

## 用相干光成象

E. N. Leith J. Upathieks

发展了一种三维成象技术,作为盖伯(D. Gabor)波前再现方法的推广。所产生的象本质上就是原始景物的再现,并且显示出原物的很多视觉特性: 远近距离物体之间的视差,观察景物不同部分的物体时,眼睛需要重新调焦,最后,其三维效应与用普通立体照相术获得的相同。

## 引言

本文描述盖伯在 1940 年后期发明的一种有趣的照相方法。他称这方法为“波前再现”,一个充分说明这种方法的名字。从那时起,该方法在英国由盖伯等人<sup>[1~3]</sup>,在美国由柯克帕特里克、埃耳-萨姆等人<sup>[4,5]</sup>进一步发展了。本文作者作了一些修正,使得盖伯方法的某些潜力得以实现。特别值得指出的是,这方法已用来取得非常逼真的三维成象。

成象的三维特性是这种方法最重要的方面之一。有几种标准的立体照相技术,但都有损伤结果写实性的缺点。本文所述的成象真正是三维的,并且不用玻璃偏振片之类的手段就可获得,所成的象具有原始实物的全部视觉特性,包括当观察者移动他的头时透视的变化,以及象的远近距离部分之间的视差。

## 波前再现原理

盖伯发展的波前再现是一种两个步骤的成象过程。它将物和象平面之间某一中间位置上的正常成象过程遮断。当光波通过这一位置时,就被记录在某一合适的信息存储器上,稍后再由其上显示出光波。这样,便完成了成象过程。

可借助于图 1 解释这种概念。位于平面  $P_1$  上的实物用一束从点光源来的单色光,或等价地,用光激光器产生的单色光照射,透镜在平面  $P_3$  上成象。

照相底片或其他记录器件处在中间平面  $P_2^*$  上,并

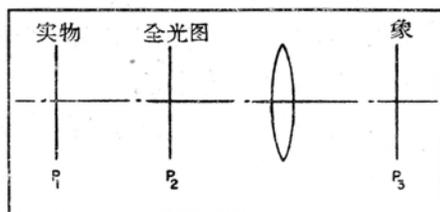


图 1

\* 原文誤为  $P_2$ 。——譯校者注。

记录那点的照明情况。该平面可以在透镜的任意一边。事实上，能在任意位置上接收实物发出的光。盖伯称这种照相记录为全光图(Hologram)。

通过平面  $P_2$  的光波，无可争辩地载有再现实物所需的全部信息。事实证明，当光波到达平面  $P_3$  时，的确形成象。波前再现的中心问题，是如何适当地记录这些光波所载的信息。主要困难在于这种信息不但包括光束的振幅，而且还有相位关系。记录器件对光的振幅和相位应有反应，而且能够加以记录。但是，所有熟知的探测器，如照相软片，仅对光的振幅才有响应，而放弃了相位部分。

所以，照相底片或全光图，仅记录入射光的振幅部分，因此是不完全的记录。

盖伯解决这问题的方式是用强相干背景。例如，假设实物是带有黑字的透明体。打在透明体上的光，在字的附近受到散射。但是大部分光仍为未受扰动的光束(图 2)。因此，打在记录平面  $P_2$  上的光可以分解为两个分量

$$S_b + S_0, \quad (1)$$

式中  $S_b$  是背景波， $S_0$  是散射光，或更精确地说，是字的菲涅耳衍射图样。

如果照明是单色的和空间相干的(来自光激光器或点光源)，那么每一分量可表示为时间不变向量。我们将假设背景波  $S_b$  为准直光束或平行光束。因此代表  $S_b$  的向量与平面  $P_2$  的笛卡尔坐标变量  $X$ 、 $Y$  无关。另一方面，散射光的相位和振幅是  $X$ 、 $Y$  的函数。记录平面的  $X$ 、 $Y$  点上的照明结果是  $S_b$  和  $S_0$  的向量和。

如果  $S_b \gg S_0$ ，那么如图 3 所示，照明结果几乎只保持有  $S_b$  的相位，也就是说，相位在整个记录平面上几乎是均匀的，而且记录中发生的相位损失是允许的。

以更纯粹的物理术语来描述。在相干背景法所产生的散射波和背景波之间的干涉中，散射光的相位部分变换成干涉条纹形式的振幅波动。这些振幅波动很容易记录下来，产生的全光图是强度。

$$I = (S_b + S_0)^{2(*)} = S_b^2 + S_0^2 + S_b S_0 + S_b S_0^* \quad (2)$$

的照相记录，式中的星号表示复数共轭。

以一束单色光照射全光图实现显象，单色光传递时在全光图上与密度变化相互作用，产生散射波。这些波的分量之一构成产生记录时打在底片上的波的拷贝。正象原来的波不受遮断时的进程一样，这些波继续在图 1 的光学系统中成象。该光表示方程(2)中的  $S_b S_0$  项。以  $S_b S_0^*$  代表的第二分量表示与原来的波共轭的波，这是因为，除了是会聚而不是发射之外(当然假设原始记录波是发射的)，它们都与原来的波相似。这样，没有透镜它们也能够构

