

基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法

李涛涛^{1,2}, 杨 峰¹, 许献磊¹

¹中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

²萍乡学院机械电子工程学院, 江西 萍乡 337055

摘要 为解决现有线结构光大尺度测量标定复杂、精度不高的问题,提出了一种基于多视觉线结构光传感器的大尺度、高精度测量方法。多视觉线结构光传感器含 1 个激光器和多个等间距并排的相机(一主多从),相互间有 1/3 左右重叠视场(OFOV),光束覆盖所有相机视宽。传感器标定只需简易的棋盘格靶标,按张氏标定法采集靶标图像、标定传统参数;此外,考虑相机视角的不变性,利用 OFOV 内标定图像的已知特征角点,经图像配准可预标定相邻相机图像拼接的变换矩阵。变换矩阵的逐步连乘得到任意从相机图像转换到主相机成像平面的透视变换模型(PTM)。该方法通过各相机同步采集大尺度物体的局部光条图像,再利用 PTM 将所有局部光条快速拼接成完整的光条图像,最终经光条坐标提取、换算得到光条位置的三维坐标。实验结果表明:与已有方法相比,该方法使用简便、精度更高,重构模型平均构造深度与真实模型仅差 8.3%。

关键词 测量;大尺度测量;线结构光传感器;图像拼接;透视变换模型;多视觉

中图分类号 TG806; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1104003

Method of Large-Scale Measurement Based on Multi-Vision Line Structured Light Sensor

Li Taotao^{1,2}, Yang Feng¹, Xu Xianlei¹

¹State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

²School of Electromechanical Engineering, Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337055, China

Abstract In order to solve the problems of complex calibration and low accuracy that exist in large-scale measurement of the present line structured light, a measurement method with large-scale and high precision based on multi-vision line structured light sensor is proposed. Multi-vision line structured light sensor is comprised of a laser and several equidistant cameras (a single master and multi-slavers) which are arrayed side by side. About 1/3 overlapped field of view (OFOV) exists between neighboring cameras. The laser beam can cover the total width of field of view of all cameras. The calibration of sensor just needs a simple chessboard target. The method of Zhang's calibration method is used to acquire the target images and calibrate traditional parameters. In addition, considering that the perspectives of camera are invariable, the transformation matrix of images stitching in adjacent cameras can be pre-calibrated through image registration with the known feature corner points extracted from the internal calibration images in OFOV. Continuous multiplication of the transformation matrixes can finally build the perspective transformation model (PTM) which can be used to transform arbitrary slave camera image to the imaging plane of the master camera. With the proposed method, local light stripe images of large-scale object can be collected simultaneously by cameras. Then, all the local light stripe images are quickly stitched into a complete stripe image with PTM. Finally, 3D coordinates of light stripe location are obtained by the extraction and the conversion of the coordinate of the light stripe. The experimental results show that the proposed method is more

收稿日期: 2017-04-09; **收到修改稿日期:** 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61601466)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM16KFD03)

作者简介: 李涛涛(1988—),男,博士研究生,主要从事路面、隧道大尺度三维检测方面的研究。

E-mail: ltaotao1988@126.com

导师简介: 杨 峰(1968—),男,博士,教授,主要从事路面、隧道三维检测、地质雷达等方面的研究。

accurate and convenient than the existing methods. The average texture depth of the reconstructed model is only 8.3% away from that of real model.

Key words measurement; large-scale measurement; line structured light sensor; image stitching; perspective transformation model; multi-vision

OCIS codes 120.6650; 150.6910; 150.4232; 100.2000

1 引 言

随着大型装备制造、大场景扫描检测等领域的发展,大尺度、高精度三维测量技术在工件质检^[1-2]、逆向工程^[3]、路面检测^[4-5]等过程中的需求越来越多。三维测量方法中,结构光测量^[6-7]以其低成本、快速的特点被广泛应用。但常用结构光测量无法同时满足大范围与高精度测量的要求,故研究基于结构光的大尺度精确测量方法具有较强的实用价值。

现有线结构光测量方法中,依据传感器数量的不同分为单线结构光传感器测量^[8]、多线结构光传感器测量^[9]、多视觉线结构光传感器测量^[10]。曲学军等^[11-12]分别基于三标志点的多视数据对齐、传感器性能提升及标定算法优化的方法实现单传感器的三维测量,但测量过程复杂,范围有限,且精度不高。马玉坤等^[13-16]分别利用一维靶标、特制标定模块、组合靶标的固有特性(如尺寸、形状)得到多传感器之间的坐标转换模型,实现局部三维测量数据到全局坐标系的统一。这些方法普遍存在标定工具及过程复杂、标定参数较多、变换累积误差较大、数据对齐拼接或全局变换不稳健等缺陷^[17-19]。

针对以上问题,提出了一种新的基于多视觉线结构光传感器的大尺度物体、精确测量方法。多视觉线结构光传感器包含多个相机、一个激光器,所有参数标定只需要简易的二维棋盘格靶标。测量时,各相机同步采集大尺度物体的局部光条图像,标定获得的透视变换模型(PTM)对局部光条图像配准、拼接^[20-21],得到主相机成像平面上完整的光条图像。最后经光条中心提取、坐标换算得到光条位置三维坐标。

2 多视觉线结构光传感器原理及模型

2.1 传感器原理

线结构光测量的本质是激光三角测量。线结构光光束投射到被测物体表面,深度不一的表面引起激光光线形变,相机记录形变光条图像,利用三角测量原理将光条中心二维坐标转换成光条位置三维坐标,附加一维扫描可得到被测物完整的三维表面分布。图1为线结构光传感器的结构示意图。

