

# ホログラフィにおいて リアルタイム応答を提供するデジタル技術

ジェフ・ヘクト

デジタル画像処理や表示技術が、ホログラフィの新しい可能性を開こうとしている。デジタルホログラフィック顕微鏡は、生細胞の3D画像をリアルタイムにコンピュータ上に表示することができ、また、デジタル・ホログラフィック・テレプレゼンスは実現への端緒を開きつつある。

ホログラフィはアナログ技術として誕生し、エメット・リース氏 (Emmett Leith) とユリス・ウパトニクス氏 (Juris Upatnieks) によるレーザホログラフィの進歩は、アナログコンピューティングの1つである光信号処理に関するリース氏の初期の研究を大きな基盤としている。ホログラムは長い間、ガラス板やフィルム上に塗られる特殊な写真乳剤に記録されていた。

コンピュータによるホログラムの生成という概念は1966年から存在するが、その技術は長い間、演算能力の問題という実用上の制約を受け、また、初期のコンピュータ生成のホログラムは写真媒体に記録されることが多かった。現在では、新世代のデジタル技術によって、写真媒体に代わるホログラムの記録手段が生み出され、ホログラフィック画像の処理および表示に新しい選択肢がもたらされている。写真技術と同様に、デジタル手法には、リアルタイム応答や、処理や保存が容易といった重要な利点がある。応用分野としては、3D顕微鏡法、ディスプレイ、動画または「テレプレゼンス」などがある。

## 基本的なコンピューティング概念

ホログラフィは、物体からの光の波面の振幅と位相の両方を記録することに基づく手法である。これは物体から

の光の波面に、同じ光源からのコヒーレントな参照光を組み合わせて、ホログラムと呼ばれる干渉パターンを生成することによって行われる。記録されたホログラムに同一の参照光を照射すると、元の波面が再構成され、元の物体があたかもそこに存在するかのようになり、目には認識される。

デニス・ガボール氏 (Dennis Gabor) の元の概念では、物体光と参照光は同じ経路をたどり、物体そのものは2次元だった。軸上ホログラフィと呼ばれるこの手法は実装が容易で、現在でも一部の応用分野で使用されているが、本質的に小さな物体にしか適用できず、また、互いに重なり合う2つの同一像が生成されるという問題が存在する。リース氏が発明した軸外ホログラフィでは、物体光と参照光が別々の経路をたどり、より大きな物体のホログラフィが可能になったとともに、再構成像において2つめの同一像が除去された。

コンピュータ生成ホログラフィでは、コンピュータによって仮想物体が生成する干渉パターンが計算された。コンピュータによって生成されたホログラフィは、主に写真媒体に印刷され、参照光を照射することによって仮想物体の3D像が生成された。

新しいデジタルホログラフィでは、初期のホログラムの記録に使用された

アナログ写真フィルムや感光板に代わって、図1の軸外ホログラフィに示すように、ホログラムを記録するデジタル検出器アレイが使用される。これによって得られるデジタル版のホログラムは、さらなる処理を施すためにコンピュータへと転送される。

コンピュータを使用して、例えば、デジタル化されたホログラムから位相と強度のデータを抽出し、コンピュータのディスプレイ上に表示可能な、元の物体の3Dデジタルモデルを生成することが考えられる。あるいは、デジタル化されたホログラムをデジタルディスプレイやフォトリフラクティブ材料上に再現し、それに参照光を照射して、3D像を光学的に再構成することができる。像は、固定像として個々に記録および表示するか、順番に記録および表示してホログラフィック動画、映画、またはテレプレゼンスを生成することができる。

## 顕微鏡法における利用方法

顕微鏡法は、デジタルホログラフィにおいて特に成功を収めた応用分野であり、ガボール氏が電子顕微鏡を改良する手段としてホログラフィを発明したときに、素晴らしく鋭い視点を持っていたことをうかがわせるものである。デジタルホログラフィは、生細胞にもう

