デジタルホログラムの合成と 波動光学シミュレーションライブラリ

Programming Library for Wave-Optical Simulation and Digitally Synthetic Holograms

松島恭治

Kyoji Matsushima

関西大学工学部

Department of Electrical Engineering, Kansai University Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680 / matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract

Recent evolution of digitally synthetic holograms as well as diffractive optical elements is surveyed with emphasis on its algorithm/software. The implement of these algorithms lead to necessity of a common programming library that capsules a two-dimensional array of complex values given as sampled complex amplitude of the wave field. The LightWave library designed to meet the requirement is intoroduced.

1 初めに

デジタル合成ホログラム*は,コンピュータモ デルとしてのみ存在する物体からの光波を数値合 成し,それを適当な方法で表示することにより, 架空の物体からのホログラムを合成する技術であ る.いわゆる立体画像といわれる立体感のある画 像を提示する技術は数多くあるが,これらのほと んどが単に人間が生理的に立体感を得るための感 覚の一部を刺激するだけであるのに対して,光波 そのものを合成する,より高度な技術と言える. しかしながら,その技術的ハードルは高く,デジ タル合成ホログラムは未だ実用化とは程遠い状況 にある.技術的ハードルの一つは,デジタル合成 ホログラムが極めて高解像度の印刷機器や表示デ バイスを必要とすることであるが,もう一つは, 物体光波の数値合成や最終的なホログラムへの コーディングに長時間の演算時間を要することで ある.前者の表示の問題,特に動画については, デバイス自体の発達を待たねばならない状況であ るが,後者は理論・アルゴリズム,そしてソフト ウェアの問題である.

一方,計算機で合成した微細な振幅パターンや 位相パターンを作製し,その回折作用によって一定 の機能を果たす回折光学素子(Diffracted Optical Element,以下 DOE)は,入射波面を別の波面に 変換するという意味でデジタル合成ホログラムと 全く同等な素子と言える.ただし,DOE はホロ

^{*}計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram) という用語は,光学の世界では単に波面変換用の光 学素子の意味で使われ,「ディスプレイ」を含意しないこと が多い.そこで,本稿ではディスプレイとしての計算機合成 ホログラムをデジタル合成ホログラム (Digitally Synthetic Hologram) と呼ぶ.なお,デジタルホログラフィという用語 は「デジタル的に記録したホログラム」の意味で使われ,再 生そのものは (2次元の) コンピュータ画面上で行われ,立体 像の再生とは意味合いの異なった技術を指す用語として用い られることが多いため注意が必要である.



図 1 デジタル合成ホログラムの作成過程

グラムの様なディスプレイとは異なり,素子1個 あたりの製作コストが高くても良いため,光リソ グラフィなどの高価な技術が利用できる.そのた め,シミュレーションの信頼性といったソフト面 の技術的な課題の比重がより高いと言える.本稿 では,これらのデジタル合成ホログラムやDOE の技術について我々の行ってきた研究を中心に概 観し,我々が作成して研究に用いている,これら のソフトに共通のオブジェクト指向ライブラリで あるLightWave について紹介する.

2 デジタル合成ホログラムと回折光学 素子

図1にデジタル合成ホログラムを作成する過程 を示す.まず,初めに物体モデルがある.これに はプログラム内にハードコーディングされた座標 データか,コンピュータグラフィックスなどで用 いられる 3-D 用のモデルファイル(DXF, VRML など)を用いる.CG 用のモデルファイルを利用 する方法は,高度に発達した様々な CG モデラー ソフトを利用できるため,複雑な物体のホログラ ムの合成に向いている.一方,物体の表裏判定が 容易でないなど,隠面消去や影付けに問題がおき ることがある.

次にホログラムに入射する物体モデルからの光 波を数値的に合成する.合成された物体光波は, ホログラムの作製方法に応じて,振幅型にするか 位相型にするか,あるいは量子化するなどの変換



図 2 点光源法によって作成されたホログラムの再生 像 [3]. ピッチ 2 µm ×4 µm , 8192 × 4096pixel.

