Technical
Survey

技術解説

ライトフィールドカメラ&ディスプレイ

(正会員) 小池 崇文[†]

ライトフィールドカメラとライトフィールドディスプレイについて解説する。ライトフィールドは1908年にLippmannにより提案されたインテグラルフォトグラフィを原点とする、光を4または5次元の情報と定義することで光線を扱う考え方である。本稿ではライトフィールドの基礎に始まり、そのカメラとディスプレイの基本知識を中心に説明する。

キーワード：ライトフィールド、ライトフィールドカメラ、ライトフィールドディスプレイ

1. まえがき

“光を光線として扱う”ことは、幾何光学ではあたり前のことである。幾何光学は歴史的に見ても十分に研究されている。しかしながら、光をデジタルな情報として扱うことや、その情報処理については、必ずしもその考え方や、方法論が確立されているとは言えなかった。近年、一般的になってきたライトフィールドの考え方は、まさしく光線を情報処理も含めて統一的に扱うアイデアであり、ようやく、基盤が整ってきたと言える。その結果として、ライトフィールドカメラ・ディスプレイは注目を浴びているのであり、今後、関連研究者や技術者が知っておくべき、必須技術であると言える。

本解説では、まず、ライトフィールドについて説明し、続いて、ライトフィールドの原点とも言えるLippmannのインテグラルフォトグラフィについて解説する。続いて、そのライトフィールドを取得するライトフィールドカメラ、さらに、ライトフィールドを表示するライトフィールドディスプレイと、その研究動向について説明する。本解説により、少しでも読者のライトフィールドカメラ・ディスプレイの正しい理解と、今後の関連技術の発展に貢献できればと思う。

2. ライトフィールドとは

ライトフィールドは、その名の通り、光を場として考えたものであり、光の輝度を位置と方向で記述される(図1)。ライトフィールドは一般には4次元の情報で記述され、4D Light Fieldとも呼ばれている。Light Fieldの日本語訳もいくつか提案されているようであるが、必ずしも適切ではないように思える。したがって、本稿ではライトフィールド

図1 ライトフィールドの概念図
空間中に存在する光線を位置と方向で表す。

とカタカナ表記とし、必要に応じて英語表記も用いる。

Light Fieldの“Field”は、日本語では“場”や“界”と訳される。一般には、電磁場、重力場のように、(時)空間中の任意の点に存在する、ある物理量であり、物理的に実在する場である。ただし、ライトフィールドは、実際の物理的な場ではなく、物理量を表す仮想的な場であり、マクスウェル方程式が発見される前に、ファラデーによって最初に提案されたと言われている¹⁾。

光は古典物理においては、マクスウェル方程式で電磁場として記述される。マクスウェル方程式は、通常4つの式で表記される連立偏微分方程式であるため、解析的にも数値的にも解くのが難しい。一方で、われわれが見ている可視光は直進性も高く、主要部分を幾何光学で記述できるため、ほとんどの場合で単純化して考えて良い。ライトフィールドの本質は、光を物理場と同様な場として捉えることで、エンジニアリング的に取り扱いを容易にする考え方である。これにより、標本化によるデジタル化を可能にし、その結果、コンピュータグラフィックスや信号処理といった技術で取り扱い可能になった効果が非常に大きい。

[†] 法政大学 情報科学部

"Light Field Camera & Display" by Takafumi Koike (Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University, Tokyo)

図2 Plenoptic Functionとその座標系
光(L)を5次元 (x, y, z, θ, ϕ) で記述する。

3. ライトフィールドの基本知識

3.1 Plenoptic Function

Plenoptic Functionは、1991年にAdelsonとBergenにより提案された光を記述するための関数²⁾で、人やロボットが取得する実世界の光の情報を記述するために導入された(図2)。光の出射位置を表す3次元 (x, y, z) と、方向を表す2次元 (θ, ϕ) を用いると、任意の光を記述することが可能となる。この光を完全に記述する5次元の関数 $(L(x, y, z, \theta, \phi))$ をPlenoptic Functionと呼ぶ。波長 (λ) と時間 (t) を合わせて7次元の関数とする考え方もあるが、本稿では5次元であるとする。これは情報量の次元であり、実際の物理的な次元ではないことに注意されたい。なお、Plenopticはラテン語で完全、fullを表すPlenusとOpticより作られた造語である。

