

ホログラムプリンターの開発

Development of Full-Color Hologram Printer

伊藤 善尚, 佐藤 充, 奥山 健久, 白戸 琢也

Yoshihisa Itoh, Makoto Sato, Takehisa Okuyama, Takuya Shioto

要旨 我々はステレオホログラムの技術を用いて、これまで美しいカラー立体像が得られるリップマンホログラムの作製に必要であった撮影用模型、除震装置や暗室などの大がかりな撮影環境や機材、光学系のセッティングや露光条件などに関する高度な撮影技術や知識が不要で、コンピュータグラフィックスなどの3次元形状データから誰にでも簡単にホログラムの作製が可能なホログラムプリンターを開発した。

Summary We have developed a compact, full-color printer that uses stereo hologram technology for the creation of Lippmann holograms, offering a realistic three dimensional image with a true feeling of depth. This newly developed hologram printer does not require the complex photographic environment previously required for the creation of Lippmann holograms, which included models to be photographed, vibration dampers and a darkened room, nor does it require any of the high level specialist technology or knowledge in terms of devices, optical system settings or exposure required by the old process, instead allowing anyone to easily create holograms from 3-dimensional shape data such as computer graphics.

キーワード :ホログラムプリンター, リップマンホログラム, ステレオホログラム

1. はじめに

3D-コンテンツ, 3D-ディスプレイ, 3D-ゲーム, 3D-アミューズメント, 3D-カメラ, などの普及に伴い, 3D画像作成装置から3D表示装置まで充実してきた。しかし, 現在では, ディスプレイで観察する方法が主で, カードや写真として美しい立体画像が手軽にプリントアウトできる装置は存在しない。

3D-ディスプレイなどの電氣的表示装置を用いずに立体画像を表示する方法として, ホログラムが知られている。特にリップマンホログラムは, あたかも実物がそこにあるかのような美しい立体画像が得られるため美術館で展示が行われたり, 欧米においてはアート作品やお土産品としての販売が盛んに行われたりしている。しかしながらその作成においては, 大規模な撮影装置が必要であるだけでなく, 撮影者には装置のセッティングや露光方法, 現像プロセスなどに関する高度なスキルと芸術的センスが要求されるなど, 専門家のための特殊な技術という位置づけであった。

また, ホログラムには見る角度により異なる画像を表示できたり, 容易にはコピーできないなどの特徴があるため, 偽造防止や認証等のセキュリティ用途にも用いられる。紙幣やクレジットカード等には比較的製造の容易なエンボスホログラムが用いられることが多いが, より信頼性の高いリップマンホログラムもパスポートなどに実用化され始めている。

ホログラムプリンターは, このようにホログラムとして優れた特徴を持つリップマンホログラムを, 大規模なセットや特殊な技能などを必要とせずに作製するための装置で, コンピュータグラフィックス(CG)データからの出力が可能なことから, 手軽なプリンター感覚で使用することができる。また, 一品一品の個別にカスタマイズされたホログラムの作製が可能であることは, 従来のホログラム作製方法にはない優れた特徴であり, セキュリティ用途, アミューズメント用途などへの新たなアプリケーション展開を可能とするものである。

なお本稿は2013年ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報⁽¹⁾と2014年ICJ2014⁽²⁾で発表した内容を元に加筆, 修正を行ったものである。

2. ホログラムの記録と再生

ホログラムプリンターによるホログラムの記録はホログラフィックステレオグラムの原理⁽³⁾に基づきリップマンホログラムを記録するものであり, 記録時は物体光と参照光を記録材料の表裏から各々対向入射しその干渉縞を媒体に記録する。再生時は参照光と同じ方向から白色の照明光を当てると記録された立体像が再生される。

図1(a)は3種類のパターンで空間変調された物体光を用いたホログラムの記録の様子、図1(b)はその再生の様子を表した模式図である。Aに表示されたパターンは、再生時にはA'の方向で観察される。同様にBに表示されたパターンはB'の方向に、Cに表示されたパターンはC'の方向で観察される。このように観察者の視点位置に応じて異なる画像を表示できるのは、物体光の波面の状態を記録できるホログラムの特徴である。ホログラムを3次元物体の記録に用いる場合には、あらかじめAには表示する物体を θ の角度から見上げた投影画像を、Bには同物体を水平位置から見た投影画像を、Cには同物体を θ の角度から見下ろした投影画像をそれぞれ表示しておくことで、記録されたホログラムは観察位置に応じて適切なアングルの画像が表示されることになる。

