自由視点画像合成における見え方を考慮した レンズアレイ撮像系の設定

Use of View-Parameters in Free-Viewpoint Image Synthesis
to Configure a Multi-View Acquisition System with Lens Array

金 時 煥[†], 河 宗 玄[†], 田 口 裕 一[†],
高 橋 桂 太[†], 正 会 員 苗 村 健[†]

Sihwan Kim [†], Jonghyun Ha[†], Yuichi Taguchi[†], Keita Takahashi[†] and Takeshi Naemura[†]

Abstract We have been studying on a real-time Image-Based Rendering (IBR) system that uses a single camera with thousands of lenslets to capture multi-view images of dynamic 3D scenes and to synthesize arbitrary views of the scenes in real time. In our previous papers, we have formulated the upper limit of the spatial frequency captured with the optical system by analyzing the effects on the image sensor of blurring and sampling. In this paper, we defined view-parameters and formulated their relation with acquisition-parameters, which are used to decide the location setting of the devices. Our results showed that our theory is an effective way of designing acquisition-parameters for our real-time IBR system.

キーワード: Image-Based Rendering, レンズアレイ, LIFLET, 見え方のパラメータ, パラメータ設定

1. ま え が き

実世界の3次元視覚情報を扱う技術として、Image Based Rendering (IBR)¹⁾が注目を集めている。IBRでは、ある空間の多視点画像を利用し、その空間を自由な視点(仮想視点)から見た画像(自由視点画像)を合成する。多視点画像の取得には、一般的にカメラアレイ(多数のカメラを格子状に並べた撮像系)が用いられるが^{2)~6)}、大規模なカメラアレイを構築するためには相当のコストがかかり、また、それらを密に並べることも物理的な制約上限界がある。

そこで、筆者らのグループでは、カメラアレイの代わりに、レンズアレイ(数千個のマイクロレンズを密に並べたもの)を用いて多視点画像を取得し、実時間で自由視点画像の合成を行うIBRシステム“LIFLET”(Light Field Live with Thousands of Lenslets)を提案した⁷⁾。これまで、LIFLETにおいて、撮像系に奥行き制御レンズを導入することによる光学的歪みの除去⁸⁾、高画質の画像を得るための画像合成法⁹⁾について検討してきた。また、LIFLETの撮像系を使って撮像される多眼画像の空間周波数特性についても検討したが¹⁰⁾、合成される自由視点画像における見

図1 LIFLETの撮像系
Our capturing system “LIFLET”.

え方については十分に議論されていなかったため、撮像系の設定は経験や試行錯誤に頼ることが多かった。

本稿では、合成される自由視点画像の見え方に着目したレンズアレイ撮像系の設定手法¹¹⁾¹²⁾について報告する。まず、見え方に関する三つのパラメータ(視野角に収まる被写体空間の幅、視野の変化の大きさ、被写体の鮮明さ)を定義し、それらのパラメータと撮像パラメータの関係を明確にする。結果として、目標とする合成画像の見え方に対して、どのように撮像パラメータを設定したらよいかという指針が示せるようになった。

2. LIFLET:Light Field Live with Thousands of Lenslets

LIFLET撮像系の外観を図1に、LIFLET撮像光学系を

2006年7月4日受付, 2006年8月23日再受付, 2006年8月26日採録

[†] 東京大学 工学部

(〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-6781)

[†] Faculty of Engineering The University of Tokyo

(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan)

図 2 LIFLET 撮像光学系
Optical system of LIFLET.

表 1 光学系を構成する物理的パラメータ
Physical parameters of optical devices.

ϕ_g	diameter of GRIN lens
f_g	focal length of GRIN lens
Θ_g	FOV of GRIN lens
f_d	focal length of depth control lens
N_p	number of pixels of IP Image
F_c	F-Number of camera lens
F'_c	effective F-Number of camera lens
δ_c	pixel pitch of image sensor

図 4 見え方のパラメータ
View-parameters.

