

实验九 静物全息照片的摄制与观察

全息照相技术是 60 年代发展起来的一门立体摄影和波前再现的新技术. 它比普通照相具有更多的特点, 故在摄影艺术、精密计量、无损检测、信息处理、遥感图像分析, 生物医学和国防科研中具有广泛的应用.

拍摄全息照片就是将物体表面的漫射光波的振幅和位相以干涉条纹 (全息图) 的形式记录下来. 而对全息照片的观察及分析则是全息照相术的工程应用基础. 本实验将从观察和分析全息照片的主要特征出发简要介绍全息照相的基本原理及摄制方法.

【实验目的】

1. 学习全息照相的拍摄方法和观察要领;
2. 通过对静物全息照片的摄制与观察, 了解全息照片的主要特点.

【实验原理】

1. 全息照相与全息照相技术

照相是将物体上各点发出或反射的光记录在感光材料上, 由光的波动理论知道, 光波是电磁波, 一列单色波可表示为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi - \frac{2\pi r}{\lambda}) \quad (1)$$

式中 A 为振幅, ω 为圆频率, λ 为波长, φ 为波源的初相位. 一个实际物体发射或反射的光波比较复杂, 但是一般可以看成是由许多不同频率的单色光波的叠加

$$x = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i - \frac{2\pi r_i}{\lambda_i}) \quad (2)$$

因此任何一定频率的光波都包含着振幅 A 和相位 $(\omega t + \varphi - \frac{2\pi r}{\lambda})$ 两类信息. 光在传播过程中, 借助于它们的频率、振幅和相位来区别物体的颜色 (频率)、明暗 (振幅平方)、形状和远近 (相位).

普通照相是通过成像系统 (照相机镜头) 使物体成像在感光材料上, 材料上的感光强度只与物体表面光强分布有关, 因为光强与振幅平方成正比, 所以它只记录了光波的振幅信息, 无法记录物体光波的相位差别. 因此普通照相记录的只能是物体的一个二维平面像, 缺乏立体感.

全息照相不仅记录了物体发出或反射的光波的振幅信息, 而且把光波的相位信息也记录下来, 所以全息照相技术所记录的并不是普通几何光学方法形成的物体像, 而是物光光波本身. 它记录了光波的全部信息, 并且在一定条件下, 能将所记录的全部信息完全再现

出来，因而再现的物像是一个逼真的三维立体像。

全息照相包括二个过程，第一，把物体光波的全部信息记录在感光材料上，称为记录（拍摄）过程。第二，照明已被记录下全部信息的感光材料，使其再现原始物体的光波，称为再现过程。

全息照相的基本原理是以波的干涉为基础，所以除光波外，对其他的波动过程如声波、超声波等也都适用。

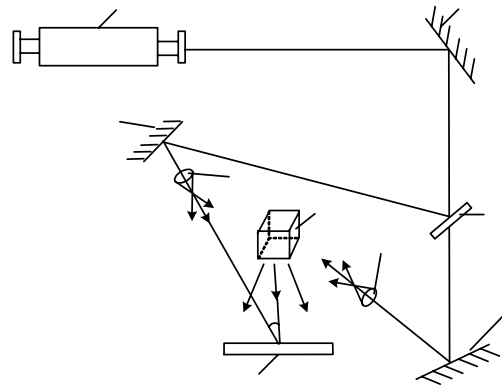
2. 全息照相的基本过程——记录和再现

(1) 全息照相记录过程的原理——光的干涉

怎样才能把物光的全部信息同时记录下来呢？由物理光学可知，利用干涉的方法，以干涉条纹的形式就可以记录物光的全部信息。

图 1 是记录过程中使用的光路。相干性极好的氦氖激光器发出激光束，通过分束镜分成二束。其中一束经反射镜 M_1 反射，再由扩束镜 L_1 将光束扩大后均匀地照射到被摄物体 D 上，经物体表面反射（或透射）后再照射到感光材料（实验中用全息感光胶片） H 上，一般称这束光为物光。另一束经反射镜 M_2 反射， L_2 扩束后，直接均匀地照射到 H 上，一般称这束光为参考光。这二束光在胶片 H 上叠加干涉，出现了许多明暗不同的条纹、小环和斑点等干涉图样，被胶片 H 记录下来，再经过显影，定影等处理，成了一张有干涉条纹的“全息照片”（或称全息图）。干涉图样的形状反映了物光和参考光之间的相位关系。干涉条纹明暗对比程度（称为反差）反映了光的强度，干涉条纹的疏密则反映了物光和参考光的夹角情况。

(2) 全息照相再现过程的原理——光的衍射



1. 激光器；2. 分束镜；3、8、9. 反光镜；4、7. 扩束镜；5. 被摄物；6. 感光胶片

图 1 拍摄全息照片的典型光路

我们知道人之所以看到物体，是因为从物体发出或反射的光波被人的眼睛所接收。所以，如果想要从全息图上看原来物体的像，直接观察是看不到的，而只能看到复杂的干涉条纹。要看到原来物体的像，必须使全息图再现原来物体发出的光波，这个过程就称为全息图的再现过程，它所利用的是光栅衍射原理。

