



基于角度交会的二维坐标图像测量系统

程瑶 许文斌 刘云阳

Two-dimensional coordinate image measurement system based on angle intersection

CHENG Yao, XU Wenbin, LIU Yunyang

引用本文:

程瑶,许文斌,刘云阳. 基于角度交会的二维坐标图像测量系统[J]. *应用光学*, 2024, 45(2): 438–445. DOI: 10.5768/JAO202445.0203006

CHENG Yao, XU Wenbin, LIU Yunyang. Two-dimensional coordinate image measurement system based on angle intersection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 438–445. DOI: 10.5768/JAO202445.0203006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于FPGA的图像畸变矫正算法研究](#)

Image distortion correction algorithm based on FPGA

应用光学. 2020, 41(1): 86–93 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0102004>

[基于线阵CCD的光学测角嵌入式系统设计](#)

Design of embedded system for optical angle measurement based on linear array CCD

应用光学. 2018, 39(5): 650–654 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501010>

[基于二维振镜的多光谱集成靶标设计及应用](#)

Multi-spectral target design and application based on two-dimensional galvanometer

应用光学. 2017, 38(2): 187–192 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201006>

[基于单目结构光的大物体三维测量关键方法的研究](#)

Research on critical method of large objects three-dimensional measurement based on monocular structured light

应用光学. 2018, 39(2): 212–219 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0203001>

[基于锥形透镜的光线入射角度测量系统设计与研究](#)

Design and research of light incident angle measuring system based on conical lens

应用光学. 2020, 41(6): 1181–1189 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0602001>

[三维人脸测量与分割系统研究](#)

Research on three-dimensional face measurement and segmentation system

应用光学. 2021, 42(4): 664–670 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 02-0438-08

基于角度交会的二维坐标图像测量系统

程 瑶, 许文斌, 刘云阳

(重庆理工大学 机械工程学院, 重庆 400050)

摘要: 针对基准平面障碍物检测定位问题, 设计了一种采用角度交会法测量二维坐标的嵌入式图像检测系统。二维坐标测量系统采用双线法标定线阵 CCD 图像传感器, 并采用角度交会法对被测对象进行坐标计算, 从而测得未修正的二维坐标测量结果。采用控制变量法分别测量 X 轴和 Y 轴坐标, 使用 Matlab 软件对数据进行处理, 并对 X 轴和 Y 轴测量误差分别进行多项式线性拟合, 进而得到坐标修正公式, 修正的二维坐标误差明显变小。实验结果表明: 基于角度交会的二维坐标图像测量系统能够实时、准确、快速和可靠地测量二维坐标, 为基准平面障碍物二维坐标测量定位提供了一种可行的方案, 具有一定的应用价值和意义。

关键词: 线阵 CCD; 二维坐标测量; 角度交会法; Matlab

中图分类号: TN29

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0203006](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203006)

Two-dimensional coordinate image measurement system based on angle intersection

CHENG Yao, XU Wenbin, LIU Yunyang

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: Aiming at the problem of detection and positioning of reference plane obstacles, an embedded image detection system using angle intersection method to measure two-dimensional coordinates was designed. The two-line method was adopted to calibrate the linear array CCD image sensor by two-dimensional coordinate measurement system, and the angle intersection method was used to calculate the coordinates of the measured object, so that the uncorrected two-dimensional coordinate measurement results were obtained. The control variable method was used to measure the coordinates of X axis and Y axis, respectively, the Matlab software was used to process the data, and the polynomial linear fitting of the measurement errors of X axis and Y axis was carried out respectively to obtain the coordinate correction formula, in which the corrected two-dimensional coordinate errors became significantly smaller. The experimental results show that the two-dimensional coordinate image measurement system based on angle intersection can measure two-dimensional coordinates in real time, accurately, quickly and reliably, and provides a feasible scheme for two-dimensional coordinate measurement of reference plane obstacles, which has certain application values and significance.

Key words: linear CCD; two-dimensional coordinate measurement; angle intersection method; Matlab

引言

线阵 CCD 图像传感器具有视野极大、扫描频率高、分辨率高等特点, 广泛应用于非接触式测量和表面检测等领域^[1]。二维坐标测量系统主要是

对基准面上的坐标进行测量, 广泛应用于机床、路径规划、障碍定位等领域^[2]。目前, 坐标测量可以分为接触式测量和非接触式测量, 接触式测量具有适用范围的局限性, 而非接触式测量具有广泛

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2024-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (52375526); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS22653); 重庆市科委基础与前沿研究一般项目 (cstc2016jcyjA0497); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202301108); 重庆理工大学研究生教育高质量发展项目 (gzlcx20232126)

作者简介: 程瑶 (1981—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事图像检测及处理等研究。E-mail: chy_cqit@cqu.edu.cn

