

基于线阵 CCD 的二维轮廓扫描系统

田小超, 李忠科

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘要: 吊装过程中为获取吊物具体位置信息,设计了一种基于线阵 CCD 的二维轮廓扫描系统。利用激光照射直线与线阵 CCD 投影直线相交的原理求取激光照射点二维坐标;提出了一种基于硬件的线阵 CCD 脉冲中心位置测量方法;采用双直线法对线阵 CCD 进行标定,得到其输出像素坐标与投影直线的映射关系;研究提出了一种升降速控制策略,能平稳高效地控制步进电机。用已知尺寸的圆柱形 PVC 管作为实验对象,系统测得其二维轮廓若干离散点坐标,通过圆周拟合的方式得到圆柱半径,平均误差为 0.928 mm,系统一次扫描耗时约 0.45 s;实验结果表明,系统测量精度较高,扫描速度较快,可广泛应用于物体的二维轮廓扫描。

关键词: 线阵 CCD; 激光扫描; 步进电机; 二维轮廓测量

中图分类号: V271.4; TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0100-05

A Two-Dimensional Outline Scanning System Based on Linear CCD

TIAN Xiao-chao, LI Zhong-ke

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to obtain the specific location information of hanging objects in the lifting process, a 2D outline scanning system based on linear CCD was designed. The principle that laser line and linear CCD projection line must intersect was used for getting the 2D coordinates of laser irradiation. A linear CCD pulse central position measurement method based on hardware was proposed, and double line method was used for linear CCD calibration to obtain the mapping relationship between the output pixel coordinates and projection line. A speed control strategy was presented for smooth and efficient control of stepper motor. A cylindrical PVC with known size was taken as the experiment object, and was measured by the system for coordinates of some discrete points of the 2D contour. The cylinder radius was obtained by fitting circle with an average error of 0.928 mm, and one scan took about 0.45 s. The results show that the system has a high measuring accuracy, fast scanning speed, and can be widely applied to 2D contour scanning of objects.

Key words: linear CCD; laser scanning; stepper motor; 2D outline measurement

0 引言

在大型构件的吊装过程中,司机视野受限是吊装效率低下、吊物易受损、安全性不高的主要原因,获取吊物实时二维轮廓对实现吊装操作智能化、自动化有着重要意义。线阵 CCD 是精密测量中广泛采用的一种光电传感器,主要用于激光三角法实现的位移测量系统^[1-2]、非接触运动测量等^[3-4]领域,但目前大都用于微小位移或精密尺寸的测量。为给吊装司机提供精确的吊物位置

信息,本文借鉴双目视觉原理,提出了一种基于线阵 CCD 的二维轮廓扫描系统,系统利用激光发射直线与线阵 CCD 投影直线求取激光照射点二维坐标,步进电机带动激光对目标进行扫描从而得到其二维轮廓。

1 系统原理

二维测量原理如图 1 所示,假设激光从 A 点处发射打在目标侧壁上的 C 点形成漫反射,由 B 点的线阵 CCD 摄像机接收由侧壁反射回来的激光信号,那么激光发射直线 AC 与线阵 CCD 投影直线 BC 的交点即为激光照射点的坐标。其中, A 点在二维测量坐标系中的位置是已知的, α 由步进电机脉冲决定,则可确定直

线 AC 的方程为

$$y = (x - x_A) \cdot \tan \alpha + y_A \quad (1)$$

直线 BC 的方程可由线阵 CCD 图像脉冲得到,具体方法将在 3.2 节中详述。

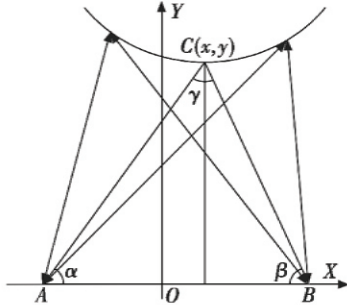


图 1 二维测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of two dimensional measurement

