

Light Field Renderingにおける合焦判定法の空間解析

高橋 桂太[†] 苗村 健[†]

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科

あらまし 筆者らは、多視点画像を入力として、高品質な自由視点画像合成を可能にするため、light field rendering法を拡張した全焦点レンダリング法を提案してきた。本稿では、その核になる合焦判定法に関して、空間領域で詳細に議論する。空間領域の議論によって下記のメリットがもたらされる。(1) 提案手法の適用範囲を、非正規格子状のカメラアレイに拡張できる。(2) 提案手法と、既存のビジョン技術 (space-sweep 法) との関係が明らかになる。(3) 合焦判定の精度やオクルージョンの影響について議論できる。

キーワード light field rendering, 全焦点自由視点画像, 合焦判定法, space-sweep 法

Spatial Domain Analysis on Focus Measurement for Light Field Rendering

Keita TAKAHASHI[†] and Takeshi NAEMURA[†]

[†] School of Inform. Scien. & Tech., The Univ. of Tokyo

Abstract For synthesizing free-viewpoint images of high quality from a set of multi-view images, we proposed a novel all in-focus rendering method by combining light field rendering and a focus measurement algorithm. This paper introduces a detailed spatial domain analysis of the focus measurement. The advantages of this analysis are as follows: First, the application scope of the proposed method is extended to general camera-arrays that do not have tetragonal grid structure. Secondly, the relation between the proposed method and space-sweeping method is clarified. Finally, we can see some possibility for discussing the accuracy of the focus measure and the effect of occlusions on it.

Key words light field rendering, all in-focus free-viewpoint image, focus measurement, space-sweeping

1. ま え が き

イメージペーストレンダリング [1], [2] とは、あらかじめ取得された多視点画像を用いて、自由視点画像を合成する手法である。一般に、入力画像の取得密度を妥当な範囲に抑えるためには、多視点画像に加えて被写体の形状モデルを利用することが必要である (理論的根拠については、文献 [3] を参照されたい)。形状モデルとして、ポリゴンモデル、ボクセルモデル、多層平面モデルなどが用いられてきたが、本稿では特に多層平面モデルに着目する。この分野の先行研究としては、layered depth images [4]、多層 focal surface モデル [5]、layered lumigraph [6] などを挙げることができる。

一般に、多層平面モデルを用いて自由視点画像を合成する際には、合成画像の各画素が、どの平面に属しているのかを決定する必要がある。これを奥行き割り当てと呼ぶことにする。従来の手法 [4]~[6] では、被写体の形状を表現する中間データ (各カメラから見たデプスマップや、layered depth images など) があらかじめ得られていることを前提として、ランタイム

の奥行き割り当てが実現されていた。中間データの取得/構築は、あらかじめオフラインで行うことが想定されているため、これらの手法を、そのまま動的なシーンに適用することは困難であると考えられる (注1)。

一方、筆者らは、単一の平面モデルに基づいて自由視点画像を合成する light field rendering (LFR) 法 [8] を拡張することにより、オフライン処理を前提としない、新しい多層平面レンダリング手法を提案してきた [9]~[11]。LFR 法では、鮮明に合成できるのは、仮定された平面付近の物体のみである。提案手法では、まず、平面モデルを仮定する位置を変化させながら、LFR 法によって多数枚の画像を合成する。次に、それら合成画像を分析して、鮮明に合成できている部分を抽出する (合焦判定)。最後に、抽出された部分を1枚の画像に統合することによって、最終的な合成画像を得る。この手法では、各画素に対

(注1): 筆者らの研究グループでは、ステレオ計測によるデプス推定を行う専用のハードウェアを用いることにより、動的なシーンを多層平面モデルでレンダリングすることに成功している [7]。しかし、単一の視点から見たデプスマップのみを用いるので、合成画像に“穴”が生じる問題を根本的に解決できない。

する奥行き割り当ては、LFR法による合成画像に対する合焦判定によって、ランタイムの処理のみで実現されている。合焦判定は視点位置に依存した処理であるため、毎フレームごとに行う必要があるが、インタラクティブなフレームレートで画像合成が可能であることが確認されている。

