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

Real-Time All in-Focus Free-Viewpoint Image Synthesis System Using a Lens Array

河 宗 玄[†], 小 島 將[†], 高 橋 桂 太[†], 正会員 苗 村 健[†]

Jonghyun Ha[†], Masaru Kojima[†], Keita Takahashi[†], and Takeshi Naemura[†]

Abstract We have proposed a real-time IBR system that captures multiviewpoint images of a 3D dynamic scene with a single camera through thousands of lenslets, and synthesizes arbitrary views of the scene in real time. We have also proposed a method for all-in-focus rendering of arbitrary views of a 3D scene captured by an array of cameras. This paper combines these two works to achieve a new all-in-focus real-time IBR system. Our experimental results indicate that the proposed method can synthesize clearer views than the previous method.

キーワード : 自由視点画像合成, Image-Based Rendering, レンズアレイ, 合焦判定, 実時間 IBR システム

1. ま え が き

実空間の多視点画像を基に、その空間の自由視点画像を合成する手法を Image Based Rendering (IBR) と呼ぶ。IBR は従来のコンピュータグラフィックス技術と比較して、被写体の幾何学的モデルや反射特性モデルを必要としないという特徴がある。近年では、入力（撮像）から合成までを実時間でやる IBR システムも多数提案されている^{1)~4)}。

筆者らのグループは、これまでに、IBR のための撮像系、画像合成法、およびその実時間システムについての検討を重ねてきた。本稿では、その中で以下に示す二つの従来研究を組合せた、新しい IBR システムを提案する。

まず、筆者らのグループは、実時間 IBR システムとして LIFLET (Light Field Live with Thousands of Lenslets)⁵⁾ を提案した。LIFLET は、レンズアレイを用いた撮像系で、ある動空間の多視点画像を取得し、リアルタイムでその空間の自由視点画像を合成するシステムである。

また、IBR のための画像合成法として、“合焦判定”に基づく全焦点画像合成法⁶⁾を提案した。この手法は、“合焦判定”に基づいて、被写体の奥行きを合成画像の画素ごとに推定し、対象空間全体を鮮明にとらえた画像を合成するものである。

LIFLET では、ある視点から見た被写体の奥行きを、いくつかの代表点について求め、それを基に構成された“簡易構造モデル”を用いて画像合成を行う。しかし、この手法では、対象によっては、モデルの解像度が必ずしも充分であるとはいえないため、満足な合成品質が得られない場合もあった。そこで本稿では、LIFLET の撮像系で取得した多視点画像に、“合焦判定”に基づく全焦点画像合成法を適用することによって、従来より高品質な画像合成を行うシステムを構築することを目標とする。なお、提案システムを LIFLET と区別するために、“全焦点 LIFLET”と呼ぶことにする。“合焦判定”法はカメラアレイによる多視点画像を想定して提案された手法であるため、これを LIFLET の撮像系で取得した多視点画像に適用する際、合成手法を最適化することが、本稿の主な課題である。

2. 従 来 研 究

本章では提案システムで用いる、LIFLET の撮像系と“合焦判定”に基づく全焦点画像合成法の概要について説明する。

2.1 LIFLET の撮像系⁵⁾

LIFLET の撮像系の外見を図 1 に示す。撮像系は、奥行き制御レンズ（凸レンズ）、レンズアレイ、一台のカメラからなる。ここで用いるレンズアレイは、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、個々のレンズが一台のカメラの役割をする⁷⁾。

LIFLET の撮像光学系を図 2（上）に示す。被写体空間は奥行き制御レンズによって、レンズアレイの入射端面付

2005 年 5 月 30 日受付, 2005 年 7 月 1 日採録

[†] 東京大学 大学院 情報理工学系研究科

(〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-8754)

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

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

図 2 レンズアレイを用いた撮像系 (上) と focal plane (z_1 – z_8) の設定の最適化 (下)
The capturing system of LIFLET (top) and optimal setting of the focal planes (bottom).

図 1 LIFLET の撮像系
The capturing system of LIFLET.

近に結像される。なお、この像は単に縮小されるだけでなく、奥行き方向に非線形に歪んだものになる。次に、レンズアレイは、それぞれのレンズが、各位置からみた「被写体空間の像」を、出射端面付近に結像させる。そのため、カメラでレンズアレイを撮像すると、被写体空間 (の像) の多視点画像が取得できる。このように、レンズアレイを用いて取得した多視点画像は、その全体を“IP (Integral Photography) 画像”と呼び、レンズ一眼に相当する領域を“要素画像”と呼ぶ。IP 画像の例を図 3 (a) に示す。

2.2 “合焦判定”に基づく全焦点画像合成⁹⁾

文献 6) の手法は、light field rendering (LFR)⁸⁾ を拡張したものである。light field とは、光の満たされた実空間のことであり、LFR ではまず、この light field の光線データを 4 次元情報空間である ray space に記録する。自由視点画像合成の際には、ある視点に到着する各光線の経路を追

跡し、ray space から必要な光線を読み出し、補間などを行う。被写体の形状が未知の場合、光線の経路を追跡するにあたって、3 次元空間を focal plane と呼ばれる一枚の平面に近似する。その結果、合成画像では focal plane の付近の物体のみが鮮明に合成され、focal plane から離れた物体はぼけて合成される⁹⁾。

“合焦判定”に基づく合成法は、多数枚の focal plane を用いることにより、上記の問題を解決している。まず、focal plane の奥行きを前後に変えながら、多数枚の画像を合成する。次に、これらの画像から鮮明な領域を抽出 (合焦判定) し、一枚の画像に統合することによって、すべての奥行きで鮮明な画像を合成する。なお、各画像から鮮明な領域を抽出する“合焦判定”は、同じ focal plane に対し 2 種類のフィルタで画像を合成し、それらの差分を評価することで行うが、詳しい原理については文献 6) を参照されたい。

3. レンズアレイ方式自由視点画像合成における“合焦判定”法の適用

本稿では、レンズアレイを用いて多視点画像を取得し、“合焦判定”法を用いて自由視点画像を合成するシステムを提案する。これは、2 章で述べた二つの従来研究を組合せたシステムと考えることができる。

なお、LIFLET の撮像系では、カメラアレイとは異なり、奥行き制御レンズが利用されている。そのため、“合焦判定”法の適用の際に、撮像光学系に合わせて、合成アルゴリズムを変更する必要がある。奥行き制御レンズは、被写体空間の適切な奥行き範囲を鮮明に撮影するために使用するものであるが¹⁰⁾、前述のように、その像は単に縮小され

るだけではなく、奥行き方向に非線形に歪んだものとなる。取得された IP 画像は、レンズによって結ばれた像の多視点画像である。そこで本稿では、画像合成の際に以下の 2 点の変更を行うことにする。

- 奥行き制御レンズによる光線の屈折を考慮した LFR
- focal plane の設定の最適化

それぞれの詳細を以下で説明する。

3.1 奥行き制御レンズによる光線の屈折を考慮した LFR

苗村ら¹¹⁾は図 2 (上) のような撮像系で IP 画像を取得し、一枚の focal plane を用いて自由視点画像を合成する手法を提案している。これは“合焦判定”に基づく画像合成法⁶⁾で用いられている LFR と等価な手法である。しかし、この手法では奥行き制御レンズの影響を考慮していないため、あくまでも、レンズによって結像された空間をレンダリングしていたにすぎない。一方、LIFLET の画像合成⁵⁾には、光線の経路を追跡する際に、奥行き制御レンズによる屈折を考慮し、結像される前の被写体空間をより正確にレンダリングする手法が用いられている。そこで本稿では、苗村の手法¹¹⁾に対して、LIFLET の画像合成法⁵⁾のような屈折を考慮したアプローチを導入し、LFR を行うことにする。

3.2 focal plane の設定の最適化

“合焦判定”による合成法では、多数枚の focal plane に対して LFR を行う。なお、LIFLET の撮像系で取得した多視点画像に適用する場合、focal plane の設定に注意が必要である。

図 2 (上) の撮像系の各パラメータの説明を表 1 に示す。これらのパラメータを用いて、被写体の奥行き z と隣り合う要素画像間の視差 d の関係式を導くことができる。まず、被写体空間の像の奥行き z' と視差 d は、次式に示すように、反比例の関係にある。

$$z' = \frac{n_p f_g}{d} \quad (1)$$

なお、 n_p は要素画像 1 辺の画素数を表す。一方、ニュートンの結像公式より、

$$(z - f_f)(d_{fg} - z') = f_f^2 \quad (2)$$

が成り立つ。(1) 式を (2) 式に代入し、 z を d の関数と考えると次式を導くことができる。

$$z(d) = \frac{f_f^2 n_p f_g}{d_{fg}^2} \cdot \frac{1}{d - \frac{n_p f_g}{d_{fg}}} + \frac{f_f^2}{d_{fg}} + f_f \quad (3)$$

(3) 式を基に、 z と d の関係をプロットしたグラフを図 2 (下、太い実線) に示す。グラフで、 $z = 0$ は、図 2 (上) の奥行き制御レンズの位置と一致させている。図 2 からわかるように、視差 d は正の値だけでなく負の値も持ち、その値が無限大となる奥行き面が存在する。これは奥行き制御レンズを用いることに起因するものであり、本稿では、こ

表 1 各種パラメータ

System parameters.

z	distance between objects and depth control lens
z'	distance between image of objects and lens array
f_f	focal length of depth control lens
f_g	focal length of lens array
d_{fg}	distance between depth control lens focus and lens array

の視差が無限大になる奥行き面を“視差無限大平面”と呼ぶことにする。視差無限大平面の付近は、多視点画像にならないため*、この付近 ($Z_f < z < Z_n$ とする) には被写体を置かないことにする。focal plane を N 個配置する場合を考える。まず、視差無限大平面の前後に配置する focal plane の枚数 (N_n , N_f) を次式に従い定める。

$$N_n = \left\lceil \frac{D_n}{D_n + D_f} \cdot N \right\rceil \quad (4)$$

$$N_f = N - N_n \quad (5)$$

なお、 $[x]$ は x を超えない最大の整数を意味する。 D_n および D_f は視差無限大平面の前後の視差距離であり、次式で求められる。

$$D_n = |d(Z_n) - d(0)| \quad (6)$$

$$D_f = |d(-\infty) - d(Z_f)| \quad (7)$$

なお、 $d(Z_n)$ は $z = Z_n$ に対応する視差である。この時、focal plane の奥行き z_n は、Chai らの“Plenoptic Sampling”理論¹²⁾に従い、視差無限大平面前後のそれぞれの視差空間を等分するように設定する。

$$z_n = z(d_n) \quad (8)$$

$$d_n = \begin{cases} d(Z_n) + D_n \cdot \frac{n - 1/2}{N_n} & (n \leq N_n) \\ d(\infty) + D_f \cdot \frac{(n - N_n) - 1/2}{N_f} & (n > N_n) \end{cases} \quad (9)$$

インデックスの n は、視差 d_n が単調増加するように定めている。 $N = 8$ の時の設定例を図 2 (下) に示す。 z_1 から z_8 は上記の方法で定められた focal plane の奥行きである。

4. 実時間合成のための実装および実験

4.1 実装

実装には、Xeon 3.2GHz CPU, nVIDIA GeForce FX 5900XT GPU を搭載した 1 台の PC を用いた。また“合焦判定”するために、各 focal plane に対し、2 種類のフィルタで画像を合成する必要があるが、本実装では Normal filter と Camera-skipped filter を用いた**。

図 3 に画像合成の流れを示す。(a) は XGA のビデオカメラで撮影した IP 画像の一例である。(b) は、同一の視点位置に対して、focal plane の奥行きを変えながら合成した

* 視差無限大平面付近のある 1 点は、複数の要素画像に同時に撮影されない

** 文献 6) では Nomal filter, Wide-aperture filter, Camera-skipped filter の 3 種類のフィルタが用いられている。

図 3 画像合成の過程
Process flow.

図 5 動空間を対象にした合成の様子
Rendering results for dynamic scenes.

図 6 提案手法と従来手法の画質の比較
Comparison of image quality between
our proposal (top) and the previous (bottom).

図 4 マルチスレッドを用いた実装
Implementation using multi-threads.

画像群である。(b)の画像群から鮮明な領域を抽出・統合することによって、(c)に示すようなすべての奥行きに対して、鮮明な画像を合成することができた。

“合焦判定”による合成法では、各 focal plane に対して、二つのフィルタで画像を合成して、その差分画像を平滑化する必要がある。このプロセスを逐次処理（単ースレッドによる処理）している様子を図 4 (a) に示す。なお、グラ

フの凡例を図 4 (c) に示す。スループットの向上を図るため、画像合成処理と差分画像の平滑化処理を並列化（マルチスレッド化）した様子を図 4 (b) に示す。この時、8 枚の focal plane, 400×300 画素の画面サイズに対して、10.9 fps の速度で画像合成を行うことができた。

動空間を対象にした合成の様子を図 5 に示す。左図では水の流れる様子やそれによって光が屈折される様子が、右図では穴の開いた物体によって生じるオクルージョンが正しく再現されている様子が確認できる。

4.2 従来手法との画質の比較

LIFLET⁵⁾ では、被写体空間の簡易構造モデルを実時間で推定し、そのモデルを用いて自由視点画像を合成していた。この手法では、まず、ステレオマッチング法を用いて各要素画像ごとに一つの奥行きを推定する。次に、推定した奥行きから、被写体空間のポリゴンモデルを作成する。最後に、合成に必要な領域を各要素画像から抽出し、それらの領域をポリゴンに張り合わせることで自由視点画像を合成する。

一方、本稿の“合焦判定”に基づく合成法では合成画像の画素ごとに合焦判定を行うため、簡易構造モデルより精密な奥行き情報が推定される。XGA のカメラでも、視覚的な

品質の差を確認することが可能であるが、さらに解像度の高いカメラを用いることにより、この差が明確になる。そこで、本稿では高解像度カメラ (Canon EOS D60) を用いて、静止画の IP 画像 (3076×2048 pixels, $n_p = 130$ pixels) を撮り、提案手法と従来手法の画質の比較を行った。本論文で提案する全焦点 LIFLET による合成画像を図 6 上に、LIFLET による合成画像を図 6 下に示す。提案手法の方がより鮮明な画像が合成されていることがわかる。

5. む す び

本稿では、レンズアレイを用いて取得した多視点画像を基に、“合焦判定”による全焦点自由視点画像を合成する実時間 IBR システムを提案した。そのために、まず、LIFLET の撮像系に用いられている奥行き制御レンズによる光線の屈折を考慮した LFR を行った。また、被写体の奥行きと要素画像間の視差の関係を明らかにし、これを基に画像合成に用いる focal plane の最適な置き方について検討した。さらに、PC に上記のアルゴリズムの実装を行い、動空間を対象に全焦点画像を合成できることを示した。最後に、高解像度の IP 画像で画像合成を行い、従来手法より画質が改善されたことを確認した。

なお、現段階の合成画像にはまだ“合焦判定”に失敗する部分があるため、今後、その原因を明らかにし、さらに画質を改善する必要がある。また、筆者らのグループは、本システムを拡張したアプリケーションの開発を行っていく予定である。

本研究に関して、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) T. Naemura, J. Tago, and H. Harashima: “Real-Time Video-Based Modeling and Rendering of 3D Scenes”, IEEE Computer Graphics and Applications, **22**, 2, pp. 66 – 73 (Mar. 2002)
- 2) 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)
- 3) B. Wilburn, M. Smulski, K. Lee, and M.A. Horowitz: “The Light Field Video Camera”, Proc. Media Processors 2002, SPIE Electronic Imaging 2002, (Jan. 2002)
- 4) C. Zhang and T. Chen: “A Self-Reconfigurable Camera Array”, Proc. 15th Eurographics Symposium on Rendering (June 2004)
- 5) T. Yamamoto, M. Kojima, and T. Naemura: “LIFLET: Light Field Live with Thousands of Lenslets”, ACM SIGGRAPH 2004 Emerging Technologies, etech.0130, (Aug. 2004)
- 6) 高橋 桂太, 久保田 彰, 苗村 健: “Light Field Rendering における合焦判定と全焦点画像合成”, 信学論, **J88-D-II**, 3, pp. 573 – 584, (Mar.2005)
- 7) 洗井 淳, 岡野 文男, 星野 春男, 湯山 一郎: “屈折率分布レンズを用いたインテグラルフォトグラフィ撮像方式の基礎検討”, 映情学誌, **51**, 11, pp.1927–1934, (Nov. 1997)
- 8) M. Levoy, P. Hanrahan, “Light Field Rendering”, Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 31–42, (Aug. 1996)
- 9) A. Isaksen, L. McMillan, and S. J. Gortler, “Dynamically Reparameterized Light Fields”, Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 297–306, (July 2000)
- 10) 小島 将, 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”, 映情学誌, **59**, 4, pp. 569 – 580,

(Apr. 2005)

- 11) T. Naemura, T. Yoshida and H. Harashima: “3-D computer graphics based on integral photography”, Opt. Express, **8**, 4, pp. 255 – 262, (Feb. 2001)
- 12) J. -X. Chai, X. Tong, S. -C. Chany, H. -Y. Shum, “Plenoptic Sampling”, Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 307–318, (July 2000)

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.

小島 将

2003 年, 東京大学工学部電子情報工学科卒業. 2005 年, 同大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了. 同年, NHK 入局. 在学中, 実世界 3 次元モデリング, 実写に基づく画像合成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. 2003 年, 同大学院情報理工学系研究科修士課程修了. 現在, 同大学院同研究科博士課程に在籍. 2005 年より日本学術振興会特別研究員. 3 次元画像処理, 実写に基づく画像合成に関する研究に従事.

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.