通信作者: 许文斌 (1996—), 男, 硕士, 主要从事图像处理和并联机构等研究。E-mail: 1602361393@qq.com

的适用范围, 非接触式测量方法主要有激光扫描、影像测量、照相测量和工业 CT 扫描等^[3]。激光扫描方法由半导体激光器发出激光, 聚光透镜在被测曲面上结成光电并反射, 利用光敏元件接收其散射光, 根据其在光敏元件上的位置, 从而测出被测点的坐标位置^[4]。如朱博源等^[5]将多个角锥棱镜作为无源待测靶点, 通过构建非球面反射接收模型实现了信号发射端与接收端的结合, 建立了多靶点光信号匹配机制以实现无源多靶点交会定位; 影像测量方法通过光学放大系统对被测物体放大, CCD 图像采集系统采集图像特征并送入计算机, 实现高效地检测^[6]。如白玮本等^[7]采用基于结构光的嵌入式图像采集系统, 借助光栅发生器对被测物进行扫描, CCD 相机抓取被测物光条纹信息, 通过以太网传输至 PC 端; 照相测量方法通过相机多角度采集被测对象得到图像信息, 依据空间物体投影原理, 利用被测对象表面的标志点特征计算被测对象的三维空间信息, 多应用于三维重构领域^[8]; 工业 CT 扫描方法是将计算机断层成像技术应用于工业中, 其基本原理是依据辐射在被检测物体中的减弱和吸收特性, 广泛应用于医学和三维重构领域^[9-10]; 角度交会法通过两个角度的测量进而计算得到被测对象坐标, 具有测量精度高, 适用范围广等特点, 广泛应用于工程项目^[11]。

综上所述, 基于影像测量法的高效优势和角度交会法的高精度特点, 针对基准平面障碍物检测定位问题, 本文设计了一种基于角度交会的嵌入式二维坐标图像测量系统, 将图像检测技术应用于二维坐标测量, 可以发挥线阵 CCD 图像传感器大视野、高扫描频率、高分辨率和嵌入式设备实时性高等优势, 能够实时、准确、快速和高效地测量显示障碍物二维坐标, 可以广泛应用于基准平面障碍物检测定位, 具有一定的实用价值和意义。

1 系统测量原理

如图 1 所示, 二维坐标测量系统主要由被测对象、光源、光路模块、传感模块、单片机 (micro-controller unit, MCU) 和显示模块组成。二维坐标测量系统将光电技术结合, 在外部光源照射的条件下, 光路模块发射光信号到被测物体表面, 采集模块检测到物体表面反射的光线并将采集的数据传输给单片机, 单片机对数据进行处理和算法运算, 最终得到被测对象的二维坐标信息并在显示模块上面显示。

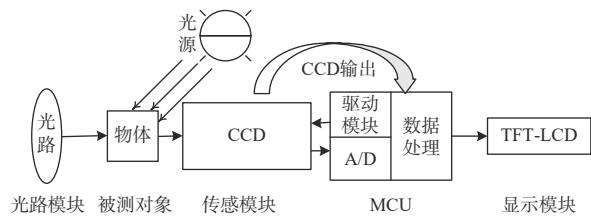


图 1 二维坐标测量系统总体框图

Fig. 1 Overall block diagram of two-dimensional coordinate measurement system

二维坐标测量系统采用角度交会法对被测对象进行坐标计算。角度交会法是一种通过角度的测量, 进而得到未知坐标的算法, 具有测量算法公式简单、系统结构装置简易及测量精度较高的特点。如图 2 所示, A 点放置位置为固定的步进电机带动激光光源, B 点放置位置为固定的线阵 CCD 图像传感器, C 点为被测对象的位置。假设点 A、B 和 C 的坐标依次为 (X_A, Y_A) 、 (X_B, Y_B) 和 (X_C, Y_C) , A 点和 B 点坐标已知, 若要求解 C 点的坐标, 则需要测量角 α 和 β 的大小, 然后应用式(1)得到 C 点坐标:

$$\begin{cases} X_C = \frac{X_B \cdot \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} \\ Y_C = \frac{X_B \cdot \tan \beta \cdot \tan \alpha}{\tan \alpha + \tan \beta} \end{cases} \quad (1)$$

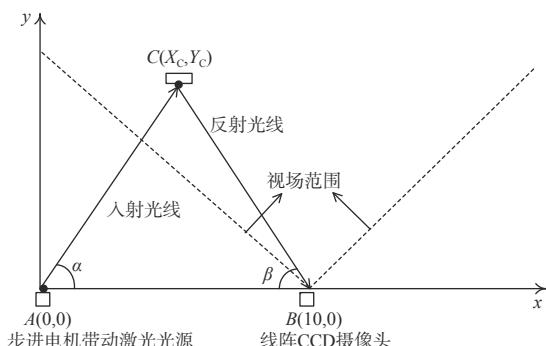


图 2 角度交会法求解坐标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solving coordinates by angle intersection method

在图 2 中, AC 为入射光线, CB 为反射光线, α 角度的大小可以通过步进电机的转动角来测得, β 角度的大小可以通过线阵 CCD 输出的信号处理得到, 采用角度交会法便可以求解出三角模型中 C 点的坐标。