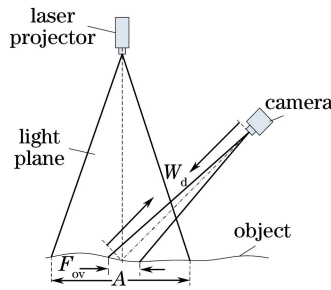


图1 线结构光传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of line structured light sensor

传感器的测量范围(F_{ov})、相机测量精度值(p)符合关系

$$\begin{cases} F_{ov} = \frac{s_w \cdot N_w \cdot W_d}{f} \\ p = \frac{F_{ov}}{N_w} = \frac{s_w \cdot W_d}{f} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 p 为单个像素表征实际测量尺寸, W_d 为相机工作距离, f 为焦距, N_w 为横向分辨率, s_w 为横向像元尺寸。由(1)式可知:传感器测量范围、测量精度值均与工作距离成正比,因此传统单线结构光大尺度测量时,工作距离较远, p 值大,单个像素表征实际测量尺寸大,准确性低。除了以上因素,相机与激光器自身性能也

是影响结构光测量范围与精度的主要原因。相比激光器,相机性能是更主要的制约因素,因为已有线结构光发射器的光束辐射范围和聚焦程度足以满足大尺寸测量的要求,但相机的像素分辨率有限,大视场拍摄时,测量精度偏低、精确度不高。

针对上述问题,多视觉线结构光传感器通过增加相机数量,合理布置相机、激光器位置对传统单视觉传感器进行改进。所有相机等间距并行排列,其中包含一个主相机和多个从相机,相互之间 1/3 左右视场为重叠视场(OFOV),激光器光束覆盖所有相机视宽。每个相机同步拍摄各自小视场的光条图像,再利用 OFOV 图像对相邻光条图像进行拼接,进而在保证测量精度的同时拓宽测量宽度。对拼接完整的光条图像进行坐标提取,获得光条中心像素坐标,再利用主相机成像坐标系与世界坐标系的单应性转换关系,将光条中心像素坐标换算成光条位置的真实三维坐标。

多视觉线结构光传感器的关键技术是多相机光条图像的拼接。传统图像拼接通过对相邻相机图像进行特征提取、图像匹配和透视变换,将局部光条图像统一到主相机的成像坐标平面,得到拼接完整的光条图像。但考虑到本传感器所有相机视角的不变性,相邻相机图像存在固定的拼接透视变换关系,因此可预先标定变换模型,图像拼接时只需直接利用已知模型进行透视变换,实现局部光条的快速拼接。

2.2 传感器模型

图 2 为多视觉线结构光传感器系统模型,以三个相机为例,包括一个主相机、两个从相机、一个激光器,相机一字排列,相邻之间有重叠视场,激光器光条由三个相机分段拍摄。 $O_w-x_wy_wz_w$ 为世界坐标系, $o_{ci}-x_{ci}y_{ci}z_{ci}$ 、 $o_i-u_iv_i$ ($i=0,1,2$) 分别表示 i 号相机(0 号为主相机)的摄像机坐标系、像素坐标系, π 为光平面。 P_i 为光平面上的点,世界坐标为 $P_{wi}=(x_{wi},y_{wi},z_{wi})$,像素坐标为 $p_i=(u_i,v_i)$ 。 h_1, h_2 为相邻相机图像的透视变换矩阵, H_1, H_2 为两个从相机图像向主相机成像坐标平面透视变换的单映射矩阵。

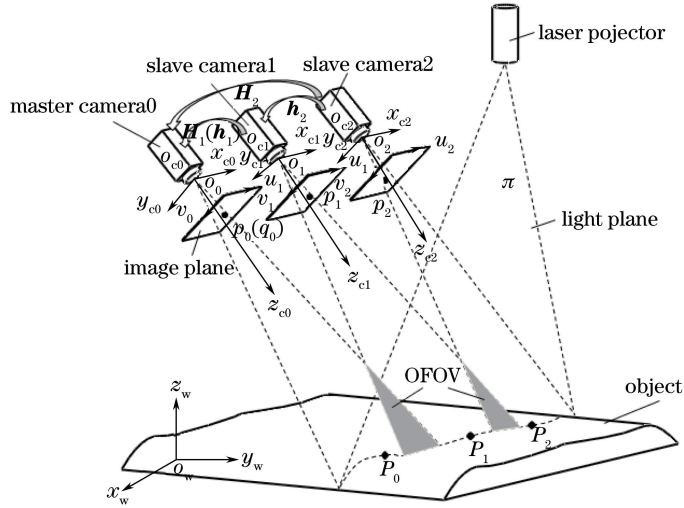


图 2 多视觉线结构光传感器系统模型

Fig. 2 Model of multi-vision line structured light sensor system

任意相机像平面上畸变点 p_i 经畸变校正后得到点 p'_i 为

$$p'_i = f_{\text{undistort}}(K_i, P_i, p_i) \quad i \in \{0, 1, 2\}, \tag{2}$$

式中, $f_{\text{undistort}}$ 为畸变校正函数, K_i, P_i 为相机径向、切向畸变参数。 p'_i 经逐步透视变换,统一到主相机成像坐标平面,变换结果为

$$\tilde{q}_i = H_i p'_i \quad i \in \{0, 1, 2\}, H_0 = E, \tag{3}$$

式中 E 为单位矩阵,统一变换结果 q_i 可由主相机的透视投影模型完成投影变换。(3)式、主相机透视投影变换模型及光平面方程一起构成的传感器数学测量模型为

$$\begin{cases} \tilde{q}_i = \mathbf{H}_i \tilde{p}'_i \\ s \tilde{q}_i = \mathbf{M}(\mathbf{R}, \mathbf{t}) \tilde{P}_{wi} \\ ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \end{cases}, \quad i \in \{0, 1, 2\}, \quad (4)$$