今、光の直進性を仮定する。ある光線を考えたとして、光の減衰を無視すれば、遮蔽物にぶつからない限り、その光線上では L は同じ値を持つ。例えば、図2で z 軸方向の光線を考えると、 z がどのような値でも L は同じ値を持つことから自明である。

よって、Plenoptic Functionから1次元削減しても記述できる情報に違いはなく、これを4D Light Fieldと呼んでいる³⁾。一般には、このPlenoptic Functionから1次元削減したものを4D Light Fieldと呼んでいるが、広義にはどちらも同じものであり、次元を削減しなければ、5D Light Fieldとなる。ただし、4次元であることの意味は大きく、カメラアレイやレンズアレイカメラとの対応関係が明確になるメリットがある。

従来は、立体映像は3次元の情報であると漠然と考えられてきたものが、4または5次元必要であることを示した功績は大きい。

3.2 ライトフィールドの座標系

ライトフィールドは座標系の取り方に自由度があり、さまざまな座標系が提案されている。数学的には、座標系の取り方は大きな意味を持たないが、工学的にはライトフィールドにおける座標系の取り方は、実際の光線のサンプリングとその信号処理に密接に結びついており、適切な

図3 ライトフィールドの座標系
光を (s, t) 、 (u, v) の2枚の平面を通る直線で表すことが一般的である。

座標系を取るとさまざまな利点がある。

図3に一般的なライトフィールドの座標系を示す。座標系の取り方はいくつか提案されており、図3に示した他にも、平面と方向(例えば、3次元極座標の2つの角度成分で方向を表す)といった組合せもよく使われる。

4. インテグラルフォトグラフィ

ライトフィールドカメラ・ディスプレイの説明の前に、その原点とも言えるGabriel Lippmannのインテグラルフォトグラフィについて説明する。インテグラルフォトグラフィはライトフィールドの原点であるとともに、立体写真の元祖とも言える。Lippmann自身も、(当時の、そして現在の)写真は絵画のようにリアリティの1面を切り取った平面的なものでしかないと、その解決手段として提案した旨を論文の冒頭で述べている⁴⁾。

図4に、Lippmannのインテグラルフォトグラフィの原理を示す。インテグラルフォトグラフィは、1908年に提案された写真技術で、フィルム(当時は写真乾板であった可能性が高い)の前面にレンズアレイを置くことで、光を記録し、再生する方式である。Aから発せられた(または通過した)光は一般にはさまざまな方向成分を持つ、つまり、複数の光線を持つが、それぞれが複数の a に記録されている。これを再現してやれば、Aから発せられたさまざまな方向の光、つまり光線群が再現されることになる。

より直感的な説明をすると、1つひとつのレンズ(と対応する乾板領域を合わせて)が微小なカメラであると考え、多視点画像を撮影する方式であり、多視点写真である。

原理的には、本方式では、被写体の視差が反転してしまう現象があり、後に、Ivesによって、インテグラル写真を再度、Integral Photographyで撮影することで、再度の反転が起こり、問題が解決することがわかっている。また、より現実的な解決方法として、GRINレンズアレイを用い

図4 インテグラルフォトグラフィの原理(文献⁴⁾より引用)

て光学的に反転する手法が提案されているが、現在は、途中で信号をデジタル化し、処理することが一般的であるので、この像の反転が課題になることはほとんどない。

余談であるが、Lippmannはカラー写真技術でノーベル物理学賞を受賞しており、また、Lippmann Hologramとして名前が残っている。また、キュリー夫人の指導教員であったことも知られている。業績に比べて知名度は低いと思われるし、写真技術の基礎を築いたといっても過言ではないと思う。

5. ライトフィールドカメラ

ライトフィールドを取得（撮影）するカメラがライトフィールドカメラである。基本的には、先に説明したLippmannのインテグラルフォトグラフィと同等の光学系を持つが、現在はより改良が進んだものとなっている。

5.1 ライトフィールドカメラの原理と分類

図5に、一般的なライトフィールドカメラの光学系を示す。この光学系を持つライトフィールドカメラはPlenoptic Cameraと呼ばれており、レンズアレイとセンサとの距離が、ちょうどレンズアレイの焦点距離と同じものである。大きなレンズは、一般的なカメラ・レンズと同じ役割で、被写体への焦点調節として使われる。なお、レンズアレイの大きさはイメージセンサと同スケールであるため、レンズアレイの各レンズは、非常に径の小さいものが使われる。そのため、レンズアレイは、マイクロレンズアレイと呼ばれることが多く、実際に、数十～数百 μm 程度の小さなレンズである。

