

激光结构光测量连续调节智能光源控制器设计

王晓东¹, 胡松钰^{2*}

(1. 唐山学院 计算机科学与技术系, 河北 唐山 063000;
2. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 激光结构光视觉测量过程中被测物体的表面材质差异、表面几何曲率大小均会影响到实际采集的激光光斑图像质量, 从而影响到测量数据处理的精确度和准确性。为了适应工业测量中多变的被测对象特性和使用环境, 对结构光源的激光二极管进行电流控制。在分析 mW 级别小功率激光二极管工作特性的基础上, 提出了一种使用上位机和 ARM 微控制器的微小功率半导体激光器智能控制器的低成本设计方案。研究了数字 PWM 信号驱动激光二极管的技术, 使用 ARM 微控制器生成 PWM 信号输出, 然后 PWM 数字信号通过光电隔离的阻容滤波电路、运放电压跟随、调理电路以及压控恒流源电路 ($V-I$) 驱动半导体激光二极管的电流大小。激光控制器的 PWM 信号的占空比、基准频率通过上位机串行 Modbus 协议通讯进行快速设定。系统经过激光结构光投影成像实验进行验证, 适时调整激光结构光输出强度大小, 可优化激光视觉测量系统的测量输出和适应性。通过实验验证的结果表明, 系统可以稳定运行。

关键词: 激光测量; 半导体激光器; PWM; 激光控制器; 小功率

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200180

Continuous smart light source controller design for laser structure light measurement

Wang Xiaodong¹, Hu Songyu^{2*}

(1. Department of Computer Science and Technology, Tangshan University, Tangshan 063000, China;
2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: During the measurement procedure of laser structure light vision, the measurement object material surface difference and geometric curvity would both affect the laser light-spot image quality, and influence the precision accuracy of measurement data processing. For adapting to application various circumstances of industrial measurement, the current controlling of laser diode of structure light was adopted. A low cost miniwatt semiconductor laser controller design solution was submitted based on the analysis of laser diode performance. The PWM signal driving technique was researched in this paper, which applied ARM MCU to generating PWM output signals, and then signals were transformed into analog laser controlling signal by cascade circuits of the resistance-capacitance filter circuit with optoisolator, operational amplifier follower and voltage controlled constant current source ($V-I$) circuit. The ratio and reference frequency of PWM signal could be set by the modbus serial agreement between host machine and laser controller. A series of imaging experiments with laser structure light projection were be done, which indicated adjusting laser structure light output at the right level would be able to optimize the measurement result and improve the adaptability of laser vision system. The experimental

收稿日期: 2020-05-20; 修订日期: 2020-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (61803270); 唐山市科技计划项目 (20130226b); 唐山学院博创基金 (1402001); 中央高校基本业务专项资金 (2020QNA4002)

results show that the system can run stably.

Key words: laser measurement; semiconductor laser; PWM; laser controller; miniwatt

0 引言

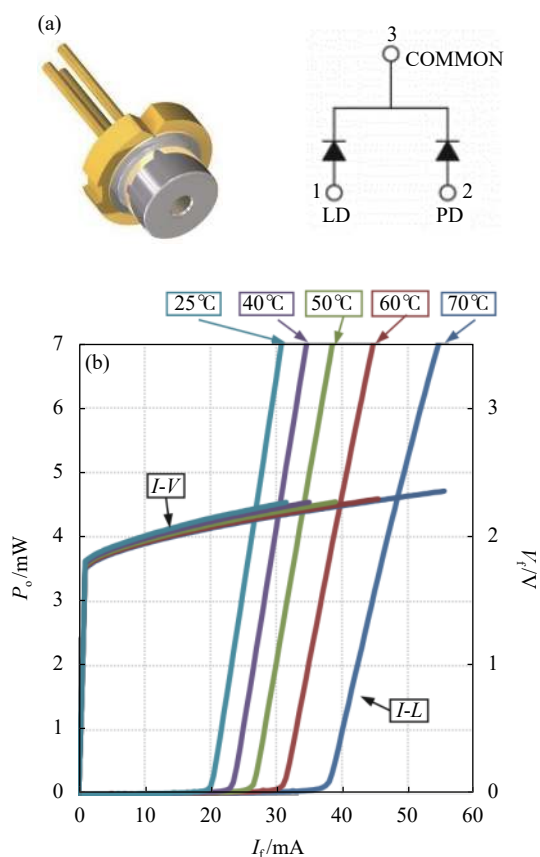
使用激光结构光^[1]的主动视觉测量^[2]应用日渐增多,在细胞生物研究、智能制造、消费电子产品生产和测试,无人车、振动检测^[3]、轨道检测^[4]等领域均有成功的应用案例。国内外厂商推出了相应的产品,形成了一定的市场规模。在实际应用中,测量对象的特性各不相同,例如表面材质反光程度、平面、球面的几何形状等都会影响到激光视觉成像的效果,从而对于测量系统后端的激光光条^[3]特征提取产生重要影响。参考文献[5-6]针对结构光提取和高反光结构光测量算法进行了深入研究,但由于实际应用环境的复杂性,还是会产生问题,例如高反射率和低反射率的混合材质工件测量,光线反射多个路径返回等,解决问题的一个方面是随着环境变化控制激光光源的柔性输出。激光结构光测量光源一般是使用半导体激光二极管作为发光器件,文献[7]总结了半导体激光器的发展现状,在半导体激光控制器领域,但是大多数激光驱动芯片都是针对 100 mA 以上的高功率的半导体激光器控制,文献[8]使用美国 TI 的 DSP 处理器实现了 0~1 A 的半导体激光控制器,但其方案成本高、面积大,且没有上位机控制功能。文献[9]也是实现了 20 mW 分辨率的较大功率的半导体激光器控制,然而在智能制造领域的激光测量由于工作距离、重复性精度的限制,只能使用小功率激光二极管,正常工作输出功率在 1~15 mW 之间,工作电流都在 100 mA 以下。目前国内激光结构光视觉测量厂商将激光器设定在固定的开关模式输出,这样当测量物体颜色和材质发生变化时候,系统不能做出有效改变,导致测量系统失效。在激光视觉主机方面,随着移动互联网和物联网的发展起来的边缘计算硬件,具有强大的处理能力,可支持 GPU 加速的人工智能计算,因此构建开放体系的通用边缘硬件架构的激光视觉测量系统将是未来的一个趋势。对于高性能边缘计算激光视觉测量系统,也需要具有灵活开放的激光控制器来控制激光发射功率。

