

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514654

液体透镜调控的可变结构光投射方法研究*

甘子豪, 洪华杰, 刘召阳, 张萌, 吕建明
(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

摘要:针对多线结构光因其线间隔角度固定、景深窄等带来的能力瓶颈,提出了一种液体透镜调控的新型多线结构光投射系统,并形成光条纹特征参量的调节方法。首先,在给出系统设计构型的基础上,建立基于双液体透镜的结构光投射参数模型,形成非线性规划与遗传算法双层优化的结构参数求解方法。然后,面向不同投射距离条件下结构光条纹的调节问题,给出液体透镜的控制策略,提出描述从系统调节参数映射到线间隔角度的神经网络结构。最后,搭建液体透镜调控的可变结构光投射系统实物平台,并设计实验对系统性能及方法有效性进行测试验证。与传统方案相比,该方法能够大大拓展多线结构光的有效投射距离区间(保持光条纹线宽在1.25 mm以内);系统通过协同调节双液体透镜的输入电流(工作过程无移动组件),能够生成线间隔角度在 $0.537^\circ \sim 0.986^\circ$ 范围动态可调的结构光条纹,其角放大率可达1.836。基于标定获取的数据集生成双液体透镜参数到线间隔角度的映射网络模型,经测试,该模型对线间隔角度的预测误差平均为1.07%。结果表明,所提系统及方法能够根据目标的实际大小、位置等因素灵活调节多线结构光条纹的疏密程度,并严格控制光条纹线宽,研究成果可为提升多线结构光探测性能提供新的技术路径。

关键词: 液体透镜; 结构光; 光条纹线宽; 线间隔角度; 神经网络

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

A liquid-lens-controlled method for variable structured-light projection

Gan Zihao, Hong Huajie, Liu Zhaoyang, Zhang Meng, Lyu Jianming

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To address the capability bottlenecks of multi-line structured light caused by fixed line spacing angle and narrow depth of field, this paper proposes a novel multi-line structured light projection system regulated by liquid lenses and develops a method for adjusting the characteristic parameters of light stripes. Firstly, based on the given system design configuration, a structured light projection parameter model based on dual liquid lenses is established, and a bi-level optimization method for solving structural parameters is formed by combining nonlinear programming and genetic algorithm. Then, to adjust the structured light stripes under varying projection distance, a control strategy for the liquid lens is provided, and a neural network structure is proposed to model the mapping from system parameters to line spacing angles. Finally, a physical prototype of a liquid-lens-controlled variable structured-light projection system is constructed, and a series of experiments are designed and conducted to evaluate system performance and verify the effectiveness of the proposed method. Compared with traditional schemes, this method has the ability to substantially extend the effective projection distance of multi-line structured light (keep the linewidth of light stripes within 1.25 mm). By coordinately regulating the input currents of the dual liquid lenses (without moving components during operation. The system is able to generate dynamically adjustable structured-light fringes with inter-line spacing angles ranging from 0.537° to 0.986° , achieving an angular magnification of up to 1.836. Based on the dataset obtained through calibration, a mapping network model is constructed to relate the dual liquid-lens parameters to the inter-line spacing angle. Experimental evaluation shows that the model achieves an average prediction error of 1.07% for the inter-line spacing angle. These results demonstrate that the proposed system and method can flexibly adjust the density of multi-line structured-light fringes according to factors such as the target's size and position, while strictly controlling the stripe linewidth. The proposed approach provides

收稿日期: 2025-11-05 Received Date: 2025-11-05

* 基金项目: 国家自然科学基金(62305386)、国防科技大学自主创新科学基金(24-ZZCX-JDZ-21)项目资助

a new technical pathway for enhancing the detection performance of multi-line structured-light systems.

Keywords: liquid lenses; structured light; the linewidth of light stripes; line spacing angle; neural network

0 引言

使用机器人搭载视觉设备在低照度的地下环境开展侦察、排爆等任务逐渐成为研究的热点方向^[1]。结构光法是一类主动式光学三维测量方法,能够在光照不足(甚至无光)、缺乏纹理的场景下完成视觉检测^[2-4],有望作为机器人的“眼睛”引导系统实现高效作业。多线结构光视觉是通过投射多条线激光到物体表面,结合视觉传感器捕捉光线变形信息,实现物体三维形貌的快速重建,与机械扫描配合单线结构光的方案相比,具有显著的效率优势^[5-6]。然而,当前多线结构光视觉系统中,投射条纹的疏密通常是预先设定的固定参数,无法根据被测目标的实际大小、位置及测量需求进行动态调节^[7-8],这一局限性可能引发两类问题:当目标尺寸大于预设投射范围或位置偏离投射中心时,固定疏密的条纹难以完整覆盖目标全貌,导致部分区域因缺乏光纹特征而无法完成三维重建;而当目标尺寸远小于投射范围时,过疏的条纹会使单位面积内的光纹数量不足,目标表面的细节特征无法被充分捕捉,最终影响三维测量的完整性与精度。

液体透镜是一类基于仿生学概念发展起来的新型光学元件,其原理是通过改变液体界面轮廓曲率实现焦距自主调节^[9-10]。目前,国内外相关单位主要将液体透镜技术应用于成像系统,开展了液体光学变焦系统设计的研究,并形成相关的设计方法与原理样机^[11-14]。与全固体镜头相比,液体光学镜头在响应速度、结构体量上具有显著优势^[15-16]。针对多线结构光视觉存在的能力局限性,本文利用液体透镜的自适应调节特性,提出一种新型的可变结构光投射系统技术方案,进一步开展系统优化设计与结构光条纹调控的研究。

