

## Design of Volume Optical Measuring System Based on Disk Integral\*

ZHOU Jinrong<sup>1 2\*</sup> HUANG Wenming ZHENG Nan

(1. College of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China;

2. Fujian Lilliput Optoelectronics Technology Co., Ltd., Zhangzhou, Fujian 363000, China)

**Abstract:** In the volume measurement of irregular objects, it is a commonly used method to measure manually with a measuring cup. Taking the volume measurement of irregular pyramid as an example, a fast automatic measurement method is proposed based on the principle of laser and CCD sensor imaging. The method uses TMS320F28335 high-speed digital signal processing chip as the main control circuit and laser triangulation and calculus disc method to achieve irregular pyramid volume measurements. This method takes into account the automatic acquisition error of cloud point coordinates during dynamic imaging of CCD sensor and improves the accuracy and stability of automatic detection by complement and least squares. The experimental results show that the relative measurement accuracy of the system is more than 94%.

**Key words:** optical measurement; laser triangulation; line array CCD sensor; disc differential method

EEACC: 7200; 7320P

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2018.01.017

## 基于圆盘积分的体积光学测量系统设计\*

周锦荣<sup>1 2\*</sup> 黄闻铭 郑楠

(1. 闽南师范大学物理与信息工程学院 福建 漳州 363000; 2. 福建利利普光电科技有限公司 福建 漳州 363000)

**摘 要:** 在不规则物体的体积测量中, 用量杯进行人工测量是常用的一种方法。以不规则四棱锥的体积测量为例, 结合激光学原理和 CCD 传感器成像技术, 提出一种快速的自动测量方法。该方法利用 TMS320F28335 高速数字信号处理芯片作为主控电路, 采用激光三角法和微积分中的圆盘法, 实现不规则四棱锥的体积测量。该方法综合考虑了 CCD 传感器动态成像时云点坐标的自动采集误差, 并通过补全和最小二乘法来提高自动检测的精度和稳定性。实验结果表明, 该系统的相对测量精度达到 94% 以上。

**关键词:** 光学测量; 激光三角法; 线阵 CCD 传感器; 圆盘微分法

中图分类号: TP21

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2018) 01-0090-05

在测量领域, 测量精度、测量速度、测量数字化和自动化程度要求不断提高, 传统的接触式测量已经无法满足需要, 而基于 CCD 成像与激光三角法的非接触式测量方法具有结构简单、测量精度高、实时性好, 广泛应用于工业生产、医学检测和精密测量等领域<sup>[1-3]</sup>。目前, 国内外很多的科研机构对光斑定位、CCD 自动聚焦调整、测量误差等不足问题进行了研究, 并提出了相应的优化方法<sup>[4-9]</sup>。实际应用中, 如德国 OPTO NCDT 系列和日本 LK 系列、LC 系列等激光三角测量传感器在测量精度、速度等性能方面也比以前有较好的提高<sup>[6-7, 9]</sup>。为实现多面体的体积非接

触测量, 利用激光三角法和圆盘积分法推导出测量的数学算法模型, 并采用 TI 公司的 TMS320F28335 高速 DSP 信号处理器为控制核心<sup>[10]</sup>, 设计出对不规则四棱锥体积的进行光学测量的具体硬件电路和软件程序实现方法。系统结构如图 1 所示。

### 1 多面体的体积测量原理

利用直入型激光三角测量原理和圆盘积分法相结合进行多面体的体积测量<sup>[14, 8]</sup>, 直入型激光三角测量原理如图 2 所示, 体积测量采用圆盘积分测量法, 如图 3 所示。

项目来源: 福建省自然科学基金项目 (2016J01758); 福建省资助省属高校科研专项项目 (JK2016026); 福建省教育厅科技项目 (JAT160284)

