

文章编号: 1001-3806(2017)06-0891-06

室内高速激光三角测距技术的设计与实现

王晨宇, 黄涛*

(武汉理工大学 信息工程学院, 武汉 430070)

摘要: 为了实现室内大范围环境激光测距, 采用三角测距原理设计了一套高速激光测距系统。该系统采用高分辨率线性 CCD 传感器采集环境信息并输出二值化信号, 由 32 位单片机对二值化信号进行处理, 利用分段拟合法得到的距离解算算法对二值化信号进行解算, 从而得到激光光斑与测距模块镜头中心的距离; 最后进行了实验验证。结果表明, 测距仪具有 714Hz 的测量频率, 最大测量距离为 6311mm, 最小测量距离为 48mm, 平均误差为 2.8mm, 最大测量误差为 11mm。该测距系统可满足室内大范围环境测量的要求。

关键词: 激光技术; 测距; 激光三角法; 线性 CCD; K60 单片机; 系统标定

中图分类号: P225.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.06.025

Design and implementation of high speed indoor laser triangulation measurement

WANG Chenyu, HUANG Tao

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to realize wide range indoor environment laser ranging, a high speed laser ranging system was designed by the principle of trigonometric ranging. Environmental informations were collected with a high resolution linear CCD sensor, and the binary signal was output. The binary signal was processed by a 32-bit single chip microcomputer. The distance between laser spot and lens center of the ranging module was obtained according to the distance obtained by the piecewise fitting method. After the experimental verification, the results show that the rangefinder has the measurement frequency of 714Hz. The maximum measurement distance is 6311mm and the minimum measurement distance is 48mm. The average error is 2.8mm and the maximum measurement error is 11mm. The distance measurement system can meet the requirements of large-scale indoor environment measurement.

Key words: laser technique; ranging; laser triangulation; linear CCD; K60 microcontroller; system calibration

引言

目前国内对于三角法激光测距仪器的研究大多还处于实验阶段, 只有个别的企业有为数不多的产品推出, 例如上海光学仪器厂和北京机床厂等。国内销售的测距产品, 很多都是国外产品^[1]。对比发达国家, 我国激光三角法测距传感器技术不够成熟, 成型的产品较少, 虽然有一些产品推出市场, 但测量精度、测量范围和速度等都不够理想^[2-3], 传统激光三角测距主要用于微米级测量、小范围微距测量等领域, 对于要求快速实时响应的大范围测量的任务无法胜任。作者就这些问题对传统激光三角测距技术进行了改进。

本文中在传统三角测距的基础上简化成像系统结

构的设计, 选择带有二值化电路的高分辨率线阵 CCD 芯片, 设计匹配的驱动信号产生算法、信号处理算法、分段拟合距离解算算法, 在硬件、软件结合的基础上保证测距系统在室内大范围测量环境下依然能够满足实际应用的需求。该系统可为低成本 2 维激光雷达、室内服务机器人等智能产品提供低成本距离感测模块, 具有一定的实际应用价值。

1 成像系统结构设计

光学成像系统的结构设计包括对激光发射器、镜头以及感光元件 CCD 进行合理的选型, 同时对三者的位置关系进行合理布局^[4], 设置能满足测距指标的几何结构参量。

1.1 镜头选型

由三角测距法原理和光学知识, 镜头视角决定了测距模块的测距范围。同时, 为了满足远距离测距的要求, 镜头要有足够大的焦距。而视角与焦距两个参量相互制约, 因此, 镜头摄入范围和拍摄距离是一对相

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575411)

作者简介: 王晨宇(1992-), 男, 硕士研究生, 现在主要从事汽车电子技术、智能信息处理的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 119072957@qq.com

收稿日期: 2016-12-23; 收到修改稿日期: 2017-03-01

互制约的两个因素^[5-6]。所以在进行镜头选择的时候,要使镜头的视角和焦距两个参量既能保证镜头有较大测量距离又能保证有合理的测量范围,对于两个参量的确定要保持适中的原则。另一方面,镜头成像尺寸必须适配选定的 CCD 尺寸^[7],本系统采用的 CCD 感光面长度为 8.192mm,所以综合以上因素并经过实际调试,本文中 choice 成像面为 1/2 英寸、焦距为 9mm、视场角为 52°、接口为 m12 型号的镜头作为成像系统镜头,该镜头能够保证在本系统成像结构中连续采集到 48mm ~ 6311mm 范围内的激光光斑。

