

## 計算機写真 (Computational Photography\*) の時代がやってくる

発明から 100 年：実現されるか集積写真術 (Integral Photography)

Adobe Systems Incorporated Dave Story

訳 / O plus E 編集部

Adobe Systems (米国アドビ システムズ社、以下 Adobe) の顧客は創造性があり、また要望も多い。彼らは Adobe® Photoshop® によって “ありえない写真 (impossible photograph)” を創ろうと考<sup>つ</sup>えている。カメラが撮った像ではなく、彼らが頭に描いた像を得たいのである。この2つの間の乖<sup>かい</sup>離を埋められるように、われわれは日々新たな手法の研究開発を行っている。

Adobe® Photoshop® が使える計算機能力は、ムーアの法則\*\*のおかげで、指数関数的に増大している。Adobe 社内で開発された画像処理、画像強調のアルゴリズムのなかには、カメラ側がもっと進歩しないと商品として提供できないものがある。ソフトウェアだけでなくハードウェアの革新 (イノベーション) が要求されており、これらの新規アルゴリズムを活用できるように、計算機写真を実現するカメラとレンズの試作にわれわれは着手しているのである。こうした研究の結果として前途有望と思われるのが、集積カメラ (plenoptic カメラ) である。

この解説記事では、研究開発にいたったきっかけや動機について述べる。われわれの仕事が、カラー写真でノーベル賞を受賞したガブリエル・リップマンをはじめとして、多くの科学者の仕事にどのように依存しているかを示す。リップマンの “集積写真 (integral photograph, 1908 年)<sup>1)</sup>” と、それが今日の技術でどのように実現できるかを述べる。またこの新奇 (novel) な手法の応用について述べ、写真と計算機の融合に関するわれわれの研究結果を示す。読者の皆さんが、将来の写真

を実現するために何らかの貢献をしたいと考えるのではないかと思う。そしてわれわれは、計算機写真がその将来の写真になるものと信じている\*\*\*。

### 1. 集積写真 (Integral photography) の過去と未来

写真による画像取得の基本技術は初期のカメラと変わっておらず、3次元の視覚の場は、写真乾板、フィルム、あるいは CCD のような2次元面上に描かれる。一方、計算機の能力は指数関数的に増加している。Adobe® Photoshop® のような新しい画像処理ソフトによって、従来、カメラと暗室では達成できず、あるいは非常に困難であった画像を、得ることができるようになった。しかし、さらにより多くのことができるようになっており、また顧客もさらなる期待をしている。今日、われわれは、過去の偉大な着想の中から、将来の写真技術として実現可能なものを探している。

1908 年、リップマンは3次元空間中の光のエネルギーを表す物理量である輝度を、写真技術として捕まえる方法を提案した。彼は記録されたデータを “集積写真” と呼んだ。もし、リップマンの集積写真を実用化できれば、多くの写真家にとって “デジタル暗室 (digital darkroom)” とも言うべき Adobe® Photoshop® によってまったく新しいことが可能となるだろう。新しいアルゴリズムと集積カメラのようなハードウェアの改良によって、写真を撮った後からでも、フォーカスを合わせ直したり、カメラの視点を動かしたり、ピクセルごとにフォーカスを調整するような3次元的操作ができるように

\* 訳注：Computational Lithography は計算機リソグラフィーと訳されているので、Computational Photography も計算機写真と訳した。

\*\* 訳注：半導体回路の集積度が2年で2倍の速さで進むという経験則で、ムーアが提唱した。

\*\*\*[http://web.mit.edu/persci/people/adelson/pub\\_pdfs/elements91.pdf](http://web.mit.edu/persci/people/adelson/pub_pdfs/elements91.pdf) が plenoptic カメラの機能を理解する上で参考になるであろう。

デイブ ストーリー

なる。Adobeは未来を志向し、“なぜできないの？”と常に問いかけているのである。例えば、写真の傷を修正する修繕筆（Healing Brush）をすでに持っているが、像の任意の個所のピントを合わせたり、ピンボケにできる焦点筆（Focus Brush）はなぜないのか？ 像の各画素における奥行き（depth）を知ることができ、それに基づき好きな部分を選んで処理するような、新たな選択筆（Selection Brush）はなぜないのか？ このような、あるいはその他の処理は今のカメラではできていないが、集積カメラとPhotoshop®が実現すれば、ありえない写真（impossible photograph）が容易に創れるようになるだろう。

