

レンズレス写真の世界

理学博士
電気通信大学
竹田辰興 名誉教授 監修



[1] 写真はどのように撮れるのかな： レンズ付きカメラとレンズレス・カメラ

カメラを使うことで、被写体の像が撮れるのは何故でしょう？

それは、被写体上の一点からの光が真っ直ぐ進んで来てカメラの中のセンサー（アナログ・カメラではフィルム）上にその光の痕跡一点を残すからです。被写体上のあらゆるところから出た光は、センサー上に、被写体上の点に対応した光の痕跡を残すので、そのすべての光の痕跡を合わせて見ると被写体像になっているわけです。

でも、被写体上の一点からの光線は、真っ直ぐに向かってくる一本だけではなくてあらゆる方向に向かって飛び出てきます。もし、これらの光線全てが、センサーの上に集まったら、センサーの上のあらゆる所に被写体上のあらゆる点から飛んできた光線が痕跡を残すので、お互いの区別がなくなってしまって像はできません。

そこで、レンズ、ピンホール、ゾンプレート等の出番です。これらの素子は皆、一点から出た光は一点にまとめて見せてくれる素子です。これらについて簡単に説明します。

ピンホールは、被写体上の一点から色々な方向に向かって飛び出した光線のごく一部だけをセンサーが感じるようにするために開けてある小さな穴です。ごく小さな穴なので、被写体上の別の点から出た光線はピンホールを通るとセンサー上の別の点に到着します。

このように、被写体上の光の出発点はセンサー上の光の痕跡にほぼ一対一で関係づけられますから、センサー上には被写体の像が出来上がります（図 1-1）。

このように、ピンホールを使えば写真が撮れますが、光線の通る穴が小さいので、痕跡を残す光の量も少なくて写真を撮るのに時間がかかります。そこで、被写体上の一点を出てセンサーの方向に向かう光線の多くを無駄なく使うためにピンホールの穴を大きく広げ

ることを考えて見ましょう。ただ単に穴を大きくしたのでは穴の中心から離れたところを通る光は、進むにつれてますます離れていってしまいぼやけた点の像しか作れません。

そこで、ガラスなどの透明な物体が持っている「屈折」という性質を使うと、ピンホールよりも大きな円形のガラスの表面の形を調整することでガラスのどこに入ってきた光も全て一点に集まるようにできます。これがレンズです。このレンズを使うことで多くの光をセンサー上の一点に集めて短い時間で写真が撮れるようになりました（図 1-2）。

レンズを使うカメラに対して、ピンホール・カメラのようにレンズを使わないカメラをレンズレス・カメラと言います。では、レンズレス・カメラにはピンホール・カメラしかないのでしょうか？実は、ゾーンプレート・カメラもレンズレス・カメラの一つなのです。

レンズはガラスなど透明物質が持っている「光を屈折する」という性質を使いますが、ゾーンプレートは透明物質の性質ではなく、光が通り抜ける穴の形で生じる「回折」という現象を使っています。「回折」は、細い隙間が狭く並んだところを通り抜けた光線は大きな角度で曲がり、逆の場合は曲がる角度が小さくなる現象です（図 1-3）。

基本的なゾーンプレートであるフレネル・ゾーンプレートは、図 1-4 の左下に描かれているように弓的のような形をしています。同心円状に並んでいる透明ゾーンと不透明ゾーンは全て面積が同じになるように作ってあります。こうすると円周の長い外側のゾーンほど幅が狭くなるので、図 1-3 のように、外側にある幅の狭い透明ゾーンを通った光は大きく曲がり内部の透明ゾーンを通り抜けた光は少ししか曲がりません。そこで、全てのゾーンを通り抜けた光線はある一点（焦点）に集まるようにできるので、ゾーンプレートはレンズレスですがレンズと同じように光を集める働きをします。

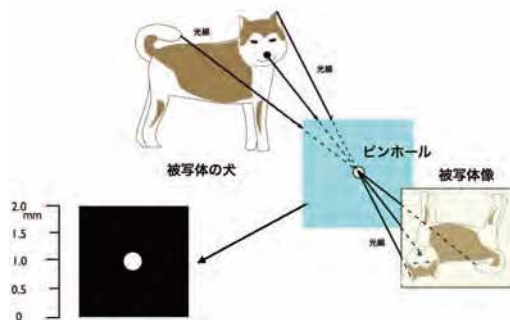


図 1-1 ピンホールによる像のでき方

左下の図は、像までの距離が 50mm ぐらいの時に、最も鮮明な像が得られるような大きさのピンホールを表しています。ただし、像までの距離は焦点距離と違うので、この大きさはそれほど厳密ではありません。

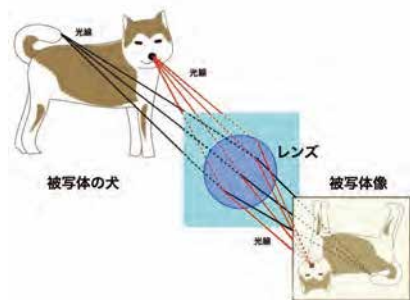


図 1-2 レンズによる像のでき方

レンズの周辺部に向かった光も曲げられて集まってくるので明るく鮮明な像が得られます。

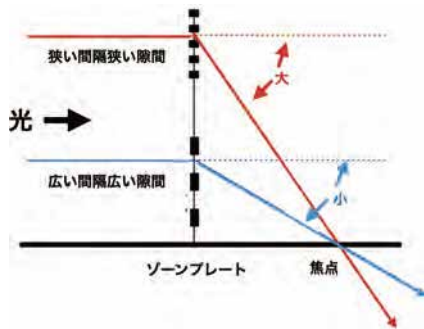


図 1-3 回折光の曲がり方

隙間が並んだ板に光が当たると、隙間が狭いところでは大きく曲がり、隙間が広いところではあまり曲がりません。これがゾーンプレートの原理です。

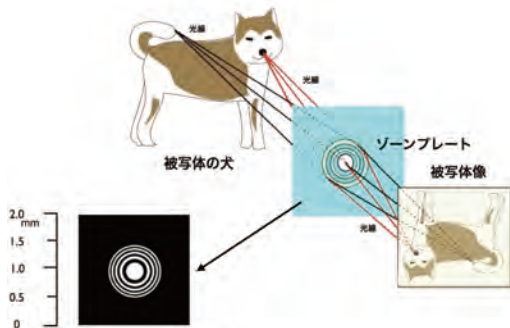


図 1-4 ゾーンプレートによる像のでき方

回折現象によって、レンズと同じように光が一点に集まってくるので明るく鮮明な像が得られます。左下の図は、焦点距離が50mmでゾーン数が9であるゾーンプレートの実際的大小を表しています。

