

基于网格结构光的双目测量方法

杨帆^{1,2}, 刘斌^{1,2*}, 初录^{1,2}, 池砚³, 韩芳芳^{1,2}, 刘娜^{1,2}, 张宝峰^{1,2}¹天津理工大学电气电子工程学院, 天津 300384;²天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384;³天津城建大学经济与管理学院, 天津 300384

摘要 利用网格结构光对物体表面进行投射, 可为双目视觉测量提供易于提取的立体匹配特征点, 从而实现三维测量。提出一种新的网格结构光特征点提取算法。首先通过 Shi-Tomasi 算法提取结构光图像中的网格角点, 但由于噪声的影响, 存在角点误提取以及角点缺失的情况, 引入密度聚类算法可以解决该问题。通过噪声仿真证明密度聚类算法能很好地剔除误提取的非角点, 并能准确地将角点进行分组。利用分组后的每组角点可以确定一个区域。每个双目立体匹配的特征点为此区域内交叉网格线的交点。通过在各区域内对网格横纵线进行水平和竖直方向的中心提取, 并分别进行拟合确定直线方程, 即可求得各特征点的像素坐标。另外, 针对遮挡导致的左右视图缺少对应特征点的问题, 研究了适用的特征点拓扑关系确定方法。为验证所提方法的鲁棒性和测量精度, 进行了平移台位移测量实验。将本文方法的测量结果与精度为 $1\ \mu\text{m}$ 的光栅尺的测量数据进行比较, 可得最大相对误差为 2.20%。

关键词 测量; 双目测量; 网格结构光; 特征提取; 密度聚类; 三维重建

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2304004

1 引言

近年来, 结构光三维测量技术以其高精度、光条信息易处理、稳定性好以及易控等优点, 已被应用在工业零件测量^[1]、微小电子元器件测量^[2]、文物数字化三维重建^[3]等方面。结构光按投射形式可分为点结构光、线结构光、面结构光^[4]。点结构光测量方法虽然能在准确获得激光点的情况下获得该点的空间坐标, 但是测量效率低。线结构光测量方法是用线代替点, 尽管扫描效率较高, 仍满足不了动态测量的需求。面结构光测量方法则是通过对物体投射一幅图案进行测量, 相比较前两者来说, 测量效率得到提升, 可实现对动态物体的测量。

对结构光投射图案进行编码可以更好地识别特征点。不同的编码方式对应于不同的测量环境、测量对象、测量精度等。编码方式一般分为基于时间

编码的方式和基于空间编码的方式^[5]。基于时间编码的方式是将一组图案连续地投射到被测物上, 特征点由投射的多幅图像确定, 因此该方式的测量精度高。常见的基于时间编码的方式有相移法^[6-7]和格雷法^[8-9]。相移法使用一幅或多幅正弦周期图案, 连续像素之间具有连续的相位, 通过相位信息实现特征点的匹配。由于这种编码方式要连续投射多个图案, 被测物不能移动, 因此不适用于动态测量。空间编码是使图像中局部编码具有唯一性, 这种编码方式具有更快的测量速度, 在动态测量上更有优势。常见的空间编码有 De Bruijn 编码^[10]、二进制码^[11]、颜色编码^[12], 其中颜色编码最常见, 颜色编码分为基于多色结构光与基于单色结构光两种。多色结构光是将颜色作为特征对不同的颜色进行编码, 通过提取到的像素颜色实现左、右图特征点的匹配, 准确提取每个像素的颜色是该方法的关键。与基

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61975151, 61308120)、天津市“项目+团队”重点培养专项(XC202054)、天津市研究生科研创新项目(2020YJSS013)

通信作者: *lbin83@126.com

于单色结构光的编码方式相比,基于多色结构光的编码方式虽得到简化,但是当考虑被测物的反照率、投影仪光谱的非线性、相机的光谱响应、测量环境中颜色复杂的影响时,提取到的颜色会与投射的颜色存在偏差,颜色的错误分类会造成匹配精度降低。

常见的结构光投影方式还有条纹投影轮廓术(FPP)和散斑结构光投影法^[13]。FPP^[14]目前主要采用数字光栅投影技术,利用数字设备可以使面结构光编码更准确灵活。其中相移轮廓术已被应用于动态场景的三维测量。散斑结构光投影法^[15]与FPP类似,通过对被测物投射随机散斑图案,利用数字散斑相关方法搜索左、右相机图像对应点的匹配,最后利用三角测量原理重建物体的三维形貌。

上述编码模式都需要通过对图案的精心设计才能够完成图像特征点的提取及匹配,考虑到由多条横竖交叉光条组成的网格结构光图案的图形特征(如横竖条纹、横竖条纹交点等)稳定、光条信息易提取的特点,无需对图案进行编码,仅依靠图案本身的特征即可实现特征点的提取、匹配,从而实现三维测量。孙佳睿^[16]基于双目立体视觉技术,通过 Brisk 算法对网格结构光进行特征点提取,选取 Freak 算法作为匹配算法,通过将两种算法结合,获得初始点云,再对初始点云进行处理,得到最终点云数据。该方法在匹配过程中存在误匹配的情况,匹配精度不高。崔中原^[17]先采用骨架优化提取算法对网格结构光进行细化处理,设计一个圆模板用于在骨架上搜索网格节点,再对搜索到的网格节点进行编码,最终实现左、右图的匹配。在搜索网格节点的过程中,遇到复杂的节点时,该方法存在提取不到节点的情况,导致匹配失效。Shi 等^[18]通过形态学开口的方式将网格结构光图案分解为只有横(竖)的多线结构光,利用顺序一致性约束实现匹配。该方法在分割网格结构光时会将光条割断,进而出现光条不连续、特征点丢失的情况。

本文从网格结构光图像的横、竖光条交接处存在角点的特性出发,先对图像进行角点提取,将提取到的角点进行分组,以保证每组角点锁定一个包含目标特征点的区域。在这个区域内对交叉光条的中心进行提取,分别拟合横、竖两条直线,其交点即为特征点。随后将特征点按顺序编码,实现立体匹配。通过实验验证了处理算法的鲁棒性和测量精度。

2 测量模型

基于网格结构光的双目立体视觉测量系统由两

台相机与网格光投影仪组成,如图 1 所示。投影仪投射的网格结构光是由多条互相垂直的横竖光条组成,如图 2 所示。将两台相机的光轴按一定角度进行安装,使两光轴光束同时会聚于被测物。如图 3 所示,假设世界坐标系与左相机坐标系重合, o 为左相机的光心, $O_L-X_L Y_L Z_L$ 、 $O_R-X_R Y_R Z_R$ 是双目视觉系统的成像平面坐标系。假设 P 点为空间中的被测点,其在世界坐标系中的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) , P 点在相机上的成像点为 $P_L(u_1, v_1)$ 和 $P_R(u_2, v_2)$ 。

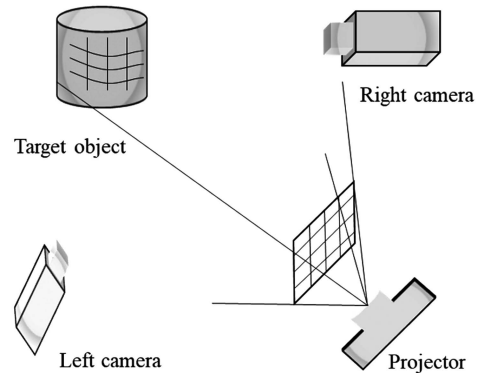


图 1 基于网格结构光的双目立体视觉测量系统
Fig. 1 Binocular stereo vision measurement system based on grid structured light

