

合成開口撮影法によるデフォーカスコントロール

楠本 夏未 日浦 慎作 佐藤 宏介

大阪大学大学院 基礎工学研究科
E-mail:kusumoto@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

概要：撮影後に写真の焦点を変化させ、ぼけ部分の描写を制御する研究は多く行われているが、どれも特別な装置、または撮影法を必要とする。また、一般に普及している小型デジタルカメラでは十分な大きさのぼけを得ることが出来ず、主要被写体を引き立たせるような作画が出来ない。そこで本研究では、小型デジタルカメラのみを使用し、位置・姿勢が未知の複数視点から撮影を行って得た画像群をもとにユーザの意図した「ぼけ」を含む画像を作成する手法を提案する。更に、合成時にぼけ像の大きさや形状、重み付けを変化させることで、様々な「ぼけ味」を作り出す手法も提案する。また、以上のようなシステムで作成したぼけ画像を評価する。

Defocus Control by Uncalibrated Synthetic Aperture

Natsumi Kusumoto Shinsaku Hiura Kosuke Sato

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Abstract : There are a lot of researches for controlling the focus and blur of previously taken pictures. However, all of these researches require some special devices or techniques for taking pictures. Besides, enough size of blur can not be created with an ordinary compact digital camera, so it is hard to take pictures with impressively attracting main subject. Therefore, In this paper, we propose a method to create the image with demanded blur from the set of images taken by a compact digital camera placed at unknown viewpoints. Moreover, it is possible to produce various taste of blur by changing size, shape or weight of the blur kernel. In addition, we evaluated the quality of blurred images made by our system.

1 はじめに

写真を撮影するにあたって、画面内の特定の被写体を意図的にぼかす表現技法がある。この表現法は、ぼけを取り入れることによって柔らかさを演出したり主張したいものに目を向けさせる等、様々な効果が考えられ、多方面からの需要がある。

近年、写真を撮影する際どこへでも手軽に持っていけるコンパクトデジタルカメラが一般的になっている。しかしこのようなカメラでは、撮像素子が非常に小さいことやレンズと撮像素子の位置関係の調

節の自由度が低いことから、大型カメラなどに比べて撮影時に意図したとおりのぼけを作り出すことが難しい。意図したぼけを作り出すには、大型カメラや特殊なレンズを使わなければならない、誰もが手軽に撮影できるわけではない。また、実際に撮影を行わなければ出来上がった作品がどうなっているかわからないことが多く、撮影後に望みのぼけでないことがわかった時は再度撮影しなければならない。そこで近年、写真撮影者の負担の軽減を図ったり、エンターテイメントのための新しい技術として、コンピュータによる画像処理で写真撮影の支援を行う技

術が研究されている。

その中でも、ぼけの描写や焦点面の変更を可能にする手法をデフォーカスコントロールと呼び、現在様々なアプローチからこれに関する研究が行われている。

Stanford の R. Ng らは、通常のカメラの撮像素子の直前に、細かいマイクロレンズを格子状に並べた板を取り付けた Plenoptic Camera を提案した [1]。複数の画素に対してマイクロレンズ 1 個を対応させることにより各レンズに光が届いた角度を記録し、撮影後のぼけの制御を可能にしている。一方 MIT の Edward H. Adelson らは、レンズの奥にレンチキュラーレンズを入れることで同じ効果を得るものを提案した [2]。ただしこれらの手法では、主レンズの口径によって決まる大きさ以上のぼけを得ることはできない。

A. Isaksen らは、多眼カメラによって撮影された画像群に合成開口法を適用することで、撮影後にぼけを制御する手法を提案した [3]。現在ではこのような目的に利用する多眼カメラが市販されている。2006 年、T. Georgiev らはカメラのレンズの前に複眼レンズを装着し、複数の視点から同じ対象を同時に撮影した画像群を得るレンズを発表した。得られた画像群をデジタル合成することで焦点を任意に変化させる処理を行うことができる [4]。

理想的なぼけ味を得るために、特殊な光学系を内蔵したレンズが発表されている。Sony の STF (スムーズ・トランス・フォーカス) レンズ [5] は、特殊効果フィルタによりぼけ像が周辺に行くほど薄くなり、柔らかく滑らかなぼけを得ることができる。

