

文章编号: 1001-3806(2004)02-0196-03

激光片光三维传感中提高深度分辨率的方法

邹小平, 苏显渝, 张启灿

(四川大学 光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 提出了两种在激光片光三维传感中降低散斑噪声、提高深度分辨率的方法。第 1 种方法采用宏观上相同、微观上受物体微结构面元影响的多帧散斑图像叠加, 用于三维测量系统的标定。第 2 种方法利用动态采集方式, 使 CCD 对微结构元进行时间积分, 可有效地降低散斑噪声的影响。实验证明, 综合利用这两种方式, 深度分辨率可以得到有效的提高。

关键词: 激光片光; 三维传感; 散斑; 光学三角测量

中图分类号: O348 **文献标识码:** A

Methods of improving the depth resolution in optical 3-D profilometry with laser sheet

ZOU Xiaoping, SU Xian-yu, ZHANG Qi-can

(Department of Opto Electronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Methods of reducing the speckle noise and improving the depth resolution in optical 3-D profilometry with laser sheet are proposed in the paper. Speckle is caused by object's micro structure, with more less correlated random structure correlation in the imaging field, the speckle can be depressed greatly. As proved by experiments, combined the method of appreciably sacrificing the lateral resolution and dynamic image capture, the depth resolution can be effectively improved.

Key words: laser sheet; laser triangulation; 3-D optical profilometry; speckle

引 言

光学三维面形检测技术, 由于其非接触、高精度、易于自动控制等优点, 被广泛地应用于机器视觉、实物仿形、工业检测、生物医学等领域。现有的方法包含莫尔条纹法(MT)^[1]、傅里叶变换轮廓术(FTP)^[2,3]、位相测量轮廓术(PMP)^[4,5]、调制度测量轮廓术(MMP)^[6]、光学三角测量法^[7-10]等。就其本质而言, 都是通过分析受物体表面面形调制的光场, 解调出物体的高度信息。

基于投影周期性条纹为主的 PMP, FTP 等方法, 无法摆脱阴影、遮挡以及位相截断等因素的限制, 从而难于用于测量突变和复杂变形的表面。激光光源的高亮度和方向性使之成为非常理想的投影光源, 激光三角法成为很多距离传感技术和由这种技术派生的三维面形测量技术的基础。激光三角法不需要

进行位相展开, 因此, 可用于突变和复杂面形的测量。但采用这种方法, 一个很重要的问题便是如何克服激光散斑的影响^[11]。物体表面某一点的高度是由该点在 CCD 中所成像点的位置决定的。由于成像系统点扩展函数的影响, 光点在像面上扩展成个斑, 光线扩展成光带。不考虑散斑噪声的情况下, 利用恰当的算法如极值法、阈值法、重心法、曲线拟合法等等便可确定光刀的 Gaussian 分布中心, 使像点定位精度达到亚像素级。但由于散斑噪声的存在, 将导致光刀中心偏移, 严重破坏深度分辨率。

LI 等人曾提出过利用片光面内扫描合成孔径的方法降低散斑噪声^[12]的影响, 此方法采用不断旋转光刀入射方向来提高深度分辨率, 但实验装置较复杂。李万松等人又提出通过牺牲少量横向分辨率的办法来换取深度分辨率^[13]的方法, 该方法只需在横向分辨率下降 20% 的条件下, 可使深度分辨率提高 1 倍。本文中提出的方法验证了文献[13]中结果的可行性, 同时也提出了利用动态采集时间积分的方式降低散斑噪声的影响, 综合利用这两种方法可以在少量牺牲横向分辨率的条件下, 使深度分辨率提高 1 倍多。该方法已用于为用户设计的三维传感

