

激光扫描三角法大型曲面测量中影响参数分析

杨耀权¹, 施仁¹, 于希宁², 高饒年²

(1. 西安交通大学, 710049, 西安; 2. 华北电力大学)

摘要: 介绍了基于光学三角理论的激光扫描大型曲面测量原理. 详细分析了影响其测量精度的几个主要因素, 即被测物体表面的光学性能、物面倾斜、光学系统畸变及散斑等对测量精度的影响. 针对大范围测量时, 光斑图像占用多个像素及诸多因素造成的光斑图像强度分布不均, 以致于很难读取真正光斑几何中心的问题, 文中提出了基于 Hough 变换的光斑中心提取方法. 实验表明了该方法对提高大型曲面测量精度的有效性.

关键词: 激光扫描; 三角测量法; 曲面测量; 误差分析

中国图书资料分类法分类号: TP391.4

Laser Scanning Triangulation for Large Profile Measurement

Yang Yaoquan¹, Shi Ren¹, Yu Xining², Gao Tangnian²

(1. Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China; 2. North China University of Electric Power)

Abstract: Large surface profile measurement is advanced using optical triangulation. Described are the effects of optical characteristic of the surface, the testing surface inclination, the optical lens distortion and speckle. It is difficult to locate the precise center of laser spot in large scale measurement, because the image spot occupies more pixels and the intensity non-uniform distribution of the image spot. Application of the Hough transform can enhance the measurement precision of large scale 3-D surface profile.

Keywords: laser scanning; optical triangulation method; surface profile measurement; error analysis

基于光学三角原理的三维物体形状测量由于其具有非接触、精度高、易于自动控制等优点, 日益受到人们的重视, 并广泛应用于机器人视觉、实物仿形、自动加工、工业检测等领域. 该方法的本质是通过分析受到三维物体面形调制的光场, 从而获得物体的三维信息. 在大型三维曲面测量中, 受光源功率、摄像机视角等因素的影响, 结构光条法、光栅投

影法的应用受到一定限制, 而较多采用的是基于点光源的激光扫描测量方法. 在激光扫描大型曲面测量系统的研制中, 我们发现除机械扫描误差、CCD 摄像机分辨率等因素外, 物体表面的光学性能、散斑的存在等因素对测量精度的影响很大. 提高测量精度是该方法进入实用化的关键. 本文对激光扫描大型曲面测量过程中影响精度的因素进行了详细分

收稿日期: 1998-05-22. 作者简介: 杨耀权, 男, 1962年9月生, 电子与信息工程学院自动控制系, 博士生; 现为华北电力大学副教授.

析,并提出了减小和校正误差的方法.

1 激光扫描大型曲面测量原理

对大型曲面进行测量时,由于测距范围很大,不能采用光学全场测量法或结构光条法进行测量,物体本身也不能运动,为此,我们设计了点光源激光扫描大型曲面测量系统^[1],其测量原理如图1所示.激光器和摄像机均安装在二维转台上,激光束与镜头光轴平行,测量过程中二者相对位置保持不变,为减小遮挡对测量的影响,整套设备安装在被测物体侧面距参考底面高度为 H 的平台上.由图1中几何关

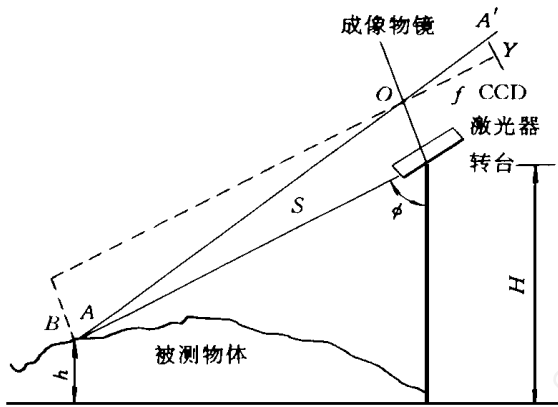


图1 测量原理图

系可知,物点 A 到激光器的距离 S 为

$$S = Bf / Y \tag{1}$$

式中 B 为激光束与镜头光轴的安装基线距离; f 为焦距; Y 为与物点 A 对应的像高.