以上のように現在、デフォーカスコントロールに関する研究は多く存在するが、どれも特別な機材や撮影法を必要とする。これは機材を保有する人に撮影者を限定したり、撮影の機会を限定してしまう。そこで本稿では、特別なカメラやレンズを必要とせず、一般に普及している小型デジタルカメラのみを使用し、簡単な撮影方法で撮影した画像からユーザの意図した「ぼけ」を含んだ写真を、撮影後、合成開口撮影法により作り出す手法を提案する。これによって、より多くの人が手軽にデフォーカスコントロールを楽しめるシステムの提案を目的とする。

また、従来の合成開口撮影法に関する研究では、ぼけの美しさの追求や評価が十分になされていない。そこで本研究では、ぼけの生成段階で様々な「ぼけ味」を作り出すことも目的とする。奥行き情報や撮

影点の位置関係を利用することによって、ぼけの大きさや形状、重み付けの変化を行い「ぼけ味」に変化をつける。

2 提案手法

本稿で提案するシステムでは、撮影者は被写体を口径の比較的小さなデジタルカメラや絞りを絞ったカメラで、微妙に異なる視点から複数枚撮影する。撮影点に対する条件としては、撮影点同士が離れすぎていることと、同じ対象を撮影していることを満たしていれば良く、撮影点が整列していることや事前に撮影位置関係がわかっている必要は無い。ただし、撮影中にシーンは変化しないものと仮定する。図 1 に提案手法のイメージ図を示す。

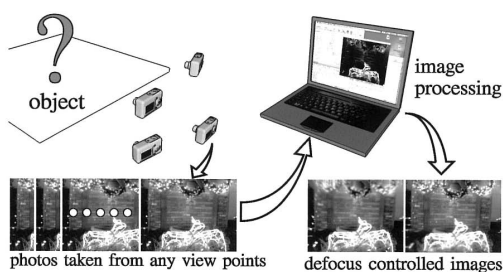


図 1: システム構成図

再現したい口径の大きさだけデジタルカメラを密に動かして撮影した像を加算平均することで、より大きな口径で撮影した場合と同じ効果が得られる。このように、小型デジタルカメラで撮影した画像に対して合成開口法を適用する。

しかし従来手法と異なり、撮影点が規則正しく整列していないため、撮影時のカメラ位置姿勢を補正する処理が必要になる。具体的には

- 撮影時のカメラ姿勢が定まっていなかったり、画像上での焦点面の形状が撮影画像間で異なってしまう
- 撮影位置関係が不規則で疎になり、ぼけ部分が滑らかにならない

といった問題を解決する必要がある。システムの流れを図 2 に示す。

2.1 合成開口撮影法

レンズによる結像は、理想的なピンホールカメラによる撮影において、ピンホールをレンズの口径内

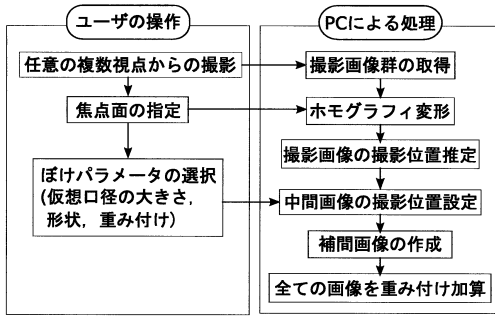


図 2: 任意焦点面に対するぼけ画像作成の流れ

でくまなく動かして撮影した像の平均である。多視点画像を用いた合成開口撮影法の原理を図 3 に示す。

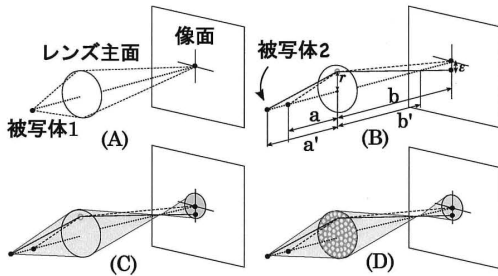


図 3: 合成開口撮影法の原理

(A)において被写体1に焦点が合っているとき、レンズのどの部分を通った光線も像面の一点に集められる。しかし、(B)のように被写体1に焦点が合い、被写体2が焦点面より手前や奥にある場合、被写体2から出た光線は、レンズのどの部分を通ったかによって像面上の終着点が異なる。ここで(B)のように、ある光線がレンズ主面を通るとき位置と光軸からの距離を r とし、その光線が像面に終着する座標とレンズ中心を通った光線の像面に終着する座標との距離を ε とすると r と ε は比例する。

