

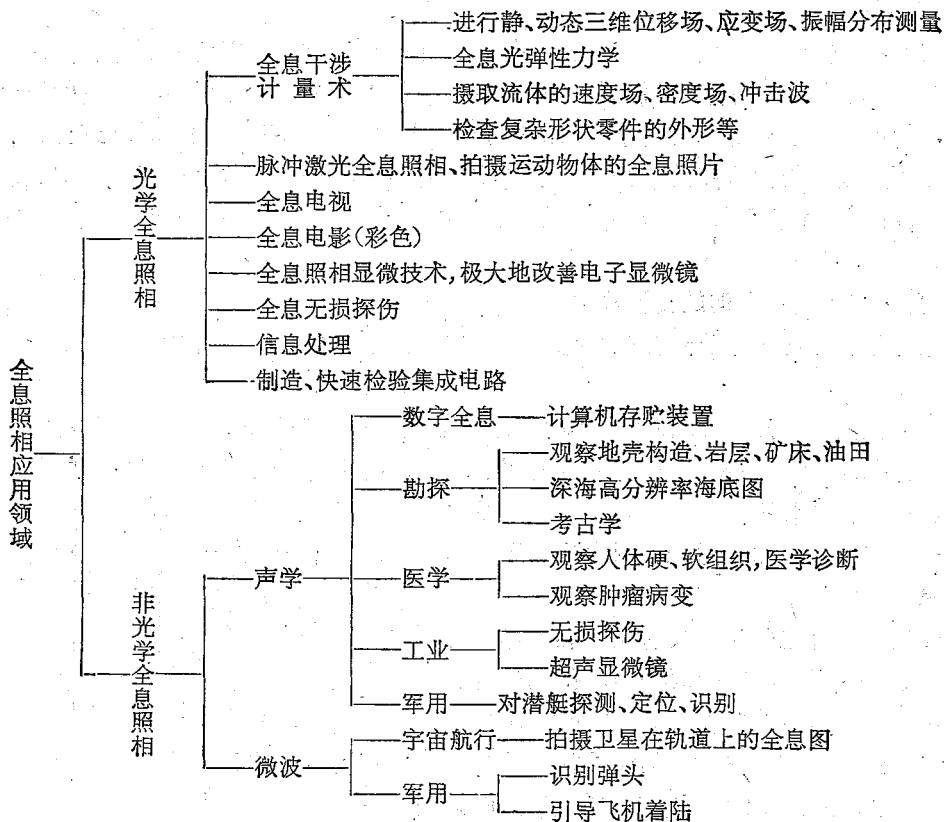
激光全息摄影

同济大学公路工程研究所

一、概 述

普通的照相术,已有上百年的历史,但在整个发展过程中除了处理方法和照相材料的逐步改进外,在成象原理上却没有任何根本的变化。它是通过透镜成象系统,把从物体表面反射来的光或物体本身发出的光的强弱变化记录在底片上,再在照相纸上显现出物体的平面象,各种类型的立体摄影也没有越出这一范围。

而全息照相术,不再需要复杂的透镜光学系统成象,而是用特殊的摄录方法,不仅在底片上记录下物光的强弱情况,同时还把物光的位相也记录下来,即把物光的全部信息记录了下来,并通过一定的步骤,“再现”出物体精细的立体图象。因此,全息照相原命名为“Holography”,取自希腊字,意思是“完全信息”,也就是这个道理。



这个原理,是1948年由英国人D. Gabor(盖伯)提出的,即“波面再现成象原理”。但由于当时缺乏很强的相干光源,这种技术实际上无法发展和推广。直到1960年激光问世以后,才使这门新技术迅速地发展了起来。

60年代初,摄制了三维物体的高质量的立体象,研制了可以用白光再现的“体积全息照片”。

到了1964年后期,在世界许多国家中,全息照相似乎成了光学领域中最热门的研究课题。在以后三年中一直都有创新,开始转入了应用的基本研究。到1967年以后,多数转入了实际应用的研究和系统的结构设计。