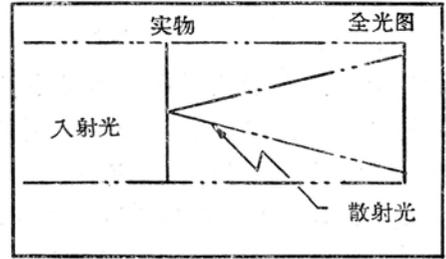


图 2

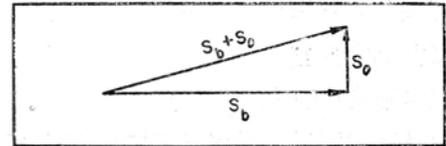


图 3

(\*) 原文誤为  $I = S_b + S_0^2$ ——譯校者注。

成实象；因此，我们称  $S_b S_0^*$  为实象项，以与虚象项  $S_b S_0$  相呼应。这两个象是分不开的；在聚焦时，每一分量须把另一分量作为散焦背景来看待。另外还有似噪声项  $|S_0|^2$ ，如果  $S_b \gg S_0$ ，这项就很小，似噪声项相当于光学的互调制时变。

因此，波前再现方法实际上仅限于相当简单的实物，其大部分提供一相干背景。而且，因孪生象之故，再现常常受到干扰。

### 双光束全光图

本文作者描述的一种技术不仅消除孪生象项，而且也消除了相互调制畸变项，以及由于软片特性偏离理想平方律或强度器件而可能引起的所有其他项。对于任何类型的实物，不论是简单的还是复杂的，不论产生强相干背景与否，不论是透明实物还是反射实物，这方法都可能再现高质量的象。实物可以是两维的或三维的。

图 4 表示用双光束干涉方法构成全光图。位于  $P_1$  的实物用相干光束照射，并在平面  $P_2$  上构成菲涅耳衍射图样。一块棱镜放在实物旁边，偏折部分入射波，使其在平面  $P_2$  上与实物的菲涅耳衍射图样相迭合，我们称这附加光束为参考光束。

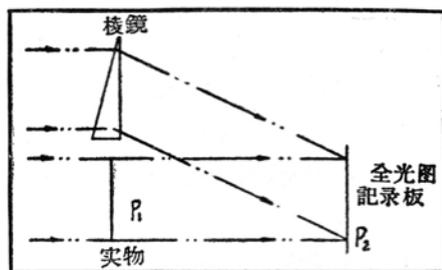


图 4

如果没有实物，则上下两光束合并产生杨氏条纹图样，它相当于空间频率正弦载波，当散射实物存在时，它在平面  $P_2$  上的菲涅耳衍射图样  $S_0$  按下述方式被调制到载波上： $S_0$  的振幅部分振幅调制载波， $S_0$  的相位部分相位调制载波。于是，产生了同时受到相位调制和振幅调制的空间正弦波，这种正弦波的存在使得相位和振幅两者都能记录在如照相软片之类仅对强度(或振幅)有响应的介质上。

还剩下通过适当显示恢复原始象的工作，为了完成这工作，正如未修改过的波前再现法一样，仅需要用单色空间相干光照射全光图。类似于已描述过的全光图制作过程，这过程可以用解调作用来描述。但是，用光学概念来描述再现过程却更容易。

可把记录下来的正弦曲线视为衍射光栅，但却是不完整的，因为由于调制作用，光栅线很不规则。这光栅受照射时，至少产生三个可见的衍射级，零级波同样产生普通全光图引起的不可分开的实象和虚象，以及相互调制畸变项。如果实物简单并且产生强相干背景，则再现发生在零级上。

但是，感兴趣的是一级衍射波。这些级中的一个引起实象，而另一个引起虚象。这些再现过程完全分离，并不含任何无关项。

为了论证这些问题，我们将实物的菲涅耳衍射图样重写为

$$S_0(x, y) = a(x, y) e^{i\phi(x, y)},$$

式中我们不再将波分为散射分量和相干背景分量。参考光束可以写为

$$a_0 e^{iax},$$

式中  $a_0$  是振幅，指数项表示，在记录平面上，由于参考光束斜射在该平面上所引起的线性

相移。照相底片记录这两个波迭加的强度:

$$I = | a_0 e^{i\alpha x} + a e^{i\phi} |^2 = a_0^2 + a^2 + 2a_0 a \cos(\alpha x - \phi)。$$