被写体2から出た光線は、本来(C)のように密にレンズ全体を通して像面へ結像する。ここで、(C)のレンズの内部の小さい範囲を通った光については(B)と同じことが言える。この小さな範囲を部分口径と呼ぶことにする。(D)のように、この部分口径をレンズ全体を密に埋め尽くすように並べた場合、これらの部分口径を通った光線を全て加算平均することで、本来の大きさのレンズを密な光線が通ったときと同じ効果が得られる。本来の大きな口径を仮

想口径と呼ぶことにする。

2.2 合焦点面の視差の補正

特別な器具を用いず、カメラを手持ちで撮影した場合、撮影時のカメラ位置姿勢に光軸に対する回転や光軸方向への平行移動が含まれ、従来手法のように撮影画像群を平行移動して重ね合わせるだけではうまく焦点が合わない。そこで撮影画像間の平面ホモグラフィを任意の合焦点面に対して計算し、各撮影画像にホモグラフィ変形を施すことで、合焦点面の視差を補正する。

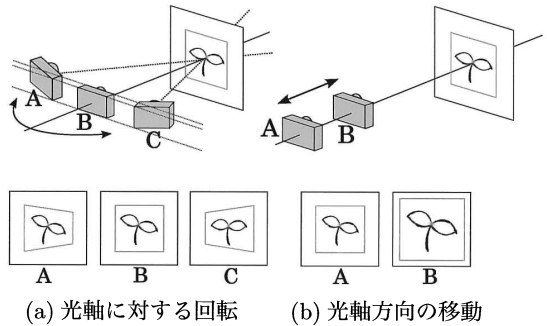


図 4: ホモグラフィ変形による補正の対象

2.3 補間による高画質化

ホモグラフィ変形したそれぞれの画像を重ね合わせると、図5のようにぼけ部分が滑らかなグラデーションにならず階段状の輝度変化になり、不自然になることが多い。これは、各撮影画像の撮影点の位置が離れていたり不規則になることが原因である。そこでまず、各撮影画像の撮影位置を推定し、それを利用して撮影点の位置が密で規則的になるように、不足する撮影位置の画像を撮影画像間の中間画像を作成することで生成する。これらの画像の重ね合わせによってぼけ画像を作成し、ぼけ部分を滑らかなグラデーションに近づける。以下に撮影位置の推定法と、中間画像の作成法を示す。

2.3.1 視点位置の推定

図6のように各画像間の視差を求めることで、撮影点の相対的な位置関係の推定を実現する。本システムでは、ホモグラフィ変形後の撮影画像からいくつかの特徴点を抜き出し、全ての撮影画像についてその特徴点の移動(オプティカルフロー)を追跡し、全てのフローの平均を撮影点の位置関係の指標とし



図 5: ぼけ部分が滑らかでない合成画像

て使用する。しかし、特徴点が焦点面の前景か後景かでフローの向きが異なるため、ここでは合焦点に対し、他の被写体が前景、もしくは後景に偏っていることを仮定した。

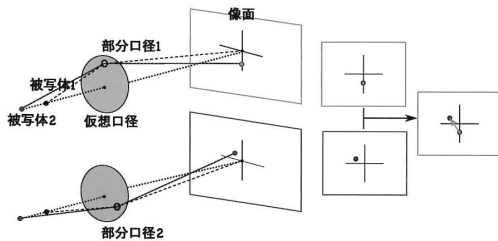


図 6: 部分口径と結像の位置関係

2.3.2 中間画像の作成

中間画像の作成では、視差の補間によるモーフィングを行う。まず、目的の中間画像の撮影点を指定すると、オクルージョンを最小限に抑えるため、その中間画像を作成するのに最も適した撮影画像群を自動選択する。これには、中間画像の撮影点を内包する三角形を形成する3点の撮影点からの撮影画像3枚を用いる(図7)。