式中, s 为比例系数, \tilde{p}'_i 、 \tilde{q}_i 、 \tilde{P}_{wi} 为各对应点的齐次坐标, \mathbf{M} 为主相机内参, \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 为世界坐标到主相机坐标的旋转矩阵、平移矢量, a 、 b 、 c 、 d 为光平面方程的 4 个系数。

3 传感器标定

利用多视觉线结构光传感器标定工具, 标定过程简单。标定无需复杂的标定模型和高精密的辅助调整设备, 只需张氏标定法中所用的一张棋盘格靶标。具体的标定过程如图 3 所示。传感器需要标定两部分参数: 传统参数和 PTM, 其中传统参数包括相机内外参数、畸变参数和光平面参数。

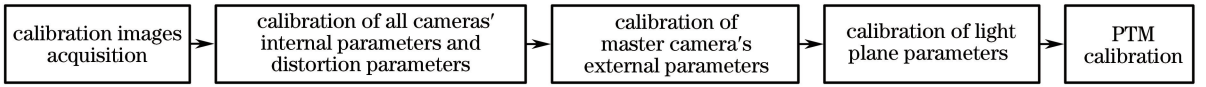


图 3 传感器标定过程

Fig. 3 Process of sensor calibration

标定图像采集与所选标定方法及所需标定参数有关。与相机相关的内、外及畸变参数标定按张氏标定法要求采集所需图像, 图像应尽量布满各个待标定相机视场。光平面参数标定需采集有光条和无光条的靶标图像各两张, 具体为: 在主相机的视场内, 选取两个存在高差的位置, 每个位置上各采集一张有光条和无光条的靶标图像。PTM 标定需要每对相邻相机同步采集重叠视场中至少三个不同位置的靶标图像。

3.1 相机标定

采用张氏标定法对相机内、外及畸变参数进行标定, 棋盘格角点在靶标坐标系的坐标和像素坐标已知, 以角点的实际像素坐标 m_{ij} 和投影坐标 \hat{m}_{ij} 偏差作为优化估计目标函数

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{ij} - \hat{m}_{ij}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{M}_j, k_1, k_2, p_1, p_2) \|^2, \quad (5)$$

式中 \hat{m}_{ij} 是第 i 张靶标图像第 j 个角点的投影坐标, \mathbf{M}_j 为第 j 个角点靶标坐标系的坐标, \mathbf{A} 为内部参数, \mathbf{R}_i 、 \mathbf{t}_i 为外部参数, k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 为相机的切向和径向畸变系数。选用 L-M 非线性优化算法求解该最小化问题, 获取相机内、外参数及畸变参数。

3.2 光平面标定

对两张无光条的光平面标定图像执行(5)式的运算, 可得到靶标坐标系向相机坐标系转换的旋转矩阵 \mathbf{R}_{L1} 、 \mathbf{R}_{L2} 和平移矢量 \mathbf{t}_{L1} 、 \mathbf{t}_{L2} 。以第一张图像的靶标坐标系作为传感器世界坐标系, 第 2 张图像的靶标坐标系向传感器世界坐标系变换的旋转矩阵 \mathbf{R}_{21} 、平移矢量 \mathbf{t}_{21} 为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{21} = \mathbf{R}_{L2}^{-1} \cdot \mathbf{R}_{L1} \\ \mathbf{t}_{21} = \mathbf{R}_{L2}^{-1} \cdot (\mathbf{t}_{L1} - \mathbf{t}_{L2}) \end{cases} \quad (6)$$

转换矩阵(\mathbf{R}_{21} , \mathbf{t}_{21})可将第二张图像光条位置的三维坐标统一到传感器坐标系中, 再结合第一张图像光条位置的三维坐标, 利用最小二乘法拟合得到光平面方程, 求得所需标定的光平面系数 a 、 b 、 c 、 d 。

3.3 PTM 标定

相比已有线结构光测量, 所提出的方法的关键是多相机局部光条图像的拼接, 图像拼接通常包括特征点提取、图像配准、模型构建、图像融合 4 步。所用传感器的各相机相对位置固定、视角不变, 因此相邻相机图像间具有固定的拼接透视变换关系。利用这种固定的变换关系, 在实际测量时无需重复执行以上 4 步, 只需利用预先标定的传感器 PTM 直接进行图像融合便可实现图像的快速拼接。

传感器 PTM 用于实现各相机局部光条图像的拼接。传感器 PTM 标定首先应对所有相邻相机图像拼接透视变换矩阵(PTMAI)进行标定, 利用相邻相机同步采集的 OFOV 区域标定板图像, 提取各自图像中的角点作为图像匹配特征点, 利用相邻相机图像中已知特征点求取图像拼接的 PTMAI。计算 PTMAI (\mathbf{h}) 的

优化目标函数为

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \| \mathbf{u}_{ij} - \mathbf{h} \mathbf{v}_{ij} \|^2, \quad \mathbf{u}_{ij} \in U, \mathbf{v}_{ij} \in V, \quad (7)$$

式中 m 、 n 分别为标定图像张数、靶标角点数, U 、 V 为相邻相机标定图片的角点集, \mathbf{u}_{ij} 、 \mathbf{v}_{ij} 为角点。在最大似然准则下, 利用最小二乘法对目标函数进行线性最优化, 求得 \mathbf{h} 。

