修士論文

適応的なインテグラルフォトグラフィによる
自由視点画像合成に向けた
可変焦点レンズアレイの研究

2008 年 2 月 4 日

指導教員　苗村健　准教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科
電子情報学専攻 66406

上田　健介

内容梗概

本稿は，近年注目を集めている Computational Photography と呼ばれる撮影手法に基づいて，実空間の光線情報を記録するためのシステムの試作とその応用例の提案を行う．Computational Photography とは，デジタルカメラにコンピュータの演算を組み合わせた撮影システムであり，空間の情報をより巧妙に引き出すことに重点を置いた撮影手法である．本稿では，Computational Photography の中でも特に Programmable Imaging と呼ばれる手法に注目した．Programmable Imaging は動的に制御可能な光学系を撮影システムに組み合わせることで，動的に光線のサンプリング方法を変更しつつ撮影する手法である．筆者は動的に制御可能な光学系として可変焦点レンズに注目した．可変焦点レンズは，電圧を加えることでその焦点距離を高速に制御できるデバイスである．筆者は６４個の可変焦点レンズを並べて可変焦点レンズアレイを製作した．可変焦点レンズは２枚のプリント基板で裏表から挟むことで固定し，個々のレンズごとに基板上に描かれた配線を通じて外部から電圧信号を独立に印加できるように設計した．基板への電圧信号制御はレンズドライバを通してコントロール基板上のマイコンにより行う．コントロール基板はパソコンと RS232C インタフェースによって接続しており，パソコンからの命令に応じて可変焦点レンズの焦点距離を独立に制御できる．このような可変焦点レンズアレイの後ろに高解像のビデオカメラを置き，ビデオカメラをパソコンと GigabitEthernet で接続することで，可変焦点レンズアレイを通してシーンを撮影した映像をパソコンに取り込めるようにした．このシステムを用いれば，シーンの状況に応じてレンズの焦点距離を制御することで動的に光線のサンプリング方法を最適化して撮影をおこなうことができる．試作した可変焦点レンズアレイシステムの応用例として，各レンズの焦点距離をシーンの物体位置にあわせて独立に動かすことで，実効的に被写界深度を拡大でき，光学ボケを軽減できることの実証をおこなう．また，インテグラルフォトグラフィに基づく自由視点画像合成の品質を改善する手法である Adaptive IP を提案する．Adaptive IP は，光線のサンプリング方法をシーンに対して動的に制御することで，自由視点画像合成におけるジオメトリ推定の不確実さを軽減する手法である．Adaptive IP を用いると補間処理が適切に働いた解像度の高い自由視点画像を合成できるようになる．議論のために，まず Adaptive IP の理論的枠組みとして仮想カメラモデルを導入し，可変焦点レンズアレイシステムが取得可能な光線の定式化を行う．そして，シーンに対してステレオマッチングの可能性を最適化する仮想カメラ配置を導出し，CG シミュレーションによってその有効性を示す.

目次

第 1 章　序論 **1**
1.1　本研究の目的と背景 2
1.2　本論文の構成 3

第 2 章　関連研究 **4**
2.1　はじめに 5
2.2　光線空間 5
2.3　光線空間情報の記録技術 5
2.3.1　カメラアレイ 6
2.3.2　レンズアレイ 6
2.4　光線空間情報の再生技術 6
2.4.1　Image-Based Rendering 6
2.4.2　Light-Field Rendering 8
2.4.3　カメラアレイを用いたアプリケーション例 9
2.5　インテグラルフォトグラフィ 11
2.5.1　IP 撮影と IP ディスプレイ 11
2.5.2　IP 画像からの自由視点画像合成 12
2.6　Computational Photography 13
2.6.1　Computational Camera 13
2.6.2　Programmable Imaging 14
2.6.3　Programmable Flash 17
2.7　まとめ 20

第 3 章　可変焦点レンズアレイシステムの実装 **21**
3.1　はじめに 22
3.2　可変焦点レンズアレイ撮像システム構成概要 22
3.3　システムの構成要素 23
3.3.1　可変焦点レンズ 23
3.3.2　レンズアレイ固定板 27
3.3.3　レンズドライバ 29
3.3.4　レンズコントローラ 31
3.3.5　デジタルカメラ 31
3.4　可変焦点レンズアレイの撮影テクニック 32
3.5　焦点調節の実験 32
3.6　可変焦点レンズアレイシステムの応用アイデア 33
3.6.1　要素レンズの独立オートフォーカスによる被写界深度拡大 33
3.6.2　光線空間のサンプリング方法の最適化 35

3.7 まとめ 35

第 4 章 Adaptive IP の理論 36
4.1 はじめに 37
4.2 Adaptive IP の概要と目的 37
4.3 Adaptive IP 光学系の特性の記述 38
4.3.1 解析の仮定 38
4.3.2 ノーテーションの定義 38
4.3.3 仮想カメラモデル 38
4.4 自由視点画像合成のための仮想カメラ配置の最適化 39
4.4.1 シーンに応じたサンプリングの決定指針 39
4.4.2 仮想要素カメラ配置に対する要請 40
4.4.3 ジオメトリ推定可能な物体領域 41
4.4.4 最適なサンプリング決定法の結論 41
4.5 Adaptive IP のシミュレーション 41
4.6 まとめ 43

第 5 章 結論 44
5.1 本研究の成果 45
5.2 今後の展望 45

謝辞 46

発表文献 47

参考文献 48

図目次

2.1 カメラアレイの例 7
2.2 Light field rendering 8
2.3 (左) 前方のオブジェクトにフォーカスした合成画像. (右) 後方のオブジェクトにフォーカスした合成画像.(文献 [16] より) 9
2.4 エイリアシングを生じないための画像取得密度とレイヤの枚数の関係 9
2.5 カメラアレイを用いたアルファマット合成 [18] 10
2.6 synthetic aperture の概念 (a) ピンホールカメラ (b) レンズカメラ (c) オクルージョン (d)synthetic aperture [21] 10
2.7 （左）カメラの前に茂みがあるシーン．（右）合成開口により茂みの後ろの像が見える． [21] 10
2.8 インテグラルフォトグラフィの原理 11
2.9 LIFLET 撮像系 12
2.10 LIFLET により撮影されるインテグラルフォトグラフィと合成画像の例 12
2.11 Computational Photography [33] 13
2.12 Computational Photography の分類 [5] 14
2.13 DMD を用いて適応的に露光を調整するシステム [36] 15
2.14 (左)ADR を用いない場合. (右)ADR を用いた場合 [36] 15
2.15 volumetric aperture を用いた split field-of-view imaging [37] 16
2.16 (左) 対象シーン. (右)Split Field-Of-View Imaging を用いた場合 [37] 16
2.17 仮想的に照明条件を変えて合成した画像 [38] 17
2.18 plenoptic funtion と反射場の記述 [38] 18
2.19 The Light Stage 5 [39] 18
2.20 direct 光と global 光の分離 [40] 19
2.21 物体からでる光線の種類 (A) 直接光 (B) 内部反射光 (C) 表面化散乱光 (D) 体積散乱光 (E) 透光 [40] 19

3.1 可変焦点レンズシステムの構成 22
3.2 液体レンズの動作原理 [42] 23
3.3 可変焦点レンズの外観 [42] 23
3.4 使用した可変焦点レンズ 24
3.5 使用した可変焦点レンズの外観 25
3.6 電圧-レンズパワーの関係 25
3.7 レンズの電圧応答 26
3.8 レンズアレイ固定板 27
3.9 レンズアレイ固定板・配線パターン 28
3.10 レンズアレイ固定板・回路図 28
3.11 レンズアレイガイド板 29

3.12 レンズドライバ出力 30
3.13 レンズドライバモジュール 30
3.14 使用したカメラ 31
3.15 撮影した IP 画像 32
3.16 カメラの焦点をレンズアレイから離して撮った画像 33
3.17 遠景にフォーカス 34
3.18 中景にフォーカス 34
3.19 近景にフォーカス 34
3.20 各レンズごとにオブジェクトを選んでフォーカス 35

4.1 AIP-IBR system 37
4.2 要請 2 の図形表示 (左), ジオメトリ推定可能な領域の導出 (中央), ジオメトリ推定可能な領域例 (右) 40
4.3 左から順に，仮想要素カメラ配置・入力多眼画像・合成画像．上段は IP，下段は AIP による． 42

表目次

2.1 光線空間の記録 6

3.1 可変焦点レンズアレイ撮像システムの構成 22

第1章

序論

1.1　本研究の目的と背景

これまで，実世界の視覚情報を記録・再生するための方法が数多く考案されてきた．なかでもカメラによる撮影は視覚情報を記録・再生する最も基本的な方法であり，日々進化を遂げている．１８２６年に Joseph Nicephore Niepce によってスチールカメラの原型が造られて以降，光を記録するための感光体の進化・レンズ等の光学系の進化は，実世界の一瞬一瞬をより正確に記録することを目指し改良が続けられてきた．そのような流れの一方で，近年の半導体撮像素子の発明は視覚情報の利用の質を決定的に変えた．記録情報がデジタル化されることで，デジタル革命と云われるほどに視覚情報の利用性が劇的に向上することとなった．このアナログカメラからデジタルカメラへの進化は，さらにコンピュータによる情報処理と組み合わされることで実世界の視覚情報の記録・再生をさらに質的に変えようとしている．例えば，コンピュータで光線情報を処理した上で画像を再生する技術として Image-Based Rendering（IBR）の研究が近年盛んである．IBR によって，空間のすべての物体に焦点があった全焦点画像の再生や，空間をさまざまな視点位置から見た自由視点画像を再生することが可能となった．

ところで，感光体の進化がカメラにデジタル革命をもたらしたように，カメラの他の構成要素を進化さえようという動きも重要である．例えば，レンズ・プリズム・シャッター・アパーチャー・フィルター等の改良はカメラの進化の歴史を支えてきた．一方で最近は，コンピュータでの光線情報の処理を前提とすることで，新規なデバイスをカメラと組み合わせることが注目されてきている．旧来のカメラが実世界の視覚情報をいわば「ありのままに」記録することに注力してきたのに対して，新規なデバイスを組み合わせたカメラは，実世界の視覚情報を「符号」として記録し，コンピュータの処理を組み合わせることで，実世界の視覚情報の記録・再生に質的な革命をもたらそうとしている．新規なデバイスの例として，可変焦点レンズ・レンズアレイ・DMD(Digital Micro-mirror Device)・LED・コーディドアパーチャーなどがあり，現在そのデバイス毎に巧妙な視覚情報の利用法が日々研究されている．例えば，レンズアレイは 3 次元空間情報を記録するために使用できる．レンズアレイを用いた 3 次元空間情報の記録・再生技術はインテグラルフォトグラフィ（IP:Integral Photography）と呼ばれている．IP の原理は，レンズアレイを通して感光体に記録した光線情報を同じレンズアレイを通して見ることで 3 次元空間情報を再生するというもので，1908 年に Lippmann [1, 2] により提唱された．一方，現在ではレンズアレイを通して記録した光線情報を IBR 技術を用いて自由視点画像として再生する方法が研究されている．当研究室でも，実時間で撮影と自由視点画像合成を行うシステム LIFLET [3, 4] を開発してきた．

以上のようなコンピュータでの光線情報処理に支えられた新たな動きは総称して Computational Photography [5] と呼ばれる．Computational Photography とは，コンピュータとデジタルカメラ，また時にはその他の光学系を組み合わせた，新たな撮影技術である．従来の言ってみれば単純な撮影法と比べると，Computational Photography は対象とする時空間からより多くの情報を引き出し，その情報をコンピュータの演算によって整理することによって，今までには得られなかったイメージを抽出することに関心がある．この分野は，最近になってやっと一領域として認識され始めたばかりの新しい研究分野である．もちろん，この分野の範疇に入る研究は大分以前から行われていたが，最近になって Computational Photography という名前が与えられ，コンセプトが明確化されたことによって，一気に注目を集めだした結果，非常にホットな研究分野となった．

本研究では， Computational Photography の応用として，可変焦点レンズアレイを新規なデバイスとして製作し研究する．本研究の目的は，可変焦点レンズアレイを用いることが光線情報の記録をシーンに対して動的に適応させえることを示し，可変焦点レンズアレイの可能性を開拓することである．そのために可変焦点レンズアレイの有用性を示す応用例のひとつとして IP による IBR システムを提案し検討を行う．光学系の理論的な解析により，可変焦点レンズアレイが IBR の応用に応じた IP 画像の最適化を可能にすることを示す．具体的には，シーン中の物体の奥行き推定可能性及びサンプリング密度の最適化を行うことで自由視点画像合成の質をあげることを目指す．

1.2　本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．まず 2 章において，本研究に関連する研究について概観する．次に 3 章において，本研究で試作した新たな撮像システムである可変焦点レンズアレイシステムについて述べる．続いて 4 章において，可変焦点レンズアレイシステムの応用例として自由視点画像合成への適用を目的とした Adaptive IP Imaging システムを提案する．最後に 5 章にて本研究の成果をまとめる．

第2章

関連研究

2.1　はじめに

2.2　光線空間

視覚情報は空間を伝搬する光によって得られる．実世界の視覚情報を取り扱うにあたっては，空間を満たしている光の情報（以下，光線情報）を一般的に記述するモデルが用いられる．空間中の 1 本の光線をいくつかのパラメータを用いて関数として表現した方法として Adelson による plenoptic function [6] がある．

$$P = P(x, y, z, \phi, \theta, \lambda, t) \tag{2.1}$$

この関数は，時刻 t において，位置 (x, y, z) を通る，方向 (ϕ, θ) からの，波長 λ の光の強度 P を表している．この 7 次元のパラメータによって張られるパラメータ空間は実空間の光線情報の全体を表し，光線空間と呼ばれる．ただし，解析の用途に応じてパラメータは取捨選択されることがある．例えば，ある瞬間をとりあげ，3 原色 RGB の各強度 f に注目することで光線の空間的なパラメータのみを残して 5 次元の関数として記述することがある．

$$f = f(x, y, z, \phi, \theta) \tag{2.2}$$

また，現実の撮影システムでは空間上のあらゆる点で光線情報を記録することは困難である．そこで，観察対象の空間と観察視点の空間を分離して考えることが行われる．「光が 3 次元空間内を干渉や減衰などの影響を受けずに直進する」と仮定すると，観察対象の空間と観察視点の空間の境界面での光線情報のみを記述すれば十分となる [7]．従って，境界面上の位置を表すパラメータ (x, y) を用いて以下の 4 次元の関数で光線空間を記述することも多い [8, 9]．

$$f = f(x, y, \phi, \theta) \tag{2.3}$$

なお境界面としては，球面や平面が用いられることが多い．

2.3　光線空間情報の記録技術

光線空間はカメラにより記録される．ピンホールカメラモデルによれば撮像素子面の 1 点に記録されるのは，カメラ中心を通りある特定の角度 (ϕ, θ) をもって入射する光線の強度 P である．すなわち 1 台のカメラは 2 次元の光線空間 $P = P(\phi, \theta)$ を記録する．しかしこれでは本来 7 次元の光線空間の記録を行うには不十分である．光線空間の一般的な記録は，カラーフィルタの導入でカラーカメラ $P(\phi, \theta, \lambda)$，ビデオカメラを用いることで $P(\phi, \theta, \lambda, t)$ とし，さらにカメラを (x, y, z) 空間上に複数台配置することで 7 次元の光線空間 $P(x, y, z, \phi, \theta, \lambda, t)$ となる．また，光線空間の詳細な記録という観点では，光線空間の各パラメータはより広く且つ密に記録される方が良い．表 2.1 に各パラメータの定義域と分解能を向上させるためのカメラの類型を表した．

静止物体に対象を限定したカメラシステムの中にはカメラのパラメータを随時変化させていくことで記録パラメータの拡張を図るものもある．例えば，スライドする機構上にカメラを設置したシステムは，カメラ位置 (x, y, z) をコントロールすることで光線空間をより詳細に記録することができる．ただし，カメラの移動による記録では動的に変化するシーンに対して適用できないことが欠点となる．動的なシーンにおいて光線空間を詳細に記録するには，カメラを並べたカメラアレイ並びに，光学的にはカメラアレイと同様に見なせるレンズアレイシステムが用いられている．以下でカメラアレイとレンズアレイについて紹介する．

表 2.1: 光線空間の記録

variables	improvement	
	range	resolution
x,y,z	カメラアレイ・レンズアレイ＆カメラ	
φ，θ	広角カメラ パノラマカメラ omnidirectional camera	高精細カメラ
λ	赤外線サーモカメラ	スペクトラムカメラ
t	ビデオカメラ	ハイスピードカメラ
P	高感度カメラ 高ダイナミックレンジカメラ	高階調カメラ

2.3.1　カメラアレイ

光線空間を記録する手段として，よく用いられるのはカメラアレイである．カメラを平面状に並べたものが代表的である [10–14]．図 2.1 に例を示す．

2.3.2　レンズアレイ

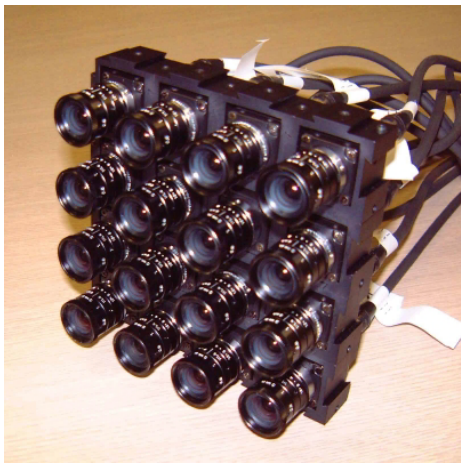
レンズアレイを通して１台のカメラでシーンを撮影することで多視点画像を得ることができる．レンズアレイを利用することは，光学的に小さなカメラを密に並べることと等価であり，カメラアレイを用いる場合に比べ，より多数の視点から，より密な光線情報を取得できるという利点がある．従って，カメラアレイが比較的スケールの大きい対象の光線空間の記録に用いられるのに対して，レンズアレイを用いた撮影システムは，スケールの小さい光線空間の記録に適している．カメラアレイはその構造上カメラを密に配置するには限界があるからである．また，レンズアレイシステムは装置をコンパクトにできるため，ハンドヘルドの光線空間記録装置 [15] を作成し易いことに利点がある．加えて，カメラ間の色合わせやタイミング同期が不要なため，システムの実装が手軽である点も利点である．なお，レンズアレイを利用した光線空間の撮影・再生技術であるインテグラルフォトグラフィについては 2.5 節で詳述する．

2.4　光線空間情報の再生技術

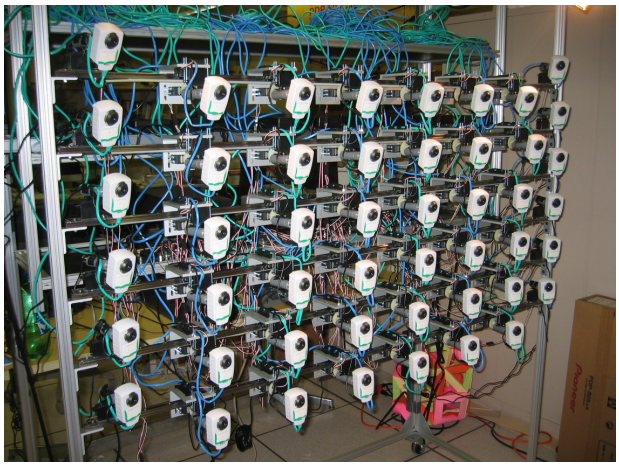
光線空間を再生する装置として３次元ディスプレイがある．３次元ディスプレイは実空間から記録された光線空間を再び実空間に再現する装置である．一方で光線空間を再生する装置として従来の２次元のディスプレイを用いることも多い．こちらは光線空間を再現するのでなく，光線空間の情報を上手く処理することで付加価値をもった画像を提示することに主眼がある．本稿では，２次元のディスプレイに提示する技術を扱う．