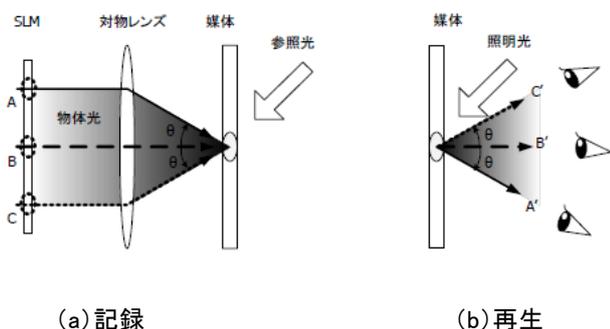


図1 ステレオホログラムの記録と再生

1次元方向に3視点の画像を記録する例について述べたが、実際の記録は図2のように水平垂直両方向の多視点の視差画像を2次的に配置して行う。また媒体への露光は画像の全体を一度に行うのではなく、多視点の視差画像のそれぞれを細かいメッシュ状に分割し、その断片ごとに行う。一度の露光で記録されるホログラムを要素ホログラムと呼び、この要素ホログラムを記録媒体上に並べていくことで一つの画像が完成する。元の3次元形状データから多視点の視差画像を生成し、さらに空間変調器の表示画像を生成するまでの一連の工程をレンダリングと呼んでいる。

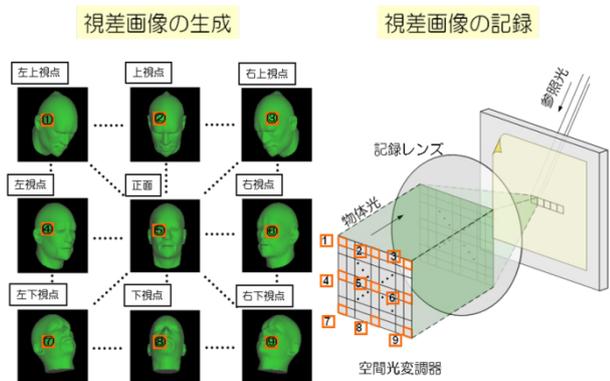


図2 要素ホログラムの記録法

多視点画像の視点数はホログラム画像の動きのなめらかさに、要素ホログラムの大きさはホログラム画像の精細感に直結するため、画質を決める重要な要因である。一方でレンダリングの計算量は視点数に比例して多くなり、ホログラムの記録時間は要素ホログラム数に比例して長くなるため、それを考慮した上で、視点数と要素ホログラムサイズを決定する必要がある。

3. フルカラープリンター

古くから知られているホログラフィックステレオグラムの原理を用いたホログラムプリンターの発表がいくつかなされている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、暗室や実験室で使用する巨大な装置が主である。今回開発したホログラムプリンターは小型で設置場所を選ばないこと、パソコンの周辺機器と同様の感覚で容易に操作できることなどの特徴がある。

3.1 光学系

図3に開発したホログラムプリンターの光学構成を示す。赤(R, 632.8nm)、緑(G, 532nm)、青(B, 473nm)のレーザー光を同軸にまとめた後、偏光ビームスプリッター (PBS Polarizing Beam Splitter) により参照光と物体光に分岐される。空間光変調器 (SLM Spatial Light Modulator) で空間変調された物体光は対物レンズにより媒体面に集光照射され、同時に媒体反対側より平行光の参照光が照射されることにより反射型のホログラムの記録が行われる。SLMは反射型液晶 (LCOS Liquid Crystal on Silicon) を使用した。記録用の対物レンズの開口数 (NA Numerical Aperture) は0.4で、全方向に対して $\pm 23.4^\circ$ の視野角を持つホログラム像を記録することが出来る。物体光と参照光の光路中にはそれぞれ矩形のアパーチャが配置されており、その結果、媒体面に形成される要素ホログラムは0.3mm \times 0.3mmの矩形形状となる。また物体光が上記露光領域内で均一な強度分布となるようにSLMの直前に拡散板を配置した。

