基于辅助相机的多目视觉线结构光测量系统全局标定方法研究

葛庆如¹, 严思杰², 陈巍^{1,2}, 吴龙^{1,2}, 徐小虎^{2*}

1. 无锡中车时代智能装备有限公司, 无锡 214000;

2. 华中科技大学机械学院, 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074

* E-mail: xuxiaohu@hust.edu.cn

收稿日期: 2021-08-13; 接受日期: 2021-10-20; 网络版发表日期: 2022-04-06

国家重点研发计划(编号: 2019YFA0706703)、国家自然科学基金(批准号: 52075204)和国家青年科学基金(编号: 52105514)资助项目

摘要 为解决现有的多目视觉线结构光测量系统在大视场测量时, 相机之间无公共视场, 导致标定工具要求高、全局标定过程复杂等问题, 本文提出了一种基于辅助相机的多目视觉线结构光测量系统全局标定方法. 首先, 将辅助相机作为中介, 它与线结构光传感器的相机有1/2左右的视场重叠, 构成了双目子系统, 通过拍摄标定板不同姿态的图像来建立辅助相机和相邻两个线结构光传感器的空间几何关系. 然后基于此通过坐标转换求解出相邻两个无公共视场线结构光传感器的位置关系, 最后再逐步换算求解出局部坐标系向全局坐标系统一的变换矩阵, 完成全局标定过程. 此方法对标定工具要求低, 不需要借助高精度测量设备及复杂靶标, 只需简易的棋盘格靶标即可完成多目视觉线结构光测量系统的全局标定, 标定过程简单, 并且可达到较高的标定精度. 测量试验表明, 该方法的全局标定误差是0.067 mm, 有效提高了测量精度, 为后续大构件的机器人“测量-加工”一体化作业提供精度保障.

关键词 辅助相机, 大视场, 全局标定, 多目视觉线结构光测量系统

1 引言

在三维模型重建技术中, 线结构光以低成本、高精度、结构简单的优势广泛应用于三维测量领域中^[1,2]. 目前, 线结构光大视场测量方法依据传感器数量可以分为三类: 单线结构光传感器大视场测量、多线结构光传感器大视场测量、多目视觉线结构光传感器大视场测量^[3]. 由单相机和激光器构成的单线结构

光传感器结构简单, 但是大视场测量时相机成像畸变大, 分辨率降低, 无法同时满足高精度和大范围的测量需求. 由多套线结构光传感器组建成的多线结构光传感器, 可以突破单线结构光传感器的测量视场限制, 实现大视场高精度测量, 但是也存在结构光条纹干扰、标定位姿偏差等问题. 考虑到激光器的光束辐射范围和聚焦性能可以满足大视场测量的需求, 将多个相机和单个激光器组合成多目视觉线结构光传感器,

引用格式: 葛庆如, 严思杰, 陈巍, 等. 基于辅助相机的多目视觉线结构光测量系统全局标定方法研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1274–1284
Ge Q R, Yan S J, Chen W, et al. Research on the global calibration of the multi-vision line-structured light-measurement system based on auxiliary camera (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1274–1284, doi: 10.1360/SST-2021-0367

可以有效地避免激光条纹相互干扰, 在保证局部测量准确的同时, 实现大视场高精度三维测量, 如轨道交通隧道结构、排水管道、道路、钢轨表面轮廓等^[3-5].

多目视觉线结构光传感器实现大视场高精度测量的关键在于高精度的全局标定. 通过全局标定确定各个线结构光传感器坐标系到全局坐标系的转换矩阵, 将获取的局部测量数据坐标系统一, 进行拼接融合, 实现大视场的整体测量. 通常线结构光传感器坐标系建立在相机坐标系下, 多目视觉线结构光测量系统的相机之间不存在或存在很小的重叠视场, 所以多目视觉线结构光传感器的全局标定也可以视为多目视觉系统的非重叠视场相机全局标定. 目前常用的非重叠视场相机全局标定的方法, 如图1所示, 主要有以下四类^[6].

(1) 高精度测量仪器法. 该方法是借助激光跟踪仪或经纬仪等高精度设备构建全局坐标系, 确定相机与高精度设备之间的位置关系实现全局标定^[7]. Lu等人^[8]使用两个经纬仪构成的测量系统进行全局标定, 将标定靶标放置在相机的视场中, 使用经纬仪坐标测量系统获取标定靶标上特征点坐标, 再计算标定靶标和相机之间的位置关系, 以解析相机坐标系和经纬仪坐标系之间的转换矩阵. 这种方法测量精度高, 适用于大场景测量, 但是高精度设备价格昂贵且操作复杂.

