

文章编号:1001-5078(2024)04-0542-08

· 激光应用技术 ·

# 基于双激光视觉成像与BP算法的微小位移测量

李世雯<sup>1</sup>, 路恩会<sup>1,2</sup>, 郭耀村<sup>1</sup>, 朱兴龙<sup>1</sup>

(1. 扬州大学机械工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对现有单激光视觉微位移测量方法中利用的图像特征信息不丰富,导致测量结果不精确的问题,本文提出了一种直射与斜射结合的双激光微小位移测量方法,配合BP(Back Propagation)神经网络实现位移的高精度测量。论文采用透镜成像和小孔成像的原理对双激光模型进行理论分析,使用ZEMAX对测距模型进行数值模拟,以验证所提方法的理论可行性与优越性;其次,根据数值模拟结果设计并搭建实验平台进行图像采集实验,提取一系列图像特征作为BP网络的输入,以位移参数为输出,构建位移预测模型。实验结果表明,相比单激光模型,本文提出的双激光位移模型有更高的测量精度,引入BP神经网络后,测量准确度达到99%以上。本文为微小位移高精度测量提供了新方法与新思路。

**关键词:**双激光测距;位移测量;ZEMAX仿真;BP神经网络

中图分类号:TN247;TP391.41 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.009

## Tiny displacement measurement based on dual laser vision imaging and BP algorithm

LI Shi-wen<sup>1</sup>, LU En-hui<sup>1,2</sup>, GUO Yao-cun<sup>1</sup>, ZHU Xing-long<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the image feature information utilized in the existing single-laser visual microdisplacement measurement methods is not rich, which leads to inaccurate measurement results, a dual-laser microdisplacement measurement method combining direct and oblique shooting, together with BP (Back Propagation) neural network is proposed to achieve high-precision measurement of displacement. In this paper, the principles of lens imaging and small-aperture imaging are adopted to theoretically analyze the dual-laser model, and ZEMAX is used to numerically simulate the ranging model to verify the theoretical feasibility and superiority of the proposed method. Secondly, according to the numerical simulation results, the experimental platform is designed and constructed for image acquisition experiments, a series of image features are extracted as the inputs to the BP network, and the displacement prediction with the displacement parameters are used as the outputs to construct the displacement prediction model. The experimental results show that the dual-laser displacement model proposed in this paper has higher measurement accuracy compared with the single-laser model, and the measurement accuracy reaches more than 99% after the introduction of BP neural network. This paper provides a new method and new ideas for the high-precision measurement of tiny displacement.

**Keywords:** dual laser ranging; displacement measurement; ZEMAX simulation; BP neural networks

**基金项目:**科技部中日合作专项项目(No. 2017YFE0128400);扬州市市校合作专项项目(No. YZ2022184);绿杨金凤计划项目(No. YZLYJFJH2021YXBS097)资助。

**作者简介:**李世雯(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为视觉测量与定位。

**通讯作者:**路恩会(1990-),男,讲师,主要研究方向为粗糙度检测、深度学习、机器视觉。E-mail:luenhui@hnu.edu.cn

**收稿日期:**2023-07-13

## 1 引言

随着科学技术与制造工艺的不断发展,人们对距离检测的需求不断增强,在科学实验与工业生产这两方面最为突出。在这种强大的需求推动下,距离测量技术也经过了一次次的变革,从最初最简单的机械测量手段发展到电子测量手段,再到现在的光学测量手段<sup>[1-2]</sup>。其中激光光源作为核心器件的光学测量手段具有非接触、精度高和响应快等优点,因此受到了广泛关注,并且该技术也在不断更迭。

文献[3]利用小孔成像的原理设计了一种计算目标物体深度信息的几何测距方法,实现基于单目视觉的目标物体精确跟踪定位。文献[4]采用透镜成像的原理,采用边缘梯度检测和像素均值检测估测序列图像的位置。同时,文献[5]提出了一种基于视差的几何模型的立体视觉测距方法,其测距时间为181.59 ms,且距离小于1800 mm时,误差最大不超过2%。在微小位移测距中除了采用透镜成像关系来测距,还有其他激光测距方式,根据采用的激光类别不同,其精度等级也各不相同<sup>[6-7]</sup>。