[2] レンズレス写真の特徴

レンズレス写真の最大の特徴は、光の通るところに何も物質が無いようにできるため可視光以外のあらゆる電磁波（電波、赤外線、紫外線、X線、放射線）にも使えることです。

実際、この特徴を使って、色々な目的の研究開発がなされています。また、レンズの場合その材料に基づく色々な収差がありますが、これらが無いことも特徴の一つです。

1) ピンホール写真

ピンホールの役目は、像を作る光を選ぶだけで、光を収束させる働きはありませんから、光の束は遠くに進むにつれ広がって像の鮮明さが失われていきます（図 2-1）。

これは欠点でもありますが、撮影者が感じたままのソフトな写真が撮れるという利点であるとも考えられます。ピンホール写真が不鮮明になるのを避けるためにはピンホールの大きさを小さくすれば良いと思うかもしれませんが、センサーまでの距離によって決まるある大きさより小さなピンホールでは、像は逆に不鮮明になってしまいます。穴が小さいと入ってくる光の量が少なくて長時間露出が必要であるという課題もあります。

2) ゾーンプレート写真

同じレンズレスであっても、ゾーンプレートの場合は焦点があるのが特徴です。被写体上の一点から出発してゾーンプレートを通り抜けた光は一点に集まり、鮮明な写真を撮ることができます（図 2-2）。

ただし、ゾーンプレートを通り抜けた光の中には、ピンホールと同様に真っ直ぐ進む光（直進光）も含まれています。この直進光は「ゾーンプレート全体の大きさを持つ巨大ピンホール」からの直進光と同じ働きをするのでセンサー上には極めて不鮮明な像を作り出

します。これが、明るい被写体の周りの「ハロー（暈）」や写真全体を覆う「かすみ」の原因で、ゾーンプレート写真らしさを作り出すと共に写真を不鮮明にする原因にもなっています（図 2-3）。

このような理由のため、同じ被写体について、ピンホール写真とゾーンプレート写真を比べると、一見、ピンホール写真が鮮明であるように見えますが、細かく見るとゾーンプレート写真が鮮明であることがわかります（図 2-4,2-5）。

ゾーンプレートの特徴として、他に、次のようなことがあります。

- ① ピンホールに比べて極めて明るいので、速いシャッター速度で撮影できる。
- ② 入射光の波長分布によっては背景が目で見たとより一層暗くなったり（図 2-6）、明るい色が鮮やかで透明感あふれる色になることがよく見られます（図 2-7）。
- ③ ピンホールと違って焦点があるので、被写体までの距離やセンサーまでの距離を調整してマクロ写真が撮れる。また、焦点距離の長いゾーンプレートを使えば望遠写真を撮ることができる。ただし、本製品だけではできません。

3) 色々なゾーンプレート

ピンホールに比べてゾーンプレートは複雑な形をしていますから、形の違う変形ゾーンプレートが色々あります。本製品には、「フォトンシープ」と「直交線形ゾーンプレート」がついています。フォトンシープは、フレネル・ゾーンプレートの透明ゾーンを多数の穴で置き換えた形で、直交線形ゾーンプレートは、横方向だけあるいは縦方向だけに収束条件を満たす「1次元ゾーンプレート」2枚を重ね合わせて、多少修正を加えた形になっています。色々な特徴がありますが、例えば、直交線形ゾーンプレートを使うことで、クロスフィルターをつけて撮ったような写真を撮ることができます。

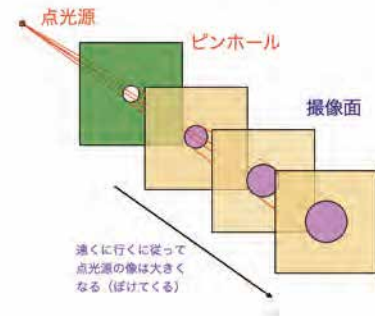


図 2-1 ピンホール写真がソフトな理由

ピンホールは光を収束する働きをしませんから、被写体上の一点から出た光は、ピンホールを通り抜けてから遠くに行くほど広がって、「点」だった光源の像は大きな円になっていきます。

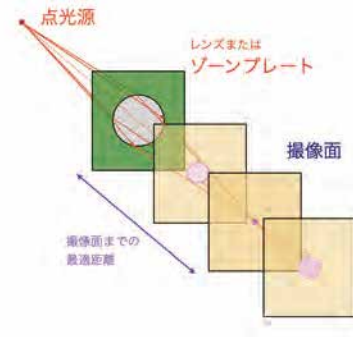


図 2-2 ゾーンプレートで焦点に集まる光

焦点があると、点からの光はセンサー上の点に集まりますが、センサーを前に動かしても後ろに動かしても点の像は大きくなります。

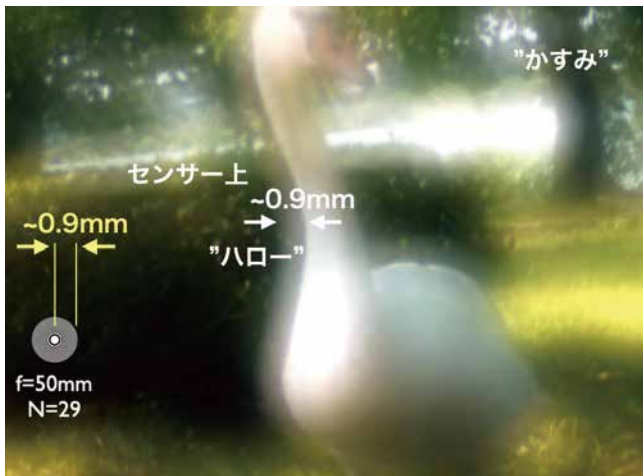


図 2-3 ゾーンプレート写真のハローとかすみ

センサー上の明るい被写体像の所には、直進光による不鮮明な像(ハロー)の中にゾーンプレート本来の鮮明な像が見られます。ゾーンプレートからセンサーまでの距離は被写体までの距離に比べて非常に短いので「ハロー」の幅は、センサー上でゾーンプレートの半径とほぼ同じになります。明るい被写体がないところでは、直進光は「かすみ」になって全体的にソフトな感じの写真を作り出します。



