

基于光纤激光的高精度三维视觉测量技术

洪梓铭,艾青松,陈 昆

(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 随着现代数字制造技术的快速发展,在工业产品测量领域,对微型物体几何尺寸的测量需要满足非接触、高精度、多尺寸等需求,而现有测量技术还不能达到这些要求。为了实现多尺寸、高效、快速、非接触式的精确测量,文中利用光纤耦合激光器光束质量好、线宽超细、精度高、单色性好、体积小以及免调节等优势,研制了基于光纤激光的精密非接触测量系统,提出了一种基于光纤耦合激光的超精密视觉测量方法,主要包含基于光纤线激光的目标成像、激光线滤波与提取、测量模型建立及几何参数标定、数据转换和三维重建测量等关键技术。利用光纤激光器向测量物体表面连续发射激光线,采用高分辨率相机,通过照明/不照明两次成像技术获取物体的平面尺寸和高度信息。对激光线图像进行滤波校正,快速提取激光线,对几何参数进行标定和坐标转换,然后进行处理数据,获取物体测量部位的三维测量值。实物测量和对比实验验证了文中测量方法的准确性、快速性和有效性,测量精度可达微米级。为微型物体几何尺寸的三维非接触、高精度、多尺寸测量提供了有效方法和测量仪器。

关键词: 光纤激光; 微型物体; 非接触; 超精密测量

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0803011

High precise 3D visual measurement based on fiber laser

Hong Ziming, Ai Qingsong, Chen Kun

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

Abstract: With the rapid development of modern digital manufacturing technology, in the field of industrial product measurement, the measurement of the geometric dimensions of objects need some requirements, such as non-contact, high-precision, multiple sizes, high-volume, etc. The existing measurement technologies cannot meet these requirements. In order to achieve multiple sizes, high-efficiency, rapid, and non-contact precise measurement, fiber-coupled lasers with the advantages of good beam quality, ultra-fine line width, high precision, good monochromaticity, small size, convenient using, no adjustment, maintenance-free and high stability were used to develop a precision non-contact measurement system based on fiber lasers. A high-precision measurement method based on fiber-coupled lasers was proposed, which mainly included object imaging based on fiber-optic line laser, bilateral filtering and extraction of laser line, mathematical relationship establishment of measurement model, geometric parameter calibration, data conversion and 3D reconstruction and other key technologies. The fiber laser continuously emitted laser line to the object, adopted a high-resolution camera, and

收稿日期:2018-04-11; 修订日期:2018-05-12

基金项目:国家自然科学基金(61305039)

作者简介:洪梓铭(1997-)男,本科生,主要从事电子信息方面的研究。Email: hzzzzmmmmm@whut.edu.cn

导师简介:艾青松(1981-)男,教授,博士生导师,主要从事电子信息方面的研究。Email: qingsongai@whut.edu.cn

photographed the laser line image of the object through two imaging techniques of illumination/non-illumination to acquire 2D plane size and height information of the object. The laser line image was filtered and corrected, the laser line was quickly extracted, the geometric parameters were calibrated and the coordinate transformation was performed, and then the processing data was processed to obtain the measurement value of the measurement parts of the object. A large number of object measurements and comparative experiments were carried out to verify the validity and accuracy of the measurement system and measurement method. The measurement accuracy can reach micron level. It provides an efficient method and measurement equipment for the three-dimensional high-precision non-contact measurement of industrial products.

Key words: fiber laser; micro-object; non-contact; ultra-precise measurement

0 引言

目前微型物体的外形及外形数据的精确获取成为测量领域的重要研究方向^[1]。如何快速、高精度地获取物体三维表面数据,特别是不规则自由曲面、形体的三维测量,已成为现代工业发展中亟待解决的难题^[2]。光纤激光器无论对于工业应用还是基础科学研究,都起到了重要的推动作用,近年来,光纤激光器发展有很大突破^[3],光纤激光器应用于显微镜成像领域,光纤激光显微成像应用取得了一些具有创新意义的成果^[4]。光纤激光器精度高、单色性好、使用方便,能更好地满足微型物体的视觉测量需求。光纤激光技术精密测量取得了一系列重要成果^[5],三维激光扫描非接触测量技术备受关注^[6-7]。与传统测量技术相比,该技术在非接触物体的前提下,能够快速获得物体的三维结构信息,实现无接触精确测量^[8]。精密测量技术在制造业和精密仪器等行业中的作用越来越重要。随着制造业精密程度的发展,对精密测量技术要求越来越高。微机电系统技术的兴起与发展,人们对微观世界探索的不断深入,测量对象尺寸越来越小,微机电系统装配与集成、集成电路制造与精密加工,达到了微米和亚微米量级^[9],尺寸测量进入超精密测量阶段^[10]。超精密测量技术已经成为衡量国家高新技术发展水平的重要标志。测量行业迎来了新技术的挑战。精密测量技术向着非接触、高精度、高灵敏度、多尺寸、大量程、同步同时、多批量等方向发展^[11]。

