

# 激光片光三维传感中 降低散斑影响的新方法\*

苏显渝 李杰林 李继陶

(四川联合大学光电科学技术系, 成都 610064)

**摘 要** 提出一种激光片光三维传感中降低散斑影响的新方法: 片光面内扫描合成孔径法。通过向被测物体表面投射面内扫描的片状激光束, 产生空间变化的动态散斑光场, 这样的光场在成像透镜光瞳平面上的移动, 其时间平均效果等效于利用了一个大的“合成孔径”, 降低了散斑的影响, 明显地提高了测量精度。文中给出了合成孔径的理论分析和三维面形测量的实验结果。

**关键词** 三维传感, 散斑。

## 1 引 言

基于三角法距离测量原理。采用激光片光照明的三维面形传感器, 通过投射一片状激光束(也称激光片光)到被测物体表面, 在物体表面形成一投影亮线, 从与投影方向不同的另一个方向观察该线, 由于受到物体高度的调制, 该亮线发生变形, 通过对像面上亮线像坐标的计算可以得到物体上一个剖面的高度数据, 如果再加上一维扫描就可以得到三维面形分布<sup>[1~3]</sup>。采用激光片光的三维传感系统, 其测量精度主要取决于对亮线像中心的定位精度。人们曾试图通过技术上的改进, 例如: 减少电信号噪声, 增加探测器分辨单元数目等, 提高测量精度, 但研究表明, 测量精度的限制还来自物理上的原因, 激光散斑对三角法测量精度具有重要的影响<sup>[4]</sup>。降低散斑影响, 提高激光三角测量系统精度, 一直是三维传感领域国内外普遍关注的问题。为了减弱散斑的影响, 人们已经研究了几种方法, 包括热空气扰动法, 孔径内扫描法等<sup>[4, 5]</sup>。采用这些方法, 虽然深度分辨率有所提高, 但都以牺牲横向分辨率为代价, 具有明显的局限性<sup>[5]</sup>。本文提出了在激光片光照明的三维传感系统中采用投影激光片光的面内扫描来降低散斑影响的方法。采用激光片光的面内扫描, 可以在保持理想几何像不变的情况下, 产生空间变化的动态散斑光场, 这样的光场在光瞳平面上平移, 其时间平均的效果, 可看作利用了多个孔径, 将这些孔径的总和称之为“合成孔径”。合成孔径的采用降低了散斑影响, 明显提高了测量精度。与原有方法不同, 采用本文提出的方法, 在提高深度分辨率的同时, 横向分辨率可以保持不变。文中给出了合成孔径的理论分析和实验结果。

\* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1995 年 10 月 30 日

## 2 光强合成孔径的理论分析

采用激光片光面内扫描的三维传感系统原理如图 1 所示。图中激光器 1 发出的激光经过一柱透镜 2 后, 发散为片状光束 4。带有平面反射镜的扫描装置 3, 能以转轴 10 为中心转动或振动, 片光平面与反射镜垂直, 使投影在被测物体 5 表面的激光片光在片光平面内进行面内扫描的片光在物体表面形成一投影亮线, 从与投影方向成一定夹角的另一观察方向上用二维探测器阵列接收片与物体表面交线的像, 通过计算<sup>[2]</sup>, 可以得到物体表面一个剖面上的高度分布, 高度分辨率受像点坐标测量精度的限制。

在图 2 中所示的成像系统中, 物平面和观察平面分别用  $(X', Y')$  和  $(X, Y)$ 。 $\Sigma$  是成像透镜,  $\Sigma$  上的坐标是  $(x, y)$ ,  $\theta$  是照明的入射角。由于物体表面的微观起伏, 在透镜平面  $\Sigma$  形状具有散斑结构的波面, 并通过透镜成像过程进一步在像面上形成叠加有散斑的像。