図 2-4 ゾーンプレート写真とピンホール写真の比較 (1)

左：ゾーンプレート写真、右：ピンホール写真
ピンホール写真の方がシャープな印象を与えます。



図 2-5 ゾーンプレート写真とピンホール写真の比較 (2)

図 2-4 の写真を拡大しただけの写真ですが、ゾーンプレート写真の方がシャープであることがわかります (例えば、ビルの窓、桜の花)。



図 2-6 ゾーンプレート写真における明暗差
ゾーンプレート写真では、光の状況によって明るいところと暗いところの明るさが極端に変わって、暗い背景に被写体が鮮やかに現れる写真が撮れます。



図 2-7 透明感のある鮮やかさ
ゾーンプレート写真では、光の状況次第で目で見ると以上に鮮やかで透明感のある写真が撮れます。

[3] レンズレス写真の歴史

1) ピンホール 写真

写真の歴史とは、「像を描き出すこと」と「像を記録すること」の歴史です。

像を記録する技術は 19 世紀前半になってやっと実現しますが、「像を描き出すこと」の歴史はピンホールの歴史と考えられますから遥か昔まで遡ります。

記録に残るピンホール現象は、紀元前 5 世紀の中国の墨子、紀元前 4 世紀のギリシャのアリストテレスの書物にまで遡れます。

その後、10 世紀にはアラビアのアルハゼンによってピンホール現象は詳しく研究されて、ヨーロッパのルネッサンス期には、この研究に基づいて、遠近法を取り入れた絵画を描く道具として、あるいは天体観測の道具として、カメラ・オブスキュラ（暗い部屋）という名前で用いられました。

ただし、実用的な用途には、既にピンホール の代わりにレンズが多く使われていたようです。東洋では中国で墨子以来、ピンホール現象についてのいくつかの記録が残っています。

日本では、ピンホール現象の知識は江戸時代に中国から渡ってきました。有名なのは、葛飾北斎の「富岳百景」にある「さい穴（節穴）の富士」という版画（図 3-1）でピンホール現象が現れる様子がありありと描かれています。

また、滝沢馬琴による「陰兼陽（かげとひなたの）珍紋圖彙」にも節穴からの光が作るピンホール現象の版画が載せられていて、その様子が文章でも詳しく書かれています。

2) ゾーンプレート写真

ゾーンプレート写真の原理である回折現象は、自然界でよく見られる「光環」、「彩雲」とか「ブロッケン現象」の原因です。

しかし、同心円状の透明ゾーンと不透明ゾーンの組み合わせからできているゾーンプレート自体は、単なる丸い穴であるピンホールなどと比べるとはるかに複雑な形の人工的物体ですから、ピンホールによる画像のようにゾーンプレートによる画像が自然に見られることはまず考えられません。

光学素子としてのゾーンプレートはソレ (J.L. Sorét) が 1875 年に学術雑誌に発表したのが最初の論文です。ただし、学術雑誌への発表はしていませんが、著名な物理学者でノーベル賞受賞者のレイリー卿 (3rd Baron Rayleigh) がソレよりも早くゾーンプレートを発明していた記録があるので、ゾーンプレート発明者としてはこの二人の名前がよく出てきます。

ゾーンプレートが発明された当時これについて研究して、撮影したゾーンプレート写真を残しているのは基礎的光学や写真光学の分野で多くを残している物理学者のウッド (R.W. Wood) です。

ウッドによるゾーンプレート写真撮影後、半世紀以上はゾーンプレート写真の話題はあまり出てこなかったようですが、20世紀後半になって写真芸術の一つとして注目され始めました。

フィルム・カメラの時代にはゾーンプレート写真のソフトさだけが強調されていて、これをコントロールすることが簡単にはできず大きな広がりには期待できませんでした。しかし、デジタル時代となりこれが容易になったので、今後の発展が期待できます。



図 3-1 さい穴 (節穴) の富士
葛飾北斎の版画集「富嶽百景」にあるピンホール現象の版画です。

[4] レンズレス・カメラの今後

ピンホール写真は写真の原点で、レンズレス写真は芸術的な美しい写真を撮る上での能力を秘めていることもわかりました。でも、新しいカメラ技術の発展のためには、レンズレス・カメラの出番はないのでしょうか？そんなことはありません。レンズレス・カメラはまだ色々な能力を秘めているのです。ここでは、その中の一つだけお話ししましょう。

複数のピンホール を使って写真を撮ることを考えてみましょう。図 4-1 は、四つのピンホール がついたカメラで恐竜の写真を撮っている様子です。センサーにはわずかに違う4つの像が重なって写るので非常に不鮮明な恐竜の写真が得られます。このままでは何ともしようがありませんが、この四つの恐竜像を分離することができれば鮮明な恐竜像が得られます。しかも、四つの像は少しずつ違う角度から見た恐竜像ですから、ここには立体写真の元となる3次元データが含まれています。四つの穴だけでなく、光の通るところをもっと増やして、数学的に像の逆変換を行えば、3次元空間の被写体情報をもっと精度良く簡単に記録できるでしょう。

そんなことができるのだろうかと思われるかもしれませんが、特別な配置の複数の透明部分のある素子（符号化開口：coded aperture）を使えば、計算によってこのような操作を行うことが可能になります。中でも、ゾーンプレートと相似形の符号化開口についてはレンズを使わない高性能カメラとして製品化されることが予告されています。