(2) 反射镜法. 这种方法是利用镜面反射原理, 通过调整反射镜的位置让所有相机同时观测到靶标, 克服了所有相机必须直接观测公共靶标的局限性, 实现非重叠视场相机的全局标定^[9,10]. Xu等人^[11]使用二维平面靶标和反射镜来校准由四个相机、获取相机与全局相机之间的位置转换关系. 对于少量相机组成的视觉系统, 反射镜法使用起来简单. 然而在实际的复杂环境中, 所有相机通过镜面直接或者间接地观测到靶

标的前提难以保证.

(3) 激光投影法. 该方法是将激光投射非重叠视场相机的视场, 并根据共线约束或者共面约束来标定相邻相机之间的位姿变换关系, 实现视觉系统的全局标定^[12,13]. Liu等人^[14]利用多个光平面作为校准对象, 在全局坐标系下不同相机中的光平面是相同的这一约束, 计算相机之间的位置关系. 激光投影法简单, 成本低廉, 对光照条件不敏感, 可用于现场参数校准, 但是标定的精度受到激光线性误差的影响, 而且大视场测量时难以保证激光的平直度.

(4) 大尺寸标定靶标法. 使用大标定板覆盖不同相机视场, 由靶标上特征点的位置关系求解相机之间的位姿关系, 实现全局标定^[15]. 然而大尺寸二维平面靶标价格高, 不易加工, 而且加工精度难以保证, 所以通常采用高精度的一维靶标或者拼接的平面靶标进行标定^[16,17]. 一维靶标可以制造得很大, 覆盖多个相机的视场同时标定多个相机, 非常适合现场使用, 刘震等人^[18]提出一种基于一维靶标同步实现多线结构光的局部标定和全局标定的快速标定方法. 但是一维靶标也存在着空间几何约束条件少, 标定过程复杂, 待求参数不易收敛等问题. Liu等人^[19]使用两个小平面靶标刚性连接组成的组合靶标, 根据小平面靶标间的相对位置不变的约束, 求解相机之间位置关系. 该方法不需要借助高精度的测量设备, 灵活方便, 但是也存在着组合靶标位姿只能小范围变化, 标定结果不稳定性问题.

不同全局标定方法的优缺点对比如表1所示. 针对现有的多目视觉线结构光传感器全局标定方法存在着对标定工具要求高、标定过程复杂的局限性, 本文提出了一种基于辅助相机的全局标定方法, 标定过程简

图1 (网络版彩图)全局标定方法. (a) 高精度测量仪器法^[8]; (b) 反射镜法^[11]; (c) 激光投影法^[14]; (d) 大尺寸标定靶标法^[19]

Figure 1 (Color online) Global calibration method. (a) High-precision device method^[8]; (b) optical mirrors method^[11]; (c) laser projection method^[14]; (d) large-scale targets method^[19].

单且标定精度高. 该方法以辅助相机为中介, 以棋盘格靶标的特征点为约束, 将无公共视场的线结构光传感器联系起来, 先求解相邻线结构光传感器坐标系之间的齐次变换矩阵, 然后通过坐标系变换求解出局部坐标系向全局坐标系统一的变换矩阵.

2 多目视觉线结构光测量系统构建

基于辅助相机全局标定的多目视觉线结构光测量系统模型如图2所示, 由主相机、从相机、辅助相机和激光器构成, 相邻主从相机之间无重叠视场, 增加辅助相机之后, 辅助相机与相邻的主从相机之间有1/2左右

视场为重叠视场(OFOV), 激光器投射的光束覆盖所有相机的视场范围, π 为线结构光的光平面, P 为光平面与被测物体表面交线上的点. $o_w-x_wy_wz_w$ 是世界坐标系, $o_{ci}-x_{ci}y_{ci}z_{ci}$, $o_i-u_iv_i$ 分别表示*i*号相机的相机坐标系和像素坐标系. 选择第一个相机为主相机, 主相机坐标系为全局坐标系, 其中, 主相机和光平面构成线结构光传感器1, 从相机1和光平面构成线结构光传感器2, 从相机2和光平面构成线结构光传感器3, 以此类推, 从相机*n*和光平面构成线结构光传感器*n*. h_j^i 是*j*号相机坐标系向*i*号相机坐标系转换的齐次变换矩阵, H_n 是*n*号从相机坐标系向主相机坐标系转换的齐次变换矩阵.

多目视觉线结构光传感器大视场测量是先局部测

表 1 不同全局标定方法优缺点对比
Table 1 Comparison of different global calibration methods

测量方法	测量方式	优点	缺点
1	高精度测量仪器法	精度高, 测量范围大	设备昂贵, 操作复杂
2	反射镜法	成本低	测量范围小, 操作复杂
3	激光投影法	成本低, 抗干扰能力强, 测量范围大	激光器的性能影响系统精度, 对人眼有危害
4	大尺寸标定靶标法	精度高, 灵活性强, 成本低	标定工具及标定过程复杂, 标定参数多

图 2 (网络彩图版)基于辅助相机全局标定的多目视觉线结构光测量系统
Figure 2 (Color online) Multi-vision line structured light measurement system based on the global calibration of auxiliary camera.

