

基于二维图像基准的动态线扫描点云校正方法

马璐瑶, 郝继贵, 杨凌辉*, 刘皓月, 樊一源, 杨朔

天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072

摘要 提出一种基于二维图像基准的动态线扫描点云校正方法, 采用基于重投影图像全局变换和基于重投影图像光流分析的两步式校正手段, 实现点云轮廓与二维图像基准在复杂扰动下精准、可靠的关联, 优化每条点云轮廓的位姿, 并结合图像和点云信息设计基于低噪声基准的校正补偿方法, 实现 6 自由度全面校正。这为运动状态下基于点云的细节分析检测提供了有效的技术支持。

关键词 测量; 视觉测量; 点云; 线扫描; 校正; 扰动

中图分类号 TH741 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231662

1 引言

基于高密度点云的三维形貌测量具有信息丰富、表现形式真实直观的特点, 能够还原细节特征信息^[1-2]。运动状态下的三维形貌测量应用于轨道交通领域, 为移动巡检车上的轨道检测或运行状态下的列车检查提供了更加高效、快捷的解决方案^[3-5]。

基于结构光投影的视觉三维形貌测量具有非接触、高精度、高分辨率的优点^[6-7]。视觉结构光测量按照测量模式可分为面扫描、线扫描两类。面扫描技术采用面阵相机与面结构光获取局部块状点云^[8], 但其受限于相机的采集频率, 往往在静止状态下进行高精度、高分辨率的形貌测量^[9]。线扫描技术可分为面阵相机线结构光测量和线阵相机测量, 单次测量可获得二维的点云轮廓, 且随着运动连续延展成三维形貌, 这是一项专门与运动相结合的视觉测量技术。其中, 面阵相机线结构光测量的数据利用率低, 且在进行高分辨率测量时, 扫描速度缓慢。线阵相机是一种特殊视觉传感器, 仅在一维方向成像^[10], 因此可以轻松兼顾高分辨率和高采集频率, 为运动状态下三维形貌测量提供了最理想的硬件技术支持。基于线阵相机的动态线扫描点云测量未来发展潜力大^[11]。

然而, 由于二维轮廓之间相互独立, 基于线阵相机动态线扫描的点云形貌在运动延展方向缺乏刚性, 若不采取相应的措施则容易引入点云拼接误差, 从而影响细节特征的重建精度。为避免引入点云拼接误差, 其中一种方式是在稳定的环境下使用精密位移平台。但这在实际工程中并非主流选择, 例如列车、铁轨、隧

道等检测场景更倾向于利用现成的轨道或灵活的巡检车^[12-13], 但其无法保证足够高的运动精度, 同时也存在运动扰动, 如检测车的抖动、列车速度波动等^[14-16]。另一种方式是在运动方向添加基准进行约束和校正, 具体可分为外部基准和内部基准。外部基准主要依靠附加传感器提供的定位结果来约束点云拼接。然而, 线阵相机扫描频率极高, 基于视觉、室内 GPS (Global positioning system)、激光跟踪仪和合作靶标等定位方法均无法满足该需求^[17-19], 但若加入惯性测量单元则易受噪声、漂移的影响。内部基准主要依靠点云自身的形状或纹理等特征进行约束^[20], 但无论是二维点云轮廓还是一维线阵图像, 都存在特征不明显、缺乏重叠信息、前后关联薄弱等问题。有的方法利用特定场景下已知的轮廓特征, 但其应用场景、校正自由度均会受限^[14-15, 21]。因此, 点云校正的关键问题在于基准的构建, 而且运动扰动情况也比较复杂, 其包含来自多个自由度的运动偏差和抖动, 进一步增加了点云校正问题的严峻性^[22]。运动偏差的累积往往会造成大幅度的点云偏移, 而运动中难以控制的抖动则会造成不规则的点云畸变, 二者综合起来会造成复杂的点云形变, 从而使实现精准、可靠、高效的点云校正成为难题。

本文融合内部基准和外部基准的思想, 提出基于二维图像基准的动态线扫描点云校正方法, 通过附加的面阵相机拍摄被测物表面, 以二维图像为基准将动态线扫描点云轮廓的纹理关联起来, 构造点云轮廓的位姿约束, 以减小拼接误差。该方法依次采用基于重投影图像全局变换的初步校正和基于重投影图像光流分析的精细校正, 两步式的校正流程高效配合, 能够在

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-11-11; 录用日期: 2023-12-01; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51975408, 52127810, 51721003)

通信作者: *icelinker@tju.edu.cn

复杂的运动扰动下可靠、精准地关联基准图像和点云轮廓,结合相机成像、位姿扰动模型和迭代算法,将关联结果有效转换为点云位姿调整量,并结合图像点云信息设计基于低噪声基准的校正补偿算法,实现 6 自由度校正。该方法打破线阵相机动态线扫描点云校正的重大瓶颈,能够在各种程度的复杂扰动下保证校正的可靠性,为运动状态下的基于点云的细节分析检测提供借鉴。

2 基本原理

来自面阵相机的二维图像对于来自线阵相机的线扫描点云是一种理想的基准。首先,面阵相机虽然不适合运动状态下的三维点云测量,但只要能够提供照明并控制足够短的曝光时间,便可在运动中低频、间断性地捕获理想的二维图像。其次,面阵图像视场范围可覆盖多条点云轮廓,这种一对多的关系使得采集到的低频的

面阵图像完全可以服务于高频的线阵扫描,而二维面阵图像很好地弥补了线扫描点云在运动方向缺乏的刚性。此外,点云测量、校正的底层均为视觉传感器,在成像原理上具有相通性,二者具备相互关联的潜力。

如图 1 所示,面阵相机、线阵相机、结构光投影仪之间通过工装固连,在运动状态下协同工作。面阵相机和线阵相机都由投影仪触发,工作在同一时钟、不同频率下,曝光时间一致且较短。线阵相机和投影仪的工作频率很高,可实现运动状态下高分辨率点云轮廓获取和纹理信息的同步映射。面阵相机被大幅分频后的投影仪信号触发,在投影白图的辅助下低频获取纹理图像。根据有效的匹配和校正算法,通过铁轨等被测物表面自身的非稠密纹理特征,面阵相机二维图像基准与线阵相机点云轮廓即可形成一对多的关联,并进一步转换成点云轮廓的位姿校正量,从而补偿点云轮廓在拼接方向的误差。

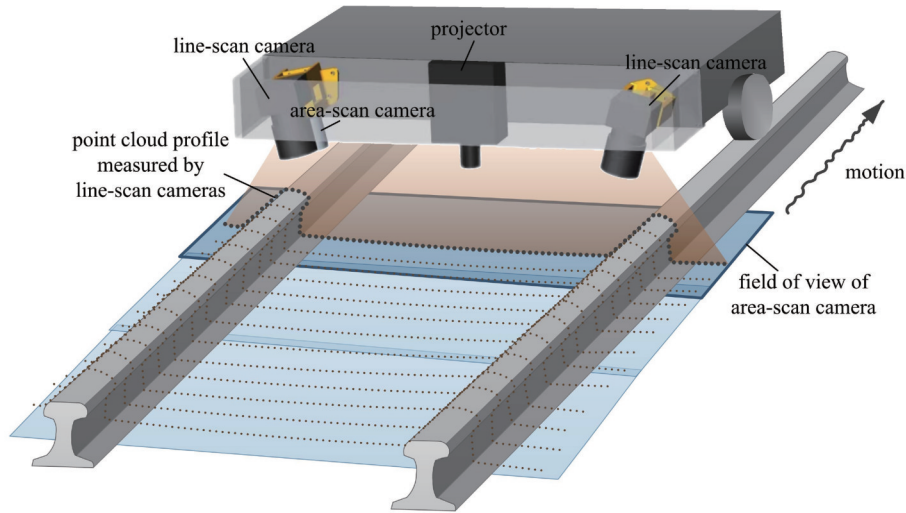


图 1 基于二维图像基准的动态线扫描点云校正方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic line-scan point cloud correction method based on two-dimensional image reference

