

•测试、试验与仿真•

基于金字塔棱镜的三维小角度测量方法

李保霖¹, 蔡盛²

(1. 海军驻长春地区航空军事代表室, 长春 130033; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:在激光准直技术的基础上,以金字塔棱镜作为合作目标,实现一种非接触式的三维小角度测量。提出了通过光斑质心位置同时求解俯仰角、偏摆角和扭转角的算法,并在此基础上设计了测量系统,完成了建模和仿真实验。实验结果表明,该方法具有工作距离远、精度高、范围适中的特点,具有良好的工程应用价值。

关键词:角度测量;光学准直;金字塔棱镜

中图分类号:U661.42;TG806

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-06-0076-05

Three-dimensional Small Angle Measurement Based on Pyramid Prism

LI Bao-lin¹, CAI Sheng²

(1. Changchun Representative Office of Aviation Military of the Navy, Changchun 130033, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Based on optical collimation, a non-contact three-dimensional small angle measurement method is presented by using a pyramid prism as a cooperation target. A retrieving algorithm which calculates simultaneously the pitch, yaw and roll angles is proposed according to the spot centroid. Based on this, a measuring system is designed to finish modeling and simulation experiments. Simulation experiments show that the method has the characteristics of long working distance, high accuracy and decent range, and has good application value in engineering.

Key words: angle measurement; optical collimation; pyramid prism

角度的高精度测量一直是工程领域的一个重要议题,一方面,它具有诸多直接应用,例如,在桥梁、船体的建设使用过程中,需要实时的监测结构的角度变形;另一方面,由于角度是一种基础的物理量,很多其他信息可以在测角的基础上获得,例如光电测量设备可以通过测角和测距推算出目标的方位信息。

测量角度的方法多种多样,总体上可以分为接触式和非接触式。接触式测量各种角度传感器为代表,如电位式角度传感器、电阻应变式角度传感器、光栅式角度传感器、磁栅式角度传感器、感应同步器和码盘式角度传感器等^[1-4]。它们普遍具有较

高的测量精度,可数字化并能够动态测量。当使用这类传感器测量相距较远的两点间角度时,需要通过连接机构来传递角度信息,测量精度难以保证。

非接触式测量是以各类光学方法为主,如自准直法^[5]、偏振光能量法^[6]、摩尔条纹法^[7]等。这些光学方法测量范围(角度大小)较小但精度很高,与此同时还具有较大的测量行程(基准点和目标点的距离),适用于各类对测量距离有要求的场合。但这些光学方法往往结构复杂、成本高、难以普及应用^[8]。

针对这种现状,在激光准直技术的基础上,利用金字塔棱镜的反射特性,提出了一种新型非接触式小角度测量方法。与前文所述的方法相比较,该方

收稿日期:2017-10-11

基金项目:重点科技攻关:面向工业测量的光电图像获取处理及显示一体化系统(20170204050GX)

作者简介:李保霖(1985-),男,湖南会同人,学士,海军驻长春地区航空军事代表室工程师,研究方向为光电工程;蔡盛(1983-),男,湖北黄冈人,博士,中国科学院长春光机所精密仪器与装备研发中心副研究员,研究方向为光电测量与成像技术。

法具有原理简单、结构可靠的特点,并且能同时测量三维角度,具有良好的应用前景。

1 测量原理

1.1 金字塔棱镜及其反射特性

金字塔棱镜,即正四棱锥棱镜,由四个对称的锥面和一个底面构成,常用于波前探测领域^[9]。如图1中所示,以金字塔反射镜的顶点 O 为原点, Z 轴为金字塔反射镜的中轴线方向,建立右手坐标系 $O-XYZ$,则金字塔反射镜的四个反射面 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 的法线方向矢量分别为 $(0, \sin\varphi, \cos\varphi)^T$, $(0, -\sin\varphi, \cos\varphi)^T$, $(\sin\varphi, 0, \cos\varphi)^T$, $(-\sin\varphi, 0, \cos\varphi)^T$,其中, φ 为四个反射面与底面的夹角。