量然后全局统一, 根据全局标定结果将多个线结构光传感器三维重建的局部测量数据统一变换到全局坐标系下, 实现大视场测量. 如果要求解出局部坐标系向全局坐标系统一的变换矩阵, 可以先确定相邻的两个线结构光传感器坐标系的转换矩阵, 通常线结构光传感器坐标系建立在相机坐标系下, 也就是要确定相邻两个线结构光传感器的相机坐标系之间的位置关系, 然后再进行逐步换算求解. 基于辅助相机的全局标定方法是将辅助相机作为中介, 辅助相机与线结构光传感器的相机组成双目子系统, 通过双目标定确定辅助相机与线结构光传感器的相机之间的位置关系, 然后由坐标变换确定相邻线结构光传感器的相机坐标系之间的旋转平移矩阵, 最后再将每个相机坐标系转换到全局坐标下, 完成全局标定过程.

综上所述, 基于辅助相机全局标定的多目视觉线结构光传感器的数学模型如下所示:

$$\begin{cases} sp_i = \mathbf{A}_i P_{ci}, \\ a_i x_{ci} + b_i y_{ci} + c_i z_{ci} + d_i = 0, \\ i = 2n+1, (n \in N), \\ \mathbf{H}_0 = \mathbf{E}, \\ P_c = \mathbf{H}_n P_{ci}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 是相机编号, s 是比例系数, $\mathbf{A}_i$ 是 i 号相机的内参矩阵, $\mathbf{E}$ 是单位矩阵, p_i, P_{ci}, P_c 分别是激光条纹上无畸变点的像素坐标, 在 i 号相机坐标系下的坐标和全局坐标, a_i, b_i, c_i, d_i 是在 i 号相机坐标系下光平面方程的参数.

3 多目视觉线结构光测量系统标定

多目视觉线结构光测量系统的标定主要分为两部分: 一是各个线结构光传感器的局部标定, 获取线结构光传感器结构参数, 即相机参数, 光平面参数和扫描方向参数; 二是多目视觉线结构光传感器的全局标定, 将线结构光传感器获取的局部测量数据统一到全局坐标下, 实现测量数据的全局拼接.

3.1 相机参数标定

设棋盘格靶标的角点 M 的世界坐标 $M=[x_w, y_w, 0, 1]^T$, 对应的像素坐标 $m=[u, v, 1]^T$, 由相机透视变换原理可得

$$sm = \mathbf{A}[\mathbf{R} \mathbf{t}] M, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 s 是比例系数, $\mathbf{A}$ 为相机内参矩阵, $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$ 分别是为棋盘格靶标平面到相机坐标系的旋转矩阵和平移向量. 将相机内参 $\mathbf{A}$ 和外参 $(\mathbf{R} \mathbf{t})$ 合并可得

$$sm = \mathbf{H} M, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{H}$ 是棋盘格靶标平面和成像平面之间的单应性矩阵, 设 $\mathbf{H}=(h_1 \ h_2 \ h_3)$, $\mathbf{R}=(r_1 \ r_2 \ r_3)$, 则可得

$$\lambda(h_1 \ h_2 \ h_3) = \mathbf{A}(r_1 \ r_2 \ t). \quad (4)$$

为了求解相机内参, 设 $\mathbf{B}=\lambda \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1}$, 则

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将内参矩阵 $\mathbf{A}$ 代入上式, 可得

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 \beta)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据张正友相机参数标定方法^[20], 采集至少三个不同方向上的棋盘格靶标图像, 求解参数矩阵 $\mathbf{B}$, 然后分离出相机内参, 如下所示:

$$\begin{cases} v_0 = (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23}) / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2), \\ \lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0 (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23})] / B_{11}, \\ \alpha = \sqrt{\lambda / B_{11}}, \\ \beta = \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2)}, \\ \gamma = -B_{12} \alpha^2 \beta / \lambda, \\ u_0 = \gamma v_0 / \beta - B_{13} \alpha^2 / \lambda. \end{cases} \quad (7)$$

一旦求解出相机内参矩阵 $\mathbf{A}$, 相机的外参可由下式求出:

$$\begin{cases} r_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_1, \\ r_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_2, \\ r_3 = r_1 \times r_2, \\ t = \lambda \mathbf{A}^{-1} h_3, \end{cases} \quad (8)$$

考虑到镜头的径向畸变和切向畸变, 理想像素坐标 (u, v) 和实际像素坐标 (x, y) 存在着如下的关系:

$$\begin{cases} u = x + x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2), \\ v = y + y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2), \end{cases} \quad (9)$$

式中 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 为相机镜头的畸变系数, r 是像点到图像坐标系原点的距离。