作者简介: 邹小平(1978), 男, 硕士研究生, 从事三维传感及机器人视觉的研究。

E-mail: runners@263.net

收稿日期: 2003-05-08; 收到修改稿日期: 2003-07-30

测量系统中,取得了很好的效果。

1 基本原理

激光(又称光刀)三角测量系统是在传统的光学三角测量的基础上发展起来的。激光光束沿投影光轴垂直投射到物体表面,在另一个方向上,由物体面形引起的光刀像中心的偏移被探测器(CCD 摄像机)接受,并按照三角测量原理获得剖面数据,通过附加的一维扫描可以得到物体的三维面形分布。基本原理如图 1 所示, θ 为成像光轴与投影光轴之间

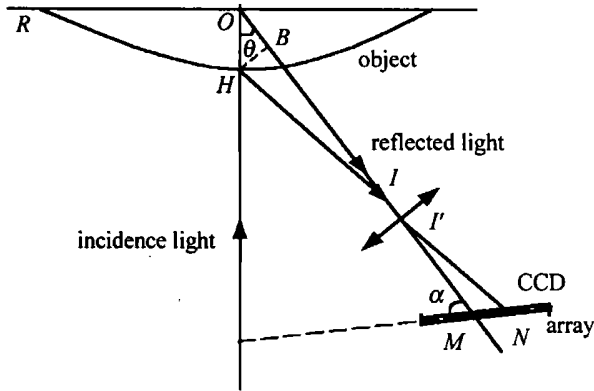


Fig. 1 Sketch map for 3-D measurement system using multi-sensor with line structured illuminated laser

的夹角, α 为 CCD 阵列与成像光轴的夹角,两光轴交于 O 点, R 为参考平面, H 为物体表面上一点, I 和 I' 分别是成像系统的入瞳和出瞳, H 点成像于 CCD 面阵上 N 点, N 点相对于中心像素 M 的偏移量 $\Delta = M - N$,由简单的几何关系可以得到面形高度 OH 与偏移量 Δ 间的关系为:

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

式中, f 为成像系统的焦距。由该式可以看出面形高度与偏移量成非线性关系。测量的精度直接受成像光点位置测量精度 Δ 的影响,由于散斑噪声的存在,导致测量的光刀重心与真实的光刀重心有了一定的偏移,从而影响了测量精度。

根据衍射受限理论,像面上一点的光场是物平面内一个小区域内光场贡献的总和。此区域的直径 D_p 可按式^[12]估计而得:

$$D_p = 2.44 \lambda / D \quad (2)$$

式中, l 为物距, D 为透镜口径。当物面上移的距离远小于 D_p 时,成像方某一点 r 处前后两个光强值基本上是由同一微结构贡献的,其相关系数较大。当上移距离与 D_p 相当时,则 r 点处前后两个光强是由两个完全不同的微结构贡献的,其相关系数较小。

2 降低散斑噪声影响的办法

2.1 多帧平均降低散斑噪声的影响

激光片光三维传感系统的校准是精密测量的基础,通常采用对标准模块的测量完成系统校准。为了保证校准过程的测量精度,在对模块的测量中采用多帧平均技术,以降低散斑噪声的影响。一个特殊设计的校准模块如图 2 所示,该模块是一个由 5 个台阶和 7 根平行的切槽组成的阶梯靶标,用于标识片光扫描平面内 35 个特征点位置。投影系统从一侧经光学系统将片光投射在模块台阶平面上,形成图示的光刀形状,再经光学系统反射进入同一侧的成像系统被 CCD 接收。平移系统(步进电机)带动投影和成像一起移动,在模块的同一台面上,宏观上看来,光刀图像成像在 CCD 光敏面的同一位置,理想像是一样的,但由于受物体微结构的影响,所形成的图像散斑形态有所差异。同一台阶面上获取的多帧图像平均降低散斑噪声的影响。

