

# ライトフィールド光学と3次元空間の表現

岩根 透\*

## Light-field optics, 3D space transformation onto 2D plane

Toru IWANE\*

ライトフィールド光学は、コンピュータの発達、受光データのデジタル化によって可能となったいわゆる計算機光学のひとつで、これまでの結像光学とはその基本的な考え方が異なっている。これまで完成された画像、すなわち位相情報を失った2次元の光の強度分布を記録していたのに対して、奥行を含めた3次元データを情報の塊として取得し、それから画像を含めた有益な情報をコンピュータで切り出し算出するというものである。3次元空間データがそのまま記録されているので、これまでの撮影作業—焦点合わせや絞りの決定など—は、ライトフィールド光学ではポストプロセッシングで可能となる。これはリフォーカス機能としてよく知られたものである。そして、幾何光学の可逆性から、2次元面上に記録された3次元空間は、記録時と逆のプロセスで復元することができる。すなわち2次元面上に表示された符号化データから、3次元空間つまり空間の光線状態が再現できる。これは、3次元光線空間再現装置、裸眼3次元表示装置であり、表示面と像の光学的共役関係の拘束がない光学装置である。このライトフィールド光学の概観を説明する。

Light-field optics is different from conventional imaging optics. This technique was produced based on development of computer and digitalized light detector data. In contrast that 2D images or pictures, 2D light amplitude distributions which do not include depth nor phase information, are captured from 3D scene in conventional optics, in light field optics 3D space or conditions of rays in 3D space are recorded on 2D detector plane as they are. Though this concept of light field optics seems to be similar to holograph, a system of the light-filled optics uses neither diffraction nor interference of light but uses geometric optics and computational processing instead. Acquired data on 2D plane contain depth information and a 2D image of any focal position can be composed from the data by post processing; this process is well known as "refocusing". In addition from reversibility of geometric optics, these coded data on 2D plane can be transformed back to conditions of rays in 3D space again through same optical system. This can be thought as a glass-free 3D display. As an image is reconstructed from coded data, image is not necessarily optically conjugated with a display plane which shows coded data. Then optical system of light field optics is free from limit of optical conjugation. I introduce theorem of light field optics and its applications in this report.

**Key words** ライトフィールド、インテグラルディスプレイ、3次元表示、コンピューティショナルフォト plenoptics, integral photo, 3D display, light field camera, computational photograph

### 1 はじめに

世界は光で溢れていて、空間には光線が充満している。その一部が眼に入射して光像を網膜に結ぶ。我々は、大昔からこの像で世界を把握し、像を介して世界を表現してきた。ラスコー洞窟の壁画から始まる絵画の歴史、そして19世紀にはじまる写真の歴史はそれを引き継ぐものである。次に三枚の絵を示そう。左の絵は現存する最古の絵画であるラスコー洞窟の壁画である。バイソンやシカなどが描かれており、その世界の様子は絵画から認識可能である。中央の絵は15世紀のオランダの画家ファン・エイクによるもので、写真のような表現、つまり網膜に結ぶ像を忠実に再現している。空間はこの画像によって確かに再現されている。右の絵画は、ピカソによるもので、先の絵画とは異な

り、画像として認識が困難である。この絵は、複数の視点を一枚の絵の上に描き、空間と立体を表現しようとしたものである。

こうした二次元面上の画像表現から脱して、空間にある

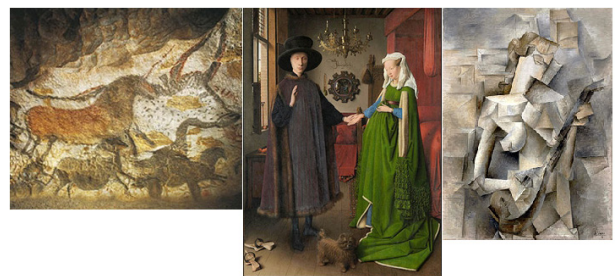


Fig. 1 画像による空間の表現の発展 (左 ラスコー壁画, 中央 ファンエイク油彩, 右 ピカソ油彩)

