

情報検索ホログラムメモリーのレンズ系設計と情報量限界

土田 恵一*・関根 征士**・大河 正志**・三田 元仁***

*長岡工業高等専門学校電気工学科 〒940-8532 長岡市西片貝町 888

**新潟大学工学部電気電子工学科 〒950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050

***新潟職業訓練短期大学校 〒957-0017 新発田市新富町 1-7-21

Design of Single Lens and Capacity of Information for Optical Information Retrieval System

Keiichi TSUCHIDA,* Seishi SEKINE,** Masashi OHKAWA** and Motohito MITA***

*Department of Electrical Engineering, Nagaoka College of Technology, 888, Nishikatakai-machi, Nagaoka 940-8532

**Faculty of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi Ninocho, Niigata 950-2181

***Department of Information Engineering, Niigata Polytechnic College, 1-7-21, Sintomicho, Shibata 957-0017

A design of single lens for optical information retrieval system and capacity for the system are reported. Capacity of information for the system is determined by aberrations for Fourier transform lens and limitation of diffraction. We calculate area of rays focused by Fourier transform lens for the system, and research limitations of information depended on diffraction. Comparing the results of the area of rays and the limitation of diffraction, most suitable single lens and area of holograms, spatial light modulators, and detectors are determined. Predicted retrieval time of the optical system with 100 micro seconds of one operation is 100 times shorter than those for computer system with CD-ROM.

1. ま え が き

近年、社会が扱う情報量は増加の一途を辿り、将来においてその増加速度はさらに加速すると予想される。この状況において、大量の情報から必要とする情報を検索するシステムは今後さらなる大容量化と処理速度の向上が求められる。現在、情報検索は電子式のデジタルコンピューターにより行われている。しかし、莫大な情報量を扱う場合、光の特長である大容量・並列処理の可能な光コンピューターの一手法であるホログラムメモリーを用いた情報検索システムが注目されている。

筆者らは情報検索ホログラムメモリーに必要なデバイスに関する研究あるいは動作実証用システムの試作等を行ってきた^{1,2)}。今後、情報検索ホログラムメモリーの実用化を図るためには、本システムの情報量、処理速度といった能力の限界を明らかにした上でシステム設計が必要となる。そのため、本研究では光の回折限界とフーリエ変換レンズ

による収差という2点について着目した。

本システムは光を情報の媒体として用いるため、情報量限界は光の回折により制限される。この回折限界を考慮し、本システムにおいて最大限の情報量を扱うためにはホログラムアレイとSLMそしてフォトディテクターアレイに対してどのような条件が必要であるかを検討した。さらに、本システムでは、レンズ系の収差を無視することはできない。かつ、本システムに用いるフーリエ変換レンズは物体距離がレンズの焦点距離である場合と物体距離が無限大である場合という、異なる結像における収差低減が必要となる。この問題を解決するため、本研究では、最もシンプルなシングルレンズについてレンズの曲率半径を変化させてレイトレースを行った。

以上述べた回折限界の条件とレンズ系の収差はレンズが同一焦点距離の場合、ホログラムアレイ面、SLM面、そしてディテクター面の径に対して相反する性質となる。そのため、両者の条件を比較し、レイトレースにより求めたレンズ系に対して最適なホログラムアレイ面、SLM面、そし

E-mail: ktuchi@nagaoka-ct.ac.jp

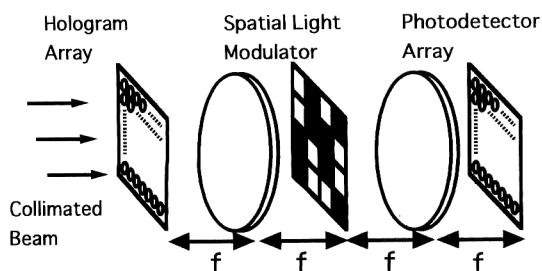


Fig. 1. Schematic diagram of information retrieval system.

