

DOI: 10.12086/oe.2021.200127

双视角三维测量系统 同时标定方法

赵涵卓, 高楠*, 孟召宗, 张宗华

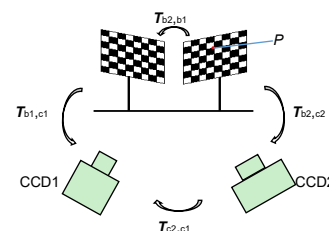
河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

摘要: 针对现有标定方法在相机无公共视场情况下的局限性, 本文提出使用双平面标定板对双相机进行同时标定的方法。通过推导两个相机与两个标定板间的坐标变换, 将待标定相机与参考相机的相对位姿关系的求解转换为较为成熟的手眼标定方程求解。通过实验验证: 该方法可实现双相机的同时标定, 且方法的绝对误差不超过 0.089 mm, 较为可靠; 在双视角三维测量系统中, 与相位-深度的累积误差不超过 0.116 mm, 可为进一步的数据融合提供可靠的初值。此外, 由于本方法灵活方便, 可适用于多视角三维测量系统的同时标定。

关键词: 双视角测量; 全局标定; 系统标定; 条纹投影

中图分类号: TH741

文献标志码: A



赵涵卓, 高楠, 孟召宗, 等. 双视角三维测量系统同时标定方法[J]. 光电工程, 2021, 48(3): 200127

Zhao H Z, Gao N, Meng Z Z, et al. Method of simultaneous calibration of dual view 3D measurement system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(3): 200127

Method of simultaneous calibration of dual view 3D measurement system

Zhao Hanzhuo, Gao Nan*, Meng Zhaozong, Zhang Zonghua

College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

Abstract: In view of the limitations of the existing methods when the camera has no common field of view, this paper proposes a method of using two plane calibration plates to calibrate two cameras at the same time. By deriving the coordinate transformation between the two cameras and two calibration plates, the solution of the relative pose relationship between any camera and the reference camera is transformed into a more mature hand-eye calibration equation. The experimental results show that this method can achieve simultaneous calibration of two cameras, and the absolute error is less than 0.089 mm. In the dual vision 3D measurement system, the cumulative error with phase height is less than 0.116 mm, which can provide a reliable initial value for the next step of data fusion.

Keywords: dual vision measurement; global calibration; system calibration; fringe projection

收稿日期: 2020-04-18; 收到修改稿日期: 2020-09-14

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发重点专项(2017YFF0106404); 国家自然科学基金资助项目(51675160); 河北省应用基础研究计划重点基础研究资助项目(15961701D)

作者简介: 赵涵卓(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学三维测量的研究。E-mail: 972466185@qq.com

通信作者: 高楠(1982-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事光学测量与光谱检测方面的研究。E-mail: ngao@hebut.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

1 引言

条纹投影测量法由于其结构简单、精度和分辨率高、可全场测量等突出的优点^[1],被广泛应用在各个领域,其中单视角的条纹投影系统组成简单,能够快速、方便地测量被测目标物体的三维信息。目前关于单视角系统的研究已有很多^[2-5],双视角系统是单视角系统的延伸,通过扩展相机的视场,获得更大范围的三维几何信息。在双视角三维测量系统中,两相机坐标系之间相互独立,所以需要确定两相机的相对位姿关系并将两相机坐标系统一到一个坐标系下,这一过程被称为全局标定,全局标定是实现双视角及多视角系统标定的关键^[6]。