\* 経営戦略本部 事業戦略部

光をそのまま記録、再現しようという方法が現れてきた。多くの光線の状態を、画像を介さずにそのまま記録し、再現するのである。それがライトフィールド光学である。それまでの立体と云えば2次元画像に奥行きを付与するという概念が支配的であったが、そうではなくて3次元の空間をそのまま2次元上に符号化して記録し、これを復号して空間を再現しようというものである。

この概念はもともと1908年にリップマンによって提唱されたものであるが、銀塩フィルムに糊と鍍の道具立てでは得られた画像の操作はいかんともし難い。そのまま、この技術は、デジカメの現れる21世紀になるまで忘れ去られることになる<sup>1)2)</sup>。受光データのデジタル化に加え、視覚を超える“無駄”な高精細カメラやディスプレイが現れてきたことにより、この光学システムは甦ってきた<sup>3)</sup>。なかなか実用化しないホログラムによる汎用立体表示に代わり、ライトフィールド光学が研究、開発されるようになってきたのである。

ニコンのライトフィールド光学開発の歴史は、意外に古い。1980年代に日本のカメラメーカーはいわゆるハネウェルによるAF特許裁判に巻き込まれた。一眼レフAF (Automatic Focusing) で先行していたミノルタはこの特許紛争をハネウェルと正面から戦い一敗地に塗れてしまった。その結果300億の特許賠償を払ったと言われている。こうした状況下、ニコンは結局この特許の使用権を使ってないにもかかわらず60億で買うことになる。ハネウェルのこの焦点検出方式 (TCL) をどうにか有効利用できないかと使い道を探ることとなった。その後、デジカメの基礎となる2次元のエリアセンサーが出現した。マイクロレンズアレイとエリアセンサーを組み合わせれば、TCL方式を発展させた原理により、撮影画面全体の焦点検出が可能であることがわかった。

画面全体の奥行き情報の取得は、とりもなおさず空間とその奥行きを直接記録であって、ライトフィールド光学に他ならないのである。本来の目的の焦点検出のほかに、後処理によって2次元像の焦点可変や絞りが変更ができることに気づき、それを実験で確かめたところ、スタンフォード大学でも同様の研究をおこなっていて、ライトフィールドと呼んでいるらしいということを知ったのである<sup>4)</sup>。彼らは、後に最初のライトフィールドカメラを発売した Lytro 社となるグループである。

## 2 光線の再現

さて、それでは空間中の光線はどのような仕組みで再現すればよいだろうか。光線は、空間上直線と考えることができるから、空間上に平行に置かれた2枚の平面を考えると、それぞれの2つの交点で直線を定義することができる。ひとつの交点の平面上の座標は、光線の通過位置であり、

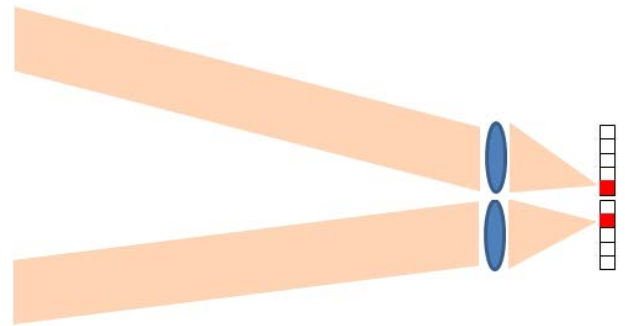


Fig. 2 点灯画素を変化させると出射光の方向が変わる。

他方の交点との座標の差分は、進行方向である。すなわち、光線は、位置と方向の2つの2次元データの組、4次元データとして表されるのである。

光線を定義する方向と位置のうち、位置に関しては簡単に実現することができる。2次元平面ディスプレイの発光位置が光線の通過位置である。したがって、問題は光線の方向の再現である。これは、高精細の平面ディスプレイと小レンズの組み合わせで実現することができる。Fig. 2において、最下部の画素だけが点灯しているとき、この組み合わせの小レンズから、光線は斜め上方に出射される。この光線の出射方向は点灯する画素を変えることで変化させることができる。これから配列された小レンズと、高精細平面ディスプレイの組み合わせで、任意の方向と位置で規定される光線を再現することができる。これから、ライトフィールドディスプレイの構造はレンズアレイと高精細平面ディスプレイからなることがわかる。レンズアレイ中の小レンズの座標が光線の位置を表し、小レンズの内部の画素座標が方向を表すことになる<sup>4)</sup>。

