

# 位相一定型フレネルホログラムの設計条件に関する実験的考察

西田 茂生・溝邊 宜之・松本 雅人

Experimental consideration in some design conditions of an amplitude-contrast Fresnel hologram

Shigeki NISHIDA, Noriyuki MIZOBE and Masato MATSUMOTO

The best design conditions of an amplitude-contrast Fresnel hologram were evaluated by the computer simulation and experiments. Moreover, an optical scale has been proposed as an application of Fresnel hologram. As the first, the resolution of the optical scale has been evaluated objectively using the correlate function by computer simulation. As the result, in the case of the distance from a hologram to the image plane is 50mm and the hologram size is  $10 \times 10 \text{mm}^2$ , the distance and angle resolution have become 0.1mm and  $2.5^\circ$  respectively. Finally, it has been understood experimentally to be able to make an optical scale of the distance resolution about 10cm, consisted of four layers.

## 1. 緒 言

これまでの研究において、平面だけでなく任意面に任意の微細パターンを形成できる手法を提案してきた。<sup>1)2)</sup>具体的には実物モデルが不必要な計算機合成フレネルホログラム (CGFH) を用いた。

フレネルホログラムを用いた理由は、実際のホログラムサイズおよび決結像離を考慮した場合、フレネル回折領域での扱いになるからである。非平面を扱う方法としては非平面を平面の線形和として扱う手法を用いた。また、ホログラムには光の利用効率が高い振幅一定型ホログラムと作製が容易な位相一定型ホログラムの二つの設計手法を考えたが、今回は実際にホログラムを作製することを考慮して、位相一定型ホログラムについて述べる。

まず位相一定型フレネルホログラムの最適な設計条件を計算機シミュレーションにより求めた。

次にこの設計手法の応用例として提案している空間光スケールの設計<sup>3)</sup>のために、スケールにおける目盛の最小間隔に相当する光スケールの距離分解能および角度分解能の客観的評価方法を提案し、いくつかの条件における距離・角度分解能を求めた。

その後求められた分解能により空間光スケールを設

計し、外注のスライドにより位相一定型フレネルホログラムとしての空間光スケールを作製した。スライドでホログラムを作製する場合、スライドに印刷できる最高空間周波数によりホログラムパターンの複雑さに限界が生じることになる。そこで作製したホログラムを基にスライドで作製可能な空間光スケールの最適設計条件を求めた。

## 2. フレネルホログラムの基本設計条件

フレネルホログラムからの回折像の鮮明さに影響を与える基本的な設計条件を計算機シミュレーションにより求めた。基本的設計条件として、入射光波面、ホログラム平面の分割数、設計アルゴリズム内におけるCGFHのパターン収束のための繰り返し回数、結像距離を探りあげた。また、シミュレーションは単層で $5 \times 5 \text{mm}$ 角の位相一定型CGFHとし、振幅分布を2値化したものを取り扱う。入射光の波長は632.8nmとした。まず設計方法を示した後、各設計条件について述べる。

### 2. 1 位相一定型フレネルホログラムの設計方法

Fig.1に位相一定型フレネルホログラムの設計手順の概要を示す。

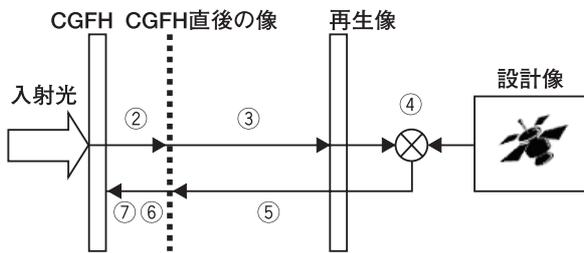


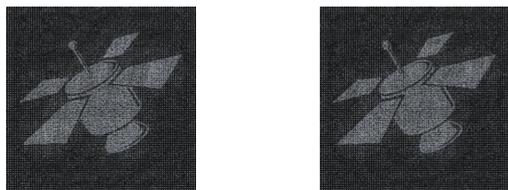
Fig.1 位相一定型フレネルホログラムの設計手順

まず、ホログラムサイズおよび分割数、入射光の波長および波面、結像距離、CGFHのパターン収束のための繰り返し回数の設定を行う。以下図中の番号に基づいて設計方法手順を述べる。