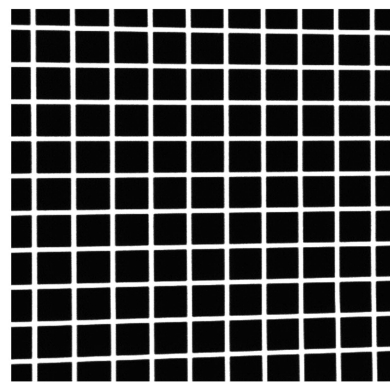


图 2 网格结构光

Fig. 2 Grid structured light

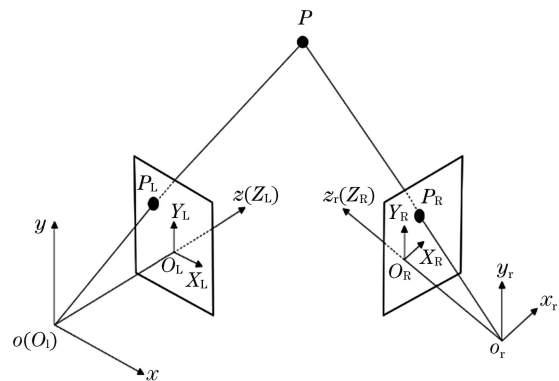


图 3 双目模型

Fig. 3 Binocular model

通过上述双目模型^[19]可得

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{O}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $a_x = \frac{f}{d_x}$ 、 $a_y = \frac{f}{d_y}$ 分别表示 u 、 v 轴上的尺度因子, f 为相机的焦距, d_x 、 d_y 分别表示 u 、 v 轴上的单位像素数量; (u_0, v_0) 为相机的主点坐标; \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 分别为两相机相对位置关系的旋转和平移矩阵; z_c 为

尺度因子。

令

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_k = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2, \quad (3)$$

式中: \mathbf{M}_1 为内参数矩阵, 由相机内部的参数决定; \mathbf{M}_2 为外参数矩阵, 由两相机相对位置关系的旋转和平移矩阵决定。将左、右相机满足的(2)式联立可得

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1) X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1) Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1) Z = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1) X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1) Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1) Z = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2) X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2) Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2) Z = m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2) X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2) Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2) Z = m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: m_{ij}^k 为矩阵 \mathbf{M}_k 中的第 i 行、第 j 列的元素。通过解此方程组即可得到点的三维坐标。精确重建物体三维坐标的流程图如图 4 所示, 首先要准确找到左、右相机视图中的一组匹配点, 基于网格结构光的双目视觉测量的关键是特征点的提取与匹配。

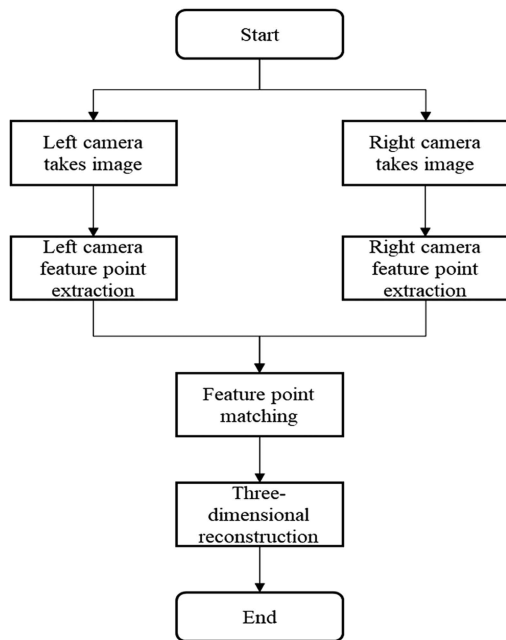


图 4 精确重建物体三维坐标的流程图

Fig. 4 Flow chart of accurate reconstruction of three-dimensional coordinates of objects

3 匹配特征点提取算法

网格结构光是由多条互相交叉的光条组成, 常规的光条中心提取算法难以直接对图像进行光条中

心线提取。如图 5 所示, 使用 Steger 法^[20]直接对网格图像进行中心线提取会存在断线的情况。本文从网格交叉线存在角点的特性出发, 提出的特征点提取算法的原理如下: 首先通过角点检测算法对网格图像[图 6(a)]进行角点提取[图 6(b)], 黑色圆点即为提取到的角点, 利用密度聚类算法将提取到的角点进行聚类分组, 聚类分组后的每组角点能够确定一个矩形区域[图 6(c)中较小矩形区域, 该矩形区域包含横、竖光条相交区域], 再将该区域的面积小范围扩大[图 6(c)中较大矩形区域], 在两个区域之间分别沿水平、垂直方向进行光条中心提取[图 6(c)中线条], 通过光条中心点进行直线拟合得到横竖光条, 其交点即为网格特征点[图 6(d)中圆点]。在运算过程中, 聚类算法可以快速聚类角点, 通过设定参数可将部分非角点剔除掉。通过在局部区域进行光条中心点拟合, 求取横竖光条的交点, 实现了特征点的

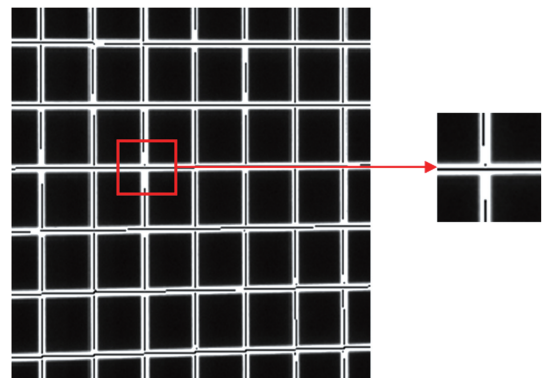


图 5 Steger 法提取效果图

Fig. 5 Extraction effect image of Steger method

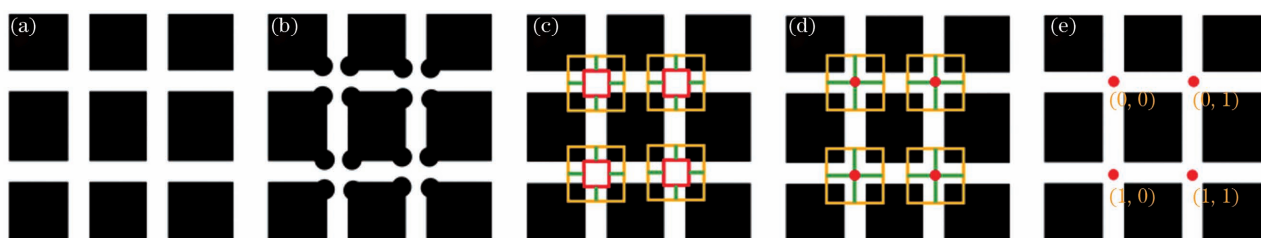


图 6 特征点提取示意图。(a)原图;(b)角点提取;(c)光条中心点提取;(d)确定特征点位置;(e)特征点编码

Fig. 6 Diagrams of feature point extraction. (a) Original image; (b) corner point extraction; (c) light strip center point extraction; (d) determination of feature point position; (e) feature point coding

亚像素提取,提高了精度。图 6(e)为特征点编码。

3.1 角点检测算法

常见的角点检测算法主要分为基于灰度强度的方法和基于边缘轮廓的方法^[21]。本文用作角点检测的图像图形结构单一且光条交接处存在明显的角点,结合图像的特点,选用基于灰度强度的方法进行角点提取。Harris 角点算法^[22]有提取角点速度快、准确性高的优点,但存在对有噪声图像的