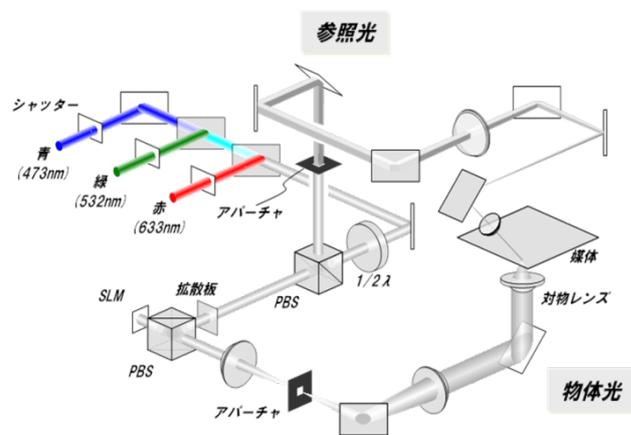


図3 光学構成

3.2 記録媒体

図4に記録媒体と記録時の様子を示す。基材フィルムにフォトポリマーが塗られた記録媒体を記録時の平面性を保つためにガラスに粘着させ、物体光を入射角0度でガラス側から、参照光を入射角40度で基材フィルム側から入射しフォトポリマー層で干渉させ反射型ホログラムを記録する。記録媒体はバイエル マテリアルサイエンス株式会社から提供されたバイフォール®HXを用いた。

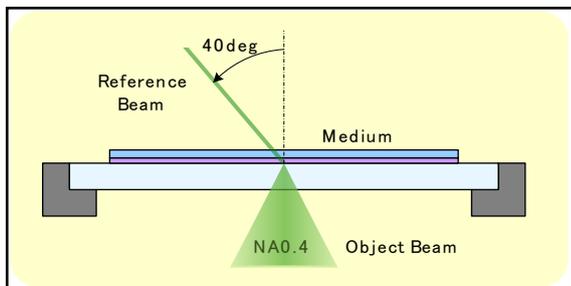


図4 記録媒体

3.3 光源

ホログラム記録機の光学構成上物体光と参照光に光路長差が発生するため光源にはそれに対応できる可干渉距離が要求される。つまり、光源に要求される重要な性能は波長の均一性でありファブリペローレーザーでは記録に対応できない。

本機で使用した光源は、青は波長473nm出力50mW、緑は波長532nm出力150mWの半導体励起固体 (DPSS Diode Pumped Solid State) レーザーを、赤は波長632.8nm出力10mWのHe-Neレーザーを用いた。

レーザーの可干渉距離Lは以下の式で求められる

$$L = 2 / \pi \times \ln 2 \times C / \delta \quad \dots (1)$$

(ここで δ = 縦モード間隔 C=光速である。)

青レーザーの縦モード間隔は13MHz以下なので、(1)式よりL青は10m以下となる。緑レーザーもほぼ同等であるが、赤レーザーの縦モード間隔は320MHz以下なので、同じく(1)式よりL赤は0.4m以下となり、そのままの構成では可干渉距離が短く干渉性能が低下する。

これを補正するために図3に示すように参照光の光路を複数枚のミラーにより折り返し物体光との光路長差を補償する構成とした。

図5に青レーザーのスペクトルの実測を示す。

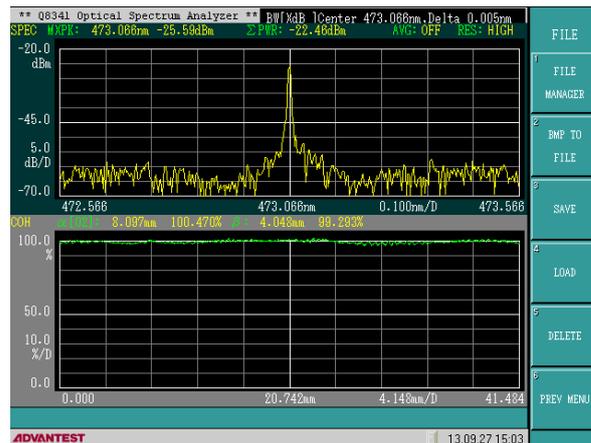


図5 青レーザーのスペクトルと可干渉性

3.4 光源シャッター

3.3で用いた各レーザーは自己変調が行えないので、外部から光のオン、オフの制御を行う必要がある。また、ホログラムの記録には振動を避けなければならないため電磁シャッター等のメカニカル動作の装置は組み込めない。