针对短距离激光视觉测量,设计了基于 32 bit ARM 处理器的微小功率激光控制器,ARM 处理器型号为 STM32F103C8T6。控制器输出 PWM 调制信

号。然后使用低通滤波电路将数字信号转换成 0~3 V 模拟电压信号,然后使用运放电路进行阻抗变换和电压调整,最终通过压控恒流电路驱动激光二极管。为了和工控系统兼容,主机和激光控制器之间设计了支持串口 485/232 的 Modbus 通讯协议控制接口,主机能够下发 PWM 占空比、频率等参数给激光控制器。

1 小功率半导体激光管发光元件特性分析

工业制造的激光视觉测量系统激光器使用 50 mW 以下的激光管(LD),激光管的中心波长有 405、540、635、650、808、940 nm 等。因为 650 nm 激光管红光发光束稳定性好,对于图像传感器波长感光效率较高,因此在很多应用中 650 nm 红光是常见的波长,例如 ROHM 罗姆公司提供红光 650 nm 的激光管^[10],对于追求测量精度的应用,激光波长可以选择 405 nm。**图 1**是 ROHM 公司的 RLD65MZT7 型号激光二极管特性和引脚定义^[10],阈值电流在 20 mA,工作电压在 2.3~2.6 V 之间,最大电流 70 mA,**图 1(a)**元件的 3 脚



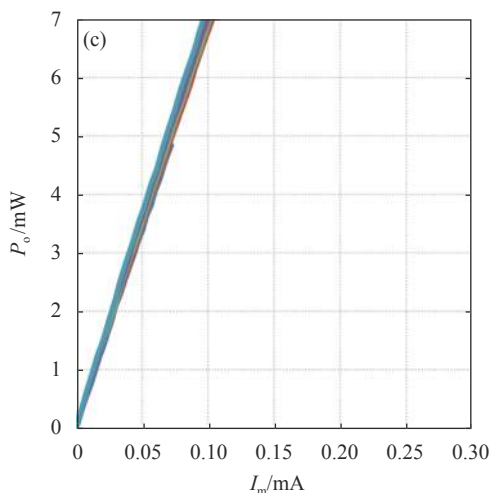


图 1 激光二极管特性定义。(a) 激光二极管器件引脚定义; (b) LD 的 $V-I$ 特性; (c) PD 的电气特性

Fig.1 The laser diode electrical feature definition. (a) Laser diode pin map; (b) $V-I$ feature of LD; (c) Electrical feature of PD

是低电位公共端, 1 脚是发光管 LD 阳极, 2 脚是激光器内部光敏二极管 PD 的阳极。当在二极管 1、3 之间加载正常工作电压时候, 激光二极管产生光输出, 光敏二极管 PD 产生感应光电流, 光电流大小从 0~0.5 mA 之间, 在 4 mW 输出时候光电流大约是 0.05 mA。图 1(b) 和 (c) 分别是发光二极管和光敏 PD 的电流功率关系图。

激光二极管器件对静电敏感、输出和温度关系很大, 瞬态的电流、电压尖峰脉冲, 过流过压都有可能损坏器件^[8-9], 因此驱动电路要有专用的保护电路, 控制方式有恒功率控制 APC 和恒流控制 ACC^[7-8], 实际上无论 APC 还是 ACC 控制都是控制激光二极管的电流。文中设计了激光电流驱动电路, 在主机激光图像处理端使用图像算法检测激光图像亮度, 和正常的亮度进行比较, 然后控制激光器的输出, 从而形成了二次大闭环控制。

2 激光控制器结构设计

激光控制器的系统架构如图 2 所示, 核心处理器使用意法半导体公司的 ARM 内核 Cortex M3 的 STM32F103 微处理器^[11], 输入 8M 的外部时钟, 经过内部所相环后, 系统主频设定在 72 MHz。STM32F103 控制外设的 IO 接口大部分兼容 3.3 V 和 5 V, 低功耗和安全性能良好。如图 2 所示, 控制器和上位机之间使用串行总线 RS485/232 通讯, 这是考虑到工业环境的信号可靠性。控制器外部供电采用两级供电的方式, 首先使用 12 V 转 5 V 的 DC-DC 开关电源, 然后使用 LDO 电源模块将 5 V 转换到 3.3 V, 以便提供高供电效率和低纹波的电源。STM32F103 处理器通过定时器模块输出 PWM 信号^[11]到低通滤波器, 低通滤

