

线结构光三维传感器扫描方向标定方法

刘昌文¹, 段发阶^{1*}, 李杰², 徐毅², 邢少颖²¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;²中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 611730

摘要 线结构光三维传感器需要结合扫描机构才能对物体进行三维重构, 在使用前需要对扫描方向进行标定。由于各个标定图像的清晰度不同, 传统标定方法会多次引入噪声, 降低了标定精度。为了减小由图像清晰度不同多次引入的噪声, 本文提出了基于联合估计的扫描方向标定方法。在标定过程中, 需要使用位移台将平面靶标移动一个固定的距离, 使每个拍摄位置处的靶标相对相机坐标系的旋转矩阵相同, 同时平移向量的变化由位移台的运动步长约束。通过对旋转矩阵和平移向量增加约束, 将平面靶标上的二维特征点拓展为三维特征点; 联合所有标定图像进行统一的单应性估计, 减小了由图像清晰度不同多次引入的噪声。通过测量量块尺寸进行了验证实验, 实验结果表明: 所提方法的测量误差相比传统方法减小了约 30%, 而且所提方法具有更好的重复性。所提方法实现了线结构光三维传感器扫描方向的高精度标定, 减小了传感器三维重构的误差。

关键词 机器视觉; 扫描方向标定; 联合单应性估计; 噪声分析; 线结构光传感器

中图分类号 TP29; TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220791

1 引言

线结构光三维传感器以其非接触、高精度、结构简单等优点被广泛应用于对物体的三维重构。线结构光三维传感器主要由线结构光激光器和相机组成, 其工作原理为: 线结构光激光器投射出的光平面与被测物体表面相交形成光条, 相机拍摄光条图像, 通过标定可以获得图像中光条中心像素坐标与物体表面上对应点三维坐标之间的映射关系, 进而获得被测物体的三维信息。

在视觉检测系统中, 常用扫描机构移动视觉检测传感器或者被测物体进行多次拍摄, 扩大测量范围, 这被称为“平移扫描”。对于线结构光三维传感器来说, 其单次拍摄的测量范围仅为光平面与物体相交形成的光条, 需要使用扫描机构使光平面依次扫过整个物体表面, 从而实现对被测物体的三维重构。在实际应用中, 经常联合使用线结构光三维传感器和平移扫描机构对扁平物体进行测量, 这种方法已被广泛应用于瑕疵检测^[1]、质量控制^[2]、几何尺寸测量^[3-4]、定位组装^[5]中, 但在使用前需要统一扫描机构坐标系与传感器坐标系, 即对扫描机构的扫描方向进行标定。如果位移机构扫描方向标定结果不准确, 就会使各个截面点云

的相对位置发生偏移, 从而导致三维重构结果存在误差。例如: 对两个平行的平面进行三维重构时, 如果扫描方向不准确, 就会使平面法向量的测量值不准确, 进而导致两平面间距离的测量值也不准确; 对球体进行三维重构时, 如果扫描方向不准确, 就会使其三维重构结果变为不规则的椭球体。因此, 需要对扫描方向进行准确标定。

目前主要使用三维靶标或者平面靶标进行标定。Xie 等^[6]通过增加光平面过球靶标球心的约束完成了从传感器坐标系到三坐标测量机笛卡儿坐标系的标定, 实现了三坐标测量机与线结构光三维传感器的联合测量; Che 等^[7]、Shi 等^[8]和李子奇^[9]分别使用二球靶标、四球靶标和圆柱靶标实现了从倾斜传感器坐标系到扫描机构正交参考坐标系的标定。但是, 高精度三维靶标表面一般非常光滑, 会对线结构光传感器投射出的激光进行镜面反射, 导致光条中心提取不准确, 从而影响标定精度; 同时, 这些方法需要大量的点云数据才能拟合出球心或者圆柱的对称轴, 操作复杂且计算量大, 不适用于工业现场快速标定。因此, 平面靶标是进行位移方向标定时更普遍的选择。

易文祥^[10]、曾祥军等^[11]提出了一种新的标定方法, 即: 固定棋盘格平面靶标, 使传感器沿着扫描方向移动

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-06-07; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2010800)、国家自然科学基金(61905175, 61971307)、青年人才托举工程(2021QN-RC001)、国防科技重点实验室基金(6142212210304)、霍英东教育基金会资助项目(171055)、广东省重点研发计划(2020B0404030001)、中国航发四川燃气涡轮研究院外委课题(WDZC-2021-3-4)

