

氏名	下馬場 朋禄
所属機関	千葉大学大学院工学研究院融合理工学府電気電子工学コース
研究題目	広視域なホログラフィック 3次元ディスプレイに関する研究

### 1. 研究の目的

3次元ディスプレイにはメガネをかける方式や特殊なレンズを使う方式など様々な方式が考案されているが、この中でもホログラフィによる3次元ディスプレイは物体の持つ光波を忠実に再現できる特異な性質を持つため究極の方式として期待されている。しかし、この方式の実用化には次の2課題を克服する必要がある。

「課題1 複雑な3次元像からホログラムを高速生成できる手法の開発」

「課題2 広い範囲（視域）で3次元像を観察できる光学系の開発」

課題1に関しては現状では単純な3次元像であればリアルタイムでホログラムを生成することが可能であるが複雑な3次元像や大面積のホログラムをリアルタイム生成することは難しい。課題2に関しては現在のホログラム表示素子が小さいため3次元像の見える範囲（視域）は数度程度と狭い。

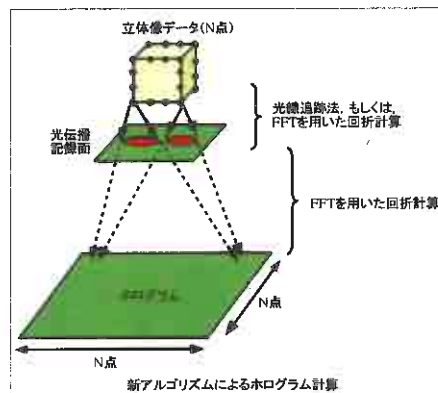
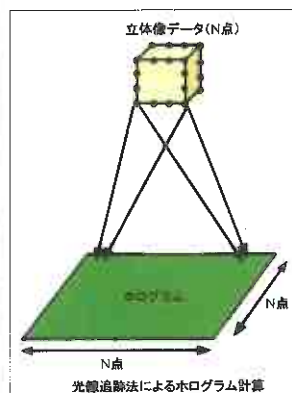
本研究ではこれらの課題を克服する手法を開発する。課題1に対しては波面記録法をベースにしたホログラム計算高速化手法を開発する。申請者は既に波面記録法と名付けたホログラム高速計算アルゴリズムを開発しており従来手法に比べ300倍程度の高速化を実現している。この手法に信号処理手法を組み合わせることで更に100倍程度の高速化を目指す。課題2に対しては「位相拡散板を用いた高視域化法」を開発する。これにより視域を30°以上に拡大することを目指す。

### 2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

現状では単純な3次元像であればリアルタイムでホログラムを生成することが可能であるが複雑な3次元像や大面積のホログラムをリアルタイム生成することは難しい。また、現在のホログラム表示素子が小さいため3次元像の見える範囲（視域）は数度程度と極端に狭い。

本研究では、これらの課題を克服する手法を開発した。計算の高速化に関して申請者がすでに提案した波面記録法を基にさらに高速化した手法を開発した。波面記録法の概略を下記に示す。

従来手法（左図（左））では、3次元物体を点光源の集合体と考え、その各点光源からの光の伝播計算をホログラム面上の全ての画素に対して行う。その計算量は、物体点は $N$ 点、ホログラムが $N \times N$ 点で構成されている場合、 $O(N^3)$ となる。



波面記録法（右）では、3次元物体とホログラム面の間に、仮想的な面（光伝搬記録面と呼ぶ）を用意する。まず、3次元物体の各点光源から出る光波の振幅と位相情報（伝播方向）を、この光伝搬記録面に記録する。この時、3次元物体近傍に光伝搬記録面を配置すれば、3次元物体の点光源から出た光が、この面を通過する断面積は非常に小さくなる。3次元物体と光伝搬記録面間の計算はこの微小な断面積に対して行うので計算量は微小なものとなる。

