

コンピュータショナルフォトグラフィ 理解のための光学系入門

日 浦 慎 作^{†1}

コンピュータショナルフォトグラフィ(以下, CP とする)に関する研究は近年盛り上がりを見せているが, それらを理解するには光学系の知識を要することが多い. そこで本稿では CP に関する光学系の基礎を, コンピュータビジョンやイメージベースレンダリングで用いられる用語や知見と関連づけながら解説する.

Tutorial of optics for understanding Computational Photography

SHINSAKU HIURA^{†1}

Recently, Computational Photography attracts broad interests as an emerging research area, however, it is not so easy to approach because it often requires the knowledge of optics to understand. Therefore in this paper, I explain about the basics of optics and lens system used in CP studies with mention of terms and knowledges in computer vision and image-based rendering area.

1. はじめに

コンピュータショナルフォトグラフィ(CP)とは計算機による演算を介してシーンの画像・映像を獲得する手法である. もちろん, 既存のデジタルカメラでも画像に対する演算が全く行われていないわけではなく, センサの出力から各画素の色を求めたり(デモザイキング), センサ内で生じるノイズを除去したり, といった演算は行われている. しかし本質的に現在

のデジタルカメラは, 従来のカメラの写真フィルムを CCD や CMOS センサなどの撮像素子で置き換えただけのものであり, 現に多くのレンズ交換式デジタル一眼レフカメラではフィルム用と同じレンズを用いることができる. そのため, 画像を形成する主役としてのレンズに求められる「記録デバイス上に鮮明な像を形成する」という役割は変わっていない.

一方, カメラを「被写体の像を画素値として出力する」という機能面から捉えたとき, レンズが記録デバイス上に形成する像は光記録過程の中の単なる中間表現のひとつに過ぎないと言えることができる. このとき, レンズはもはや鑑賞に堪えうる美しい像を平面上に形成する必要はなく, センサから出力されたデータを何らかの計算により「復号」することで画像が出てくればそれでよいということになる. 言い換えると, 所望の画像を得るため, または必要な機能を実装するためにカメラ全体の構成を一から見直す余地があり, 結果として従来とは全く異なる光学系とデータ処理の組み合わせに有効性を見いだせる可能性があるわけである. これがコンピュータショナルフォトグラフィを支える基本的な動機であり, 撮像素子によるフィルムの置き換えに続く, 半導体デバイス・計算機技術によるカメラ進化の第2幕として注目を集める理由であろう.

CP はまだ生まれて間もない考え方であるため, その定義や範囲もまだはっきりとはしていない. 現に研究者によってそのとらえ方には大きなばらつきがあるように思われる. また, イメージベースレンダリング (IBR) との違いはなにかと尋ねられることもある. 冒頭の定義^{*1}に従えば, あくまで単体でも鑑賞に堪えうる画像を出発点とする IBR 等の研究に対し, 画像の獲得方法そのものを変えようとするのが CP であるということになるが, その定義の妥当性はともかく, CP では往々にして光学系の解析や設計に踏み込む機会が多い. また提案手法の利害得失を論じる上で既存のレンズ光学系の性質を知る必要もある. そこで本稿ではコンピュータショナルフォトグラフィの理解を深めるため, レンズの基礎から幾何光学のツールまでを必要な部分に限って解説することとする. 特に CP では光線の状況を考察する上でライトフィールドなど IBR における考え方が深く関連するため, IBR や CV 分野における用語や知見を交えながら解説したい. CP においてはシーンから発せられた光がセンサに到達するまでの間に, 光線を光学的に符号化し, 後に計算機により復号する「符号化撮像」が注目を集めている. ただし本稿では符号化撮像を理解する上で必要となる概念までを説明するとともに, 詳細や具体例は次稿「符号化撮像」に譲る.

^{†1} 大阪大学 大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{*1} 米国東海岸流, つまり MIT や MERL, コロンビア大学流の定義と言えよう. それに対しシアトル近辺ではノイズやブレの除去, さらにマッピングやモザイキングなどの積極的な画像の編集も含める傾向にある.

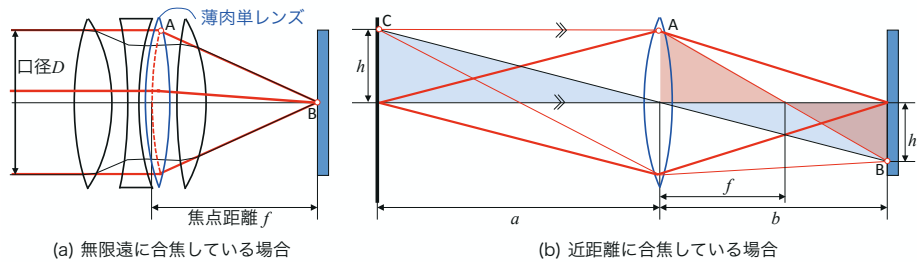


図 1 レンズの各パラメータ。(a) レンズが無遠慮に合焦している場合。写真用のレンズは複数枚で構成されるが、その構成を無視して光の入出力関係だけに着目すると全体を薄肉単レンズで表すことができ、入射光と出射光の交点の位置から焦点距離を定めることができる。(b) レンズが近距離物体に合焦している場合。倍率は a と b の比率で表すことができる。

2. レンズ

まず準備として、この章ではレンズの様々な性質や、それを表す公式について証明を交えながら解説する。

2.1 レンズの基礎

レンズは平行光を 1 点に集める働きを持つ。図 1(a) に示すように、写真用のレンズは各種収差（理想レンズからの乖離）を補正するために異なる特性を持つガラスで作った凹凸のレンズを組み合わせて構成されているが、ここではそのようなレンズの中身を無視してブラックボックスとして扱い、入射光と出射光の関係だけを考える。すると図 1(a) の赤線で示したように、入射光と出射光をそれぞれ延長して交点（点 A）を求めることができる。今、入射光が光軸に平行であるとする、点 A の位置は入射光がどれだけ光軸から離れているか（入射高という）によって変化することが分かる。図では点 A の軌跡を赤色の点線で表している。そこで入射光を光軸に近づけていく（入射高の 0 への極限を求めると）、このときの交点 A と像 B（出射光と光軸の交点）との距離から焦点距離 f を定義することができる。また、レンズを通過する入射光の円筒の太さ D を有効径（または、単に口径）と言う。焦点距離 f と口径 D の比 $\frac{f}{D}$ を F 値といい、像面上の照度に対するシーン輝度の比の平方根に比例する。言い換えると、F 値はレンズの明るさを表し、F 値が小さいレンズほど明るいレンズである。

次に、無限遠でなく近距離にピントを合わせる場合を考える。そのためには、レンズを撮像素子から少し遠ざければよい。このとき、レンズから被写体までの距離 a と、レンズか

ら像までの距離 b は以下の結像公式に従う。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

この式はよく知られているが、ではこれは理論的な厳密性を持つ式なのか、それとも経験的な近似なのかははっきりとはご存じない方も多いと思う。実はこの式は、収差の取り除かれた理想レンズでは自然に成り立つ厳密な式なのだが、それを示す前に理想レンズについて述べておく必要がある。

理想レンズとは以下のような条件を満たすレンズであると言える。括弧内は、現実のレンズが持つ収差の例である。

- (1) シーン中の 1 点から発した光は、再び 1 点に集められる（⇔ 球面収差）。
- (2) シーン中の平面は、平面上に結像する（⇔ 像面湾曲など）。
- (3) 光軸に垂直な面上の図形は、像面上で相似の図形となる（⇔ 歪曲収差）。

