

结构光传感器的成像分析及其数学模型

尤 政* 胡庆英 罗维国 张东仁

文 摘 对结构光传感器进行了成像分析,从结构光传感器的结构及其成像机理入手,得出了物像间的坐标关系式,建立了结构光传感器的数学模型,分析了其成像特点,并指出了数学模型的应用方法。

主题词 结构光,传感器,成像分析,数学模型

1 引 言

现代生产的发展对几何量测量提出了越来越高的要求,既要求有高的测量准确度,还要求有快的测量速度和较低的使用条件,各种新型传感器也由此应运而生。特别是采用激光的光学传感器,由于它具有结构简单、使用方便、抗干扰、与被测物体不接触等特点,在对有腐蚀性的物体、高温物体等不允许接触的物体的测量中显示出了明显的优势,因而在化工、冶金、现代化制造生产线等领域得到了广泛的应用。以前对光学传感器的研究比较集中于激光三角法传感器,直接探测投射在物体上的光点,其特点在于结构特别简单,信号处理工作量小^[1,2],但其缺点也很明显,用于位移测量时要求物体沿光线移动,对于移动方向有偏移的情况就要设法补偿,用于三维测量时需要两个方向扫描,结构就比较复杂。结构光传感器采用线测量,探测投射在物体上的光线上各点的位移,克服了三角法传感器的缺点,因而适应性更强,用途也更广泛^[3]。但目前对结构光传感器的理论研究还很不够,严重地制约了结构光传感器的应用及其推广和普及,有必要从结构光传感器的成像分析入手,作比较深入的探讨。

2 结构和工作原理

结构光传感器的典型结构如图 1 所示,采用反射镜是为了减小传感器的体积,也可以不用反射镜。

该传感器的基本原理为:激光器发射的激光经柱面镜转换后成为线光源,投射出的扇形

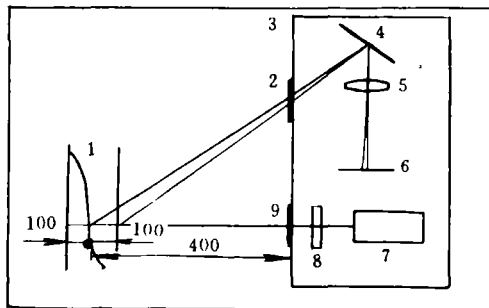


图 1 结构光传感器的结构示意图

1. 被测物体;2. 大防护镜;3. 壳体;4. 反射镜;5. 透镜;
6. CCD靶面;7. 激光器;8. 柱面镜;9. 小防护镜。

收稿日期:1996 06 24 返修日期:1997 04 10

* 清华大学,教授,100084

面与被测物体相交于一条曲线,经另一光轴上的 CCD 摄像系统成像并转换为电信号,送计算机系统进行分析处理得到所需的参数。

3 成像分析及其数学模型

如图 2 所示,设透镜主轴与扇形光面的交点为 q ,光面会聚点为 O ,取 \overline{qO} 为 x 轴,以 q 为原点在物方建立如图所示的直角坐标系 xqy 。设透镜中心点为 O' ,对应于 q 点的像点为 Q ,为使沿光线 Oq 的点完全聚焦,CCD 靶面须倾斜角度 $v^{[2]}$

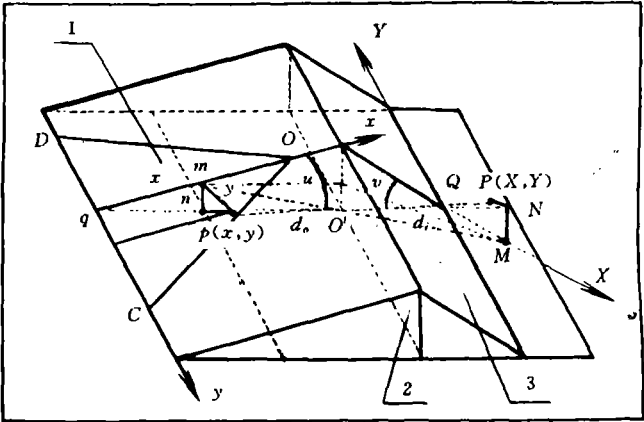


图 2 成像空间的立体模型(一)