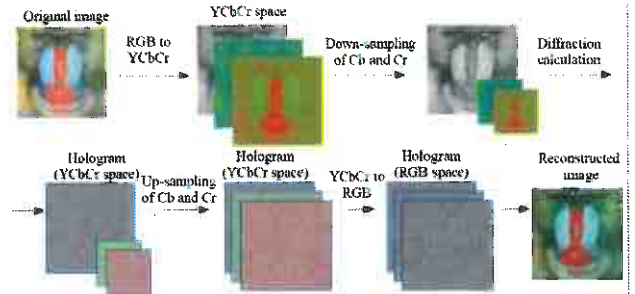
光伝搬記録面には、3次元物体から出た光の振幅と位相情報（伝搬方向）が記録されるため、光伝搬記録面からホログラムまでの光の伝搬計算を行えば、ホログラム面上での3次元物体の光伝搬を計算したことに相当する。光伝搬記録面からホログラムへの光伝搬は、光波の数値計算で広く用いられている計算負荷の軽いFFTによる回折計算アルゴリズムを使用することができる。

## 2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

本研究ではこの波面記録法の第1ステップを更に高速化するために、物体点から出る光波の情報を圧縮した。圧縮には Wavelet 変換を使用し、Wavelet 空間上で各点光源が発する光波を足し合わせる手法 (WASABI と名付けた) を開発することに成功した。この方法は、従来の第一ステップの計算方法に比べ 50~100 倍程度の高速化ができる。

カラーホログラムの高速計算手法についても検討を行った。カラー再生像を得るには 3 原色の波長で計算した 3 枚のホログラムが必要とされるが、この計算には単色よりも 3 倍の計算時間が要求され高速化の妨げになる。色空間変換によるカラーホログラムの高速計算手法も併せて開発を行った。

右図は提案した色空間変換によるカラーホログラム生成の概略を示しており、YCbCr 色空間の特性を利用して画質を落とさずに、従来に比べ 2~3 倍程度の高速化に成功した。

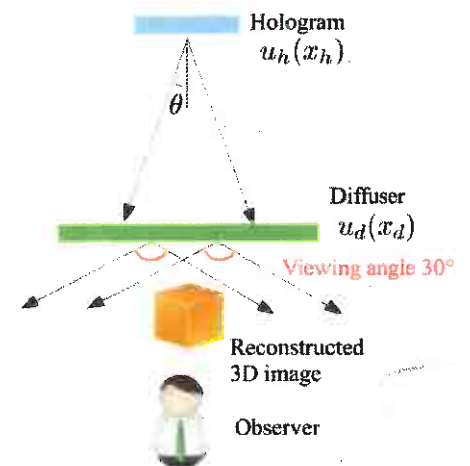


視域の狭さについては「位相拡散板を用いた高視域化法」を開発し、シミュレーションレベルではあるがこの手法により視域を  $30^\circ$  以上に拡大できることを確認した。3次元像のサイズを拡大するにはホログラム表示素子の面積を大きくする必要があり、視域を広げるには表示素子の画素間隔を微細化する必要がある。つまり、視域と像サイズの両方を拡大するには膨大な画素数が要求される。