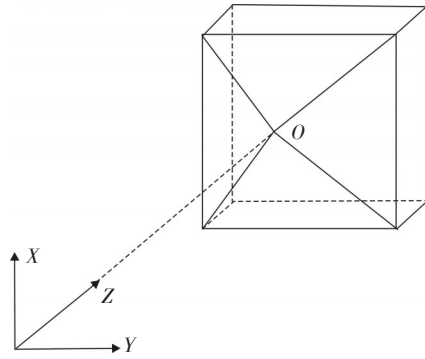


图1 金字塔棱镜结构图

当金字塔棱镜偏转三维角度 α, β, γ 时,可以求得各反射面法向量为

$$N_1 = \begin{bmatrix} Nx_1 \\ Ny_1 \\ Nz_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\beta \cos(\alpha + \varphi) \cos\gamma + \sin(\alpha + \varphi) \sin\gamma \\ \sin\beta \cos(\alpha + \varphi) \sin\gamma + \sin(\alpha + \varphi) \cos\gamma \\ \cos(\alpha + \varphi) \cos\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} Nx_2 \\ Ny_2 \\ Nz_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\beta \cos(\alpha - \varphi) \cos\gamma + \sin(\alpha - \varphi) \sin\gamma \\ \sin\beta \cos(\alpha - \varphi) \sin\gamma + \sin(\alpha - \varphi) \cos\gamma \\ \cos(\alpha - \varphi) \cos\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$N_3 = \begin{bmatrix} Nx_3 \\ Ny_3 \\ Nz_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\alpha \sin\gamma \cos\varphi - \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma \cos\varphi + \\ \cos\beta \cos\gamma \sin\varphi \\ \sin\alpha \cos\gamma \cos\varphi + \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma \cos\varphi - \\ \cos\beta \sin\gamma \sin\varphi \\ \sin\beta \sin\varphi + \cos\alpha \cos\beta \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$N_4 = \begin{bmatrix} Nx_4 \\ Ny_4 \\ Nz_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\alpha \sin\gamma \cos\varphi - \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma \cos\varphi - \\ \cos\beta \cos\gamma \sin\varphi \\ \sin\alpha \cos\gamma \cos\varphi + \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma \cos\varphi + \\ \cos\beta \sin\gamma \sin\varphi \\ -\sin\beta \sin\varphi + \cos\alpha \cos\beta \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

此时,各个反射面的反射矩阵^[10]可以表示为

$$H_k = 1 - 2N_k N_k^T \quad (5)$$

若入射光沿 Z 轴方向照射金字塔棱镜,即

$$A_1 = [0 \quad 0 \quad 1] \quad (6)$$

则可求的反射光线的方向向量为

$$A_{2k} = H_k A_1 = \begin{bmatrix} -2Nx_k Nz_k \\ -2Ny_k Nz_k \\ 1 - 2Nz_k^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

上述式中 $k=1, 2, 3, 4$,表示分别经四个反射面反射后的光线。

1.2 三维角度测量原理

三维角度测量系统如图2所示。

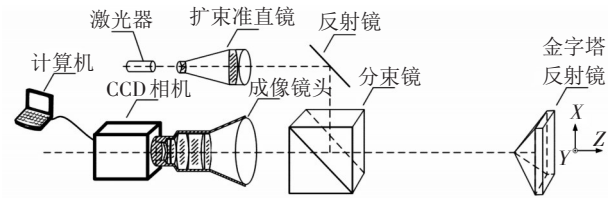


图2 三维角度测量系统结构图

工作时,将金字塔棱镜固定在被测点,其余部分安装在基准点。激光器发出的激光经扩束镜扩束准直后,通过平面反射镜、分束镜照射金字塔反射镜中心。由于金字塔反射镜具有4个对称反射面,反射后的光束被分为四束,被成像镜头成像为4个光斑。当被测点和基准点之间发生角度变化时,金字塔棱镜反射回来的光束角度也会随之变化,根据CCD相机采集到的光斑位置信息的变化,就可以反解出所需的角度的信息。具体步骤如下:

(1) 建立图像坐标系

建立CCD图像传感器成像面坐标系 uv ;图像传感器成像面坐标系 uv 的坐标原点为图像传感器的像面左上角顶点, u 和 v 分别对应图像传感器的像面的行坐标和列坐标,坐标单位为像素;

(2) 获取激光像斑质心位置信息

利用图像传感器采集经金字塔反射镜反射的光

斑图像,记 (u_k, v_k) , $k=1, 2, 3, 4$ 为金字塔反射镜反射面 N_k 反射光束的像斑质心位置,则有

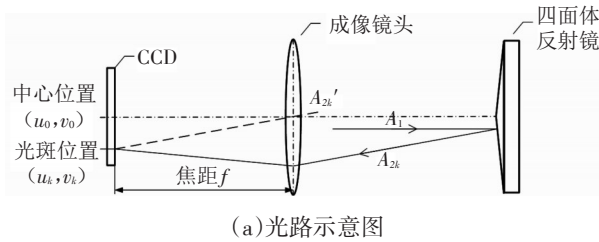
$$u_k = \frac{\sum \sum i [I(i, j) - T]}{\sum \sum [I(i, j) - T]} \quad (8)$$

$$v_k = \frac{\sum \sum j [I(i, j) - T]}{\sum \sum [I(i, j) - T]} \quad (9)$$

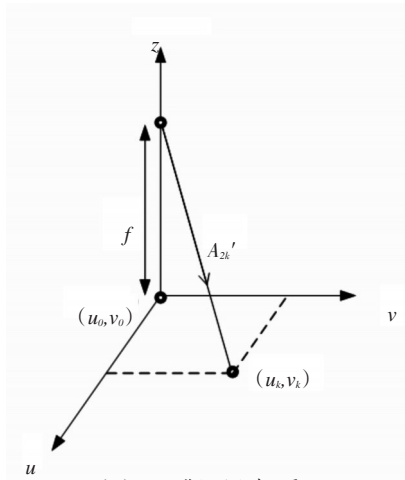
其中, (i, j) 为激光照射图像传感器像元的位置; $I(i, j)$ 为所述像元的信号强度; T 为图像噪声域值。

(3) 求解三维角度

角度测量原理图如图3所示。



(a) 光路示意图



(b) CCD靶面坐标系

图3 角度测量原理图

系统光路如图3a所示。准直后的激光 A_1 照射金字塔反射镜上,经过第 k ($k=1, 2, 3, 4$)面反射后的光束 A_{2k} 被焦距为 f 的成像镜头接收,并成像于CCD靶面上的 (u_k, v_k) 处。由成像原理可知,作辅助光线 A_{2k}' 平行于 A_{2k} 且过镜头光心,则光斑位置 (u_k, v_k) 可由 A_{2k}' 和焦距 f 确定。

如图3b所示,在CCD靶面坐标系 uv 中,测量相机中心点坐标为 (u_0, v_0) ,反射光斑中心位置 (u_k, v_k) ,根据几何关系和式(7)可得下式

$$\begin{cases} \frac{u_k - u_0}{f} = \frac{2N_{z_k} N_{x_k}}{2N_{z_k}^2 - 1} \\ \frac{v_k - v_0}{f} = \frac{2N_{z_k} N_{y_k}}{2N_{z_k}^2 - 1} \end{cases} \quad (10)$$

上式即为光斑中心位置的理论表达式。将根据式(8)、式(9)从实际图像中求出的 (u_k, v_k) 代入式(10),采用最小二乘迭代算法即可求出三维角度 α, β, γ 。

2 系统设计与仿真实验

2.1 系统设计与指标分析

为实现前文所述功能,需要针对性的设计整个系统。系统的设计参数主要包括成像镜头焦距 f 和口径 D , CCD的靶面面积 $a \times b$ 和像元尺寸 λ ,以及金字塔棱镜底面和反射面的夹角 φ 。根据式(10)可知,系统测量精度和镜头焦距 f 有关, f 越大测量精度越高。CCD的像元大小 λ 也决定了系统测量精度,有下式

