コンピュータホログラフィによる 光伝搬動画像記録・再生法の高速シミュレーション

角江 崇
Takashi KAKUE

千葉大学 大学院工学研究院
〒263-8522　千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33
Graduate School of Engineering, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

1. はじめに

コンピュータホログラフィでは，計測対象となる光の情報をホログラムと呼ばれる２次元の干渉縞画像としてイメージセンサで記録する．記録したホログラムに対して計算機上で再生処理計算を行い，計測対象の情報を有した光の強度分布と位相分布, つまり３次元像を数値的に再生できる．この特長を活かして，透明ガス流や超音波場の可視化へと適用した例[1-3]が報告されている．コンピュータホログラフィの応用事例のうち，光が伝搬する様子を記録，再生可能な技術（以下，光伝搬動画像記録・再生法と呼ぶ）[4,5]は，光源に超短光パルスレーザを用いる．時間分解記録手法などのような他技術では成し得ない時空間的に連続な３次元動画像，つまり４次元（空間３次元＋時間１次元）像を単一露光で取得できる大きな利点がある．その一方で，得られる４次元像には時空間歪みが生じることが明らかにされていた[4]．光が伝搬する様子を精確に再現するにはこの時空間歪みの補償が必要であり，そのためには光伝搬動画像記録・再生法の計算機シミュレーションが有用であると考えられる．しかし光の４次元的な振る舞いを詳細に解析するためには，膨大な計算機リソースと長大な時間，双方を必要とする．このことから，光伝搬動画像記録・再生法における４次元像の時空間歪み補償法を確立するには至っていなかった．

本研究課題では上述の問題に焦点を当てた．すなわち，時空間歪み補償法の確立に向け，現実的な計算機リソースかつ計算時間で処理可能な光伝搬動画像記録・再生法の計算機シミュレーションモデルを新たに開発することである．本稿では, 高速フーリエ変換（FFT）に基づく高速化手法[6]について紹介する．

2. 光伝搬動画像記録・再生法

2.1 記録の原理

図１に光伝搬動画像記録・再生法における記録の原理図を示す．光源となる超短光パルスレーザから出射された光パルスはビーム分割素子で二分される．それぞれ，凹レンズと凸レンズを組み合わせたビーム径拡大素子によって広げられた後，一方は拡散板，他方はホログラム記録材料へと導入される．拡散板に入射した光パルスは散乱され，様々な方向へと広がっていく（図 1(a)）．この光パルスを物体光パルスと呼ぶ．ホログラム記録材料へと入射される光パルスは参照光パルスと呼ばれる．図 1(a)の瞬間においては，参照光パルスはホログラム記録材料へは到達していない．次に，図 1(a)で発生した物体光パルスが，ホログラム記録材料へと到達する瞬間を考える（図 1(b)）．物体光パルスと同時に参照光パルスが到達する場合，両者は互いに干渉するため，干渉縞が形成される．この干渉縞がホログラムとして，ホログラム記録材料へ記録される．同時に到達しない場合には干渉縞は形成されない．一方，拡散板を照明している光パルスは移動し，図 1(a)の瞬間とは別の位置から新たに物体光パルスが発生