作業を行わなければならない,この過程は一般に コーディングと呼ばれている.この二つのステッ プがソフトウェアとしての作業となる.回折光学 素子の場合は,通常,物体光波合成の過程がなく, 設計目標として与えられる出力強度分布を発生す るようなホログラムを,その製作方法の制約に応 じて直接コーディングすることになる.

以下,物体光波の合成とコーディングについて 述べる.

2.1 物体光波の合成

まず,数値モデルとして計算機中に存在する物 体からの光波をホログラム面上で数値的に合成し なければならない.これには,物体モデルの表現 方法と相俟って種々の手法が提案されている.古 くは,ホログラムに平行な平面にある2次元の画 像を物体として光波を合成することが多かったが, これは主に計算機の能力の点から来た制約と思わ れる.3次元の立体物については,Lohmannらの 頃より断層化することにより3次元物体を2次元 画像の集積として表現し光波合成を行う手法が提 案されている[1].断層ホログラムは隠面消去の 観点から現在でも重要な手法である.この種の手 法の一つとして3次元フレネル回折式を離散的に 計算する方法も研究されている[2].

2.1.1 点光源法

近年は,物体モデルの表面に点光源を配置して その点光源からの球面波をホログラム上で重畳 する点光源法 [5,6]が主流になっている.これは



図 3 点光源法によって作成された表面モデル物体のバ イナリホログラムの再生像 [4] . ピッチ 6.25 µm ×6.25 μm , $4800 \times 4800 pixel$.



図 4 点光源法

MIT の Benton らの, いわゆるホロビデオで用い られた手法である [7,8]. ワイヤフレームの物体 に点光源を配置して作製したホログラムの再生像 の例を図2に示す.点光源法の最大の利点はその 高い表現力にある.すなわち,点光源を表面モデ ルの物体表面にそって充填すれば,コンピュータ グラフィックスと同様に物体表面のシェーディン グやテクスチャマッピングが可能になる.点光源 法を用いた表面モデル物体の再生像の例を図3に 示す.ただし,点光源を充填して合成した物体光 波は,光学再生時に再生される物体表面の輝度が 点光源法に特有の性質を示すため,シェーディン グ以前にその補正が必要である [4,9].

点光源法の最大の難点は,その長大な計算時間 にある.点光源法では,物体表面に充填した全て の点光源とホログラムの全てのピクセル (サンプ リング点)との間の距離計算が必要になる.その ため, ピクセル数 M, 点光源数 N とすると, そ の計算時間は

$$T_{total} = \tau_a M N \tag{1}$$



図 5 漸化式による近似計算法

アルゴリズムや CPU 能力を表わす性能指数にな る.この性能指数を向上するため,様々な手法が提 案されている.一般的な手法は,まず複素数を用い ず実数値のみで計算を行うことであり [6,10], そ の上で, 表参照法 [10] や対照性を用いる方法 [11] や, CG 用描画プロセッサの利用 [12,13], ホログ ラム専用 CPU の構築 [14] などが提案されている. 表参照法は非常に高速な計算が可能であるが,一 方,離散的な位置にしか点光源を配置できないこ とや莫大なメモリを要する欠点がある.近似を用 いた算術的な加速計算法としては,筆者らが提案 した漸化式による方法 [15] や吉川らの差分法 [16] がある.

例えば,筆者の漸化式法[15]は,図5で示すよ うに,隣り合ったピクセル間では点光源からの距 離がさほど変化しないことを用いた近似であり, 隣り合ったピクセル間の漸化式

$$p_{n+1} = p_n(2 - r_{n+1}p_n),$$

$$r_{n+1} = r_n + s_n p_n,$$

$$s_{n+1} = s_n + c_1.$$
(2)

を用いて計算を行う.ここで,初期値と定数は以 下のとおりである.

$$p_{0} \equiv 1/r_{0},$$

$$r_{0} \equiv \sqrt{d_{0}^{2} + x_{0}^{2}},$$

$$s_{0} \equiv (x_{0} + \delta x/2)\delta x,$$

$$c_{1} \equiv \delta x^{2}.$$
(3)

このような漸化式を用いると,基本的に加減算 と積のみで距離計算ができるため,例えば Alpha 21164A(600MHz) プロセッサを用いると, $\tau_a = 47$ で表わされ, τ_a [sec/pixel/point] が計算に用いた [nsec/pixel/point] の値が得られる [15]. 差分法は



図 6 傾いた平面間における光波の回折伝搬



図 7 60°傾いた平面上で計算した正方形開口からの回 折光波.ただし搬送波成分は除去してある.

