画像処理を施し、零次光やスペックルを軽減することにより光源の中心波長と設計波長が一致する場合に最大強度の回折像が得られた。これにより、複数のフレネルホログラムを用いた光源の中心波長検出手法の妥当性を示すことができた。今後フレネルホログラムを多重化することにより一枚のフレネルホログラムによる中心波長検出システムの可能性が示された。

参考文献

- 1) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton : A Practical Algorithm for the Determination of the Phase from Image and Diffraction Plane Pictures, Optik 35 (1972)