その中の代表撮影画像中から特徴点を抽出し、それらの特徴点を他の撮影画像に対して対応付けを行う。また、代表撮影画像の特徴点すべてをドローネー網で結び、画像を複数の三角形領域に分割しておく。その後、目的の中間画像と撮影画像群の撮影点の位置関係を元に、中間画像の対応する特徴点の座標を

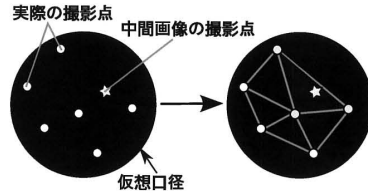


図 7: 中間画像作成に最適な撮影画像の選択

計算し、分割した小領域をそれぞれ変形する。最後に、変形した小領域をそれぞれつなぎ合わせ、中間画像を作成する。

2.4 撮影点の指定によるぼけ像の制御

一般的なレンズによる点光源のぼけ像は丸く均一に広がるため背景にコントラストの強いものが存在する場合、ぼけ部分にも高周波成分が残る。ぼけ像の外側にいくに従ってぼけが薄くなると、ぼけ像から高周波成分がなくなり、より柔らかいぼけが生じる。ぼけ像の形は、口径の形を変化させると同じように変化する。

本提案システムでは、それぞれの画像を合成する際に重み付けをして重ね合わせることで、仮想口径の重み付けを変化させ、ぼけ像を制御する。また、部分口径の配置を設定することで、仮想口径の形状や大きさを変化させ、ぼけ像の形も制御する(図8,9)。

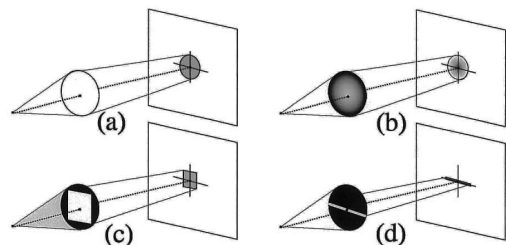


図 8: レンズの重み付けや形状変化による像の変化

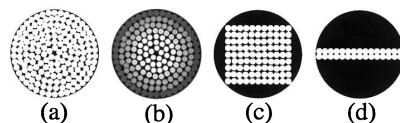


図 9: 仮想口径の重み付けや形状の制御

3 実験と結果

本稿の提案手法を実装したシステムを構築し、それぞれの動作を確かめた。これにより、

- 中間画像の作成方法
- 撮影位置の推定方法
- 任意焦点面に対するぼけ画像の自動作成手法
- 撮影点の拘束条件がないときのぼけ画像作手法
- ぼけ像の重み付け方法

といった、提案手法の有効性を実験的に確認した。

3.1 中間画像の作成実験

提案手法を用いて、縦 1cm、横 1cm 離れた視点の画像同士の間画像を作成する実験を行った。図 10 にその結果の一部拡大図を示す。(a) は作成した中間画像、(b) は実際の撮影で得た中間画像、(c) は撮影画像の特徴点追跡結果である。全体的には良い結果を得たが、一部作成画像が乱れてしまっている。これは、(c) のように撮影画像間での特徴点の追跡がうまくできておらず、異なった点との対応付けのまま補間を行ってしまったことが原因と考えられる。

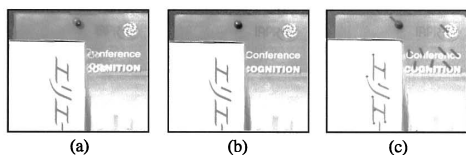


図 10: 特徴点追跡のミスによる画像の崩れ

3.2 撮影位置関係の推定実験

オプティカルフローによる撮影位置の推定実験を行った。推定に使った撮影画像は 81 枚で、図 11 のように同一平面上で一辺 2 cm の 9×9 の格子状に並べたカメラ位置から撮影を行った。撮影方法は一台のデジタルカメラを手動スライドステージに固定し、実験者が撮影のたびに目盛りに合わせてカメラを移動させていくという方法で行った。

図 12 に撮影位置関係の推定結果を示す。

手動スライドステージの精度や剛性の問題のため、視点間の間隔が 2.5mm であることを考えると、正確にカメラ位置が格子状に並んでいる状態は実現できていない。このことをふまえると、おおよその撮影位置関係が推定できていると考えられる。