2 硬件设计

测量系统采用 STM32F103ZET6 单片机, 核心芯片为 STM32F103ZET6; 传感模块采用 TSL1401

线阵 CCD 图像传感器,选用 90°广角镜头;显示模块采用 NT35310 TFT-LCD 显示屏;同时采用 28BYJ-48 步进电机和 ULN2003 步进电机驱动,以满足测量系统设计精度的需求。系统电路原理图如图 3 所示。

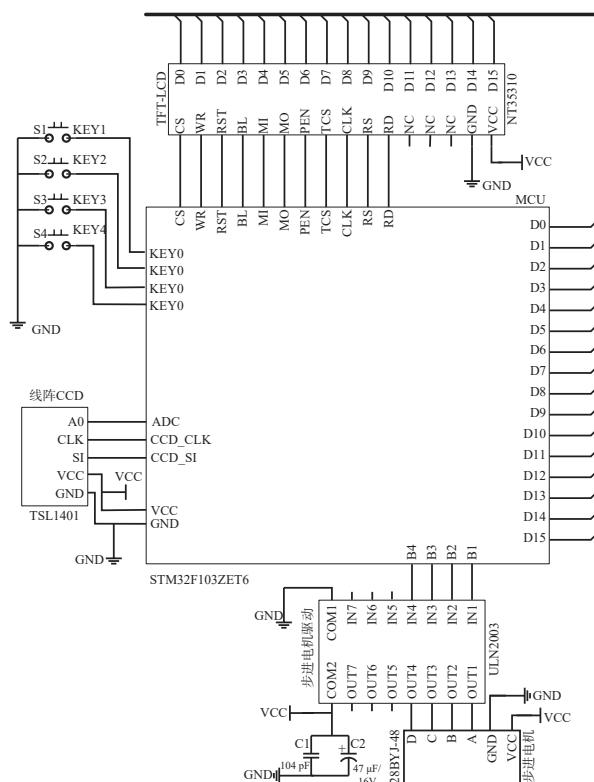


图 3 系统电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of system circuit

MCU 驱动线阵 CCD 图像传感器和显示模块工作,ULN2003 步进电机驱动步进电机工作。MCU 利用 STM32 的定时器中断功能编写线阵 CCD 的驱动时序,无需外加 AD 转换模块就可以实现将线阵 CCD 图像传感器采集的信号从模拟信号转换为数字信号。STM32 使用 FSMC 驱动 TFT-LCD 显示屏,实现显示模块的显示功能。因单片机引脚输出电压过低无法驱动步进电机,所以采用 ULN2003 步进电机驱动和外设电源的方案,通过 MCU 将电信号传输给 ULN2003,间接实现驱动步进电机的功能。测量系统的各个模块相互配合,完成数据的采集、处理和运算,并对二维坐标进行实时显示。

3 软件设计

软件设计部分主要是 MCU 对步进电机转动、线阵 CCD 图像传感器数据采集和 TFT-LCD 显示进

行控制,经运算处理得到相关参数,从而得到被测对象的坐标并显示。MCU 控制步进电机转动设定角度,从而带动激光光源转动并扫描平面内障碍物;MCU 驱动线阵 CCD 图像传感器实时采集视场范围内的状况,并将采集的信息转化为电信号传输到 MCU 进行处理得到相关参数;运算处理得到二维坐标,驱动 TFT-LCD 显示被测对象的坐标信息。在 MCU 和外部设备相互配合下,完成实验设定条件的控制、数据采集、数据处理、数据计算和结果显示。该系统的主程序流程图如图 4 所示。

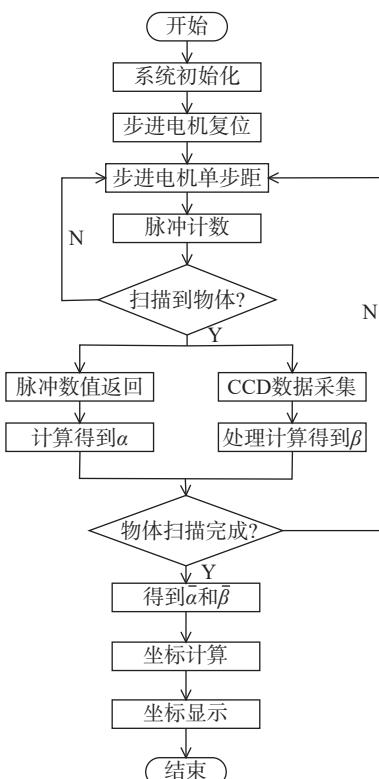


图 4 主程序流程图

Fig. 4 Flow chart of master program

由图 4 可知,系统上电后进行初始化,步进电机复位并开始运行程序;步进电机带动激光光源以单位脉冲周期 $5.625/64$ °的步距角进行转动,并对脉冲数进行计数;当激光光源扫描到被测物时,实时返回脉冲数并计算此时的角度 α ,此时线阵 CCD 对被测对象进行数据采集并处理计算得到角度 β ,若未扫描到被测对象,步进电机仍旧以单位脉冲步距角带动激光光源转动直至扫描到被测对象;当被测对象扫描完成时,单片机计算得到角度 α 和 β 的期望,通过运算处理得到被测对象的坐标,最终在 TFT-LCD 显示屏上显示,若被测对象未完成扫描,步进电机继续带动激光光源进行扫描直