激光测距不仅仅用于微小位移的测量中,国内外也进行了很多长距离测量的研究<sup>[8-9]</sup>,其中包括对长距离的定点测距和跟踪测距。

采用透镜成像和小孔成像的原理,精密测量的精度能达到微米级,但是无法达到纳米级,然而在文献[10]中,通过光纤传感器,该微位移光纤传感器的检测范围为0~25 μm,灵敏度最高可达10.32 nm/μm,纳米分辨率最低可达2 nm。此外,文献[11]提出了一种基于交替振荡光电振荡器的高精度微位移测量方法,其测量范围为20 mm,测量精度小于300 nm。另外,文献[12]介绍了一种改进的激光自混合光栅干涉仪,利用该系统,可以在目标(光栅)上应用不同形式的微位移信号,精度可达几纳米。还有,文献[13]提出了一种利用多个平行光抽运自旋vcSEL中混沌x偏振分量数目对矩形目标内多区域进行精确测距的新方案,该方法具有小于0.28%的相对误差,其距离分辨率可达0.9 mm,并表现出优异的抗噪声性能。

综上所述,激光视觉测距已经得到了长足的发展。然而上述单激光方法存在一定局限性。在采用单激光斜射法进行测量时,光斑会因为镜头边缘的

形状导致畸变;而在采用单激光直射法测量时,则无法判别位移是在焦点哪一侧。为了解决这个问题,本文采用透镜成像和小孔成像结合原理提出斜射与直射相结合的双激光视觉微小位移测量方法。此外,BP神经网络在测距领域已有广泛应用,效果较好<sup>[14]</sup>,本文引入神经网络构建预测模型以提升测量精度。

## 2 点光源视觉测距理论

在视觉检测中,最重要的在于相机、目标物以及光源之间的关系,当物距移动 $D$ 时,焦点相对移动距离为 $S$ ,如图1所示,则:

$$S = \frac{v^2 D}{u^2 + Dv + Du} \quad (1)$$

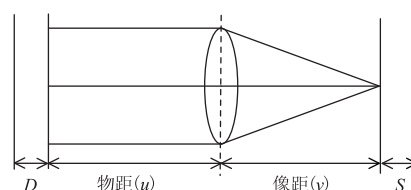


图1 透镜成像原理图

Fig. 1 Principal diagram of lens imaging

本文采用透镜成像和小孔成像的原理,设计了直射法与斜射法相结合的双激光测距模型,将相机的镜头组看成是一个透镜,相机的CCD面则为一个像面,激光照射在目标物上,形成一个物面。

如图2所示,工业相机、分光镜、目标物放在同一根轴线上,分光镜与中轴线成45°角,红色激光可以通过分光镜一部分光线反射到样块中心位置,形成直射光,另一部分光线透过分光镜。绿色激光与中心轴线形成一定角度,使得反射激光可以进入相机CCD面上。根据透镜成像的规律找到目标物的清晰位置,再根据小孔成像的原理观察CCD成像面上光斑的变化。