光線の再現が可能になったとして、これから3次元空間を光線でどのように記述すればいいだろうか。我々は、光線で空間を表すことに慣れていない。3次元空間のもっとも基礎的な要素は、空間中の点光源である。空間像は数多くの点光源から成立する。点光源を光線で記述することは難しくはない。その点光源を通過する光線群を考えれば十分である。

2次元画像を構成するひとつの光点は、2次元ディスプレイのひとつの画素で表現することができる。一方、ライトフィールドディスプレイでは、一つの光点を再現するためには多くの光線つまり微小画素が必要になる。しかしながら、ライトフィールドディスプレイでは、点灯する画素のパターンを変化させることで異なる任意の深さの空間に光点を合成することができる。Fig. 3にその例を示す。上に示した例と下の例では、点灯パターンが異なっているだけである。小レンズから出射した光線は、空間中の異なった深さで交わり、点光源を空間中の異なる位置に生成する<sup>6)7)</sup>。

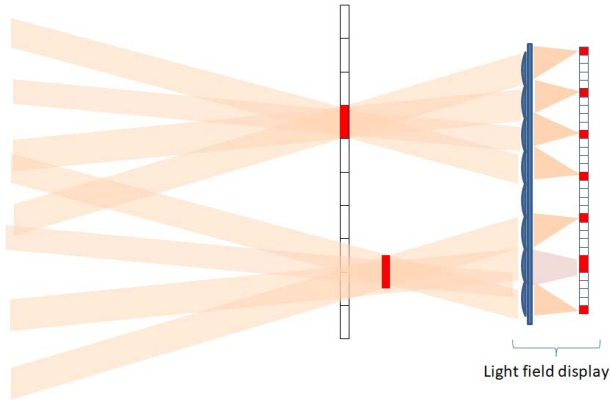


Fig. 3 画素の点灯パターンを変えると、異なる深さに点光源が再現される。

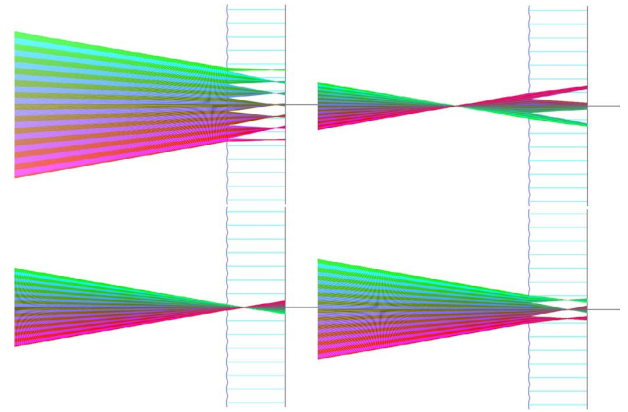


Fig. 4 光線追跡図。レンズアレイを通して点光源は、2次元のパターンに変換される。

### 3 3次元空間を2次元面で表現

それでは、高精細平面ディスプレイの点灯パターンはどのように決めればいだろうか。幾何光学の可逆性から、空間上の点光源からディスプレイ面に光が向かう場合を考えてみる。Fig. 4 にその光線追跡を示す。Fig. 4 には点光源の異なる4つの奥行きに点光源がある例を示している。図中、左の縦の波線はレンズアレイの前面であり、右の縦線はディスプレイ面である。左上図では点光源は左端にあり、右上図では点光源はレンズアレイに近づいた位置にある。下段は、点光源がレンズアレイの右側にある場合を現している。

レンズアレイに入射した光は、ここでいくつかに分けられ、離散的な光分布をディスプレイ面上で示す。左上の図では、入射光は7つに分けられて、右上図では3つに分けられている。この光分布の離散化の様子が、点光源の深さを表現している。