通信作者: *fjduan@tju.edu.cn

并拍摄靶标图像,单独估计每幅图像对应的相机外参,再计算各靶标图像上同一特征点在相机坐标系下的三维坐标,最后对三维坐标进行直线拟合,直线的方向向量即为扫描方向。下文把这种对每幅图像分别进行外参估计的方法称为“独立估计法”。由于不同位置上拍摄的靶标图像的清晰度不同,因此单独对每幅图像进行估计得到的对应的相机外参含有不同的噪声,这在计算特征点三维坐标时会多次引入噪声,对标定精度不利。因此,本文提出了一种基于联合估计的线结构光三维传感器扫描方向标定方法。该方法通过增加旋转矩阵和平移向量的约束,将平面靶标上的二维特征点拓展为三维特征点,同时联合了所有的标定图像进行统一的单应性估计,提高了扫描方向的标定精度。

2 独立估计法噪声分析

2.1 相机成像原理

以棋盘格平面靶标为例,相机成像模型如图 1 所示。以相机投影中心为原点建立相机坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$,在像面上以左上角像素为原点建立像素坐标系 $O_E-X_E Y_E$, X_C 、 X_E 轴平行于图像的列轴, Y_C 、 Y_E 轴平行于图像的行轴, Z_C 由右手法则确定;以棋盘格靶标左上角点为原点建立世界坐标系 $O_W-X_W Y_W Z_W$, X_W 轴平行于棋盘格列轴, Y_W 轴平行于棋盘格行轴, Z_W 由右手法则确定。通过单应性矩阵 H 建立世界坐标与像素坐标的映射关系,即

$$\rho \begin{bmatrix} \mathbf{P}_E \\ 1 \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$A[\mathbf{R}|\mathbf{T}] \begin{bmatrix} \mathbf{P}_W \\ 1 \end{bmatrix} = AB \begin{bmatrix} \mathbf{P}_W \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{T_z} \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_5 & h_6 & h_7 & h_8 \\ h_9 & h_{10} & h_{11} & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_W \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: ρ 为齐次坐标的比例系数; $\mathbf{P}_W[X_W Y_W Z_W]^T$ 为世界

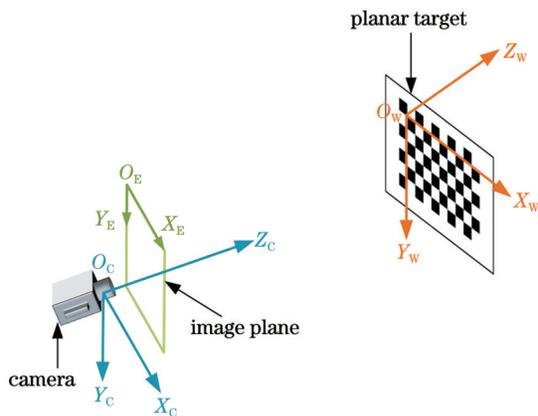


图 1 相机成像原理图

Fig. 1 Schematic of camera imaging

界坐标; $\mathbf{P}_E[X_E Y_E]^T$ 为像素坐标; \mathbf{A} 为内参矩阵,由 X_E 、 Y_E 方向上的主距 f_x 、 f_y 和主点像素坐标 $[u_0 v_0]^T$ 组成; \mathbf{B} 为外参矩阵,由旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 组成, \mathbf{R} 由 $r_1 \sim r_9$ 组成, \mathbf{T} 由 T_x 、 T_y 、 T_z 组成。通过 Zhang^[12] 提出的方法可以获得内参矩阵并对镜头畸变进行校正,因此下文默认相机内参矩阵已知,镜头畸变已被校正。

2.2 噪声分析验证

独立估计法对每一幅标定图像 I_i 都分别进行单应性最优估计,而角点都处于 $O_W-X_W Y_W$ 平面上,因此角点的 Z_W 轴坐标为 0。所以 \mathbf{H} 和 \mathbf{B} 可以简化为 \mathbf{H}' 和 \mathbf{B}' ,即

$$\rho \begin{bmatrix} \mathbf{P}_E \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & T_x \\ r_4 & r_5 & T_y \\ r_7 & r_8 & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$AB' \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{T_z} \begin{bmatrix} h'_1 & h'_2 & h'_3 \\ h'_4 & h'_5 & h'_6 \\ h'_7 & h'_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}' \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