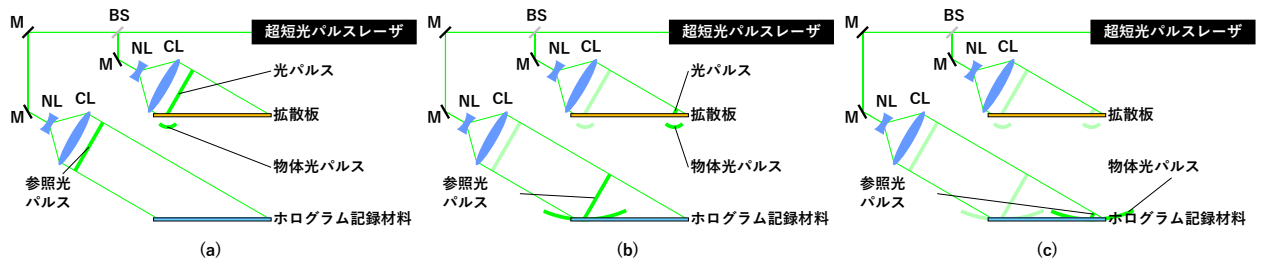

図 1　光伝搬動画像記録・再生法の記録の原理[6]．(a)から(c)の順に時間が経過．図中の略称はそれぞれ，BS: ビーム分割素子，M: ミラー，NL: 凹レンズ，CL: 凸レンズを表す．

する．この物体光パルスは，図 1(c)の瞬間において，ホログラム記録材料へと到達する．このとき参照光パルスに目を移すと，図 1(b)の瞬間とは別の位置においてホログラム記録材料を照明している．図 1(b)と同様に，物体光パルスと参照光パルスが同時にホログラム記録材料を照明する場合，干渉縞が形成され，記録される．つまり光伝搬動画像記録・再生法においては，物体光パルスの有する時間情報が，ホログラム記録材料において空間情報に変換されて記録される．この性質により，複数回の露光を必要とせず，単一露光によって 4 次元像を取得できる．

2.2　シミュレーションモデル

図 2 に，光伝搬動画像記録・再生法のシミュレーションモデルを示す．計算処理およびモデルの簡単化のため，以下のような仮定を導入した．拡散板とホログラム記録材料とは平行であり，その間の距離をdとする．拡散板を照明する光パルスは，z軸に対してx方向にθ_Oの角度で入射させる．光パルスの強度分布は矩形波状であり，光パルスと拡散板との断面像は直線状になる．この直線状の断面から物体光パルスが発生する．散乱の指向性は考慮せず，散乱によって物体光パルスの位相がランダムに乱されたうえで，物体光パルスは球面波状に一様に広がっていくと考える．物体光パルスがホログラム記録材料へと到達する時刻はその経路，すなわち光路長に依存して異なる．ホログラム記録材料へ角度θ_Rで入射する参照光パルスを考えた場合，拡散板上の点$\mathrm{P}_D(x_D, y_D, 0)$から発生した物体光パルスが，ホログラム記録材料上

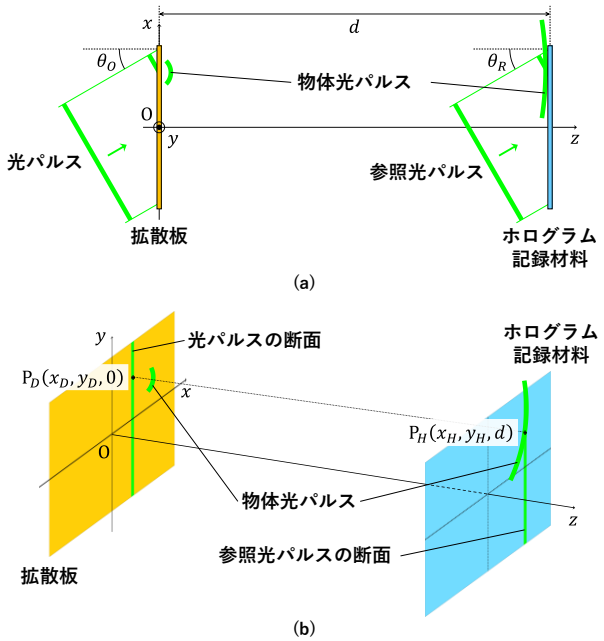

図 2　光伝搬動画像記録・再生法のシミュレーションモデル[6]．(a) 上面図，(b) 俯瞰図．

の点$\mathrm{P}_H(x_H, y_H, z_H)$に記録される条件は以下のように与えられる[6]．

$$|x_H \sin\theta_R - x_D \sin\theta_O + d - r_{DH}| < cW \quad (1)$$

$$r_{DH} = \sqrt{(x_H - x_D)^2 + (y_H - y_D)^2 + d^2} \quad (2)$$

ここで，cは光速，Wは光パルスの時間幅を表す．(1)式を満たす光のみをホログラム記録材料上で重ね合わせることにより，光伝搬動画像記録・再生法で記録されるホログラムを数値計算できる．