本機では可動部分の無い音響光学偏向器 (AOD Acousto Optic Deflector)を用いた。AODの動作はTeO₂クリスタルをセンセサイザーにて100~200MHzの高周波で加振すると、入射光に1次回折光が発生し、その周波数に応じた回折角度で偏向するものである。各光源波長に対応した1次回折光の偏向角度40~50mrad、回折効率約70%のものを用いた。図6に偏向器の外観を示す。



図6 音響光学偏向器

3.5 空間光変調器(SLM)

空間光変調器には強誘電性反射型液晶LCOSを用いた。主な仕様は、画素ピッチ10.7×10.7μm、画素数1216×1216の正方、フレームレート1.1KHz、コントラスト100対1以上である。これは青色の波長にて最適設計されたものであるが、長波長の633nmにおいては効率が低下するものの使用上問題は無いと判断した。図7に空間光変調器の外観を示す。

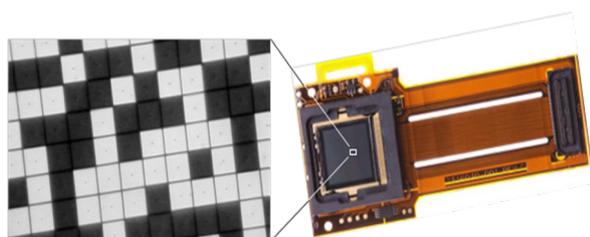


図7 空間光変調器

3.6 2軸送り機構

ホログラムは一辺が300 μm の矩形の要素ホログラムを並べて記録している。記録媒体の移動はリニアガイドとボールネジにて構成した2軸送り機構をステッピングモーターのオープンループ制御により300 μm ずつストップアンドゴー送りを行った。この動作では停止時に振動が発生し記録の障害となったため、図8に示す様に送りネジのナット保持部に弾性をもたせ振動の発生を低減させた。しかし、保持部のバックラッシュによる改行時の要素ホログラムのずれが発生したので、往復記録ではなく片方向記録を採用した。また、送りガイド部の振動をより低減するために、これも図8に示す様に制振合金を用いて振動の減衰を行った。

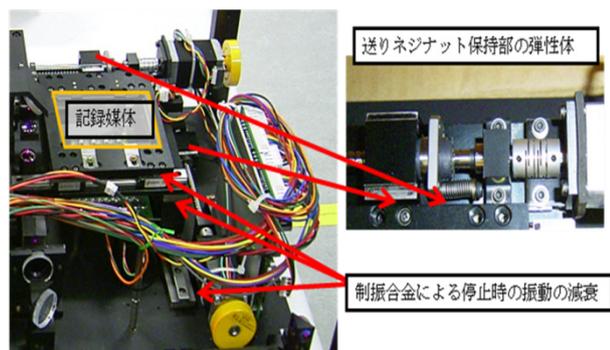


図8 2軸送り機構

3.7 記録動作

本機での記録時のタイムチャートを図9に示す。3.6で述べた2軸送り機構の性能は図のステッパーに示す様に移動に30ms、記録に供する静止待ち時間は50msであった。また、今回用いた記録媒体パイフォル®HXの最適露光時間は各色10~20ms程度であり、合計40ms程度で3色の露光が完了できた。

次に3.5に示したSLMは強誘電性液晶のため長時間同じ画面を表示させると焼きつきが発生し、デバイスの急激な劣化を引き起こす。SLMの仕様は100msより短い期間において表示のDCバランスをとる必要がある。つまり50ms画像を表示したら次の50msはその画像のネガ画像を表示するように動作させる必要がある。そこで、記録画像を40ms表示したのちにその画像のネガ表示を40ms行う期間を設けた。

これを記録動作に従って述べる。SLMの画像表示40msにて3色の露光が完了すると、ただちにステッパーは合計80msの移動、静止待ちを行う。一方、SLMは記録画像のネガを40ms表示し、さらに40ms間全白、全黒を繰り返し、合計80msの表示を行う。この120msのサイクルを繰り返して記録を実行する。

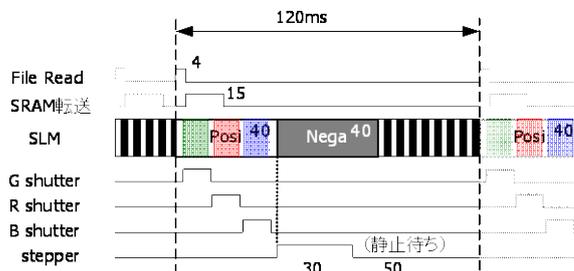


図9 記録動作

次に、表示データの転送について述べる。SLMは240 \times 240画素のデータを2倍アップスケールして480 \times 480画素の表示部分のみを用いた。また、表示画像はディザリングを用いたので2値データで良い。つまり、読み込みに必要なファイルサイズは8KB程度であり、図9に示す様に4ms以内でファイルの読みこみが可能である。また、SLMは1216 \times 1216画素のうち表示する480 \times 480画素のみSRAMへ転送することにより15ms以内での転送を行った。図10に示す様にシャッター動作中は全黒とする記録画像表示を行った。

