

高分辨率微线结构光测量系统设计

何娜 王建华 商执亿

Design of high-resolution thin line structured light measurement system

HE Na, WANG Jianhua, SHANG Zhiyi

引用本文:

何娜, 王建华, 商执亿. 高分辨率微线结构光测量系统设计[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1073–1079. DOI: 10.5768/JAO202344.0503003

HE Na, WANG Jianhua, SHANG Zhiyi. Design of high-resolution thin line structured light measurement system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 1073–1079. DOI: 10.5768/JAO202344.0503003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高分辨率超低畸变航天光学成像系统设计

Design of aerospace optical imaging system with high-resolution and ultra-low distortion

应用光学. 2019, 40(3): 363–368 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0301001>

高分辨率长焦广角低畸变光学成像系统设计

Design of optical imaging system with high resolution, long-focus, wide angle and low distortion

应用光学. 2017, 38(5): 725–731 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501008>

高分辨率微型星载相机光学系统的设计及应用

Design and application of optical system for high-resolution micro space-borne camera

应用光学. 2020, 41(2): 235–241 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201001>

高分辨率光学遥感卫星小目标法在轨辐射定标

In-flight radiometric calibration of high spatial resolution satellite optical sensor using small targets

应用光学. 2019, 40(6): 951–957 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601004>

基于一代像增强器的高分辨率X射线相机

High-resolution X-ray CCD camera based on the first generation image intensifier

应用光学. 2017, 38(5): 810–814 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0505001>

面向冰盖剖面的高空间分辨率分布式光纤测温系统设计

High spatial resolution distributed optical fiber temperature measurement system for ice cover profile

应用光学. 2021, 42(5): 941–948 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-1073-07

高分辨率微线结构光测量系统设计

何娜, 王建华, 商执亿

(西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为实现物体表面轮廓高精度三维测量, 提出一种视场、物距、测量范围均较大的远心光路测量系统。介绍了系统组成及光三角测量原理, 论述了投影与成像双光路均与被测表面法线呈 45° 夹角的光路搭建方式可降低较大深度测量范围对成像物镜景深的要求; 建立系统深度标定理论模型, 获得CCD单位像素深度理论值为 $0.5544\ \mu\text{m}$; 计算出放大倍率、数值孔径等光路参数并完成光路搭建; 通过实验对所搭建测量系统的分辨力、测量范围、光条最小宽度及其边缘质量进行分析。实验结果表明, 投影条纹最长 $2\ \text{mm}$, 最小线宽可达 $8.96\ \mu\text{m}$, 条纹边缘清晰平滑。系统成像畸变小, 可实现 $1.62\ \mu\text{m}$ 的光学分辨率及 $0.54\ \mu\text{m}$ 的深度像素分辨率, 工作距离 $65\ \text{mm}$, 深度测量范围不低于 $140\ \mu\text{m}$, 具有良好的测量性能。

关键词: 高分辨率测量; 微线结构光; 系统设计; 性能分析

中图分类号: TH741

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0503003

Design of high-resolution thin line structured light measurement system

HE Na, WANG Jianhua, SHANG Zhiyi

(College of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: To achieve high-precision 3D measurement of surface profile of the object, a telecentric optical path measurement system with large field of view (FOV), object distance and measuring range was proposed. The composition of the system and the principle of optical triangulation were introduced, the construction of the optical path with the angle of 45° between the projection and double optical path and the normal line of the measured surface could reduce the requirement of depth of field of the imaging objective lens for large depth measurement range. The theoretical model of system depth calibration was established, and the theoretical value of CCD unit pixel depth was $0.5544\ \mu\text{m}$. The magnification, numerical apertures and other optical parameters were calculated and the optical path was constructed. The resolution, measuring range, minimum width of light stripe and edge quality of the system were analyzed by experiments. The experimental results show that the longest projection stripe is $2\ \text{mm}$, the minimum line width is $8.96\ \mu\text{m}$, and the stripe edge is clear and smooth. The imaging distortion of the system is small, and the optical resolution of $1.62\ \mu\text{m}$ and the depth pixel resolution of $0.54\ \mu\text{m}$ can be achieved. The object distance is $65\ \text{mm}$, the depth measurement range is no less than $140\ \mu\text{m}$. The system has good measurement performances.