3.　提案手法

3.1　PSF を利用した光の回折の計算

光の伝搬および重ね合わせ，すなわち光の回折は，時間項を考慮しない場合においては以下のよ

うに記述できる．

$$u_2(x_2,y_2,d)=\frac{1}{i\lambda}\iint u_1(x_1,y_1,0)\times\frac{d}{r_{21}^2}\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}r_{21}\right)dx_1dy_1 \quad (3)$$

$$r_{21}=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+d^2} \quad (4)$$

u_1とu_2はそれぞれ伝搬元と伝搬先における光の複素振幅分布を表す．iは虚数単位，λは光の波長である．伝搬元と伝搬先の面は平行であり，その距離はdである．(3)式は次のように，畳み込みを利用して書き換えることができる．

$$u_2(x,y,d)=u_1(x,y,0)*h_{RS}(x,y) \quad (5)$$

$$h_{RS}(x,y)=\frac{d}{i\lambda r^2}\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}r\right) \quad (6)$$

$$r=\sqrt{x^2+y^2+d^2} \quad (7)$$

$*$は畳み込み演算子を表す．$h_{RS}(x,y)$は点拡がり関数（PSF）と呼ばれ，光がどのように広がっていくのかを表すものである．(5)式から，PSF の分布が不変であれば，点拡がり関数との畳み込みによって光の回折を記述できることが分かる．畳み込みはフーリエ変換により計算できるので，(5)式はさらに以下のように表せる．

$$u_2(x,y,d)=\mathcal{F}^{-1}\left[\mathcal{F}[u_1(x,y,0)]\mathcal{F}[h_{RS}(x,y)]\right] \quad (8)$$

$\mathcal{F}[\,]$および$\mathcal{F}^{-1}[\,]$はそれぞれフーリエ変換，逆フーリエ変換の演算子を表す．計算機においては，フーリエ変換は FFT を利用して高速に計算可能である．したがって，(8)式に基づいて光の回折を計算すれば，(3)式を直接的に計算するよりも高速に結果を取得できる．

3.2　光路長差を考慮した PSF による光伝搬動画像記録・再生法のシミュレーション

光伝搬動画像記録・再生法においては，参照光と物体光が同時にホログラム記録材料へと到達した場合にのみ干渉が生じるため，光の伝搬において時間項，すなわち光路長差を考慮する必要がある．したがって 3.1 節に示した計算をそのまま適用できない．この点を考慮し，従来手法[5]においては(8)式ではなく(3)式を直接的に計算していたため，計算に莫大な時間を要していた．そこで新たに，光路長差を考慮して PSF の分布を変調する手法を提案する．まず，以下のような関数hを新たに定義する．

$$h(x_1,y_1;x_2,y_2)=\frac{d}{i\lambda r_{21}^2}\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}r_{21}\right) \quad (9)$$

ここで，r_{21}は(4)式で与える．(9)式は，伝搬元の面上にある任意の点$(x_1,y_1,0)$からの光が，伝搬先の面上にある任意の点(x_2,y_2,d)にどのような分布を形成するのかを表している．(9)式と(6)式を用いると以下の関係が得られる．

$$h(x_0,y_0;x_0+x,y_0+y)=h_{RS}(x,y) \quad (10)$$

(10)式は，点$(x_0,y_0,0)$からの光が点(x_0+y,y_0+y,d)に形成する分布が PSF に相当することを示している．つまり，光の発生点が(x_0,y_0)だけ変化しても光の分布は(x_0,y_0)だけシフトするのみで，光の分布自体は変化しないことを意味する．