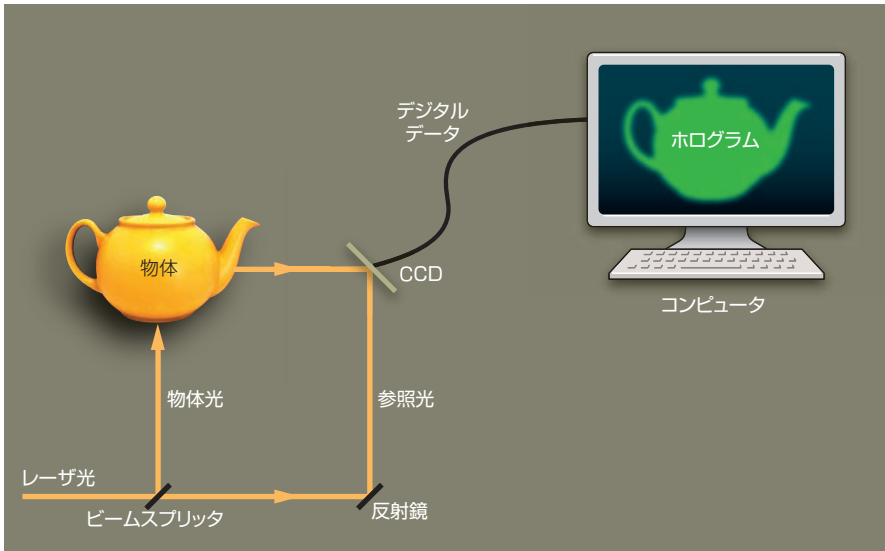


図1 デジタル軸外ホログラフィでは、CCDアレイを使用して、参照光を物体光に干渉させたデジタルホログラムを記録する。データはコンピュータへと転送され、分析される。

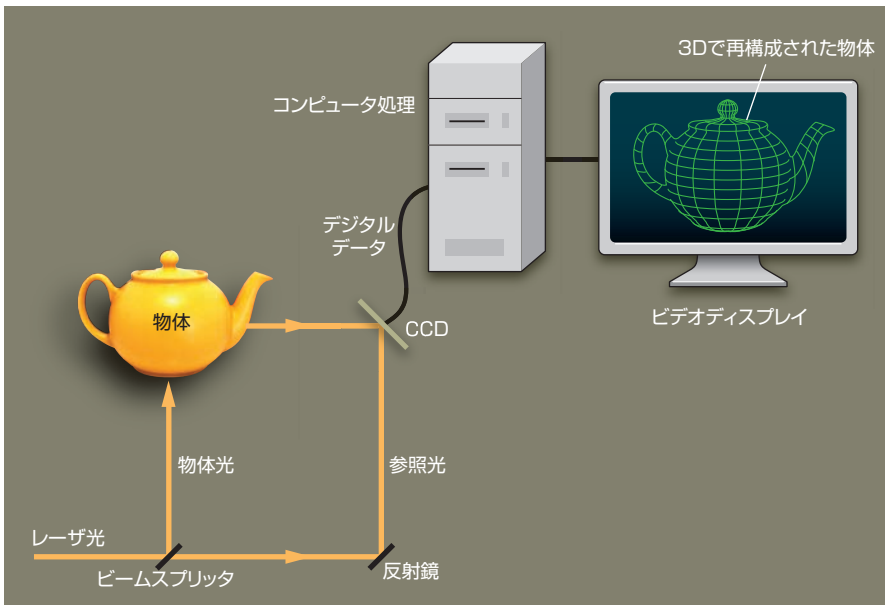
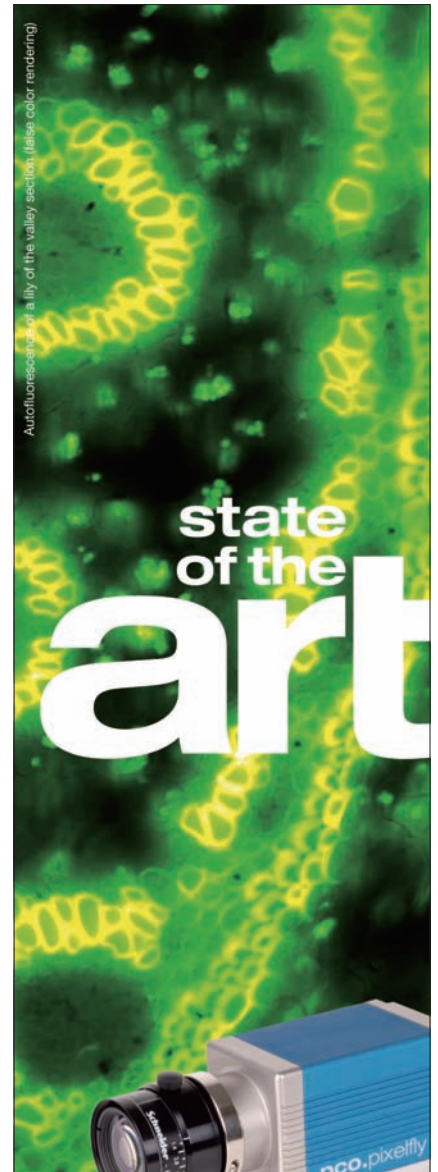


図2 デジタルホログラムはCCDアレイ上に記録され、そのデータがコンピュータ上で処理されて、コンピュータにおいてデジタル3Dモデルが生成される。このモデルが画面上に、あたかも3次元であるかのように表示される。