任意从相机图像经多次透视变换被统一到主相机成像平面, 从而得到完整的拼接光条图像。图像的多次透视变换过程实际为 PTMAI 的逐级连乘过程, 利用 PTMAI 的连乘运算得到传感器的 PTM, 可以表示为

$$\mathbf{H}_j = \prod_{i=1}^j \mathbf{h}_i, \quad (8)$$

式中 j 为从相机编号, \mathbf{H}_j 为 j 号从相机图像向主相机成像平面变换的单映射矩阵。

4 大尺度测量原理

所用多视觉线结构光传感器由 1 个激光器和多个等间距并布置的相机组成, 激光器光束覆盖所有相机视宽, 多个相机拍摄连续小范围的光条图像。传感器利用多相机的小视场拍摄和合理布置的相机、激光器位置, 实现大尺度物体的精确测量。实际测量时, 每个相机同步采集大尺度物体上局部小范围的连续光条图像; 基于相邻相机的 OFOV 图像及标定好的 PTM 对局部光条图像进行拼接, 所有局部光条图像统一到主相机的成像坐标平面上, 得到完整的光条拼接图像; 采用灰度重心法提取拼接图像的光条中心坐标; 再由主相机的透视投影模型和光平面方程, 将光条中心坐标换算成光条照射位置的真实三维坐标。

该大尺度、精确测量方法的关键是多相机光条图像的拼接。基于相邻相机图像间固定的拼接透视变换关系, 测量前对传感器的 PTM 进行预先标定, 进而减少测量过程中图像拼接的运算量, 大大加快了测量速度。基于预先标定的传感器 PTM(\mathbf{H}_j), 对所有相机的局部光条图像 \mathbf{X}_j 进行图像拼接, 得到完整光条拼接图像

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \sum_{j=1}^N \mathbf{H}_j \mathbf{X}_j, \quad (9)$$

式中 j 为从相机编号, N 为从相机数, \mathbf{X}_0 为主相机图像。

5 实验验证与结果分析

为了对所提出的方法进行有效性验证, 搭建了一套具有三个相机的多视觉线结构光传感器大尺度测量系统, 如图 4 所示。相机采用配 12 mm 焦距光学镜头的工业相机, 分辨率为 1280 pixel × 1024 pixel, 成像靶面为 1/2"; 工作距离为 0.75 m, 视场宽度为 0.4 m, 测量精度值为 0.3 mm。激光器波长为 660 nm, 功率为 100 mw, 扇形角为 75°, 工作距离设置为 1 m, 光束辐射范围为 1.22 m。

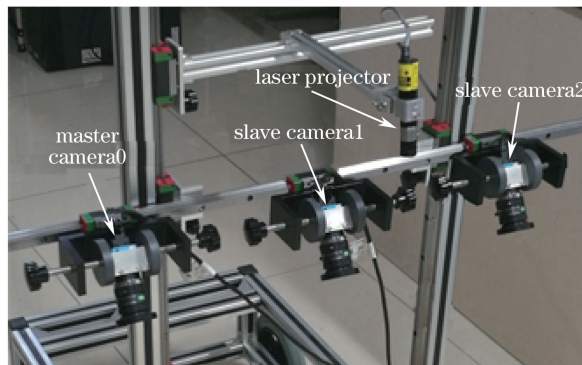


图 4 大尺度测量系统装置图

Fig. 4 Setup diagram of large-scale measurement system

5.1 标定实验

标定实验的棋盘格靶标角点间距为 7 mm,纵、横角点数为 7×8。以张氏标定法作为各个相机内、外及畸变参数的标定方法,依次采集每个相机的标定源图片,要求源图片位置遍布各个相机视场区域,利用标定源图片标定各相机参数。按 3.3 节中所述方法对 PTM 进行标定,PTM 标定源图片采集是将棋盘格靶标依次放置在相邻相机 OFOV 区域内三个以上的不同位置,相邻相机均采集不同位置上的棋盘格图像。图 5 为大尺度测量系统采集的一组 PTM 标定源图像,标定图像中的匹配特征角点通过画线连接,变换模型标定结果为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1.021 & -0.240 & 407.789 \\ 0 & 1.006 & 6.067 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1.047 & -0.47 & 813.205 \\ -0.006 & 1.016 & 8.667 \\ 0 & 0 & 1.001 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

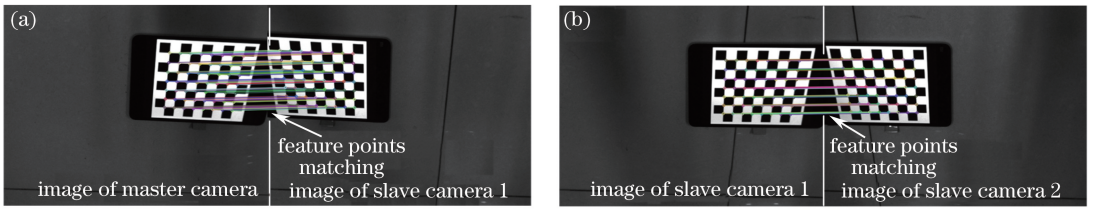


图 5 PTM 标定源图片匹配。(a) 1 号从相机与主相机图像匹配;(b) 2 号从相机与 1 号从相机图像匹配
Fig. 5 PTM calibration source images matching. (a) Images matching of slave camera 1 and master camera;
(b) images matching of slave camera 2 and slave camera 1

