

基于空间约束的非重叠视场相机精确标定方法

马玛双*, 杨小冈, 李传祥, 齐乃新, 宋平

火箭军工程大学导弹工程学院, 陕西 西安 710025

摘要 针对现有的非重叠视场多相机系统标定方法复杂的问题,提出了一种基于空间约束的非重叠视场相机精确标定方法。将多个小靶标分布在各自相机的视场中,拼接成大的标定平面,采用大视场相机对固连靶标进行平面测量,求得标定板之间的位置关系,作为相机之间的关联参数;通过非重叠视场相机分别获取视场区域中的小靶标,依据空间约束条件,构建相机之间的重投影误差函数,采用 Levenberg-Marquardt 算法进行非线性优化,获取优化后的非重叠视场相机之间的转换矩阵。实验结果表明,所提出的全局标定方法在 X 轴和 Y 轴方向上的重投影误差分别为 0.33 mm 和 0.57 mm,具有较高的精度和稳定性,可以实现非重叠视场相机的精确标定。

关键词 机器视觉; 非重叠视场; 靶标拼接; 空间约束; 非线性优化; 精确标定

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1015003

Accurate Calibration Method for Non-Overlapping Fields of Cameras Based on Spatial Constraints

Ma Mashuang*, Yang Xiaogang, Li Chuanxiang, Qi Naixin, Song Ping

Department of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract Aiming at the problem of the complexity of the existing global calibration method for multi-camera system with non-overlapping fields, an accurate calibration method with non-overlapping fields of view (FOV) cameras based on spatial constraints is proposed. Firstly, spliced small targets distributed in the field of respective camera are fixed together to make up a large calibration planar. A large-field camera is used to measure the spliced small targets, and the obtained relationship between the calibration plates is used as the correlated parameter between cameras. Then, small targets in the fields of view are obtained by non-overlapping FOV cameras, the reprojection error functions of cameras can be obtained based on spatial constraints, and the transformation matrix between non-overlapping FOV cameras is nonlinearly optimized by the Levenberg-Marquardt algorithm. The experimental results show that the reprojection errors of the global calibration method are 0.33 mm and 0.57 mm for the X-axes and Y-axes, respectively. It achieves global calibration of non-overlapping FOV cameras with high precision and stability.

Key words machine vision; non-overlapping fields of view; spliced targets; spatial constraint; nonlinear optimization; accurate calibration

OCIS codes 150.1135; 150.1488; 150.0155

1 引 言

随着工业技术的迅速发展,视觉测量系统以其非接触、易获取、高灵活性和高精度等特性,受到了广泛的应用。在大范围的标定系统中,因单目大视场测量装置的覆盖区域有限,多相机视觉系统正受到越来越多的关注。

在多相机系统的应用过程中,全局标定一直以

来都是研究的热点。目前,多相机系统全局标定的方法和原理可以分为以下几类^[1]:

1) 基于大型测量装置法。为了获取相机之间的精确坐标,常需采用经纬仪、激光跟踪仪和激光测距仪等高精度的测量设备。如文献[2]采用激光跟踪仪,直接测量图像坐标系中像素点在参考坐标系的三维坐标,获取所有相机在参考坐标系的相对位置,并将其统一转换到参考的世界坐标系中,从而实

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61773389,61806209)

* E-mail: mamas008@163.com

现全局标定。该方法的测量精度高,但是标定过程复杂,需要借助高精度的大型测量设备,在较小的场景中无法应用。

2) 基于反射镜法。该方法利用光学镜面的反射,克服了多相机系统必须看到相同标志物的限制。如文献[3]使用平面标定板和反射镜,求解相机之间的转换关系。文献[4]利用已知半径的球面镜,通过已知三维参考点的投影,同时求解出球面镜的位置和相机的外部参数。但是,随着相机之间距离增大,该方法图像中的参考标志物会减小,致使标定结果精度明显下降,而且在实际的应用中难以保证相机通过镜面可以直接或者间接地观测到标志物。

3) 基于运动模型法。该方法通过跟踪不同相机视场中的物体,建立不同相机之间的变换矩阵。如文献[5]将标定板安装在移动机器人上,利用机器人的精确运动和非重叠视场相机观测到的图像序列,来弥补相机之间的无重叠区域,从而实现多相机的标定。该方法成本低,灵活方便,但是标定结果的精度较低,通常用于大型的网络监控系统中。

4) 基于激光投影法。如文献[6-7]将激光指示器投射到空中,使激光穿过需要标定的多相机视场区域,根据共线或者共面约束,计算相机的外部参数。虽然激光投影的距离较远,但是其线性误差会影响标定的精度。此外,当标定的距离较大时,激光的平直度难以保持。

5) 基于大尺度标定物法。因为大尺度标定物难于制作,所以通常采用一维标志物或者二维靶标进行拼接的方法。如文献[8-9]采用一维靶标进行全局标定,但是需要利用参考相机和其他相机构建双目视觉系统,因此并不适用于非重叠的多相机系

统。文献[10]提出了一种基于可重构大平面标定物的非重叠视场相机全局标定方法,该方法需要构建一个大的平面标定物,在标定的过程中,每个相机分别获取小靶标中的局部特征信息,根据靶标间相对位置的不变性,通过获取靶标在不同位置的特征信息,求解相机之间的变换矩阵。该方法无需高精度的测量装置,但是在求解中需要获取标定物多个视场的图像信息,标定结果不稳定。

