

无重叠视场多相机组安装关系的灵活标定

王 刚^{1,2}, 尚 洋^{1,2*}, 关棒磊^{1,2}, 于起峰^{1,2}

¹国防科学技术大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

²图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 在多相机组测量应用场景中,各相机之间常常存在没有重叠视场的特殊情况,该条件下多相机组安装关系的标定极具挑战性。针对传统基于全站仪的标定方法过于繁琐的缺点,基于机器人领域里手眼标定与多相机组安装关系标定的等价关系,给出了求解多相机组安装关系的基础方程,推导了利用四元数描述旋转矩阵下基础方程的解算步骤,提出了一种基于手眼标定的无重叠视场多相机组标定方法。实验结果表明,与传统标定方法相比,该方法在不降低测量精度的前提下,无需其他测量传感器的辅助,极大减少了人工作业量,操作更加简单灵活,工作效率更高。

关键词 测量; 外参数标定; 手眼标定; 无重叠视场

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0604004

Flexible Calibration of Setting Relation of a Multi-Camera Rig for Non-Overlapping Views

Wang Gang^{1,2}, Shang Yang^{1,2}, Guan Banglei^{1,2}, Yu Qifeng^{1,2}

¹College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Hunan Provincial Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In many measurement applications by using a multi-camera rig, there are some special conditions like non-overlapping views between cameras. Thus, setting relation calibration of a multi-camera rig under these conditions is very challenging. The traditional calibration method based on all station is pretty cumbersome. The basic equation to solve the setting relation of multi-camera rig is presented on the basis of the equivalence relation between hand-eye calibration in the robotics and setting relation calibration of the multi-camera rig. The process of solution for the basic equation by using quaternions to represent rotation matrix is derived. And a novel calibration method of non-overlapping multi-camera rig based on hand-eye calibration is proposed. The experiment results show that the measurement accuracy of the proposed method is the same as that of the traditional calibration method. The proposed method greatly reduces the manual task, and it has features of easy and flexible operation and higher efficiency without the help of other measuring sensors.

Key words measurement; extrinsic parameter calibration; hand-eye calibration; non-overlapping views

OCIS codes 120.1880; 150.1135; 150.1488; 150.4232; 150.6044

收稿日期: 2016-12-19; 收到修改稿日期: 2017-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(11332012)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ140517)、国防科技大学科研计划项目(ZK16-03-27)

作者简介: 王 刚(1990—),男,博士研究生,主要从事大型结构变形测量与位姿估计方面的研究。

E-mail: wanggang13@nudt.edu.cn

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,院士,主要从事空天图像测量与视觉导航等方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: shangyang1977@nudt.edu.cn

1 引 言

近年来多相机组合系统愈来愈多地应用于三维重建、大型结构测量、视频监控等领域^[1-3]。相较于单相机,多相机组合系统能够覆盖更广的视场、采集更多的数据,对环境变化也具有更强的稳健性,能够更好地应对环境光照突变、目标遮挡和逃出视场等异常情况。

根据不同的应用背景需求,多相机组合系统通常具有不同的相机配置,一般包含立体相机、会聚式相机组、发散式相机组和相机网络等。会聚式相机组是指系统中所有相机具有重叠视场,能够同时看到部分相同的场景;相反地,发散式相机组则没有重叠视场,视场中的观测区域各不相同,因而发散式相机组也叫做无重叠视场相机组。相机网络既存在会聚式相机组,也包含发散式相机组。

在实际应用中,按照视觉测量任务的要求将多相机组安装固定于理想观测位置后,还需要对多相机组进行相机标定。多相机组的标定是指获取固定连接在一起的多个相机的内外参数,一般情况下相机的内参数可以提前通过逐个标定来获得。多相机组外参数的标定通常是指标定出多个相机之间的安装关系,解算得到多个相机在同一坐标系下的相对位置姿态,将所有相机统一转化到同一个坐标系下。多相机组安装关系的标定是应用固连多相机组的基本前提,在完成该安装关系的标定之后,才能实现所有单个相机获取信息的融合^[4-6]。