2.4.1　Image-Based Rendering

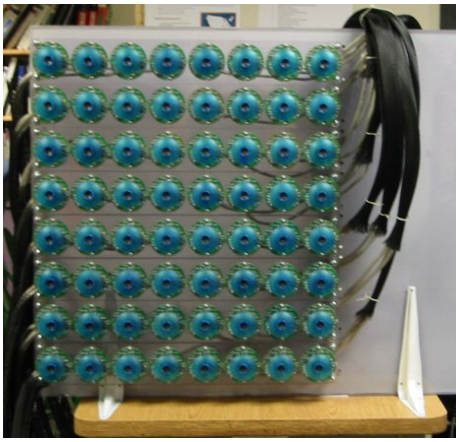
IBR(Image-Based Rendering) と呼ばれる技術は，ある空間を多数の視点から撮影した実写画像群をもとに，各画像をうまく合成することで実際には撮影されていない画像をつくりだす技術である．なかでも IBR の最も有名な例は自由視点画像合成と呼ばれる手法である．自由視点画像合成とは，対象の空間を好みの方向から眺めた画像を，適切な補間を用いることで合成する手法である．３ DCG 技術に基づく model-based



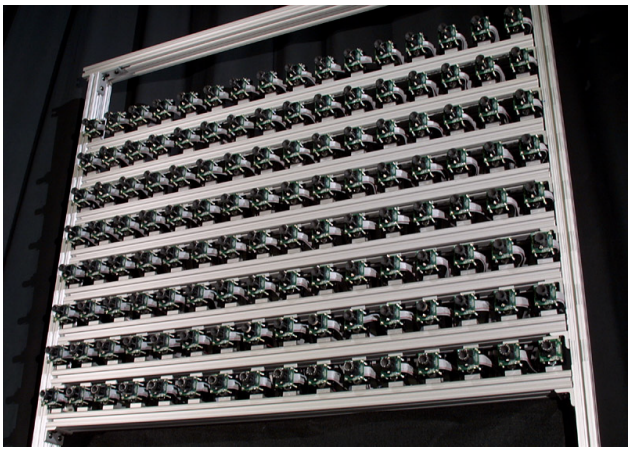
(a) 16 cameras [10]



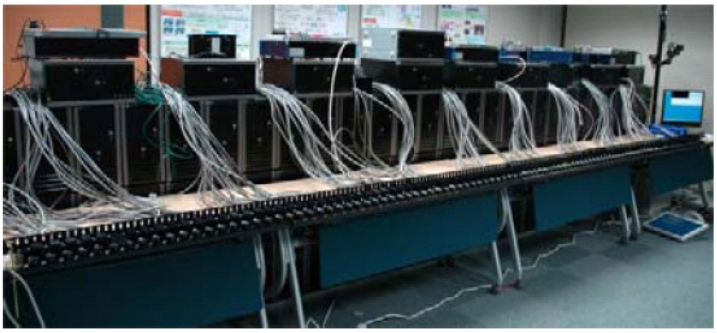
(b) 48 cameras [11]

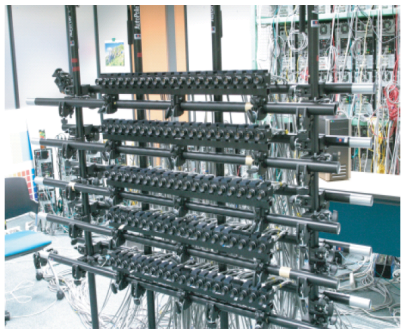


(c) 64 cameras [12]



(d) 128 cameras [13]





(e) 100 cameras [14]

図 2.1: カメラアレイの例

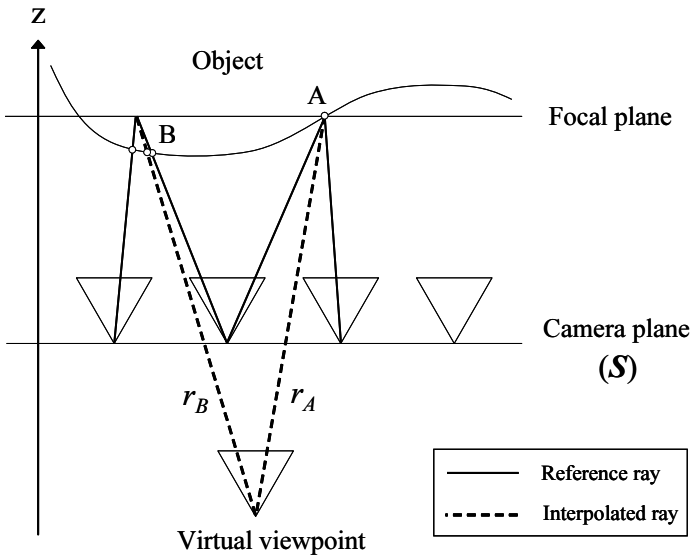


図 2.2: Light field rendering

rendering と比べて，複雑なモデル仮定や幾何計算を必要としないために，リアルタイムでの実写品質での合成に強みをもつ技術である．

2.4.2 Light-Field Rendering

IBR を光線空間の再生という観点から捉えたとき，Levoy による Light Field Rendering(LFR) [8] は光線空間の処理に対する基本的な枠組みを提示している．LFR では，2 次元格子状に並べられたカメラを利用して画像を取得する．画像合成は，rendering camera と呼ばれる仮想視点を置いた位置での光線空間 $f = f(x, y, z, \phi, \theta)|x = Xr, y = Yr, z = Zr$ をシミュレートすることで描画される．まず rendering camera とカメラアレイの中心を結ぶ線上の光線はカメラアレイによって記録されているから，光線の直進性の仮定により仮想視点における光線情報は各カメラの対応画素から正確に求まる．しかし，仮想視点を通る光線のすべてがカメラアレイで記録されているわけではない．従って，仮想視点での光線空間は補間により推定する必要がある．LFR では図 2.2 に示すように，ある平面 (focal plain) に物体が存在し且つ focal plain がランバート面と仮定することで，光線空間を補間する．すなわち，focal plain 上のある点を通る光線はすべて同一の光線情報を持つと仮定することで，仮想視点を通る光線 (図 2.2：interpolated ray) を focal plain と交わる点に対しカメラアレイから逆投影される光線 (図 2.2：reference ray) の情報で近似するのである．この方法はシンプルであり線形演算で描画できるために高速であるが，反面，物体が focal plain にない時は合成ボケが生じてしまう．この点，Isaksen [16] は focal plain の位置を変えて合成することで，あたかもカメラ焦点・開口を変えて撮影したかのような画像が合成的に得られることを指摘している（図 2.3）．一方，Lumigraph [9] では合成ボケを改善するために，幾何モデル（奥行き情報）を考慮して focal plain を決定し合成を行っている．幾何モデル導入に対する理論的な枠組みとして，Chai らは Plenoptic Sampling [17] において，幾何モデルを奥行き方向の多層平面レイヤで近似した場合，エイリアシングを生じない画像合成を行うために必要な画像のサンプル数とレイヤの数が反比例になることを理論的に示している (図 2.4). これは，システム設計において光線情報のサンプリング密度と奥行き情報の詳細度とのトレードオフを考える際の指針となるものである．

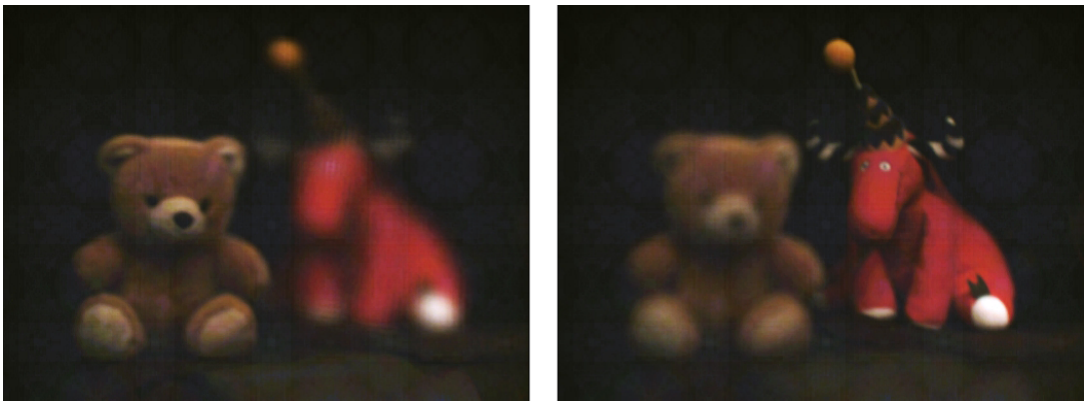


図 2.3: (左) 前方のオブジェクトにフォーカスした合成画像. (右) 後方のオブジェクトにフォーカスした合成画像.(文献 [16] より)

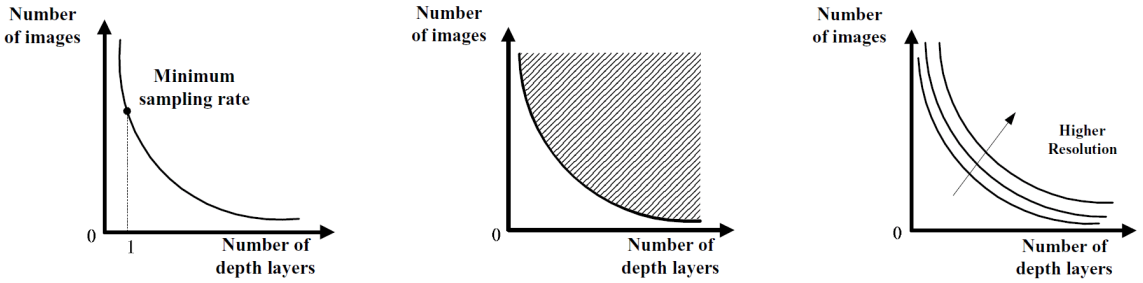


図 2.4: エイリアシングを生じないための画像取得密度とレイヤの枚数の関係　(文献 [17] より)

2.4.3　カメラアレイを用いたアプリケーション例

Joshi ら [18] のアルファマット合成が興味深い．Joshi らは 3 次元計測によるモデリングでは困難だろうと思われる霧状の対象に対する自然なアルファマット合成に成功している（図 2.5）．

Wilburn ら [19] は，カメラの同期のタイミングを一定間隔づつわざとずらすことによって，高解像度の動画が 1560fps という驚くべき高フレームレートで得られるシステムを作成している．

カメラアレイシステムの中で，特に目を引くのは合成開口の概念である．Levoy ら [20] は，48 台のカメラを並べて撮影をおこなうことで，カメラの前に遮蔽物があってもその後ろの像を撮影することができるシステムを作成した（図 2.7）．図 2.6(b) に示すようにレンズカメラには焦平面があり，この平面上の一点がイメージセンサ上の 1 点に結像する．しかし，レンズと焦平面の間にレンズの開口より小さい遮蔽物がある場合には，イメージセンサ上の 1 点には，焦平面上の 1 点に加えて，遮蔽物全体からの光線も同時に写りこむ (図 2.6(c))．画像で考えると，焦平面に対する像とピントがぼけた遮蔽物の像が写ることになる．このことを逆に考えると，遮蔽物より大きい開口を持つレンズを用いれば，遮蔽物の後ろの情報が取得できるといえる．しかし，通常の場合，それほど大きなレンズを現実的でない．それに対して，図 2.6(d) のように，間隔を置いたカメラアレイで対象を撮影すれば，等価的に非常に巨大な開口を実現できるというのが合成開口のアイデアである．

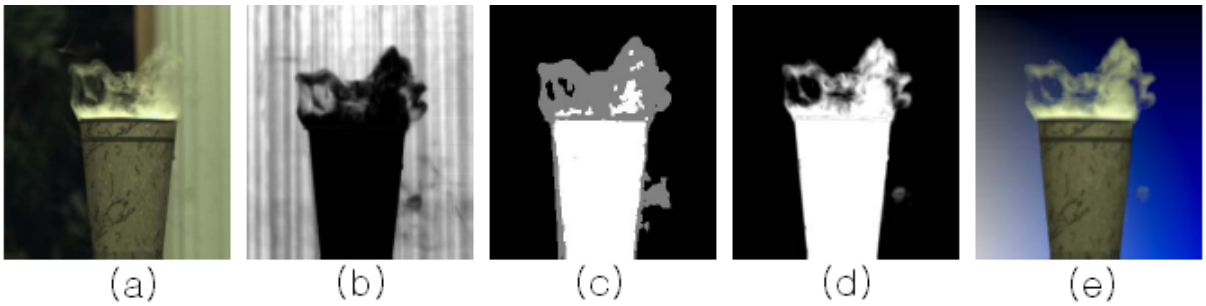


図 2.5: カメラアレイを用いたアルファマット合成 [18]

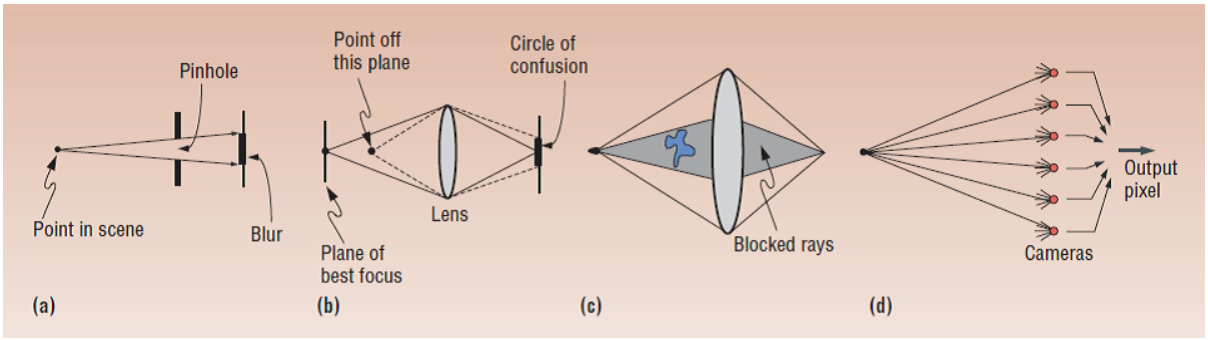


図 2.6: synthetic aperture の概念 (a) ピンホールカメラ (b) レンズカメラ (c) オクルージョン (d)synthetic aperture [21]

図 2.7: （左）カメラの前に茂みがあるシーン．（右）合成開口により茂みの後ろの像が見える．[21]

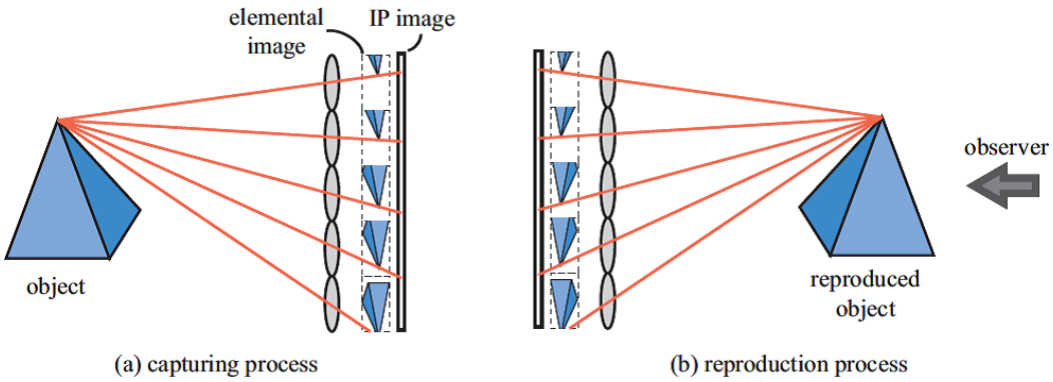


図 2.8: インテグラルフォトグラフィの原理

2.5　インテグラルフォトグラフィ

あるシーンをレンズアレイを通して観察した場合，各レンズにはそのレンズの位置から見た対象シーンが映る．すなわち，レンズアレイを通して撮影を行うことで，カメラアレイを用いて撮影された多視点画像のような画像が得られる．ここでは，レンズアレイを用いて 3 次元写真を撮影・再生する技術であるインテグラルフォトグラフィ (IP:Integral Photography) について，その原理といくつかの関連研究を紹介する．

IP は 1908 年に Lippmann によって提案された 3 次元写真の記録・再生技術である [1,2]．図 2.8 に IP の原理を示す．図 2.8（a）は IP による多視点画像の撮像過程を示している．フィルムにおいてレンズアレイの各レンズに対応する部分には，そのレンズの位置から見た対象シーンの見え方が結像する．すなわち平面上に並んだカメラアレイによる撮影による画像の集合と等価的な画像を得ることができる．こうして撮像される多視点画像は IP 画像と呼ばれ，IP 画像の各レンズに映る画像を要素画像と呼ぶ．光線空間の記録という意味では，IP 画像中の各要素画像は光線空間の 2 次元 (ϕ, θ) のスライスに対応し，要素画像の並びは光線空間の 2 次元 (x, y) のサンプリングにあたるため，全体で 4 次元の光線空間を記録していると言える．

2.5.1　IP 撮影と IP ディスプレイ

Lippmann による IP のアイデアは，現像された IP 画像の前面に撮影時と同じレンズアレイを置いて観察することで 3 次元の視覚情報を再現するものであった．図 2.8（b）は IP 画像を用いた立体像の再生過程を示している．レンズアレイにより，観察者の視点位置に応じて各要素画像のうちの一つの点が対応するレンズによって抽出され観察される．視点位置を変えれば要素画像ごとに別の一点が抽出され観察される．従って，両眼視差のみならず滑らかな運動視差をもつ 3 次元像が提示できる．光線空間の概念によれば，IP ディスプレイ [30] は理想的な 4 D 光線空間再現デバイスである．光線空間の 2 次元 (ϕ, θ) のスライスである要素画像の配列 (x, y) として平面に記録されていた IP 画像が，レンズ（原理的にはピンホール）の角度選択性により，再び 4 次元の光線空間 (x, y, ϕ, θ) として空間に展開される．ただし IP の原理は図 2.8 に示したように光線の可逆性に基づいているため，実写入力画像に基づく再生像は凹凸が逆転する疑視像（pseudo-scopic image）の問題がある．説明は省くが疑視像の問題は文献 [22–25] で取り扱われている．