针对以上方法标定装置复杂、标定结果不稳定的问题,本文提出一种基于空间约束的非重叠视场相机精确标定方法。为了降低文献[10]中同时估计相机间优化矩阵和靶标之间转换矩阵的复杂计算,提高参数估计的稳定性,引入摄影测量法和空间约束关系求解转换矩阵。首先,将刚性连接的小靶标放置在大尺寸标定物中,构建一个大尺寸的标定靶标,基于摄影测量法获取小靶标之间的转换矩阵,以减少固连靶标间转换矩阵带来的误差;然后,根据多相机系统的空间约束条件,构建非重叠视场相机的优化函数,采用非线性优化方法求解相机之间的转换矩阵,以提高非重叠多相机系统测量结果的精度,从而实现全局的精确标定。

2 非重叠视场标定平面拼接

2.1 固定靶标间的转换

如图1所示,将两个小靶标固连在导轨上,调整标定靶标的间距,确保小靶标均在各自相机的视场范围内。然后,利用大视场相机获取整个固连靶标的图像信息,检测图像中小靶标的角点特征,重构小靶标的空间结构^[11],获取相机与小靶标之间的转换矩阵,并以相机坐标系为中介,获得小靶标之间的转换矩阵 $T_{12,t1}$ 。

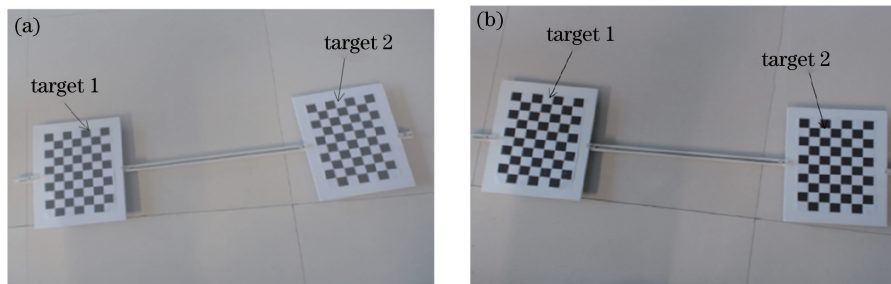


图1 固连小靶标转换矩阵求解。(a)位置1;(b)位置2

Fig. 1 Solution of transformation matrix between two small targets. (a) Position 1; (b) position 2

根据摄影测量法^[12-14],将固连的小靶标放置在标定平面 π_t 的不同位置以获取图像,保证相机视场能够覆盖整个固连的靶标。在每一个位置分别以左

上角的角点特征为原点,构建小靶标的坐标系,记第 k_1 个靶标到相机的坐标系为 $O_t^{(k_1)} x_t^{(k_1)} y_t^{(k_1)} z_t^{(k_1)}$,其中, $z_t^{(k_1)}$ 轴与固连靶标的标定平面 π_t 垂直。空

间中任意一点 P , 在图像坐标系中的齐次坐标为 $P_m^{(k_1, j)}(u, v, 1)$, u, v 分别为像素坐标系中 X 轴和 Y 轴的坐标, j 表示第 j 个特征点; 在相机坐标系的齐次坐标为 $P_c^{(k_1, j)}(x_c, y_c, 0, 1)$, x_c, y_c 分别为相机坐标系中 X 轴和 Y 轴的坐标; 在靶标平面坐标系中的齐次坐标为 $P_t^{(k_1, j)}(x_t, y_t, 0, 1)$, x_t, y_t 分别为靶标平面坐标系中 X 轴和 Y 轴的坐标。根据相机的成像模型^[15], 可得

$$\lambda P_m^{(k_1, j)} = K P_c^{(k_1, j)} = K [R_t^{(k_1)} \quad t_t^{(k_1)}] P_t^{(k_1, j)}, \quad (1)$$

$$H^{(k_1)} = K [R_t^{(k_1)} \quad t_t^{(k_1)}], \quad (2)$$

式中: λ 为尺度因子; K 为相机的内部参数矩阵; $H^{(k_1)}$ 为第 k_1 个靶标平面到图像平面的单应矩阵; $R_t^{(k_1)}$ 和 $t_t^{(k_1)}$ 为相机的外部参数, 分别为第 k_1 个靶标坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移向量。

根据 PnP 原理, 求解每一个靶标到图像平面的单应矩阵 $H^{(k_1, j)}$ 。在相机内参已知的情况下, 利用(2)式可以计算出每一个小靶标坐标系到相机坐标系之间的旋转矩阵 $R_t^{(k_1)}$ 和平移向量 $t_t^{(k_1)}$ 。为了方便构建靶标之间的关系, 令标定平面的世界坐标系 $O_b x_b y_b z_b$ 与靶标 1 的坐标系重合, 则世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 $R_b = R_t^{(1)}$, 平移向量 $t_b = t_t^{(1)}$ 。以相机坐标系为中介, 可以得到第 k_1 个靶标坐标系到世界坐标系的旋转矩阵和平移向量:

$$\begin{cases} R_{tb}^{(k_1)} = (R_t^{(1)})^{-1} R_t^{(k_1)} \\ t_{tb}^{(k_1)} = (R_t^{(1)})^{-1} (t_t^{(k_1)} - t_t^{(1)}) \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式可以构建多个靶标之间的转换矩阵。在此, 靶标数量 $k_t = 2$, 靶标 2 到靶标 1 的转换矩阵记为 $T_{t2, t1} = [R_{tb}^{(2)} \quad t_{tb}^{(2)}]$ 。

2.2 多相机间的全局标定

在标定靶标间转换矩阵的基础上, 调整固连小靶标的位置, 使小靶标分别位于各自相机的视场中^[16], 如图 2 所示。令相机 1 和相机 2 分别采集靶标 1 和靶标 2 的图像, 进行全局标定, 确定相机之间的位置关系。