步进电机带动转台控制反光镜旋转,从而实现激光的扫描,步进电机每转动一定的步数,激光旋转一定的角度,系统进行一次激光照射点二维坐标的测量。在一次行程中得到目标侧壁若干点二维坐标,用曲线拟合的方式即可得到目标侧壁轮廓。系统对目标来回扫描,即可得到其实时二维轮廓位置信息。

2 系统方案设计

系统硬件包括线阵 CCD 摄像机、红外激光器、转台、无线通信模块和主控模块等,如图 2 所示。在整个测量系统中,主控模块是核心部分,驱动控制线阵 CCD 的工作,采集处理图像信息,通过转台控制激光器的扫描,根据线阵 CCD 输出信号和转台转动角度,经过一系列的处理得到目标轮廓二维坐标,再通过无线通信模块把测量二维坐标值发送至上位机,如图 3 所示。

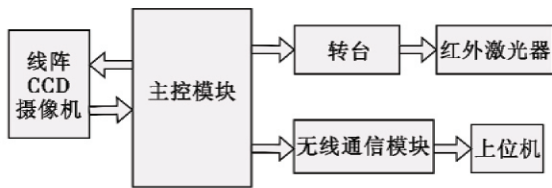


图 2 系统框图

Fig.2 Block diagram of system

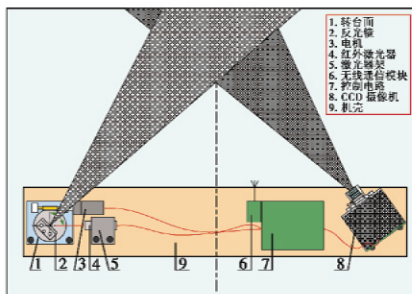


图 3 系统工作示意图

Fig.3 Schematic diagram of system

3 系统关键技术研究是实现

3.1 线阵 CCD 的驱动及信号处理

目前常用的 CCD 驱动方法有数字电路直接驱动法^[5]、单片机驱动法^[6]、专用 IC 驱动方法^[7]等,CCD 输出信号的处理大都是先对其进行 A/D 转换,再通过一定的算法获取脉冲中心位置,但此方案存在着速度慢的问题。文献[8]提出了采用特殊设计的比较器筛选电路,只对 CCD 有效像元信号进行存储与处理,兼有测量速度快、精度高的优点,但系统复杂,硬件成本较高。本文提出了基于两片单片机的线阵 CCD 驱动及信号处理方案,具有速度快、成本低、体积小的优点。

测量系统选用的线阵 CCD 是日本东芝公司的 TC-D1501D 图像传感器,单片机选用宏晶公司的 STC11F02。一片单片机产生驱动时序,直接与 CCD 驱动口相连,用汇编语言通过延时控制得到 CCD 所要求的驱动时序;另一片单片机负责信号处理、测量控制及与上位机的通信,电路如图 4 所示。