Fig. 5 にディスプレイ面での光分布の状態を表す。点光源が  $6f$ 、すなわちレンズアレイの焦点距離の6倍位置にあるとき、光分布（パターン）は、右上に示すようなものとなり、 $3f$ のときには右中に示すような形状となる。パターンの総面積は、形状によらず一定である。

2次元のパターンと2次元空間の点光源は別空間であるが、同じものであり、レンズアレイを介して、互いに交換することができる。これから、ライトフィールド光学は3次元点像を2次元の面に移すものであることがわかるだろう。

先に述べたように、3次元空間像は、数多くの点光源の集合とみなすことができる。したがって、2次元面上でこれらの点光源に対応するパターンの重畳は、3次元空間像を表すことに他ならない。これがライトフィールドデータである。ライトフィールドデータは、空間を2次元面上に展開されるデータで表したものである。Fig. 6 に実際のライトフィールドデータを示す。このデータの中に奥行き情報や、異なる視点から映像が含まれている。最初にお見せし

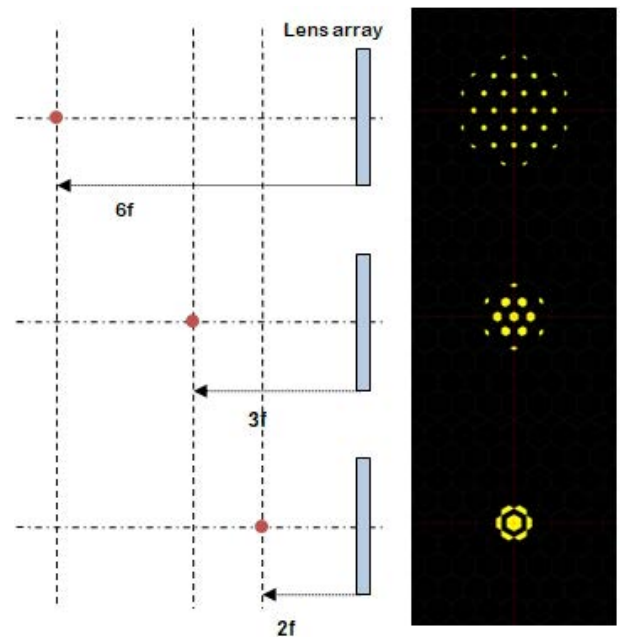


Fig. 5 パターンと点光源の関係。右のパターンと点光源は別空間の同一のものともなせる。

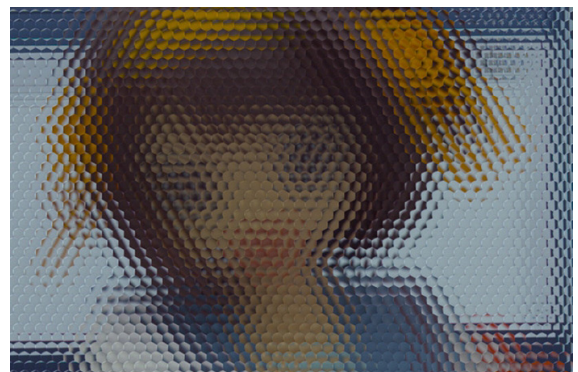


Fig. 6 実際のライトフィールドデータ。レンズアレイの配列で細分されている。

た絵画を思い出して貰いたい。ピカソの絵に似ていることに気が付くかもしれない。立体を多くの視点から見て、これを一枚の2次元像に情報として埋め込むプロセスは、ラ

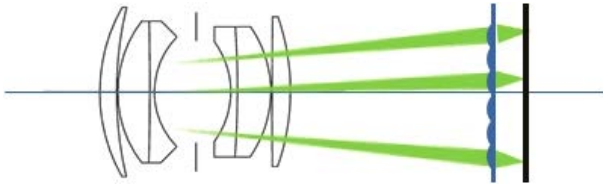


Fig. 7 ライトフィールドカメラの概念図

イトフィールドと同じである。画像としては分かりにくい  
が、一定の論理性を持っている。高度な才能の持つ人の試  
行は、技術に先行しているものである。

さて、それでは、このライトフィールドデータはどのよ  
うにして入手することができるだろうか。ライトフィール  
ドカメラによって、空間像をライトフィールドデータに変  
換することができるのである。ライトフィールドカメラは、  
ライトフィールドディスプレイと逆のシステムと考えると  
分かりやすい。ライトフィールドカメラの概念図を Fig. 7  
に示す。レンズアレイとディスプレイの代わりに撮像素子  
が装備されていて、そこに入射光の開口を制限するため  
に撮影レンズが付加されている。通常のカメラで、撮像素子  
の直前にレンズアレイが装備されたものと考えてもいい。