## 2. どのように働くのか？ “奥行きのある画面（deep pixels\*）”を持つことの意味

何層もの画面（像面）を持つ仮想的なカメラを想像していただきたい。レンズを通った光はセンサーにさまざまな角度で入射する。光線に沿って運ばれるエネルギーを示す物理量は、光線がセンサーに入射するときの場所と角度の関数である4次元輝度\*\*である。一般には、この輝度情報は2次元画像に射影される。この2次元画像は、撮影時の被写界深度と像面位置の関数である。しかしながら“奥行きのある画素（deep pixel）”であれば、さまざまなピントでの光線の情報を記録できる（図1）。すなわち、光は多くの画面層を通過し、各層にはそれぞれにピントの合った特定距離の物体の像だけが記録されることになる。各層の画像を選択的に組み合わせることで、望ましいピントの像を創ることができる。1つの層

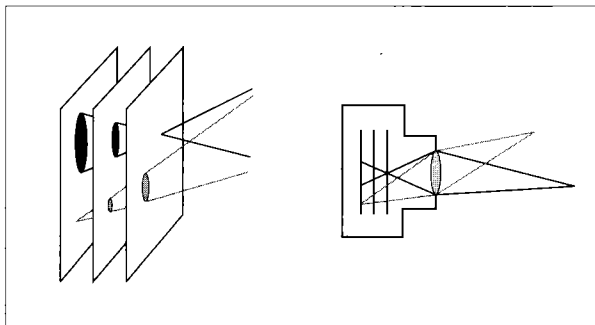


図1 ピントの奥行きがある仮想的なカメラ

\* 訳注：deep pixelsは何層もの画面で作られたものである。これを奥行きのある画面、またdeep pixelを奥行きのある画素と訳した。

\*\* 訳注：4次元輝度というのは、場所、角度（方向）の各2次元で計4次元の変数の関数としての輝度という意味。

の像を最終像とすることもできるし、ピントの合った画素を組み合わせることで画面上のすべてでピントの合った像を得ることもできる。

集積写真によって奥行きがある画素を光学的に得ることができる。1つのレンズによる画像形成ではなく、集積写真は複数のレンズによって複数画像を像面に形成する。この方法では、3次元空間中を伝わるそれぞれの光線が、カメラセンサーに角度情報として記録される（図2）。

このアプローチでは、従来のカメラのピクセルは多数のサブピクセルに分轄され、各サブピクセルは異なる方向からの光線を記録することになる。それゆえ4次元像の形成、すなわちセンサー上に4次元輝度の記録がなされる。3次元空間のある面を通る光線は、4次元データ（ $x, y, \alpha, \beta$ ）で記録される。光線が像面を通る位置（ $x, y$ ）と光線の方向（ $\alpha, \beta$ ）は光学的な位相空間（光線空間）をなす。

計算処理によって得られる画像では、各ピクセルは深さの自由度を持ち、撮影した後で画像にバーチャルな深度を与えることができる。われわれのこの技術による画像処理によって、カメラのレンズを使った焦点調節は、ソフト上の仮想的なレンズを使った焦点調節に置き換えられる。焦点合わせ、収差補正、さらに光学系の働き全般が、カメラで得られた輝度情報を用いてソフトウェアで行われることになる。そうなれば、レンズとは何かまったく新しい見方もできるであろう。例えば、もし完全なレンズを作る代わりに計算機暗室で収差補正ができれば、安価でそれもあまりまでもないレンズでも高画質の像を得ることができるかもしれない。

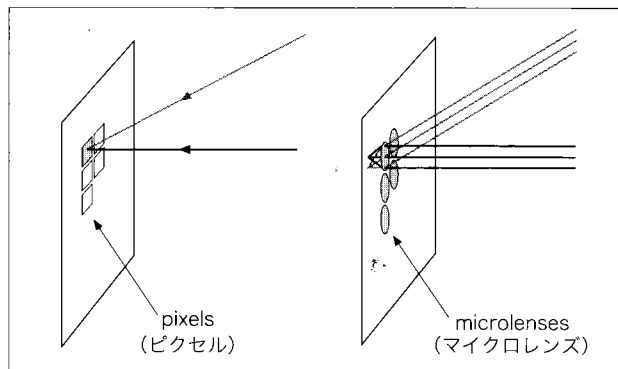


図2 一般のデジタルカメラでは（左）、輝度情報は各ピクセルごとに均されてしまう。集積カメラ（plenopticカメラ）では（右）、マイクロレンズの集光作用によって輝度を記録できる。