1 系统设计方法

1.1 结构布局

本文提出一种新型的非位移式可变结构光投射系统,其构型如图1所示。该系统由2个液体透镜和1个多线激光器构成。

其中,多线激光器通过衍射光学元件(diffractive optical element, DOE)对单束激光进行分束,再经柱面透镜整形后生成以不同的衍射角(不同的视场角)出射的多条高斯光束,在垂直方向形成线阵光条纹,将其作为结构光的初始光源,液体透镜1主要承担投射距离远近的调节功能,液体透镜2主要承担线间展角的调节功能。

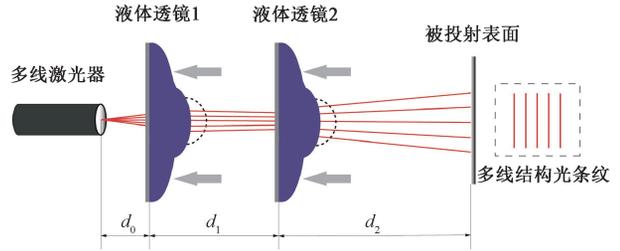


图1 非位移式可变结构光投射系统的组成

Fig.1 The composition of a non-displacement variable structured light projection system

通过按照一定规律调节两个液体透镜的输入电流,能够有效控制投射结构光条纹的疏密和距离,从而适应不同尺度目标在不同距离下的三维感知需求,整个工作过程无移动组件。

1.2 结构参数优化

对图1所示的可变结构光投射系统进行结构参数设计,液体透镜1和液体透镜2共同改变投射光线的传播方向,从而调制相邻线结构光的实际间隔角度 $\Delta\theta$ 。在近轴条件下,线激光通过双液体透镜系统后的偏角计算需采用逐次光线追迹法,将液体透镜作为薄透镜处理,分两步推导:先计算经液体透镜1后的偏角,再以此为入射条件计算经液体透镜2后的最终偏角,可推导出经液体光学系统调制后的结构光线间隔角度 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = [1 - \varphi_1 d_0 - \varphi_2 (d_0 + d_1) + \varphi_1 \varphi_2 d_0 d_1] \cdot \Delta\theta_0 \quad (1)$$

式中: φ_1 和 φ_2 分别为液体透镜1和液体透镜2的光焦距; d_0 为激光器出射面到液体透镜1的距离; d_1 为液体透镜1到液体透镜2的距离; $\Delta\theta_0$ 为多线激光器线间隔的初始角度。将双液体透镜组合系统对多线结构光的放大率表达为:

$$M = 1 - \varphi_1 d_0 - \varphi_2 (d_0 + d_1) + \varphi_1 \varphi_2 d_0 d_1 \quad (2)$$

液体透镜的光焦距是在一定范围可调的变量,当仅改变一个液体透镜的光焦距时,线结构光的间隔角度产生变化,且光束聚焦位置也会相应改变,这可能导致光条纹出现模糊、线宽变大的现象,严重影响结构光检测质量,对此需要两个液体透镜按照一定规律协同调控,才能使得系统工作过程中光束聚焦位置始终保持相对稳定。多线激光器发射光束的聚焦面实际为接近平面的曲面,这里将其作为平面处理,通过高斯括号法^[17]可以推导出反映结构光投射聚焦面偏移情况的函数式为:

$$B = (1 - d_0 \varphi_1) \cdot d_2 + (d_0 + d_1 - d_0 d_1 \varphi_1) \cdot (1 - \varphi_2 d_2) \quad (3)$$

式中: φ_0 为多线激光器的光焦距; d_2 为液体透镜 2 到被测目标表面的距离。理想状态下 $|B| \approx 0$ 。受液体透镜外部结构尺寸的影响, d_1 存在最小值限制, 同时为实现系统整体小型化, 需对 $d_0 + d_1$ 的最大值进行限定, 基于以上分析存在的关系为:

$$\begin{cases} \varphi_1 \in [-\delta, \delta] \\ \varphi_2 \in [-\delta, \delta] \\ \{d_0, d_1, d_2\} \subset \mathbb{R}^+ \\ d_1 \geq t \end{cases} \quad (4)$$

式中: δ 为液体透镜可调的最大光焦距值, 由器件本身性能决定; t 为液体透镜外部结构的厚度。为使激光器出射的线激光完全通过液体光学系统, 应满足的约束条件为: 1) 最外侧线激光到达液体透镜 1 的入射高度小于液体透镜光学口径的一半; 2) 最外侧线激光到达液体透镜 2 后端的入射高度小于液体透镜光学口径的一半。由此推导

出系统参数应满足的不等式关系为:

$$\begin{cases} \tan[(n-1) \cdot \Delta\theta_0/2] \cdot d_0 < C_L/2 \\ \tan[(n-1) \cdot \Delta\theta_0/2] \cdot [d_0 + (1-\varphi_1)d_0] \cdot (d_1 + t/2) < C_L/2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为使用的线激光条数; C_L 为液体透镜的光学口径。用 K 表征系统角放大率的可调节能力, 其函数表达式为:

$$K = \frac{\max\{M(\varphi_1, \varphi_2, d_0, d_1)\}}{\min\{M(\varphi_1, \varphi_2, d_0, d_1)\}} \quad (6)$$

在满足约束条件式(3)~(5)的前提下, 应使 K 尽可能大, 需获得最优状态下对应 d_0 和 d_1 的解作为结构设计参数。由此建立了基于双液体透镜的多线结构光投射参数模型。