でディテクター面の径を決定し、配置可能なホログラム数と SLM 窓数を求めた。最後に設計したシステムの情報量と動作速度についての検討を行い、本システムの処理能力を評価した。

2. 情報検索システムの概要

Fig. 1 に本システムの概要を示す。本システムはホログラムアレイ、空間光変調器（以下 SLM と略す）、フォトディテクターアレイと 2 組のフーリエ変換レンズから構成されている。検索される情報の内容はホログラムアレイ中の 1 ホログラムに 2 値符号化され記録されている。ホログラムアレイにコリメートされたレーザー光が照射されると、個々のホログラムからの再生像はフーリエ変換レンズにより SLM 上に重畳して再生される。情報に含まれる個々の項目は 1 bit の情報を 1 組 2 個からなるドットにより表される。すなわち、ビット情報の値に応じて 1 組 2 個のドットのうち、1 つは明点となり、残りは暗点となる。そのため、情報項目のビット数に対し 2 倍の SLM 窓が必要となる。この SLM 窓はデータマスクとして機能する。検索すべき情報の項目に対応した SLM 窓は低透過率とする（以後、この状態を「閉」とする）。すると、SLM の項目と一致した情報について、ホログラムからの再生光は遮断される。一方、検索すべき情報ではない項目に対応した SLM 窓は高透過率とする（以後、この状態を「開」とする）。すると、SLM の項目と一致しない情報についてホログラムからの再生光は SLM を透過する。その結果 SLM すべての項目と一致したホログラムの再生光は完全に SLM により遮断され、逆に SLM と 1 項目でも異なるホログラムの再生光は SLM を透過する。SLM を透過した再生光は再びフーリエ変換レンズによりフォトディテクターアレイ上に重畳して結像する。このとき、ホログラムアレイからの再生光とディテクター上の結像は 1 対 1 に対応し、共役な位置関係となる。したがって、ホログラムアレイ数と同数のディテクターアレイが必要となる。その結果、SLM に表示される検索情報と完全に一致する情報を記録したホログラム

に対応するディテクターアレイは暗点となる。

本システムは、以上述べた方法により、個々のホログラムに記録された情報から必要とする情報のアドレスを並列処理により検索する。

3. 光の回折限界による性能制限

前章において述べたように、本システムではホログラムに記録された光波を再生して検索を行う。そのため、ホログラム数、ホログラムに記録された情報密度あるいは SLM 窓数の最大値は光の回折により制限される。本システムにおける回折限界を調べるため、ランダムな位置に円形開口が多数ある情報構成板を記録物体とするホログラム記録時の光学系を想定する。情報構成板には円形開口が情報の項目数の 2 倍あり、情報の項目に応じて開または閉となっている。

情報構成板から回折する光波はフーリエ変換レンズによりフーリエ変換されて、参照光と干渉することにより記録材料上に記録される。このような円形開口により生じるホログラム面の回折像の光振幅分布は、その中心を含む断面がベッセル第 1 種関数に比例する³⁾。ここでエアリーディスクと同様に第 1 明輪までをホログラムの大きさとして仮定すると、光の波長を λ 、レンズの焦点距離を f として、情報構成板の半径 r_0 とホログラム r_h の半径は

$$r_h = 1.22 \lambda f / r_0 \quad (1)$$

と表される。この式(1)は情報構成板の円形開口とホログラムの大きさの回折による限界を表している。また、ホログラムの 1 個あたりの面積を Δ_h 、情報構成板の開口 1 個あたりの面積を Δ_0 として Δ_h と Δ_0 の関係は

$$\Delta_h = 1.49 \pi \lambda^2 f^2 / \Delta_0 \quad (2)$$

と表される。

次に式(2)の条件から本システムにおいて最大限の情報量を扱うための条件を論じる。ホログラムアレイ面、SLM 面、ディテクターアレイ面はレンズの面積を有効に利用するため円形と仮定し、それぞれの直径を Φ_h 、 Φ_s 、 Φ_d とする。ただし、本システムにおける 2 組のフーリエ変換レンズの焦点距離は等しいため、 Φ_h と Φ_d は等しくなる。