先に述べたように 1 枚のレンズでは様々な収差が発生するため、市販のレンズでは 3~20 枚程度の凹と凸のレンズが組み合わされており、上の条件が実用上満たされている。条件 (2) から、図 1(b) に示すように、光軸に対して垂直な平面上の点 C の像は、やはり光軸に対して垂直に設置された撮像素子上の点 B に像を結ぶ。実際のレンズでは像面が湾曲してしまうことが多いが、そのような収差を取り除くために複数のレンズが組み合わされているわけである。また平行光は無遠慮の 1 点からの光であるので、図 1(a) のように並行光もやはり光軸に対して垂直な面上に像を結ぶ。

結像公式の証明

図 1(b) から結像公式を証明する。ここで点 C から点 A に向かう光線は光軸に並行であるとする。薄肉単レンズの中心を通る光は屈折しないので、直線 CB と光軸の間のできる三角形（薄水色）の相似から $\frac{1}{a}h = \frac{1}{b}h'$ が言える（条件 (3)）。同様に直線 AB と光軸の間のできる三角形（薄橙色）から $\frac{1}{f}h = \frac{a}{b-f}h'$ となる。この 2 式から h を消去すると、

$$\frac{1}{f}h = \frac{a}{b-f}h' = \frac{1}{b-f}h' \quad (2)$$

のように自然に h' も消え、両辺を整理すると式 (1) が得られる。

なお、被写体の大きさ h に対する像の大きさ h' の比

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{b}{a} \quad (3)$$

を倍率という。

2.2 シャインフリューク (Scheimpflug) の法則

2.1 節では理想レンズの条件として、光軸に垂直な平面は、再び光軸に垂直な平面上に結像することを述べた。では、光軸に対して垂直でない任意の平面から出た光線は、レンズを通

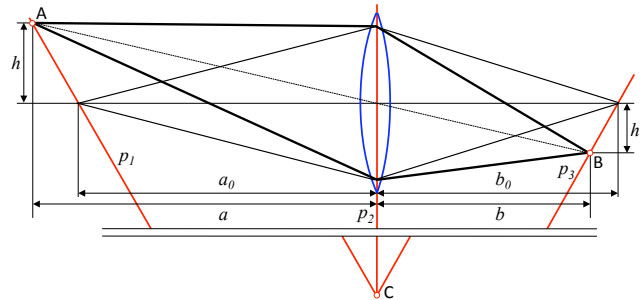


図2 シャインフリユークの法則．被写体面 p_1 が傾いている場合でもその像は平面 p_3 となり， p_1, p_3 とレンズ主面 p_2 は1本の直線で交わる（図では点Cで交わる）．

過した後どのような形状の像を結ぶのか．結論から言うと，このような傾いた平面の像も再び常に平面となることが証明できる．さらにその2つの平面の交線は，薄肉単レンズの置かれた面（レンズ主面）の上に乗る（図2の点C）．これをシャインフリユーク (Scheimpflüg) の法則と呼ぶ．

シャインフリユークの法則の証明

証明に必要な材料はこれまでに述べた結像公式（式(1)）と倍率の式（式(3)）の2つだけである．ここでは簡単のため，図2に示したように平面上で考える．平坦な被写体を表す式として，図2中の直線 p_1 を

$$a = \alpha h + a_0 \tag{4}$$

とする．この式に式(1)式(3)を代入して整理すると，

$$b = \frac{f\alpha}{f - a_0} h' - \frac{fa_0}{f - a_0} \tag{5}$$

が得られる．式(5)を見てみると，像の高さ h' の係数 $\frac{f\alpha}{f - a_0}$ と切片 b_0 は定数であることから， b と h' は線形な関係にあることが分かる．また式(5)の b に0を代入すると $h' = \frac{a_0}{\alpha}$ となり，一方平坦被写体の式(4)の a に0を代入すると $h = -\frac{a_0}{\alpha}$ となることから，図2で h と h' を逆向きを取っていることに注意すると，被写体面 p_1 ，像面 p_3 とレンズ主面 p_2 は共通の直線で交わることが分かる（図2における点Cに対応）．

この法則を3次元空間に拡張することは容易である．なぜなら紙面は光軸を通り，被写体面 p_1 と像面 p_3 の双方に対して直交すると考えればよく，点Aを通り紙面に垂直な直線の像は，点Bを通り再び紙面に直交するからである．

この法則は，被写体面 p_1 のシャープな像が平坦像面 p_3 を形成することを表しているが，

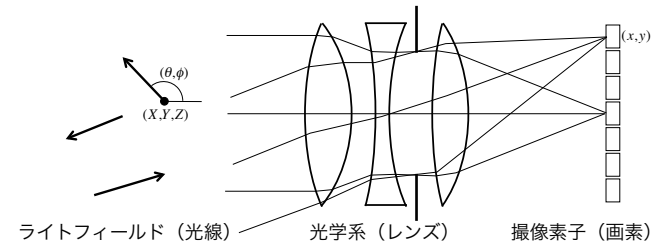


図3 カメラによる光線の記録．カメラは，実空間を埋め尽くす光の分布（ライトフィールド）のうち，レンズ口径内へ飛び込んだ光のみについて， (θ, ϕ) の分布を記録する．レンズは方位 (θ, ϕ) を画素座標 (x, y) に変換するデバイスである．

被写体面 p_1 上の図形と像面 p_3 上の図形は相似とはならないことに注意されたい．実際には，被写体面 p_1 と像面 p_3 の関係は2-D homography で表される．なぜなら被写体面 p_1 と像面 p_3 の関係は，図2中の点線で表したようにレンズの中心（投影中心）にピンホールを置いたピンホールカメラと同じであるからである．よって，CV分野で知られているようにピンホールカメラにおける幾何学から，平面から平面への投影は2-D homography で表すことができる．

3. 光線の表現とカメラの働き

本章ではまず，カメラによる撮影とはどのような現象であるのかについて再考したい．普通我々はカメラによる対象物体の撮影というと，対象物体の色や形と，画素値との間の直接的な関係について考えがちである．しかしここではシーンを「光の分布を生み出すもの」として考えから切り離し，まずはそれにより生じた光線の分布と，その記録とに分けて考えることにする．

3.1 ライトフィールド

カメラが置かれた実環境は図3に示すように，光源から発せられた光や，それが対象物体表面で反射した光で縦横無尽に埋め尽くされている．カメラはそのうちごく一部を取り込んで画像を出力する．一般的に，環境を満たす光の強さ（分光放射輝度） I は以下のような数式で表すことができる．

$$I = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t) \tag{6}$$

ここで (X, Y, Z) は空間中の1点を， (θ, ϕ) は光線の方向を表す．また λ は波長， t は時刻

であるので、この関数 P により環境中の光の状況を幾何光学的^{*1}に完全に記述することが出来る。この7変数の関数 P をプレノプティック関数と呼び、またこのような光線で埋められた3次元空間をライトフィールドと言う。

さてここで、環境に置かれたカメラの働きについて見てみよう。図3から明らかなように、カメラは環境中の光線のうち、レンズへ飛び込んだごく一部を内部に取り込み画像を出力する。そこでまず簡単のため、コンピュータビジョン(以下CV)分野で広く用いられている理想的なピンホールカメラモデルについて考えると、これはピンホールが置かれた点を通過する光だけを取り込み、他は全部捨ててしまうようなカメラだということはすぐに了解されよう。また幾何学的なパラメータ (X, Y, Z, θ, ϕ) とは独立性の高いパラメータである波長 λ (色彩) は単波長とし、また撮影が一瞬のうちに終了する(露光時間は限りなく短い)場合について考えると、カメラはある特定の (X, Y, Z, λ, t) のうち、ある範囲の (θ, ϕ) に関する輝度分布を記録する装置だと言うことが分かる。式(6)が表す7次元空間を、 $\theta - \phi$ 平面に対して平行に切った断面を得ているというわけである。もちろん、 (θ, ϕ) は各画素の位置に対応する。