1. 结构光所在平面; 2. 成像透镜; 3. CCD 靶面。

$$\operatorname{tg} v = \frac{d_o - f}{f} \operatorname{tg} u \quad (1)$$

在透镜主光轴所在平面内

取过 Q 点且平行于 y 轴的直线为 Y 轴,以靶面内过 Q 点垂直于 Y 轴的直线为 X 轴(与透镜主光轴所在平面倾斜角度 v),建立如图所示的直角坐标系 XQY 。

现在我们分析扇形平面上任一光点 $p(x, y)$ 所成的像 $P(X, Y)$ 。由透镜成像公式,对光点 q 有

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

即

$$d_i = \frac{f \cdot d_o}{d_o - f} \quad (2)$$

式中: $d_o = |qO'|$; $d_i = |QO'|$

作 $pm \parallel y$ 轴,交 x 轴于 m ;作 mn 垂直 qQ 于 n ,则

$$\overline{mn} \perp \overline{mp}, \quad |\overline{qm}| = x, \quad |\overline{pm}| = y, \quad |\overline{mn}| = x \sin u$$

所以有

$$L = |\overline{pn}| = \sqrt{|\overline{pm}|^2 + |\overline{mn}|^2} = \sqrt{y^2 + x^2 \cdot \sin^2 u} \quad (3)$$

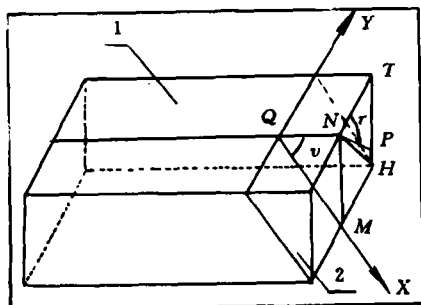
设 n 点成像为 N ,则有

$$d'_o = d_o - |\overline{qn}| = d_o - x \cdot \cos u \quad (4)$$

$$\frac{1}{d'_o} + \frac{1}{d'_i} = \frac{1}{f}$$

$$d'_i = \frac{f \cdot d'_o}{d'_o - f} = \frac{f(d_o - x \cdot \cos u)}{d_o - x \cdot \cos u - f} \quad (5)$$
$$|\overline{PN}| = L \cdot \frac{d'_i}{d'_o} = L \cdot \frac{f}{d_o - x \cdot \cos u - f} \quad (6)$$
$$\cos r = \frac{|\overline{mp}|}{|\overline{np}|} = \frac{y}{L} = \frac{y}{\sqrt{y^2 + x^2 \cdot \sin^2 u}} \quad (7)$$

$$\sin r = \frac{x \cdot \sin u}{L} = \frac{x \cdot \sin u}{\sqrt{y^2 + x^2 \cdot \sin^2 u}} \quad (8)$$



1. 透镜主光轴所在平面; 2. CCD 靶面。

$$|\overline{QN}| = d'_i - d_i = \frac{f \cdot (d_o - x \cdot \cos u)}{d_o - x \cdot \cos u - f} - \frac{f \cdot d_o}{d_o - f} = \frac{f^2 \cdot x \cdot \cos u}{(d_o - x \cdot \cos u - f)(d_o - f)}$$

$$\angle TNP = r$$

$$|\overline{TP}| = |\overline{NP}| \cdot \sin r = L \cdot \frac{f}{(d_o - x \cdot \cos u - f)} \cdot \frac{x \cdot \sin u}{L} = \frac{f \cdot x \cdot \sin u}{d_o - x \cdot \cos u - f} \quad (9)$$

$$\text{而 } |\overline{NM}| = |\overline{QN}| \cdot \operatorname{tg} v = \frac{f^2 \cdot x \cdot \cos u}{(d_n - x \cdot \cos u - f)(d_n - f)} \cdot \operatorname{tg} v$$

$$|\overline{NM}| = \frac{f^2 \cdot x \cdot \cos u}{(d_o - x \cdot \cos u - f)(d_o - f)} \cdot \frac{d_o - f}{f} \cdot \operatorname{tg} u = \frac{f \cdot x \cdot \sin u}{d_o - x \cdot \cos u - f} \quad (10)$$
$$|\overline{TP}| = |\overline{NM}|$$