假设位移台移动标定板 $m-1$ 次,相机共拍摄了 m 幅标定图像,棋盘格上有 n 个角点,则根据棋盘格角点的世界坐标 $\mathbf{P}_{w,ij}[X_{w,ij} Y_{w,ij} 0]^T$ 与像素坐标 $\mathbf{P}_{e,ij}[X_{e,ij} Y_{e,ij}]^T$ ($i=1 \sim m, j=1 \sim n$) 的对应关系对每幅标定图像 I_i 的单应性矩阵 \mathbf{H}'_i 进行式(3)所示的最优估计,再结合式(2)和已知的内参矩阵即可分离出每幅图像对应的外参矩阵 \mathbf{B}'_i 。

$$\begin{cases} \min e_{Hi} = \sum_{j=1}^n \left\| \mathbf{P}_{E,ij} - \hat{\mathbf{P}}_{E,ij} \right\|^2 \\ \hat{\mathbf{P}}_{E,ij} = \mathbf{H}'_i \begin{bmatrix} X_{W,ij} \\ Y_{W,ij} \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (3)$$

则每个拍摄位置下各个角点在相机坐标系下的三维坐标 $\mathbf{P}_{c,ij}[X_{c,ij} Y_{c,ij} Z_{c,ij}]^T$ 为

$$\mathbf{P}_{c,ij} = \mathbf{B}'_i \begin{bmatrix} X_{W,ij} \\ Y_{W,ij} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对同一个角点在各个拍摄位置下的三维坐标进行直线拟合即可得到相机坐标系下位移台扫描方向的方向向量。

采用独立估计法得到每幅标定图像 I_i 对应的外参矩阵 \mathbf{B}'_i ,由于 I_i 的清晰度不同, \mathbf{B}'_i 中会有相互独立的噪声,这将会在角点的世界坐标 $\mathbf{P}_{w,ij}$ 转换为相机坐标 $\mathbf{P}_{c,ij}$ 时多次引入噪声,降低标定精度。

图 2 所示实验可以直观地展现出独立估计法引入的噪声。实验中,仅通过高精度位移台对靶标进行平移,平面靶标相对相机的姿态不变;同时通过激光干涉仪测量标靶平移的距离,共平移 19 次,拍摄包括初始位置的 20 幅图像。

图 3 为独立估计法得到的从相机坐标系到世界坐

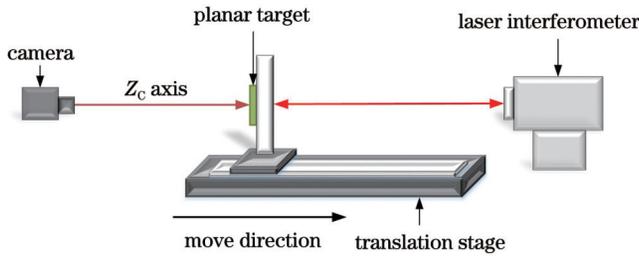


图 2 独立估计法噪声验证实验原理图

Fig. 2 Schematic of noise verification experiment of independent estimation method

标系的旋转角度,图 3(a)、(b)、(c)分别是沿 X_c 、 Y_c 、 Z_c 轴旋转的角度 α 、 β 、 γ ,图 4 是各个拍摄位置相对于前一个拍摄位置的平移 δT 。

理想情况下,各个拍摄位置的 α 、 β 、 γ 应该与初始位置处的相同,但是由图 4 可以看出各个拍摄位置的 α 、 β 、 γ 相对于初始位置的角度都有不同的变化,且独立估计得到的平移与基准值相比也明显不同。因此,独立估计得到的 B'_i 包含噪声,且各个 B'_i 包含的噪声相互独立,这会在对角点进行坐标转换时多次引入噪声,导致标定精度下降。

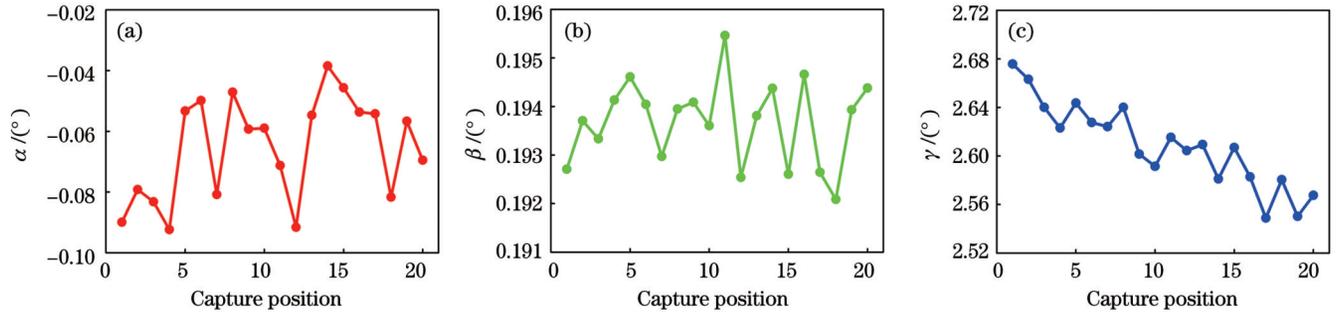


图 3 从相机坐标系到世界坐标系旋转角度的估计结果。(a)沿 X_c 轴旋转角度 α ; (b)沿 Y_c 轴旋转角度 β ; (c)沿 Z_c 轴旋转角度 γ

Fig. 3 Estimation results of rotation angles from camera coordinate system to world coordinate system. (a) Angle α rotated along X_c axis; (b) angle β rotated along Y_c axis; (c) angle γ rotated along Z_c axis