5.2 测量精度对比实验

为对比验证所提出的方法的测量精度,将其与单视觉线结构光传感器测量方法(方法 1)、基于三维对齐的多线结构光传感器测量方法(方法 2)和基于三维全局统一的多视觉线结构光传感器测量方法^[10](方法 3)进行比较。在系统组成方面,方法 1、2 分别包括一个、多个线结构光传感器,每个传感器由单独的激光器和相机组成;方法 3 和所提出的方法都是由单个激光器和多个相机组成。在后期光条坐标变换方法方面,方法 1 直接进行透视投影变换,方法 2、3 的每个传感器光条先独立透视变换,再分别进行三维对齐、全局统一。考虑比较上的合理性,所有方法的相机和激光器都选用相同型号,方法 2、3 系统中均含三个相机,以最左侧相机为全局相机。为了将测量结果与实际值进行比较,实验以 1.015 m 长的高精密钢制齿条作为实验对象,表面氧化成黑色,加工误差为 0.01 mm,齿条及单齿设计尺寸如图 6 所示。

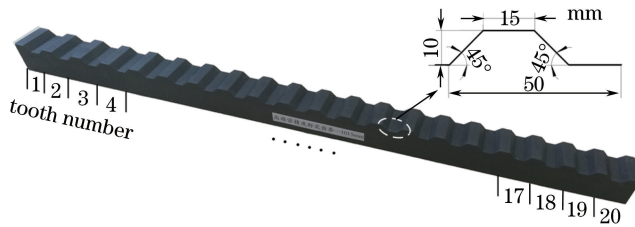


图 6 高精密齿条
Fig. 6 High-precision rack

对所有方法测得的结果进行线性回归,得到各齿顶、斜齿、齿根的拟合函数方程,计算单齿在设计回归直线上的残差平方和均值(RSS, v_{RSSa}),图 7(a)以所提出的方法对第 9 齿测量处理为例;统计各方法测得所有单齿的 v_{RSSa} 变换情况,如图 7(b)所示,图中 \bar{v}_{RSSa} 为 v_{RSSa} 的均值,能反映各方法的整体测量精度。

由图 7 可知:方法 1 测得各齿 v_{RSSa} 较大,变化平稳, \bar{v}_{RSSa1} 最大为 0.0645,测得轮廓与实际轮廓偏差最大,精度最差。其余方法 v_{RSSa} 在第 1~6 齿内极为接近,但在第 7、13 齿处均出现两次不同程度的“阶梯骤增”情

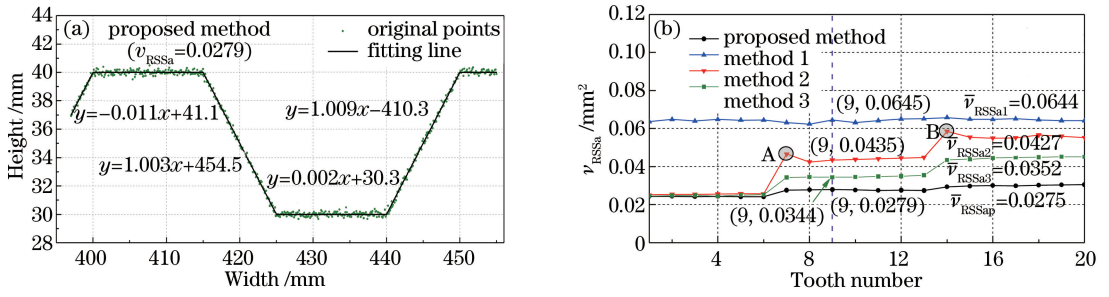


图 7 测量结果对比。(a)所提方法测得的第 9 齿轮廓；(b)齿条 RSS

Fig. 7 Comparison of the measurement results. (a) Measured profiles of the 9th tooth with the proposed method; (b) RSS of rack

况,方法 2 在这两处[图 7(b)中的 A、B]“异常骤增”,增加幅度均大于之后的数齿。整体骤增程度和 \bar{v}_{RSSa} 从大到小分别为方法 2、方法 3、所提出的方法,这种骤变是由光条数据的三维对齐或全局统一变换引起的,骤增大小直接表征了测得轮廓与实际轮廓偏差大小。由此可知:大尺度测量时,方法 1 全局测量精度不高;方法 2、3 虽能保证较高的局部测量精度,但不同区域测量精度变化较大,全局精度不高,方法 2 尤为突出;所提出的方法具有较高的局部和全局测量精度。

5.3 模型测量实验

实验测量对象为室内 1.8 m×1 m 的水泥路面模型,模型表面整体平整,局部有裂缝、坑洼和拥包等破损。图 8(a)、(b)、(c)为某一时刻测量系统各相机拍摄的局部光条图像,图 8(d)为光条拼接图像,图中#1、#2 为实验标识物。

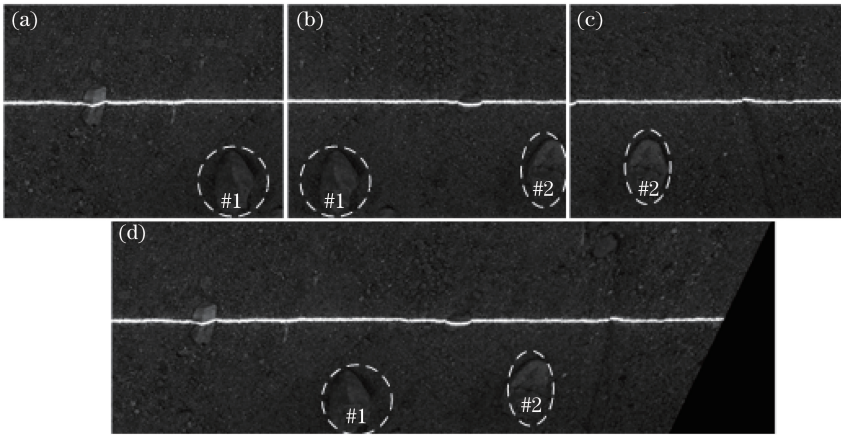


图 8 (a)主相机局部光条图像;(b)从相机 1 局部光条图像;(c)从相机 2 局部光条图像;(d)光条图像拼接结果

Fig. 8 (a) Local light stripe image of master camera; (b) local light stripe image of slave camera 1; (c) local light stripe image of slave camera 2; (d) result of light stripe images stitching