具有重叠视场的多相机组安装关系的标定一般将标定物置于重叠视场内,多个相机同时拍摄获取不同视角的图像,图像匹配特征后,求解出本质矩阵,再对本质矩阵进行分解就可以得到相机间的相对外参数。

无重叠视场的多相机组由于相机之间没有公共的观测视场,相机之间没有匹配的图像特征能够使用,类似于立体相机标定等常规标定技术在无重叠视场多相机组中并不可行,给相机安装关系的标定带来了更大的挑战。

目前无重叠视场多相机组安装关系的标定通常需要在不同相机视场内布置多个控制点,然后使用其他精密测量设备(如全站仪等)将这些控制点统一到相同坐标系下。基于同一坐标系下控制点的标定方法直观易懂、原理简单。然而该方法需要布设大量的控制点,由于受到测量环境的影响,在许多场景下并不能满足该条件,而且全站仪测点作业强度大,工作效率低,费时费力。

多相机组各相机之间严格固定连接在一起,两两之间具有刚性约束的关系,即它们之间的相互关系并不随着多相机组的运动而改变。利用多相机组各相机之间刚性约束条件之一,基于机器人领域手眼标定的方法便能够有效解决无重叠视场多相机组安装关系的标定问题。与基于全站仪的无重叠视场多相机组安装关系的标定方法相比,该方法更加简便易行、灵活可靠。

2 测量模型

无重叠视场多相机组安装关系的标定任务和机器人领域的手眼标定问题十分相似,二者都是刚体约束下的不同坐标系间的坐标系转换问题。许多学者提出了一系列解决手眼标定问题的解算方法^[7-12],并把手眼标定问题统一归纳为求解基础方程 $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$ 。方程中 \mathbf{A} 为不同位置相机坐标系之间相对位置姿态关系,可以通过采集目标图像进行相机标定得到;而 \mathbf{B} 为机器人末端连杆在机器人手眼标定系统移动前后的变换关系,可以由机器人的运动传感器直接获取,待求解的参数 \mathbf{X} 即机器人平台之间的相对位置姿态。

在成对相机组中,一个相机可以看作手眼系统的“手”,另一个相机可以看作手眼系统的“眼”。略微不同的是固连多相机组缺少运动传感器,但是它的位姿变化信息可以从序列图像中获取。

在无重叠视场的固连多相机系统中,为了标定各相机间的外部参数,需要移动固连多相机系统若干次,所有相机同步采集数据。图 1 表示无重叠视场下多相机组和标定物间相对运动关系,合作标志保持不动,多相机系统每次运动后都可获得各个单相机到对应标定物间的相对位姿。为了描述方便,上标 $t \in [1 \cdots M]$ 用来表示运动的时刻,下标 $i \in [1 \cdots N]$ 用来表示相机的序列号。其中, C_i 表示第 i 号相机; \mathbf{T}_i^t 表示 t 时刻, C_i 相对初始时刻的变化关系; $\Delta \mathbf{T}_i$ 表示第 i 号相机到第一个相机的变换关系。

对于不同时刻的单个相机,可以选取初始时刻的相机坐标系作为单个相机的局部参考坐标系,其他时刻相机的位姿都能表示为相对于初始时刻的变换关系。第 i 号相机从初始时刻到 t 时刻的坐标变换可由旋转矩阵 \mathbf{R}_i^t 和平移向量 t_i^t 组成的齐次变换 \mathbf{T}_i^t 表示

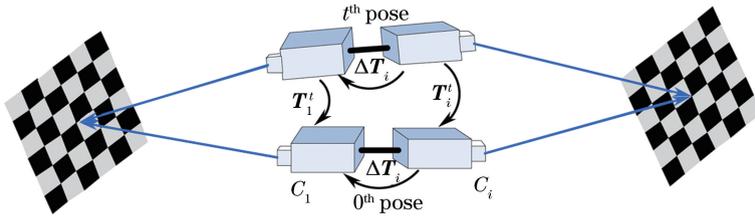


图 1 多相机组与标志之间相对运动关系

Fig. 1 Relative motion between multi-camera rig and marks

$$T_i^t = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_i^t & \mathbf{t}_i^t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