- ① CGFHの位相分布を一定値、振幅分布を乱数で設定する。
- ② CGFHに入射光を乗じCGFH透過光の複素振幅を計算する。
- ③ ②をフレネル変換して回折光の複素振幅を計算する。
- ④ 回折光の振幅分布と設計像の位相を乗じ、回折像を鮮明化する。
- ⑤ ④の複素振幅を逆フレネル変換してCGFH透過光の複素振幅を計算する。
- ⑥ ⑤を入射光で除しCGFHの振幅分布を計算する。
- ⑦ ⑥の結果を新たなCGFHの振幅分布として設定する。
- ⑧ ②から⑦の操作を設定した繰り返し回数だけ行い、得られた振幅分布をCGFHの設計値とする。

## 2.2 入射光波面

入射光波面を平面波と球面波にして回折像を求め、像の鮮明さを比較した。平面の分割数256、結像距離50mm、繰り返し回数10回とした。Fig.2(a)に平面波、(b)に球面波による回折像を示す。



(a)平面波による回折像 (b)球面波による回折像

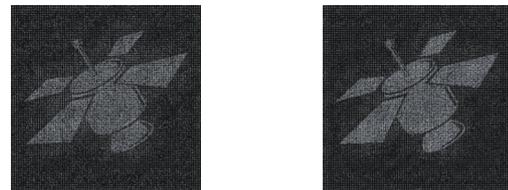
Fig.2 異なる入射光波面による回折像

平面波による回折像と球面波による回折像には際立った相違は見られない。実際の光学系では、ホログラムの大きさから考えると平面波を用いることにより光学系がコンパクトになるため、入射光波面としては平面波を用いる。

## 2.3 設計アルゴリズム内での繰り返し回数

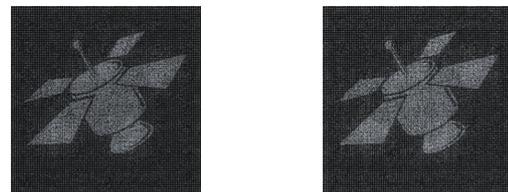
設計アルゴリズム内での繰り返し回数を、1回から10回は1刻み、10回から100回までは10刻み、100回から1000回までは100刻みで変化させて回折像を求め、像の鮮明さの変化を調べた。平面の分割数256、結像距離0.05mmとする。繰り返し回数1, 10, 100, 1000回の回折像をそれぞれFig.3(a)(b)(c)(d)に示す。

1回の繰り返しでも回折像の形は十分に認識できるが、複雑な設計像の場合は、鋭利な部分や微小な隙間など、細部まで描くことが出来ていない。10回はこれまでに用いていた回数で、複雑な設計像でも細部まで十分に描くことが出来ている。10回以降は大きく変化せず、100回、1000回にしても大きな変化はなかった。繰り返し回数が大きくなると設計に要する実行時間が長くなるため、繰り返し回数は10回と設定する。



(a)繰り返し回数1

(b)繰り返し回数10



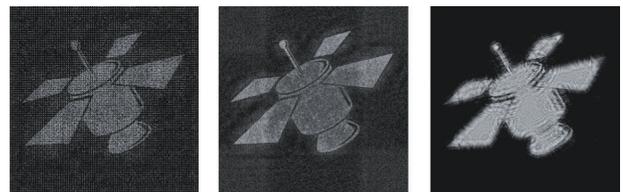
(c)繰り返し回数100

(d)繰り返し回数1000

Fig.3 異なる繰り返し回数による回折像

## 2.4 ホログラム平面の分割数

ホログラム平面の分割数を256, 512, 1024に変化させて回折像を求めた。結像距離50mm、繰り返し回数10回とする。各分割数における回折像をFig.4(a)(b)(c)に示す。