3.2 ライトフィールドの表現

先に述べたように光線の幾何学的な配置は (X, Y, Z, θ, ϕ) の5変数で表されるが、光線上の輝度は光線に沿って一定なので1変数が冗長となり、4つの変数で表せばよいことになる。そこで図4に表すような表現が用いられる。IBR分野では図4(a)に示すように、光線が2つの平行な平面を通過するところの座標 $(x, y) - (s, t)$ による表現が広く用いられている。しかし本稿では、後に述べる光線行列や、エピポーラ平面画像(EPI)との関連から図4(b)に示す、1平面の通過点 (x, y) と光線の傾き (u, v) による表現を用いることにする。

さらに議論を簡単にするため、以後、3次元空間中ではなく2次元平面上の光線について考えることにする。ただし2次元平面上で得られた知見のほとんどは3次元空間でも通用するので、本質的な理解には問題はない。図4(c)に示すように、 $x - z$ 平面上の光線が $z = 0$ 直線(x 軸)を通過するときの位置 x と傾き u を記録することでライトフィールドを表現する。そのようにして各光線をライトフィールド表現上にプロットしたものが図4(d)である^{*2}。光線Aと光線Bはともに右肩下がりなので $u < 0$ の領域にプロットされる。並行光

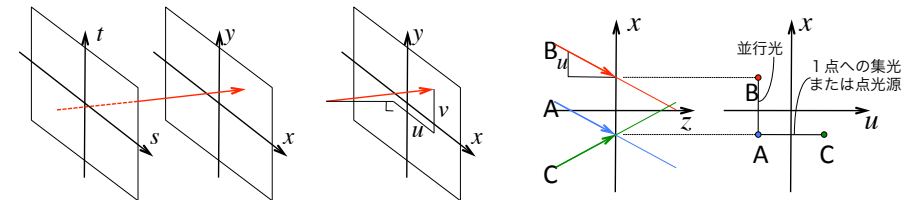


図4 (a) 2平面の通過点による表現 (b) 通過点と傾きによる表現 (c) $z=0$ 上の光線 (d) 2次元ライトフィールド

図4 ライトフィールドの表現方法。(a) 2平面の通過点による4次元ライトフィールドの表現で、IBR分野で良く用いられる。(b) 平面上の通過点と、光線の向き(傾き)による4次元ライトフィールドの表現で、本稿ではこちらを用いる。(c) $x - z$ 2次元空間中のライトフィールドの表現。 $z = 0$ 直線(x 軸)上の光線の通過位置 x と傾き u により表現する。(d) 2次元ライトフィールドの状況。すべての光線は $x - u$ 座標系内の1点で表される。普通は横軸に x 、縦軸に u をとるが、本稿では光路図との一致を図るため x 軸と u 軸を入れ替えていることに注意。この図では、1点への集光、または1点からの放射(点光源)は水平線に、また平行光は垂直線として表れる。

は傾きがすべて同じである光線群であるため、図4(d)の点Aと点Bを結んだ線分のように、平行光は垂直線として表れる。一方、光線AとCは $z = 0$ 直線上の同じ1点を通過しているため、その2点を結んだ線分ACは水平線となる。このように、点光源、または1点への集光は水平線として表れる。

レンズはこのライトフィールド空間に対する一次変換として表され、座標系の回転により平行光を集光したり、物体の倒立像を像面上に形成する働きを持つ。これについては3.4節で詳しく述べる。

3.3 レンズの機能

先に述べたように、カメラは光の分布のうち、その向き (θ, ϕ) だけ(または、図4(b)における (u, v) だけ)を記録する装置である。それを実現するための主役がレンズである。図3に示した光路のように、それぞれの画素に入射する光はもともと並行光であり、画素位置が異なるとその向きもまた異なる。つまり、レンズは光の方位を位置に変換するデバイスである。これについては後に詳しく述べる。

もう1つ図3から分かることは、1つの画素に入射する並行光には太さがあることである。ピンホールカメラではこの太さが無限に小さいことを仮定しており、それはレンズの絞りを極限まで絞ったものと同じである。後に述べるように、この入射光の太さは焦点ボケを生じる原因となるが、かといって絞りを絞りすぎてしまうとセンサへ到達する光の量が小さくなりすぎてしまい、そのぶん露光時間を伸ばさなければ撮影ができなくなってしまう。

*1 光には1) 波動性: 干渉や回折を起こす原因となる、波としての性質、2) 粒子性: 光の強度は連続値でないなど、粒(光子)としての性質があり、それぞれ波動光学、量子光学として幾何光学と区別される。

*2 普通は x を横軸に、 u を縦軸にとるが、本稿では光路図と並べたときの理解を容易にするため、敢えて x 軸を縦に取っていることに注意されたい。

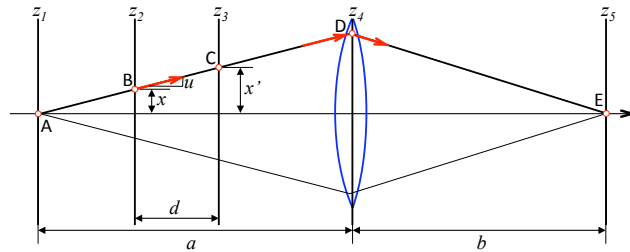


図5 レンズと光線行列の関係． z_1 から z_4 までは自由空間を光が通過し，レンズが設置された z_4 で向きを変える．その後再び z_5 まで自由空間を通過し点 E に至る．

これは数学的には積分であり，前に述べたライトフィールド (x, y, u, v) を (x, y) に関するある範囲（具体的には，レンズの口径）について積分していることになる．もしこの積分区間の幅が 0 であれば積分値も 0 になり，真っ暗になってしまう．同様に，撮影は瞬時に終了することはなく，ある有限の露光時間（シャッタースピード）が必ず必要である．波長についても，感度を有する波長の範囲（分光感度分布）が狭いほど感度が低下する．画素の大きさは，方位 (u, v) に関するある範囲の積分に対応する．このように，ある量の（有限の）光を集めるための積分に相当する操作がライトフィールドを表す変数のすべてにおいてなされている．また，積分区間全体の総和を漫然と求めるのではなく，被積分関数に対して重み関数をかけることが次稿で解説される符号化露光に対応する．

図3 は無限遠にピントを合わせた特殊なケースであり，レンズを移動させて近くにピントを合わせたときは，1 画素に集まる光はもはや並行ではないではないか，という指摘もあるうかと思う．しかし実はこれは，各画素に対応する積分区間が斜めに歪むことに対応している．これについては後に述べる．

3.4 光線行列

準備が整ったので，3.2 節で述べたように，いよいよライトフィールドとレンズの関係を一次変換で表すことにしよう．光線行列 (ray matrix) とは，図 4(d) に示したライトフィールド空間 (x, u) に対する一次変換である．次の式

$$\begin{bmatrix} x' \\ u' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \quad (7)$$

のように，ライトフィールド $(x, u)^T$ を $(x', u')^T$ へ変換する．これを図 5 に沿って説明する．

自由空間の通過 図 5 中の直線 z_2 を通過する光線について考える．点 B を通過する光線は傾き u を持ち，光軸から x 離れている．これが自由空間中を通過し， z_3 上の点 C まで進んだときを考えよう．このとき傾きは u ，また z 軸方向の移動距離は d であるから， $x' = x + ud$ となる．また光線の傾き $u' = u$ は変化しない．そのため，自由空間を距離 d だけ移動したときの $(x, u)^T$ から $(x', u')^T$ への変換は，以下のように表される．

$$\begin{bmatrix} x' \\ u' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \quad (8)$$