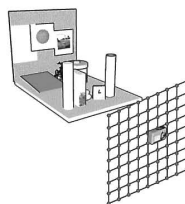


図 11: 撮影位置関係

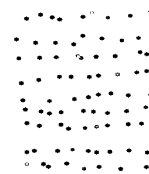


図 12: 撮影位置関係の推定結果

3.3 任意焦点面に対するぼけ画像の自動作成実験

提案手法を用いて、ユーザの指定した焦点面に対するぼけ画像の自動作成実験を行った。使用画像は図 13 の 5 枚であり、撮影の間隔はほぼ等間隔である。

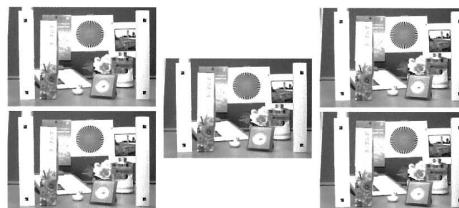


図 13: ぼけ画像の作成に使用した撮影画像

図 14 に結果画像を示す。(a) は前景に、(b) は後景に焦点を合わせた結果である。

意図したとおりのぼけを生じさせることができた。しかし、一部合焦点面であるにも関わらずぼけてしまっている部分がある。図 15 にその例を示す。図 14(a) の時計の部分は合焦点面に限りなく近いが、図 15(b) のようにぼけてしまっている。これは、中間画像を作成する時のドロネー網による分割 (図 15(c)) が、合焦点面と背景をまたいでしまっているために、その中の部分がうまく補間されなかったのが原因である。

3.4 自由視点撮影時のぼけ画像作成実験

本提案システムでは、多視点画像の撮影位置が未知で、撮影点同士の拘束がほとんどないという特徴を持つ。これを確かめるために撮影位置が未知で撮影位置間に拘束が無い、フリーハンドの撮影による画像からのぼけ画像作成実験を行った。これらの画像は、撮影位置が一つの平面上にある保証が無く、



(a) 前景に合焦



(b) 後景に合焦

図 14: 任意焦点面に対するぼけ画像の自動作成結果

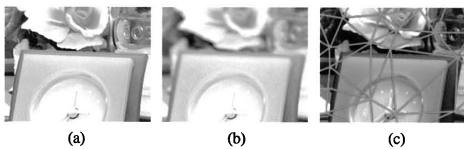
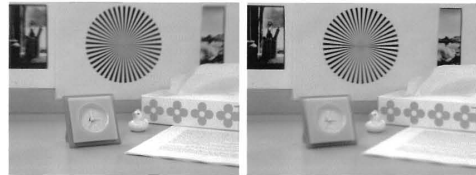


図 15: 網のまたがりによるエッジ抽出の失敗

光軸に対しての回転やカメラ平面の回転を含んでいる可能性が高い。

図 16 に結果画像を示す。(a) は前景の時計部分に、(b) は後景のチャート部分に焦点を合わせたものである。



(a) 前景に合焦 (b) 後景に合焦

図 16: フリーハンドの撮影による画像からのぼけ画像作成結果

フリーハンドの撮影による画像からのぼけ画像作成も、位置が既知のものと同様な良い結果を得た。これによって、本提案システムでは撮影カメラ位置の拘束が、同じ対象を写していることのみであることが確認できた。

3.5 ぼけ像の重み付け実験

仮想口径の重み付けや形状を変化させることで、ぼけ像を変化させる実験を行った。ぼけ像がわかりやすいように、コントラストの強いぼけ像が得られるイルミネーションを含む画像を用いた。図 17 に使用した撮影画像群を、図 18 に仮想口径の重み付けや形状を変化させるために用いたマスクを示す。