(a)分割数256×256

(b)分割数512×512

(c)分割数1024×1024

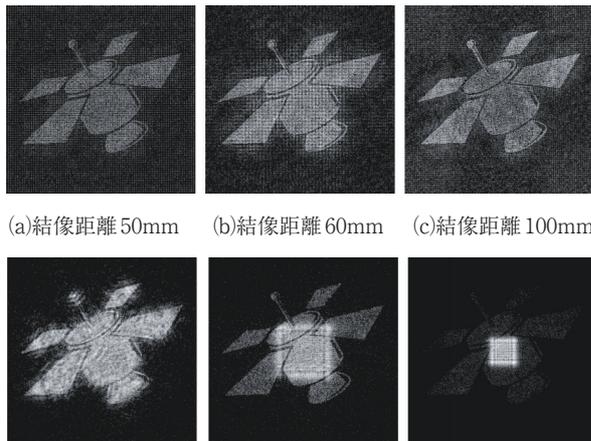
Fig.4 異なる分割数により回折像

256分割はこれまで用いてきた分割数で、複雑な設計像であっても十分に認識することが可能な分割数である。512分割にすると、非常に鮮明な再生像を得ることができる。1024分割にすると、512分割までには表示さ

れていなかった像の周辺部分の強度分布で非常に弱い回折波が現れてしまい輪郭がぼやけてしまった。これは画素が細かすぎためと考えられる。像がより鮮明に見える設計条件を求めため、最適な平面の分割数は512と設定する。ただし、分割数が大きくなるとCGFHの空間周波数が高くなり、ホログラム作製時にパターンが正しく印刷されない部分が発生する。これまでは256分割でもパターンの一部が欠落し印刷できていない場合があった。512分割にすると今まで以上に印刷できない部分が増えてしまい、製作が不可能となってしまう可能性がある。そこで対策として、分割数の増加に比例してホログラムサイズを5mmから10mmなどに変更し、空間周波数が高くなり過ぎないようにする必要がある。

## 2.5 結像距離

近接限界である50mmから100mmまでは1mm刻み、100mmから1000mmまでは100mm刻みで回折像を求めた。分割数256、繰り返し回数10回とする。シミュレーション結果のうち結像距離50, 60, 100, 200, 500, 1000mmの回折像をFig.5(a)から(f)に示す。



(a)結像距離 50mm (b)結像距離 60mm (c)結像距離 100mm  
(d)結像距離 200mm (e)結像距離 500mm (f)結像距離 1000mm

Fig.5 異なる結像距離による回折像

Fig.5(a)から(c)をみると距離の変化により回折像にスペックルの現れ方など細かい変化は見られるが、鮮明さの優劣を判断するほどの差が見られない。また、(d)から(f)のように結像距離が100mm以上で設計を行うと、回折像の中央に徐々に強度の大きい0次回折光が現れるため、目的の設計像が暗くなり見えづらくなる。CGFHの目的は設計した距離にのみ回折像を結像することであるから、距離分解能が小さくなるように設計することが望ましい。距離分解能は結像距離を遠くすると大きくなるのが分かっているため、最適な結像距離は設計するホログラムサイズにより決まるフレネル回折領域の近接限界となる距離とする。

## 2.6 最適基本設計条件

基本設計条件の最適値をシミュレーションにより求め、以下のようにまとめることができる。

入射光波面としては、光学系を考慮すると平面波とする。設計アルゴリズム中の繰り返し回数は10回で十分である。ホログラム平面の分割数としてはホログラム作製に使用する機器の空間分解能により、256または512分割とする。結像距離としてはなるべくフレネル回折の近接限界に近い距離が良い。