Key words: high-resolution measurement; thin-line structured light; system design; performance analysis

引言

线结构光三维检测技术因其无损伤、高效、高

精度等优势^[1-3], 被广泛应用于工业及科学的各个领域^[4-5]。智能制造的不断精密化及批量化对三维

收稿日期: 2022-12-26; 修回日期: 2023-04-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51975448); 省部 (级) 科研基金重点项目 (2019zdzx0-02-02)

作者简介: 何娜 (1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事计算机辅助光学精密测量技术研究。E-mail: chdd6668@163.com

通信作者: 王建华 (1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测试理论、计算机控制技术与信息处理技术等研究领域。E-mail: wangjianhuaxatu@126.com

检测精度及效率提出更高要求^[6],线结构光测量技术朝高分辨、高精度、大视场方向发展。

常见的线结构光测量系统一般使用激光或 LED 作为测量光源。2017 年,李文涛等人采用激光视觉方法进行钢轨截面磨损动态测量,并提出一种结合相机自动曝光、动态阈值分割法和 Hessian 矩阵的激光光条中心亚像素提取方法,测量结果表明钢轨轮廓尺寸偏差约为 0.01 mm^[7]。2019 年 GUO Xiaozhong 等人为快速获取齿轮齿面三维形状信息,提出一种基于线结构光传感器和高精度气浮转台的三维点云测量系统,利用该系统测量模数为 3 的 6 级齿轮,所得总齿廓偏差为 15.87 μm ^[8]。2020 年, WU Xiaojun 等人提出一种高精度相机标定及激光平面标定的三维激光扫描系统,通过测试不同试件得出该方法的最小几何测量精度为 18 μm ^[9]。以上研究均以线激光作为测量光源,激光的高相干性导致测量条纹散斑噪声明显^[10-11],光条中心提取误差大,检测精度难以提高。

2012 年,夏灵林等人改造光切显微镜搭建线结构光显微测量系统,该系统使用光切显微镜自带的非相干 LED 绿光光源,投影条纹边缘平整,测量精度可达亚微米级,工作距离 4.206 mm,测量深度范围 $\pm 10 \mu\text{m}$,成像视场 183 μm ^[12]。以显微镜作为成像物镜可达到较高分辨率,易实现高精度测量,但由于其分辨率与景深参数相互制约^[13]且放大倍率过高,因而往往伴随着小景深及小测量范围,使用远心镜头则可在保持高分辨率的同时有效拓展景深^[14],更易实现高精度、大范围测量。2021 年, SHANG Z Y 等人提出一种非相干线结构光高精度轮廓测量方法,并搭建双远心测量系统,该系统可达到 1.8 μm 的测量分辨力及 1 mm 景深。将其应用于测量渐开线齿廓时,误差为 $\pm 2.2 \mu\text{m}$ ^[15],但该系统投影线宽较大,测量分辨力难以进一步提高^[16]。

针对以上问题,本文提出高分辨率微线结构光测量系统,利用非相干性 LED 投影宽度不足 10 μm 且边缘平整的光条,更易实现高分辨、高精度测量;利用高分辨率远心微距镜头搭建成像系统,在提高分辨率的同时增大物距,系统测量范围更大,应用范围更广。

1 微线结构光测量系统原理

1.1 系统组成

微线结构光测量系统分为投影光路与成像

光路,投影光路包括光源、狭缝、投影物镜及其装夹微调装置等,其作用为进行光源光束整形从而产生主动测量^[17]所需的原始投影条纹;成像光路主要由成像物镜、CCD 相机及其装夹微调装置等构成,用于拍摄投影于被测物表面且经被测物表面轮廓调制的信息条纹^[18],系统组成如图 1 所示。