以棋盘格角点的实际像素坐标和投影坐标的偏差作为目标函数, 迭代求解相机参数, 提高相机标定结果的可靠性。假设相机从不同位置姿态采集了 n 张靶标图像, 每张靶标图像有 m 个内角点, 第 i 张图片上的第 j 个角点 P_{ij} 对应的投影坐标为 p , 理论像素坐标为 p_{ij} 。考虑到镜头畸变, 迭代求解相机内外参及畸变系数, 可以通过 Levenberg-Marquardt 算法求解下列目标函数来实现:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|p_{ij} - p(\mathbf{A}, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, P_{ij})\|^2. \quad (10)$$

3.2 光平面标定

通过获得三个以上不共线的空间点来构建光平面, 进而确定光平面方程参数。此时需要至少采集两组高度不同的光条图像, 通过光条纹中心提取算法获取光平面与棋盘格平面的交线上特征点在相机坐标系下的坐标值, 再由最小二乘法拟合得到相机坐标系下的光平面方程。

假设光平面与棋盘格平面的交线上特征点 P 在 i 号相机坐标系下的坐标值为 $(x^{ci}, y^{ci}, z^{ci}, 1)$, 提取光条纹上的 n 个特征点建立下列方程组:

$$\begin{bmatrix} x_1^{ci} & y_1^{ci} & z_1^{ci} & 1 \\ x_2^{ci} & y_2^{ci} & z_2^{ci} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n^{ci} & y_n^{ci} & z_n^{ci} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix} = 0. \quad (11)$$

最小二乘法求解该方程组, 解出在 i 号相机坐标系下的光平面方程参数 a_i, b_i, c_i, d_i , 完成光平面标定。

3.3 扫描方向标定

完成相机参数标定和光平面方程参数标定后, 单次测量只能获取光条纹位置处的三维坐标, 需要利用移动平台使线结构光传感器和测量对象产生相对位移, 对物体表面进行扫描运动, 将光条纹数据沿扫描方向进行拼接组合成待测对象的三维形貌。因此, 需要对扫描方向标定, 进行精确的光条纹数据拼接。

在几何空间中选取合适的位置放置棋盘格靶标, 采集靶标图像, 线结构光三维测量系统的一维移动平台移动单位距离后, 再次采集标定板图像, 如图3所示。以相机坐标系为参考坐标系, 那么棋盘格角点 P 在几何空间中的移动轨迹就是扫描方向^[21]。

假设初始位置测量点 P 的坐标是 $P(x_0, y_0, z_0)$, 一维运动平台每次移动的单位距离是 s , 移动 i 次后, 测量点在相机坐标系下的坐标 $P'(x_i, y_i, z_i)$ 可表示为

$$\begin{cases} x_i = x_0 + i \cdot s_x, \\ y_i = y_0 + i \cdot s_y, \\ z_i = z_0 + i \cdot s_z, \end{cases} \quad (12)$$

式中, $s=(s_x, s_y, s_z)$ 就是扫描方向参数。

3.4 基于辅助相机的全局标定

辅助相机与线结构光传感器的 j 号从相机和 $j+1$ 号从相机分别有 $1/2$ 左右的视场重叠, 组成两组双目子系统, 如图4所示。

在辅助相机与 j 号从相机组成双目子系统中, 将棋盘格靶标置于双目子系统的重叠视场中, 双目子系统的左右相机拍摄标定板不同姿态的图像。假设 P 是棋盘格靶标的角点, 在世界坐标系下的坐标是 $P_w(x_w, y_w, z_w)$, 在 $k-1$ 号相机坐标系下的坐标是 P_{Ck-1} , 在 k 号相机坐标系下的坐标是 P_{Ck} , 世界坐标系到 $k-1$ 号相机坐标系变换的旋转平移矩阵是 $(\mathbf{R}_w^{Ck-1}, \mathbf{T}_w^{Ck-1})$, 世界坐标系到 k 号相机坐标系变换的旋转平移矩阵是 $(\mathbf{R}_w^{Ck}, \mathbf{T}_w^{Ck})$ 。可以得到下式:

$$\begin{cases} P_{Ck-1} = \mathbf{R}_w^{Ck-1} P_w + \mathbf{T}_w^{Ck-1}, \\ P_{Ck} = \mathbf{R}_w^{Ck} P_w + \mathbf{T}_w^{Ck}, \\ P_{Ck-1} = \mathbf{R}_k^{k-1} P_{Ck} + \mathbf{T}_k^{k-1}, \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{R}_k^{k-1}$ 和 $\mathbf{T}_k^{k-1}$ 分别是 k 相机向 $k-1$ 相机转换的旋转矩阵和平移矩阵。消除 P_{Ck-1} 和 P_{Ck} , 将公式(13)简化为

图 3 扫描方向标定原理

Figure 3 The principle of scanning direction calibration.

