

一种激光三维传感中提高深度分辨率的方法*

李万松 苏显渝 李继陶

(四川联合大学光电科学技术系, 成都 610064)

提要 提出了一种在用激光片光做光源的三维传感中提高深度分辨率的方法, 在牺牲少量横向分辨率的情况下, 利用激光片光在物面上几个相邻区域产生的部分退相关的光强分布进行多帧平均, 从而部分抑制激光散斑的影响, 提高深度分辨率。实验结果表明, 在横向分辨率下降约 20% 的条件下, 深度分辨率提高了近一倍。

关键词 激光三维测量, 激光片光, 散斑, 相关

1 引言

光学的三维面形检测, 由于其非接触、高精度、易于自动控制等优点, 日益受到人们的重视。现有的方法包括莫尔条纹法(MT)^[1]、傅里叶变换轮廓术(FTP)^[2]、位相测量轮廓术(PMP)^[3]、光学三角测量法^[4,5]等。就其本质而言, 都是通过分析受到三维物体面形调制的空间光场, 从而获得高度信息。这些方法已广泛地应用于机器人视觉、实物仿形、自动加工等领域。

光学三角测量法, 由于新的光电扫描技术与光电探测器件的发展, 加之微机的控制和数据处理, 使这种方法有了许多新的进展和应用。现代激光三角测量技术具有速度快、精度高、测量范围大等优点, 是三维传感领域中的一个重要发展方向。

在用激光片光做光源的三角测量法中, 一个重要的问题就是如何克服激光散斑的影响。物体表面某一点的高度是由该点在 CCD 表面所成像点的位置决定的, 如果光点在像面上扩展到几个像素的区域, 在不考虑散斑的情况下, 使用恰当的算法(如重心法、中值法), 可以使像点定位精度达到亚像素级。但散斑的存在, 造成像面光强分布的不均匀, 严重破坏深度分辨率。

我们已经提出一种基于在入射面内旋转光刀来提高深度分辨率的方法^[6], 此方法需要不断改变光刀的入射方向, 实验装置较复杂。本文提出的方法操作机构十分简单, 它基于横向移动被测物体, 即在测量物体的某一剖面时, 在此剖面附近的一个极小范围内进行多次测量, 每次测量时都将物体沿剖面平面的法线方向平移一个小的位移, 从而得到多个剖面高度数据。由于这多组数据都是在待测剖面附近的一个极小范围内获得的, 被测物体在此范围内的高度变化将远小于由于散斑造成的高度测量误差。因此, 只要这多组数据间由于散斑造成的误差分布的相关性很小, 把这些数据相加后平均, 就能在一定程度上降低散斑的影响。横向移动被测物体势必降低了横向分辨率, 本文通过理论分析和详细的实验结果表明, 在很小的横向位移上,

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年12月25日; 收到修改稿日期: 1996年4月8日

CCD 像面各光刀像强度分布的相关性便有很大的下降。因此只要牺牲少量的横向分辨率,深度分辨率就能大大提高。

2 基本原理

采用激光片光的光学三角测量法如图 1 [图 1(a) 中只画出了一维情况], 激光束沿投影光轴投射到物面, 在另一个方向上, 光场的像被 CCD 接收。通过几何关系可得^[5]:

$$Z = OH = \frac{(OI - f)\Delta \sin(\alpha)}{f \sin(\theta) + \Delta \sin(\alpha) \cos(\theta)} \quad (1)$$

其中 f 为成像系统的焦距, OI 为成像系统到参考平面的距离, 图 1(a) 中, M 点为参考平面上 O 点在 CCD 平面上所成的像点, N 点为在参考平面处放上被测物体后, 物面上的 H 点在 CCD 平面上所成的像点, Δ 为 M 和 N 之间的距离。