近些年来,国内外学者提出了许多双相机及多相机全局标定方法。例如,苏显渝等人^[7]利用经纬仪或激光跟踪仪组成空间坐标系测量系统测得各个相机之间的角度及距离关系,求解出多相机之间的转换关系。鲁亚楠等人^[8]提出了通过旋转台带动平面标靶旋转适当角度,即可求解出旋转台旋转角度与待标定相机坐标系之间的非线性关系,得到多相机之间的转换矩阵的方法。Liu Z 等人^[9]使用激光雷达扫描得到组成立体靶标的三个标板之间的位姿关系,然后利用该立体靶标完成三个相机的标定。以上方法简单有效,但是均需借助辅助设备,成本较高。Besl 等人^[10]基于ICP(iterative closest point)算法提出了多视角三维数据的融合方法,该方法及其改进算法后来也成为相机视角中应用最广泛的融合算法。但是,两相机相对位姿关系初值的准确性会直接决定ICP算法的速度和鲁棒性,对于多相机初值的确定有以下几个方法:楚圣辉等人^[11]将一个大大平面标定板置于4个待标定相机的公共视场内,以标定板为中介统一各个相机坐标系到一个坐标系来完成多相机的全局标定,但是该方法只适用于多相机视角方向一致的情况;潘华伟等人^[12]对该类方法进行改进,采用平面标定板依次标定两个相邻相机的内外参数,最后逐个将各相机坐标系转换到一个相机坐标系,该方法虽然可完成无公共视场的多个相机的标定,但是操作复杂且无法实现多相机的同时标定。郎威等人^[13]提出了通过旋转台带动平面标靶旋转适当角度,求解出旋转台旋转角度与待标定相机坐标系之间的转换关系,继而求得多相机之间的相对位姿关系,该方法性能稳定,但只能获取特定视角下三维数据的位置关系。

本文针对现有双视角及多视角三维测量系统中全

局标定方法中存在的局限性,提出了一种利用两块平面标定板实现双视角全局标定的方法:将待标定相机坐标系与参考坐标系的转换矩阵的求解转换为机器人领域中研究较为成熟的手眼标定方程的求解问题。该方法无需额外的辅助设备,操作简单,且可满足大部分测量场景的精度要求。

2 标定原理

2.1 子系统标定原理

单视角相移条纹投影测量系统的数学模型如图1所示。经过一系列公式推导,相位和深度数据之间的关系可用一个多项式对其进行拟合^[14]:

$$\Delta h(u, v) = \sum_{n=0}^N a_n(u, v) \Delta \varphi(u, v)^n, \quad (1)$$

其中: $\Delta h(u, v)$ 为测量位置对于参考位置的相对深度值,系数 $a_0(u, v)$, $a_1(u, v)$, ..., $a_{n-1}(u, v)$, $a_n(u, v)$ 为需要标定的多项式系数, $\Delta \varphi(u, v)$ 为测量位置相对于参考位置的相对相位值。

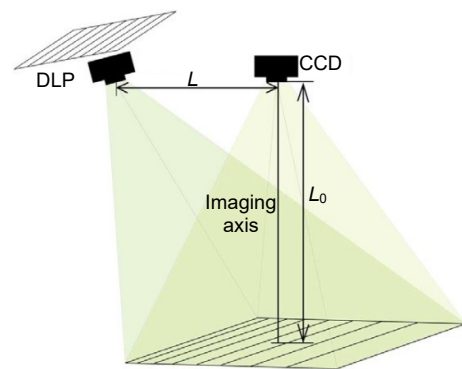


图1 测量系统模型

Fig. 1 Model of measurement system

将相机坐标系和世界坐标系中的点定义为 $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ 和 $(X_w, Y_w, Z_w)^T$, 根据相机标定技术可知坐标系的关系为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由于标定板中所有标识点的 X_w 和 Y_w 是精确已知的, 因此可以通过该标识点找到相机坐标系中所有特征点的位置。将标定板在相机和投影仪的公共市场内任意摆放若干个位置, 并令中间的一个位置为参考面, 则该参考面可描述为

$$AX_c^T + BY_c^T + Z_c^T + C = 0, \quad (3)$$

其中: A 、 B 、 C 为平面方程的参数, $(X_c^T, Y_c^T, Z_c^T)^T$ 为

参考平面上的任意特征点,虽然形成一个平面只需三个点,但用最小二乘法求解平面参数可以提高精度。

一旦平面方程的参数确定,其他任何位置的标定板上的点对应参考面的高度便可表示为

$$\Delta h = \frac{AX_C + BY_C + Z_C + C}{\sqrt{A^2 + B^2 + 1^2}} \quad (4)$$

这样标定板只要在相机和投影仪的公共视场内任意摆放若干个位置便可完成每个视角下相对深度值。相对相位值可通过相移法^[15]及最佳条纹法相结合的方法获取。

2.2 双视角全局标定原理

实现双视角的全局标定,首先要对双相机坐标系的坐标变换进行推导。图2中左侧相机称为相机1,对应的双平面标靶左边的平面标定板称为标定板1,右侧相机称为相机2,对应的平面标定板称为标定板2。以相机1为参考坐标系,设标定板2上的一个特征点P在其坐标系上的齐次坐标为 P_{b2}^{b2} ,在标定板1的齐次坐标为 P_{b1}^{b2} 。在相机1坐标系下的齐次坐标为 P_{c1}^{b2} ,在相机2坐标系下的齐次坐标为 P_{c2}^{b2} 。则有变换:

$$\begin{cases} P_{b1}^{b2} = T_{b2,b1} P_{b2}^{b2} \\ P_{c2}^{b2} = T_{b2(i),c2} P_{b2}^{b2} \\ P_{c1}^{b2} = T_{b1(i),c1} P_{b1}^{b2} = T_{c2,c1} P_{c2}^{b2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $T_{b2,b1}$ 表示标定板2坐标系到标定板1坐标系的转换矩阵, $T_{c2,c1}$ 表示相机2坐标系到相机1坐标系的转换矩阵, $T_{b2(i),c2}$ 表示第*i*次摆放位置中,标定板2坐标系到相机2坐标系的转换矩阵, $T_{b1(i),c1}$ 同理。由式(5)可得:

$$T_{b1(i),c1} T_{b2,b1} = T_{c2,c1} T_{b2(i),c2} \quad (6)$$

考虑双平面标靶的第*i*次和*j*次这两个摆放位置,结合两个标定板之间位置关系不变、两个相机之间位置关系也不变这两个约束条件,则可将式(6)整理得:

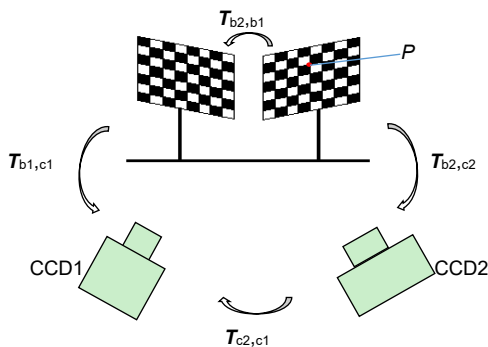


图2 全局标定示意图

Fig. 2 Global calibration diagram

$$\begin{cases} T_{b2,b1} = T_{b1(i),c1}^{-1} T_{c2,c1} T_{b2(i),c2} \\ T_{c2,c1} = T_{b1(i),c1}^{-1} T_{b2,b1} T_{b2(i),c2}^{-1} \\ T_{b2,b1} = T_{b1(j),c1}^{-1} T_{c2,c1} T_{b2(j),c2} \\ T_{c2,c1} = T_{b1(j),c1}^{-1} T_{b2,b1} T_{b2(j),c2}^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

进一步的整理合并可得:

$$\begin{cases} T_{b1(j),c1} T_{b1(i),c1}^{-1} T_{c2,c1} = T_{c2,c1} T_{b2(j),c2} T_{b2(i),c2}^{-1} \\ T_{b1(j),c1}^{-1} T_{b1(i),c1} T_{b2,b1} = T_{b2,b1} T_{b2(j),c2}^{-1} T_{b2(i),c2} \end{cases} \quad (8)$$

令 $T_A = T_{b1(j),c1} T_{b1(i),c1}^{-1}$, $T_B = T_{b2(j),c2} T_{b2(i),c2}^{-1}$, $T_C = T_{b1(j),c1}^{-1} T_{b1(i),c1}$, $T_D = T_{b2(j),c2}^{-1} T_{b2(i),c2}$, $T_X = T_{c2,c1}$, $T_Y = T_{b2,b1}$ 。则方程组(8)可简化为

$$\begin{cases} T_A T_X = T_X T_B \\ T_C T_Y = T_Y T_D \end{cases} \quad (9)$$

其中: $T_A T_X = T_X T_B$ 中因为 T_A 、 T_B 可以通过相机标定求得。这样 T_X 的求解问题就转化成Tsai等人^[16]提出的手眼标定方程 $AX=XB$ 的求解问题。

