

3

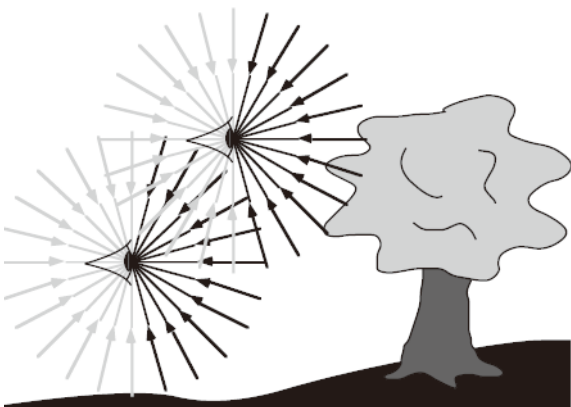
光線情報を用いた 3 次元映像情報の
取得から表示まで

— 光線空間法と Light Field Rendering —

光線空間法 /
Light Field Rendering とは

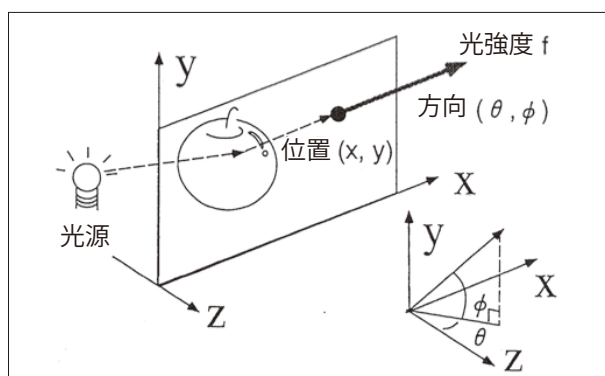
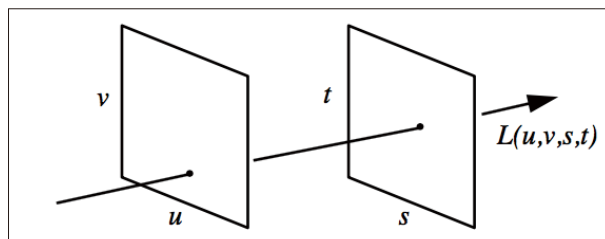
3 次元映像とは、観察者に立体感を与えられる映像を言う。しかし、3 次元とはいっても画像座標 (x, y) に加えてシーンの奥行き情報 (z) を陽に持っていることは意味していない。たとえば、いわゆる 3D 映画などは左右の眼に提示する 2 つの 2 次元映像である。3 次元映像の表現においてこの概念を一般化し、2 視点から多視点に、さらには無限にまで視点数を増やし、任意の視点から「見た映像」を記述しようとする手法が、本稿で紹介する光線に基づく記述法である。

このような「見え」を表現するものとして、文献 1) では Plenoptic Function (Plenoptic: plenus=すべての +optic の造語) が導入されている (図-1)。これは、空間中の光線を $P(x, y, t, \lambda, V_x, V_y, V_z)$ という 7 次元空間で定義される関数で表すものである (x, y : 画像座標, t : 時間, λ : 波長, (V_x, V_y, V_z) : 視点位置)。時間と波長を考慮しない場合、 P は 5 次元の関数となるが、屈折、反射、遮蔽等のない自由空間における光の直進性と、直進する光

図-1 Plenoptic Function¹⁾

線上での光強度の不変性の仮定を用いることにより、次元数を 4 に減らすことができる。このように、4 次元空間の関数として定義された光線の情報を用いて 3 次元映像情報を表現していく手法が、光線空間法²⁾ / Light Field Rendering³⁾ である。

光線空間法は各種の 3 次元映像を記述する共通フォーマットとして提案されたものであり、3 次元空間 $x-y-z$ における光線の記述法として、基準面 $x-y$ を通過する位置 (x, y) と光線の射出方向 (θ, ϕ) の 4 つのパラメータで表される関数 $f(x, y, \theta, \phi)$ として定義された (図-2)。一方の Light Field Rendering は、コンピュータグラフィックス分野において陽に 3 次元モデルを用いることなくリアルな 3 次元映像生成ができる手法として登場した。図-3 に示すように $u-v$ と $s-t$ で定義される 2 つの平面を考え、それぞれの交点により表され