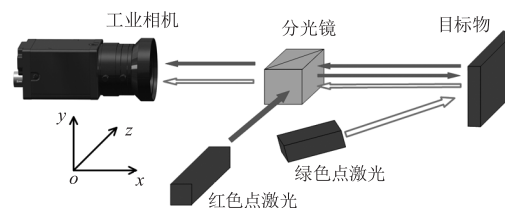


图2 双激光模型光径图

Fig. 2 Dual laser model optical path diagram

## 3 基于ZEMAX的点光源测距仿真成像

### 3.1 成像仿真模型构建

本文设计了一款序列模式的透镜成像系统,采用一个简化透镜表示相机的镜头组,根据点光源视

觉测距理论,先后设计了直射法和斜射法两种点激光放置方式,如图 3 所示。

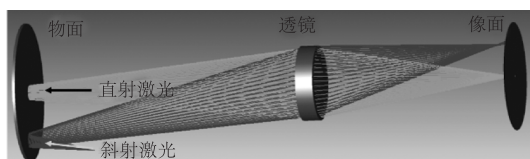


图 3 直射法和斜射法两种点激光放置

Fig. 3 Direct and oblique method of two-point laser placement

选择孔径类型为入瞳直径,孔径值设置为 10 mm,波长设置为  $0.55 \mu\text{m}$ ,温度设置为  $20^\circ\text{C}$ ,压力设置为 1.0 ATM,设置两个视场,视场 1 是  $X$  轴角度为  $0^\circ$ , $Y$  轴角度为  $-10^\circ$  的斜视视场,视场 2 是  $X$  轴角度为  $0^\circ$ , $Y$  轴角度为  $0^\circ$  的直射视场,如表 1 所示。光阑厚度设置为 4 mm,像面与透镜表面的距离固定设置为 30 mm,点激光放置位置固定,距透镜为 32 mm。

表 1 仿真参数的设置

Tab. 1 Setting simulation parameters

参数	数值
孔径值/mm	10
波长/ $\mu\text{m}$	0.55
温度/ $^\circ\text{C}$	20
压力/atm	1.0
视场 1/ $^\circ$	$X=0, Y=-10$
视场 2/ $^\circ$	$X=0, Y=0$

### 3.2 仿真样本获取

仿真总计 3 次实验,如表 2 所示。

表 2 仿真实验的设计

Tab. 2 Design of simulation experiments

仿真序号	物距间隔/mm	物距范围/mm
1	1	35 ~ 46
2	0.1	35 ~ 46
3	0.01	38 ~ 40

第一次仿真确定焦点范围后选取 35 ~ 46 mm 作为测距范围。

第二次仿真观察像面上的直射法产生的光斑点与斜射法产生的光斑点。对于直射法,光斑始终为圆形,所以选取光斑半径作为因变量,随着物距的变化,观察光斑半径的变化。对于斜射法,光斑为椭圆形,首选取椭圆的长短径作为因变量,随着物距的变

化,观察光斑形状的变化。同时选取光斑中心点与像面中心坐标原点之间的距离作为因变量,观察随着物距的变化,光斑位置的变化。

第三次仿真确定最清晰点位置并以 0.01 mm 为距,依次选取 38 ~ 40 mm 范围内数据点,观察直射法和斜射法光斑在这个范围内的具体变化。

### 3.3 可行性验证

如图 4 所示,根据第二次实验拟合得到的直射法光斑与距离之间的关系。从图中可以看出在物距为 39.2 mm 时取得光斑最小值。当物距处于 35 ~ 39.2 mm 时,光斑半径与物距成单调递减函数。当物距处于 39.2 ~ 46 mm 时,光斑半径与物距成单调递增函数。两段函数通过数据拟合可达 99.78 % 以上。然而,已知一个光斑半径时,很难判断出目标物位移,即很难判断数据点在两段函数中的哪一段。

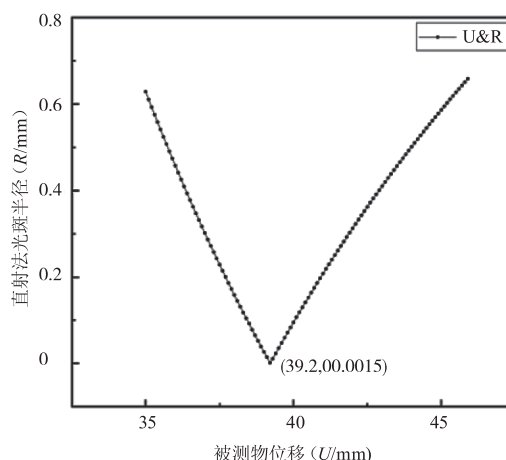


图 4 直射法光斑大小与位移之间的关系

Fig. 4 Relationship between spot size and displacement by direct injection method

图 5 为斜射法得到的光斑中心到 CCD 面中心的距离与目标物位移的拟合线。根据散点数据拟合的拟合优度为 74 %。原因是在焦点附近,斜射法的光线穿过透镜的中间和两端的折射度不同,会导致光线在焦点附近多次交叠,延长了焦点的范围。并且在焦点附近的光斑也不再是标准的椭圆形,对于不规整形,取得其长短径的数值也不准确,从而导致准确度不高。因此得知,当斜射法物距在焦点附近移动时,不再是单调函数。