早期的测量仪器和工具以物体表面接触为主,典型的接触式三维重建测量工具是三坐标测量机^[7],

三坐标测量机目前仍然是工厂的标准立体测量装备,通常配备复杂的转轴、连杆和弹簧,测量精度受机械装置的限制。以模拟电路和机械传感为基础的测量仪通过探针运动来获得物体表面信号,如电容式测微仪、电感式测微仪、光栅尺位移传感器等,这些测量手段多用于被测物体上某一采样点的高度测量,测量效率低下。接触式测量存在许多缺点,受物体形状制约,测量区域有限,需接触待测目标,易划伤表面;测量速度慢,效率低;测量非刚体可能因接触使表面变形,导致测量数据不准^[6]。

以光学技术为特征的非接触式测量已开始出现和应用于工业生产之中。非接触式测量可以分为主动式和被动式两种情况^[6]。目前国内外较为常用的非接触式测量方法有全息干涉法^[12]、双目体视法^[13-14]、激光三角测量法^[15]等。全息干涉法是利用全息照相获得物体形变前后光波波阵面相互干涉所产生的干涉条纹图来得到物体的三维信息,优点是精度比较高,但测量数据冗余,难以计算三维信息,效率低^[15],噪声极大影响了条纹可见度和分辨率。双目体视法通过双目感知距离来实现对物体轮廓的测量,适应性强,但计算量大,测量误差较大^[14]。激光三角测量法是常用的测量技术,激光光束投射在平面镜上,被平面镜反射后,通过物镜在 CCD 上形成点光斑,点光斑在 CCD 上的成像位置也在变化,通过计算 CCD 上点光斑位置进行计算,张劲峰等提出一种多光斑激光三角法^[10]。光谱共焦技术的测量精度很高,可达纳米级,但目前只能做到点测量、小量程,由于受硬件条件制约,光谱共焦技术很难做到多尺寸、大量程、同步同时、批量测量,对弯曲部分的尺寸测量也难以完成^[9]。

针对现有测量技术存在测量精度不高、量程小、单点测量、效率低等问题^[6],研制了基于光纤耦合激光器的视觉测量系统,利用光纤激光光线宽超细、光子能量集中,精度高、单色性好、体积小、使用方便等优势^[16]及图像分析方法解决上述问题。建立视觉测量模型,将视觉测量值转换为物体的实际测量值,实现微型物体的非接触、高精度、多尺寸的三维精密测量。

1 基于光纤激光投影的视觉测量原理

在实际测量过程中,根据精度需求、环境约束等各方面情况,综合考虑制定合适的测量方案。研制的 3D 视觉测量系统主要由运动平台、激光线发射和视觉成像三部分构成。视觉测量系统对激光功率要求不高,对激光光线宽要求越精细越好。光纤激光器 Z-FIBER 系列能够满足微型物体精密测量需求,且 Z-FIBER 激光器可以有效地通过通信接口(RS-232 & I2C)集成到复杂的机器视觉装置中,投影质量优于可用的自由空间激光器。相比于自由空间激光器,光纤激光器的谐振腔内无光学镜片,具有免调节、免维护、高稳定性等优势,能更好地满足微型测量需求。Z-FIBER 系列的单模线型光纤激光器配备光纤耦合激光系统 ZFSM,ZFSM 系统通过一根带有电控功能的光纤,将光学器件和激光源分离开, ZFSM 能形成 3~4 μm 的有强度峰值的圆形高斯光斑。相比于激光二极管直接输出的光束质量($M^2 \sim 1.05$)和几何发射角,光纤输出的光学性能更有优势,速度快,精度高,极细线激光可达 5 μm,亮度可调,聚焦可调。可选波长有 450 nm (蓝),520 nm (绿),635~685 nm (红),785~830 nm(近红外)等,工作距离小于 150 mm,输出光束形状为一字线型,线宽为 5~13 μm,激光光线宽与工作距离成正比,见图 1。该测量系统采用蓝色激光光源,中心波长为 450 nm,不确定度为 10 nm,中心波长漂移小于 1 nm,该光谱中心波长短、频率高、单色性好、光子能量集中、具有最细线宽,见图1。高斯光束经过棱镜扩束后形成具有一定宽度的激光条纹,光条纹随物体表面的深度的变化而发生改变,从变化的弯曲光条纹中可获得物体表面的三维高度信息^[17-18]。