レンズによる屈折 図 5 中の直線 z_4 上において光線はレンズにより屈折され向きを変えるが，通過位置は変わらない．そのため $x' = x$ である．光線の向きの変化量は焦点距離 f と光線の通過位置 x により決まり，屈折力の強い（焦点距離 f の小さい）レンズほど急激に曲げられるため，先に結論を言うと，光線行列は

$$\begin{bmatrix} x' \\ u' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる．これをレンズの結像公式，式 (1) と比べてみよう．点 D と光軸の距離を x とすると，入射光の傾き u は図から $x = ua$ である．一方，出射光の傾きは，向きが右肩下がりであることに注意すると $x = -u'b$ である．また式 (1) より $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ であるから，この式の a と b をそれぞれ消去すると

$$\frac{u}{x} - \frac{u'}{x} = \frac{1}{f} \quad (10)$$

となり，式 (9) の第 2 行， $u' = -\frac{1}{f}x + u$ が得られる．

つぎに，レンズによる結像がライトフィールドをどのように変換していくのかを，光線行列を用いて明らかにしてみよう．例として図 5 において $a = 6, b = 3$ とし，よって式 (1) よりレンズの焦点距離は $f = 2$ である．このとき倍率は $M = \frac{1}{2}$ である．まず，図 5 の点 A から点 B へ向かって進む光について，今仮に傾き u が $u = 1$ であるとする．その光線は図 6(a) において赤丸で示した点 A となり，その位置は $(x_1, u_1) = (0, 1)$ となる（繰り返しになるが，本稿では特に x を縦軸に， u を横軸にとっていることに注意されたい）．この光線がレンズまで右へ 6 だけ進むので，式 (8) により

$$\begin{bmatrix} x_4 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

の変換が施され，光線は点 D の座標 $(x_4, u_4) = (6, 1)$ へ到達する．次にこの光線は点 D で

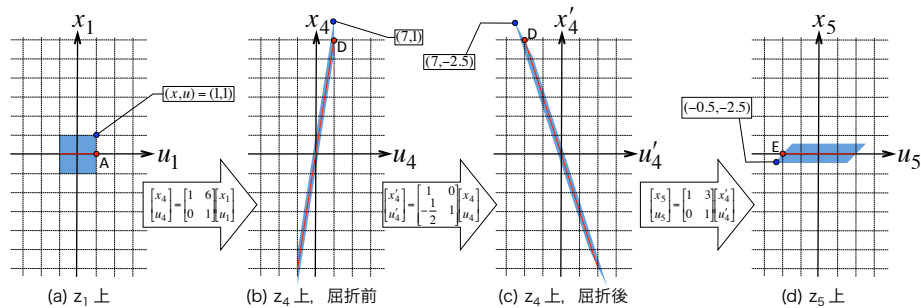


図 6 光線行列によるライトフィールドの一次変換．自由空間の光の伝搬は図の右側が上がり，左側が下がるような剪断変形（シア）変換である．それに対し，凸レンズ ($f > 0$) による屈折は，図の上部が左へ，下部が右へずれるようなシア変換である．赤色で示した水平線は反時計回りに 180 度回転し，再び水平線となる．すなわち，像を結ぶ．本稿では縦軸に x を取っていることに注意されたい．

焦点距離 2 のレンズにより屈折されるため，式 (9) より

$$\begin{bmatrix} x'_4 \\ u'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

となり，光線の傾き u が $u = 2$ となることで右肩下がりの方向へ折れ曲がる．そして再び，像面まで 3 だけ自由空間を進むため，

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ -2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

となり，図 5 および図 6(d) の点 E に示したとおり，光軸上を右斜め下へ通過する．同様に，点 A より 1 だけ上方から並行に発した光について図 6(a) ~ (d) の青丸で示したので確認されたい．

図 5 において，点 A は様々な方向へ光を発する点光源であるとする．点光源から発した光は図 4(d) および 3.2 節で示したように，ライトフィールドの図上では水平線として表現される．図 6(a) 上では赤色の水平線として表示している．その光が自由空間中を伝播すると，図 6(b) のように x 軸方向へ剪断歪み（シア）状の変形を受ける．次にレンズによりこれが屈折されることで u 軸方向の負の方向へ剪断変形し，さらに自由空間を伝播することで全体としては反時計回りに 180 度回転し，再び u 軸上の水平線となる．もとのライトフィールドにおいて水平線であったものが変換の結果再び水平線になることは，点光源から発した光が再び 1 点に集まったことを表し，これは像を結ぶという現象そのものである．

同様に，もとのライトフィールドで垂直線であったものが 90 度回転し水平線となることは，平行光が 1 点に集まったことを表す．これは図 1(a) のように焦点距離 f のレンズによる屈折と，距離 f の自由空間通過の変換を順に施す変換が

$$\begin{bmatrix} x' \\ u' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fu \\ -\frac{x}{f} + u \end{bmatrix} \quad (14)$$

のようになり，到達点の位置 $x' = fu$ は光の向き u のみによって決まることからわかる．つまり，前に述べたように，無限遠にピントを合わせたレンズは光線の向きを点の位置に変換するデバイスであるということである．

ここで挙げた 2 つの変換には，もう 1 つおもしろい性質がある．剪断変形は図形の面積を変化させない変換である（行列式の値が 1 である）ため，変換前後でライトフィールド上の図形の面積は変化しない*1．図 6 では一辺 2 の正方形の変形の様子を図示しているが，図 (a) ~ (d) でこの部分の面積は一定である．ただし，図 (a) において正方形は高さが 2 であったのに対し，最後の図 (d) では高さが 1 の平行四辺形となっている．図形の高さ（ x 軸方向の広がり）は像の大きさに対応しているので，図 5 のように $a = 6, b = 3$ の条件では倍率 M が $M = \frac{1}{2}$ であることを表している．回転により x の正の領域が最終的に x の負の領域へ移動するが，これは像が倒立することに対応している．

3.5 光学系の構成要素とその働き

レンズがライトフィールドに及ぼす効果は前節で理解されたことと思う．そこでこの節では，その他の 3 種のデバイス（撮像素子，マスク，レンズアレイ）について，それがライトフィールド上で持つ働きについて簡単に述べる．

3.5.1 撮像素子

撮像素子は平面を格子状に区切り，それぞれの格子に入射する光量に比例した値を出力する．ただし，それぞれの画素にどの方向から光が入射したのかは分からない．そのため図 7(a) に示すようにライトフィールド上では，横長の短冊状の領域内の総和（積分）を求める操作に相当する．

3.5.2 マスク

マスクはその形状により，開口部分の光をそのまま通過させ，その他の光は減衰・遮断する．光線の位置や方位には影響を与えないため，ライトフィールドに対し横縞状の係数を掛

*1 これをヘルムホルツ・ラグランジュの不変量といい，屈折や反射により見かけの輝度を増減させることができないことを表している．例えば双眼鏡やカメラ（凸面鏡）を介して地上の物体を観察すると，対象物体の見かけの大きさは変化するが，対象物体の見え目の明るさは元と変わらないことはこの法則の帰結である．

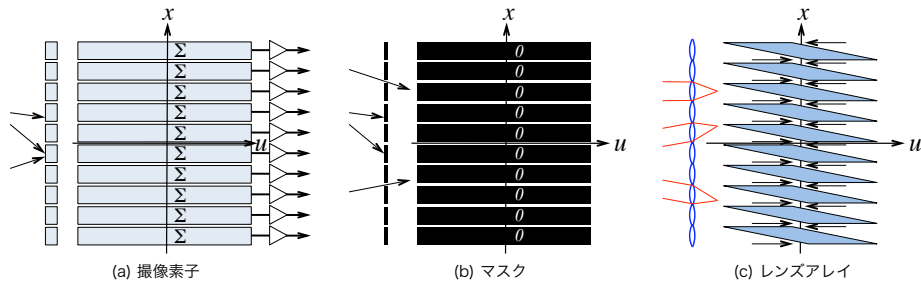


図7 カメラ中の光学素子がライトフィールドに与える影響。(a) 撮像素子．各センサは画素に入射した光量の総和を出力する．(b) マスク．ライトフィールドを位置に応じて通過・遮断する．光線の方位には影響を与えない．(c) レンズアレイ．位置に応じて光線の方位を変更する．各レンズアレイの焦点距離だけ離れたと、各小領域ごとに垂直線（平行光）が水平線（1点への集光）に変換されることになる．