对此, 本文提出一种结合非线性规划与遗传算法(genetic algorithm, GA)的双层优化求解方法, 设计参数计算方法如图 2 所示。

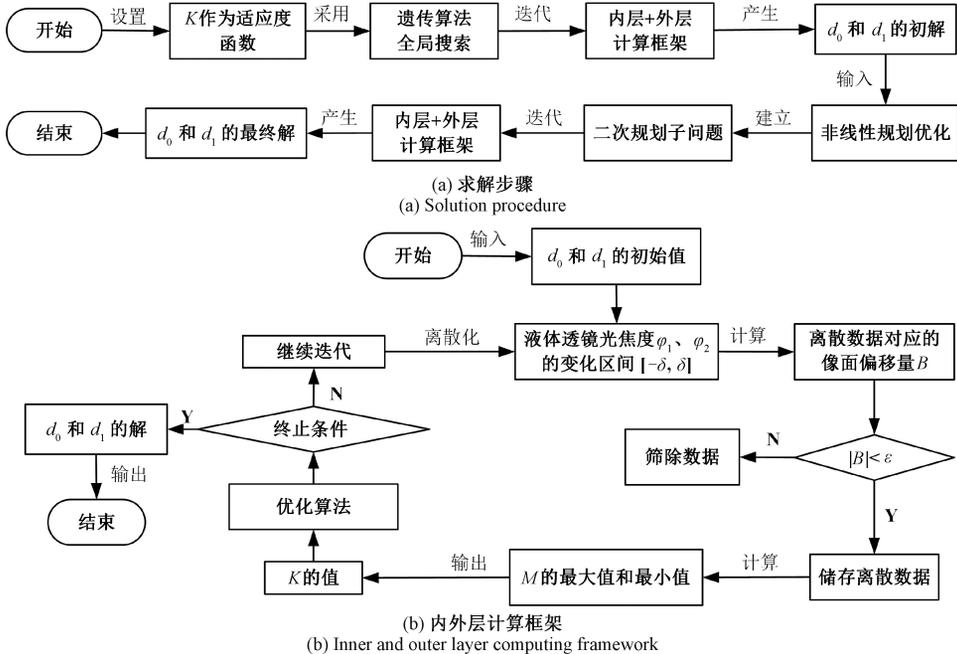


图 2 可变结构光投射系统的设计参数计算方法

Fig. 2 Calculation method for design parameters of variable structured light projection system

实现步骤如图 2(a) 所示, 具体为:

1) GA 生成初解

GA 算法凭借其模拟生物进化的特性, 具备强大的全局搜索能力, 能在复杂的非凸解空间中寻找潜在的优质解, 本文利用 GA 算子的全局搜索能力对内外层进行优化计算, 生成 d_0 和 d_1 的初解。以 $K(d_0, d_1)$ 作为适应度函数, 设置种群规模, 以染色体适应度的大小来确定该染色体被遗传到下一代种群中的概率, 通过选择、交叉和变异生成子代, 完成指定迭代次数后输出 d_0 和 d_1 的初解。

2) 非线性规划局部精细化求解

将 GA 算法得到的最优个体作为非线性规划优化的初始解输入, 利用目标函数和约束条件的一阶、二阶导数信息 (Hessian 矩阵), 构建一个二次规划子问题, 该子问题的目标函数是原目标函数的二次近似, 通过求解二次规划子问题得到搜索方向, 沿此方向更新解点, 重复这一过程, 逐步逼近满足 Kuhn-Tucker 条件的局部最优解。

求解过程涉及的内外层计算框架如图 2(b) 所示, 设计思路为:

1) 内层优化

当 GA 求初解时, d_0 、 d_1 均取 t 作为初始值输入; 当非线性规划求最终解时, d_0 、 d_1 取 GA 求解结果作为初始值输入, 固定 d_0 、 d_1 参量, 将 φ_1 和 φ_2 的变化区间 $[-\delta, \delta]$ 进行等间隔离散化处理, 计算所有离散点处对应的 B 值, 式(3)为理想情况, 实际上当 $|B| < \varepsilon$ (ε 取 0.05) 时, 即可保证结构光在被测物表面处于稳定聚焦状态, 根据该条件筛选出符合的离散点, 代入式(2)中计算出 M 的全局最大值和最小值, 从而得到 K 的值。

2) 外层优化

根据式(4)和(5)设置变量的边界或函数约束, 选择 GA 或非线性规划作为优化算法, 通过优化算法搜索 $K(d_0, d_1)$ 的最大值, 进而得到 d_0 和 d_1 的解。

2 结构光条纹调控

2.1 液体透镜的控制策略

为生成高质量的结构光条纹, 本研究通过调节液体透镜 1 的输入电流使结构光聚焦于被测表面, 从而满足对不同远近目标的投射需求。在系统工作过程中, 液体透镜 1 采用清晰度评价结合自适应步长搜索的控制策略, 通过 CCD/CMOS 相机采集结构光图像, 根据清晰度评价函数生成的数值, 通过自适应步长的爬山搜索算法调节液体透镜 1 的电流, 直至达到最佳聚焦状态, 具体要点设计为:

1) 图像清晰度评价

考虑到多线结构光条纹具有相近的主方向, 且各条纹的宽度和强度分布相似^[18], 设计了一种方向自适应的清晰度评价函数。首先, 采用 Canny 边缘检测增强条纹特征, 通过霍夫变换检测光条纹角度; 然后, 根据检测的主方向 α , 生成垂直方向 ($\alpha+90^\circ$) 的 Sobel 算子; 最后, 采用旋转后的 Sobel 算子计算梯度, 取梯度的平方和均值作为清晰度评价函数。

2) 自适应搜索算法

设置初始调节电流步长 s 和初始调节方向, 每调节一次电流后计算结构光图像的清晰度评价, 若清晰度提升, 步长以 1.2 倍率增大加速搜索, 若清晰度下降, 步长缩至 70% 并反向搜索, 持续迭代直至达到终止条件。终止条件设置为清晰度变化率小于设定阈值。