至完成被测对象的扫描。

3.1 CCD 驱动及采集

利用 STM32 定时器完成 TSL1401 线阵 CCD 图像传感器驱动时序。线阵 CCD 包含 128 个感光单元, t_{qt} 为采样周期间隔, 驱动时序图如图 5 所示。采用时钟管脚 PA7 产生 CLK 信号, IO 串口 PA6 作为 SI 信号输入, 从而输出模拟信号 AO^[12]。

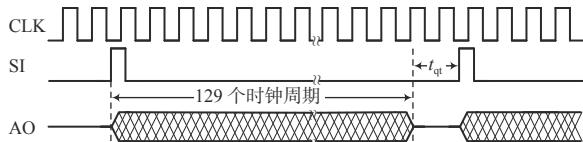


图 5 TSL1401 线阵 CCD 驱动时序图

Fig. 5 Drive time-sequence diagram of TSL1401 linear array CCD

利用 STM32 的定时器来触发 ADC 的启动转换^[13]。系统使用单次单通道 ADC1 触发时序图如图 6 所示, t_{STAB} 为上电延时; ADC_CLK 为 ADC1 时钟; SET ADON 为设置 ADC_CR 寄存器的 ADON 位; EOC 为规则组转换结束事件标志。设置 PA1 为模拟输入, 通过 RCC_CFGR 设置 ADC1 分频因子, 最终完成 ADC1 的模式配置, 实现单次转换模式、触发方式选择、数据对齐方式等功能。

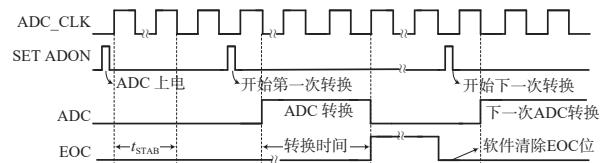


图 6 ADC 驱动时序图

Fig. 6 Drive time-sequence diagram of ADC

3.2 步进电机驱动

如图 7 所示, 系统选用四相八拍的 28BYJ48 步进电机, 对步进电机施加一系列特定顺序并且连续不断地控制脉冲时, 便可以连续不断地转动。每个脉冲信号使得步进电机的一相或两相绕组的通电状态改变一次, 即转子转过一定角度, 当通电状态的改变完成 1 个循环时, 转子转过 1 个步距角。所以启动步进电机, 只需要依次给各个相输入高电平信号。系统采用八拍方式驱动, STM32 的 4 个 GPIO 串口依次与步进电机驱动的 IN1-IN4 端口连接, 即 STM32 的 PC6、PC7、PC8 和 PC9 串口配置为 I/O 口, 类似 PC9、PC8、PC7 和 PC6 这 4 个端口的输出信号, 可以实现对步进电机启动、停止、正转和反转的控制。

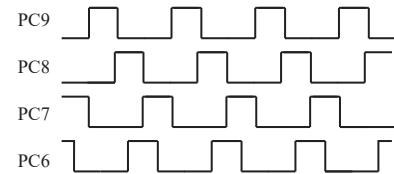


图 7 步进电机驱动时序

Fig. 7 Drive time-sequence diagram of stepper motor

3.3 CCD 标定及 β 计算

采用双直线法标定线阵 CCD。如图 8 所示, 在线阵 CCD 图像传感器的视场范围内进行位置标定, 在二维坐标测量扫描区的远近平行位置 Y_F 和 Y_N 处对线阵 CCD 标定采样, 其中 Y_F 和 Y_N 为线阵 CCD 标定的 2 条采样直线, 并且 $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 与 β 相等; 假设被测物体在 m_i 和 n_i 点时, 线阵 CCD 图像传感器检测 m_i 和 n_i 点的反射光线重合, 则线阵 CCD 产生的输出信号也相同, 可以据此对线阵 CCD 标定。在远位置 Y_F 上取等间距的 20 个采样点, 将被测对象依次放在采样点处, 线阵 CCD 图像传感器进行数据采集, 微控制单元对线阵 CCD 采集的数据进行处理得到采样点 CCD 的像元值 C_{x_i} 。采用同样的方法对近位置 Y_N 处进行标定采样, 因为 m_i 和 n_i 点处进入线阵 CCD 的入射角 $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 相等, 即可以根据已得的像元值进一步找到 n_i 点。相反, 已知 m_i 和 n_i 点的坐标, 可以得到 M_i 和 N_i 角度的大小, 即可以得到像元值 C_{x_i} 与 $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 一一对应的关系。取像元值 C_{x_i} 为横坐标, $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 为纵坐标, 可以得到关于 C_{x_i} 与 $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 的散点图, 采用最小二乘法对数据进行拟合, 得到 C_{x_i} 与 $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 的关系式^[14]。