ける働きを持つ．

3.5.3 レンズアレイ

レンズアレイは小さなレンズの集まりなので、通常のレンズと同じように扱うことができるが、レンズの位置が光軸上にないことと、その守備範囲が区分的であることに注意する必要がある．ライトフィールドを横長の短冊状に区切り、それぞれの短冊内を横方向に剪断歪み変換する働きを持つ．

レンズアレイと撮像素子を組み合わせる場合、そのレンズアレイから焦点距離だけ離れた場所に撮像素子を置くことが多い．このとき、各横長領域内の垂直線（平行光）は撮像素子上でそれぞれ水平線（1点への集光）に変換されることになる．

4. 応用例

これまでに、レンズなど光学系の構成要素による光線の変化を、一次変換などライトフィールドの操作という観点で表す方法について述べた．そこでこの章では、IBR や CP 分野の研究例をその観点から統一的に整理する．

4.1 カメラアレイによるライトフィールドの獲得

3.1 節で述べたように、ピンホールカメラは特定の1点を通して光だけを記録する．そうではなく様々な位置を通して光線の輝度を得たいときには、多数のカメラを並べた装置を用いて光を記録する方法が考えられる．実際にこのような方法は IBR において広く行われており、カメラアレイと呼ばれている¹⁾²⁾．ただし、式 (6) において位置パラメータは

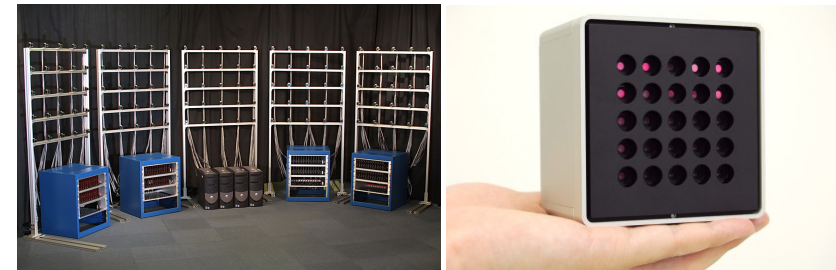


図8 ライトフィールド取得のためのカメラアレイの例．左：The Stanford Multi-Camera Array¹⁾，右：ViewPLUS ProFUSION25²⁾．

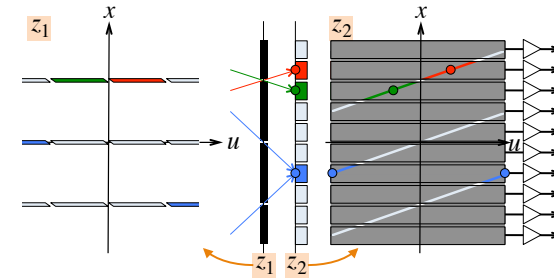


図9 ピンホールアレイを用いたライトフィールドカメラ．ピンホールアレイからセンサを一定距離離して設置すると、その間隔だけライトフィールドは右肩を上げる方向へ剪断変形し（図 6(b)）、その結果、ピンホールが設置された面 (z_1) では、位置 x と方位 u の双方について等間隔でサンプリングをしていることになる．

X, Y, Z の3つだが、3.2 節で述べたように、カメラを3次元空間を埋めるように配置する必要はない．図8にカメラアレイの例を示すが、このようにカメラは普通、平面的に並べられる．

まずは最も簡単な、ピンホールアレイ（マスクの一種）を用いたライトフィールドカメラ（図9）について説明しよう．マスクは3.5.2 節で述べたように、ライトフィールドの一部を遮断するが、それは光線通過位置について働くため、横縞状のマスクパターンとライトフィールドとの積を求めることに対応する．またセンサはマスクに密着しているのではなく、マスクとセンサとの間には一定の間隔が設けられる．この間隔は3.4 節で述べたように自由空間の光の通過に相当するので、図 6(b) に示したように、ライトフィールドの左側を上げ右側を下げるような剪断変形を行うことになる．つまり図9のセンサ面 (z_2 面) に対

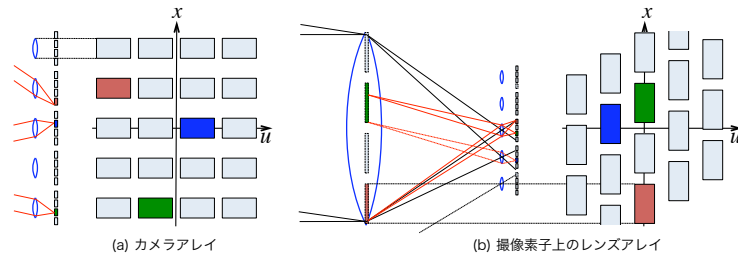


図 10 ライトフィールドカメラの 2 つの構成。(a) 多数のカメラを並べたもの、図 8 に挙げたシステムはこのタイプである。カメラの個数が光線の位置分解能に、個々のカメラの画素数が角度分解能に対応する。(b) 撮像素子上にレンズアレイを載せた構成。レンズアレイのレンズ個数が角度分解能に、個々のレンズアレイに対応した小領域中の画素数が位置分解能に対応する。

しては、マスクは斜め縞状のパターンを乗じていることに等しい。結果として、ピンホールアレイをセンサから一定距離だけ離して設置したカメラは、図 9 のマスク面 (z_1 面) に示したようにライトフィールドを位置 x と光線方位 u との双方について等間隔に (格子状に) サンプリングするカメラであると言える。しかしピンホールアレイの開口率に応じて光が遮断されるため、センサに入射しない光の割合が多くなる。ピンホールの径を大きくすると光の通過率は上がるが、それぞれの画素に対応するライトフィールド上の図形は平行四辺形状であり、ピンホール径を大きくするとその形状は左斜め上と右斜め下の方向に伸びていくため、方位分解能が下がってしまう。またそれぞれのピンホールが光の入射方位を制限しない場合、図の青色の光線で示したように、異なるピンホールを通過した光が同一の画素に入射することがあるため、各領域を壁で仕切る必要が生じる。

続いてピンホールアレイの代わりにレンズを並べた、いわゆるカメラアレイについて説明する。図 10(a) に示すように、レンズは一定の口径を持ち、その口径を通過した光がその後の像面上に焦点を形成する。先に述べたように、レンズは光線の入射方位を焦点の位置に変換するデバイスであるため、それぞれのレンズ口径が光通過位置の、また画素の大きさが光通過方位の守備範囲を定める。そのため図 10(a) に示したように、それぞれの画素が観測する光線はライトフィールド上で長方形となる。ここでもし画素と画素の間に隙間がなく (センサの開口率が 1 であるという)、またレンズとレンズの間にも隙間がないとすると、そのようなカメラアレイはライトフィールド上のある範囲内の光を漏れなく記録することになる。