従来の筆者らの文献[9],[10]では、周波数領域での議論[3]に基づいて、合焦判定のアルゴリズムに理論的な裏づけが与えられた。本稿では、合焦判定法を空間領域で詳細に議論する。空間領域での議論によって、次のようなメリットがもたらされる。

(1) 提案手法の適用範囲を、非正規格子状のカメラアレイに拡張できる。従来の周波数領域の議論は、シャノンのサンプリング理論に基づくものであったため、光線情報を等間隔でサンプリングすることが前提となっていた。したがって、その適用範囲は、カメラを平行かつ等間隔に並べた正規格子状のカメラアレイに限定されていた。しかし、空間領域で合焦判定法を定義し直すことにより、本手法の適用範囲を、非正規格子状のカメラアレイに対して拡張することができる。

(2) 提案手法と、既存のビジョン技術(space-sweep法)との関係が明らかになる。多視点画像を元にして、3次元形状を復元する手法に、space-sweep法がある。空間領域の解析により、LFRにおける合焦判定法は、space-sweep法を簡易に実装したものであることが明らかになる。提案手法は、形状復元ではなく、画像合成を目的としているため、一般のspace-sweep法とは最適化の方向が異なっている。

(3) 合焦判定の精度やオクルージョンの影響について議論できる。従来の周波数領域における解析では、オクルージョンの影響は無視できるという仮定を置いていた。また、スペクトラムの存在領域(サポート領域)だけを議論し、振幅は考慮していなかったため、合焦判定の精度を議論することはできなかった。しかし、空間領域の解析によって、オクルージョンの影響や合焦判定の精度について、直接的に議論する可能性が開ける。

2. 基本的なアルゴリズム

2.1 light field rendering 法

3次元のシーンを表現する際に、被写体の形状や材質をモデル化するのではなく、むしろ空間を伝播して観察者の眼に到達する光線をモデル化するというアプローチがある[12]~[16]。light field rendering (LFR)は、そのような手法の一つである。図1を用いて、画像合成のアルゴリズムを示す。

入力多視点画像は、密に配置されたカメラによって取得される。本来カメラは2次元アレイ上に配置されるが、図1では簡単のため1次元の配列のみを示した。画像合成は、レンダリングカメラを任意の位置に置き、その位置に到達する個々の光線の色を求めることによって実現される。このとき、アレイのカメラ間を通過する光線について、適切な補間処理を行うことが必要である。

例えば、図1に示した光線 r_d を求める場合を考える。まず、focal planeを定義し、すべての光線がこの面上から発していると仮定する。これは、対象空間全体の奥行きを、focal plane

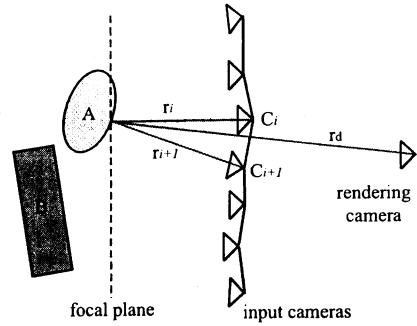


図1 LFRの原理
Fig.1 Algorithm of LFR

によって近似していることと等価である。次に、所望の光線と、入力カメラアレイ面との交点を求める。所望の光線 r_d は、その交点の近傍のカメラ C_i 、 C_{i+1} を参照して、focal plane上の同一の点から発している光線 r_i 、 r_{i+1} の重み付け和として求められる。このようにして、レンダリングカメラに到達するすべての光線の色を求めることによって、画像合成が実現される。

2.2 合焦判定の原理

被写体が実際にfocal planeに近い位置にある場合、その物体は上記の手法によって鮮明に合成される。しかし、focal planeから離れた位置にある物体には、合成の際にぼけや二重像が発生してしまう。これが、LFRにおける焦点ぼけである[5],[17]^(注2)。