角点检测不准确的问题。考虑到实际三维测量应用场景中存在噪声,本文在实验室中采集到的图像中加入高斯、椒盐噪声,模拟在实际应用中存在的噪声对角点提取精度的影响,如图 7 所示。对于质量较高、噪声少的图片,Harris 角点检测算法能够准确地提取到角点;对于质量较差、噪声多的图片,Harris 角点检测算法无法准确地提取到角点,误差较大。

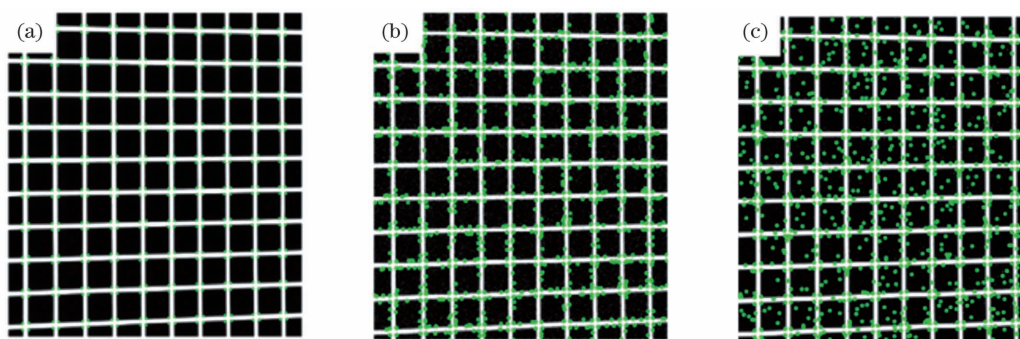


图 7 Harris 算法的角点提取。(a)原图角点提取;(b)含高斯噪声图像的角点提取;(c)含椒盐噪声图像的角点提取

Fig. 7 Corner extraction using Harris algorithm. (a) Extracted corners of original image; (b) extracted corners of image with Gaussian noise; (c) extracted corners of image with salt and pepper noise

Shi-Tomasi 算法^[23-24]是 Harris 算法的改进,不仅运算速度更快,且在存在干扰的情况下对角点的提取精度更高。采用该角点检测算法分别对原图、加入椒盐噪声、加入高斯噪声的图片进行角点提取,如图 8 所示。与 Harris 角点提取算法相比,Shi-

Tomasi 算法对含有噪声的图片进行角点提取的效果大幅提升,但仍会存在角点误提取以及角点缺失的情况。

3.2 角点聚类分组处理

计算任意两个角点之间的欧氏距离,通过设定

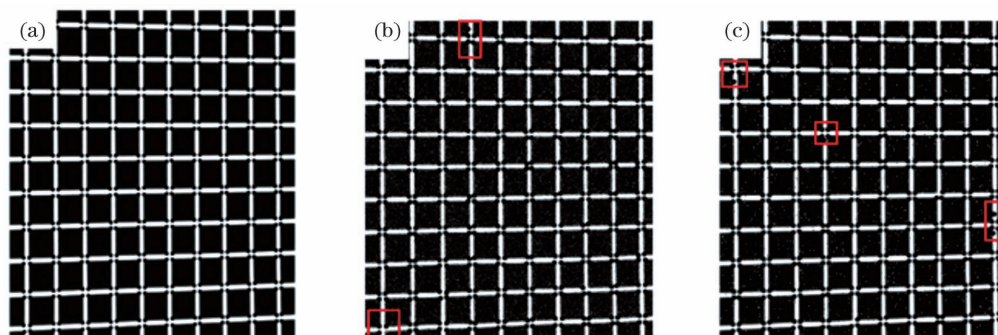


图 8 Shi-Tomasi 角点提取。(a)原图的角点提取;(b)含高斯噪声图像的角点提取;(c)含有椒盐噪声图像的角点提取

Fig. 8 Corner extraction using Shi-Tomasi algorithm. (a) Extracted corners of original image; (b) extracted corners of image with Gaussian noise; (c) extracted corners of image with salt and pepper noise

阈值可将角点进行聚类,使其形成簇,而非角点则为离散的点。基于密度的聚类方法^[25-26]可通过设定参数的方式对一组数据进行聚类,该方法可判断数据点是否为高密度点,然后将相同性质的点连成一组,最终形成聚类好的簇。算法实现如下:

- 1) 以每个点为圆心,设定半径形成一个圆,计算这个圆区域内存在的点数,点数即为密度值;
- 2) 设定密度阈值,圈内点数小于密度阈值的圆心点为低密度点,反之则为高密度点,即核心点;
- 3) 高密度点在另一个高密度点的圈内,不断将此点串联起来;

4) 低密度点在高密度圈内,将低密度点与之最近的高密度点连接;

5) 所有连接在一起的点则为一个簇,不在高密度圈内的低密度点则为异常点。

如图 9 所示,对在灰度图像中提取到的角点进行密度聚类,设定圆的半径为 9 和密度阈值为 2。如图 9(a) 所示,通过密度聚类处理已实现角点聚类。如图 9(b) 所示,角点位置在图像中用交叉十字(\times)表示,将形成簇的角点用同一颜色表示。可见图 9(a) 中存在的非角点(方框区域)在经过密度聚类算法处理之后能够被标记为误差点并被剔除。

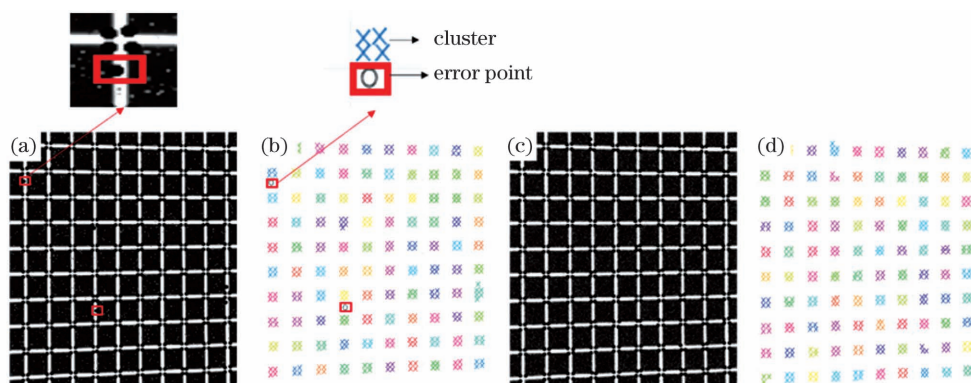


图 9 基于密度聚类的角点分组。(a)(c)Shi-Tomasi 算法的角点提取;(b)(d)密度聚类处理结果

Fig. 9 Corner grouping based on density clustering. (a)(c) Corner extraction using Shi-Tomasi algorithm; (b)(d) density clustering results

3.3 特征点拟合

通过密度聚类算法将角点分成不同的组,在组内比较角点的像素坐标 (u, v) ,得到 u 中的最大值和最小值 u_{\max}, u_{\min} 以及 v 中的最大值和最小值 v_{\max}, v_{\min} 4 个值,点 $(u_{\max}, v_{\max}), (u_{\min}, v_{\min})$ 作为一个矩形的对

角点,从而确定一个矩形区域,如图 10(a)、10(e)中矩形所示。通过此类方法确定的矩形区域能够包含横、竖条纹交叉区域。由于矩形区域无法保证仅包含光条交叉处部分,直接在该区域内进行光条中心提取则会有误差。以原有的矩形区域为基础并进行小范围