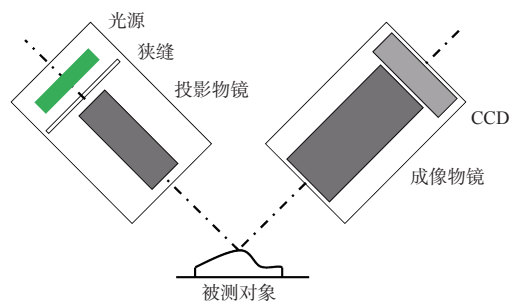


图 1 系统组成

Fig. 1 Composition diagram of system

1.2 基本测量原理

线光源产生光束经狭缝光阑整形照亮狭缝轮廓,狭缝轮廓经投影物镜成像于被测物体表面,如图 2(a) 所示,此时被测物体表面呈现光条 $a-b-c-d-e-f$,成像光路将物面的光条成于像平面即为信息光条 $a'-b'-c'-d'-e'-f'$,最后由 CCD 探测器采集并通过显示器显示出来^[19-20]。被测物表面高度变化使得光条受到调制,表现在图像中则是光条发生了弯曲或断裂变形^[21],变形程度则取决于被测面深度^[22],因此从变形光条图像中可获取物体表面的三维信息。

设计要求测量系统既在深度方向具备相对较大的测量范围(0.15 mm),又拥有较高分辨率(约 1 μm)。如图 2(b) 所示,当以投影光路光轴与成像光路光轴垂直且均与被测表面法线呈 45° 夹角的方式搭建光路时,若将被测表面置于位置 2 处,则投影光条中心位于成像物镜的对准平面内,此时无论将被测表面位置移动至位置 1 还是位置 3,条纹 1、条纹 2、条纹 3 的中心线对于成像物镜的物距是一致的,即无论被测表面如何起伏,光条中心总保持在成像物镜的对准平面内,成像物镜只需对条纹两侧能清晰成像,景深便足够。系统 z 方向测量范围主要取决于投影光路,与成像物镜景深无关。景深要求降低即可适当增加成像物镜数值孔径以满足最小分辨率要求。

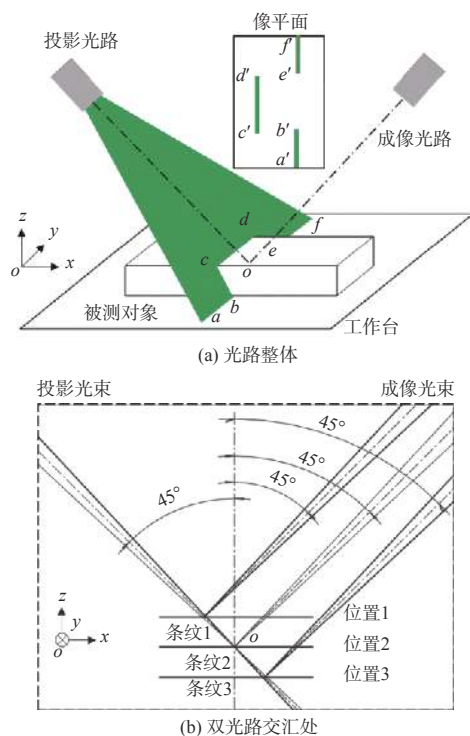


图2 测量原理

Fig. 2 Diagram of measurement principle

1.3 深度标定模型

系统深度标定指对具有标准高度(深度)的工件表面进行条纹投影并拍摄图片,分析条纹图片得出 CCD 单个像素对应的实际高度(深度)的过程。如图 3 所示,在光路 45° 投影、 45° 拍摄条件下,利用标准量块高度差对测量系统进行深度标定,设量块高度差为 Δh , CCD 像元尺寸为 d ,成像物镜放大倍率为 β ,量块高度差反映至像方尺寸为 $\Delta h'$,其所占像素数为 n ,则系统单位像素深度 D 可由公式(1)得到,该式可用于后期系统深度标定的理论计算。

$$D = \frac{\Delta h}{n} = \frac{\Delta h' \cos 45^\circ}{\beta \times n} = \frac{n \times d \times \cos 45^\circ}{\beta \times n} = \frac{d}{\sqrt{2}\beta} \quad (1)$$