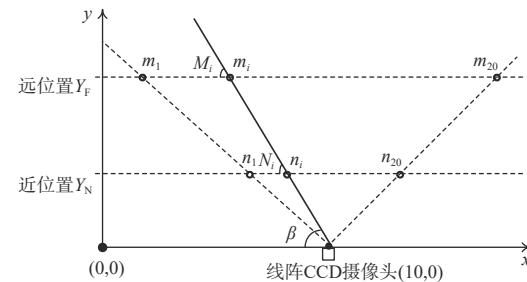


图 8 双直线法标定 CCD 示意图

Fig. 8 Schematic diagram of CCD calibration by double-line method

如图 9 所示, 标定图案为在白色平板上刻画黑色竖线, 相邻竖线间隔可选。首先选用相邻竖线间隔 10 mm 的标定图案, 将标定图案竖直放置于 $Y_F = 10$ 的直线上, 并将最左边边缘线与 $X = 0$ 对齐; 然后, 步进电机带动激光光源在设定的速度下转动, 激光光源会在被照射的标定图像竖线上形成

点 m_i 之后, 线阵 CCD 图像传感器进行数据采集, 并将信号输出给 MCU; 最后, MCU 对输入的信号进行处理, 得到点 m_i 对应的平均像元值, 并记录实验数据, 如表 1 所示。

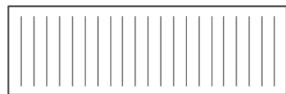


图 9 标定图案

Fig. 9 Calibration pattern

表 1 m_i 采样点与对应像元值测试数据Table 1 Sampling points m_i and corresponding pixel value test data

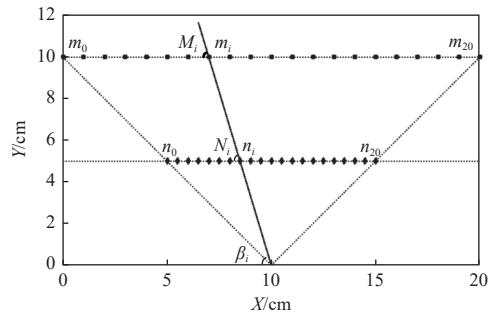
m_i	X_i	C_{x_i}	m_i	X_i	C_{x_i}
1	114	8	72	15	26
2	109	9	66	16	20
3	103	10	62	17	16
4	98	11	54	18	9
5	91	12	45	19	5
6	84	13	40	20	0
7	78	14	32		

选用相邻竖线间隔 5 mm 的标定图案, 将标定图案竖直放置于 $Y_N = 5$ MT4 的直线上, 重复上述操作, 得到点 n_i 对应的平均像元值, 并进行记录, 如表 2 所示。

表 2 n_i 采样点与对应像元值测试数据Table 2 Sampling points n_i and corresponding pixel value test data

n_i	X_i	C_{x_i}	n_i	X_i	C_{x_i}
5.0	0	8.5	78	12.0	33
5.5	114	9.0	72	12.5	26
6.0	108	9.5	66	13.0	20
6.5	103	10.0	61	13.5	15
7.0	98	10.5	54	14.0	9
7.5	90	11.0	45	14.5	5
8.0	84	11.5	40	15.0	1

对比表 1 和表 2 可知, 点 n_i 对应的像元值几乎可以与点 m_i 对应的像元值一一对应。利用 Matlab 将上述的 2 个表格中的点 m_i 和 n_i 描绘在直角坐标系中, 如图 10 所示, 并做相关的辅助线, 线阵 CCD 采集 m_i, n_i 线段上点的像元值输出基本相同, 即 m_i, n_i 线段上点对应的像元值相同, 证明采用双直线标定线阵 CCD 是成立的。

图 10 m_i 和 n_i 采样点展示图Fig. 10 Display diagram of sampling points m_i and n_i

$Y_F = 10$ 和 $Y_N = 5$ 的采样点 m_i 和 n_i 坐标已知, 由式(2)计算得 $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 的大小, 因 $\angle M_i$ 和 $\angle N_i$ 与 β_i 相等, 即求得 β_i 的大小。由表 1 和表 2 计算线段 $m_i n_i$ 与 X 轴的夹角 β_i , 并将 β_i 和相应的像元值记录如表 3 所示。