一方、ゾーンプレートにも様々なものがあり、その例を図 4-2 に示します。

このように、レンズレス・カメラは過去のものではなく、常に写真技術の未来を開いてゆく先端的装置と考えられ、まだまだ活躍する場面が待っていると思われます。

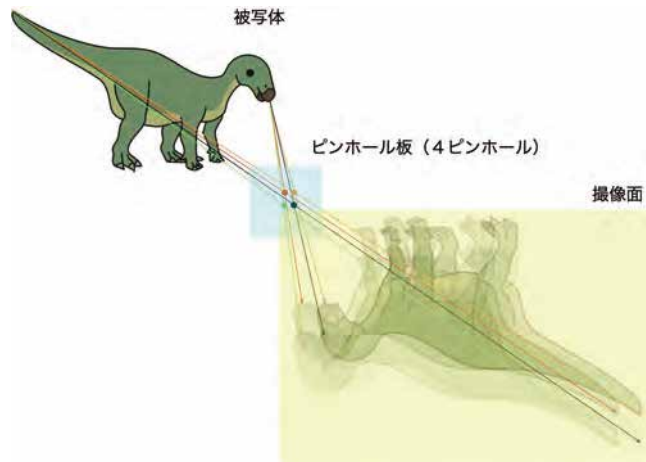


図 4-1 複数のピンホールがあるときの像
四つのピンホールからなるピンホール・カメラで恐竜を撮るときの様子です。

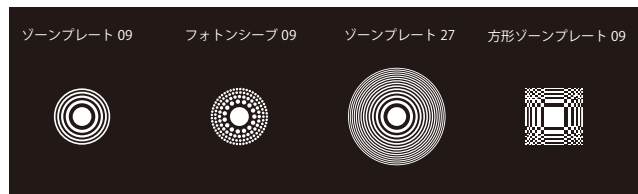


図 4-2 ゾーンプレートの例

ゾーンプレートには、ゾーン数や、形状の異なるものが多数ありますが、何れも回折現象により結像しています。ゾーン数や形状の違いによって、特徴のある画像が撮影できます。4種類のゾーンプレートの例を挙げます。

日本針穴写真協会 (JPPS)

Japan Pinhole Photographic Society

「本当に針で開けた穴だけで写真が写せるのだろうか？」という素朴な疑問を持ち、興味を示す方のための優しいガイドから、その原理、歴史、理論、技術などの発展過程の探求を基に、針穴写真での「芸術表現」を希求する上級者までを対象に、カメラ作りから、撮影方法など、諸々のノウハウを、各種イベントやホームページなどを通じて、お互いに知恵を出し、情報を交換し合いながら、針穴写真に興味を持つすべての人々に役立つために機能する協会でありたいと考えます。本会の目的は、針穴写真の魅力を紹介し、ひとりでも多くの方に、針穴写真の素晴らしさを体験していただくことです。針穴写真の経験は問いません。写真の知識や技術も問いません。針穴写真をご存知の方も、これからやってみみたい方もお気軽にご参加ください。

【入会手続き】

日本針穴写真協会のホームページ(下記 URL)より、「入会・退会」をクリックし、「入会申込み」をクリックして、詳細をご確認ください。

<http://jpps.jp/web/index.html>



[1] How Do Pictures Get Taken: Lensed and Lensless Cameras

Why is it that a camera can capture an image of a subject? This is because light from a point on the subject comes straight at you and leaves a single trace of light on the sensor of the camera (or a film in an analog camera). Light that comes from anywhere on the subject leaves a trace of light on the sensor that corresponds to points on the subject, and when all of these traces of light are combined together, they form the image of the subject.

But all the rays of light from a point on the subject are not just coming straight at you, they are coming out in all directions. If all of these rays were to come together on the sensor, they would leave traces everywhere on the sensor, from all points on the subject, and there would be no distinction between them, so no image would be created.

This is why lenses, pinholes, zone plates, etc. come into play. All of these elements are capable of showing light emitted from a single point as a single point. Here is a brief explanation of them.

A pinhole is a small hole created to allow the sensor to sense only a small portion of the light rays emitted from a point on the subject in various directions. Since it is a very small hole, a ray of light from another point on the subject will pass through the pinhole and arrive at another point on the sensor. In this way, the starting point of the light on the subject is almost one-to-one related to the light trace on the sensor, resulting in an image of the subject on the sensor (Fig. 1-1).

In this way, a pinhole can be used to take a picture, but since the hole through which the light beam passes is very small, the amount of light that forms an image is small and it takes a long time to take a picture. So, let's consider to widen the hole of the pinhole so that more of the light rays that come from one point on the subject and go toward the sensor can be used without much waste. If we simply make the hole bigger, the light that passes away from the center of the hole will move further and further away as it travels, creating only a blurry point image.

By using the refractive property of transparent objects such as glass, it is

possible to make all light entering anywhere on the glass will be focused on a single point by adjusting the shape of the surface of a glass circle, which is larger than a pinhole. This is a lens. By using this lens, we can concentrate a lot of light into a single point on the sensor and take a picture in a short time (Fig. 1-2).

In contrast to a camera that uses a lens, a camera that does not use a lens, such as a pinhole camera, is called a lensless camera. So, is a pinhole camera the only lensless camera? In fact, a zone plate camera is also one of the lensless cameras. Lenses use the property of transparent materials such as glass to refract light, while zone plates use the phenomenon of diffraction, which is caused by the shape of the holes through which light passes, rather than the property of transparent materials. Diffraction is a phenomenon in which a ray of light passing through a narrow gap bends at a large angle, while the opposite is true at a smaller angle (Fig. 1-3).

The basic zone plate, the Fresnel zone plate, is shaped like a bow target, as depicted in the lower left of Fig. 1-4. In this pattern all the concentric transparent and opaque zones are made to have the same area. In this way, as the outer zone with a longer circumference becomes narrower, so as shown in Fig. 1-3, light passing through the outer narrow transparent zone bends largely and light passing through the inner transparent zone bends only slightly. Therefore, the light rays passing through all the zones can be made to converge at one point (focal point), so the zone plate is lensless but works like a lens to collect light.