2.1 线阵点云轮廓测量的纹理映射

基于线阵相机的动态线扫描形貌测量具备以下特征:采集频率很高,可以结合高速结构光投影技术,将高精度、高可靠性的多帧测量方法用于运动状态下的三维点云测量;作为视觉传感器,不仅能够根据立体视觉原理进行三维形貌测量,还能用于获取被测物表面纹理。基于以上特征,结构光投影在周期内可增加一幅白图的投影,不仅能够作为常用的

背景归一化手段来辅助以进行更可靠的点云轮廓形貌测量,还可以同步获取被测物表面的纹理信息。由于采集频率极高,可默认结构光条纹和被测物表面的纹理信息同时被采集,以像素坐标作为索引,将计算得到的空间点三维坐标和像素灰度值绑定,可轻松实现点云轮廓的纹理映射。图 2 为点云轮廓生成和纹理映射的流程,该流程为后续校正方法的实施提供必要条件。

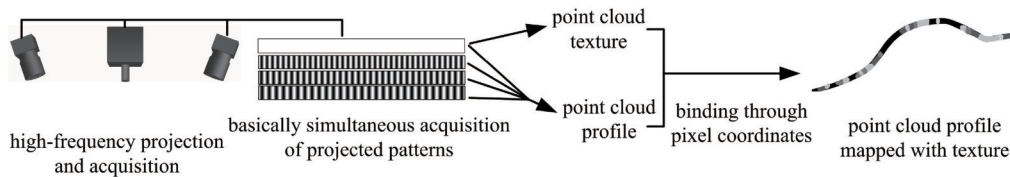


图 2 点云轮廓生成与纹理映射流程

Fig. 2 Process of point cloud profile generation and texture mapping

2.2 基于重投影图像全局变换的初步校正

当运动扰动存在时,由于采集频率极高,单独点云轮廓仍保持较高的精度,但由于运动方向约束的缺乏和误差的累积,点云轮廓的拼接精度下降,具体表现为运动偏差造成点云较大幅度的失真,且运动抖动也引入不规则的畸变。基于重投影图像全局变换的点云校正方法作为初步校正的手段,能够快速消除较明显的运动偏差所带来的影响,为后续的精细校正提高可靠性并减少一定的时间。

首先进行点云重投影,将线阵相机扫描的点云通过坐标变换转换到面阵相机坐标系下,并重投影至面阵相机的图像平面上,重投影过程可表示为

$$\begin{cases} u = f_x \frac{X_m}{Z_m} + c_x \\ v = f_y \frac{Y_m}{Z_m} + c_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: (u, v) 为重投影后的像素坐标; (X_m, Y_m, Z_m) 为点云轮廓在面阵相机坐标系下的某点的坐标; (f_x, f_y, c_x, c_y) 为面阵相机的内参,下标 x, y 分别表示 x 方向和 y 方向。由于运动扰动的存在,点云拼接精度下降,点云重投影图像与面阵相机基准图像产生偏差与错位,如图3所示。根据图像偏差校正每条点云轮廓的位姿,即可提高拼接精度。

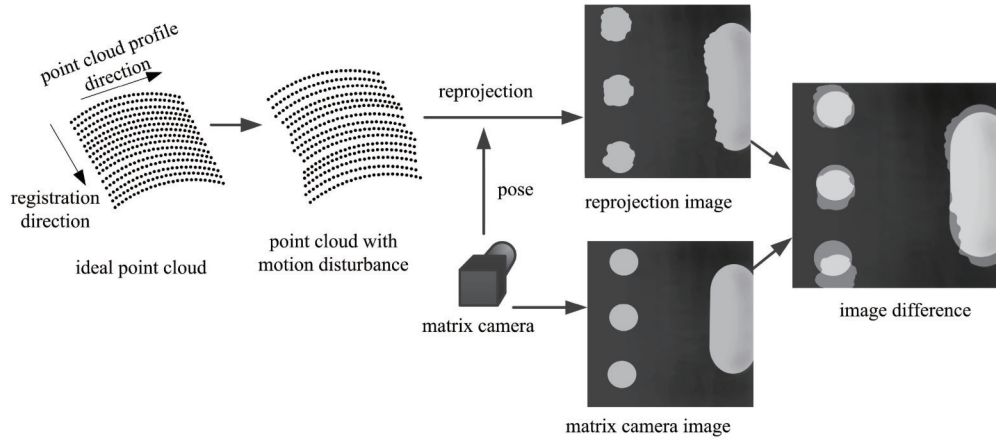


图3 运动扰动造成的重投影图像偏差

Fig. 3 Deviation of reprojection image caused by motion perturbation

持续的运动偏差会造成重投影图像明显的几何失真,如运动方向的偏差会导致图像的错切、运动速度的偏差会导致图像的拉伸等。线阵相机为一维成像传感器,单一点云轮廓的重投影图像特征不明显,又由于复杂的外部扰动影响,拼接后点云形貌的重投影图像特征也产生失真而难以匹配,对点云的校正提出严峻挑战。因此,对拼接后点云形貌的重投影图像做全局几何变换,通过图像整体的灰度信息进行约束,实现与面阵基准图像的初步粗配准。再利用图像变换矩阵获取像素偏差,计算出对应的点云轮廓位姿调整量,实现初步校正。图像几何变换的变量包括两个方向的平移与缩放、图像的旋转、两个方向的错切,分别表示为 $t_1, t_2, s_1, s_2, r, h_1, h_2$,则变换矩阵 t 可以表示为

$$t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos r & \sin r & 0 \\ -\sin r & \cos r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_1 & 0 \\ h_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

结合线扫描的实际情况,重投影图像往往在某一维度的缩放、错切程度比另一维度更明显,整体位移偏差比整体旋转误差更明显,因此对 $t_1, t_2, s_1, s_2, r, h_1, h_2$ 施加不同的权重。以图像之间差异最小为目标,构造

最小二乘问题,选择基于像素灰度信息的均方根误差(RMSE)度量图像之间的相似度,采用梯度下降法作为最小二乘求解方法,得到最优的变换矩阵 t 。

完成全局配准之后,以单条高精度点云轮廓为单位,选取每条点云轮廓所有点的重投影像素偏差,根据成像模型和点云位姿扰动模型,通过求解雅可比矩阵的方式计算该点云轮廓的位姿校正量,依次对所有点云轮廓进行处理即可提高拼接精度。设 $[u \ v]^T$ 为待校正点云轮廓内的一点 $p=[X_p \ Y_p \ Z_p]^T$ 的重投影结果,则像素偏差 e 为

$$e = t \cdot [u \ v]^T - [u \ v]^T. \quad (3)$$

对点云轮廓的位姿 ξ 施加一个扰动量 $\delta\xi$,则像素偏差对扰动量的导数为

$$\frac{\partial e}{\partial \delta \xi} = \frac{\partial e}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \delta \xi}, \quad (4)$$

式(4)反映了像素偏差关于点云轮廓位姿参数的一阶变化关系。根据成像模型,可以得到

$$\frac{\partial e}{\partial p} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial X_p} & \frac{\partial u}{\partial Y_p} & \frac{\partial u}{\partial Z_p} \\ \frac{\partial v}{\partial X_p} & \frac{\partial v}{\partial Y_p} & \frac{\partial v}{\partial Z_p} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

根据运动扰动模型^[23],可以得到

$$\frac{\partial p}{\partial \delta \xi} = [I \quad -\hat{p}], \quad (6)$$

式中: I 表示 3×3 的单位矩阵;符号 $\hat{\cdot}$ 表示求解反对称矩阵。设点的数目为 n ,则雅可比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial \delta \xi} & \dots & \frac{\partial e_n}{\partial \delta \xi} \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

设所有点的误差 E 为 $[e_1^T \quad e_2^T \quad \dots \quad e_n^T]^T$,对位姿

进行校正,表达式为

$$\delta \xi = -(J^T J)^{-1} J^T E. \quad (8)$$

单条轮廓具有大量高密度、高相对精度的点,这些点将协同约束点云轮廓的位姿。所有校正流程均以整条高精度点云轮廓为单位,单条轮廓的大量高密度点提升了校正的可靠性、摆脱对密集纹理的要求。整体流程图如图4所示。