## 3. 空間光スケールへの応用

空間の決められた位置に物体を設置するためには、空間内にスケールを設ける必要がある。この空間スケールを光パターンとして構成できれば、物体を設置する作業は、光のパターンを読みとるだけの容易なものとなる。そこで空間の任意の位置に回折パターンを形成することのできる本手法を用いて、空間上に光スケールとしてフレネルホログラム設置することにより、物体の位置決めを行うことが可能となる。スケールを設計する際、スケールの目盛間隔を設定する必要がある。空間光スケールの場合、目盛間隔に相当するものがホログラム設置位置からの結像距離および結像位置での結像面の光軸に対する傾き角である。本研究では設定した結像位置からの程度の距離がずれても再生像が鮮明と言えるかを距離分解能、光軸からの程度傾いても再生像が鮮明であるかを角度分解能と定義する。本章では、まず空間光スケールの距離分解能と角度分解能を客観的に評価し、得られた分解能で空間光スケールの設計を行う。設計条件としては入射光の波長を632.8nm、ホログラムサイズ10mm角、平面の分割数512、結像距離50mmおよび175mmとした。複数の再生距離を必要とするため多層ホログラムの手法を用いた。

### 3.1 相関関数を用いた分解能の評価

距離分解能ではCGFHからの再生距離を結像距離から前後にずらして再生像を得る。また角度分解能では再生面の光軸から傾かせて再生像を得る。結像距離での鮮明な再生画像と各再生位置での再生像の相互相関をとることで、鮮明さを数値化できると考えた。すなわち相関曲線から得られる尖頭度から鮮明さを評価する。ここで、尖頭度とは相関度曲線においてピーク値より1画素だけピークから離れるときの下り勾配と定義する<sup>4)</sup>。簡単のため1次元の相関関数による尖頭度の定義をFig.6に示す。

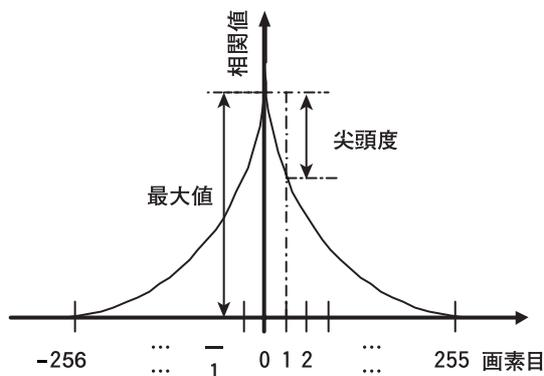
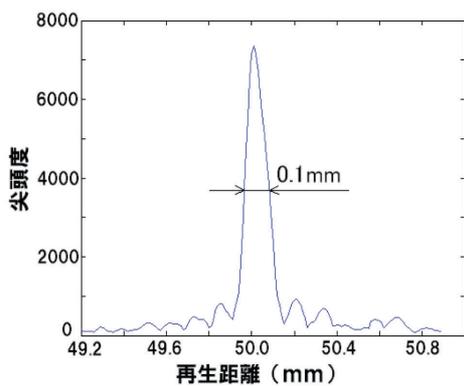
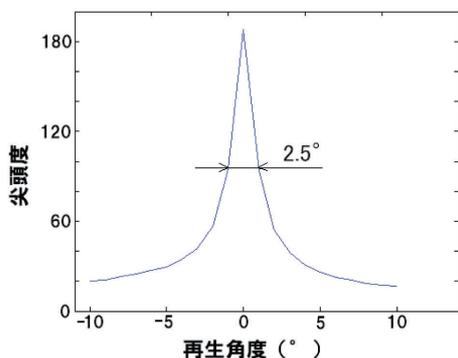


Fig.6 1次元相関関数における尖頭度の定義

本研究では、再生距離および再生角度と尖頭度のグラフより尖頭度の最大値の半値幅を分解能とした。距離分解能と角度分解能における再生像と尖頭度の関係を結像距離50mmでの場合をFig.7(a)(b)に、結像距離175mmでの場合をFig.8(a)(b)に示す。