[2] Features of Lensless Photography

The main feature of the lensless photography is that it can be used for all kinds of electromagnetic waves including visible light (radio waves, infrared rays, ultraviolet rays, X-rays, and gamma rays) because it can be made so that there is no material where the light passes through. In fact, this feature is being used in research and development for a variety of purposes. In addition, lenses have various aberrations derived from the materials they are made of, and the absence of these aberrations is one of their features.

1) Pinhole Photography

The role of a pinhole is only to select the light to create an image, not to converge the light, so the farther the light travels, the more it spreads out and the less clear the image becomes (Fig. 2-1). This can be a disadvantage, but it can also be an advantage, as it allows the photographer to take softer pictures that are more true to his or her feeling. However, if the pinhole is smaller than a certain size, which is determined by the distance to the sensor, the image will be blurred. A smaller hole also means less light coming in, which means a longer exposure time is required.

2) Zone Plate Photography

Although it is the same lensless system, the zone plate is characterized by existence of the focusing ability. Starting from a point on the subject, the light passing through the zone plate is focused on a single point, resulting in a clear picture (Fig. 2-2).

However, the light that has passed through the zone plate includes light that travels straight like a pinhole. This straight light works the same as the straight light from a "giant pinhole with the size of the entire zone plate", so it creates an extremely unclear image on the sensor. This is the cause of the "halo" around a bright subject and the "haze" that covers the entire photo, creating the appearance of a zone plate photograph and also making the photo blurry (Fig. 2-3).

For this reason, when comparing pinhole and zone plate images of the same subject, the pinhole image appears to be clearer at first glance, but a closer look reveals that the zone plate image is clearer (Figs. 2-4 and 2-5).

Other characteristics of the zone plate are as follows.

- ① It is extremely bright compared to pinholes, so you can shoot at a high shutter speed.
- ② Depending on the wavelength distribution of the incident light, the background may be darker than it is visible (Fig. 2-6), and bright colors often become vivid and transparent (Fig. 2-7).

③ Unlike a pinhole, a zone plate has a focal point, so you can take macro photos by adjusting the distance to the subject and the distance to the sensor. Also, if you use a zone plate with a long focal length, you can take telephoto photos. However, this is not possible with this turret alone.

3) Various zone plates

Compared to a pinhole, a zone plate has a more complex shape. There are various types of zone plates with different shapes. The turret has a "photon sieve" and an "square zone plate". A photon sieve has many small transparent holes instead of transparent zones of the Fresnel zone plate, and a square zone plate is made by superimposing orthogonally two "one-dimensional zone plates" that satisfy the convergence condition only in the horizontal and vertical directions, with some modification. It has many characteristics, but for example, by using a square zone plate, you can take a picture as if you had taken it by a camera with a cross filter.

[3] The History of Lensless Photography

1) Pinhole Photography

The history of photography is the history of "depicting an image" and "recording an image". Although the technology to record images was not realized until the first half of the 19th century, the history of "image creation" can be thought of as the history of pinholes, and the history of "creating images" goes back a long time ago.

The oldest recorded pinhole phenomenon is the Chinese Mozi, in the 5th century BC., and in the West it dates back to the Greek Aristotle's books of the 4th century BC.

Later, in the 10th century, the pinhole phenomenon was studied in detail by Alhazen of Arabia, and based on his research, during the European Renaissance, it was used as a tool for perspective painting and astronomical observation under the name of camera obscura (dark room). However, for practical use, lenses were already widely used instead of pinholes in these days.

In the Orient, there are several records of the pinhole phenomenon in China since Mozi.

In Japan, knowledge of the pinhole phenomenon came from China during the Edo period. It is famous that the pinhole phenomenon appears in a print (Fig. 3-1) called "Saiana no Fuji (Mt.Fuji depicted by knothole)" in "Fugaku Hyakkei (One Hundred Views of Mt. Fuji) by Hokusai Katsushika. Also, in the book "Kage to Hinata no Chinmon-Zui (Yin and Yang Crest Encyclopedia) " by Bakin Takizawa, there is a print of a pinhole phenomenon created by light coming from a knothole, which is also described in detail in the text.

2) Zone Plate Photography

Diffraction phenomenon, which is the principle of zone plate photography, is the cause of "halo", "light ring" and "Brocken specter" that are often seen in nature. However, the zone plate itself, which is made up of concentric transparent and opaque zones, is an artificial object with a much more complex shape than a pinhole which is just a round hole, so it is unlikely that an image of a zone plate would look as natural as an image of a pinhole.

The first paper on the zone plate as an optical element was published by J.L.Sorét in a scientific journal in 1875. However, there is a record that the famous physicist and Nobel laureate Lord Rayleigh (3rd Baron Rayleigh) had invented the zone plate before Sorét, although he did not publish in a scientific journal, so these two names are often mentioned as the inventors of the zone plate.

At the time the zone plate was invented, it was studied and photographed by R.W. Wood, a physicist who has done much work in the fields of basic optics and photographic optics. After Wood's zone plate photography, the topic of zone plate photography did not come up much for more than half a century, but in the latter half of the 20th century, it began to attract attention as a form of photographic art.

In the days of film cameras, only the softness of zone plate photography was emphasized, and it was not easy to control it, so it was not expected to expand greatly. In the digital age, however, it has become easier to do so,

and we can expect further development in this area.

[4] The Future of Lensless Cameras

We have learned that pinhole photography is the origin of photography, and that lensless photography has the potential to create beautiful, artistic photographs. But does this mean that lensless cameras have no place in the development of new camera technology? No, not at all. Lensless cameras still have a lot of potential. Let's talk about just one of them here as an example.

Consider taking a picture with multiple pinholes. Figure 4-1 shows a picture of a dinosaur taken with a camera with four pinholes. The four slightly different images are superimposed on the sensor, resulting in a very blurry picture of the dinosaur. There is nothing we can do as it is, but if we can separate these four dinosaur images, we can get a clear dinosaur image. Moreover, since the four images are dinosaur images viewed from slightly different angles, they contain the three-dimensional data that is the basis of the three-dimensional photograph. If we could increase the number of places where light passes through and mathematically reverse-transform the image, we could easily record information about the subject in three-dimensional space with more accuracy. You may wonder how this is possible, but with the use of specially arranged elements with multiple transparent parts (coded apertures), it is possible to perform such operations computationally. In particular, the coded aperture, which is similar to a zone plate, is expected to be commercialized as a high-performance camera without using a lens.