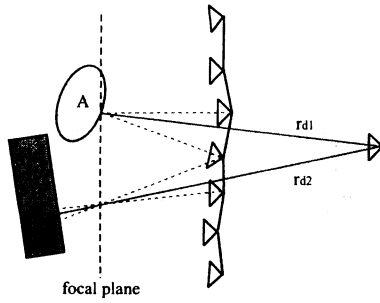
筆者らは、文献[9],[10]で、同一の合焦距離において異なる方法で画像を合成し、それらの画像間の差分を用いて合焦判定を行う手法を提案した。画像合成の際の補間処理は、周波数領域では、再構成フィルタとしてモデル化されるが[3]、本稿ではその議論を割愛し、空間領域でより直感的に説明する。文献[9],[10]で展開された周波数領域の議論では、入力カメラは、厳密に単一の平面上に平行かつ等間隔に配置されている必要があったが、本稿では各カメラの位置や姿勢は自由であるとして議論する。

本稿で用いる2つの合成手法を図2に示す。一方では、すべての入力多視点画像を用いて合成を行う(モードA)。他方は入力多視点画像を1つおきに間引いたものを用いる(モードB)。双方のモードで、視点位置およびfocal planeの奥行き(合焦距離)は同一であるとする。

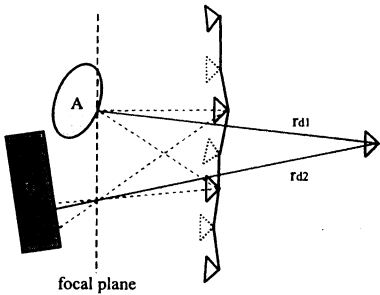
ここでは、物体の反射特性がランバート(ある一点の色は見る方向に依存しない)であり、かつオクルージョンの問題が無視できると仮定する。物体の表面がfocal plane上にある場合、どちらのモードでも、合成される光線の色は同じである(例として r_{d1})。これは、どちらのモードでも、同一の点から発する光線が合成に使用され、ランバート仮定により、それらの光線の色は同じだからである。しかし、物体がfocal plane上にない場合、両者において合成される光線(r_{d2})の色には違いが生じ得る。

そのため、双方のモードによる合成画像を比較すると、焦点

(注2):本稿では、入力多視点画像には焦点ぼけがないものと仮定する。



(a) mode A



(b) mode B

図2 2つのモードによる画像合成

Fig. 2 Image synthesis by mode A and mode B.

が合っている領域はほとんど同じように合成されているのに対して、焦点が合っていない領域は差異が生じ得ることになる。したがって、これら2枚の画像の差分値を評価することによって、焦点が合っている領域を検出することができる。

2.3 多層平面モデルによる全焦点画像合成

ここまでの2つの節では、単一平面モデルを用いた自由視点画像合成法と、その合成画像に対する合焦判定の手法を説明した。これらの2つを組み合わせることにより、多層平面モデルによる画像合成が表現される。

まず、focal planeを配置する N 個の奥行き候補 $z_n (n = 0, 1, \dots, N-1)$ を、次の式にしたがってあらかじめ定めておく。

$$\frac{1}{z_n} = \frac{n}{N-1} \left(\frac{1}{z_{\min}} - \frac{1}{z_{\max}} \right) + \frac{1}{z_{\max}} \quad (1)$$

z_{\max} , z_{\min} は、対象とするシーンの奥行き(入力カメラシステムからの距離)の最大値および最小値である。

与えられた視点位置に対する画像合成の手順は下記の通りである。

(1) “多焦点”画像の合成:

それぞれの奥行き z_n に対して、2つのモードのLFR法で画像を合成する。“合焦”距離 z_n 、モードAで合成された画像を $I_A^{(n)}(x, y)$ 、モードBによるものを $I_B^{(n)}(x, y)$ と表記する。

(2) “合焦”判定:

まず、同一の z_n で、異なるモードで合成された画像間の差分

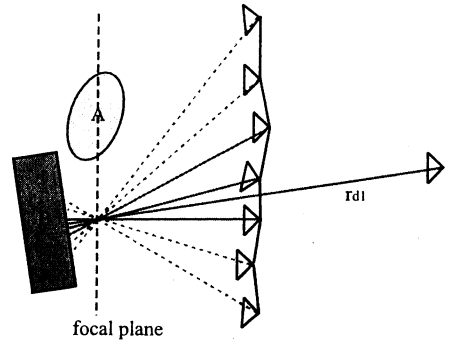


図3 space-sweep法と提案手法との比較

Fig. 3 Comparison between space-sweeping and our method.

