

全方向視差高解像度 CGH における 循環畳み込みを利用した背景画像の拡大

Expansion of Background Image Using Circular Convolution in Full-Parallax High-Definition Computer Holography

今井毅 西寛仁 松島恭治

Takeshi Imai Hirohito Nishi Kyoji Matsushima

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

ABSTRACT

Full-parallax high-definition computer-generated holograms (FPHD-CGH) can reconstruct deep 3D scenes. However, the reconstructed images generally appear to be floating in outer space because it is difficult to compute a large background field due to its long computation time and requirement of large computation resources. The proposed method makes it possible to expand the background image by using the property of circular convolution, which is not used in ordinary field propagation. In addition, an effective occlusion processing technique is also proposed for the expanded background image. The usefulness of the proposed method is confirmed by comparison of the computation time.

Keywords: 計算機合成ホログラム, コンピューターホログラフィ, 循環畳み込み,

1. はじめに

近年, 計算機性能の向上と効率的な物体光波計算手法の確立により, 1000 億画素を超える大規模な全方向視差高解像度計算機合成ホログラム (Full-parallax high-definition CGH, FPHD-CGH) が製作されている [1]. FPHD-CGH は立体視に必要な条件を全て満たしているため, 従来の 3 次元映像技術と比較すると非常に奥行きのある深い像を再生できる. しかし, 大規模かつ広い視域をもつ CGH を作製するためには膨大な画素数が必要であり, 画素数が増加するほど計算時間も増加する. そのため, 再生像の視野全体を覆う程の大規模なシーンの構築が困難であり, これまで作製された FPHD-CGH はすべて黒い背景が見え, 宇宙空間に物体が浮いているようなシーンとなっている. 広視野の FPHD-CGH として, 非常に大きな仮想物体を配置して窓から見た都市景観を

表現したのも製作されているが, 約 10 日もの計算時間を要した上, やはり背景は黒であった [2].

そこで, 本研究では光波の伝搬計算で生じる循環畳み込みの効果を積極的に利用し, 少ない計算量で広い背景光波を計算する手法を提案する. また, 提案手法を用いない場合の計算時間との比較により, その有用性を確認する. さらに, 拡大した背景に対するオクルージョン処理法も示し, 実際に FPHD-CGH を作製した結果を報告する.

2. 背景画像拡大法とその有効性

2.1 拡大の原理

角スペクトル法 (Angular spectrum method, ASM) などの畳み込み演算を用いた伝搬計算では FFT が用いられる [3]. 離散フーリエ変換では実空間とスペクトル空間の両方で周期性があるため, 循環畳み込み (Circular convolution, CC) となり, 隣り合う周期構造からの光波がサンプリング窓内に侵入し伝搬計算にエラーが生じる. 通常はこのようなエラーを防ぐため, 伝搬計算を行う前にサンプリング窓を拡張し, 線形畳み込み (Linear convolution, LC) として計算を行

今井毅

<k821541@kansai-u.ac.jp>

関西大学システム理工学部電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35

TEL 06-6368-1121(内線 5722)

った後に元のサイズに縮小する．本研究ではこの周期構造を積極的に利用して背景画像の拡大を行う．

Fig.1 に示すように背景画像をホログラム面まで伝搬計算すると循環畳み込みによる周期構造が発生する．ここでサンプリング窓のサイズ W と背景画像サイズ S を等しくすることで周期構造を接続することができる．この時，背景画像に周期性のある画像を用いることにより，Fig.2 に示すように周期構造が連続的になり，循環畳み込み角スペクトル法(CC-ASM)で伝搬すると，あたかも1枚の大きな背景画像のような光波とすることができる．