在多相机系统中,为了避免坐标系的混乱,还需要确定一个基准坐标系。为了不失一般性,在无重叠视场固连多相机系统中,一般选定第一个相机为主相机,其余的相机都被定义为从属相机。初始时刻主相机对应的相机坐标系被选为多相机系统的基准坐标系。

空间直角坐标系之间先后两次的变换关系可以由简单的乘法运算得到,因此基准坐标系和任意时刻从属相机坐标系之间的变换关系有两种计算方法。第一种方式可以先将 t 时刻从属相机坐标系转化到对应时刻的主相机坐标系,再将 t 时刻的主相机坐标系转化到基准坐标系,可以表示为 $T_1^t \Delta T_i$;另一种方式则是先将 t 时刻从属相机坐标系转化到局部参考坐标系,再由局部参考坐标系转化到基准坐标系,可以表示为 $\Delta T_i T_i^t$ 。这两种变换方式在物理意义上是等价关系,即

$$T_1^t \Delta T_i = \Delta T_i T_i^t. \quad (2)$$

很显然,(2)式满足 $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$ 相同的等式关系,机器人领域中的手眼标定问题也是在欧氏变换群上求解该方程,因而标定无重叠视场下固连多相机系统的外部参数转化为类似的手眼标定问题。将(1)式代入(2)式,方程可以分解得到

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1^t \Delta \mathbf{R}_i = \Delta \mathbf{R}_i \mathbf{R}_i^t \\ \mathbf{R}_1^t \Delta \mathbf{t}_i + \mathbf{t}_1^t = \Delta \mathbf{R}_i \mathbf{t}_i^t + \Delta \mathbf{t}_i \end{cases}. \quad (3)$$

3 方法原理

3.1 相机轨迹估计

在求解(2)式之前,还需要通过相机轨迹估计得到不同时刻相机的位姿变换矩阵 T_i^t 。相机轨迹估计是指在序列图像中获取任一时刻相机相对于初始时刻的位置姿态,也叫做相机的运动估计。在固连多相机系统中,每个相机的轨迹能够独立解算获得。如果场景的结构未知,可以使用从运动恢复结构^[13](SFM)方法得到相机的运动信息。与之相反,如果场景的结构已知,相机的轨迹只需通过简单的位姿估计和刚体变换便可求得。

在无重叠视场多相机系统标定中,一般选择几何结构已知的合作标志作为标定参考物。在提前标定获得相机内参数的情况下,利用传统的外参数标定算法获得各个运动位置相机和合作标志之间的位姿关系,再通过一系列刚体变换估计出相机的轨迹。合作标志上一点 P 的相机坐标系 $\mathbf{P}_C(X_C, Y_C, Z_C)$ 与靶标坐标系 $\mathbf{P}_S(X_S, Y_S, Z_S)$ 满足关系

$$\mathbf{P}_C^t = \mathbf{H}_i^t \mathbf{P}_S^t, \quad (4)$$

式中 \mathbf{H}_i^t 表示旋转矩阵和平移向量组成的齐次变换矩阵,则 i 号相机 t 时刻的轨迹为

$$T_i^t = \mathbf{H}_i^t (\mathbf{H}_i^0)^{-1}. \quad (5)$$

3.2 线性求解旋转矩阵和平移向量

一般采用“两步法”求解基本方程(3)式,先利用旋转平均的思路求出旋转矩阵 $\Delta \mathbf{R}_i$,再将得到的 $\Delta \mathbf{R}_i$ 代入(3)式中,线性求解出平移向量 $\Delta \mathbf{t}_i$ 。