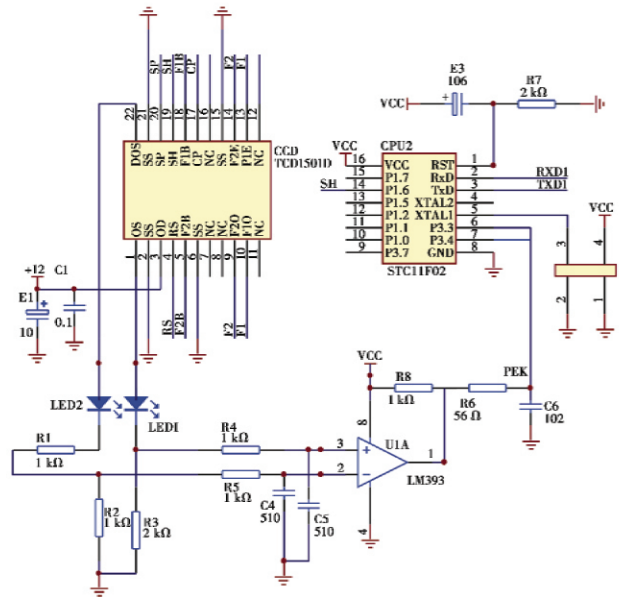


图 4 线阵 CCD 信号处理电路图

Fig.4 Schematic diagram of linear CCD signal processing

线阵 CCD 输出的图像信号 OS 和补偿信号 DOS 经过电压比较器变成二值化信号,进入 CPU2 的 P3.3 和 P3.4,其中,P3.3 是单片机的外部中断输入 INT1。用单片机的内部 T₀ 定时器对 CCD 信号脉冲前沿进行测量计数,用 T₁ 定时器对 CCD 信号脉冲宽度进行测量计数。系统工作时,首先检测 SH 信号,当发现 SH 信号到达后,启动 T₀ 计数。当 CCD 信号脉冲到达时,经过电压比较器产生一个负脉冲,该负脉冲的下跳沿产生 INT1 中断请求,停止 T₀ 计数并启动 T₁ 计数,此时 T₀ 计数值即为脉冲前沿信息。通过软件查询 P3.4 上跳沿的方式判断

脉冲结束时刻,当发现 P3.4 电平上跳时停止 T_1 计数,此时 T_1 计数值即为脉冲宽度信息, $T_0 + T_1/2$ 即为测量结果,如图 5 所示。此方法得到的脉冲中心位置理论误差为 ± 1 像素,对本系统影响不大。

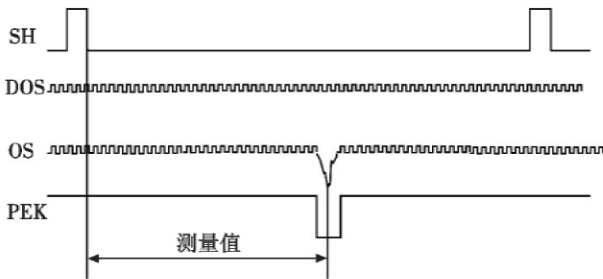


图 5 测量方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measuring method

3.2 线阵 CCD 的标定

本文提出了双直线法对线阵 CCD 进行标定,得到线阵 CCD 像素坐标与投影直线之间的关系。在二维轮廓扫描测量区的远、近两平行位置对标定图案采样,远近位置之间的距离根据测量区确定,标定图案是在白色平板上制作平行黑色竖线,相邻直线间隔相同,如图 6 所示。

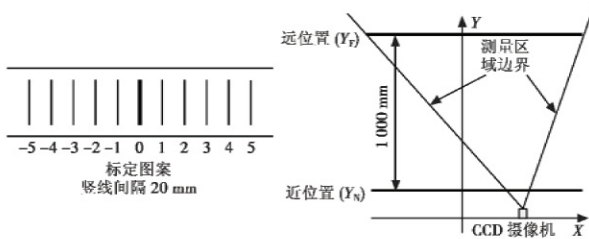


图 6 标定图案与标定位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calibration pattern and calibration location

对线阵 CCD 输出信号处理之后,得到表 1 所示的标定样本集合。

表 1 样本数据

Table 1 Sample data

	线阵 CCD 像素坐标	实际 X 坐标
远位置	$D_{F1}, D_{F2}, \dots, D_{Fn}$	$X_{F1}, X_{F2}, \dots, X_{Fn}$
近位置	$D_{N1}, D_{N2}, \dots, D_{Nn}$	$X_{N1}, X_{N2}, \dots, X_{Nn}$

应用最小二乘法对数据拟合,得到远、近位置实际 X 坐标与线阵 CCD 像素坐标的一般化公式为

$$X_F = f_1(D) \quad (2)$$

$$X_N = f_2(D) \quad (3)$$

根据照相机原理,像面上的一个像素对应一条进入镜头的光线。对 CCD 相机来说,任意像素坐标 D ,使用式(1)和(2),得到一对空间坐标 $(X_F, Y_F), (X_N, Y_N)$,也即投影直线上两点的坐标,由此确定了投影直线方程。