On the other hand, there are various types of zone plates, examples of which are shown in Fig. 4-2.

In this way, lensless cameras are not a thing of the past, but are considered to be cutting-edge devices that will always open up the future of photography technology, and it seems that there are still many situations in which they will play an active role.

- Figure Captions -

Figure 1-1: How an image is created by a pinhole

The lower left figure shows the size of the pinhole that produces the clearest image when the distance to the image is about 50mm. However, since the distance to the image is different from the focal length, this size is not so exact.

Figure 1-2: How an image is created by a lens

The light toward the periphery of the lens is also bent and gathered, resulting in a bright and clear image.

Figure 1-3: How the diffracted light bends

When light shines on a plate lined with gaps, it bends more in the narrower gaps and less in the wider ones. This is the principle of the zone plate.

Figure 1-4: How an image is created by a zone plate

Due to the diffraction phenomenon, light is gathered at one point like a lens, so a bright and clear image can be obtained. The lower left figure shows the actual size of a zone plate with a focal length of 50 mm and a number of zones of 9.

Figure 2-1: Why pinhole photos are so soft

Pinholes do not converge light, so light emitted from a single point on the subject spreads out as it travels farther, turning the image of the "point" light source into a large circle.

Figure 2-2: Light gathered at a focus by a zone plate

As there is a focus in the case of a zone plate, the light from a point is focused on a point on the sensor, but the image of the point becomes larger when the sensor is moved forward or backward.

Figure 2-3: Halo and haze in zone plate photo

In the place of the bright subject image on the sensor, the clear image due to the converged light by the zone plate can be seen in the unclear image (halo) due to the straight light. The distance from the zone plate to the sensor is very short compared to the distance to the subject, so the width of the "halo" is about the same as the radius of the zone plate itself on the sensor. Where there is no bright subject, effect of the straight light becomes "haze" and

creates a soft-looking photo overall.

Figure 2-4: Comparison of zone plate photo and pinhole photo (1)

Left: Zone plate photo, Right: Pinhole photo; The pinhole photo gives a sharper impression.

Figure 2-5: Comparison of zone plate photo and pinhole photo (2)

This is just an enlargement of the photo in Fig. 2-4, but you can see that the zone plate photo is sharper (e.g., building windows, cherry blossoms).

Figure 2-6: Difference in brightness in zone plate photographs

With zone plate photography, the brightness of bright and dark areas changes drastically depending on the light conditions, and you can take a picture in which the subject appears vividly on a dark background.

Figure 2-7: Vividness with transparency.

With zone plate photography, depending on the light conditions, you can take pictures that are more vivid and transparent than you can see with your eyes.

Figure 3-1: Saiana no Fuji (Mt.Fuji depicted by light through knothole)

This is a print of the pinhole phenomenon in Hokusai Katsushika's print collection "Fugaku Hyakkei (One Hundred Views of Mt.Fuji)".

Figure 4-1: Image with multiple pinholes

This is a shot of a dinosaur with a pinhole camera consisting of four pinholes.

Figure 4-2: Examples of various kind of zone plate patterns

There are many zone plates with different numbers of zones and shapes, but all of them form images by diffraction phenomenon. Depending on the number of zones and the shape of the zone plate, it is possible to capture images with different characteristics. Examples of the four types of zone plates are shown here

=====

- JPPS -

Japan Pinhole Photographic Society (JPPS)

Japan Pinhole Photographic Society is an association both for beginners who have a simple question and interest, "Is it really possible to take a picture with only a hole made by a needle?" as well as for advanced photographers who seek "artistic expression" through the exploration of the principles, history, theories, techniques, and other developmental processes of the pinhole photography. We would like to be a useful association to all people who are interested in the pinhole photography, by sharing our wisdom and exchanging information with each other through various events and our website.

The purpose of this association is to introduce the appeal of pinhole photography and to have as many people as possible to experience the beauty of pinhole photography. No previous experience with pinhole photography is necessary. There is no need to have any knowledge or skills in photography. Whether you are familiar with pinhole photography or would like to try it out, please feel free to join us.

[Enrollment procedure]

From the website of the Japan Pinhole Photographic Association (URL below), click

"Join / Unsubscribe" and then "Apply for Membership" to check the details.

<http://jpps.jp/web/index.html>



[1] 为什么能拍到照片？

带镜头的相机与无镜头的相机

为什么使用相机可以拍摄到被摄体的像？

那是因为来自被摄体某一点的光直射进相机内部感光传感器上（非数字相机为感光胶片）而留下光的该点痕迹所致。被摄体上的所有点所发出的光，在感光传感器上都留下相应的点，这样所有光的痕迹的集合就是被摄体的像。

但是，从被摄体上的一个点发出的光并非是一条直线，它射向所有方向。如果所有这些光线都聚集在感光传感器上，那么从被摄体上射来的每一点的光线在感光传感器上都将留下无差别的光痕迹，而无法成像。

这就要引出透镜、针孔、波带光元件等实物概念了。这些光学元件都是能将发出的一点光，聚集成一点像的元件。概要解释如下。

所谓针孔，就是被摄体上的一个点光向各个方向射出光线时，让感光传感器只能感受到一小部分光束的小孔。由于孔极小，所以从被摄体上一个点射出的光，可以通过针孔到达感光传感器，形成一点。

这样，被摄体上的一个发光点与感光传感器上的该光点残留痕迹基本上形成了一对一的对应关系，因此在感光传感器上形成了被摄体的像（图 1-1）。

这样一来，虽然我们可以使用针孔来摄影，但由于通过孔的光线少，所以留下痕迹的光量也少，拍照时需要较长的感光时间。为了不损失光线，通常考虑加大针孔孔径，以使大部分光线不会浪费。但如果孔径做得太大，那么越远离孔中心穿过的光线会距孔中心越来越远，就只能形成模糊点的像了。