目前关于手眼标定方程 $AX=XB$ 求解的研究相对成熟,主要通过包括有经典两步法^[16],四元数法^[17-18]以及矩阵直积法^[19]等数学方法完成^[20]。本文利用四元数表示坐标系在空间的旋转运动,基于SVD的线性优化算法和单位四元数特性求解矩阵方程的旋转部分,基于最小二乘法求解其平移部分,由于篇幅有限,本文不做赘述,详细可参考文献^[17]。求出 T_X 即完成了两相机间的转换矩阵初值,同理,也可以计算出式(9)中 T_Y 的 R_Y 和 t_Y ,及两标定板之间的转换矩阵初值。

假设每个相机拍摄了*m*张标定板图片,每张图片中含有*n*个棋盘格角点。在相机1拍摄的第*i*张标定板图像中的第*j*个角点的像素坐标为 p_{ij}^{b1} ,其对应的三维空间点经过相机1内参 M_1 和标定板到相机1的转换矩阵 $T_{bi,c1}$ 变换后,得到的二维像素为 $\bar{p}_{ij}^{b1}$;在相机2拍摄的第*i*张标定板图像中的第*j*个角点的像素坐标为 p_{ij}^{b2} ,其对应的三维空间点经过标定板2到标定板1的转换矩阵 T_Y ,标定板到相机1的转换矩阵 $T_{bi,c1}$ 和相机1到相机2的转换矩阵 T_X^{-1} 后,得到的二维像素为 $\bar{p}_{ij}^{b2}$ 。然后用重投影点与实际像点之间的偏差可构造优化代价函数,通过求解两组角点坐标差值的最小值,可以求解出最优的转换矩阵。构造的优化函数:

$$f(T_X, T_Y, T_{b(i),c1}) = \min \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(p_{ij}^{b1}, \bar{p}_{ij}^{b1})^2 + d(p_{ij}^{b2}, \bar{p}_{ij}^{b2})^2 \right] \quad (10)$$

在本系统优化过程中,选择转换矩阵 T_X 、 T_Y 、 $T_{bi,c1}$ 作为优化算法的初始值,采用LM(levenberg-marquardt)法即可得到最优解。

3 实验验证及结果

为了验证本文提出的标定方法的准确性,根据条纹投影三维测量技术的原理,研制了一套如图 3 所示的双视角三维测量系统固定于光学平台上,作为该课题所需的硬件系统。选用精度高、可靠性强且输出稳定的 BenQCP270 的数字投影仪一台,物理分辨率是 1024 pixels×768 pixels;选用具有高速传输、信噪比高、实用性强等优点的 SVS-eco655CVGE 相机两台,其分辨率为 1280 pixels×1024 pixels,搭配的镜头的变焦焦距为 12 mm~36 mm。

首先完成两个视角的相机标定及全局标定,标定用的双棋盘格标定板如图 4,其中每个标定板上的棋盘格数量为 13×12,每个棋盘格的边长为 6 mm,两个标定板之间的位置灵活可调,当两个相机均可拍摄到较高质量的图像时,对两个标定板分别进行固定,使两个标定板固定连接为一体。具体标定流程如下:

步骤 1: 将如图 5 所示的双平面标定板摆放于相机视场中 20 个位置,使每个位置与相机光轴有较大的夹角并尽量使其与光轴对称;

步骤 2: 相机 1 拍摄标定板 1,相机 2 拍摄标定板 2,两相机分别将采集到的标定板图像传输到计算机;

步骤 3: 分别载入两个相机采集的图像,输入特征点物理间距,提取特征点角点坐标,使用张正友法完成两相机的内参及畸变系数的标定;

步骤 4: 利用标定出的畸变系数对两个棋盘格标

定板的图像坐标进行畸变校正,并重复步骤 3,更精确求解出相机的内参。

步骤 5: 利用本文提出的多相机全局标定方法和已修正畸变的双平面标定板上的特征点的像素及相机坐标,进行全局标定。

在全局标定中,每 2 个摆放位置可以得到 1 个如式(9)的方程,本实验就得到了 10 个方程组,利用两步法以及 LM 优化算法就得到两相机之间的旋转矩阵 $R_{c2,c1}$ 和平移向量 $t_{c2,c1}$:

$$R_{c2,c1} = \begin{bmatrix} 0.8753 & -0.0842 & 0.06673 \\ 0.1095 & 0.7301 & -0.0042 \\ 0.0227 & 0.0152 & 0.7316 \end{bmatrix},$$