計算精度的には不利になるが,基本的に加算のみ で計算可能であるため固定小数点演算(整数演算) が利用でき,Pentium II(450MHz) プロセッサで も $\tau_a = 0.6$ [nsec/pixel/point] に達する [16].

2.1.2 表面モデル光波回折法

点光源では,どのような工夫をしようとも基本 的にその計算時間は式(1)に従うことは免れない. そこで,筆者らは全く新しい物体光波合成法とし 表面モデル光波回折法を提案している[17-19].こ れは筆者らが開発した,傾いた平面間における光 波の回折伝搬の計算理論[20,21]を応用したもの である.この回折伝搬計算法は波面展開法を発展 させたものであり,図6に示したように,平面S 上で定義される光波の複素振幅から平面 R上で の複素振幅を求めることができ,このときSとR は任意の傾きを持っていて良い.これを用いると, 例えば,図7のように,正方形開口からの回折光 波をその開口に対して非平行な面で計算すること ができる.



図 8 表面モデル光波回折法



図 9 表面モデル光波回折法で作成した傾いた平面の ホログラムの再生像



図 10 表面モデル光波回折法で作成した立体物のホロ グラムの再生像



図 11 デジタル合成ホログラムにおける隠面消去

この計算法を用いることにより,物体表面に充 填した点光源一つ一つからの光波を求めるのでは なく,図8に示した様に,物体を平面の集まりと して構成し,各平面からの回折光波をホログラム 面上で計算することができる.したがって,全て の面からの光波を重畳することにより物体光波を 合成できる.これを用いて合成したホログラムの 再生像 [22] を図 9 と図 10 に示す.図 9 はテクス チャマッピングした正方形平面を傾けたホログラ ムであり,図10は平面で構成しフラットシェー ディングした物体のホログラムである.

なお,坂本らも平面からの回折光波を用いた同 様の光波合成手法を提案している [23].

2.1.3 隠面消去

デジタル合成ホログラムにおいて,再生像の観 察者からは見えないはずの光を再生しない技術は 大変重要である.これはコンピュータグラフィッ クスにおける隠面消去に相当する.事実,ホログ ラムの視域角が小さい場合には, CG における zbuffer 法を用いた隠面消去も可能である.しかし,チャマッピング等が困難になる問題点がある. ある程度の視域角があるとサブホログラムに分割 するなどの処理が必要となる [2,24].

主に幾何光学的手法と波動光学的手法に分けら れる.前者は点光源法に対応するものであり,図 11(b) に示したように,点光源からホログラム上の がある.最近筆者らは,前述の傾いた平面におけ ピクセルへの光線と物体との交差判定を行い, 交 る回折伝搬の計算手法を用いて傾いた平面上のマ 差する光線を除去する、これを実現するためのい スク関数で光波を遮蔽するための厳密な処理を議



図 12 シルエット近似を用いた波動光学的隠面消去

くつかの具体的な手法が報告されている[25-27]. 幾何光学的隠面消去法の最大の問題点は,全ての 点光源と全てのピクセルとの間で交差判定を行わ なければならないため,どのような手法をとって もその計算時間とメモリの積が莫大な値になるこ とである.そのため,これらの手法はすべて縦方 向視差を放棄したホログラムへ適用されており, 筆者の知る限り,全方向視差ホログラムでの幾何 光学的隠面消去の報告はない.