2.2 特征参量的映射关系建模

结合本文 1.2 节中系统总角放大率的理论模型, 采用 BP 神经网络描述从液体透镜的光焦度到结构光的投射特征参量的映射关系, 构建如图 3 所示的神经网络模型。

图 3 中, 输入为两个液体透镜的光焦度, 输入层的节点数目为 2; 隐含层的节点传递函数为 Tansig; 输出为多

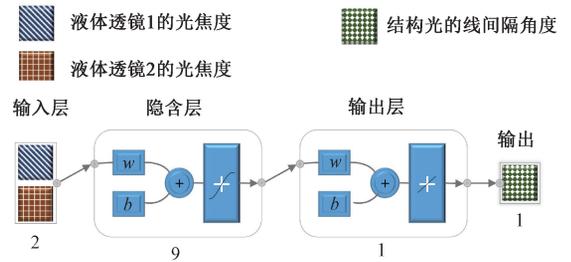


图 3 描述系统特征参量映射关系的神经网络结构
Fig. 3 Neural network structure for describing the mapping relationship of system characteristic parameters

线结构光的线间隔角度, 输出层的节点数目为 1, 输出层的节点传递函数为 Purelin。根据经验公式^[19-20]可得到隐含层节点数目 q 在 2~11 范围取值, 采用如下思路确定 q 的值: 通过网格搜索策略, 在经验公式确定的合理范围内遍历不同的隐含层节点数, 训练前馈神经网络并计算其在训练集上的均方误差 (mean squared error, MSE), 最终选择误差最小的节点数作为最优结构。

构建神经网络时赋予的权值和阈值将会对网络模型的预测精度、收敛速度及稳定性等造成较大影响。对此, 为提升神经网络的训练效果, 采用 GA 算子对图 3 所示的神经网络结构参数进行优化, 利用 GA 算子的全局搜索能力生成权值和阈值的最优解。用于训练神经网络模型的数据集元素包括两个液体透镜的光焦度 φ_1 、 φ_2 以及结构光线间隔角度 $\Delta\theta$, 系统采用的是基于电磁驱动的液体透镜 (通过改变输入电流调节光焦度), 透镜光焦度大小受温度变化影响会产生波动, 因此在该类液体透镜参数标定时需考虑温度因素的实时补偿。设定基准温度 T_0 , 以光焦度相等作为转换条件, 某一温度 T 下的输入电流 I 可转换为基准温度 T_0 下的等效电流 I' , 存在的函数关系式^[21-22]为:

$$I' = I + a \cdot (T - T_0) \tag{7}$$

式中: a 为常数项。采用如下方法标定 a 的数值: 设定多组光焦度 P_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), 对于每组而言, 将液体透镜的光焦度固定为 P_i , 把透镜温度调至基准温度 T_0 , 记录对应的输入电流值 I' , 然后通过对透镜加热或冷却改变温度条件, 依次记录不同温度对应的输入电流值 I 。基于采样数据对式(7)进行最小二乘拟合, 即可得到 a 值。

对于电磁驱动式液体透镜而言, 其光焦度与电流变化呈正比例关系^[21]。考虑到光焦度受温度因素的影响, 结合式(7)得到在某一温度 T 下光焦度与输入电流 I 的函数关系, 即:

$$\varphi = b \cdot I' + c = b \cdot [I + a \cdot (T - T_0)] + c \tag{8}$$

式中: b 和 c 均为常数项。

b 和 c 的标定通过如下方案实现: 以温度和输入电流作为设定变量, 记录不同温度以及输入电流条件下的液体

透镜光焦度(光焦度数值可通过传感器直接读取),基于采样数据对式(8)进行最小二乘拟合,即可得到 b 和 c 的数值。

3 实验与讨论

3.1 实验手段

1) 平台构建

系统组件包括 1 个多线激光器和 2 个液体透镜,其中,多线激光器(线激光的总条数为 25,考虑到边缘光线存在畸变、衰减等问题,这里使用中心区域 19 线)的波长为 450 nm,焦距为 500 mm(出射激光束的线聚焦距离,可得到其光焦度 φ_0 为 2D),线间隔的初始角度为 0.75° ;液体透镜的通光孔径为 16 mm,机械厚度为 11.9 mm,输入电流范围为 $-250 \sim 250$ mA,调节耗时(响应+稳定)为 25 ms。通过 1.2 节的优化计算方法生成系统结构设计参数: $d_0 = 23.7$ mm; $d_1 = 21.9$ mm,根据优化设计结果搭建出液体透镜调控的多线结构光投射系统,同时配备 FL-20 型 CMOS 相机(分辨率 $2\ 736 \times 1\ 824$)采集结构光图像,实验平台如图 4 所示。

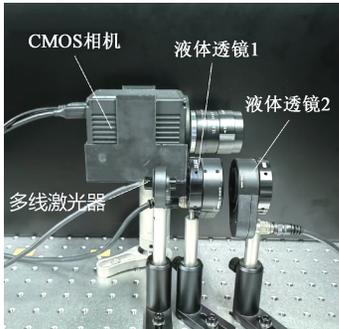


图 4 新型可变结构光投射系统的实验平台

Fig. 4 Experimental platform of the novel variable structured light projection system