次に，hに対して以下の制約を与える．

$$|x\sin\theta_R-x_0\sin\theta_O+d-r_0|<cW \quad (11)$$

$$r_0=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+d^2} \quad (12)$$

(11)式は，光伝搬動画像記録・再生法において物体光パルスがホログラム記録材料へと記録されるための条件である(1)式と同様である．$d=270\ \mathrm{mm}$，$\lambda=522\ \mathrm{nm}$，$p=2.2\ \mu\mathrm{m}$を与え，計算対象とする領域を 4,096×4,096 画素で表した場合におけるhの分布を図 3 に示す．各画像中に示した座標は(x_0,y_0)を表す．前述したように，hの分布は(x_0,y_0)に応じてシフトしているだけであることが分かる．一方，図 3(b)は$\theta_R=2°$，$\theta_O=3°$とし，(11)式を用いて光路長を考慮した場合におけるhの分布を表す．(11)式を満たさない領域については黒色で表現した．図 3(b)では，(x_0,y_0)が変化するとその位置がシフトするだけでなく，分布中のパターンも変化している様子が分かる．このことは，図 3(b)で与えられる分布を(5)式における PSF として利用できないことを表している．そこで今回は，(11)式に対してさらに$\theta_R=\theta_O$という

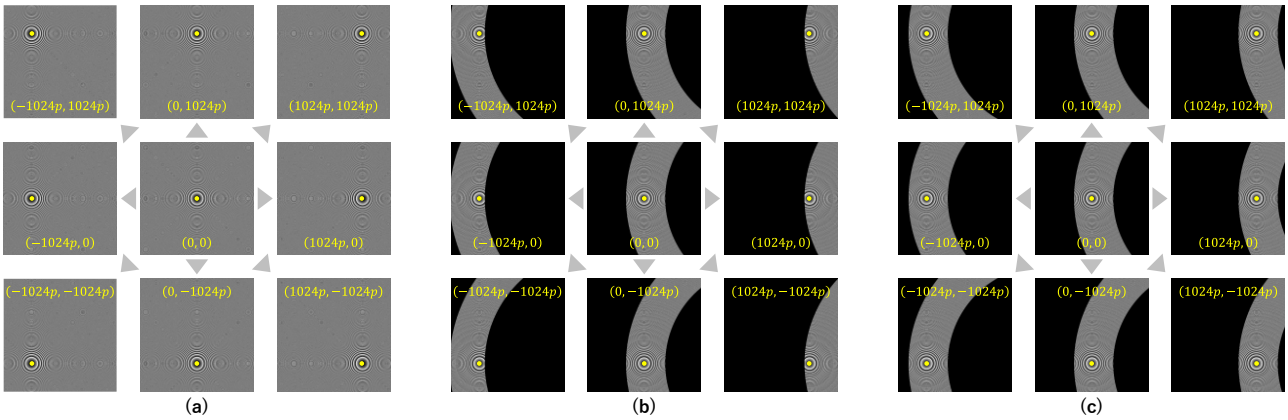

図 3　$h(x_0, y_0; x_0 + x, y_0 + y)$の分布[6]．(a) 光路長差を考慮しない場合，(b) 光路長差を考慮した場合（$\theta_R = 2°$，$\theta_O = 3°$），(c) 光路長差を考慮した場合（$\theta_R = \theta_O = 2°$）．

条件を加えた．図 3(c)に，$\theta_R = \theta_O \equiv \Theta = 2°$とした場合における$h$の分布を示す．図 3(c)の各画像は，図 3(a)と同様に，(x_0, y_0)に応じて分布中のパターンがシフトしているだけであり，分布そのものは不変であることが分かる．提案手法においては，図 3(c)の$(x_0, y_0) = (0, 0)$における分布を PSF として利用する．すなわち，提案手法における PSF は以下のように表現できる．

$$h_{LIF}(x, y) = \begin{cases} \dfrac{d}{i\lambda r^2} \exp\left(i \dfrac{2\pi}{\lambda} r\right) & (satisfy\ (14)) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \tag{13}$$

$$|x \sin\Theta + d - r| < cW \tag{14}$$

(13)式で与えられる PSF を用いて(8)式に示した畳み込みを計算することで，光伝搬動画像記録・再生法においてホログラム記録材料上に形成される干渉縞の分布を得ることができる．

