

4

光線計測に基づく コンピュータショナルフォトグラフィ

向川康博（奈良先端科学技術大学院大学）

画像と光線の関係

我々人間が眼で見ている視覚情報や、カメラで撮影される画像の元になっているのは、いずれもシーンを飛び交う光線である。光線の強度は、その通過位置、角度、波長、時刻などをパラメータに持つ高次元のデータである。一方、カメラでシーンを撮影すると2次元画像として記録される。このカメラによる撮影は、光線の「積分」と見なすことができる。つまり、レンズと絞りで足し合わせる光線の角度範囲を決め、シャッターで足し合わせる光線の時間範囲を決め、撮像素子の分光感度特性で畳み込む波長の重みを決めていると考えることができる。この、光線を積分して画像に変換するというカメラの仕組みは、以前の銀塩フィルムを使っていた時代から、最新のデジタルカメラになっても、基本的には変わってはいない。

コンピュータショナルフォトグラフィ

カメラによる撮影の仕組みを大きく変える考え方として、近年、コンピュータショナルフォトグラフィ（Computational Photography：以下CPと略す）が注目を集めている。まだ、一般的には馴染みのない概念であるが、コンピュータビジョン、コンピュータグラフィクス、信号処理、光学など、幅広い分野を横断する学際領域研究である。近年、Lytro社が開発したライトフィールドカメラ¹⁾は、マイクロレンズアレイを用いて、撮像素子に集まる光線を角度ごとに別々に記録しておき、「後からピント調整ができるカメラ」として民生用に発売された。こ

のようにフォーカス面を変えたり、絞りや露光時間を符号化したりする手法がCPの代表例であるが、広義には、撮影過程に何らかの計算が入っていれば、CPであるということができる。CPによって、撮影時に必要な設定を後で変えることや、カメラの物理的・光学的な性能限界を超えた撮影をすることが可能となる。

光線の計測と積分

ここで、光線計測に基づくCPという考え方を紹介したい。前述のように、カメラは光線を積分して所望の画像を記録する機器である。図-1のように、この仕組みそのものを変えて、光線の強度を計測しておき、積分は計測後にコンピュータで行うことを考える。積分を後回しにする利点としては、以下が挙げられる。

- (1) フォーカスや絞りなどの設定は、撮影後に決めることができる。
- (2) 実際の光学系では不可能な積分を行うことができる。

前者の(1)では、得られる画像自体は通常のカメラで撮影されたものと同様であるが、手ブレやピンぼけなど、写真撮影にありがちな失敗を防ぐことができる。一方、後者の(2)では、通常のカメラでは、そもそも撮影することができない画像を得ることが

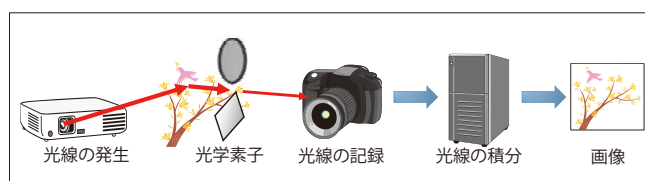


図-1 光線計測に基づくCPの概念

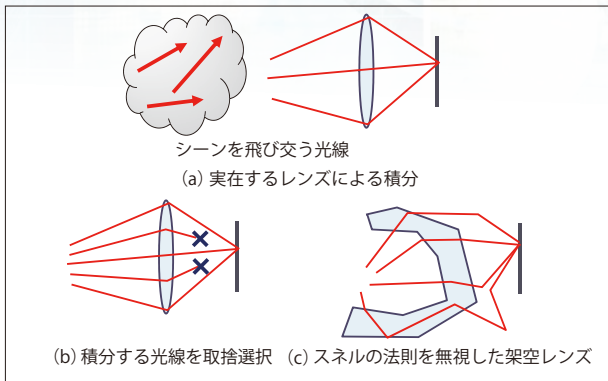


図-2 架空のレンズによる光線の積分

できる。図-2 (b) のように積分する光線を取捨選択したり、極端な場合には (c) のようにスネルの法則さえ無視した屈折をさせたりするなど、現実の光学系では決して実現できない光線から画像への変換が可能となる。なお、自由視点映像生成も、計測していなかった視点位置を通過する光線強度を予測して、実在しない架空のレンズを通る光線を積分するという意味では (2) に相当する。

以下では、この光線計測に基づく CP の研究事例をいくつか紹介する。

大口径レンズ

理想的なピンホールカメラでは、フォーカス面という概念がなく、いわゆるピンぼけは生じない。一方、一般的なカメラはレンズを用いるため、どの奥行きにフォーカスを合わせるかを考える必要があり、フォーカス面以外の奥行きにある物体はピンぼけしてしまう。工場ラインでの製品検査などにおいては、ピンぼけは望ましくなく、すべての奥行きにフォーカスが合う全焦点画像が望まれる。しかし、ピンぼけをうまく利用することで、たとえば檻の中にいる動物を撮影する際に、檻をぼかして動物だけを鮮明に撮影することもできる。