除去在焦点位置,斜射法光斑位置与物距位移之间成单调递增函数,但是由于存在焦点位置的大范围波动,其准确度还是不够高。斜射法的光斑能量图也没有直射法的能量图清晰,如图 6 所示。

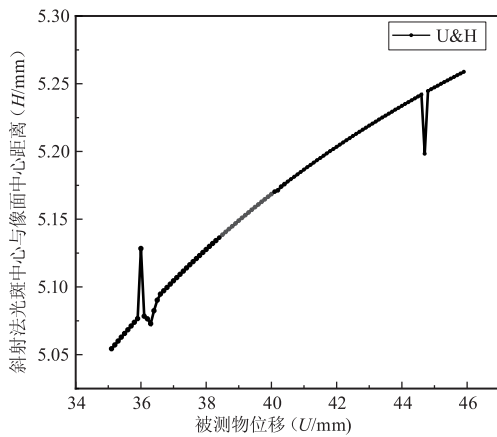


图5 斜射法光斑位置与位移之间的关系  
Fig.5 Relationship between spot position and displacement by oblique projection method

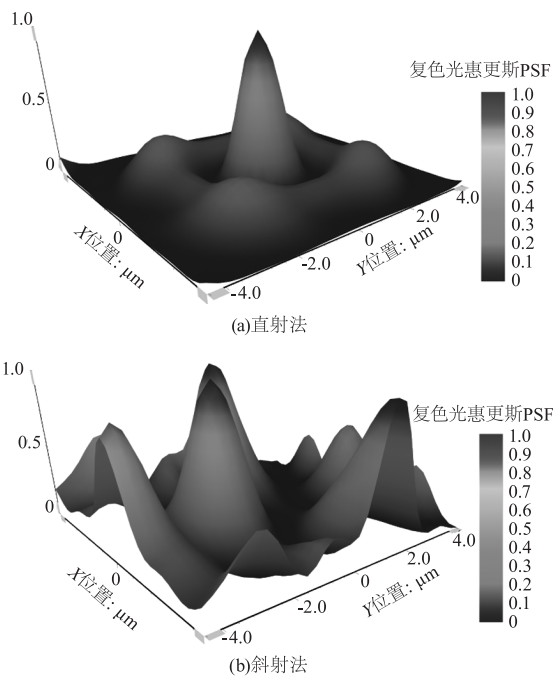


图6 光斑能量图

Fig. 6 Light spot energy diagram

综上所述,两种激光入射方式各有优点,直射法由于光斑位置一直在像面中心而不会产生较大的变动,适合作为测距的直接关联关系。斜射法由于光线与镜头之间的折射关系,不适合直接用于精密位移测量,但是可以采用斜射法辅助判断目标物相对于焦点的位置。因此可以结合两种方法的光斑图实现对目标位移的精确测量。

## 4 实验设计

### 4.1 实验方案设计

选择 300 mm × 600 mm 的光学隔振平台,其次选择 X 轴一维精密微调的移动平移滑台、Z 轴微

调升降平台和 XZ 轴精密微调移动光学滑台。这三个位移平台的 X 轴行程为 13 mm,Z 轴行程为 10 mm。选用 BASLER acA2500 - 14gc 工业相机,将相机放置在 XZ 轴精密微调移动光学滑台上组成相机模组。选用  $\phi 25$  40R/60T 的分光镜,将分光镜安装在 45° 镜片架上固定在 Z 轴微调升降平台上组成分光镜模组。选用波长为 520 nm 的绿色点激光作为斜射光,波长为 650 nm 的红色点激光作为直射光,将点激光分别安装在支架上组成激光模组。

如图 7 所示,将相机模组放置在光学平台的最左侧。调整好分光镜模组方向,保证光线可以反射到相机内,将分光镜模组放置在相机镜头右侧。将目标物固定在 X 轴一维精密微调的移动平移滑台上,放置在光学平台的最右侧,采用吸铁石将样块与平移滑台连接在一起。将红色激光模组放置在分光镜前让红点激光透过分光镜反射至样块上形成直射光线,绿色点激光直接照射到物体表面上,其反射光线穿过分光镜被相机捕捉到。调节相机在 X 轴和 Z 轴的位置,精准捕捉到两个光点。