由此证明:只要靶面倾斜适当的角度 ν ,扇形光面上任一点均可在 XQY 坐标面内聚焦。

$$Y = |TN| = |PN| \cdot \cos r = L \cdot \frac{f}{d_o - x \cdot \cos u - f} \cdot \frac{y}{L} = \frac{y \cdot f}{d_o - x \cdot \cos u - f} \quad (11)$$

$$X = |QM| = \frac{|QN|}{\cos v} = \frac{d'_i - d_i}{\cos v} = \frac{f^2 \cdot x \cdot \cos u}{(d_o - x \cdot \cos u - f)(d_o - f)} \cdot \frac{1}{\cos v} \quad (12)$$

— 7 —

用式(11)除以式(12),得

$$\frac{Y}{X} = \frac{y}{x} \cdot \frac{\cos v \cdot (d_0 - f)}{f \cdot \cos u} = \frac{y}{x} \cdot m \quad (13)$$

式中: $m = \cos v(d_0 - f)/(f \cdot \cos u)$

(a) 只有当 $y = kx$ 时, $Y = kmX$, 即只有在 x 轴上的过物方原点的光线所成的像才是直线, 此时相当于三角法传感器, 位移关系为

$$X = \frac{f^2 \cdot x \cdot \cos u}{(d_0 - x \cdot \cos u - f)(d_0 - f)}$$

而其它光线上的点所成的像都是曲线, 不满足激光三角法的关系。

(b) 对平行于 y 轴的物体, x 坐标都相同, 所成的像的 X 坐标也一样, 即所成的像为一直线, 但物高和像高已不再满足几何光学中的物像放大关系。

(c) 对平行于 x 轴的物体, 所成的像是一条曲线, 其上各点物像间的坐标关系满足式(11)和式(12)。

4 数学模型的应用

(1) 结构光传感器的数学模型可以帮助我们正确分析结构光传感器的工作原理, 对结构光传感器进行优化设计;

(2) 利用数学模型可以对设计好的结构光传感器进行标定, 根据测得的几组物像的坐标求出未知参数即可, 简化了标定工作, 提高了标定准确度;

(3) 通过数学模型可以直接由 CCD 靶面上的像的坐标定出物点的位置, 而不再需要进行线性化工作, 提高了测量准确度;

(4) 我们按图 1 设计, 经标定修正后的结构光传感器的主要技术指标如下:

光束方向测量范围: (250~550) mm

光线方向测量范围: 120 mm

x 向测量误差: 0.1 mm

y 向测量误差: 1.0 mm

参 考 文 献

- 1 Z JI, M C LEU. Design of optical triangulation devices. Optics & Laser Technology, 1989, 21 (5)
- 2 胡庆英等. 激光三角法及其在几何量测量中的应用. 宇航计测技术, 1996, 16 (2)
- 3 尤政等. 一种多用途结构光传感器. 工具技术, 1996 (12)

(下转第 12 页)

参 考 文 献

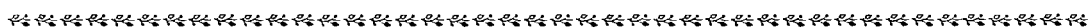
- 1 Buhner C F et al. Optical frequency shifting by electrooptic effect. Appl. Phys. 1962, 1(2): 46~49
- 2 关信安等. 双频激光干涉仪. 北京:机械工业出版社,1985. 62~78
- 3 李恭亮等. 晶体光学. 北京:国防工业出版社,1990. 311~323
- 4 高希才等. 声光器件用材料. 压电与声光,1989, (4): 65~76

New method of applying LN electrooptical modulator to laser heterodyne interference

Li Bin Liang Jinwen

Abstract Introduces the characteristics of LN electrooptical modulators. By using them properly, can develop new type of laser heterodyne interferometers. Presents two examples.

Subject terms Lithium niobate, Electrooptic modulator, Interferometric measurement



(上接第 8 页)

Analysis of image formation and its mathematical model in a structural light sensor

You Zheng Hu Qingying Luo Weiguo Zhang Dongren

Abstract Analyzes the image formation in a structural light sensor, beginning with the structure light and image forming theory in structural light sensors, induces the relationship between object coordinates and image coordinates, built up its mathematical model, furthermore, analyzes the image forming features, and points out the applications of the mathematical model.

Subject terms Structural light, Sensor, Image forming analysis, mathematical model