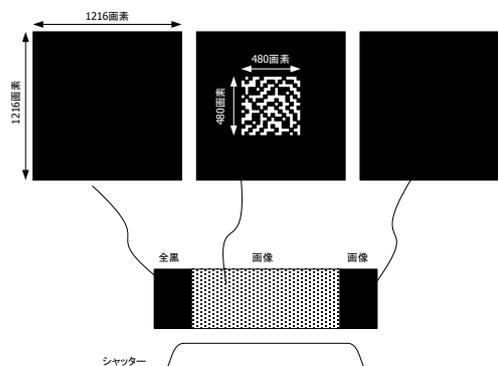


図10 SLM表示画像とシャッター動作

3.8 コントロールソフト

本機の制御と記録画像のレイアウトやレンダリングのためにノートPC上にて動作する専用のコントロールソフトウェアを新規に開発した。図11にコントロールソフトウェアのスクリーンショット画像を示す。

このメインウィンドウ上で実際にホログラムとして記録する3次元画像のレイアウトを行う。その後、設定した視点数やホログラムサイズの情報に基づいてレンダリングを行う。Corei5 3.1GHz, Memory 4GBのPCにて、要素ホログラム数252 \times 168, 視差数60 \times 60のフルカラー画像のレンダリングに要する時間は約30分である。レンダリング後のホログラムへの記録は、自動的に行うことが可能であり、ユー

ザーは画像のレイアウトが完了した後、ワンクリックでホログラムの作製が行える。このようにドローソフトとプリンターを扱うような感覚でホログラムを簡便に作製することが出来る。

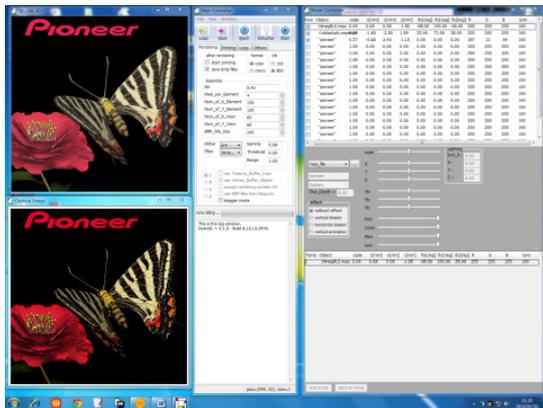
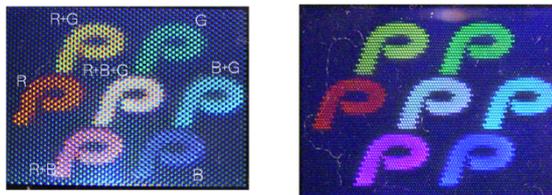


図11 コントロールソフト

3.9 多重記録

フルカラーを表現するのに、液晶パネルのようにRGBを順次並べて配置して画像を表現することも可能であるが、ホログラムの特徴である多重記録を実現することにより一つの要素ホログラムで中間の色合いが表現でき精細感のあるホログラムが実現できる。図12の左にRGB配列記録、右に多重記録のホログラムを示す。明らかな精細感の違いが確認できる。ここで多重記録の条件は中心にある白色の画像が表現できるRGBの露光条件を見つけることが重要である。3.7で述べた40ms以内での3色露光の条件はこれを実現したものである。



配列記録画像 多重記録画像
図12 文字画像と白色表現

3.10 フルカラープリンターと記録サンプル

図13に示す様にプリンター本体と電源部から構成された本機をUSB接続されたノートPCにより制御することで、暗室や除震台を使用せず、簡便にホログラムを記録することができた。表1に主な仕様を示す。