$$\delta_\alpha = \delta_\beta = \frac{\lambda}{2f} \quad (11)$$

$$\delta_\gamma = \frac{\lambda}{4\varphi f} \quad (12)$$

系统的测量范围则由CCD靶面大小和镜头焦距 f 决定,有下式

$$R_\alpha = \pm \left(\frac{a}{4f} - \varphi \right) \quad (13)$$

$$R_\beta = \pm \left(\frac{b}{4f} - \varphi \right) \quad (14)$$

而扭转角 γ 的测量范围理论上无限制。

因为要保证反射的光线被镜头接收到,所以金字塔棱镜的夹角 φ 和镜头口径 D 共同决定了系统的工作距离(基准点和被测点间的距离)为

$$L = \frac{D/2}{\tan 2\varphi} \quad (15)$$

此外,还要尽量减少镜头畸变对测量精度带来的影响。综合考虑后,一个典型的测量系统的设计参数如表1所示。

表1 三维角度测量系统参数

参数	值	单位
工作波长	632.8	nm
金字塔棱镜夹角 φ	0.001	rad
镜头口径	100	mm
镜头焦距	470	mm
镜头畸变	<0.01	%
CCD分辨率	1 024×1 024	/
CCD像元大小	5.45	μm

此时,可求出系统的工作距离大于 20 m,俯仰角和偏摆角分辨率 4.7 μrad ,测量范围 1.97 mrad,扭转角分辨率 2.9 mrad。而实际使用时可根据需要修改参数,只要指标满足使用需求即可。

2.2 仿真实验验证

为验证测量方法,在此使用光学软件 FRED 进行建模与仿真实验。为简便起见,在建模过程中使用 FRED 自定义光源,设置其波长为 632.8 nm,光束直径 5 mm,代替实际系统中经过扩束的 He-Ne 激光束。分光棱镜和成像物镜的口径为 100 mm,物镜焦距 470 mm,像面大小 10 \times 10 mm。金字塔棱镜采用 UG 建模并导入 FRED,设置其斜面与底面夹角 φ 为 3.5 mrad。根据式(15)可求出,此时系统的最大工作距离(金字塔棱镜与发射接收端距离)为

$$L = \frac{100/2}{\tan(2 \times 0.0035)} = 7142.74 \text{ mm} \quad (16)$$

保留一定裕量,取工作距离为 3 m,系统建模和光线追迹如图 4 所示。注:由于太长的工作距离不方便图示,所以此处仿真建模的参数相对于表 1 有所改动。

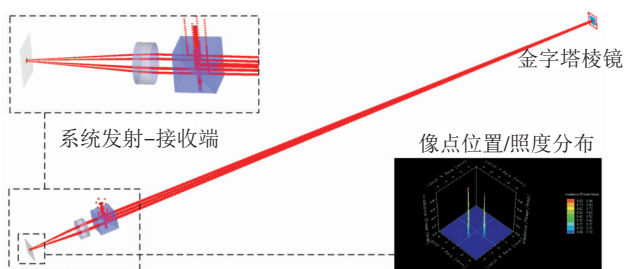
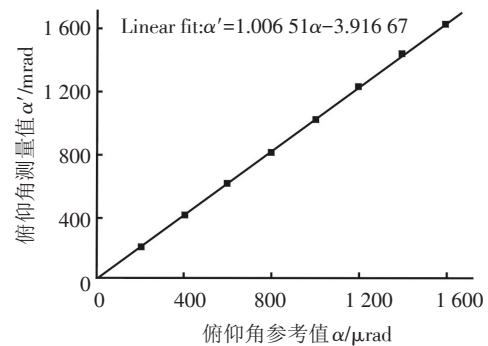


图4 系统仿真实验原理图

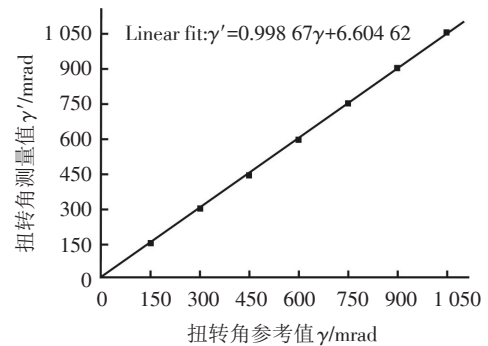
分别设置金字塔棱镜的偏转角度 α, β, γ , 对像面上的四个像斑采用式(8)、式(9)求出质心位置,然后根据前文所述原理求出偏转角度的测量值 α', β', γ' , 并与设置的参考真值进行比较,结果如图 5 所示(俯仰和偏摆结果相同,故在此只列出俯仰角结果)。