ホログラムに記録する情報構成板の円形開口はホログラムの位置に関係なく SLM 面上に重畳して再生される。ホログラム再生時のフーリエ変換レンズによる収差あるいは回折による影響を無視すると、情報構成板の開口 1 個あたりの面積 Δ_0 と SLM 窓 1 個あたりの面積 Δ_s は等しい。このとき、ホログラムアレイにおいて最周辺部にあるホログラムの再生光が SLM 上に結像するための条件を考える。最周辺部にあるホログラムからの再生光が光軸となす最大

角を θ とする。このとき、レンズによるフーリエ変換が成り立ち、ホログラムからの再生光がレンズの有口径 D 内に入射するためには

$$\Phi_h/2 + f \sin \theta = \Phi_h/2 + \Phi_s/2 = D/2 \quad (3)$$

なる条件が必要である。ここで、式(3)について、 Φ_h と Φ_s の比を変数 a を用いて $a : (1-a)$ と表すと

$$\Phi_h = aD \quad (4)$$

$$\Phi_s = (1-a)D \quad (5)$$

ただし、 $0 < a < 1$ となる。式(4)と式(5)からホログラムアレイ面積 S_h と SLM 面積 S_s を求めると

$$S_h = \pi (\Phi_h/2)^2 = \pi a^2 D^2 / 4 \quad (6)$$

$$S_s = \pi (\Phi_s/2)^2 = \pi (1-a)^2 D^2 / 4 \quad (7)$$

となる。式(6)を式(2)に示す Δ_h により除算することにより、配置可能なホログラム数 n_{ho} は

$$n_{ho} = a^2 D^2 \Delta_s / (7.84 \pi^2 \lambda^2 f^2) \quad (8)$$

となり、同様に式(7)を Δ_s により除算することにより、配置可能な SLM 数 n_{slm} は

$$n_{slm} = \pi (1-a)^2 D^2 / (4 \Delta_s) \quad (9)$$

となる。式(8)、(9)から、ホログラム数あるいは SLM 数は、 Φ_h と Φ_s の比と Δ_h 、 Δ_s の比によって配分が変わることがわかる。

ホログラム数は検索すべき情報の数に対応しており、SLM 数は検索すべき情報の項目数に対応している。一般的に情報数と項目数のどちらを優先させるかという問題は容易に結論を得ることはできない。そこで、ホログラム数と SLM 数の積を全情報量 n_{all} と定義して、評価の対象とする。 n_{all} は式(8)と式(9)より

$$n_{all} = a^2 (1-a)^2 D^4 / (23.84 \pi \lambda^2 f^2) \quad (10)$$

となる。式(10)から全情報量は a により異なり、 $a=0.5$ 、すなわち、 $\Phi_h = \Phi_s = \Phi_d = 0.5D$ とした場合に最大の情報量を取り扱うことが可能となることがわかる。また、ホログラム数と SLM 数の積は一定となるので、両者の配分は回折限界をふまえた上で Δ_h と Δ_s の比によって変えるべきである。

4. レイトレースによるレンズ設計

前章では、回折の観点から本システムの情報量限界について論じたが、システムを設計する場合、レンズの収差による影響を無視することはできない。かつ、本システムに用いられるレンズは、物体距離が焦点距離の場合と物体距離が無限大の場合という異なる2種類の結像について収差を低減する必要がある。しかし、この異なる物体距離の結像について、両者の収差を完全になくすことは不可能である。一般にレンズは構成枚数が多くなるほど収差を低減で

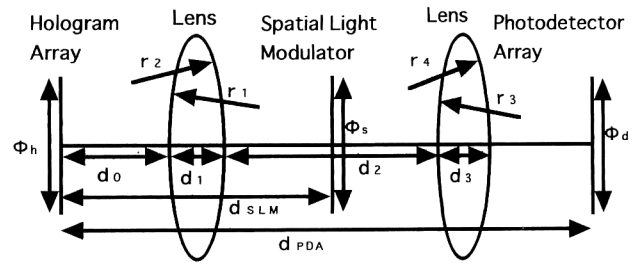


Fig. 2. Schematic diagram for lens design.