波動光学的隠面消去は,図11(a)に示したとお リ,基本的に空間を回折伝搬する光の一部を2値 のマスク関数を用いて遮蔽する手法である.その 代表的な方法は, Lohmann の断層ホログラムで ある [1]. 回折伝搬計算は一般に FFT を用いて行 えるため比較的高速であり,全方向視差ホログラ ムに適用できる.しかしながら,物体を断層面で 切断した場合,表面モデルでの陰影付けやテクス

これらの問題を解決するため,近年,波動光学 的手法の一種としてバビネの原理に基づく隠面消 デジタル合成ホログラムにおける隠面消去は,去法 [28,29]が提案されているが,多数の平面で 構成される物体での効果や傾いた平面に対する隠 面消去の具体的方法と結果は示されていない難点



図 13 シルエット近似で隠面消去したホログラムの再 生像 (1)



図 14 シルエット近似で隠面消去したホログラムの再 生像 (2)

論した [30].また,厳密な処理では一枚の平面を 処理するために4回のFFTが必要になるため,シ ルエット近似を用いた簡略化した処理を提案して いる.これは図12に示したように,傾いた平面 上のマスクをホログラムに平行な平面に投影し, それを用いて光波を遮蔽する手法である.この手 法は,物体光波そのものの合成は点光源法でもそ の他の方法でも行え,光波合成の手法とは独立し ている.図13と図14にこの手法で隠面消去した 全方向視差ホログラムを示す.物体光波の合成に は点光源法を用いている.なお,図14では隠面 消去以外に影付けの処理も施している.

2.2 コーディング

物体光波の合成はホログラム面に物体から回 折伝搬される光波の複素振幅分布の合成である[†] 位相と振幅が同時に空間変調できれば,この複素 振幅そのものからホログラムを作製できることに なるが,一般には振幅または位相の一方しか空間



図 15 複素誤差拡散 [31] でコーディングした 2 値位 相型フーリエホログラムの再生像 [32]

変調できず,また2値化などの量子化が必要なことが多い.このように,複素振幅分布から位相または振幅分布への変換と量子化を,ホログラムのコーディングと呼ぶ.

例えば,よく知られているように,古典的なホ ログラムでは物体光波の複素振幅 *O*(*x*,*y*) と参照 光波 *R*(*x*,*y*) を重畳した干渉縞強度

$$I(x,y) = |O(x,y) + R(x,y)|^{2}$$
(4)

を記録材料に記録し、それを透過率分布 $t_0I(x,y)$ に変換する.この場合、変換

$$O(x,y) \to t_0 I(x,y)$$
 (5)

がコーディングである.このように作製した透過 率分布(振幅分布)に参照光と同じ再生光を照射 した t₀R(x,y)I(x,y)には元の物体光波O(x,y)の 成分が含まれていることはホログラムの原理とし てよく知られている.このように,振幅型のホロ グラムのコーディングは比較的容易であり,デジ タルホログラムでは量子化ノイズの抑制だけが課 題となる.一方,回折効率の高い位相型は式(5) に相当するコーディングからの物体光波の再生を 簡単に示すことはできない.これは十分にノイズ を抑制したコーディング方法の工夫が必要である ことを意味している.

2.2.1 2値位相型フーリエホログラム

図15は,イメージセッタで出力した振幅マスク をフォトポリマーに転写することにより作製した 位相型フーリエホログラム [32]の再生像である.

[†]点光源法で実数値の干渉編強度(いわゆる bipolar intensity) を求める場合は複素振幅ではない.



図 16 (a) 同時摂動型最適化法を用いた適応型誤差拡 散法 [33], (b) 一般の誤差拡散法

このコーディングでは, 複素誤差拡散法 [31] を用 いた2値位相エンコーディングを行っている.-般にバイナリフーリエホログラムでは再生像全体 にハローのような量子化ノイズがまとわりつくが, 実数誤差拡散法により、それがわずかに改善され ている.誤差拡散法を用いてフーリエホログラム をコーディングした場合,再生像の中心付近にフ リーゾーンと呼ばれる量子化ノイズが減少した領 域が生じる.再生像がこのフリーゾーン内に生じ るように再生像の位置を合わせて再生像を改善す るが,再生像の配置によってはそれが困難な場合 がある.そのためGAを用いた拡散係数の探索も 報告されている [34]. 図 16(a) は GA よりも高速 であると期待される同時摂動法を用いて拡散係数 を最適化する適応型誤差拡散 [33] によってコー ディングした結果である.単純な誤差拡散(b)で は周辺部全体に生じるノイズが, (a) では物体像 を避けて四隅に移動していることがわかる.