将(3)式写成四元数乘法的形式:

$$\dot{\mathbf{r}}_1^t \Delta \dot{\mathbf{r}}_i - \Delta \dot{\mathbf{r}}_i \dot{\mathbf{r}}_1^t = \mathbf{0}. \quad (6)$$

根据四元数和旋转轴-角的转化关系,旋转矩阵对 $(\mathbf{R}_1^t, \mathbf{R}_i^t)$ 可以写成如下四元数形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}_1^t = [\cos(\theta_1/2), \hat{\mathbf{r}}_1^t \sin(\theta_1/2)] \\ \dot{\mathbf{r}}_i^t = [\cos(\theta_i/2), \hat{\mathbf{r}}_i^t \sin(\theta_i/2)] \end{cases}, \quad (7)$$

式中 θ_i 表示旋转角度, $\hat{\mathbf{r}}_i^t$ 表示旋转轴,则四元数距离上的旋转平均问题就是求解出四元数 $\Delta \dot{\mathbf{r}}_i$ 使下式最小化:

$$\sum_{t=1}^n \|\dot{\mathbf{r}}_1^t \Delta \dot{\mathbf{r}}_i - \Delta \dot{\mathbf{r}}_i \dot{\mathbf{r}}_1^t\|_2^2 = \sum_{t=1}^n \|\Delta \dot{\mathbf{r}}_i^{-1} \dot{\mathbf{r}}_1^t \Delta \dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_1^t\|_2^2. \quad (8)$$

由旋转轴-角与旋转矩阵的转化性质,易得旋转矩阵 $\Delta \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{R}_1^t \Delta \mathbf{R}_i$ 对应的四元数为

$$\Delta \dot{\mathbf{r}}_i^{-1} \dot{\mathbf{r}}_1^t \Delta \dot{\mathbf{r}}_i = [\cos(\theta_1/2), \Delta \mathbf{R}_i^{-1} \hat{\mathbf{r}}_1^t \sin(\theta_1/2)]. \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式,可得

$$\sum_{t=1}^n \|\Delta \dot{\mathbf{r}}_i^{-1} \dot{\mathbf{r}}_1^t \Delta \dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_1^t\|_2^2 = \sum_{t=1}^n \|\Delta \mathbf{R}_i^{-1} \hat{\mathbf{r}}_1^t \sin(\theta_1/2) - \hat{\mathbf{r}}_1^t \sin(\theta_i/2)\|_2^2 + M, \quad (10)$$

式中 $M = \sum_{t=1}^n [\cos(\theta_1/2) - \cos(\theta_i/2)]^2$ 为常量,与 $\Delta \mathbf{R}_i$ 无关.使(10)式达到最小化与绝对定向求解^[14]问题类似,可以用相同的方法进行求解 $\Delta \mathbf{R}_i$. 求解如下:

$$\Delta \tilde{\mathbf{R}}_i = \sum_{t=1}^n [\hat{\mathbf{r}}_i^t \sin(\theta_i/2)]^T [\hat{\mathbf{r}}_1^t \sin(\theta_1/2)]. \quad (11)$$

若 $\Delta \tilde{\mathbf{R}}_i$ 奇异值分解为 $\Delta \tilde{\mathbf{R}}_i = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T$,其中 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 为正交矩阵, \mathbf{D} 为对角矩阵,则旋转矩阵 $\Delta \mathbf{R}_i = \mathbf{V} \mathbf{U}^T$.

将计算得到的矩阵 $\Delta \mathbf{R}_i$ 代入(3)式中,将相机对每次运动得到的相机轨迹矩阵堆积在一起,列出如下线性方程组

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I} - \mathbf{R}_1^1 \\ \vdots \\ \mathbf{I} - \mathbf{R}_1^M \end{pmatrix} \Delta \mathbf{t}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{t}_1^1 - \Delta \mathbf{R}_i \mathbf{t}_i^1 \\ \vdots \\ \mathbf{t}_1^M - \Delta \mathbf{R}_i \mathbf{t}_i^M \end{pmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{B} \Delta \mathbf{t}_i = \mathbf{L}. \quad (12)$$

根据最小二乘原理,(12)式的向量解 $\Delta \mathbf{t}_i = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L}$.