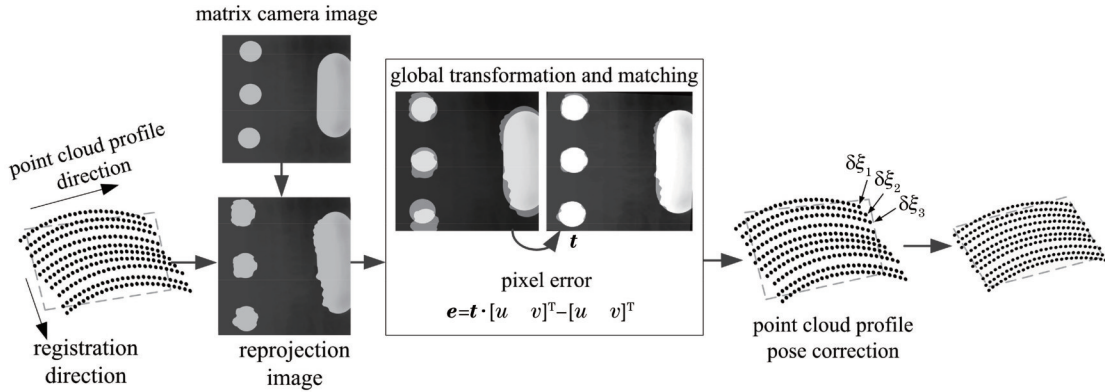


图4 基于重投影图像全局变换的初步校正流程

Fig. 4 Process of preliminary correction based on global transformation of reprojection image

2.3 基于重投影图像光流分析的精细校正

运动过程中的抖动会造成点云小范围的无规则畸变,其重投影图像的形变也是复杂且无规则的,解决该问题的有效方案为构建图像位移场并实现基于非刚性局部变换的图像配准。大多数匹配方法均由于特征的变形而无法精确配准图像,而基于光流场的Demons算法^[24]具有运算效率高和配准精度高的优点,不受特征提取准确性的影响,因此可通过光流分析对图像非刚性形变进行建模,获取每个像素点与参考图像的位移偏差。基于光流分析的图像配准方法通常只适用于局部小形变处理,而经过前一步粗校正,线阵点云重投影结果和面阵基准图像之间只剩下不规则的小形变需要精细校正,因此该方法适用。

Demons算法把原图像和待配准图像两幅图像假设成运动图像序列中的两帧,图像配准过程可以看作待配准图像的像素点向原图像逐步扩散的过程。以面阵基准图像的梯度作为内力,图像灰度差作为外力,驱动重投影图像的非刚性形变,获取变形场。根据光流场模型可以得到

$$\nabla I_m \cdot D = I_m - I_r, \quad (9)$$

式中: I_m 为面阵基准图像; I_r 为线阵点云重投影图像; D 表示变形场。对式(9)进行变换,同时保证方程的稳定性,可以得到

$$D = \frac{(I_r - I_m) \nabla I_m}{|\nabla I_m|^2 + \alpha^2 (I_r - I_m)^2}, \quad (10)$$

其中, $\alpha^2 (I_r - I_m)^2$ 用来保持形变方程的稳定。变形场

包括每个像素点在两个方向的位移(du , dv),可看作重投影图像相对于面阵基准图像的像素偏差。以单条线扫描点云轮廓为单位,获取该轮廓内 n 个点的重投影像素偏差,即

$$e_k = [du_k \quad dv_k]^T, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

式中: du_k 和 dv_k 是这条点云轮廓内第 k 个点的重投影结果分别在图像横、纵两个方向上的像素坐标偏差。将 du_k 和 dv_k 代入2.2节的式(4)~(8)中,可以将偏差转换为点云轮廓的位姿调整量。

基于重投影图像光流分析的点云校正是在粗校正基础上实现点云更精细的微调,因此对校正精度要求较高,而单次校正难以达到最理想的校正效果。考虑到上述点云位姿微调之后,再次重投影的像素偏差会减小,有利于计算更准确的位移场,因此引入循环迭代校正的方法,进行多次“重投影—光流分析—像素偏差获取—点云位姿校正”的流程,逐渐逼近精确匹配点和精准的点云轮廓位姿,消除不规则抖动的影响。精细校正流程如图5所示。

点云轮廓位姿为6自由度,受限于相机成像模型,基于二维图像基准的校正方法通常对 X 、 Y 、 f_{yaw} 这种在 XOY 平面内的扰动偏差更为敏感,因为这更容易使带纹理的点云在面阵像平面上的重投影图像发生变化,如图6所示。因此优先考虑 X 、 Y 、 f_{yaw} 这3个自由度的校正,即 $\partial p / \partial \delta \xi$ 仅包含1、2、6列,对应整个点云轮廓的雅可比矩阵 J 为 $2N \times 3$ 的矩阵,剩下的3个自由度可进一步采取校正补偿算法。

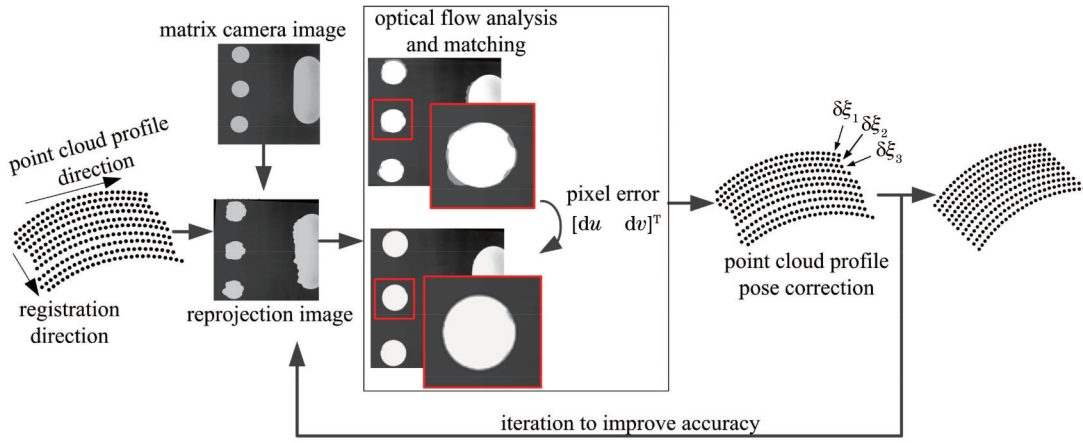


图 5 基于重投影图像光流分析的精细校正流程

Fig. 5 Process of fine correction based on optical flow analysis of reprojection image

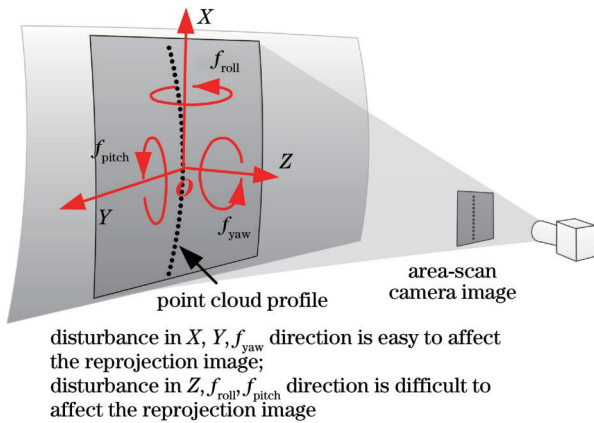


图 6 点云轮廓位姿不同自由度的扰动对重投影图像的影响
Fig. 6 Influence of point cloud profile pose perturbation in different degrees of freedom on the reprojection image

2.4 基于低噪声基准的校正补偿

由 2.3 节可知, Z, f_{roll}, f_{pitch} 方向的运动扰动仍需进一步校正补偿。不同于 X, Y, f_{yaw} 这种在 XOY 平面内的扰动, Z, f_{roll}, f_{pitch} 方向的扰动对表面纹理的改变不明显, 但会以面外噪声的形式影响点云的三维形状, 更适