研制的测量系统采用了型号为 FL2-20S4C CCD 像机,分辨率为 1 624×1 224,运动平台采用三

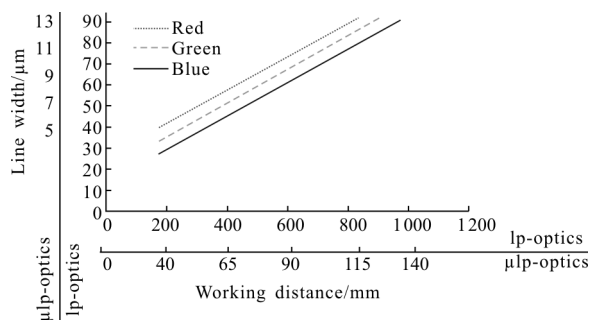


图 1 Z-FIBER 光纤耦合激光光线宽与工作距离关系
Fig.1 Line width vs working distance in Z-FIBER fiber-coupled laser

轴直线电机,X轴电机 Y轴电机带动机台 XY 平面运动,Z轴电机带动相机垂直于机台方向运动,光栅尺精度为 0.5 μm。测量原理如图 2 所示。

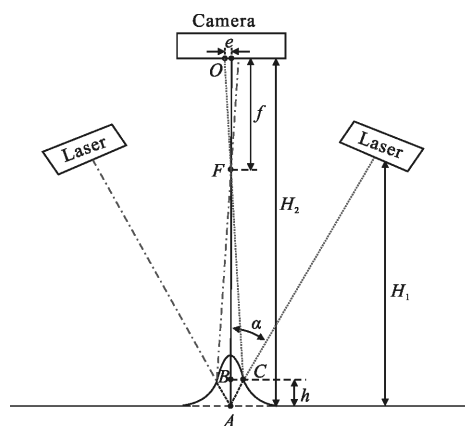


图 2 测量原理

Fig.2 Measuring principle

在图 2 中, H_2 为相机到基准面的高度差, f 为焦距, α 为激光发射线与基准面法线的夹角。 h 为物体上测点的高度, h 的正方向设为基准面向上。 e 为测点在 CCD 相面的投影位置与基准点的投影位置的像素偏差。从图 2 可以得到:

$$h=BC/\tan\alpha \quad (1)$$

$$BF=H_2-f-h \quad (2)$$

$$BC/BF=e/f \quad (3)$$

将公式(2)代入公式(3)中,可得到:

$$BC=e(H_2-f-h)/f \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(1)中,可得到:

$$h=e(H_2-f)/(f\tan\alpha+e) \quad (5)$$

式中: e 一般为微米量级;焦距 f 为厘米量级,数量级

相差较大; e 对 h 的计算影响较小, 因此, 其模型可以简化为:

$$h=e(H_2-f)/f\tan\alpha \quad (6)$$

式中: H_2, f, α 为已知量, 公式(6)可简化为:

$$h=k \cdot e \quad (7)$$

式中: k 为测量高度的转换系数, 其与测量系统的几何参数及安装参数相关。由公式(7)可知, 测点的高度 h 值由测点的图像视觉量 e 计算得到。

2 激光线光强度高斯滤波及激光线提取

物体几何尺寸的测量精度与激光条中心线的提取精度相关^[19]。由于线激光具有较好的频率、相位和振幅一致性, 一些材料表面的激光线成像时会出现激光散斑, 激光线成像具有颗粒感, 激光线条不连续性, 影响了激光线中心点的提取。空间高斯滤波方法具有保边去噪功能, 在平滑噪声的同时, 对图像进行边缘保护^[20]。为提升激光线成像质量, 采用空间高斯滤波方法先对激光线图像进行预处理。空间高斯滤波器系数由高斯函数确定。输出像素 $g(i, j)$ 的值取决于邻域像素值的加权组合。