3.3 非线性优化

在固连多相机系统中,由于各相机之间的位姿关系不变,为了使待优化的参数最小,一般选择主相机相机坐标系为多相机系统的基准坐标系,其他任意一个相机坐标系都能由基准坐标系转化到全局坐标系下.待优化的相机外部参数最少包括主相机相对全局坐标系的位姿参数以及从属相机相对主相机的位姿参数.

确定待优化的参数后,便是建立优化代价函数.根据相机参数解算结果和已知的空间点坐标,按照相机成像模型重新将空间点投影到相机像平面上,这个过程称为空间点的重投影.非线性优化中,一般用重投影结果与实际像点之间的偏差最小作为优化代价函数.固连多相机系统的目标函数为

$$f(\mathbf{R}_1^t, \mathbf{t}_1^t, \Delta \mathbf{R}_i, \Delta \mathbf{t}_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^M d[\mathbf{x}_i^t(\mathbf{K}_i, \boldsymbol{\delta}_i, \mathbf{R}_1^t, \mathbf{t}_1^t, \Delta \mathbf{R}_i, \Delta \mathbf{t}_i), \mathbf{x}_i^t]^2, \quad (13)$$

式中 \mathbf{x}_i^t 表示 t 时刻第 i 号相机的实际像点, \mathbf{x}_i^t 表示重投影像点, \mathbf{K}_i 表示相机的内参数, $\boldsymbol{\delta}_i$ 表示畸变参数,其他符号与上文一致,目标函数是计算所有图像上实际像点与重投影像点的误差平方和.

4 实验结果

4.1 仿真实验

实验模拟条件如下,双头相机固连在一起,左相机到右相机的相对外参数旋转矩阵对应的欧拉角 (A_x, A_y, A_z) 为 $(0^\circ, 180^\circ, 0^\circ)$,相对平移向量 (t_x, t_y, t_z) 为 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, -0.2 \text{ m})$.通过给理想像点坐标加入均值为 0、标准差为 σ 的高斯白噪声的方式得到实际像点坐标.

为得到图像像点提取误差对双头相机标定精度的影响程度,设置图像噪声标准差从 0 pixel 变化到 1.0 pixel,间隔为 0.1 pixel.左右相机观测到的控制点个数均为 8 个,双头相机移动 5 次.为了得到有效的

统计结果,针对每一噪声条件,仿真 200 次,最后统计真值与测量值之间的标准误差。平移向量与旋转矩阵的误差为

$$E_R = \arccos \left[\frac{\text{trace}(\mathbf{R}^T \mathbf{R}_g) - 1}{2} \right], \quad (14)$$

$$E_t = \| \mathbf{t} - \mathbf{t}_g \|, \quad (15)$$

式中 $\mathbf{R}_g, \mathbf{t}_g$ 为预先设置的真值, \mathbf{R}, \mathbf{t} 为估计值, $\text{trace}()$ 代表矩阵的迹。

双头相机安装关系标定的旋转矩阵误差和平移向量误差随图像噪声的变化结果如图 2 所示,其中蓝色三角形表示线性初值,红色星形表示非线性优化结果。由图 2 可以看出,双头相机标定的位姿误差随着图像噪声增加而增大,非线性优化结果远远优于线性初值。在实际应用中,噪声误差通常小于 0.1 pixel,该算法在此条件下的角度误差在角分量级,位置误差在厘米量级,能够满足实际需求,具有一定的可行性。