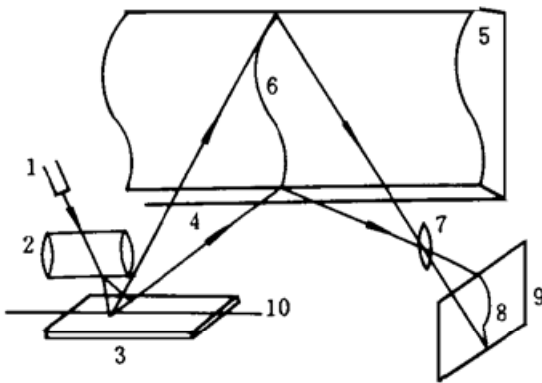


Fig. 1 Laser sheet 3-D sensing geometry using in-plane scan

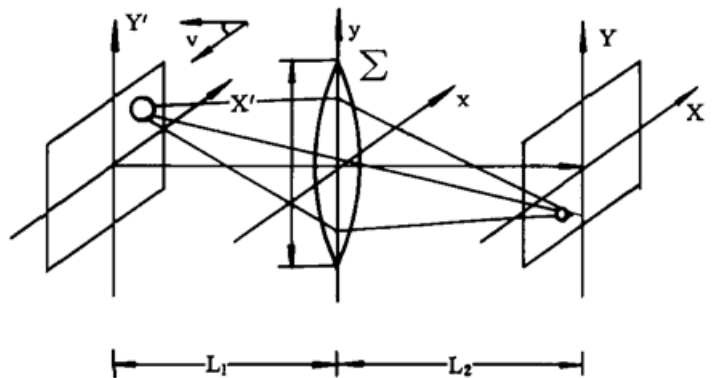


Fig. 2 Physical representation forming an image speckle

改变入射角  $\theta$  为  $\theta + \delta\theta$ , 在光瞳平面  $\Sigma$  产生的效果是两方面的<sup>[6]</sup>。1) 散斑图形在相应于  $\theta$  的方向上有一个平移, 2) 第一个和第二个散斑图形之间相关性随  $\theta$  的增加而减少。即散斑图样发生变形, 当被测物体的粗糙度在一定范围内, 例如小于  $20 \mu\text{m}$  时, 散斑变形的影响较小, 因而可以忽略。散斑图形的平移可以表示为:

$$\Delta = l_1 \cos \theta \delta\theta \tag{1}$$

散斑光场在光瞳平面上的移动, 相当于光瞳在散斑场上的移动, 其时间平均效果, 等效于一个大的合成孔径, 因而降低了散斑的影响。进一步的理论分析和实验结果都证实了这种合成孔径概念的正确性。

对于本文采用的激光片光投影, 在理想情况下(假定无散斑影响), 像的强度剖面为高斯分布, 但是像面散斑的存在破坏了其对称性。假定  $I(X, Y)$  是片光(像)的光强分布, 定义一个片光重心函数  $X_m$ <sup>[7]</sup>:

$$X_m(Y) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X I(X, Y) dX}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(X, Y) dX} \tag{2}$$

式中  $Y$  坐标与片光(像)平行, 为简便起见, 在归一化光强的假定下, 片光重心函数记为:

$$X_m(Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} X I(X, Y) dX \tag{3}$$

由于像面散斑是随机起伏的, 所以  $X_m(Y)$  是一个随机变量, 当片光在面内扫描时, 对于两个不同的入射角  $\theta_1$  和  $\theta_2 = \theta_1 + \delta\theta$ , 片光中心扰动的互相关函数  $\Gamma_{X_m}(\delta\theta)$  可表示为:

$$\Gamma_{X_m}(\delta\theta) = \langle X_m(\theta_1) X_m(\theta_2) \rangle - \langle X_m(\theta_1) \rangle \langle X_m(\theta_2) \rangle \quad (4)$$

式中  $\langle \rangle$  为取平均值, 根据散斑统计理论, 假定  $X_m$  的均值为 0, 并采用归一化表示, 得到:

$$\Gamma_{X_m}(\delta\theta) = \frac{\langle X_m(\theta_1) X_m(\theta_2) \rangle}{\sqrt{\langle X_m^2(\theta_1) \rangle \langle X_m^2(\theta_2) \rangle}} \quad (5)$$