2.2.2 回折光学素子のコーディング

回折光学素子(DOE)は光の回折作用を用いて 機能する光学素子の総称であるが,狭義ではHOE のような干渉露光を用いず,数値的に求めた位相/ 振幅空間変調パターンを微細加工技術などで作製 する素子を意味する.計算機合成するという意味 でも,また入射光の波面を変換するという意味で も,非ディスプレイ用途の計算機合成ホログラム と言える.特に最適化をベースとしたDOE はかな り複雑な波面変換をも可能とする素子である.例



図 17 反復フーリエ変換アルゴリズム

えば, 一本のレーザービームを数100~数1000も のレーザービームに分割するビームスプリッター や通常のガウス関数型強度分布のビームを均一な 強度分布に変換するビームホモジナイザー, 特定 のビームパターンを形成するビームシェーパーな どがある.

デジタル合成ホログラムと DOE の大きな違い は,後者は一般に物体光波合成を必要としない ことである.DOEは,通常,その出力の2次元 強度分布のみが設計目標として与えられるので, その様な波面に変換するホログラムを直接コー ディングすることになる.吸収損失を避けるため, DOE は一般に透明な媒体の表面レリーフとして 作製される.そのため,位相型のホログラムと 見なすことができる.DOEのコーディングには Direct Binary Search (DBS) [35] やシミュレーテ ッド・アニーリング,反復フーリエ変換法(Iterative Fourier Transformation Algorithm, IFTA) [36, 37],同時摂動型最適化法 [38,39] 等が用いられ る.特に,多数のピクセル数が必要であるビーム ホモジナイザーやビームシェーパーには計算時間 の関係で IFTA が主な役割を果たす.

図 17 に IFTA による位相型フーリエホログラ ムコーディングの手順を示す.基本的に出力面(像 面)では欲しい強度分布を制約とし,DOE 面での 制約(位相型なので振幅は1)と像面の制約を反 復しながら収束していく.計算時間はFFTの演 算時間で決まるが,大きなピクセル数の素子を扱 う場合は非常に時間がかかる場合がある.図18 は IFTA で求めた DOE 位相分布(a)とそれから 得られる像面の振幅分布のシミュレーション結果



図 18 反復フーリエ変換法によって設計した位相分布 (a) とその出力強度分布(b)

(b) である.これは TEM₀₀ ガウスビームをこの 結果のような特殊なビームパターンに変換する素 子を設計した例である.

3 LightWave ライブラリ

前節までにデジタル合成ホログラムや回折光 学素子にまつわる種々雑多なアルゴリズムとその 実装結果を概観してきた.これらの研究開発に必 要なソフトウェアを見渡した時,一つの共通なパ ターンが見えてくる.それはこれらのシミュレー ションや最適化アルゴリズムが取り扱うのは,図 19に示したような,自由空間中の平面上でサンプ リングされた複素振幅の2次元配列であるという ことである.ほとんどの演算や変換はこの2次元 配列上あるいは2次元配列間で行われる.従って, このような光波の2次元複素振幅配列を効率良く 取り扱い,回折・伝搬,フーリエ変換,種々の算術



図 19 LightWave オブジェクト

1: #include <LightWave.h>
2: void main(void)
3: {
4: LightWave a(512, 512, 2e-6);
5: a.SetRect(0.5e-3, 0.5e-3);
6: a.SPWProp(10e-3);
7: a.SaveAsEMP("phase.bmp", LW_PHASE);
8: a.Normalize();
9: a.SaveAsEMP("amp.bmp", LW_AMPLITUDE);
10: }

図 20 正方形開口からの回折光波のシミュレーション 演算,計測・評価,ファイル入出力を行う共通ラ イブラリがあれば,デジタル合成ホログラムに関 連する様々なソフトウェアの作成が飛躍的に容易 になる.筆者は,この様な観点から,光波の2次 元複素振幅配列を取り扱うライブラリを設計・実 装してきた.筆者はこのライブラリをLightWave ライブラリと名づけている.

LightWave ライブラリの設計目標は次のような ものであった.