表 3 像元值与对应 β_i 数据Table 3 Image value and the corresponding β_i data

C_{x_i}	β_i	C_{x_i}	β_i	C_{x_i}	β_i
0	45.0	78	73.3	32	111.8
114	48.0	72	78.8	26	116.6
108	51.3	66	84.3	20	121.0
103	55.0	61	90.0	15	125.0
98	59.0	54	95.7	9	128.7
90	63.4	45	101.3	5	132.0
84	68.2	40	106.7	1	135.0

$$\tan(\angle M_i) = \tan(\angle N_i) = -\left(\frac{Y_{m_i} - Y_{n_i}}{X_{m_i} - X_{n_i}}\right) \quad (2)$$

$$\tan(\beta_i) = -\left(\frac{Y_{m_i}}{X_{m_i} - 10}\right)$$

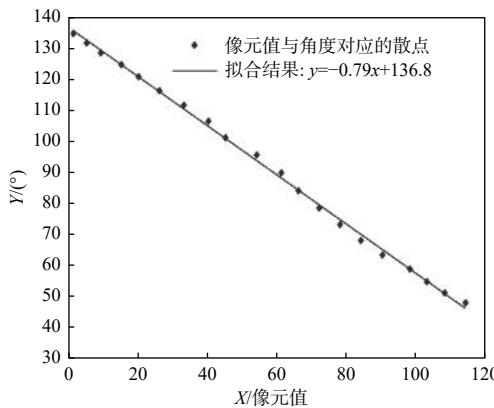
将像元值 C_{x_i} 作为横坐标, β_i 作为纵坐标绘制相应的散点图, 利用 Matlab 进行线性拟合如图 11 所示。设 $\beta_i = a \cdot C_{x_i} + b$, 最小二乘法线性回归方程如式(3)所示, 即 β_i 与像元值的关系式为

$$\beta_i = -0.79C_{x_i} + 136.8 \quad (3)$$

式中:

$$a = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N y_i\right)}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} = -0.79 \quad (4)$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i\right)}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} = 136.8 \quad (5)$$

图 11 β_i 与像元值的最小二乘法线性回归方程拟合图Fig. 11 β_i and least square linear regression equation for pixel values

3.4 坐标测量算法

被测对象在线阵 CCD 图像传感器的视场范围内, 步进电机带动激光光源装置放置于原点 (0,0), 线阵 CCD 图像传感器放置于点 (10,0) 处, MCU 直接控制步进电机的转动, 间接调整激光光源与 X 轴夹角的变化。步进电机的转角即就是激光光源的转角, 选用型号为 28BYJ-48、步距角为 $5.625/64^\circ$ 、额定电压为 5V 的步进电机, 步进电机转动的角度等于脉冲个数与步距角的乘积且与 α 互余, 如式 (6) 所示:

$$\alpha = 90 - N \cdot 5.625/64^\circ \quad (6)$$

由式(3)和式(6)可得入射光线和反射光线的方程式。

入射光线方程式:

$$Y_C = X_C \cdot \tan(\alpha) = X_C \cdot \tan(90 - N \cdot 5.625/64^\circ) \quad (7)$$

反射光线方程式:

$$Y_C = -(X_C - 10) \cdot \tan(\beta) = -(X_C - 10) \cdot \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8) \quad (8)$$

由式(6)和式(7)联合求解, 得 X_C 与像元值的关系式:

$$X_C = \frac{10 \cdot \tan(\beta_i)}{\tan(\alpha) + \tan(\beta_i)} = \frac{10 \cdot \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8)}{\tan(90 - N \cdot 5.625/64^\circ) + \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8)} \quad (9)$$

由式(6)和式(8)联合求解, 得 Y_C 与像元值的关系式:

$$Y_C = \frac{10 \cdot \tan(\beta_i) \cdot \tan(\alpha)}{\tan(\alpha) + \tan(\beta_i)} = \frac{10 \cdot \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8) \cdot \tan(90 - N \cdot 5.625/64^\circ)}{\tan(90 - N \cdot 5.625/64^\circ) + \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8)} \quad (10)$$

4 测试结果及分析

二维坐标图像测量系统如图 12 所示, 采用控制变量法分别对 X 轴和 Y 轴坐标进行分析。将被测对象放置于 $Y=10$ 处, 在线阵 CCD 图像传感器的视野范围内以及 X 轴坐标准确的前提下, 以 1 cm 为间隔移动被测对象, 得到 Y 轴固定 X 轴变化的二维坐标, 如表 4 所示。

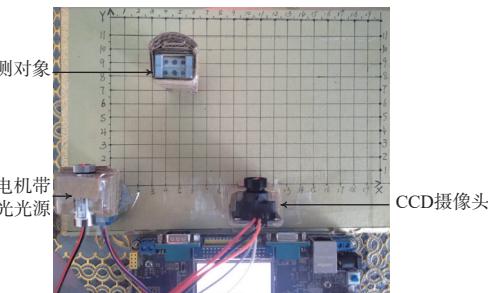


Fig. 12 Two-dimensional coordinate image measurement system

表 4 $Y=10$ 时坐标测量数据Table 4 Coordinate test data when $Y=10$

Y	X	Y_{test}	X	Y_{test}	X	Y_{test}
10	1	10.22	8	9.86	15	10.20
10	2	10.07	9	9.87	16	10.17
10	3	10.00	10	9.91	17	10.10
10	4	9.96	11	9.97	18	10.09
10	5	9.92	12	10.04	19	9.94
10	6	9.89	13	10.12		
10	7	9.87	14	10.17		