1.2 传感器选型

本文中选用 PANVISION 公司的 RPLIS-2048EX 型号的 CCD 传感器,该传感器拥有 2048 个像素,单个像素尺寸为 4μm × 32μm,分辨率高于市面上绝大多数 CCD 传感器,线阵长度为 8.192mm,最高工作频率可达 2.5MHz。同时,该传感器具有先进滤波技术,可有效抑制噪声干扰,一定程度减小光斑中心位置的像移偏移量误差。同时内置二值化电路,3 种阈值设置方法:可以外部输入参考电压作为阈值,通过内置数字模拟转换器(digital to analog converter, DAC)人为设置阈值或由内置自动动态阈值模块自动生成阈值,省去了后续人为设计信号处理电路的过程,方便了后期图像的处理。传统三角测距系统 CCD 传感器分辨率不高,不利于远距离精确测量,成像面尺寸过大,需要设计专门的透镜成像结构进行匹配^[8],并且功能单一,需要人为设计后续滤波电路与信号处理电路,该 CCD 传感器充分克服了以上不足。传感器参量如表 1 所示。

Table 1 Main parameters of CCD chip

model	RPLIS-2048-EXB-LG
array size	12 dark pixels + 2048 video pixels
pixel size	4μm × 32μm
image array size	imaging area: 8192μm × 32μm
output	analog and digital
maximum frequency	2.5MHz

1.3 成像系统结构参量的确定

图 1 所示为激光三角测距系统的成像结构。传统测距系统对成像结构进行精确设计,保证激光光斑在成像系统中能够时刻聚焦^[9-10],所以结构参量的精确性直接关系到系统测量的误差,本系统的成像结构并不服从 scheimpflug 条件,但系统通过选用高分辨率 CCD 芯片及分段的距离标定算法,软硬件相结合,保证在不知道精确的结构参量的情况下依然能解算出光斑距离,并保持较高精度。采用这种方式无须专门设计透镜结构,采用符合参量的低成本工业镜头即可满足要求,有效简化和降低传统三角测距系统光学结构

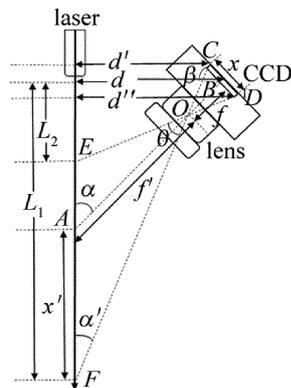


Fig. 1 Imaging structure of laser triangle ranging system

的设计负担和制作成本。

在确定了镜头类型及镜头结构参量之后,系统的已知量为镜头的有效焦距 $f = 9\text{mm}$,视场角 $\theta = 52^\circ$,以及 CCD 尺寸 $x \approx 8\text{mm}$,自变量为成像系统的结构参量,包括镜头光轴与激光束方向所成夹角 β , CCD 中点与激光束方向的垂直距离 d 。为了简化分析计算的过程,同时为了满足系统几何尺寸的要求,这里将 CCD 中点与激光束方向的垂直距离 d 设为 50mm,未知量为 β ,因变量为最终测量指标,包括测量的最远距离 L_1 、最短距离 L_2 、测量范围 W 和最大分辨率 k 。