因此，利用玻璃等透明体的「折射」特性，调整比针孔孔径大得多的圆形玻璃表面的形状，让所有进入玻璃的光都聚集到一个点上。这就是镜头的原理。用这个镜头，让充足的光线集合于感光传感器的一点上，就可以在短时间内进行拍摄（图 1-2）。

图 1-1 针孔成像原理

如图所示，至像距离 50mm 时，将形成最为鲜明的像的针孔大小，但像距并非焦距，大小也并非那么严密。

图 1-2 镜头成像原理

镜头周边的光线在通过镜头后聚合，得到明亮而鲜明的像。

相对于使用镜头的相机，如针孔相机等不使用镜头的相机就被称为无镜头相机。那么无镜头相机中是否只有针孔相机呢？实际上波带光学元件相机也是无镜头相机的一种。

镜头是使用玻璃等透明物质所具有的「光的折射」性质。而波带光学元件不是透明材料，而是利用「光的衍射」的现象，这种现象以光通过小孔的形式出现。「衍射」是指通过狭窄缝隙的光线在角度较大时弯曲较大，与其相反在角度较小时，弯曲较小的一种光学现象（特性）（图 1-3）。

图 1-3 衍射光的弯曲

当光线射向按一定缝隙间隔排列的波带光学元件时，缝隙窄的地方出现较大的弯曲，而缝隙较宽的地方没有那么弯曲。这就是波带的光学原理。

基本波带即菲涅耳波带，呈弓形，如图 1-4 左下角所示。它由同心圆排列的透明带状区域和不透明带状区域，相同的面积而组成。这样一来，周长越长的外侧区域带的宽度越窄，如图 1-3 所示，外侧的透明带越窄，穿过透明区域的光线就弯曲较大，穿过内部透明区域的光线只有轻微弯曲。这样，通过所有区域的光线可以聚焦在某个点上（即焦点），所以波带光学元件是无透镜的，但与透镜相同都有光线集聚的功能。

图 1-4 波带的成像原理

与透镜类同，由光的衍射现象而形成的光线一点聚集，能得到明亮而鲜明的像。图中所示的是焦点距离为 50mm，带数为 9 的圆波带光学元件的实际大小。

[2] 无镜头摄影的特点

无镜头摄影最大的特点是除了可见光以外，还可适用于所有电磁波（无线电波、红外线、紫外线、X 射线、辐射），因为它们都可以通过任何无物质的介质。实际上利用该特点，我们可以进行各种目的的研究和开发。而且在使用镜头摄影时会产生各种像差，而无镜头摄影则不会，这也是它的一个特点。

1) 针孔摄影

针孔的作用只是选择成像的光，不具有聚集光的功能，所以光束通过针孔后，越往前扩散，其像的清晰度就损失越多（图 2-1）。

这虽是一个缺点，但它也可以被认为是一个优点，因为您可以拍到与摄影者的感觉相近的较为柔和的照片。为了避免针孔照片模糊，也许可以减小针孔的大小，但是小于特定尺寸的针孔（该特定尺寸由与感光传感器的距离而决定），将反会使像更模糊。如果针孔太小，则入射光量小，曝光时间需较长，也是一个所面临的课题。

2) 波带摄影

即便同样是无透镜摄影，波带摄影是有焦点的，这也是它的一个特点。从被摄体的一点出发，通过波带光学元件后，光会聚焦在一点上，这样就能得到清晰的照片（图 2-2）。

但是，通过波带光学元件的光包括类似于针孔的直线传播的光（即直线光）。这种直线光从「一个有整个波带光学元件大小的巨大的针孔」直射而出，由于它的工作原理与针孔直线光相同，因此会在感光传感器上产生极其模糊的像。这就是产生围绕光亮被摄体的所谓「光晕」和覆盖被摄体的所谓「雾霾」的原因，也是产生波带摄影的特点表象，即照片不清晰的原因（图 2-3）。

正因如此，当比较同一被摄体的针孔照片和波带照片时，乍一看似乎针孔照片清晰，但如果仔细观察，就会发现其实波带照片更清晰。（图 2-4，2-5）。

波带摄影的其他特性如下。

- ① 与针孔照片相比，它非常亮，可以以较快的快门速度进行拍摄。
- ② 根据入射光的波长分布，我们常常会观察到背景比肉眼直接观察要更暗（图 2-6），观察到光亮的颜色会变得透明而清晰（图 2-7）。
- ③ 与针孔摄影不同，波带摄影有焦点，因此您可以通过调整与被摄体的距离和与感光传感器的距离来拍摄微距照片。而且，您还可以通过使用长焦的波带光学元件来拍摄长焦（望远）照片。当然光靠本产品还做不到。

图 2-1 针孔摄影的照片柔和的理由

由于针孔摄影没有光线聚集的作用，所以从被摄体上的一点发出的

光穿过针孔后随着距离的增加而扩散，作为「点」光源的像变成了一个光圈。

图 2-2 通过波带光学元件的聚焦光

由于有焦点，在对焦时来自点光源的光会聚焦在感光传感器的像点上，但无论感光传感器向前或是向后移动，该像点也都会被放大。

图 2-3 波带摄影照片中的光晕和雾霾

在呈现在感光传感器上的光亮被摄体的像上，可以看到由于直射光而产生不清晰的像（光晕）和在其中的波带成像的清晰像。由于从波带元件到感光传感器的距离与到被摄体的距离相比非常短，因此「光晕」「光晕」的幅宽与感光传感器上波带成像的半径大致相同。在没有光亮的被摄体的地方，直射光就会变成「雾霾」，整体营造出柔和的照片效果。

