

全息扫描镜直线扫描分析及像差校正

邹振书

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要:介绍了全息扫描镜的原理,给出了等空间频率分布及变空间频率分布的全息扫描镜结构。基于全息图相位及相位传递函数方法,分析了全息扫描镜产生直线扫描条件,推导出记录子全息图各参数之间的关系,得出了利用短波长光记录子全息图,用长波长光再现,实现线性扫描的结果。提出了由于波长移动引起的像差校正方法。分析了摆动与偏心对扫描特性的影响。简介了所设计的变空间频率分布的全息扫描镜。

关键词:全息扫描镜; 直线扫描; 像差校正

中图分类号: TB877 **文献标识码:** A

1 引言

激光扫描是激光技术应用诸多领域中比较重要的一个方面,从高速打印机到条形码扫描,从激光光盘到图形传真和防盗报警一类系统中,无一不是利用激光扫描进行工作。激光扫描装置的关键部件之一是光束偏转器,目前所用的光束偏转器有旋转多面棱镜、检流计、振镜及声光或电光器件等。但是由这些偏转器组成的激光扫描器,其扫描线的方位和焦距是不能变的,扫描速度不可能很高,且对其机械结构及加工要求比较苛刻,这就限制了其应用范围。新近研究和发展的全息扫描镜技术^[1-3],能够提供多方位和多焦距的扫描。全息扫描镜的特点也是其独到之处,是它用衍射偏转代替传统扫描的反射偏转,可产生三维扫描场。全息扫描镜结构简单,小型化,对驱动器要求低,可提高扫描速度,适于在环境较差的场合下工作。本文简述了全息扫描镜的原理,提出了两种子全息图的制作;基于全息图相位和相位传递函数的方法,详尽地分析了全息扫描镜直线扫描条件,提出了消除像差的方法。最后叙述了我们设计的变空间频率的全息扫描镜。

2 全息扫描镜原理

全息扫描镜作为激光扫描器偏转元件功能在

某种意义上类似通常扫描器中作为偏转元件的多面体反射镜。它是用全息光栅来替代多面体中的每个反射镜面,这种全息光栅可以是两个平面波记录的等间距空间频率的。也可以是平面波和球面波记录的波带板结构,或者是两个球面记录的光栅,统称为变空间频率光栅。把扫描镜作成一个大圆盘,圆盘上分成多个扇形。每个扇形是上述的一个全息光栅(称为子全息图),当用激光照明旋转的圆盘,扫过子全息图,其衍射像点便形成一条扫描线。若每个子全息图选取不同的参数和记录方式,便会得到多方位、多焦距的扫描线,实现空间不同方位,不同焦距的扫描,满足一些特殊应用的要求。由于这种子全息图制作比较简单,可大量复制、价格低廉,因此全息扫描镜很容易实现小型化,降低对驱动器的要求,实现高速扫描。

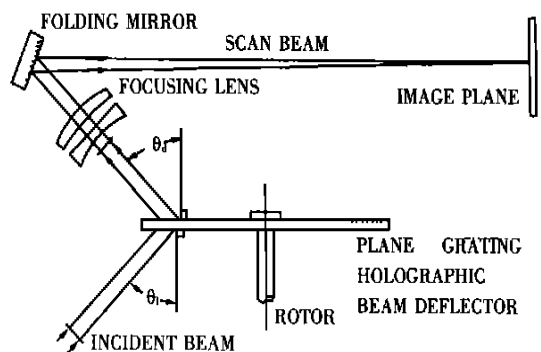


Fig. 1 Plane grating holographic scanner

由等空间频率的子全息图构成的全息扫描镜具有低的扫描直线位移误差,对扫描盘的径向误差和摆动不敏感,但必须要有附加光学部分,如准直透镜和 F-θ 透镜等,其结构如图(1)。

变空间频率子全息图构成的全息扫描镜,它本身具有等空间频率子全息图全息扫描镜的附加光学部分的功能,即自聚焦功能,但对盘子的摆动,径向误差较等空间频率全息扫描镜灵敏。这种类型扫描镜可以实现小型化,随着激光二极管的长足发展,用它来做扫描镜的照明光源是最好的选择,为了克服激光二极管由于温度效应引起波长飘移对扫描性能影响的因素,已研制了仅有全息扫描盘和附加全息透镜组成的纯全息扫描器^[4],结构如图(2)所示。