在多相机间标定的过程中, 相机 1 和相机 2 的坐标系分别为 $O_{c1} x_{c1} y_{c1} z_{c1}$ 和 $O_{c2} x_{c2} y_{c2} z_{c2}$, 与之对应的图像坐标系分别为 $O_1 x_1 y_1$ 和 $O_2 x_2 y_2$, 靶标 1 到相机 1 的转换矩阵为 $T_{t1, c1}$, 靶标 2 到相机 2 的转换矩阵为 $T_{t2, c2}$, 靶标 2 到靶标 1 的转换矩阵为 $T_{t2, t1}$, 相机 2 到相机 1 的转换矩阵为 $T_{c2, c1}$ 。以相机 1 的坐标系 $O_{c1} x_{c1} y_{c1} z_{c1}$ 作为参考的世界坐标系, 则靶标 2 上的点 P^2 在靶标 2 坐标系中的齐次坐标为 P_{t2}^2 , 在靶标 1 坐标中的齐次坐标为 P_{t1}^2 , 在相机 1 坐标系中的齐次坐标为 P_{c1}^2 , 在相机 2 坐标系中的齐次

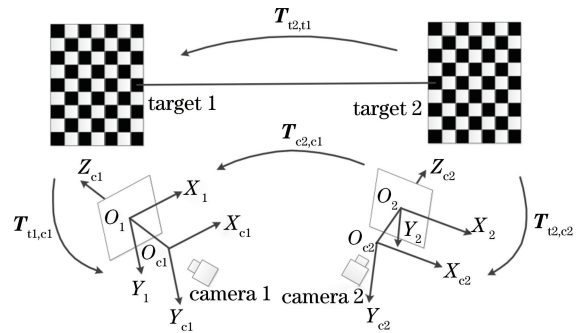


图 2 非重叠视场相机全局标定示意图

Fig. 2 Diagram of global calibration for non-overlapping FOV cameras

坐标为 P_{c2}^2 , 对应的转换关系可以表示为

$$\begin{cases} P_{t1}^2 = T_{t2, t1} P_{t2}^2 \\ P_{c1}^2 = T_{t1, c1} P_{t1}^2 \\ P_{c2}^2 = T_{t2, c2} P_{t2}^2 \\ P_{c1}^2 = T_{c2, c1} P_{c2}^2 \end{cases} \quad (4)$$

根据靶标以及相机之间位置关系不变的性质, 由(3)式和(4)式可求得非重叠视场相机间的转换矩阵, 即

$$T_{c2, c1} = T_{t1, c1} T_{t2, t1} T_{t2, c2}^{-1}, \quad (5)$$

式中: $T_{t2, t1}$ 为通过摄影测量法求得的固连靶标之间的转换矩阵。

3 基于空间约束的多相机标定优化方法

3.1 多相机的空间约束条件

通过分析非重叠多相机全局标定方法可知, 在理论上, 通过一次标定即可获得非重叠视场相机的转化矩阵, 但是由于存在畸变误差和噪声干扰等, 标定结果并不理想, 重投影误差较大^[17-18]。约束条件主要包括以下几个方面。

1) 子靶标间平移分量 $t_{t2, t1}^z$ 的约束

根据靶标 1 和靶标 2 的共面特性, 将(3)式改写成成分量的形式:

$$R_{t1, t2} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$t_{t1, t2} = [t_1 \quad t_2 \quad t_3]^T. \quad (7)$$

由于所有靶标在同一标定平面上, 靶标之间仅在 $Ox_1 y_1$ 平面间存在旋转和平移量, 理论上其 z 轴方向的变换量 $|t_{t2, t1}^z| = 0$, 即

$$\tilde{R}_{t1, t2} = \begin{bmatrix} \cos \theta^{(k_1)} & -\sin \theta^{(k_1)} & 0 \\ \sin \theta^{(k_1)} & \cos \theta^{(k_1)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{t}}_{t_1, t_2} = [\mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2 \quad 0]^T, \quad (9)$$

式中: $\theta^{(k_1)}$ 为靶标 2 到靶标 1 在 $Ox_t y_t$ 上的旋转角。

但是,在实际标定靶标间的位置关系时,考虑到相机的分辨率、畸变、成像角,以及标定平面非共面带来的误差,实际计算求解中 $|\mathbf{t}_{t_2, t_1}^z| \neq 0$ 。为了降低 z 轴分量对标定结果的影响,在不同位置 k_2 获取靶标图像,得到靶标之间的转换矩阵 $\mathbf{T}_{t_2, t_1}(k_2)$ 。取平移分量在 z 轴偏差 $t_{t_2, t_1}^z(k_2)$ 最小时的 $\mathbf{t}_{t_2, t_1}(k_2)$ 作为靶标间的转换矩阵:

$$\mathbf{T}_{t_2, t_1} = \mathbf{T}_{t_2, t_1}(k_2), k_2 = \operatorname{argmin}[t_{t_2, t_1}^z(k_2)]. \quad (10)$$

2) 相机和靶标之间的位置约束

$$\begin{cases} (\mathbf{R}_{c_2, c_1})_{[m-n]} = (\mathbf{R}_{t_1, c_2} \mathbf{R}_{t_1, c_1}^{-1})_{[m-n]} = 0 \\ (\mathbf{t}_{c_2, c_1})_{[m-n]} = \left[\frac{\mathbf{t}_{t_1, c_2} - \mathbf{R}_{t_1, c_2} \mathbf{R}_{t_1, c_1}^{-1} \mathbf{t}_{t_1, c_1}}{\|\mathbf{t}_{t_1, c_2} - \mathbf{R}_{t_1, c_2} \mathbf{R}_{t_1, c_1}^{-1} \mathbf{t}_{t_1, c_1}\|} \right]_{[m-n]} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