图 2-4 波带片照片与针孔照片对比（1）

左：波带摄影照片，右：针孔摄影照片
针孔摄影照片给人的印象更清晰。

图 2-5 波带摄影照片与针孔摄影照片的对比（2）

这只是图 2-4 的局部放大照片，可以看到波带摄影照片更清晰些（例如，建筑物的窗户、樱花）。

图 2-6 波带摄影照片的明暗差异

波带摄影时，随着光线的明暗亮度的剧烈变化，您可以拍摄到在暗背景上的被摄体能生动呈现的照片。

图 2-7 有透明感的鲜艳度

波带摄影时，随着光线条件的改变，您可以拍出比肉眼看到的更加鲜艳而又有透明感的照片。

[3] 无镜头摄影的历史

1) 针孔摄影

所谓摄影的历史就是「将像描绘出来」和「将像记录下来」的历史。

记录像的技术是在 19 世纪上半叶才实现的，但「将像描绘出来」的历史被认为是针孔成像的历史，因此可以追溯到更遥远的过去。

针孔现象的记载可以追溯到公元前 5 世纪中国的墨子和公元前 4 世纪希腊的亚里士多德的著作。

在那之后的 10 世纪，阿拉伯的 Alhazen 对针孔现象进行了详细的研究，而在欧洲文艺复兴时期，在此研究的基础上，作为结合透视法的绘画工具，或作为天文观测的工具，以 Camera Obscura（暗室）命名使用。

但是出于实际需要，在许多场合似乎已经使用透镜代替针孔成像。在东方，中国墨子之后，还有不少针孔现象的记载。

在日本，江户时代从中国传来了有关针孔现象的知识。最著名的针孔现象出现在葛饰北斋的《富岳百景》中，名为「节穴之富士」的版画（图 3-1）。它描写了针孔现象被发现，“看到了看到了”的情景。

此外，在泷泽马琴的《阴与阳（阴面与阳面）的稀有纹章》中，还附有一张由节孔发出的光而形成的针孔现象的印刷品，并在文中详细描述了这种情况。

2) 波带摄影照片

衍射现象是波带摄影的原理，是自然界中常见的「电晕」、「虹彩」和「布罗肯现象」的成因。

然而，圆波带光学元件本身是由同心透明带和不透明带组合而成的，它是一个人造物，形状比针孔复杂得多，针孔只是一个圆孔。波带效果看上去比针孔效果更自然些。

J.L. Sorét（索莱）于 1875 年在学术期刊上发表了关于波带作为光学元件的第一篇论文。不过，虽然没有在学术期刊上发表过，但有记载指出，著名物理学家、诺贝尔奖获得者瑞利爵士（3rd Baron Rayleigh）比索莱更早发明了波带光学元件，所以作为波带光学元件发明者，这两个人的名字经常被提到。

R.W. Wood 作为基础光学及照相光学领域的物理学家，在波带光学元件被发明时，就研究它并留下了拍摄波带效果的照片。

在伍德的波带摄影之后的半个多世纪里，波带摄影的话题似乎并没有受到过多的关注，但在 20 世纪下半叶以后，它才作为摄影艺术之一开始受到关注。

在胶卷相机时代，只强调了波带摄影的柔和性，由于它不好控制，也就不能指望有大范围的普及。但在数字时代这些控制变得更容易了，所以我们可以期待未来的发展。

图 3-1 节穴富士

葛饰北斋在他的版画集《富岳百景》中收藏了有针孔现象的版画。

[4] 无镜头相机的未来

一般认为针孔摄影是摄影的起源，无镜头摄影蕴藏着拍摄具有艺术性的精美照片的潜力。那么随着新相机技术的发展，无镜头相机机会失去其魅力吗？答案是否定的。无镜头相机仍蕴藏着各种不为人所知的功能。在此，我们只谈其中一例。

假设用多个针孔的相机拍摄一张针孔照片。图 4-1 就显示了一个带有四个针孔的相机，拍摄恐龙照片的情景。感光传感器上叠加了四张略有不同的像，所获得的像是一张非常模糊的恐龙照片。不进行特殊加工的话，无论如何我们是得不到想要的清晰照片的。但如果我们能将这四张恐龙像分解开，就能得到清晰的恐龙像。这四张像是从略微不同的角度拍摄到的恐龙像，它包含有立体照片所需的基本 3D 数据。如果不仅是四个孔，而是增加更多光通过的地方，那么在数学上进行像的逆转换，这样就能更准确、更轻松地记录到三维空间的数据。

您可能很想实现这种数据的记录？事实表明利用多个透明部分，并按特殊排列来实现光学元件（编码孔径：coded aperture）的数据采集，是可以通过计算操作来实现的。其中，类似于波带光学元件的编码光圈作为不使用镜头的高性能相机，将被商业化。

此外，波带效果的无镜头摄影，还有如图 4-2 所示的多种应用。

如此可见，无镜头相机并非过时的，而被认为始终是开拓摄影技术未来的尖端设备，仍有众多场合等待着它发挥积极的作用。

图 4-1 多个针孔的成像

用四个针孔组成的针孔相机拍摄的恐龙成像状况

圆波带光学元件 09 光子束光学元件 09 圆波带光学元件 27 方波带光学元件 09

图 4-2 波带光学元件的实例

波带光学元件有波带的带数、形状的差异等，但无论哪一种都是通过衍射效果而成像。波带数、形状的不同能够拍摄到不同特点的照片。本图列举 4 种不同的波带光学元件的例子。

日本针孔摄影协会 (JPPS) Japan Pinhole Photographic Society

「真的可以只用针戳一个洞来拍照吗？」，这是一个单纯而有趣的疑问。为了提问的朋友，我们将深入浅出地介绍其原理、历史、理论、技术等的发展过程。对此，对于在针孔摄影中寻求「艺术表现力」的资深用户，将通过各种活动和网站传递相机制作、拍摄方法等各种知识。对于所有对针孔摄影感兴趣的人而言，本协会将促进智慧分享和信息交流。本协会的目的就是介绍针孔摄影的魅力，让尽可能多的人参与进来，体验针孔摄影的精彩之处。它不需要针孔摄影的经验；不需要摄影知识或专业技能。无论您是想了解针孔摄影还是想尝试一下，请随时加入我们。

【入会手续】

从日本针孔摄影协会的网站（以下网址），点击「加入 / 退订」，然后点击「会员申请」以查看详细信息。

<http://jpps.jp/web/index.html>