由以上成像系统的结构参量并根据三角激光测距的几何知识来计算系统所要达到的各项指标,根据预期指标要求,选择确定最适合应用需求的结构参量 β 。

根据图 1,由三角几何知识可以得到如下关系式:

$$\frac{d'}{d} = \frac{d/\cos\beta - x/2}{d/\cos\beta} \quad (1)$$

$$\frac{d}{d''} = \frac{d/\cos\beta}{d/\cos\beta + x/2} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{d'}{\tan(\alpha - \theta/2)} - \frac{x\sin\beta}{2} \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{d''}{\tan(\alpha + \theta/2)} + \frac{x\sin\beta}{2} \quad (4)$$

$$\beta = \alpha = \alpha' + \theta/2 \quad (5)$$

$$\sin\beta = \frac{d}{f + f'} \quad (6)$$

$$\frac{f'}{f} = \frac{x'\sin(\beta - \theta/2)}{x/2} \quad (7)$$

联立(1)式~(5)式得到:

$$\begin{cases} L_1 = \left(d - \frac{x\cos\beta}{2}\right)\cot\left(\beta - \frac{\theta}{2}\right) - \frac{x\sin\beta}{2} \\ L_2 = \left(d + \frac{x\cos\beta}{2}\right)\cot\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right) + \frac{x\sin\beta}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, L_1 为最长测量距离, L_2 为最短测量距离。

测量范围 W 为:

$$[L_1, L_2] = \left[\left(d - x'\cos\beta\right)\cot\left(\beta - \frac{\theta}{2}\right) - x'\sin\beta, \right.$$

$$(d + x' \cos\beta) \cot\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right) + x' \sin\beta \quad (9)$$

由(4)式、(5)式得到:

$$k = \frac{x'}{x/2} = \frac{d - f \sin\beta}{f \sin\beta \sin(\beta - \theta/2)} \quad (10)$$

式中, k 为系统最大分辨率, 即目标最远处物像移动一个像素所对应的物体实际移动距离。

图 2 显示的是测量指标随着镜头倾角 β 的变化情况。因为分辨率越大, 测量误差越大, 所以由图可看出, 最大测量距离与精度是一对相互制约的因素, 为了使系统能满足实际应用的需要, 将 β 的范围控制在 $26^\circ \sim 27^\circ$ 之间。图 3 所示为 $26^\circ < \beta < 27^\circ$ 时测量指标的变化情况, β 的精度为 0.1° , 图中标识 max 代表最大测量距离, min 代表最小测量距离。为使误差不能太大, 同时又能满足室内应用的需求, 本系统选择镜头的倾角 $\beta = 26.4^\circ$, 此时测量的最大距离约为 6648mm, 最小距离约为 41mm, 系统最远距离分辨率约为 6.6mm。

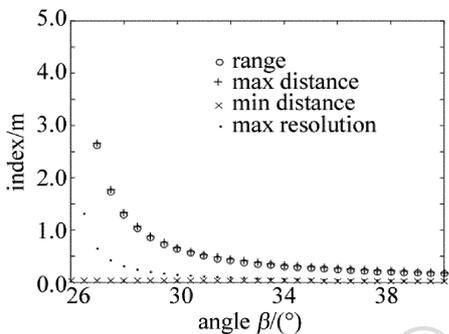


Fig. 2 Measurement index with the change of lens inclination angle β

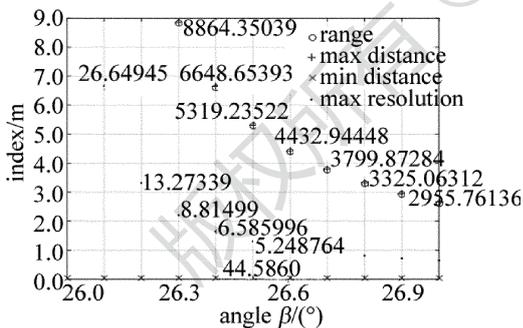
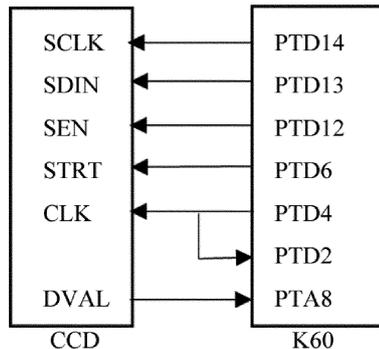


Fig. 3 Measurement index with the change of lens inclination angle $\beta (26^\circ < \beta < 27^\circ)$