外空間は、撮影レンズで縮小された像としてレンズアレ  
イ付近に移行され、この像がレンズアレイによってライト  
フィールドデータに変換される。

ライトフィールドカメラによって撮影された空間は、ラ  
イトフィールドディスプレイによって空間像として再現す  
ることができるのである<sup>5)~7)</sup>。

## 4 ライトフィールドディスプレイ

先に述べたようにライトフィールドディスプレイの構造  
は非常に簡単である。Fig. 7で示すようにレンズアレイ  
プレートが高精細平面ディスプレイ直上に装備されている<sup>4)5)</sup>。  
平面ディスプレイにライトフィールドデータが表示され  
ると、立体像がレンズアレイ近傍に出現する。

Fig. 9に実際のライトフィールドディスプレイを示す。こ  
れは、市販のスマートフォン上にレンズアレイプレート  
が載せられている。図で表示されている画像は、自社カ  
メラを改造した試作のライトフィールドカメラで取得したも  
のである。レンズアレイはハニカム配列で小レンズが稠密  
に配置されたものであり、一つの小レンズの直径は、表示  
画素14個分に相当する。画素サイズは 31.7 μm である。レ  
ンズアレイはポリカーボネートの基材上にポリマーを成型  
して製作している。レンズアレイの仕様を次の表1に示す。

Fig. 9に示すようにライトフィールドカメラで撮影され  
た空間が、光学的に縮小されているが、3次元像として再  
現されている。再現されている立体空間像は、よく知られ  
たステレオ画像ではなく、体積を持った像である。

さて、立体表示と言え、ある程度の年齢の方には、映

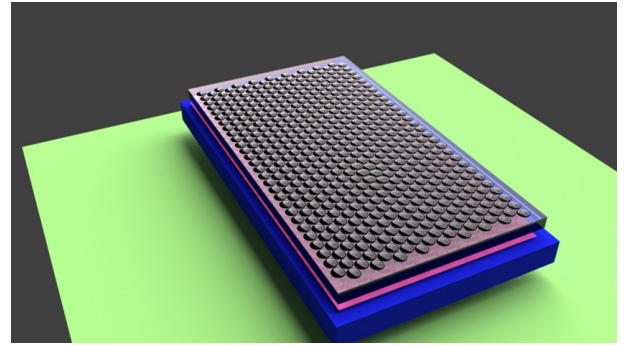


Fig. 8 ライトフィールドディスプレイの構造。レンズアレイ  
と平面表示機からなる。

Table 1

焦点距離	直径	F 数	画素サイズ	厚さ
1.33 (mm)	0.44 (mm)	3.0	31.7 (μm)	0.6 (mm)



Fig. 9 スマートフォンを使用したライトフィールドディス  
プレイ

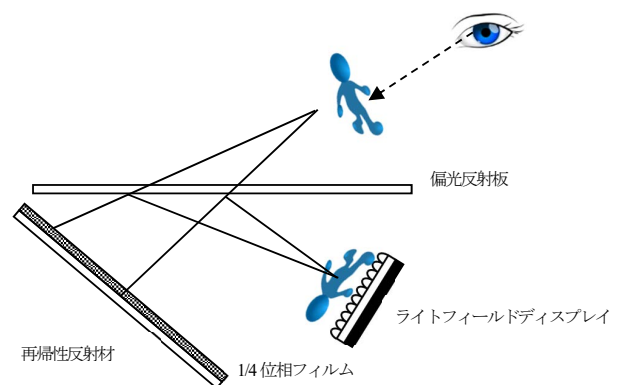


Fig. 10 空中立体表示装置の構造

画スターウォーズのレイア姫であろう。こうした空中立体  
像は、空中表示装置とライトフィールドディスプレイを組  
み合わせることで完全再現とは言わないけれども可能に  
なる。Fig. 10 に空中立体ディスプレイの概念図を示す。この

