

大規模光伝搬シミュレーション技術と そのコンピュータホログラフィへの応用

松島恭治

1. はじめに

光学の一分野として波動光学あるいは物理光学と呼ばれる分野がある。光を光線で近似する幾何光学とは異なり、波動光学では光の干渉、回折、偏光などの波動的性質を取り扱う。したがって、これらの現象が支配的な光学機器や技術では重要な分野である。特に、近年のイメージセンサ、微細加工技術、液晶等の空間光変調デバイスの発展によりホログラフィに関連する光学技術がデジタル化しており、波動光学的な計算やシミュレーションの重要性が増している。本稿では、近年発展が著しいコンピュータホログラフィ/デジタルホログラフィに関連して、サンプリング点数が数 10~数 100 億程度になる大規模な光波の伝搬をシミュレーションする技術とその応用について述べる。

2. 大規模光波伝搬シミュレーションの手法

2.1 開口からの回折光のシミュレーション

波動光学において計算規模が巨大になることを示すために、例として、[図 1 \(a\)](#) に示すように小さな開口の背面を波長 633 nm の単色光で照明した場合に距離 d 離れたスクリーン上で観察される回折光の波動光学シミュレーションの結果を [図 1 \(b\)](#) と [図 1 \(c\)](#) に示す。[図 1 \(b\)](#) の例は高さ 1 mm の「イ」の文字形開口からの回折であり、20 mm から 60、100 mm と伝搬するに従って回折光の形が崩れて広がっていく。しかし、この例では 100 mm 伝搬後でも回折光の広がりはいずれも概ね 1.5 mm 四方の範囲に収まっている。しかし、文字高を 0.1 mm に縮小した [図 1 \(c\)](#) の例では、20 mm の回折で計算範囲全体の約 2 mm 四方に広がっており、 $d = 100$ mm では完全に計算範囲を逸脱して広がっている。実のところ、[図 1 \(c\)](#) の $d = 100$ mm の場合では 15 mm 四方程度に回折光が広がっている。

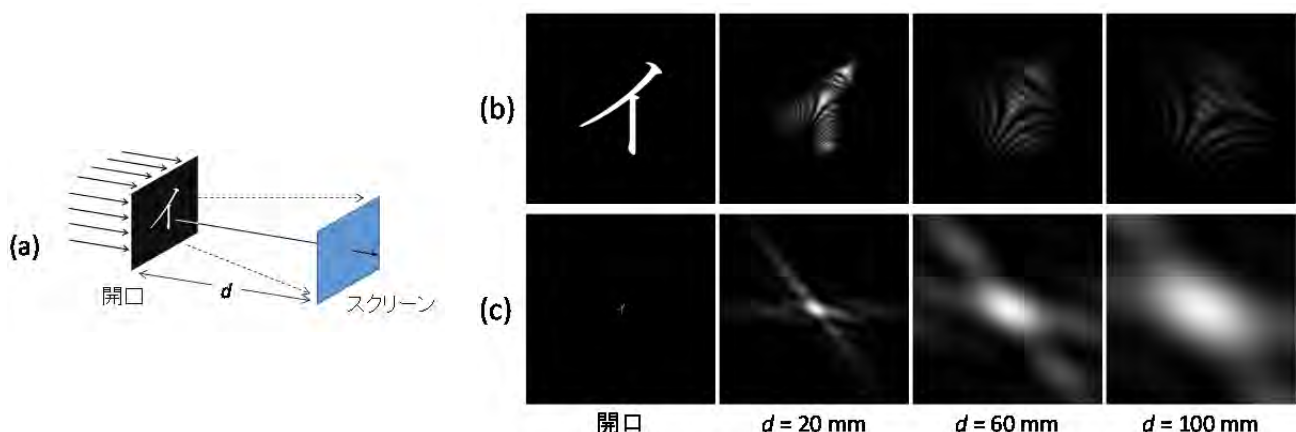


図 1 「イ」文字形開口からの回折シミュレーション

この様な波動光学シミュレーションでは、開口面とスクリーン面の光波をそれぞれ2次元格子上でサンプリングし、それぞれのサンプリング点の光を複素振幅と呼ばれる複素数値で表す。この時必要なサンプリング間隔は、どの程度軸から外れて進行する光を扱う必要があるかによって決まる。目安として、波長 λ の光をサンプリング間隔 Δ でサンプリングした場合には、スクリーン（あるいは光学器具）に入射する光線の入射角 θ は次の関係を満たさなければならない。

$$\theta \leq \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2\Delta} \right)$$

図1の例では、開口面のサンプリング間隔を水平垂直方向とも $1\ \mu\text{m}$ としたため、角度 $\theta = 18.5^\circ$ が限界となる。開口背面の入射光が元々軸に対して傾きを持っている等の理由により、もし回折光にこの角度より大きな方向成分があると、エイリアシング誤差が生じて正しい結果を得られない。