2 CCD 驱动电路设计

图 4 为 CCD 芯片与 k60 单片机的引脚连接图。芯片的 SCLK, SDIN, SEN 引脚分别与单片机的 PTD14, PTD13, PTD12 引脚连接, 由单片机产生脉冲波形传输至 CCD, 对芯片可编程寄存器进行功能设置, 选择相应的曝光模式和二值化方式。STRT 引脚连接 PTD6, 单片机由 PTD6 产生脉冲波形作为 CCD 的 STRT 开始曝光信号。DVAL 引脚连接 PTA8, 单片



机的 PTA8 引脚复用 FTM 模块的输入捕捉功能, 对 DVAL 信号的跳变沿进行捕捉, 以判断像素电压何时开始输出以及何时结束输出。CLK 连接 PTD4 及 PTD2, PTD4 引脚复用 FTM 模块的 PWM 模式, 产生频率为 2MHz 的占空比为 50% 的方波信号作为 CLK 时钟信号驱动 CCD, 同时 CLK 时钟信号通过 PTD2 引脚输入给单片机, 用以驱动单片机内置的 DMA 数据传输模块以采集 CCD 传送回来的图像信号 DOUT, CCD 的 DOUT 信号引脚接单片机的 PTB7, PTB7 引脚复用 DMA 模块的数据传输功能, 由 CLK 时钟信号作为驱动信号, 采集每一次传入的像素点电压。完成对 CCD 图像的传输与采集。

3 系统算法设计

系统算法主要包括: CCD 驱动信号的产生算法; CCD 对采集信号的处理算法; 距离解算算法以及上位机接收显示算法。

3.1 CCD 驱动算法的设计

CCD 驱动信号的产生算法是系统设计的关键, 因为 CCD 驱动算法直接决定了测距仪的测距频率, 在单片机产生 CCD 驱动信号的同时, 要保证单片机能在一个曝光工作周期内完成后续 3 个算法的执行, 只有这样才能保证最大化发挥 CCD 的工作效能。因此对 CCD 驱动信号周期的准确控制就成为首要且关键的问题。

CCD 工作时的主要信号分别为: (1) STRT: 触发 CCD 曝光的开始信号; (2) CLK: 保证 CCD 正常工作的时钟信号; (3) DVAL: 指示 CCD 像素数据开始输出的标志信号, 由 CCD 产生; (4) VOUT: 像素电压输出信号。

RPLIS-2048-EX 芯片共有两种曝光方式: 短时曝光和正常曝光。图 5 为 CCD 芯片正常曝光的工作波形。正常曝光工作方式芯片的默认曝光方式, 时钟信号 CLK 为占空比为 50% 的方波信号, 起始信号 STRT 是触发芯片开始曝光的信号, 时钟信号需要在 CLK 信号的上升沿到来之前即低电平期间开始触发,

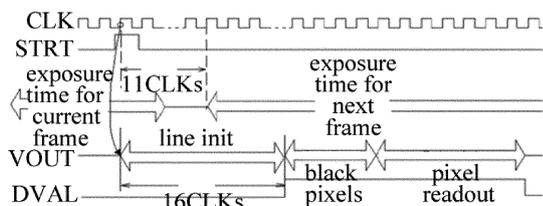


Fig. 5 Working waveform of normal exposure of CCD chip

STRT 信号触发后的第 11 个 CLK 时钟周期, 芯片将结束上一轮曝光过程, 紧接着芯片像素阵列将进入初始化阶段, 初始化阶段将持续大约 16 个 CLK 时钟周期, 在像素阵列初始化结束之后, DVAL 信号会发生自动跳变, 从低电平变为高电平, DVAL 信号的上升沿预示着从暗像素开始像素阵列进行新一轮的曝光, 在此期间可读取上一轮曝光之后的 CCD 像素的电压值 VOUT 信号, 每个 CLK 周期输出一个像素电压, 共 2060 个像素故需要 2060 个 CLK 时钟周期才能全部输出, 在像素电压值通过 VOUT 信号输出完毕之后, DVAL 信号将再次跳变, 从高电平自动下降为低电平, DVAL 信号的下降沿预示着像素电压输出阶段的结束。当下一个 STRT 信号到来时, 一个工作周期结束。由上可知, 一个工作周期的最小时间为初始化阶段与像素电压输出阶段所花的时间总和, 即 $2060 + 16 = 2076$ 个 CLK 时钟信号周期。