合通过改变表面形貌进行约束。传统方法常采用曲面拟合、点云滤波等技术去除面外离群点, 但是容易损失被测物表面的细节特征和缺陷信息, 不适合应用于精细检测的场景。考虑到单条线扫描点云轮廓具有高精度、高分辨率的特点, 误差主要表现在拼接延展方向, 对传统方法进行改进: 首先获取低噪声的基准, 再将其作为重要的约束条件以加强各个线扫描点云轮廓之间的关联, 以整条高精度、高分辨率点云轮廓为单位优化点云轮廓 Z, f_{roll}, f_{pitch} 的位姿, 提高拼接精度。该流程与前两节的图像基准校正形成互补, 从而实现 6 自由度校正。

基于低噪声基准的校正补偿算法流程如图 7 所示。为提高可靠性, 首先根据图像、点云信息联合判断被测物是否具有局部连续性的表面以提供校正的约束基准: 利用面阵图像分割出连续性背景表面和细节特征区域, 再根据 2.3 节的关联结果对连续性背景表面的点云进一步在拼接延展方向判断其连续性。为了简化运算过程并提高该算法的普适性, 通过沿拼接延展方向进行小范围、分段式的曲线拟合来获取低噪声基

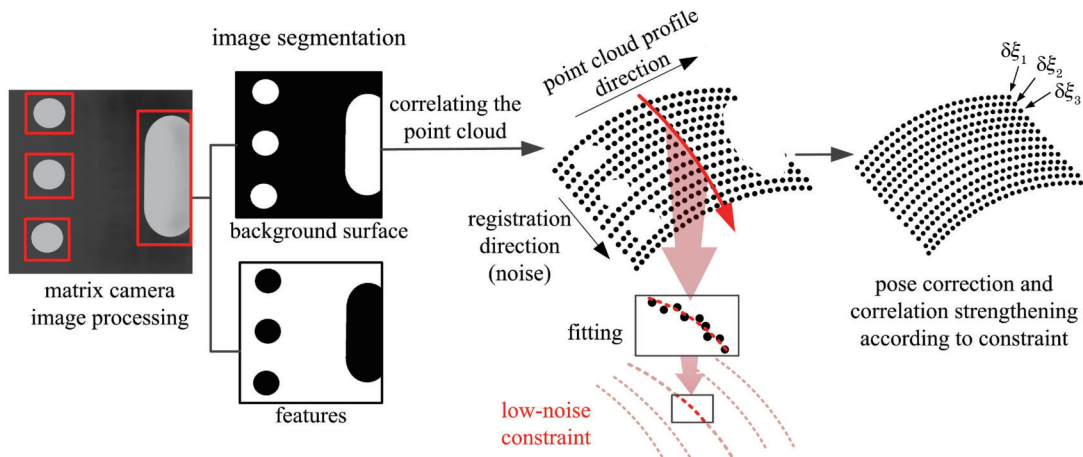


图 7 基于低噪声基准的校正补偿流程

Fig. 7 Process of correction compensation based on low-noise reference

准。在多条基准的辅助下,调整每个线扫描点云轮廓的位姿使其尽量能够通过这些基准,加强线扫描点云轮廓之间的位姿关联,减小 Z 、 f_{roll} 、 f_{pitch} 方向拼接误差。由于该方法保留了整条高精度、高分辨率的点云轮廓,细节特征得到有效保护。

设 $[X_r \ Y_r \ Z_r]^T$ 是点云轮廓上一点 $p = [X_p \ Y_p \ Z_p]^T$ 映射到基准曲线的三维坐标,则误差 e' 可以表示为

$$e' = [X_r \ Y_r \ Z_r]^T - [X_p \ Y_p \ Z_p]^T, \quad (12)$$

之后可以得到

$$\frac{\partial e'}{\partial \delta \xi} = -\frac{\partial p}{\partial \delta \xi} = -[I \ -\hat{p}]. \quad (13)$$

可通过雅可比矩阵对整条点云轮廓在 Z 、 f_{roll} 、 f_{pitch} 方向的位姿偏差进行校正,过程同式(7)和式(8)。

3 验证实验

为验证所提方法在实际情况中的有效性和实用性,建立一个测量系统。图 8 是测量实验的系统的构造实物图,整个系统包括两台分辨率为 8192 pixel 的线阵相机 (Basler raL8192-12gm)、一台分辨率为 4096 pixel \times 3000 pixel 的面阵相机 (MV-CH120-10UM),以及一台通过二值图像离焦能够实现快速正弦条纹投影且分辨率为 912 pixel \times 1140 pixel 的投影仪 (DLP Lightcrafter 4500)。线阵采集频率和投影仪投影频率均为 500 Hz,对该信号进行 2000 分频并触发面阵相机的采集。系统搭载在一辆小车上,其运动精度低且在测量过程中存在动态扰动。

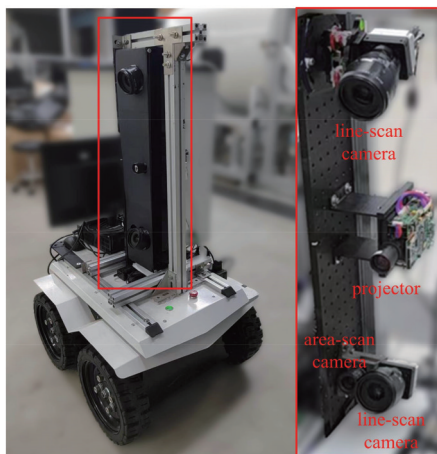


图 8 测量实验的系统实物图

Fig. 8 System diagram of measurement experiment

3.1 方法有效性验证

实验通过铁轨样品的测量结果对校正方法进行验证。为了更好地进行定量精度评估,一个双球模型被作为参数已知的局部特征固定在铁轨样品的一侧,辅助校正效果的检验,其中两个球体均为直径为 15 mm 的高精度标准球,用高精度坐标测量仪测得球心距为

23.349 mm。图 9 显示了测量系统在运动状态下通过线扫描实现点云连续获取的过程,其中图 9(a)为测量场景与铁轨样品,图 9(b)为带纹理的线扫描点云形貌。分别在两种不同程度的扰动下进行线扫描形貌测量,验证方法的有效性。

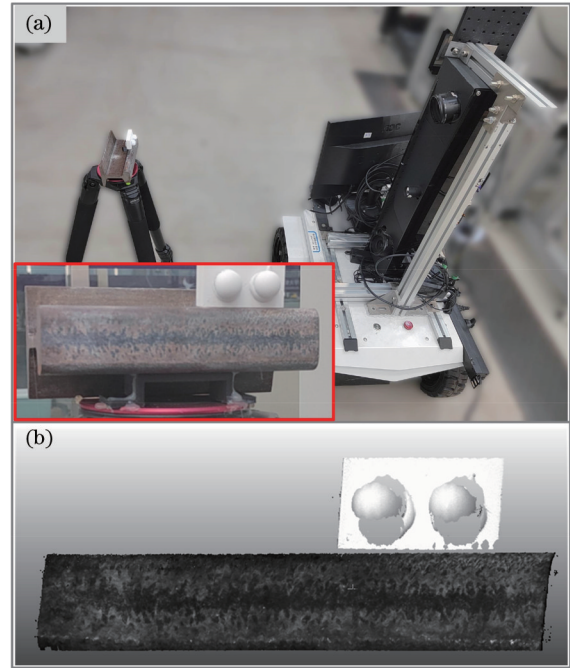


图 9 铁轨扫描场景与测量的点云。(a)测量场景与铁轨样品;
(b)线扫描点云

Fig. 9 Rail sample scanning scene and measured point cloud.
(a) Measurement scene and rail sample; (b) line-scan point cloud

图 10 为运动扰动程度较大的情况下的测量结果。图 10(a)上方为校正前的点云,如方框标示的区域所示,点云表面纹理出现明显扭曲,表明点云在扰动影响下发生了严重的变形失真。经过校正,点云变形减弱,精度得到了优化,如图 10(a)下方点云所示。图 10(b)更清晰地展示了点云形貌的校正效果,上方是校正之前的点云,形貌失真明显,而下方校正后的点云形貌失真被基本消除。为了进行定量评估,进一步提取球体部分的点云,通过拟合直径为 15 mm 的标准球体来计算球面三维重建误差,通过两个拟合球的距离来评估球心距测量误差。图 11 显示了校正前后球面重建的 RMSE 和球心距误差。校正之前的形貌误差很大,运动扰动使重建的球面基本偏离标准形状,给细节分析造成很大困难,球心距也明显偏离真实值,表明线扫描速度变化也会对形貌测量造成影响。而校正后的形貌误差显著减小,两个球面的重建误差均减小 60% 以上,球心距也基本接近真实值,重建精度满足实际需求。