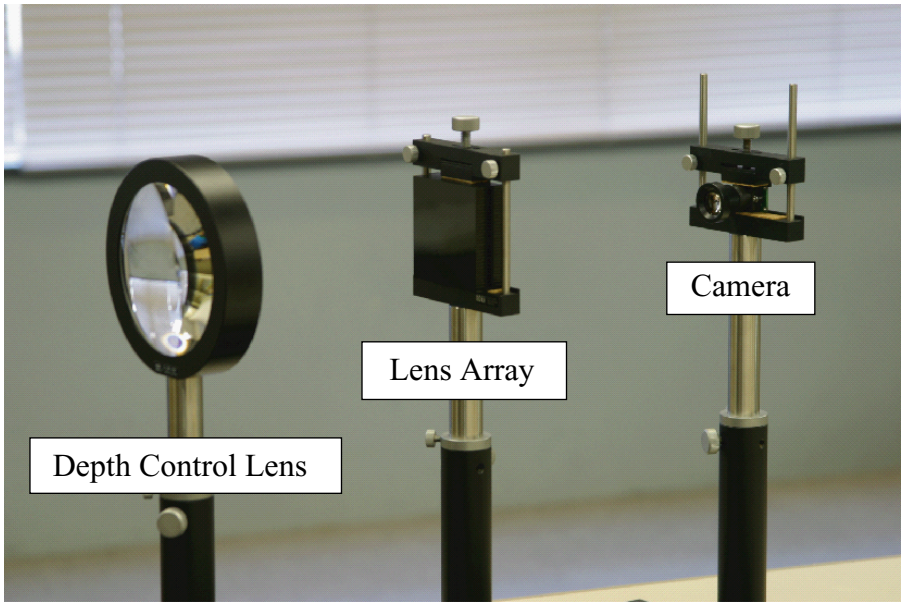
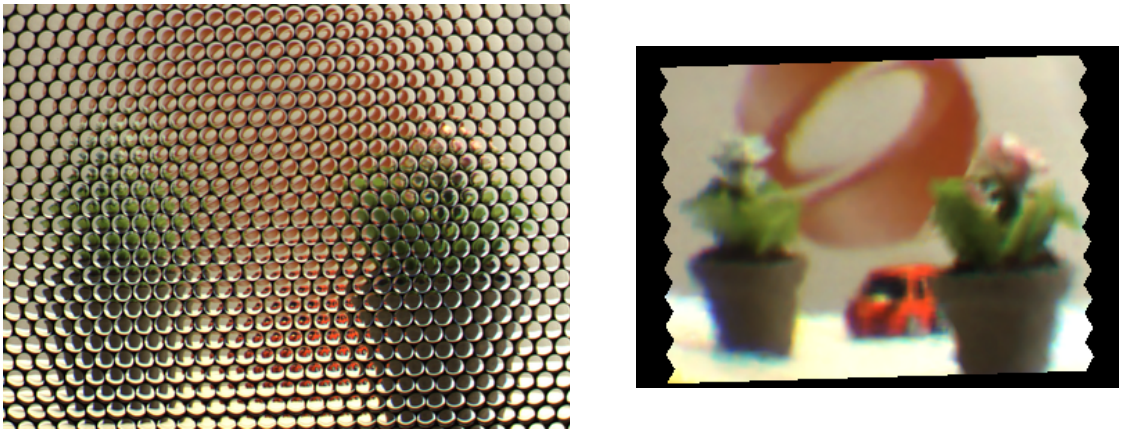


図 2.9: LIFLET 撮像系



(a) An integral photography　　(b) A synthesized image

図 2.10: LIFLET により撮影されるインテグラルフォトグラフィと合成画像の例

2.5.2　IP 画像からの自由視点画像合成

実写 IP 画像を 3 次元ディスプレイによる光線空間の再現に用いる研究と平行して，実写 IP 画像を IBR のために利用する研究がある．Yamamoto ら [26] は，レンズアレイと 1 台のカメラを撮像系に利用したシステム (LIFLET) を構築している (図 2.9)．LIFLET により撮影される IP 画像を図 2.10 (a) に示す．画像合成の際には，まず，ステレオマッチングを利用して各レンズごとに 1 つの奥行きを推定することにより，視点依存簡易幾何モデルを構築する．これを用いることにより，図 2.10 (b) のような高品質な画像をインタラクティブレートで提示することに成功している．

小島らは，この撮像系の空間周波数特性を解析し [27]，カメラの数を増やすことでより高画質な画像を合成するシステムを提案している [28]．また，河ら [29] は，カメラアレイ入力に対して提案されていた合

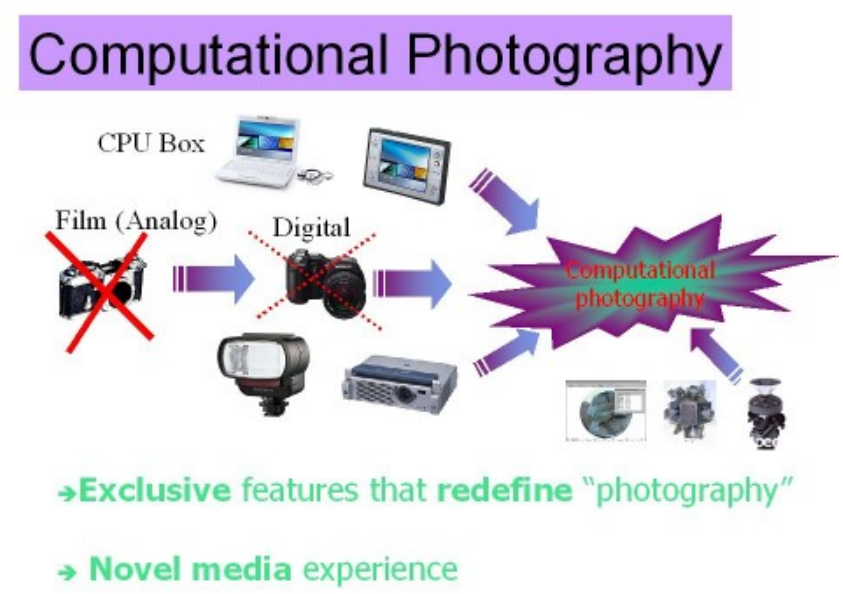


図 2.11: Computational Photography [33]

焦判定法 [31,32] をこのシステムに適用することにより，ステレオマッチングを用いた手法よりも高画質な画像を合成できることを示した．

2.6　Computational Photography

Computational Photography [5] とは，コンピュータとデジタルカメラ，また時にはその他の光学系を組み合わせた，新たな撮影技術である（図 2.11）．Oliver Bimber [34] は，アナログ撮影からデジタル撮影への進化が一つの大きな進歩であったのと同様に，デジタル撮影から Computational Photography への進化はまた一つの大きな進歩であるという．従来の撮影がイメージを記録することに力点があったのに対して，Computational Photography のアイデアは，光線情報を如何にうまく引き出し，そして利用するかにある．しかし，この定義の曖昧さもあって，Computational Photography の範囲は広くその全容の把握は容易ではない．この点について，Nayar [5] は Computational Photography のアイデアを図 2.12 のように整理している．この分類は,「新しい要素の追加」の一面から捉えられた Computational Photography の分類と考えられる．この分類は，Computational Photography にまつわる研究を整理するのに役立つため，本節の最初の 3 小節にわたって分類にしたがいどのような研究があるのかを述べる．

2.6.1　Computational Camera

Traditional Camera(図 2.12(a)) が，レンズ中心を通る光線を detector でありのままに記録するのに対して，Computational Camera(図 2.12(b)) は，通常のレンズの替わりに用いる新たな光学系を通る光線を detector で記録する．この detector で記録されたイメージは，私たちが見てそのまま認識できる像とは違ったものでもよく，ある意味で，空間の情報がエンコードされ記録されたものと考えることができる．この情報から，私たちが認識しうるイメージを作り出すためには，コンピュータを用いて，その追加された新たな光学系に関する知識から情報をデコードしなくてはならない．この考えは，Computational Camera が単にデ

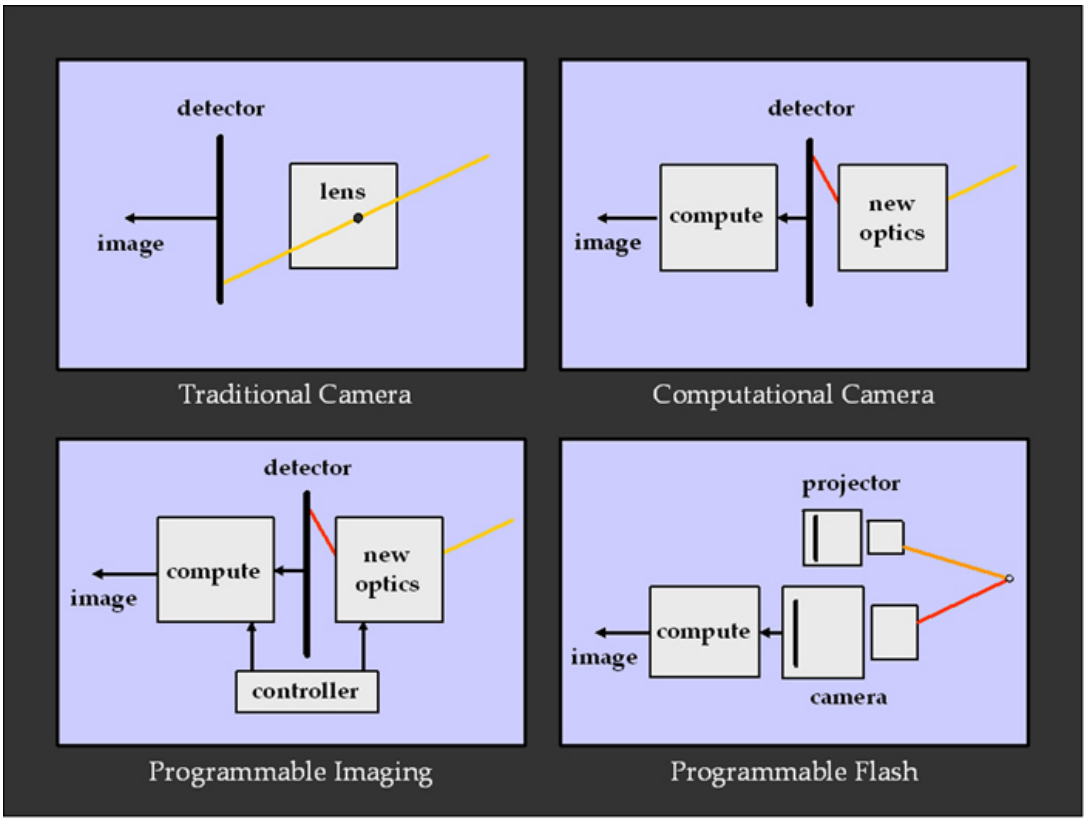


図 2.12: Computational Photography の分類 [5]

ジタルカメラと画像処理の組み合わせではなく，新たな可能性に挑むものであることを伝えている．

Computational Camera の例として， Nayar [5] は，曲面ミラーを用いた 360 °視野カメラ，透過率の異なる種々のカラーフィルタをモザイク状に用いた高ダイナミックレンジカメラ，一方向に連続的に波長透過性が変化する干渉フィルターを用いたスペクトラムカメラ，円錐状のミラーを用いた 3 次元形状撮影カメラ，など実に様々な提案をおこなっている．

また，この範疇に属する研究として，苗村ら [4] による LIFLET や，Levoy ら [35] による LFM(Light Field Microscopy) が位置づけられるだろう．これらは，マイクロレンズアレイをカメラの前面に用いることで，IP 画像を撮影するシステムといえる．IP 画像をコンピュータを用いて解析することによって，自由視点画像やリフォーカス画像，また奥行き画像を導くことが可能である．

2.6.2 Programmable Imaging

Programmable Imaging(図 2.12(c)) は，光学系をコンピュータからコントロールしながら撮影を行うことによって，Computational Camera より多くの又は場合に応じて適切に選択された情報を取得可能とする構成である．

Nayar ら [36] は，コントロール可能なマイクロミラーアレイである DMD(Digital Micromirror Device) を用いた，適応的ダイナミックレンジカメラを提案している．これは，図 2.13 に示すような構成をとる．DMD とは $10\mu m$ 四方程度の大きさの微小な鏡を解像度分（およそ１００万個程度）ならべたもので，電気的な制御によってそれぞれの鏡の傾き（現在のところ $\pm 10°$ の 2 値）を $10\mu sec$ 程度の速度で高速に制御できる光学デバイスである．

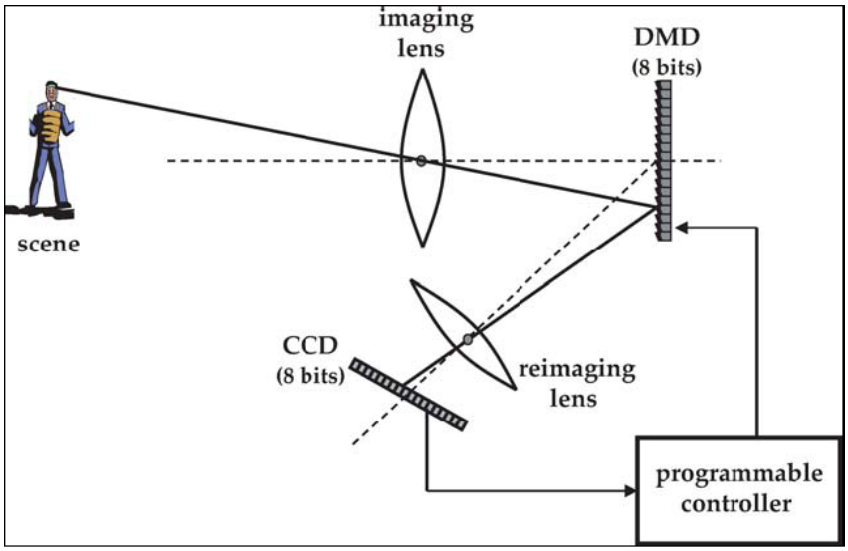


図 2.13: DMD を用いて適応的に露光を調整するシステム [36]

図 2.14: (左)ADR を用いない場合. (右)ADR を用いた場合 [36]

DMD を高速に切り替えることによって，イメージセンサーに届く光の量あるいは露光時間を画素ごとにコントロール可能となるため，輝度が飽和しそうな領域だけ露光時間を抑えることができ，例えば逆光下など明るい領域と暗い領域が同時にするシーンであっても撮影が可能となる．なお，どの領域が輝度が飽和しそうかという情報が事前に必要となるが，この情報は直前に通常の撮影を行うことによって推定できる．

Zomet ら [37] は，コントロール可能な絞りとして LCD を 2 枚用い，レンズを用いずに撮影する Controllable Aperture Imaging を提案している．これは原理的にはレンズを用いない古典的なピンホールカメラであるが，ピンホールの位置を平面上で自由に制御でき，かつその平面が 2 面あるという非常に面白い構成（図 2.15）になっている．[1]

この構成では，複数のピンホールをうまく配置して配列することにより，像平面を分割することができ，図 2.16 に示すような興味ある特定の領域をつなぎ合わせたイメージを得ることができる．これは，無駄な

[1]ただこの構成では，元来ピンホールが十分な光量を集めるのに不利なことに加えて，LCD の光通過率もそれほど大きくないため，露光時間を長くせざるを得ないため実用的には問題がある点が指摘できる

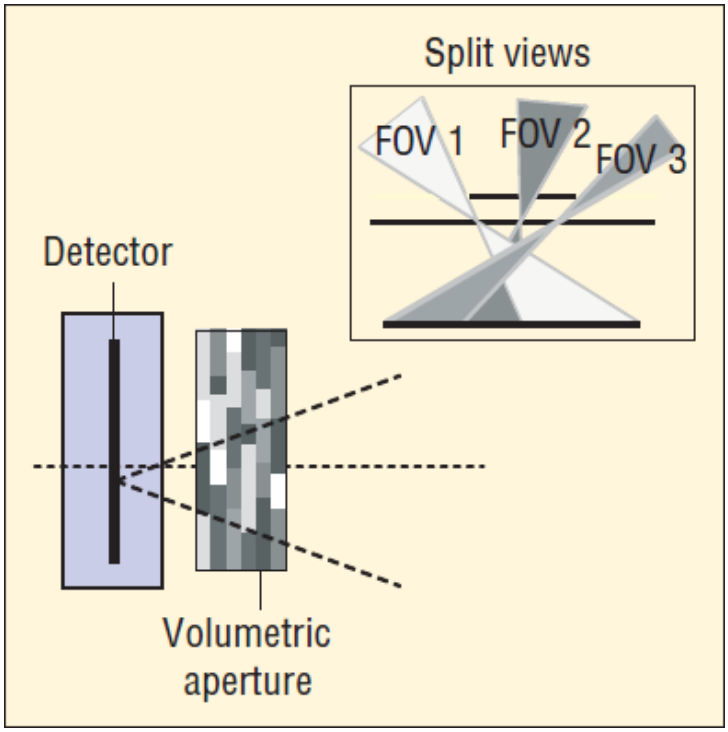


図 2.15: volumetric aperture を用いた split field-of-view imaging [37]

図 2.16: (左) 対象シーン. (右)Split Field-Of-View Imaging を用いた場合 [37]

図 2.17: 仮想的に照明条件を変えて合成した画像 [38]

領域を省くことによって解像度を有効に利用しているといえる．

2.6.3 Programmable Flash

Programmable Flash に関する取り組みは，大きく 2 つにわけられる．一つは，任意照明下でのイメージを後で自由に合成する方法に関してであり，他方は，空間的に強弱のパターンをもった照明を対象にあてることによってなにがしかの情報を取得しようとする試みである．

図 2.17 を見ても明らかなように，照明をどう当てるかでシーンの見え方は大きく異なる．もし，1 度撮影しただけで後から照明の具合を自由に変えることができればシーンの演出や編集の効率化に大いに貢献するだろう．また，異なるシーンを合成する際にも，撮影後に照明を自由に選べれば，おのおのの照明環境が異なるせいで不自然な合成となってしまうことを避けられる．

あらゆる照明の配置のもとでの光線を再現するにはどうしたらいいか考えるにあたっては，光の加法性が重要である．照明 A と照明 B のもとでのシーンは，照明 A のもとでのシーンと照明 B のもとでのシーンとの輝度の和であらわせる．つまり，任意の点においた照明のもとでのシーンを記録しておけば，あらゆる環境のもとでのシーンが再現可能となる．

まず，2.1 節で述べたように，ある環境下での光線は $P(x, y, z, \phi, \theta, \lambda, t)$ による 7 D の関数で記録できる．これと同様に照明も，$P_i(x, y, z, \phi, \theta, \lambda, t)$，$x, y, z$ に位置し，ϕ, θ の方向に波長 λ の光線を時刻 t において放射する光源として記述できる．よって，光線場と反射場の完全な記述は，

$$P = P(x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \lambda_i, t_i, x_r, y_r, z_r, \phi_r, \theta_r, \lambda_r, t_r) \tag{2.4}$$