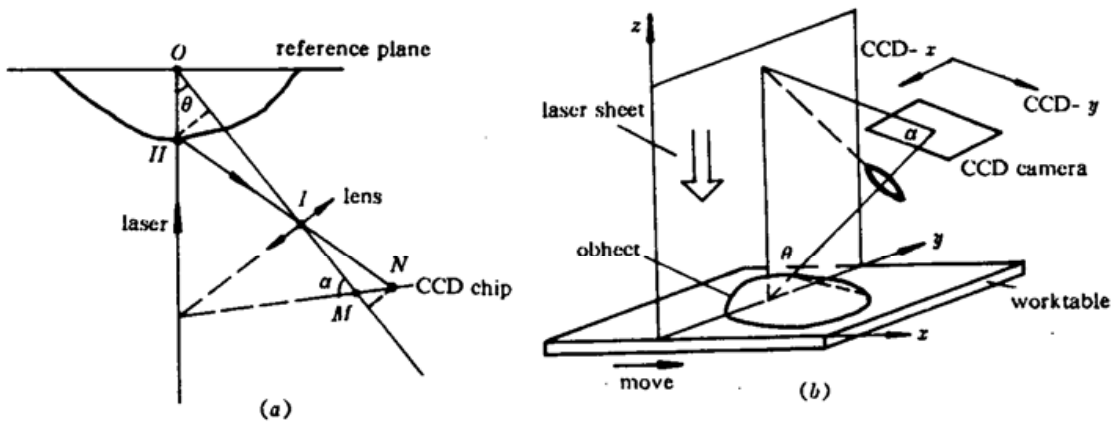


Fig. 1

(a) laser triangulation geometry; (b) experimental setup. The object is fixed on the worktable. It is movable along the direction of x by a setp motor

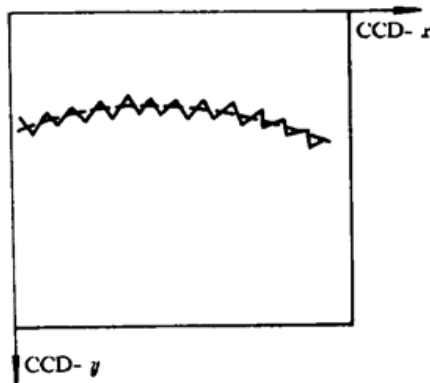


Fig. 2 The centroid line of laser sheet in CCD surface. The dashed one is the geometric centroid line and the solid one is the measured line. The speckle is the main source for the fluctuation

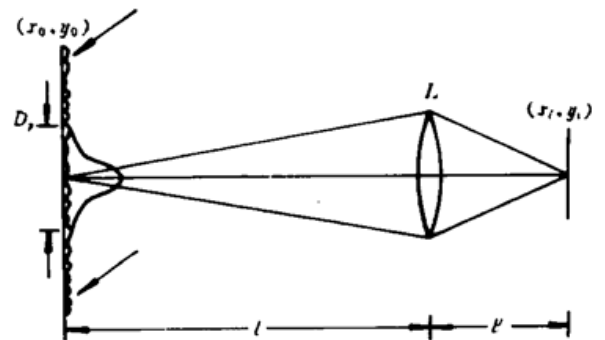


Fig. 3 Formation of the image speckle. The intensity of a point in the image plane is determined by the points in the area, which is determined by the point spread function, in the object plane

物点高度 OH 与该点在 CCD 像面上的位置 Δ 是一一对应的非线性关系。 Δ 的测量精度主要取决于激光散斑的影响。由于散斑的存在, 通过 CCD 像面光强分布计算出的光刀重心同物点的几何像之间存在着一定的误差, 如图 2。对于 CCD 像面散斑的形成, 如图 3, 其中 x_0y_0 面为物平面, xy 面为 CCD 探测器表面, Σ 为透镜所在平面, 透镜到物平面的距离为 l , 透镜通光口径为

D 。由于系统点扩展函数的存在,像面上每一个点的光场是物平面内一个小区域内光场贡献的总和。当物面粗糙度与光波长相比足够粗糙时,物面反射的光场服从圆复高斯分布,光波干涉的结果使像点光场随机起伏,产生散斑噪声。

设入射到物面上的光场为 $U(r_0)$, 用 $R(r_0)$ 表示物面的复振幅反射率, 用 $A_0(r_0)$ 表示当 $U(r_0)$ 和 $R(r_0)$ 均为 1 时, 物体表面处的出射场, 它是由物体表面的微观结构所决定的, 为复数值。用 $h(r - r_0)$ 表示成像系统的振幅扩展函数, 于是散斑像的复振幅可表示为

$$A_i(r) = \int_{-\infty}^{\infty} U(r_0)R(r_0)A_0(r_0)h(r - r_0)dr_0 \quad (2)$$