2) 表征方案

线结构光在垂直于光纹方向的灰度分布近似为高斯分布,以光强分布中半高全宽(full width at half maximum, FWHM)作为计算线宽^[23]。以平板作为投射对象,在平板表面会形成多线结构光条纹,同时在投射区域水平放置高精度标尺。通过固定位置的相机采集投射条纹及标尺的图像。基于图像测量可得到标尺 10 mm 刻度对应的像素数,采用如下步骤计算每个光条纹线宽对应的像素数:首先,对采集结果进行去噪、感兴趣区域(region of interest, ROI)选取的预处理,通过霍夫变换检测光条纹角度,若光条纹倾斜则旋转图像使光条纹水平;然后,在 ROI 内,沿垂直于光纹的方向取一条中线,得到灰度值随像素位置变化的曲线;最后,根据灰度剖面计算

并确定半高位置,计算出半高位置间隔对应的像素数。则单个光条纹线宽的测量值为:

$$L_w = \frac{10 \cdot P_w}{P_L} \quad (9)$$

式中: P_w 为光条纹线宽对应的像素数; P_L 为标尺 10 mm 刻度对应的像素数。

本文通过标定线结构光的光平面求解线间隔角度,采用如图 5 所示的测试方案。

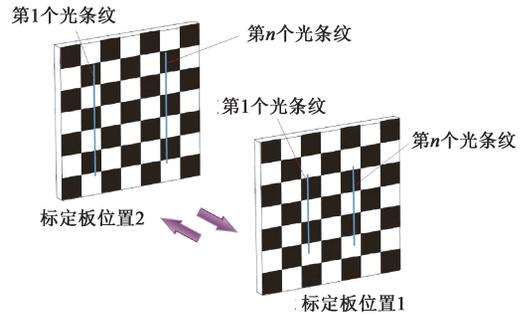


图 5 多线结构光的光平面标定方案

Fig. 5 Diagram of optical plane calibration for multi-line structured light

具体方案步骤为:

(1) 将结构光投射在棋盘格标定板上,通过固定位置相机分别拍摄两个位置(比如图 5 中的位置 1 和 2)的多线结构光图像;

(2) 采用张正友标定法得到相机的内参(含焦距和主点坐标),在此基础上,根据棋盘格角点的世界坐标-图像坐标数据,通过直接线性变换(direct linear transformation, DLT)算法结合列文伯格-马夸尔特法(Levenberg-Marquardt, LM)算法得标定板两个位置对应的外参(旋转矩阵和平移向量);

(3) 采用 Steger 算法提取边界线结构光的条纹中心,分别得到两个位置上光条纹中心的采样点;

(4) 结合之前内外参数的标定结果,可生成光条纹采样点在相机坐标系下的坐标值;根据光条纹在位置 1 和 2 的采样点坐标,采用最小二乘拟合得到对应的光平面方程;

(5) 通过光平面法向量运算可得到两侧线结构光的夹角,再除以 $(n-1)$ 得到线间隔角度。

3.2 模型训练结果

设定基准温度为 25°C ,在温度 $21^\circ\text{C} \sim 36^\circ\text{C}$ 、输入电流范围内采集 7 组数据(相同光焦度的数据为一组,每组 12 个采样数据),将采样数据代入式(7),通过最小二乘拟合得到常数项 a 的值为 1.413。基于传感信息得到输入电流-温度-光焦度的采样数据,共计 33 个,将采样数据代入式(8),通过最小二乘拟合得到 b 、 c 的值分别为

0.049 56, 0.030 18。

针对本文系统结构光特征量的神经网络(如图 3 所示),通过遍历运算得到隐含层节点数目 q 取 10。根据 2.2 节方法得到 132 组映射数据(输入-输出),其中 112 组数据用于神经网络训练;另外 20 组数据用于计算 GA 优化-神经网络的适应度值,从而指导 GA 迭代。采用的 GA 优化参数取值如表 1 所示。

表 1 遗传优化算法的参数值

Table 1 Parameter values of genetic optimization algorithm

参数	数值
种群规模	200
染色体大小	41
交叉率	0.8
变异率	0.005
进化代数	160

经过 GA 优化生成该神经网络结构参数(权值和阈值)的最优解,将数据集导入到神经网络模型中进行训练,损失函数采用的是均方误差(mean squared error, MSE)值。训练集、测试集和验证集的 MSE 值随迭代次数的变化情况如图 6 所示,从误差变化曲线可以看出,训练集、测试集和验证集的误差在迭代过程中逐渐下降,并在第 8 次迭代训练后趋于平稳,这表明模型在学习数据规律,且性能稳定提升后收敛。