图 4 基于辅助相机的全局标定原理

Figure 4 The global calibration principle based on auxiliary camera.

$$\begin{cases} \mathbf{R}_k^{k-1} = \mathbf{R}_W^{Ck-1} (\mathbf{R}_W^{Ck})^T, \\ \mathbf{T}_k^{k-1} = \mathbf{T}_W^{Ck-1} - \mathbf{R}_k^{k-1} \mathbf{T}_W^{Ck}. \end{cases} \quad (14)$$

通过相机外参标定可以得到变换矩阵 $(\mathbf{R}_W^{Ck-1}, \mathbf{T}_W^{Ck-1})$ 和 $(\mathbf{R}_W^{Ck}, \mathbf{T}_W^{Ck})$, 带入公式(14)求取未知量 $(\mathbf{R}_k^{k-1}, \mathbf{T}_k^{k-1})$. 只需要将棋盘格标定板摆放一次, 即可求解出相邻相机坐标系之间的变换矩阵。

但是求解过程中存在着噪声误差、镜头畸变误差和舍入误差等因素, 需要将棋盘格靶标摆放多个位置, 获取多组变换矩阵 $(\mathbf{R}_k^{k-1}, \mathbf{T}_k^{k-1})$, 来进一步优化 k 号相机坐标系到 $k-1$ 号相机坐标系的变换矩阵。假设 P_{ij}^W 表示第 i 张标定板图像上的第 j 个角点在世界坐标系中的坐标, $\mathbf{H}_W^{Ck-1}$ 表示世界坐标系到 $k-1$ 号相机坐标系的齐次

变换矩阵, $\mathbf{H}_W^{Ck}$ 表示世界坐标系到 k 号相机坐标系的齐次变换矩阵, $\mathbf{h}_k^{k-1}$ 表示 k 号相机坐标系到 $k-1$ 号相机坐标系的齐次转换矩阵, 以棋盘格角点在 $k-1$ 号相机坐标系下的偏差, 建立如下的目标优化函数:

$$f(x) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| \mathbf{H}_W^{Ck-1} P_{ij}^W - \mathbf{h}_k^{k-1} \mathbf{H}_W^{Ck} P_{ij}^W \right\|^2. \quad (15)$$

Levenberg-Marquardt 迭代优化求解该最小化问题, 获取最佳的齐次变换矩阵 $\mathbf{h}_k^{k-1}$, 确定辅助相机与从相机 j 之间的位置关系。同理, 对辅助相机与 $j+1$ 号从相机组成双目子系统进行标定, 可以获取辅助相机与从相机 $j+1$ 之间的相机坐标系转换矩阵 $\mathbf{h}_{k+1}^k$, 然后由坐标系变换可以确定从相机 $j+1$ 与从相机 j 之间的齐次变换矩阵 $\mathbf{H}_{j+1}^j$:

$$\mathbf{H}_{j+1}^j = \mathbf{h}_k^{k-1} \mathbf{h}_{k+1}^k. \quad (16)$$

4 实验验证及结果分析

本文选取 $800 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$ 的高铁车身侧墙部件来验证所提方法的可行性与有效性。以可操作性、高效性和合理性为目的, 采用 5 个 1920×1200 像素且搭配 8 mm 焦距镜头的 basler 工业相机和单个 650 nm 波长的鲍威尔激光器来构建一套三目视觉线结构光测量系统, 并且验证全局标定方法的实用性, 如图 5(a) 所示。所搭建的多目视觉线结构光测量系统的测量范围是 $823 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$, 每个相机的测量视场 $303 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$, 相机和激光器之间采用直射式布局方式, 激光器垂直照射到被测物体表面, 与相机光轴之间形成 30° 夹角。一块简易的棋盘格靶标即可完成传感器参数的标定, 选用的棋盘格靶标角点间距是 10 mm , 横纵角点数为 13×9 , 如图 5(b) 所示。

采集棋盘格靶标图像数据, 要求将标定板位置遍布各个相机视场区域, 以张正友相机标定法^[20]标定各个相机内参、外参及镜头畸变参数, 结果如表 2 所示。

对光平面和扫描方向进行标定, 在相机 1, 3, 5 坐标系下的光平面方程参数和扫描方向参数如表 3 所示。

根据 3.4 节中的基于辅助相机全局标定原理, 将棋盘格靶标依次放在相邻相机重叠视场内至少三个不同位置, 相邻相机采集不同位置的棋盘格图像, 如图 6 所

图5 (网络彩图版)测量系统实验装置图. (a) 实验装置图; (b) 棋盘格靶标

Figure 5 (Color online) Experimental setup of measurement system. (a) Experimental setup; (b) chessboard target.