図 3 光線追跡による画像合成
Image synthesis by ray tracing.

図 2 に示す．撮像系は，奥行き制御レンズ（口径の大きな凸レンズ），レンズアレイ，カメラからなる．レンズアレイとは，直径約 1mm のマイクロレンズを数千眼，密に並べたものであり，各々のレンズが 1 台のカメラの役割をする．レンズアレイを構成するレンズとしては，焦点が入射端面，出射端面上に存在するような屈折率分布レンズ（GRIN レンズ）を用いている¹³⁾．

被写体空間は奥行き制御レンズによって縮小され，レンズアレイの入射端面付近に結像される．レンズアレイを構成する個々のレンズはその位置から見た“縮小された被写体空間”の像を出射端面付近に結像させ，レンズアレイの後方端面を 1 台のカメラで撮影することで多視点画像（Integral Photography(IP) 画像）が得られる．IP 画像中で，レンズ 1 個に相当する円領域を“要素画像”（elemental image）と呼び，小さなカメラ 1 台で撮影した画像に相当する．

自由視点画像は，仮想視点を通る光線を追跡することで合成される．例えば，仮想視点を図 3 の virtual viewpoint

の位置に設定すると，その点を通る光線の経路をレンズアレイに向けてたどることができる．IP 画像上のこれらの光線に相当する部分の色を使い，また，適切な補間を用いることで仮想視点から見た画像が合成される．仮想視点の動く範囲は，レンズアレイを構成するすべてのレンズから光線を読出せる範囲と定義する（図 2 の斜線の部分）．

LIFLET システムにおいて，デバイスの物理的なパラメータ（表 1）を固定した場合，入力データを取得する際のパラメータ（“撮像パラメータ”）は，図 2 における以下の三つとなる．

- z : 奥行き制御レンズの前方焦点と被写体間の距離
- d : 奥行き制御レンズの後方焦点とレンズアレイ入射端面間の距離
- n_p : 要素画像の直径方向の画素数（ d' に依存）

これらのパラメータは LIFLET 撮像光学系におけるデバイス間の距離であり，それぞれ奥行き制御レンズに対して，被写体，レンズアレイ，カメラの位置に相当する．

3. 見え方のパラメータの提案

本章では，LIFLET システムにおいて“見え方のパラメータ”を定義する．目標は，所望の見え方のパラメータに対して適切な撮像パラメータを算出できるようにすることである．また，多視点画像にならない領域を考慮した撮像パラメータと見え方のパラメータの制約条件について述べる．

3.1 見え方のパラメータ

合成された自由視点画像の見え方を特徴付ける，次のパラメータを見え方のパラメータと定義する（図 4 参照）．

図 5 合成画像の視野角に収まる被写体空間の幅 W
Width of object space at standard viewpoint : W .

図 6 視野の変化の大きさ R_w
Magnitude of change of view : R_w .

図 7 カットオフ周波数 ν
Cutoff frequency : ν .

- W : 合成画像の視野角に収まる被写体空間の幅
- R_w : 視野の変化の大きさ
- ν : 被写体の鮮明さ (カットオフ周波数)

ここで、仮想視点は光軸に対して左右の可動範囲が最も広い PQ 上で動かすことにする。以下では、上記の見え方のパラメータを詳しく説明し、撮像パラメータとの関係を示す。特に、見え方のパラメータから、撮像パラメータを逆算できることが重要な目標である。