さて、図1(c)の $d = 100\ \text{mm}$ で回折光全体を計算したい場合、スクリーン側に必要なサンプリング数はどれぐらいになるであろうか。光波伝搬計算では一般にFFTを用いる関係で、サンプリング数は2のべき乗が望ましい。そこで、約 $15\ \text{mm}$ 四方を間隔 $1\ \mu\text{m}$ でサンプリングするために、垂直水平共に $2^{14} = 16,384$ のサンプリング点を用いることにすると、その総数は $(2^{14})^2 = 2^{28}$ 点となる。一つの複素振幅値を2個の単精度数で表現すると1サンプリング点あたり8バイトが必要であるので、必要なデータ容量は $2^{31}\ \text{Byte} = 2\ \text{GByte}$ となる[a]。実際には、回折計算を正確に行うために水平垂直とも一時的に2倍に拡張して計算する必要があるため、計算途中で必要なメモリ容量は8GByteに達する。したがって、この原稿を書いている筆者のパソコン（4GByte搭載）では、この計算は完全にギブアップである[b]。このように、わずか $0.1\ \text{mm}$ サイズの開口からの回折計算だけでもかなりのメモリ容量を必要とする。実際には後述のように伝搬元（ここでは開口面）と伝搬先（スクリーン面）の両方が数cmから数10cmサイズの場合もあり、単純に必要なデータ容量を求めると数テラバイトに達することもある。

注釈

[a] ここでは $2^{30} = 1,073,741,824$ バイトを1GByteと表現している。

[b] ここでは、回折後の光波にさらに処理を施して後段のシミュレーションにつなげることを想定しているため、開口面と同じ $1\ \mu\text{m}$ のサンプリング間隔の回折結果を得ている。単に回折光の形を知りたいだけであれば、シフテッドフレネル計算法のように回折後のサンプリング間隔を変えられる手法を用い、スクリーン面でのサンプリング間隔を広げると、最小限のサンプリング数で計算することもできる。

2.2 オフアクシス型回折計算法を用いた大規模光波の伝搬シミュレーション

計算機に搭載されたメモリ容量をはるかに超える規模の光波を伝搬計算するためには、オフアクシス型の伝搬計算法を用いる。図2(a)に示すように、一般的な伝搬計算法では伝搬元の計算範囲が光軸方向に平行移動した範囲で伝搬先の光波が得られるのに対して、オフアクシス型伝搬計算法では、図2(b)に示すように、光軸と垂直な方向にずれた範囲で伝搬先の光波を計算することができる。このようなオフアクシス型伝搬計算法としては、シフテッドフレネル伝搬計算法[1]やシフテッド角スペクトル法[2]が知られている。

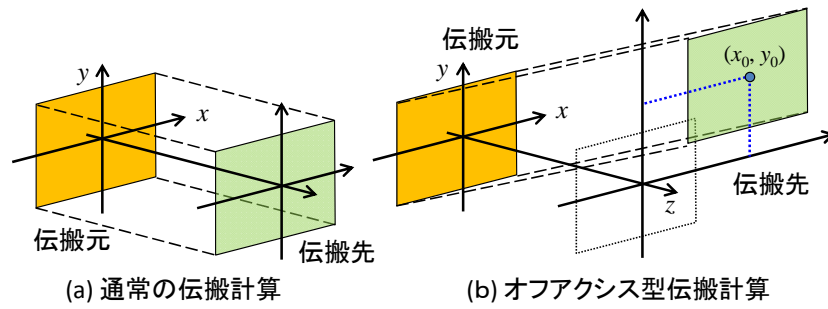


図2 オフアキス型回折伝搬計算法

この計算方法を用いると、メモリ容量を超えるような大規模光波の伝搬計算ができる。これには、図3に示すように、伝搬元と伝搬先のサンプリング領域を均等に矩形セグメントに分割し、オフアキス型計算法を用いて伝搬元セグメントから伝搬先セグメントに伝搬計算を行う。例えば、図に示したように伝搬先の(0, 3)のセグメントでは、伝搬元のすべてのセグメントからの光波を計算しそれを重畳することにより、その範囲の光波を求めることができる。これを伝搬先の全セグメントで繰り返す。したがって、伝搬元と伝搬先がそれぞれ M_1 個と M_2 個のセグメントに分割されている場合、伝搬先の光波を完全に求めるためには $M_1 \times M_2$ 回のオフアキス型伝搬計算が必要となる。