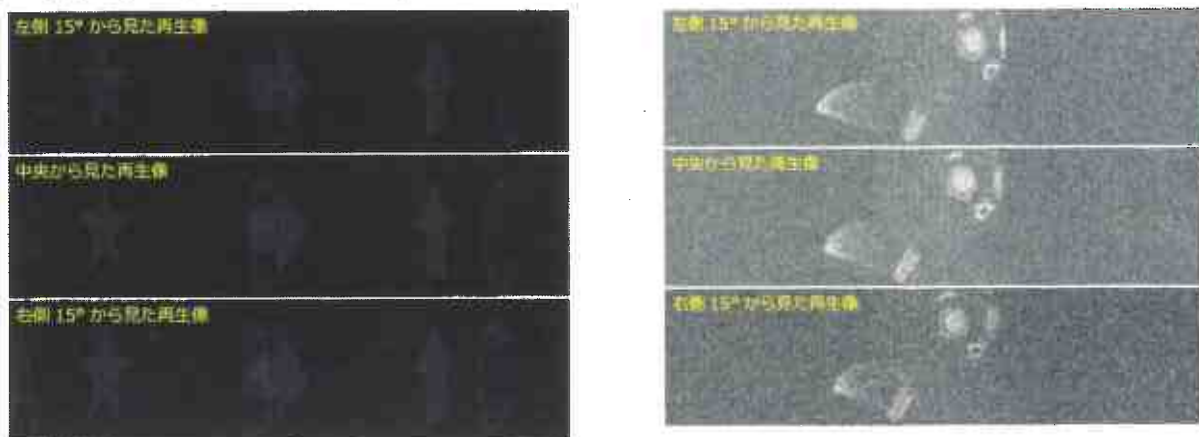
現在、広く使用されているホログラム表示素子の一つに LCD パネルがある。当該分野で一般的に使用されている LCD の画素数は  $1,920 \times 1,080$  画素、画素間隔は  $8\mu\text{m}$  程度となっている。この LCD パネルから直接得られる再生像のサイズは参照光源波長  $633\text{nm}$  のとき約  $1\text{cm}$ 、視域は  $4^\circ$  程度となり実用化には程遠い。この問題を解決するために複数枚のホログラム表示素子を並べ大面積のホログラム表示素子を実現する方法や、2次元ホログラム表示素子の画素構造を光学的に1次元上に再配置し水平方向の視域を拡大する方法などが提案されているが、これらは視域や像サイズを拡大するほどシステムが大規模化してしまう問題がある。また、素材の方面からの検討も進んでおり、例えば、フォトリフラクティブポリマーを使用したホログラム表示素子は容易に数  $10\text{cm}$  四方の表示素子を生成することができるが、この素子へホログラムを描画する時間や描画されたホログラムを消去する時間に長時間を要するため動画化が難しい。

本研究では広視域・広視野な3次元像観察を目指した簡易な電子ホログラフィの提案を行う。この方法では、一般的な画素数のホログラム表示素子 ( $1,920 \times 1,080$  画素、画素間隔  $8\mu\text{m}$  の LCD パネル) に広い拡散角を持つ拡散素子を組み合わせた極めて簡易なシステム構成になる。本研究では  $3\text{cm}$  のサイズを持つ再生像を  $30^\circ$  の視域で観察できることをシミュレーションで確認し、この手法の有効性を確認した。

提案手法で想定している光学系の概略図を右図に示す。提案手法では、視域と視野を拡大するために LCD と観察者の間に拡散角の広い拡散素子を導入する。例えば、拡散角が  $30^\circ$  の拡散素子を導入した場合、ホログラム表示素子からの光波は拡散素子により  $30^\circ$  に拡散されるため、3次元像をこの視域で観察することが可能となる。

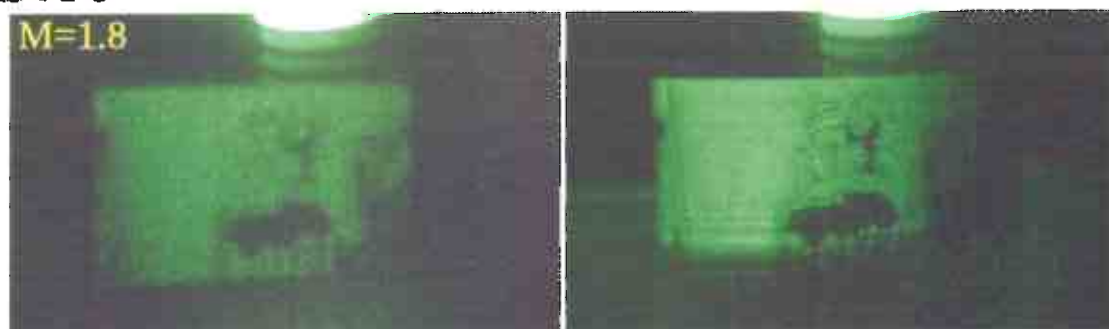


また、視野に関してはホログラム表示素子から発する光波が拡散素子上で広がる領域と考えることができる。表示素子と拡散板間の距離が0.5mとすると、観察者はサイズが3.4cmの三次元像を、30°の視域で観察することができる。