このぼけの効果は、レンズの焦点距離を有効口径で割った値である F 値が小さいほうが効果は大きい。一般に入手できるレンズでは、F 値は 0.95 あたりが最小であり、それ以上小さくする（つまり口径を大きくする）ことは光学設計上きわめて難しい。



図-3 多面体鏡による大口径レンズ

しかし、光線を計測し、架空のレンズを通る光線を積分するのであれば、F 値が非常に小さな大口径レンズも理論的には実現でき、フォーカスの合う範囲（被写界深度）が極端に浅い撮影も可能となる。

図-3 に示す多面体鏡は、カメラを組み合わせることで、被写体を中心とした半球面上に仮想カメラが配置されるよう設計されている²⁾。この多面体鏡を用いて光線を計測し、半球面を架空のレンズとみなして光線を積分すれば、半球面状の合成開口となり、特定の奥行きにのみにフォーカスが合う撮影が可能となる。また、リフォーカスも自由にできるため、層構造の物体を各層ごとに別々に撮影することも可能となる。このように、光学系だけでは実現できない架空の大口径レンズを計算で創り出せる。

透視画像の鮮明化

物体の裏側から光を当てて観測される透視画像は、物体内部の様子を可視化できるため、たとえば食品の異物検査などの用途に利用される。しかし、物体を通過する光線は散乱することが多く、通常のカメラで撮影された透視画像は不鮮明になりがちである。

物体を通過する光は、直進する透過光と物体中の微粒子に衝突して方向が乱れる散乱光があり、その両方をまとめて積分していることが原因である。つまり、透過光だけを集め、散乱光は積分しない架空のレンズを計算上で創り出せば、透視画像の鮮明化が実現できる。

図-4 は、プロジェクタを照明として用いた計測

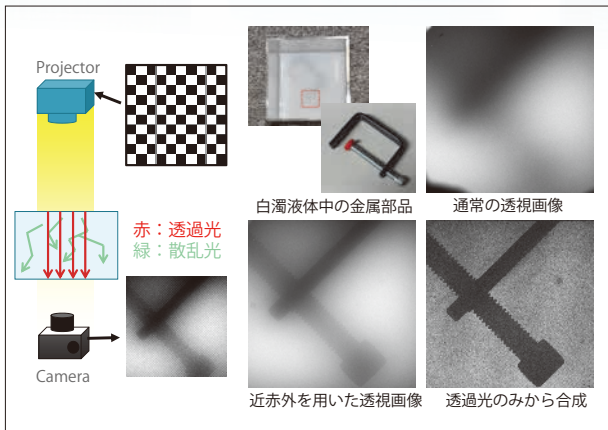


図-4 透視画像の鮮明化

システムである³⁾。プロジェクタから細かい格子パターンの位相を変えながら投影し、カメラで計測した強度の最大値と最小値を用いた簡単な計算で、透過光と散乱光を分離している。白濁した液体中に沈められた金属部品を可視光の照明と通常のカメラで撮影すると、何かがあることは分かって、形状はほとんど分からない。照明を近赤外光に変えると、輪郭部は見えるがまだ不鮮明である。一方、同じく近赤外光を使うが、散乱光は積分計算に利用せず、透過光だけで構成された画像は、細部まで鮮明に見えていることが分かる。このように、散乱しない光線だけを通す架空のレンズを計算で創り出せる。

層構造の分解

有名な絵画作品の下に、まったく別の絵が描かれていたといった発見をニュースなどで見かけることがある。油絵に使われる絵の具は近赤外光を通しやすいため、近赤外の照明とカメラで撮影すると、表面の絵の具だけではなく、その下地も観測できることが多い。ただ、その場合でも、表層の絵の具と下地が重なって見えるため、下地だけを撮影することはできない。これは、通常近赤外撮影では、表面近くの層からの反射と、より深い層からの反射が混ざってしまうからである。ここでも同様に、深い層からの反射光だけを積分する架空のレンズがあれば、下地だけが撮影できることになる。