示. 全局标定获取从相机1和从相机2与主相机的齐次变换矩阵 $\mathbf{H}_1$ 和 $\mathbf{H}_2$, 结果如下所示:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0.99989 & -0.00873 & 0.01160 & 262.66407 \\ 0.00896 & 0.99977 & -0.01942 & 0.46002 \\ -0.01143 & 0.01952 & 0.99974 & -2.09963 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0.99976 & -0.01472 & 0.01638 & 526.49202 \\ 0.01494 & 0.99980 & -0.01360 & 3.91364 \\ -0.01618 & 0.01384 & 0.99977 & -5.50698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

4.1 测量系统全局标定精度验证

对三目视觉线结构光测量系统进行全局标定后, 需要验证全局标定的精度, 为此进行了标准件测量实验. 加工如图7所示的标准件, 标准件的特征点A与B之间的距离 $L_{ab}=260.056 \text{ mm}$, 特征点B与C之间的距离

表2 所有相机参数标定结果

Table 2 Calibration results for all camera parameters

参数	相机1	相机2	相机3	相机4	相机5
f_x	1740.81	1732.01	1743.60	1739.51	1742.37
f_y	1738.78	1731.50	1741.75	1737.78	1740.25
u_0	961.67	990.95	968.29	985.18	967.45
v_0	586.57	592.59	576.56	586.79	588.88
k_1	-0.2188	-0.2153	-0.2180	-0.2161	-0.2122
k_2	0.1937	0.1969	0.2119	0.2037	0.1571
k_3	-0.0885	-0.1209	-0.1485	-0.1455	0.0056
p_1	-0.0008	0	-0.0009	-0.0008	-0.0009
p_2	0	-0.0002	-0.0004	-0.0004	-0.0007

表3 光平面标定和扫描方向标定结果

Table 3 Results of optical plane and scanning direction calibration

相机坐标系	1	3	5
a	-0.0075	-0.0070	-0.0088
b	-0.8571	-0.8669	-0.8631
c	-0.5151	-0.4985	-0.5049
d	131.0849	130.1649	127.9885
s_x	0.0143	0.0120	0.0095
s_y	-0.8544	-0.8638	-0.8608
s_z	-0.5161	-0.4998	-0.5056

$L_{bc}=264.074 \text{ mm}$, 特征点A与C之间的距离 $L_{ac}=524.13 \text{ mm}$. 使用三目视觉线结构光测量系统扫描测量标准件, 由标准件三维形貌点云数据, 求出特征点之间的距离, 与已知的标准距离进行对比, 验证全局

图6 (网络彩图版)基于辅助相机的全局标定图片. (a) 相机1和2的重叠视场; (b) 相机2和3的重叠视场; (c) 相机3和相机4的重叠视场; (d) 相机4和相机5的重叠视场

Figure 6 (Color online) Global calibration images based on the auxiliary camera. (a) Overlapped field of view of cameras 1 and 2; (b) overlapped field of view of cameras 2 and 3; (c) overlapped field of view of cameras 3 and 4; (d) overlapped field of view of cameras 4 and 5.

标定的精度.

将标准件放在三目视觉线结构光测量系统下, 摆放8次位置, 再由基于辅助相机的全局标定方法, 将三个线结构光传感器的局部测量数据统一到全局坐标系下, 计算标准件空间特征点距离与标准距离的偏差, 如图8所示. 通过计算得到260.056, 264.074, 524.13 mm特征点长度的测量数据RMS误差依次是0.022, 0.048, 0.067 mm. 当特征点长度为524.13 mm时, 标准件覆盖了三目视觉线结构光测量系统的整个视场, 所以在尺寸工件测量时, 基于辅助相机的全局标定误差是0.067 mm.

表4是常用全局标定方法在精度、成本和操作上

图 7 (网络彩图版)标准件
Figure 7 (Color online) Standard parts.

图 8 (网络彩图版)标准件测量数据RMS误差
Figure 8 (Color online) RMS errors of standard parts measurement data.

表 4 全局标定方法在精度、成本和操作方面上的比较

Table 4 Comparison of global calibration methods in terms of accuracy, cost and operation

方法	精度 (mm)	成本	操作
高精度测量仪器法	0.057 ^[8]	高	复杂
反射镜法	0.074 ^[11]	低	复杂
激光投影法	0.2 ^[14]	低	简单
大尺寸标定靶标法	0.15 ^[19]	低	复杂
本文方法	0.067	低	简单

的比较. 可以看出, 本文所提方法全局标定精度为0.067 mm, 高于其他全局标定方法的精度, 除了高精度测量仪器法, 其精度为0.057 mm. 虽然高精度测量仪器法的标定精度高, 但其成本较高, 操作复杂, 相比之下, 本方法的标定精度已经能够满足大视场的测量, 并且成本低, 操作和标定过程简单灵活, 更适用于大型复杂构件的全局标定与测量.

4.2 高铁车身测量试验

为了验证所提方法在实际应用中的可行性和有效性, 采用所搭建的三目视觉线结构光测量系统, 扫描测量高铁车身侧墙板样件, 其尺寸是800 mm × 650 mm, 呈弧形结构, 如图9所示, 其表面还涂覆着腻子, 用于后续腻子打磨与喷漆, 而喷漆的质量直接决定着高铁车身的使用寿命. 因此, 高铁车身的精准高效测量尤为重要.