3.3 步进电机的控制

系统需控制激光对目标进行连续来回的扫描。在实际工作过程中,步进电机存在堵转、失步和超步的可能^[9],这使得激光发射直线角度信息不正确,二维测量结果出错。而且步进电机急停、急加速时容易造成振动,使激光点不能稳定地照射在目标的一点上,测量结果亦不稳定。因此,有必要对步进电机进行升降速控制。

步进电机升速曲线如图 7 所示。步进电机在静止状态时突然施加的启动脉冲频率不可超过突跳频率,否则会堵转或丢步^[10]。在升速时,应当按照升速曲线连续升速,否则会产生加速度冲击。

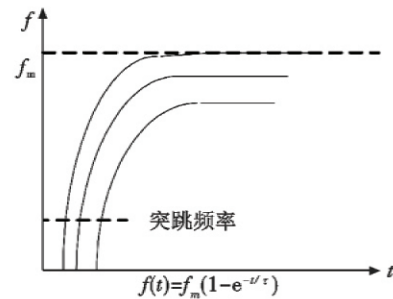


图 7 步进电机升速曲线

Fig. 7 The acceleration curve of stepper motor

图中 f_m 为步进电机的最高工作频率,与电机的电磁转矩等参数有关; τ 为时间常数,与负载转动惯量和转矩常数有关。步进电机对降速曲线的要求比升速曲线低,只要保证电机不超步即可。为简单起见,采用对称化设计,将升速曲线的逆过程用作降速曲线。实时计算指数对单片机的要求过高,所以采用离散化方法。本文采用等脉冲数不等时间间隔方法,使用一个延时表格,表格中各元素 t_i 按下述公式计算

$$t = \sum_{k=0}^{i-1} t_k \quad (4)$$

$$t_i = 1/[f_m(1 - e^{-t/\tau})] \quad (5)$$

式中, t_i 代表第 i 个步进脉冲的周期宽度。升速时顺序读取 t_i 的值,降速时则逆序读取 t_i 的值用作延时函数的参数。假设对每个 t_i 都输出 n 个步进脉冲,则使升、降速过程变长为原来的 n 倍,相当于升、降速曲线的时间常数加大 n 倍,方便根据负载变化调节升、降速过程。

升降速算法的基本思想是将步进脉冲总数 N 分成升速步数 $N_{升}$ 、降速步数 $N_{降}$ 和匀速步数 $N_{匀速}$ 三部分,假设延时表格共有 M 个延时参数,则 $N_{升}$ 、 $N_{降}$ 和 $N_{匀速}$ 的计算规则为:若 $N > 2 * n * M$,则 $N_{升} = N_{降} = n * M, N_{匀速} = N - 2 * n * M$;若 $N \leq 2 * n * M$,则 $N_{升} = N_{降} = N/2, N_{匀速} = 0$ 。

4 实验与分析

4.1 测试实验设计

为验证系统二维测量精度及扫描速度,选用长 1 200 mm、半径 100 mm 且表面光滑的圆柱形 PVC 管作为测试对象。圆柱体通过机械装置垂直于标定坐标平面,置于系统正上方,系统跟踪扫描其轮廓。具体方法为:首先,对空中一定区域内连续扫描测量,根据圆柱体与背景(室内天花板)之间的位置关系,剔除背景坐标,得到圆柱体侧壁若干点二维坐标;然后,用曲线拟合的方法得到圆柱体侧壁轮廓,得到圆柱体初始位置;最后,移动圆柱体,以轮廓最低点(即 Y 坐标最小)作为下次扫描的中心点,重复进行扫描测量。测得的 5 组结果如图 8 所示,受机械装置限制,只能对圆柱体进行水平移动。

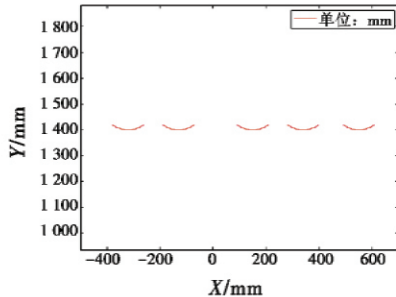


图 8 测量结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the measurement results

