フルカラー全方向視差高解像度 CGH における単一 FFT による

大型背景光波の計算法

今井 毅 西 寛仁 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 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 E-mail: k821541@kansai-u.ac.jp (今井)

あらまし 大規模なフルカラー全方向視差高解像度 CGH は、その巨大な計算量のため、一般に長い計算時間が 必要である.そのため、視野全体を覆うような広いカラー背景を伴うシーンを計算することが非常に難しい.そこ で本研究では、RGB の各波長について1回の FFT だけで大型のカラー背景画像光波を短時間で計算する手法を提 案し、この手法を用いて実際に計算・作製したフルカラーCGH を報告する. キーワード CGH、フルカラー3 次元映像、FFT

Calculation Method for Object Field of Large Background Using Single FFT in Full-Color Full-Parallax High-Definition CGH

Takeshi Imai Hirohito Nishi Kyoji Matsushima

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan

E-mail: k821541@kansai-u.ac.jp (T.Imai)

Abstract Large-scale full-color full-parallax CGH commonly requires long computation time because of its huge computational load. Therefore, it is very difficult to calculate scenes that include a wide color background image covering the entire field of view. In this study, to reduce the computation time, we propose a method to compute large color background images by only once FFT for each RGB color. We also report an actual full-color CGH created using the proposed method.

Keyword CGH, full-color 3D image, FFT

1. はじめに

近年,計算機性能の向上や光波計算手法の発展によ り,一千億以上の画素数を有する大規模かつ実用的な 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)の作製が可 能となった[1]. 最新の FPHD-CGH は 3600 億もの画素 数を有しており,視差のみを再生する従来の 3 次元映 像と比較すると非常に深い奥行きのある像を再生でき る[2,3]. しかし、大規模かつ広い視域を有する CGH を作製するためには膨大な画素数が必要であるため, 計算量が増加し、それに伴い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 はすべて黒い背景となっており,図1に示すように再 生像が宇宙空間に浮いているように見える[1]. この問 題に対して, 単色の FPHD-CGH においては FFT を一 回実行するだけで視野全体を覆う程大規模な壁紙を計 算する手法が提案されている[4]. この手法は光波計算

の前後でサンプリング間隔が変化することを利用し, 少ないサンプル点で大きな背景画像を計算する.その 結果,計算に必要なメモリ量や計算時間を大幅に削減 することができる.しかし,この手法をそのままフル カラーCGH の計算に適用すると色ずれが発生する問 題がある.そこで,本研究ではこの手法を発展させ,



図1 単色 FPHD-CGH の例

大型の背景画像を有するフルカラーFPHD-CGH の計
算手法を提案する.

2. 原理

2.1. 大型背景光波の計算法

図2に単一 FFTによる光波計算の原理を示す.この 手法では,背景画像の各画素が球面波を発生している と考え,ホログラム面で球面波を重畳することで背景 画像の光波を計算する.いま簡単化のために1次元で 考え,背景画像の画素mのx座標をxm,ホログラム面上 のサンプル点pのx座標をxpとすると,この画素から照 射される球面波は,初期位相を乱数化した場合,ホロ グラム面で

$$f_m(x_p) = \sqrt{I_m} \exp[i(kr + \phi_m)] \tag{1}$$

と表せる. ここで*I_m*は画素*m*の輝度, Ø_mはランダム位 相を表す. また, *r*はホログラム面上のサンプル点*p*と 画素*m*との距離であり,背景画像とホログラムの間隔*d* を用いて

$$r = \sqrt{\left(x_p - x_m\right)^2 + d^2}$$
 (2)

で与えられる.ここで、 $d \gg (x_p - x_m)$ としてフレネル 近似すると、式(2)は

$$r \simeq d + \frac{\left(x_p - x_m\right)^2}{2d} \tag{3}$$

となる.背景画像の画素数をMとすると,球面波を重 畳して得られるホログラム面上の光波は

$$f(x_p) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp[ikr], (p = 0, ..., M-1)$$
(4)

$$a_m = \sqrt{I_m} \exp[i \phi_m]$$
 (5)
となるので、式(3)を代入すると、

$$f(x_p) = \exp[ikd] \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}(x_p - x_m)^2\right]$$
(6)

と表せる.