十几年来,除了光学全息术取得了较大进展外,微波全息、红外全息和声全息也在发展。

全息照相术的应用领域正在日益扩大,尤其在电子计算机、信息处理、医疗诊断和干涉测量等方面有着广阔的前景(相比之下,特别是全息干涉计量术,目前发展最快,也较为成熟)。对于工农业生产、科学实验、国防建设、医学及文化艺术等方面,都有一定的使用价值,因此日益受到各方面的重视。

我国各有关部门也都把该项新技术的研究列入了研究规划之中。在党的“自力更生”方针指引下,近几年来,全国不少单位相继在不同的应用领域开展了全息技术的研究工作,并取得了不少可喜的成绩。

二、全息照相基本原理

1. 波面再现的基本概念

我们知道,光具有波动特性。人眼之所以能看到一个亮点,是因为该亮点所发出的球面波的波面为人眼所接收;同样,人们看到一个物体,也就是因为从物体发出的特定的波面为人眼所接收。如果上述发光点和物体拿掉,而它们所发出的球面波和特定的波面已记录下来,并被入眼所看到,则我们同样能感觉到该亮点和物体的存在。这就是波面再现的基本概念。激光全息摄影就是利用波面再现的原理,将景物的波面记录下来,然后在观察时再将原来的波面显示出来。

2. 全息照相成象原理的简要解释

全息照相和普通照相虽然都是用感光材料作为记录介质,但二者的成象原理却截然不同。

大家都很熟悉,普通照相在物体和胶片之间必须安放成象系统,不管是复杂的摄影物镜或是简单的针孔,其成象原理都是一样的(见图1),物体的反射光波只有通过针孔的那一部分才能达到底片上,结果物体上的一点只能投射到底片上某一对应点,因而在感光材料上形成了物体的二维象。

但是光是一种电磁波,具有振幅和位相等特性参数。振幅表示光波的强弱分布,位相确定了光的传播方向。通常的照相实质上也是一种只能

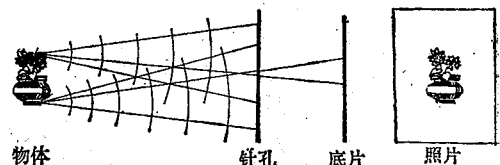


图1 普通照相原理

检测到光的强度(振幅的平方)的能量检测系统,所以只能是物体和底片之间对应点强度的记录。可见,这仅仅记录了与振幅有关的信息,而丢失了位相部分的信息。

而激光全息照相技术，它在底片和被摄物体之间不用安置任何成象系统（图2、图3），所以物体上由每一点所反射（或透射）的光波将落在底片的整个表面上，也即底片上的任一点都将接收到的物体表面上任一点所反射（或透射）的光波（当然，这只有那些能到达底片上的光波才有可能）。从这里也可以了解到为什么全息照片的任一小块都能成完整的象的道理。

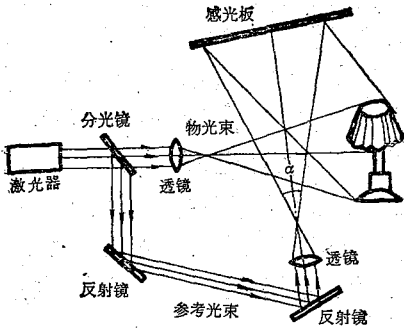


图2 反射式摄影系统

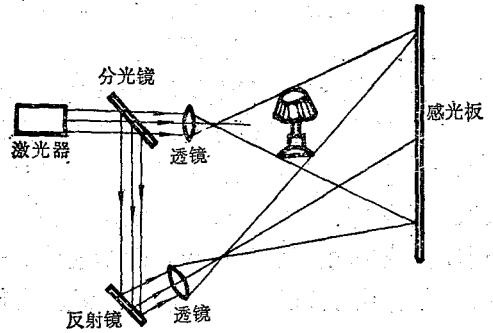


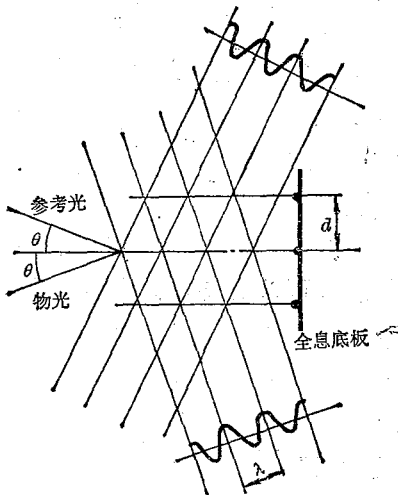
图3 透射式摄影系统

激光全息照相所以能同时记录物光波的振幅和位相，是应用了光的干涉原理。即用一束具有恒定位相的光束（球面波或平面波）作为参考光，使与要求摄影的物光波面发生干涉，并将其记录在感光材料上，形成全息干涉光图。