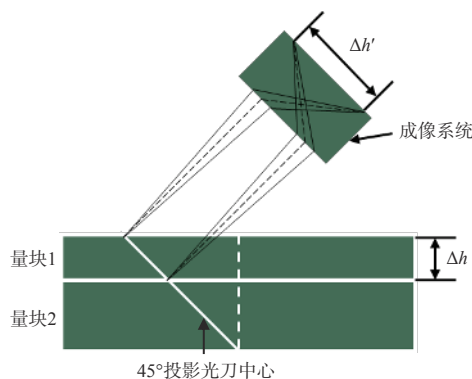


图3 深度标定理论模型

Fig. 3 Theoretical model of depth calibration

2 测量系统光路设计及搭建

2.1 光路设计

2.1.1 成像光路设计

系统以小模数齿轮为测量对象,需实现长度 2 mm、宽度 $10 \mu\text{m}$ 的投影条纹,故成像物镜线视场 y 约 2 mm。选用 2/3" 工业 CCD(感光面宽度 a 为 8.8 mm)相机作为成像接收器件,则可得成像镜头放大倍率 β 为

$$\beta = \frac{a}{y} = \frac{8.8 \text{ mm}}{2 \text{ mm}} = 4.4 \quad (2)$$

以显微成像且被测物体被其他光源斜照明为光路模型,则成像物镜理论最小分辨率 σ 为

$$\sigma = \frac{0.5\lambda}{N_A} \quad (3)$$

式中: λ 为成像光主波长; N_A 为镜头数值孔径。当成像物镜的分辨率 σ 为 $1 \mu\text{m}$ 、 λ 为 $0.55 \mu\text{m}$ 时,可反推出其数值孔径 N_A 为 0.275。

经过以上分析,选择数值孔径为 0.2、放大倍率 β 为 4.4 的远心微距镜头作为成像物镜,该镜头在 $0.55 \mu\text{m}$ 工作波长下的标称分辨率为 $1.68 \mu\text{m}$,在光源斜照明条件下的理论分辨率 σ 为 $1.375 \mu\text{m}$,由此计算与该镜头适配的 CCD 相机的像元尺寸 d 为

$$d = 2\sigma = 2 \times 1.375 \mu\text{m} = 2.75 \mu\text{m} \quad (4)$$

根据上述计算,选择像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ 的 500 万像素 CCD 相机,此时 CCD 像元尺寸 $3.45 \mu\text{m}$ 大于上文计算所得的镜头适配 CCD 像元尺寸 $2.75 \mu\text{m}$,成像系统成为光学受限系统^[23]。

2.1.2 投影光路设计

投影光路设计采用主波长 $0.55 \mu\text{m}$ 的单色绿光 LED 作为测量光源,搭配光强可调光源控制器,可根据被测表面质量调节光源强度,从而呈现最佳光条质量。定制宽度 $20 \mu\text{m}$ 、长度 8 mm 的高精度光学狭缝,利用狭缝夹持器进行固定,搭配狭缝微调装置可对狭缝倾角进行调节从而获得测量所需的理想条纹状态。投影物镜选用倒置工业显微镜,镜头标称 TV 失真 0.02%,数值孔径小,出光平行度高,放大倍率 4 倍,可将长度 8 mm、宽度 $20 \mu\text{m}$ 的狭缝缩小至长度 2 mm、宽度 $10 \mu\text{m}$ 以内。

2.2 系统光路搭建

光路搭建如图 4 所示,投影光路与成像光路光轴垂直且分别与工件装夹台背板法线呈 45° 夹角。投影光路由光源、高精度光学狭缝、狭缝夹持器与微调装置及投影物镜构成;成像光路由成像