上図（左）は3次元物体の再生像であり、文字ABCの2次元画像と矢印・星の2次元画像を奥行方向にわずかにずらして配置してある。3次元像を左側15°から見た場合、中央から見た場合、右側15°から見た場合を示しており、2つの2次元画像のズレ具合から30°の視域が達成できることを確認した。上図（右）は3次元物体Bの再生像であり、3次元像を左側15°から見た場合、中央から見た場合、右側15°から見た場合を示しており、視差が再現されていることが分かる。

また、ホログラムからの再生像にはスペックルノイズと呼ばれる粒状のランダムな干渉ノイズが重畳されることが知られている。このスペックルノイズを低減する手法も開発した。従来はランダム位相と呼ばれる位相分布を元画像に適用していたが、これがノイズ発生要因の一つになっていた。本研究ではランダム位相を使用しない手法の開発に成功しており、良好な光学再生像を得られることを確認した。下図（左）は従来手法、右が提案手法で再生した結果であり、画質が大幅に向上していることが確認できる。



### 3. 研究の結論、今後の課題

本研究では、ホログラフィを用いた3次元ディスプレイに関して以下の技術を開発した。

- ① Wavelet 変換を用いたホログラムの高速計算手法 (WASAB 法)
- ② WASABI 法と波面記録法を用いたホログラムの高速計算手法
- ③ 色空間変換を用いたカラーホログラムの高速計算手法
- ④ 位相拡散板を用いた簡易なホログラフィックディスプレイの視域・視野の拡大手法

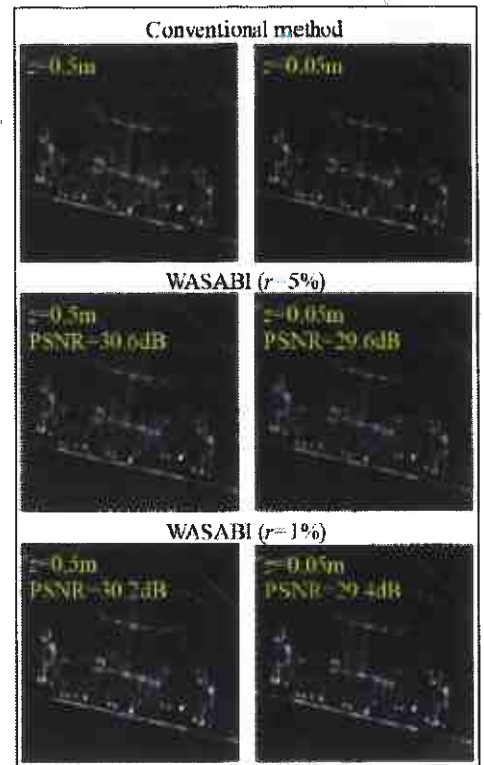
①については、例えば、従来手法と WASABI でホログラム計算したときの再生像を示すが、画質はほぼ同じ結果が得られている。対して計算時間については、下表のように従来手法に比べ Wavelet 変換の圧縮率  $r=1\%$  のとき 50 倍程度高速に計算できていることがわかる。

②については、WASABI と波面記録法を組み合わせることで、さらに 100 倍程度の高速計算が可能となる。よって、従来手法と比べるとトータルで従来手法と比べ、5000 倍の高速化が達成でき、この計算速度は現在のところ、世界最速のアルゴリズムとなっている。一番下の画像は、本手法で計算したホログラムをガラス基板上に精細に描画し得られた光学再生像である。像の大きさは  $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ 、視域角はおよそ  $30^\circ$  となった。

先に述べたように、ホログラフィを用いた3次元ディスプレイには「課題1 複雑な3次元像からホログラムを高速生成できる手法の開発」と「課題2 広い範囲(視域)で3次元像を観察できる光学系の開発」がある。

本研究では、課題1に関して、WASABI と波面記録法を組み合わせたホログラム計算の高速化手法により、従来手法より大幅な計算高速化を達成した。またこの計算手法が、広い視域・視野を再生できるホログラムの計算にも適していることを光学実験により確認した。課題2に関しては、ホログラムと3次元物体の間に拡散板を挟むことで、簡易な光学系で広い視域・視野をもつ3次元像を再生できる手法を提案した。