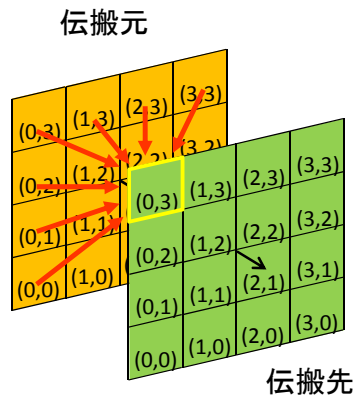


図3 メモリ容量を超える規模の光波計算

セグメント間の伝搬計算に必要なメモリ容量は、そのセグメントサイズに応じたメモリ容量だけであるため、現在計算中のセグメントの光波だけをメモリに置き、残りをハードディスクなどの2次メモリに退避しておくことで、計算機の搭載メモリ量を超える規模の光波が計算できる。この方法では、セグメントの分割数を増やせば増やすほど必要メモリ量は減少するが、一方伝搬計算回数は増加し、それとともなってファイルI/O時間も増加するため、必要メモリ量と計算時間はトレードオフになる。

3. 大規模伝搬シミュレーションのコンピュータホログラフィへの応用

3.1 デジタルホログラフィによる大規模な光波の記録と再生

古典的な光学ホログラフィでは記録する物体光波と参照光波の干渉縞を感光性材料に記録した。現在では、イメージセンサを用いて干渉縞をデジタル記録するデジタルホログラフィが発達している。ただし、計測用途に用いられるデジタルホログラフィでは、その光波の規模はイメージセンサの画素数程度であり、そのデータ処理に本稿のような大規模光波伝搬は必要ではない。一方、3次元立体画像用途のホログラフィを完全

にデジタル化する「デジタイズドホログラフィ」[3]では、このような大規模伝搬計算が必要である。

この技術では、まずレンズレスフーリエ型合成開口デジタルホログラフィを用いて高密度大面積の物体光波を記録する。図4(a)は記録した複素干渉縞の例であり、そのフーリエ変換で求まる物体光波のサンプリング間隔は1 μm 、また総サンプリング数は約40億サンプリング点となっている。このようにして記録した複数の物体光波を3Dシーン上に配置し、大規模光波伝搬を用いてシーン全体の光波を計算した後、微細加工技術でホログラム干渉縞を描画し光学再生した結果を図4(b)に示す。ホログラムの総画素数(サンプリング数)は約80億であり、光波伝搬計算は4×2個のセグメントに分割して144 GByteのメモリを搭載した計算機で行っている。

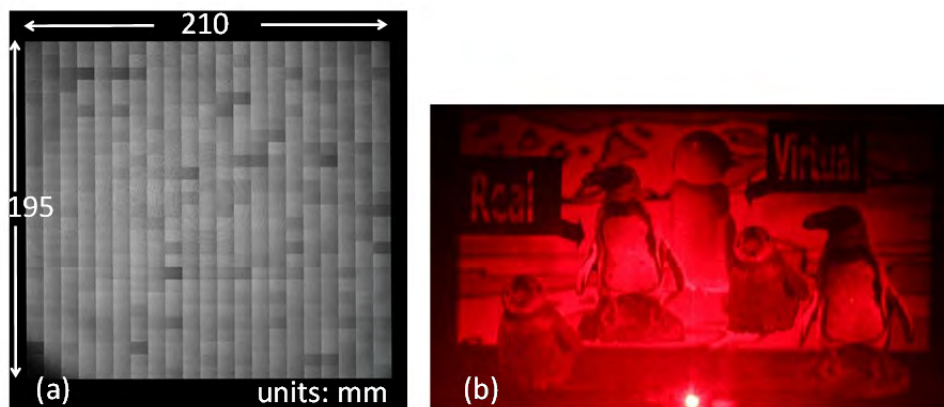


図4 記録した大規模光波(a)とその伝搬計算を用いたホログラムの再生像(b)

3.2 コンピュータホログラフィによる理想的な3次元デジタル映像

前節は、従来型のホログラフィと同様、実在の物体を記録再生した例であったが、コンピュータグラフィックスのように数値モデルから計算された仮想的な物体やシーンを再生するホログラムを作成する技術が完成しつつある。これをコンピュータホログラフィと呼んでいる。この技術では光の波面そのものが再生されるため、現在実用化している3D映像で問題となっている輻輳調節矛盾等は一切生じず、運動視差も含めて完全な3D映像が得られる。そのため、この技術は究極の3Dデジタル映像技術とも呼ばれている[4]。

図5は、筆者らがボストンにあるMITミュージアムでの展示用に制作した「Brothers」という名前のコンピュータホログラムの3Dモデルとその光学再生像である[5]。このホログラムでは二人の子供の顔形状を3Dスキャナで計測してポリゴンメッシュを生成し、それらの数値データからホログラム干渉縞を計算している。ホログラム干渉縞は196,608×131,072画素でできており、その総サンプリング数は約260億点に達している。伝搬計算では光波を6×1個のセグメントに分割し、256 GByteのメモリを搭載した計算機で計算を実行している。