### 3. 角度分解能と空間分解能のトレードオフ — 両方を得ることはできないか？

4次元上の情報である輝度を2次元画面上で得るといふ従来の方法では、所与の2次元ピクセル配列上に角度情報と空間情報を多重化して保存することが必要である。それゆえ、トレードオフが行われ、角度情報を増やして空間情報を減らすか、あるいはその逆を選ぶことになる\*。Adobeは、4次元輝度情報を2次元上に光学的に多重化する適切な方法を研究している。以下に、2つの方法とわれわれのそれらの改良について概観する。

4次元光線空間を空間成分と角度成分に分けるには、2つの方法がある。1つはレンズアレイ（またはレンズとプリズム）をカメラレンズの前に置く方法である（図3の右図）。Adobeでは、この方法を用いて、同じシーンを異なる視点からとらえた19の画像に、光学位相空間を分割し多重化している。レンズアレイのおおののレンズは異なる視点から像を撮ることになる。各レンズの像面に作られた各像が、主レンズによって最終像面に一緒に再結像している（図3では簡略化して各レンズアレイの中心を通る光線だけを描いてある）。もう1つの方法はリップマン自身の提案であり<sup>1)</sup>、マイクロレンズアレイをイメージセンサーの直前に置く方法である（図3の左図）。図2ですでに述べたように、マイクロレンズの後に奥行きが深い（深い被写界深度の情報を持った）像が作られることになる。

2つの方法に共通の問題は、（マイクロ）レンズの数で光線空間の分割数が決まってしまう、それが固定され

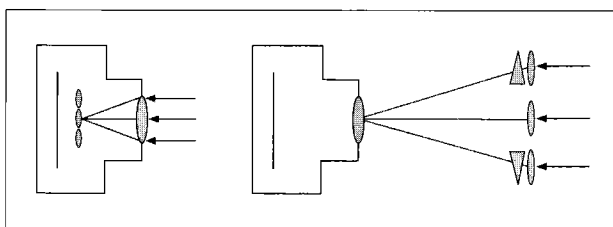


図3 輝度情報を得るための2つの方法 (Plenoptic 1.0)

\* A) ピクセルの大きさと空間分解能は制限されるが、回折現象によって  $\Delta\alpha\Delta x > \lambda$  という限界がある。ここで、 $\Delta\alpha$ は角度分解能、 $\Delta x$ は空間分解能、 $\lambda$ は光の波長である。これらのうち厳しい方の条件によって可能な画素数が決まる。それは、空間と角度のそれぞれの分割数の積である。理屈上、異なる割り当てで（例えば、 $100=10\times 10$ と $100=50\times 2$ ）、カメラを設計することができる。  
B) 従来の plenoptic カメラではマイクロレンズの開口数は主レンズの開口数と同じでなくてはならない（訳注：以下の説明はマイクロレンズの後ろ側焦点に CCD が、前側焦点に主レンズの像ができると考えたと理解しやすいと思う）。もし、マイクロレンズが回折限界で使われているときには、その開口の大きさは主レンズの空間解像よりも十分に大きくなくてはならない。ひとつのマイクロレンズは主レンズが作った像の多数のピクセル（解像限界の大きさ）で覆われることになる。この結果、像には偽信号 (aliasing) が載る。これを防止するために、マイクロレンズの前に拡散板を置くことになるが、このため角度分解能が低下する。それゆえ、高画質にすることは困難である。われわれの Plenoptic 2.0 では、偽信号を生じることなく空間と角度の情報を得ることができる。全素子数として、光学的に最大の解像力を得ることができる。

ていることである。分割可能なピクセル数は有限であるから、レンズ設計者は深度と解像力の妥協点を見出し、空間と角度への最適な割り当てを行わなければならない。

このトレードオフは、集積写真で直面するほかの課題にも関係してくる。基本的には物体はランベルト面（完全拡散面）である。物体上の1点から出てくる光の輝度はその方向によらない。このため、輝度情報の方向（角度）成分には冗長性がある。このような密接に関連した課題を解決するには、後で図5や図6の右図で示すような両者の関係性を利用して、両者を同時に解決する方法が求められる。この方法を用いれば、空間分解能と角度分解能の配分を簡単に換えられるようになる。この冗長性を利用して角度分解能を低くし、空間分解能を高くすることができる。