三目视觉线结构光测量系统所采集的局部测量数据如图10(a)~(c)所示, 基于全局标定结果将局部测量数据进行拼接融合, 其结果如图10(d)所示.

使用高精度测量设备Leica T-Scan AT960激光跟踪仪和T-Scan手持式扫描仪精确扫描涂覆腻子的实验样件, 将采集到的数据作为实验样件的理论模型, 与全局拼接的实验样件形貌数据进行配准对齐, 其结果如图11所示. 分析结果表明实验样件的平均偏差是-0.2797~0.2134 mm, 标准偏差是0.3031 mm, 间接验证了本文所提全局标定方法的可靠性与有效性.

为进一步验证全局标定方法在实际应用中的可行性, 采用本文所提方法对高铁车体“测量-打磨”一体化装置中的多目视觉线结构光测量系统进行全局标定,

图 9 (网络彩图版)高铁车身侧墙板实验样件
Figure 9 (Color online) Experimental prototype of high-speed railway body.

图 10 (网络彩图版)实验样件点云数据. 线结构光传感器1 (a), 2 (b), 3 (c)的数据和拼接数据(d)

Figure 10 (Color online) Point cloud data of the experimental sample. Data of line structured light sensors 1 (a), 2 (b), 3 (c), and spliced data (d).

图 11 (网络彩图版)实验样件点云数据偏差分析

Figure 11 (Color online) Deviation analysis of the point cloud data of the experimental sample.

如图12所示.

采用文中标定方法标定后的测量装置, 来扫描测量单节高铁车体, 将多目视觉线结构光传感器三维重建的局部测量数据全局统一, 实现对大型构件高铁车体表面的三维测量, 测量结果如图13所示, 图中颜色随着高度值的增加大致呈现蓝绿黄的变化.

机器人根据扫描的车体表面三维形貌进行在线路径规划, 进而实现高铁车体表面赋予的机器人自动化打磨, 不仅提高生产效率, 还能提升表面加工质量一致性, 为后续车体高效高质量喷漆提供支撑, 如图14所示.

图 12 (网络彩图版)高铁车体测量打磨一体化装置图

Figure 12 (Color online) Measurement and grinding integration device of high-speed railway body.

图 13 (网络彩图版)高铁车体三维测量数据

Figure 13 (Color online) 3D measurement data of high-speed railway body.

5 结论

针对现有的多目视觉线结构光测量系统全局标定方法对标定工具要求高, 标定过程复杂, 以及全局标定困难等问题, 本文提出了一种基于辅助相机的全局标定方法, 能够实现对测量系统的快速高效全局标定. 通过采用5个工业相机和1个激光器搭建测量范围823 mm×350 mm的视觉测量系统, 从而实现高铁车身体样件的全局标定与高效测量, 并得出以下结论.

图 14 (网络彩图版)高铁车身表面腻子机器人打磨系统
Figure 14 (Color online) Robotic grinding of high-speed railway body.

(1) 本文所提方法标定过程简单、成本低、操作灵活、标定精度高, 所搭建测量系统的全局标定误差为 0.067 mm , 远低于其他全局标定方法的标定误差; 虽然高精度测量仪器法的标定误差更低(0.057 mm), 但其成本高, 操作复杂, 相比较之下, 本文所提方法更适用于大型复杂构件的全局标定与测量。

(2) 针对 $800\text{ mm} \times 650\text{ mm}$ 的弧形高铁车身样件, 其全局测量平均偏差为 $-0.2797 \sim -0.2134\text{ mm}$, 标准偏差为 0.3031 mm , 能够满足大构件的测量精度要求, 从而间接验证了本文所提全局标定方法的可靠性与有效性。

(3) 本文所提方法能够进一步应用于高铁车身表面腻子机器人标定、测量、打磨、检测的一体化操作, 不仅能够提高生产效率, 还能提升表面加工质量一致性, 为后续车体高效高质量喷漆提供精度保障。