采用上述几种方法对模型进行测量,图 9(a)、(b)、(c)、(d)为严重破损区域 S 的测量结果($230\text{ mm} < S_{width} < 480\text{ mm}$, $300\text{ mm} < S_{length} < 600\text{ mm}$);图 9(e)、(f)、(g)为测量结果中局部典型破损(裂缝、坑洼)的放大对比图;图 9(h)为图 9(g)所示裂缝破损 A、B、C、D 处的截面轮廓对比图。比较测量结果可以发现:方法 1 对路面的细节(如细小裂缝、坑洼边缘)无法进行准确测量,出现坑洼缩小、细小裂缝模糊甚至消失等情况,如图 9(e)、(f)所示。方法 2、3 能较完整地测量局部细节信息,但在三维数据拼接、全局变换连接位置(E、H 处)存在不同程度的错位现象,比较图 9(g)中 $b_3 - c_3 - d_3$ 、图 9(h)中 B-C-D 轮廓。相比方法 1、2、3,所提方法能准确、完整地测得路面模型三维信息。

为量化比较各种方法的测量效果,以裂缝参数(条数 N、长度 L、宽度 W)和路面平均构造深度(TD, v_{TD})作为指标,对严重破损区域 S 的真实及重构模型进行参数化评价。裂缝参数、TD 值的比较能分别从局部和整体反映真实模型与重构模型的差异程度。真实模型各指标可通过电动铺沙和人工测量的方式获得;重构

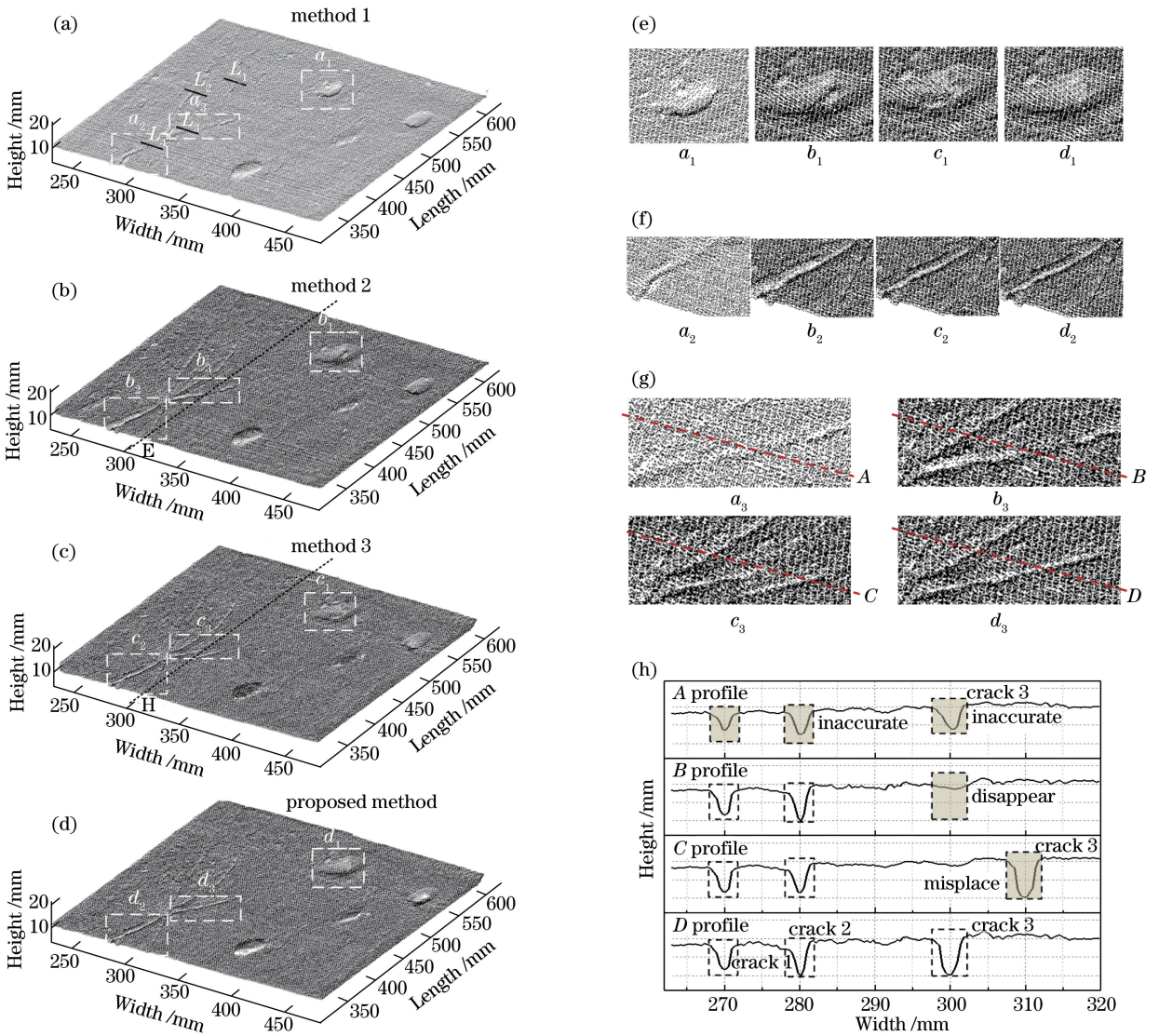


图9 测量结果及局部典型破损对比。(a)、(b)、(c)、(d)严重破损区域 S；

(e)坑洼；(f)裂缝区域 1；(g)裂缝区域 2；(h)裂缝轮廓

Fig. 9 Comparison of the measurement results and local typical damages. (a), (b), (c), (d) Severely damaged area S；