收稿日期: 2016-12-28 修改日期: 2017-02-23

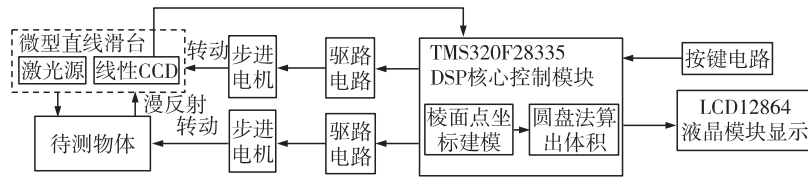


图1 测量系统设计框图

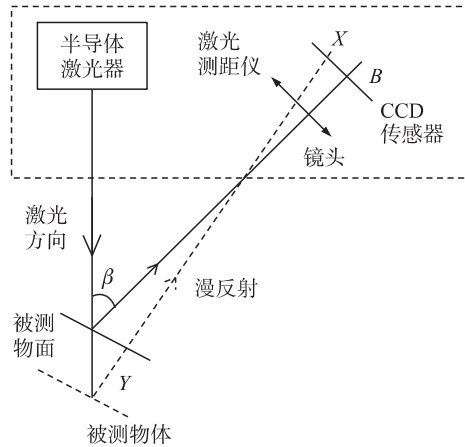


图2 直入式激光三角测量原理

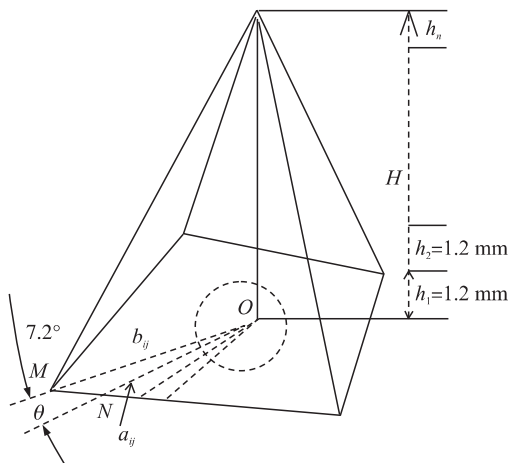


图3 圆盘积分测量体积原理

图2中半导体激光器发出的直入射光到被测物表面,形成一个光斑在物体表面发生漫反射,其中一部分漫反射光经过接收透镜成像于CCD上,直入射光与CCD传感探测到的漫反射成像光线之间的夹角为 $\beta$ ,当被测物面移动或表面形状发生变化时,成像光线在图像上的位置也随之发生变化。通过对图像上的光线进行点采样,并利用激光三角测距的方法计算各采样点对应的物点离参考平面的距离,半导体激光器和CCD组成的系统完整扫描被测物体的表面后,即可获取被测物面的点云及其对应坐标 $P=(r, \theta, z)$ ,其中 $r$ 为载物台旋转中心至物体表面点的距离 $\theta$ 为载物台每次旋转的角度 $z$ 为高度 $h$ 。如图3所示,把整个四棱锥的每一层圆盘按高度 $h$ 分为 $n$ 层,并每层圆周 $360^\circ$ 按角度 $\theta$ 分为 $m$ 个角

度,则 $n=H/m$ , $m=360^\circ/\theta$ ,其中 $m, n$ 四舍五入取整数。

实验中按图3所示圆盘积分测量法首先得到的距离是物体表面与旋转中心 $O=(0, 0, 0)$ 的距离 $a_{ij}$ 和 $b_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ ,然后通过控制底部转盘的旋转,每次旋转 $\theta=7.2^\circ$ ,可将当前高度表面上的点采样出来,并使用三角形的面积公式计算出对应面积:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} a_{ij} b_{ij} \sin \theta \quad (1)$$

再通过每次上升的高度使用圆柱的体积公式底面积乘高,就可得到当前层的体积,之后通过直线滑台将线阵CCD与激光模块向上抬升 $h$ 高度,进行下一次测量,直到测量结束,便可利用式(2)计算出整个物体的体积。若顶部最后剩余的距离小于 $h$ ,由于激光存在衍射、散射,因此总会有部分光会被CCD采集到,可减少顶部丢失成份。

$$V = \sum_{j=1}^n h_j \sum_{i=1}^m S_{ij} = \sum_{j=1}^n \left( h_j \times \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} a_{ij} b_{ij} \sin \theta \right) \quad (2)$$

## 2 实验测量平台与主要硬件电路

### 2.1 主控电路模块

实验测量平台主要由TMS320F28335为核心的DSP高速处理控制器模块<sup>[11]</sup>、载物台转动模块、TSL1401线阵CCD、半导体激光源以及LCD12864液晶显示模块构成。利用TMS320F28335的PWM脉宽调制功能,一方面控制步进电机的转动从而带动载物台待测物体的转动,每次转动 $7.2^\circ$ ;另一方面控制微型直线滑台(激光器和线阵CCD)作步进升降。半导体激光照射在待测物体上,物体产生漫反射被线阵CCD接收,线阵CCD再将数据传至TMS320F28335控制模块上,随后待测物体上升 $1.2\text{ mm}$ 。控制模块接收到线阵CCD采集的光斑点坐标信息进行分析处理,建立相关的数学模型,利用式(2)圆盘积分算法快速计算出物体体积,并送LCD12864上显示测量结果。主控电路如图4所示,按键S1实现直线滑台的上升,按键S2实现直线滑台的下降,按键S3为控制整个系统的启动。