$$g(i, j)=\sum_{m=-3}^3 \sum_{n=-2}^2 \alpha(i+m, j+n)f(i+m, j+n) \quad (8)$$

式中: (i, j) 为当前点坐标; $(i+m, j+n)$ 为当前点邻域坐标; $\alpha(\cdot)$ 为高斯权系数, 窗口内各点权系数之和为 1。以当前像素点为中心, 采用合适大小的滑动窗口, 一般设为 7×5 , 将窗口中心与当前像素点重合, 在滑动窗口覆盖的图像区域内, 确定各点滤波权重系数 $\alpha(\cdot)$, 由公式(8)计算当前点 $g(i, j)$ 值。从左到右, 从上到下, 在图像中滑动窗口, 计算每个像素点, 得滤波处理图像。经过空斯滤波处理后, 线激光图像光线的连续性得到改善, 同时断面高斯曲线得到了平滑, 峰值点位置明显, 更准确地逼近于理论位置。

利用灰度质心和峰值点连续性协同来提取激光线中心点像素。灰度质心法按横断面素值分布来求质心坐标, 将质心坐标作为激光线中心点候选来考虑。对图像列 j , 设峰值点的计算半径为 R , 则重心坐标的计算公式为:

$$x_c(j)=\sum_{m=-R}^R (i+m)g(i+m, j)/\sum_{m=-R}^R g(i+m, j) \quad (9)$$

灰度质心和峰值点连续性协同方法提取激光线

中心点主要有以下 4 步:

(1) 提取图像一列素灰度值, 获图像列灰度曲线, 寻找灰度峰值位置。

(2) 以灰度峰值像素位置为中心, 提取适当宽度范围的邻域灰度值, 计算质心位置。

(3) 以质心位置为起点, 对激光线中心点进行逐点跟踪, 分别向左/右两边跟踪。对下一列像素灰度曲线的灰度峰值及质心位置的确认, 以与上列中心点为 8 邻域的质心位置或峰值点为该列的激光线中心点, 如质心位置和峰值点都为上列中心点的 8 邻域, 为了确定哪一个点为下一个中心点, 利用连续性, 比较这些点与先前中心点的方向码, 与先前中心点的方向码一致或绝对误差最小的点作为下一个中心点。

(4) 逐列寻找和确认激光线中心点, 直至图像中激光线的最右端和最左端。

灰度质心和峰值点连续性协同提取方法能精确、自动快速提取激光线, 具有很强的鲁棒性。

3 相机标定及数据转换

利用标定块对物体长、宽、高及激光发射角度等参数进行标定。标定结果直接影响物体的图像视觉尺寸到实际尺寸的转换关系及计算精度。标定过程首先对镜头进行畸变校正: 取标定模板放置于平面上, 从不同角度拍摄若干张模板图像并检测出图像中的特征点, 求出摄像机的内参数和外参数, 求出畸变系数完成对镜头的畸变校正。对相机的单像素长宽尺寸进行标定, 取一块标准长度为 L 的标定块, 在景深范围内对标定块进行拍照, 计算标定块长度在图像中所占像素个数 N , 得到像素点的长度方向标定尺寸:

$$L_b=Length/Num \quad (10)$$

同理可以标定像素点的宽度方向标定尺寸。

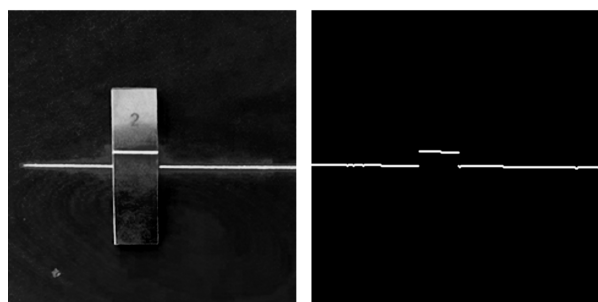
由公式(7)可知, 物体高度的测量计算与激光器安装角度、相机参数及安装位置等参数有关, 由于安装角度、位置等测量有误差, 为规避相机内外参数和安装参数测量误差影响, 通过人工标定块来确定高度计算公式(7)的参数 k 。

高度标定如图 3(a)所示, 取标定块置于图像中, 已知标定块厚度 h , 以固定入射角激光投射标定块

形成二维图像上的高度差,提取激光线并计算高度线与基准线的像素视觉高度差 e ,由公式(7)中可得高度系数 k 的标定值。

$$\hat{k} = \frac{1}{N} \sum_i hle(i) \quad (11)$$

高度标定系数 k 值会随激光器安装角度 α 的变化而发生变动。一旦激光器安装角度固定后, k 值就会随之确定,因此测量时,当安装角度固定后,只需对测量系统做一次高度标定。