考虑到很多测量场景都能够保持运动基本的平稳性,因此在微小扰动下也测试了所提方法的性能。图

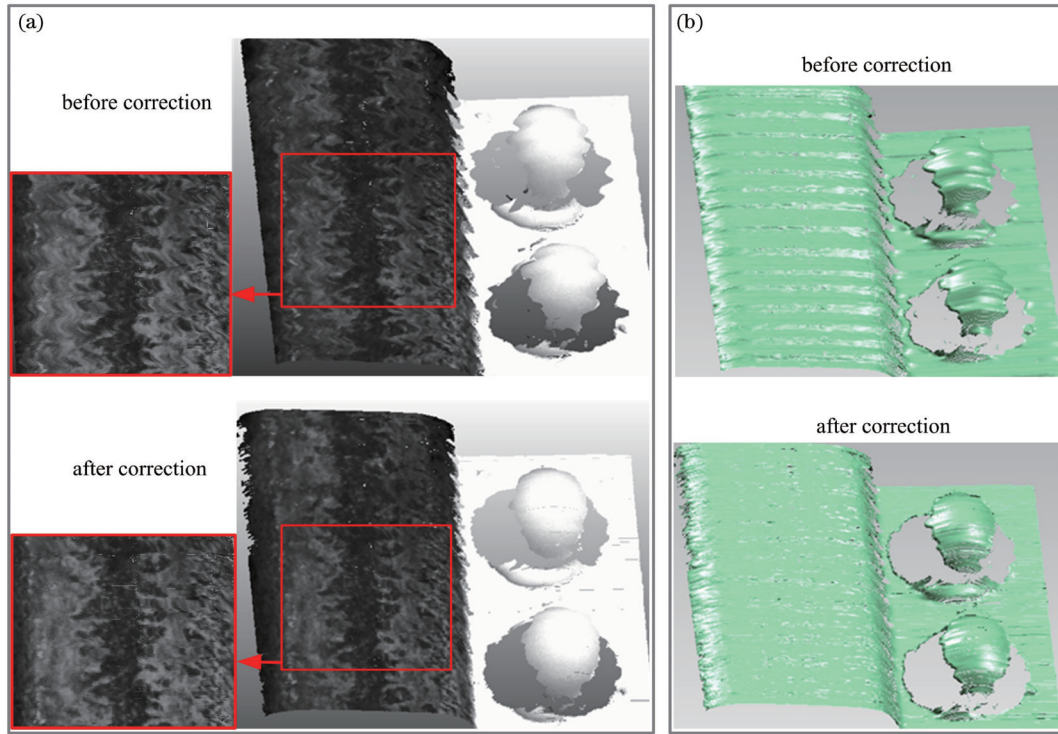


图 10 大扰动下测量的铁轨样品点云校正结果。(a)映射纹理的点云;(b)反映形貌特征点云
 Fig. 10 Rail sample point cloud correction results of measurement with large perturbation. (a) Point clouds with mapped textures; (b) point clouds reflecting shape characteristics

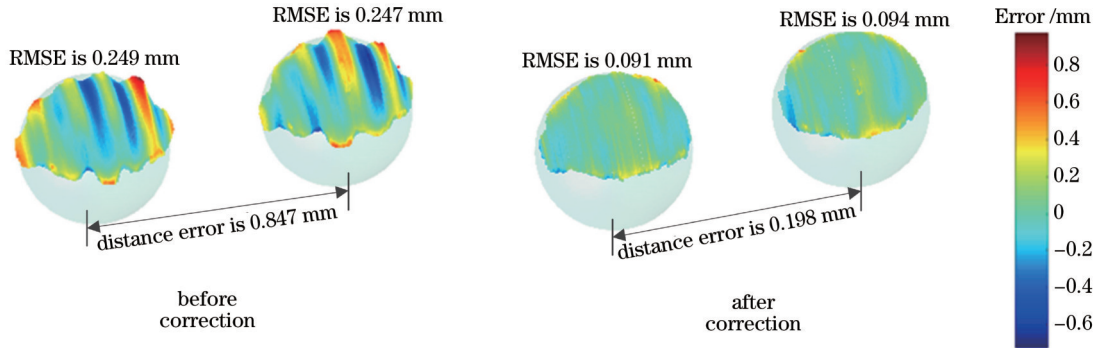


图 11 大扰动下测量的定量精度分析
 Fig. 11 Quantitative accuracy analysis of measurement with large perturbation

12(a)和图 12(b)上方为校正前的点云,下方为校正后的点云。由于扰动很小,校正前的点云难以观察到明显的失真,通过仔细辨认可从图 12(b)方框区域发现细微扰动产生的失真。在校正之后,小幅失真问题也得到了缓解。为了更清晰地反映校正效果,对其进行定量评估,图 13 为定量评估结果,同样证明小幅的点云变形得到了遏制。因此,所提出的校正方法在面向微小运动扰动时,仍能够进一步优化重建结果。

3.2 精度对比实验

为了进一步验证所提方法的性能,将所提点云校正方法和通过传感器定位约束点云拼接的方法进行对比。图 14(a)和图 14(b)上方为校正前的点云,如方框标示的区域所示,点云出现了变形失真。经过所提方

法校正后,点云失真得到有效消除,如图 14(a)和图 14(b)下方点云所示。图 15 显示了校正前后球面重建的 RMSE 和球心距误差,可以观察到校正后的误差显著减小,重建精度有效提升。

如图 16(a)所示,对比实验中的附加传感器定位采用了一个面阵相机和惯性测量单元(IMU),其中面阵相机通过标定的人工特征点进行 20 Hz 的低频位姿测量,IMU 被高频的线阵相机采集信号同步触发,使位姿测量的频率与线阵相机点云测量相适配,面阵相机和 IMU 测量结果通过卡尔曼滤波进行融合,通过空间坐标转换获得线阵相机点云拼接的位姿约束。实验的结果如图 16(b)和图 16(c)所示,可以发现球心距偏差较小,但是球面重建的误差明显大于所提方法的误

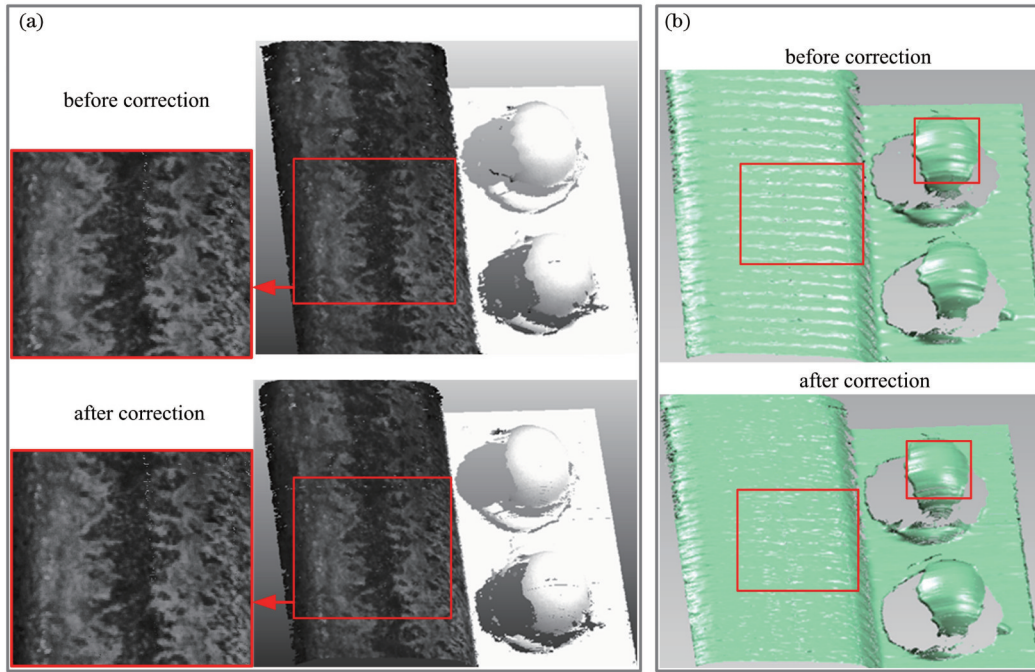


图 12 微小扰动下测量的铁轨样品点云校正结果。(a)映射纹理的点云;(b)反映形貌特征点云
 Fig. 12 Rail sample point cloud correction results of measurement with small perturbation. (a) Point clouds with mapped textures; (b) point clouds reflecting shape characteristics