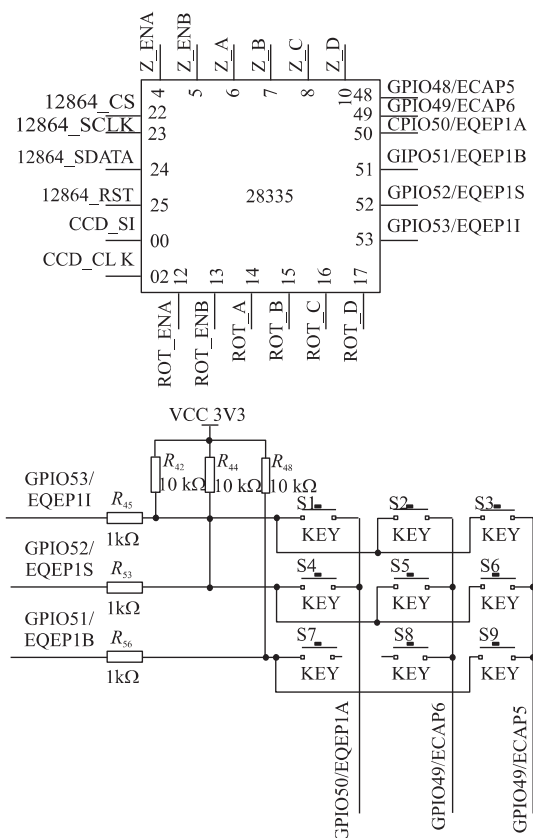


图 4 TMS320F28335 主控电路图

## 2.2 载物台转动模块和微型直线滑台模块

载物台转动模块和微型直线滑台模块利用 L298N 电机驱动电路来控制载物圆盘的旋转和直线滑台的上下直线运动。TMS320F28335 的 GPIO 端口与 L298N 的输入控制信号相连,接收脉冲信号和采用电流,并调整 PWM 输出给 L298N 控制电机的正反转。微型直线滑台通过滚珠丝杠将旋转运动转化成直线运动,并通过 TMS320F28335 产生控制信号控制步进电机的步进角,实现使激光和 CCD 测量模块按预定的高度上升。实验滑台的丝杆总长 295 mm;丝杆螺距 12 mm;有效行程 255 mm;不锈钢光轴导轨 5 mm。步进电机采用 42 系两相六线步进电机,步距角度  $1.8^\circ$ 。

在实际设计中,该电机的中间抽头不连接,当成两相四线应用,因该步进电机实际驱动电路和载物台 L298N 电机驱动模块的设计应用方法一样,这里不再给出具体电路和原理分析。实物测验平台如图 5 所示。

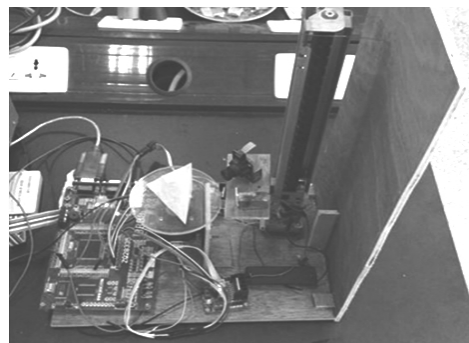


图 5 实物测验平台

## 2.3 TSL1401 线阵 CCD

TSL1401 线阵 CCD 传感器包含 120 个线性排列的光电二极管。每个光电二极管都有各自的积分电路,每个像素所采集的图像灰度值与它所感知的光强和积分时间成正比<sup>[11-12]</sup>。在 128 个像素外还有一个开关逻辑控制和移位寄存器电路,SI 通过该电路控制每个像素的积分和复位操作;CLK 通过该电路控制每一个像素电压的依次输出。内部 Gain Trim 模块对传感器输出的电压进行增益调整,故从 AO 引脚输出的电压无需再接其他运放,直接接入 TMS320F28335 的 AD 输入引脚,每个像素的值可以在 CLK 的下降沿时从 AO 采集。为了便于编程,设计中采用单次曝光法:该方法需要在两个 SI 信号之间添加延时函数来控制曝光时间。首先利用一个 SI 周期来曝光 CCD,紧接着在下一个 SI 周期对 128 个像素进行一次采集。在前一个 SI 周期内,必须输出 129 个 CLK 以丢弃没用的 AO 输出,曝光结束后的第 2 个 SI 周期内采集的 AO 输出才是正确的。TSL1401 的内部结构框图如图 6 所示。