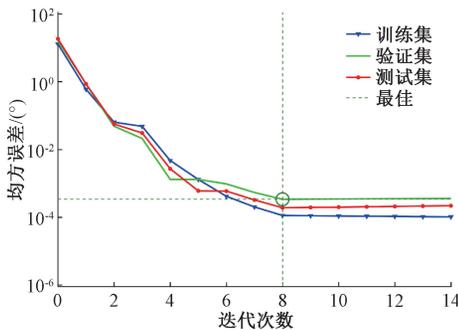


图 6 网络性能误差随迭代次数的变化曲线

Fig. 6 The variation curve of network performance error with iteration times

图 7 为该神经网络回归任务的预测-真实值对比,从对比结果可以看出,其 R 值均接近于 1,这表明该神经网络模型的拟合程度很高,输入与输出之间具有较强的相关性。

3.3 性能验证

1) 光条纹线宽变化

结构光条纹的线宽是影响测量精度及稳定性的关键参数,条纹线宽过大(>1.5 mm)会造成较大的点云数据

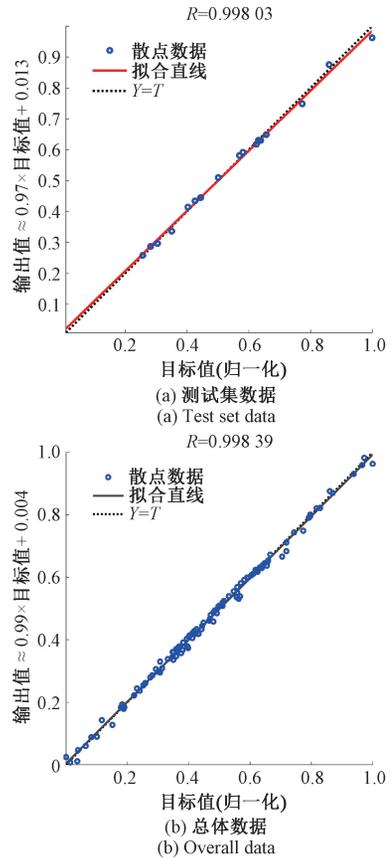


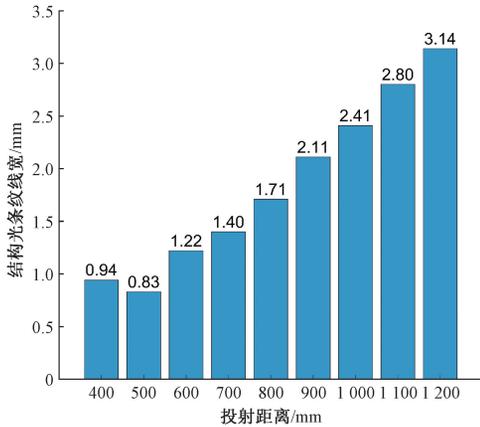
图 7 网络训练结果的回归分析

Fig. 7 Regression analysis of network training results

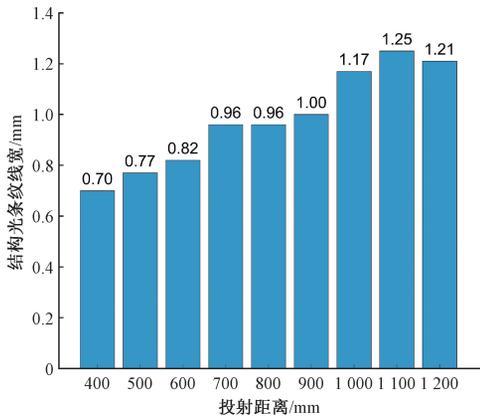
误差。以结构光条纹的线宽作为质量指标,选取不同远近的平面区域作为投射对象,测试传统多线结构光方案(由多线激光器直接生成)和本文系统(如图 4 所示)产生光条纹的线宽情况。设置 400、500、600、700、800、900、1 000、1 100 和 1 200 mm 为投射距离变量,针对每个投射距离,采用 3.1 节的表征方案测定得到多线结构光条纹的线宽平均值。

图 8(a)为多线激光器在 9 组距离处生成结构光条纹的线宽大小,从测试结果可以看出,距离 500 mm 处的结构光线宽最小,其值为 0.83 mm;之后随着投射距离的增加,光条纹的线宽显著变大,9 组距离的平均线宽为 1.84 mm。当投射距离为 1200 mm 时,其条纹线宽达到了 3.14 mm。对于本文系统而言,液体透镜 2 的输入电流设置为 -119 mA,根据 2.1 节的控制策略动态调节液体透镜 1 的输入电流,测定得到 9 组距离处生成结构光条纹的线宽大小,如图 8(b)所示,从测试结果可以看出,本文系统生成的结构光线宽随投射距离的增加变化较为平缓,9 组距离的平均线宽为 0.98 mm,所有光条纹的线宽值均在 1.25 mm 以内。对比传统方案,基于液体透镜调控的系统方案能够在较大的距离区间产生小线宽的结构光条

纹,从而大大提升结构光视觉的深度测量范围。



(a) 由传统方案生成
(a) Generated by traditional schemes



(b) 由本文系统生成
(b) Generated by the proposed approach

图8 不同距离处生成结构光条纹的线宽波动情况
Fig.8 Line width fluctuations of structured light stripes

2) 条纹间隔调节能力

为验证本文系统的条纹间隔调节能力,投射面的距离设置为650 mm,将液体透镜2的电流分别调节至6组不同数值。对于每组而言,通过2.1节的控制策略动态调节液体透镜1的电流,使系统产生的结构光聚焦在给定投射面上。

图9为不同调节参数下系统在距离650 mm处生成的多线结构光图像,从成像结果可以看出,从状态1到状态6的结构光条纹分布由稀疏到稠密,条纹间隔距离不断增大。此外还注意到投射的结构光条纹并非都是直线,说明实际线结构光传输面可能存在弯曲而非理想平面,这是由于液体透镜的畸变像差导致的,但应用于双目匹配多线结构光测量时,是以多线结构光条纹作为立体匹配特征,无需标定光平面,因此在光条纹线宽较窄且清晰的前提下,其形态是否为标准直线并不会对测量精度造成额外影响。采用3.1节的表征方案得到6组多线结构光的线间隔角度真值。将液体透镜的状态参数导入构建的神经网络模型中,可输出对应线间隔角度的预测值。

表2列出了6组实验对应线间隔角度的真值与预测值,从结果可以看出,搭建的多线结构光投射系统可实现其投射结构光的线间隔角度在0.537°~0.986°范围调节,系统角放大率K可达1.836。结构光线间隔角度的预测模型误差平均为1.07%,结果表明,系统基于该模型能够精确调控生成结构光条纹的疏密程度,从而适应不同尺度目标的主动式三维探测需求。