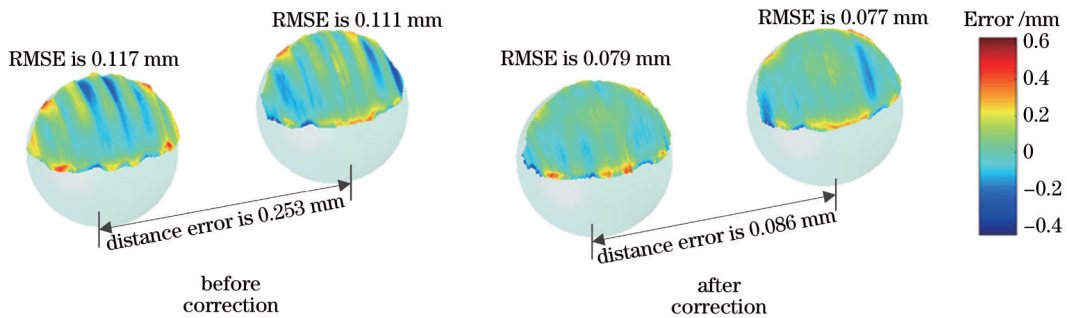


图 13 微小扰动下测量的定量精度分析
 Fig. 13 Quantitative accuracy analysis of measurement with small perturbation

差,球体表面出现了多条垂直于点云拼接延展方向的条纹,说明点云轮廓的拼接精度仍然不足。以上对比实验证明了使用传感器定位难以对局部细节区域进行有效的精度控制。通过分析得知:面阵相机位姿测量的频率严重受限且存在特征点圆心提取的偏差,IMU 则存在噪声和漂移,因此当这种多传感器位姿测量与高频采集的线阵相机形貌测量结合时,传感器自身的性能限制了最终的三维重建效果,难以精确控制点云形貌的细节。此外,整个系统从搭建到标定的过程较为繁琐,各种传感器的集成使得数据处理与计算量大幅上升,当系统面向长距离轨道进行长时间运作时,成本、可靠性也是需要考虑的问题。相比之下,所提方法操作复杂度低,效果良好,更适用于轨道交通领域的实际应用。

3.3 消融实验

为了验证所提出的校正方法中每一个校正环节的

重要性和影响,分别针对基于重投影图像全局变换的初步校正、基于重投影图像光流分析的精细校正、基于低噪声基准的校正补偿这三点进行了消融实验。如图 17(a)所示,在缺少第一个基于重投影图像全局变化的初步校正时,后续的精细校正难以准确匹配线扫描点云和二维面阵图像,导致点云的失真难以消除,例如图 17(a)左侧点云的纹理仍是扭曲的。图 17(b)是缺少第二个基于重投影图像光流分析的精细校正得到的实验结果,如图 17(b)方框区域所示,大量不规则的点云畸变无法被消除。图 17(c)展示了缺少第三个基于低噪声基准的校正补偿的结果,如图 17(c)方框区域所示,虽然点云的纹理较为规则、失真很小,但是在右侧点云的形貌中可以看到非常明显的噪声影响。图 17(d)是经过完整校正过程的点云,可作为对照。图 17(d)的点云从纹理和形貌上均能够反映出其重建效果优于以上三个消融实验的重建结果。

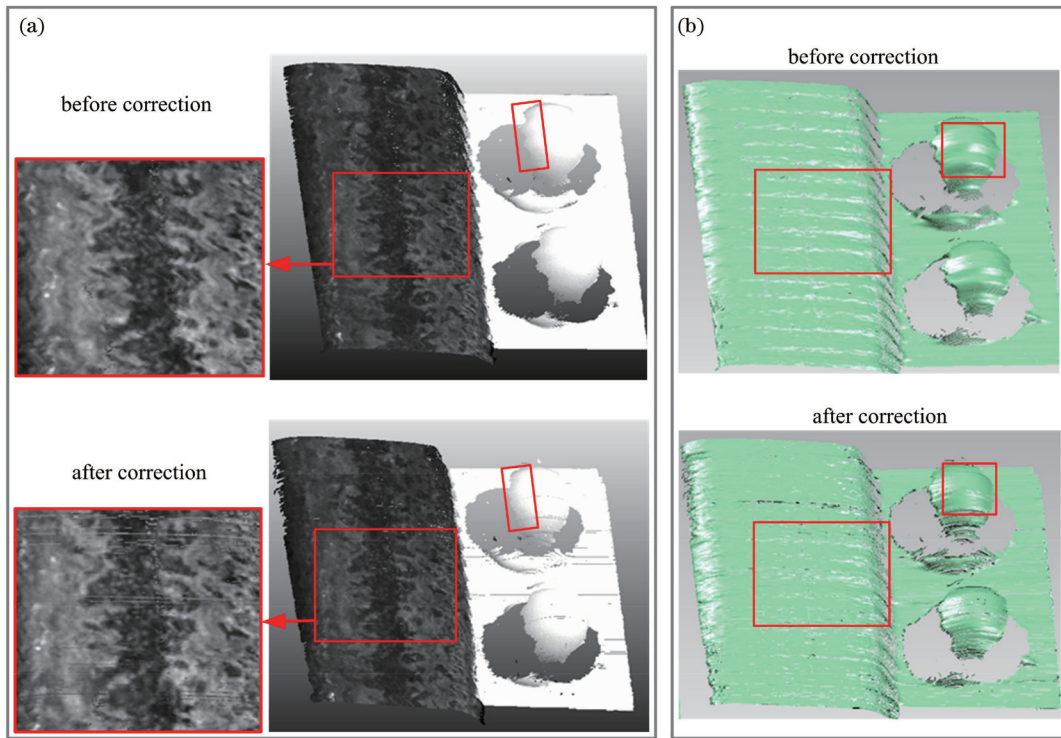


图 14 使用所提出的方法的点云校正结果。(a)映射纹理的点云;(b)反映形貌特征点云

Fig. 14 Point cloud correction results of using the proposed method. (a) Point clouds with mapped textures; (b) point clouds reflecting shape characteristics

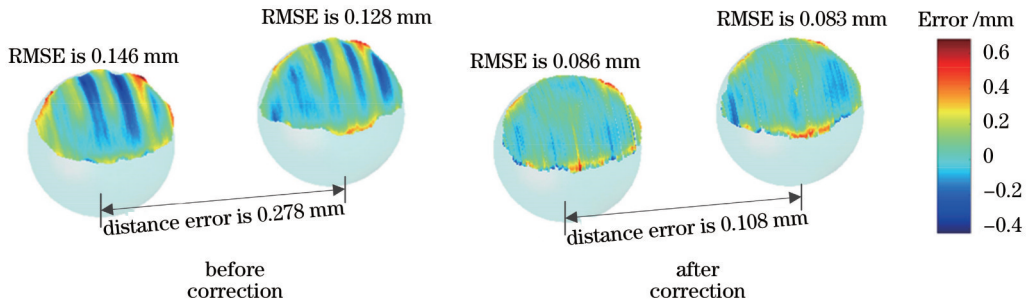


图 15 所提出方法校正效果的定量精度分析

Fig. 15 Quantitative accuracy analysis of the correction effect using the proposed method