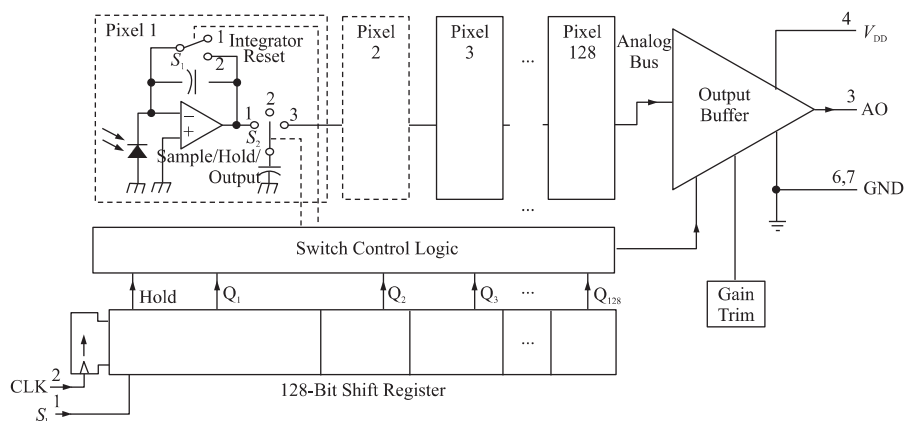


图 6 TSL1401 线阵 CCD 内部电路结构框图

### 3 系统测试

在实验测试前,先对 CCD 矫正测试,利用 EXCEL 对采集到的输入测试数据进行 CCD 曲线拟合:(1)把所给的数据画在一个坐标图上,通过图表来判断其数学形式;(2)决定数学形式中的待定参数;(3)求得数学模型后将实际测定的数据与理论值进行比较,判断误差程度,从而选择合适的参数使得均方误差最小,拟合结果如式(3)所示。

$$y=0.000\ 008\ 014\ 8x^3-0.022\ 260\ 224x^2+0.247\ 295\ 606\ 5x-7.454\ 238\ 437\ 9 \quad (3)$$

式中:通过 CCD 读数和距离的拟合曲线对 CCD 读取出来的值进行校正, $x$  是表示 CCD 读取到的中值, $y$  是与转盘的旋转中心的距离。

实验平台通过 TI 公司的 TMS320F28335 芯片内部自带的 A/D 模块采集 CCD 测量到的距离,对采集到的数据采用微积分中的圆盘法进行体积计算并对丢失部分进行补全。补全方法如图 7 所示,对于丢失的数据,直接将最近两点连接起来,形成一个完整的三角形。主程序流程图如图 8 所示。

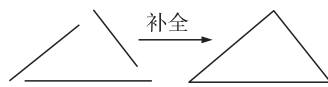


图 7 补全示意图

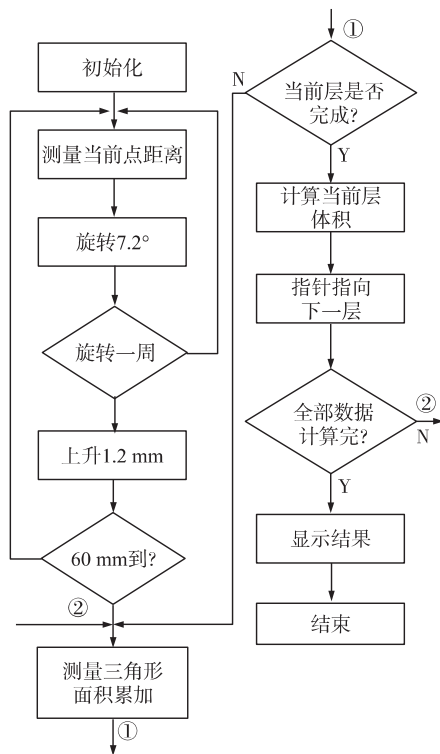


图 8 主程序流程图

利用量杯采用排水法测量棱锥的体积与使用本设计系统对 4 块不同形状的棱锥型橡皮块进行测

量。假设用量杯测量出的多面体体积为标准值,则利用激光测量法测量所得到的值与量杯法测出的值之间的相对误差如式(4)所示。

$$\delta=(\Delta/L)\times 100\% \quad (4)$$

测量结果如表 1 所示。

表 1 棱锥体积测量结果

Drainage method/mL	Laser measurement method/mL	Relative Error/%
8.76	9.25	5.59
12.13	11.84	4.79
25.75	24.37	5.36
30.18	31.76	5.24
43.27	45.42	4.97