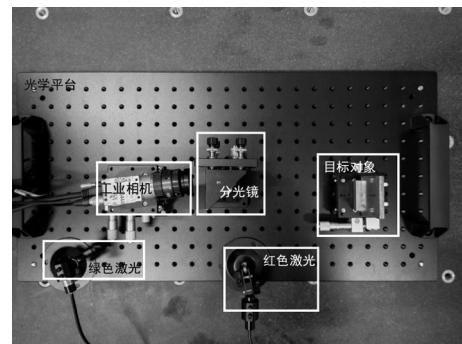


图7 双激光测距装置

Fig.7 The dual laser ranging device

### 4.2 实验步骤

实验总共 3 个步骤:

(1) 将准备好的目标物放置在 X 轴一维精密微调的移动平移滑台上,调节相机的焦距,使得画面清晰,样块清晰。调节红绿激光,采用镜子代替目标物,模拟粗糙度为 0 的理想状态,调整好激光的位置。

(2) 为了避免样块微观形貌对结果的影响,实验采用粗糙度为 0.8  $\mu\text{m}$  镜面完成实验。采用镜面作为物面时,CCD 成像面中除了会出现镜子上反射的实像,也会出现镜子上反射出来的虚像,实像与虚



像区别较大,易于分辨,对实验结果影响不大。

(3)将镜子固定在  $X$  轴一维精密微调的移动平移滑台上,在调节好焦距之后将目标物提前调节到焦点后的位置,在实验时就可以按照  $X$  轴的正方向一直前进,以便于获取焦点前后数据。

### 4.3 图像样本获取

先将目标物固定在  $X$  轴位移平台量程中间的 5 mm 位置,调节好焦距后,将目标物调至 10 mm 处,确保两个光点都能被 CCD 面捕捉到后,分别采取 0.2 mm 步距和 0.1 mm 步距,将目标物从 10 mm 处平移至 0 mm 处,获取 50 和 100 个测点图像。实验重复三组,实验过程中保持样块、激光、分光镜以及相机固定无扰动,将实验图像依次标记。

## 5 结果与分析

### 5.1 数据分析流程

图 8 所示为数据分析流程图。

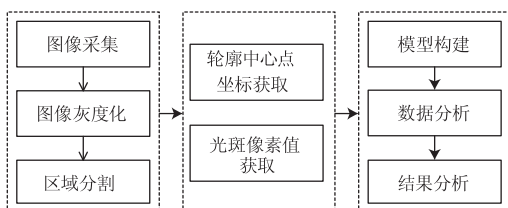


图 8 数据分析流程图

Fig. 8 Flow chart of data analysis

### 5.2 图像处理

仿真数据处理时采用 4 个输入指标,分别是直射法光斑的半径  $R$ ,表示直射法光斑的大小;斜射法光斑的长半径  $A$  和  $B$ ,表示斜射法光斑的大小;以及直射法光斑和斜射法光斑之间的距离  $H$ ;输出是物面的位移  $D$ 。

实验数据处理时采用 6 个输入指标,与仿真数据输入的 4 个指标一一对应,分别是直射法光斑和斜射法光斑的像素点个数  $R_1, R_2$ ,代表着直射法和斜射法光斑的大小;直射法和斜射法光斑的位置  $A_1, B_1$  和  $A_2, B_2$ ,代表着直射法和斜射法光斑之间的位置;输出是物面的位移  $D$ 。输入输出关系如表 3 所示。

仿真与实验的图片如图 9 和图 10 所示。在实际实验过程中很难将直射法的激光束调至仿真时的状态,激光束无法实现光点的完全重合,只能采用微偏置的激光,此时打在分光镜上的光点与反射出来的光点会同时存在于 CCD 面上。

表 3 仿真与实验的数据分类

Tab. 3 Data classification of simulation and experiment

仿真数据分类		实验数据分类	
输入	输出	输入	输出
$R$	$D$	$R_1$	$D$
$A$		$R_2$	
$B$		$A_1$	
$H$		$B_1$	
		$A_2$	
	$B_2$		