である (図 2.18)．ただし，反射・散乱によって波長が変化しない $\lambda_i = \lambda_r$ という仮定は多くの場合正しい

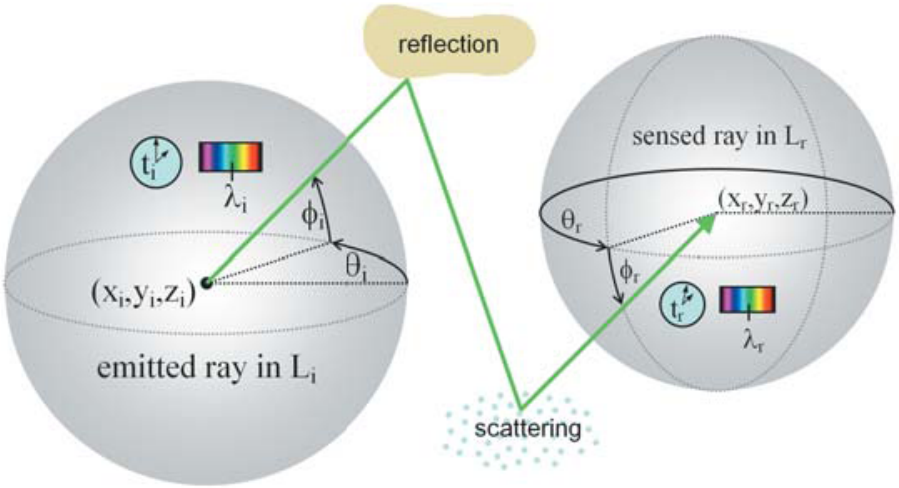
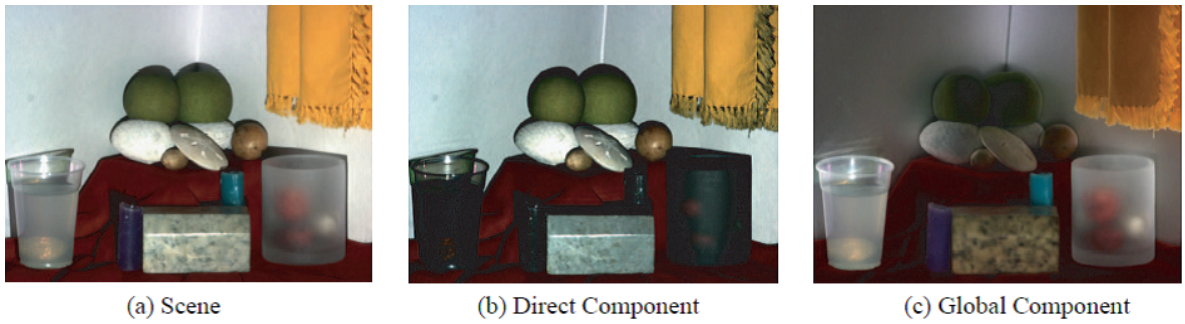


図 2.18: plenoptic funtion と反射場の記述 [38]

図 2.19: The Light Stage 5 [39]



(a) Scene　(b) Direct Component　(c) Global Component

図 2.20: direct 光と global 光の分離 [40]

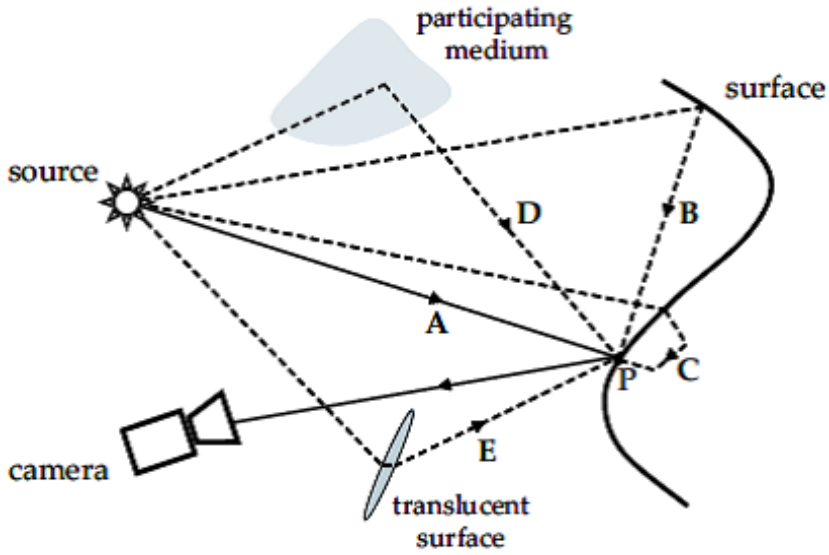


図 2.21: 物体からでる光線の種類 (A) 直接光 (B) 内部反射光 (C) 表面化散乱光 (D) 体積散乱光 (E) 透光 [40]

し，通常の感覚では $t_i = t_r$ とみなして問題ない．よって，

$$P = P(x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, x_r, y_r, z_r, \phi_r, \theta_r, \lambda, t) \tag{2.5}$$

で十分に光線場と反射場を記述したとみなせる．

実際に 12D の次元すべてを記録するのは困難であるが，$P(\phi_i, \theta_i, \phi_r, \theta_r, \lambda, t)$ の 7 D の記録は既に行われている [39]．これは，カメラを 1 点に固定し，光源を半球上に 156 個配置したスタジオ（図 2.19）である．

一方，Nayar ら [40] は，市松模様をプロジェクターから高速に移動させつつ照射することで 2 種類の光，direct 光と global 光の分離を実現した（図 2.20）．ある画素に記憶される物体表面の 1 点からの光線は，光源からの直接の反射・散乱光線（direct 光）とその他の経路をとる光線（global 光）の 2 種類にわけて考えることができる（図 2.21）．global 光には様々な種類が存在するが，特に微細な隙間のある物質に見られる表面下散乱やコロイド上の物質に見られる体積散乱が重要である．[2]direct 光と global 光の分離の原理は，次のような仮定に基づいている．市松模様の黒い格子が対象点にあたっている瞬間は，この点から反射散乱されてくる光は global 光の半分である．一方，市松模様の白い格子が対象点にあたっている瞬間には，

[2]これらの存在が CG でレンダリングを行う際になかなか自然な描写ができない原因だと考えられている．

この点から global 光の半分と direct 光の和だけの光線が反射散乱されてくる．したがって，この２通りの状態で光線が記録できれば，global 光と direct 光を分離できる．具体的には，以下の手順で生成できる．

(1) 市松模様をプロジェクターから高速に移動させつつ照射
(2) 画素ごとに上記のスパン中のフレームから最大（最小）の輝度を選んで最大（最小）輝度画像を生成．
(3) 最大輝度画像と最小輝度画像の差をとって direct 光画像を，最小輝度画像の輝度を２倍して global 光画像を得る．

2.7　まとめ

本章において，本研究に関連する研究について概観した．まず実空間の視覚情報を扱う手段として光線空間の概念を紹介し，続けて光線空間を記録・再生する装置・技術について述べた．加えて，本研究の構想の核となる概念として Computational Photography のアイデアを数例の既存研究とともに紹介した．Computational Photography の特徴をまとめると以下の通りである．

(1) イメージセンサが記録する情報は，対象を忠実に写した像だと考えるのではなく，巧妙に選択された７次元 Light Field のサブサンプリングでありエンコードされた光線情報であると考える．
(2) 得られた光線情報を，コンピュータで処理（デコード）して望む像を再構成することを前提とする．
(3) Light Field から効果的に情報をサンプリングするために，用途に応じて工夫した光学系を用いる．
(4) 必要に応じてコントローラーを付し，サンプリングの仕方あるいは環境を動的に制御する．

Computational Photography は光線情報を扱う強力な手法となりうる．本研究ではインテグラルフォトグラフィに対して新たな光学系とコントローラを導入することを以下の章で検討する．

第3章

可変焦点レンズアレイシステムの実装

表 3.1: 可変焦点レンズアレイ撮像システムの構成

名称	型	メーカー
可変焦点レンズ	Arctic416SL	Varioptic
レンズアレイ固定板	（オーダーメイド）	p 板.com
レンズドライバ	DrivBoard-PWM	Varioptic
コントローラ	ATmega48	Atmel
GigabitEthernet カメラ	IPX-4M15-GCFB	Imperx

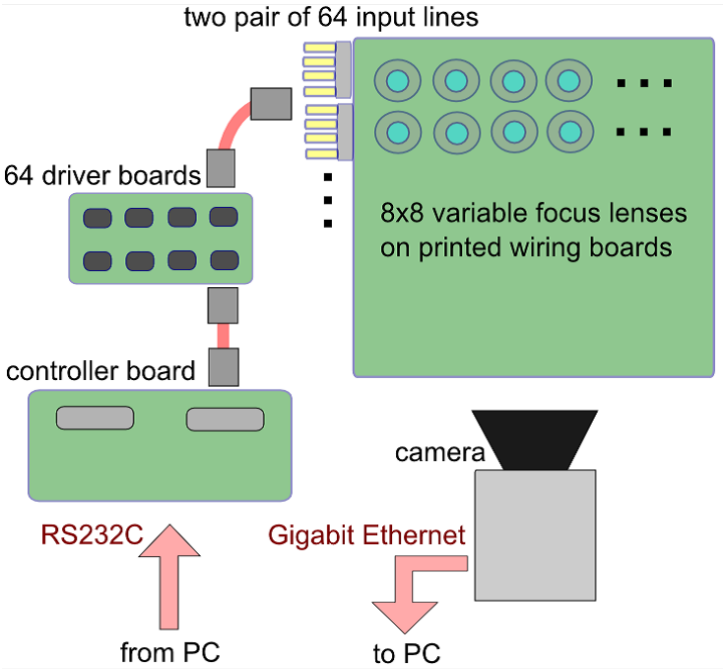


図 3.1: 可変焦点レンズシステムの構成

3.1　はじめに

本研究では， Programmable Imaging の実践の一形態として，イメージベースドレンダリングための可変焦点レンズアレイ撮像システムを試作した．本章ではその構成と動作について紹介する．まず，3.2 節にて全体の構成を概観した後に，3.3 節において各構成要素について個別に述べる．なお，開発的要素が強いために，ところどころに付加的な情報を脚注として示した．

3.2　可変焦点レンズアレイ撮像システム構成概要

可変焦点レンズアレイ撮像システムを構成する主な要素を表 3.1 に挙げた．図 3.1 はシステムの構成の概略である．以下，全体の構成を簡単に説明する．$8 \times 8 = 64$ 個の可変焦点レンズは 2 枚のレンズアレイ固定板によって挟まれネジによる加圧で固定される．レンズアレイ固定板はプリント基板になっておりレンズ 1 個につき 2 本の配線が独立に配されている．レンズアレイ固定板はケーブルによりレンズドライバボー

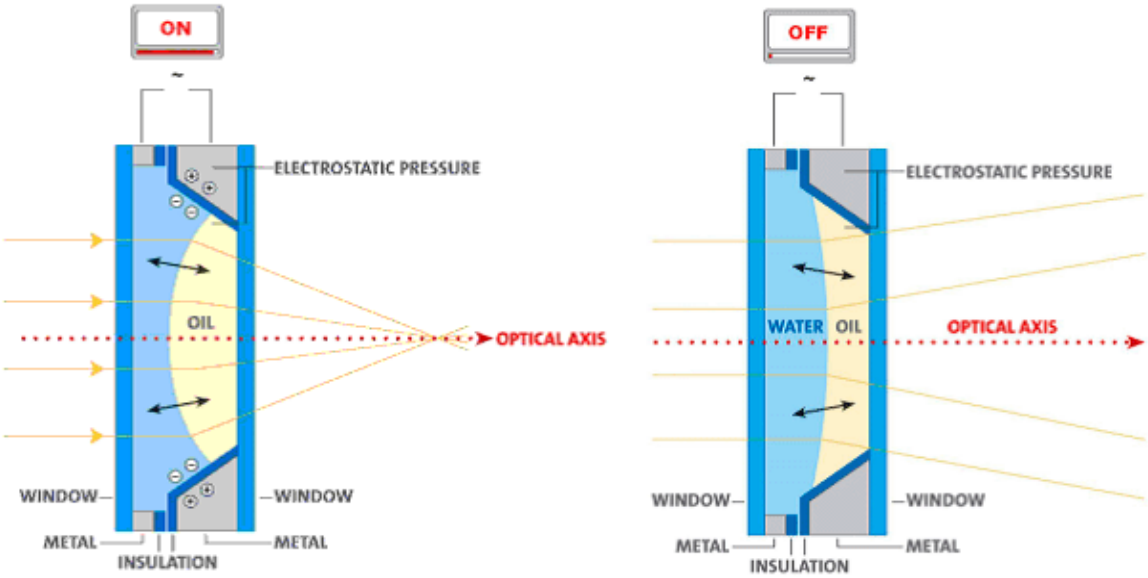


図 3.2: 液体レンズの動作原理 [42]

図 3.3: 可変焦点レンズの外観 [42]

ドと接続される．レンズドライバボードはレンズ駆動に必要な電圧を出力するためのレンズドライバ IC を備えている．レンズドライバボードはコントロールボードとケーブルで接続される．コントロールボード上のマイコンは PC からのコマンドに応じてレンズドライバ IC の制御をおこなう．

3.3　システムの構成要素

システムの構成要素について一つ一つ説明する．

3.3.1　可変焦点レンズ

可変焦点レンズとは，レンズ自体を動かすことなく焦点距離を変えられるレンズである．[1] 可変焦点の実現には，レンズ媒質の屈折率を変化させるか媒質の界面の形状を変化させることが必用である．媒質の界面の形状を変化させるタイプのレンズに electrowetting を用いた液体レンズ [41] がある（図 3.2）．このレ

[1] 一方で，撮影システムの焦平面を変える機構（カメラのオートフォーカス等）は，ガイドに取り付けられたレンズとレンズの位置を動かすアクチュエータからなるユニットによって実現されることが現在一般的である．レンズを動かすアクチュエータの種類によってピエゾアクチュエータ方式・ボイスコイルモータ方式・スッテピングモータ方式等，様々な方式がある．