从表 1 结果分析,以量杯法为标准值利用激光法进行测量存在小于 6% 的相对误差,这种误差主要由于以下几个方面产生:(1)由于采样的点个数有限,故使用积分法会产生一定的量化误差;(2)部分误差是来自 CCD 的精度,由于使用的 CCD 为 128 像素的线阵 CCD,分辨率较小,故对应测量误差较大;(3)测量过程中,机械部分在运动的时候也会产生误差,特别是直线滑台,由于丝杆螺距为 12 mm,故每次上升的高度会有一定的误差;(4)由于三角测距 CCD 与激光头要存在一定的角度,所以当被测物体的棱角较小时,会产生测量的死区,虽然软件可通过算法做一定程度的修复,但是若实际存在较大的测量盲区误差,则这部分误差对测量精度的影响也较大,可使用双 CCD 进行双重成像减小这种误差;(5)量杯排水法进行测量的固有误差。

### 4 结论

设计中使用线阵 CCD 传感器,利用 TI 公司的 TMS320F28335 芯片,结合激光三角测距、最小二乘法拟合以及微积分中的圆盘法测量出棱锥的体积。实验中以排水法的测量值作为多面体体积的标准值,通过测试计算,利用本系统测量的相对精度能达到 94% 以上。由于采用高速数字信号处理芯片进行自动测量,系统测量速度快,受人为干扰少,测量稳定性较高。另外,由于三角测距 CCD 与激光头要存在一定的角度,所以当被测物体的棱角较小时,会产生测量的死区,虽然软件可通过算法做一定程度的修复,但是与实际存在较大的误差,故这部分对测量精度的影响较大,可使用双 CCD 来提高测试精度。

## 参考文献:

- [1] 汪琛,赵斌. 单镜头激光三角法薄板厚度测量研究[J]. 激光技 2013, 37(1):6-9.
- [2] 邢冀川,罗小红. 利用激光三角法测量货车车厢体积[J]. 红外与激光工程 2012, 41(11):3083-3087.
- [3] Chang R S, Chiu J H, Chen F P, et al. A Parkinson's Disease Measurement System Using Laser Lines and a CMOS Image Sensor [J]. Sensors 2011, 11(2):1461-1475.
- [4] 沈磊,李顶根,褚俊,等. 激光三角法位移测量中数字散斑相关法的研究[J]. 红外与激光工程 2014, 43(1):288-293.
- [5] 刘君,刘江春,晏克俊. 光学三角法高精度自动调焦系统设计[J]. 西安理工大学学报 2004, 20(1):63-66.
- [6] Qi L T, Namba Y. Precision Laser Adjustment Using CW Diode Laser[J]. Precision Engineering 2011, 35(1):126-132.
- [7] Alfredo C, Federico M, Stefano M, et al. Laser Triangulation Device for in Line Measurement of Road Texture at Medium and High Speed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(7):2225-2234.
- [8] 何凯,陈星,王建新,等. 高精度激光三角位移测量系统误差分析[J]. 光学与光电技术 2013, 11(3):62-66.
- [9] 李雅倩,付献斌,周坤. CCD 分段测量的光学位移测量系统[J]. 光学精密工程 2011, 19(9):2036-2042.
- [10] 聂晨晨,张海波,陶卫,等. 基于 FPGA 与 DSP 的一体化激光三角位移传感器系统[J]. 计算机测量与控制 2012, 20(6):1725-1728.
- [11] 赵万欣,陈思屹. 基于 TSL1401 线性 CCD 的智能巡线小车[J]. 工业控制计算机 2014, 27(2):121-122.
- [12] 李孟桃. 基于线性 TSL1401 CCD 的直立智能小车设计[J]. 电子设计工程 2013, 21(21):86-88.



周锦荣(1974-),男,汉族,福建云霄人,闽南师范大学 硕士,主要从事光电控制与信息处理方面研究, jinrongzhou@163.com。