

采用激光光刀的叶片三维面形测量方法

贾波* 苏显渝 郭履容
(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

提要: 提出一种采用激光光刀的叶片三维面形测量方法。介绍了方法原理、系统结构、信息获取与处理方案, 并给出了对实际飞机发动机叶片的面形测量结果。

关键词: 三维面形测量, 叶片面形检测, 机器人视觉

3-D measurement of turbine blade profile by light knife

Jia Bo, Su Xianyu, Guo Lirong

(Dept. of Opto-Electronic Science and Technology, Sichuan University, Chengdu)

Abstract: A new method for obtaining 3-D profile of turbine blade by light knife is put forward and the principle, system construction, data acquisition and processing scheme, and the experimental results are described.

Key words: 3-D profile measurement, turbine blade profile measurement, machine vision

光学的三维面形检测, 由于其非接触性、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、傅里叶变换轮廓术、位相测量轮廓术、光学探针等^[1~5], 已广泛应用于机器人视觉、实物仿形、自动加工等领域。本文中提出了一种新型的激光光刀, 采用三角测量法, 对叶片的面形进行了测量, 为工业中叶片检测提供了一种高速度、高精度的自动化测量手段, 在工业生产中具有广阔的应用前景。

一、光刀的理论分析

通常产生光刀的方法是投影法。最近, 德国的 Gerd Häusler 和 Werner Heckel 利用激光束通过一种 axicon 的器件产生衍射, 获得很大景深的光笔, 用高速转镜扫描, 即获得光刀^[6]。这种光刀景深大且线宽窄, 但其缺点是需要高速转镜, 装置复杂。本文提出了一种利用激光束在棱镜边上产生衍射而形成光刀的方法。

在我们的实验中, 激光垂直投射在薄等腰棱镜的棱上, 由于折射和衍射效应, 在棱镜后方形成了光刀型的空间分布, 如图 1 所示。在 y 方向上, 由于折射和衍射使光束发散, 它的分布是两端有两个很锐的峰值, 其间则是一条近似等光强的光带, 即光刀部分。两峰间的距离 L 为

$$L = z \cdot \tan(\arcsin(n \cdot \sin \theta) - \theta) \quad (1)$$

式中 n 是棱镜的折射率, θ 为薄棱镜的底角。在 x 方向上, 光束会聚, 仍为高斯分布。

采用薄棱镜近似的假设, 得到棱镜后方远场的夫琅和费衍射光场在 y 方向上的分布:

$$F(y) = A \cdot \exp\left(-\frac{\omega^2(z) \cdot y^2}{4\lambda^2 z^2}\right) * \left[\frac{1 - \exp\left[j2\pi l \left(\frac{y}{\lambda z} - f_0\right)\right]}{\frac{y}{\lambda z} - f_0} + \frac{\exp\left[-j2\pi l \left(\frac{y}{\lambda z} + f_0\right) - 1\right]}{\frac{y}{\lambda z} + f_0} \right] \quad (2)$$

式中 A 为常数, $f_0 = \frac{(n-1) \cdot d}{\lambda l}$, $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\sigma \omega_0}\right)^2}$ 为高斯光束在 z 点的光斑半径。

由上式可知, 在 y 方向的光场分布有两个很锐的峰值, 位置在 $\lambda z f_0$, $-\lambda z f_0$ 处, 光刀的长度与 z 成正比, 其强度却随 z 增大而降低。

在 x 方向上, 光束会聚, 根据高斯光束的传播特性, 可知其有很大的景深。在棱镜后方加上透镜可使光刀更窄。实验中, 采用 He-Ne 激光, λ 为 632.8 nm, 光刀线宽为 0.28 mm, 景深为 400 mm。

二、三维面形测量原理

三维面形测量的本质就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。在我们实验中, 光刀被垂直投射到被测物体表面, COD 探测器从另一个角度观察由于面形引起光刀中心的偏移, 并按三角测量原理获得面形高度。