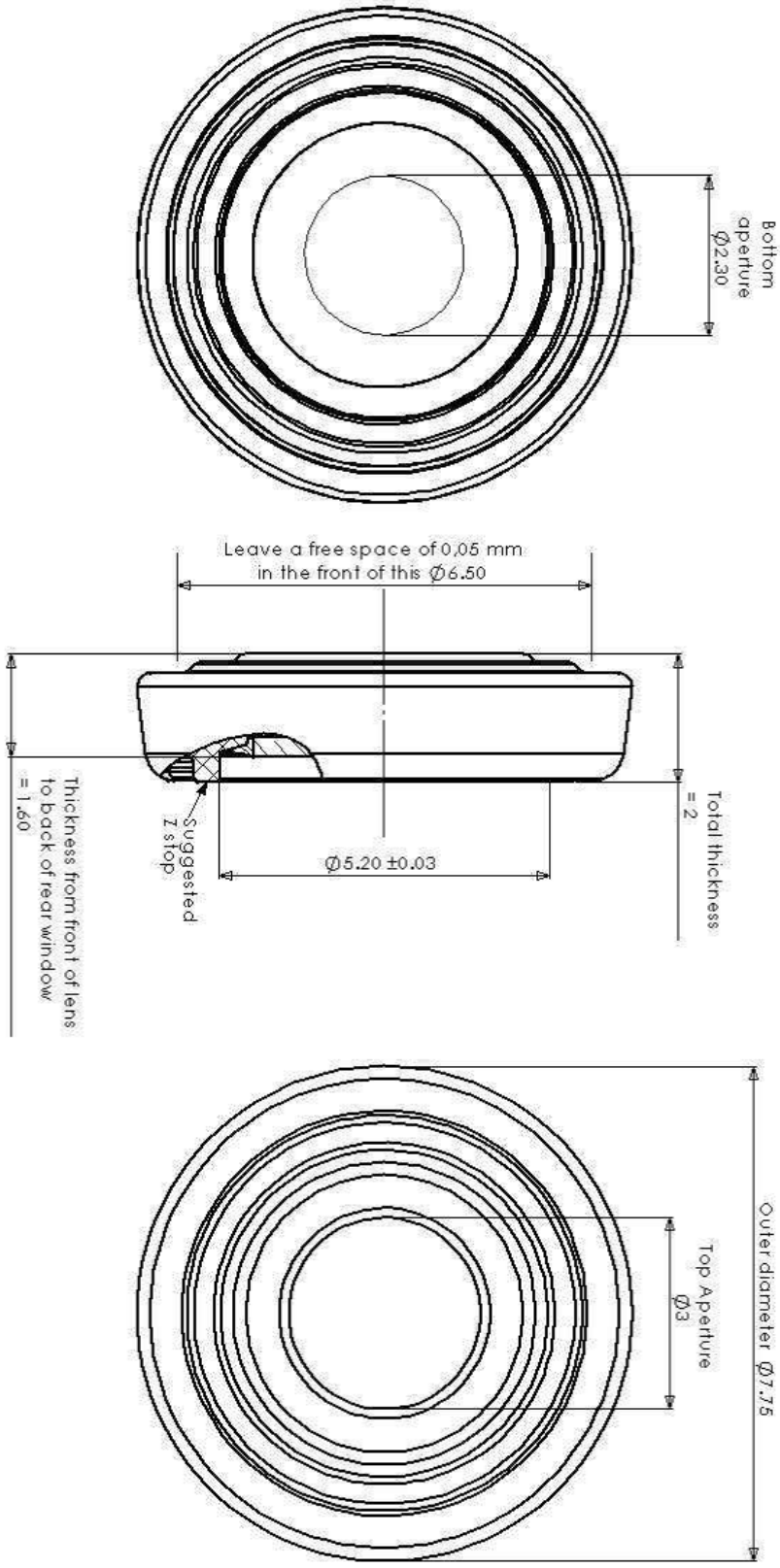


図 3.4: 使用した可変焦点レンズ

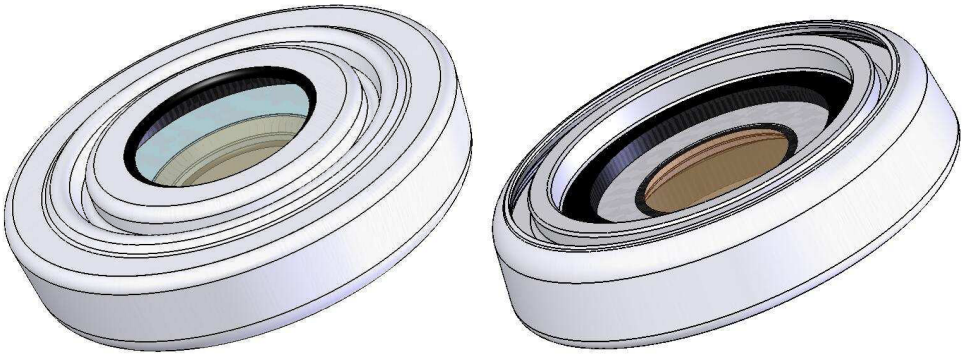


図 3.5: 使用した可変焦点レンズの外観

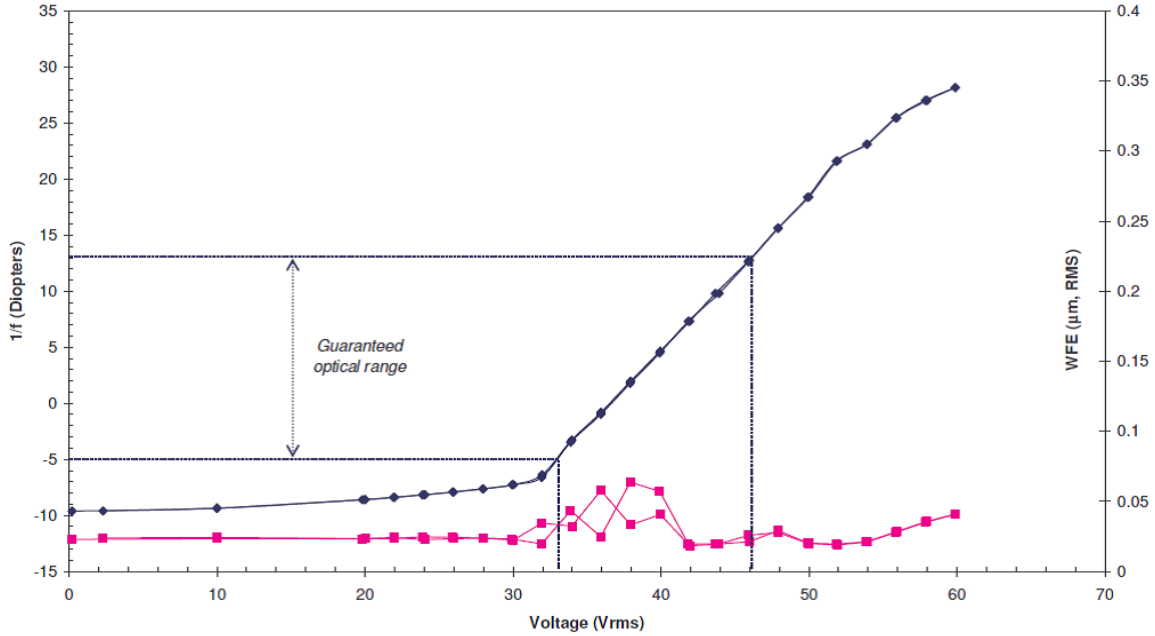


図 3.6: 電圧-レンズパワーの関係

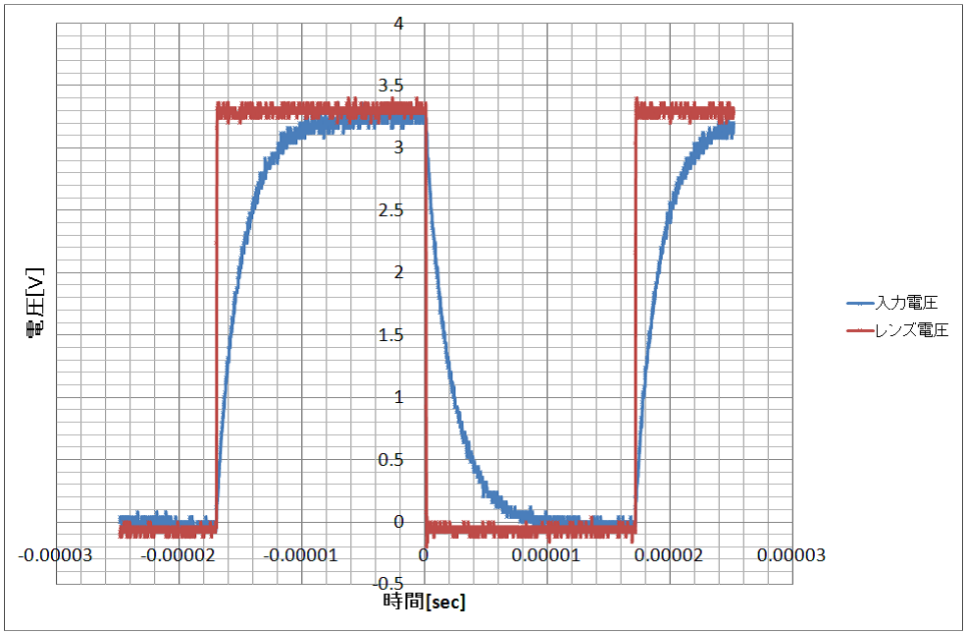


図 3.7: レンズの電圧応答

ンズは電気的特性が異なる 2 種類の液体を封止した容器に電圧をかけることで，2 種の液体の界面の曲率を変化させることを焦点変化の原理としている．このレンズの特徴は，機械的な可動部分がまったくないことである．レンズ位置の機械的駆動により焦点距離を変えるユニットと比べると以下の長所がある．まず，長期間使用しても部品摩耗による誤差が生じない，衝撃に強い，といった対故障性の高さがある．ヒステリシスがほとんどなく高速な応答を示す点も優れている．[2] 機構が単純なためにサイズを小さくしやすい．以上の長所のためにレンズを並べてレンズアレイを構成するのに非常に使い勝手が良いレンズといえる．なお，まだ実現されていないが，将来的にはレンズ作成工程において 1 基板上に可変焦点レンズを密に並べたアレイを製作することも原理的には可能と考えられるために有望なデバイスであると考えている．一方で，液体レンズ故の短所も存在する．表面張力の関係でレンズの大型化は難しいこと，また液体の体積変化を起こす温度変化に弱いことが挙げられる．とはいえ，レンズの大型化は難しいことはむしろ小さなレンズを複数並べレンズアレイとすることへの動機づけとなる．温度変化に弱いことは実装上の問題となる可能性もあるが，本研究の使用の範囲（室内の使用・周囲に熱源がない）では問題にならなかった．

今回用いたレンズは Varioptic 社の製品（図 3.3）である．[3] 試作開始時に最新の製品であった Arctic416SL を用いた．[4] Arctic416SL の模式図を図 3.4, 外観図を図 3.5 に示す．レンズ外形は直径 $7.75mm$，レンズ開口は直径 $3.0mm$（前面）・$2.3mm$（後面）である．従って，レンズの面積に対する開口面積の比は 15%（前面）9%（後面）となりアレイとして並べたときに有効に利用できる領域が少ない．これは一見すると，IP 画像を撮影した時に隙間が多くなってしまいカメラの解像度を有効に利用できないように思える．しかし，この点は撮影方法を工夫することにより改善が可能である（詳しくは 3.4 節で述べる）．

メーカ提供のデータシートによる電圧-レンズパワー特性を図 3.6 に示す．このレンズは $0Vrms$ から $60Vrms$ の電圧入力でレンズパワー（焦点距離の逆数）を $-9m^{-1}$ から $28m^{-1}$ までコントロールできる．

[2] ピエゾアクチュエータによりレンズを駆動するタイプの可変焦点ユニットは高速であるが，ヒステリシスがあるために制御が複雑となる．

[3] Varioptic 社の液体レンズは，広く市場向けに一般供給された初めての可変焦点レンズである．携帯電話に内蔵されるカメラのレンズ用途として量産化が開始されている．

[4] Varioptic 社は続々と新製品を投入しており，Arctic416SL はすでに上位製品で置換されている．

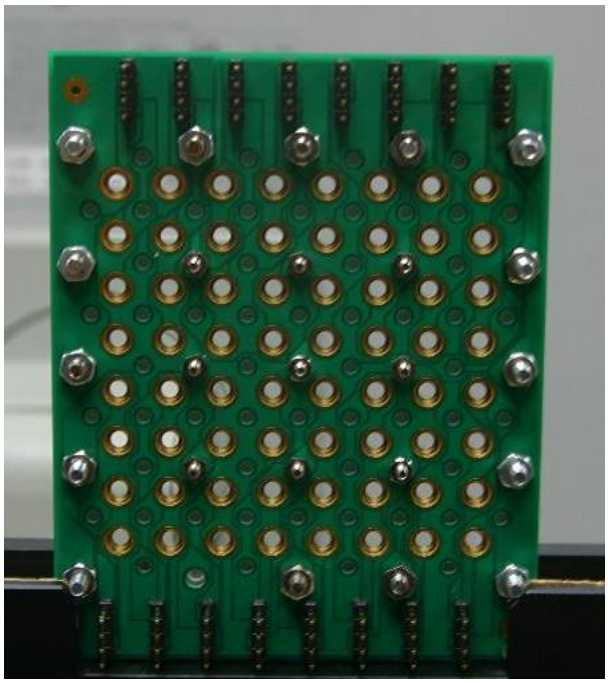


図 3.8: レンズアレイ固定板

レンズは２つの電極をもつ．電極の一方は前面と側面の外装である．もう一方の電極は裏面のリング状凸部である．この２つの電極に電圧をかけることで焦点を制御できる．従ってレンズを駆動するためには，電極に電気的接触をとる配線が必要となる．この点の実装については 3.3.2 節に詳しく述べる．

electrowetting の原理を考えるとレンズは電気的にはコンデンサと等価であると考えられる．[5] この点を確かめるためにレンズの電気的特性を測定した結果を図 3.7 に示す．単体レンズを $10k\Omega$ の抵抗を介して方形波電圧を印加し反応をオシロスコープで観察した．図 3.7 より容量性の反応を示していることがわかる．立ち上がり・立下りの曲線部分に対して対数をとってから最小２乗法で線形フィッティングにより傾きを求めたところ 4.98×10^5 であった．すなわち時定数はおよそ $2\mu s$ である．これより，レンズの容量を推定したところ $200pF$ の値を得た．

3.3.2　レンズアレイ固定板

レンズをアレイ状に配置し且つ配線するために専用の固定板を作成した．固定板は２枚一組となっており，レンズを上下から挟み加圧することで固定するようになっている．加圧は固定板上に開けた穴を通してボルトとナットを用い締めることで調整する．固定板はプリント基板になっており，レンズの置かれる位置に電極パッドが描かれている．十分な加圧をすることでレンズの表と裏の電極がそれぞれ固定板上の電極パッドと密着し電気的接触がとれる．電極パッドからはプリント配線がレンズ別に伸びており固定板の端部でソケットにまとめられ外部回路と繋げられるようにしてある．

可能な限り密にレンズを詰めた方が効率がよいが，レンズの側面は電極となているために互いに接触しないよう幾ばくか間をおいて配列する必要がある．レンズ同士の接触を防ぐために非導電性のガイド板を作成した．ガイド板はレンズより若干薄い厚さの板であり，レンズの配置される位置に穴があけてあるものである．レンズをガイド板中に並べてから２枚の固定板で挟んだ後，３枚の板をボルトで固定する構造

[5]ただし，電圧により容量は変化すると考えられる．

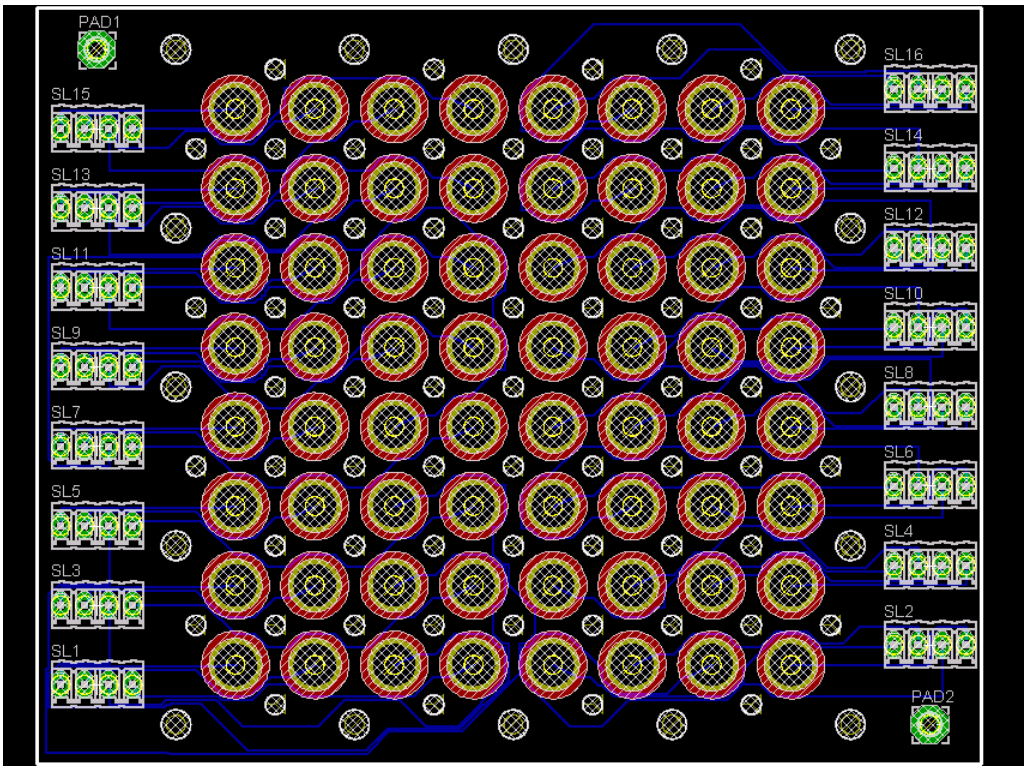


図 3.9: レンズアレイ固定板・配線パターン

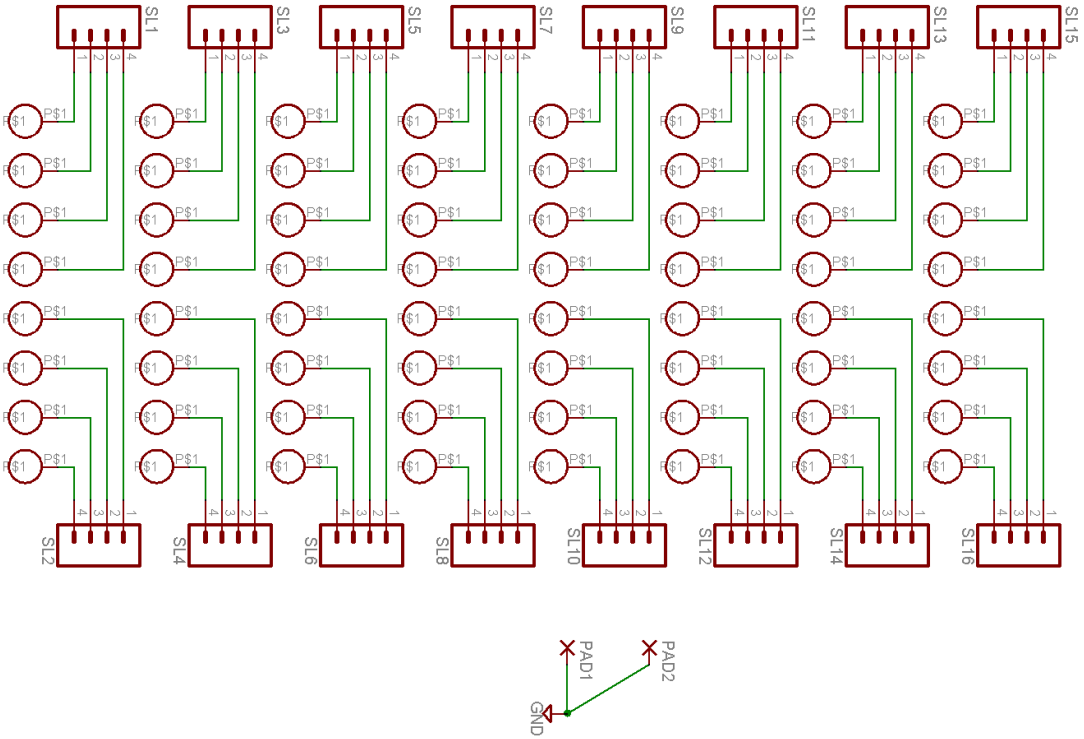


図 3.10: レンズアレイ固定板・回路図

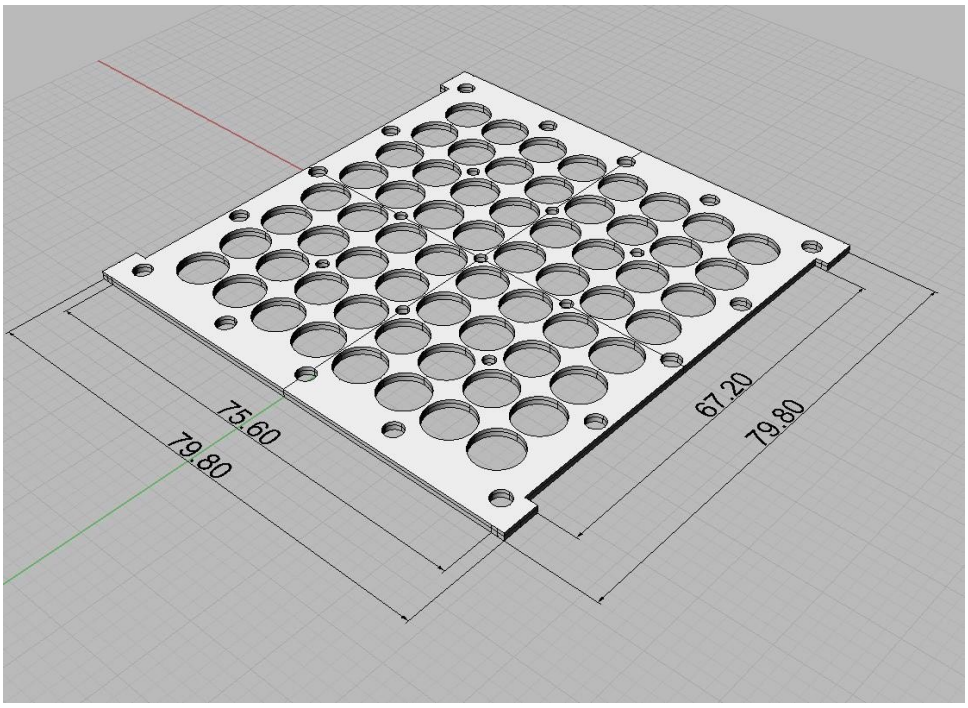


図 3.11: レンズアレイガイド板

にすることで，レンズの相互絶縁と正確な位置決めができた．

レンズの配置は 8×8 の正方格子として試作を行った．[6] レンズ直径 $7.75mm$ に対してレンズ間隙を $0.65mm$ とってレンズピッチを $8.40mm$ としている．結果，レンズアレイのレンズ部分の面積占有率は 70.1% となった．

ガイド板は３次元プリンタ（CAD データに基づき立体形状の造形を行う機械）を用いて非導電性の樹脂により製作，[7] 固定板はプリント基板を外注することで製作した．設計した固定板の配線パターンを図 3.9 に回路図を図 3.10 に示す．[8]

3.3.3　レンズドライバ

可変焦点レンズを駆動するには最大で $60Vrms$ 程度の高い電圧が必要となる．そのために専用のレンズドライバボードを varioptic 社より購入した．レンズドライバボードは Rogers Corporation 社製の EL ランプ用ドライバ IC である D388A [9] を核としている．ドライバＩＣはステップアップコンバータを内蔵しており $3V$ 程度の入力電圧から $100Vrms$ 程度の電圧を生成できる (なおＩＣの出力段にはブリッジ回路が内蔵されており出力は交流となっている)．ドライバＩＣには出力調整用の入力ポートがあり，そこへアナログ電圧を加えることで出力電圧値を調整できる．ドライバボードではドライバＩＣの出力調整用の入力ポートにローパスフィルタを介して PWM 信号を入力することにより電圧値を調整する仕様となっいる．$5V$ の PWM 信号を入力したときのドライブボードの出力電圧を計測した結果を図 3.12 に示す．完全に線形な応

[6] レンズ密度の観点で言えば，正方格子の面積占有率 78.5% に対してハニカム配列の面積占有率は 90.7% であり，ハニカム配列の方が優位であるが，設計の簡易さを優先して正方格子を選択した．

[7] ３次元プリンタ（Dimension 768）による製作では細い線の強度がでないためにレンズ間隙を $0.65mm$ ほどとった．レンズ間隙を狭くするためには基板加工機でベイク板を削りだすことで製作することが考えられる．