このようなライトフィールドカメラとしては、図 8(a) に示したように多数のカメラを単に

並べたもの¹⁾、つまりレンズ 1 個に撮像素子が 1 個ずつ対応した構成が代表例であろう。この場合、カメラの間隔を大きく取るとは容易であるのに対し、レンズを密に配置することは難しくなる。後に述べるように、得られたライトフィールドを元にレンズの集光現象をシミュレートし、事後的に任意の距離へのピント合わせを行う、いわゆるリフォーカスに関する研究がなされているが、カメラを並べた構成は一般のレンズよりも仮想口径 (シミュレートするレンズの口径) が大きくなりがちであり、ぼけ量が過大となりやすい。その点で、図 8(b) の製品は筐体や回路基板設計に工夫を凝らすことでカメラをなるべく密に配置した例であると言える。一方、1 つの撮像素子上にレンズアレイを設置した構成も考えられ、谷田らの TOMBO³⁾ が有名である。しかしこの場合は反対にカメラ配置領域の大きさが撮像素子の大きさに制約され、半導体製造コストなどから開口径を大きくすることは極めて難しい。

4.2 カメラ内部の工夫によるライトフィールドの獲得

ライトフィールドとは一般に、カメラに光が入射する前の空間における光線の分布状態を指す。しかし先に述べたように、レンズはライトフィールドを一次変換により変形させるものの、ライトフィールドを縮退させるものではない。そこでレンズと撮像素子の間に何らかの光学デバイスを設置することでライトフィールドを獲得する方法が研究されている。

Adelson ら⁴⁾ は図 10(b) に示すように、もともと撮像素子が設置されるべき焦点面にレンズアレイを設置し、さらにそこから一定間隔だけ離れたところに撮像素子を設置する方式のライトフィールドカメラを提案した。レンズアレイは主レンズの焦点面に置いてあるため、それぞれの小レンズはもとあった撮像素子の画素に対応する。それに対してそれぞれの画素は小レンズを介して主レンズの口径の一部に対応しているため、隣り合った画素はそれぞれ異なる部分口径からの入射光に対応する。つまり図 10(a) とはライトフィールドと画素の配置の関係が転置されたようになっている点が特徴である。先に述べたように、図 10(a) では画素が密に配置されると (開口率が 1 である) 方位方向に関して光線を取り逃すことがなくなるが、図 10(b) の構成では、これは部分口径同士の間隙がないことに対応する。

レンズアレイのうち 1 つの小レンズと、それに対応した撮像素子上の小領域をまとめて 1 つの小さなカメラと見なすと、その小カメラの視野は主レンズの開口部分に対応していると言える。しかしそれぞれの小カメラは位置が少しずつずれているため、その視野もそのぶんずれ、もしすべての小カメラの構成が同じであるとすると、ライトフィールド上では図 10(b) のように斜めにサンプリングしていることになる。また端のほうの小カメラでは、視野のうち一部には光が到達しない領域ができる。撮像素子と小レンズの位置関係をずらして、すべての小カメラの画素が主レンズの部分口径上でぴったり重なり合うように補正

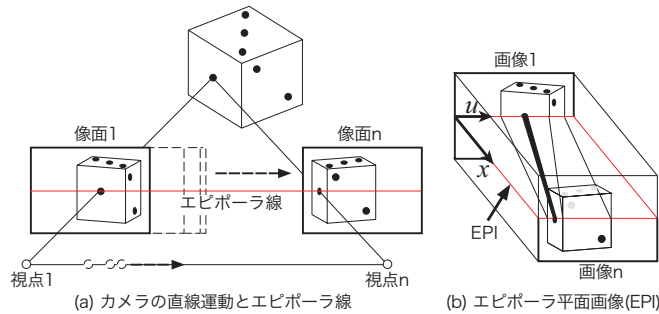


図 11 エビポーラ画像 (EPI)。(a) カメラの直線運動とエビポーラ線。エビポーラ線は画像上ですべて並行となる。エビポーラ拘束の性質より、対象物体上の点（例えば、サイコロの1の目）はエビポーラ線上を移動する。(b) 取得した画像を重ね、エビポーラ線に沿って切断したときの切断面に現れる像が EPI である。特徴点は EPI 上では軌跡として表れる。

することもできる^{*1}。

この構成は、主レンズの口径を分割してライトフィールドを得ているため、既存のカメラにリフォーカス機能を付与するような目的に向けた構成であるといえる。逆に言うと、物理的なレンズでは実現が難しいような大きな口径によるぼけの生成には用いることができない。近年は撮像素子の微細化に伴い撮像素子全体の大きさも小さくなっている。それに比例して同一画角に対応するレンズ焦点距離と口径が小さくなっているため、写真制作の観点では作画に必要なだけの十分なぼけを得ることが難しくなっていると言える。そのため、この手法は Ng⁵⁾ が示したように撮像素子が大きなデジタル一眼レフカメラでは有効でも、コンパクトデジタルカメラでは有用なケースは限られると思われる。

このように、光線行列とそれによるライトフィールドの変換を用いると、光学系において生じる様々な現象が明快に表される。とはいえ、これが光路図の直観的な解釈よりも簡明であるとは一概には言えないと思う。しかし、その光学系が持つ特性を定量的に評価したい場合などには有用なツールであるということは言えよう。

4.3 エビポーラ画像 (EPI)

エビポーラ画像 (EPI)⁶⁾ はライトフィールドの 1 断面であると言える。図 11(a) に示すようにカメラが姿勢を変えずに直線運動をすると、画像上のエビポーラ線は一定で

あり動かない。なぜならエビポール（または Focus of Expansion, FoE）はカメラの移動方向と画像面との交点であり、それが不動であるためである^{*2}。そこでカメラ移動中に得られた画像列から、このエビポール線上の画素値を抜き出し並べたものが EPI である（図 11(b)）。エビポール拘束の性質より、エビポール線上の 1 点はカメラが移動した後もまたエビポール線上で観察されるため、対象物体上の 1 点は図 11(a) のサイコロの目のように EPI 上では軌跡をなす。

カメラアレイのように多数のカメラを並べる代わりに、1 台のカメラを移動させながら多数の画像を撮影して得られるものが EPI であるから、カメラアレイとライトフィールドの関係を表した図 10(a) と見比べると、EPI はライトフィールドそのものである。図 11(b) に示すように、カメラの画素位置は方位を表すためライトフィールドの勾配軸 (u 軸) に、時間軸方向はカメラの位置に対応するためライトフィールドの位置軸 (x 軸) にそれぞれ対応する。エビポーラ画像ではカメラに近い物体ほど軌跡の勾配が急になり、無限遠の物体は x 軸に並行となるが、これは図 4(d) で並行光が x 軸に平行な直線として表されることと等価である。

対象物体が拡散反射であると、物体表面各点の輝度はどの方位から観測しても一定である。そのため EPI 上では、ある点に対応した軌跡上の画素値は一定であり、このことを利用した処理が可能である。その例として、EPI 上でエッジ追跡を行うことにより対象物体までの奥行きを求める方法などが用いられる。またステレオ計測におけるテンプレートマッチングでは左右の画像で対応点の輝度が変化していないことを仮定している。これによりシーンの奥行きが推定できれば、それから EPI を生成することは容易である。一方、カメラアレイ等を用いて取得したライトフィールドに関しても、疎なサンプリングから密なライトフィールドを再現し、IBR による生成画像の品質向上を図ることが行われている。つまりこれらの研究（動画処理における EPI 解析、多眼ステレオによる奥行き推定、IBR における視点の補間）ではほとんど等価と見なせる手法が数多く存在する。例えば EPI が縞状になることを利用して、フーリエ変換により奥行きとオクルージョンを検出する手法も提案されている⁷⁾。これは後に述べるライトフィールドのフーリエ変換と密接な関係がある。もちろん対象物体が鏡面反射を有したり、透明・半透明な物体、オクルージョンが生じる場合には対応点の輝度が一定であるという仮定が崩れることになり、少数の視点の画像からライト

*1 大判カメラ等におけるレンズのシフトと呼ばれる技法に対応する。

*2 簡単のため、図 11(a) は特にカメラの移動方向と画像面が平行である場合を示しているが、そうでない場合でも画像を 2D homography 変形することで図 11(a) の状況に帰着できる。運動中にカメラが回転する場合も、その回転が既知であれば同様である。