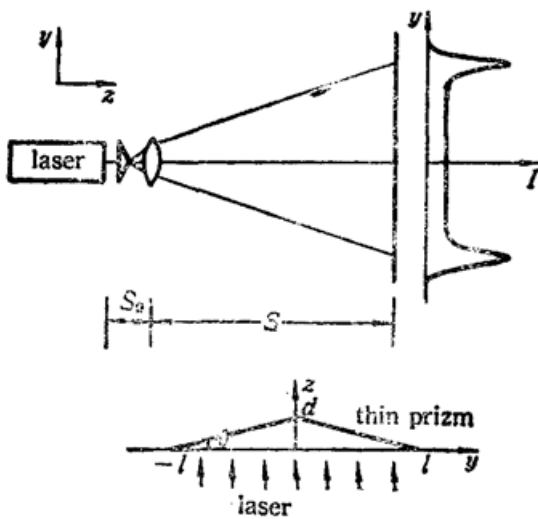


Fig. 1 Principle of the light knife

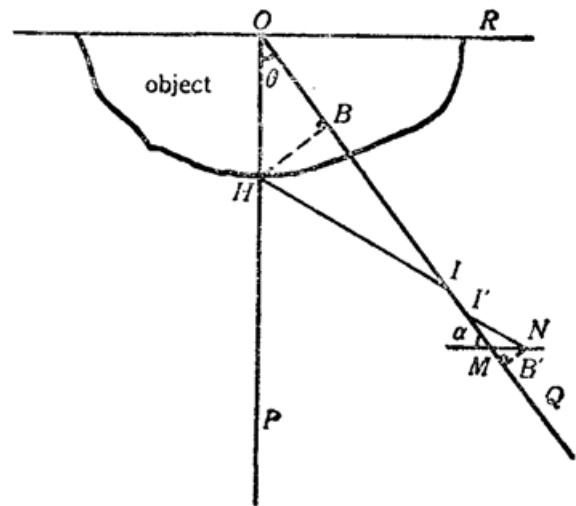


Fig. 2 Principle of triangulation

图 2 为本文采用的三角测量原理图。 θ 为成像光轴 QO 与投影光轴 PO 的夹角, α 为 CCD 阵列与成像光轴 QO 的夹角, 两光轴交于 O 点, R 为参考平面, H 为面形上某一点, H 点成像于 CCD 面阵上的 N 点, N 点相对于中心像素 M 的偏移量 $\Delta = M - N$ 。

在测量中, 为了使在被测范围内的点都能成像于 CCD 阵列上, θ 与 α 必须满足下列关系:

$$\tan \theta = \beta \cdot \tan \alpha \quad (3)$$

式中 β 为横向放大率。

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:

$$OH = \frac{(OI - f) \cdot \Delta \cdot \sin \alpha}{f \cdot \sin \theta + \Delta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

上式中 f 为成像系统的焦距, OI 为成像系统到参考平面的距离, 我们得知高度与偏移量成非线性关系。

三、信息处理方案

为了得到被测面形的数据, 那么就要测得光刀的偏移量 Δ , 即必须精确地确定光带高斯分布的中心。确定高斯分布的中心有多种算法: 极值法、阈值法、重心法、高斯拟合法。为了处理好精度与速度的矛盾, 我们选择的信息处理方案为: 1. 确定采样窗口, 多帧平均; 2. 确定光带峰值位置, 以其为中心确定一个浮动小窗口作二维卷积滤波; 3. 采用阈值法与重心法结合确定高斯光束中心。在图 3 中, 设阈值 T 与曲线交于 P 、 Q 两点, 由线性插值可求得 P 、 Q 对应的位置 p 、 q 值:

$$p = n + \frac{T - I(n)}{I(n+1) - I(n)} \quad (5)$$

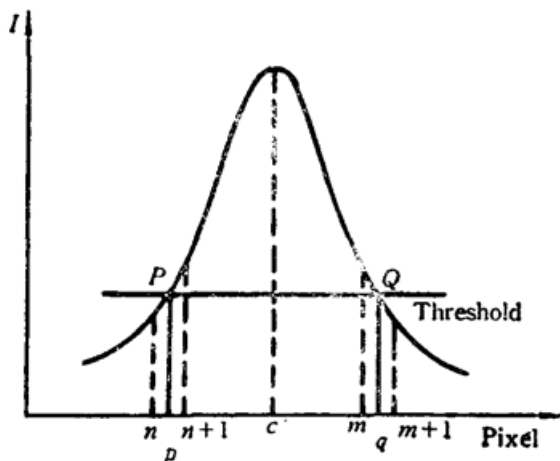


Fig. 3 Intensity cross section of a light knife

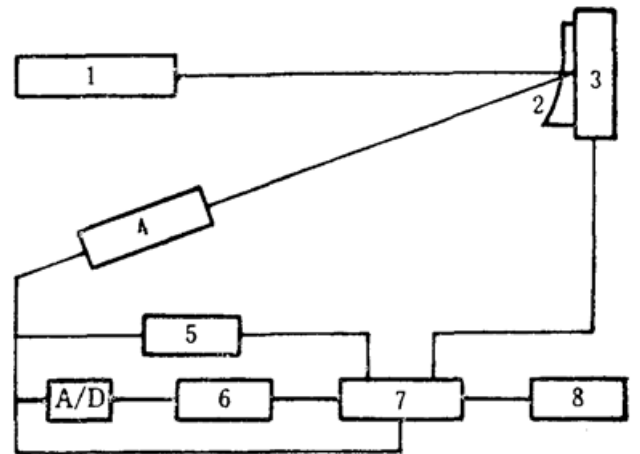


Fig. 4 Block diagram of the system

1—light knife projector; 2—3-D object; 3—movable stage; 4—CCD TV camera; 5—monitor; 6—buffer; 7—microcomputer; 8—x-y plotter