[8] 設計には Eagle というフリーの CAD ソフトを用いた．

[9] まったく同じものだが，レンズドライバ用の IC は DLL3A という名前になっている．

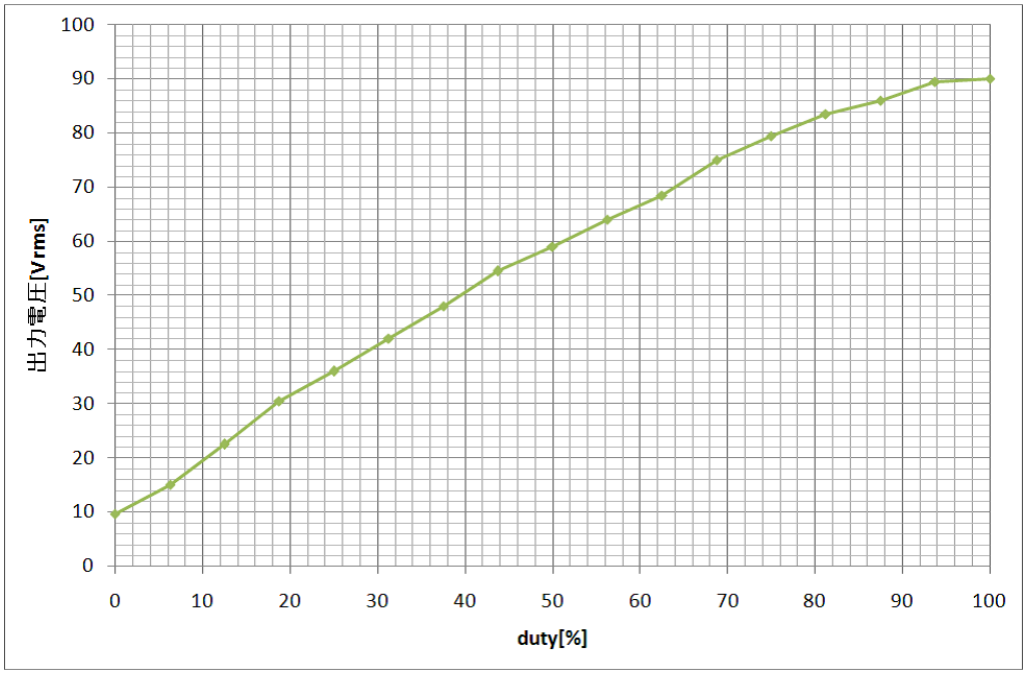


図 3.12: レンズドライバ出力

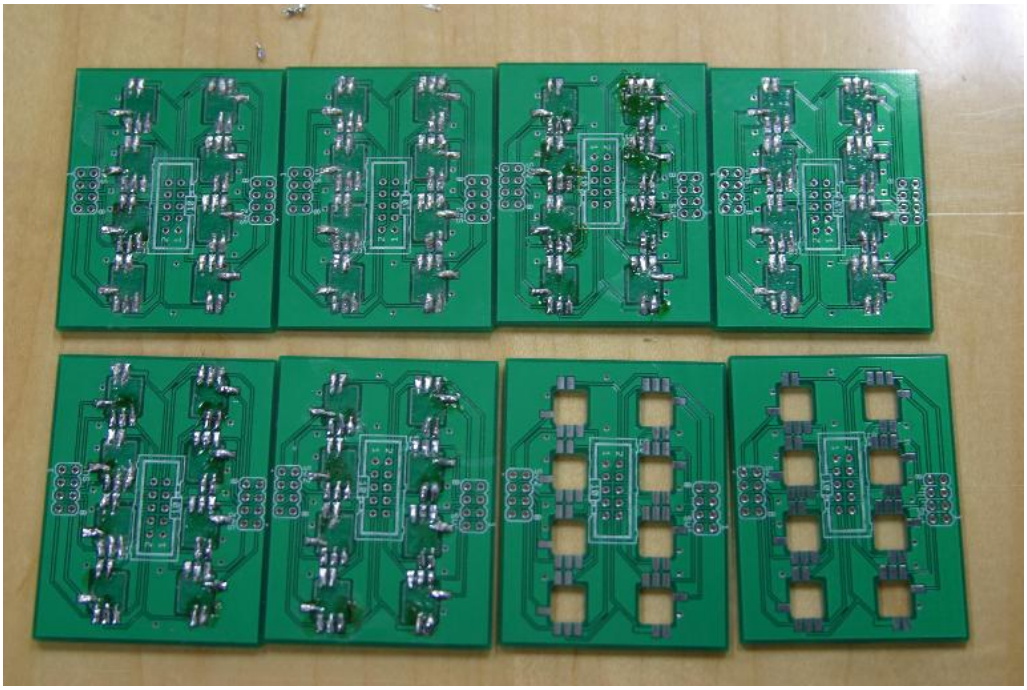


図 3.13: レンズドライバモジュール

図 3.14: 使用したカメラ

答となっていないことがわかる．この点はレンズを駆動する際に考慮しなければならない．

ドライバボードはレンズ１個につき１つ必要となる．従って６４個のレンズを駆動するために６４個のドライバボードが必要となる．実装に当たっては，取り扱い易さと故障等の原因による交換時の保守性とのバランスを考え，８個のドライバボードを一組としてモジュールを作成した．図 3.13 に示すようにドライバボードが嵌る様に 8 個穴を開けたプリント基板を８枚作成し，ドライバボードを嵌めてから端子を半田で配線することでドライバモジュールを作成した．

3.3.4　レンズコントローラ

PC からのコマンドに応じてレンズドライバを制御するためにマイコンを用いた．マイコンは２チャネルの 8bit タイマーを備えて，各チャネル毎に２系統の PWM 信号を出力できる．レンズドライバの出力調整用ポートへローパスフィルタを介して PWM 信号を出力することでレンズドライバを制御することとし，１マイコンあたり４つのレンズドライバを独立に制御することが可能である．そのため，６４個のレンズドライバを制御するために１６個のマイコンを用意した．マイコンはパソコンと RS232C シリアル通信によって接続する．パソコン側の RS232C 出力端子は１６個のマイコンすべての RS232C 入力端子と接続している．各マイコンは自身のアドレスによってパソコンからの自分宛のコマンドを見分けて処理するように設計した．

3.3.5　デジタルカメラ

レンズアレイをデジタルカメラで撮影することでインテグラルフォトグラフィ画像を取得する．インテグラルフォトグラフィ画像中の各レンズの画像は小さくなるので，できるかぎり高解像度のカメラが必要となる．今回は解像度 2048×2048 を $15fps$ で記録できるカメラを用いた（図 3.14）．原理的には 8×8 正方格子のレンズアレイを映した場合，最大で 256×256 解像度でレンズを写すことができる．実際にはレンズの開口はレンズ径より小さくまたレンズ間には間隙があるために解像度は上記の値より小さい．本稿における設計ではレンズピッチ $8.4mm$ に対して，開口径 $3mm$ であるから，カメラに映るレンズの解像度は 91×91 程度と小さくなる．撮影した IP 画像を図 3.15 に示す．ただし，この点は次節に述べる撮影上のテクニックにより軽減可能である．

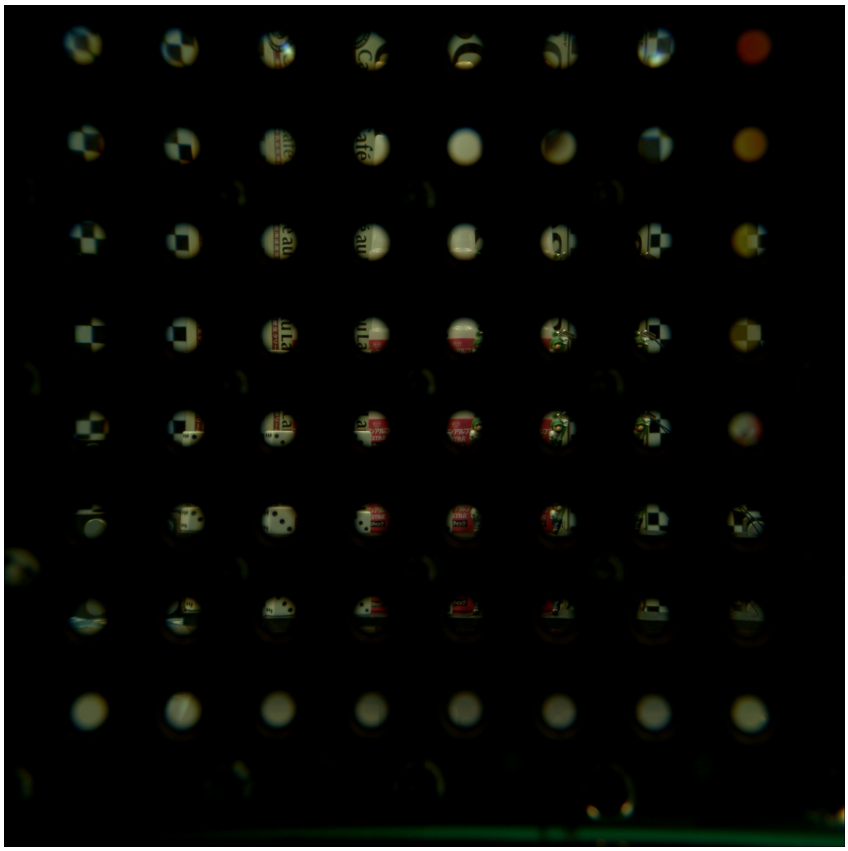


図 3.15: 撮影した IP 画像

3.4　可変焦点レンズアレイの撮影テクニック

レンズアレイは被写体とカメラの間に固定して撮影する．この時，カメラのフォーカスを合わせる位置が重要である．通常はレンズ間の干渉を避けるためにカメラのフォーカスをレンズアレイ面上にあわせるべきである．しかし，レンズの開口が狭い場合には撮影上のテクニックとしてわざとカメラフォーカスをレンズアレイ面から離すことも有益である．なぜなら，デフォーカスすることで開口が拡大してみえるために要素画像の解像度を上昇させることができるからである．ただし，レンズの開口面以外からの光（固定板面等の反射光）が画像に混入しないようにカメラ-レンズアレイ間を外光から遮断して撮影すべきである．また，レンズ中心とレンズ外延部での光量差が生じるために，画像の輝度補正が必要となることにも注意を要する．図 3.16 にカメラの焦点をレンズアレイから離して撮った画像例を示す．焦点を離しすぎるとレンズの画像間で干渉が生じる（図 3.16 右）.

3.5　焦点調節の実験

製作した可変焦点レンズアレイシステムの動作実験を行った．まず，すべてのレンズに同じ電圧をかけた場合の撮影結果を図 3.17・図 3.18・図 3.19 に示す．シーンにはレンズアレイから $400cm$ の位置にカボチャとキューブ・$30cm$ の位置に魚のフィギュア・$10cm$ の位置にコーヒー缶を置いてある．レンズの焦点距離を変化させていくに従ってフォーカスのあうオブジェクトが連続的に変化していく画像が撮れた．図は遠景・中景・近景それぞれの位置のオブジェクトにフォーカスがあった瞬間の画像である．

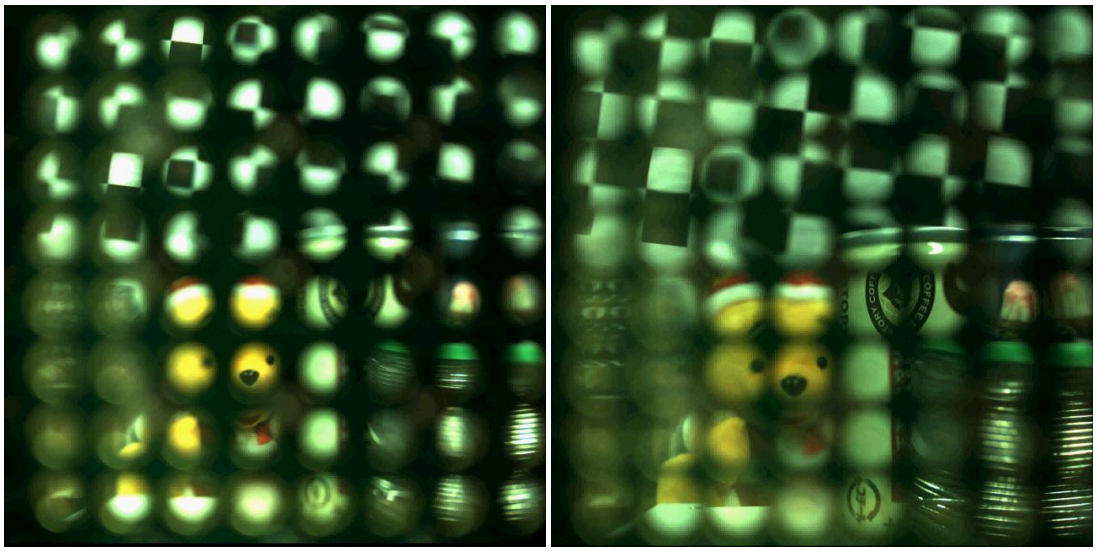


図 3.16: カメラの焦点をレンズアレイから離して撮った画像

次に，個々のレンズに異なる電圧をかけて焦点を独立に制御する実験を行った．さきほどの実験で記録しておいたフォーカスがあうレンズコントローラの出力値を用いて，遠景・中景・近景すべてに焦点があうようにレンズの焦点距離を制御した．結果を図 3.20 に示す．レンズに離れた奥行きにある 2 以上のオブジェクトが映っている場合は一つのオブジェクトのみに焦点が合い他のオブジェクトはぼけて映ってはいるものも，全体としてみると遠景・中景・近景すべてに焦点があった画像が得られている．このように可変焦点レンズアレイを用いて区分的にフォーカス位置を変えて撮影することで，全体として被写界深度の広い画像を取得可能であることがわかった．

3.6　可変焦点レンズアレイシステムの応用アイデア

1 個の可変焦点レンズを用いた場合には，高速な全焦点画像合成 [43] やジオメトリ推定 [44] が考えうる．しかしこの節では特に各レンズの焦点距離を独立に制御できるという可変焦点レンズアレイの特性を生かした用途について検討する．まず，カメラの被写界深度が狭い場合について考え，次に被写界深度が広い場合について考える．

3.6.1　要素レンズの独立オートフォーカスによる被写界深度拡大

シーン中の物体の奥行きのレンジが広い場合，被写界深度が狭いカメラのみで撮影すると，すべての物体に焦点をあわせることができずいずれかの物体がぼけた画像しか得ることができない．一方，可変焦点レンズアレイを用いたシステムでは，各レンズの焦点を制御してそれぞれの物体にフォーカスが合った画像を得ることができる．従って，実質的に被写界深度が拡大でき，光学ボケを減らした画像を得ることができる（前節の実験を参照）．この仕組みは，各レンズがすべて独立にオートフォーカスを行うことで実現できる．オートフォーカス単体の実装は様々な方法がありここでは述べないが，[10] 以下では本システム特有の実装アイデアについて述べる．本システムはレンズ毎にオートフォーカスを行うが，アレイの構造を考え近接するレンズの情報を考慮することでロバストな推定ができる．すなわち，多くのオブジェクトは連

[10] 例えば，画像のコントラストやエッジの鮮明さを評価関数として評価値が改善する方向に徐々に焦点距離を動かす方法などがある．

図 3.17: 遠景にフォーカス

図 3.18: 中景にフォーカス

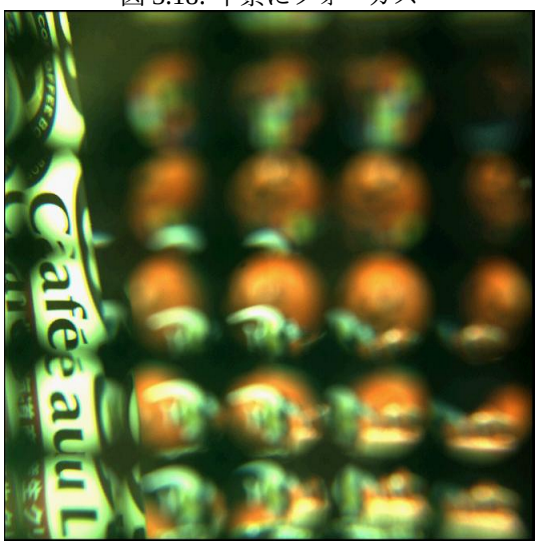


図 3.19: 近景にフォーカス

図 3.20: 各レンズごとにオブジェクトを選んでフォーカス

続的な表面をもっていることを鑑み，レンズのフォーカス位置は近辺のレンズのフォーカス位置と近い値を持つと考える．こうすることで，１レンズでオートフォーカスが失敗した場合でも，その影響を軽減できる．しかし，オブジェクトの境界では背景とオブジェクトで奥行き位置が大きくずれることが一般的である．この場合はフォーカス位置は隣り合うレンズで大きく異なっていたほうがむしろふさわしい．以上のことを考慮すると，フォーカス位置の 2 次元行列に対して単純に平滑化フィルタをかけるのでなく，バイラテラルフィルタをかけることでエッジを保ったままフォーカス位置の推定がロバストにできると考えられる．[11] なお，本手法ではレンズ毎にオートフォーカスを行った結果，同時にシーンのストラクチャ推定もできる（フォーカス位置はすなわち物体位置である）．詳しい考察については今後の課題としたい．

3.6.2　光線空間のサンプリング方法の最適化

カメラの被写界深度が広い場合について考えてみる．レンズの焦点距離に関わらずフォーカスが物体に合う場合には，焦点距離の自由度を用いて光線空間のサンプリング方法を制御できる．この利点について詳細な議論を 4 章で行う．4 章では具体例として，ステレオグラフィの最適化を行う方法について述べる．

3.7　まとめ

本章では，可変焦点レンズアレイの設計と製作法について述べた．可変焦点レンズアレイは８行８列計６４個の可変焦点レンズからなり，コントローラを介してパソコンから焦点距離を制御できる構成となっている．実際に試作したシステムで各レンズの焦点距離が独立に制御できることを確認した．動作実験として，レンズ毎に映る物体に合わせてフォーカスを調整することで被写界深度を実質的に拡大できることを実証した．また，可変焦点レンズアレイの応用先についてアイデアを記した．このうち，光線空間のサンプリング方法を最適化する方法については，次章で詳しく議論をおこなうこととした．

[11] フィルタの代わりに belief propagation を用いることも考えられる．

第4章

Adaptive IP の理論

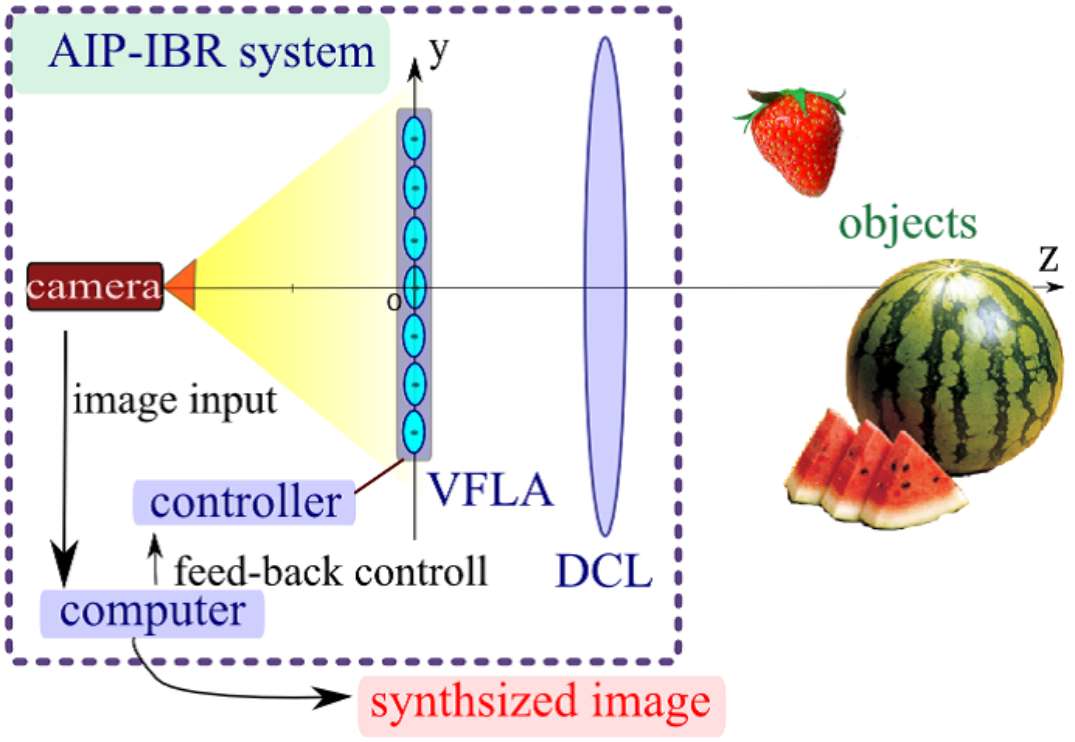


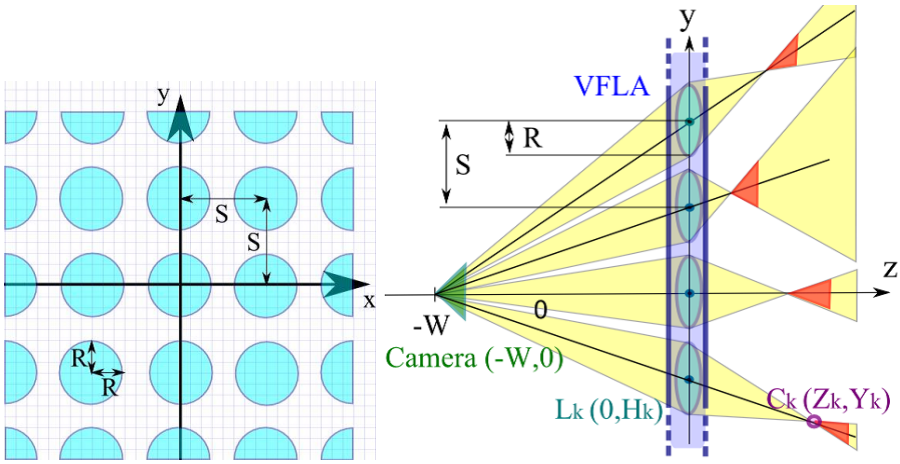
図 4.1: AIP-IBR system

4.1　はじめに

3 章で試作した可変焦点レンズシステムの応用先として，本章では Adaptive IP(適応的インテグラルフォトグラフィ) と呼ぶ手法を提案する．本章の構成は以下のとおりである．まず，4.2 節において Adaptive IP の概要と目的を述べる．次に，4.3 節において Adaptive IP を理論的に扱うための基礎として光学系の数学的記述を行う．続けて 4.4 節において光線空間サンプリングの最適化について論じ，最後に 4.5 節においてシミュレーションにより本手法の有効性を示す．