$$t_{c2,c1} = [-452.6315 \quad -33.0208 \quad 48.7923]。$$

为了验证全局标定精度,将一个较大的高精度陶瓷平面标定板摆放在两个相机前,如图 5 所示,该标定板棋盘格的标准间距为 20 mm。假设相机 1 拍摄的特征点 P 在相机 1 坐标系下的三维坐标为 P_{b1} ,其相邻特征点 Q 在相机 2 坐标系下的三维坐标为 Q_{b2} 。根据全局标定结果将 Q_{b2} 转换到相机 1 坐标系下得到 Q_{b1} 。计算 P_{b1} 与 Q_{b1} 之间的距离,将计算距离与真实距离之间的误差作为全局标定的绝对误差。本文将验证标定板摆放了三个位置,每个图验证位置处选择如图 6 中标红的 44 个距离,计算得到的最大误差、最小误差和平均误差如表 1 所示。

由全局标定的验证结果可知,本文确定的全局标

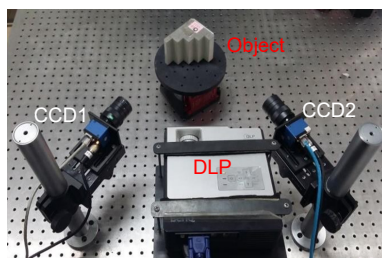


图 3 双视角三维测量系统
Fig. 3 Double vision 3D measurement system



图 4 双棋盘格标定板
Fig. 4 Double checkerboard calibration board

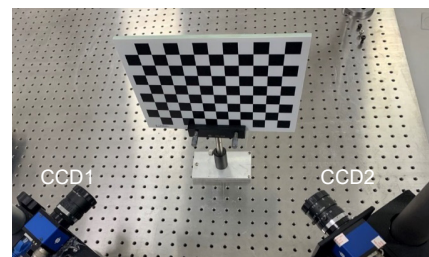


图 5 全局标定精度验证
Fig. 5 Global calibration accuracy verification

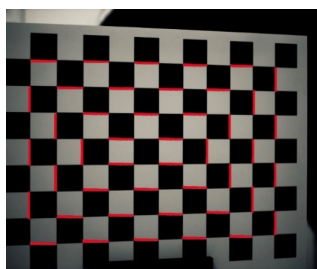


图 6 选取的验证距离
Fig. 6 Selected verification distance

表 1 全局标定精度验证结果

Table 1 Verification results of global calibration accuracy

摆放位置	最大误差/mm	最小误差/mm	平均误差/mm
1	0.089	0.036	0.075
2	0.077	0.039	0.069
3	0.084	0.045	0.071

定方法标定误差最高为 0.089 mm, 标定结果较为可靠。

由于条纹投影三维测量中需要向标定板投射高对比度的条纹以完成相位的提取, 但由于标定板上黑色棋盘格部分对条纹具有低反射率, 解算得到的绝对相位会缺失一部分的相位数据, 导致最终标定精度的下降。故在两个子系统的同时标定中采用如图 7 的两个等间距圆环标定板完成, 其中每个标定板上的圆环数量为 9×12 , 每两个相邻圆环中心的间距为 7.5 mm。这样每个视角都使用的是对应的圆环标定板进行标定, 从而既可以实现无重叠视场节点的同时标定, 还可以避免圆环由于倾斜角度过大而导致的圆心偏

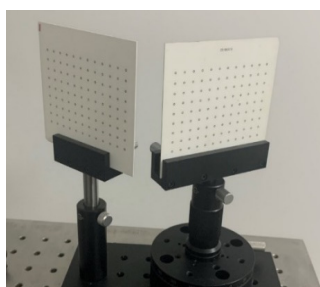


图 7 双圆环标定板
Fig. 7 Double ring targets

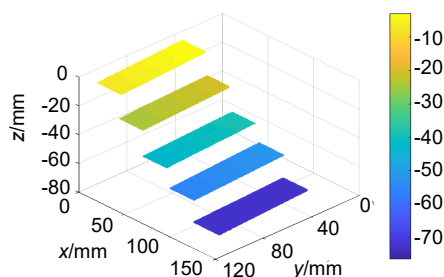


图 8 视角 1 恢复的台阶三维形貌
Fig. 8 Three dimensional topography of steps restored by perspective 1