若以 $I_i(r) = A_i(r)A_i^*(r)$ 表示散斑像的光强, 则其均值可表示为:

$$\langle I_i(r) \rangle = \langle A_i(r)A_i^*(r) \rangle \quad (3)$$

式中 $\langle \dots \rangle$ 表示对系综求平均, 将(2)式代入(3)式得:

$$\langle I_i(r) \rangle = \iint_{\infty} U(r_0)U(r'_0)R(r_0)R(r'_0)h(r - r_0)h^*(r - r'_0)\langle A_0(r_0)A_0^*(r'_0) \rangle dr_0 dr'_0 \quad (4)$$

式中 $\langle A_0(r_0)A_0^*(r'_0) \rangle$ 是物体表面出射光场的自相关函数。

用 $J_0(r_0, r'_0)$ 表示, 于是(4)式写成:

$$\langle I_i(r) \rangle = \iint_{\infty} J_0(r_0, r'_0)U(r_0)U(r'_0)R(r_0)R(r'_0)h(r - r_0)h^*(r - r'_0)dr_0 dr'_0 \quad (5)$$

像强度的互相关函数可写成:

$$\Gamma_i(r, r') = \langle I_i(r)I_i(r') \rangle = \langle A_i(r)A_i(r')A_i^*(r)A_i^*(r') \rangle \quad (6)$$

用圆复高斯矩定理展开得:

$$\begin{aligned} \Gamma_i(r, r') &= \langle A_i(r)A_i^*(r) \rangle \langle A_i(r')A_i^*(r') \rangle + \langle A_i(r)A_i^*(r') \rangle \langle A_i(r')A_i^*(r) \rangle \\ &= \langle I_i(r) \rangle \langle I_i(r') \rangle + |J_i(r, r')|^2 \\ &= \langle I_i(r) \rangle \langle I_i(r') \rangle \left[1 + \frac{|J_i(r, r')|^2}{\langle I_i(r) \rangle \langle I_i(r') \rangle} \right] \\ &= \langle I_i(r) \rangle \langle I_i(r') \rangle [1 + |u_i(r, r')|^2] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $u_i(r, r')$ 为归一化复相关系数, 反映互相关函数的涨落部分的特征。其表达式为:

$$u_i(r, r') = \frac{\iint_{\infty} J_0(r_0, r'_0)U(r_0)U(r'_0)R(r_0)R(r'_0)h(r - r_0)h^*(r - r'_0)dr_0 dr'_0}{[\langle I_i(r) \rangle \langle I_i(r') \rangle]^{1/2}} \quad (8)$$

由此可见, 复相关系数与点扩展函数紧密相关, 当两个点扩展函数的重叠区域很小时, 复相关系数也趋近于零。

在图 3 所示的成像系统中, 用 He-Ne 激光器形成的光刀照明物面, 光刀宽度约为 1 mm, 物距 $l = 120$ mm, 透镜口径 $D = 3$ mm, 只要成像系统的点扩展函数具有足够的尺寸, 折算到物面后能在物体表面覆盖足够多的微面元, 则来自这些微面元的光线在同一像点叠加干涉, 从而形成散斑光强。我们用衍射受限时在物面上点扩展函数的直径 D_s 来估算这个覆盖区域:

$$D_s = 2.44 \frac{\lambda}{D} \approx 0.06 \text{ mm} \quad (9)$$

实际系统中, 由于系统的像差等因素的影响, 真实的点扩展函数的直径比 D_s 大, 但仍比光刀宽度小得多。

若入射光场不变, 而将物面向上移动, 则对应的散斑像将向下移动, 像面上某一点 r 处的强度 $I_i(r)$ 将被另一点的 r' 强度 $I_i(r')$ 所代替。

当上移的距离远小于 D , 时, r 点处前后两个光强值基本上是由相同的微面元(即同一样本)贡献的, 其相关系数 $|u_i(r, r')|$ 有较大的值; 当上移距离与 D , 相当时, 则 r 点处前后两个光强是由完全不同的微面元(即不同样本)贡献的, 其相关系数 $|u_i(r, r')|$ 有较小的值, 也就是说相邻两次强度测量值是不相关的。在三维传感系统中, 我们关心的是光刀重心的精度, 这样几帧退相关的光刀重心分布相叠加时可使噪声降低。