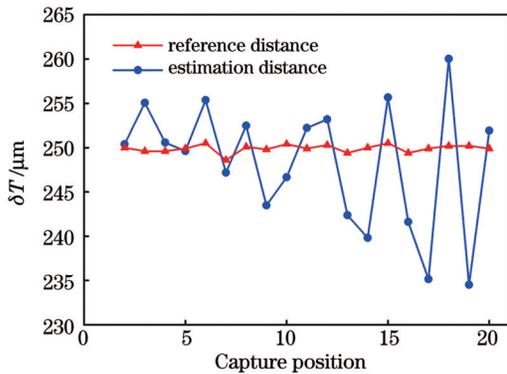


图 4 各个拍摄位置相对于前一个拍摄位置的平移 δT

Fig. 4 Movement distances δT of each capture position relative to previous capture position

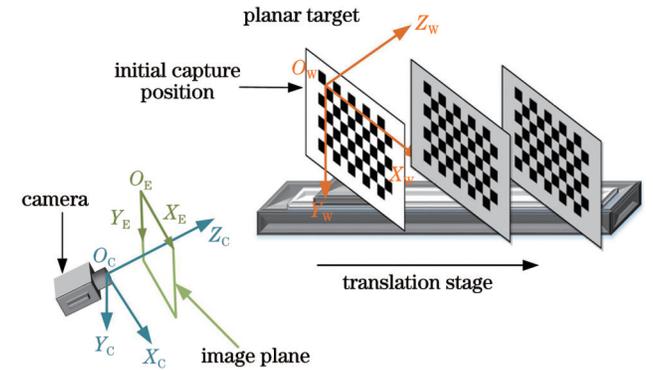


图 5 扫描方向标定原理图

Fig. 5 Schematic of scanning direction calibration

定距离,并在每个位置处拍摄靶标图像。以初始拍摄位置的靶标的左上角点为原点建立三维世界坐标系,不同拍摄位置处棋盘格角点的世界坐标 $P_{w,ij} [X_{w,ij} Y_{w,ij} Z_{w,ij}]^T$ 表示为

$$\begin{bmatrix} P_{w,ij} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & V_{wx} & 0 \\ 0 & 1 & V_{wy} & 0 \\ 0 & 0 & V_{wz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_{w,ij} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中,

$$P'_{w,ij} = \begin{bmatrix} X_{w,ij} \\ Y_{w,ij} \\ \lambda(i-1) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: λ 为位移台运动步长; $[X_{w,ij} Y_{w,ij}]^T$ 可以通过靶标的设计参数得到; $V_w [V_{wx} V_{wy} V_{wz}]^T$ 为世界坐标

3 基于联合估计的扫描方向标定方法

为了减小由图像清晰度不同引入的噪声,本文提出了基于联合估计的扫描方向标定方法。该方法使用高精度位移台移动平面靶标,使每个位置处的靶标相对相机坐标系的旋转矩阵相同,同时平移向量模长的变化由位移台运动步长约束。通过对旋转矩阵和平移向量增加约束,将平面靶标上的二维特征点拓展为三维特征点,实现了对所有标定图像进行统一的单应性估计,提高了扫描方向的标定精度。具体标定方法如下:

如图 5 所示,标定板放置于位移台上,调节棋盘格靶标的姿态使其清晰成像。使用位移台使靶标移动固

系下位移台位移单位方向向量。

所以角点的世界坐标 $\mathbf{P}_{w,ij}$ 与像素坐标 $\mathbf{P}_{e,ij}$ 之间的映射关系可以表示为

$$\rho \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{e,ij} \\ 1 \end{bmatrix} = AB \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{w,ij} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}'' \begin{bmatrix} \mathbf{P}'_{w,ij} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