式中: m 和 n 分别为任意两个不同位置, $[m-n]$ 为根据图像特征点求得的相机 1 到相机 2 的外参差异,归一化是为了便于计算。

3) 多相机间的重投影误差约束

不同相机在相同位置时的重投影误差不同。在不考虑镜头畸变时,径向一致性约束条件表示为

$$\begin{bmatrix} X_{ti} Y_{di} & Y_{ti} Y_{di} & Z_{ti} Y_{di} & Y_{di} & -X_{ti} X_{di} \\ & -Y_{ti} X_{di} & -Z_{ti} X_{di} & & \\ s_x r_1 / T_y & s_x r_2 / T_y & s_x r_3 / T_y & s_x T_x / T_y \\ & r_4 / T_y & r_5 / T_y & r_6 / T_y \end{bmatrix}^T = X_{di}, \quad (13)$$

式中: (X_{ti}, Y_{ti}, Z_{ti}) 为特征点在世界坐标系中的三

相机间的转换矩阵 \mathbf{R}_{c_2, c_1} 和平移向量 \mathbf{t}_{c_2, c_1} 为待优化的固定值。根据实时解算的矩阵 \mathbf{R}_{c_2, c_1} 和 \mathbf{t}_{c_2, c_1} , 在不同位置时刻,相机 2 到相机 1 的变换矩阵的位置关系为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{t_1, c_2} = \mathbf{R}_{c_2, c_1} \mathbf{R}_{t_1, c_1} \\ \mathbf{t}_{t_1, c_2} = \mathbf{R}_{c_2, c_1} \mathbf{t}_{t_1, c_1} + \mathbf{t}_{c_2, c_1} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{R}_{t_1, c_2} 为靶标 1 到相机 2 的旋转矩阵; \mathbf{R}_{t_1, c_1} 为靶标 1 到相机 1 的旋转矩阵; \mathbf{t}_{t_1, c_2} 为靶标 1 到相机 2 的旋转矩阵; \mathbf{t}_{t_1, c_1} 为靶标 1 到相机 1 的平移向量; \mathbf{t}_{c_2, c_1} 为靶标 2 到靶标 1 的平移向量。

位置约束条件为

维坐标; (X_{di}, Y_{di}, Z_{di}) 为特征点在图像坐标系中的三维坐标;世界坐标系到图像坐标系的旋转矩阵

$$\mathbf{R}_{td} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \text{ 平移量 } \mathbf{T}_{td} = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T;$$

s_x 为尺度因子。 $s_x r_1 / T_y, s_x r_2 / T_y, s_x r_3 / T_y, s_x T_x / T_y, r_4 / T_y, r_5 / T_y, r_6 / T_y$ 可以通过最小二乘法得到, $s_x, r_1, r_2, \dots, r_9, T_x, T_y, T_z$ 可以通过旋转矩阵的正交性得到。

靶标上的坐标点可以表示为

$$\begin{cases} X_{ti} = \frac{-fr_5 T_x + fr_2 T_y + y_{ui} T_z r_2 - y_{ui} T_z r_2 + r_5 y_{ui} T_z - T_y y_{ui} r_8}{-x_{ui} r_7 r_5 - r_1 y_{ui} r_8 + r_1 f r_5 + x_{ui} r_8 r_4 + r_2 y_{ui} r_7 - r_2 f r_4} \\ Y_{ti} = \frac{-x_{ui} r_7 T_x - r_1 y_{ui} T_z + r_1 f T_y + x_{ui} T_z r_4 + T_x y_{ui} r_7 - T_x f r_4}{-x_{ui} r_7 r_5 - r_1 y_{ui} r_8 + r_1 f r_5 + x_{ui} r_8 r_4 + r_2 y_{ui} r_7 - r_2 f r_4} \\ Z_{ti} = 0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: f 为相机焦距; (x_{ui}, y_{ui}) 为特征点的像素点坐标。从(14)式可以看出,靶标的坐标点与相机本身的焦距及畸变参数有关。同一目标点,经过多相机坐标系的转换后,其坐标的重投影误差不同。

因此,为了最小化重投影目标函数,需要将相机间转换的因素考虑在内。令靶标在位置 i 时,特征点 j 在靶标 1 和靶标 2 上的坐标分别为 $\mathbf{P}_{i,j}^1$ 和 $\mathbf{P}_{i,j}^2$ ($\mathbf{P}_{i,j}^1$ 为点 $\mathbf{P}_{i,j}^1$ 在靶标 1 坐标系中的齐次坐标, $\mathbf{P}_{i,j}^2$ 为点 $\mathbf{P}_{i,j}^2$ 在靶标 2 坐标系中的齐次坐标), $\tilde{\mathbf{P}}_{m_1, i, j}^1$ 和 $\tilde{\mathbf{P}}_{m_2, i, j}^2$ 分别为特征点 $\mathbf{P}_{i,j}^1$ 在无畸变图像中

重投影图像的齐次坐标。根据透视投影模型可得

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{P}}_{m_1, i, j}^1 = \mathbf{K}_1 (\mathbf{I} \quad 0) \mathbf{T}_{c_2, c_1} \mathbf{T}_{t_2, c_2}^{-1} \mathbf{T}_{t_2, t_1} \mathbf{P}_{i, j}^1 \\ \tilde{\mathbf{P}}_{m_2, i, j}^2 = \mathbf{K}_2 (\mathbf{I} \quad 0) \mathbf{T}_{c_2, c_1}^{-1} \mathbf{T}_{t_1, c_1} \mathbf{T}_{t_2, t_1} \mathbf{P}_{i, j}^2 \end{cases}, \quad (15)$$

式中: \mathbf{I} 为 3×3 的单位阵; \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 分别相机 1 和相机 2 的内部参数矩阵。

在多相机系统中,靶标间的重投影误差可以表示为

$$J = \sum_{j=1}^{n_1} \|\mathbf{P}_{i, j}^1 - \tilde{\mathbf{P}}_{m_1, i, j}^1\| + \sum_{j=1}^{n_2} \|\mathbf{P}_{i, j}^2 - \tilde{\mathbf{P}}_{m_2, i, j}^2\|, \quad (16)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为靶标中的特征点数量。