可求出对应物点 A 的高度

$$h = H - S \cos \phi \tag{2}$$

这样,转台在计算机控制下带动激光器和 CCD 摄像机按一定的分割方案对被测物体逐点扫描,采集图像信息,同时计算被测点三维坐标.扫描完成后,由计算机拟合物体表面形状,并给出测量结果.

2 影响参数分析

2.1 物体表面光学性能的影响

采用激光扫描方法对物体形状进行测量,是以激光束投射到被测物面形成的漫反射光斑作为传感信号.假设被测物面为理想的漫反射面,散射体为不透明的无吸收介质,根据朗伯(Lambert)定律^[2],散射光场的光强分布为

$$I = I_0 \cos \theta \tag{3}$$

如图2所示,其中 θ 为散射光方向与物面法线间的夹角, I 为 θ 方向单位立体角内的散射光功率, I_0 为法线方向的 I 值.由此可知,当入射光功率一定时,被测物表面反光性能越好,则 CCD 光敏面接收到的光功率越大,信噪比越高,越有利于提高测量精度.

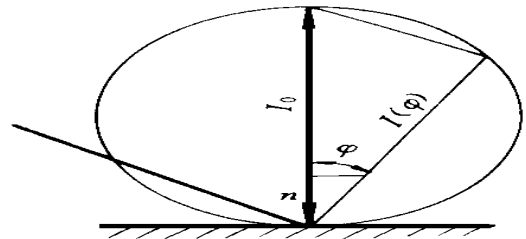


图2 朗伯定律示意图

在曲面测量中,被测物表面的情况是千差万别的,同一光源入射到不同材料、粗糙度、颜色、光学性质及表面面形的物体表面上,物面对光的反射和吸收程度将有很大差异,特别是物体表面的粗糙度和复折射率等因素严重影响着物体表面的光散射,这将会使通过成像物镜得到的光斑图像的质量有较大差别.文献[3]从理论上证明了可以将面形和表面粗糙度对散射的贡献分离开来加以处理.

图3为同一激光光源投射到不同材料上,经 CCD 摄像机采集到的光斑图像信号.其中图3a中物面为均匀的细煤粉表面;图3b中为煤粉与煤块混

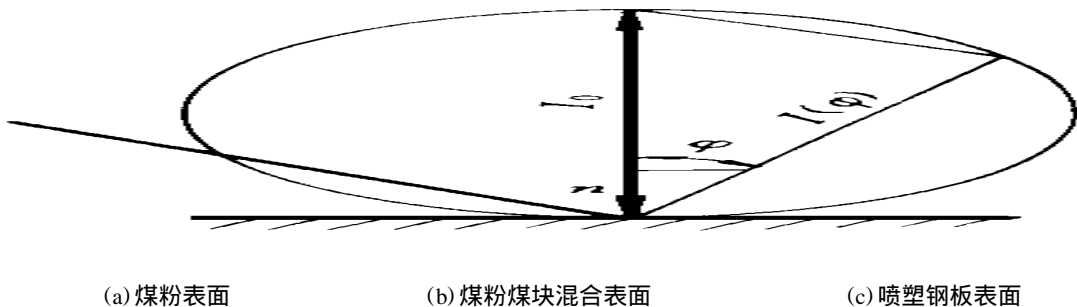


图3 激光投射到不同材料上的光斑图

合所形成的表面;图 3c 中为喷塑钢板表面. 由此可以看出,当对不同物面进行扫描时,激光束在物面所形成的光斑信号形状大不相同. 因此,在计算面形坐标时,必须对光斑中心进行提取,否则将严重影响测量精度.