2.2 計算時間の短縮効果

大きな背景光波を計算する場合，通常，背景画像のサイズに合わせた大きなサンプリング窓を用いる必要があり，一般にその分サンプル点数が増加する．そのため計算量が増加し，必要なメモリ量も莫大になる．具体的には，Fig.3 に示すように，伝搬距離を d ，最大回折角を θ ，ホログラムサイズを L とすると，視野を覆う背景のサイズは

$$L' = L + 2d \tan \theta \quad (1)$$

となり，サンプリング間隔が一定あれば，概ね d の2乗に比例してサンプル点数が増加する．それに対して，提案手法では必要なサンプル点数は背景サイズに関わらず物体光波のサンプル点数と等しいため，伝搬距離 d によらずに一定となり，計算時間が増加せず，莫大なメモリも必要としない．

背景として「空」を表現したい場合など， d を大きく取りたい場合がよくあるので，伝搬距離 d の異なる3種類の背景光波について，サンプル点数を増大して通常の線形畳み込み角スペクトル法(LC-ASM)[3]を用いて伝搬計算した場合と提案手法の計算時間を比較した．用いた3DシーンをFig.4に，パラメータと計測環境をTable 1に示す．ここでは，背景光波がホログラムサイズ S の2, 4, 8倍となる距離を伝搬距離としている．背景光波の計算時間をFig.5，結像再生シミュレーション[4]による再生像をFig.6に示す．いずれの方法でもほぼ同じ再生像が得られるが，伝搬距離105mm(8S)では，提案手法を用いることにより約85倍の計算速度を実現できることがわかった．

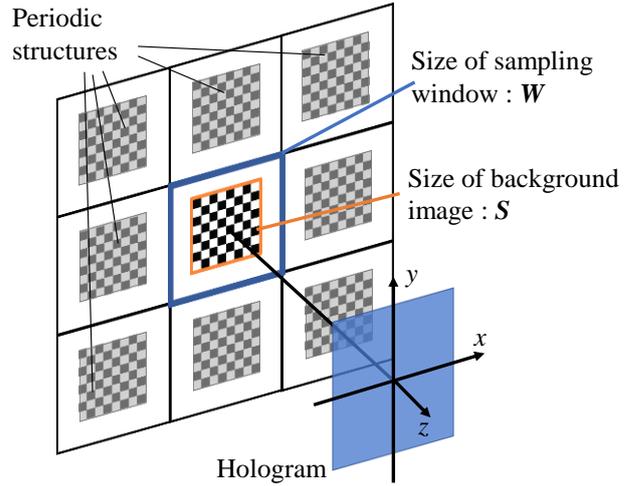


Fig.1 The principle of expansion of a background image by using periodic structures generated by circular convolution.

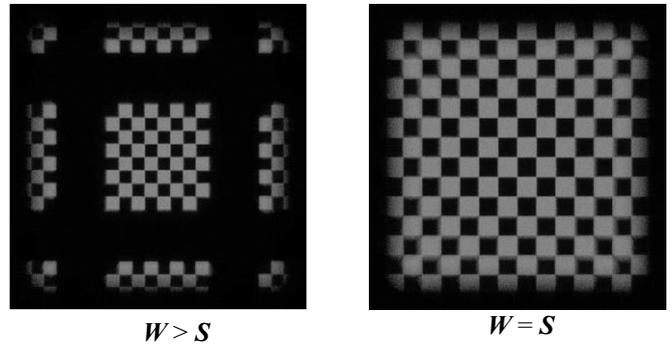


Fig.2 Simulated reconstructions of the expanded background image.

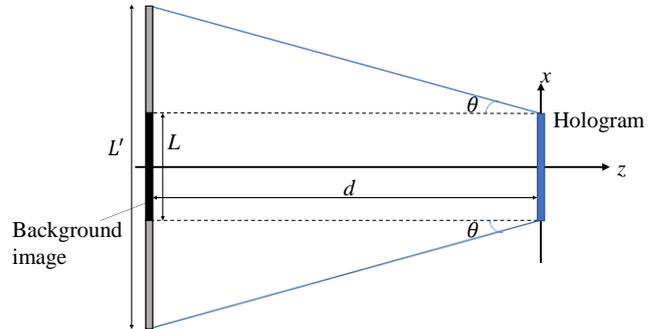


Fig.3 The size of the background image spreading over the whole field of vision.