3.2 非线性优化函数构建

结合(10)、(12)、(16)式建立的约束条件,采用非线性优化的方法,通过非重叠视场相机同时采集

不同位置 k 时的靶标图像,优化相机之间的转换矩阵。依据最大似然准则,构建所有靶标特征点与重投影点之间误差最小的目标优化函数,求解 \mathbf{T}_{t_2,t_1} 和 \mathbf{T}_{c_2,c_1} 的最优解,即

$$F_2 = \min[J(k_3)] = \min\left(\sum_{i=1}^{k_3} \sum_{j=1}^{n_1} \|\mathbf{P}_{m_1,i,j}^{t_1} - \tilde{\mathbf{P}}_{m_1,i,j}^{t_1}\| + \sum_{i=1}^{k_3} \sum_{j=1}^{n_2} \|\mathbf{P}_{m_2,i,j}^{t_2} - \tilde{\mathbf{P}}_{m_2,i,j}^{t_2}\|\right)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{T}_{t_2,t_1} = \mathbf{T}_{t_2,t_1}(k_2), k_2 = \operatorname{argmin}[\mathbf{t}_{t_2,t_1}^*(k_2)] \\ (\mathbf{R}_{c_1,c_2})_{[m-n]} = 0 \\ (\mathbf{t}_{c_1,c_2})_{[m-n]} = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

式中: k_2 为靶标在不同位置拍摄的靶标图像次数; k_3 为最小化重投影的次数; n_1 和 n_2 分别为靶标中特征点的数量。利用 Levenberg-Marquardt 算法,对相机之间转换矩阵的 12 个参数进行优化,求解优化后非重叠相机之间的转换矩阵 \mathbf{T}_{c_2,c_1} 。

3.3 全局标定步骤

在相机 1 和相机 2 内部参数已知的条件下,对非重叠视场的多相机进行外参标定。算法流程图如图 3 所示,具体的标定步骤如下。

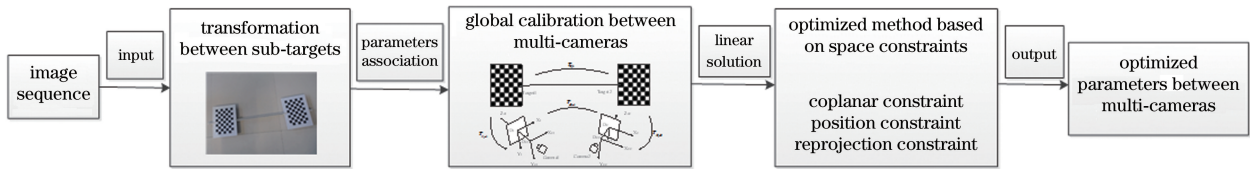


图 3 本文算法流程图

Fig. 3 Flowchart of proposed algorithm

1) 将两个子靶标固连,确保靶标分别放置于两个相机的视场中,再通过大视场相机获取不同位置时固连靶标的图像序列。根据 PnP 原理,可以求解小靶标到大视场相机的转换矩阵 $\mathbf{T}_{t_1,c}$ 和 $\mathbf{T}_{t_2,c}$ 。以相机坐标系为中介,根据(3)式,通过摄影测量法获取子靶标之间的转换矩阵 \mathbf{T}_{t_2,t_1} ,作为求解多相机系统间转换矩阵的参数关联条件。

2) 对于非重叠视场的多相机系统,令相机 1 和相机 2 分别采集视场中的子靶标 1 和子靶标 2 的图像,提取图像中的角点特征,得到靶标 1 到相机 1 的转换矩阵 \mathbf{T}_{t_1,c_1} 和靶标 2 到相机 2 的转换矩阵 \mathbf{T}_{t_2,c_2} ,并结合步骤 1) 中得到的参数关联条件 \mathbf{T}_{t_2,t_1} ,根据(5)式得到多相机间转换矩阵的线性解 \mathbf{T}_{c_2,c_1} 。

3) 结合多相机标定的空间约束条件,构建重投影目标优化函数,根据(18)式并依据最小化准则获得子靶标之间优化的转换矩阵 \mathbf{T}'_{t_2,t_1} 。通过 levmar 非线性优化函数库,采用 Levenberg-Marquardt 算法对相机间转换矩阵的参数进行非线性优化,获取相机之间转换矩阵参数的最优解 \mathbf{T}'_{c_2,c_1} 。

4 分析与讨论

为了验证所提方法对非重叠视场相机全局标定的效果,构建实验系统,如图 4 所示。采用的相机像素为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,相机采用万向支架进行固定,相机与地面间的高度约为 700 mm,两相机的物理尺寸分别为 1.06 mm 和 0.92 mm。将固连靶标放置于地面,子靶标间的距离约为 700 mm,靶标的大小为 $29 \text{ mm} \times 29 \text{ mm}$,特征点个数为 54。

固定靶标之间的位置,将固连靶标放置于高清相机的中心,以获取整个靶标的图像,求解得到靶标之间的转换矩阵。在对相机进行非线性优化时,利用相机之间的线性解作为 Levenberg-Marquardt 算法的初始值。通过改变靶标位置,构建靶标之间特征点与重投影点的误差函数并进行优化,得到相机之间优化的转换矩阵,即

$$\mathbf{T}_{t_2,t_1} = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0.0164 & -0.0014 & 675.4843 \\ 0.0164 & 0.9997 & -0.0166 & -6.02887 \\ 0.0016 & 0.0166 & 0.9999 & 0.3401 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