4.　提案手法の評価

提案手法の有効性を示すために計算時間を評価した．計算機環境は以下のとおりである．OS として Windows 10 Enterprise，CPU として Intel Core-i9 10900K, GPU として GeForce RTX 3090, メモリ 64GB を搭載した PC を用いた．プログラム開発環境として Microsoft Visual Studio Community 2019 と CUDA 10.2 を用いた．(8)式

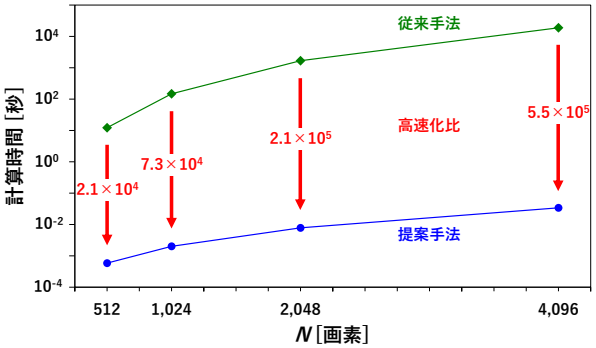

図 4　計算時間の計測結果[6]．

で必要となる FFT の計算には，CUDA で提供される cuFFT ライブラリを用いた．図 4 に計算領域の画素数と計算時間との関係を示す．ここでは，(3)式を直接的に計算する手法を従来手法とした．計算領域の画素数を$N \times N$画素としたとき，Nが 512，1,024，2,048，4,096 の場合における結果を示した．図 4 の結果はいずれも，計算時間を 10 回計測して得られた平均値である．従来手法においては，計算時間がそれぞれ1.2×10^1，1.5×10^2，1.7×10^3，1.9×10^4秒であった．一方，提案手法においてはそれぞれ5.9×10^{-4}，2.0×10^{-3}，7.8×10^{-3}，3.4×10^{-2}秒であり，最大で約 56 万倍の高速化を達成できた．次に，従来手法を基準とした場合に，提案手法で得られる再生像の画質を二乗平均平方根誤差（RMSE）により評価した．RMSE は，得られた再生像を 256 階調化した後で計算し

た．Nが 512，1,024，2,048，4,096 の場合において，それぞれ 38.0，25.6，19.8，15.5 という結果が得られた．光伝搬動画像記録・再生法に限らずコンピュータホログラフィにおいては，散乱光を記録する場合には再生像に粒上のノイズ（スペックルノイズ）が重畳し，画質が低下することが知られている．この点を考慮すると，従来手法と提案手法とで再生像画質には大きな差がないことを確認できた．