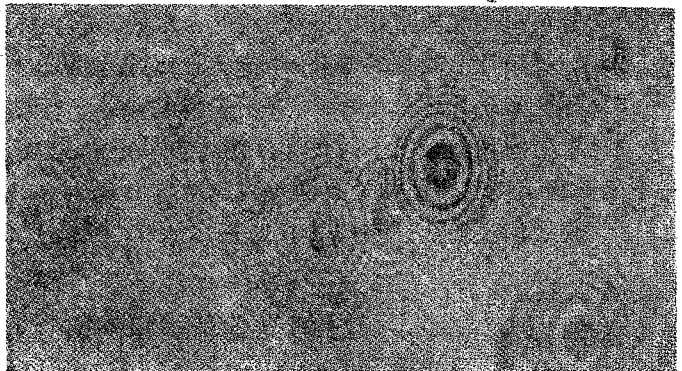
从干涉原理知道，假设有两列相干平面波，以某一倾角投射到屏上，则屏上将出现一组均匀的平行的干涉条纹（图4(a)），条纹间隔 d 取决于两列波（波长为 λ ）间的夹角 θ ，根据两列平面波的相互干涉的布拉格条件推得：

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

条纹的明暗程度，取决于两列波到达该处的位相差。如果位相相同，则为相长干涉，振幅迭加，相当于亮条纹；反之如位相相反，且两列波振幅相等，则为相消干涉，相当于暗条纹；介于两者之间的情况，则条纹明暗程度也介于上述两极限情况之间。



(a)



(b) 全息照片

图 4

以此类推,如果由复杂的物体反射的不规则的波面,与另一平面波相干时,由于入射波面不规则,最终构成的干涉条纹同样是不规则的。在物波有最大振幅之处,干涉条纹反差最大,而在物波振幅小的地方,条纹反差也小,这样,由物体反射的光波其振幅的变化,引起了被记录的干涉条纹反差的相应变化。

如前所述,底片上某处条纹的间隔将取决于该处发生干涉的物光束和参考光束之间的夹角,夹角大处,条纹细密,小处,则稀疏。显然,光波的绝对位相不能测量,但两束光之间的位相差则可以精确地测定。所以,物光束的位相变化,引起底片上条纹间隔作相应的变化。

因此,无论是物光束的振幅或位相,都可以由被记录的干涉条纹的反差和间距的形式保存下来。如果用照相底片来记录这些干涉条纹,冲洗后就得到一张全息照片,如图4(b)所示。

这一全息照片相当于一块平面(二维)光栅。当采用与拍摄时的参考光束的取向、波面形状以及波长相同的再现光束照明时,则此二维光栅使再现光束发生衍射,产生一个沿着照明方向前进的零级衍射波和两个一级衍射波。一级衍射波中的一个将沿着物光传播的方向前进,物光就这样被再现了。另一个一级衍射波向第三个方向前进,称为共轭光波(图5),形成虚像。