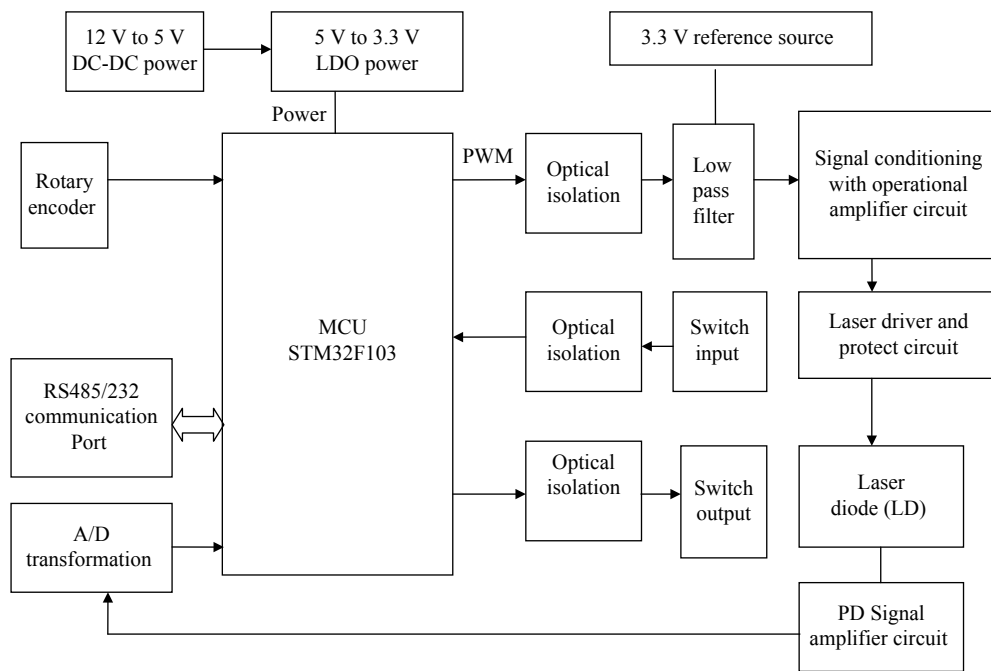


图 2 激光结构光源控制器系统架构图

Fig.2 Architecture diagram of laser structure light controller

波器将方波信号转换成电压模拟信号,然后使用有源运放电路对电压模拟信号进行输入和输出阻抗变换和电平转换,最后输出 0.2~1.2 V 电压控制一个压控电流源驱动激光二极管。激光二极管器件内部封装了一个光电二极管 PD,光电二极管的光电流经过放大后使用 STM32F103 处理器的 AD 转换器转换成数字量。因为控制板用于视觉图像扫描控制系统,控制板上具有编码器采集和开关量输入和输出功能。

3 激光控制器控制驱动电路设计

激光控制的物理实现需要使用模拟信号,而 STM32 单片控制器输出的信号是数字信号,有些型号的 STM32 控制器有 DA 功能,但芯片的成本比较贵,贴片焊接工艺也比较复杂。文中控制器使用了 PWM (脉冲宽度调制) 数模转换 D/A^[12] 方式进行数字到模拟量的转换,通过改变 IO 输出的脉冲的宽度可以控制输出电压的高低和电流的大小。以下是详细介绍如何使用 PWM 技术控制激光器的输出。

3.1 PWM 信号生成

控制器使用 STM32 的高级定时器 TIM1 控制 PWM 的输出, TIM1 使用和系统主频一样的 APB2 总线 (最高 72 MHz), TIM1 具有运动编码器捕获功能,

可以生成 4 个不同占空比 PWM 输出。TIM1 的 PWM 信号由预分频 TIM1_PSC 寄存器、自动加载寄存器 TIM1_ARR、捕获/比较寄存器 TIM1_CCRx 控制,其产生的原理如图 3 所示。首先根据 TIM1_PSC 寄存器对系统内部时钟 (默认 72MHz) 或者 ETR 引脚输入的时钟信号进行预分频,分频后的时钟即为 TIM1 的基准时钟, TIM1 的计数器 TIM1_CNT 在基准时钟的驱动下进行计数, TIM1_CNT 内计数值始终在和 TIM1_CCRx 进行比较,当 TIM1_CNT < TIM1_CCRx 时候 PWM 参考信号 OCxREF 为高,否则低, OCxREF 信号在输出控制设置下将分别通过硬件的 Oc_x 和 Oc_{xN} 引脚输出。当计数值达到 TIM1_ARR 值时, TIM1_CNT 重新设置成初始值。以上陈述中 x 代表 1, 2, 3, 4 数值, 分别代表一个通道。图 3 中 DTG 寄存器用于产生死区设置,在驱动互补功率 MOS 管器件时,为了避免串联的 MOS 管同时导通,需要设置死区。文中激光控制器 DTG 寄存器设置成 0 即可。使用刹车输入时,可以迅速停止 PWM 输出。

TIM1 定时器的 PWM 信号的生成基频和脉冲占空比计算如公式 (1) 和 (2) 所示,式中 ARR 是 TIM1_ARR 寄存器的值。fCLK 是硬件内部时钟频率,对于 STM32F103 硬件, fCLK 是 72 MHz。TIM1_PSC 是预