まく適用することができる。生細胞は柔らかく、自然な色の明暗差がほとんどないため、従来型の顕微鏡法で観察するのは困難な場合がある。ホログラフィは、位相対比顕微鏡と同様に、細胞成分の識別につながる、屈折率の違いを記録することができる。

顕微鏡法において、デジタルホログ

ラムは電子的に記録され、その結果得られるデジタルデータは通常、図2に示すように、コンピュータ画面上に表示する3Dモデルを生成するためにリアルタイムで処理される。この手法では、時間のかかる写真処理は不要で、画像を時系列に記録して動的な効果を観察することができる。さらに、「光場を複



**Every image is a work of art!**

The high-definition **pco.pixelfly usb** digital camera system with advanced CCD technology guarantees the best results in scientific and industrial applications.

The **pco.pixelfly usb** features a high dynamic range (14 bit) and high resolution (1392 × 1040 pixel) with low readout noise ( $6_{\text{rms}} e^-$ ). Another advantage is its compact form factor.

**pco.**

www.pco.de  
in America: www.pco-tech.com

素数の配列として完全かつ正確に表現することによって、実空間のホログラフィでは困難または実現不可能な多くの画像処理および加工機能が可能になる」と、米南フロリダ大学(University of South Florida)のキム・ミョンクン教授(Myung K. Kim)は記している<sup>(1)</sup>。画像処理としては、さまざまな距離に存在する物体へのフォーカス、定量的な位相シフト測定、収差補正といったデジタル操作などがある。デジタル処理では、ガボール氏によるインラインホログラフィにおける、2つの同一像が生成される問題も抑制することができる。

2003年に初めて実証されたデジタルホログラフィの主要な利点は、生細胞を、染色やラベル付けなどによる影響を与えることなく、観察できることである。これによって、「生細胞に対してはこれまで観察が非常に困難であった、細胞の厚さ、体積、細胞の屈折率といった細胞の性質を容易に測定することができる」と、スウェーデンのフェーズ・ホログラフィック・イメージング社(Phase Holographic Imaging)のケルスティ・アルム氏(Kersti Alm)とそのチームはレビュー論文に記している<sup>(2)</sup>。リアルタイムのデジタル処理によって、一連の観測結果から変化をとらえることが可能となり、また、記録されたホログラフィックデータを再処理することによって、異なる観測結果をより適切に比較することができる。

ただし、デジタルホログラフィック顕微鏡法にも独自の制約がある。主な制約は、デジタルカメラの空間周波数応答が比較的低いことである。このために、再構成されたホログラムの解像度が制約されると、アイルランド国立大学(National University of Ireland)のダミアン・ケリー氏(Damien Kelly)



図3 デジタルホログラムはCCD上に記録された後、コンピュータに保存され処理される。ホログラムをデジタル再構成するには、処理済みのデジタルホログラムを空間光変調器上に表示する。空間光変調器に参照波を照射することによって、物体像が再構成される。

とそのチームは記している<sup>(3)</sup>。これは、検知素子の間隔と、それらのサイズが写真媒体の粒子よりも大きいことに起因している。しかしケリー氏は、新しい処理手法によって改善される見込みだと述べている。

### デジタル・ホログラム・ディスプレイ

デジタル記録されたホログラムは、空間光変調器(SLM: spatial light modulator)またはフォトリフラクティブ媒質に表示し、参照光を照射することによっても再構成することができる。図3に示すように、表示されたホログラムによって入力光が回折され、3D像が生成される。

高品質なホログラフィック画像を生成するには、記録されたホログラムに対して、照射波長と表示機器の物理的な特性の両方を考慮に入れたデジタル処理を施す必要がある。これを行うには、表示機器固有の特性に対応するために、ホログラムを標準交換形式で転送し、最終処理を表示機器で実行することが最も望ましいと、米MITメディアラボ(MIT Media Laboratory)のV. マイケル・ボブ氏(V. Michael Bove)はデジタル表示ホログラフィに関する最近のレビューに記している<sup>(4)</sup>。「理想的なSLMならば、光の強度と位相の両方を制御可能だが、実用的なSLMのほとんどはそのいずれか一方しか制御できないことを考えると、位相のみを制御する変調器の方が望ましい。理論的には、振幅のみを制御する変調器よりも(中略)回折効率が5倍以上高いためである」と同氏はいう。両方の種類の変調器について、実証結果が示されている。

SLMのもう1つの利点は、表示されたホログラムにおける光の回折方法を変更することによって、表示ホログラムを動的に変更できる点である。これによって、補償光学用の共役波面の生成や、(ホログラフィック)光ピンセット用のビーム指向装置など、調整可能な光学系を必要とする用途向けの動的なホログラフィック光学部品としてSLMを使用することができる。このデジタル素子は、アナログホログラフィック材料よりも空間帯域幅が小さいが、多くの応用分野に対し、量産民生製品用に開発された、適切な処理を行う液晶ディスプレイやデジタルマイクロミラーを採用することができると、独シュトゥットガルト大学(University of Stuttgart)のトビアス・ファイスト氏(Tobias Faist)は記している<sup>(5)</sup>。



図4 MITおよびアリゾナ大学が実証した、「レイア姫」に扮装した学生のホログラフィック・テレプレゼンス(写真提供:MITメディアラボおよびアリゾナ大学光科学部)

行った<sup>(6)</sup>。2011年にはMITのポーブ氏のグループが、マイクロソフト社(Microsoft)の「Kinect」からのジェスチャ認識カメラを改造して入力像を生成し、それを画像処理チップで処理して、カスタマイドの音響光学プロジェクトを使用して表示し、レイア姫の衣装を身に着けた大学院生のエドウィーナ・ポートカレーロさん(Edwina Portocarrero)の像を披露した(図4)。

## 今後の展望

デジタル技術は、ホログラフィック画像処理に多大な進歩をもたらした。デジタル画像処理および加工技術はとどまることなく進歩し続けており、そのような新しい技術とピクセル解像度の向上のおかげで、「まだ概念的にも創造されていない新しいホログラフィック画像処理および加工機能が今後出現するだろう」とキム教授は楽観的な展望を抱いている。

リアルタイムのホログラフィック動画も目覚ましい進歩を遂げているが、難しい問題が残っている。解像度は、アポロ時代のカラーテレビ放送よりも初期の電子テレビに近いレベルにとどまるのだ。デジタルコンバータとビデオデッキに接続された古いアナログのブラウン管テレビセットが、ホロビジョンに置き換えられるまでずっと動作し続けてくれるとは期待しない方がよい。

## テレビまたはテレプレゼンスへ

動的なデジタルホログラフィの先にある次の段階は、ホログラフィック・テレビジョン、またはテレプレゼンスである。つまり、デジタルホログラムを動画のようなフレームレートで記録し、転送して、同じフレームレートで3次元で表示するという概念である。

これまでのところ、最も印象的な「ホログラフィック」の実演には、実際のホログラムはまったく使用されていない。1977年の映画「スターウォーズ：エピソードI」で助けを求めるレイア姫の有名な「ホログラム」は、非ホログラフィックの特殊効果であった。フューチャリストであるレイ・カーツワイル氏(Ray Kurzweil)や、かなり以前に亡くなったラッパーのトゥパック・シャクル氏(Tupac Shakur)を含む、最近の一連の「ホログラフィック・テレプレゼンス」の実演も単なる見せかけであり、2D画像をステージ上の透明なスクリーン上に投影するという「ベッパーズ・ゴースト」の錯覚を利用している。

ホログラフィック映画やテレビ番組は、1960年代からの夢だったが、長年にわたるアナログ技術による開発は1990年半ばに徐々に姿を消していった。ここ数年では、リアルタイムのデジタ

ルホログラフィが大きな進歩を遂げている。「進歩を妨げる障壁となると考えられてきたキャプチャと計算は、障壁ではないことが明らかになりつつある。ディスプレイ自体が制約要因である」とMITメディアラボのポーブ氏は述べる。開発者らは、安価なカメラを使用してコヒーレントでない光における像をキャプチャし、コンピュータを使用して、計算の大部分をディスプレイで実行することによって、ホログラムを生成している。

中には、人目を引く実証事例も存在する。米アリゾナ大学(University of Arizona)のナセル・ペイガムバリアン教授(Nasser Peyghambarian)とそのチームは2010年、新しいフォトリフラクティブ材料を使用して、1秒あたり1フレームの速度でテレプレゼンスの実証を

## 参考文献

- (1) M.K. Kim, "Principles and techniques of digital holographic microscopy," SPIE Reviews, 1 (2010); doi:10.1117/6.0000006.
- (2) K. Alm et al., "Digital Holography and Cell Studies," Holography, Research and Technologies, InTech, Rijeka, Croatia (2011).
- (3) D.P. Kelly et al., "Resolution limits in practical digital holographic systems," Opt. Eng., 48, 9, 095801 (September 2009).
- (4) V. Michael Bove, Jr., "Display Holography's Digital Second Act," Proc. IEEE, 100, 4, 918 (April 2012).
- (5) S. Zwick, T. Haist, M. Warber, and W. Osten, "Dynamic holography using pixelated light modulators," Appl. Opt., 49, F47 (Sept. 1, 2010).
- (6) J. Hecht, "Holographic telepresence approaches real-time operation," Laser Focus World, 46, 12 (December 2010).