表示機は、ライトフィールドディスプレイと、偏光反射板、 $1/4\lambda$ 位相フィルムと再帰性反射材から成立している<sup>8)9)</sup>。再帰性反射材は、小さなコーナークューブが数多く敷き詰められた構造をしており、入射した光は、入射してきた方向に戻る。つまり光の進行方向を反転する機能を持っている。交通標識などに使われている反射材を精密したものと考えればよい。

ライトフィールドディスプレイから出射された光は、表示機が液晶なので直線偏光しており、偏光反射板で反射され、 $1/4$ 位相フィルムを通して再帰性反射材に入射する。ここで反射した光は再び位相フィルムを通して、入射した時と同じ経路を逆にたどり、偏光反射板に至る。この時偏光面は $90^\circ$ 回転していて、光は偏光反射板を通過する。本来、ライトフィールドディスプレイで生成された立体像に戻る光は、偏光反射板に反対側の空中に立体像を形成する。

Fig. 11 に、この空中表示装置の実例を示す。空中に立体の脳の像が浮かんでいるのがわかる。この像は、立体のCG画像からライトフィールドデータを合成し、このデータをライトフィールドディスプレイに出力することで得られたものである。

この光学系の問題は、光の進行方向が反転しているのでライトフィールドディスプレイで表示された立体像を裏側から観察することになり、立体像の遠近が反転することである。これを解決するためには、あらかじめ遠近を反転した立体画像を表示し、この表示装置の光路で再反転する方法をとる。これはそれほど難しいことではない。立体像を構成する点光源をレンズアレイ面について鏡面对称に移動させればよい。先に述べたように、点光源を構成する光線の方向は、小レンズ内の座標で決定される。この座標の正負を反転すれば、光線の方向は光軸に対して反転し、光線群の交点、つまり点光源はレンズアレイの反対方向に移動する。したがって、ライトフィールドデータをそれぞれ的小レンズ領域毎に反転すれば、生成される立体像はレンズアレイの反対側で遠近反転することになる。

Fig. 12 に空中立体表示機の別の例を示す。これはスマートフォンサイズ5.5インチの立体表示で、ハチが空中に表示されている。こうした表示装置は、スマートフォン用の高精細ディスプレイが容易に入手できるので、簡単に製作できる。

空中表示ではないが、スマートフォンやスマートウォッチに立体のアバターが立ち上がっているような表示（斜方の立体）も可能である。表示機の高精細化と処理能力の向上により、ライトフィールド光学を使用した可能性は大きく広がってきている。