上述结果和理论值的偏差主要来自于光学系统的误差。实验中采用的是一块单透镜作为成像物镜,畸变未得到很好的校正;另一方面,经过金字塔棱镜反射后的光束斜入射物镜边缘,导致成像点形状的对称性不好,给定位精度带来了较大影响。尽管如此,上述结果仍然验证了该测量原理的正确

性,若能采用设计良好的光学系统,可以大大降低这两者的影响。



(a)俯仰角测量结果



(b)扭转角测量结果

图5 仿真实验结果

此外,还进行了作用距离 20 m 的仿真实验(采用表 1 中参数),测量精度没有显著变化。但在系统实际使用过程中,较远的工作距离必然会引入其他不可控因素,如光通道中空气非均匀性导致的光束漂移,金字塔棱镜夹角 φ 太小而导致相对加工误差 $\Delta\varphi$ 增大等。这类因素对测量精度的影响有实际验证。

3 结论

提出了一种光学非接触式的小角度测量方法,该方法基于激光准直技术和金字塔棱镜的反射特性,具有原理简单、结构可靠、作用距离远,并可以同时测量三维角度的特点,适用于船体、桥梁等大型结构的小角度变形测量。文中通过数学建模和理论分析,给出了三维角度的计算方法;随后,设计了测量系统,论证了系统的工作距离、分辨率和测量范围,并进行了建模和仿真实验。实验结果表明,该方法可以在几米到几十米的作用距离上实现三维角度的

精密测量。

参考文献

- [1] 常立斌. 角度传感器发展动向[J]. 微电机, 1993(2): 20-23.
- [2] 王超, 马建仓. 无盲角磁阻角度传感器的研制[J]. 电子测量技术, 2007(5): 188-190.
- [3] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程, 2010(8): 1766-1772.
- [4] 何俊, 李文华. 基于绝对感应同步器的绝对角度测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2009(4): 64-66.
- [5] 陈颖, 张学典, 逯兴莲, 等. 自准直仪的现状与发展趋势[J]. 光机电信息, 2011(1): 6-9.
- [6] 吴易明, 高立民, 陈良益. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 525-529.
- [7] 蔡盛, 梁爽, 丁振勇, 等. 基于莫尔条纹的自准直测角方法研究[J]. 光电子·激光, 2008(10): 1375-1377.
- [8] 殷延鹤, 乔彦峰, 蔡盛, 等. 大型结构角度变形测量中的光学方法[J]. 光电技术应用, 2014(4): 69-74.
- [9] 张彦夫, 王建立, 吴元昊, 等. 四棱锥波前传感技术数值仿真和重构研究[J]. 光学技术, 2015(2): 101-105.
- [10] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 67-69.

《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管, 中国电子科技集团公司光电研究院主办, 公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色, 传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息, 报道新型科技成果, 推动工程技术交流, 促进行业科技进步与发展。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升, 2015年、2016年两年连续入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

期刊所设栏目主要有: 综述, 光电系统, 光学设计, 红外技术, 激光技术, 光电探测, 光电器件与材料, 信号与信息处理, 电路与控制, 测试、试验与仿真等。

期刊拥有优秀的编委会成员, 审稿专家涉及光电技术的各个领域, 具有审稿速度快、质量高, 编辑人员具有较高的职业素质, 工作认真负责、反馈速度快, 期刊版面设计合理、美观大方, 印刷质量好, 出刊及时。对于优秀论文可以减收或不收版面费。

编辑部通信地址: 天津市空港经济区纬五道9号; 邮政编码: 300308; 联系电话: 022-59067938; 联系人: 朱编辑 牛编辑; 投稿邮箱: aoe-cetc@vip.163.com。

《光电技术应用》编辑部