を取る。

$$Sub^{(n)}(x, y) = |I_A^{(n)}(x, y) - I_B^{(n)}(x, y)| \quad (2)$$

差分画像を、ブロック平滑化する(M は正の整数)。

$$F^{(n)}(x, y) = \sum_{-M \leq i, j \leq M} \frac{Sub^{(n)}(x+i, y+j)}{(2M+1)^2} \quad (3)$$

各画素に対して、最適な奥行き $n(x, y)$ を次のように定める。

$$n(x, y) = \arg \min_{0 \leq n \leq N-1} F^{(n)}(x, y) \quad (4)$$

(3) “全焦点”画像合成:

すべての点 (x, y) について、最も“焦点”が合っている画像 $I_A^{(n(x, y))}(x, y)$ から画素値を読み出すことにより、最終的な合成画像 $I(x, y)$ を得る。

$$I(x, y) = I_A^{(n(x, y))}(x, y) \quad (5)$$

こうして得られた合成画像は、被写体全体を鮮明に捉えたもの(全焦点画像)となっている。これは、LFR法を拡張して、全焦点画像を得る手法であることから、筆者らはこれを、全焦点LFR法と呼んでいる。

3. Space-Sweep法との比較

前章で述べたように、提案手法では、focal planeの位置を前後に移動しながら、2つのモードで画像を合成し、それらの画像の差分を評価することで、合焦判定(奥行き推定)を行う。これは見方を変えると、ある光線の奥行きを求める際に、2つのモードで合成に利用されるサンプル光線の色の一致度を、間接的に評価していることになる。すなわち、図3において光線 rd_1 の奥行きを求める際、focal planeの位置を移動しながら、図中の実線で示した光線の一致度を評価している、ということである。これは原理的には、多視点画像を元に形状復元を行うspace-sweep法[18](分散空間法[19], voxel coloring法[20]と呼ばれることもある)と等価である。

しかし提案手法は、下記の2つの点で、space-sweep法とは異なっている(注3)。

(注3): Zhangらのシステム[21]では、(1)に関しては、従来のspace-sweep法と同様のアプローチを取っているが、(2)については、筆者らと同じ選択をしている。

(1) space-sweep 法では、入力画像の画素値の一致度を直接評価するが、提案手法では、2つのモードによる合成画像の差分という形で、間接的に評価する。

(2) 一般的な space-sweep 法では、一致度の評価はすべての入力画像を対象として行う(図3の実線、点線すべての光線を用いる)が、提案手法では、所望の光線の近傍のカメラ画像だけ(実線のみ)を用いて、局所的に一致度を評価する。

(1)に関しては、処理コストの面で相違が生じる。space-sweep 法では、光線の一致度を評価する際に、二乗誤差や分散など、比較的計算コストが高い評価値が用いられ、その計算コストは、入力カメラの数に比例して増大する。一方、提案手法では、ある奥行きで2枚の画像を合成できれば、それらの画像の減算(および減算結果に対する簡易な平滑化)だけで、評価値を得ることができる。LFR法による画像合成は、市販のグラフィックスカードでも充分高速に行うことができ、今後もますます高速になってゆくことが期待される。また差分計算のコストは、入力カメラの台数に依存せず、合成画像の解像度に依存するものである。したがって、提案手法は、カメラの台数の増加に対してスケールラブルであり、かつトータルの処理時間をより低く抑える見込みがあるアプローチを取っている。