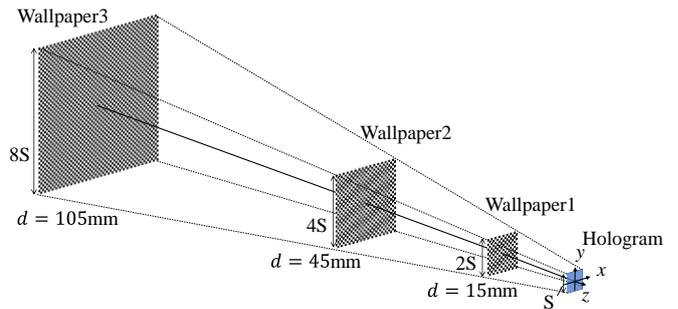


Fig.4 The 3D scene used for measurement of computation time.

Table 1 Parameters used for measurement.

Hologram	
Number of sample points	16,384 × 16,384
Sampling interval	0.8μm × 0.8 μm
Wavelength	640nm
Calculation environment	
CPU	Intel(R) Xeon(R) Silver 4216
Number of cores	32
Memory	1.5TB

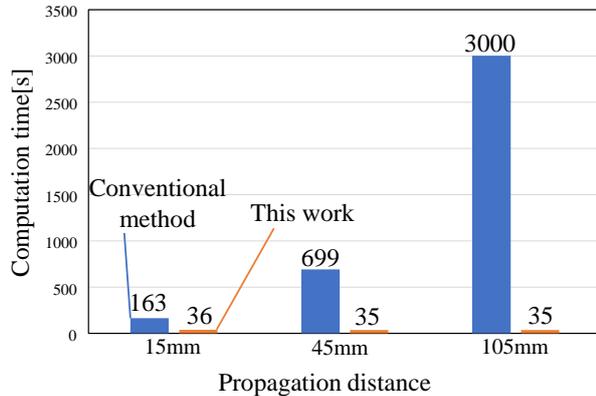


Fig. 5 Comparison of computation time.

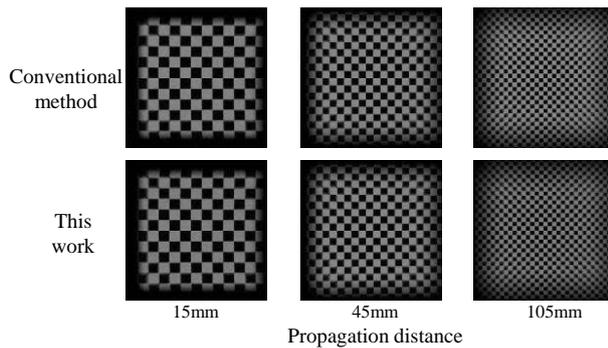


Fig. 6 Simulated reconstruction of the expanded background field.

3. オクルージョン処理

Fig. 7(a)に示す 3D シーンのように本手法の背景画像の手前に物体を配置してシルエット法[5]によりオクルージョン処理しようとする時、物体光波にも周期構造が生じるため (b)に示すような再生像になる。そこで提案手法により拡大した背景光波に対する 2 種類のオクルージョン処理法を考案した。

3.1. Babinet の原理を用いたオクルージョン処理

計算手順を Fig. 8 に示す。まず背景画像の光波を、提案手法のとおり、CC-ASM で物体平面とホログラム面まで伝搬計算する。次に物体平面の背景光波を物体のシルエットマスクを反転させたシルエット開口により遮蔽し、LC-ASM でホログラム面まで伝搬計算する。同様に、物体平面上で求めた物体光波も

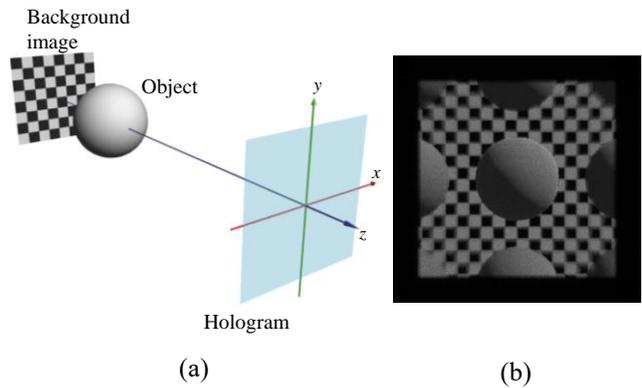


Fig. 7 An example of the occlusion error.