3 实验结果与讨论

实验装置如图 1(b)。被测物体放置于一平移工作台上, 实验中工作台在精密螺纹移动装置的带动下可沿 z 轴方向平移, 平移精度可控制在 $1 \mu\text{m}$ 以内。He-Ne 激光器发出的激光经棱镜衍射后产生一激光片光, 沿 z 轴投影到被测物体表面。CCD 照相机通过一图像采集板(美国 Pcplus)联接一台 IBM386 微机上。激光片光平面 (yz 面) 与 CCD 平面成物像关系, 即为一对共轭平面。

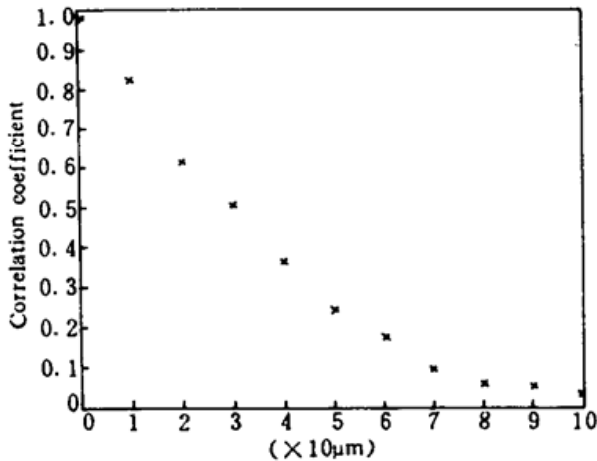


Fig. 4 Cross correlation function of the centroid as a function of the shift distance

图 4 为我们对一平面物体测得的平移距离与光刀重心线相关系数的关系曲线。横坐标为平移距离(单位: $10 \mu\text{m}$), 纵坐标为相关系数。计算相关系数时, 先固定一物体位置进行一次测量, 在 CCD 上得到一条光刀重心线, 考虑透镜成像时的像差和畸变, 我们把所得到的重心线拟合成一条光滑的高阶多项式曲线。可以认为拟合曲线克服了由于散斑造成的实测像点与几何像点之间的误差, 即该拟合曲线就是平面物体表面光刀截面在 CCD 表面所成的几何像。将实测重心线与拟合线对应点相减, 得到一条以零为均值上下随机波动的曲线, 这就是由于散斑引起的对真实重心线的涨落。

当物体平移一定距离后, 再进行一次测量, 又得到一条类似的涨落曲线, 由概率统计的方法, 可得到两个随机变量的协方差系数, 我们把它看作两条光刀重心线的相关系数。可见相关系数随平移距离的增大而迅速减小, 当平移距离为 $60 \mu\text{m}$ (衍射受限点扩展函数直径) 时, 相关系数小于 0.2。

为了估计深度分辨率提高的程度, 我们对上述平面物体的一个剖面进行了多帧平均测量。实验装置同图 1(b), 取平移步进量为 $30 \mu\text{m}$, 测量次数为 7 次, 总移动距离为 $180 \mu\text{m}$, 光刀宽度为 1mm , 可认为横向分辨率下降了 18%。对 7 帧光刀截面光强分布图分别求出光刀重心线, 进行曲线拟合之后, 得到 7 幅实测值和真实值(我们认为拟合值即真实值)之间的误差分布图, 图 5(a) ~ (c) 分别画出了第 1, 第 4 和第 7 次测量的误差分布图, 7 次单独测量的均方根误差均在 0.32 左右(单位为像素)。图 5(d) 为叠加 7 幅光刀重心线经平均之后的误差分布图, 其均方根误差为 0.164, 比叠加前下降了近一半。对比叠加前后光刀重心线误差分布图, 我们可看出由于散斑引起的随机噪声得到了明显抑制。对(1)式两边微分化简后可得:

$$\delta Z = \frac{f \sin \theta}{(OI - f) \sin \alpha} \left(\frac{Z}{\Delta} \right)^2 \delta \Delta \quad (10)$$

实际测量中 Z 远大于 Δ , Δ 的测量精度 $\delta\Delta$ 将严重影响深度 Z 的测量精度 δZ 。而 $\delta\Delta$ 可认为就是光刀重心线的均方根误差, 叠加平均后均方根误差降低了一倍, δZ 随之也降低一倍, 故我们认为深度分辨率提高了一倍。