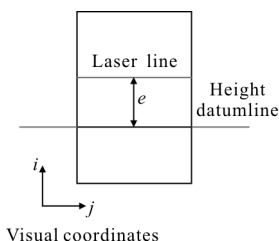


(a) 标定块激光线图

(b) 提取激光线

(a) Laser line image of calibration block

(b) Laser line extraction



(c) 高度标定

(c) Height calibration

图 3 高度标定原理

Fig.3 Calibration principle of height

4 三维点云数据获取及三维重建

物体表面激光线图见图 4, 激光线会随物体高度的变化而发生改变。需要先选择基准线位置,在视觉坐标系,基准线一般不是平行于坐标轴,见图 4,先要求出基准线,采用最小二乘直线拟合得到基准线的直线方程为 $ax+by+c=0$,测点相对于基准线的视觉高度差为 e 为:

$$e(i, j) = |ai + bj + c| / \sqrt{a^2 + b^2} \quad (12)$$

将 e 代入公式(7),可得到每个测点的高度差测量值,对应于物体测点相对基准面的高度。

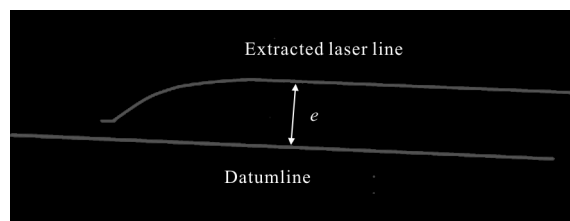


图 4 高度计算及三维点数据获取

Fig.4 Height calculation and 3D point data acquisition

计算多个测点的高度差,则构成物体三维点云数据。物体三维点云数据主要依靠相机获取的二维数据及激光线获取的高度数据来实现。控制平台保持匀速运动,激光器连续发射激光线,扫描物体表面,高分辨率相机连续采集物体表面的激光线图,为了消除物体背景对激光线提取效果的干扰,采用两次拍摄,照明开启时拍摄物体激光线图,得到物体的平面信息,物体位置保持不动,关闭照明时再次拍摄物体无背景的激光线图,获取物体表面的深度信息。提取图像激光线,并计算测点高度,高度信息的空间点。将这些点置入三维坐标系中构成三维点云数据。利用邻近三点连线原则获取点云数据的三角面片,构造物体点云数据的三维模型,对物体表面进行三维重建测量。

5 实验结果与分析

采用文中测量方法,对不同形状及不规则物体进行了大量的测量实验,验证方法的可靠性和测量精度。为了消除物体背景对激光线提取效果的干扰,采用两次拍摄,将要测的物体放在测量系统平台上,照明开启时拍摄物体,得到物体的图像信息;物体位置保持不动,关闭照明时再次拍摄物体的激光线图,得到被测点的深度信息。下面以透明和非透明物体为例,给出物体厚度的测试结果及测量数据对比。

实验 1 标准量块厚度的测量。图 5(a)为 2 mm 高的标准量块激光线实物图像。将标准量块放在测量平台中,照明开启时所得到的标准量块激光线图见图 5(b),图像大小 487 pixel×1 200 pixel。位置保持不动,关闭照明时所得到的标准量块激光线图见图 5(c)。激光线提取结果见图 5(d)。参数 k 标定结果为 0.0107。选取图像中箭头指示的 3 个测点测量厚

度值,测量耗时 $10\ \mu\text{s}$,与千分尺人工测量值做比较,测量结果及光纤测量相对标准值误差、人工测量相对标准值误差见表 1,其中千分尺测量值只能测到小数点后 2 位,第 3 位为估读值。由表 1 可知,光纤激光测量方法要比人工测量精确。