次に，提案手法による計算機シミュレーションで得られた結果を，光学実験で得られた結果と定性的に比較した．図 5(a)に示すような光学系を構築してホログラムを取得した．中心波長 522nm，時間幅 178fs のフェムト秒光パルスレーザを光源として用いた．光パルスが伝搬する様子を分かりやすくするため，拡散板には解像力テストターゲットのパターンを開口として設定した．画素数 $2{,}592 \times 1{,}944$画素，画素ピッチ$2.2\ \mu\mathrm{m}$のイメージセンサを用い，$d = 270\ \mathrm{mm}$，$\Theta = 2°$の条件でホログラムを記録した．図 5(b)には，図 5(a)の光学系で記録したホログラムから得られる 4 次元像の模式図を示す．拡散板を用いる場合，光パルスと拡散板との断面像が記録されるため，実際には 3 次元（空間 2 次元＋時間 1 次元）像となる．断面像が左から右へと伝搬していく様子が観察できる．また，再生像中に現れる解像力テストターゲットのパターンの変化する様子から，光パルスが伝搬する様子を容易に観察できると期待される．ここで，断面像は直線状であるが，1 章でも述べたように得られる 4 次元像には時空間歪みが生じるため，図 5(b)に示したように実際の像は弓状に歪む．記録したホログラムに対する再生処理については，紙面の分量の都合からここでは割愛する．詳細は参考文献[6]を参照されたい．図 6 に得られた再生動画像から抜き出した静止画の一部を示す．(a)，(b)はそれぞれ光学実験，計算機シミュレーションで得られたホログラムからの再生結果である．画像間の時間差は 8.2fs に相当する．実際の再生動画像は参考文献[6]中のリンクから閲覧可能であるので，よければそちらも参照されたい．いずれの場合においても図 5(b)で期待されたように，弓状に歪んだ光パルスの断面像が左から右へと伝搬していく様子を観察できた．両者の結果は定性的によく一致しており，提案手法の有効性をじゅうぶん示しているといえる．一方で，光学実験から得られた再生像はエッジ部分がぼけているのに対し，計算機シミュレーションで得られた結果はエッジ部分がはっきりしていることが確認できた．この差は，計算機シミュレーションにおける処理を簡単化する目的で導入していた仮定によって生じたものと考えられる．計算機シミュレーションにおいては，光パルスは矩形波状の強度分布を有するという仮定を導入していた．一方で，実際の光パルスはガウス分布状の強度分布を有することが知られている．この違いが，

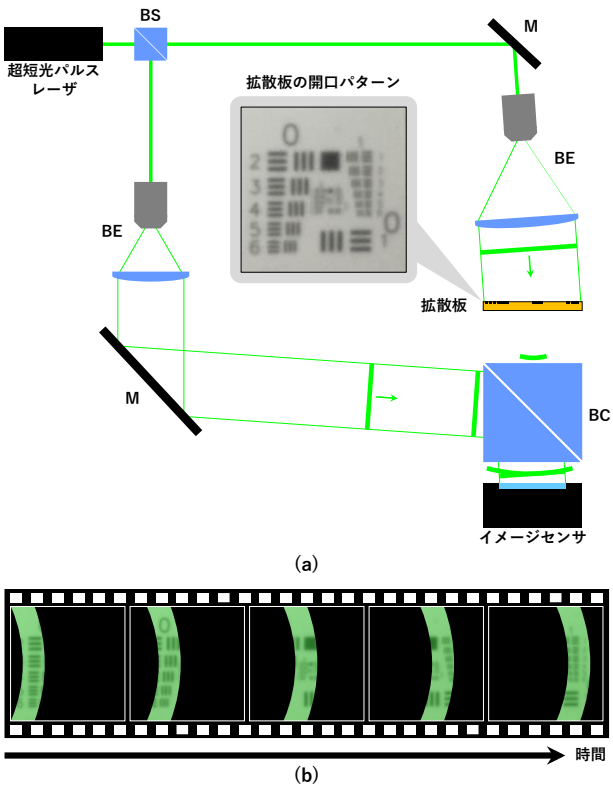

図 5　光学実験の概略[6]．(a) 光学系の模式図，(b) 期待される再生像の模式図．
図中の略称号はそれぞれ，BS: ビーム分割素子，M: ミラー，BE: ビーム径拡大素子，BC: ビーム結合素子を表す．