図 12 未較正合成開口法⁸⁾によるぼけ生成の結果．左：5枚の入力画像のうちの1枚．右：未較正合成開口法により生成した背景ぼけ画像．色一緻度判定を用いることによりエッジ周辺のぼけが正しく再現されている．

フィールドを補間することが難しくなる．

4.4 合成開口法によるリフォーカス

2.1 節で述べたように、レンズは空間中の任意の1点から発した光を再び1点(像)に集める働きを持つ。被写体が平面であれば像もまた平面であり、それらの平面間の図形の変形は2-D homographyで表せることは2.2 節で述べた。ということは、様々な視点から得た画像を、シーン中の任意の平面上で画像がぴったり重なり合うように2-D homography変形して加算(または平均)すると、レンズのシミュレーションができることになる。これをCP分野では合成開口法と呼ぶ^{*1}。またこの方法により、あたかも事後にピント合わせをするかのように、任意の面の鮮明さを保ちつつ、その前後にぼけを与えるような処理をリフォーカスと呼ぶ。図8(b)に挙げた25眼カメラアレイProFUSION25²⁾は最初からこのような処理を用途の1つに想定して開発されたカメラであり、また図8(a)の装置では、現実のレンズでは実現が不可能な大きな開口によるぼけを仮想的に生成し、手前の物体をぼかすことで奥に隠された物体を視認することが可能であることを示している¹⁾。また4.2 節で述べた、撮像素子の直前にレンズアレイを置く方法によるライトフィールドカメラモリフォーカスを前提にしたカメラであると言うことができる⁵⁾。

我々はこのような特殊な装置を用いないリフォーカス手法として未較正合成開口法を提案

*1 合成開口法(synthetic aperture)は本来、様々な位置で観測した波を位相をずらしながら重ね合わせることで、大きな開口で観測した場合と同等の方位分解能(指向性)を仮想的に得る手法のことを指し、天文分野や電波レーダ(フェーズドアレイアンテナ)などで用いられている。それに対して本稿で述べる合成開口法は光の干渉効果による分解能向上効果がないことに注意されたい。

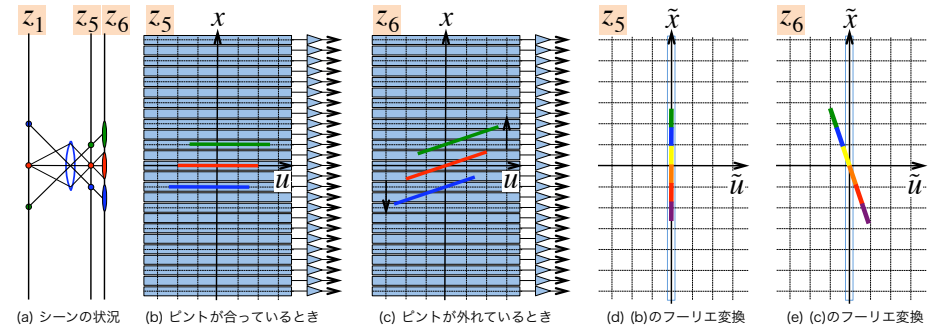


図 13 ライトフィールドのフーリエ変換。(a) シーンと像の様子、 z_5 には合焦しており、 z_6 はピントが外れてぼけている。(b) ピントが合っているときのライトフィールドと各画素の受光範囲。(c) ピントが外れているときのライトフィールドと各画素の受光範囲。(d) ピントが合っているときのライトフィールドのフーリエ変換と、撮像素子が取り込める範囲。(e) ピントが外れているときのライトフィールドのフーリエ変換、スペクトルが傾くことで低周波数成分しか撮像素子で取り込むことができない。

した⁸⁾。手持ちカメラで視点を僅かに変化させながら被写体を連写して得た画像からライトフィールドを復元することで、任意の平面に合焦した画像を得ることができる。この手法では、画像撮影時のカメラの位置と姿勢は未知であるので、まず特徴点追跡と射影因子分解法によって射影不定性⁹⁾を残したままカメラパラメータを復元する。次に多視点ステレオ法的一种である色一緻度探索を用いて視点依存奥行きマップを求め、それにより疎な視点間に設定した仮想視点からの画像を多数生成する。最後に生成した画像の重み付け和によって所望のぼけを有する画像を生成することができる(図12)。シーンの形状とカメラ位置姿勢の推定には射影不定性が残存しているが、目的は中間視点画像の生成であるためこれは問題とはならない。

5. ライトフィールドのフーリエ変換

ピントが被写体にぴったり合っておらず、撮影した画像がぼけている場合について考えよう。図13(a)は平面 z_1 上の3つの輝点から発した光がレンズにより屈折し、平面 z_5 上にぼけずに像を結んでいる状況を表している。このことをライトフィールドの状況で説明すると、シーン中の各輝点は点光源であるので(図4(d)で示したように)各点から発した光は水平線で表され(図6(a)中の赤線)、それが像面に至るまでに反時計回りに180度回転して再び水平線となり(図6(d)中の赤線)、撮像素子に到達する。撮像素子は図13(b)のよう

に、光が入射した位置 x に対してのみ分解能を持つため、ライトフィールド上では横長の長方形領域の範囲を積分する働きを持つ。そのため、各輝点に対応した光線を表す水平線はちょうど1つの画素の守備範囲に収まり、シャープな画素が得られる。それに対しピントがずれている場合は、光が撮像素子に到達した段階でライトフィールド中の水平線の回転が180度に足りないか180度を超える状況であり、1点から発した光はライトフィールド上で斜め線になる(図13(c))。よって1点から発した光は多数の画素に入射し、ぼけを生じる。

この現象は、フーリエ変換により空間周波数領域で解釈することができる。まず撮像素子であるが、これは位置 x についてはサンプリングする一方、方位 u については分解能がないため、空間周波数領域 (\tilde{x}, \tilde{u}) においては \tilde{x} 軸上の情報だけを残し、その他の領域 $(\tilde{u} \neq 0)$ の領域はゼロにしてしまう(直流成分のみを残す)ような効果を持つ。また、横縞状のライトフィールドもまた、 \tilde{x} 軸に沿って値を持ちそれ以外の領域はゼロである。そのため図13(d)に示すように、ピントが合っているときにはシーンの情報(虹色状の直線で示した)をセンサが捉えることになるが、ピントが外れているときには図13(e)のようにセンサが取り込める領域から信号が逸脱し、座標軸の原点付近の情報しか取り込めない。座標の原点付近は低周波数領域であるため、高周波数領域の情報が失われるが、これはぼけがローパスフィルタとして働くことを意味する。

つぎに、マスクを用いた場合について述べる。図7(b)に示したように、マスクはライトフィールド全体に対する積であるため、空間周波数領域においては畳み込みとして働く。図9に示したように、ピンホールアレイをセンサから離して設置した場合、これは空間周波数領域においては、斜めに配置したインパルス列(デルタ関数の列)をたたみ込むことに相当する。つまり、ライトフィールドを斜め方向にずらしながら重ね合わせる操作を繰り返すことになる。このようなライトフィールドの空間周波数領域における畳み込み(一定間隔の複製の重ね合わせ)はVeeraraghavanらの論文¹⁰⁾の理論の根幹をなすものであり、ピントがはずれた部分の情報を高周波数領域へ周波数変換することでライトフィールドを取得する、という意味が論文タイトルの“Heterodyned Light Fields”に込められている^{*1}。

次稿で解説される符号化撮像において符号化マスクの特性を調べたり、その符号を設計するためには、空間周波数領域における解析が重要となる。古くから用いられている、レンズのPSF(point spread function, 点拡がり関数)と原画像の畳み込みというレベルの解釈でも