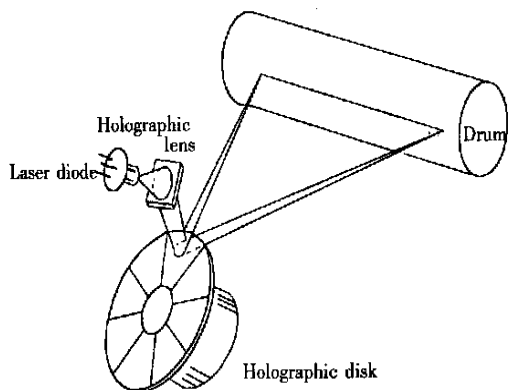


Fig. 2 All holographic line scanner

变空间频率全息扫描镜子全息图空间频率分布分别如图(3)、图(4)所示。图(3)是由平面波与点源球面波记录而成的,图(4)是用两点源球面波对称记录而成的。

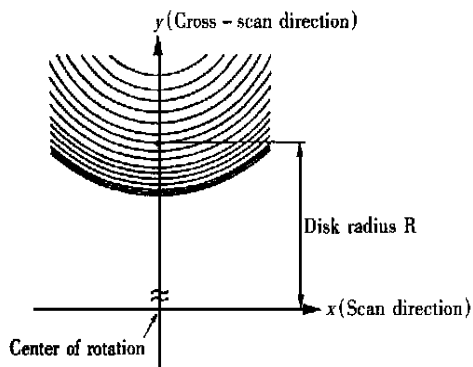


Fig. 3 Spatial frequency distribution of the holographic zone plate disk at 0° disk rotation angle

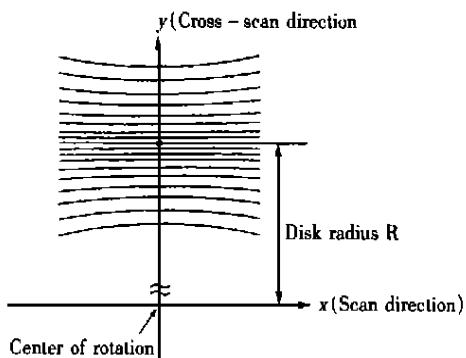


Fig. 4 Spatial frequency distribution of the holographic disk using a divergent spherical wave as the reference wave at 0° disk rotation angle

3 全息扫描直线性分析

全息扫描镜不论应用在什么方面,都必须是具有小的线偏移误差和高分辨扫描光点的直线扫描。通常全息图用参考光共轭光照明时,会产生无像差的像,若是点源全息图将产生一无像差的点像,旋转此点源全息图则产生一弧形扫描线。要想获得直线扫描的一种方法是采用圆柱形全息扫描镜(不加其他辅助反射器等光学元件),用发散的球面波照明旋转的圆柱形全息扫描镜,发射球面波的点源正好位于旋转轴线上^[1],衍射主光线垂直入射到平场像平面,产生直线扫描,如图(5)所示。但这种圆柱形扫描镜制作起来非常困难,而且设计也比较复杂,失去了全息扫描镜作为扫描偏转元件的优越性。

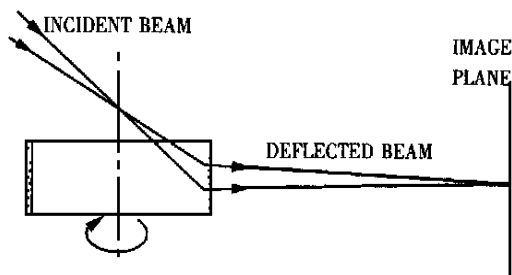


Fig. 5 Cylindrical holographic beam deflector

实际上,全息图是一相位变换元件,它可使入射波阵面通过全息图变成具有另外一种波阵面的出射波,也就是相位变化。正因为如此,我们可以基于全息图相位和相位传递函数的方法,适当地设计全息图的制作及重构,便可获得我们所需要的理想结果。文献(5)基于上述分析方法得出利用短波长光记录全息扫描镜子全息图,使用时用长

波长光照明全息扫描镜便可获得直线扫描及小的线偏移误差。下面我们仅分析利用双球面发散波记录子全息图获得直线扫描的各记录参数之间的关系。设记录光路如图(6)所示。A、G 为两球面发散波点源, F_1 、 F_2 分别为 G、A 两点到扫描盘的垂直距离, D 是点源 A 在圆盘平面上的投影, y_2 是 D 点到圆盘中心的距离, R 是圆盘中心和重构光主光线与圆盘交点间的距离, 设 G 点在圆盘上的投影为圆盘旋转中心。记录波长为 λ_1 , 其波数为 $K_1 = 2\pi/\lambda_1$, 重构光波长为 λ_2 , 其波数为 $K_2 = 2\pi/\lambda_2$, 且 $\lambda_2 > \lambda_1$, 比值为 $S = \lambda_2/\lambda_1$ 。