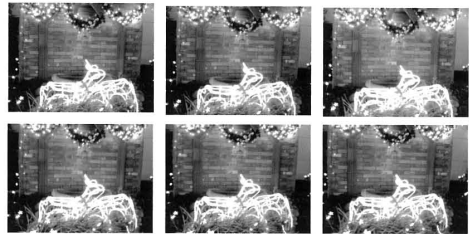


図 17: 重み付けぼけ画像の作成に使用した撮影画像

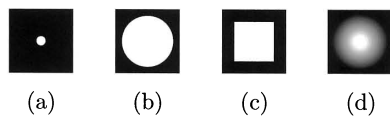


図 18: 仮想口径の重み付けに利用したマスク

ぼけ部分を拡大した結果画像を図 19 に示す。(a) は撮影画像、(b) は一般のレンズと同じ効果を狙い、

円形の仮想口径, (c) は方形の仮想口径, (d) は円形レンズの回りにいくほどぼけが薄くなるような効果を狙った口径でそれぞれ作成したぼけ画像である。

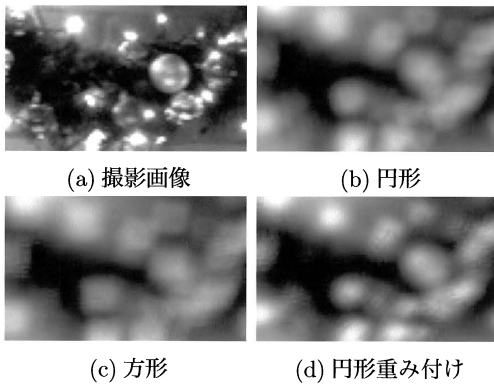


図 19: 仮想口径に変形・重み付けを行って作成した画像のぼけ部分の拡大

それぞれについて狙ったような効果が得られた。特に (b) と (d) については, (b) より (d) のほうが輪郭の無い柔らかなぼけになっており, 同じ形の口径で重み付けを変えた結果として STF レンズと同様の効果が得られている。美しさの基準や好みが人それぞれであるため一概にどれが最も良いとは言えないが, それぞれ審美的な結果が得られ, 本提案システムの新たな可能性を示した。

4 システムの評価

本稿の提案システムの有効性を確かめるため, 提案システムで作成した画像に対し, 周波数領域での解析, 及び比較評価実験を行った。

4.1 フーリエ解析

一般的なレンズは像面に光を円形に集め, その光エネルギーはレンズのどこを通っても一様である。レンズによって像面に集められる点光源のぼけ像の強度分布 (点像強度分布関数) をフーリエ変換すると, Bessel 関数と呼ばれる関数になる。この関数は中心に大きなピークを持つが, 中心以外も波のようにピークが現れる。これはぼけ像の輪郭がくっきり現れ, 高周波成分が消えずに残ることを示している。このように, 周波数領域でぼけ像を解析すると, ぼけ像の鮮明さを定量的に評価することができる。

評価したいぼけを含む画像に対して 2次元フーリエ変換を行い, それぞれを比較した。実験には, 撮

影画像と, 撮影画像群から様々な仮想口径の重み付けを行って作成したぼけ画像を使用した。また比較対象として, 実際大きな口径を持つカメラで F 値を小さくして撮影したぼけ画像も使用した。

- (a) F 値 22 の撮影画像
- (b) F 値 2 の撮影画像
- (c) F 値 4 の撮影画像
- (d) 円形の仮想口径 (4) で作成したぼけ画像
- (e) 円形重み付け仮想口径 (4) で作成したぼけ画像
- (f) 円形重み付け仮想口径 (6) で作成したぼけ画像
- (g) 円形重み付け仮想口径 (8) で作成したぼけ画像
- (h) 方形の仮想口径 (4) で作成したぼけ画像

ただし, 円形重み付けとは仮想口径が円形で, 周りにいくほどぼけ像が薄くなるように線形的に重み付けを減らしたもので, () 内の数字は, 仮想口径の半径の比を示している。実験に使用した画像を図 20 に示す。