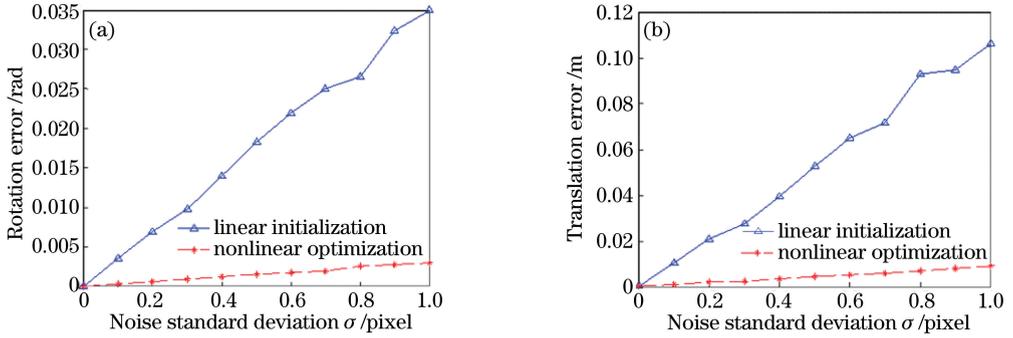


图 2 旋转和平移误差随图像噪声的变化

Fig. 2 Errors in rotation and translation versus image noise

4.2 实物实验

无重叠视场下固连多相机组均可以看作是若干个双相机组的混合,因而接下来的验证实验以双相机组为例。本实验采用的双相机组为北京微视新纪元科技公司的 MVC1000SAM-GE30 黑白相机,无需采集卡,直接连接到计算机千兆网口便能采集图像。相机有效分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,采用宾得镜头,其焦距为 25 mm,视场角约为 $15^\circ \times 12^\circ$ 。出于成像清晰、提点方便的考虑,本实验采用了打印的棋盘格标志作为标定参考物。

双相机组的安装关系如图 3 所示,两个相机背靠背固定安装在基座上,二者完全没有公共的视域。在标定双相机组的安装关系前,左右相机分别采集了多张不同位置的平面靶标图像,同样基于手眼定标的外参数标定中也拍摄了许多平面靶标图像,这些图像都可以用来标定相机内参数。根据 Zhang Z^[15] 提出的平面靶标标定算法,标定出的左右相机内参数如表 1 所示,其中 (f_x, f_y) 表示等效焦距, (u_0, v_0) 表示主点坐标,

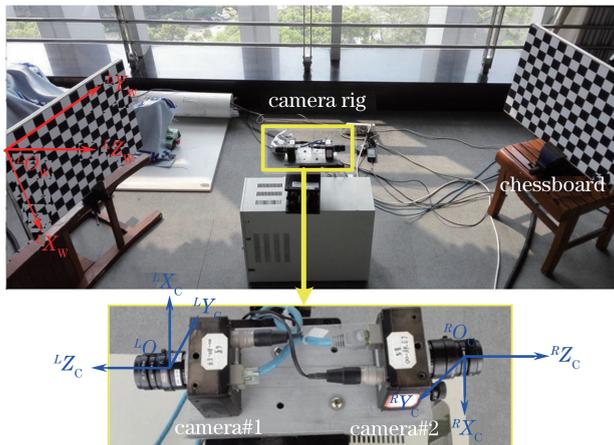


图 3 无重叠视场的双相机组标定

Fig. 3 Calibration of non-overlapping two-camera rig

(k_1, k_2) 为 DC Brown 像差模型中的径向畸变系数。

表 1 双相机组标定结果
Table 1 Calibration results of two-camera rig

Intrinsic parameter	Camera #1	Camera #2
(f_x, f_y) /pixel	(2402.4910, 2396.2242)	(2393.0822, 2390.3540)
(u_0, v_0) /pixel	(649.1261, 452.8340)	(665.9806, 510.8664)
(k_1, k_2)	(-0.2624, 0.0120)	(-0.2714, 0.2356)
Extrinsic parameter	Theodolite-based method	Proposed method
(α, β, γ) /($^\circ$)	(0.2652, -178.0846, -0.7137)	(0.2752, -178.1328, -0.7405)
(t_x, t_y, t_z) /cm	(-0.19, 0.40, -22.88)	(-0.16, 1.35, -22.30)