差。本系统选择的相移条纹数为 100、99 及 90, 每组条纹图之间的相位差为 $\pi/2$, 即每组条纹图都符合四步相移法。

系统标定完成之后, 使用具有平行面的台阶来验证系统精度, 该台阶面之间的真实间距由精度为 $1 \mu\text{m}$ 的三坐标测量仪测得。与系统标定实验相同, 利用相移法及最佳条纹相结合的方法获得台阶表面的绝对相位信息, 由已标定的系统参数和得到的台阶的展开相位可算出每个台阶面上所有点的相对深度, 恢复出台阶的三维形貌。如图 8 为视角 1 恢复的实验结果, 图 9 为视角 2 恢复的实验结果。在每个台阶面上选择靠台阶面中间的大部分点拟合出 5 个相互平行的平面, 然后在每个台阶面上均匀地取一定量的点, 利用 Geomagic 11 中的工具测量它们到相邻台阶面的距离, 再对其进行平均, 就可比较准确地得到相邻台阶面的测量间距。

由于两个视角恢复出的三维点云在两个相机坐标系中, 而两个相机坐标系之间的转换关系已通过全局标定得到, 于是我们将两片点云转换到一个坐标系下进行融合, 融合结果如图 10 所示, 可见无明显的分层和错位的现象。然后同样对融合的台阶面之间的距离进行拟合计算, 便可得到融合台阶的测量结果。视角

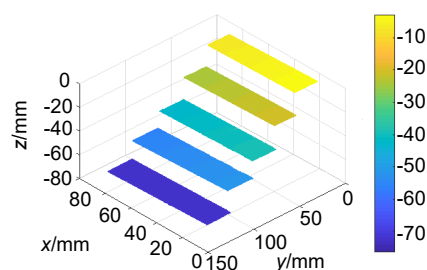


图 9 相机 2 视角恢复的台阶三维形貌
Fig. 9 Three dimensional topography of steps restored by perspective 2

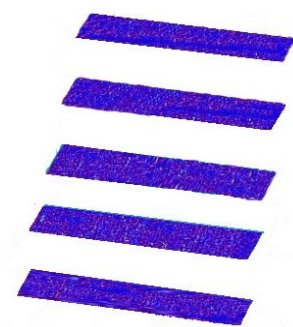


图 10 两视角融合效果图
Fig. 10 Fusion of two perspectives

表 2 双视角测量结果(单位: mm)

Table 2 Measurement results of double view angle (unit: mm)

	台阶实际间距			
	17.603	18.422	13.258	18.212
视角 1 测量间距	17.637	18.386	13.291	18.255
视角 1 测量误差	0.034	0.036	0.033	0.043
视角 2 测量间距	17.643	18.387	13.225	18.253
视角 2 测量误差	0.040	0.035	0.033	0.041
双视角测量结果	18.408	17.611	13.994	17.618
双视角测量误差	0.102	0.097	0.090	0.116

1、视角 2 恢复出的台阶以及两视角融合台阶的测量距离和测量误差见表 2, 由实验结果可知, 本文采用的全局标定方法和子系统标定方法的累计误差不超过 0.116 mm。

4 结 论

本文针对双视角三维测量系统同时标定方法进行了研究。针对现有标定方法中存在的局限性, 采用一种新的方法, 以双平面标定板为中介, 求解出待标定相机坐标系与参考坐标系的转换矩阵。该方法无需辅助设备便可以实现无公共视场的双视角系统的同时标定, 增强了标定的灵活性。此外, 本文确定的全局标定方法适用于多视角三维测量系统, 当相机数量多于两个时, 增加对应相机数量的标定板, 便可实现多个相机的同时标定。

