

CPU 及び GPU に対応した C++ と Python 向け  
波動光学計算ライブラリの開発

## Computational wave optics library for C++ and Python running on CPU and GPU

下馬場朋禄\* 角江崇\* 高田直樹† 増田信之\* 伊藤智義\*  
Tomoyoshi Shimobaba Takashi Kakue Naoki Takada Nobuyuki Masuda Tomoyoshi Ito

## 1. まえがき

波動光学は、回折光学素子、光 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) といった光学部品の光学特性解析、ホログラフィに関する計算などに使われる [1]. 光学システムの 3 次元解析やリアルタイムでのホログラフィ計算を行う場合、CPU では長い計算時間を要するため高速化が必要になる。本報告では、波動光学で使われる回折計算、ホログラム計算、位相回復アルゴリズム、位相アンラッピングアルゴリズムなどを CPU 及び GPU (Graphics Processing Unit) 上で高速に実行できる CWO ライブラリ (Computational Wave Optics) について述べる。本ライブラリは C++ 言語と軽量言語の一つである Python [2] 向けに実装されている。波動光学は光学のみならず超音波、X 線、電子線などの幅広い分野で適用できるため [3, 4], 本ライブラリはこれらの分野でも有用なものとなる。

## 2. CWO ライブラリ

筆者らは 2008 年に CPU 及び GPU 上で高速計算ができる C 言語ベースの波動光学計算ライブラリ (GWO ライブラリ) を発表した [5]. これは GPU の知識がなくても手軽に GPU 上で波動光学計算が可能なライブラリとなっている。筆者らはこのライブラリを用いたホログラフィによる顕微鏡やディスプレイに関する成果を発表し、筆者ら以外にもこのライブラリを使用した成果 (エアリービームの伝播解析) を発表している [6, 7]. ただし C 言語ベースなので、CPU や GPU のメモリ管理などを自分で行う必要がありコーディングが煩雑になる傾向があった。2012 年に CPU 及び GPU 上で高速計算ができる C++ 言語ベースの CWO++ ライブラリを開発し、GWO ライブラリで煩雑であった記述も隠蔽化し、コーディングがより簡便に行えるようになった [8].

本報告では、CWO++ ライブラリの他に、新たに Python ベースの CWOpy ライブラリを追加し、これらを総称して CWO と呼ぶライブラリ群の開発を行った。Python ベースの CWOpy を開発した理由は、Python がオープンソースで開発されていること、数値計算や可視化など充実したライブラリが存在すること、ユーザー数が多いこと、文法が簡潔であり、また光学分野でよく使用される MATLAB ユーザーにも違和感の無い文法を持つことなどが挙げられる。図 1 に CWO ライブラリの概略を示す。

CWO ライブラリはユーザが接する高レベルのライブラリ群 (CWO++ と CWOpy) とユーザからは隠蔽され

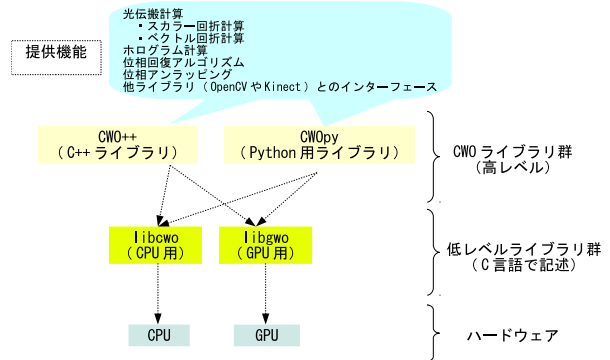


図 1: CWO ライブラリの概略

ている低レベルのライブラリ群が存在する。低レベルのライブラリ群は C 言語で記述され、CPU と GPU に対応した実装がなされている。低レベルのライブラリ群は高レベルのライブラリ群から共通で使用される。CWOpy から C 言語で実装された低レベルライブラリを呼び出すために Python の ctypes モジュールを使用した。現在の CWO ライブラリは Windows 及び Linux (CentOS 上で動作確認済み) で動作し、GPU は NVIDIA 社の CUDA 対応 GPU を対象としている。

## 2.1. 提供機能

CWO ライブラリはスカラーとベクトルの回折計算、3 次元回折計算、ホログラム計算、位相回復アルゴリズム、位相アンラッピング、更に OpenCV などの他ライブラリとのインターフェースが実装がされている。スカラー回折計算にはフラウンホーファ回折、フレネル回折 (畳み込み表現とフーリエ変換表現の 2 種類)、シフトフレネル回折 [9], 角スペクトル法, シフト角スペクトル法 [10], スケール角スペクトル法 [11], Rayleigh-Sommerfeld 回折が実装されている。