きることは知られている。しかし、どのようなレンズを用いてもすべての収差をなくすことは事実上不可能である。かつ、仮に収差がないレンズを用いたとしても回折限界による制限は存在する。

そこで、本研究では、最もシンプルな単レンズをフーリエ変換レンズとして用いたときに最適なレンズを設計し、本システムが扱うことが可能な情報量を検討する。

4.1 レイトレースによるレンズ設計

本システムはホログラムからの再生光を2枚のフーリエ変換レンズを介して SLM 上とディテクターアレイ上に結像させる。本システムに用いるレンズを設計する場合、近軸領域における収差論からレンズ設計を行うことは大変見通しが悪い。そのため、本研究では本システムにおける光路を追跡するレイトレース⁴⁾を行う。

レイトレースを行う場合、Fig. 2 に示す光学系を想定する。1個のホログラムから再生される光波は1枚目のフーリエ変換レンズを透過し、ホログラムの位置にかかわらず SLM 上の各窓に入射する。これらの光波は SLM 窓を通過した後、2枚目のフーリエ変換レンズを透過して、ディテクターに集光する。すなわち、ある SLM 窓には異なるホログラムから互いに平行な進行方向に再生される光波が集まる。一方、あるディテクターには同一ホログラムから異なる進行方向に再生され、SLM のすべての窓を透過した光波が集まる。この2種類の結像における最周辺部の集光面積は、同一のレンズを使用しても Φ_h 、 Φ_s 、そして Φ_d の値により異なる。そのため、これらの条件は前章にて求めた回折限界時に最大の情報量を取り扱うことが可能な条件、すなわち $\Phi_h = \Phi_s = \Phi_d$ とした。光源としては、最も廉価な He-Ne レーザーを、単レンズの材質としては、最も一般的で安価な硼珪クラウンガラス (BK-7, オハラ社 S-BSL7) を想定した。

単レンズの焦点距離 f はレンズの屈折率 n 、レンズの第1面の曲率半径 r_1 、レンズの第2面の曲率半径 r_2 、レンズの厚さ d によって決まる。そのため、 f 、 d 、そして n を一定値として r_1 をパラメーターとして変化させた。また2枚目の

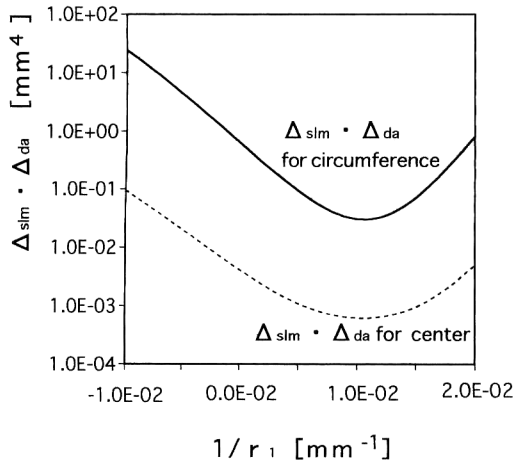


Fig. 3. Product of area of SLM and that of photodetector versus inverse of radius of lens.

フーリエ変換レンズの曲率半径はディテクターアレイにおける歪曲を少なくするため、SLM に対して対称、すなわち $r_3 = -r_2$, $r_4 = -r_1$ とした。

また、3章にて述べたように、本システムの評価指標としては、ホログラム数と SLM 数の積である全情報量が適すと考えられる。かつ、レイトレースを行う場合、 $\Phi_h = \Phi_s = \Phi_d$ なる条件を用いる。そのため、ホログラム数と SLM 数はディテクター面に集光する面積と SLM 面に集光する面積に反比例する。本研究ではレイトレースの評価指標として、集光面積を結像面スポットダイアグラムにおける横方向と縦方向の最大広がりから求められる長方形の面積として定義した。そして、ディテクター面に集光する集光面積と SLM 面に集光する集光面積の積をレイトレースの評価指数とする。また、レイトレースを行った光線本数は 1 結像あたり 756 本である。