図6は、Focused Plenoptic Cameraと呼ばれるライトフィールドカメラで、イメージセンサとレンズアレイ間の距離がレンズアレイの焦点距離とは異なる光学系を持つ。Plenoptic Cameraが、レンズ毎に入射する異なる方向の光線を取得するのに対して、Focused Plenoptic Cameraは、1レンズが小さなカメラであると見なせる違いがある。

5.2 ライトフィールドカメラの実装

実際のライトフィールドカメラは、一般には、複数台のカメラで構成されるカメラアレイかハエの眼レンズ等を用いたレンズアレイカメラで実装される。図7にその例を示す。図に示すように、大きなサイズから小さなサイズまでいろいろな実装が提案されている。

カメラアレイであれば、その大きさがカメラ開口に対応するため、大きなサイズであるほど、奥行きに対する精度が向上する特徴を持つ。

ライトフィールドカメラの実際の製品としては、Stanford大学で学位を取得したRen Ngが創立したRefocus Imaging社（現Lytro社）とそのカメラが有名である。日本国内でも話題になり、容易に入手できるので、名前を聞いたことのある方も多いと思われる。

なお、ライトフィールドカメラの研究が盛んになるに従い、Computational Photography/Cameraというキーワードも使われるようになってきたが、一般にはライトフィー

図5 (Standard) Plenoptic Cameraの光学系

図6 Focused Plenoptic Cameraの光学系

文献6) より引用

文献7) より引用

文献8) より引用

図7 ライトフィールドカメラの実装例
さまざまなサイズのライトフィールドカメラが提案されている。

ルドカメラを含む概念である。

5.3 ライトフィールドカメラの応用例

ここでは、ライトフィールドカメラで撮影したライトフィールドでできる代表的な応用例について説明する。

まずは、立体映像撮影カメラとしてのライトフィールド

カメラが挙げられる。後ほど説明するライトフィールドディスプレイに表示するライトフィールドそのものの取得である。

続いて、充分に開口が大きいライトフィールドカメラであれば、Image-Based Rendering (IBR) や自由視点映像として知られる視点を移動した画像生成が可能である。

さらに、複数台のカメラであると考えたと奥行き推定にも使うことが可能である。また、奥行き推定と実質同じことであるが、撮影後の写真のリフォーカスが挙げられる。リフォーカスとは、焦点調整(フォーカス)を再び行うという意味で、撮影後にピントが換えられるカメラとしてよく知られている。

6. ライトフィールドディスプレイ

ライトフィールドを再生するのがライトフィールドディスプレイである。広義には、ライトフィールドディスプレイとは、離散化された光線群を再生するディスプレイであるが、狭義には4D Light Fieldを再生するディスプレイである。

そのため、制御された光線群を再生していれば、ライトフィールドディスプレイと呼んで差し支えないが、あえて分類すると、大きく2つの方式があると言える。図8がその2方式であり、1つは、元々のLippmannのインテグラルフォトグラフィと同等の光学系を用いた方式である。もう1つが、複数のディスプレイパネルを用いた方式である。続く節で詳細を述べる。

6.1 インテグラルイメージング方式

最初の方式は、液晶ディスプレイなどの2次元ディスプレイとレンズアレイやバリアなどの光学系を組合せて、光の指向性を実現しているものである。Lippmannが提案したオリジナルのインテグラルフォトグラフィ⁴⁾と光学系は同等であり、一般的な裸眼立体ディスプレイの原理でもある。インテグラルフォトグラフィと同等の光学系を持つ結像技術という意味で、インテグラルイメージングと呼ばれ

ることが多い。

例えば、レンズの位置を座標で、1レンズ下の画素群を座標で表すと、ライトフィールドとディスプレイの対応関係が明瞭になる⁵⁾。

ライトフィールドディスプレイの大きさは、ライトフィールドカメラのイメージセンサの大きさに比べて1~2桁大きい。そのため、レンズアレイのレンズの大きさも同様に大きく、数百 μm ~数mmの大きさをもつ。レンズで画素を拡大して見ているとも考えられるため、一般にライトフィールドディスプレイでは、映像の2次元解像度が、元のディスプレイデバイスに比べて1~2桁程度低下し、画素が大きくなる2つの課題がある。