4.2　Adaptive IP の概要と目的

Adaptive IP は，可変焦点レンズアレイを用いた Programmable Imaging の一例であり，多数の視点位置から取得した画像群をもとに自由視点画像を合成する技術である Image-Based Rendering(IBR) への応用である．これまでに筆者のグループではカメラアレイやレンズアレイを用いて多視点映像を取得する装置を開発してきた [29, 45, 46]．ただし，これらは撮影シーンに応じてその都度手動で光学系を最適に設定しないと，品質の高い合成ができない点が課題であった．これに対して本研究では可変焦点レンズを用いた Programmable Imaging を導入し，シーンに対して適応的に多眼撮像光学系の構成を最適化する方式について検討する．



仮想要素カメラの定義

4.3　Adaptive IP 光学系の特性の記述

4.3.1　解析の仮定

本稿では，不定位置に不定形状の複数個のオブジェクトが配置された一般的なシーンを対象とし，シーンを AIP により撮影して得られた画像を入力として，ある仮想視点から上記シーンを観察したときの画像を合成し出力するシステム（以下 AIP-IBR）（図 4.1）を考察する．撮影系は，カメラ・VFLA・奥行き制御レンズ（Depth Control Lens : DCL）からなる．VFLA は同一の可変焦点レンズが 1 平面に等間隔に並んだものを使用する．また，カメラ・VFLA・DCL の光軸は平行かつレンズの収差は無いと仮定する．なお VFLA において干渉を生じなくするための設計上の条件として，カメラの焦平面は VFLA 面に合わせる．

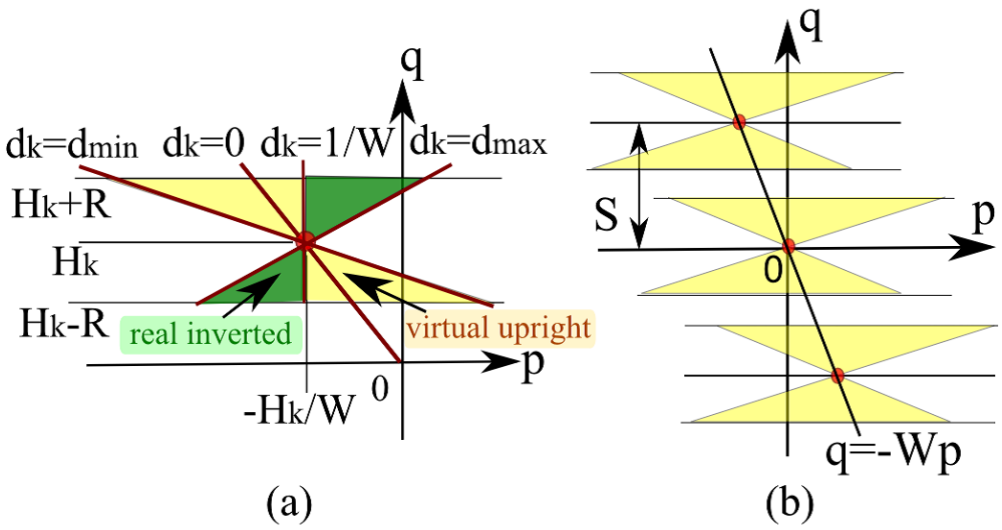
4.3.2　ノーテーションの定義

次に座標系とノーテーションを定義する（図 4.3.3 右）．光軸の向きに z 軸を，光軸に直交する 1 方向に y 軸をとった 2 次元の座標系を考える（一般性は失われない）．また簡単のためにレンズの第 1 主点と第 2 主点は中心に一致するものとして扱う（第 1 主点と第 2 主点が異なる場合であっても z 方向への平行移動が生じるのみであるから，適切に座標系を定義しなおせば式は同一になる）．VFLA は主平面が y 軸に重なるように置く．VFLA を構成する個々のレンズ (以下，要素レンズ) 共通のパラメータとして，開口半径 R，レンズピッチ S（なお $S > 2R$ の関係が成り立つ）とする．また要素レンズ個々を区別する添え字を用いて，要素レンズの系列を L_k とし，その位置を $(0, H_k)$，レンズパワーを d_k とする．カメラは z 軸上の $z = -W(W > 0)$ の位置に，DCL は z 軸上の $z = V(V > 0)$ の位置に置く．また，z, y 軸を z 方向に V 移動した座標軸を新たに z', y' 軸とする．次に光線空間を 2 平面モデルに基づき定義する．$0 \leq z \leq V$ の間の光線に対しては，光線が $z = 0, 1$ の 2 平面と交わる 2 点 $(0, y_0), (1, y_1)$ に対して，$(p, q) \equiv (y_0 - y_1, y_0)$ で定義する．$0 \leq z'$ の光線に対しても同様に (p', q') を定義する．

4.3.3　仮想カメラモデル

L_k を通ってカメラに記録される光線群は，IP 画像中の部分画像 (以下，要素画像)I_k をなす．この要素画像に注目して以下議論を進める．

まず (z, y) 空間を考察する．要素レンズ L_k によるカメラ $(-W, 0)$ の像点の座標 $\vec{V_k} = (Z_k, Y_k)$ は，レンズの公式より $Z_k = Z(d_k) = W/(d_k W - 1)$，$Y_k = H(1 + Z(d_k)/W)$ とかける．L_k を通りカメラに記録さ



仮想要素カメラがサンプリングできる光線空間

れる光線群は $\vec{V_k}$ を通ることから，要素画像 I_k を記録するような仮想的なカメラ（以下仮想要素カメラ）C_k を $\vec{V_k}$ の位置に考えることができる (図 4.3.3 右)．C_k が記録する光線群はパラメータ $-R < r < R$ を用いて，

$$y = \left(\frac{H_k}{W} - \frac{r}{Z(d_k)} \right) z + H + r \tag{4.1}$$

と書ける．なお，C_k の画角は L_k の端と $\vec{V_k}$ を結ぶ直線によって定義され，焦平面は $z = 0$ 面となる（実カメラの焦平面を $z = 0$ 面に仮定していたため）．

一方で，C_k が記録する光線群（式 (4.1)) を (p, q) 空間に変換すると，

$$(p, q) = \left(\frac{r}{Z(d_k)} - \frac{H_k}{W}, H_k + r \right) \tag{4.2}$$

となる．ここで r をパラメータとした時の (p, q) の存在範囲は

$$q = Z(d_k)p + H_k \left(1 + \frac{Z(d_k)}{W} \right) \tag{4.3}$$

の $H_k - R < q < H_k + R$ 部分の線分で与えられ，C_k の記録領域を表す．加えて，d_k をコントロールすると上記の線分は固定点 $(p, q) = (-\frac{H}{W}, H)$ を中心にして回転する．その軌跡は図 4.3.3 左のようになり C_k が取得可能な pq 光線空間を表現する．なお，サンプリング線の固定点は実カメラの中心と要素レンズの中心を通る光線を表し，I_k の中心点に記録される光線にあたる（光束中心点と記す）．図 4.3.3 左には C_k が正立虚像・倒立実像のどちらであるかも示してある．正立虚像 (倒立実像) の C_k は $z > Z_k$ の位置にある物体を正立 (倒立) で IP 画像中 (I_k) に映す．d_k の制御範囲 $d_{min} \leq d_k \leq d_{max}$ に応じて C_k は，常に倒立実像（$\frac{1}{W} < d_{min}$）である場合，常に正立虚像 ($d_{max} < \frac{1}{W}$) である場合，両者が混在する場合 ($d_{min} \leq \frac{1}{W} \leq d_{max}$) の 3 通りがあるが，図では倒立・正立が混在する場合を例にとってある．

4.4　自由視点画像合成のための仮想カメラ配置の最適化

4.4.1　シーンに応じたサンプリングの決定指針

図 4.3.3 右に AIP システム全体でサンプリング可能な pq 光線空間を示した．しかし，ある瞬間に C_k がサンプリングできる領域は式（4.3）に示したようにサンプリング可能領域中のある線分（以下，サンプリ

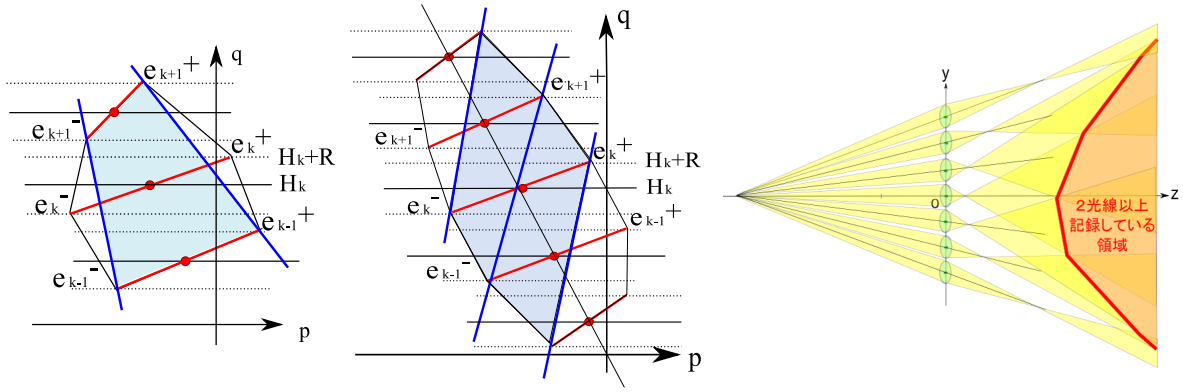


図 4.2: 要請 2 の図形表示 (左), ジオメトリ推定可能な領域の導出 (中央), ジオメトリ推定可能な領域例 (右)

ング直線）のみである．従って，ある瞬間にサンプリング直線を各々どのように設定するかが問題となる (これはシーンに応じて最適な d_k を決定する問題である)．本稿では以下でサンプリングを最適化するための d_k の決定法を明らかにする．

まず，サンプリングの最適化を考えるにあたっては，

(1) オブジェクト表面のサンプリング解像度の高さ
(2) ジオメトリ推定可能性

の 2 点が重要である．なぜなら，前者は直接合成画像の解像度に影響し，後者はジオメトリ情報が補間を用いたレンダリングのために必要だからである．第一に C_k に記録される物体表面の空間解像度は，物体の奥行きを $z = z_{obj}$ とすると，$|Z(d_k)|/|z_{obj} - Z(d_k)|$ に比例することは容易にわかる．第二にジオメトリ推定可能な物体領域を求めるのは一般には複雑なため，先立って仮想要素カメラ配置に対する制約を定義する．妥当な条件を設けることで議論を簡単にするためである．

4.4.2　仮想要素カメラ配置に対する要請

まず，系列 C_n を構成する仮想要素カメラ群は倒立実像か正立虚像かいずれかのみとする．倒立実像と正立虚像が同時に混在すると，解析も実装も複雑になるからである．また，AIP-IBR においては，効率が良く十分連続的なサンプリングを要請することが望ましい．ここで以下の要請を定義する．

(1) C_k が位置する点 $\vec{V_k}$ を通る光線は他のどのカメラ $C_n | n \neq k$ も映さない．
(2) C_{k-1} と C_{k+1} の両方に映る物点は必ず C_k に映る．

要請 1 は必要以上にサンプリングされるのを防ぐためであり，要請 2 はサンプリングに不連続さがないようにするためである．以下，この要請を満たす d_n の束縛条件を求める．先立って，サンプリング直線関数

$$p = \zeta_n(q) = q\left(d_n - \frac{1}{W}\right) - H_n d_n \tag{4.4}$$

及び，サンプリング直線の端点 $\mathbf{e}_\mathbf{k}^\pm = (\zeta_k(H_k \pm R), H_k \pm R)$ を定義（2 端点は右肩の $\pm$ で区別）する．ところで，実空間の光線は pq 光線空間における点となり，実空間のある点（を通る光線群）は pq 光線空間における直線となることを考えると，要請は pq 空間上の図形的な意味として解釈でき，要請 1 は $\mathbf{e}_\mathbf{k}^+, \mathbf{e}_\mathbf{n}^+, \mathbf{e}_\mathbf{k}^-, \mathbf{e}_\mathbf{n}^- (n \neq k)$ の 4 点が成す四角形が凸であることと同値である．要請 2 は $\mathbf{e}_{\mathbf{k-1}}^+, \mathbf{e}_\mathbf{k}^+, \mathbf{e}_{\mathbf{k+1}}^+, \mathbf{e}_{\mathbf{k-1}}^-, \mathbf{e}_\mathbf{k}^-, \mathbf{e}_{\mathbf{k+1}}^-$ の 6 点が成す六角形 (図 4.2 左) が（要請 1 成立下で）凸であることと同値である．

まず要請 1 は，2 直線 $p=\zeta_k(q), p=\zeta_{k+m}(q)$ の交点 (p,q) において，$|q-H_k|>R$ かつ $|q-H_{k+m}|>R$ で定式化でき，

$$\frac{1}{T(m)}<\left|\frac{d_{k+m}}{d_k}\right|<T(m)\left(T(m)\equiv\frac{|m|S}{R}+\mathtt{sign}\left(\frac{d_{k+m}}{d_k}\right)\right) \tag{4.5}$$

が導かれる．この式は，m 個離れたカメラ同士のレンズのパワー比に制限があることを示しており，レンズのパワーを周囲のレンズと比べて突出した値にすることを許さないことを結論づけている．なお，上式は $2R<S$ を考慮し d_k を定符号とするなら，$m=1$ でなりたてば $m>1$ でも成り立つ．

次に要請 2 は，要請 1 が成立する条件下で，$\mathbf{e}^{\pm}_{\mathbf{k+1}}, \mathbf{e}^{\pm}_{\mathbf{k-1}}$ の 2 点を通る直線とサンプリング直線 $p=\zeta_k(q)$ の交点 (p,q) において，$|q-H_k|<R$ で定式化でき，$\bar{d}_k=(d_{k+1}+d_{k-1})/2, \ddot{d}_k=(d_{k+1}-d_{k-1})/2$ と置いて，

$$(d_k-\bar{d}_k)\left(d_k+\bar{d}_k\pm\frac{2R\ddot{d}_k}{S}\right)>0 \tag{4.6}$$

が導かれる (複号は同時成立)．この条件は，$2R<S$ を考慮し，d_k を定符号とするなら，d_k の系列が凸包 $|d_{k+1}+d_{k-1}|<2|d_k|$ であることを示している．

4.4.3　ジオメトリ推定可能な物体領域

4.4.2 節で要請した制約の下で，ジオメトリ推定の計算が可能な物体領域を求める．ジオメトリ推定するには，物点は少なくとも 2 台の仮想要素カメラから同時に記録されていなければならない．pq 空間で考えると，ジオメトリ推定可能な物点は，物点を表す直線がサンプリング直線群と 2 点以上で交わる．そこで，サンプリング直線群と 1 点でしか交わらない限界の直線を各サンプリング直線局所で考えると，それら限界を表す離散直線群を滑らかに遷移するような連続直線群はすべてサンプリング直線群と 2 点以上で交わる（4.2 中央）．このような連続直線群は zy 空間では連続点群となりジオメトリ推定可能な領域の（十分条件で近似された）境界を示す．$\mathbf{e}^{\pm}_{\mathbf{k+1}}, \mathbf{e}^{\mp}_{\mathbf{k-1}}$ の 2 点を通る直線の傾き a_k，y 切片 b_k に対して，点 $\vec{g_k}=(z_k,y_k)$ を

$$\vec{g_k}=(a_k,b_k)=\left(\frac{1}{\bar{d}_k\frac{R}{R\pm S}-\frac{1}{W}}, \frac{\bar{d}_kH+\ddot{d}_k(\pm R-S)}{\bar{d}_k-\frac{1}{W}\pm\frac{S}{WR}}\right) \tag{4.7}$$

で定義する．上記の議論より，$\vec{g_k}$ の点列 ($\mathbf{e}^{\pm}_{\mathbf{n}}$ は 2 価なので 2 系列できる) を直線で結んだ線を境界として原点から遠い側の領域（十分条件）にある物点は必ず 2 台以上の仮想要素カメラに記録されていることが言える．この領域が物体を置くことが許される領域となる．図 4.2 右に一例をとり領域を図示した．

4.4.4　最適なサンプリング決定法の結論

したがって，式 (4.5)，式 (4.6)，及びジオメトリ推定可能性 (4.4.3 節) を満たす条件の下で，可能な限りサンプリング解像度を向上させるために $Z(d_k)\to z_{obj}$ となるように d_k を制御することが最適である．典型的な実装のイメージとしては，仮想要素カメラがすべて引いた ($d_k\to\max d_k$) 初期状態から，図 4.2 右で示す境界線が物体を包むように仮想要素カメラ群を物体に近づければよいことになる．

4.5　Adaptive IP のシミュレーション

提案方式の妥当性を確かめるため，CG によるシミュレーション実験を行った．まず，IP および AIP の光学系をシミュレーションするソフトウェアを開発し，CG シーンから評価用の多眼画像を作成した．次に，得られた多眼画像から自由視点画像を合成し，AIP と IP とで合成画像の品質を比較した．

対象とする CG シーンは，3 枚の平面状のオブジェクトで構成されており，近景にイチゴ，中景にスイカ，遠景に海と空を配した．シミュレーション光学系では，このシーンを，従来のレンズアレイ（従来の