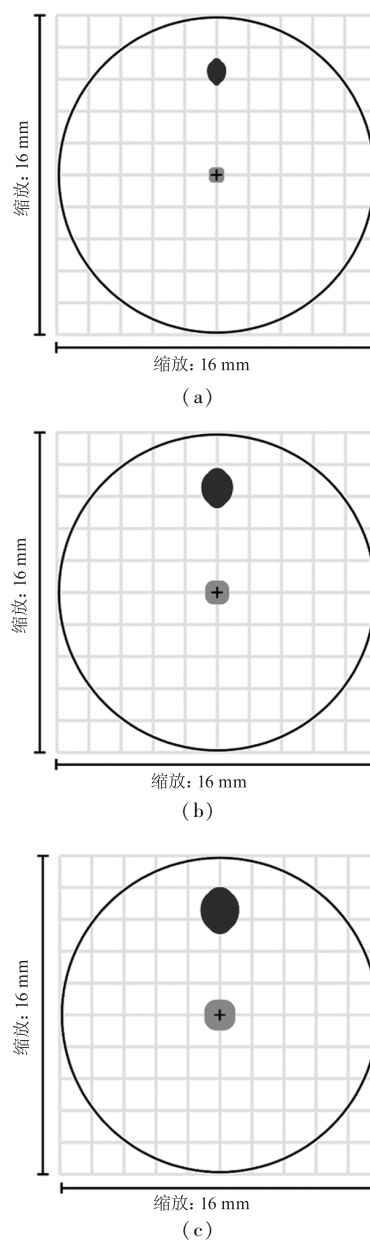


图 9 仿真物距不同时 CCD 所呈现的图像  
Fig. 9 Simulation of the image presented by the CCD at different object distances

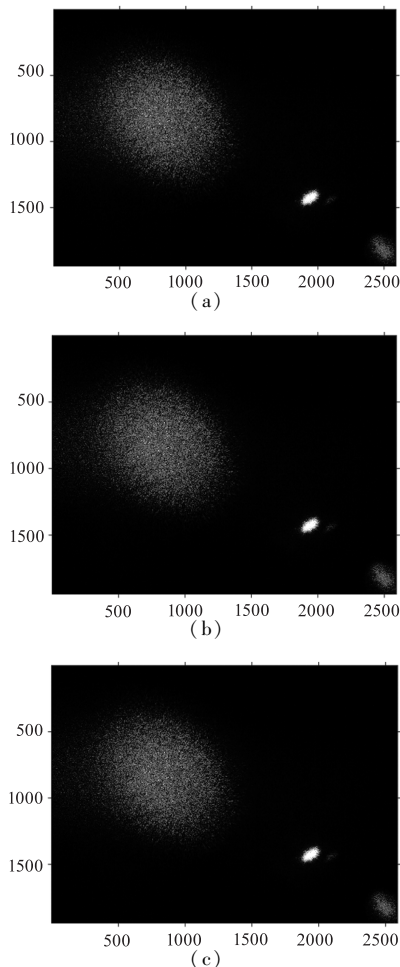


图 10 目标物为镜面时 CCD 所呈现的图像  
Fig. 10 Image presented by the CCD when the target is a mirror

由于是镜面反射的原因,图片中会出现重影(图 10),相应颜色的重影存在映射关系,而采用有粗糙度的物面时则不会出现重影(图 11)。

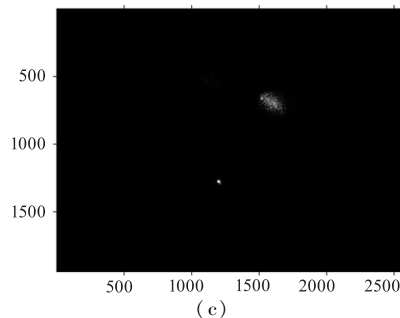
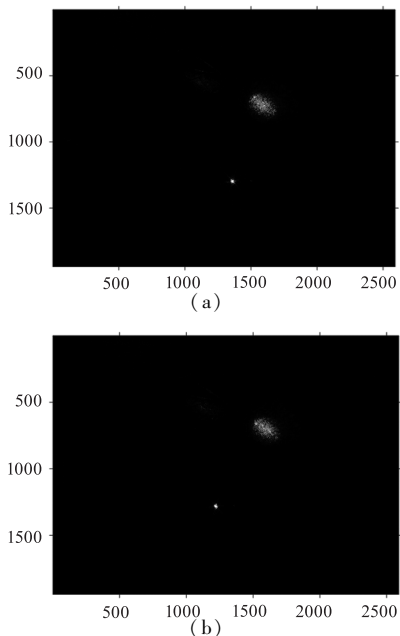