$$q = m + \frac{T - I(m)}{I(m+1) - I(m)} \quad (6)$$

再由重心法确定中心:

$$O = p + \frac{\sum_{i=p}^q I(i) \cdot (i-p)}{\sum_{i=p}^q (i-p)} \quad (7)$$

式中求和是指在 $p < i < q$ 范围内的整数像元包括 P 、 Q 两点在内; 4. 为了实现高速处理, 预先建立一个高度表, 根据高度与中心偏移量 Δ 的关系式(4), 得到

$$Y_i = a + bX_i \quad (8)$$

式中 $Y_i = 1/h_i$, $X_i = 1/\Delta_i$, h_i 为 Δ_i 对应的高度, a 、 b 是系统常数, 可表示为

$$a = \frac{\cos \theta}{OI - f}, \quad b = \frac{f \cdot \sin \theta}{(OI - f) \cdot \sin \alpha} \quad (9)$$

根据线性拟合理论,二组以上不同的(h_i, Δ_i)值,就能得到 a, b ,从而得到高度表。

四、实验装置和结果

实验装置的框图如图 4 所示。光学系统产生光刀型空间光场投射到被测物体上, CCD 面阵摄像机以视频速度获得观察光场信息, 视频信号通过高速模数转换、帧存储器进入微机, 进行数据处理。微机通过接口, 同时控制移动工作台的驱动电机, 使得待测物体移动。测量结果可由 CRT 显示或绘图仪画出。

实验采用的主要系统参数为: $S \approx 400$ mm, $S_0 \approx 140$ mm, $\theta \approx 26.5^\circ$, CCD 面阵为 512×512 , 单元像素的长度约为 $18 \mu\text{m}$, 镜头焦距为 50 mm。实验结果表明: 系统的深度静态精度