(1) 合成画像の視野角に収まる被写体空間の幅: W

仮想視点を PQ の中心 (点 F) において画像を合成する場合を考え、 z においてその視野角に収まる被写体空間の幅を W と定義する (図 4)。点 F は奥行き制御レンズの焦点と一致するため、点 F を通過する各光線は奥行き制御レンズを通過した後、光軸に平行に直進する。したがって、レンズアレイの両端に位置するレンズから、光軸に平行な光線をたどることにより (点線)、 W と撮像パラメータの関係が以下のように求められる。

$$W(z, n_p) = \frac{N_p}{n_p} \phi_g \frac{z}{f_d} \quad (1)$$

ここで、 N_p/n_p は合成に用いる要素画像の数であり、 W は N_p/n_p と z に比例する。

(2) 視野の変化の大きさ: R_w

仮想視点を PQ 上で動かした時に、各位置において被写体空間をそれぞれ違う角度から見た画像が合成される。これらの視野角に収まる幅の全域 (論理和) を W_{or} と定義する (図 4)。 W_{or}/W は、仮想視点を PQ 上で移動したときに、合成画像の視野に含まれる範囲が変化する度合いを表しており、これを視野の変化の大きさ R_w として定義する。(詳細については付録 A を参照されたい)

$$R_w(z, d, n_p) = 1 + \frac{2n_p \tan \Theta_g}{N_p \phi_g} \left| d - \frac{f_d^2}{z} \right| \quad (2)$$

(3) 被写体の鮮明さ (カットオフ周波数): ν

LIFLET システムでは、レンズ系における焦点ぼけと撮像素子におけるサンプリングの影響によって劣化した多視点画像が取得される。さらに、自由視点合成画像では、合

成アルゴリズムに依存したほけが加わる．ここでは，合成アルゴリズムが理想的な場合を考え，合成の段階でのほけを無視する．また，経験上，レンズ系における焦点ほけの影響はほとんどないため，撮像素子におけるサンプリングの影響によるほけを，合成される画像のほけの程度を表す指標とする．小島ら¹⁰⁾の理論に従い，カットオフ周波数 ν は次のようになる．

$$\nu(z, d, n_p) = \frac{n_p |f_g| f_d}{2\phi_g |d| |z - f_d^2/d|} \quad (3)$$

撮像パラメータを軸とした $d-z$ 平面 ($n_p = 41\text{pixel}$, 固定), n_p-z 平面 ($d = 100\text{mm}$, 固定), $d-n_p$ 平面 ($z = 1000\text{mm}$, 固定)において, 各見え方のパラメータ (W, R_w, ν)を一定として描いた等高線を図5, 図6, 図7に示す．特に R_w と ν は撮像パラメータに対して非線形に変化するため, 撮像系を設定する際に試行錯誤によって目標とする値に近付くことは必ずしも容易ではない．

しかし, 見え方のパラメータ (W, R_w, ν)を一意に決めると, 撮像パラメータ (z, d, n_p)を逆に求めることができる．(1)–(3)式を変形することにより求められた撮像パラメータを(4)–(6)式に表す．同じ見え方のパラメータの値に対して, z と n_p は一意に決まるが, d は二つの値を持つことがわかる．

$$z(W, R_w, \nu) = \frac{f_d \nu W^2}{N_p |f_g| \tan \Theta_g} (R_w - 1) \quad (4)$$

$$d(W, R_w, \nu) = \frac{N_p |f_g|}{\nu W} \left(\frac{f_d \tan \Theta_g}{W (R_w - 1)} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

$$n_p(W, R_w, \nu) = \frac{\phi_g \nu W}{|f_g| \tan \Theta_g} (R_w - 1) \quad (6)$$

3.2 多視点画像にならない領域の考慮

LIFLETシステムには, 奥行き制御レンズを用いることにより, 図8のように多視点画像として取得できない領域 (“NGゾーン”)が存在する⁹⁾．図8において, 灰色付きの部分は各レンズの視野を表すが, NGゾーンの中では, 同時に二つ以上のレンズの視野に入らない領域ができるため, その部分は多視点画像にならない．NGゾーンにおける撮像パラメータは(7)式で表される．

$$\frac{f_d^2}{d + 2|f_g|} \leq z \leq \frac{f_d^2}{d - 2|f_g|} \quad (7)$$

このNGゾーンを考慮せずに見え方のパラメータを設定すると, (4)–(6)式によって計算される撮像パラメータが(7)式の範囲に入り, 自由視点画像の合成ができなくなる場合がある．そのため, NGゾーンに含まれないための見え方のパラメータの条件を調べる必要がある．

(7)式に(4)–(6)式を代入することでNGゾーンにおける見え方のパラメータを求めると(8)式のようになる．

$$W\nu > \frac{N_p}{4} \quad (8)$$

図8 NGゾーン
NG zone.