PTA8 引脚接的是 CCD 的 DVAL 信号, 复用 FTM 模块的输入捕捉功能, 在后续的 CCD 采集信号处理算法中介绍, PTD6 引脚复用 GPIO 功能, 用来产生 STRT 周期性脉冲波形, 触发 CCD 的周期性曝光工作。由于 STRT 和 CLK 时钟信号波形需满足一定的时序关系, 因此在产生 STRT 开始信号和 CLK 时钟信号时, 需利用算法对两者时序进行合理的安排设置。

图 6 所示为一个曝光周期的数据处理流程。单片机在每两个 STRT 脉冲信号之间要经过以下几个过程: (1) line init 像素初始化过程, 等待 DVAL 信号上升沿; (2) DVAL 信号上升沿到来之后, 初始化对本次像素信号的 DMA 采集; (3) 对上次曝光采集到的像素信号进行处理, 解算出上次曝光采集到的距离信息; (4) 启动 UART 模块, 对上次采集的距离信息进行串口传输; (5) DVAL 信号下降沿到来之后, 利用数组变量对本次曝光采集到的像素信号进行存储, 以便下一轮曝光时进行过程(3)的处理来解算得到本次采集到的距离信息。

经过实际实验的测算, 过程(1)花费时长为 16 个 CLK 周期, 即 $8\mu\text{s}$; 过程(2)和过程(3)花费的时间平均约为 $170\mu\text{s}$; 过程(4)花费时长约 $180\mu\text{s}$; 过程(5)花费的时间为 $310\mu\text{s}$ 。DVAL 高电平持续时间为 2060 个 CLK 时钟周期即 1.03ms , 过程(1)~过程(4)的持续

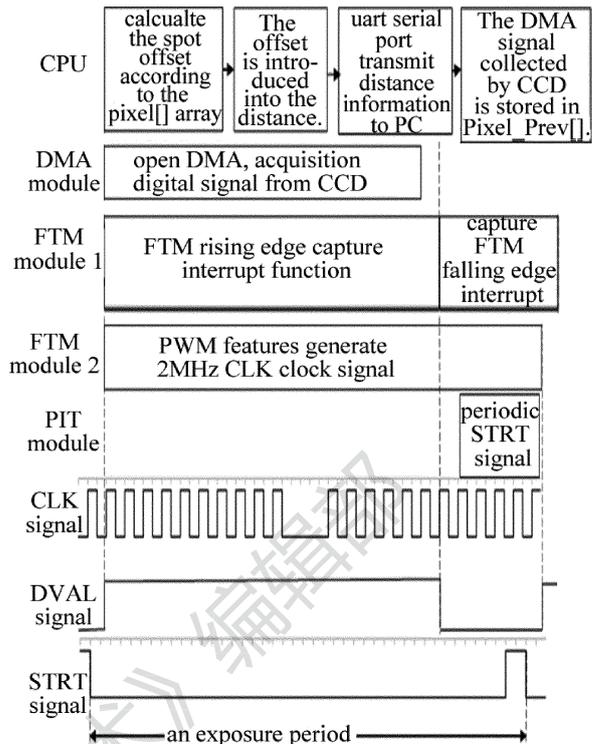


Fig. 6 Data processing flow of an exposure cycle

时间约为 $480\mu\text{s}$ 。所以 STRT 最小周期为 DVAL 高电平持续时间与过程(5)持续时间之和, 约为 1.34ms , 本系统设置 STRT 产生的周期为 1.40ms , 即在理论计算的理想情况下, 测距频率可达到 714Hz 。STRT 周期性信号由单片机的 PIT 定时中断产生。

本系统驱动算法充分利用 32 位单片机的内部资源, 并考虑每个工作环节的时序与时间, 设计的驱动算法使 CCD 传感器能够在最大工作频率下进行测量工作。保证了测距速率。