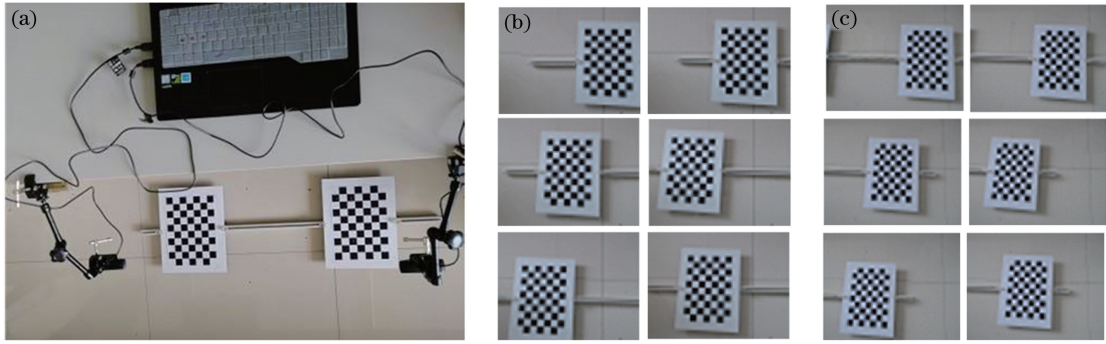


图 4 实验装置。(a)测量系统;(b)相机 1 获取的图像;(c)相机 2 获取的图像

Fig. 4 Experimental setup. (a) Measure system; (b) images captured by camera 1; (c) images captured by camera 2

$$\mathbf{T}_{e2,c1} = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0013 & -0.0004 & 667.1992 \\ 0.0013 & 1.0000 & -0.0071 & 27.8614 \\ 0.0004 & 0.0071 & 1.0000 & -5.1258 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}'_{e2,c1} = \begin{bmatrix} 0.9813 & 0.0022 & -0.0224 & 667.1921 \\ -0.0088 & 0.98886 & -0.0154 & 27.8614 \\ 0.0195 & 0.0188 & 0.9944 & -5.1245 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

4.1 数据分析验证

1) 精度分析.

为了对非重叠视场相机的全局标定结果进行定量评价,移动固连拼接的靶标,保证靶标在各自相机的视场范围内,获取 17 个不同位置下的实验数据。通过构建图像重投影点与去除畸变点在 X 轴和 Y 轴方向上的绝对误差,对去除畸变的图像特征点进行重投影,用于评价相机之间优化求解的转换矩阵。靶标重投影的特征点为 k_4 , 每个靶标特征点的总数 $N_t = 54$, 图像中去除畸变的特征点坐标为 $p_{\text{udist}} [p_{\text{udist}}^x(k_4) \ p_{\text{udist}}^y(k_4)]$, 其中, $p_{\text{udist}}^x(k_4)$ 为去畸变的 X 轴坐标, $p_{\text{udist}}^y(k_4)$ 去畸变的 Y 轴坐标; 重投影的

坐标点为 $p_{\text{proj}} [p_{\text{proj}}^x(k_4), p_{\text{proj}}^y(k_4)]$, 其中, $p_{\text{proj}}^x(k_4)$ 为重投影的 X 轴坐标, $p_{\text{proj}}^y(k_4)$ 为重投影的 Y 轴坐标。定义靶标之间的重投影测量误差为

$$\begin{cases} e_x = \frac{\sum_{k_4=1}^{N_t} |p_{\text{proj}}^x(k_4) - p_{\text{udist}}^x(k_4)|}{N_t} \\ e_y = \frac{\sum_{k_4=1}^{N_t} |p_{\text{proj}}^y(k_4) - p_{\text{udist}}^y(k_4)|}{N_t} \end{cases}. \quad (18)$$

图 5 所示为靶标在 17 个不同位置, 分别采用基本准则、文献[10]的算法和本文算法获得重投影测量误差曲线。误差统计结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 以基本准则求解的线性解容易受到相机的倾斜角和靶标的位置影响, 当固连靶标处于不同的位置时, 其在 X 轴和 Y 轴方向的重投影误差变化较大, 分别为 1.49 mm 和 2.59 mm; 采用文献[10]的方法, 利用靶标间位置和角度约束求解的重投影误差在 X 轴和 Y 轴方向分别为 0.71 mm 和 0.91 mm, 但求解的精度不够稳定; 而采用本文提出的非线性优化方法求解的重投影误差曲线较为稳

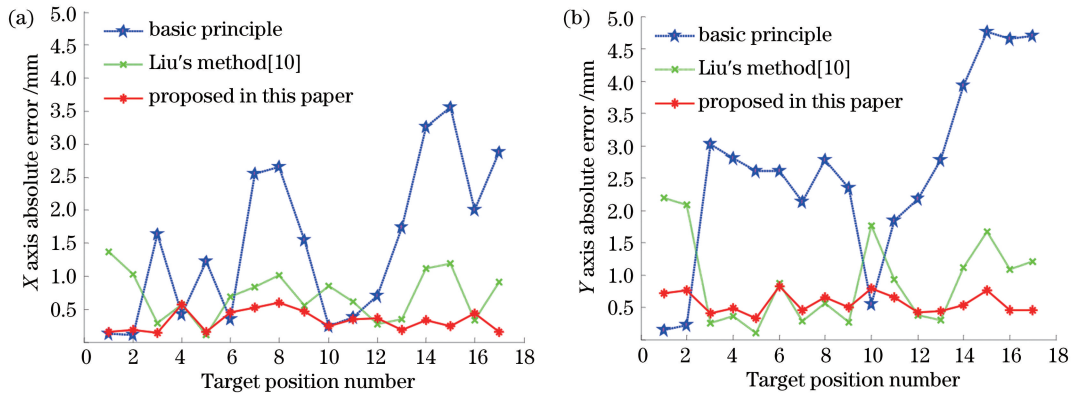


图 5 不同位置靶标间的测量误差。(a) X 轴方向;(b) Y 轴方向

Fig. 5 Measurement errors of different positions between two targets. (a) X axis; (b) Y axis