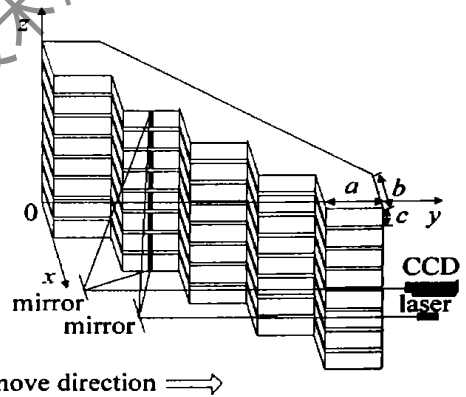


Fig. 2 Sketch map for calibrating model

测量系统采用半导体激光器波长 $\lambda = 650\text{nm}$ 作为投射光源,CCD 口径 14.4mm ,物距在 $200\text{mm} \sim 400\text{mm}$ 左右,根据(2)式得到: $D_p = 0.022\text{mm} \sim 0.044\text{mm}$ 。

在实际测量中,同一台面上相邻两帧图像在平移装置平移方向的距离远大于 D_p ,因此,两帧图像上的散斑是完全不相关的。采用几帧宏观上完全一样、微观上散斑形态不同的散斑图像叠加平均便可有效地降低散斑噪声的影响。

为了验证上述结论,设置步进电机步长为 1mm 进行了实验。取同一台面上拍摄的 6 帧图像和其平均图像进行比较。

利用重心法^[14]等方法可以提取出光刀的重心线,考虑到透镜成像时的像差和畸变,把从 CCD 图像中提取的光刀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

实测像点和几何像点之间的误差,即该拟合曲线就是平面如图表面光刀截面在 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 0 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偏移,见图 3。

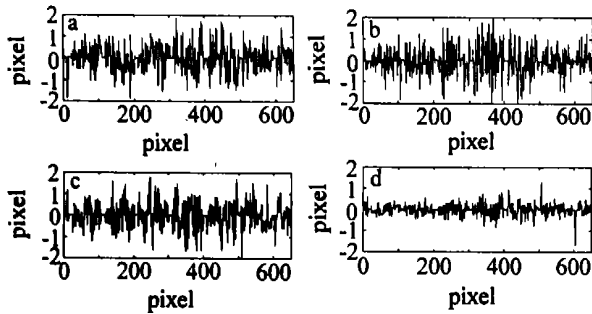


Fig. 3 Curve of excursion of laser sheet's center compared single frames to image averaged by multiply frames

a~c—represent single frame d—represent averaged frame

图 3a~ 图 3c 代表 6 帧 CCD 拍摄图像中的其中 3 帧,图 3d 表示平均后的图像。可以看到,多帧平均后的散斑引起的误差得到明显的抑制。6 帧图像其均方差都约为 0.47 像素,平均后的图像均方差为 0.21 像素,比叠加前下降了一半多。

对(1)式两边微分后得:

$$\delta Z = \frac{f \sin \theta}{(OI - f) \sin \alpha} \left(\frac{Z}{\Delta} \right)^2 \delta \Delta \quad (3)$$

实际测量中 Z 远大于 Δ, Δ 的测量精度 δΔ 将严重影响深度 Z 的测量精度 δZ,而 δΔ 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 1 倍,δZ 随之降低 1 倍,故深度分辨率提高了 1 倍。

2.2 动态采集降低散斑噪声的影响

在动态测量过程中,由于 CCD 的成像过程实际上是一个时间积分,而在这一段时间内,CCD 所采集物体表面的微结构也发生了一定的变化,因此,成像方一点的光场便是由更多的微结构面元的时间积分效果。如果选取合适的平移系统平移速度,可以使这段时间覆盖的微结构元是退相关或者不相关的,在成像方的叠加同样将降低散斑噪声的影响。

在同样的实验条件下,按静态(即采集的时候平移系统不动)和动态采集两种方式进行了实验,动态采集时平移系统平移速度为 2180mm/min,取同一台面上的 12 帧图像单帧求取光刀其重心线,得到散斑引起的真实重心偏移图,对比结果见图 4。