2.2 被测物面倾斜的影响

当被测物面法线与入射光方向不重合时,称被测物面发生了倾斜. 随着倾斜角的不同,散射光场的空间分布也将发生变化,从而使接收光功率发生变化. 如果称由激光束和成像物镜光轴构成的平面为测量入射面,实验与理论分析说明,被测物面法线在测量入射面内的倾斜对测量影响最大. 下面仍假设被测物面为理想的漫反射面,基于朗伯定律对物面倾斜的影响加以讨论.

成像物镜接收光功率 P 可由下式计算

$$P = I \cdot D \tag{4}$$

式中: I 为成像物镜所对应的接收光强; D 为成像物镜所对应的立体角. 由于成像物镜相对于测量距离来讲很小,因此可以认为接收光强在 D 的立体角内是均匀的.

如图 4 所示,当被测物面倾斜角为 α ,且激光器到物点之间距离为 S 时,则被测物面法线与物点到成像物镜中心连线间的夹角为

$$\phi = \tan^{-1}(B/S) - \alpha = \beta - \alpha$$

式中: $\beta = \tan^{-1}(B/S)$,则依朗伯定律有

$$I = I_0 \cos(\beta - \alpha) \tag{5}$$

成像物镜所对应的立体角为

$$D = R^2 / r^2$$

式中 R 为成像物镜半径; r 为物点到成像物镜中心的距离, $r = S / \sin \beta$.

综合以上可得

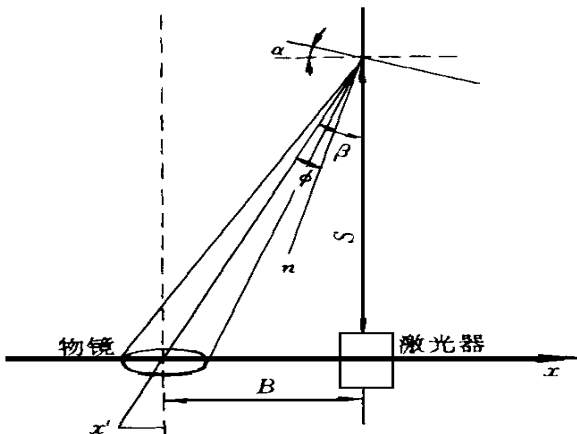


图 4 物面倾斜的影响

$$P = I_0 (R^2 / S^2) \sin^2 \beta \cos(\beta - \alpha) \tag{6}$$

由上式可以看出,成像物镜的接收光功率有如下变化规律:

(1) 当被测物面倾斜角 α 一定时,成像物镜接收光功率 P 与测量距离 S 的平方成反比;

(2) 当测量距离 S 一定时,接收光功率 P 随物面倾角的变化规律是,当 $\beta < \alpha$ 时, P 随 α 增大而增大,当 $\beta > \alpha$ 时, P 随 α 增大而减小,当 $\beta = \alpha$ 时, P 取极大值.

在激光扫描大型曲面测量中,由于 $B \ll S$,故角度 β 的值很小. 因此,当 α 较大时会使得成像物镜接收到的光功率明显降低,从而影响系统测量精度.

2.3 弥散斑的影响

在激光扫描过程中,目标光斑到镜头之间的距离(物距)在不断变化,由此将导致像距的变化,而 CCD 与物镜之间的距离在装调好后应保持不变,因此光斑成像质量在很大程度上取决于像平面与 CCD 接收面的重合程度. 在扫描过程中,二者不可能完全重合,因而在 CCD 接收面上出现了弥散斑. 如图 5 所示,图中 A_1AA_2 为物镜的出瞳, B_1B_2 表示物体像的大小, M_1M_2 为 CCD 接收面,由于二者不重合,使得像点 B_1B_2 在 M_1M_2 上形成了弥散斑. 受弥散斑的影响,光斑图像的光强分布是不稳定、不均匀的^[4],使光斑几何中心与光强中心发生了偏离.