3.2 信号采集算法的设计

信号采集算法采用单片机的 DMA 模块进行数据采集, 实现了数据运算与图像采集两个功能同步进行, 保证了系统工作频率。

如图 6 所示, FTM 模块的输入捕获中断函数在 DVAL 信号上升和下降沿出现的时候被调用, 在 DVAL 信号上升沿时, 单片机执行以下几个处理动作: (1) 单片机开启 DMA 数据采集, 用以采集 CCD 输出的二值化数字信号, 因为有 2048 个视频像素, 所以传输 2048 次数据, 每次传送一个 8 位二进制数据, 8 位数据由最高位到最低位分别传送至单片机的 PTB7 到 PTB0 引脚, PTB7 接 CCD 的 DOUT 端口, 接收 CCD 输出的像素二值化信号, 单片机 PTB6 到 PTB0 引脚接地, 所以当像素电压大于设定的阈值电压时, DOUT 引脚输出为 1, 单片机通过 DMA 采集到的 8 位二进制数据为 10000000, 小于阈值电压时, DOUT 引脚输出为 0 采集到的 8 位二进制数据为 00000000; (2) 调用距离解算

函数对 CCD 上一次采集的像素信息 Pixel_Prev[] 进行处理,解算出被测物的实际距离;(3)调用 UART 串口相关函数将得到的实际距离信息通过串口传送至 PC 端的上位机。

在 DVAL 信号下降沿到来时,系统将把 CCD 传输出来的像素信息存储进 Pixel_Prev[] 数组,以便 CCD 在下一次曝光采集的过程中对本次采集的像素信息 Pixel_Prev[] 进行处理,解析出本次采集到的光斑偏移量 x 。

3.3 距离解算算法的设计

系统成像结构决定了被测目标点与仪器间的最小距离和最大距离。当目标点等间隔移动时其像点在 CCD 上并不是等间隔地均匀变化,因此这种测量是非线性的^[13]。所以系统采用分段拟合的方法得到距离的标定曲线,再由标定曲线解算出目标距离。相对于传统三角测距由标定曲线确定结构参量不同^[14],本系统将标定得到的数量关系存储进单片机,光学结构参量将不再影响距离解算过程,利用软件算法克服了硬件结构上的误差。

本系统理论上测量的最大距离约为 6648mm,最小距离约为 41mm,但在实际测试时,受结构参量、外部干扰、CCD 感应灵敏度等客观因素的影响^[15-16],实际测量的最小测量距离为 48mm,最大测量距离为 6311mm。系统标定步长设为 1mm,在标定过程中记录激光光斑与仪器的实际距离 y ,单位为 mm,成像光斑在 CCD 上距端点像素的像素偏移量 x ,单位为 pixel。

在测量范围内经过 3 次完整标定并取平均,得到一组平均标定数据集,对平均标定数据集进行曲线拟合,经过实验,若对 y 和 x 的关系进行曲线拟合,所得

曲线参量会超出单片机的运算处理能力,因此为适应单片机运算能力,此处将 y 与 x 的关系转换为 $1/y$ 和 $1/x$ 之间的关系,图 7 所示为标定实验所得的点集($1/y, 1/x$)的图形。

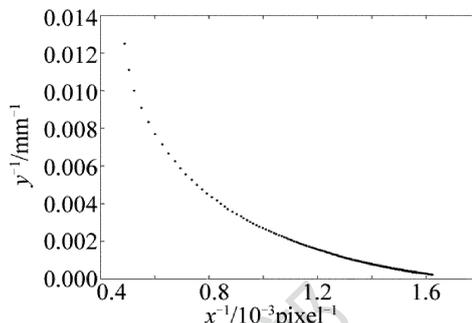


Fig. 7 Relationship between $1/y$ and $1/x$

经过实验测试,本系统将该点集分成 5 段,分别为 $48\text{mm} \leq y < 240\text{mm}$, $240\text{mm} \leq y < 740\text{mm}$, $750\text{mm} \leq y < 2840\text{mm}$, $2840\text{mm} \leq y < 4200\text{mm}$, $4200\text{mm} \leq y < 6311\text{mm}$,图 8 依次为对各段点集进行曲线拟合的结果。图中反映了采样点的点集与拟合曲线的关系。