参考文献

- Pan X, Liu Z. High-accuracy calibration of line-structured light vision sensor by correction of image deviation. *Opt Express*, 2019, 27: 4364–4385
- Xu X H. Research on the key technology of robotic abrasive belt grinding of compressor blade (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. 30–59 [徐小虎. 压气机叶片机器人砂带磨抛加工关键技术研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2019. 30–59]
- Li T T, Yang F, Xu X L. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2017, 44: 136–146 [李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法. 中国激光, 2017, 44: 136–146]
- 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. *Sensors*, 2015, 15: 8664–8684
- Xu K, Yang C L, Zhou P, et al. 3D detection technique of surface defects for steel rails based on linear lasers (in Chinese). *J Mech Eng*, 2010, 46: 1–5 [徐科, 杨朝霖, 周鹏, 等. 基于激光线光源的钢轨表面缺陷三维检测方法. 机械工程学报, 2010, 46: 1–5]
- Xia R, Hu M, Zhao J, et al. Global calibration of non-overlapping cameras: State of the art. *Optik*, 2018, 158: 951–961
- Zhao Y H, Yuan F, Ding Z L, et al. Global calibration method for multi-vision measurement system under the conditions of large field of view. *J Basic Sci Eng*, 2011, 19: 679–688
- Lu R S, Li Y F. A global calibration method for large-scale multi-sensor visual measurement systems. *Sens Actuat A-Phys*, 2004, 116: 384–393
- Martins N, Dias J. Camera calibration using reflections in planar mirrors and object reconstruction using volume carving method. *Imag Sci J*, 2004, 52: 117–130
- Zou W, Wei Z, Liu F. High-accuracy calibration of line-structured light vision sensors using a plane mirror. *Opt Express*, 2019, 27: 34681–34704
- Xu Z, Wang Y, Yang C. Multi-camera global calibration for large-scale measurement based on plane mirror. *Optik*, 2015, 126: 4149–4154
- Liu Z, Wei X, Zhang G. External parameter calibration of widely distributed vision sensors with non-overlapping fields of view. *Optics Lasers Eng*, 2013, 51: 643–650
- Liu Q, Sun J, Liu Z, et al. Global calibration method of multi-sensor vision system using skew laser lines. *Chin J Mech Eng*, 2012, 25: 405–410
- Liu Q, Sun J H, Zhao Y T, et al. Calibration method for geometry relationships of nonoverlapping cameras using light planes. *Opt Eng*, 2013, 52: 1–7
- Ma Y K, Wang Z Y, Yang G W, et al. A system based on structured-light sensors for measurement of pavement evenness (in Chinese). *Chin J Sensors Actuat*, 2013, 26: 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. 传感技术学报, 2013, 26: 1597–1603]

1597–1603]

- 16 Xia R, Hu M, Zhao J, et al. Global calibration of multi-cameras with non-overlapping fields of view based on photogrammetry and reconfigurable target. *Meas Sci Technol*, 2018, 29: 065005
- 17 Liu Z, Zhang G, Wei Z, et al. Novel calibration method for non-overlapping multiple vision sensors based on 1D target. *Optics Lasers Eng*, 2011, 49: 570–577
- 18 Liu Z, Huang B K, Wei X G, et al. Calibration method for multiple line structured light vision sensors (in Chinese). *J Mech Eng*, 2012, 48: 19–24 [刘震, 黄邦奎, 魏新国, 等. 线结构光多视觉传感器现场同步校准方法. *机械工程学报*, 2012, 48: 19–24]
- 19 Liu Z, Zhang G, Wei Z, et al. A global calibration method for multiple vision sensors based on multiple targets. *Meas Sci Technol*, 2011, 22: 125102–125111
- 20 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell*, 2000, 22: 1330–1334
- 21 Zeng X J, Huo J C, Wu Q Y. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linera-structure light (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2012, 39: 174–178 [曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定. *中国激光*, 2012, 39: 174–178]

Research on the global calibration of the multi-vision line structured light measurement system based on auxiliary camera

GE QingRu¹, YAN SiJie², CHEN Wei^{1,2}, WU Long^{1,2} & XU XiaoHu²

¹ Wuxi CRRC Times Intelligent Equipment Co., Ltd., Wuxi 214000, China;

² State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

To solve the problem of the absence of a common field of view between the cameras in the existing multi-vision line structured light measurement system, which leads to high requirements for calibration tools and complicated global-calibration process, a global-calibration method for the multi-vision line structured light measurement system based on an auxiliary camera is introduced to achieve a large-field-of-view measurement. First, an auxiliary camera is used as an intermediary to acquire an approximately one-half overlapped field of view with the line structured light sensor, which can constitute a binocular subsystem. Then, the spatial geometric relationship between the auxiliary camera and two adjacent line structured light sensors is established based on the different pose images of the calibration plate. Second, the position relationship between the two adjacent line structured light sensors without a common field of view is solved using coordinate transformation. Finally, the transformation matrix from a local to a global coordinate system is solved one at a time to complete the global calibration process. The requirement in terms of calibration tools of the proposed calibration method is low. Further, it does require the use of high-precision measuring equipment and complex targets but only requires a simple chessboard target to complete the global calibration of a multi-vision line structured light measurement system. Meanwhile, the calibration process can achieve high calibration accuracy. Meanwhile, the measurement experiment demonstrates that the global calibration error of this method is 0.067 mm, which effectively improves the measurement accuracy and can guarantee the required accuracy for the integration of “measurement and machining” of large components using robots.

auxiliary camera, large field of view, global calibration, multi-vision line structured light measurement

doi: [10.1360/SST-2021-0367](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0367)