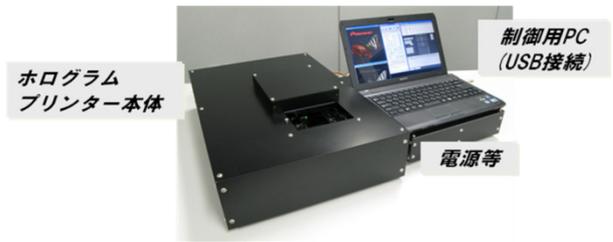


図13 フルカラープリンターと記録サンプル

本体(突出部を除く)	: W370mm×D580mm×H130mm
最大プリントサイズ	: 75.6mm×50.4mm
要素ホログラムサイズ	: 0.3mm×0.3mm
視認角度	: ±23度(上下, 左右方向ともに)
記録波長	: 青473nm, 緑532nm, 赤633nm
記録時間(最大サイズ)	: 90分(カラー), 60分(胎児)

表1 フルカラープリンターの主な仕様

4.フルカラープリンターの胎児記録への応用

我々は、開発したフルカラープリンターを用いたアプリケーションの一つとして、妊婦が行っている3Dエコー健診に注目した。健診では胎児の3Dデータが取得されており、コンテンツの入手が楽である。また、このコンテンツには、大量印刷の必要がなく、記念品としての意味合いが強いという特徴がある。これらのことからホログラムによる胎児の3Dプリントサービスが有意義であると判断し、その実現手法を開発した。

4.1 エコーデータの3D変換

胎児のデータはGEヘルスケア・ジャパン株式会社製の超音波診断装置 Voluson シリーズの DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) -3D出力データを3D-CGデータに変換する手法を開発してホログラムプリントを実現した。図14(a)に超音波装置の出力データ、図14(b)に変換手法により取得した3Dデータ、図14(c)にホログラムプリントの結果を示す。



(a) (b) (c)
図14 超音波データからのホログラム記録

図14(b)にみられるように超音波データをそのまま3Dに変換しただけではノイズが多く残ってしまう。そこで我々は、超音波データに、画素中心からの距離に応じて係数を変化させる巡回平均化フィルタを利用しノイズを除去したのちに3D画像に変換する方法を採用した。図15(a)にノイズ除去前の超音波データ、図15(b)に採用した巡回平均化フィルタによるノイズ除去後のデータ、図15(c)にノイズ未処理の3D変換データ、図15(d)にノイズ除去後の3D変換データを示す。本手法により3Dデータのノイズが除去されたことが確認できる。

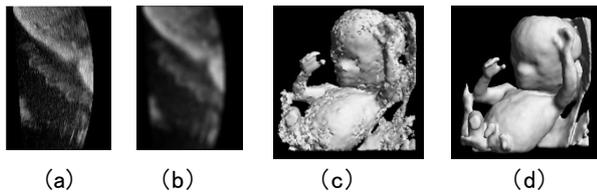


図15 巡回平均化フィルタによるノイズ除去

なお、ここに提示した画像データの一部はGEヘルスケア・ジャパン株式会社より提供していただいた。

4.2 2色スキップ記録

現在妊婦が健診後に目にしている胎児の映像は写真やビデオであるが、色合いはゴールデンイエローといわれるオレンジ色系である。そこで、本機で違和感なくそのイメージが実現できるかを確認した。図16(a)にフルカラーで記録した胎児、図16(b)に緑と赤の2色で記録した胎児記録サンプル、図16(c)に妊婦が入手する写真を示した。フルカラーでは肌色に近い色合いが表現できているが、2色記録では、妊婦が入手する写真やビデオの色合いが表現できており、2色記録でも十分に記録品として提供可能と判断した。これにより、胎児記録用プリンターをオレンジ単色で実現すればさらなる低価格化が実現できると考えられる。

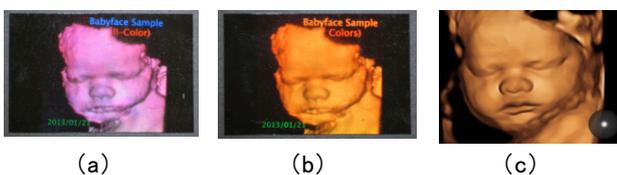


図16 胎児プリント

更に、図16に示す様に胎児記録の場合、フルカラーのプリントと異なり背景の黒の比率が高いので、上下左右の視差方向がすべて黒である要素ホログラムは、記録露光をせずにスキップする方法を採用した。図17(a)に全画素を記録する場合、図17(b)に新方式のスキップ記録の様子図17(c)にスキップ記録した画像を示す。スキップ記録をしても画像の印象に不具合は生じず、記録時間は最大20%程度短縮することができた。また、2色による記録時間