对这 5 组数据(每组有 21 对离散的二维坐标)用最小二乘法进行圆周拟合,得到拟合圆的半径,并与真实值(PVC 管半径 100 mm)进行比较,如表 2 所示。

表 2 拟合半径值

Table 2 The value of fitting radius

组别	拟合半径/mm	误差/mm	平均误差/mm
1	98.91	-1.09	
2	100.78	0.78	
3	101.20	1.20	0.928
4	99.05	-0.95	
5	100.62	0.62	

通过实验测试,系统对圆柱体目标进行一次扫描大约需 0.45 s,速度较快,对低速运动物体有一定的实时测量能力;二维测量结果拟合的圆柱半径平均误差为 0.928 mm,说明系统二维轮廓扫描精度较高。

4.2 误差分析

从测量原理上看,目标侧壁点的二维坐标测量精度取决于激光发射直线和线阵 CCD 投影直线的精度。本文采用的线阵 CCD 信号处理方案得到激光光斑脉冲中心位置误差在一个像素之内,TCD1501D 有 5 000 个有效像元,故相对误差小于 0.02%,经双直线法标

定得到的投影直线方程误差可忽略不计。系统测量误差基本上是由激光发射直线的误差引起的,主要有以下两个原因。

1) 激光发射点的位置误差。系统把反光镜转动的轴心当作激光发射点,但事实上激光不可能准确无误地照射在转轴轴心上,偏离轴心会使反光镜转动时激光照射在反光镜上的位置不断变化,即激光发射点的位置不是固定不变的。

2) 由机械间隙引起的激光发射角度误差。激光发射角是由步进电机转动步数得到的,但由于存在机械间隙,步进电机带动转台做换方向运动时,会出现反向间隙误差。

要想进一步提高系统测量精度,必须采用一定的方法对以上两个原因产生的误差进行修正补偿,这也是以后的研究方向。

5 结束语

本文设计了一个基于线阵 CCD 的二维轮廓扫描系统,利用激光入射直线与 CCD 摄像机投影直线相交的原理解算出激光照射点二维坐标,通过步进电机控制激光扫描目标轮廓,采用硬件的方式获得线阵 CCD 脉冲中心位置并用双直线法进行标定。试验结果表明,系统扫描速度快,测量精度高,可广泛应用于物体的二维轮廓扫描。在吊装过程中,系统置于吊物预放位置正下方,对吊物进行不间断的跟踪扫描,得到实时的吊物侧壁二维轮廓,能为司机提供吊物的精确位置信息,并为吊装过程的自动化、智能化打下良好的基础。

参考文献

- [1] 李杰强. 基于线阵 CCD 的微位移传感器设计与研究[D]. 广州:华南理工大学,2012. (LI J Q. The design and research of micro displacement sensor based on linear CCD[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2012.)
- [2] 李晶,袁峰,胡英辉. 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. 光学精密工程,2013(6):1635-1641. (LI J, YUAN F, HU Y H. Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target[J]. Optics and Precision Engineering, 2013(6):1635-1641.)
- [3] 朱柏树. 线阵 CCD 精密尺寸测量仪的研制[D]. 成都:西华大学,2012. (ZHU B S. Development of the precise dimension measuring instrument based on linear array CCD[D]. Chengdu:Xihua University, 2012.)
- [4] 于之靖,刘月林,诸葛晶昌. 高精度双线阵 CCD 非接触