表 2 所示为各段点集拟合曲线的函数。将这些公式编入距离解算函数,解算出与光斑中心偏移量相

Table 2 Function of fitting curve of each set of points

$48\text{mm} \leq y < 240\text{mm}$	$y = 1 / (-238884699.65/x^3 + 530548.2274/x^2 - 404.94/x + 0.111213)$
$240\text{mm} \leq y < 740\text{mm}$	$y = 1 / (-7899795.464/x^3 + 31495.48609/x^2 - 46.1119/x + 0.02521)$
$750\text{mm} \leq y < 2840\text{mm}$	$y = 1 / (-12825216.53/x^3 + 56003.15446/x^2 - 84.5048/x + 0.04452)$
$2840\text{mm} \leq y < 4200\text{mm}$	$y = 1 / (9381971.246/x^3 - 39260.8585/x^2 + 51.8177/x - 0.02055)$
$4200\text{mm} \leq y < 6311\text{mm}$	$y = 1 / (-431717687.9/x^3 + 2064225.4742/x^2 - 3291.774/x + 1.7512)$

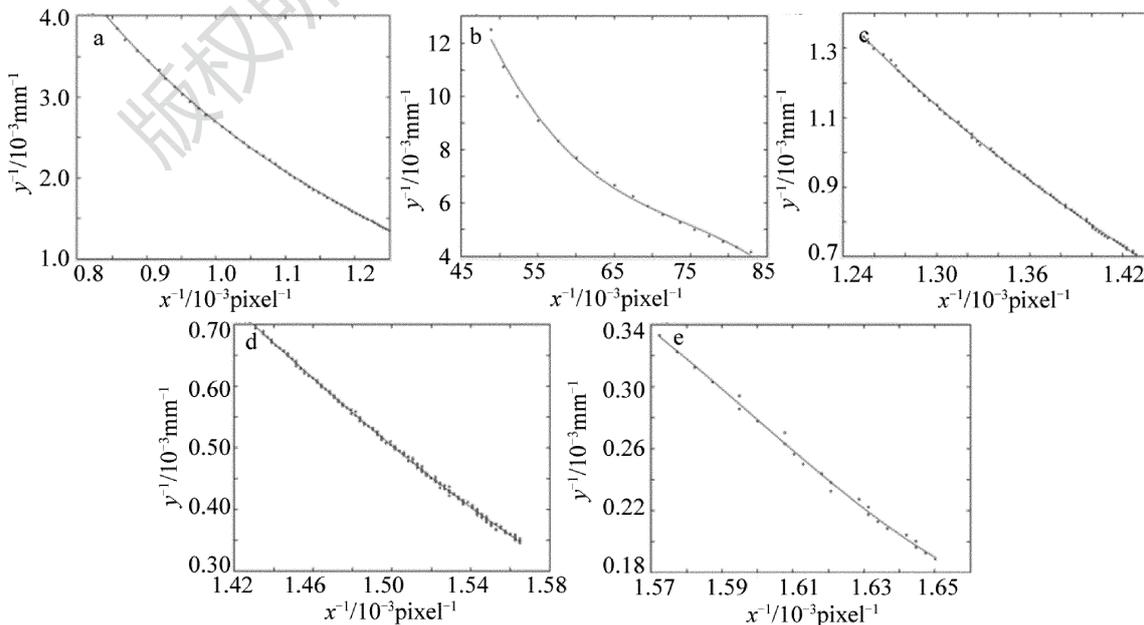


Fig. 8 Results of curve fitting for each set of points

对应的被测物实际距离。

4 测试结果

三角法激光测量系统由测距模块、PC 上位机、被测物体和导轨组成,测距模块被放置在光学平台上,能有效避免震动造成的影响。在进行实验前,首先对光源稳定性进行测试,保证光源稳定后由导轨带动被测物体单步移动,每移动一步上位机自动读取 20 帧测量数据并取平均,最后显示出平均后的测量结果。测量每隔 10mm 进行一次,实验共进行 3 次,每次采集 625 个样本点。此处分别只列出近距离和远距离范围的部分测量结果。表 3 所示为 50mm ~ 950mm 范围内的测量结果。表 4 所示为 5400mm ~ 6300mm 范围内的测量结果,步长为 100mm。最终测量结果显示,系统平均测量误差为 2.8mm,最大测量误差为 11mm。