(2)に関して、近傍のカメラのみを用いることには、次の3つの点でメリットがある。まず1つ目に、完全なランバート反射ではないシーンを扱うことが可能になる。反射特性が完全なランバートではなくても、局所的にはランバートで近似できる場合があるからである。2つ目に、オクルージョンによる影響によって生じる問題を抑えることができる。ある点の奥行きが正しく推定されるためには、その点が評価に用いられる各カメラから見えていなければならない。入力カメラすべてに対してこの条件が満たされていない場合、近傍の数台のカメラに限定すれば、この条件が満たされる場合が多い。3つ目のメリットは、近傍のカメラのみを用いるほうが、必要な focal plane の枚数が少ないので、結果として画像合成のコストを下げるができる、という点である。

3つ目の点について、図3を用いて説明する。ここでは、focal plane の位置が、物体の表面からやや離れている場合を考える。このとき、評価の対象となる光線は、物体表面上で、ある程度の「広がり」をもった領域から放射されている。この「広がり」の範囲が、入力カメラおよびレンダリングカメラの画素ピッチに対して十分に小さい場合、この領域は事実上、「一点」とみなすことが可能である。この領域を「一点」とみなすことができる奥行きのずれの範囲は、光線の「広がり」の度合いによって決まる。したがって、この範囲は、すべての入力カメラを参照するよりも、近傍のカメラのみを参照したほうが、より広くなること分かる。言い換えれば、近傍のカメラのみを用いた場合、奥行き方向の量子化ステップをより大きくすることができる。これは、推定できる奥行きの分解能が低いことを意味するので、形状復元の観点からはデメリットである。しかし、全焦点画像合成という観点で考えると、これは、シーン全体をカバーするのに必要な focal plane の枚数が少なくて済むことを意味する。

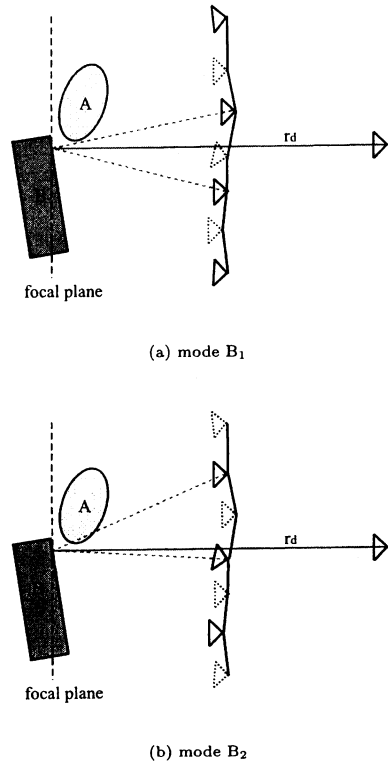


図4 2種類の間引きモードによる合焦判定
Fig. 4 Focus measurement with 2 kinds of skipping mode.

4. 2種類の間引きモードによる合焦判定

従来の筆者らの文献[9]~[11]では、モードBの合成における画像の間引き方は一通りであった。本節では、二通りの間引き方(2次元アレイでは4通り)を用いることの意義について、オクルージョンの問題、および合焦判定の精度の観点から議論する。図4に示したように、一方の間引き方をモードB₁、他方をモードB₂と呼ぶことにする。

4.1 オクルージョンについての考察

本節では、間引きを行わないモードAで正しく合成されている光線を対象として議論を進める。図4に示した光線 r_d は、モードB₁ではオクルージョンの影響を受けることなく、正しく合成される。しかし、モードB₂では、補間に用いる一方の光線が、前方のオブジェクトによって遮られるため、正しい合成を行うことができない。したがって、モードAとB₁の差分を評価した場合、光線 r_d は正しく合焦と判定されるが、モードAとB₂の差分を評価した場合には、合焦と判定されない。

このように、モードB₁、B₂の一方のみがオクルージョンの影響を受ける場合、もう一方のモードを用いることにより、正しい合焦判定を行うことができる。このようにすることによって、モードB₁、B₂のいずれか一方のみを用いる場合と比較して、オクルージョンが引き起こす問題を低減することができる。

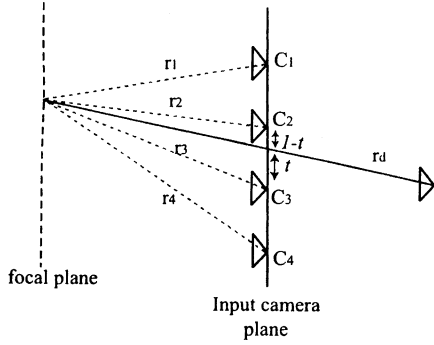


図5 パラメータの取り方(合焦判定の精度の議論)

Fig. 5 Parameterization for quantitative discussion.