- 直径测量系统[J]. 传感器与微系统, 2014(1): 120-122, 129. (YU Z J, LIU Y L, ZHUGE J C. High precision double linear array CCD non-contact diameter measurement system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014(1): 120-122, 129.)
- [5] 周建勇, 陈红兵, 袁世顺, 等. 一种 CCD 驱动时序参量化设计方法[J]. 半导体光电, 2013(6): 1055-1059, 1081. (ZHOU J Y, CHEN H B, YUAN S S, et al. Design of parametric CCD drive timing pulses[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013(6): 1055-1059, 1081.)
- [6] 唐亚军, 郭喜庆, 杨敬娴, 等. 基于 51 单片机的线阵 CCD 驱动设计[J]. 微型机与应用, 2013(12): 73-76. (TANG Y J, GUO X Q, YANG J X, et al. Design of linear CCD drive based on 51 single-chip processor[J]. Microcomputer & Its Applications, 2013(12): 73-76.)
- [7] SAN H L, FEI J. Design of linear CCD driving circuit based on SCM[J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 165-169.
- [8] 陈骥, 王鑫, 曹久大, 等. 高速 CCD 激光位移传感器[J]. 光学精密工程, 2008(4): 611-616. (CHEN J, WANG X, CAO J D, et al. Development of high-speed CCD laser displacement sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008(4): 611-616.)
- [9] 余方玉, 赵美蓉, 林玉池, 等. 步进电机矩角关系连续测试方法的研究[J]. 中国机械工程, 2014(3): 333-336. (YU F Y, ZHAO M R, LIN Y C, et al. Study on continuous test method of stepper motor torque-angle relationship[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2014(3): 333-336.)
- [10] 孙孔政, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 基于矩频曲线的步进电机加减速控制[J]. 微电机, 2014, 47(1): 81-85. (SUN K Z, XU S Y, CAO X T, et al. Speed control of step motor based on torque curve[J]. Micromotors, 2014, 47(1): 81-85.)
-
- (上接第 82 页)
- [4] 吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897-901. (WU Z S, XIE D H, XIE P H, et al. Genetic algorithm of statistical modeling about roughened surface laser scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901.)
- [5] 谭安胜. 水面舰艇编队作战运筹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (TAN A S. Operations analysis of surface warship formation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
-
- (上接第 94 页)
- [3] 李晓惠. 动态测量误差分解及溯源研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006. (LI X H. Research on error separating and tracing of dynamic measurement[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.)
- [4] 李晓惠, 陈晓怀, 卫兵. 基于神经网络的动态测量误差分解研究[J]. 工业计量, 2005(6): 6-9. (LI X H, CHEN X H, WEI B. Research on error decomposition of dynamic measurement based on neural network method[J]. Industrial Measurement, 2005(6): 6-9.)
- [5] 李世平, 付宇, 张进. 一种基于 EMD 的系统误差分离方法[J]. 中国测试, 2011, 37(3): 9-13, 36. (LI S P, FU Y, ZHANG J. Systematic error separation method based on EMD[J]. China Measurement and Test, 2011, 37(3): 9-13, 36.)
- [6] 张俊玲. 减小测量误差的测量方法研究[J]. 大学物理实验, 2010, 23(1): 71-73. (ZHANG J L. Measurement method of reduce the measurement error[J]. Physical Experiment of College, 2010, 23(1): 71-73.)
- [7] 马强, 许桢英. 动态测量误差溯源方法研究[J]. 安徽机电学院学报, 2001, 16(4): 22-25. (MA Q, XU Z Y. The tracing of dynamic measurement errors[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 2001, 16(4): 22-25.)
- [8] 黄迪山. 经验模态分解中虚假模态分量消除法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(3): 381-384. (HUANG D S. Effect of sampling on empirical mode decomposition and correction[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(3): 381-384.)
- [9] 陈茉莉, 李舜酩, 饶新阳. 基于时域特征识别微频差信号[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1234-1239. (CHEN M L, LI S M, RAO X Y. Micro frequency difference signal identification based on time domain characteristics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1234-1239.)
- [10] 谢永成, 贺芳君, 李光升, 等. 基于改进型小波神经网络的灭火系统故障诊断[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4): 128-131. (XIE Y C, HE F J, LI G S, et al. Fire-extinguishing system fault diagnosis based on improved wavelet neural network[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(4): 128-131.)