表 1 非重叠视场相机间的重投影误差

Table 1 Reprojection errors for non-overlapping FOV cameras

Reprojection error	Basic principle /mm	Method in Ref. [10] /mm	Proposed method /mm
Max error	(3.27,3.94)	(1.37,2.19)	(0.59,0.66)
Min error	(0.11,0.14)	(0.11,0.10)	(0.16,0.34)
Mean error	(1.49,2.59)	(0.71,0.91)	(0.33,0.57)

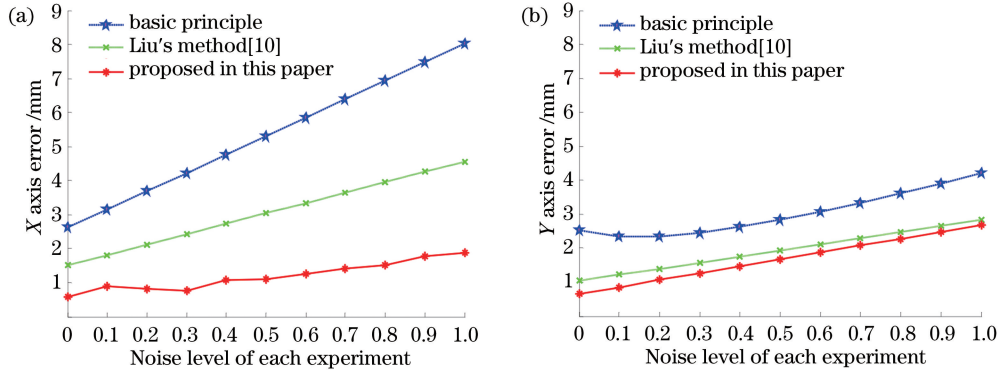


图 6 不同噪声干扰条件下的测量误差。(a) X 轴方向;(b) Y 轴方向

Fig. 6 Measurement error under different Gauss white noise. (a) X axis; (b) Y axis

定,不易受到靶标位置等因素的影响,其全局标定结果在 X、Y 轴方向的平均误差分别为 0.33 mm 和 0.57 mm。上述结果验证了本文方法的有效性和精确性。

2) 稳定性分析

在实验过程加入高斯白噪声 $G(u, \sigma)$ 对方法的稳定性进行分析,其中, u 为噪声均值, σ 为噪声方差。当 $u=0$ 时,对图像中的特征点加入 $\sigma \in [0, 1]$ 的高斯白噪声,通过采用非重叠视场相机标定方法,获得特征点的重投影坐标,测量其与不加噪声干扰的特征点在 X 轴和 Y 轴方向上的重投影误差 e_x 和 e_y 。从图 6 可以看出,随着 σ 值的增大,3 种算法求解的投影误差在 X 轴和 Y 轴方向均有所增加。采用基本准则求解的线性解在 X 轴和 Y 轴方向的平

均重投影误差分别为 5.31 mm 和 3.03 mm,在强噪声干扰的条件下偏差较大;采用文献[10]中算法得到的 X 轴和 Y 轴方向上的偏差分别为 3.04 mm 和 1.94 mm;而采用本文方法的非线性优化求解得到的 X 轴和 Y 轴方向上的平均重投影误差分别为 1.19 mm 和 1.67 mm,结果较为稳定,具有较好的抗干扰能力。

4.2 实际应用

在移动机器人平台上,其多相机视觉系统存在非重叠视场的问题。开展非重叠视场的相机标定实验,主要目的是利用移动机器人平台确定标志物的相对位置关系。如图 7(a)所示,采用 TurtleBot 移动机器人平台进行测试,将两个相机分别固定在移动机器人平台的左侧和后侧,采用固连的小靶标进

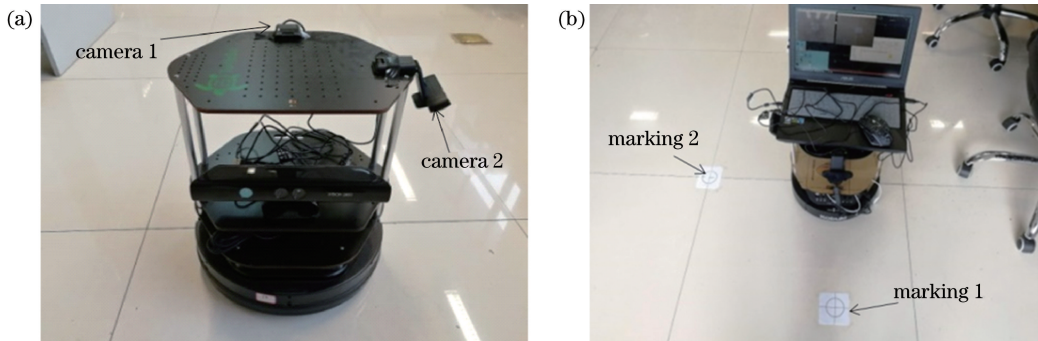


图 7 移动机器人非重叠视场的多相机全局标定。(a) TurtleBot 移动机器人;(b)全局标定平台

Fig. 7 Global calibration for non-overlapping FOV cameras by using mobile robot platform.