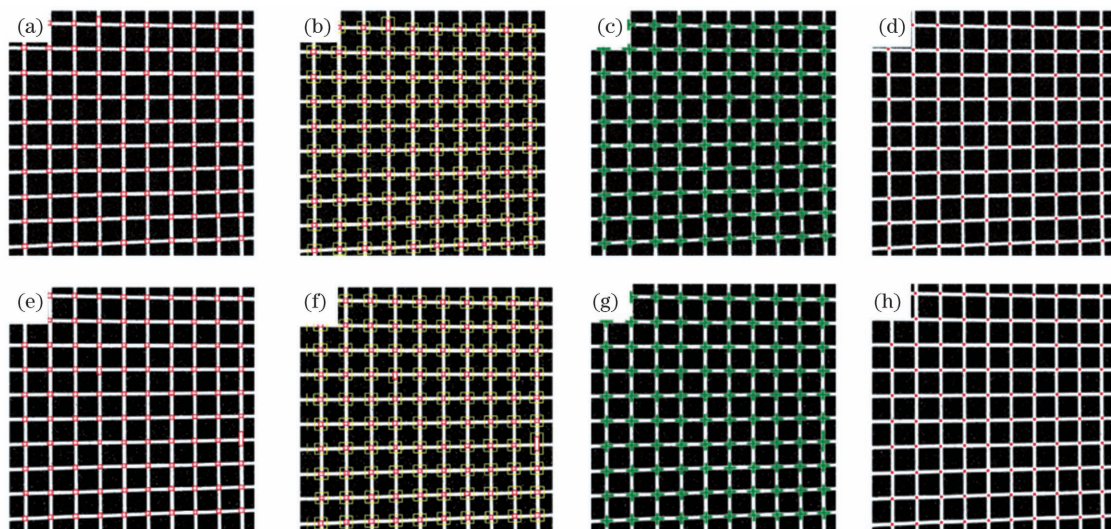


图 10 特征点拟合图。(a)(e)光条交叉区域;(b)(f)扩展光条交叉区域;(c)(g)直线拟合结果;(d)(h)特征点

Fig. 10 Diagrams of feature point fitting. (a)(e) Areas of light stripe crossing; (b)(f) extended stripe cross regions; (c)(g) line fitting results; (d)(h) feature points

扩展,形成新的矩形区域,如图 10(b)、(f)中矩形区域所示。采用灰度重心法只对两个区域之间的部分分别沿水平、垂直方向进行光条中心提取,这种方式避开了横、竖光条的交叉区域,灰度重心法^[27]能够很好地提取到光条中心。使用最小二乘法^[28]分别对提取到的水平、垂直方向的光条中心点进行直线拟合,如图 10(c)、(g)所示,拟合后横、竖直线的交点即为要提取的特征点,如图 10(d)、(h)所示。

3.4 立体匹配

基于顺序一致性约束^[29],即三维空间中物体上点的位置信息被映射到两幅图像上的位置顺序不会改变,因此可以建立网格节点的拓扑关系。如图 11 所示,将左、右两幅图左上角的第一个特征点编码为(0,0)点,从左到右依次编码为(0,1),(0,2),..., (0,m)(m 的值为垂直方向的光条总数-1);从上向下依次编码为(1,0),(2,0),..., (n,0)(n 的值为垂直方向的光条总数-1)。左、右图中编码相同的点是一组匹配点,由此可以完成所有特征点的匹配。

无编码网格结构光系统中,被测物局部深度跳变过大(如被测物的台阶区域),采集图像中的线条会失序。图 12(a)、12(b)中垂直方向光条数量不一致,此时基于顺序一致性约束难以实现准

确的立体匹配^[30]。因此,基于网格结构光的测量系统只能在有限的深度变化范围内保证左、右视图中光条数量的对应。根据文献[18],在图 13(图中 o_{cl}, o_{cr}, o_p 分别代表左相机、右相机、投影仪光心)所示的双目结构光系统中,深度变化值 Δz 与投射模板线条间距 Δd 之间的关系为

$$\Delta z = \frac{z_0^2 \Delta d}{f_p B + z_0 \Delta d}, \quad (5)$$

式中: f_p 代表投影仪的焦距; z_0 为参考平面深度; B 为基线的长度。本文设计系统的各参数为: $z_0 = 450 \text{ mm}, \Delta d = 0.45 \text{ mm}, B = 250 \text{ mm}, f_p = 35 \text{ mm}$ 。通过计算可得 $\Delta z = 10.17 \text{ mm}$,则本系统能够测量的深度最大跳变为 10.179 mm 。

在上述前提下,立体相机存在视角差异与不可避免的遮挡问题,会存在左图上的一些特征点在右图上没有对应点的问题。实际中某一视图不会出现大范围特征点丢失,可能会在小范围出现特征点丢失的情况。针对此类情况,本文设计了下述确定特征点拓扑关系的方法。

1)沿图像垂直方向按顺序完成特征点拓扑结构的行编码,即将每个特征点首次编码为($m, ?$), m 表示行编码,? 表示待编码的列号,如图 14 所示。

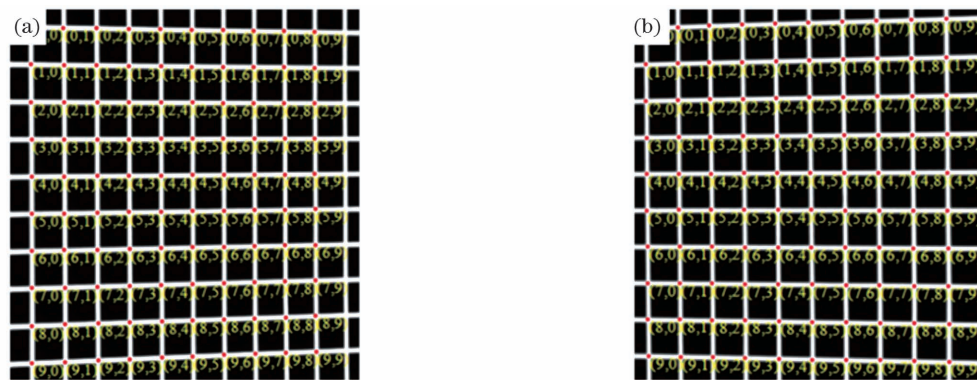


图 11 特征点编码演示。(a)左相机采集图像的编码;(b)右相机采集图像的编码

Fig. 11 Demonstration of feature point coding. (a) Coding of image obtained by left camera; (b) coding of image obtained by right camera

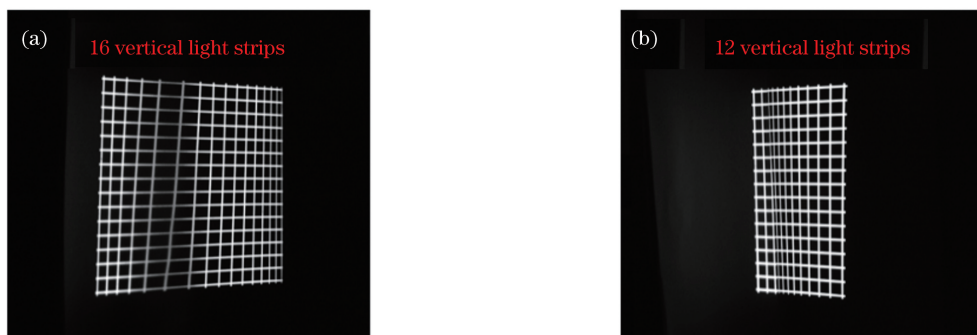


图 12 光条失序。(a)左相机采集的图像;(b)右相机采集的图像

Fig. 12 Light stripe out of order. (a) Image collected by left camera; (b) image collected by right camera