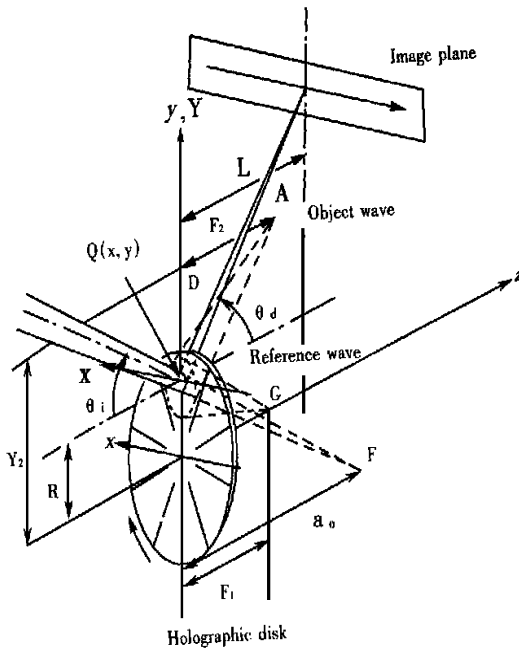


Fig. 6 Parameters for a straight-line scanning holographic disk

设重构波是入射角为 θ 的会聚球面波, 会聚点为 F , F 距圆盘中心为 a_0 , x - y - z 坐标是确定在圆盘平面上, $Z = 0$ 是全息圆盘的平面, L 是像平面距圆盘的垂直距离, (X, Y) 是重构波主光线与圆盘交点 Q 的坐标。当圆盘旋转 θ 角时, 扫描位置 $[x(\theta), y(\theta)]$ 及由圆盘衍射光的相位函数 $\mathcal{Q}(X, Y)$ 由下式给出^[6]

$$\mathcal{Q}(X, Y) = -K_2[X^2 + (Y + a_0 \tan \theta)^2 + a_0^2]^{1/2} + K_1\{[X^2 + (Y + R)^2 + F_1^2]^{1/2} - [X^2 + (Y + R)^2 + Y_2^2 - 2y_2(X \sin \theta + (Y + R) \cos \theta) + F_2^2]^{1/2}\} \quad (1)$$

$$\sin \theta_1 = SR / (R^2 + F_1^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$x(\theta) = LSy_2 \sin \theta / [(1 - S^2) \cdot$$

$$(R^2 + y_2^2 - 2y_2R \cos \theta) + F_2^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$y(\theta) = LS(y_2 \cos \theta - R) / [(1 - S^2) \cdot (R^2 + y_2^2 - 2y_2R \cos \theta) + F_2^2]^{1/2} \quad (4)$$

扫描中心的衍射角由下式给出:

$$\sin \theta_d = S(y_2 - R) / [(y_2 - R)^2 + F_2^2]^{1/2} \quad (5)$$

由上述方程式可求出衍射波的方向余弦为:

$$l(\theta) = \frac{1}{K_2} \frac{\partial \mathcal{Q}(0, 0)}{\partial X} = \frac{Sy_2 \sin \theta}{[R^2 + y_2^2 - 2y_2R \cos \theta + F_2^2]^{1/2}} \quad (6)$$

$$m(\theta) = \frac{1}{K_2} \frac{\partial \mathcal{Q}(0, 0)}{\partial Y} = \frac{Sy_2 \cos \theta}{[R^2 + y_2^2 - 2y_2R \cos \theta + F_2^2]^{1/2}} \quad (7)$$

对扫描轨迹为直线的条件是:

$$\frac{\partial y(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

即:

$$F_2 = [(s^2 - 1)y_2(y_2 - R \cos \theta)]^{1/2} \quad (9)$$

θ 是评价直线扫描的一个重要参数, 它是扫描线由凹变凸时, 圆盘旋转的角度。方程式(9)表明子全息图记录波长必须小于重构波长才能获得直线扫描。这非常适合于目前的工艺技术, 因为具有高衍射效率的介质如 DCG、光致抗蚀剂等都是对短波长比较敏感, 而长足发展的近红外波段的激光二极管可作为扫描器的照明光源。对扫描中心是扫描线拐点的, 即 $\theta = 0$, 这是我们设计扫描镜为直线扫描的依据。考虑到如何降低由盘子的摆动引起的扫描点位置变化, 设 $d\theta$ 是由于盘子摆动 $d\mathcal{Q}$ 引起的衍射角的变化, 其近似表示式:

$$d\mathcal{Q} = [(1 - \frac{\cos(\theta + \mathcal{Q})}{\cos(\theta_d - \mathcal{Q})})] d\mathcal{Q} \quad (10)$$