の短縮も含めると胎児記録を1時間程度で実現することができた。

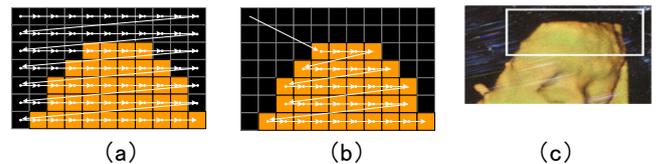


図17 全画素記録と黒スキップ記録

5. オレンジ単色胎児記録用プリンター

我々は、オレンジ色での記録が胎児記録に適用可能と判断し、専用のオレンジ単色プリンターを開発した。基本構成は、フルカラープリンターと同じであるが、以下の項目が異なる。

1. 光源は波長594nm出力40mWの自己変調可能な分布帰還型(DFB Distributed FeedBack)レーザー励起第2高調波(SHG Second Harmonic Generation)レーザーを用いた。
2. 光源が自己変調可能なためAODは不要である。
3. 空間変調器はプロジェクターやビューファインダー用のRGBカラーLCOSを用いた。
4. 記録ホログラムの視認角度を $\pm 40^\circ$ に大きくするために記録レンズはNA0.64を採用した。
5. 記録品の最大サイズをはがき程度にするために送り機構をフルカラー機の2倍を超えるサイズに設計した。

以下、オレンジ単色記録機の光源と記録動作について説明する。

5.1 オレンジレーザー

光源には励起用分布帰還型レーザーの駆動制御とSHG素子への入力パワー制御をDVD/CDレコーダーで用いているレーザードライバを用いた。図18に光源の外観を、図19に励起レーザーの駆動電流(緑)とSHG素子への入力パワーの制御(赤)を同時に行った時のSHG光の出力(オレンジ)の様子を示す。立ち上がりに2ms程度必要であるが、露光時間に比べ比較的小さいので記録には支障はない。



図18 オレンジレーザー

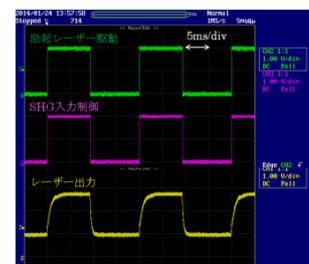


図19 出力制御波形

5.2 記録動作

本機で用いた空間変調器はRGBカラー表示用LCOSのR表示部のみを用いてオレンジ色光源にて動作させ記録画像を表示した。表示データの転送方法は3.7のフルカラー機と同じであるが記録動作がやや異なる。

図20に本機での記録動作を示す。SLMはRGBカラー表示用のため1コマでRGBの表示を行う。そのためオレンジ色の露光時間が制限される。記録プログラムの回折効率が充分に大きくなるコマ数3コマを使い記録露光した。媒体の2軸送り機構はフルカラー機に比べ大型になったため移動と静止時間の最適な組み合わせは移動40ms、静止待ち80msとやや長くなった。すなわち、露光3コマ(60ms)とあわせて合計180msを1サイクルとして記録を行った。