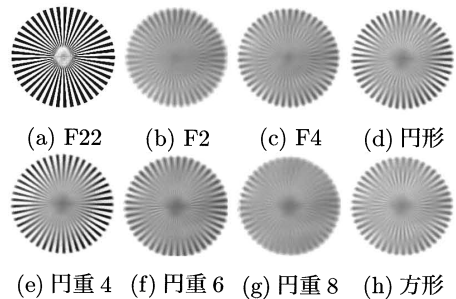


図 20: フーリエ解析に使用した画像

図 21 に結果を示す。(a) と比較すると, どの画像も高周波成分が減少している。その他の周波数成分は, 様々な特徴を示している。

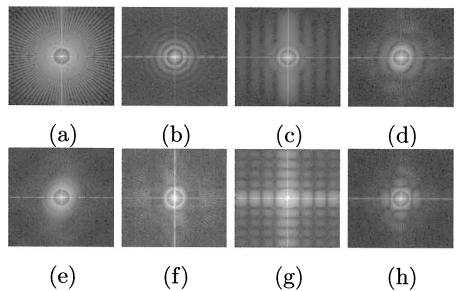


図 21: フーリエ解析結果

(b) や (c), (d) には一度消える周波数帯域があり, その周りに再び弱いピークが円形に波のように訪れ

ている。これは、先述のようにぼけ像自体に輪郭が残っていることを示す。(h)も同様に、方形のフーリエ変換は sinc 関数となることが知られているが、この性質を良く示している。また、(e), (f), (g)を比較してみると、仮想口径の形状や重み付け方法が同じであるのに結果が全く異なる。これは(f), (g)の仮想口径を大きくした際に、ぼけ像の重なり合いによるエリアシングが生じたためである。今回使用したフーリエ解析前のチャートにもエリアシングがはっきり現れている。

4.2 主観評価実験

提案システムによって作成したぼけ画像と、実際の撮影で得られるぼけ画像や従来の合成開口法で作成したぼけ画像を比較し、提案システムの有効性を確かめる。さらに、仮想口径のパラメータを様々に変化させたぼけを比較評価し、仮想口径の重み付けや形状の変化による視覚的な効果を確認する。

本提案手法によって作成した様々なぼけを含む画像を用意し、それぞれについて美しさ、好みなどを5段階で被験者に評価してもらい、被験者は20～56歳の男女23名である。

用意した画像は以下の7枚である。

- (A) 口径を絞って撮影した全体に合焦した撮影画像 (F値 22)
- (B) 口径を開いて撮影した背景をぼかした撮影画像 (F値 4)
- (C) 方形の仮想口径 (4) で作成したぼけ画像
- (D) 円形の仮想口径 (4) で作成したぼけ画像
- (E) 円形重み付け仮想口径 (4) で作成したぼけ画像
- (F) 円形重み付け仮想口径 (6) で作成したぼけ画像
- (G) 提案システムを用いず、撮影画像5枚のみを合成開口法により重ね合わせたぼけ画像

背景部分のぼけの滑らかさについては、円形重み付け仮想口径を用いたもの (E) が高い評価を得た。美しさや好みについても同様に、画像中央に位置するチャートにエリアシングが抑えられているという理由から (E) が高い評価を得た。従来の合成開口法 (G) についてはどの評価項目も非常に低い評価になり、中間画像による補間の有効性を確かめることができた。今回の実験の構図では、ぼけが無い方が好ましいとする意見も多く、被写体や構図によっても評価値は大きく変化すると考えられる。

5 まとめ

本稿では、一般的な小型デジタルカメラを使って任意の視点から撮影した複数の画像から多様なぼけを作り出す手法を提案し、ユーザーが撮影後自由にぼけの強さや配置を調節することができるシステムを構築した。また、実験を通してこの手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] R.Ng, M.Levoy, M.Bredif, G.Duval, M.Horowitz, dssP.Hanrahan: "Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera," *Stanford Tech Report CTSR 2005-02, 2005*
- [2] Edward H. Adelson, John Y.A. Wang: "Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Vol.14, No. 2, pp.99-106, 1992*
- [3] A.Isaksen, L.McMillan, S.J.Gortler: "Dynamically Reparameterized Light Fields," *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.297 - 306, 2000*
- [4] T.Georgeiv, K.C.Zheng, B.Curless, D.Salesin, S.Nayar, C.Intwala: "Spatio-Angular Resolution Tradeoff in Integral Photography," *Eurographics Symposium on Rendering, 2006*
- [5] <http://www.ecat.sony.co.jp/dslr/lens/lens.cfm?PD=24685>
- [6] A.Veeraraghavan, R.Raskar, A.Agrawal, A.Mohan, J.Tumblin: "Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing," *ACM SIGGRAPH 2007 papers*
- [7] F. Moreno-Noguer, P.N. Belhumeur and S.K. Nayar: "Active Refocusing of Images and Videos," *ACM SIGGRAPH 2007 papers*
- [8] Ren Ng: "Fourier Slice Photography," *ACM SIGGRAPH 2005 Papers, pp.735-744*