计算知 $Y=10$ 处的测量值 $\bar{Y}_{\text{test}} = 10.019$, 同上测量 $Y=2$ 至 $Y=11$ 间隔 0.5 cm 的直线上的坐标, 并对数据进行处理, 记录如表 5 所示。对 Y 轴坐标的测量误差进行多项式线性拟合, 得到如图 13 所示的 Y 轴坐标测量值误差的拟合多项式误差曲线^[15]。误差曲线的 6 次项和 5 次项系数比较小可以忽略, 误差曲线可以表示为 $y = 0.01x^4 - 0.09x^3 + 0.38x^2 - 0.83x + 0.75$, 即可以取 Y 轴坐标测量值误差的拟合曲线的相反数作为修正值, 则被测对象的 Y 轴修正坐标为

$$Y_i = \frac{10 \cdot \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8) \cdot \tan(90 - N \cdot 5.625/64^\circ)}{\tan(90 - N \cdot 5.625/64^\circ) + \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8)} - 0.01x^4 + 0.09x^3 - 0.38x^2 + 0.83x - 0.75$$

表 5 不同 Y 轴坐标测量数据

Table 5 Different Y-axis coordinate measurement data

Y	\bar{Y}_{test}	ΔY	Y	\bar{Y}_{test}	ΔY
2.0	2.045	0.045	7.0	6.994	-0.006
2.5	2.515	0.015	7.5	7.508	0.008
3.0	3.000	0.000	8.0	8.024	0.024
3.5	3.491	-0.009	8.5	8.531	0.031
4.0	3.983	-0.017	9.0	9.038	0.038
4.5	4.481	-0.020	9.5	9.534	0.034
5.0	4.975	-0.025	10.0	10.020	0.020
5.5	5.474	-0.026	10.5	10.506	0.006
6.0	5.975	-0.025	11.0	10.988	-0.012
6.5	6.483	-0.017			

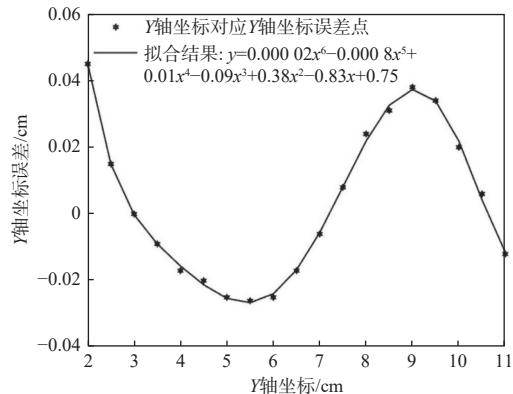


图 13 Y 轴坐标的测量误差多项式拟合曲线图

Fig. 13 Polynomial fitting curve of measurement error for Y-axis coordinates

同上操作, 测量 $X=2$ 至 $X=19$ 间隔 1 cm 的直线上的坐标, 对 X 轴坐标进行分析处理如表 6 所示。

表 6 不同 X 轴坐标测量数据

Table 6 Different X-axis coordinate measurement data

X	\bar{X}_{test}	ΔX	X	\bar{X}_{test}	ΔX
2	1.982	-0.018	11	10.987	-0.013
3	2.984	-0.016	12	11.977	-0.023
4	3.999	-0.001	13	12.974	-0.026
5	5.013	0.013	14	13.976	-0.024
6	6.022	0.022	15	14.988	-0.012
7	7.026	0.026	16	16.001	0.001
8	8.021	0.021	17	17.013	0.013
9	9.012	0.012	18	18.026	0.026
10	10.000	0.000	19	19.034	0.034

同上操作, 误差曲线的 5 次项系数比较小可以忽略, 如图 14 所示, 误差曲线可以表示为 $y=0.0046x^4-0.0065x^3+0.044x^2-0.12x+0.092$, 即被测

对象的 X 轴修正坐标为

$$X_i = \frac{10 \cdot \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8)}{\tan(90 - N \cdot 5.625/64^\circ) + \tan(-0.79C_{x_i} + 136.8)} - 0.00046x^4 + 0.0065x^3 - 0.044x^2 + 0.12x - 0.092$$

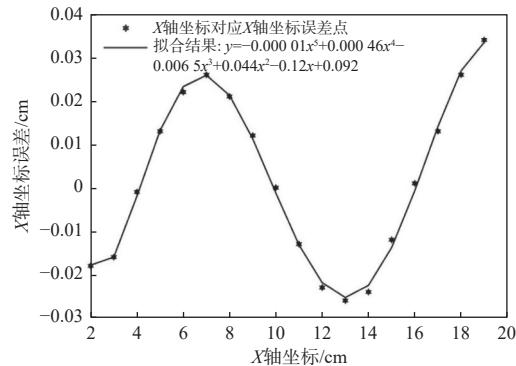
图 14 X 轴坐标的测量误差多项式拟合曲线图

Fig. 14 Polynomial fitting curve of measurement error for X-axis coordinates

将上述 X 轴和 Y 轴坐标修正公式加入系统程序, 得到如图 15 所示的点 (5,6) 坐标的测量结果。与未修正的坐标测量结果对比, 可知修正后的坐标测量结果误差减小了一些, X 轴坐标误差由 -0.0060 cm 减小到 -0.0013 cm, Y 轴坐标误差由 -0.0399 cm 减小到 -0.0104 cm, 即这样的坐标修正方法是可行的。