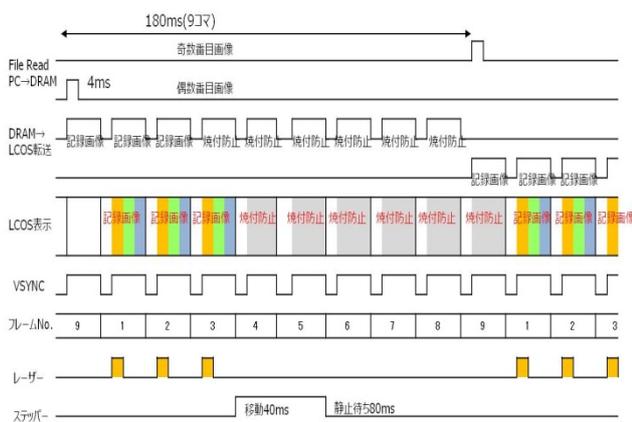


図20 記録動作

5.3 オレンジ単色プリンターと記録サンプル

図21に実現した胎児記録用プリンター本体と電源部、制御用ノートPCと記録サンプルを示す。また、表2に主な仕様を示す。

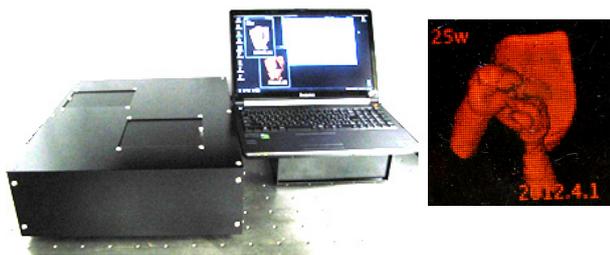


図21 オレンジ単色プリンターと記録サンプル

本体	: W400mm × D500mm × H135mm
最大プリントサイズ	: 78.0mm × 102.0mm
要素ホログラムサイズ	: 0.3mm × 0.3mm
視認角度	: ±40度(上下, 左右方向ともに)
記録波長	: 橙594nm
記録時間(フルサイズ)	: 180分

表2 オレンジ単色プリンターの主な仕様

6. おわりに

胎児ホログラムを「ぶりホロ」と命名し、図22に示す四種類の形態で医療機関と提携して、胎児データよりホログラムを作成するプリントサービスのテストを開始した。

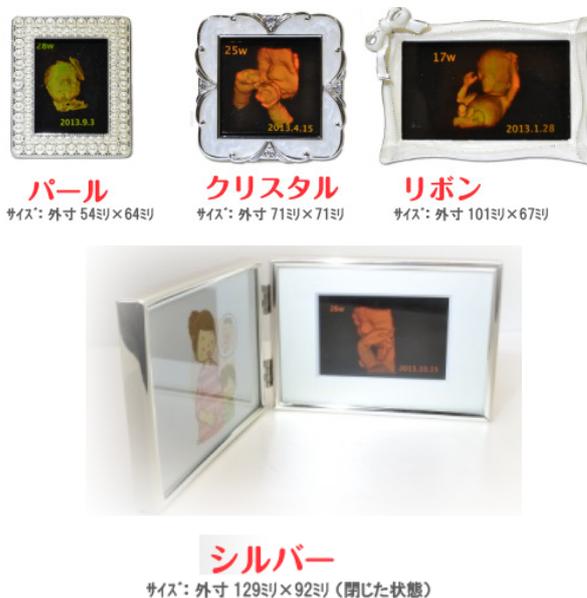


図22 胎児記録形態

このように誰にでも簡単にホログラムを作製することができる装置が登場し普及することで、ホログラムが日常に浸透し、多くの人にその美しさを体験していただけることを期待する。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり、記録媒体を提供していただいたバイエル マテリアルサイエンス株式会社様、超音波データを提供していただいたGEヘルスケア・ジャパン株式会社様、並びに「ぶりホロ」のプリントサービスのテスト開始にご協力いただいた丸茂レディースクリニック院長 丸茂元三先生に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Makoto Sato, Yoshihisa Ito, Takuma Yanagisawa, Kazuo Takahashi and Masakazu Ogasawara, "Compact Full-Color Hologram Printer", HODIC Circular, Vol.33, No.1, pp.9-13 (2013)[in Japanese].
- (2) Makoto Sato, "Principle of the Hologram Printer and the Applied Example ", Imaging Conference JAPAN 2014
- (3) <http://homepage2.nifty.com/kubotaholo/>
- (4) S.Maruyama, Y.Ono and M.Yamaguchi, "High-density recording of full-color full-parallax holographic stereogram", Proc. of SPIE Vol.6912 (2008)
- (5) <http://www.piphotonics.co.jp/hologram/research.html>

著者紹介

伊藤 善尚(いとう よしひさ)

研究開発部 第六研究部 研究一課に所属。
光ピックアップ, 有機EL, ホログラムメモリーの研究開発を経て, 現在ホログラムプリンターの研究に従事。

佐藤 充 (さとう まこと)

研究開発部 第六研究部 研究一課に所属。
光ピックアップ, 次世代メモリの研究開発を経て, 現在ホログラムプリンターの研究に従事。

奥山 健久(おくやま たけひさ)

研究開発部 第六研究部 研究一課に所属。
光ピックアップ, ブルーレイディスクの研究開発を経て, 現在ホログラムプリンターの研究に従事。

白戸 琢也(しろと たくや)

研究開発部 第六研究部 研究一課に所属。
ホログラムメモリー, 超多層光ディスクの研究開発を経て, 現在ホログラムプリンターの研究に従事。