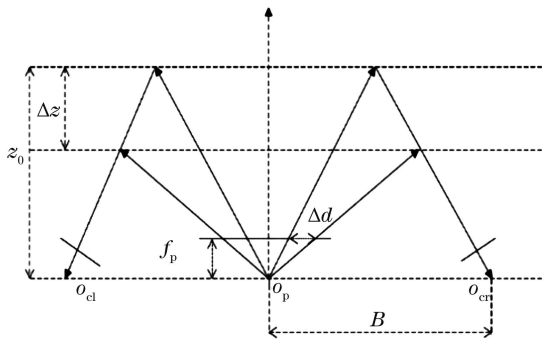


图 13 双目结构光模型

Fig. 13 Binocular structured light model

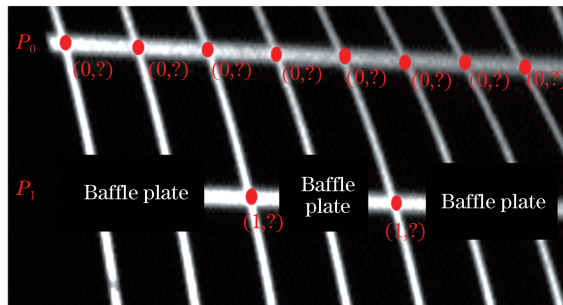


图 14 特征点行标号编码

Fig. 14 Feature point line label coding

2) 将行编码相同且特征点个数为垂直光条数的一组 (即该行特征点不丢失), 按从左往右的顺序完成该行的列编码, 如图 15(a) 中 P_0 行, 该行编码为

$(0,1), (0,2), \dots, (0,15)$ 。

3) 8 邻域区域生长^[31]。如图 15(a) 所示, 8 邻域区域生长的思想是指定一个点为起始生长点; 规定生长准则, 若 8 邻域中某一邻域的点满足生长准则, 则将其作为下一个生长点; 设定生长停止条件, 停止生长。待编码特征点 [图 15(b) 中 $(1,?)$] 为生长起始点, 规定生长准则为 8 邻域灰度值与生长点灰度值之差小于设定阈值, 本文中设定的阈值为 20; 生长停止条件为某次生长点的邻域坐标包含其他非相同行编码的特征点。如图 15(b) 所示, 点 $(1,?)$ 经过生长与点 $(0,2)$ 的列编码相同, 则点 $(1,?)$ 可编码为 $(1,2)$ 。图 16 为特征点编码。起始种子点生长所生成的区域如图 16(b)、(c) 所示。

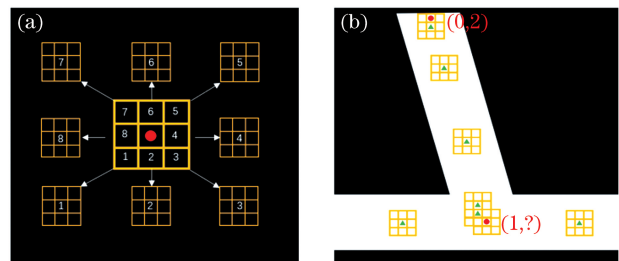


图 15 区域生长。(a) 8 邻域生长; (b) 生长过程
Fig. 15 Region Growing. (a) Eight-neighborhood growth; (b) growth process

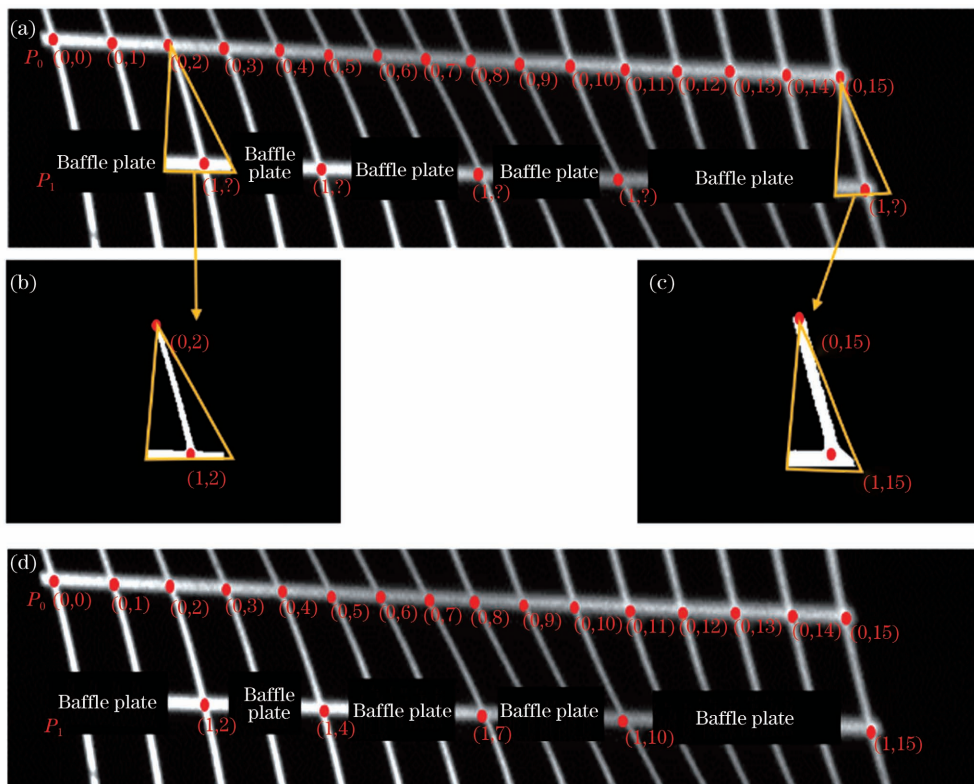


图 16 特征点编码。(a) 不丢失特征点对的行顺序编码; (b)(c) 区域生长图; (d) 完成编码

Fig. 16 Coding of feature points. (a) Row sequence encoding without loss of feature point pairs; (b)(c) region growing maps; (d) coding completion

4)完成特征点缺失行编码。如图 16(d)所示, 已对 P_1 所在的行完成正确编码。

4 实验及结果

本次实验选取两个工业相机 (Hikvision MV-

CA013-21UM)及镜头(焦距 16 mm)、OPT 结构光光源(OPT-SL03-R)、位移控制器(Zolix SC300)、圆导轨电动直线滑台(TSA200),以及光栅尺(精度 $1 \mu\text{m}$)。系统样机如图 17 所示。

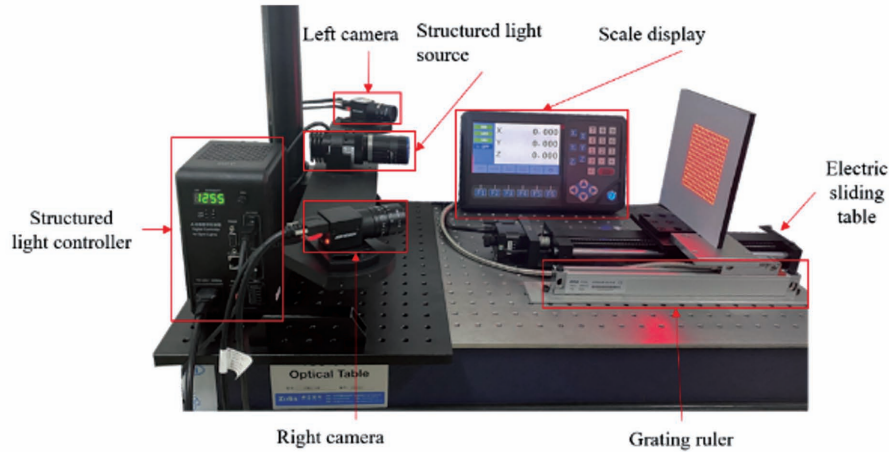


图 17 实验设备

Fig. 17 Experimental equipment

4.1 精度验证实验

首先采用张正友标定算法^[32-33]对左、右相机的内参进行标定,通过立体标定算出左、右相机之间的相对位置关系,得到相机的内外参数与相对位移关系,如表 1 所示。由 TSA200 圆导轨电动直线滑台参数可知,在 8 细分下分辨率为 $2.5 \mu\text{m}$,即每接收 8 个脉冲信号(P),电机位移为 $2.5 \mu\text{m}$ 。实验过程中先用相机采集图像,然后使用电动直线滑台带动精度为 $1 \mu\text{m}$ 的光栅尺移动,在景深范围内直线滑台步进 9 次并记录每次光栅尺的测量值。对采集到的图像进行三维重建,得到特征点