4.2 レイトレースによる計算結果

前節にて述べた条件に基づいてレイトレースを行った結果を Fig. 3 に示す。計算の条件としては $f=100$ mm, $d=40$ mm, $\Phi_h = \Phi_s = \Phi_d = 30$ mm, レンズ材質である硼珪クラウンガラスの屈折率は 1.51462 とした。Fig. 3 の横軸は $1/r_1 = -1/r_4$, 縦軸はディテクター集光面積と SLM 集光面積の積を示す。

Fig. 3 から、積 $\Delta_{slim} \cdot \Delta_{da}$ は $1/r_1$ に対して最小値があることがわかる。本システムでは、1 枚目のレンズと 2 枚目のレンズに求められる収差補正が異なる。ある SLM 窓に集光する光線群は、異なるホログラムから平行に射出したものである。そのため、1 枚目のレンズにおいて物体距離が無限大時に収差が最小となる場合、 Δ_{slim} は最小となる。一方、ディテクター面に集光する光線群は、1 個のホログラムから異なる方向に射出したものである。この光線群は、1 枚

Table 1. Designed lens for the system.

Radius [mm]	Distance [mm]	Glass	n_{He-Ne}
$r_1 = +94.340$	$d_0 = 85.98$		
$r_2 = -96.915$	$d_1 = 40.00$	S-BSL7 (BK7)	1.51462
$r_3 = -96.915$	$d_2 = 171.19$		
$r_4 = +94.340$	$d_3 = 40.00$	S-BSL7 (BK7)	1.51462
	$d_{SLM} = 211.57$		
	$d_{PDA} = 423.14$		

目のレンズにより平行な光線群に変換され、SLM を透過した後、2 枚目のレンズによりディテクター面に集光する。そのため、1 枚目のレンズにおいて物体距離 f の場合の収差が最小となり、かつ 2 枚目のレンズにおいて、物体距離が無限大時に収差が最小となる場合、 Δ_{da} は最小となる。積 $\Delta_{slim} \cdot \Delta_{da}$ が最小となる $r_1 = -r_4$ は、これらの収差にバランスが最もとれた場合と考えられる。

また、SLM 面およびディテクター面の中心に集光する $\Delta_{slim} \cdot \Delta_{da}$ に比べて、周辺部に集光する $\Delta_{slim} \cdot \Delta_{da}$ は 4 倍程度大きい。この理由は、SLM 面あるいはディテクター面の周辺部に集光する光線は、レンズに入射する入射高あるいは光線の光軸に対する傾きが大きいため収差が増大するためと考えられる。

以上の結果から、本システムに適すると考えられるレンズ系を Table 1 に示す。これらの結果は SLM 面とディテクター面の周辺部における集光面積の積が最小となる値である。

4.3 回折限界と収差の最適化

前節では、レイトレースによりレンズの設計を行った。しかし、前節の設計では回折による限界を考慮していない。前章にて論じたように、回折による結像の広がりにはレンズの焦点距離と波長により決まる。すなわち、回折による影響のみを考慮した場合、 Φ_h , Φ_s そして Φ_d を大きくするほど、本システムにおいて扱うことが可能な情報量は増加する。一方、幾何学的な収差による結像の広がりには、入射高あるいは主光線と光軸のなす角が大きいくほど、著しく増加する。すなわち、収差を考慮した場合は、 Φ_h , Φ_s そして Φ_d を大きくするほど、本システムにおいて扱うことが可能な情報量は減少する。これら回折と収差は、 Φ_h , Φ_s そして Φ_d をパラメーターとして情報量に対して相反する性質であり、かつ両者を分離することは不可能である。この両者の影響を最小にするためには、回折による広がり収差による広がりが等しい条件を求める必要がある。