(e) pothole；(f) crack area 1；(g) crack area 2；(h) profile of crack

模型的裂缝参数可通过对模型二维高程数字图像进行人工与自动识别^[22-23]相结合的方式获得，TD 值采用双向均值法^[24]求得

$$v_{TD} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\max(\mathbf{G}) - \mathbf{G}_{ij}], \quad (12)$$

式中 m 、 n 为重构模型的行数、列数， G_{ij} 为第 i 行、 j 列的高程信息。真实模型与三种方法测得模型的评价参数统计如表 1 所示。

表 1 中， $\delta = |v_{TD_{actual}} - v_{TD_{model}}| / v_{TD_{actual}}$ ， L_i 为被测裂缝在模型长度方向的位置。由表 1 可知：与真实模型的各项评价参数相比，所提出的方法测得模型各评价参数与之最为接近，其中平均构造深度仅相差 8.3%；方法 3 模型次之，方法 1 模型相差最大。方法 1 模型与真实模型的平均构造深度和裂纹长度参数相差最大，分别为 24.7%、21.7%。除所提出的方法能准确测得裂缝条数外，其他两种方法都存在丢失或增加的情况。方法 3 各项评价参数优于方法 2，但仍比所提出的方法差。由此可见所提出的方法具有较高的测量准确性。

表 1 真实模型与重构模型评价参数比较

Table 1 Comparison on evaluation parameters of actual model and reconstructed models

Model	TD /mm	TD error (δ)	Crack parameter					
			Branch	Length / mm	Width /mm			
					count	$L_1=525$ mm	$L_2=493$ mm	$L_3=418$ mm
Actual	2.102	0	5	498	2.28	2.40	5.13	2.89
Method 1	1.583	24.7%	4	390	3.06	2.81	6.32	3.53
Method 2	2.412	14.7%	6	461	2.51	2.56	5.54	3.26
Method 3	2.349	11.8%	6	456	2.45	2.57	5.46	3.10
Proposed method	2.273	8.3%	5	477	2.46	2.50	5.31	3.02

以上精度对比实验和模型测量实验结果说明所提出的方法相对其他三种线结构光大尺度测量方法具有更高的测量精度和准确性,原因在于:

1) 单视觉线结构光大尺度测量主要通过加大工作距离来实现,单个像素表征实际测量尺寸较大,测量精度不高,导致测得齿条轮廓与实际轮廓偏差较大,路面细节模糊甚至丢失等情况。

2) 基于三维对齐的多线结构光大尺度测量由多个传感器单独采集三维数据,利用标定位姿参数实现数据的对齐、拼接。受传感器间互扰结构光条、标定位姿偏差等因素的影响,导致重构模型拼接错位、拼接处 v_{RSSa} 异常骤变、齿条不同位置测量精度变化较大、全局测量精度不高等情况。此外,当主传感器任意侧存在两个及以上传感器时,多次变换带来的累积误差也会对测量精度和准确性产生影响。

3) 基于三维全局统一的多视觉线结构光传感器测量与方法 2 类似,各传感器单独采集数据到局部坐标系下,后统一三维变换到相同的全局坐标系中。全局变换模型标定工具及过程复杂、标定参数较多,测量精度受标定误差、空间三维坐标多次变换累积误差的影响较大,导致重构模型也存在错位、 v_{RSSa} 骤变、全局测量精度不高等情况。

4) 所提出的多视觉线结构光大尺度测量方法采用多个并排的视觉相机对连续的局部小视场进行拍摄,相机工作距离较短,实现大尺度测量的同时保证了较高的测量精度和准确性;此外,光条图像先拼接后变换的处理方式首先保证了光条变换前后的连续性,其次多次平面二维图像的透视变换相对方法 3 的多次空间三维坐标变换,其运算累积误差减少,另外较少的标定参数和简易的标定过程进一步提高了测量的精度。

6 结 论

提出了一种基于多视觉线结构光传感器的大尺度、精确测量方法,传感器由多个并排的相机组成。该方法首先由各相机同步采集大尺度物体的局部光条图像,再利用相邻相机 1/3 左右重叠图像和预先标定的不变 PTM 完成局部光条图像的变换和拼接,最后经光条中心坐标提取、换算得到光条位置三维坐标,从而实现大尺度物体的精确测量。标定实验、测量精度对比实验和模型实测结果表明:相比已有大尺度线结构光测量方法,该方法测量前的传感器标定工具及过程简单、实用,具有较高的全局测量精度,测量 v_{RSSa} 为现有方法的 1/3~2/3,重构模型平均构造深度与真实模型仅差 8.3%。因此,该方法能较好地满足大尺度物体的高精度、准确测量要求。

参 考 文 献

[1] Wu B, Xue T, Zhang T, *et al.* A novel method for round steel measurement with a multi-line structured light vision sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(2): 025204.