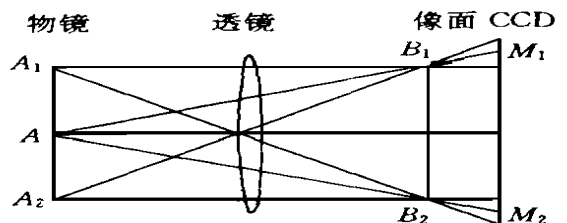


图 5 弥散斑的产生

除上述影响因素外,其它影响激光扫描大型曲面测量精度的因素还有: CCD 摄像机分辨率的影响、光学系统的畸变、机械扫描定位误差、遮挡的影响等. 它们造成影响的原因及消除方法在下一部分介绍.

3 提高测量精度的途径

3.1 提高光斑几何中心定位精度的方法

前已述及,在激光扫描测量中,受多种因素的影

响,使采集到的光斑图像的几何中心与光强中心发生偏离.此时,传统的光斑中心定位方法,如面积中心法等已不适用.基于此,我们提出了基于 Hough 变换的光斑中心读取方法,在应用中取得了较好的效果.

对于大型曲面的测量,由于测距范围变化较大,光学镜头焦距采用按档变倍调节,以使在整个测量范围内系统的深度测量分辨率比较均匀.但是,由于激光束存在一很小的发散角,再加上镜头聚焦、光圈等参数的影响,使得在整个测量范围内,采集到的光斑图像大小在不断变化.在我们设计的系统中,光斑图像为一个半径为 4~10 个像素的圆.尽管在实际测试中受各种因素的影响,光斑图像光强分布极不均匀,且圆的形状也存在畸变,但是,我们发现光斑图像仍能给出圆形光斑的大部分轮廓.因此,为了准确读取光斑几何中心,我们首先根据图像灰度值读取光斑中心的大致位置,然后采用 Hough 变换的思想,在一 30×30 像素的领域内提取光斑图像边缘,并实施 Hough 变换,寻找半径为 4~10 个像素的圆.经 Hough 变换后,可以得到多个满足给定条件的圆,选取圆上满足条件边缘像素数最多(对应 Hough 变换参数矩阵的最大值)的圆,以该圆的圆心作为光斑几何中心,求取被测物点的三维信息.该方法有效地提高了测量的重复性能,基本克服了由于被测物体表面光学性能的差异、物面倾斜、弥散斑等因素对测量结果的影响.

3.2 视觉系统参数的标定

目标光斑首先要经光学系统,然后进入 CCD 摄像机至图像采集系统,而一般光学系统也存在畸变误差.进入 CCD 传感器后,虽然视频信号的转换误差、传感器的随机与系统噪声及传感器像素阵列的几何误差等也会给系统带来测量误差,这些误差从理论计算加以消除是很困难的,甚至是不可能的,但是,它们有一个特性,就是系统一旦确定,这些影响因素也就确定了.因此,我们将已知的物体表面坐标

位置和对对应摄像机的像平面的坐标位置在整个测量范围内均匀布点标定,并且要考虑光学系统参数调整(如变倍、聚焦)的影响,将标定的对应值进行非线性拟合处理,从而得到一个像点位置与测量距离的输入与输出的一一对应关系.这样可以基本消除光学系统畸变、CCD 摄像机及图像采集系统对测量结果的影响.

3.3 其它提高测量精度的方法

CCD 摄像机光敏面上像元中心距限制了深度测量分辨率.在高精度的测量中,可选用像元数多、分辨率高的 CCD 器件,也可以通过计算机拟合插值或解调与概率统计法增加像元数,在一定程度上提高 CCD 分辨率.

对于本系统,由图 1 知,镜头光轴与激光束平行,无穷远处物点成像在 CCD 光敏面中心,实测范围内均成像在光轴一侧,没有充分利用 CCD 的分辨率.为此,我们在镜头光轴与激光束之间引入一交汇角,使实测物点能成像在光轴两侧,以提高系统的测量分辨率.交汇角的值很小,其值由测距范围、基线 B 及镜头变倍的档位确定.为克服遮挡的影响,我们设计在被测物体两侧同时安装两套图 1 所示的测量系统互补测量,以消除遮挡对测量结果的影响.