在再现过程中,  $a_0^2$  和  $a^2$  项产生零级波, 而  $2a_0 a \cos(\alpha x - \phi)$  项产生一级衍射波。如果我们以指数形式

$$a_0 a e^{i(\alpha x - \phi)} + a_0 a e^{-i(\alpha x - \phi)}$$

重写这项, 则能表明, 每一项代表两个一级衍射波之一。其中第一项除了  $e^{i\alpha x}$  因子外, 与非涅耳衍射图样相同, 因此引起虚象, 但却移到离轴位置上。起因于调制过程的第二项是原始非涅耳衍射的复数共轭, 代表一实象。

### 方法的特点

双光束方法产生了很多种实物的高质量再现。例如, 用双光束技术, 已有可能拍摄连续色调的透明体, 而单光束技术则不适合于这类照相工作。此外, 还用反射光拍摄出了三维实物, 结果得到了非常相似于原始物的再现。

在某些情况下, 最终制品不是全光图本身, 而是原始透明物的相片。这种情况下, 成象变为两步过程, 第一步产生全光图, 第二步变成记录再现的象。只需把照相底片放在再现的实象处, 则整个过程不用透镜也能实现。这种可能性的起因, 是由于平方律探测这种记录过程在记录非涅耳衍射图样的过程中产生实象项。如果把由实物来的发散波作为全光图的输入波, 而构成实象的会聚波作为输出波, 那么, 全光图的作用就类似于一面透镜, 其焦距为实物和全光图之间的距离的一半。

已制成的最有魅力的全光图是三维实物的, 因为它的再现象保持并显示了实物的全部三维视觉特性。三维效应与普通立体照片所产生的相同, 但在这种情况下, 这种效应无需一对立体相片便能获得。这种再现有普通立体照相不能产生的另一些特点, 例如, 如果在观察景物的再现象时, 观察者移动他的头, 则将看到象中的透视变化。再现象中远近物体之间的视差正是在观察原始景物时所具有的。如果在某一观察位置, 观察者发现前景的物体遮蔽了它后面的物体, 那么观察者可以真正地改变位置, 绕过遮蔽物来看, 正如观看原始景物时所能做到的那样。视线由再现景物上的近物移向远物时, 观察者的眼睛必须重新聚焦。与此相仿, 如果用相机来拍摄再现景物, 则很明显, 有限的焦深会有所影响。因此, 如果要获得相当好的景深, 就需要缩小相机的光圈。

正如两维再现一样, 视觉上也可以观察到实的或虚的三维再现象。实际上, 观察者对实象调焦最初可能有一些困难, 这可能是生理光学上的原因。如果这一困难得到克服, 就会得到结果, 那时, 观察者能看到悬挂在自己和全光图底片之间的空间上的整个再现景物。无论怎样, 观察虚象不会有问题, 但必须透过全光图看景物才能观察到, 就象通过窗看景色一样。

在这类三维照相术中, 全光图是最终制品而不是两步过程中的第一步, 因为不失去上述特性, 我们就不能记录再现象。

除了那些与三维效应有关的性质以外, 全光图尚有若干有趣的性质。首先, 再现象是正

象，虽然照一般情况，记录片是负的。如果我们采用接触晒印底片的方法，则原始全光图发生反转，但新的全光图仍旧产生正的再现。简言之，双光束全光图技术不产生负象。

双光束波前再现过程的另一有趣的性质是，不管记录底片的  $\gamma$  值如何，再现象与原始实物总有同样的反差。有一种  $\gamma$  值约为 8 的高反差底片。普通照相使用这种底片时，可能损坏实物的大部分色调层次，但当照相记录是全光图时，这种可能性就完全不存在。

全光图还有另一个有趣的性质，即每一单元包含了整个画面，这是因为实物的每一单元都照射整个全光图。因此，可将全光图分成很多很小的小块，而每一小块仍能再现整个景物，但此时分辨率却减低，因为全光图构成系统的孔径。

### 应用的可能性

用双光束波前再现技术获得成功结果将促进它的实际应用，这里提出其中的一些。

波前再现最有吸引力的方向之一，是将其用到目前的成象技术尚有缺陷的领域中去。盖伯曾建议将其用于电子显微镜，以克服这仪器中存在的不可校正球面象差。若用电子波制作全光图而以可见光再现，则这一点是可能做到的。完成再现时，要用设计好的透镜去补偿电子光学系统所产生的象差。

其他类似的应用包括 X 射线和远紫外的高质量成象，这些波段的成象技术因无合用的透镜而发展得很不够。贝兹和埃耳-萨姆<sup>[5]</sup>曾研究过 X 射线应用问题。