通过求解式(8)的最小二乘解,即可求得 $\mathbf{P}'_{w,ij}$ 与 $\mathbf{P}_{e,ij}$ 之间的单应性矩阵 \mathbf{H}'' 。

$$\begin{cases} \min e_H = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|\mathbf{P}_{e,ij} - \hat{\mathbf{P}}_{e,ij}\|^2 \\ \hat{\mathbf{P}}_{e,ij} = \mathbf{H}'' \begin{bmatrix} \mathbf{P}'_{w,ij} \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (8)$$

由于相机内参已知,结合旋转矩阵为正交矩阵且 \mathbf{V}_w 为单位向量的约束,即可由 \mathbf{H}'' 分离出相机坐标系和世界坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 、平移向量 \mathbf{T} 以及 \mathbf{V}_w 。

因此相机坐标系下位移台扫描方向的方向向量 \mathbf{V}_c 为

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{R}\mathbf{V}_w. \quad (9)$$

4 测量实验与结果

为了验证本文提出的标定方法,分别使用所提标定方法以及基于独立估计的标定方法进行多次重复标

定,比较两种方法标定结果的重复性,验证标定方法的精密度;标定后测量量块的尺寸,以验证算法的正确度和准确度。实验平台主要包括相机、线结构光激光器、位移台、量块,其中:相机型号为 Basler-acA-1440,相机视场约为 $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$;激光器型号为中国长春新产业光电技术有限公司的 PGL-L-405 nm;位移台型号为上海联谊光纤机械有限公司的 XW76H-25-N,位移台误差为 $\pm 2 \mu\text{m}$;量块规格为 0 级,标称尺寸为 25 mm 。

标定实验中 $\lambda=0.25 \text{ mm}$,共运动了 20 步。在标定过程中, λ 越小,单位长度内拍摄的图像数量就越多,用于计算位移台运动方向的数据就越多,即采样频率越高。增加采样频率(减小 λ)会在一定程度上减小数据的随机误差,但是会增加标定的操作时长和算法的计算量。因此,根据需求选择合适的 λ 来保证有足够多的数据(目的是减小随机误差),同时保证有适当的操作时长和计算量。

为了验证基于联合估计的标定算法具有减小噪声和提高标定结果重复性的能力,进行了 10 次重复标定实验。在 10 次重复实验中,基于联合估计和基于独立估计得到的方向向量 $\mathbf{V}_c [V_{cx} \ V_{cy} \ V_{cz}]^T$ 如图 6 所示。

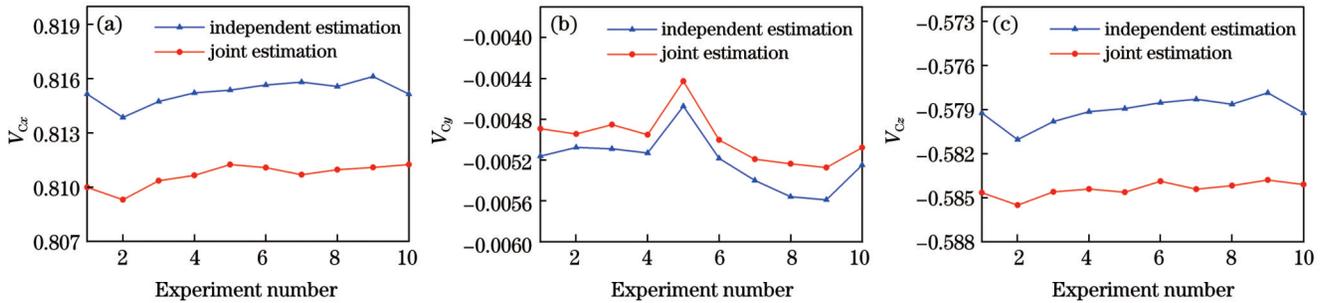


图 6 10 次重复实验中基于联合估计和基于独立估计的方向向量标定结果。(a) V_{cx} ; (b) V_{cy} ; (c) V_{cz}

Fig.6 Calibration results of direction vector based on joint estimation and independent estimation in 10 repeated experiments. (a) V_{cx} ; (b) V_{cy} ; (c) V_{cz}

图 6(a) 中,基于独立估计和基于联合估计的 V_{cx} 的标准差分别为 0.00060、0.00059;图 6(b) 中,基于独立估计和基于联合估计的 V_{cy} 的标准差分别为 0.00025、0.00023;图 6(c) 中,基于独立估计和基于联合估计的 V_{cz} 的标准差分别为 0.00084、0.00046。比较两种标定方法的结果可知, V_{cx} 和 V_{cy} 的标准差几乎相同,但是基于联合估计的 V_{cz} 的标准差比基于独立估计的 V_{cz} 的标准差减小了约 45%。因此,基于联合估计的标定方法具有更好的重复性,即精密度更高。