6.2 テンソルディスプレイ方式

2番目の方式は、複数枚の透過型液晶パネルなどを用いた積層型のもので、ここではテンソルディスプレイ方式と呼ぶことにする。積層型の立体ディスプレイは、積層数を2枚まで減らしても立体映像が知覚可能な、陶山らのDFD (Depth Fused 3D)⁹⁾が良く知られている。DFDもテンソルディスプレイ方式もハードウェアに大きな違いはないが、DFDを含めた一般的な積層型立体ディスプレイは、パネル位置または両端パネル間の空間に像があると考えのに対して、テンソルディスプレイ方式は、原理上は両端パネル間の空間を超えた範囲に映像を表示できる点に大きな違いがある。

原理は、ライトフィールドのある1本の光線を、複数のパネルの透過率の積で表していることが特徴である。視点追跡等を行わない場合には、閲覧者が破綻なく映像を見ることが可能な視点範囲がある程度限定されるが、その範囲内では、元のパネルの解像度を保ったまま、ライトフィールド表示が可能となっている。複数の光線を少ない画素の積で表すため、ハードウェアが必要とする情報量は少なくなる。しかしながら、表示したいライトフィールドを近似値に分解していることになるため、より良い近似解を高速に求める必要がある。

名前の由来であるが、表示ライトフィールドをテンソル積に分解し各パネルに表示することから、Tensor Display¹⁰⁾と呼ばれている。

6.3 二方式の本質的な違い

前記二方式の違いは、構成デバイスの違いよりは、数学的な違いが本質的な点である。前者は、元のディスプレイの画素(信号)を、レンズ等によってサンプリングし方向制御することによって、ライトフィールドを生成している。一方で、後者は、元の画素をサンプリングするのではなく、信号と別の信号(もう1枚のディスプレイ)の積をとることによって、ライトフィールドを生成している。両者は生成されるライトフィールドの標本数に大きな違いが発生する点が大きく異なる。

6.4 ライトフィールドディスプレイの応用例

ライトフィールドディスプレイに関しては、まだ実用化されているものがほとんど存在しないため、実用化先とし

図8 ライトフィールドディスプレイの実装例

て期待される関連研究について紹介しておく。

6.4.1 ライトフィールドディスプレイによる視力調整機能の追加

ライトフィールドディスプレイで表示するライトフィールドを、個々人の眼の特性に合わせることで、例えば、近眼の人にも鮮明な画像を提示する、いわば視力調整機能を備えたディスプレイが提案されている。近眼は眼のレンズの屈折率が強すぎて、網膜上で、像がボケてしまっている状態である。そこで、眼のレンズの屈折率を考慮して、網膜上に鮮明なライトフィールドが写るように表示するライトフィールドを調整すれば良い。もう少し単純化すると、眼鏡の機能をディスプレイ側に持たせたと考えても良い。

このようなアプローチは、最近、研究が盛んで、バリアアレイ、レンズアレイ、多層ディスプレイ、などさまざまな方式が提案されており^{11)~13)}、スマートフォンやタブレット、メガネ型や腕時計型ウェアラブル端末への適用が期待されている。例えば、腕時計型ウェアラブル端末の表示面にこの機能が実装されれば、就寝時などのメガネを使用していない時でも、よく見えるといった効果が期待できる。

Tensor Displayの論文著者の1人であるMatthew Hirschらによって、ライトフィールドディスプレイを開発するベンチャー企業のLUMI社¹⁴⁾も設立されており、Lytro同様に、今後、製品化が大きく期待できる。

6.4.2 グラス型ウェアラブル装置へのライトフィールドディスプレイの適用

ライトフィールドディスプレイをグラス型ウェアラブル装置へ適用する方法も提案されている¹⁵⁾。構成としては、レンズアレイと小型のディスプレイデバイスであり、一般的なライトフィールドと似ているが、各レンズアレイで虚像を表示することで、近距離でのライトフィールド表示を実現している。ディスプレイと眼の距離の適切な調整など、調整項目が多いのが課題である。