- (1) オブジェクト指向ライブラリとし、2次元複素配列とそれに関連する情報をカプセル化すること。
- (2) ライブラリ内容を良い意味で隠蔽してブラッ クボックス化すること.
- (3) 十分な速度的パフォーマンスが得られること.
- (4) ライブラリを用いて実装されたプログラムの ソースコードが読みやすいこと。
- (5) 一貫性があって拡張性が高く長期に渡って使 い続けられること.
- (6) 複雑なクラス階層を持たず,理解しやすいこと.

実際にこの様な設計目標が達成されているかどう かはライブラリのユーザーの判断に任せるとして, 以下,このLightWaveライブラリについて述べる.

3.1 LightWave を用いたシミュレーション例

LightWave を用いたもっとも簡単なシミュレー ションの一例として,正方形の開口からの光波回 折のシミュレーションを示す.図20がそのソー スリストである.4行目で512×512サンプリング のLightWave オブジェクトをサンプリング間隔2 µm で定義している.5行目で一辺0.5mmの正方



図 21 正方形開口からの回折光波

形開口に相当する振幅パターンをセットし,6行 目で波面展開法を用いて伝搬している.7~9行目 では回折光波の振幅と位相を BMP ファイルとし てセーブしている.図20のソースをコンパイル して実行した結果を図21 に示す.

3.2 LightWave の現状

3.2.1 メンバー関数

現時点でLightWave には,マニュアルに記載さ れた関数だけで 130 近いメンバー関数が実装さ れている.表Iに現在のLightWave クラスのメン バー関数の分類と数を示す.テスト的に実装され た関数や,まだデバッグが十分でないためマニュ アルに記載されていない関数もまだ幾つかある.

3.2.2 言語とプラットフォーム

現在のLightWave は Intel 32bit CPU の Windows 環境のみで提供される.現在のLightWave は, Visual C++で実装された Dynamic Link Library (DLL) であり, DLL が呼び出せる環境から利用で きる.また,すでに大半の関数が Microsoft.NET の Common Language Runtime (CLR) に移植さ れており, CLR を用いることのできる C++.NET や, C#.NET, VisualBasic.NET からも呼び出す ことができる.

3.2.3 WaveFront と GUI 環境

LightWaveはあくまでライブラリであり、ビジュ ルチ CPU でも高速化しない.マルチスレッド化 アルな GUI とは縁がない.しかしながら、光波 も次のバージョンの課題である.さらには、MPI の振幅,位相,強度などを手軽に観察したり、任 のような並列ライブラリを用いて、マルチプロセ 意の断面での分布観察,正規化表示する領域の設 ス/クラスターシステムの対応も検討中である.



図 22 波面ブラウザWaveFront のスクリーンショット

定や,簡単な回折伝搬計算など,GUIが便利な場 合も多々ある.そこで,前述のCLR版LightWave とC#.NETを用いて,WaveFront波面ブラウザ が開発されている.WaveFrontの画面例を図22 に示す.LightWaveを補助する波面ブラウザとい う位置づけではあるが,これ単体でも簡単な回折 伝搬シミュレーション等をこなすことができる.

3.3 LightWave の将来

32bit CPU とその OS では,一般に,一つプロ セスで利用できるメモリは 32bit アドレス空間の 半分にあたる 2GB までである.そのため,現在 のLightWave が実用的に取り扱える最大のサンプ リング数は 8192×8192 程度に制限されている.ホ ログラムの合成においても DOE のコーディング においても,この壁がすでに問題になっている. 最も簡単な解決方法は 64bit CPU への移植であ り,それはすでにスケジュールに入っている.ま た,現在のLightWave は1 スレッド構造であり,マ ルチ CPU でも高速化しない.マルチスレッド化 も次のバージョンの課題である.さらには,MPI のような並列ライブラリを用いて,マルチプロセ ス/クラスターシステムの対応も検討中である.