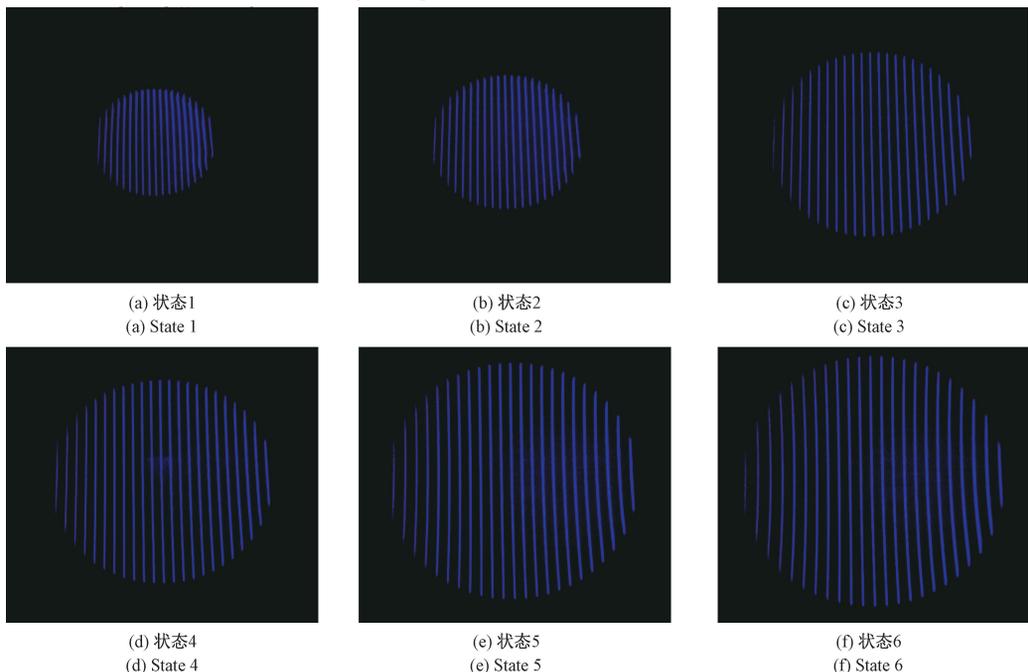


图9 基于不同液体透镜调节参数生成的多线结构光图像

Fig.9 Multi-line structured light images generated based on different adjustment parameters of liquid lens

表2 不同调节参数下线间隔角度的真值与预测值

Table 2 Real and predicted values of line spacing angle under different adjustment parameters

序号	液体透镜的 电流/mA	液体透镜的 温度/℃	液体透镜的 光焦度 /D	线间隔角度的 真值/(°)	线间隔角度的 预测值/(°)	相对 误差/%
1	液体透镜 1: -249.36	液体透镜 1: 29.25	液体透镜 1: -12.030	0.542	0.537	0.92
	液体透镜 2: 228.98	液体透镜 2: 28.00	液体透镜 2: 11.589			
2	液体透镜 1: -115.13	液体透镜 1: 28.00	液体透镜 1: -5.466	0.611	0.621	1.64
	液体透镜 2: 122.21	液体透镜 2: 27.50	液体透镜 2: 6.262			
3	液体透镜 1: 10.01	液体透镜 1: 25.50	液体透镜 1: 0.561	0.763	0.774	1.44
	液体透镜 2: -20.60	液体透镜 2: 25.00	液体透镜 2: -0.991			
4	液体透镜 1: 70.37	液体透镜 1: 25.50	液体透镜 1: 3.553	0.815	0.819	0.49
	液体透镜 2: -81.67	液体透镜 2: 25.50	液体透镜 2: -3.982			
5	液体透镜 1: 151.03	液体透镜 1: 28.25	液体透镜 1: 7.743	0.917	0.928	1.20
	液体透镜 2: -191.01	液体透镜 2: 29.00	液体透镜 2: -9.156			
6	液体透镜 1: 178.85	液体透镜 1: 28.50	液体透镜 1: 9.139	0.979	0.986	0.72
	液体透镜 2: -249.36	液体透镜 2: 29.00	液体透镜 2: -12.048			

4 结 论

通过将液体光子器件与线激光技术相结合,提出了一种液体透镜调控的可变结构光投射系统及方法。在给出系统设计构型的基础上,建立了基于双液体透镜的结构光投射参数模型;开展了系统结构参数的寻优算法研究,提出了一种结合非线性规划与GA算法的双层优化求解方法,并形成相应的优化设计结果。为生成高质量的结构光条纹,给出了系统中液体透镜的控制策略,通过神经网络技术构建了可表述液体透镜输入参量与结构光线间隔角度的映射模型。与传统技术方案相比,本文方法能够大大拓展多线结构光的有效投射距离区间(保持光条纹线宽在1.25 mm以内),抑制因被测物体距离不同对结构光条纹质量的影响。通过改变双液体透镜的电流(工作过程无移动组件),可实现多线结构光的线间隔角度在较大范围动态调节,并且基于线间隔角度的映射模型具有较高的预测精度。研究成果能够克服传统多线结构光方案由于线间隔角度固定、景深窄等带来的能力瓶颈,为提升主动式三维探测能力提供了新的技术思路。

参考文献

[1] SUN F CH, CHEN Y, WU Y Y, et al. Motion planning and cooperative manipulation for mobile robots with dual

arms[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2022, 6(6): 1345-1356.

[2] LI X SH, FENG SH J, CHEN W W, et al. Adaptive structured-light 3D surface imaging with cross-domain learning[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(12): 2401609.

[3] 谢哲欣, 李小丽, 蒋金, 等. 复杂堆叠环境下的多类相似弱纹理工件识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(6): 139-153.