図-2 光線空間の定義²⁾図-3 Light Field の定義³⁾

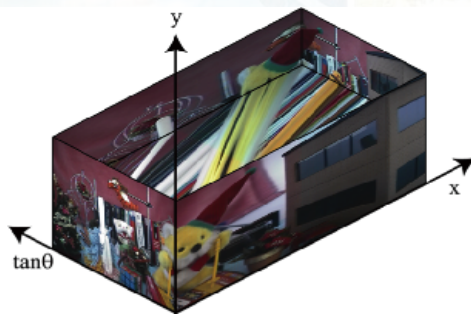


図-4 光線空間データの例

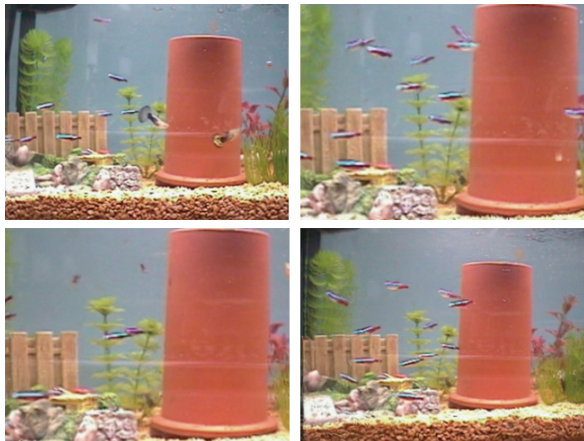


図-5 自由視点映像の生成

る光線を $L(u, v, s, t)$ として定義した。両者は独立に提案されたものであるが、Light Field を定義する平面において、 $u-v$ 平面を基準面とし、光線角度を保ったまま $u-v$ 平面と $s-t$ 平面との距離を無限大としたとき、光線空間の定義に一致する。

さて、次に図-2の座標系に従って光線空間の性質を見ていく。いま、縦方向の視差 ϕ を無視することとし、 $f(x, y, \tan \theta)$ の3次元光線空間を考えると、たとえば図-4に示すような光線空間が得られる。いま、高さ y が一定の平面上において、実空間座標 (X, Z) と光線空間内の座標 $(x, \tan \theta)$ との関係を考える。実空間内の一点 $P(X, Z)$ を通過する光線群を考えると、幾何学的な関係より、

$$X = x + Z \tan \theta \quad (1)$$

が得られ、「実空間内の一点を通過する光線群は、光線空間において直線となる」ことが分かる。この関係をランバート反射面を持つ物体の表面上の一点から射出される光線群に適用した場合は、「光線空間の y が一定の断面 $x-\tan \theta$ 面は直線群から構成される」ことが示される。また一方、 $P(X, Z)$ にピ



図-6 可変焦点画像の例（手前と奥に合焦）

ンホールカメラを置いてシーンを撮影したと考えるならば、「点 P においたカメラで撮影した（1次元）画像は、光線空間における直線上の点群に相当する」という性質が導かれる。

ここで、光線空間の水平断面 $x-\tan \theta$ は、カメラを水平移動させながら等間隔に撮影した画像を並べ、高さ一定の平面で切断した断面と等価であり、EPI (Epipolar Plane Image) と呼ばれる。

光線空間法により何ができるのか

文献2)、文献3)が指向していたものは、任意の視点の映像を光線の情報として記述することであり、3次元モデルを用いることなく自由視点映像を生成する手法として導入されたものである。光線空間法に基づく自由視点映像生成の例を図-5に示す。この処理は光線空間の断面の切り出しにより実現され、複雑なレンダリング処理が不要で高速生成が可能であるという特長を持つ。一方、その後の研究の発展により、さまざまな分野に応用が広がってきている。以下にいくつか例をみていく。

可変焦点画像生成

光線空間情報を用いて、ある奥行き面に合焦した画像を生成することができる。それには、合焦面上の各点において、その点を通る光線群のすべての角度方向の輝度情報を積分すればよい。これは、先の y が一定の断面で考えるならば、合焦面上の点 $P(X, Z)$ を通る光線群のうち(1)式に沿って開口分の角度範囲で畳み込み積分を行うことにより実現可能である。図-6に可変焦点画像の例を示す。

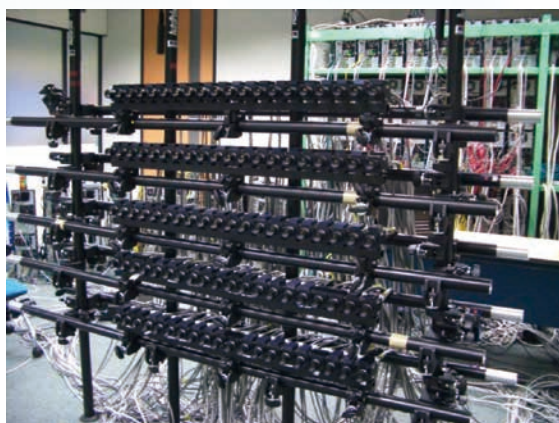


図-7 100 眼カメラシステム (名古屋大学)

奥行き推定

ステレオ画像からの奥行き推定では、左右画像間に対応点関係を求め、カメラ間隔を基線長として三角測量の原理に基づき奥行きを算出する。この手法を光線空間からの奥行き推定に応用した場合、カメラ間隔が「密な」多視点画像が利用可能なため、対応点問題や隠蔽の問題が緩和されるといった利点が考えられる。また一方、EPI パターンを解析して奥行き推定を行う研究もなされてきた。古くは直線の傾きの検出問題として研究されてきたが、近年では EPI 上での勾配や構造テンソルを用いた奥行き推定法などが提案されており、Shape from Light Field という分野を形成しつつある。

超解像

光線空間情報は視点位置を「微小に」ずらしながら撮影した画像群と等価であり、これを利用した超解像が可能である。この場合、サンプリング位置がずれるだけでなく被写体の奥行きに応じた視差が生じるため、これを補償しつつ処理を行うことが必要となる。