そこで、以下に前節にて求めたレンズの設計を用いて最適条件を求める。回折による広がり面積は式(2)より表される。一方、収差による広がり面積はレイトレースにより求めることができる。Table 1 に示されたレンズの設計値

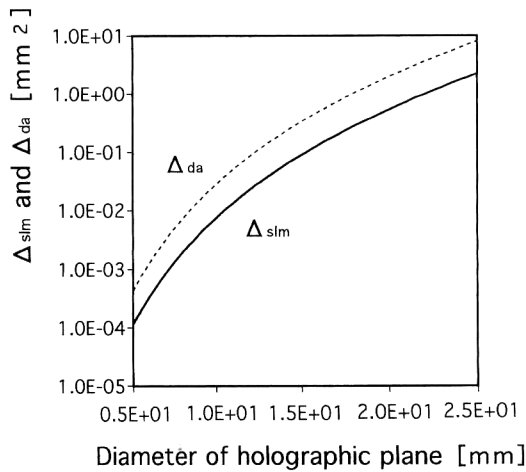


Fig. 4. Area of SLM and photodetector versus diameter of holographic plane.

を用い、かつ前章と同様に $\phi_h = \phi_s = \phi_d$ とし、 ϕ_h をパラメータとして最周辺部における集光面積をレイトレースにより求めた。この結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から、 ϕ_h が大きくなるに従って、急激に収差の影響が大きくなり、集光面積が増加することがわかる。さらに、 Δ_{slm} と比べて Δ_{da} が大きいことがわかる。SLM 面に結像する光線群は、レンズ 1 枚を透過した後、集光する。一方、ディテクター面に結像する光線群は、レンズ 2 枚を透過した後、集光する。そのため、ディテクター面に集光する光線群は 2 枚のレンズによる収差の影響を受け、集光面積は増大すると考えられる。

Δ_{da} と Δ_{slm} の比を求めると、 $5 \text{ mm} < \phi_h < 50 \text{ mm}$ の範囲において、 $3.64 < \Delta_{da}/\Delta_{slm} < 3.76$ となる。この Δ_{da} と Δ_{slm} の比とレンズ設計時の波長、焦点距離を式(2)に示される回折限界の式により、 Δ_{slm} 、 Δ_{da} を求めると、 $\Delta_{slm} = 0.223 \text{ mm}^2$ 、 $\Delta_{da} = 0.830 \text{ mm}^2$ となる。以上の集光面積から求めたホログラム半径、SLM 半径、ホログラム数、SLM 窓数を Table 2 に示す。

Table 2 から、本システムにおいて、並列処理が可能な情報数とそのビット数がわかる。Table 2 の設計例は、レーザーの波長やレンズの焦点距離を仮定して求めた一例であるが、各条件が変化しても、本システムのレンズ設計法として応用できる。

5. 情報処理速度に関する検討

前章までは、単レンズを用いた場合、情報検索システムにおいて、扱うことが可能な情報量を検討してきた。本章では、情報検索システムの動作処理速度について検討する。

本システムにおいて、処理速度が必要な部分は SLM と

Table 2. Designed values of the optical system.

Radius of hologram	0.514 mm
Radius of SLM	0.266 mm
Radius of holographic plane	
Radius of SLM plane	8.75 mm
Radius of detector plane	
Number of holograms	289
Number of detectors	
Number of SLM	1079

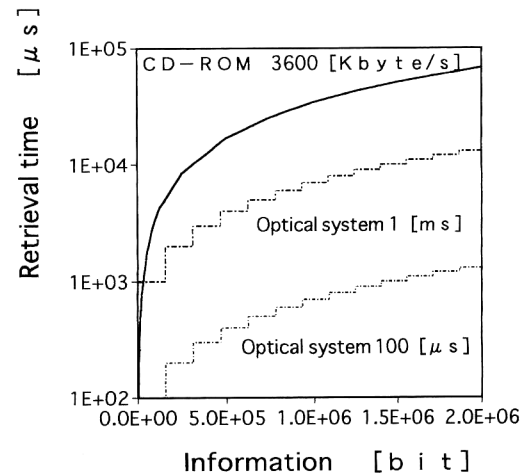


Fig. 5. Comparison of retrieval time between computer system with CD-ROM and the optical system.