(5) 式表示片光在面内扫描时, 两个入射角度之间散斑像的相关性, 当  $\Gamma_{X_m}(\delta\theta) = 1$ , 表示两个散斑像是完全相同的。对应  $\delta\theta = 0$  的情况; 当  $\Gamma_{X_m}(\delta\theta) = 0$ , 则表示它们是完全不同的。只考虑 X 方向上的统计分布, 可以得到<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} \langle X_m(\theta_1) X_m(\theta_2) \rangle &= \left\langle \int_{-\infty}^{+\infty} X_1 I(\theta_1, X_1, Y_1) dX_1 \int_{-\infty}^{+\infty} X_2 I(\theta_2, X_2, Y_2) dX_2 \right\rangle \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} X_1 X_2 \langle I(\theta_1, X_1, Y_1) I(\theta_2, X_2, Y_1) \rangle dX_1 dX_2 \end{aligned} \quad (6)$$

由散斑统计理论<sup>[8]</sup>, 系综平均

$$\langle I(\theta_1, X_1, Y_1) I(\theta_2, X_2, Y_1) \rangle = \langle I(X_1, Y_1) \rangle^2 [1 + |\mu(\theta_1, \theta_2, X_2 - X_1)|^2] \quad (7)$$

在(7)式中,  $\langle I(X_1, Y_1) \rangle$  是对应于非相干光源时光场的扰动,  $||$  表示取模,  $\mu(\theta_1, X_2 - X_1)$  是复相干因子。当只考虑涨落项时, (6) 式可写为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} \langle X_m(\theta_1) X_m(\theta_2) \rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} X_1 \langle I(X_1, Y_1) \rangle \int_{-\infty}^{+\infty} X_2 \langle I(X_2, Y_1) \rangle \\ &\quad \times |\mu(\theta_1, X_2 - X_1) \mu^*(\theta_2, X_2 - X_1)| dX dX_2 \end{aligned} \quad (8)$$

因为第二个积分只在  $X_1$  附近小范围取值<sup>[7]</sup>, 该公式变为

$$\langle X_m(\theta_1) X_m(\theta_2) \rangle = A_c \int_{-\infty}^{+\infty} X^2 \langle I(X, Y) \rangle^2 dX \quad (9)$$

$$A_c = \int_{-\infty}^{+\infty} |\mu(\theta_1, \Delta X) \mu^*(\theta_2, \Delta X)| d\Delta X \quad (10)$$

$$\Delta X = X_1 - X_2$$

正如前文指出的, 散斑光场在光瞳平面上的移动, 等效于光瞳在散斑场上的移动, 按照文献[9]的结论, 两个不同孔径的光场强度互相关函数等于两孔径重叠面积与孔径总面积比的平方, 与圆孔光学传递函数的计算方法类同, 有:

$$A_c = \begin{cases} [2 \cos^{-1}(\Delta/2r) - (\Delta/r) \sqrt{1 - (\Delta/2r)^2}]^2 / \pi^2, & 0 \leq \Delta \leq 2r \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

结合(5)式, (9)式和(11)式, 得到片光重心互相关函数

$$\Gamma(\delta\theta) = \begin{cases} \left[ 2 \cos^{-1}\left(\frac{l_1 \cos \theta \delta\theta}{2r}\right) - \frac{l_1 \cos \theta \delta\theta}{r} \sqrt{1 - \left[\frac{l_1 \cos \theta \delta\theta}{2r}\right]^2} \right]^2 / \pi^2, & 0 \leq \delta\theta \leq \frac{2r}{l_1 \cos \theta} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