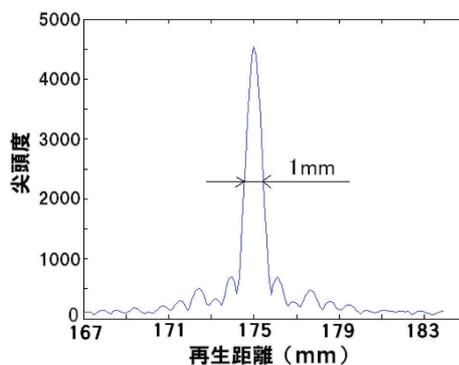


(a)距離分解能

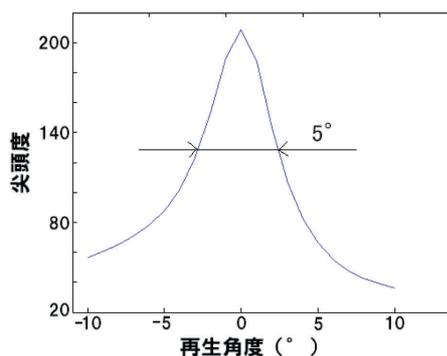


(b)角度分解能

Fig.7 結像距離50mmでの尖頭度と再生距離の関係



(a)距離分解能



(b)角度分解能

Fig.8 結像距離175mmでの尖頭度と再生距離の関係

Fig.7, 8より結像距離50mmで距離, 角度分解能がそれぞれ0.1mm, 2.5°, 結像距離175mmで距離, 角度分解能がそれぞれ1mm, 5°となる。

### 3.2 空間光スケールの設計

前節の結果を用いて結像距離50mmの空間光スケールを設計した。スケールの設計像としてFig.9を用いる。

0	2.5	5	0
2.5	0.7 0.6 0.5 0.4		-2.5
	0.3 0.2 0.1 0		
5	-0.1 -0.2 -0.3 -0.4		-5
	-0.5 -0.6 -0.7 -0.8		
0	-2.5	5	0

Fig.9 空間光スケールの設計像(結像距離50mm)

この設計像は中央部が距離 (単位 mm) のずれに対応した数字を再生する部分で、ホログラム方向へのずれはマイナス、ホログラムと逆方向へのずれはプラスを表す。周辺部は再生面の光軸に対して垂直な面からの傾き角 (単位°) に対応した数字を再生させる部分である。設計したCGFHを用いたシミュレーションの結果を

Fig.10に示す．ここで，再生面は結像距離に配置された傾きのない面とした．

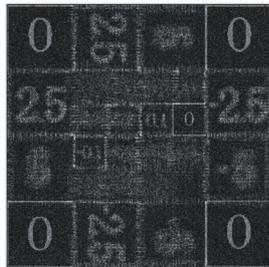
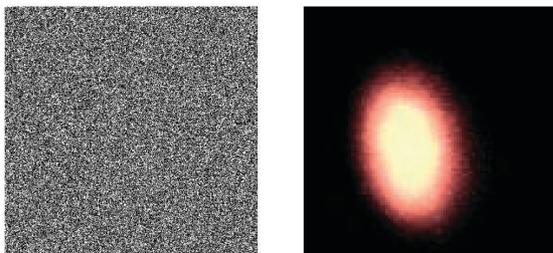


Fig.10 シミュレーションによる光スケールの再生像

Fig.10から距離については結像距離で再生されていることを示す"0"が鮮明に見えている．また，角度についても傾き0°を示す"0"のみが鮮明に見えている．

### 3. 3 空間光スケールの作製

前節で設計した空間光スケールを実際に外注のスライドにより作製した．作製した空間光スケールをFig.11(a)に，またこの光スケールに波長632.8nmのHe-Neレーザを照射したときの再生像の写真をFig.11(b)に示す．再生面はシミュレーションと同様，結像距離に配置された傾きのない面とした．



(a)作製したフレネルホログラム (b)ホログラムの再生像

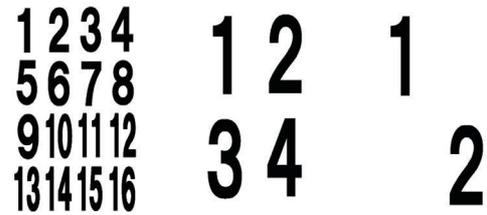
Fig.11 空間光スケールのホログラムと再生像

理論上はFig.10のような結果が得られるはずであるが，実際はFig.11(b)のようなまったく何も表示されていない再生像となった．このようになった原因を調べるため，作製した光スケールを顕微鏡で観察した．その結果，ホログラムのパターンが正しくスライドに印刷されておらず，特に空間周波数の高い部分が全く印刷されていなかった．