图 11 目标物为光滑物面时 CCD 所呈现的图像  
Fig. 11 Image presented by CCD when the target object is a smooth object surface

根据仿真和实验图像可提取出上述特征构建预测模型,特征提取图像处理步骤如图 12 所示。

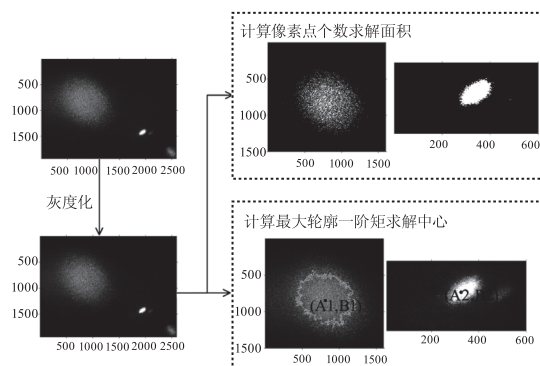


图 12 特征提取图像处理步骤

Fig. 12 Image processing steps for characteristics' extraction

### 5.3 可行性验证

论文选用 BP 神经网络构建位移预测模型,其中 80 % 的数据集来训练模型,剩余的 20 % 数据集进行预测和评估模型的性能。将 5.2 节得到的仿真与实验特征数据分别输入到 BP 神经网络之中,选择选择隐含层层数为 1 层,隐含层节点数为 10,得到仿真与实验的预测模型。图 13 为采用实验数据构建的 BP 网络图。采用仿真数据构建模型时,只改变输入参数即可。

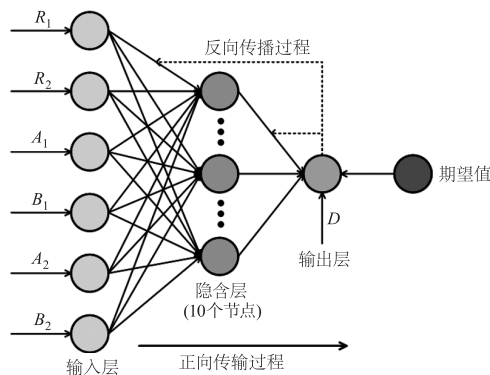


图 13 BP 神经网络结构

Fig. 13 BP neural network structure

如表 4 所示,仿真数据的准确度为 99.999%,实验数据的准确度为 99%,证明本文方法可行性。

表 4 BP 神经网络双激光模型预测结果

Tab. 4 Prediction results of BP neural network dual-laser model

序号	训练准确度 /%	测试准确度 /%	验证准确度 /%	综合准确度 /%
仿真	99.999	99.999	100	99.999
实验 1	99.959	96.875	99.791	99.321
实验 2	99.681	99.554	98.682	99.564
实验 3	99.583	99.361	98.589	99.380

#### 5.4 优越性验证

为了验证双激光的优越性,本文基于单激光的测距模型进行位移预测。其中输入数据有 3 个特征指标,分别为单激光的像素点个数  $R$ 、单激光的坐标  $A_3, B_3$ ,输出是目标物的位移  $D$ 。

预测结果如表 5 所示,实验数据准确率最高只有 93%,与双激光得到的 99% 准确率差距较大。论证了本文所提方法的优越性。

表 5 BP 神经网络单激光模型预测结果

Tab. 5 BP neural network single laser model prediction results

序号	训练准确度 /%	测试准确度 /%	验证准确度 /%	综合准确度 /%
实验 1	92.456	97.009	94.636	93.412
实验 2	81.342	94.007	82.290	87.468
实验 3	82.189	92.081	74.335	82.498