### 3 实验结果

实验装置的原理光路如图 1 所示,光源采用氩-氖激光器,激光束经柱透镜和带平面反射镜的扫描机构后,形成一面内扫描的片状光束,投射到被测物体表面,片光像由一个 CCD 摄像机(MTV1881-CB)接收,送入 PC 386 微机内的帧存储器(PCVISION),然后用微机进行数据处理。由采样数据,可以计算片光每一截面能量分布中心(即重心),每截面的重心构成片光的重心线。首先选被测物体表面为平面改变入射光束扫描角度(面内旋转),实测在不同角度下片光重心线,然后计算片光重心互相关函数,实验结果如图 3 所示。图中  $\delta\theta_1$  是入射角的变化量,  $\Gamma_{x_m}$  是互相关函数,实线是理论值,星号是实测值、实验表明随入射角变化量的增加,片光重心互相关函数值下降,理论分析和实验结果有较好的一致性。实验中  $\theta_1 = 51.4^\circ$ ,  $L_1 = 240 \text{ mm}$ , CCD 成像透镜焦距为 16 mm, 光圈 4.0, 被测平面表面粗糙度约为  $2.0 \mu\text{m}$ 。从图中可看出,  $\delta\theta_1$  大约变化  $30'$ , 相关值降为  $1/e$ , 作者认为片光重心线已经退相关。

在上述实验基础上, 本文将  $N$  帧退相关的片光像叠加, 并计算重心线, 分别取  $N = 1, \dots, 10$ , 实验结果如图 4 所示, 图中横坐标是参与叠加的片光像的个数, 纵坐标是从叠加像计算的合成片光重心线方差, 为说明这种非相干叠加的效果, 图中显示的是相对与单帧方差的归一化值。应指出的是, 激光片光的面内扫描, 并不改变片光理想像(在实验中表现为拟合的直线)的位置。多帧非相关像的叠加, 使散斑的影响明显降低。

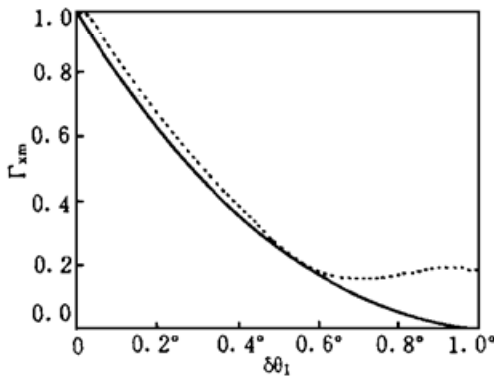


Fig. 3 Cross correlation function of the centroid as a function of the incident angle

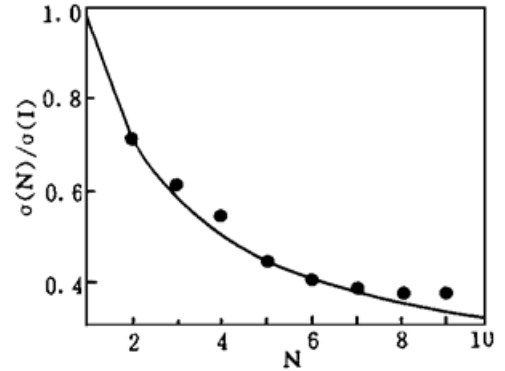


Fig. 4 Decrease of speckle noise using superposition of uncorrelated speckle images

在理论分析和实验的基础上, 采用了一个振镜代替手动调节的反射镜, 产生连续的片光面内扫描, 扫描角度约为  $3^\circ$ , 扫描频率 50 Hz, 获取单帧图像计算片光重心线。实际结果如图 5 所示。图 5(a) 是振镜未接通驱动电路(静止)的测量结果, 图 5(b) 是振镜接通驱动电路(扫描)的测量结果。片光重心线的方差分别为  $1.29 \mu\text{m}$  和  $0.69 \mu\text{m}$ 。提高扫描频率和增大扫描角度将进一步提高测量精度。