(a) TurtleBot mobile robot; (b) global calibration platform

行非重叠视场相机的全局标定。如图 7(b)所示,通过移动机器人在已知场景中运动,以 TurtleBot 移动机器人后方相机 1 拍摄的标志物 1 为参考点,通过非重叠相机之间的转换矩阵,将标志物 1 和标志物 2 的位置信息进行关联,确定两个圆形标志物的相对位置。

为了定量评价算法的性能,以两个标志物的圆心距离作为评价标准。图 8 所示为两标志物相对距离的视觉测量偏差结果。从实验结果看,基于基本准则方法的平均误差为 5.45 mm,采用文献[10]算法的平均误差为 5.03 mm,而本文方法的平均误差为 4.59 mm,具有较好的视觉测量结果。但是,本文方法的部分结果偏差较大。分析发现,这部分场景下的标志物分布在图像边缘,受相机畸变、透视的影响较大。考虑到移动平台稳定性对实验结果的影响,在基于移动平台进行相对位置估计时,平均误差小于 5 mm 的测量偏差均在可接受范围内。

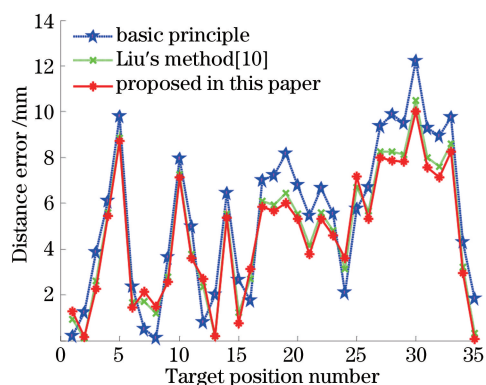


图 8 标志物相对距离的测量误差

Fig. 8 Measurement error of relative distance of markers

5 结 论

提出一种基于空间约束的非重叠视场相机精确标定方法。采用可拼接靶标构建大的标定平面,利用摄影测量法较为方便地获取靶标之间的转化矩阵;同时,针对相机之间的约束条件,构建多相机系统的重投影误差函数,利用非线性优化方法优化相机之间的转换矩阵参数,进而获得标志物的全局方位信息。该方法较为方便地解决了非重叠视场相机的标定问题。从实验结果来看,该方法具有较高的精度和稳定性。

参 考 文 献

[1] Xia R B, Hu M B, Zhao J B, *et al.* Global calibration of non-overlapping cameras: state of the art[J]. *Optik*, 2018, 158: 951-961.

[2] 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]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(4): 679-688.
赵玉华, 袁峰, 丁振良, 等. 大视场多视觉传感器测量系统的全局标定方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(4): 679-688.

[3] Xu Z Y, Wang Y, Yang C. Multi-camera global calibration for large-scale measurement based on plane mirror[J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4149-4154.

[4] Agrawal A. Extrinsic camera calibration without a direct view using spherical mirror[C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, Australia. New York: IEEE, 2013: 2368-2375.

[5] Huang H F, Li N N, Guo H W, *et al.* Calibration of non-overlapping cameras based on a mobile robot[C] // 2015 5th International Conference on Information Science and Technology (ICIST), April 24-26, 2015, Changsha, China. New York: IEEE, 2015: 328-333.

[6] Li S G, Harada T, Zou W H. Estimating relative pose between nonoverlapping cameras by four laser pointers based on general camera model[C] // 2017 4th IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR), November 26-29, 2017, Nanjing, China. New York: IEEE, 2017: 168-172.

[7] Zou W H, Li S G. Calibration of nonoverlapping in-vehicle cameras with laser pointers [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(3): 1348-1359.

[8] de França J A, Stemmer M R, França M B de M, *et al.* A new robust algorithmic for multi-camera calibration with a 1D object under general motions without prior knowledge of any camera intrinsic parameter[J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(10): 3636-3647.

[9] Quan Y M, Qin Z B, Li W S, *et al.* Multi-camera calibration of one-dimensional calibration objects based on normalization algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0415001.
全燕鸣, 覃镇波, 李维诗, 等. 基于归一化算法的一维标定物多相机标定[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0415001.

[10] Liu Z, Zhang G J, Wei Z Z, *et al.* A global calibration method for multiple vision sensors based on multiple targets [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(12): 125102.

[11] Huo J, Yang N, Yang M, *et al.* Calibration of camera with wide field-of-view based on spliced small

- targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1474-1479.
- 霍炬, 杨宁, 杨明, 等. 基于小靶标拼接的大视场摄像机标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1474-1479.
- [12] Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0815002.
- 苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0815002.
- [13] Hu M B, Xia R B, Chen S L, *et al.* Global calibration of non-overlapping field of views cameras based on photogrammetry[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(10): 89-92.
- 胡茂邦, 夏仁波, 陈松林, 等. 基于摄影测量的非重叠视场相机全局标定[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(10): 89-92.
- [14] Xia R B, Hu M B, Zhao J B, *et al.* Global calibration of multi-cameras with non-overlapping fields of view based on photogrammetry and reconfigurable target[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(6): 065005.
- [15] Qi N X, Yang X G, Li X F, *et al.* Visual odometry algorithm based on ORB features and LK optical flow [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 216-227.
- 齐乃新, 杨小冈, 李小峰, 等. 基于 ORB 特征和 LK 光流的视觉里程计算法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 216-227.
- [16] Wu Q H, Chen H, Zhu S S, *et al.* Fast calibration method of large dimension measurement system based on multi-camera array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1215002.
- 吴庆华, 陈慧, 朱思斯, 等. 一种多相机阵列大尺寸测量系统快速标定方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1215002.
- [17] Huo J, Li Y H, Yang M. Multi-camera calibration method based on minimizing the difference of reprojection error vectors [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(4): 844-853.
- [18] Yang D S, Bi S S, Cai Y R, *et al.* Wide-area monocular plane measurement based on calibration on a parallel plane using multiple targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1015001.
- 杨东升, 毕树生, 蔡月日, 等. 基于平行面多靶标标定的单目大视场平面测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1015001.