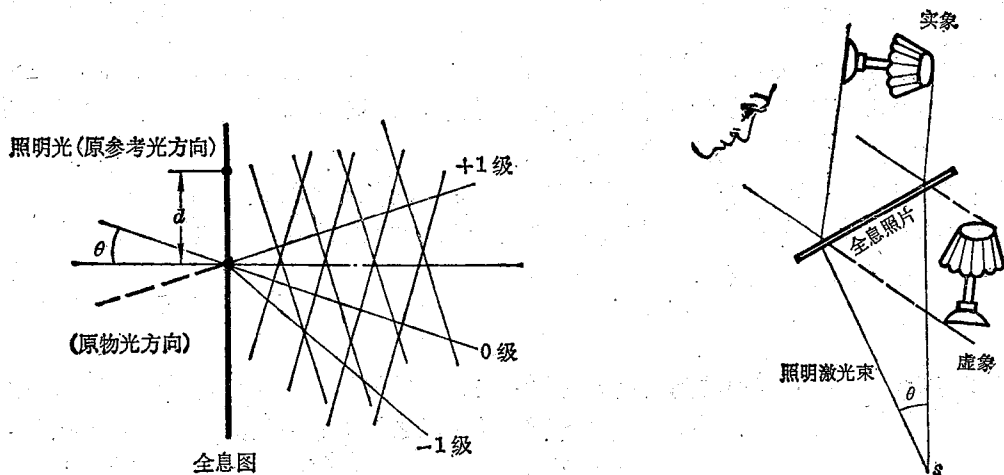


图 5

全息照相有许多重要的特性,如:

1. 能再现出和原来物体一模一样、非常逼真的立体象;
2. 全息照片上的每一部分,不论大小,总能再现出原来物体的图象;
3. 不管是正片还是负片,再现出来的象都是一样的;
4. 对不同景物采用不同角度入射的参考光束,经多次曝光后,可以重选记录多个象,且每一个象又能不受其他象的干扰而单独地显示出来;
5. 易于用接触法复制等。

三、激光全息照相的摄制方法和装置

1. 拍摄过程:

激光全息摄影的具体布置如图2、图3所示。激光器射出的激光束,通过分光镜后分成两

束,一束叫物光束,经透镜扩束后射向物体,再由物体反射(或透射)后投向全息底片;另一束叫参考光束,经反射镜和透镜后照射在底片上。两束光在底片上相遇,由于光波迭加而形成许多明暗不同的干涉花纹,经处理便得到一张全息照片。

2. 对摄制系统的要求:

(1) 对稳定性的要求:

由于全息照片的摄制过程就是把精细的干涉条纹记录在感光材料上,如果在记录过程中发生振动,将引起干涉条纹的混迭。结果必然导致象的衍射亮度下降,甚至使实验归于失败。实验结果表明,为了获得清晰的全息照片,在曝光过程中,光程变化必须小于 $1/8$ 波长。

为了使摄影系统的稳定性达到这个要求,工作台的防振,分光镜、反光镜等元件的机械稳定性,工作室内空气流动及温度变化,声学干扰等都必须加以适当的控制。

当然,若能约束曝光时间,如用脉冲激光器为摄制光源,则对稳定性的要求就能大大降低。

(2) 对激光器的要求

(a) 有足够的单色性,能单模工作,输出激光的相干长度要大于被摄物体的尺寸;

(b) 有很大的输出功率,或能量;

(c) 输出稳定,寿命长,使用方便。

He-Ne 激光器目前除功率较小外,能很好满足其余要求,氩、氪离子激光器适于拍摄彩色全息照片,功率亦较高,但效率低,寿命短;Q 突变脉冲激光器瞬时功率大,适于拍摄运动物体。

(3) 对光路布置的要求:

全息照相系统的布置,是一个几何问题,考虑到再现时的照明方法和对再现象的不同要求而进行选择。一般应考虑如下因素:

(a) 光学元件愈少愈好,因系统中任一部分的微小变化都将引起记录中干涉条纹的变化。

(b) 物光束与参考光束之间的最大夹角应控制在照相底片分辨率的极限之内,夹角愈大,干涉条纹越密,分辨率要求也越高。例如:夹角为 6° 左右时,可用每毫米 200 条线的胶片,而夹角在 20° 以上时,必须用 2000 条线的胶片。

(c) 物光束与参考光束的光程差在激光光源的相干长度以内并尽可能地小。

(d) 为提高光束发散后的均匀性,可在发散透镜的焦点上加一针孔光阑;也可使物光束通过一漫射器(毛玻璃板或半透明塑料板等)然后照射到物体上,不但能使光束分布均匀,同时使底片所接收到的物光束的信息大为丰富起来,能使衍射场变得十分清晰均匀。

(4) 对底片曝光和处理的要求

(a) 底片的选用:

全息照相的记录介质种类很多,如乳胶底片、二色性明胶、光色度晶体、光导热塑料、铌酸锂(铁电晶体)、热色度膜、锰铋磁性薄膜等。它们各有特点。目前主要用乳胶底片。它的银盐极细,分辨率很高(数百条~3000 条线/毫米),因而它的灵敏度就必然受到限制。为此,必须选用合适的底片,使所用的激光光谱区域内应有足够的灵敏度。

(b) 必须合理地选取参考光束与物光束的强度比例,以使全息照片的曝光落在底片的 T/E 曲线(即透过率—曝光曲线)的直线部分的中点附近(图 6),用这样的理想曝光是希望通过全息照片的光束具有最大衍射,即使记录的条纹能再现出亮度最大而失真最小的图象。

由于每种底片都有自己的特性 T/E 曲线,因此必须根据不同的底片特性来选用合适的光

强比。对于我国的全息照相中使用的绝大多数底片来说, 比值为 2:1~10:1, 一般能得到满意的结果。

(c) 底片处理中的几个注意问题:

乳胶类全息干板与一般乳胶底片一样, 需要进行湿法冲洗。其冲洗液配方和处理方法, 出厂时都另有说明。需加特别注意的是:

处理过程的每一步都必须细心, 尽可能不使乳剂承受压力, 以免乳剂面引起变形而影响衍射亮度和产生畸变。

采用漂白处理方法, 能使全部银粒从乳剂中除去, 因此已普遍用来作为提高衍射效率的有效方法, 并可用此方法来校正曝光量或处理中的失误。但漂白后底片中的噪音相应增大。

也有用把全息干板先在 5% 的三乙醇胺溶液中浸泡适当时间的方法, 来提高干板的灵敏度, 并且也可以减少乳剂收缩引起的影响。

3. 全息照相的种类:

用不同装置, 可以得到不同种类的全息照相, 常见的有以下五种: 菲涅耳全息照相, 夫琅和弗全息照相, 散射全息照相, 彩色全息照相和体积全息照相, 他们各有特点和应用范围, 可以视实际情况而用, 在此不再详述。

从全息照相技术发展的整个情况来看, 还未能实际中得到广泛的应用, 其主要关键在于没有很好地解决记录介质和激光器的问题。

(上接第 64 页)

(续表)

玻 璃 型 号	N0812	N0712	N0912	N1024
玻璃折射率 $n_{1.06}$	1.5122	1.4953	1.5076	1.5067
$n_{1.06}$ (计算)	1.5122	1.4955	1.5075	1.5068
n_o	1.51969	1.50290	1.51502	1.51455
n_D	1.5224	1.5054	1.5176	1.5171
n_F	1.52843	1.51134	1.52363	1.52335
平均色散 $n_F - n_C$	0.00874	0.00844	0.00861	0.00880
阿贝数 $\nu (n_D - 1 / n_F - n_C)$	59.8	59.9	60.1	58.8
玻璃在 6328 埃处的热光系数 $W \cdot 10^{-7} (^{\circ}\text{C}^{-1})$	58	45	46	54
折射率温度系数 $\beta \cdot 10^{-7} (^{\circ}\text{C}^{-1})$	16.2	0.2	1.2	8.0
玻璃线膨胀系数 ($15^{\circ} \sim 200^{\circ}\text{C}$) $\alpha \cdot 10^{-7} (^{\circ}\text{C}^{-1})$	80	89	87	89
($15^{\circ} \sim T_g^{\circ}\text{C}$) $\alpha \cdot 10^{-7} (^{\circ}\text{C}^{-1})$	88	96	93	100
玻璃密度 d (克/厘米 ³)	2.51	2.52	2.50	2.52
显微硬度 (千克/毫米 ²)	606	557	533	585
抗折强度 (千克/毫米 ²)	11.8	9.1	10.2	8.9
弹性模量 $E \cdot 10^{-3}$ (千克/厘米 ²)	759	647	687	750
玻璃转变温度 $T_g (^{\circ}\text{C})$	590	495	620	525
玻璃软化温度 $T_F (^{\circ}\text{C})$	660	560	680	585

(上海玻璃会战组供稿)