的点云数据,以采集到的第一组图的点云数据重建的平面为基准面,分别计算每次移动后三维重建的点云数据与基准面的欧氏距离,取其均值作为电动滑台移动的距离。随后将本系统的实验测量结果与光栅尺的测量数据进行比较,得到相对误差。

最终得到系统的标定参数如表 1 所示,其中, f_x, f_y 为像素焦距; c_x, c_y 为相机的主点坐标; k_1, k_2, k_3 为相机的径向畸变系数; p_1, p_2 为相机的切向畸变系数; \mathbf{R}_0 和 \mathbf{T}_0 分别为两相机相对位置关系的旋转矩阵和平移矩阵。

表 1 系统标定参数

Table 1 System calibration parameters

Parameter	Left camera calibration parameters	Right camera calibration parameters
f_x, f_y	3349.428, 3328.896	3334.508, 3334.182
c_x, c_y	694.825, 411.300	631.871, 493.223
k_1, k_2, k_3	-0.053, -0.722, 0	-0.140, 0.560, 0
p_1, p_2	0, 0	0, 0
\mathbf{R}_0	$\begin{pmatrix} 0.551, & 0.010, & 0.834 \\ 0.003, & 0.999, & -0.010 \\ -0.834, & 0.011, & 0.551 \end{pmatrix}$	
\mathbf{T}_0	$(-417.578, -2.245, 217.447)$	

选取单次移动 10000P(3.120 mm)的一组图,对其每个面的点云数据进行平面拟合,如图 18 所示。由图 19 可见,平面拟合标准差都在 0.084 mm

以下,说明通过本文算法计算得到的三维特征点基本在一个平面,这符合实际情况。

选取不同的移动脉冲,分别为 2000P、5000P、

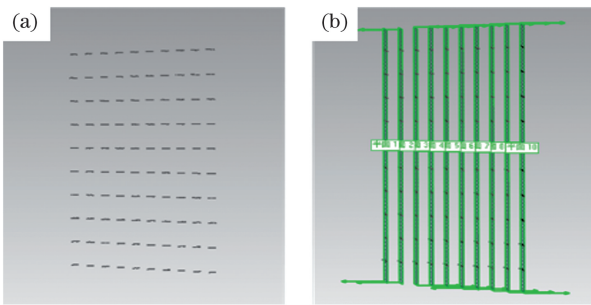


图 18 三维点云数据。(a)特征点三维点云图;(b)特征点拟合平面图

Fig. 18 Three-dimensional point cloud data. (a) Feature point three-dimensional point cloud; (b) feature point fitting plane

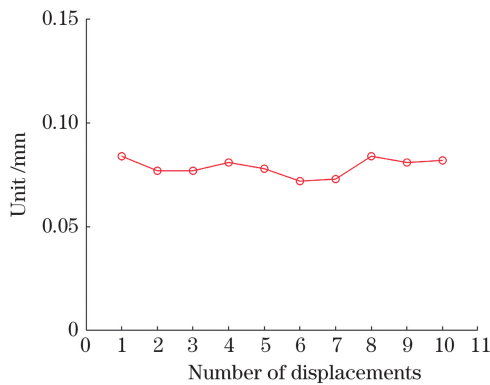


图 19 10 个平面拟合标准差

Fig. 19 10 standard deviations of plane fitting

10000P, 32000P (0.625 mm, 1.563 mm, 3.120 mm, 10.000 mm)。将电动滑台多次移动后,计算每次移

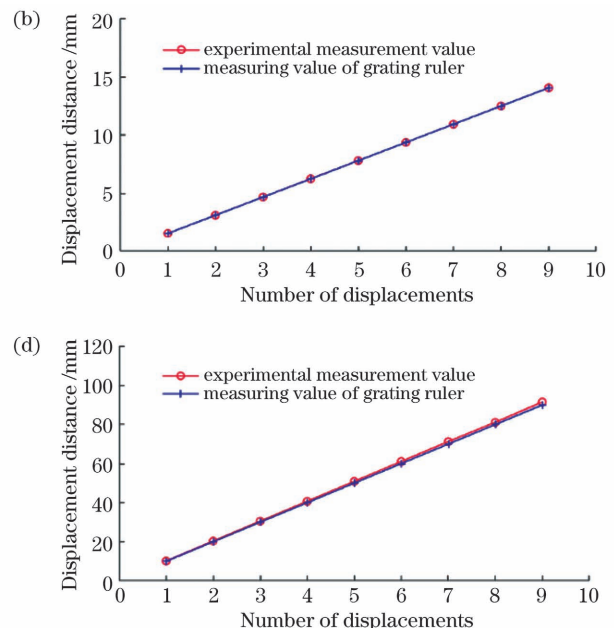
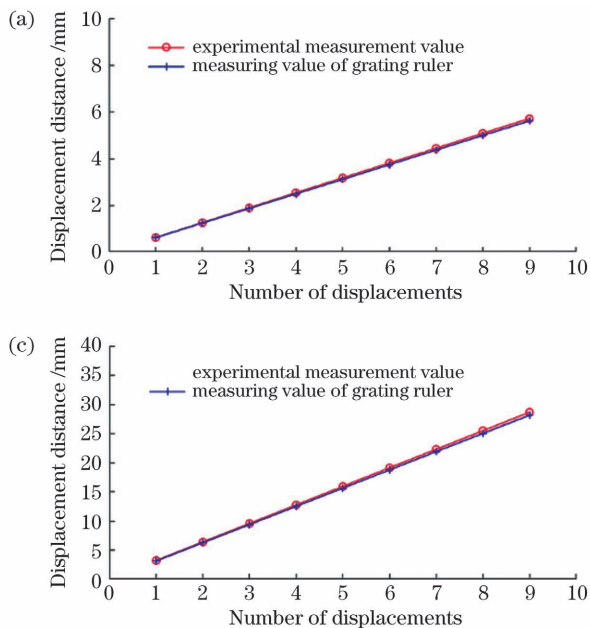


图 21 实验测量值与光栅尺测量值对比图。(a) 2000P;(b) 5000P;(c) 10000P;(d) 32000P

Fig. 21 Comparison of experimental measurement values and grating ruler measurement values. (a) 2000P; (b) 5000P; (c) 10000P; (d) 32000P

动特征点的三维点云与基准面的均值 \bar{d} , 如图 20 所示。将测量结果与光栅尺的测量数值进行比较, 由图 21 可见, 两者基本一致。计算实验测量值与光栅尺测量值的相对误差, 如图 22 所示, 可见多次重复性实验中, 最大相对误差为 2.20%, 这符合精密测量的要求。