## 5 まとめ

ライトフィールド光学では、光線を再現することで体積

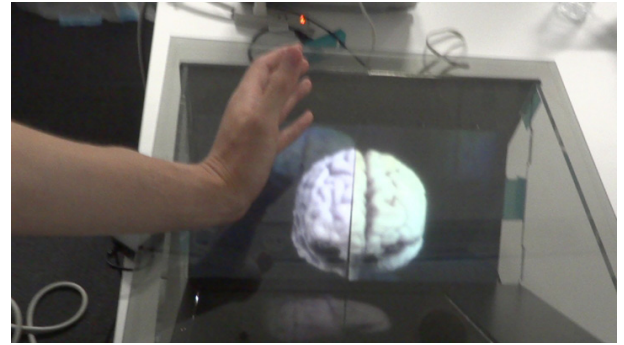


Fig. 11 実際の空中立体表示装置

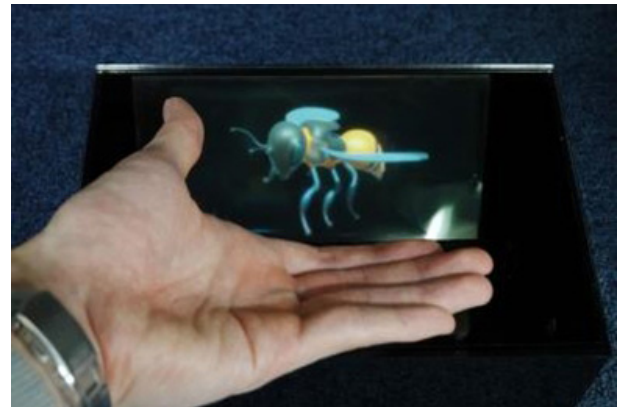


Fig. 12 もう一つの空中立体表示機の例

型の立体像を生成できることを示した。これは、2次元面に記録された符号化データと3次元の空間像の変換の問題であり、概念的な枠組みは、方法論は違うけれども、ホログラムに近い。ホログラムは、空間の小さな点が全画面に展開されるのに対して、本タイプのライトフィールド光学では、小レンズの大きさに展開されるだけなので、表示面の分解能に対する再現像テクスチャーの“歩留まり”が良い。これは、“無駄に”高精細化されたディスプレイや撮像素子の“無駄な”部分を利用すれば、それなりの3次元像を生成できることを意味する<sup>10)</sup>。そういう意味で、8K表示や放送の登場は、非常の良いタイミングである。実際、本技術にはかなりの引き合いがある。

立体表示を中心に述べてきたが、符号化した2次元データを光線群に変換するという概念から、立体とは異なる用途も考えられる。表示されるデータは符号化されたものであるから、表示面と出現する像の間に、光学的な共役関係はない。これは有益な条件である。たとえば、ヘッドマウントディスプレイを考えると、この装置は通常、小型表示機の表示面と網膜を光学的に共役とする光学系を小さく高視野に製作するという問題である。ライトフィールド光学系はこの制約はないから、表示機を網膜に結像しえないメガネレンズの位置に置いて、網膜上に像を形成することが可能である。スマートフォンやタブレットで像を表示面の後方1mの位置に表示させれば、観察者が老眼や遠視でも

表示機を明視距離（25 cm）に置いて視認することができる。これらは、ここでは紙数の都合で述べてはいないが、既に原理試作での確認を終えている。

最後に、本来ならカメラについての論考が要請されることであるが、本論文では、ほとんどカメラには触れていない。ライトフィールドカメラは、3次元の空間をライトフィールドデータに変換する装置で、つまり情報の材料を作る装置で、それを料理するものではない。ライトフィールド技術により厚さが1 mm以下のカメラなど機械的な特性として面白いものは可能であるけれども、情報の活用という観点からは、面白さに欠けるので省略した。別の機会としたい。

本技術の研究の継続に尽力いただいた、研究開発本部の皆様へ謝意を表したい。

### 参 考 文 献

- 1) G. Lippmann, *Académie des Sciences*, pp. 446–451 (1908).
- 2) T. Georgiev, <http://www.tgeorgiev.net/Lippmann/index.html> (2008).
- 3) E. Adelson and J. Wang, *IEEE Trans., PAMI* **14**, pp. 99–106 (1992).
- 4) R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan, *Light Field Photography with a hand-held plenoptic camera*, Stanford University Computer Science Tech Report **CSTR 2005-02** (2005).
- 5) B. Javidi and F. Okano, *Three-dimensional TV, video, and display*. (Springer Science and Business Media) (2002).
- 6) T. Iwane and M. Shoda, *Optical Engineering*, **57**(6), **061616**, (2018).
- 7) S.-W. Min, M. Hahn, J. Kim and B. Lee, *Opt. Exp.*, **13**, pp. 4358–4369 (2005).
- 8) H. Yamamoto, Y. Tomiyama and S. Suyama, *Opt. Exp.*, **22**, pp. 26919–26924 (2014).
- 9) T. Iwane, *OSA Imaging and Applied Optics*, (2016).
- 10) T. Iwane, *Photonics West 2019*, **10943-7**, (2019).