と考えられる。ただし、本手法では、被写体の形状が未知であることを前提としているため、オクルージョンが合成画像のどの部分に影響を与えているのかを判断することは困難である。この問題を効果的に扱う具体的なアルゴリズムは、今後の検討課題である。

4.2 合焦判定の精度について

本節では、定量的な議論を展開するため、入力カメラが同一平面上に平行かつ等間隔に並んでいる場合を考える。図5には、所望の光線 r_d の近傍の4つのカメラのみを図示している。 r_d は、カメラ C_2 と C_3 の間を、 $1-t:t$ に内分する点を通しているとする。また、これら4つのカメラに写っている範囲では、非ランバート反射やオクルージョンの影響が無視できるものと仮定する。

モード A, B_1 および B_2 によって合成される光線を、光線 r_1, r_2, r_3, r_4 を用いて表す。ここでは、一般的な補間アルゴリズム [8] に従い、合成に用いるサンプル光線は、カメラ面上での所望の光線 r_d との距離に応じて、線形に重み付けされるものとする。モード B_1 では、カメラ C_2 と C_4 が間引かれ、モード B_2 では、 C_1 と C_3 が間引かれることにする。

$$r_{d(A)} = tr_2 + (1-t)r_3 \quad (6)$$

$$r_{d(B_1)} = \frac{t}{2}r_1 + \frac{2-t}{2}r_3 \quad (7)$$

$$r_{d(B_2)} = \frac{1+t}{2}r_2 + \frac{1-t}{2}r_4 \quad (8)$$

モード A による合成画像と、モード B_1 による合成画像の差分をとった場合、光線 r_d に関する差分は下記のように表される。

$$\begin{aligned} sub(A, B_1) &= |r_{d(A)} - r_{d(B_1)}| \\ &= \frac{t}{2}|(r_2 - r_1) + (r_2 - r_3)| \\ &= \frac{t}{2}c(r_2, r_1, r_3) \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、関数 c は、光線の色の一致度を評価する関数であり、次のように定義される。

$$c(x, y, z) = |(x - y) + (x - z)| \quad (10)$$

合焦判定は、focal plane の位置を変化させながら、差分値

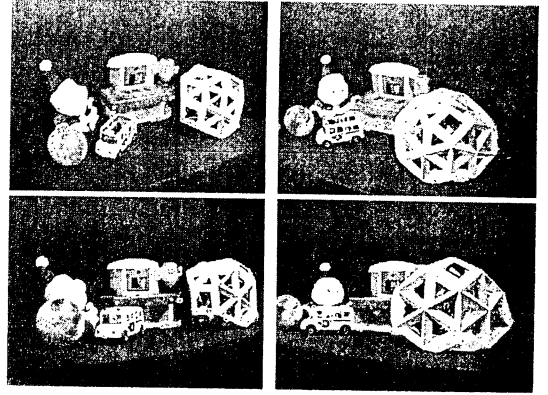


図6 入力画像多視点画像の例

Fig. 6 Examples of input multi-view images.

$sub(A, B_1)$ を評価することによって行われる。 $sub(A, B_1)$ は、 $c(r_2, r_1, r_3)$ に、 $t/2$ のゲインを掛け合わせた形になっている。したがって、 $t \approx 0$ のときには、 $sub(A, B_1)$ の変動が小さくなるため、丸め誤差の影響を受けやすくなる(合焦判定の精度が劣化する)。

一方、モード A と、モード B_2 との差分は次の通りである。

$$\begin{aligned} sub(A, B_2) &= |r_{d(A)} - r_{d(B_2)}| \\ &= \frac{1-t}{2}c(r_3, r_2, r_4) \end{aligned} \quad (11)$$