今後は、本研究で開発した①~④の各技術を統合することで、実用的なホログラフィック3次元ディスプレイの開発を進めていく予定である。



z (m)	Calculation time (ms)		
	Conventional method [4]	WASABI (r=5%)	WASABI (r=1%)
0.5	2,834,778	361,434	56,570
0.2	457,489	42,605	7,689
0.1	116,278	9,948	2,016
0.05	29,803	2,578	600



#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

##### 4. 1. 社会的価値

ホログラフィを応用した3次元ディスプレイは、人間の立体知覚要因を完全に満たすことができる唯一の方式であり究極の3次元ディスプレイと言われている。しかし、この方式の実用化には、複雑な3次元像からホログラムを高速生成できる手法と、広い範囲(視域)で3次元像を観察できる光学的手法が必要とされる。

本研究で開発したホログラムの高速計算技術を用いれば、現在のコンピュータ上でも複雑な3次元像のホログラムをリアルタイム計算することができる。また、一般的に大きな3次元像を広い範囲で観察するためには、大画素数のホログラムが必要になるが、本研究で提案している技術は一般的なLCDと拡散板を組み合わせたのみで、大きな3次元像を広い範囲で観察できる。これらの技術は、ホログラフィを用いた3次元ディスプレイの社会実装を行う上で重要になる。

##### 4. 2. 学術的価値

3次元像のサイズを拡大するにはホログラム表示素子の面積を大きくする必要があり、視域を広げるには表示素子の画素間隔を微細化する必要がある。つまり、視域と像サイズの両方を拡大するには膨大な画素数のホログラム表示素子が要求される。例えば、10cm×10cmの像サイズを30°程度の視域で観察したい場合、ホログラム表示素子に要求される画素数は、およそ10万×10万画素となる。

本研究で開発した方法では、このような大画素数の表示素子を使うことなく、一般的な画素数のホログラム表示素子(ここでは2K画素のLCDパネル)と位相拡散板を用いることで広視域かつ大きな3次元像を再生できる手法の提案を行った。また、開発したホログラム計算の高速化手法により、従来手法より5000倍程度高速な高速化を達成した。この手法は光の計算を行うので、3次元ディスプレイ以外にも使用することができ、学術的に価値のあるものとなっている。

##### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

1. Tomoyoshi Shimobaba, Michal Makowski, Takashi Kakue, Naohisa Okada, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Yuki Nagahama, Tomoyoshi Ito, "Numerical investigation of lensless zoomable holographic projection to multiple tilted planes", Optics Communications, 333, 274-280 (2014)
2. Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, "Random phase-free computer-generated hologram", Optics Express, 23, 9549-9554 (2015)
3. Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Yuki Nagahama, Marie Sano, Minoru Oikawa, Takashige Sugie, Tomoyoshi Ito, "Improvement of the image quality of random phase-free holography using an iterative method", Optics Communications, 355, 596-601 (2015)
4. Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Yuki Nagahama, Marie Sano, Minoru Oikawa, Takashige Sugie, Tomoyoshi Ito, "Random phase-free kinoform for large objects", Optics Express, 23, 17269-17274 (Jun. 2015)
5. Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Tomoyoshi Ito, "Review of fast algorithms and hardware implementations on computer holography", IEEE Transactions on Industrial Informatics, 12, 4, 1611 - 1622 (2016)
6. Tomoyoshi Shimobaba, Michal Makowski, Yuki Nagahama, Yutaka Endo, Ryuji Hirayama, Daisuke Hiyama, Satoki Hasegawa, Marie Sano, Takashi Kakue, Minoru Oikawa, Takashige Sugie, Naoki Takada, Tomoyoshi Ito, "Computer-generated hologram using random phase-free method and color space conversion", Applied Optics, 55, 4159-4165 (2016)
7. Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, "Fast generation of computer-generated hologram using wavelet shrinkage", Optics Express, 25, 77-87 (2017)

紙面の都合上、掲載できなかったが、他査読付き論文20件となっている。