[2] Zhang Haiming, Yang Xichen, Gao Gui. 3D reconstruction of parts to be processed by laser remanufacturing robot[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2937-2944.
张海明, 杨洗陈, 高贵. 激光再制造机器人待加工零件形貌三维重建[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2937-2944.

[3] Lai Xide, Li Guangfu, Zhang Weibin, *et al.* 3D model reconstruction and its feature parameters extraction of a turbine blade[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 915-920.
赖喜德, 李广府, 张惟斌, 等. 涡轮叶片逆向建模与特征参数提取[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(5): 915-920.

- [4] Ouyang W, Xu B. Pavement cracking measurements using 3D laser-scan images [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105204.
- [5] Monti M. Large-area laser scanner with holographic detector optics for real-time recognition of cracks in road surfaces [J]. Optical Engineering, 1995, 34(7): 2017-2023.
- [6] Lu Mingteng, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.* 3D shape reconstruction algorithms for modulation measuring profilometry with synchronous scanning [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0308006.
卢明腾, 苏显渝, 曹益平, 等. 同步扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0308006.
- [7] Ou Pan, Wang Ting, Li Ruixiang. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011102.
欧攀, 王婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011102.
- [8] Liu Chong, Sun Junhua, Liu Zhen, *et al.* A field calibration method for line structured light vision sensor with large FOV [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(1): 106-112.
刘冲, 孙军华, 刘震, 等. 大视场线结构光视觉传感器的现场标定 [J]. 光电工程, 2013, 40(1): 106-112.
- [9] Garrido-Jurado S, Munoz-Salinas R, Madrid-Cuevas F J, *et al.* Simultaneous reconstruction and calibration for multi-view structured light scanning [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 39: 120-131.
- [10] Zhan D, Yu L, Xiao J, *et al.* Multi-camera and structured-light vision system (MSVS) for dynamic high-accuracy 3D measurements of railway tunnels [J]. Sensors, 2015, 15(4): 8664-8684.
- [11] Qu Xuejun, Wang Yong, Fan Longxin, *et al.* Alignment of multi-view data of linear structure light scanning measurement [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(5): 124-129.
曲学军, 王勇, 樊龙欣, 等. 线结构光三维扫描测量中的多视数据对齐 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19(5): 124-129.
- [12] Xie Zexiao, Liu Jingxiao. Calibration technology for line structured light sensor with large scale [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1214001.
解则晓, 刘静晓. 超大尺度线结构光传感器现场标定技术 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1214001.
- [13] Ma Yukun, Wang Zhongya, Yang Guowei, *et al.* A system based on structured-light sensors for measurement of pavement evenness [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(11): 1597-1603.
马玉坤, 王中亚, 杨国威, 等. 基于线结构光传感器的公路平整度测量系统 [J]. 传感技术学报, 2013, 26(11): 1597-1603.
- [14] Huang Bangkui, Liu Zhen, Zhang Guangjun. Global calibration of multi-sensor vision measurement system based on line structured light [J]. Journal of Optoelectronics • Lasers, 2011, 22(12): 1816-1820.
黄邦奎, 刘震, 张广军. 多传感器线结构光视觉测量系统全局校准 [J]. 光电子 • 激光, 2011, 22(12): 1816-1820.
- [15] Zhang Qican, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Calibration of 3-D measurement system using multi-sensor with line structured-illuminated laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 225-227.
张启灿, 苏显渝, 邹小平. 多个线结构光传感器三维测量系统的校准 [J]. 激光技术, 2005, 29(3): 225-227.
- [16] Huang Y G, Li X H, Chen P F. Calibration method for line-structured light multi-vision sensor based on combined target [J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 2013(1): 92-98.
- [17] Masuda T, Sakaue K, Yokoya N. Registration and integration of multiple range images for 3-D model construction [C]. Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996, 1: 879-883.
- [18] Zhang Weiguang, Zhao Hong. Error correction method for three-dimensional measurement system with multi-sensor and linear-structure light [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(6): 75-80.
张维光, 赵宏. 线结构光多传感器三维测量系统误差校正方法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(6): 75-80.
- [19] Tang Minghui, Cheng Xiaosheng, Cui Haihua, *et al.* A high stability mapping stitching method for structured light three-dimensional measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112006.
汤明辉, 程筱胜, 崔海华, 等. 面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112006.
- [20] Kim H K, Lee K W, Jung J Y, *et al.* A content-aware image stitching algorithm for mobile multimedia devices [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(4): 1875-1882.
- [21] Zou Chengming, Hou Xiaobi, Ma Jing. SIFT image stitching based on geometric image registration solution [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science), 2016, 44(4): 32-36.
邹承明, 侯小碧, 马静. 基于几何学图像配准的 SIFT 图像拼接算法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 32-36.
- [22] Liu S, Wang W X, Wang F P. Measurement of road surface irregular crack width based on ferret and second order

- moment[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2016, 9(12): 51-60.
- [23] Wang Pingrang, Huang Hongwei, Xue Yadong. Automatic recognition of cracks in tunnel lining based on characteristics of local grids in images[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2012, 31(5): 991-999.
王平让, 黄宏伟, 薛亚东. 基于图像局部网格特征的隧道衬砌裂缝自动识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 991-999.
- [24] Hao Xueli, Sun Zhaoyun, Sha Aimin, *et al.* 3D detection of the groove wear degree on cement concrete pavement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1767-1773.
郝雪丽, 孙朝云, 沙爱民, 等. 水泥混凝土路面刻槽磨损程度三维检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1767-1773.