いま背景画像の画素間隔を Δx_s ,ホログラム上の光波 のサンプリング間隔を Δx とし, $x_m = m\Delta x_s$, $x_p = p\Delta x$ と すると,式(6)は,

$$f(x_p) \cong \exp[ikd] \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}x_p^2\right] \times \\ \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}x_m^2\right] \exp\left[-i2\pi\frac{\Delta x \Delta x_s}{\lambda d}mp\right]$$
(7)
$$\geq t_s \Im . \quad \neq z \subset \mathcal{T},$$

$$\frac{\Delta x \Delta x_s}{\lambda d} = \frac{1}{M} \tag{8}$$

の制約を課すと、ホログラム上の光波は FFT を用いて

$$f(x_p) = \exp\left[ikd\right] \exp\left[i\frac{\pi\Delta x^2}{\lambda d}p^2\right] \text{FFT}\left\{a_m \exp\left[i\frac{\pi\Delta x_s^2}{\lambda d}m^2\right]\right\}$$
(9)



図2 背景画像光波計算の原理



図3背景画像の見かけのサイズ

と表すことができる.これは単一 FFT によるフレネル 回折計算と同等の計算であり, FFT を1回実行するだ けで背景画像の光波を計算できる.

2 次元で考えた場合、この計算法では式(8)の関係が 必要であるため、背景画像の見かけの画素間隔は

$$\Delta x_s = \frac{\lambda d}{M\Delta x}, \quad \Delta y_s = \frac{\lambda d}{N\Delta y} \tag{10}$$

となる.ここで Nはy方向の画素数である.その結果,図3に示すように,背景画像の見かけのサイズは,

$$W_{sx} = \frac{\lambda d}{\Delta x}, \qquad W_{sy} = \frac{\lambda d}{\Delta y}$$
 (11)

となり,距離dに比例して増大する.そのため,大きな 背景画像を短時間で計算することができる.

2.2. フルカラーCGH の計算

この計算法での背景画像の見かけのサイズは,式 (11)に示すように,距離dだけでなく波長にも依存する. そのため,図4(a)に示すカラー画像をRGBの色チャン ネルに分解して対応する3波長で計算すると,色ごと に背景画像の見かけのサイズが異なり,図4(b)に示す ように色ずれが発生する.これを防ぐためには,全て の波長において背景画像の見かけのサイズを同じにす る必要がある.

そこで本研究では,最も波長が短い青波長での見か けのサイズW_{sx}×W_{sv}を式(11)から求め,図5に示すよ うに、同じ物理的サイズになるように赤と緑の画像を 再サンプリングして縮小し、周囲をゼロ値で埋めた. これにより,図4(c)に示すように,色ずれなく大型の カラー画像を計算することができる.

2.3. オクルージョン処理

背景画像とホログラムの間に物体が存在する場合, 背景光波の一部を遮蔽するオクルージョン処理が必要 となる.しかし,提案手法では背景画像の光波を直接 ホログラム面上で計算するため,従来のシルエット法 [5]をそのまま適用することができない. そのため, 以 下に示す手順でオクルージョン処理を行う.

まず,提案手法を用いてホログラム面で背景光波を 計算する. その後,物体平面において視野全体を覆う ように、ホログラム面での背景画像光波のサンプリン グ窓を拡張する.次に、帯域制限角スペクトル法[6]を 用いてこの拡張背景光波を物体モデルの背面の位置ま で逆方向伝搬する.この背景光波に対して、スイッチ バック法[5]を用いてオクルージョン処理した物体光 波を計算する. 最後に, 物体光波を再びホログラム面 まで伝搬し,ホログラムのサイズに合わせてトリミン グする.以上の手順で計算することにより,正しくオ クルージョン処理ができる.