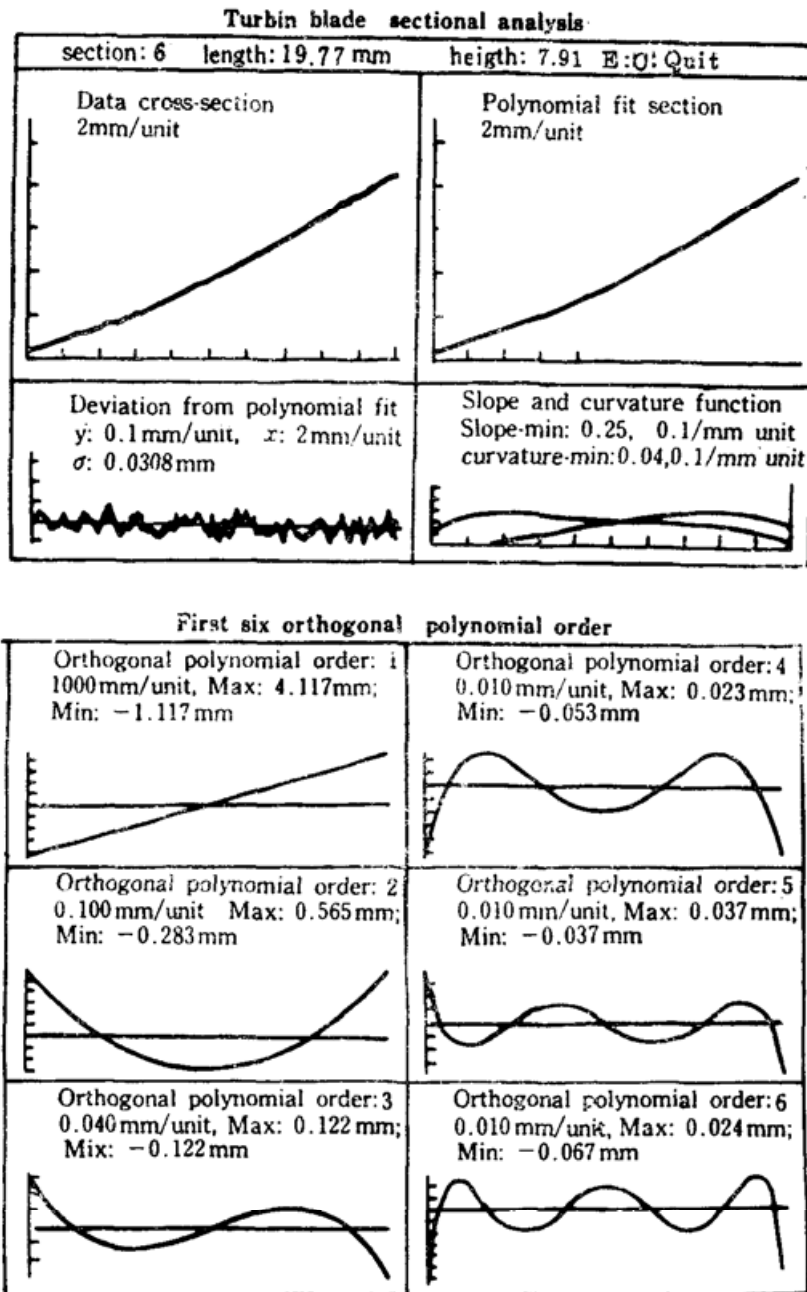


Fig. 5 Turbine blade sectional analysis, showing polynomial fit, slop, curvature, deviation from polynomial fit(upper); showing first six orthogonal polynomial orders (lower)

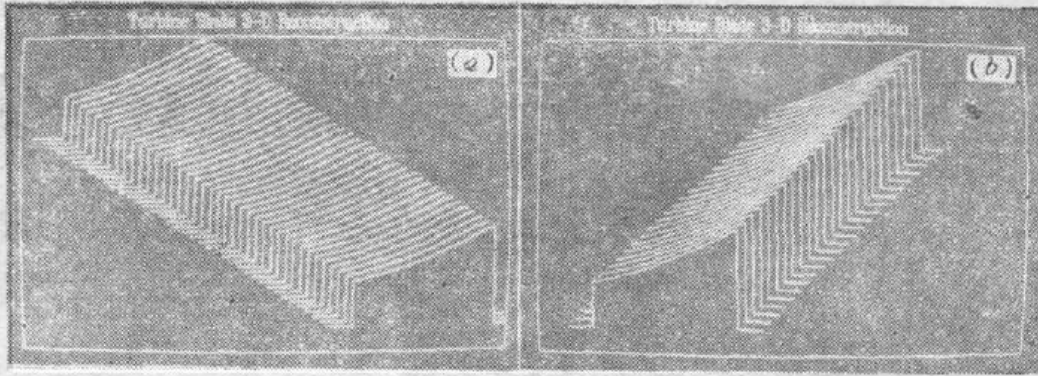


Fig. 6 3-D reconstruction of the turbine blade

$\sigma < 0.03$ pixel, 即为 $3\mu\text{m}$, 最大漂移不超过 0.1 pixel, 即为 $10\mu\text{m}$ 。系统的深度分辨率 σ 小于 $40\mu\text{m}$, 即相对深度分辨率为 $1/1600$ 。采用这种方法对生产中的飞机发动机叶片测量结果见图 5、6。图 5(上)为测得某一剖面数据作六阶正交多项式拟合, 给出测量曲线、拟合曲线以及误差等数据分析处理^[7]。图 5(下)为正交多项式每一项对拟合曲线的贡献。图 6 为重建的叶片三维面形图。对测量结果的分析表明, 测量的精度主要受到 OCD 阵列的分辨率、激光散斑、 θ 角度的大小、系统的随机噪声等因素的影响。提高 OCD 阵列的分辨率、增大 θ 角度, 都能提高系统的分辨率。在这两个条件一定的情况下, 激光散斑对测量精度的影响最大, 是误差的主要来源。根据散斑的成因, 采用热空气法^[8], 降低激光的相干性, 减少散斑对测量的影响, 其深度分辨率可达 $30\mu\text{m}$, 相对深度分辨率为 $1/2000$ 。

参 考 文 献

- 1 H. Takasaki, *Appl. Opt.*, **9** (6), 1467 (1970)
- 2 M. Takeda, K. Mutoh, *Appl. Opt.*, **22** (24), 3977 (1983)
- 3 Su Xian-Yu, Li Jian *et al.*, *Proc. SPIE*, Vol. 954
- 4 苏显渝, 程晓雪 *et al.*, *光学学报*, **9** (7), 670 (1989)
- 5 陈泽先, 苏显渝, *仪器仪表学报*, **10** (4), 409 (1989)
- 6 Gerd Häusler, Werner Heckel, *Appl. Opt.*, **27** (24), 5165 (1988)
- 7 Maurice Halioua, Hsin-Chu Liu, *Optics and Laser in Engineering*, **11**, 185 (1989)
- 8 Gerd Häusler, Jurgen Herrmann, *Appl. Opt.*, **27** (22), 4631 (1988)