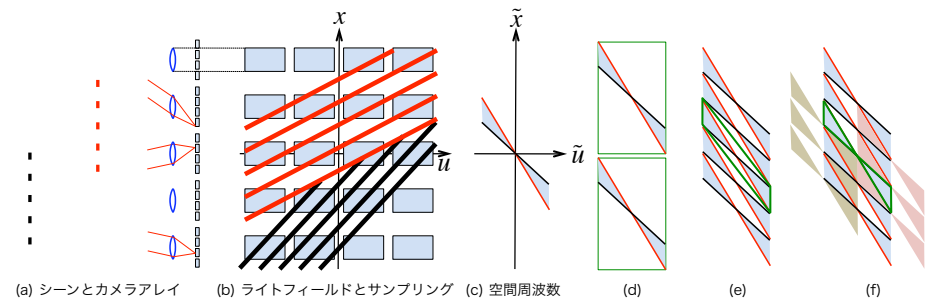


図14 プレノプティックサンプリング理論。(a) シーンとカメラアレイの配置。赤色面が黒色面の手前にあり、一部を隠している。(b) レンズアレイが置かれた面におけるライトフィールドの状況と、その画素によるサンプリング。奥行きによって縞模様の傾きが異なる。(c) ライトフィールドの空間周波数分布。IBR分野における文献¹²⁾¹³⁾とは縦軸と横軸が入れ替わっていることに注意されたい。(d) 保守的なサンプリング。(e) プレノプティックサンプリング¹²⁾、緑色の平行四辺形の内部だけの信号を取り出すようなフィルタ処理を行う必要がある。(f) より高度なサンプリング法¹³⁾。

多くの符号化撮像法を理解することはできるが、CPにおけるぼけ除去や奥行き推定ではライトフィールドの獲得や情報損失の抑制が問題となる。このような理論的枠組みの最新の成果の1つとして、論文タイトルが“4D Frequency Analysis”で始まるLevinらのlattice-focal lens¹¹⁾の研究が挙げられるであろう。

5.1 プレノプティックサンプリング

プレノプティックサンプリング理論もまた、ライトフィールドのフーリエ変換に関する理論である。図14(a)に示すように、奥行き異なる2つの面をカメラアレイによって撮影した場合を考えよう。このときカメラが取得するライトフィールドは、レンズアレイが置かれた面において図14(b)のような斜めの縞の集まりになる。この場合、赤色の面が黒色の面を隠していることが分かる。縞模様のフーリエ変換は、その縞に直交する方向に伸びた線状のスペクトルとなるため、このライトフィールドのフーリエ変換は、図14(c)の赤線と黒線のような角度異なる2本の線上のスペクトルとなる。このスペクトルの長さは物体表面上のテクスチャの空間周波数で決まるが、ここではそのテクスチャの空間周波数は一定の帯域内に収まっているものと仮定する。ここでもし、対象物体までの奥行きが赤色面から黒色面までの間に収まっているとすると、その物体のスペクトルもまた、図14(c)の赤線と黒線の間に表示される。つまり奥行きが限定されたシーンでは、そのライトフィールドは図14(c)の水色で表されたような領域に限定されることになる。

*1 ヘテロダインとは、周波数が僅かに異なる信号同士の干渉(うなり)の原理を用いて周波数変換をすることであり、例えばラジオ受信機に用いられている。

これをカメラアレイにより取り込むことを考える。もちろんカメラアレイは画素間隔が小さく、またレンズの間隔が小さいほど、高精細にライトフィールドを取り込むことができるが、コスト等の制約によりむやみに高精細化することはできない。そこでシーンテクスチャの空間周波数と、シーンの奥行き分布から最適なサンプリング間隔を設定する必要がある。図 14(b) のように格子点状のサンプリングは、空間周波数領域では格子点状の関数による畳み込みとなる。つまり、図 14(b) を格子サンプリングすると、図 14(c) の図形を縦・横方向に等間隔に複製したようなスペクトルとなり、そのときスペクトル同士が重なると原信号が復元できなくなる（エイリアシング、折り返し歪）。そこでまず考えられるのは、図 14(d) のようにライトフィールドのフーリエ変換に外接する長方形を設定し、その長方形同士が重なり合わないような間隔でサンプリングすることが考えられる^{*1}。しかしこの場合、空白の部分が多く無駄が生じていることが分かるだろう。そこで図 14(e) に示すように、スペクトル同士が重なり合わないよう密に複製することを許容する。これにより x 軸方向のサンプリング間隔を広くすることができる。つまりカメラアレイのカメラの台数を減らすことができるわけである。ただし取得したライトフィールドから、原信号の領域（図 14(e) における緑色の平行四辺形の内部）のみを残し、それ以外の領域の信号をゼロにするような適切なフィルタを施す必要がある。これをプレノプティックサンプリング¹²⁾ といい、IBR 分野においてカメラアレイのカメラ間隔を設定するための基礎理論となっている。なお後の研究で、さらに余白の部分を埋めるようなサンプリング（図 14(f)）も提案されている¹³⁾。ただしこの場合、格子点状のサンプリングではなく、図 10(b) に示したように斜めにサンプリングすることが求められる。

6. おわりに

本稿ではレンズの基礎、特に光線行列を用いた光線追跡について述べ、これを IBR 分野におけるライトフィールドや動画画像解析分野におけるエピソード平面画像 (EPI) と対応付けて説明した。紙幅の都合からレンズの収差論や光の波動光学的効果に関するトピックは割愛したが、この解説が CP, IBR 分野の論文理解の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E. V. Talvala, E. R. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz and M. Levoy, High performance imaging using large camera arrays, ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), Vol. 24, No. 3, pp. 765-776, 2005.
- 2) ProFUSION25, ViewPLUS, <http://www.viewplus.co.jp/products/profusion25/index.html>
- 3) J. Tanida T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, Thin observation module by bound optics (tombo), concept and experimental verification, Appl. Opt, Vol. 40, pp. 1806-1819, 2001.
- 4) E. H. Adelson and J.Y.A. Wang, Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera, IEEE Trans. PAMI, Vol14, No.2, pp. 99-106, 1992.
- 5) R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, P. Hanrahan, Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera, Stanford Tech Report CTSR 2005-02, 2005.
- 6) R. C. Bolles, H. H. Baker and D. H. Marimont, Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion, International Journal of Computer Vision, Vol.1, Issue 1, pp. 7-55, 1987.
- 7) Z. Zhu, G. Xu and X Lin, Efficient Fourier-based approach for detecting orientations and occlusions in epipolar plane images for 3D scene modeling, International Journal of Computer Vision, Vol. 61, Issue 3, pp. 233-258, 2005.
- 8) N. Kusumoto, S. Hiura and K. Sato, Uncalibrated Synthetic Aperture Photography for Defocus Control, Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, Vol.63, No.6, pp. 857-865, 2009.
- 9) 金谷健一, 森昭延, 菅谷保之. 自己校正法の最新レシピ. 情報処理学会研究報告, 2006-CVIM-153-31, pp. 199-206, 2006.
- 10) A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, and J. Tumblin, Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing, ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), Vol. 26, No. 3, 2007.
- 11) A. Levin, S. Hasinoff, P. Green, F. Durand and W. Freeman, 4D Frequency Analysis of Computational Cameras for Depth of Field Extension, ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), Vol. 28, No. 3, 2009.
- 12) J.X. Chai, X. Tong, S.C. Chan and H.Y. Shum, Plenoptic sampling, ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), Vol. 19, No. 3, pp.307-318, 2000.
- 13) C. Zhang and T. Chen, Generalized Plenoptic Sampling, CMU Technical Report AMP01-06, 2001.

*1 空間周波数領域で複製同士の間隔を大きくすることは、原信号領域において密にサンプリングすることに対応する。