图 15 二维坐标测量结果展示图

Fig. 15 Display of 2D coordinate measurement results

5 结论

基于角度交会法设计了一种二维坐标图像测量系统, 分析处理测量结果得到修正公式, 进而修正坐标计算公式提高坐标测量精度。系统采用线阵 CCD 图像传感器为传感模块, 发挥线阵 CCD 大视野、高扫描频率、高分辨率的特点, 能够准确、快速、可靠的采集被测对象的信息; 搭建三角测距

光路模型, 测量两个角度参数, 采用角度交会法计算二维坐标; 利用 Matlab 分别分析处理 X 轴坐标和 Y 轴坐标, 对坐标测量误差进行多项式拟合, 得到坐标修正公式, 并将其应用于坐标计算, 实验测量结果表明修正后的系统测量精度更高。

参考文献:

- [1] 卢佳宝, 韩学辉, 王彩霞. 基于线阵CCD的精密尺寸测量系统[J]. 光电子·激光, 2019, 30(9): 935-940.
LU Jiabao, HAN Xuehui, WANG Caixia. Precise dimension measurement system based on linear CCD[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(9): 935-940.
- [2] 宫二敏, 黄强先, 余夫领. 共平面二维高精度工作台误差修正与实验研究[J]. 中国测试, 2014, 40(4): 10-14.
GONG Ermin, HUANG Qiangxian, YU Fuling. Research of error correction and experiment of co-planar 2D high precision stage[J]. China Measurement & Test, 2014, 40(4): 10-14.
- [3] HOCKEN R J. Coordinate measuring machines and systems[D]. Boca Raton: Crc Press, 2016.
- [4] CHEN Z Y, WANG Y C, YANG Y, et al. PSD: principled synthetic-to-real dehazing guided by physical priors[C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville: IEEE, 2021: 7180-7189.
- [5] 朱博源, 任永杰, 段显龙, 等. 旋转激光扫描无源多靶点定位方法[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 66-76.
ZHU Boyuan, REN Yongjie, DUAN Xianlong, et al. Passive multi-target location method based on rotating laser scanning[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 66-76.
- [6] LI J, QIN H, WANG J Z, et al. Open street map-based autonomous navigation for the four wheel-legged robot via 3D-lidar and CCD camera[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(3): 2708-2717.
- [7] 白玮本, 曹慧峰, 刘欣宜. 基于结构光的嵌入式图像采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021(8): 55-58.
BAI Weiben, CAO Huifeng, LIU Xinyi. Embedded image acquisition system based on structured light[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(8): 55-58.
- [8] PAN Y, DONG Y Q, WANG D L, et al. Three-dimen-
- sional reconstruction of structural surface model of heritage bridges using UAV-based photogrammetric point clouds[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1204.
- [9] SHAH V, KENIYA R, SHRIDHARANI A, et al. Diagnosis of COVID-19 using CT scan images and deep learning techniques[J]. Emergency Radiology, 2021, 28(3): 497-505.
- [10] RUMBOLDT Z, HUDA W, ALL J W. Review of portable CT with assessment of a dedicated head CT scanner[J]. American Journal of Neuroradiology, 2009, 30(9): 1630-1636.
- [11] 张同双, 傅敏辉, 钟德安, 等. 基于MLE算法的海上角度交会测量方法及其精度分析[J]. 电讯技术, 2013, 53(8): 1033-1038.
ZHANG Tongshuang, FU Minhui, ZHONG Dean, et al. Marine angle intersection method based on MLE algorithm and its precision analysis[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(8): 1033-1038.
- [12] 田又源, 程瑶, 贾宁, 等. 高速线阵CCD驱动与数据采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 84-87.
TIAN Youyuan, CHENG Yao, JIA Ning, et al. Design of high speed linear CCD driving and data acquisition system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(3): 84-87.
- [13] 高毅, 于瀛, 杨絮, 等. 基于多波段光源的智能痕迹分色方法[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 46-54.
GAO Yi, YU Ying, YANG Xu, et al. Intelligent trace color or separation method based on multi-band light source[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 46-54.
- [14] 伍川辉, 尹纪磊, 郭辉, 等. 基于二维激光位移传感器的通过式轮对测量系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(11): 50-53.
WU Chuanhui, YIN Jilei, GUO Hui, et al. Design of wheel-set measurement system based on two-dimensional laser displacement sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(11): 50-53.
- [15] 顾天奇, 林述温, 陈剑雄, 等. 坐标测量数据稳健拟合算法与实验研究[J]. 机械设计与制造, 2019(7): 165-167.
GU Tianqi, LIN Shuwen, CHEN Jianxiong, et al. The robust fitting algorithm and experimental study of measurement data of coordinate measurement machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(7): 165-167.