再现过程的观察光路如图 2 所示。一束从特定的方向或与原来参考光方向相同的激光束（通常称为再现光）照射全息图。全息图上每一组干涉条纹相当于一个复杂的光栅，它

使再现光产生衍射。我们沿着衍射方向透过全息图朝原来被摄物的方位观察时，就可以看到一个完全逼真的三维立体图像。为讨论方便起见，取全息图上某一小区域 ab 为例，同时把再现光看成是一束平行光，且垂直照射于全息图上。如图 3 所示，按光栅衍射原理，再

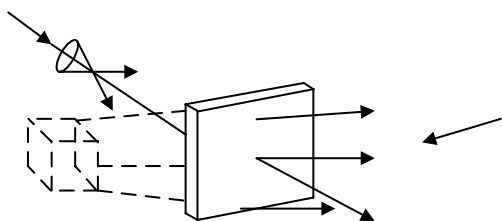


图 2 被摄物的再现

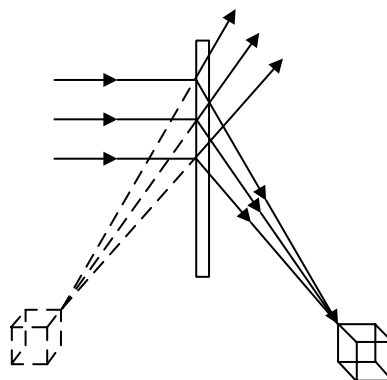


图 3 光栅衍射原理

再现光将发生衍射，其+1级衍射光是发散光；与物体在原来位置时发出的光波完全一样，将形成一个虚像，与原物体完全相同，称为真像。-1级衍射光是会聚光，将形成一个共轭实像，称为膺像。

3. 全息图的主要特点和应用 **扩束镜**

(1) 全息图的视觉特性

全息图再现的被摄物体是一幅完全逼真的三维立体图像。因此，当我们移动眼睛从不同角度去观察时，就好像面对原物体一样，可看到原来被遮住的侧面，图 4 就是从不同角度去观察同一张全息图时的立体效果。

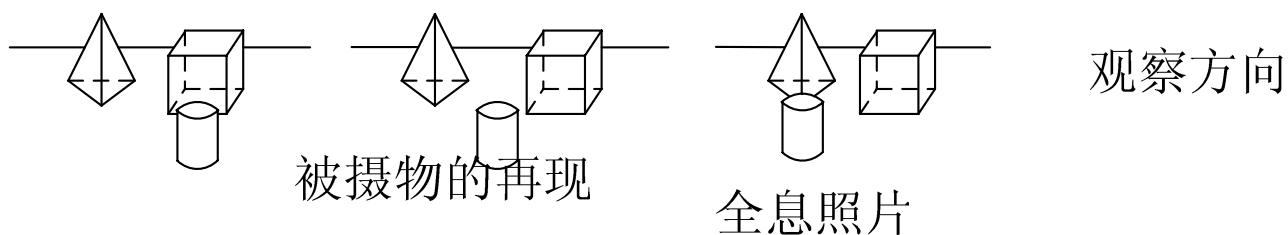


图 4 物体的视差特性

(2) 全息图的可分割性

全息图上的任一小区域都分别记录了从同一物点发出的不同倾角的物光信息。因此，通过全息图的任一碎片仍能再现出完整的物像。

(3) 全息图的多重记录性

在一次全息照相拍摄曝光后，只要稍微改变感光胶片的方位，如转过一定角度，或改变参考光的入射方向，就可以在同一张感光胶片上进行第二次、第三次的重叠记录。再现时，只要适当转动全息图即可获得各自独立互不干涉的图像。

由于全息照相技术具有上述独特的特点，所以在各个领域中得到较广泛的应用。如

利用全息图的立体视觉特性，可作三维显示、立体广告、立体电影等。利用全息图的可分割性和多重记录特性，可作信息存储、全息干涉计量、振动频谱分析、无损检测和测量位移、应力、应变等。

4. 拍摄系统的技术要求

为了拍摄合乎要求的全息图，对拍摄系统有一定的技术要求。

(1) 对全息照相的光学系统，要求有特别高的机械稳定性。如果物光和参考光的光程稍有不规则的变化，就会使干涉图样模糊不清。而且地面振动而引起工作台面的振动，光学元件及物体夹得不牢固而引起的抖动，强烈声波振动而引起空气密度的变化等，都会引起干涉条纹的不规则漂移而使图像模糊。因此，拍摄系统必须安装在具有防振装置的平台，系统中光学元件和各种支架都要用磁钢牢固地吸在全息平台上。在曝光过程中，人们不要走动，不要高声说话，以保证干涉条纹无漂移。