表 I LightWave に実装されたメンバー関数

ᆂ 국내	メンバ 問料の粉
	メンハー国奴の奴
オーバーロード算術演算子	9
パラメータ・サンプリング値アクセス,サンプリング数設定	23
座標変換関連,複素振幅変換	16
ファイル I/O,ファイル変換	19
FFT,回折伝搬,回転変換	7
基本光波・開口生成,位相・振幅操作,量子化	14
計測ウィンドウ操作 , 誤差・効率計測関連	22
コンストラクタ・デストラクタ , 初期化関連 , 時間計測 , ログ , エラー処理	11
オブジェクトサイズ変更 , 図形描画	8

現在のLightWave は Windows 環境でのライブ ラリである.別の方向への拡張として,Linux/Unix へのマルチプラットフォーム化に対する要望もす でに存在する.これについても今後の検討課題と したい.

3.4 LightWave の公開と配布

従来,我々の研究室/研究グループ内だけでの 私的なライブラリとしてLightWaveを使用してき たが,関係各所からの要望により,2003年10月 末より下記のアドレスにて公開を開始する予定で ある.当初,バイナリのみの配布とするが,利用 している一部のソースのライセンス関係の整理が つき次第,オープンソースに移行する計画である.

http://www.laser.ee.kansai-u.ac.jp/lightwave

4 まとめ

近年のデジタル合成ホログラム・回折光学素子の 技術について,我々のグループが行ってきた研究 を中心に,主にアルゴリズム・ソフトウェアの面か ら概観した.また,これらの研究開発のための共 通ライブラリとして構築を進めてきたLightWave ライブラリについて紹介した.

参考文献

 A. W. Lohmann: "Three-dimensional properties of wave-fields", Optik, 51, pp. 105–117 (1978).

- [2] 西,森,村島: "奥行き情報を保持した投影像と低容量配列演算によるフレネル型計算機合成ホログラム",光学,32, pp. 99–104 (2003).
- [3] 松島、上甲:"計算機合成ディスプレイホログラム用高解像度プリンタ"、映情学誌、56、p. 1989 (2002).
- [4] 松島,本荘: "陰影付けした表面モデル3次元物体の全方向視差計算機合成ホログラム",映情学誌, 56, p. 986 (2002).
- [5] J. P. Waters: "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods", Appl. Phys. Lett., 9, pp. 405–407 (1966).
- [6] A. D. Stein, Z. Wang and J. J. S. Leigh: "Computer-generated holograms: A simplified ray-tracing approach", Computers in Physics, 6, pp. 389–392 (1992).
- [7] P. St.-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, J. Underkoffler and H. Yoshikawa: "Electronic display system for computational holography", SPIE Proc. Practical Holography IV, **1212**, pp. 174–182 (1990).
- [8] P. St.-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, J. Underkoffler and H. Yoshikawa: "Real-time holographic display: Improvements using a multichannel acousto-optic modulator and holographic optical elements", SPIE Proc. Practical Holography V, **1461**, pp. 254–261 (1991).
- [9] 松島,有安: "ポリゴンモデル3次元物体の計算 機合成ホログラムに関する検討",第3回 HODIC 講演会論文集(テレビ学技報20, AIT96-39), pp. 29-32 (1996).
- [10] M. Lucente: "Interactive computation of holograms using a look-up table", J. Electronic Imaging, 2, pp. 28–34 (1993).
- [11] J. L. Juárez-Pérez, A. Olivares-Pérez and R. Berriel-Valdos: "Nonredundant calculation for creating digital Fresnel holograms", Appl. Opt., 36, pp. 7437–7443 (1997).