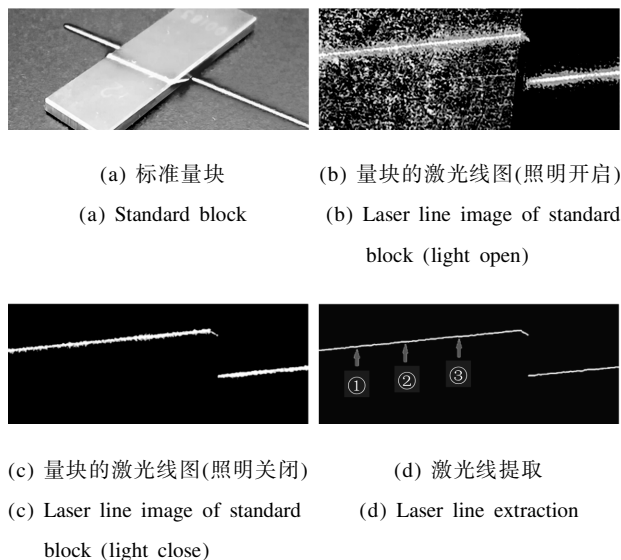


图 5 标准量块厚度的测量对比

Fig.5 Measurement and comparison of standard blocks thickness

表 1 标准量块厚度的测量结果及误差对比 (单位: mm)

Tab.1 Standard block thickness measurement results and relative error comparison (Unit: mm)

	Measurement point 1	Measurement point 2	Measurement point 3
Actual value	2.00	2.00	2.00
Manual measurement & relative error	2.011 0.045%	2.013 0.58%	2.013 0.58%
Laser measurement & relative error	2.000 9 0.045%	2.011 6 0.58%	2.011 6 0.58%

实验 2 玻璃厚度的测量。图 6(a)为弧面玻璃,图 6(b)为照明开启的激光线图,图像大小 $484\ \text{pixel} \times 1\ 200\ \text{pixel}$ 。照明关闭时的激光线图见图 6(c),激光线提取结果见图 6(d),玻璃折射率 1.5,角度标定值为 31.5° ,参数 k 标定结果为 0.012 3,选取图像中灰色箭头指示的 3 个测点计算厚度值,并与千分尺人

工测量值做比较,测量结果及相对人工测量值误差见表 2,实验表明激光测量方法能精确、快速测量弧形玻璃多测点厚度。

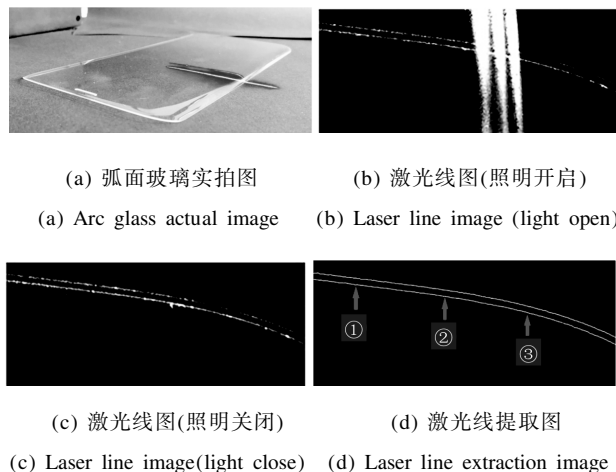


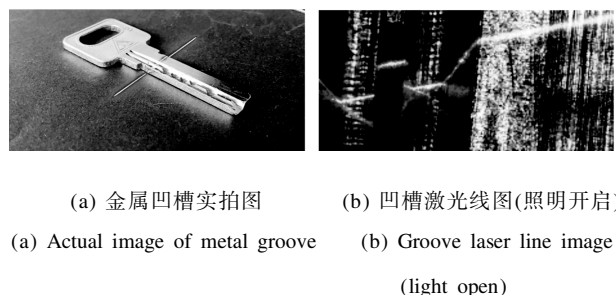
图 6 弧面玻璃厚度的测量

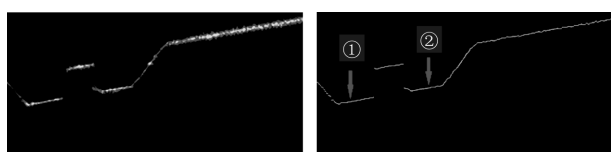
Fig.6 Measurement of thickness of arc glass

表 2 弧面玻璃厚度测量结果及误差对比(单位: mm)
Tab.2 Thickness measurement results of arc glass and relative error comparison (Unit: mm)

	Measurement point 1	Measurement point 2	Measurement point 3
Manual measurement	0.491	0.489	0.488
Laser measurement	0.487 2	0.487 2	0.487 2
Relative error	0.77%	0.37%	0.16%