### 4. 集積写真は本当に実用化できるのか？

コンピューターの処理能力はますます増大しており、集積写真の100年の歴史において特別な状況になってきている。MITのAdelsonとWangはplenopticカメラを提案した<sup>3)</sup>。リップマンのカメラをデジタル的に実現し、コンピュータービジョンに応用するものである。さらなる研究によって焦点ずらしのアルゴリズムが導入され<sup>4)</sup>、またplenopticカメラやlight field camera<sup>5)</sup>によって得られた輝度情報を3次元的に操る方法が考えられている。しかし、このような進展にもかかわらず、カメラのハードウェアによって相変わらず制限されている。われわれが今日持っているコンピューター能力を十分に生かせるようにplenopticカメラを改良することはできるのだろうか？そして集積写真は実用化されるのだろうか？

最近の仕事で、輝度の角度情報を得るには、plenopticカメラのマイクロレンズの上に像ができなくてもよいことをわれわれは示した [図4, Plenoptic 2.0]<sup>6)</sup>。マイクロレンズから像までの距離は任意でよく、角度情報はお

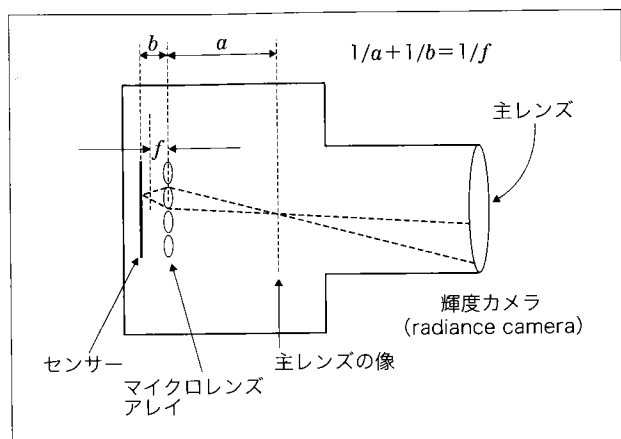


図4 われわれが考えている、ケプラーイメージによる plenoptic カメラ (Plenoptic 2.0)

のおののマイクロレンズの画像から求めることができるのである。しかし、このようなフォーカスの方法では別の問題が生じる。最大の空間分解能を得るために、どのようにマイクロレンズのピントを合わせるかである。

結局のところ、ガリレオとケプラーの2つの望遠系を用いた解がある。基本的に望遠系の機能がカメラ内部に組み込まれている。望遠鏡の接眼レンズを通して人が見ることができる像に相当するものが、マイクロレンズの前の像面に作られている。望遠鏡での接眼レンズと眼の組み合わせがマイクロレンズに置き換わっており、CCDアレイが眼の網膜の役割をしている。マイクロレンズによって作られるそれぞれの小さなマイクロ画像は、全体画像から分割され、異なる仕方で反転されたり異なる大きさに変換されたパズルピースのようなものである。この集積画像 (integral image) の構造はマイクロ画像の深度に依存する。われわれのアルゴリズムは、マイクロ画像のサイズを変更し、反転させ、適宜継ぎ合わせることができ、さらにこれらを組み合わせることで最終的な像を作り出すことができる。

このカメラの設計では、正しくピントの合った像を得るために、マイクロレンズはセンサーから正確な距離だ

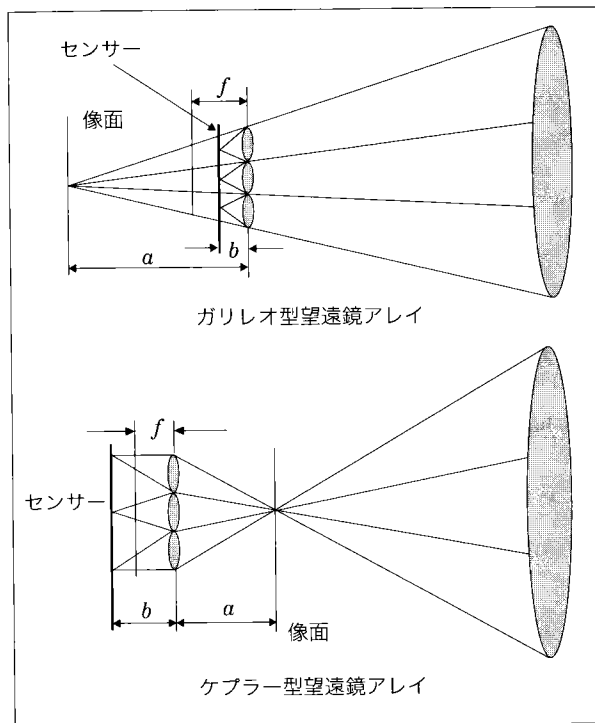


図5 Plenoptic カメラ 2.0：ガリレオ型とケプラー型

け離れていなければならない。図5には Plenoptic 2.0 の2つのバージョンが示されている。従来の plenoptic カメラに比べて高解像像であるだけでなく、サンプリングが柔軟になっている\*。マイクロレンズとセンサー間の距離によって、1つのマイクロレンズがサンプリングする光学位相空間の空間分解能と角度分解能を調整することができる\*\* (図6)。