3. 作製したフルカラーFPHD-CGH

提案手法を用いて作製したフルカラーFPHD-CGH の 3D シーンを図 6 に示す. このカラーCGH を RGB カ ラーフィルタ方式[7]により実際に作製した.そのパラ メータを表1に示し、光学再生像を図7に示す.この 時,3色の物体光波計算にかかった時間は、 Intel(R)Xeon(R) Gold 6342 CPU, プロセッサ×2 (メイ ンメモリ 2T Byte 搭載)を用いて約 47 時間だった.

従来手法を用いて同サイズの背景画像を計算する 場合、この計算機を用いても背景光波全体をメモリ内 に保持できないため,いくつかのセグメントに分割し てシフテッド角スペクトル法を用いて伝搬計算する必 要がある[8]. 例として,1セグメントのサイズをホロ グラムと同サイズにし、3×3のセグメントに分割して 背景光波を物体モデルの背面まで伝搬計算した場合, 1色につき約10時間を要する.一方,提案手法を用い た場合は背景光波の計算時間は約1色につき 50分で あるため、提案手法による高速化率は約12倍である. ただし、オクルージョン処理以降は同じ計算手順であ るため、従来手法による全体の計算時間は約 74 時間 と推定され、全体の高速化率は約1.6倍となる.

4. まとめ

1回だけのFFTにより、視野を覆うほどの大きなカ ラー背景画像の光波を短時間で計算する手法を提案し,







(b)

(c)

図4原画像とシミュレーション再生像.(a)原画 像, (b)サイズを補正しない場合, (c)提案手 法





図5背景画像の色チャンネル毎の補正処理



図6 作製した H	FPHD-CGH の	3D シーン
-----------	------------	--------

表 1 作製した FPHD-CGH のパラメータ		
ピクセル数	$131,072 \times 262,144$	
ピクセルピッチ[μm]	0.8×0.4	
設計波長(R,G,B)[nm]	(635, 517, 443)	

実際にフルカラーFPHD-CGH を作製した. 今後は,「空」 などの雄大なシーンを再生する、より大規模な FPHD-CGH の作成を目指す.

5. 謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 22H03712 および 国 立 研 究 開 発 法 人 情 報 通 信 研 究 機 構 の 委 託 研 究

(JPJ012368C06801)の助成を受けたものである.

文 献

- "Introduction to [1] K. Matsushima: Computer Holography," Sect. 1.3, Springer (2020).
- [2] K. Matsushima and H. Nishi: "Challenges to terapixel-scale full-parallax computer holography for 3D Imaging," Frontiers in Optics + Laser Science 2022, FM5E.2 (Oct.2022).
- [3] K. Matsushima, H. Nishi, R. Katsura, and C.-J. Lee: "Computation techniques in tera-pixel-scale full-parallax computer holography for 3D display," The 12th Laser Display and Lighting Conference 2023, LDC10-02 (Apl.2023).

- [4] H. Nishi and K. Matsushima: "Calculation technique for large backdrops filing visual field of full-parallax high-definition CGH," 12th Intern. Symp. on Display Holography, ISDH2023-ED-0256, pp.220-223 (Jun. 2023).
- [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, pp.24450-24465 (Sep.2014).
- [6] 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, pp.19662-19673 (Oct.2009).
- [7] Y. Tsuchiyama and K. Matsushima: "Full-color largescaled computer-generated holograms using RGB color filters," Opt. Express 25 pp.2016-2030 (Jan.2017).
- Matsushima: "Introduction [8] K. to Computer Holography," Chap. 12, Springer (2020).





左視点



正面



下視点 図7 作製した FPHD-CGH の光学再生像



右視点