ディテクターである。SLM については、現在高速に動作する素子の開発が遅れている。現状で本システムに適した素子としては、強誘電性液晶が考えられ、高速なものも $70 \mu\text{s}$ 程度で動作する⁵⁾。ディテクターに関してはフォトディテクターアレイ、あるいは CCD チップなど、比較的素子の開発が進んでいる。そのため、現状における本システムの動作速度は SLM に依存すると考えられる。

一方、現在の電子計算機では、逐次記録媒体からデータを読み込み、CPU により比較を行うことにより検索が行われる。現在の電子計算機は CPU の処理速度が他の記録媒体からの転送速度に比べて速い。そのため、電子計算機の処理速度は記録媒体からの転送速度に依存すると考えられる。現在の電子計算機において、大量の情報を記憶する記録媒体としては CD-ROM が挙げられる。CD-ROM の転送速度を 3600 Kbyte/s と仮定し、情報量検索速度を計算した。ただし、情報検索速度は記録媒体のすべての情報を比較し、判定が終了する時間と定義した。

以上の方法により情報検索速度を比較した結果を Fig. 5 に示す。本システムと電子計算機の検索方法は全く異なる。そのため、情報検索速度を比較するためのパラメータとしては、本システムの仮定した動作速度を用いた。

Fig. 5 から、検索する情報量が莫大になるほど、本シス

テムの優位性が増すことがわかる。単レンズにより設計したシステムと現状のCD-ROMを比較すると、システムの動作速度を1msと仮定した場合で処理速度はおよそ1桁速くなり、システムの動作速度を100 μ sと仮定した場合でおよそ2桁速くなる。

6. ま と め

本研究では、単レンズについて光の回折限界とフーリエ変換レンズによる収差について最適化を行い、情報検索プログラムメモリの設計を行った。

最初に、回折限界による情報量制限を求めた。その結果、本システムにおいて $\Phi_h = \Phi_s = \Phi_d = 0.5D$ とした場合に最大の情報量を取り扱うことが可能となることがわかった。次にその条件を踏まえて、レイトレースにより単レンズの収差による結像広がり計算した。計算した結果から、本システムに適した単レンズの設計例を求めた。回折限界による結像広がりとレンズの収差による結像広がりを比較し、両者が等しくなる $\Phi_h = \Phi_s = \Phi_d$ の値を求め、システムの各値を求めた。その結果、本研究の設計例においてホログ

ラム配列可能数は239、SLM数は1079である。

設計したシステムの動作速度はシステムの動作速度を100 μ sと仮定して予測した。その結果、現在の電子計算機と比較して、およそ2桁速い情報検索を行うことが可能であると考えられ、光の並列性を活用したシステムが情報の処理速度に関していかに有効であるかということを示している。

文 献

- 1) X. Z. Wang, A. Hirai, K. Shioya, M. Ohkawa, S. Sekine and S. Ando: "Fast and highly parallel content addressing of a large amount of information recording in a holographic memory," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 3003-3009.
- 2) 羽鳥雅章, 塩谷康平, 土田恵一, 三田元仁, 大河正志, 関根征士: "空間光変調器を用いた光情報処理システムの動作実験", *電子情報通信学会誌*, **J79C-1** (1996) 10-18.
- 3) 谷田貝豊彦: 光とフーリエ変換 (朝倉書店, 1992) pp. 27-29.
- 4) D. P. Feder: "Optical calculations with automatic computing machinery," *J. Opt. Soc. Am.*, **41** (1951) 630-635.
- 5) 原 勉: "空間光変調器と光メモリー", *光技術コンタクト*, **33** (1995) 665-671.