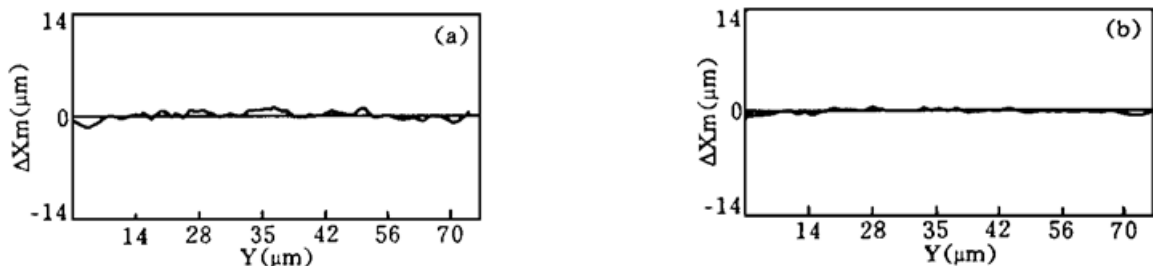


Fig. 5 In-plane scan using a vibrating mirror

(a) centroid line distribution without in-plane scan; (b) scan with vibrating mirror

**结 论** 入射光扫描合成孔径法是基于这样的认识: 随着入射光角度的改变, 成像系统光瞳平面上的散斑将发生平移和变形, 引起像面散斑同样的变化。在三维传感系统中, 激光片光的面内扫描, 将不改变理想像的位置, 但叠加在理想像上的散斑发生了变化。多帧像叠加的结果降低了散斑的对比, 使对理想像的测量具有更高的精度。因此对于散斑像的形成, 等效于采用了一个比物理孔径更大的合成孔径, 减弱了散斑的影响。

本文对入射光扫描合成孔径法进行了理论分析, 研究了片光面内扫描对像面散斑的影响, 针对片光型三维传感系统, 提出片光重心互相关函数的概念。实验结果与理论分析的结论基本符合, 实验表明, 所提出的方法可以明显提高三维传感系统的测量精度, 具有广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Xianyu Su, Bo Jia, A method for the generation of light knife and its application in 3-D sensing. *Proc. SPIE*, 1990, **1319**: 362~ 370
- [2] 贾 波, 苏显渝, 郭履容, 用光刀投影的叶片三维面型测量方法. *中国激光*, 1992, **19**(4): 271~ 280
- [3] Xiaoxue Cheng, Xianyu Su, Lurong Guo, Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(10): 1274~ 1280
- [4] W. Dremel, G. Hausler, M. Maul, Triangulation with large dynamic range. in Proceeding on Optical Techniques in Industrial Inspection, P. Cielo, ed, *Proc. SPIE*, 1986, **665**: 182~ 187
- [5] Rejean Baribeau, Marx Rioux, Influence of speckle on laser range finders. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(20): 2873~ 2878
- [6] D. Leger, E. Mathieu, J. C. Perrin, Optical surface roughness determination using speckle correlation technique. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(4): 872~ 877
- [7] R. Baribeau, M. Rioux, Influence of speckle in laser range finder. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(24): 3725~ 3730
- [8] J. W. Goodman, *Statistical Optics*, New York, Wiley, 1985
- [9] T. S. Meckechnie, *Laser Speckle and Related Phenomena*, ed. J. C. Dainty, New York, Springer-Verlag, 1984: 300~ 350

## A New Method for Reducing Speckle in Laser 3-D Sensing

Su Xianyu    Li Jielin    Li Jitao

(Department of Opto-electronics, Sichuan Combine University, Chengdo 610064)

(Received 30 October 1995)

**Abstract** A new method combined aperture by in-plane-scanning laser sheet for reducing speckle in laser sheet 3-D sensing is suggested. Scanning the laser sheet within the sheet plane, a dynamic speckle field is shifted on the image lens of CCD camera. Image speckel is occurred on the image plane of CCD, the time integration of the CCD equals to averaging of the image speckle. So the speckle noise is reduced. This method is similar to the moving aperture within a "combined lens" on the image lens, which is larger than the actual aperture. An analytical description is presented and verified experimentally.

**Key words** 3-D sensing, speckle.