Table 3 Measurement results within the range of 50mm ~ 950mm

distance/mm	50	150	250	350	450
No. 1	50	150	250	350	451
No. 2	50	150	250	350	450
No. 3	50	150	250	350	450
distance/mm	550	650	750	850	950
No. 1	550	650	749	849	950
No. 2	550	650	750	850	950
No. 3	550	650	749	850	951

Table 4 Measurement results within the range of 5400mm ~ 6300mm

distance/mm	5400	5500	5600	5700	5800
No. 1	5397	5498	5607	5703	5802
No. 2	5396	5496	5611	5702	5799
No. 3	5399	5497	5606	5699	5797
distance/mm	5900	6000	6100	6200	6300
No. 1	5903	6002	6097	6194	6292
No. 2	5904	5999	6094	6192	6294
No. 3	5903	5997	6095	6194	6290

5 结论

本文中在传统三角激光测距技术的基础上,以系统实际应用为导向,简化了成像系统结构模型的设计,选择带有二值化模块的高分辨率 CCD 芯片对采集信号进行预处理,并提出了一套优化的信号处理算法,在硬件软件相结合的基础上,保证了系统在室内大范围

环境下依然能够保证足够的测量精度和工作频率。

结果表明:系统的测量范围达到 48mm ~ 6311mm,测量频率达到了 714Hz,平均测量误差为 2.8mm,最大测量误差为 11mm。满足室内测量的基本要求。

参考文献

- [1] WANG F. Laser ranging technology based on triangulation [D]. Tianjin: Nankai University, 2012: 45-77 (in Chinese).
- [2] CHEN J X, TAO W, YANG H W, et al. Laser triangulation displacement sensor localization algorithm [J]. Optimization Design of Sensor and Micro Systems, 2016, 35(9): 62-65 (in Chinese).
- [3] LIU K, CHEN F. Laser ranging method and the development of laser [J]. Science and Technology Information, 2008, 1(30): 387-388.
- [4] MA S D. A self-calibration technique for active vision system [J]. IEEE Transactions on Robot Automation, 1996, 12(1): 114-120.
- [5] FU B Ch. Research on the hardware circuit of high precision laser range finder [D]. Nanjing: Nanjing Science and Engineering University, 2007: 17-34 (in Chinese).
- [6] XIAO B. Study on laser ranging method [J]. Geo Spatial Information, 2010, 8(4): 162-164 (in Chinese).
- [7] YAN S, LI D G, YU Zh L. Design and analysis of parameter optimization of triangulation laser displacement sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(10): 21-24 (in Chinese).
- [8] ZHENG D, YUE Y D. Simple three-dimensional laser radar measuring method and model reconstruction for hot heavy forgings [J]. Optical Engineering, 2012, 51(2): 021118.
- [9] XU J Ch. Study on new phase laser range finder [D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2008: 13-21 (in Chinese).
- [10] YU P Zh. Analysis and improvement of detection error shift of laser triangulation [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 88-93 (in Chinese).
- [11] JIA Q, XIE J S. Design and implementation of laser displacement sensor based on triangulation method [J]. Journal of Changchun University, 2014, 24(10): 1035-1037 (in Chinese).
- [12] WANG G. Design and research of laser rangefinder receiving optical system field diaphragm [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 647-650 (in Chinese).
- [13] GAO Y Y, LI Y H, FENG Q L, et al. Design of optical system for laser ranging based on digital phase detection [J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 353-356 (in Chinese).
- [14] WANG X J, GAO J, WANG L. Overview of the laser triangulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 601-604 (in Chinese).
- [15] TAN H Y, ZHAO X J. Online measurement of surface roughness of parts based on laser triangulation method [J]. Machine Tool and Hydraulic Press, 2010, 38(6): 67-68 (in Chinese).
- [16] LÜ P, HAN G H. Double wedge application in calibration of laser range finder optical axis [J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 151-153 (in Chinese).