物镜及其微调装置、CCD 相机等构成。

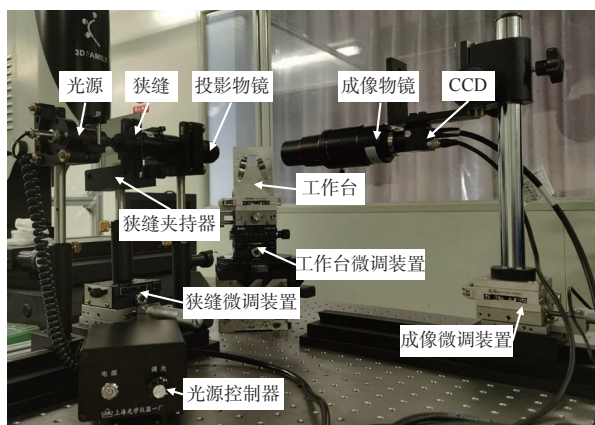


图 4 系统光路

Fig. 4 System optical path

3 系统性能分析

通过实验分析所搭建的微线结构光测量系统的各项性能,包括系统分辨力、深度测量范围及投影条纹的最小线宽及其边缘质量。

3.1 系统分辨力

成像系统分辨力包括成像光路分辨率和测量深度像素分辨率。

3.1.1 成像光路分辨率

成像光路分辨率检测使用 USAF 1951 分辨率测试靶,以瑞利判据为理论依据,当目标元素明暗条纹的灰度对比度小于 73.5% 时^[24],认为该目标元素可被分辨。实验获得分辨率测试靶第 7 组元素 1 的灰度对比度随拍摄物距变化曲线如图 5 所示。由数据结果可知,该图组中清晰度最高的图片位置读数为 6.94 mm,该图片中第 4~7 组元素图案及第 7 组元素局部放大如图 6 所示。

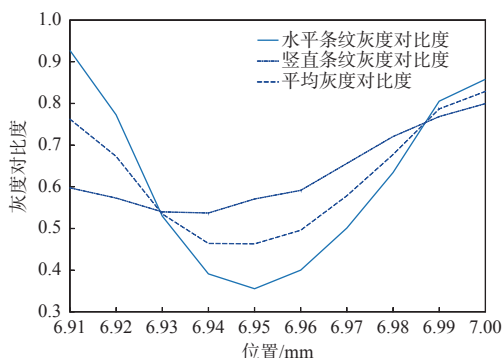
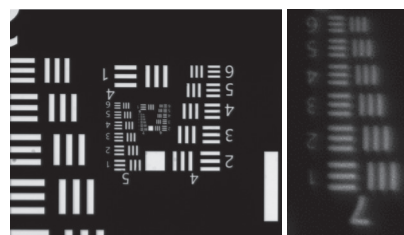


图 5 第 7 组元素 1 灰度对比度随拍摄物距变化曲线

Fig. 5 Variation curves of gray contrast of group 7 element 1 with object distance



(a) 原始图片 (b) 第 7 组局部放大图

图 6 成像系统拍摄分辨率靶所得图片

Fig. 6 Image obtained from resolution target taken by imaging system

依次分析图 6(b) 中各元素灰度曲线,获得明暗条纹灰度极值,以灰度曲线上的灰度极小值与灰度极大值之比得各元素水平、竖直条纹对比度,即数据表 1。结果表明,成像系统可分辨出分辨率靶第 7 组最小元素,即实际分辨率高于 $2.19 \mu\text{m}$ 。使用最小二乘法对所得数据拟合直线得图 7,由拟合直线可知,成像系统对竖直条纹的极限分辨率为 $1.616 \mu\text{m}$,对于水平条纹极限分辨率及平均分辨率均超过 $1.616 \mu\text{m}$,故可推论,成像光路极限分辨率可达到 $1.62 \mu\text{m}$ 。

表 1 第 7 组各元素成像对比度数据表

Table 1 Imaging contrast data for each element in group 7

元素序号	分辨率/ μm	解析力/lp/mm	水平条纹对比度	竖直条纹对比度	平均对比度
7.1	3.91	128.00	0.405	0.538	0.452
7.2	3.48	144.00	0.430	0.596	0.497
7.3	3.10	161.00	0.440	0.617	0.512
7.4	2.76	181.00	0.475	0.639	0.538
7.5	2.46	203.00	0.512	0.662	0.569
7.6	2.19	228.00	0.525	0.689	0.596