(2) 要有好的相干光源。一般实验中常采用氦氖激光器作为光源。同时物光和参考光的光程差要符合相干条件。一般常使两者光程差小于 1 cm。

(3) 物光和参考光的光强比要合适。一般以 1: 4 到 1: 6 为宜。两者间的夹角小于 45°，因为夹角越大，干涉条纹间距越小，条纹越密，对感光材料分辨率的要求也越高。

【实验仪器】

氦氖激光器、全息防振平台、平面反射镜、分束镜、拍摄物、扩束镜、感光胶片和光学可调磁性座等。

【实验内容与步骤】

1. 按拍摄光路图布置光路，同时按下列步骤调整光路。

(1) 调整光路的等高，以激光器出光的高度为基准。

(2) 调整物光和参考光的光程差，使两者的光程差控制在 1 cm 之内。物光与参考光的夹角在 30° 左右。

(3) 使物光扩束均匀照亮拍摄物；参考光扩束后均匀照亮对光板。同时测量物光与参考光的光强，使物光光强与参考光光强之比为 1: 4 到 1: 6。

2. 计算曝光时间

曝光时间可由公式 $T_{\text{曝}} = \frac{25\text{mV} \cdot \text{秒}}{\text{总光强(mV)}}$ 来计算。

3. 曝光、拍摄

用挡板挡住激光，然后轻轻地将胶片装在胶片夹上，稍等片刻，移开挡板按计算的曝光时间进行曝光。曝光结束取下胶片用黑纸包住去暗室冲洗。

4. 胶片的冲洗

将已曝过光的胶片依次放在显影液 (D-19)，清水和定影液 (F-5) 中进行冲洗。显影时在暗绿光下操作，与旁边放有一片灰度适中的对比片进行比较，显影时间以灰度为准，记录显影时间。定影为 3 分钟。定影后经水洗并烘干即得到一张全息照片。

5. 观察所摄全息照片的再现物象

(1) 观察虚像

按图 5 所示的再现光路将全息照片按拍摄时相同的方位固定在支架上，眼睛贴近全息照片，透过照片向拍摄时物体放置的方向观察，即可找到再现虚像。观察时，注意再现虚像的大小及位置与原物进行比较。体会全息图的立体视觉效果，如亮暗程度，质感等。再通过小孔观察再现虚像，并改变小孔覆盖在全息照片上的位置，体会全息照片的可分割性，并详细记录观察结果。

(2) 观察实像

图 6 是观察全息照片再现实像的光路，将未扩束的激光直接按拍摄时参考光的入射方向 α 直射全息照片的背面（玻璃基面），利用毛玻璃屏接收观察再现实像。注意观察入射光束的入射点不同，再现实像的视差，亮度和清晰程度都会发生变化。观察屏离照片距离不同，实像的大小和清晰度也会改变。只有当观察屏离全息照片距离等于被摄物在拍摄时与感光片相同距离时，实像才最清晰。

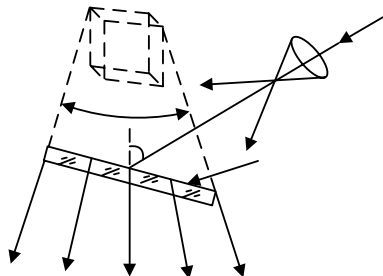


图 5 全息照片再现光路虚像的观察

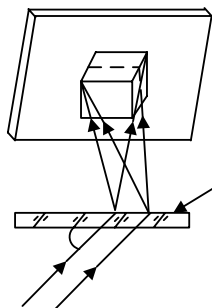


图 6 细光束观察再现实像的光路

【注意事项】

1. 绝对不能用眼睛直视（直接使激光束射入眼睛）未扩束的激光束。
2. 拍摄时使用的光学元件应保持清洁，若光学面有沾染或灰尘，应请指导教师处理，切勿用手或纸片揩拭。
3. 全息拍摄曝光过程中，切勿触及全息防振台，人员也不宜走动，喧哗，以免造成不必要的振动干扰，影响全息图的拍摄质量，衍射效率及视场大小和清晰程度。
4. 照相暗室中显影、水洗、定影的条件和顺序应严格按照规定进行，及时记录各实验参数。温度、时间等。冲洗结束应整理实验环境，并将药液倒回原瓶。

【思考题】

1. 要获得一张优质的全息照片，应该注意那些程序？
2. 结合实际光路说明：为什么物光与参考光的夹角以小些为好？如何才能使物光与参考光的光强比调整到 1: 4~1: 6 之间？
3. 为什么物光与参考光的平均光程要大致相等？
4. 试列表总结全息照相与一般照相的区别。
5. 从拍摄技术、参数和实验条件对摄得的全息照片进行评价。

虚像

扩束镜

L₂

ω

θ

感光药膜面