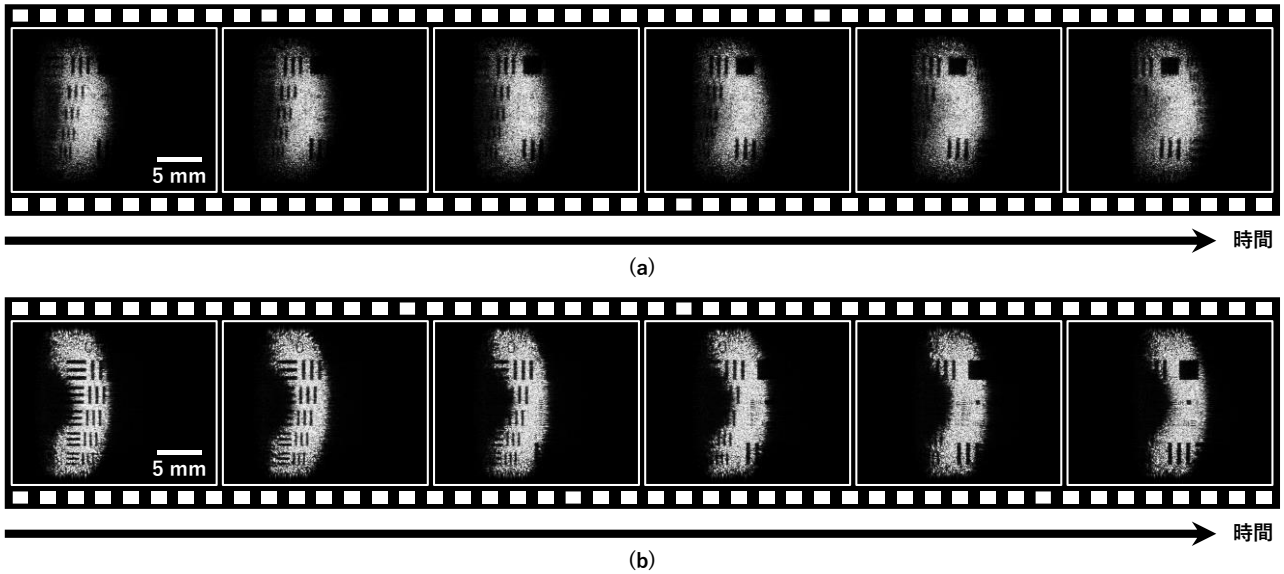

図 6　得られた再生動画像から抜き出した 6 コマの静止画[6]．(a) 光学実験結果，(b) 計算機シミュレーション結果．画像間の時間間隔は 8.2fs．実際の再生動画像は参考文献[6]中のリンクから閲覧可．

再生像におけるエッジのぼけ具合の差に影響を与えたと予想できる．

5.　まとめ

コンピュータホログラフィの応用事例の一つである光伝搬動画像記録・再生法の計算機シミュレーションを，FFT に基づいて高速に処理可能な手法を提案，実証した．計算時間の評価結果から，提案手法は従来よりも約 56 万倍高速化可能であることが示された．RMSE を利用した画質評価により，提案手法が従来手法と同等の再生像画質を得られることを確認した．光学実験によって得られたホログラムからの 4 次元像と定性的に比較した結果，提案手法の有効性を示すことに成功した．今後は，提案手法の拡張性および汎用性を高めるために，本研究において導入していたいくつかの仮定を満たさない場合，例えば$\theta_R \neq \theta_O$の条件においても適用可能な，新たな計算手法およびシミュレーションモデルを開発することを目指す．将来的には，4 次元像に生じる時空間歪みを補正し，光パルスの振る舞いを精緻に捉えることが可能な未踏技術の確立へと挑戦する予定である．

謝辞

本研究は，公益財団法人高柳健次郎財団の助成によるものである．また，本研究の一部は JSPS 科研費（20H05887，20J23542），公益財団法人島津科学技術振興財団の助成を受けたものである．ここに記し，関係各位に謝意を表す．

共同研究者である千葉大学の伊藤智義教授，下馬場朋禄教授，京都工芸繊維大学の粟辻安浩教授，井上智好氏にこの場を借りて感謝申し上げる．

参考文献

[1] T. Kakue, *et al.*, *Opt. Lett.* **36**, 4131-4133 (2011).

[2] T. Kakue, *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 10413 (2017).

[3] Y. Takase, *et al.*, *Appl. Opt.* **60**, A179-A187 (2021).

[4] T. Kakue, *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **18**, 479-485 (2012).

[5] T. Kakue, *et al.*, *OSA Continuum* **4**, 437-454 (2021).

[6] T. Kakue, *et al.*, *JOSA A* **39**, A7-A14 (2021).