表2 実験に用いたデバイスの物理的パラメータの値
Physical parameters in this experiment.

ϕ_g	diameter of GRIN lens	1.085mm
f_g	focal length of GRIN lens	-2.65mm
f_d	focal length of depth control lens	210.6mm
N_p	number of pixels of IP Image	2800pixel
Θ_g	FOV of GRIN lens	5.425°

ここで, N_p (IP画像の1辺の画素数)はカメラの画素数の制約を受ける．この式は, NGゾーンに含まれないためには, W と ν の積が $N_p/4$ より小さくしなければならないことを意味する．また, N_p が固定された場合, W と ν がトレードオフ関係であることがわかる．

4. 実験

本章では, 3章の議論を確認するための実験を行う．まず, 見え方のパラメータを与え, それに対する撮像パラメータを算出する．次に, 算出された撮像パラメータを基にLIFLET撮像系を設定する．最後に, IP画像を取得し, それから自由視点画像を合成する．

撮像系のデバイスの物理的パラメータを表2に示す．ただし Θ_g は, PQ上で実際に視点位置を動かして視覚的に許容できる画像が合成可能であった範囲から逆算した値をもって実効値(5.425°)とした．レンズアレイを撮影するカメラとして, 高画質のデジタル一眼レフカメラ(Canon EOS D-60, 3072×2048pixel)を用いた．被写体は, 花の模型(幅約40mm), 電車型の玩具(幅約120mm), “LIFLET”と書いた板(幅約300mm)である．自由視点画像の合成には河ら⁹⁾の手法を用いた．

まず, 表3のように, 3通りの見え方のパラメータを設定した．Aでは, 被写体(花の模型)が合成画面に入るように W を設定し, (8)式を考慮して ν の値を決めた．BはAに対して R_w の値のみを大きくした．CはAに対して R_w を固定し, W と ν を変化させた．見え方のパラメータに基づいて, (4)–(6)式により計算された撮像パラメータを表4に示す．ここでは, (5)式の符号が負の場合を選択した．

次に, 表4の計算された撮像パラメータを基に, 被写体, レンズアレイ, カメラを配置した．被写体は, 算出された z の位置に電車型の玩具の前面を合わせ, その直前に花の模

図 9 合成結果
Synthetic results.

表 3 見え方のパラメータの設定
Configuration of view-parameters.

Config.	W [mm]	R_w	ν [cycle/mm]
A	50	1.1	4.0
B	50	1.2	4.0
C	200	1.1	1.0

表 4 撮像パラメータの導出
Calculated acquisition-parameters.

Config.	z [mm]	d [mm]	n_p [pixel]
A	298.9	129.9	86.22
B	597.7	55.65	172.5
C	1195	18.55	86.22

型を、背景として遠方に“LIFLET”と書いた板を置いた。

設定した撮像系を用いて IP 画像を取得し、自由視点画像を合成した結果を図 9 に示す。ここで、Left view, Center view, Right view とは、仮想視点を図 2 の左視点 (点 Q), 基準視点 (点 F), 右視点 (点 P) において合成した画像である。まず、A の Center View において、合成画像に収まっている花の模型の大きさから、おおよそ目標とした $W(=50\text{mm})$ が得られていることがわかる。次に A と B を比較すると、視野に収まる面積はほぼ同じであるが、視点の移動にともなって、B の方が、花の位置が大きく変化していることがわかる。これは、B において、 R_w がより大きいことに対応する。そして、A, C を比較すると、C はより大きい被写体空間を視野に収めているが (W が大きい)、C の一部を拡大したものに相当する A の方が細部をより鮮明にとらえている (ν が大きい) ことがわかる。これらより、 R_w と ν についても、定性的な大小関係が設計と一致することを確認できた。