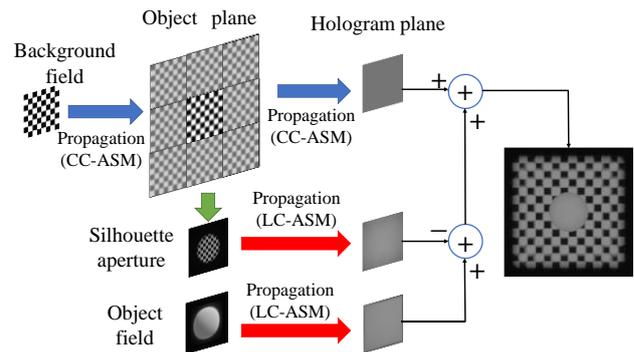


Fig. 8 The procedure for occlusion processing based on Babinet's law.

LC-ASM で伝搬計算し、Babinet の法則に従って加減算する。これにより背景光波は周期構造によって拡大される一方、シルエット開口を通過した光波と物体光波には周期構造が現れないため、正しくオクルージョン処理される。

3.2. 逆方向伝搬を用いたオクルージョン処理

前節の手法は物体単位のシルエット法となるため [5]、モデルに自己オクルージョンがあると処理できない。自己オクルージョンのあるモデルの場合は、まず提案手法でホログラム面での背景画像光波を求め、サンプリング窓のサイズが(1)式の L' 以上のサイズになるようにゼロ埋め拡張する。この拡張した光波を物体モデルの背面まで逆方向伝搬する。このように拡張するのは、ホログラム面に到達する全光波を含むようにするためである。この拡張光波を背景光波としてスイッチバック法を用いてオクルージョン処理した物体光波を求め[5]、ホログラム面まで順方向伝搬する。最後にホログラムサイズにサンプリング窓を縮小する。この手法では逆伝搬計算前に計算領域を拡張しているため、周期構造からの光波がホログラム面に侵入するのを防ぐことができる。

4. CGH の光学再生像

提案手法を用いて作製した 10.4 cm × 10.4cm サイズのモノクロ FPHD-CGH の 3D シーンを Fig.9 に、パラメータを Table 2 に示す。ここで、共役像や非回折光が視界に入るのを防ぐため干渉縞オーバーサンプリングを施している[6]。物体光波の計算にかかった時間は約 11.5 時間であり、提案手法を用いずに背景光波を拡大した場合の計算時間は約 18.2 時間であるため、6.7 時間程度短縮されている。

この CGH では、背景に画像ではなく周期性を有する 3D モデルを用いている。提案手法では 2 次元画像だけでなく、3 次元の物体でも隣り合う周期構造に連続性があれば拡大することができる。しかし、3D モデルの大きさをサンプリング窓のサイズ W と同じにすると、3D モデルのエッジ部分のシェーディングが変化してしまう。そこで、 W よりも大きな 3D モデルを用いてサンプリング窓の範囲の物体光波を計算している。Fig.10 に示す光学再生像からわかるとおり、連続した構造の 3 次元物体が背景として視野全体に広がるシーンの再生に成功している。

5. まとめ

循環畳み込みによる周期構造を利用することで、大きな背景光波を短時間で計算する手法を提案した。また、拡大した背景に対して用いる 2 種類のオクルージョン処理法を提案した。提案手法を用いて、実際に全方向視差 CGH を作製し、光学再生像で背景が拡大し、正しくオクルージョン処理ができていることを確認した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 22H03712 の助

Table 2 Parameters of the created FPHD-CGH.