6.4.3 ヘッドマウントディスプレイ(HMD)へのライトフィールドディスプレイの適用

HMDと2枚構成のテンソルディスプレイを組合せて、両眼視と単眼視の両方で奥行き知覚が可能なHMDが提案されている¹⁶⁾。HMDは、現在、急速に普及が始まったウェアラブル装置の1つであるが、現在のHMDは、眼の焦点は近距離のディスプレイ面に合うため、必ずしも理想的ではなかった。ライトフィールドディスプレイを用いることで、単眼による奥行き知覚も可能となり、より自然で見やすいHMDが実現できる。

7. むすび

本稿では、ライトフィールドの歴史的な経緯も含めて概説し、ライトフィールドカメラとライトフィールドディスプレイについて基本的な原理やいくつかの応用例について述べた。本文中では触れなかったが、ライトフィールドは

次元が高く、情報量が多いため、ソフトウェア面でもデバイス面でもまだまだ発展の必要な技術である。しかしながら、一部では実用化もされ、また、興味深い応用可能性も研究されている。その将来性は非常に高く、今後、大いに期待できる楽しい技術である。

なお、近年はライトフィールドに関連した研究を汎光線時空間(Plen-optic Time Space; PoTS)映像学¹⁷⁾と呼び、関連研究会の立ち上げと、関連研究を盛り上げていこうとする気運があり、学術的にも、発展が期待できる。

(2016年10月25日受付)

〔文 献〕

- 1) M. Faraday: "Thoughts on Ray Vibrations", Philosophical Magazine, S.3, XXVIII, N188 (1846)
- 2) E.H. Adelson and J.R. Bergen: "The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision", Computational Models of Visual Processing, MIT Press, pp.3-20 (1991)
- 3) M. Levoy and P. Hanrahan: "Light Field Rendering", ACM SIGGRAPH 1996, pp.31-42 (1996)
- 4) M.G. Lippmann: "Epreuves Reversibles Donnant la Sensation du Relief", J. Phys., 7, 4, pp.821-825 (1908)
- 5) A. Isaksen et al.: "Dynamically Reparameterized Light Fields", ACM SIGGRAPH 2000, pp.297-306 (2000)
- 6) B. Wilburn et al.: "High Performance Imaging Using Large Camera Arrays", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), 24, 3 (2005)
- 7) R. Ng et al.: "Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera", Stanford Univ. Comp. Sci. Tech Report CSTR 2005-02 (2005)
- 8) K. Venkataraman et al.: "PiCam: An Ultra-Thin High Performance Monolithic Camera Array", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH ASIA), 32, 6 (2013)
- 9) S. Suyama et al.: "A Direct-Vision 3-D Display Using a New Depth-fusing Perceptual Phenomenon in 2-D Displays with Different Depths", IEICE Trans. On Elec., E85-C, 11, pp.1911-1915 (2002)
- 10) G. Wetzstein et al.: "Tensor Displays: Compressive Light Field Synthesis using Multilayer Displays with Directional Backlighting", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), 31, 4 (2012)
- 11) V.F. Pamplona et al.: "Tailored Displays to Compensate for Visual Aberrations", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), 31, 4 (2012)
- 12) F. Huang et al.: "Correcting for Optical Aberrations using Multilayer Displays", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), 31, 6 (2012)
- 13) F. Huang et al.: "Eyeglasses-free Display: Towards Correcting Visual Aberrations with Computational Light Field Displays", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), 33, 4 (2014)
- 14) Lumi, <http://www.lumiidisplay.com/>
- 15) D. Lanman and D. Luebke: "Near-eye Light Field Displays", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH ASIA), 32, 6 (2013)
- 16) F. Huang et al.: "The Light Field Stereoscope: Immersive Computer Graphics via Factored Near-Eye Light Field Displays with Focus Cues", ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH), 34, 4 (2015)
- 17) 斎藤英雄, 田村秀行: "汎光線時空間(PoTS)映像学の提案", 情報処理, 57, 10 (2016)

こいけ たかふみ
小池 崇文 1995年、東京工業大学理学部卒業。1997年、東京大学工学系研究科修士課程修了。同年、(株)日立製作所入社。2013年、法政大学情報科学部教授。コンピュータ・ディスプレイ/カメラ、バーチャルリアリティ・拡張現実感、CGに関する要素技術から全体システム、応用までの研究に従事。博士(情報理工学)。正会員。