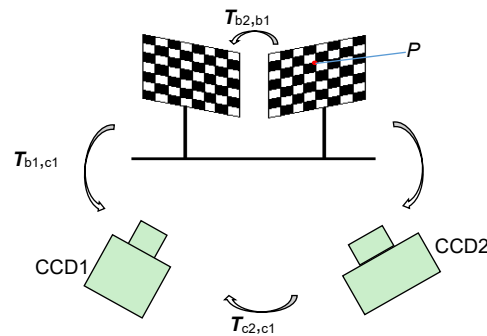
参考文献

- [1] Bai X F, Zhang Z H. 3D shape measurement based on colour fringe projection techniques[J]. *Chin J Sci Instrum*, 2017, **38**(8): 1912–1925.
白雪飞, 张宗华. 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量[J]. 仪器仪表学报, 2017, **38**(8): 1912–1925.
- [2] Tang Y, Chen W J, Zhang Q, et al. BP neural network applied to 3D object measurement based on fringe pattern projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2007, **34**(12): 61–65.
唐燕, 陈文静, 张强, 等. 神经网络获取三维面形研究[J]. 光电工程, 2007, **34**(12): 61–65.
- [3] Li B W, Zhang S. Superfast high-resolution absolute 3D recovery of a stabilized flapping flight process[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(22): 27270–27282.
- [4] Fan S H, Liu C R, Qi X T, et al. Accuracy analysis and verification of structured light 3D measurement system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2014, **41**(5): 52–56.
范生宏, 刘昌儒, 乔晓彤, 等. 结构光三维测量系统精度分析及验证[J]. 光电工程, 2014, **41**(5): 52–56.
- [5] Luo J, Yuan J H. Geometric calibration method of 3D photogrammetric instruments using grating projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2005, **32**(11): 43–48, 67.
罗剑, 袁家虎. 光栅投影式三维摄影测量仪的几何标定方法[J]. 光电工程, 2005, **32**(11): 43–48, 67.
- [6] Chen M Y, Tang Y C, Zhou X J, et al. High-accuracy multi-camera reconstruction enhanced by adaptive point cloud correction algorithm[J]. *Opt Lasers Eng*, 2019, **122**: 170–183.
- [7] Su X Y, Cheng X X, Guo L R. An automated method for 360° surface measurement of 3-D objects[J]. *Acta Opt Sin*, 1989, **9**(7): 670–672.
苏显渝, 程晓雪, 郭履容. 三维物体 360°面形自动测量方法[J]. 光学学报, 1989, **9**(7): 670–672.
- [8] Lu Y N, Wan Z J, Wang X J. Solution to relative position of cameras without public FOV[J]. *J Appl Opt*, 2017, **38**(3): 400–405.
鲁亚楠, 万子敬, 王向军. 一种无公共视场相机位置关系的求解方法[J]. 应用光学, 2017, **38**(3): 400–405.
- [9] Liu Z, Meng Z Z, Gao N, et al. Calibration of the relative orientation between multiple depth cameras based on a three-dimensional target[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, **19**(13): 3008.
- [10] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1992, **14**(2): 239–256.
- [11] Chu S H, Zhang H M, Chen S, et al. Research on the calibration method of multi eye stereo vision in large scenes[J]. *Mod Comput*, 2017(15): 33–38.
楚圣辉, 张慧萌, 陈硕, 等. 大场景下多目立体视觉标定方法的研究[J]. 现代计算机(专业版), 2017(15): 33–38.
- [12] Pan H W, Yang Z X, Gao C M, et al. Multi-camera calibration method using planar patterns[J]. *Appl Res Comput*, 2011, **28**(11): 4357–4360.
潘华伟, 杨振先, 高春鸣, 等. 一种基于平面模板的多摄像机标定方法[J]. 计算机应用研究, 2011, **28**(11): 4357–4360.
- [13] Lang W, Xue J P, Li C H, et al. Splicing of multi-view point clouds based on calibrated parameters of turntable[J]. *Chinese J Lasers*, 2019, **46**(11): 1104003.
郎威, 薛俊鹏, 李承杭, 等. 基于旋转台参数标定实现多视点云拼接[J]. 中国激光, 2019, **46**(11): 1104003.
- [14] Zhang Z, Zhang D, Peng X. Performance analysis of a 3D full-field sensor based on fringe projection[J]. *Opt Lasers Eng*, 2004, **42**(3): 341–353.
- [15] Zhou C L, Si S C, Gao C Y, et al. Two-step phase-shifting profilometry based on Gram-Schmidt orthonormalization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2013, **40**(6): 37–42.
周灿林, 司书春, 高成勇, 等. 基于格莱姆-施密特正交化两步相移轮廓术[J]. 光电工程, 2013, **40**(6): 37–42.
- [16] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. *IEEE Trans Robot Autom*, 1989, **5**(3): 345–358.
- [17] Mao J F, Shao H F, Jiang L, et al. Quaternion geometrical analysis on solving equation $R_a R_x = R_x R_b$ [J]. *J Image Graph*, 2010, **15**(6): 951–957.
毛剑飞, 邵黄芳, 蒋莉, 等. 求解方程 $R_a R_x = R_x R_b$ 的四元数几何研究[J]. 中国图象图形学报, 2010, **15**(6): 951–957.
- [18] Wang C Y, Li L J. Hand-eye calibration algorithm for robot based on quaternion[J]. *Transducer Microsyst Technol*, 2019, **38**(12): 133–135.
王昌云, 李立君. 基于四元数的机器人手眼标定算法[J]. 传感器与微系统, 2019, **38**(12): 133–135.
- [19] Hu W, Liu C, Fu L, et al. An algorithm for robot hand eye calibration with high accuracy[J]. *Fire Control Comm Control*, 2018, **43**(9): 19–24.
胡为, 刘冲, 傅莉, 等. 一种高精度的机器人手眼标定算法[J]. 火力与指挥控制, 2018, **43**(9): 19–24.
- [20] Wei Z Z, Gao M, Zhou F Q, et al. Robot extended eye-in-hand calibration method based on an assistant camera[J]. *Opto-Electron Eng*, 2008, **35**(9): 76–80, 121.
魏振忠, 高明, 周富强, 等. 基于辅助摄像机的机器人延伸手眼标定方法[J]. 光电工程, 2008, **35**(9): 76–80, 121.