これらの結果から、見え方のパラメータを決めることにより、それに応じて撮像パラメータを設定することが可能であることがわかる。

5. む す び

本稿では、レンズアレイ撮像系を用いた自由視点画像合成システム (LIFLET) において、その見え方を考慮した

撮像パラメータの設定について検討した。まず、LIFLET システムにおいて、合成される画像の見え方を特徴付ける“見え方のパラメータ”を定義し、入力データの取得条件を特徴付ける“撮像パラメータ”との関係性を求めた。次に、この関係式に基づき、多視点画像にならない領域も考慮に入れた撮像パラメータの設定について検討を行った。また、実際の撮像パラメータの設定、撮像、自由視点画像の合成を通じて、上記の検討の有効性を確認した。今後の課題としては、LIFLET システムのデバイスの物理的パラメータを変更した場合のシステム機能の向上に関する検討が考えられる。

最後に、有益なご助言を頂いた東京大学の原島博教授に深く感謝致します。本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の支援を受けて行われました。

【文 献】

- 1) H.-Y. Shum, S.-B. Kang, and S.-C. Chan: “Survey of Image-Based Representations and Compression Techniques,” IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., **13**, 11, pp. 1020–1037 (Nov. 2003)
- 2) T. Naemura, J. Tago, and H. Harashima: “Real-Time Video Based Modeling and Rendering of 3D Scenes,” IEEE Comput. Graphics & Appl., **22**, 2, pp. 66–73 (Mar. 2002)
- 3) J.C. Yang, M. Everett, C. Buehler, and L. McMillan: “A Real-Time Distributed Light Field Camera,” Proc. 13th Eurographics Workshop on Rendering, pp. 77–85 (June 2002)
- 4) B. Wilburn, M. Smulski, K. Lee, and M.A. Horowitz: “The Light Field Video Camera,” Proc. Media Processors 2002, SPIE Elec-

- 5) C. Zhang and T. Chen: "A Self-Reconfigurable Camera Array," Proc. 15th Eurographics Symposium on Rendering, pp. 243–254 (June 2004)
- 6) M. Tanimoto: "FTV (Free Viewpoint Television) Creating Ray-Based Image Engineering," Proc. IEEE ICIP 2005, **2**, pp. 25–28 (Oct. 2005)
- 7) T. Yamamoto, M. Kojima, and T. Naemura: "LIFLET: Light Field Live with Thousands of Lenslets," ACM SIGGRAPH 2004 Emerging Technologies, etech0130 (Aug. 2004)
- 8) 山本智幸, 苗村健: "屈折率分布レンズ方式 IBR システムにおける奥行き圧縮効果の除去", 信学技報, IE2003–105 (Nov. 2003)
- 9) 河宗玄, 小島將, 高橋桂太, 苗村健: "レンズアレイを用いた実時間全焦点自由視点画像合成システム", 映像学誌, **59**, 10, pp. 1483–1487 (Sep. 2005)
- 10) 小島將, 苗村健: "レンズアレイを用いた自由視点画像合成システムにおける撮像光学系の空間周波数特性", 映像学誌, **59**, 4, pp. 569–580 (Mar. 2005)
- 11) 金時煥, 河宗玄, 田口裕一, 高橋桂太, 苗村健: "自由視点画像合成における見え方の変化を考慮したレンズアレイ撮像系の設計に関する基礎検討", 信学総大, D-11-63 (Mar. 2006)
- 12) 金時煥, 河宗玄, 田口裕一, 高橋桂太, 苗村健: "自由視点画像合成における見え方の変化を考慮したレンズアレイ撮像系の設計", 3次元画像コンファレンス, 5-1, pp. 73–76 (Jul. 2006)
- 13) J. Arai, F. Okano, H. Hoshino, and I. Yuyama: "Gradient-Index Lens-Array Method Based on Real-Time Integral Photography for Three-Dimensional Images," Appl. Opt., **37**, 11, pp. 2034–2045 (Apr. 1998)

〈付 録〉

A. 視野の変化 R_w の導出過程

A.1 $z < f_d^2/d$ (図1) の場合

付・図1 $R_w(z < f_d^2/d)$ の場合
 R_w (case of $z < f_d^2/d$).

W_{or} は四角形 PABF の中の CD の長さ $(\overline{CD}) \times 2$ に相当する。PF の長さ $(\overline{PF} = f_d \tan \theta_g)$, AB の長さ $(\overline{AB} = \frac{N_p \phi_g}{2n_p} f_d)$ と比例関係から W_{or} を求めると, (付・1) 式となる。

$$W_{or} = z \left(\frac{N_p \phi_g}{n_p f_d} - \frac{2d}{f_d} \tan \theta_g \right) + 2f_d \tan \theta_g \quad (\text{付} \cdot 1)$$

(付・1) 式と (1) 式から R_w を求めると, 次のようになる。

$$R_w(z, d, n_p) = 1 - \frac{2n_p \tan \theta_g}{N_p \phi_g} \left(d - \frac{f_d^2}{z} \right) \quad (\text{付} \cdot 2)$$

A.2 $z > f_d^2/d$ (図2) の場合

W_{or} は CD の長さ $(\overline{CD}) \times 2$ に相当する。三角形 KIJ から $x(\overline{JK})$ は (付・3) 式となる。また, レンズの結像公式から (付・4) 式が, 三角形 EAB と三角形 ECD の相似関係から (付・5) 式が成り立つ。これらの式から W_{or} が求まり, (付・6) 式となる。

付・図2 $R_w(z > f_d^2/d)$ の場合
 R_w (case of $z > f_d^2/d$).

$$x = \frac{N_p \phi_g}{2n_p \tan \theta_g} \quad (\text{付} \cdot 3)$$

$$\frac{1}{x + f_d + d} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f_d} \quad (\text{付} \cdot 4)$$

$$\frac{f_d^2}{d} - y + f_d : \frac{\overline{AB}}{2} = z - y + f_d : \frac{W_{or}}{2} \quad (\text{付} \cdot 5)$$

$$W_{or} = \frac{N_p \phi_g}{n_p f_d} \left\{ \frac{z(x + d) - f_d^2}{x} \right\} \quad (\text{付} \cdot 6)$$

(付・6) 式と (1) 式から R_w を求めると, 次のようになる。

$$R_w(z, d, n_p) = 1 + \frac{2n_p \tan \theta_g}{N_p \phi_g} \left(d - \frac{f_d^2}{z} \right) \quad (\text{付} \cdot 7)$$

金 時煥 2006 年, 東京大学工学部電子工学科卒業。現在, 同大学大学院工学系研究科修士課程在学中。3次元画像処理, 画像認識のための VLSI の設計に関する研究に従事。

河 宗玄 2005 年, 東京大学工学部電気工学科卒業。現在, 同大学大学院情報理工学系研究科修士課程在学中。実写に基づく画像合成に関する研究に従事。

田口 裕一 2004 年, 東京大学工学部電子情報工学科卒業。2006 年, 同大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。現在, 同大学大学院同研究科博士課程在籍。3次元画像の処理と符号化に関する研究に従事。

高橋 桂太 2001 年, 東京大学工学部電子情報工学科卒業。2006 年, 同大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。現在, 日本学術振興会特別研究員として東京大学に在籍。実写画像に基づく3次元ビジョンと自由視点画像合成に関する研究に従事。博士(情報理工学)。

苗村 健 1992 年, 東京大学工学部電子工学科卒業。1997 年, 同博士課程修了。スタンフォード大学客員助教授(日本学術振興会海外特別研究員)を経て, 2002 年, 東京大学大学院情報学環助教授。実写に基づく画像合成, 複合現実感, 実世界指向情報環境などの研究に従事。博士(工学)。正会員。