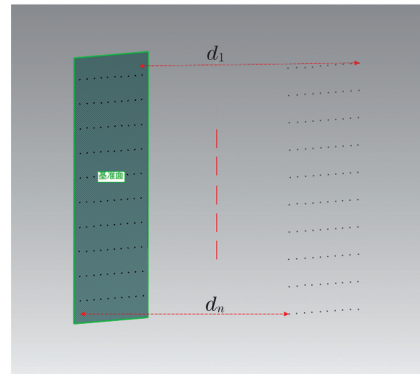


图 20 计算三维点到基准面的距离

Fig. 20 Calculation of distance from three-dimensional point to reference plane

4.2 曲面测量

为验证网格结构光双目测量方法的实际应用价值, 考虑到该方法有无法测量深度跳变太大物体的局限性, 因此选取两个变形程度符合测量范围的钣金件作为被测物, 如图 23(a)、(c) 所示。经实验验证本方法能够完整地测量变形曲面, 测量结果如图 23(b)、(d) 所示。结果证明本方法在曲面形貌三

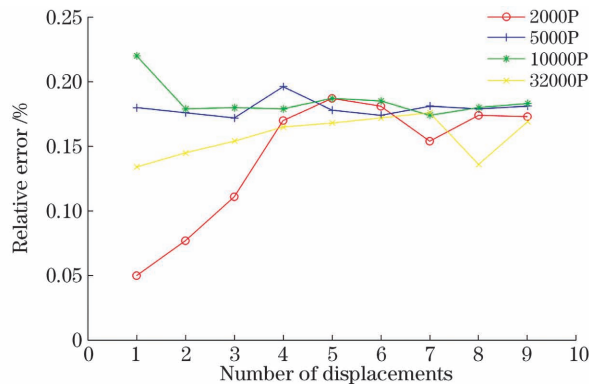


图 22 实验测量值与光栅尺测量值的相对误差

Fig. 22 Relative errors between experimental measurement values and grating ruler measurement values

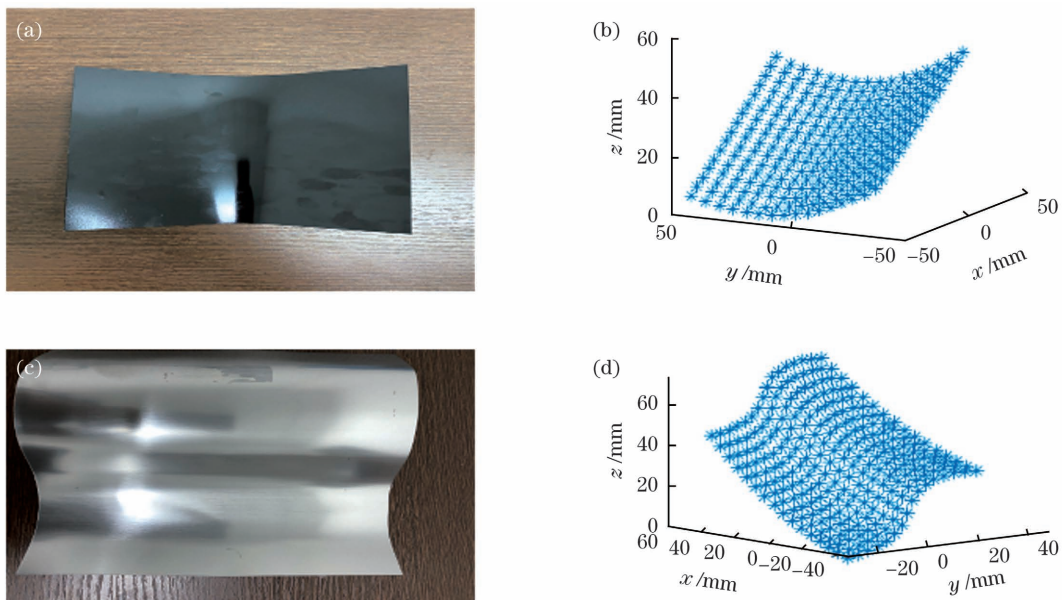


图 23 曲面测量实验。(a)(c)被测物;(b)(d)三维点云

Fig. 23 Surface measurement experiments. (a) (c) Objects to be measured; (b) (d) 3D point clouds

维检测中有一定的应用价值。

5 结 论

研究了基于网格结构光的双目立体视觉测量方法,将网格结构光光条的交点作为立体匹配特征点,实现三维测量。主要研究了网格结构光图案中特征点的提取方法。首先利用 Shi-Tomasi 提取图像中的所有角点。为了验证角点提取的鲁棒性,在原图中分别加入了椒盐、高斯噪声后进行实验,发现存在角点提取不准确的情况。基于密度聚类算法,研究了剔除提取到的角点中一些误提取的非角点和聚类分组的方法。分组后,设计了利用每一组角点锁定特征提取区域的策略,在该区域中分别对交错的光条进行中心提取并拟合两条中心线,将其交点作为立体匹配的特征点。分析了系统可测量的深度变化

最大值,并依据系统的工作特点,针对可能出现的部分特征点丢失的问题,研究了适合的特征点拓扑关系确定方法。通过平移台精度测量对比,验证了本文方法的测量精度。经过多次位移,将本系统测量得到的平移台移动量与精度为 $1 \mu\text{m}$ 的光栅尺测得的结果进行比较,得到的最大相对误差为 2.20% ,结果证明本文方法可以满足精密三维测量的需求。对不同程度变形的钣金件进行了测量,获取了其曲面形貌。

参 考 文 献

[1] Xian K Q, Pang J Z, Hu J. Surface crack size detection in nuclear fuel rods based on line structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 221013.
咸凯强, 庞静珠, 胡俊. 基于线结构光的核燃料棒表

- 面裂缝尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 221013.
- [2] Liu B, Shen K, Wei Z C, et al. High-precision measurement system for micro-diameter based on structured-light vision technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S2): 126-129.
刘斌, 沈康, 魏兆超, 等. 基于线结构光视觉技术的微小直径高精度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S2): 126-129.
- [3] Tu D W, Lan H, Zhang X. Digital three-dimensional reconstruction technology of cultural relics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 191504.
屠大维, 兰浩, 张曦. 文物数字化三维重建技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 191504.
- [4] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(8): 2666-2680.
- [5] Salvi J, Pagès J, Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- [6] Wang C X, Da F P. A novel adaptive windowed Fourier transform for phase retrieval in 3D shape measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0612005.
王辰星, 达飞鹏. 三维测量中一种新的自适应窗口傅里叶相位提取法[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0612005.
- [7] Guo H, He H, Chen M. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. Applied Optics, 2004, 43(14): 2906-2914.
- [8] Wang Y, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [9] Li B W, Wang Y J, Dai J F, et al. Some recent advances on superfast 3D shape measurement with digital binary defocusing techniques [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 236-246.
- [10] Je C, Lee S W, Park R H. Colour-stripe permutation pattern for rapid structured-light range imaging [J]. Optics Communications, 2012, 285(9): 2320-2331.
- [11] Posdamer J L, Altschuler M D. Surface measurement by space-encoded projected beam systems [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1982, 18(1): 1-17.
- [12] Yu S, Yu X Y, Guan C R, et al. A survey of 3D measurement using color coded structured light [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(5): 697-701.
于嵩, 于晓洋, 关丛荣, 等. 颜色编码结构光三维测量方法[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(5): 697-701.
- [13] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303001.
左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303001.
- [14] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [15] Yin W, Feng S J, Tao T Y, et al. High-speed 3D shape measurement using the optimized composite fringe patterns and stereo-assisted structured light system [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2411-2431.
- [16] Sun J R. 3D reconstruction technology based on grid structure light [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 27-44.
孙佳睿. 基于网格结构光的三维重建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 27-44.
- [17] Cui Z Y. 3D shape reconstruction and measurement system based on stereo vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 33-39.
崔中原. 基于立体视觉的三维形貌重建与测量系统[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 33-39.
- [18] Shi G M, Li R D, Li F, et al. Depth sensing with coding-free pattern based on topological constraint [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018, 55: 229-242.
- [19] Li Z Q. Study on some problems of the binocular convergent camera system [D]. Kaifeng: Henan University, 2008: 19-22.
李志强. 双目汇聚摄像系统若干问题研究[D]. 开封: 河南大学, 2008: 19-22.
- [20] Qi L, Zhang Y X, Zhang X P, et al. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm [J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13442-13449.
- [21] Chen Y J, Zuo W M, Wang K Q, et al. Survey on structured light pattern codification methods [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(9): 1856-1863.
陈彦军, 左旺孟, 王宽全, 等. 结构光编码方法综述[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(9): 1856-1863.
- [22] Zhang C P, Wei X G. Rectangle detection based on