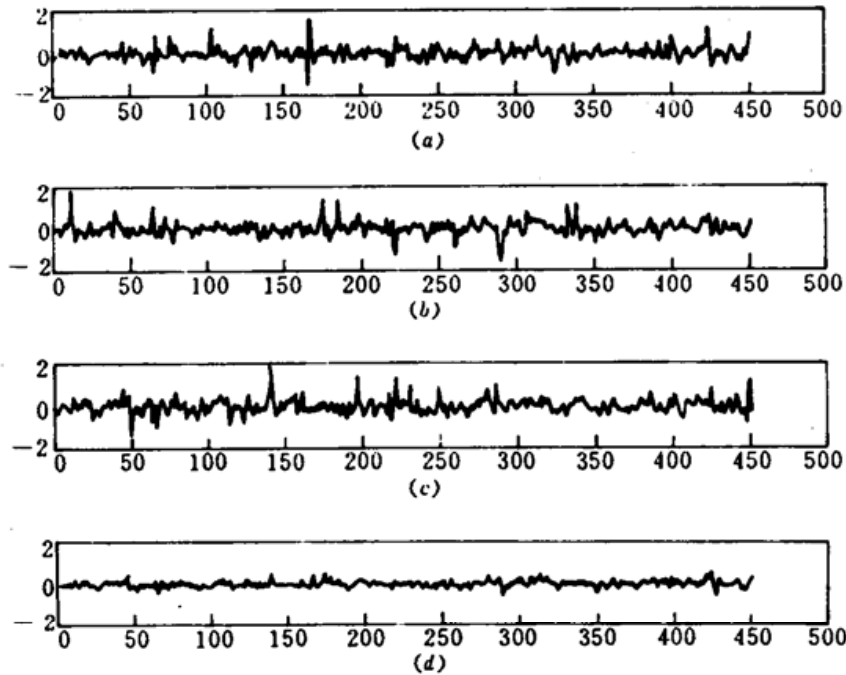


Fig. 5 Error distribution. (a) to (c) are error distributions of 1th, 4th and 7th frames respectively, the shift distance between the adjacent frames is $30\ \mu\text{m}$. (d) is the error distribution after averaging

4 结 论

本文提出的激光片光三维传感中提高深度分辨率的方法, 经理论分析和实验结果表明, 当横向移动被测物体距离接近系统点扩展函数直径时, 两帧散斑图的相关性将显著下降。这样, 在牺牲少量横向分辨率的情况下, 利用激光片光在几个相邻区域产生的部分退相关的光强分布进行多帧平均, 从而部分抑制激光散斑的影响, 提高深度分辨率。本文给出的实验结果表明, 在横向分辨率下降约 20% 的条件下, 深度分辨率提高了近一倍。

参 考 文 献

- 1 H. Takasaki. Moire topography. *Appl. Opt.*, 1970, 9: 1467
- 2 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shades. *Appl. Opt.*, 1983, 22(24): 3977
- 3 V. Srinivasan, H. C. Lui, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object. *Appl. Opt.*, 1984, 23(18): 3105
- 4 Xiao-Xue Cheng, Xian-Yu Su, Lu-Rong Guo. Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse object. *Appl. Opt.*, 1991, 30(10): 1274
- 5 Bo Jia, Xian-Yu Su, Lu-Rong Guo. 3-D measurement of turbine blade profile by light knife. *Chinese Journal of Lasers*, 1992, 19(4): 271
- 6 Jie-lin Li, Xian-Yu Su, Wen-Shen Zhou. 3-D sensing using laser sheet projection; Influence of speckle. *Opt. Rev.*, 1995, 2(2): 144

A Method to Increase the Depth Resolution in Laser Triangulation

Li Wansong Su Xianyu Li Jitao

(*Opto-electronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Abstract Laser triangulation is one of the most important 3-D sensing profilometries. Because of the influence of image speckle, the determination of the centroid of light spot in CCD surface is limited. This causes the depth resolution decreased. In this article, we present a method that is based on the lateral shift of the object. When the shift distance reaches to the diameter of the point spread function, the correlation of the centroid line of laser sheet is decreased evidently. We increase the depth resolution by lateral averaging. Experimental result presented shows that the depth resolution is increased one time while the lateral resolution is decreased only 18%.

Key words laser triangulation, laser sheet, speckle, correlation