4 实验及结论

实验是针对火电厂煤场存煤量测量的测距范围进行的,物距变化范围从 30 m 到 200 m 左右.表 1、表 2 分别给出了采用中值法和基于 Hough 变换方法读取光斑中心的测距结果.由此可以看出,采用 Hough 变换方法明显提高了测距精度,基本消除了物面反射特性不均、弥散斑及物面倾斜对测量结果的影响.体积测量实验也表明了该方法对提高测量重复性能的有效性.该方法已成功地用于火电厂煤场存煤量自动检测系统.

表 1 距离测量数据(中值法)

实际距离/m	测量距离/m					绝对误差/m	相对误差/%
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次		
30.0	29.98	30.04	30.01	29.98	29.96	0.04	0.13
90.0	89.98	89.98	90.12	89.98	90.05	0.12	0.13
180.0	180.23	179.97	179.70	179.70	179.97	0.30	0.17

(下转第 45 页)

面积,对管孔周围起到了加强作用,可以使内转角应力集中区域的应力水平大大减小;另外,这种管接头除了承受介质内压作用外,其截面还有一定的裕度,因而起到了加强作用.使用粗略的估算方法,在只考虑内压应力的情况下,依据英国疲劳计算标准 BS 5500 设计疲劳曲线,锅炉汽包下降管处的内压应力集中系数降低 10%,锅炉汽包的疲劳寿命就可以增加 35%左右.单从疲劳强度的角度看,这无疑是非常诱人的.但另一方面,内伸段的引入将有可能增大局部阻力系数,从而减小下降管压差,在上升管吸热情况和结构不变的情况下,使得自然水循环的可靠性变差.不过,通过适当增大内伸管的倒角圆弧半径,可使这种可能性得以减小.

5 结 论

通过对 300 MW 机组锅炉汽包的内插式下降管结构内压应力场的定量计算,可以看出,有内伸段

的接管结构比平齐式接管结构的应力集中水平要低许多.但是,过深的内伸管将影响到水循环的可靠性.为了既要保证水循环的安全可靠性,又要兼顾到汽包的疲劳寿命强度,本文提出了将内伸管头部加工成马鞍形的改进意见.对于这种接管结构,如何使水动力可靠性定量化,以及如何在综合评估的基础上确定内伸深度,这些工作还有待于进一步的研究.

参考文献:

- [1] 吕邦泰,沈月芬. 锅炉承压部件强度及寿命. 北京:水利电力出版社, 1992. 105~112.
- [2] 程丰渊,梁剑平. 调峰机组锅炉汽包的强度设计. 锅炉制造, 1982, (5,6): 26~55.
- [3] 赵铁成. 300 MW 机组锅炉汽包温度场、应力场三维有限元分析:[硕士学位论文]. 西安:西安交通大学能源与动工程学院, 1997.
- [4] 张康达. 锅炉压力容器的疲劳失效. 北京:劳动人事出版社, 1988. 124~128.

(编辑 蒋慧姝)

(上接第 18 页)

表 2 距离测量数据(基于 Hough 变换的方法)

实际距离/m	测量距离/m					绝对误差/m	相对误差/%
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次		
30.0	29.98	29.98	29.98	30.01	30.01	0.02	0.07
90.0	90.05	89.98	90.05	90.05	90.05	0.05	0.05
180.0	179.97	179.97	180.23	180.23	179.97	0.23	0.13

参考文献:

- [1] 杨耀权,施仁,高镛年. 基于光学三角原理的视觉检测系统及应用. 华北电力大学学报, 1998, 25(3): 64~68.
- [2] 玻恩 M,沃耳夫 E. 光学原理. 北京:科学出版社, 1978. 242.
- [3] 王海明. 光学表面光散射(1):理论基础. 计量学报, 1992, 13(4): 269~276.
- [4] Baribeau R, Rioux M. Influence of speckle on laser range finders. Appl Opt, 1991, 30(20): 2 873~2 878.

(编辑 荆树蓉)