XIE ZH X, LI X L, JIANG J, et al. A recognition method of multi-class similar workpieces with weak texture in complex stacking environments[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(6): 139-153.

[4] 邱海超, 刘安, 唐朝清. 基于正弦结构光激励的透明材质缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 173-180.

QIU H CH, LIU AN, TANG CH Q. Automatic defects detection method for transparent materials based on sinusoidal structured light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 173-180.

[5] LIU Y W, OU P, XU X Q, et al. Multi-line structured light binocular vision stereo matching method via coarse-to-fine spatial geometric constraints[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 176: 110950.

- [6] 刘泽隆, 李茂月, 卢新元, 等. 高动态范围条纹结构光在机检测技术及应用进展 [J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(1): 1-18.
- LIU Z L, LI M Y, LU X Y, et al. On-machine detection technology and application progress of high dynamic range fringe structured light [J]. Chinese Optics, 2024, 17(1): 1-18.
- [7] YANG SH CH, YANG T, WU G X, et al. Flexible and fast calibration method for uni-directional multi-line structured light system [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164: 107525.
- [8] 叶涛, 何威燃, 刘国鹏, 等. 基于卷积神经网络的线结构光高精度三维测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 183-195.
- YE T, HE W R, LIU G P, et al. High-precision 3D measurement method based on convolutional neural networks for line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 183-195.
- [9] ZHENG Y, LI X W, WANG ZH Y, et al. Fast zoom portable night vision telescope based on liquid lenses and folded optical structure [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 186: 112620.
- [10] ZHAO Y R, LI ZH S, ZHENG Y, et al. Non-aqueous electrowetting liquid lens with centimeter-level large aperture based on dielectric failure suppression principle [J]. Light: Science & Applications, 2025, 14(1): 120.
- [11] LIU ZH Y, GAN Z H, ZHANG M, et al. Design of a small non-displacement zoom optical system based on Gaussian brackets and traversal ideation [J]. Optics Communications, 2024, 557: 130336.
- [12] YIN W Q, WANG Z Y, LI L. FOV adjustable liquid lens driven by electrowetting effect [J]. Optics Express, 2024, 32(16): 27268-27277.
- [13] 孔梅梅, 董媛, 徐春生, 等. 基于平板电极的非球面组合液体透镜的仿真与实验分析 [J]. 光学学报, 2024, 44(8): 250-256.
- KONG M M, DONG Y, XU CH SH, et al. Simulation and experimental analysis of aspherical combined liquid lens based on flat electrode [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(8): 250-256.
- [14] 孔梅梅, 薛银燕, 徐春生, 等. 含有圆孔平板电极结构的双凸液体透镜的设计与分析 [J]. 物理学报, 2024, 73(1): 217-223.
- KONG M M, XUE Y Y, XU CH SH, et al. Design and analysis of biconvex liquid lens with circular hole plate electrode structure [J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(1): 217-223.
- [15] 甘子豪, 洪华杰, 刘召阳, 等. 液体光学调控的智能深度测量方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(12): 26-34.
- GAN Z H, HONG H J, LIU ZH Y, et al. Research on intelligent depth measurement method with liquid optical control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 26-34.
- [16] ZHENG Y, WANG X, JIANG ZH, et al. Adaptive multiscale microscope with fast zooming, extended working distance, and large field of view [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2024, 5(1): 62-74.
- [17] RIM C S. Optical structural design using Gaussian optics for multiscale gigapixel camera [J]. Korean Journal of Optics and Photonics, 2013, 24(6): 311-317.
- [18] LIU Y W, SUN J H, ZHOU F Q. Identifying the laser stripes via ray-model for multi-line structured light stereo vision sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2024: 24(21): 34808-34815.
- [19] ZHANG L, WANG F L, SUN T, et al. A constrained optimization method based on BP neural network [J]. Neural Computing and Applications, 2018, 29: 413-421.
- [20] 马炳图, 杜钦君, 张婷, 等. 基于 HBF 神经网络观测器的 PMSM 无模型预测电流控制 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 376-386.
- MA B T, DU Q J, ZHANG T, et al. PMSM model-free based on HBF neural network observer predictive current control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 376-386.
- [21] 李洋, 王国名, 王颖, 等. 面向机器视觉测量的液体透镜调焦系统标定方法 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 313-322.
- LI Y, WANG G M, WANG Y, et al. Calibration method of liquid lens focusing system for machine vision measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 313-322.
- [22] LIU CH, ZHENG Y, YUAN R Y, et al. Tunable liquid

lenses; Emerging technologies and future perspectives [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(11): 2300274.

- [23] XUE Y, BERRY K P, BOIVIN J R, et al. Scattering reduction by structured light illumination in line-scanning temporal focusing microscopy [J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(11): 5654-5666.

作者简介



甘子豪, 2013 年于东北大学获得学士学位, 2015 年于东北大学获得硕士学位, 2019 年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学助理研究员, 主要研究方向为仿生视觉与三维测量。

E-mail: ganzihao15@nudt.edu.cn

Gan Zihao received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Northeastern University in 2013 and 2015, respectively, and his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in

2019. He is currently an assistant research fellow at National University of Defense Technology. His main research interests include biomimetic vision and 3D measurement.



洪华杰 (通信作者), 1999 年于国防科技大学获得学士学位, 2001 年于国防科技大学获得硕士学位, 2005 年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学研究员, 主要研究方向为光机电一体化、

仿生感知与控制。

E-mail: opalqq@163.com

Hong Huajie (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from National University of Defense Technology in 1999, 2001, and 2005, respectively. He is currently a research fellow at National University of Defense Technology. His main research interests include mechatronics, biomimetic perception and control.