实验 3 凹槽深度的测量。图 7(a)为金属钥匙凹槽激光线实物图。照明开启所获取的凹槽激光线图见图 7(b),图像大小 $592\ \text{pixel} \times 1\ 200\ \text{pixel}$ 。照明关闭时的凹槽激光线图见图 7(c),激光线提取结果见图 7(d),参数 k 标定结果为 0.007 6,选取图中箭头指示的两个测点,计算凹槽深度值。并与游标卡尺人工测量值做比较,用游标卡尺无法直接测量凹槽深度,通过测量厚度的上下差值进行间接计算,游





(c) 凹槽激光线图(照明关闭)
(d) 激光线提取图
(c) Groove laser image
(d) Laser line extraction
(light close) image

图 7 凹槽深度的测量

Fig.7 Measurement of groove depth

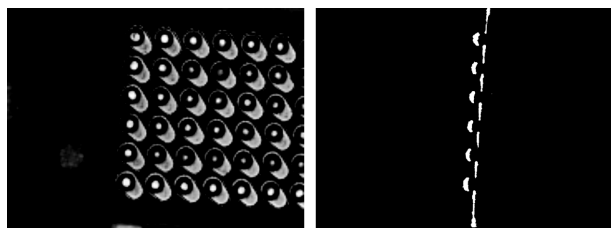
标卡尺精度为 0.02 mm。测量结果及相对人工测量值误差见表 3，实验表明光纤激光测量方法能精确测量物体的凹槽深度。

表 3 凹槽深度的测量结果及相对误差(单位: mm)

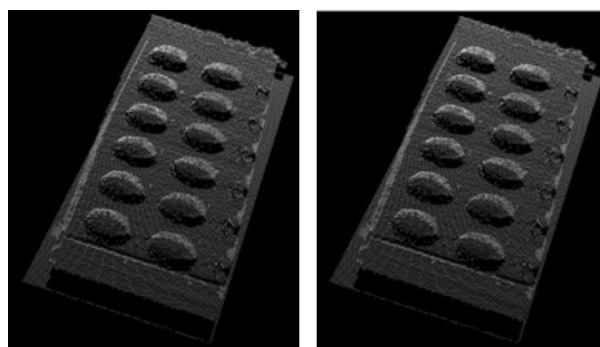
Tab.3 Groove depth measurement and relative error(Unit: mm)

	Measurement point 1	Measurement point 2
Manual measurement	1.10	1.10
Laser measurement	1.102 0	1.109 6
Relative error	0.18%	0.87%

实验 4 焊锡块点云数据获取及三维重建测量。图 8(a)为将焊锡块置于平台上照明开启时所获图像。照明关闭,运动控制平台沿 x 方向匀速运动进行激光线扫描,运动速度 0.066 5 mm/s,每 0.2 s 进行一次拍摄,共执行 150 次获得 150 帧激光线序列图像,图 8(b)为电路板焊锡激光线序列图像的第 122 帧,扫描长度 1.995 mm,提取激光线,计算激光线各测点的高度,由激光线测点高度信息所得到的三维点云数据见图 7(c),由点云数据构成的三维重建如图 7(d)所示,由此完成焊锡块三维重建测量,可获得焊锡块每点的高度信息。



(a) 焊锡块图像
(b) 激光线扫描图像(第 122 帧)
(a) Solder block image (b) Laser line image (122nd frames)



(c) 焊锡块三维点云数据
(d) 焊锡块的三维重建
(c) 3D point cloud data of
solder block (d) 3D reconstruction of
solder block

图 8 焊锡块三维点云数据及三维重建测量

Fig.8 3D point cloud data and 3D reconstruction measurement of solder block

6 结论

利用光纤耦合激光器光源精度高、体积小、单色性好、成像稳定以及使用方便等优势,研制了基于光纤耦合激光的视觉测量系统。利用光纤激光器对物体测量部位发射线激光,通过高分辨率相机的两次成像技术获取物体的平面尺寸和高度信息,利用图像技术精确计算物体的测量值。实体的三维测量验证了测量方法的有效性和准确性,可以实现透明与非透明材料的轮廓尺寸精确测量,且能适应物体形态的差异和不同的材质,测量精度可达微米级。利用运动平台能快速高效完成物体多尺寸批量的同步测量,同时,研制的测量方法也能完成物体表面的划伤及瑕疵的检测任务。

参考文献:

[1] Moll eda J, Usamentiaga R, Bulnes F G, et al. Uncertainty propagation analysis in 3-D shape measurement using laser range finding [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2012, 61(5): 1160-1172.