この式では、ゲインは $(1-t)/2$ であり、 $t \approx 1$ で合焦判定の精度が劣化する。

ここで、(9) 式と (11) 式の和を取る。

$$\begin{aligned} sub(A, B_1) + sub(A, B_2) &= \frac{t}{2}c(r_2, r_1, r_3) + \frac{1-t}{2}c(r_3, r_2, r_4) \end{aligned} \quad (12)$$

この式では、第1項のゲインが小さくなるときに、第2項のゲインが大きくなって、全体のゲインが補われる。したがって、任意の t に対して、丸め誤差の影響を受けにくくなり、安定した精度で合焦判定を行うことができると考えられる。これは、合焦判定の際に、(2) 式の代わりに、次の式を用いることに相当する。

$$Sub^{(n)}(x, y) = \sum_l |I_A^{(n)}(x, y) - I_{B_l}^{(n)}(x, y)| \quad (13)$$

1次元のカメラアレイでは、間引き方は2通りなので、 $l = 1, 2$ であるが、2次元のカメラアレイでは4通りの間引き方があるため、 $l = 1, 2, 3, 4$ である。

5. 実験

本稿では、合焦判定に基づく全焦点画像合成法を、非正規格子状のカメラアレイに適用した結果を報告する。本実験では、カーネギーメロン大 先端マルチメディア研究室のカメラアレイ [22] で撮影された多視点画像データを利用する。カメラアレイは、48台(縦6台、横8台)のカメラで構成される。カメラの配置は等間隔ではない。また、それぞれのカメラの光軸

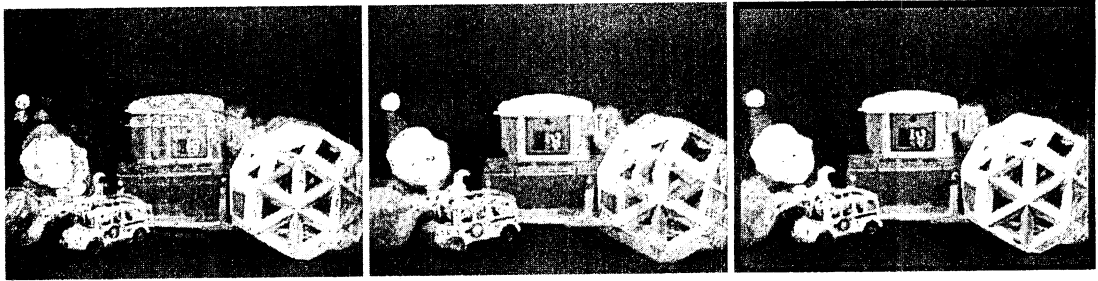


図7 合成画像の例：(左) 手前の物体に合焦、(中央) 奥の物体に合焦、(右) 全焦点画像。

Fig. 7 Examples of synthesized images: the nearest object is in-focus (left), the farthest object is in-focus (center), everything is in-focus (right).

は、被写体を画面の中心に捉えるように調整されている。各カメラの内部パラメータ（焦点距離、投影中心等）および外部パラメータ（位置、姿勢）は既知であり、取得される画像の画素数は、 320×240 画素である。図6に、アレイの四隅の位置で撮影された4枚の画像を示す。

図7に合成画像（ 320×240 画素）の一例を示す。左と中央の画像は、2.1に示したアルゴリズムにしたがって、単一の focal plane を用いて合成された画像である。左の画像では手前の物体に、中央の画像では奥の物体に焦点が合っている。焦点から外れている部分には、二重像の効果が強く表れている。右の画像は、提案手法で合成した全焦点画像である。すべての被写体を鮮明に捉えた画像が合成できていることが分かる。この例では7枚の focal plane を用いている。合焦判定には、4種類の間引きモードを用い、(13)式によって差分を評価している。処理レートは、汎用のPC（CPU: Pentium 4 3.2 GHz, GPU: NVIDIA Geforce FX 5800）上で、4.6fpsであった。