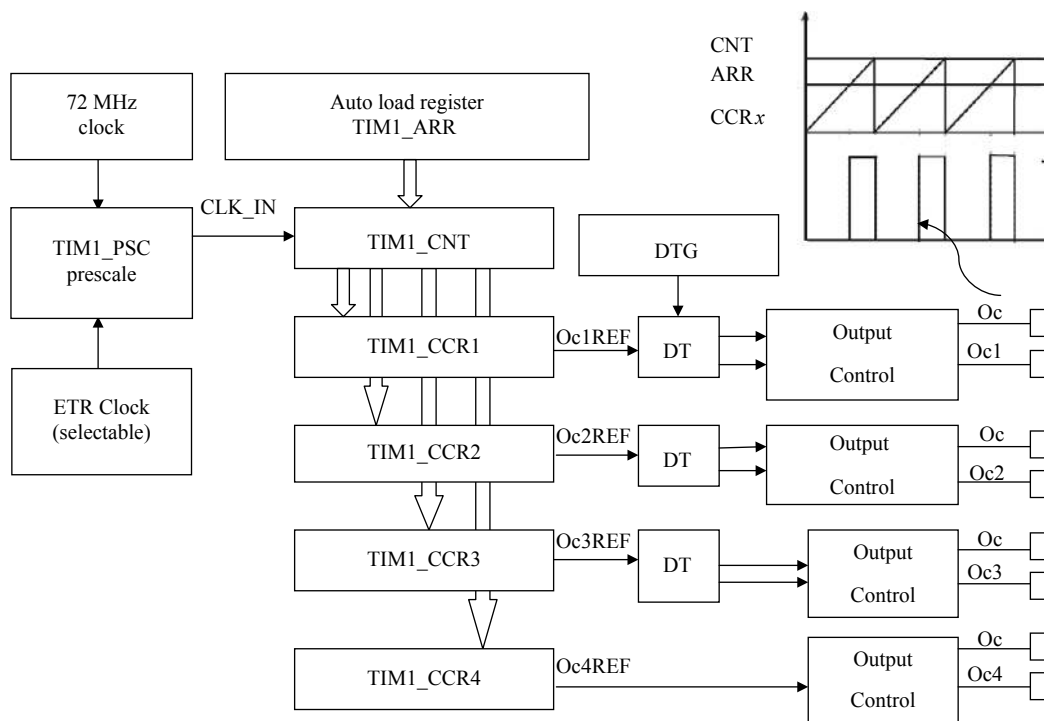


图 3 STM32 控制器高级定时器 TIM1 的 4 通道 PWM 信号输出工作原理图

Fig.3 Diagram of four PWM signals principle with STM32 MCU advanced timer TIM1

分频系数,存储在预分频寄存器中。TIM1_CCRx (x=1, 2, 3, 4) 是捕获/比较寄存器, TIM1 的四个通道的每个通道都有一个捕获/比较寄存器,因此可以同时设置四个不同占空比的 PWM 输出,但是每个 PWM 输出的基频仍然保持相同。公式 (1) 中 fb 是 PWM 基频,公式 (2) 中 ratio 为占空比数值。

$$fb = fCLK / ((ARR + 1) \times (TIM1_PSC + 1)) \quad (1)$$

$$ratio = TIM1_CCRx / (ARR + 1) \quad (2)$$

例如若生成一个 PWM 信号,其参数为基频 50 KHz,占空比 0.25。因为系统主频为 72 MHz, TIM1_PSC 可设置为 1, TIM1 的输入频率变为 36 MHz, TIM1_ARR 寄存器写入 719 数值, TIM1_CCRx 写入 90 数值,然后

设置 TIM1 时钟使能和控制输出使能,输出 50 KHz 的 PWM 方波,分辨率可以达到 0.13%。

3.2 激光 PWM 模拟驱动电路设计

由图 1(b) 的半导体激光二极管特性曲线可见,激光二极管本质上是一个电流驱动型器件,无论是 APC 控制还是 ACC 控制均需要控制激光二极管流经的电流。文中使用了电压/电流 (V-I) 转换器电路实现激光二极管的电流控制,驱动电路如图 4 所示。激光二极管流经电流的控制电压由数字信号 PWM 转换而来, PWM 信号不能直接驱动激光二极管,必须通过数模转换 DA^[12] 电路转换成模拟电压信号,才能控制激光二极管的电流的强度。