- Harris corner[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2259-2266.
- 张从鹏, 魏学光. 基于 Harris 角点的矩形检测[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2259-2266.
- [23] Ren J C, Yang X D. A new method for binocular vision ranging based on corner detection [J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(7): 93-95, 105.
- 任继昌, 杨晓东. 基于角点检测的双目视觉测距新方法[J]. *电光与控制*, 2013, 20(7): 93-95, 105.
- [24] Zhao S, Yang M S. Study on occluded image matching using Shi-Tomasi algorithm combined with wavelet transform [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(11): 118-121.
- 赵双, 杨慕升. 结合小波变换的 Shi-Tomasi 算法遮挡图像匹配研究[J]. *机械设计与制造*, 2017(11): 118-121.
- [25] Hou J, Gao H J, Li X L. DSets-DBSCAN: a parameter-free clustering algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(7): 3182-3193.
- [26] Zhou Y, Meng X Q, Jiang D B, et al. Centerline extraction of structured light stripe under complex interference[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204004.
- 周渊, 孟祥群, 江登表, 等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1204004.
- [27] Xu X B, Fei Z W, Tan Z Y, et al. Improved calibration method based on the RANSAC approach and an improved gray centroid method for a laser-line-based structured light system [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(35): 9603-9613.
- [28] Tian L, Liu Z T. Least-squares method piecewise linear fitting[J]. *Computer Science*, 2012, 39(S1): 482-484.
- 田垅, 刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合[J]. *计算机科学*, 2012, 39(S1): 482-484.
- [29] Prince S J D, Eagle R A. Weighted directional energy model of human stereo correspondence [J]. *Vision Research*, 2000, 40(9): 1143-1155.
- [30] Chen C S, Hung Y P, Chiang C C, et al. Range data acquisition using color structured lighting and stereo vision[J]. *Image and Vision Computing*, 1997, 15(6): 445-456.
- [31] Huang P, Zheng Q, Liang C. Overview of image segmentation methods [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2020, 66(6): 519-531.
- 黄鹏, 郑淇, 梁超. 图像分割方法综述[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2020, 66(6): 519-531.
- [32] Shu N. Research on camera calibration method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- 舒娜. 摄像机标定方法的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [33] Lohry W, Zhang S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 540-542.

Binocular Measurement Method Using Grid Structured Light

Yang Fan^{1,2}, Liu Bin^{1,2*}, Chu Lu^{1,2}, Chi Yan³, Han Fangfang^{1,2}, Liu Na^{1,2}, Zhang Baofeng^{1,2}

¹ School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

² Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems, Tianjin 300384, China;

³ School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

Abstract

Objective By projecting structured light to object surface, the feature points for binocular stereo matching could be easily extracted for realizing three-dimensional (3D) measurement. Accurate extraction of the feature points is critical to the precision of 3D measurement. The encoded structured light pattern is usually used to guarantee the extraction accuracy of the feature points. In this case, the encoding modes always require the special design of the structured light pattern. And an adaptive decoding method should be implemented. However, the grid structured light has obvious intersection features which means the encoding and decoding processes are not essential. Thus, the extraction of the feature points could be simplified. In this paper, we proposed a binocular 3D measurement method using the intersections of the grid light pattern as the feature points for stereo matching. The image processing

algorithm for extracting the intersections was presented. Then the stereo matching could be easily accomplished by sorting the feature points according to the grid topology. The displacement measurement experiments were carried out to verify the robustness and accuracy of the proposed method. We hope that our work could provide a binocular 3D measurement method with the advantages of high precision, strong robustness, easy to deploy, and low cost.

Methods A novel feature point extraction algorithm for grid-structured patterns was developed to extract the intersections of the grid-structured patterns in the left and right views. The algorithm implemented a coarse-to-fine process. Firstly, the regions of the feature points were locked by the improved corner extraction method. After that, the fine pixel coordinates of the feature points could be obtained by calculating the intersections of the grid lines crossed in the regions. Furthermore, the maximum value of the measurable depth of the system was analyzed. According to the working characteristics of the system, a suitable method to determine the topological relationship of the feature points was presented even while some points missed in left and right views due to occlusion.

Results and Discussions For the region location of the feature points, the corner point extraction was performed on the whole image at first. Considering the presence of noise, the common Harris corner point extraction algorithm could fail (Fig. 7). By contrast, the Shi-Tomasi algorithm could produce better results (Fig. 8). However, it is inevitable that false extraction or missing corner may occur due to the image noise (Fig. 8). Then, the density clustering algorithm was applied to solve this problem. The noise simulation experiments proved that the algorithm was capable of eliminating the false extracted points and grouping the corner points accurately (Fig. 9). After that, the extracted corner points grouped by density clustering could determine the region of each feature point [Fig. 10(b) and Fig. 10(f)]. The light stripe center extraction of the horizontal and vertical lines was performed respectively in this region [Fig. 10(c) and Fig. 10(g)]. The equations of the cross lines were fitted through the center points. In this case, the pixel coordinates of each target feature point could be calculated [Fig. 10(d) and Fig. 10(h)]. Furthermore, some feature points may miss due to occlusion which brings difficulty in stereo matching. The idea of region growth was introduced to find the relative sequence relationship between the feature points, which can effectively avoid the problem of sequential coding caused by the absence of feature points (Fig. 16). To verify the robustness and accuracy of the proposed method, the displacement measurement experiments were carried out. The measurement results of the proposed method were compared with those of the grating ruler with the accuracy of $1\ \mu\text{m}$. The maximum relative error is 2.20% (Fig. 21).

Conclusions A binocular 3D measurement method using grid structured light was proposed in this paper. The algorithm and effective stereo matching method of the feature points were studied. First, the extraction of the grid corner points was implemented by using the Shi-Tomasi algorithm. Then, the density clustering algorithm was applied to eliminate the false extracted points and group the corner points accurately. After that, each group of corner points defined a region. The light stripe center extraction of the horizontal and vertical lines was performed respectively in the region. The equations of the cross lines were fitted through the center points. In this case, the pixel coordinates of each target feature point could be calculated. Furthermore, a suitable method for determining the topological relationship of the feature points was studied even while some points may miss in left and right views due to occlusion. The verification experiment results of the proposed method were compared with those of the grating ruler with the accuracy of $1\ \mu\text{m}$. The maximum relative error is 2.20%. And 3D shape measurements of the sheet metal parts with different deformation were implemented using the proposed method.

Key words measurement; binocular measurement; grid structured light; feature extraction; density clustering; three-dimensional reconstruction

OCIS codes 120.6650; 140.5670; 100.3010; 150.1135