## 2.2. CWO++ と CWOpy による回折計算の例

```
CWO c;
GWO g;
c.Load("lena.bmp");
c.Diffraction(0.2,CWO_FRESNEL_CONV);
c.Intensity();
c.Scale(255);
c.Save("lena_diffraction.bmp");

CWO c;
GWO g;
c.Load("lena.bmp");
g.Send(c);
g.Diffraction(0.2,CWO_FRESNEL_CONV);
g.Intensity();
g.Scale(255);
g.Recv(c);
c.Save("lena_diffraction.bmp");
```

図 2: CWO++ での回折計算コード

CWO++ と CWOpy を用いたフレネル回折計算のコード例を示す。図 2 左は CWO++ を用いて CPU 上

\* 千葉大学大学院, Chiba University

† 高知大学理学部, Kochi University

で回折計算を行うコードとなっている。図中のクラス“CWO”はCPUでの処理を担当しており、関数 Load は画像の読み込み、関数 Diffract は回折計算（ここではフレネル回折を用いて0.2m離れた場所での回折パターンを計算）、関数 Intensity は Diffract の計算結果（複素振幅場）を強度に変換、関数 Scale はその強度値をある階調（ここでは256）に変換、関数 Save は計算された回折パターンを画像として保存する。

図2右はCWO++を用いてGPU上で回折計算を行うコードとなっている。クラス“GWO”はGPUでの処理を担当しており、関数 Send はCPU上のデータをGPU上に転送、関数 Recv はGPU上のデータをCPUに転送する関数となっている。インスタンス“c”はCPU上での処理、インスタンス“g”はGPU上での処理となっている。図3はPython用のコードで、左側はCPU、右側はGPUでのコードとなっている。CWOライブラリは回折計算以外にも2.1で示した機能、CPU・GPUに関わらず、ほぼ同一の記述で利用することができる。

```

import CWO as c
c.Load("lena.bmp")
c.Diffract(0.2,CWO_FRESNEL_CONV)
c.Intensity()
c.Scale(255)
c.Save("lena_diffraction.bmp")

import CWO as c
import GWO as g
c.Load("lena.bmp")
g.Send(c)
g.Diffract(0.2,CWO_FRESNEL_CONV)
g.Intensity()
g.Scale(255)
g.Recv(c)
c.Save("lena_diffraction.bmp")

```

図3: CWOPyでの回折計算コード

図4左に図2と図3で使用した元画像、右にその計算された回折強度パターンを示す。



図4: CWOライブラリを用いて計算した回折強度パターン

図2の計算速度は元画像が1,024×1,024画素の場合、CPU (Intel Core i7 740QM) の1スレッドで約230ms、GPU (GeForce GTX580) を使用した時に2msとなっている。CWOPy (図3) の場合も、CWO++と同じ低レベルライブラリを使用しているため同様の計算速度となる。

### 3. まとめ

波動光学計算で有用な機能を実装したCWOライブラリの開発を行った。本ライブラリはC++言語とPython言語で使用することができ、CPU及びGPU上で動作することができる。今後は、新機能の実装やNVIDIA社以外のGPUのサポート、FPGAベースのハードウェアのサポートなどが挙げられる。

本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)(課題番号09150542)及び文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(課題番号23700103)、中島記念国際交流財団による補助のもとで行われました。深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics, 3rd ed.", Robert & Company (2005).
- [2] <http://www.python.org/>
- [3] E. G. Williams, "Fourier Acoustics — Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography", Academic Press (1999).
- [4] D. M. Paganin, "Coherent X-Ray Optics", Oxford University Press (2006).
- [5] T. Shimobaba, T. Ito, N. Masuda, Y. Abe, Y. Ichihashi, H. Nakayama, N. Takada, A. Shiraki and T. Sugie, "Numerical calculation library for diffraction integrals using the graphic processing unit: the GPU-based wave optics library", J. Opt. A: Pure and Appl. Opt. **10**, 075308(5pp), (2008).
- [6] H. T. Dai, X. W. Sun, D. Luo, and Y. J. Liu, "Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals", Opt. Express **17**, 19365–19370 (2009).
- [7] D. Luo, H. T. Dai, X. W. Sun, H. V. Demir, "Electrically switchable finite energy Airy beams generated by a liquid crystal cell with patterned electrode", Opt. Commun. **283**, 3846–3849 (2010).
- [8] T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda and T. Ito, "Computational wave optics library for C++: CWO++ library", Comput. Phys. Commun. **183**, 1124–1138 (2012).
- [9] R. P. Muffoletto, J. M. Tyler, J. E. Tohline, "Shifted Fresnel diffraction for computational holography", Opt. Express **15** 5631–5640 (2007).
- [10] K. Matsushima, "Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation", Opt. Express **18**, 18453–18463 (2010).
- [11] T. Shimobaba, N. Masuda and T. Ito, "Angular spectrum method for different sampling rates on source and destination planes: Scaled angular spectrum method", Digital Holography and Three-Dimensional Imaging(DH) DH2012, **DTu2C.3** (2012).