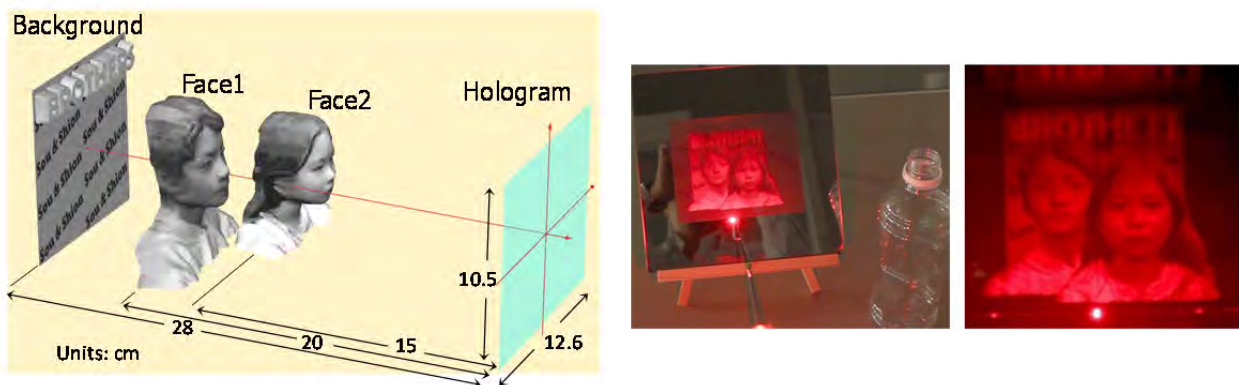


図5 コンピュータホログラム「Brothers」の3Dシーンと再生像[5]

MIT ミュージアムでの展示の様子を図6に示す。他のアナログ系のホログラムに比べるとまだまだ小型であるが、最新のコンピュータホログラフィということで人気を博しているようである。

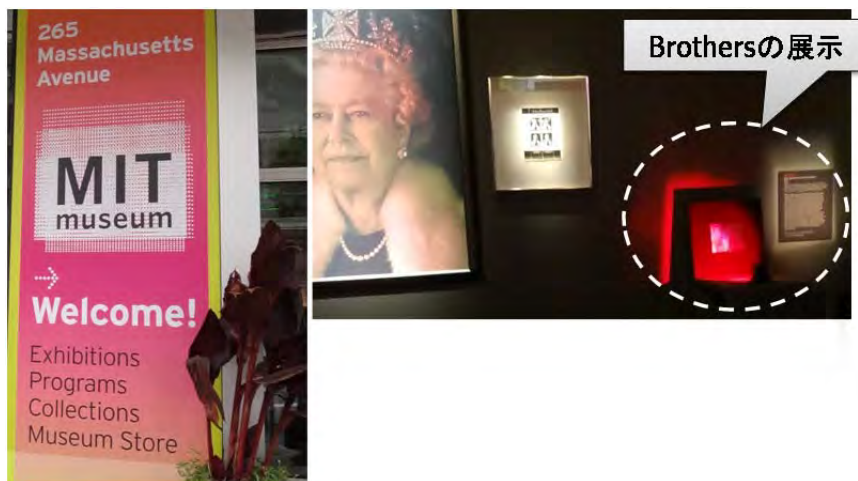


図6 MIT ミュージアム（米国ボストン）における「Brothers」の展示

4. まとめ

大規模なサンプリング数を有する光波の伝搬をシミュレーションする技術とその応用を紹介した。現在のところの応用としては、サイズが重要な映像系のものが主であるが、この技術では高密度にサンプリングされた大面積の光波を自由に扱えるため、計測用途のデジタルホログラフィ等でも重要になってくると思われる。なお、ここで紹介した計算技術を詰め込んだ波動光学シミュレーション用ライブラリやアプリケーションを以下で公開している。ぜひ一度お試しください。

<http://www.laser.ee.kansai-u.ac.jp/WaveFieldTools/>

【松島恭治（関西大学）／情報処理フォトニクス分科会】

参考文献

- [1] R. P. Muffoletto, et al.: “Shifted Fresnel diffraction for computational holography”, *Opt. Express* **15**, 5631 (2007).
- [2] K. Matsushima: “Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation”, *Opt. Express* **18**, 18453 (2010).

-
- [3] K. Matsushima, et al.: “Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects”, *Appl. Opt.* **50**, H278 (2011).
 - [4] K. Matsushima, et al.: “Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method”, *Appl. Opt.* **48**, H54 (2009).
 - [5] K. Matsushima, et al.: “Stepping closer to the perfect 3D digital image”, *SPIE Newsroom*, (6 Nov. 2012). doi: 10.1117/2.1201210.004526