所提校正方法主要针对线阵相机动态线扫描点云的细节重建精度的提升。在基于高密度点云的检测领域,局部特征或缺陷的分析为主要关注点,需要及时发现并修复问题,因此对其细节特征重建的精度、分辨率要求很高,而在大尺度上只需要基本定位特征位置即可。此外,由于所提校正方法是基于高分辨率点云测量的,一个点云轮廓的位姿由大量高密度的点进行约束,因此无需对被测物表面进行散斑喷涂等人工处理,仅利用表面本身带有的非稠密纹理特征即可实现有效校正。除铁轨之外,所提方法还能够有效适用于飞机蒙皮、列车表面等其他常见工业产品。

4 结 论

提出了一种基于二维图像基准的动态线扫描点云校正方法,使用附加的面阵相机为点云轮廓提供校正

基准,依次采用基于重投影图像全局变换的初步校正和基于重投影图像光流分析的精细校正,在复杂的运动扰动下完成可靠、精准的点云轮廓位姿优化,同时设计基于低噪声基准的校正补偿方法,实现6自由度全面校正。实验重建了铁轨样品表面,通过定量和定性评估验证了所提方法能够面向复杂的扰动场景实现有效、可靠的点云校正,保证较高的局部细节重建精度。所提方法使动态线扫描点云测量对复杂的运动扰动具有良好的抵抗能力,能够面向更广泛的应用场景并实现可靠、鲁棒的三维重建,这突破了线阵相机点云测量一直以来限制其发展与应用的瓶颈,将在轨道交通领域发挥其作用。

未来,系统将进行光源设计与改进,通过减小曝光时间进一步提高线扫描频率,提升测量效率。该方法在未来也将与基于深度学习的缺陷检测算法相结合,

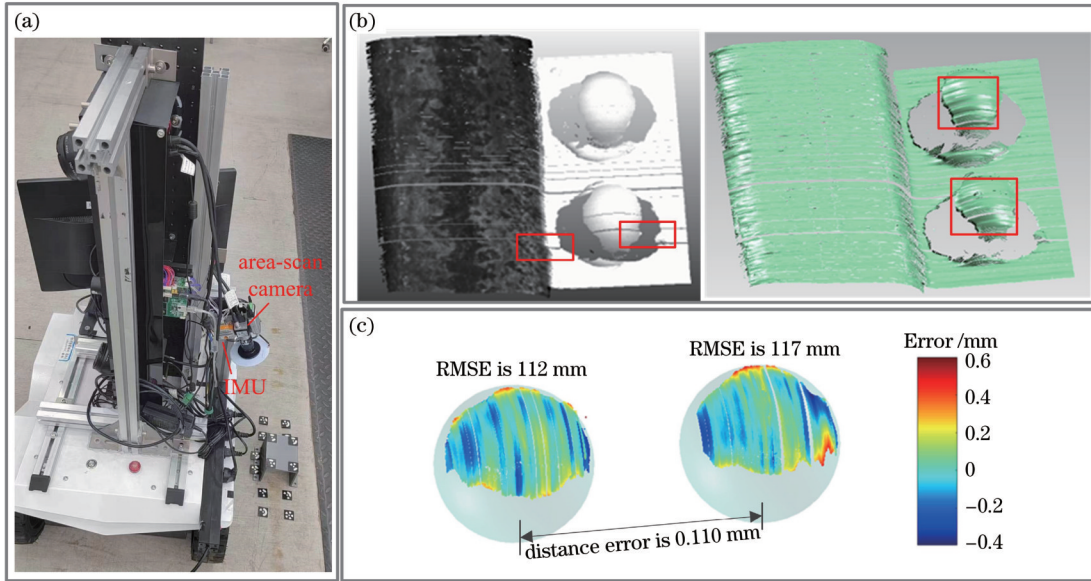


图 16 使用附加传感器定位约束点云拼接的对比实验。(a)系统实物图;(b)映射纹理的点云和反映形貌特征点云;(c)定量精度评估
 Fig. 16 Comparative experiment of point cloud stitching constraint using pose estimation by attached sensors. (a) System diagram; (b) point cloud with mapped textures and point cloud reflecting shape characteristic; (c) quantitative accuracy analysis

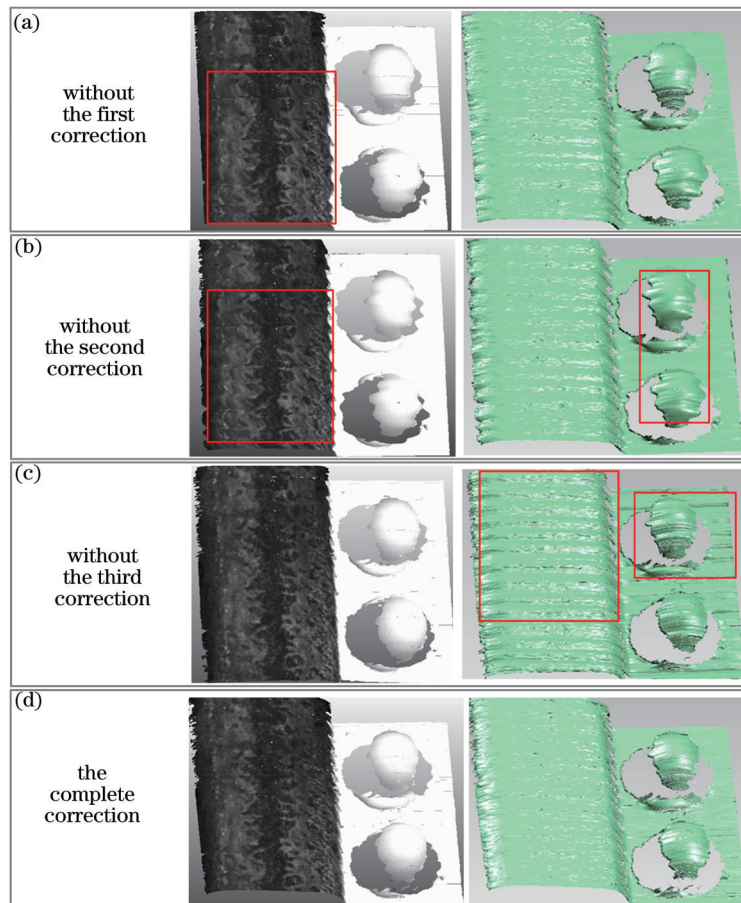


图 17 消融实验结果图。(a)缺少第一个基于重投影图像全局变换的初步校正;(b)缺少第二个基于重投影图像光流分析的精细校正;(c)缺少第三个基于低噪声基准的校正补偿;(d)完整校正过程的点云对照
 Fig. 17 Results of ablation experiment. (a) Without the first initial correction based on global transformation of reprojection image; (b) without the second fine correction based on optical flow analysis of reprojection image; (c) without the third correction compensation based on low-noise reference; (d) contrast point cloud of the complete correction process