为了使衍射角误差最小, 入射角 θ 必须等于衍射角 θ_d , 这是由(2)和(5)式决定的:

$$F_1^2[F_2^2 + (y_2 - R)^2]^{3/2} = F_2^2[F_1^2 + R^2]^{3/2} \quad (11)$$

综述上述讨论, 满足直线扫描条件, 又满足使盘子的半径误差及摆动对衍射角变化最小的最大容许误差条件, 只有:

$$F_1 = F_2 \quad y_2 = 2R \quad (12)$$

也就是说, 记录子全息图两点源球面波在入射角是对称的。对扫描中心是扫描线由凹变凸(拐点)变为直线扫描的要求, 其扫描镜子全息图制作时各参数之间的关系是:

$$F_1 = F_2 = R \sqrt{2(S^2 - 1)} \quad y_2 = 2R \quad (13)$$

$$a_0 = L = SR \sqrt{S^2 - 1} \quad (14)$$

4 全息扫描镜像差校正

由前面的分析得出, 要获得直线扫描的首要条件是要用比记录子全息图的光波波长大得多的光波照明全息扫描镜。用不同于记录全息图的光波重现全息图必然产生像差。对于全息扫描镜的应用来说, 不仅要求扫描直线性, 而且还要求其扫描像点质量要好, 光点要小, 能量要集中, 这就要求必须校正由于波长变化引起的像差。根据全息图的特点, 采用像差相互抵消的原理, 我们可先用再现光波(红光)制作一张所需波前的母版全息图, 然后用短波长光波(兰光或紫光)在 DCG 或光致抗蚀剂上复制全息图, 复制的全息图带有红光到兰光或紫光移动过程产生的像差, 把复制后的全息图用在原来的红光下使用, 这样两次产生的像差相互抵消。实际上考虑到全息图是一相位变换元件。我们可以基于全息图的相位函数计算出由于波长移动产生的附加相位变化, 为消除此相位变化, 用全息方法记录一能产生此相位变化的全息图, 也可用计算机产生具有此相位变化的全息图。用长波长光重现此全息图, 产生的衍射光入射到全息扫描镜上, 这样由全息扫描镜衍射的光便可消除由于波长移动产生的像差, 从而获得高质量的衍射像点, 满足其应用要求。用此方法制作的附加全息图可以与全息扫描镜一起构成一个没有任何附加光学元件的纯全息扫描器了。

5 变空间频率全息扫描镜的设计

基于上述分析, 我们设计了一变空间频率分布的全息扫描镜, 具体参数如下: 扫描盘直径 100mm, 子全息图数目 $n = 8$, 其扇形径向距离 35mm, $R = 40\text{mm}$, $y_2 = 80\text{mm}$, 两点源尺寸 $< 50\mu\text{m}$, 记录波长 $\lambda_1 = 0.442\text{nm}$, 再现波长 $\lambda_2 = 0.633\text{nm}$, 点源距盘子的距离 $F_1 = F_2 = 58\text{mm}$, 两主光线夹角 69.18° ; 记录介质用 DCG, 重构光以 $\theta = 54.6^\circ$ 会聚入射至全息扫描镜上, 会聚点距盘子的距离为 $a_0 = 59\text{mm}$, 其记录光路如图(7)所示。所设计扫描盘的直线扫描误差在 $\pm 0.5\text{mm}$, 如果机械设计严格一些, 可能会更好。全