図-5は、先ほどと同様に近赤外光のパターンを

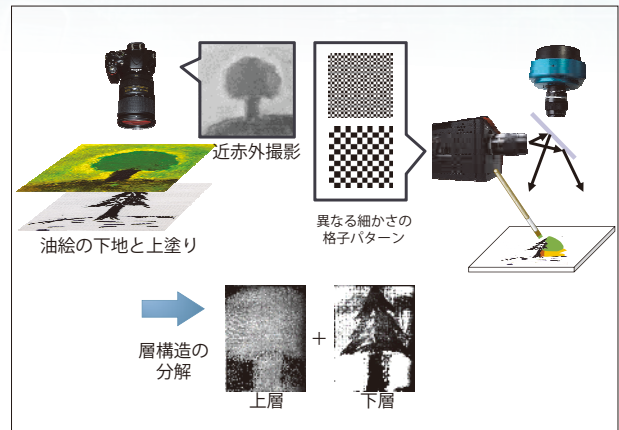


図-5 層構造の分解

投影できるプロジェクタを照明とした撮影システムである⁴⁾。プロジェクタから、細かさの異なるさまざまな格子パターンを投影する。このとき、表面近くの層で反射する光よりも、深い層で反射する光のほうが、より長く絵の具を通過することから、ぼけが大きくなる。つまり、深さに応じてぼけ具合も大きくなる。この性質に基づいて光線を分離すれば、下地だけを撮影することができる。例として挙げた絵画を近赤外光で撮影すると下地が見えるが、表面の絵の具と混ざっている。一方、深さごとに分離することにより、表面の絵の具だけ・下地だけとなるように計算した見え方が得られる。通常のカメラでは撮影できない下地だけが鮮明に撮影できている。ここでも、特定の奥行きで反射した光線だけを積分する架空のレンズを計算で創り出している。

コンタクトイメージング

シャーレに入れた状態で培養している細胞の状態を確認するためには、細胞をシャーレから取り出して顕微鏡で観察する必要がある。この観察の過程で細胞にダメージを与える可能性があり、また、顕微鏡も高価である。我々は、レンズを使わず、細胞を撮像素子に直接置いて観察するコンタクトイメージング⁵⁾を開発しており、細胞を傷めず安価に観測することが可能である。このコンタクトイメージングは、レンズがないために、そもそもフォーカスという概念がなく、まるでピンホールカメラのように

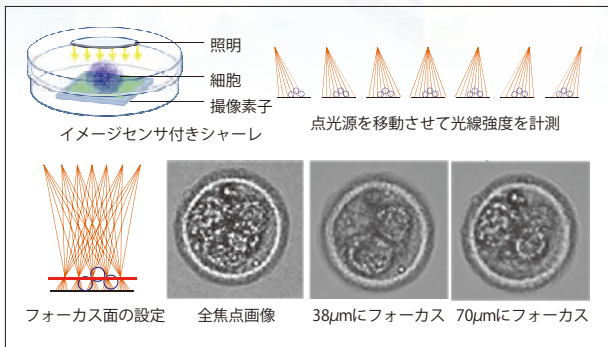


図-6 コンタクトイメージング

すべての奥行きがくっきりと観察できる。逆に言えば、異なる奥行きにある細胞がぼけることなく重なって見えるため、細胞の上下関係が把握しづらい。

この問題に対して、架空のレンズを創り出すことで、レンズがないコンタクトイメージングにフォーカスの概念を導入することを考える。図-6のように点光源を移動させて撮影することで、各点光源位置と各撮像素子を通る多数の光線を計測できる。このようにして光源側を操作して光線空間を計測することができれば、適当なフォーカス面を設定し、フォーカス面上の同一点を通る光線だけを選択して積分すれば、異なる奥行きにフォーカスした画像が得られる。この際、フォーカス面は通常のカメラのように撮像素子と平行である必要はなく、斜めになっていたり、曲面になっていたり、不連続になっていたりするなど、スネルの法則さえ無視した、架空のレンズを自由に創り出すことも可能である。

将来の展開

本稿では、さまざまな手法で光線を計測しておき、画像に変換するための積分を後回しにすることで、計算機によってさまざまな機能を持った架空のレンズを創り出す CP 技術について紹介を行った。光線を詳細に計測することで、自由視点映像や自由焦点映像だけではなく、通常のカメラの光学系では実現が不可能な撮影も可能となる。

今後は、より効率の良い光線サンプリング方法や、新たな機能を持った架空光学系の考案などによって、応用範囲を医療・農学・芸術・考古学などに広げていきたい。

参考文献

- 1) <https://www.lytro.com/>
- 2) Tagawa, S., Mukaigawa, Y., Kim, J., Raskar, R., Matsushita, Y. and Yagi, Y. : Hemispherical Confocal Imaging, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.3, pp.222-235 (Dec. 2011).
- 3) 田中賢一郎, 向川康博, 八木康史: 平行高周波照明による透視画像の散乱光除去, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J96-D, No.8, pp.1834-1843 (Aug. 2013).
- 4) Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y. : Recovering Inner Slices of Translucent Objects by Multi-frequency Illumination, Proc. CVPR2015 (June 2015).
- 5) 加藤弓子, 澤田好秀, 國吉房貴, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博: リフォーカシングによる初期胚の自由焦点画像生成, 信学技報, 医用画像研究会 (MI), No.30 (Jan. 2016).
(2016年7月6日受付)

向川康博 (正会員) ■ mukaigawa@is.naist.jp

岡山大学助手, 筑波大学講師, 大阪大学准教授を経て, 2014年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授, 博士(工学)。