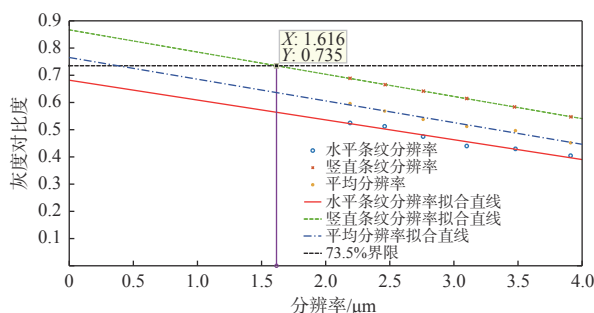


图 7 第 7 组各元素对比度拟合直线

Fig. 7 Contrast fitting line of each element in group 7

3.1.2 系统测量深度像素分辨率

上文已经获得系统深度标定的理论模型公式,带入本次实验所选用的 CCD 像元尺寸 $3.45 \mu\text{m}$ 及

成像物镜放大倍率 4.4, 可得系统测量深度方向的理论像素分辨率为 0.554 4 μm 。

通过实验测量实际所搭建光路在测量深度方向的像素分辨率, 利用分子力将 102 量块与 05 量块黏合, 并拍摄 5 张位于视场不同区域包含量块高度差信息的条纹图像(图 8); 使用自适应阈值分割算法提取条纹中心, 最终计算得测量系统单位像素深度数据如表 2 所示。

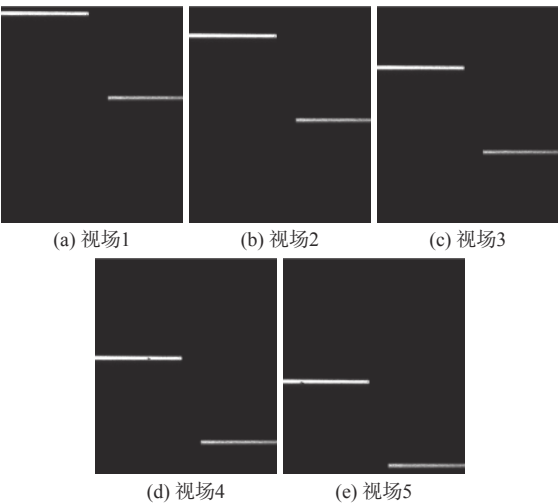


图 8 视场不同区域拍摄包含高度差信息的条纹图
Fig. 8 Fringe patterns containing height difference information taken in different areas of field of view

表 2 CCD 单位像素深度计算数据表						
Table 2 Data of computed CCD unit pixel depth						
视场序号	1	2	3	4	5	均值
条纹间距占像素数	955.4	955.1	955.3	955.4	955.2	955.3
单位像素深度/ μm	0.544 3	0.544 4	0.544 3	0.544 3	0.544 4	0.544 3

由表 2 数据计算得视场不同位置对应的单位像素深度均值为 0.544 3 μm , 即实际搭建光路在测量深度方向的像素分辨率为 0.544 3 μm , 与其理论值 0.554 4 μm 接近。另外, 在视场不同区域对 520 μm 深度进行测量, 其所占像素数波动范围在 0.3 像素以内, 换算至物方对应 0.17 μm , 故可推论成像畸变对系统深度测量结果影响较小, 由此计算镜头相对畸变约为 0.032%, 该值小于系统设计要求中给出的相对畸变 0.05%, 故搭建系统满足畸变设计要求。

3.2 系统深度测量范围

以光滑量块表面作为被测对象, 等间距改变测量深度方向上量块被测面至系统的距离, 依次采集条纹图像并计算其宽度变化率, 如表 3 所示。

表 3 条纹宽度随投影距离变化情况
Table 3 Variation of fringe width with projection distance

位置读数/mm	条纹宽度/ μm	条纹宽度变化率/%
10.62	13.05	45.61
10.64	11.63	29.82
10.66	11.32	26.32
10.68	10.53	17.54
10.70	9.59	7.02
10.72	9.43	5.26
10.74	8.96	0.00
10.76	8.96	0.00
10.78	9.12	1.75
10.80	9.27	3.51
10.82	9.43	5.26
10.84	9.43	5.26
10.86	10.69	19.30
10.88	11.79	31.58

由表 3 数据可知, 在位置读数为 10.70 mm~10.84 mm 范围内, 投影条纹宽度相对于最细条纹宽度变化率不超过 10%, 这一位置差为 0.14 mm, 约等于投影物镜的景深 0.135 mm, 超过该范围后, 条纹宽度增大趋势明显, 如图 9 所示, 故可得系统深度测量范围为 0.14 mm。