只列举了 3 幅对应位置图进行比较,图 4a~ 图 4c 表示静态测量方式下重心偏移图,图 4d~ 图 4f

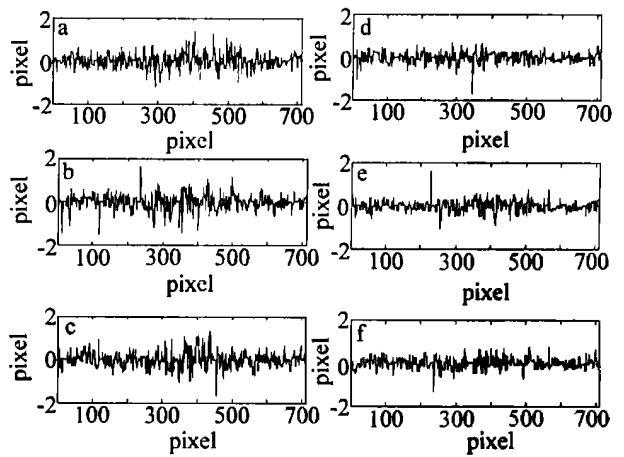


Fig. 4 Curve of excursion of laser sheet's center compared static capture to dynamic capture

a~c—represent the static capture d~f—represent the dynamic capture

表示动态测量方式下重心偏移图,可以看出散斑噪声的抑制效果明显。表 1 是此 12 幅图像的均方差,单位为像素,其中静态采集时 12 幅图的均方差都为 0.3292 左右,动态采集时均方差为 0.2330 左右,比静态测量时降低 0.3 倍左右,根据(3)式得其深度分辨率提高了 0.4 倍。

Table 1 Standard deviation of static capture compared to that of dynamic capture/pixel

static	0.3300	0.3169	0.3471	0.3435	0.3164	0.3160
mode	0.3276	0.3195	0.3226	0.3248	0.3401	0.3458
dynamic	0.2333	0.2227	0.2303	0.2406	0.2245	0.2079
mode	0.2375	0.2670	0.2079	0.2346	0.2429	0.2471

2.3 综合利用上述两种方式降低散斑噪声

上述两种方式都是独立的可降低散斑噪声的影响,如果综合利用上述两种方式进行校准测量,可期望更好地抑制散斑噪声的影响。采用 2.2 节中方式测量的数据,由于动态测量时 12 帧图像都在同一台面上,而且此 12 帧图像皆不相关(平移距离大约为 1.5mm/帧,远大于 D_p),利用 2.1 节的方式进行处理得到如图 5 所示真实重心偏移图。

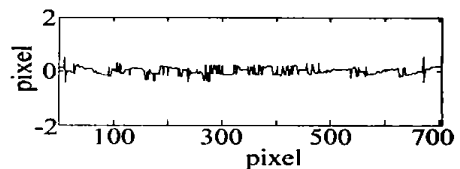


Fig. 5 Curve of excursion of laser sheet's center with method combined with multi-frame average and dynamic capture

其均方差为 0.1280 像素,相比静态测量,深度分辨率提高了 1.5 倍。

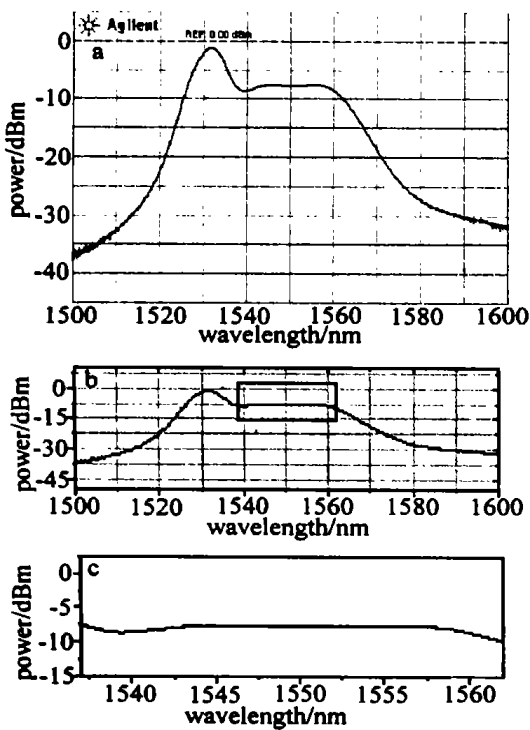


Fig. 5 a—output spectrum of DPB SFS at $P_p = 85\text{mW}$, $L = 20\text{m}$ b—zoom in on the output spectrum c—zoom in on the output spectrum