Method of simultaneous calibration of dual view 3D measurement system

Zhao Hanzhuo, Gao Nan*, Meng Zhaozong, Zhang Zonghua

College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China



Global calibration diagram

Overview: The fringe projection measurement method is widely used in various fields due to its simple structure, high precision, and resolution, full field measurement, etc. The research on the single-view system of the fringe projection measurement method has been relatively mature. The dual-view fringe projection measurement system is an extension of the single-view fringe projection measurement system, a larger range of three-dimensional geometric information can be obtained by expanding the camera's field of view. In the dual-view fringe projection measurement system, the three-dimensional measurement results of the subsystem are always restored in the camera coordinate system, while the two camera coordinate systems are independent of each other in the dual-view fringe projection measurement system. Therefore, it is necessary to solve the transformation relationship between the two camera coordinate systems, the process of solving the transformation relationship between the two camera coordinate systems is called global calibration. Global calibration is the most important task in the calibration of dual and multi view systems. However, the existing global calibration methods require expensive auxiliary equipment when the two cameras have no common field of view, which adds a certain cost to the calibration, and when the viewing angle of the system is more than two, the method of relying on the auxiliary equipment is limited. Aiming at the limitations of the existing global calibration methods, this paper proposes a method to achieve dual-view global calibration by using two plane calibration boards: Firstly, through a series of derivation, the problem of solving the transformation matrix between the two camera coordinate systems is transformed into the problem of solving the hand-eye calibration equation which is more mature in the field of robot; Secondly, adjust the two calibration boards to the appropriate position according to the placement of the camera, and fix the two calibration boards; Thirdly, place the two calibration boards at several positions in the field of view of the two cameras at the same time to obtain several equations; Finally, the conversion matrix between the two cameras is obtained by using the quaternion method, least square method, and nonlinear optimization. The method identified in this paper does not require additional auxiliary equipment, and it is proved by quantitative experiments: this method can realize the calibration of dual cameras simultaneously and the absolute error of the method does not exceed 0.089 mm, which is relatively reliable; in the dual-view 3D measurement system, the cumulative error of global calibration and phase-depth does not exceed 0.116 mm, which can provide a reliable initial value for further data fusion. In addition, the global calibration method determined in this paper is suitable for multi-view 3D measurement systems. When the number of cameras is more than two, the calibration board corresponding to the number of cameras can be added to achieve simultaneous calibration of multiple cameras.

Zhao H Z, Gao N, Meng Z Z, *et al.* Method of simultaneous calibration of dual view 3D measurement system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(3): 200127; DOI: 10.12086/oee.2021.200127

Foundation item: Major Project of the Scientific Equipment Development of China (2017YFF0106404), National Natural Science Foundation of China (51675160), and Major Basic Research Projects of Hebei Applied Basic Research Program (15961701D)

* E-mail: ngao@hebut.edu.cn