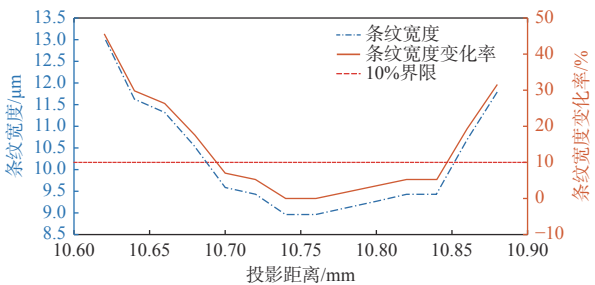


图 9 条纹宽度及其变化率曲线
Fig. 9 Fringe width and its rate of change curve

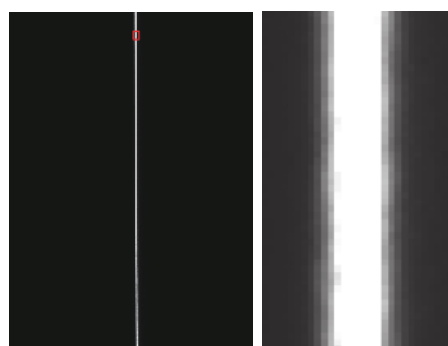
3.3 投影光条宽度及其边缘质量

实验可知, 被测物表面的细微瑕疵会使条纹边缘弥散, 即条纹边缘灰度过渡范围变宽; 较大蚀坑使得条纹边缘产生缺口甚至断裂。本次实验使用表面平整、光洁度高的金属量块作为被测表面, 其显微拍摄图片如图 10 所示。由 3.2 节可知本次设计搭建的测量系统可投影的最小条纹宽度可达 8.96 μm , 其原始图像如图 11(a) 所示。由条纹区域放大图 11(b) 及区域放大灰度图 11(c) 可知, 该被测表面所得条纹边缘较为平整, 过渡清晰。条纹宽度及其边缘质量均符合设计要求。



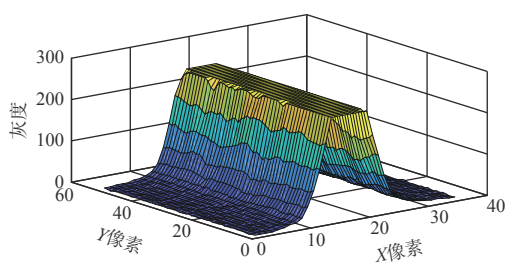
图 10 被测表面质量

Fig. 10 Surface quality of measured object



(a) 条纹整体图像

(b) 矩形区域放大图



(c) 放大区灰度图

图 11 宽度为 $8.96\ \mu\text{m}$ 的条纹图Fig. 11 Fringe pattern with width of $8.96\ \mu\text{m}$

4 结论

本文通过理论分析、设计并搭建高分辨率微线结构光测量系统。优化光路搭建方式,使得测量深度范围大幅提高。投影线宽小,更易实现高分辨、高精度测量。高分辨率远心微距镜头实现低畸变、大范围、大物距测量,大大改善了高倍显微镜仅能测量小薄工件的条件限制,应用范围更为广泛。实验结果表明,所搭建光学测量系统投影条纹长度 $1.5\ \text{mm}$,最小线宽可达 $8.96\ \mu\text{m}$,条纹边缘清晰、平滑;系统成像畸变极小,可实现 $1.62\ \mu\text{m}$ 的光学分辨率及 $0.54\ \mu\text{m}$ 的深度像素分辨率,工作距离 $65\ \text{mm}$,深度测量范围不低于 $140\ \mu\text{m}$ 。下一步预计将所搭建微线结构光测量系统应用于小模数齿轮齿廓等微小物体表面轮廓测量中,从而确定其实际测量效果。

参考文献:

- [1] 王颖,张瑞,张圆. 基于圆结构光视觉传感器的标定特征点获取方法[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 884-888.
WANG Ying, ZHANG Rui, ZHANG Yuan. Constructing method of calibration feature points used for circle structure light vision sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 884-888.
- [2] 符钦伟,杜宣,张燕,等. 半透明胶条表面光条中心线提取[J]. 光学精密工程, 2021, 29(4): 701-709.
FU Qinwei, DU Xuan, ZHANG Yan, et al. Extraction of laser stripe center on translucent glue strip surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(4): 701-709.
- [3] XU Xiaobin, FEI Zhongwen, YANG Jian, et al. Line structured light calibration method and centerline extraction: a review[J]. Results in Physics, 2020, 19(1): 103637.
- [4] LYU Shenzhen, SUN Qiang, ZHANG Yuyuan, et al. Projector distortion correction in 3D shape measurement using a structured-light system by deep neural networks[J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 204-207.
- [5] 朱统晶,周平,刘欣冉,等. 结构光三维测量系统标定的关键算法研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 848-852.
ZHU Tongjing, ZHOU Ping, LIU Xinran, et al. Crucial algorithms for structural light 3D measurement system calibration[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 848-852.
- [6] 王永红,张倩,胡寅,等. 显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 447-457.
WANG Yonghong, ZHANG Qian, HU Yin, et al. 3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry: a review[J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 447-457.
- [7] 李文涛,王培俊,唐晓敏. 钢轨磨损视觉测量的轮廓精确快速提取[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 238-244.
LI Wentao, WANG Peijun, TANG Xiaomin. Accurate and rapid contour extraction of visual measurement for rail wear[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1): 238-244.
- [8] GUO Xiaozhong, SHI Zhaoyao, YU Bo, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor[J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.
- [9] WU Xiaojun, TANG Na, LIU Bo, et al. A novel high precise laser 3D profile scanning method with flexible calibration[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020,

- 132(3): 105938.
- [10] JOSÉ S, AMALIA G, JUAN R, et al. LED source interferometer for microscopic fringe projection profilometry using a gates' interferometer configuration[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149(2): 106822.
- [11] KUMAR V, DUBEY A K, GUPTA M, et al. Speckle noise reduction strategies in laser-based projection imaging, fluorescence microscopy, and digital holography with uniform illumination, improved image sharpness, and resolution[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141(9): 107079.
- [12] 夏灵林. 激光毛化冷轧辊表面三维形貌测量及其评价方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- XIA Linglin. Measurement and evaluation for surface topography of laser roughen steel rolls [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [13] CHEN K P, SHI T L, LIU Q, et al. Microscopic three-dimensional measurement based on telecentric stereo and speckle projection methods[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(11): 3882.
- [14] ZHANG J, CHEN X, XI J, et al. Paraxial analysis of double-sided telecentric zoom lenses with four components[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 115103.
- [15] SHANG Z Y, WANG J H, ZHAO L, et al. a Measurement of gear tooth profiles using incoherent line structured light[J]. *Measurement*, 2022, 189(15): 110450.
- [16] PEI Yongchen, XIE Hailiang, TAN Qingchang. A non-contact high precision measuring method for the radial runout of cylindrical gear tooth profile[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138(7): 106543.
- [17] YAN Z H, HU F T, FANG J, et al. Multi-line laser structured light fast visual positioning system with assist of TOF and CAD[J]. *Optik*, 2022, 269(11): 169923.
- [18] 王乐, 方玥, 王胜春, 等. 基于Zemax的钢轨轮廓测量系统仿真模型研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(16): 191-103.
- WANG Le, FANG Yue, WANG Shengchun, et al. Research on simulation model of rail contour measurement system based on Zemax[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(16): 191-103.
- [19] WANG Y Z, CHEN J Q, PENG Y F. Surface reconstruction of microscale objects based on grid-patterned structured-light measurements[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2022, 28(1): 152-172.
- [20] 姚敏. 基于线结构光的视频内窥镜测量技术[J]. *应用光学*, 2016, 37(1): 91-95.
- YAO Min. Measurement method for video probe based on line-structured light[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 91-95.
- [21] LIU J H, WANG Y Z. 3D surface reconstruction of small height object based on thin structured light scanning[J]. *Micron*, 2021, 143: 103022.
- [22] WANG Y, GENG B, LONG C. Contour extraction of a laser stripe located on a microscope image from a stereo light microscope[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2019, 82(3): 260-271.
- [23] HOLST G C. Imaging system performance based upon FX/d [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 103204.
- [24] 汤东亮. 基于超振荡光场的远场超分辨成像原理和方法研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- TANG Dongliang. Investigation of far-field super-resolution imaging method based on super-oscillatory phenomenon[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics).