

## 計算機合成ホログラム作成・表示技術の進展

松島 恭治

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

**概要：**戦略基盤プロジェクト開始以降の計算機合成ホログラム作成・表示技術の進展を概観している。主に静止画と動画に分け、静止画については、カラーフィルタ方式のフルカラー計算機合成ホログラム製作技術について述べる。また、その改良を目的とした体積ホログラム転写技術、レーザーリソグラフィによる描画技術自体の改良、マルチレベル位相変調の導入や、端面入射型照明光源の導入について述べ、動画表示技術として光源スイッチング方式時分割多重化技術について報告する。

### 1. はじめに

2013年に文科省戦略基盤形成支援事業のプロジェクト(以下、戦略基盤プロジェクト)として、「コンピュータホログラフィ技術を中心とした超大規模データ処理指向コミュニケーション」という長い名前のプロジェクトを開始して以来ほぼ5年間が経過した。単にコンピュータホログラフィだけでなく、音響、通信、さらには最終的な応用形態の模索までを見据えてスタートしたプロジェクトであったが、その中核になるのは計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram: CGH)を作成・表示するコンピュータホログラフィの技術である。

この作成・表示技術における最大の問題点は、視点を変えて立体像を観察できる範囲(視域角)がCGHの干渉縞画像の物理的な画素ピッチによって決まることである。実際、コンピュータホログラフィでは視域角は $2\sin^{-1}[\lambda/(2p)]$ で与えられる。 $\lambda$ は波長で $p$ は画素ピッチである。ここから計算すると例えば、赤色の波長で視域角45度を得るために必要な画素ピッチは約 $0.8\mu\text{m}$ となる。これがCGHの製作・表示の上で大きな問題となる。

これとよく似ているが、もう一つの大きな問題点は空間バンド積の問題と呼ばれている<sup>1)</sup>。これは、簡単に言えば、画面サイズと視域角の積が画像のピクセル数に概ね比例するという問題である。つまり、大きな画面サイズと広視域を両立するためには、どうしても大きな画素数(計算においてはサンプリング数)が必要となる。例えば、 $2,000 \times 2,000$ 画素の

CGHがあったとすると、これを画素ピッチ $0.1\text{mm}$ で作成し再生すると、画面サイズは $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ となるが視域角はわずか $0.36$ 度となる。画素ピッチを $0.8\mu\text{m}$ にすると、上述のとおり視域角45度が得られるが、画面サイズはわずか $1.6 \times 1.6\text{mm}^2$ になってしまう。従って、視域角45度で数センチ角程度のCGHを作成するために必要な画素数は、数10億画素以上になってしまう。こちらは、主としてCGHの計算やデータハンドリング上の大きな問題点となる。

これらの問題点を乗り越えて、マサチューセッツ工科大学(MIT)ミュージアムでCGHを展示できたことが<sup>2-3)</sup>、やはり大きな契機となって戦略基盤プロジェクトにつながったことは否めない。本稿では、プロジェクトスタート以降に開発した作成・表示技術や、現在開発中の技術を述べる。

### 2. 静止画技術

本プロジェクトでは、静止画描画サービスをこの分野の研究者に提供する関大デジタルホロスタジオを設立し運営している<sup>1)</sup>。関大デジタルホロスタジオでは、サブミクロンの画素ピッチでCGHを作成できるレーザーリソグラフィ装置を備えており、静止画の作成ではこの装置が中心的な役割を果たしている。

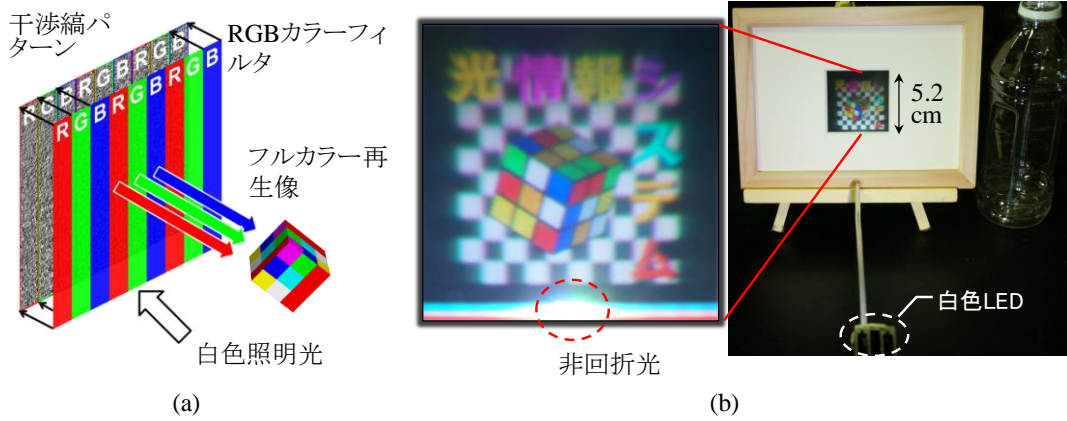


図1 カラーフィルタ方式フルカラー高解像度CGH<sup>4)</sup>. (a)原理, (b)再生像の例.

### 2.1 カラーフィルタ方式フルカラーCGH

静止画での大きなトピックは、手軽にフルカラーCGHを作成できるようになったことであろう。従来、レーザーリソグラフィ装置で作成される高解像度CGHではモノクロの再生像しか得られなかったが、図1(a)に示す通り、液晶パネルで用いられるRGBカラーフィルタをレーザーリソグラフィで描画したCGH干渉縞パターンに貼り合わせることで、カラー再生が可能となった<sup>4)</sup>。図1(b)にこの技術で作成したカラーCGHの例を示す。

この技術で作成されるCGHは、像合成に大きな光学系が必要なダイクロイックミラー方式フルカラーCGHとは異なり<sup>5)</sup>、従来のモノクロCGHとほぼ同様に展示可能である。しかし、RGBカラーフィルタのフィルタ特性が広帯域であるため、再生像に

ぼけが生じることや、カラーフィルタの位置合わせが難しく、量産性に欠けるといった問題点がある。

### 2.2 フルカラー転写CGH

カラーフィルタ方式CGHの問題点を解消するために、RGBカラーフィルタより狭帯域な波長選択性を有する体積ホログラムにレーザーリソグラフィで作製した高解像度CGHの像を転写する研究を進めている<sup>6-7)</sup>。図2にその原理を示す。(a)では、レーザーリソグラフィで作製した3枚の原版CGHを3枚の体積ホログラムに転写してそれを積層することによりフルカラー再生を行う。この手法は、カラーフィルタ方式のように干渉縞を分断しないため、再生像品質が大きく向上する。一方(b)では、通常カラーフィルタ方式CGHを原版としてそれを体積ホログラムに転写することにより、ボケの改

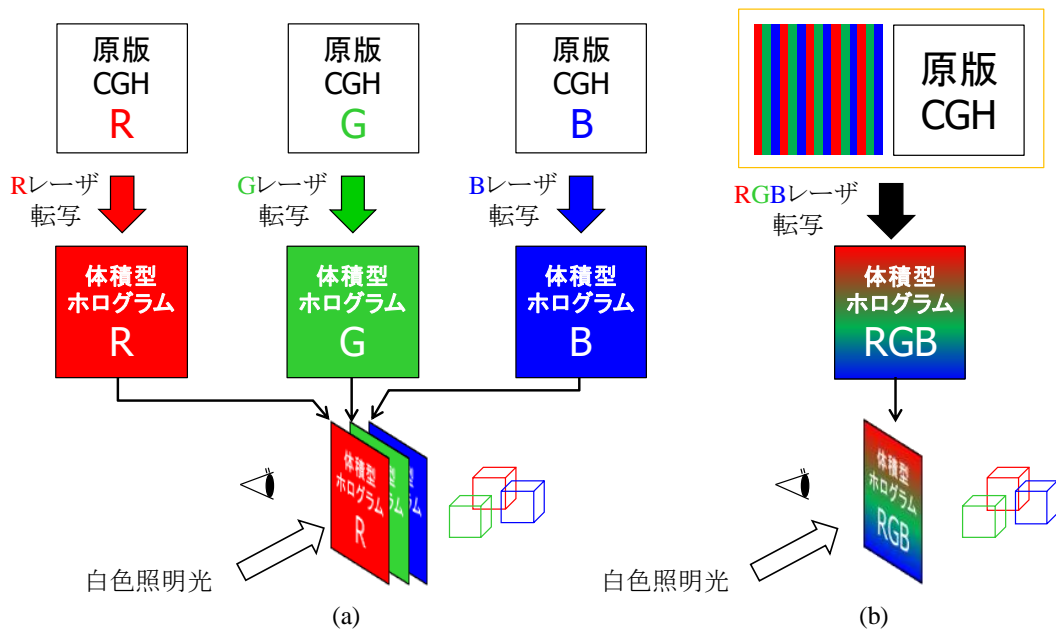


図2 フルカラー転写CGHの原理. (a)積層型カラー転写CGH, (b)フィルタ型カラー転写CGH.

善と同時に量産性を向上させることを目的としている。

### 2.3 レーザリソグラフィ装置の高度化

関大デジタルホロスタジオで運用しているレーザリソグラフィ装置では、仕様上の最小描画画素ピッチは  $0.6 \mu\text{m}$  であるが、実際には  $0.6 \mu\text{m}$  以下で描画しても十分に高い解析効率が得られることが分かった。これは、このレーザリソグラフィ装置の本来の使用目的が超微細加工用のフォトマスク作成であるのに対して、我々はフォトマスクほどの正確さが必要でない CGH 干渉縞を描画しているためと考えられる。

また、従来のレーザリソグラフィ装置ではクロム膜による振幅バイナリの干渉縞を描画していたが、描画レーザーの強度を 8 ビット (256 レベル) で変調することにより、厚膜レジストを用いて表面レリーフを形成するオプション改修を行っている。図 3 に示す通り、この表面レリーフにより、原理的には 8 ビットのマルチレベル位相変調 CGH が作製可能となる。

従来の振幅変調では、CGH の光学再生像に共役像と呼ばれる不要像が発生することを原理的に防ぐことができない。共役像による像劣化を避けるには、再生できる 3D シーンに制約を設ける必要があった。特に、再生像が CGH の手前側に飛び出すフローティング型 CGH の作成が難しかったが、マルチレベル位相変調により、このタイプの CGH が製作可能になることが期待されている。

### 2.4 端面入射型コヒーレント照明光源

高解像度 CGH の応用としては、サイネージ、室内装飾、ロゴ、アート等が考えられるが、実際の応用にあたって一つの問題点となるのが再生照明光源である。反射型 CGH の場合、図 4(a) に示す通り、CGH の手前に 25~30 cm の位置に光源を配置する必要がある。そのため、CGH を展示する場所が著しく制約を受ける。また光源自体も像の観察を阻害している。

そこで、エガリム社と共同で、図 4(b) に示す端面入射型照明光源による CGH 展示の研究を行っている。これにより光源が像観察を阻害しなくなり、壁掛けなど、様々な新しい展示方法が可能になると考

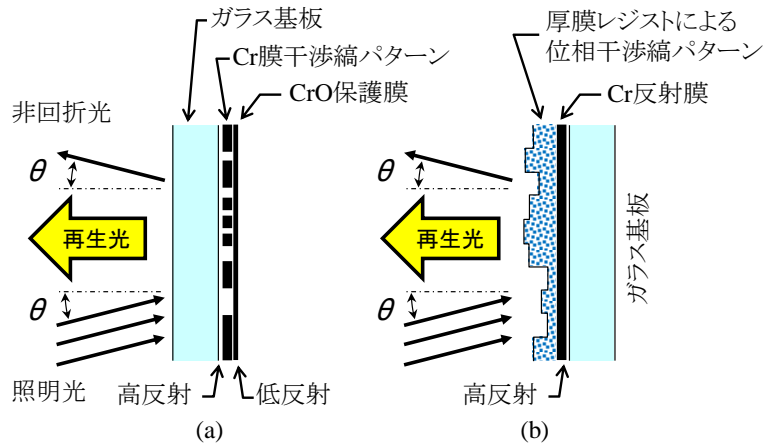


図 3 (a)クロム膜によるバイナリ振幅変調 CGH, (b)レジストによる表面レリーフ型位相変調 CGH.

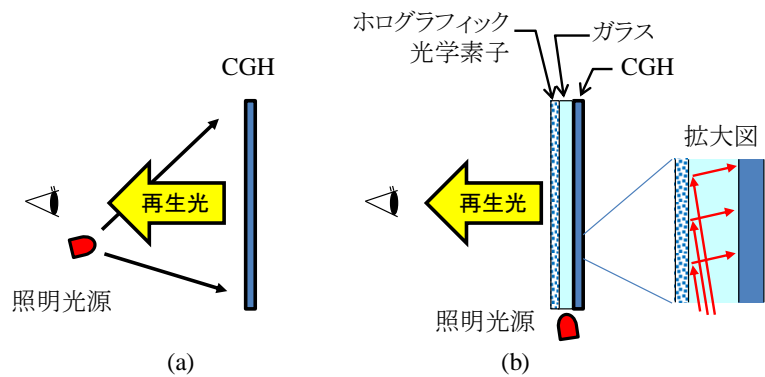


図 4 (a)従来の照明光源, (b)端面入射型照明光源.

えられる。

### 3. 動画再生技術

液晶パネルなどの電子表示デバイスを用いれば CGH を動画として再生することができる。これは電子ホログラフィやホログラフィックディスプレイと呼ばれ、人の視覚の様々な奥行き感覚を無矛盾で正確に満たすことができるため、究極のディスプレイと言われている。しかし、1 節で述べた空間バンド積の問題のため、従来の数百~数千倍の解像度のディスプレイデバイスが必要となり、現時点では単一のデバイスでそれを実現することは不可能である。そこで、一つのディスプレイデバイスを時分割多重化して用いる研究を行っている。

図 5 に、本プロジェクトで開発を進めている光源スイッチング方式時分割多重化ホログラフィックディスプレイの概念図を示す<sup>8)</sup>。この方式では、高フレームレートディスプレイデバイスとして Digital Mirror Device (DMD) を使い、照明光源として高速スイッチング可能なレーザーダイオード (LD) をアレイ化して用いている。この LD アレイのうち

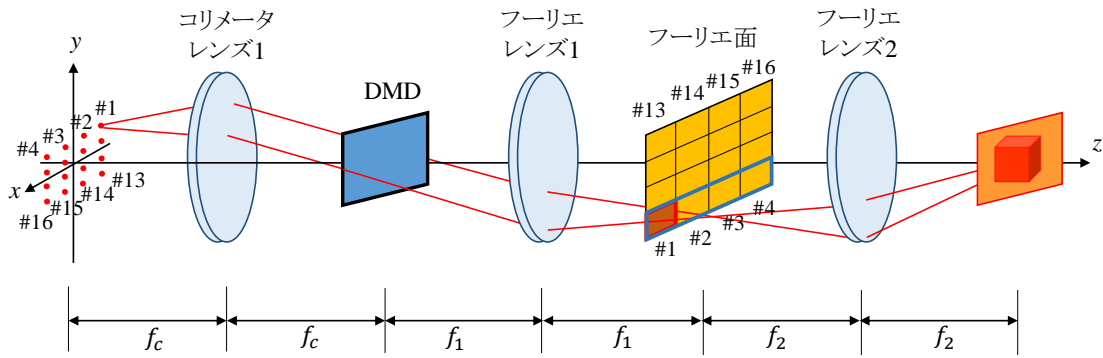


図5 光源スイッチング方式時分割多重化ホログラフィックディスプレイの原理(16倍多重化)<sup>11)</sup>.

同時に点灯しているものは一つだけであり、図に示すように、点灯しているLDの位置によってフーリエ面上の異なった位置に像が再生される。そこで、点灯するLDと同期してDMDに表示するCGHを変えるとフーリエ面で像をタイリングすることができる。したがって、この方式による多重化数はLD光源の数と等しくなる。この方式では高次回折像による劣化が生じるが、偏光特性によってそれを軽減する手法を考案している<sup>9,10)</sup>。

現時点では、 $4 \times 4$ の配列で16倍に多重化する装置を試作している<sup>11)</sup>。

### 3. まとめ

戦略基盤プロジェクトの開始以降の計算機合成ホログラムの作成技術と表示技術を概説した。プロジェクトの方は2017年度末で終了するが、これらの技術には、まだまだ開発中の物が多い。特に高解像度の静止画CGHについては、企業との連携も始まっており、関大ホロスタジオにも海外からの問い合わせが入り始めている。今後とも弛まず新技術の開発を続けていくつもりである。

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 15K00512、および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成25年~平成29年)の助成を受けたものである。

### 参考文献

- (1) 松島恭治, 中原住雄, コンピュータホログラフィの研究を支援する関大デジタルホロスタジオ, 第19回関西大学先端科学技術シンポジウム, 155-158 (2015).
- (2) 松島恭治, コンピュータホログラム「Brothers」制作記—MITミュージアムでのCGH展示を目指して—, HODIC Circular **32**, No.2, 31-40 (2012).
- (3) K. Matsushima, S. Nakahara, Stepping closer to the perfect 3D digital image, SPIE Newsroom, (6 Nov. 2012). DOI:10.1117/2.1201210.004526
- (4) Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters, Opt. Express **25**, 2016-2030 (2017).
- (5) T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara, Optimization of design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography, SPIE Proc. **9386**, 93860N (2015).
- (6) 中尾弘希, 松島恭治, フルカラー高解像度体積型CGHの作成, 3次元画像コンファレンス2017, P-10 (2017).
- (7) 五十嵐勇祐, 松島恭治, カラーフィルタを用いたフルカラー体積型転写CGHの作製, HODIC Circular **37**, No.3, 10-13 (2017).
- (8) 松田篤史, 松島恭治, 光源スイッチング方式時分割ホログラフィックディスプレイ, 信学論 D **J96-D**, 381-388 (2013).
- (9) Y. Higashino, T. Tsuchioka, K. Matsushima: Light-source switching time-division multiplexing holographic display and reduction of degradation by higher order diffraction images, OSA Imaging and Applied Optics 2016 (DH2016), DM4E.1 (2016).
- (10) 松島恭治, 東野好伸, ホログラフィ表示装置, 特願 2016-121830.
- (11) 西川凌, 土岡智旭, 松島恭治, 光源スイッチングによる時分割多重化ホログラフィックディスプレイ, Optic & Photonics Japan 2017, 31aP14 (2017).