CGH	
Number of pixels	131,072 × 262,144
Pixel pitches	0.8 μm × 0.4 μm
Design wavelength	640 nm

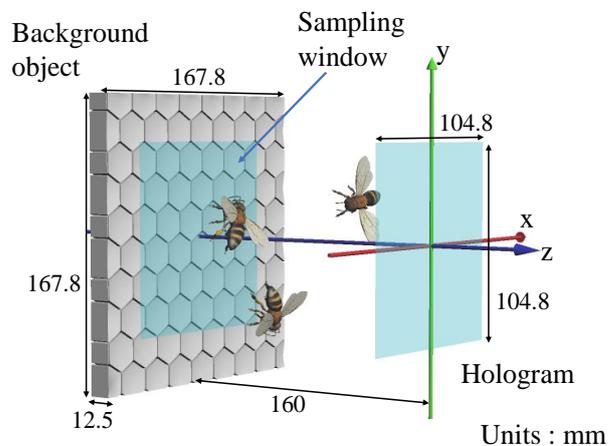


Fig.9 The 3D scene of the created FPHD-CGH.

成を受けたものである。

参考文献

- [1] K. Matsushima: *Introduction to Computer Holography*, Sect. 1.3 (Springer, 2020).
- [2] 永江, 松島: 窓から見た都市風景を再生する CGH の作成, 3次元画像コンファレンス 2019, 1-3 (2019).
- [3] K. Matsushima and T. Shimobaba: Band-Limited Angular Spectrum Method for Numerical Simulation of Free-Space Propagation in Far and Near Fields, *Opt. Express* **17**, 19662-19673 (2009).
- [4] 村上, 松島: 数値的レンズ結像を用いた全方向視差計算機合成ホログラムの波動光学的再生シミュレーション, *映像情報メディア学会誌* **65**, 1793-1800 (2011).
- [5] K. Matsushima, M. Nakamura, and S. Nakahara: "Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique," *Opt. Express* **22**, 24450-24465(2014).
- [6] K. Matsushima: *Introduction to Computer Holography*, Sect. 8.8 (Springer, 2020).

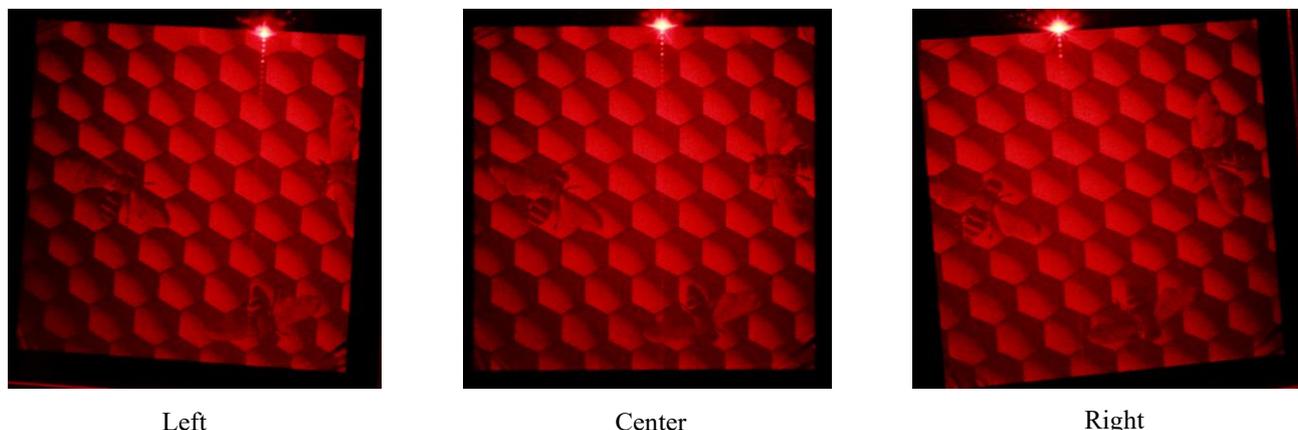


Fig.10 Optical reconstruction of the FPHD-CGH created using the proposed technique.