(上接第 198 页)

3 结论

提出了两种在三维传感测量系统中降低散斑噪声,提高深度分辨率的方法。第 1 种方法采用宏观上相同、微观上受物体微结构面元影响的多帧散斑图像叠加,通过特殊设计的校准模块的测量,完成三维测量系统的标定。第 2 种方法利用动态采集方式,使 CCD 对微结构元进行时间积分,从而降低散斑噪声的影响。实验证明,综合利用这两种方式,深度分辨率可以得到有效的提高。

参考文献

- [1] TAKASAKI H. Appl Opt, 1970, 9: 1467.
- [2] TAKEDA M, MUTOH K. Appl Opt, 1983, 22(24): 397.

作正在进行中,有关实验结果将另文发表。

4 总结

在对双程后向结构超荧光光源数值模拟的基础上,给出了光源的输出功率、带宽和平均波长特性的理论分析。结果表明,通过选取适当的掺铒光纤长度,该结构光源总能实现平均波长不依赖于泵浦功率的高稳定性运行。最后给出了研制的双程后向掺铒超荧光光源的实验研究结果,证明该光源已经可以满足各种对大功率光纤宽带光源的需求。

参考文献

- [1] WYSOCKI P F, DIGONNET M J F, KIM B Y *et al.* J Lightwave Technol, 1994, 12(3): 550~ 567.
- [2] WYSOCKI P F, DIGONNET M J F, KIM B Y. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2(3): 178~ 180.
- [3] HALL D C, BURNS W K, MOELLER R P. J Lightwave Technol, 1995, 13: 1452~ 1460.
- [4] WANG L A, CHEN C D. Electron Lett, 1996, 32(19): 1815~ 1817.
- [5] 肖 瑞. 掺铒光纤光源研究. 长沙: 国防科技大学, 2002. 11~ 18.
- [6] VENGSARKAR A M, PEDRAZZANI J R, JUDKINS J B *et al.* Opt Lett, 1996, 21(5): 336~ 338.

- [3] 陈文静, 苏显渝, 谭松新. 光学学报, 2000, 20(10): 1429~ 1434.
- [4] SRINIVASAN V, LUIH C, HALIOUA M. Appl Opt, 1984, 23(18): 305.
- [5] 李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 光学学报, 2000, 20(6): 792~ 796.
- [6] SU L K, SU X Y, LI W S *et al.* Appl Opt, 1999, 38(7): 1153~ 1158.
- [7] LEWANDOWSKI J, DESJARDINS L. Opt Engng, 1995, 34(8): 2481~ 2486.
- [8] CHENG X X, SU X Y, GUO L R. Appl Opt, 1991, 30(10): 1274.
- [9] 吴剑波, 桑 波, 赵 宏 *et al.* 西安交通大学学报, 2001, 35(9): 949~ 953.
- [10] 罗晓晖, 居 琰, 王 希 *et al.* 激光技术, 2001, 25(4): 308~ 311.
- [11] 郝建华, 赵建林. 光学技术, 1998(2): 37~ 39.
- [12] LI J L, SU X Y, ZHOU W Sh. Opt Rev, 1995, 2(2): 144.
- [13] 李万松, 苏显渝, 李继陶. 中国激光, 1996, A23(12): 1081~ 1086.
- [14] 贾 波, 苏显渝, 郭履容. 中国激光, 1992, 19(4): 271~ 275.