## 6 结论

论文提出了一种双激光微小位移测距方法,配合 BP 神经网络实现了微位移的精确预测。主要结论如下:

(1) 采用 ZEMAX 对双激光模型进行仿真分析,该双激光模型的仿真准确度达到 99.999%,证明可行。

(2) 设计搭建了实验平台,实验的被测样块采用镜面的形式,采用双激光的模型,用工业相机记录每次位移之后光斑的情况。

(3) 提取图像中像素点的信息和光斑位置信息,将信息输入到 BP 神经网络中,实验准确度达到 99.56%。

结果显示,实验准确度远高于单激光测距准确

度。但是实验没有给出测距误差范围,未来将对实验数据进一步测试,计算测量精度。

#### 参考文献:

- [1] Xie S, Zeng H, Pan Y, et al. Bi-directional PRN laser ranging and clock synchronization for TianQin mission[J]. Optics Communications, 2023, 541: 129558.
- [2] Lu Xiaojie, Han Guicheng, Yao Bo, et al. Research on calibration technology of thermal infrared camera binocular ranging system[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 567-572. (in Chinese)  
陆晓杰, 韩贵丞, 姚波, 等. 热红外相机双目测距系统标定技术研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 567-572.
- [3] Yu Naigong, Huang Chan, Lin Jia. Research on robot target localization and ranging method based on monocular vision[J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(10): 2654-2656, 2660. (in Chinese)  
于乃功, 黄灿, 林佳. 基于单目视觉的机器人目标定位测距方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(10): 2654-2656, 2660.
- [4] Ma Qian, Zhu Xinglong, Yin Junyao. A method for estimating clear imaging based on ellipsoidal speckle sequence images[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(3): 363-370. (in Chinese)  
马倩, 朱兴龙, 尹珺瑶. 基于椭圆斑点序列图像估测清晰成像的方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(3): 363-370.
- [5] Gu Jinfeng, Liu Xiangyong, Ji Yaqiang, et al. A stereo visual ranging method based on parallax geometric model[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 32(6): 809-815. (in Chinese)  
顾金凤, 刘祥勇, 纪亚强, 等. 基于视差几何模型的立体视觉测距方法[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2018, 32(6): 809-815.
- [6] Xue D, Chen C J. Novel linear programming models based on distance measure of IFSs and modified TOPSIS method for portfolio selection[J]. Egyptian Informatics Journal, 2022, 23(4): 13-31.
- [7] Mehdi K, Shin ChanH, Khosro G, et al. Assimilation of GRACE follow-on inter-satellite laser ranging measurements into land surface Models[J]. Water Resources Research, 2023, 59(3).
- [8] Hu B, Zhang Y F, Wu C P et al. Research on image based

- underwater three-point laser ranging method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48 (10): 122 - 131. (in Chinese)
- 胡波,张云菲,吴超鹏,等. 基于图像的水下三点激光测距方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48 (10): 122 - 131.
- [9] Li Z, Liu B, Wang H, et al. Advancement on target ranging and tracking by single-point photon counting lidar [J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 29907 - 29922.
- [10] Zhu Z, Liu L, Liu Z, et al. High-precision micro-displacement optical-fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1982 - 1985.
- [11] Wang J, Guo X, Yu J, et al. High-precision micro-displacement measurement method based on alternately oscillating optoelectronic oscillators [J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5644 - 5656.
- [12] Guo D, Shi L, Yu Y, et al. Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple-diffraction [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (25): 31394 - 31406.
- [13] Zhong D, Zeng N, Yang H, et al. Precise ranging for the multi-region by using multi-beam chaotic polarization components in the multiple parallel optically pumped spin-VCSELs with optical injection [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7809 - 7824.
- [14] Chen Yaowei, Peng Daogang, Xia Fei, et al. Infrared image recognition based on region growing method and BP neural network [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48 (3): 401 - 408. (in Chinese)
- 陈跃伟,彭道刚,夏飞,等. 基于区域生长法和BP神经网络的红外图像识别 [J]. *激光与红外*, 2018, 48(3): 401 - 408.