6. むすび

本稿では、多視点画像を入力として高品質な自由視点画像を合成する全焦点 light field rendering 法に着目し、その鍵となる合焦判定アルゴリズムを、空間領域で詳細に解析した。従来、本手法の適用範囲は、正規格子状のカメラアレイに限定されていたが、本稿では、その適用範囲を非正規格子状のカメラアレイにも拡張し、実験によってその有効性を確かめた。今後は、オクルージョンの影響や、合焦判定の精度に関する議論についても、実験による裏づけを行う必要がある。

謝辞：有益な議論をしてくださった東京大学の原島博教授に感謝します。本稿で使用した多視点画像データは、カーネギーメロン大 先端マルチメディア研究室の Cha Zhang 氏によって提供されたものです。

文 献

- [1] H. -Y. Shum, S. B. He, S. -C. Chan. "Survey of Image-Based Representations and Compression Techniques", IEEE Trans. CSVT, 13, 11, pp. 1020 - 1037, 2003.
- [2] C. Zhang, T. Chen, "A survey on image-based rendering - representation, sampling and compression," EURASIP Signal Processing: Image Communication, 19, 1, pp. 1 - 28, 2004.
- [3] J.-X. Chai, X. Tong, S. -C. Chany, H. -Y. Shum. "Plenoptic Sampling", Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 307 - 318, 2000.
- [4] J. Shade, S. Gortler, L.-W. He, R. Szeliski, "Layered Depth Images," Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 231 - 242, 1998.
- [5] A. Isaksen, M. Leonard, S. J. Gortler, "Dynamically Reparameterized Light Fields," Technical Report MIT-LCS-TR-778, 1999.
- [6] X. Tong, J. Chai, H. -Y. Shum, "Layered Lumigraph with LOD Control," The Journal of Visualization and Computer Animation, 13, 4, pp. 249 - 261. 2002.
- [7] T. Naemura, J. Tago, H. Harashima, "Real-Time Video-Based Modeling and Rendering of 3D Scenes," IEEE CG & A, 22, 2, pp. 66-73, 2002.
- [8] M. Levoy, P. Hanrahan. "Light Field Rendering", Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 31 - 42. 1996.
- [9] K. Takahashi, A. Kubota, T. Naemura, "All in-Focus View Synthesis from Under-Sampled Light Fields," Proc. ICAT, pp. 249 - 256, 2003.
- [10] K. Takahashi, A. Kubota, T. Naemura. "A Focus Measure for Light Field Rendering", Proc. IEEE ICIP, 3, pp. 2475 - 2478, 2004.
- [11] K. Takahashi, T. Naemura. "All in-Focus Light Field Viewer", ACM SIGGRAPH Posters, no. 48, 2004.
- [12] E. H. Adelson, J. Bergen, "The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision," Computational Models of Visual Processing, pp. 3 - 20, MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [13] L. McMillan, G. Bishop, "Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System," Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 39 - 46, 1995.
- [14] 藤井, 金子, 原島, "光線群による3次元空間情報の表現とその応用", テレビ誌, 50, 9, pp. 1312 - 1318, 1996.
- [15] S. J. Gortler, R. Crzeszczuk, R. Szeliski, M. F. Cohen, "The Lumigraph", Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 43 - 54, 1996.
- [16] H.-Y. Shum, L. -W. He, "Rendering with Concentric Mosaics", Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 6 - 11, 1999.
- [17] A. Isaksen, L. McMillan, S. J. Gortler, "Dynamically Reparameterized Light Fields," Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 297 - 306, 2000.
- [18] R. T. Collins, "A Space-Sweep Approach to True Multi-Image Matching," Proc. IEEE CVPR, pp. 358 - 363, 1996.
- [19] T. Fujii, H. Harashima, "Data Compression and Interpolation of Multi-View Image Set," IEICE Trans. Inf. & Syst., E77-D, 9, pp. 996 - 1004, 1994.
- [20] S. M. Seitz, C. R. Dyer, "Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring," Proc. IEEE CVPR, pp. 1067 - 1073. 1997.
- [21] C. Zhang, T. Chen, "A Self-Reconfigurable Camera Array", Proc. EGSR 2004.
- [22] <http://amp.ece.cmu.edu/projects/MobileCamArray/>