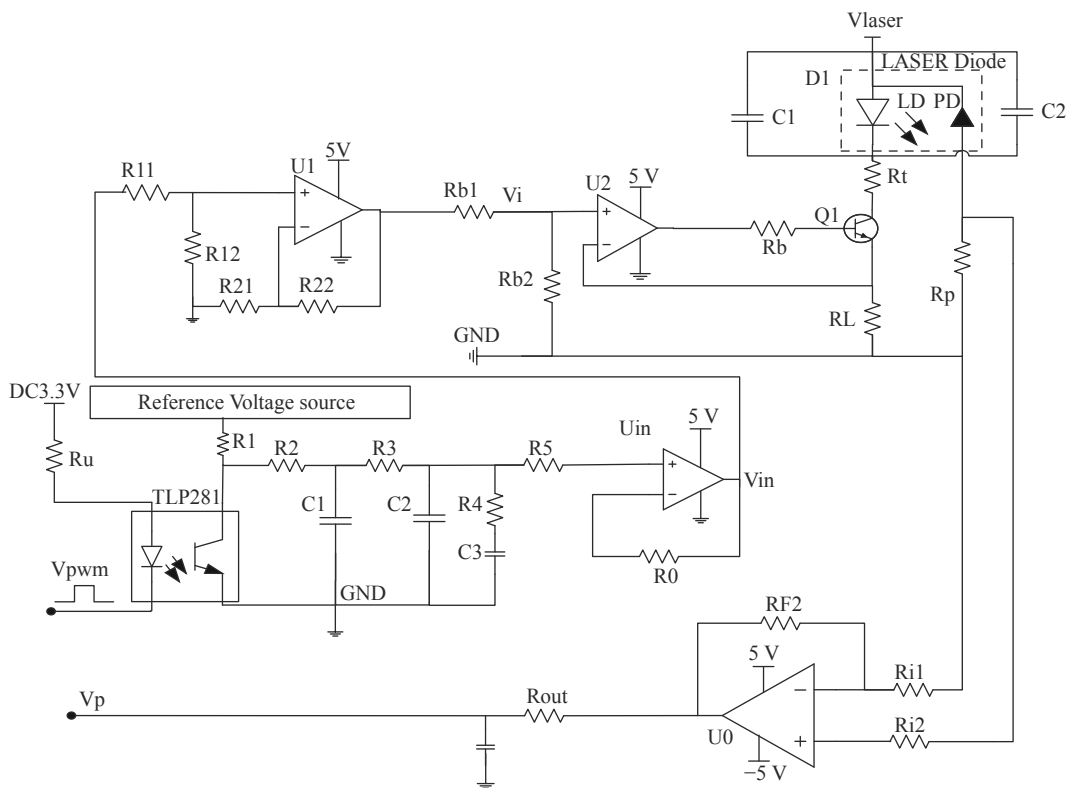


图 4 STM32 处理器的 PWM 信号驱动激光二极管电路图

Fig.4 Laser diode driver circuit diagram of by PWM signal of STM32

3.2.1 PWM 信号模拟转换电路设计

根据傅里叶信号分析理论, PWM 方波信号可以转换成一个直流分量和一系列余弦波的累加和,如公式 (3) 和 (4) 所示^[13]。PWM 信号的参数如图 5 所示,其中 T 是周期时间, PWM 基频为 $f=1/T$, 占空比 $k = t_1 / (t_1 + t_2)$ 。从公式 (3) 可以看出根据 PWM 信号的基频设计一个低通滤波器,使得高频成分衰减到一个合适的水平,即可获得和占空比 k 相关的直流模拟

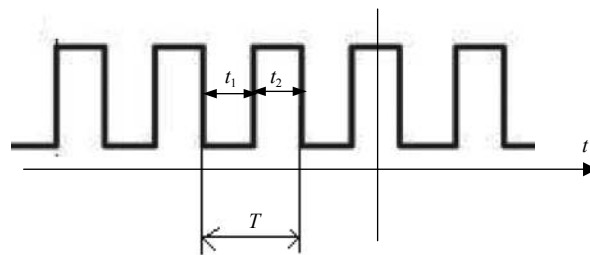


图 5 PWM 脉冲方波示意图

Fig.5 PWM pulse wave parameters diagram

电压输出。

$$f(t) = Ak + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} (\sin(n\pi k)) \right] \cos n\omega t \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} (\sin(n\pi k)) \right] \cos n\omega t \quad (4)$$

根据上面 PWM 信号的傅里叶分析理论, 控制器使用了如图 4 所示的激光二极管数字控制和驱动电路。图 4 中 Vpwm 是处理器输出的数字 PWM 信号, DC3.3V 是 CPU 的 3.3 V 供电电压, 使用光耦 TLP281 隔离数字 PWM 信号和模拟驱动电路。电阻 R2、R3 和电容 C1、C2 构成一个二阶低通阻容滤波网络, 用于将光耦次级输出转换成直流电压, 光耦供电使用基准电压源 REF3033 供电, 尽量减少电源的波动对数模转换的影响, 电阻 R4 和 C3 是补偿环节。运放 Uin 用作电压跟随器, 用于连接低通滤波器前级电路和后级电压调整电路, 避免前后级干扰。后级运放 U1、U2 调整输入电压电位, 与 Q1 组成了一个 V-I 变换电路, 即压控恒流源。电阻 R11、R12 和 Rb1、Rb2 两级分压用于控制电压调整。U2、Uin 和 U1 都是采用单相 5 V 电压供电的 LM358 运算放大器。激光主电路在激光二极管两端并联 100 μF 电容和 0.1 μF 电容, 用于激光二极管软启动和过滤掉高频尖峰电涌。PD 光电二极管由于和 LD 共阴极连接, 因此在阳极输出端连接采样电阻 Rp 到地端。高精度运放 U0 用于放大 Rp 端的采样电压, 反馈电阻 Rp 取 1 kΩ 阻值。

激光控制器的处理器后端电路中使用低通滤波阻容网络转换 PWM 信号, 阻容器件参数的选择对于动态性能和精度十分重要。对于二阶低通电路, 传递函数如公式 (5) 所示, 对数幅频特性公式如公式 (6) 和 (7) 所示, A_u 是滤波器增益, 和频率有关。根据 DA 转换的精度要求, 动态参数选择和合适的滤波器参数。例如按照公式 (3), 如果实现 8 bit 的数模转换 DAC 精度, 相对误差为 $1/256=0.0039$, 而高次谐波系数是 A/π , PWM 的一次谐波幅度至少衰减到原始幅度的 0.0061 ($0.0039\pi/2$), 也就是 -44.2 dB。设定 PWM 基频为 28.8 kHz 以上, 十倍频幅度衰减经过幅频公式计算为 -50.4 dB, 小于 -44.2 dB, 则可满足 8 bits 的转换精度, 这个频率对应的特征频率为 $f_0(f_b/10)=2.8$ kHz, 低通滤波器通带截止频率为 $f_c=0.37f_0=1.03$ kHz。根据传递函数即可计算出滤波器网络的电阻和电容参数。