[2] Liu Yuanzhi, Sun Qiang, Bi Guoling. Recognition and repairing of surface hole in three dimensionallaser scanning system[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 114-121. (in Chinese)
吕源治, 孙强, 毕国玲. 三维激光扫描系统中曲面空洞的识别与修复[J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 114-121.

[3] Wang Tianxing, Yan Zhijun, Mou Chengbo, et al. Narrow bandwidth passively mode locked picosecond Erbium doped

- fiber laser using a 45° tilted fiber grating device [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16708–16714.
- [4] Hu Song, Yao Jian, Liu Meng, et al. Gain-guided soliton fiber laser with high-quality rectangle spectrum for ultrafast time-stretch microscopy [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10786–10796.
- [5] Lilienblum E, Ai-hamadi A. A structured light approach for 3D surface reconstruction with a stereo line-scan system [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2015, 64(5): 1266–1274.
- [6] Ding Shaowen, Zhang Xiaohu, Yu Qifeng, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54 (7):21–35. (in Chinese)
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 21–35.
- [7] Zhou Na, An Zhiyong, Li Yonghao. Large-sized three dimensional profile measurement technology based on laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (12): 2465–2468. (in Chinese)
周娜, 安志勇, 李咏豪. 采用激光雷达的大尺寸三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2465–2468.
- [8] Carl C, Keith C. Distance measurement utilizing image-based triangulation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(1): 234–244.
- [9] Bi Chao, Liu Hongguang, Xu Changyu, et al. Study on measuring method of tip clearance based on chromatic confocal technology [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016, 52(2): 14–18. (in Chinese)
毕超, 刘洪光, 徐昌语, 等. 基于光谱共焦技术的叶尖间隙测量方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(2): 14–18.
- [10] Zhang Jinfeng, Zhang Jiye. Measurement system of inclination angle based on laser triangulation [J]. *Optic-Electronic Engineering*, 2016, 43(1): 18–23. (in Chinese)
张劲峰, 张继业. 基于激光三角法的倾斜角测量系统[J]. 光电工程, 2016, 43(1): 18–23.
- [11] Shao X, Elsa M, Chen Z, et al. Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high accuracy and real-time strain measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (26): 30124–30138.
- [12] Ibrahim D, Yasui T. High-precision 3D surface topography measurement using high-stable multi-wavelength digital holography referenced by an optical frequency comb [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1758.
- [13] Sun J, Zeng D. Three-dimensional infrared imaging method based on binocular stereo vision [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(10): 103111.
- [14] Mao Jiahong, Lou Xiaoping, Li Weixian, et al. Binocular 3D volume measurement system based on line-structured light [J]. *Optical Technique*, 2016, 42(1): 10–15. (in Chinese)
毛佳红, 娄小平, 李伟仙, 等. 基于线结构光的双目三维体积测量系统[J]. 光学技术, 2016, 42(1): 10–15.
- [15] Mordasov M, Savenkov A, Safonova M, et al. Non-contact triangulation measurement of distances to mirror surfaces [J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, 54(1): 69–75.
- [16] Fan Xuebing, Wang Chao, Tong Shoufeng, et al. Study of the coupling efficiency of spatial light into single-mode multi-core fiber [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38 (12): 2414–2422. (in Chinese)
范雪冰, 王超, 佟首峰, 等. 空间光到单模多芯光纤耦合效率分析及影响因素研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(12): 2414–2422.
- [17] Huang Xuemei, Liu Zhiwei, Zhao Jibin. Surface detection method with line structured light complex environment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (10): 682–689. (in Chinese)
黄雪梅, 刘志伟, 赵吉宾. 复杂环境下线结构光曲面检测方法[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 682–689.
- [18] Cao Ting, Wang Weixing, Yang Nan, et al. Detection method for the depth of pavement broken block in cement concrete based on 3D laser scanning technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206006. (in Chinese)
曹霆, 王卫星, 杨楠, 等. 基于三维激光扫描技术的路面断板深度检测[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0206006.
- [19] Feng Ping, Liu Zhen. Automatic localization method of the multi-planar strip in rudder angle measurement [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 911–916. (in Chinese)
冯萍, 刘震. 舵面角度测量中结构光光条图像自动定位方法[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 911–916.
- [20] Zhang Zhiqiang, Wang Wanyu. A modified bilateral filtering algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(3): 443–447. (in Chinese)
张志强, 王万玉. 一种改进的双边滤波算法 [J]. 中国图象学报, 2009, 14(3): 443–447.