在获取相机的内参数之后,将左右棋盘格固定不动,多次移动双相机组并同时采集各自视场内的棋盘格图像。采集完所需图像后,便可以利用该方法标定出双相机组之间的安装关系。为了验证该方法的可靠性,将该方法与传统使用全站仪辅助的标定方法进行比较,两种方法的双相机相对外参数标定结果如表 1 所示,其中为了直观易懂,将旋转矩阵分解成欧拉角的形式,用 (α, β, γ) 表示, (t_x, t_y, t_z) 表示平移向量。

实验结果表明,该方法与传统的基于全站仪的标定方法相比,三个旋转角偏差均在 0.05° 以内,平移向量三个方向位置偏差均在 1 cm 以内,因此提出的无重叠视场多相机组安装关系的标定方法完全可以替代传统的基于全站仪的标定方法,该方法操作更加快速便捷,灵活性更强。

5 结 论

为了满足实际应用中特殊任务的需求,常常需要在测量场景中布设无重叠视场的多相机组。针对这种特殊配置情况下的多相机组安装关系的标定,推导了固连多相机组标定与机器人领域手眼标定的等价关系,提出了一种基于手眼标定的无重叠视场多相机组标定方法。实验结果表明,相较于传统的标定方法,该方法在满足测量精度的前提下,无需其他测量设备的位姿传递,操作极其灵活简单,标定效率更加快速,尤其在多相机组中相机传感器个数较多时,优势更加明显,极大地减少了人工作业,有利于实现标定测量一体化。

参 考 文 献

[1] Li Qingzhong, Zang Fengni, Zhang Yang. Ship target detection for moving video maritime surveillance[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0814001.
李庆忠, 臧凤妮, 张 洋. 动态视频监控中海上舰船目标检测[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0814001.

[2] Dong Shuai, Dai Yuntong, Dong Eliang, *et al.* Three-dimensional reconstruction of dental impression based on multi-camera three-dimensional digital image correlation method[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0812006.
董 帅, 戴云彤, 董萼良, 等. 应用多相机三维数字图像相关实现口腔印模三维重构[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0812006.

[3] Guan Banglei, Sun Xiangyi, Shang Yang, *et al.* A camera calibration method for large field camera pointing at sky on sway platform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712003.
关棒磊, 孙祥一, 尚 洋, 等. 晃动平台上对空拍摄大视场摄像机的标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712003.

[4] Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua, *et al.* High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1308-1314.
姜广文, 晁志超, 伏思华, 等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1308-1314.

[5] Chen Tianfei, Zhao Jibin, Wu Xiang. New calibration method for line structured light sensor based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112004.
陈天飞, 赵吉宾, 吴 翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112004.

[6] Jiao Hongwei, Qin Shiqiao, Hu Chunsheng, *et al.* Research on the coordinates calibration of pulse lidar and camera [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0108006.
焦宏伟, 秦石乔, 胡春生, 等. 一种脉冲激光雷达与摄像机标定方法的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0108006.

[7] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1989, 5(3): 345-358.

-
- [8] Park F C, Martin B J. Robot sensor calibration: solving $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$ on the Euclidean group[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1994, 10(5): 717-721.
- [9] Horaud R, Dornaika F. Hand-eye calibration[J]. International Journal of Robotics Research, 1995, 14(3): 195-210.
- [10] Daniilidis K. Hand-eye calibration using dual quaternions[J]. International Journal of Robotics Research, 1998, 18(3): 286-298.
- [11] Li H D, Hartley R, Kim J. A linear approach to motion estimation using generalized camera models[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- [12] Lébraly P, Royer E, Ait-Aider O, *et al.* Fast calibration of embedded non-overlapping cameras[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 221-227.
- [13] Kim J H, Chung M J. Absolute motion and structure from stereo image sequences without stereo correspondence and analysis of degenerate cases[J]. Pattern Recognition, 2006, 39(9): 1649-1661.
- [14] Horn B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision, 1987, 4(4): 629-642.
- [15] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.