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{R^2 C^2 S^2 + +3S RC + 1} \quad (5)$$

$$A_u \approx 20 \lg \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + 9\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (6)$$

否则 $f \gg f_0$
 $A_u \approx -40 \lg \frac{f}{f_0} \quad (7)$

4 固件和上位机通讯程序设计

激光控制器和上位机之间使用 Modbus 协议进行通讯, Modbus 协议通过数据之间的时间判断一个数据单元是否属于同一帧数据。Modbus 协议检测的规则是当接收到当前数据字符和上一个数据字符之间时间间隔大于 3.5 个字符通讯时间长度, 则当前数据字符可作为一个新的数据帧的开始, 而在同一个数据帧内字符时间间隔小于 1.5 个字符时间。控制器根据 Modbus 帧时间特性使用 STM32 的通用定时器 TIM3 进行时间计数, TIM3 计数值初值为零。每接收到一个数据字符, 重置 TIM3, 计数值清零, 当 TIM3 计数值等于 3.5 个字节的接收时间计数值时, 进入定时器 TIM3 的中断服务程序, 在 TIM3 的中断服务程序内设置“帧有效”(Frame_flag) 标志。

5 实验和验证

系统通过上位机软件发送占空比参数和 PWM 频率控制值到激光控制器硬件, 占空比改变 2.35% 到 85%, 使用 mA 电流表和电压表测量激光器流经的电流和两端电压。测量的数值如表 1 所示。控制器硬件设置 PWM 输出的基频为 72 kHz, 串口通讯速率设置为 115200 bps, 上位机下发给控制器 PWM 占空比寄存器数值从 0 到 4096, 折合成占空比 0% 到 99.97%, 分辨率为 1/4000。在占空比 50% 附近系统的线性度最好。

图 6 是占空比和激光输出电流之间数据曲线, 本控制器可以线性的调节小功率激光二极管的输出, 重复精度可以达到 0.1 mA。LD 输出激光经过光学整形后, 输出激光线结构光, 图 7(a) 和 (c) 是光滑白板纸包装盒的 46.29% 和 75.59% 时的激光线图像, 电流分别是 21.43 mA 和 55.9 mA, 他们水平截面的像素灰度曲

线 (无单位) 如图 7(b) 和 (d) 所示。随着激光输出电流增大时, 激光线的宽度和散射噪声加大; 当材料表面材质不一样时候, 相同强度输出的激光实际成像的

效果不相同, 测量系统中不可控的激光图像会影响到后续的图像处理算法的精度, 对于精密激光测量, 光

表 1 PWM 占空比激光二极管输出数据

Tab.1 Output V-I data of different PWM ratios

PWM ratio	Laser diode work parameters	
	Voltage/V	Current/mA
36.52%	2.084	14.82
41.40%	2.128	17.82
46.29%	2.18	21.43
51.17%	2.23	25.56
56.05%	2.29	30.16
58.49%	2.32	32.7
63.37%	2.38	38.29
65.82%	2.42	41.3
70.70%	2.49	48.1
75.59%	2.58	55.9
80.46%	2.66	65.1