息扫描镜的照片如图(8)所示。

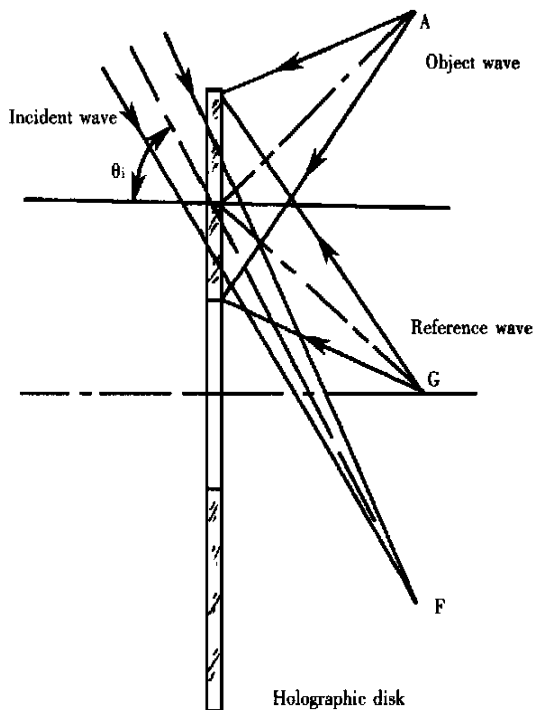


Fig. 7 Design of variable spatial frequency holographic scanning disk

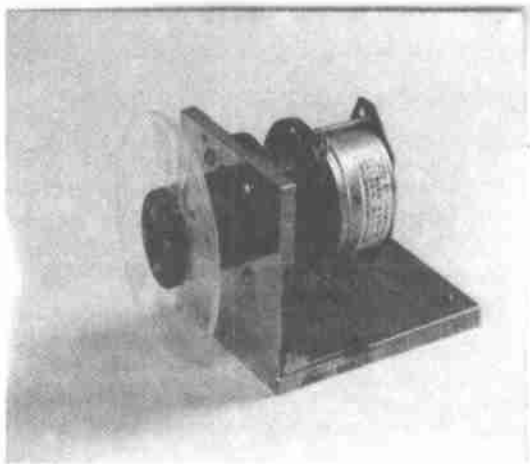


Fig. 8 Photo of holographic scanning disk

6 结 论

基于全息图相位及相位传递函数方法, 分析得出利用双球面发散波在入射点处对称记录子全息图, 用不同于记录波长的长波长光波重构旋转全息扫描镜, 可以得到直线扫描特性。利用记录附加相位全息图的方法可使全息扫描镜产生高质量的衍射光束, 形成无像差的像点, 组成一个仅有全息扫描镜和附加相位全息图的, 无任何光学元件的纯全息扫描器。

参考文献:

- [1] Kramer C J. Holographic laser scanner for nonimpact printing[J]. Laser Focus, 1981, 17: 70- 82.
- [2] One Y, Nishida N. Holographic disk scanner for bow-free scanning[J]. Appl. Opt. 1983, 22(14): 2132- 2136.
- [3] Hiroyuki, et al. Compact POS scanner using new holographic technology[J]. Proc. SPIE, 1988, 183: 207- 213.
- [4] Hasegawa Shin-Ya, et al. All holographic line scanner for use in diode laser printers[J]. Proc. SPIE, 1989, 1136: 119- 123.
- [5] Hasegawa Shic-Ya, et al. Straight-line scanning analysis of an all holographic scanner[J]. Appl. Opt., 1989, 28 (24): 5317- 5325.
- [6] Hasegawa Shic-Ya, et al. Wavefront aberration correction analysis of an all straight-line scanner[J]. Appl. Opt., 1991, 30(7): 823- 832.

Straight-line scanning analysis and aberration correlation of holographic scanning disk

ZOU Zhen-shu

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)*

Abstract: The paper described the principle of holographic scanning disk. The constructions of the holographic scanning disk with fixed spatial frequency distribution and variable spatial frequency distribution were given. The condition of straight-line scanning generated by holographic scanning disk was analysed based on the method of hologram phase and phase transfer function. It derived the relation between parameters of recording sublet hologram of holographic scanning disk. The result of straight-line scanning of holographic scanning disk were presented based on the difference between the constructed and reconstructed wavelengths and the method of aberration correction. The effect of disk wobble and decentre on the scanning characteristic of holographic scanning disk was analyzed. Finally, the paper introduced the design of holographic scanning disk with variable spatial frequency distribution.

Key words: holographic scanning disk; straight scanning; aberration correction

作者简介: 邹振书(1942-),男,山东龙口市人。1965年毕业于山东大学物理系,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员。主要从事光学信息处理、激光技术、全息及干涉计量等工作,负责主持研究的“扫描多光谱显微成像”获中国科学院科技进步二等奖,参加研究的“逆合成孔径雷达总体及处理技术”获中国科学院长春分院科技进步三等奖,先后在国内外科技刊物上发表 30 余篇论文。