此外,由图 6 可以看出两种标定方法得到的结果有明显的偏差。为了验证基于联合估计的标定方法的正确度,分别使用两种方法的标定结果对量块的尺寸进行测量,哪种方法的测量结果更接近标称尺寸,说明哪种方法的正确度更高。

标定方法验证实验的原理图和实物图如图 7 所示。测量量块的实验过程如下:1)使用相同的标定图

像分别进行基于联合估计的方向标定和基于独立估计的方向标定;2)把两个量块紧贴并放置于位移台上形成阶梯结构,量块 1 的表面与量块 2 的表面分别与光平面相交形成两个光条;3)通过位移台移动量块,移动距离为 λ' ,使光平面扫过量块表面,共移动 p 次,移动过程中相机共拍摄包括初始位置在内的 $p+1$ 幅光条图像;4)计算各幅图像对应的点云在相机坐标系下的三维坐标 $\mathbf{C}_k (k=0 \sim p)$;5)对各个点云进行式(9)所示的变换,即可得到拼接后各个点云的三维坐标 \mathbf{C}'_k 。

$$\mathbf{C}'_k = \mathbf{C}_k + k\lambda'\mathbf{V}_c. \quad (9)$$

最后对这两个量块表面的点云分别进行平面拟合,再计算这两个平面的距离即可得到量块 1 的尺寸。

实验中, $\lambda'=0.5 \text{ mm}$, $p=10$ 。两个量块表面的点云如图 8 所示,其中:图 8(a) 是基于联合估计的标定方法的结果,量块尺寸的测量误差为 $25.2 \mu\text{m}$;图 8(b) 是基于独立估计的标定方法的结果,量块尺寸的测量误

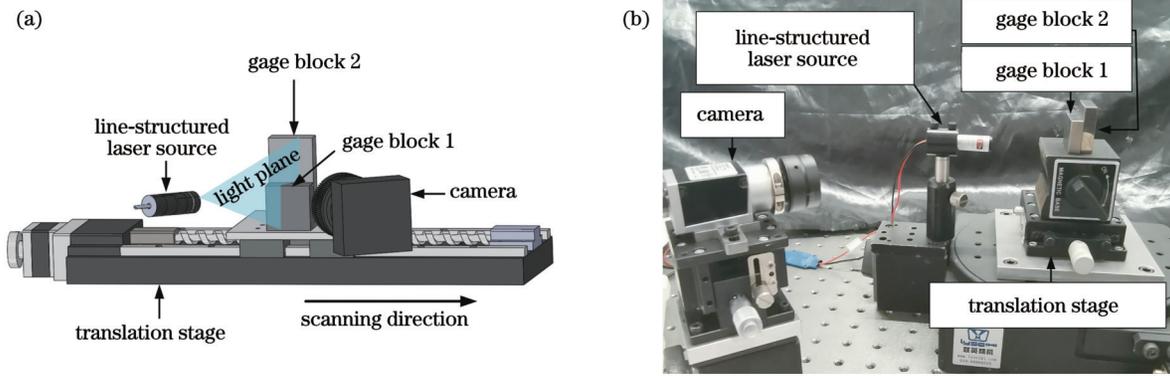


图 7 标定方法验证实验。(a)验证实验的原理图;(b)实验平台实物图

Fig. 7 Validation experiment of calibration method. (a) Schematic of calibration experiment; (b) picture of experiment platform

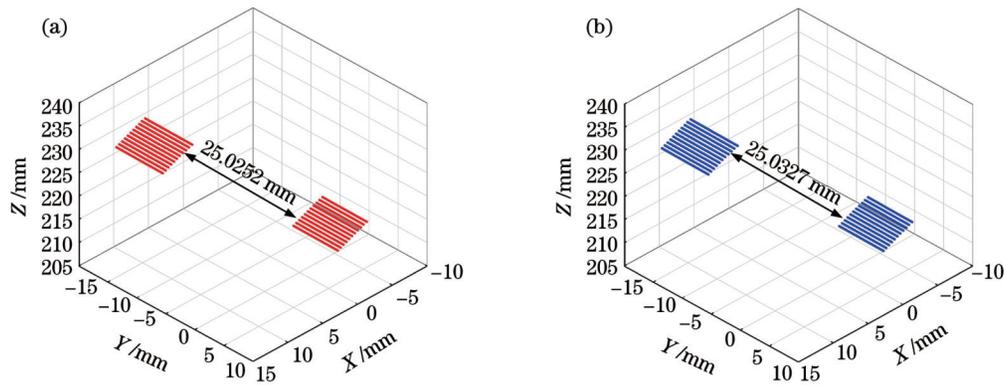


图 8 量块表面的点云图。(a)基于联合估计的点云图;(b)基于独立估计的点云图

Fig. 8 Point cloud of gage blocks' surfaces. (a) Point cloud based on joint estimation; (b) point cloud based on independent estimation