光学位相空間において、1つのマイクロレンズでサンプリングできる領域の幅と傾きとの組み合わせ (図6右図の平行四辺形の形状) を調整することにより、空間分解能と角度分解能の配分を正確に選択することができる。実際、従来の plenoptic カメラの構造では、エッジ効果によるノイズのために実現できなかったが、plenoptic 2.0 では大変低い角度分解能が可能となった\*\*\*。そ

\* Plenoptic 1.0 は従来のものを指す。Plenoptic 1.0 と Plenoptic 2.0 の2つの基本的な相違を示す。  
 A) Plenoptic 1.0 では主カメラレンズの像面にマイクロレンズアレイが置かれる。Plenoptic 2.0 では主カメラレンズの像面とマイクロレンズは離れている。  
 B) Plenoptic 1.0 ではマイクロレンズはセンサーからマイクロレンズの焦点距離  $f$  だけ離れており、したがって無限遠方に焦点が合っている。Plenoptic 2.0 ではマイクロレンズはセンサーから距離  $b$  離れており、距離  $a$  にある主カメラレンズの像をセンサー上に結像している。  
 \*\* 図5において  $a$  を大きくすれば、角度分解能が向上し、空間分解能が低下する。  
 \*\*\* 従来の Plenoptic カメラ (図2の右図の方式) で高分解能にすると、マイクロレンズの数が非常に多くなり、ひとつのマイクロレンズは数個の画素による像を作ることになる。この像の周辺の画素 (edge pixel) は完全には像の中におさまらないのでノイズが多い。空間分解能を上げると周辺の画素が多くなるので像全体のノイズが大きくなる。ただし、図3の右図の方式では、エッジ効果は大きくなりません。

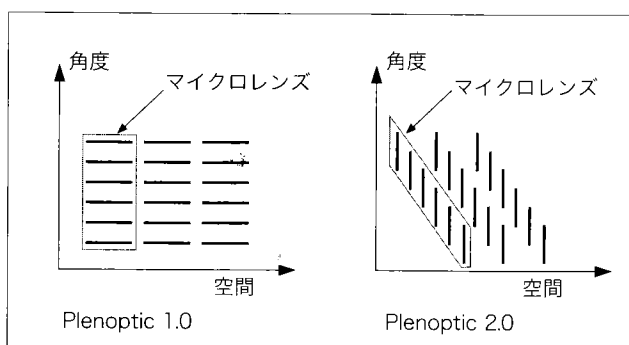


図6 主カメラレンズの像面でのサンプリング。左図は従来のPlenoptic 1.0カメラのサンプル方法で、右図はPlenoptic 2.0のサンプリングである。<http://www.tgeorgiev.net/CVPR/>にこのアイデアが説明されている。

れゆえ、空間分解能をより高められるようになり、また角度分解能と空間分解能のトレードがいつそう柔軟になった。

計算機写真では、ハードとソフトが共に進化しなければならない。それゆえ、Plenoptic 2.0では、最終像を得るための新しいアルゴリズムも開発した。われわれが解像力の改良をする以前は、plenopticカメラは角度情報を得ることはできたが、低い空間分解能であった(300×300画素)。最適化したPlenoptic 2.0では、角度分解能を犠牲にすることで、空間分解能としての画素数を10～20倍に向上させることができた(図7)。高解像力を保ったまま、異なる視点からの像を得ることができ、ピント位置を変えることができ、またその他の画像処理が行える。初期のplenopticカメラでは0.1メガピクセル程度の小さな画面しか撮ることができなかった。新しいカメラでは39メガピクセルのセンサーを用いて、2メガピクセルの最終像を得ることができ、そしてさらなる向上も可能である。このことは集積カメラ(plenopticカメラ)の実用化へのブレークスルーを示していると確信している。

### 5. このイノベーションが何を可能にするのだろうか？

この100年間、リップマンが洞察したものは多くの可能性を湛えたものと考えられてきた。しかし、試作や研究の結果は、われわれの顧客を満足させるものではなかった。しかしながら、コンピューターの能力やカメラのハードウェアの最近の進歩により、このアイデアはついに実用化されつつある。