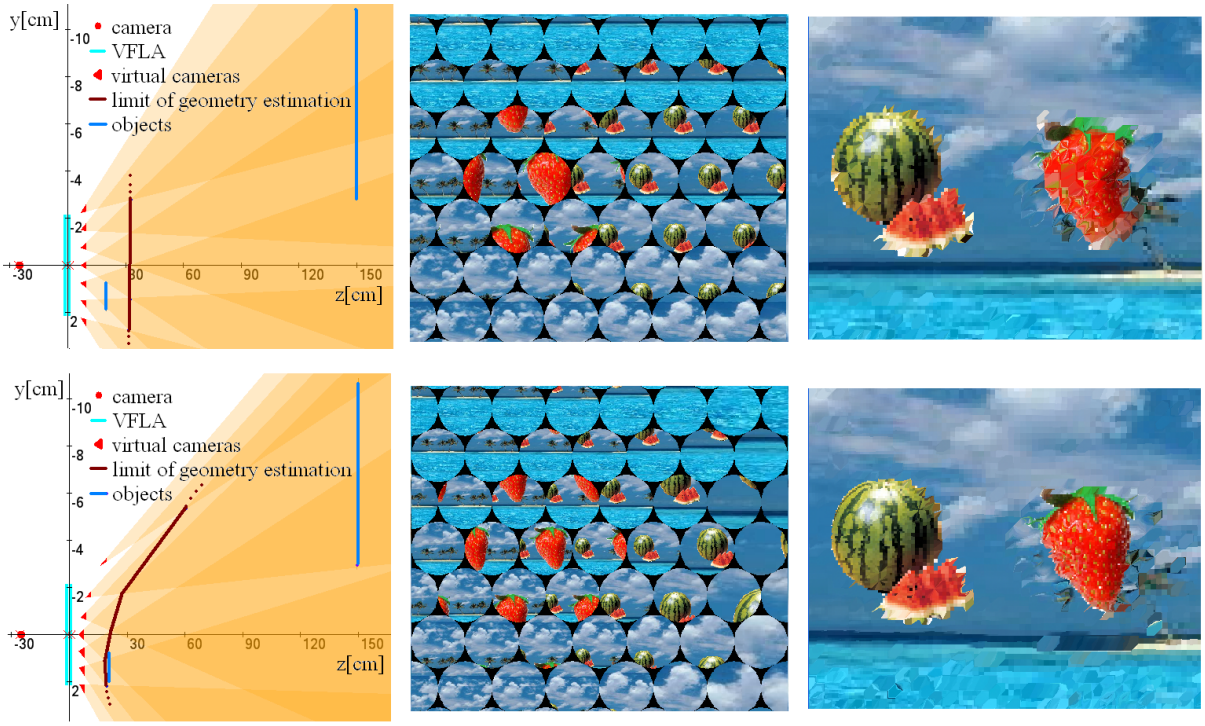


図 4.3: 左から順に，仮想要素カメラ配置・入力多眼画像・合成画像．上段は IP，下段は AIP による．

IP 方式：図 4.3 上段左）または VFLA（AIP 方式：図 4.3 下段左）を介して，VGA 解像度のピンホールカメラで撮影した．図 4.3 上段中央は従来の IP による多眼画像であり，要素レンズの焦点はすべて同一になっている．この時，イチゴは撮像系に接近しすぎてジオメトリ推定が不可能であり，スイカは遠くにありすぎて解像度が低い．一方で図 4.3 下段中央は AIP による多眼画像である．VFLA を用いているため，要素レンズごとに焦点距離が異なる．近景のイチゴがジオメトリ推定可能な領域に入るとともに，中景のスイカも高い解像度で撮影されている．

出力画像は，ステレオ計測の原理に基づいて多眼画像から対象シーンのジオメトリを推定したのち，Buehler ら [47] の手法により合成した．Buehler らの手法は任意に配置されたカメラ群から自由視点画像合成を行う手法であり，本稿ではこの手法を仮想要素カメラ群に対して適用した．手法の詳細は省略するが，直感的に述べると，画像を合成する視点位置に応じて，多眼画像から切り出した小領域を，適切な重みで混色しながら滑らかにつなぎ合わせることで，目的の画像を合成した．図 4.3 上段右は従来の IP からの，図 4.3 下段右は AIP からの同一視点での合成画像である．IP では，ジオメトリが推定できない位置になるイチゴの部分で，合成画像が大きく劣化している．また，中景のスイカでは解像度の劣化が見られる．一方で AIP 画像では，近景のイチゴが鮮明に合成できていると同時に，スイカの解像度も IP の場合よりも向上していることがわかる．

しかし，AIP においても合成画像の品質に不充分な点が残る．例えば，イチゴの周辺では仮想要素カメラがイチゴに対して最適化された結果，遠景の解像度が低下している．この点は 1 枚の AIP 画像のみを用いている限り解決できず，例えば，近景と遠景のそれぞれに最適化した 2 枚の AIP 画像を用いるなどの工夫が必要である．また，ジオメトリ推定の正確性に起因する問題点も今後検討する必要がある．

4.6　まとめ

本章では，可変焦点レンズアレイを用いた多眼画像撮影方式 Adaptive IP (AIP) を提案した．まず，光線空間をサンプリングの最適化を考察するために仮想カメラモデルを導入し，可変焦点レンズアレイのサンプリング能力を示した．次に，AIP の応用例として自由視点画像合成の最適化について検討を行い，対象シーンに対するサンプリングの効率性と連続性の制約の下で，各レンズの焦点距離を最適化する手法を提案できた．また本手法の有効性は CG シミュレーションにより確認できた．

第5章

結論

5.1　本研究の成果

本研究では，Programmable Imaging の概念に基づいて可変焦点レンズアレイシステムを試作した．可変焦点レンズアレイは６４個の可変焦点レンズから構成され，個々のレンズの焦点距離を独立高速に制御できるデバイスである．可変焦点レンズアレイを通して撮影をおこなうことで，サンプリングするシーンの光線を動的に細かく制御することが可能となった．実際に試作したデバイスの能力の一端として，レンズごとに映る物体に合わせてフォーカスを調整することで被写界深度を実質的に拡大できることを実証した．また可変焦点レンズアレイを用いたインテグラルフォトグラフィ画像取得システムである Adaptive IP の提案を行い，Adaptive IP が Programmable Imaging のための強力な手法となりうることを応用例をあげて考察した．まず，光線空間のサンプリングの最適化を考察するために仮想カメラモデルを導入し，可変焦点レンズアレイのサンプリング能力を示した．次にシステムの応用例の一つとして，インテグラルフォトグラフィ画像からの自由視点画像合成の品質を改善する手法を理論的に示した．そして，本手法の有効性を CG シミュレーションにより示すことに成功した．

5.2　今後の展望

今後は，まずレンズのキャリブレーションを行い正確な電圧-焦点距離関係を求める方法を確立し，キャリブレーション結果に基づきレンズの個体差を補正した制御ができるような実装を行いたい．そして，提案を行った Adaptive IP システムの実装を行い，実写入力からの自由視点画像合成を行いたいと考えている．また，可変焦点レンズアレイシステムの他の応用例として，オートフォーカスによる被写界深度の拡大や，ステレオマッチングと depth from focus の融合によるより正確なジオメトリ推定の手法といった用途について研究を進めていきたい．

謝辞

本研究を進めるにあたり，素晴らしい研究環境と数多くの成果発表の機会を与えて下さり，実に多くの有益なご助言頂きました，原島 博 教授，苗村 健 准教授に心から御礼申し上げます．原島教授には，さまざまな知見や研究への取り組み方についてご教示頂き，研究の方向性について大局的な見地からご指導頂きました．苗村准教授には，研究内容に関する具体的なご助言を頂くとともに，論文投稿や学会発表の際には細かな部分まで親身になって面倒を見て頂きました．本当にありがとうございました．

高橋 桂太氏には，研究内容や方針に関して実に多くの活発な議論をして頂くとともに，原稿や発表の内容に関して丁寧にご指導頂き，また，研究に対する姿勢に関して多くの見本を見せて頂きました．特に国際学会発表のための原稿を直して頂いた際は，スパゲティのごとく難読な私の英文を根気強く解きほぐしてくださり，その根気強さと科学に対する誠実な愛に深い感銘を受けました．厚く御礼申し上げます．

筧 康明氏には，研究生活の中で多くの励ましを頂くとともに，研究に対する姿勢に関して多くの見本を見せて頂きました．また，可変焦点レンズアレイの試作において大きな助力をいただきました．深く御礼申し上げます．

研究室において，多くの時間を共有させて頂いた SIGLF グループの皆様には特にお世話になりました．博士課程の小池 崇文氏には，研究全般にわたってリードしていただきました．師として父として温かく研究を見守っていただくとともに，時機を得た助言を随所でいただきました．広い経験に基づく的確なアドバイスは研究を進める道標を私に与えてくれました．重ね重ね御礼申し上げます．同じく博士課程の田口 裕一氏には研究内容や発表方法に関して的確なアドバイスを頂くとともに研究室での生活における様々な場面で手助けをして頂きました．研究を進める上での食生活と住生活の最適化は田口氏なしには成しえませんでした．深く御礼申し上げます．また河 宗玄氏には，在学中，レンズアレイ撮像システムに関して多くのことを教えて頂き，また身をもって研究への取り組み方の手本を示してくださいました．厚く御礼申し上げます．修士課程の李 同夏氏には，システムの実装に連日昼夜を問わず助力をいただきました．元旦の初日出を前にシステム稼働にこぎつけた時の複雑な感慨を共に共有してくれた李氏には言葉にならない程の感謝を捧げます．今後の益々のご活躍とご健康を心よりお祈り申し上げます．また，研究はもとより多岐にわたる分野で活発な議論を行っていただいた，修士課程の太田 昌宏氏，伊野 浩太氏に深く感謝いたします．ともに研究生活を過ごした，卒論生の石井 雅人氏，山本 和明氏，和田 拓朗氏にも感謝いたします．

また，2 年間の研究生活全般にわたって，原島・苗村研究室の皆様には大変お世話になりました．非常に楽しく充実した学生生活をともに過ごし，お互い切磋琢磨した，修士課程 2 年の天野 翔氏，木村 翔氏，吉野 祥之氏，成 ヨンア氏には，研究のみならずあらゆる場面でお世話になりました．皆様の今後のさらなるご活躍をお祈り申し上げます．学部４年の谷田 英生氏には，可変焦点レンズアレイの試作において惜しみない助力をいただきました．設計から組立まで幅広い知識と技術で製作を後押しして頂いた御礼は努々忘れることができません．彼なしには試作における様々な困難を乗り越えることは容易ではありませんでした．最大限の御礼を申し上げます．また，研究環境の整備に努めてくださった，大谷 智子氏，東山 薫氏，吉田 有里氏に御礼申し上げます．

最後に，研究生活を通してお世話になりました全ての方々に対して，そしてなにより温かい目で見守ってくださいました両親に対して，改めて心から感謝の意を表します．ありがとうございました．

2008 年 2 月 3 日
上田　健介

発表文献

[1] Kensuke Ueda, Takafumi Koike, Keita Takahashi, Takeshi Naemura: “Adaptive Integral Photography Imaging with Variable-Focus Lens Array,” SPIE Electronic Imaging, 6803-45, 2008.

[2] 上田健介，小池崇文，高橋桂太，苗村健: “Adaptive IP Imaging の基礎検討”, 映情学年次大, 2-8, 2007.

[3] 上田健介，小池崇文，高橋桂太，苗村健: “Adaptive IP Imaging における自由視点画像合成の検討”, 日本 VR 学会第 12 回大会, 1C1-6, pp. 63-66, 2007.

[4] 上田健介，小池崇文，高橋桂太，苗村健: “Adaptive IP Imaging の理論的検討” , 映像情報メディア学会立体映像技術研究会, 2007.

参考文献

[1] M. G. Lippmann, “Epreuves reversible donnant la sensation du relief”, J. Phys. vol. 7, pp. 821-825, 1908.

[2] M. G. Lippmann, “La photographie integrale,” Comtes-Rendus 146, pp. 446-451, 1908.

[3] 吉田 達哉, 苗村 健, 原島 博, “インテグラルフォトグラフィを用いたインタラクティブ 3 次元 CG の合成,” 3 次元画像コンファレンス 2000, pp. 39-42, 2000.

[4] T. Naemura, T. Yoshida, and H. Harashima, “3-D computer graphics based on integral photography,” Optics Express, vol. 8, no. 4, pp. 255-262, 2001.

[5] S. K. Nayar, “Computational Cameras: Redefining the Image,” IEEE Computer Magazine, pp. 30-38, Aug, 2006.

[6] E. Adelson and J. Bergen, “The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision,” Computational Models of Visual Processing Cambridge, MA: MIT Press, 1991.

[7] 苗村健, 金子正秀, 原島博：“光線情報の正投影表現に基づく 3 次元空間の記述”, テレビ誌, vol. 51, no. 12, pp. 2082-2090, Dec. 1997.

[8] M. Levoy and P. Hanrahan, “Light Field Rendering,” Proc. SIGGRAPH ’96, 1996.

[9] S. J.Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. F. Cohen, “The Lumigraph” Proc. SIGGRAPH ’96, pp. 43-54, 1996.

[10] T. Naemura, J. Tago, and H. Harashima: “Real-Time Video Based Modeling and Rendering of 3D Scenes,” IEEE Comput. Graphics & Appl., vol. 22, no. 2, pp. 66-73, 2002.

[11] C. Zhang and T. Chen: “A Self-Reconfigurable Camera Array,” Proc. 15th Eurographics Symposium on Rendering, pp. 243-254, 2004.

[12] J.C. Yang, M. Everett, C. Buehler, and L. McMillan: “A Real-Time Distributed Light Field Camera,” Proc. 13th Eurographics Workshop on Rendering, pp. 77-86, 2002.

[13] B. Wilburn, M. Smulski, K. Lee, and M.A. Horowitz: “Light Field Video Camera,” Proc. SPIE 4674, Media Processors 2002, pp. 29-36, 2002.

[14] M. Tanimoto: “FTV (free viewpoint television) creating ray-based image engineering,” Proc. IEEE Intl. Conf. Image Processing (ICIP 2005), vol. II, pp. 25-28, Oct., 2005.

[15] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, Hanrahan: “Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera,” Stanford Tech Report CTSR 2005-02, April, 2005.

[16] A. Isaksen, L. McMillan, and S. J. Gortler: “Dynamically reparameterized light fields,” Proc. ACM SIGGRAPH 2000, pp. 297-306, Jul., 2000.

[17] J.-X. Chai, X. Tong, S.-C. Chan, and H.-Y. Shum: “Plenoptic sampling,” Proc. ACM SIGGRAPH 2000, pp. 307-318, Jul., 2000.

[18] N. Joshi, W. Matusik, and S. Avidan, “Matting and deblurring: Natural video matting using camera arrays,” ACM Transactions on Graphics, vol. 25, no. 3, Jul., 2006

[19] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy, “Capturing reality I: High performance imaging using large camera arrays,” ACM Transactions on Graphics, vol. 24, no. 3, Jul., 2005.

[20] M. Levoy, B. Chen, V. Vaish, M. Horowitz, I. McDowall, and M. Bolas, “Synthetic aperture confocal imaging,” ACM Transactions on Graphics, 2004.

[21] M. Levoy, B. Chen, V. Vaish, M. Horowitz, I. McDowall, and M. Bolas, “Light Field and Computational Imaging,” IEEE Computer Magazine, pp. 46-55, Aug., 2006.

[22] H. E. Ives, “Optical properties of a Lippmann lenticulated sheet,” Journal of Optical Society of America, vol. 21, pp.171-176, 1931.

[23] C. Burckhardt, “Optimum parameters and resolution limitation of integral photography,” Journal of Optical Society of America, vol. 58, pp. 71-76, 1968.

[24] C. Burckhardt, R. J. Collier, and E. T. Doherty, “Formation and inversion of pseudscopic images,” Applied Optics, vol. 7, pp. 4528, 1968.

[25] R. L. DeMontebello, “Wide-angle integral photography - the integram system,” Three Dimensional Imaging, S. A. Benton, ed., Proc. SPIE vol. 120, pp. 73-91, 1977.

[26] T. Yamamoto, M. Kojima, and T. Naemura: “LIFLET: Light field live with thousands of lenslets,” ACM SIGGRAPH 2004 Emerging Technologies, etech 0130, Aug., 2004.

[27] 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”, 映情学誌, vol. 59, no. 4, pp. 596-580, Apr., 2005.

[28] M. Kojima and T. Naemura: “McLiflet: Multiple cameras for light field live with thousands of lenslets,” Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII, vol. 5664, pp. 495-505, Jan., 2005.

[29] 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”, 映情学誌, vol. 59, no. 10, pp. 1483-1487, Sept., 2005.

[30] T. Koike, M. Oikawa, K. Utsugi, M. Kobayashi and M. Yamasaki: “Interactive Autostereoscopic Display with 60 Ray Directions,” ACM SIGGRAPH 2006, Research Posters, no. 147, 2006.

[31] 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, vol. J88-D-II, no. 3, pp. 573-584, Mar., 2005.

[32] K. Takahashi, A. Kubota, and T. Naemura: “A focus measure for light field rendering,” Proc. IEEE Intl. Conf. Image Processing (ICIP 2004), pp. 2475-2478, Oct. 2004.

[33] F. Nielsen, “Computational Photography,” http://www.csl.sony.co.jp/person/nielsen /computationalphotography.html

[34] O. Bimber, “Computational Photography-The Next Big Step,” IEEE Computer Magazine, pp. 28-29, Aug., 2006.

[35] M. Levoy, M. Horowitz, R. Ng, A. Adams, and M. Footer, “Light Field Microscopy,” ACM Transactions on Graphics, vol. 25, no. 3, 2006.

[36] S. K. Nayar, V. Branzoi, and T. Boult, “Programmable Imaging: Towards a Flexible Camera,” International Journal on Computer Vision, Oct., 2006.

[37] A. Zomet and S. K. Nayar, “Lensless Imaging with a Controllable Aperture,” IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Jun., 2006.

[38] P. Debevec, “Virtual Cinematography: Relightning through Computation,” IEEE Computer Magazine, pp. 57-65, Aug., 2006.

[39] A. Wenger, A. Gardner, C. Tchou, J. Unger, T. Hawkins, and P. Debevec, “Performance Relighting and Reflectance Transformation with Time-Multiplexed Illumination,” ACM Transactions on Graphics, vol. 24, no. 3, Jul., 2005.

[40] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. Grossberg, and R. Raskar, “Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination,” ACM Transactions on Graphics, Jul., 2006.

[41] B. Berge and J. Peseux, “Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting,” Eur. Phys. J. E, vol. 3, pp.159-163, 2000.

[42] http://www.varioptic.com/en/tech/technology01.php

[43] T. Kaneko,N. Mitsumoto and N. Kawahara, “可変焦点レンズを用いたデジタル全焦点顕微システム,” デンソーテクニカルレビュー, vol. 5, no. 1, pp. 27-31, 2000.

[44] S. K. Nayar, “Shape from Focus System,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and pattern Recognition, pp. 302-308, 1992.

[45] 河 宗玄, 苗村 健: “LIFLET 光学系の二重化に関する基礎検討,” 日本 VR 学会第 10 回大会, 2B2-1, pp. 357-358, 2005.

[46] 一松 隆平, 高橋 桂太, 苗村 健: “大口径凸レンズを用いたスケーラブルな多眼撮像方式に関する基礎検討,” 映情学年次大, 18-9, 2006.

[47] C. Buehler, M. Bosse, L. McMillan, S.Gorlter, and M. Cohen: “Unstructured Lumigraph Rendering,” Proc. SIGGRAPH 2001, 2001.