差为 32.7 μm 。可见,基于联合估计的标定方法的测量误差更小,具有更高的正确度。

为了验证标定方法的准确度,共进行了 10 次重复标定,然后用这 10 次重复标定的结果分别进行量块尺寸的测量。10 次重复实验的测量误差如图 9 所示。基于联合估计的标定方法的测量误差均值为 25.0 μm ,标准差为 0.56 μm ;基于独立估计的标定方法的测量误差均值为 35.7 μm ,标准差为 1.51 μm 。相比于传统方法,所提标定方法的测量误差平均减小了约 30%,且重复性更好。因此,本文所提基于联合估计的标定方法具有更高的准确度。

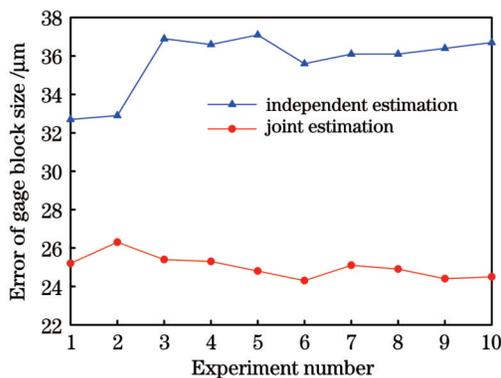


图 9 10 次重复实验中量块尺寸的测量误差

Fig. 9 Measurement error of gage block size in 10 repeated experiments

5 结 论

为了提高线结构光三维传感器三维重构的精度,本文首先详细分析并验证了传统的扫描方向标定方法多次引入噪声的缺点,然后提出了基于联合估计的扫描方向标定方法。通过对旋转矩阵和平移向量增加约束,将平面靶标上的二维特征点拓展为三维特征点,实现了对所有标定图像进行统一的单应性估计,提高了扫描方向的标定精度。实验结果表明:所提标定方法对 25 mm 量块的平均测量误差为 25.0 μm ,相比传统标定方法的测量误差减小了约 30%,且具有更好的重复性。所提标定方法提高了线结构光三维传感器扫描方向的标定精度,减小了传感器的三维重构误差。

参 考 文 献

- [1] 李荣华, 王振宇, 卢祺, 等. 高铁车体表面三维重建及瑕疵点检测[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(1): 136-139, 142.
Li R H, Wang Z Y, Lu Q, et al. 3D reconstruction of high-speed rail car body surface and defect detection[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(1): 136-139, 142.
- [2] 王乐, 周谦, 方玥, 等. 基于线结构光的钢轨扣件紧固状态检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 1612002.
Wang L, Zhou Q, Fang Y, et al. Detection method of rail fastener fastening state based on line structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(16): 1612002.
- [3] 赵其杰, 孟庆翔. 基于激光传感的料堆体积测量在线标定方法[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1208004.

- Zhao Q J, Meng Q X. On-line calibration method of stockpile volume measurement based on laser sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1208004.
- [4] 张翔, 何平安, 王子洲, 等. 轨道车辆车体外形尺寸测量系统[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(2): 77-80.
- Zhang X, He P A, Wang Z Z, et al. Bodywork dimension measurement system based on linear-structured light[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(2): 77-80.
- [5] 周晏锋, 陈蔚芳, 曹新航, 等. 基于线激光在机测量的一面两孔特征寻位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0112004.
- Zhou Y F, Chen W F, Cao X H, et al. One-plane two-hole feature positioning method based on line laser on-machine measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0112004.
- [6] Xie Z X, Zhang C G, Zhang Q M. A simplified method for the extrinsic calibration of structured-light sensors using a single-ball target[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(11): 1197-1203.
- [7] Che C G, Ni J. A ball-target-based extrinsic calibration technique for high-accuracy 3-D metrology using off-the-shelf laser-stripe sensors[J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 210-219.
- [8] Shi Z Y, Wang T, Lin J C. A simultaneous calibration technique of the extrinsic and turntable for structured-light-sensor-integrated CNC system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 138: 106451.
- [9] 李子奇. 基于线结构光扫描的大尺寸测量系统标定方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
- Li Z Q. Research on calibration method of large size measurement system based on line-structured-light scanning[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.
- [10] 易文祥. 基于线激光扫描的三维重建系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- Yi W X. Research on 3D reconstruction system based on line laser scanning[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [11] 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[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0108002.
- Zeng X J, Huo J C, Wu Q Y. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 0108002.
- [12] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C] // Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 1999: 666-673.