屡被建议采用波前再现方法的另一应用领域是普通的显微镜。制得全光图并用发散光再现，可以得到相当大的放大率。但是，正如在普通显微镜中遇到的一样，按此方法设计的显微镜将有象差问题。

这一应用以及其他应用均能以无需化学显影的记录介质实现，例如，用天然色照相玻璃\*。

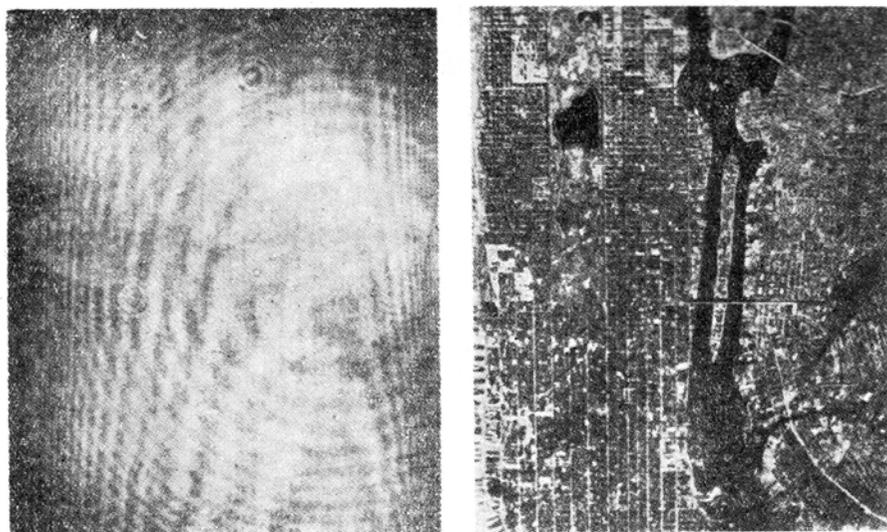


图 5 航空摄影的全光图和再现

\* 我们实验室的 K·斯特森已利用康宁玻璃厂的天然色照相玻璃样品获得了全光图和再现。

这种再现象几乎能直接观察，而无需移开全光图并加以处理。底片的可重复使用性是我们非常欲求的性质。

能记录象的任何器件都能用来记录产生三维象的全光图。尤其是，电视摄象机可作为探测器件，这样产生的全光图能够发送出去，并能在如热塑胶或通用电气公司的油质鼓膜那类器件上得到再现。利用高功率脉冲光激励器时，所能拍摄的景物比迄今为止已经处理过的还要大。

波前再现方法产生的三维成象在教学设备和摹拟器件中可能还有用。波前再现方法可通过几条途径扩展到着色，关于这一问题，本文不再赘述。

另一种应用是产生成象系统的象差的全光图。该全光图可作为校正底片，当与成象系统组合使用时，可以校正这些象差。这种方法已由作者演示过，似乎很有希望。在这种应用上，特别期望增进全光图的效果，其方法是使入射到全光图上的大部分光都落到所希望的衍射级上。适当处理全光图，便能作到这一点；例如，当全光图是照相底片时，便可用产生相位象的各种方法之一(如漂白感光乳剂)来处理。

原载 SPIE J., 1965, 3, №4, 123~126 (謝培良譯, 朱宝鈴、孙占鰲校)

## 具有激光光源的夜間航空偵察系統

美国的肖空军基地的战术航空偵察中心正在试验具有激光光源的夜间航空偵察系统。迄今为止，这种系统的成象一直有很高的分辨率。由于若干家公司正在作进一步努力，故激光夜视图的质量可望与通常的白昼图象媲美。

珀肯-埃耳默照相系统装在供飞行试验用的道格拉斯 RB-66 型飞机上。它使用了光谱物理学公司的 20 毫瓦连续 He-Ne 气体光激励器。低功率输出限制了相机的有效偵察范围，目前的高度在 3,000 呎以下。但若能用上功率更高的连续光激励器，则可能减轻或除去这种限制。激光系统可能会促进夜间偵察技术。与普通的照明装置不同，这种系统是无法探测的。

在珀肯-埃耳默系统中，一束激光被劈为两束，其一通过普克尔盒调制器，然后射向六面棱鏡扫描器，经反射后记录在软片上。

第二束光直接射向棱鏡扫描器，再射向地面。用施米特透鏡接收由地面反射回来的光束，并将其聚焦在光电倍增器上。反射光束将对原有光束进行调制。

据称扫描速度为每秒几百行。飞行试验中飞机的速度每小时在 100 到 300 哩之间。

顏紹知 譯自 *Laser Letter*, 1965, 2, №12, 3

## 激光散射通訊的研究

贝尔电话实验室正研究应用激光进行对流层散射通讯的可能性。虽然激光散射通讯会牺牲光频所特有的极大带宽的一部分，并要求高功率光激励器，但在一些特殊场合，它与普通