3 次元ディスプレイ用の映像生成

Integral Photography やレンチキュラーレンズを用いた 3 次元ディスプレイは複数の視点の映像を同時に出力できる装置と考えることができるため、多視点映像の高速生成が可能な光線空間法と相性が良い。また、ホログラフィックディスプレイへは、光線空



図-8 Light Field Camera (Lytro) と撮影画像

間データをホログラムパターンに変換することにより表示可能である。両者は、ある条件のもとで相互変換できる。

光線情報の取得・処理・表示

取得

光線情報の取得手法としては、静止シーンを対象とした場合にはカメラを光学ステージに乗せて微小に動かしながら撮影する手法が考えられる。一方で動的シーンに対しては、多数のビデオカメラが必要となる。2005 年頃には大規模カメラアレイの研究が盛んに行われた (例: 図-7)。

ほかの取得手法として、撮像素子の前にレンズ板を置いて、4 次元光線情報を 2 次元のパターンとして撮影する方法がある。これは Integral Photography の撮像原理そのものであるが、レンズ板と撮像素子を一体としてカメラの中に組み込んだ Light Field Camera (LFC) と呼ばれるものが開発されている。主な用途として可変焦点画像の生成をうたっており、「撮った後からフォーカスが変わえられる」という触れ込みで商品化がなされている (Lytro や Raytrix など) (図-8)。

また、コンピュータショナル・フォトグラフィの原理を用いて、符号化開口や符号化マスクとい

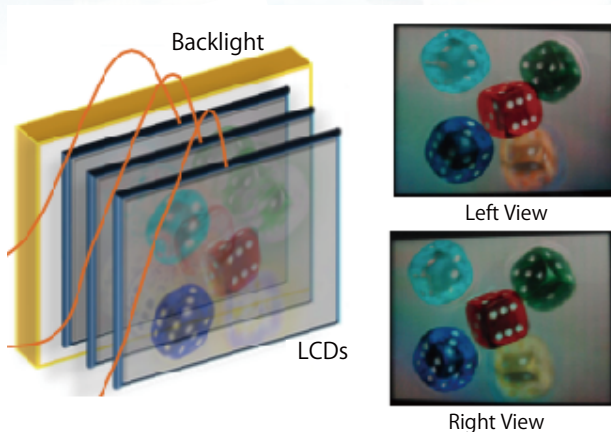


図-9 レイヤ型3次元ディスプレイ（光線再生型）

った空間光変調器と後段の計算処理とを組み合わせることで光線を取得する方法が研究されている。さらに Compressed Sensing の考え方を導入することにより、撮像素子数や撮影回数を減らす試みもなされている。

■処理

先に紹介した LFC の登場により、視点が微小に異なる多視点画像群が1ショットで得られるようになった。この特徴を活かし、物体認識などへ応用が広がっている。また、それとともに光線空間データを効率的に圧縮・符号化する研究の必要性も高まってきた。国際標準化機関でも活動が活発になっており、静止画像符号化方式の国際標準を定める会合である JPEG ではデジタルカメラへの応用を目指した JPEG PLENO が検討中であり、動画画像等の符号化方式の国際標準を定める会合である MPEG においても Light Field Compression の活動が始められたところである。

■表示

表示装置としては、光線空間情報そのものを表示できる光線再生型ディスプレイ（Light Field Display）の研究が活発になってきている。レンズ板やスリットを用いる方式は従来から研究されているが、空間光変調器や時分割多重を用いて、光線空間を忠実に再現する方式の研究が進んでいる。例として、空間光変調器を積層したレイヤ型のディスプレイなどがある（図-9）。

今後の研究の展開

光線空間法と Light Field Rendering について簡単に紹介し、取得・処理・表示のそれぞれにおける近年の研究動向を紹介してきた。取得においては、LFC の登場により簡単に撮影できるようになったが、今後さらに視域角の大きいデータを取得できる装置の開発が望まれる。処理分野では、Shape from Light Field や効率的な圧縮符号化方式の開発とその国際標準化がキーワードになるであろう。また、ライトフィールドディスプレイは携帯等への搭載も視野に入れて産業的にも注目されているところである。今後の研究の展開が楽しみである。

参考文献

- 1) Adelson, E. H. and Bergen, J. R. : The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision, in Computational Models of Visual Processing, MIT Press, pp. 3-20 (1991).
- 2) 藤井俊彰：3次元統合画像符号化の基礎検討，東京大学工学系研究科博士論文（1995），<http://hdl.handle.net/2261/1866>
- 3) Levoy, M. and Hanrahan, P. : Light Field Rendering, in Proceedings of SIGGRAPH'96, pp.31-42 (1996).

（2016年7月11日受付）

藤井俊彰（正会員）■ t.fujii@nagoya-u.jp

1995年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士（工学）。名古屋大学助手、助教授、東工大准教授を経て、2012年名古屋大学教授。3次元映像処理・通信・システムに関する研究、国際標準化活動に従事。