A Scanning Direction Calibration Method of Line-Structured Light Three-Dimensional Sensors

Liu Changwen¹, Duan Fajie^{1*}, Li Jie², Xu Yi², Xing Shaoying²

¹State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment, Chengdu 611730, Sichuan, China

Abstract

Objective In a visual measurement system, the scanning mechanism is used to move the vision sensors or the measured object to expand the measurement range, which is known as translation scanning. The measurement range of a single image, particularly for a line-structured light three-dimensional (3D) sensor, is only the light stripe formed by the intersection of the light plane and object. To achieve a 3D reconstruction of the measured object, a scanning mechanism must scan the entire surface of the light plane. In practical applications, line-structured light 3D sensors and translation scanning mechanisms are used in combination to measure flat objects and in defect detection, quality control, geometric dimension measurement, positioning, and other applications. However, before use, it is necessary to unify the coordinate systems of the scanning mechanism and sensor, that is, to calibrate the translation direction of the scanning mechanism. In the traditional calibration method, the checkerboard plane target is fixed, sensor is moved along the scanning direction, and camera captures target images. Subsequently, the extrinsic camera parameters corresponding to each image are estimated separately, and the 3D coordinates of the same feature point on each target image are calculated in the camera coordinate system. Finally, the 3D coordinates of the same feature point are fitted with a straight line, and the straight line's direction vector is the scanning direction. Because of the different sharpness of the target images captured at different positions, the corresponding camera extrinsic parameters contain different noises for each image separately, introducing noise several times when calculating the 3D coordinates of feature points and then reducing the calibration accuracy.

Methods First, the study analyzed and verified the disadvantages of the traditional calibration method, which introduces noise several times. In the verification experiment, the target was only translated by the high-precision stage; the orientation of the plane target relative to the camera remained unchanged, and the translation distance of the target was measured using the laser interferometer as the reference value. The ideal rotation matrix for each capture position should be identical to the initial capture position. However, the experimental results show that the rotation matrices estimated by the traditional methods are different (Fig. 3), and the estimated value of the target translation differs significantly from the reference value (Fig. 4). This proves that the traditional method introduces noise several times, decreasing the accuracy of the scanning-direction calibration. To reduce noise caused by different image sharpnesses, a scanning direction calibration method based on joint estimation was proposed. The scanning direction vector was added to the camera imaging model, and in the calibration process, the translation stage was used to move the plane target at a fixed distance. Therefore, the rotation matrix of the target relative to the camera coordinate system at each capture position remains unchanged, and the change in the translation vector is constrained by the translation stage's movement distance. By adding constraints on the rotation matrix and translational vector, the 2D feature points on the plane target are expanded to 3D feature

points, which are all combined for one homography estimation, and the noise caused by different image sharpnesses is reduced.

Results and Discussions To verify the proposed calibration method, the two methods were used for repeated calibration, and the repeatability of the two method's results was compared to verify the calibration algorithm's precision. Ten repeated experiments showed that the direction vectors based on the joint estimation had a smaller standard deviation and higher precision. Following calibration, the size of the measuring block was measured to verify the algorithm's accuracy. The size of the gauge block was 25 mm, measurement error of the traditional method was $32.7 \mu\text{m}$, and measurement error of the method proposed in this study was $25.2 \mu\text{m}$ (Fig. 8). To verify the stability of the calibration method, a total of ten repeated calibrations were performed, and the results of the ten repeated calibrations were used to measure the size of the gauge blocks. The average measurement error of the proposed method is $25.0 \mu\text{m}$, while the average measurement error of the traditional method is $35.7 \mu\text{m}$. Compared with the traditional method, the measurement error of this method was reduced by an average of 30% (Fig. 9). According to the experimental results, the proposed calibration method has a higher scanning direction calibration accuracy and good robustness.

Conclusions To improve the 3D reconstruction accuracy of line-structured light 3D sensors, this study first analyzes and verifies the shortcomings of the traditional scanning direction calibration method, which introduces noise several times, and then proposes a scanning direction calibration method based on joint estimation. The 2D feature points on the plane target are expanded to 3D feature points by adding constraints to the rotation matrix and translation vector, which realizes one joint homography estimation for all the calibration images and improves the calibration accuracy of the scanning direction. The experimental results show that this method improves the scanning direction calibration accuracy and reduces the sensor's 3D reconstruction error.

Key words machine vision; scanning direction calibration; joint homography estimation; noise analysis; line-structured light sensor