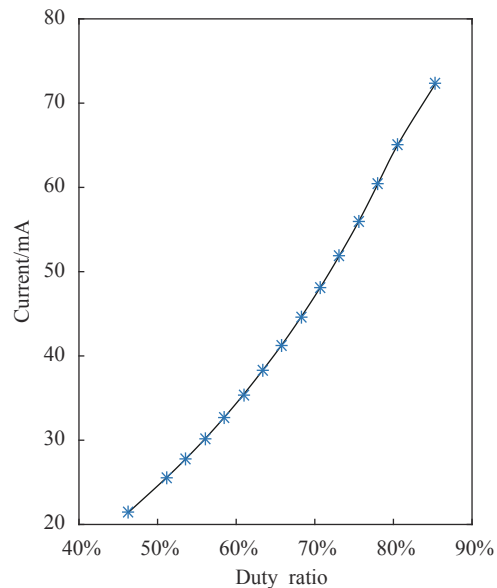


图 6 激光二极管占空比和电流之间的数据曲线

Fig.6 Laser diode relationship curve of PWM ratio and circuit current

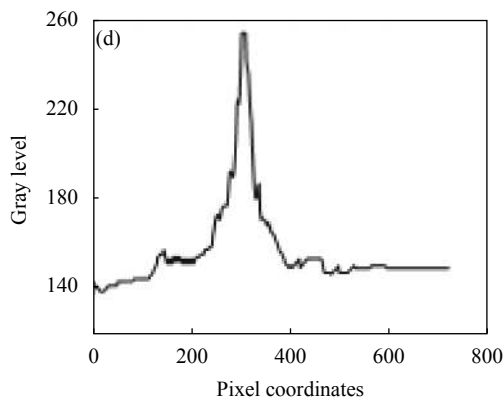
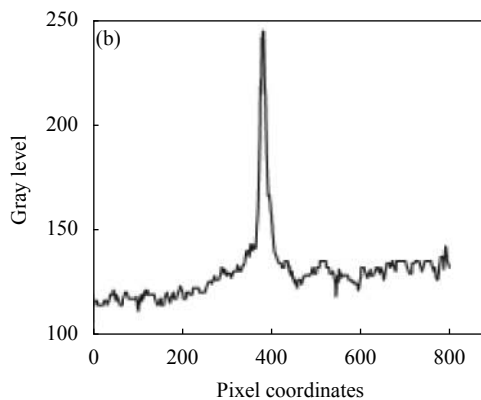
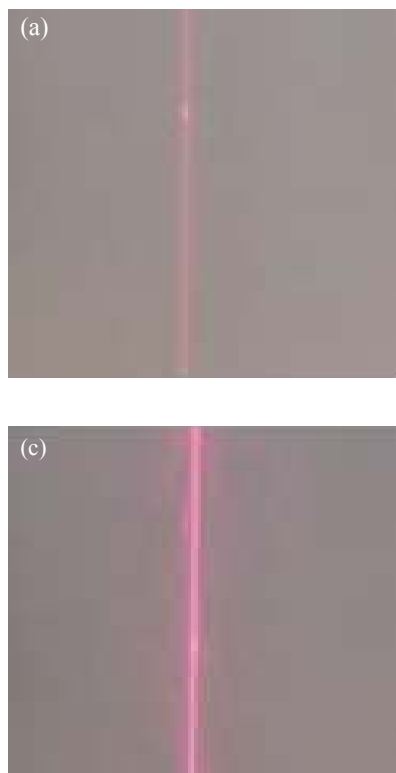


图 7 不同 PWM 占空比激光器输出测试图。(a) 46.29% 占空比, 电流 21.43 mA 包装盒激光图; (b) 21.43 mA 激光图像灰度水平截面图; (c) 75.59% 占空比, 电流 55.9 mA 包装盒激光图像; (d) 55.9 mA 激光图像灰度水平截面图

Fig.7 Laser images analysis data diagrams of different PWM ratio laser output. (a) Image of 46.29% ratio, 21.43 mA laser current; (b) Gray horizontal distribution chart of (a); (c) Image of 75.59% ratio, 55.9 mA laser current; (d) Gray horizontal distribution chart of (b)

斑中心如果跳动 1 个像素,都会影响到激光测量的准确度。图 7 中的光强测试采用 CMOS 成像传感器实现。

图 8(a) 和 (b) 是激光控制器控制激光输出在 21 mA 和 55 mA 两种状态下,激光线投影到两种塑胶材质混

合的物体上图像,物体中间是吸光强的黑色塑胶,两边是浅色的塑胶。图 8(a) 和 (b) 经过实验光斑分割阈值分别设置灰度值 20 和 40 可将激光图像分割出来。可见低电流状态的分割阈值已经接近背景灰度,激光光斑特征漏检率很大。为了检验不同输出电流时候的激光图像的测量误差,使用一个包装盒平面进行验证,图 8(c) 和 (d) 是包装盒图像,图 8(e) 和 (f) 是 (c) 和 (d) 的误差统计数据,其中 Serials1 和 Serials2 数据分别是 21 mA 和 55 mA 的激光投影图像处理数据。根据图 8(e) 的数据图的 Serials1 所示,当较弱的激光输出时候,检测出来的激光光斑有效点数目随着分割阈值的变化发生显著变化;而当较强的激光输出时候,可检测出来的激光光斑有效点数目随着分割阈值的变化较小,这样当激光图像的处理稳定较好。图 8(f) 则显示两种强度激光投影的光斑点随机误差情况,虚线是 55 mA 的激光图像,均方差为 0.382 像素;实线是 21 mA 的激光图像,均方差为 0.138 像素。对于小电流输出的激光投影图像 (s1) 误差一般情况下远小于大电流的误差。图 8(e) 和 (f) 误差计算采用自上而下检测到的每一个光斑中心坐标到拟合直线的像素距离计算。综合以上情况,当需要系统稳定工作,需要提高激光器的输出电流,但会带来随机误差增大的问题。因此实际测量过程需要均衡稳定性和测量精度要求,设置激光器在一个合适的工作点。

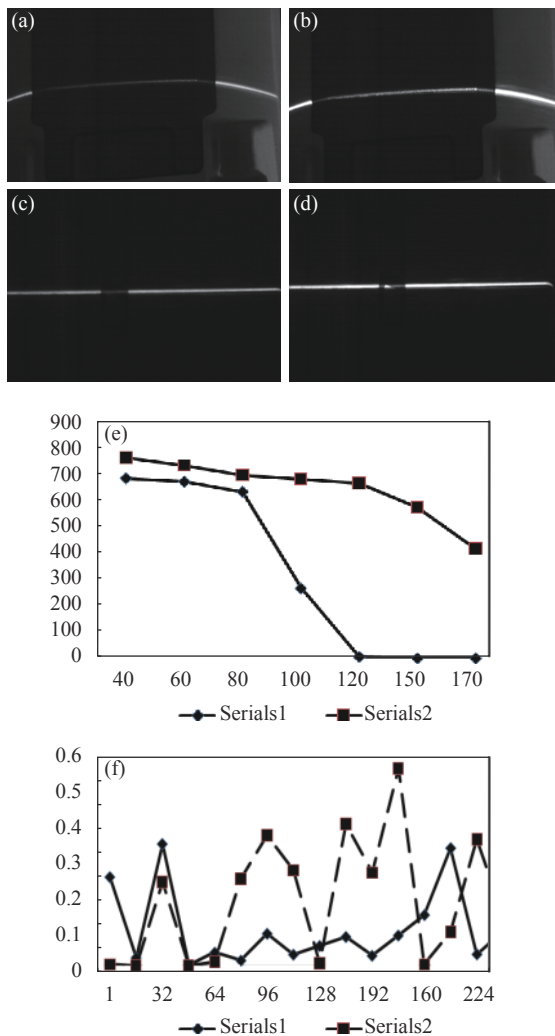


图 8 激光控制器的成像系统成像实验和分析。(a) 异种塑胶材质表面激光投影图像 (21 mA); (b) 异种塑胶材质表面激光投影图像 (55 mA); (c) 包装盒平面激光投影图像 (21 mA); (d) 包装盒平面激光投影图像 (55 mA); (e) 激光光斑有效点数目 (Serials1 表示 (c) 点数, Serials2 表示 (d) 点数) (f) 激光随机测量误差 (Serials1 和 Serials2 分别代表 (c) 和 (d) 误差)