### 4. 位相一定型フレネルホログラムの多層化の限界

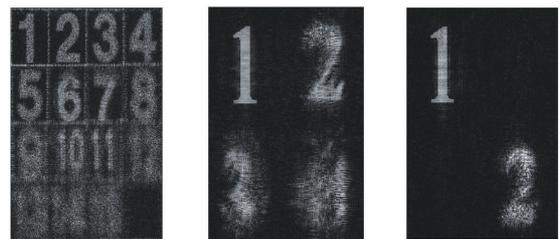
前章の結果をふまえ，空間光スケールを作製する際，フレネルホログラムの多層化の限界を実際にホログラムを作製することにより確かめた．Fig.11(a)(b)に示す設計像で多層フレネルホログラムを設計し，シミュレー

ションで得た再生像をFig.12(a)(b)(c)に示す．なお，層間隔10cm，再生面を結像距離に設置された傾きのない面とした．



(a)16層ホログラム (b)4層ホログラム (c)2層ホログラム

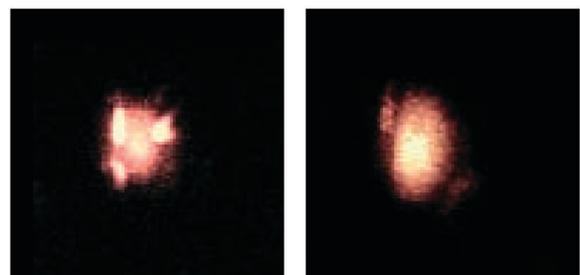
Fig.12 多層フレネルホログラムの設計像



(a)16層ホログラム (b)4層ホログラム (c)2層ホログラム

Fig.13 多層ホログラムの再生像 (シミュレーション)

Fig.13をみると，シミュレーションでは2層，4層ホログラムでは正しく"1"のみが鮮明に再生されているが，16層になると"1"以外の数字も再生されておりスケールとしては用を足さないものになってしまうことがわかる．そこで，4層と2層の多層フレネルホログラムをスライドで作製して実際に光スケールとして実用的であるか同かを調べた．



(a)4層ホログラム (b)2層ホログラム

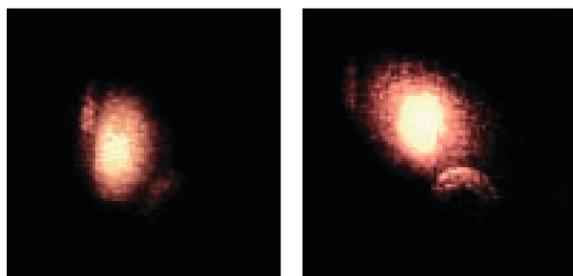
Fig.14 多層フレネルホログラムの再生像 (写真)

Fig.14(a)(b)は実際にスライドで作製した4層ホログラムと2層ホログラムにHe-Neレーザを照射したときの再生像をデジタルカメラで撮影したものである．

理論上はFig.13に示す結果となるはずである．しかし，Fig.14(b)より4層ではかろうじて判断でき，Fig.14(c)より2層では再生できることがわかる．

次に，再生面を結像距離からずらした場合，それに応じて再生像が変化するかどうかを確かめた．2層ホログ

ラムで結像距離での再生像とそこから10cmずつ距離を変えたときの再生像をデジタルカメラで撮影した写真をFig.15に示す.