对测量的点云和图像先进行缺陷或特征的识别、定位,再利用提出的校正方法优化局部点云精度,实现精准的细节重建,可以得到更好的特征分析和缺陷评估。

参 考 文 献

- [1] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 214-228.
Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 214-228.
- [2] 李佳男, 王泽, 许廷发. 基于点云数据的三维目标检测技术研究进展[J]. 光学学报, 2023, 43(15): 1515001.
Li J N, Wang Z, Xu T F. Three-dimensional object detection technology based on point cloud data[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 1515001.
- [3] Valigi M C, Logozzo S, Butini E, et al. Experimental evaluation of tramway track wear by means of 3D metrological optical scanners[J]. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces, 2021, 15(2): 150-158.
- [4] 卢海林, 冯其波, 徐昌源. 基于点云处理的机车车辆车底中心鞘螺栓故障检测方法[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(5): 67-73.
Lu H L, Feng Q B, Xu C Y. Failure detection method for center sheath bolts of locomotive and rolling stock based on point cloud processing[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(5): 67-73.
- [5] 李维刚, 梅洋, 樊响, 等. 基于车载激光点云的铁路轨道检测[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0410002.
Li W G, Mei Y, Fan X, et al. Railway track detection based on vehicle laser point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0410002.
- [6] 吴周杰, 张启灿. 基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811001.
Wu Z J, Zhang Q C. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811001.
- [7] 陈正东, 张启灿, 吴周杰, 等. 基于标记点消隐与提取的三维形貌及形变测量[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1112001.
Chen Z D, Zhang Q C, Wu Z J, et al. Three-dimensional shape and deformation measurement using marker point hiding and extraction[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1112001.
- [8] 王建华, 杨延西, 徐鹏, 等. 基于双 2+1 相移法的高动态范围三维测量[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 2012001.
Wang J H, Yang Y X, Xu P, et al. High dynamic range 3D measurement based on double 2+1 phase-shifting method[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(20): 2012001.
- [9] 杨守瑞. 大型构件复杂曲面自动化测量方法与技术[D]. 天津: 天津大学, 2017.
Yang S R. Automatic measurement method and technology of complex curved surface of large components[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [10] 王瑞琦, 赵艳, 吴世凯, 等. 基于线阵相机的多特征激光焊接焊缝轨迹识别方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0114007.
Wang R Q, Zhao Y, Wu S K, et al. Multifeature recognition methods of laser welding based on line array camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0114007.
- [11] 马璐瑶, 郝继贵, 杨凌辉, 等. 延展表面高分辨率形貌测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811005.
Ma L Y, Zhu J G, Yang L H, et al. Review of high-resolution shape measurement methods for extendable surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811005.
- [12] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 隧道病害监测检测技术研究现状概述[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 1-12.
Chen X S, Xu Z H, Bao X H, et al. Overview of research on tunnel defects monitoring and detection technology[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(3): 1-12.
- [13] 张伟, 王梦迪, 樊俊铃, 等. 机器视觉在飞机结构损伤检测中的应用进展与展望[J]. 无损检测, 2021, 43(10): 75-80.
Zhang W, Wang M D, Fan J L, et al. Progress and prospect of the application of machine vision in aircraft structural damage detection[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(10): 75-80.
- [14] 占栋, 于龙, 邱存勇, 等. 钢轨轮廓测量中的车体振动补偿问题研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 186-194.
Zhan D, Yu L, Qiu C Y, et al. Study on vehicle vibration compensation in railway track profile inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 186-194.
- [15] Gunatilake A, Piyathilaka L, Tran A, et al. Stereo vision combined with laser profiling for mapping of pipeline internal defects[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(10): 11926-11934.
- [16] 李兆新, 吕劲松, 胡远江, 等. 线阵相机图像自适应畸变校正方法及在列车成像上的应用[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15): 158-165.
Li Z X, Lü J S, Hu Y J, et al. Adaptive distortion calibration method of linear CCD image and its application in train imaging [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(15): 158-165.
- [17] 阴雷. 基于动态立体视觉的三维曲面测量及基准关联方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Yin L. Research on 3D surface measurement and datum correlation method based on dynamic stereo vision[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [18] Chen Z H, Du F Z. Measuring principle and uncertainty analysis of a large volume measurement network based on the combination of iGPS and portable scanner[J]. Measurement, 2017, 104: 263-277.
- [19] Yang J Q, Wang D Y, Fan B X, et al. Online absolute pose compensation and steering control of industrial robot based on six degrees of freedom laser measurement[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 034111.
- [20] 杨杰, 卢钰仁, 田颖, 等. 基于改进 ICP 算法的点云拼接方法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 41-43.
Yang J, Lu Y R, Tian Y, et al. Point cloud registration method based on improved ICP algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(9): 41-43.
- [21] Liu Z, Sun J H, Wang H, et al. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(11): 1343-1351.
- [22] Khezrabad M A, Zoj M J V, Safdarinezhad A. A new approach for geometric correction of UAV-based pushbroom images through the processing of simultaneously acquired frame images [J]. Measurement, 2022, 199: 111431.
- [23] 高翔, 张涛, 刘毅. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 130-204.
Gao X, Zhang T, Liu Y. Fourteen lectures on visual SLAM: from theory to practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 130-204.
- [24] Thirion J P. Image matching as a diffusion process: an analogy with Maxwell's demons[J]. Medical Image Analysis, 1998, 2(3): 243-260.

Dynamic Line-Scan Point Cloud Correction Method Based on Two-Dimensional Image Reference

Ma Luyao, Zhu Jigui, Yang Linghui*, Liu Haoyue, Fan Yiyuan, Yang Shuo

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective In rail transportation, detail inspection of rails and trains is required to ensure safe operation. The surface is measured when the train is running or rail inspection is performed on a moving vehicle to improve the detection speed and efficiency. Three-dimensional (3D) shape measurement is also needed because of the rich information, and the point cloud density should be high enough to find minor defects. Dynamic line-scan point cloud measurement based on line-scan cameras shows great potential to meet the above requirements. The line-scan cameras can capture one-dimensional (1D) images at ultra-high frequencies and resolutions, and high-density point clouds can be easily obtained in motion. However, the complex perturbation in motion represented by multi-degree-of-freedom deviations and vibrations tends to introduce errors into dynamic line-scan point clouds and poses serious challenges to point cloud correction. We report a dynamic line-scan point cloud correction method based on two-dimensional (2D) image reference. A two-step correction based on global transformation and optical flow analysis of reprojection images is adopted to achieve an accurate and reliable correlation between point cloud profiles and 2D image reference under complex perturbation. The pose of each point cloud profile is optimized, and correction compensation based on the low-noise reference according to both images and point cloud information is designed to achieve comprehensive correction. We hope the proposed method can provide effective support for point cloud-based detail analysis and inspection of rail transportation.

Methods First, a point cloud correction based on global transformation is adopted. As a preliminary correction method, it can quickly eliminate the influence of obvious motion deviation and improve the reliability of subsequent fine correction. Meanwhile, we perform the global geometric transformation on the reprojection image of the point cloud, making it as consistent as possible with an undistorted 2D reference image captured by an area-scan camera. The image geometry transformation includes translation in two directions, scaling in two directions, image rotation, and shearing in two directions. The gradient descent method is adopted to obtain the global image transformation, and the pixel deviations between the reprojection image and the 2D reference image are calculated by the transformation matrix. According to the imaging model and the point cloud pose perturbation model, the point cloud correction vector is calculated for every point cloud profile. Second, correction based on optical flow analysis of reprojection images is adopted. The Demons algorithm based on the optical flow field features high operation speed and high registration accuracy and is not susceptible to the distorted features of the reprojection image. Therefore, the non-rigid image deformation can be modeled via optical flow analysis, and the pixel deviations between the reprojection image and the 2D reference image can be obtained. Similar to the first step, the pixel deviations are converted to point cloud correction parameters, and iterations are employed to improve fine correction quality. Third, correction compensation based on low-noise reference is implemented. The continuous surfaces are identified according to both images and point cloud information, and the low-noise reference is obtained by fitting. The point cloud accuracy is further improved under the constraint of the low-noise reference. This method is easy to implement, and the texture of rails and trains is enough for effective correction without the need for additional speckle spraying.

Results and Discussions The measurement results of the rail sample are utilized to verify the proposed method. An accurate two-ball model is adopted as a detailed feature to assist in accuracy evaluation. In the verification experiment of method effectiveness, both qualitative and quantitative accuracy evaluations demonstrate that the point cloud deformation is reduced with improved reconstruction accuracy (Figs. 10–13). The improvement can be seen in the texture of the point cloud and the 3D point cloud shape. In the precision comparison experiment, the proposed correction method has better control of local detail reconstruction accuracy than the previous methods based on pose estimation using attached sensors (Figs. 14–16). Meanwhile, the proposed method is easy to implement and is not costly. In the ablation experiment, each of the three correction processes has proven to be of great importance (Fig. 17).

Conclusions We propose a dynamic line-scan point cloud correction method based on 2D image reference. With the help of 2D reference images, the initial correction based on the global transformation of reprojection images is adopted to

eliminate the influence of obvious motion deviations, and fine correction based on optical flow analysis of reprojection images is utilized to correct small irregular deformations. A correction compensation method based on low-noise reference is designed to realize better 3D reconstruction. Through quantitative and qualitative evaluations, the proposed method can realize effective and reliable point cloud correction under complex perturbation scenes. The comparison experiment further verifies the performance of the method, and the ablation experiment validates the importance of each correction process. Therefore, the proposed method has potential applications in 3D reconstruction and detail inspection of rail transportation.

Key words measurement; visual measurement; point cloud; line scan; correction; perturbation