ところで、デジタル写真の分野において、これらの革

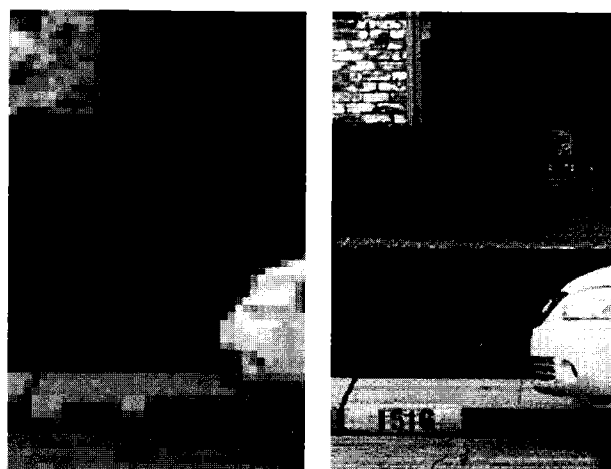


図7 Plenoptic 1.0とPlenoptic 2.0の解像力：全体画像の面積の5%を示している

新は何を本当に意味しているのであろうか？ Adobe® Photoshop®のような画像編集ソフトは、計算機写真において得られたデータのまったく新たな処理を可能にしてくれる。例えば、Adobe Labsでは、Photoshop®において多数の画像の焦点情報を元に画像の深度を深くする技術を研究している。この研究は新しいplenopticカメラに直接応用できる。しかし集積写真において、われわれは、1回の撮影でより多くの放射場の情報を得ることをさらに目指している。実際の像のピントを撮影後に仮想的に変えるだけでなく、他の画像処理が可能となる。例えば、

- ・口径と焦点深度は、画像取得後に調整できる。
  - ・ピクセルごとにピントを変えることができる。カメラやレンズだけでは不可能であるが、“焦点筆(Focus Brush)”によって、画像の任意の部分のピントを合わせたり外したりできる。
  - ・画像を撮った後でも、カメラの位置を実質的に移動させることができ、カメラの視点を調整できる。
  - ・写真の中の物体を、現在使われている色認識による不完全な方法ではなく、焦点情報に基づき自動的に選択することができる。
  - ・写真の中の適切な奥行き位置に、物体を追加することができる。
  - ・Adobe® After Effects®のようなソフトによって、これらのすべての処理がビデオでも同様に可能となる。
- このような特性があるので、写真家は画像の調整をデジタル暗室に任せることになる。カメラによって風景、

物体、あるいは瞬間をとらえるという芸術性の追及の裏側で、多くの時間を費やしていたが、彼らをそこから解放することになる。また、まったく新しい画像編集が可能となり、今までは想像できなかった画像の3次元的な性質の制御によって、撮影現場でできる以上のことが可能となる。写真家は物理的にありえない像を創ることができるのである。

Adobeはこの革新的研究を将来の写真として推し進めてはいるが、それはいつも偉大な人々の貢献の上に成り立っている。ガリレオとケプラーという偉大な先人の仕事だけでなく、LevoyやNgのような最近の仕事も参考にしている<sup>5)</sup>。1908年のリップマンの力強く、想像性豊かな仕事からこの解説を書き始めたが、彼のアイデアは実用化が始まるまでに100年かかった。次の100年が何をもたらすのであろうか、想像を巡らすばかりである。

※ Adobe, Adobe Photoshop, および Adobe After Effects は Adobe Systems Incorporated (米国アドビ システムズ社) の米国ならびにその他の国における商標または登録商標です。

#### 参考文献

- 1) G. Lippmann: "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief", *Journal of Physics* 7, 4, pp. 821 ~ 825 (1908)
- 2) T. Georgiev, K. C. Zheng, B. Curless, D. Salesin, S. Nayar and C. Intwala: "Spatio-angular Resolution Trade-off in Integral Photography", *Eurographics Symposium on Rendering* (2006)
- 3) E. H. Adelson and J. Y. A. Wang: "Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*", Vol. 14, No. 2, (1992)
- 4) M. Levoy and P. Hanrahan: *Light Field Rendering*, *ACM Trans. Graph*, pp. 31 ~ 42 (1996)
- 5) R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan: "Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera", *Stanford University Computer Science Technical Reports (CSTR)*, 2005-02 (2005)
- 6) A. Lumsdaine and T. Georgiev: *Adobe Technical Report*, Adobe Systems Incorporated (2008)