- [12] A. Ritter, J. Böttger, O. Deussen, M. König and T. Strothotte: "Hardware-based rendering of full-parallax synthetic holograms", Appl. Opt., 38, pp. 1364–1369 (1999).
- [13] C. Petz and M. Magnor: "Fast hologram synthesis for 3D geometry models using graphics hardware", SPIE Proc. Practical Holography XVII and Holographic Materials IX, #5005, pp. 266–275 (2003).
- [14] 下馬場,伊藤:"ホログラフィ専用計算機 HORN-4", 3次元画像コンファレンス'2001, pp. 9-12 (2001).
- [15] K. Matsushima and M. Takai: "Recurrence formulas for fast creation of synthetic threedimensional holograms", Appl. Opt., **39**, pp. 6587–6594 (2000).
- [16] H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference", SPIE Proc. Practical Holography XIV and Holographic Materials VI, #3956, pp. 48–55 (2000).
- [17] 松島, H. Schimmel, F. Wyrowski: "波面展開法 を用いた表面モデル CGH の高速計算法", 3 次元 画像コンファレンス 2001, pp. 13–16 (2001).
- [18] K. Matsushima, H. Schimmel and F. Wyrowski: "New creation algorithm for digitally synthesized holograms in surface model by diffraction from tilted planes", SPIE Proc. Practical Holography XVI, #4659, p. 53 (2002).
- [19] 松島, 近藤: "波面展開法を用いた表面モデル CGH の高速計算法 II", 3 次元画像コンファレンス 2002, pp. 213-216 (2002).
- [20] 松島, H. Schimmel, F. Wyrowski: "波面展開法 による傾いた平面からの光波回折シミュレーショ ン", Optics Japan 2001, pp. 229–230 (2001).
- [21] K. Matsushima, H. Schimmel and F. Wyrowski: "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves", J. Opt. Soc. Am., A20, pp. 1755–1762 (2003).
- [22] K. Matsushima and A. Kondoh: "Wave optical algorithm for creating digitally synthetic holograms of three-dimensional surface objects", SPIE Proc. Practical Holography XVII and Holographic Materials IX, #5005, pp. 190–197 (2003).
- [23] 坂本,長尾:"パッチモデルを用いた計算機合成フー リエホログラムの高速計算法",電子情報通信学会 論文誌,pp. 150–157 (2002).
- [24] 藤井,吉川: "CG を利用したフレネルホログラム のシェーディング処理", 3次元画像コンファレン ス'99, pp. 299–304 (1999).

- [25] J. Underkoffler: "Occlusion processing and smooth surface shading for fully computed synthetic holography", SPIE Proc. Practical Holography XI, **3011**, pp. 19–29 (1997).
- [26] T. Hamano and M. Kitamura: "Computergenerated holograms for reconstructing multi-3-D images by space-division recording method", Proc. of SPIE, pp. 23–32 (2000).
- [27] 高瀬,坂本,青木: "光線の到来方向を考慮した z バッファによる計算機合成ホログラムの高速隠面 消去",映情学誌,57,pp. 483-489 (2003).
- [28] 近藤,松島: "全方向視差 CGH における Babinet の原理による隠面消去",3次元画像コンファレン ス 2002, pp. 113–116 (2002).
- [29] 坂本: "影伝搬法を用いた計算機合成ホログラムの 隠面消去法",電子情報通信学会論文誌, J85-D-II, pp. 1832–1839 (2002).
- [30] 松島, 近藤: "表面モデル3次元物体のデジタル合成ホログラムにおける波動光学的隠面消去",3次元画像コンファレンス2003, pp. 153–156 (2003).
- [31] S. Weissbach, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: "Digital phase hologram: Coding and quantization with an error diffusion concept", Opt. Commun., 72, pp. 37–41 (1989).
- [32] 川淵, 松尾, 横山, 松島: "フォトポリマーを用いた 位相変調型計算機合成ホログラムの作成", 2003 年 電子情報通信学会総合大会, pp. D-11-142 (2003).
- [33] 松尾,西村,松島: "CGH の2値位相コーディン グにおける同時摂動型最適化法を用いた適応型誤 差拡散法", Optics Japan 2003 (発表予定).
- [34] 田中: "GA による計算機ホログラムにおける最適 誤差拡散の推定方法",映情学誌, 54, pp. 394-401 (2000).
- [35] M. A. Seldwitz, J. P. Allebach and D. W. Sweedney: "Synthesis of digital holograms by direct binary search", Appl. Opt., 26, pp. 2788– 2798 (1987).
- [36] F. Wyrowski: "Iterative quantization of digital amplitude holograms", Appl. Opt., 28, pp. 3864–3870 (1989).
- [37] F. Wyrowski and O. Bryndahl: "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography", J. Opt. Soc. Am., A 5, pp. 1058–1065 (1988).
- [38] 松島: "同時摂動型最適化法による位相型回折光 学素子の設計",関西大学「技苑」,109, pp. 9–14 (2001).
- [39] 後藤, 松島: "同時摂動型最適化法による回折光学 素子の最適化", Optics Japan 2002, pp. 204–205 (2002).