Fig.8 Diagrams of imaging analysis for laser controller. (a) Hybrid material surface laser projection image (21 mA); (b) Hybrid material surface laser projection image (55 mA); (c) Package platform laser projection image (21 mA); (d) Package platform laser projection image (55 mA); (e) Light spot number (Serials1 is (c), and Serials2 is (d) Laser Images) (f) Measurement error ((Serials1 , Serials2 is the error of (c) , (d))

6 结 论

针对实际应用中在不同被测物体的激光结构光成像不一致问题,如果仅仅改变光学成像传感器的曝光和增益等参数,会带来背景噪声增大的不利影响,因此提出了使用主机控制嵌入式硬件调节微小功率半导体激光器的控制方法和装置,即主机下发命令给激光控制器,控制器的 STM32F103 处理器输出 PWM 数字信号,然后将通过低通滤波电路进行 DA 转换,将数字 PWM 信号转换模拟电压,最终通过压控恒流源 ($V-I$) 电路驱动激光器。激光控制器系统从视觉测量的要求出发,使用通用元器件搭建,避免使用昂贵的专用器件,具有成本低,元器件易于采购,功耗低的优点,可以通过上位机软件高分辨连续控制激光的输出,从而和视觉测量软件无缝连接,使用方便灵活。经过实验验证,系统稳定可靠,可以长时间工作。

为了保证上位机和下位机连接的可靠性,文中使用了串口通讯技术,未来可以在数字控制器上加装物联网远程通讯模块,实现测量系统的远程控制,使得系统更加柔性化。

参考文献:

- [1] Song Xiaofeng, Li Jupeng, Chen Houjin. Laser centerline extraction method for 3D measurement of structured light in multi-scenarios [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0113004. (in Chinese)
- [2] Feng Ping, Liu Zhen. Automatic localization method of the multi-planar strip in rudder angle measurement [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(6): 911-916. (in Chinese)
- [3] Qiu Zhicheng, Xiao Jun. New calibration method of line structured light vision system and application for vibration measurement and control [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 55-65. (in Chinese)
- [4] Zhu Xiang, Shao Shuangyun, Song Zhijun. A detection method based on line-structured light sensor for geometrical morphology of track slab [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2018, 11(5): 841-850. (in Chinese)
- [5] He Wen. Reseach on the extraction accuracy of laser stripe center in light saturation and at the edge of the object[D]. Shaanxi: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [6] Zhang Zonghua, Yu Jin, Gao Nan, et al. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303006. (in Chinese)
- [7] Zhong Qirun, Jiang Haiming, Dai Junke, et al. Development situations of semiconductor laser controllers [J]. *Optical Communication Technology*, 2016(5): 52-54. (in Chinese)
- [8] Cong Menglong, Li Li, Cui Yansong, et al. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1629-1636. (in Chinese)
- [9] Fu Yanjun, Zhou Wendong, Xiao Huirong, et al. Optic power control of LD drive circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 626-630. (in Chinese)
- [10] ROHM. 650nm red single mode laser diode RLD65MZT7 datasheet[EB/OL]. <https://www.rohm.com/>, 2019.5-Rev.009.
- [11] Wang Ziquan. PWM dimmer based on STM32 [J]. *Electrical Automation*, 2018, 40(6): 98-100. (in Chinese)
- [12] Hu Qingbo, Lv Zhenggu. Realization of D/A digital signal processor [J]. *Power Supply Technologies and Applications*, 2004, 7(3): 157-159. (in Chinese)
- [13] Zhang Chengjiao, Xie Shaowei. Fourier series analysis and Matlab simulation of PWM signal [J]. *Automation & Instrumentation*, 2016(10): 185-196. (in Chinese)



第一作者简介: 王晓东 (1976-), 男, 高级工程师, 博士。本科和硕士分别毕业于河北工业大学和天津大学, 2005 年 9 月获天津大学光学工程博士学位。2005 年 11 月-2007 年 12 月在深圳大学光电所从事 3D 视觉方面的博士后研究工作, 2008 年起分别在德昌电机有限公司, 华为技术有限公司和恒科通机器人公司从事自动化视觉检测的研发工作。2019 年 9 月起, 在唐山学院计算机系物联网工程专业从事教学和科研工作。Email: wxdsu123456@163.com



通讯作者简介: 胡松钰 (1984-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士。本科和硕士分别毕业于山东大学和浙江大学, 2011 年 10 月获香港城市大学制造工程与工程管理博士学位。2011 年 12 月起, 在华为技术有限公司 2012 实验室任研发工程师, 后在深圳大学先后担任讲师和副研究员。2019 年 6 月起, 在浙江大学机械工程学院与浙江大学工程师学院任教。主要研究兴趣包括机器人、视觉与力觉的智能传感等。Email: syhu166@zju.edu.cn