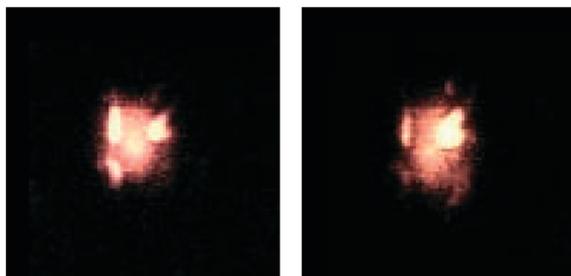


(a)結像距離

(b)結像距離+10cm

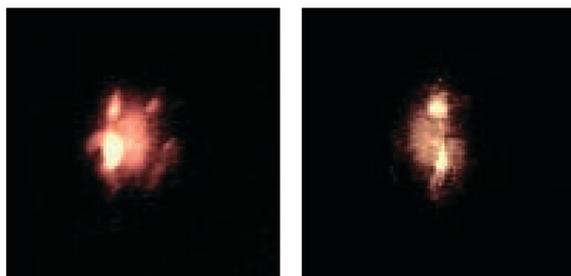
Fig.15 2層フレネルホログラムの再生像 (写真)

また、4層ホログラムの場合で結像距離での再生像とそこから10cmずつ距離を変えたときの再生像をデジタルカメラで撮影した写真をFig.16に示す.



(a)結像距離

(b)結像距離+10cm



(c)結像距離+20cm

(d)結像距離+30cm

Fig.16 4層フレネルホログラムの再生像 (写真)

この他、層間隔1mmおよび1cmの設定でも多層フレネルホログラムを設計・作製し、He-Neレーザの照射による再生を行ったが、再生像に変化が見られなかった。そこで、4層で層間距離10cm程度が、実際に作製する位相一定型フレネルホログラムの分解能の限界であると考えられる。このことから、空間光スケールを外注によるスライドとして作製することが困難であることがわかった。これを改善する方法としては、より細かなパターンを描くことのできる電子ビーム描画装置などを用いてフレネルホログラムを作製するか、分割数を増やし、ホログラムサイズを大きくすることで、フレネ

ルホログラムのパターンが正確にスライドに記録できるよう工夫することが考えられる。

## 5. 結 言

本研究では、先ずこれまでに開発してきた任意の面に任意の微細パターンを形成できる設計手法において、位相一定型フレネルホログラムの最適設計条件を計算機シミュレーションで求めた。その結果入射光波面としては、光学系を考慮すると平面波が適当であり、設計アルゴリズム中の繰り返し回数は10回で十分である。ホログラム平面の分割数としてはホログラム作製に使用する機器の空間分解能により、256, 512分割で十分であり、結像距離としてはフレネル回折近接限界に近い距離が良いことがわかった。

次にこの手法の応用として空間光スケールを提案してきたが、その分解能を客観的に求める方法として、相関関数を用いる方法が有効であることがわかった。また、それを元に空間光スケールの設計を行ったところ、計算機シミュレーションでは、結像距離50mm、ホログラムサイズ10mm角、分割数512のホログラムでは、距離で分解能0.1mm、角度分解能 $2.5^\circ$ のとなることがわかった。このことから、理論上は距離分解能0.1mm、角度分解能 $2.5^\circ$ の空間光スケールが可能であると考えられる。最後に、実際に外注のスライドで空間光スケールを作製し、再生像を確認することにより、作製可能な位相一定型フレネルホログラムの設計条件を実験的に求めた。具体的には、空間光スケールは複数の結像距離を持つ多層フレネルホログラムであるため、何層でどの程度の距離分解能まで再生が可能であるかを調べた。その結果、4層で距離分解能10cm程度の空間光スケールが作製可能であることがわかった。

## 参考文献

- 1) 非平面への微細パターン形成のためのCGH設計アルゴリズム;西田茂生, 堀崎遼一;奈良工業高等専門学校研究紀要40(2004)39-44
- 2) 非平面への微細パターン形式のための計算機合成フレネルホログラムの開発;西田茂生, 堀崎遼一, 菊田久雄;精密工学会 2005.3.18 講演
- 3) アライメント作業のための位相一定 計算機合成フレネルホログラムの開発;堀崎遼一, 西田茂生, 菊田久雄;精密工学会 2005.3.18 講演
- 4) 梵字認識システムの構築; 堀崎遼一, 西田茂生;精密工学会 2003.3.26 講演