

一种视觉靶标标定与位姿解算方法

黄智超¹,李泷果¹,李根²,齐凯¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学苏州研究院,江苏 苏州 215163)

摘要:视觉靶标是某种编码格式的固定视觉标志物。针对视觉靶标缺乏标定方法的问题,研究了视觉靶标的标定和标定误差评价方法,从而能够高精度地标定视觉靶标在空间中的位姿。基于上述标定方法,进一步地研究视觉靶标外参解算方法,通过递推最小二乘方法,优化误差函数求解。试验结果表明:利用此方法标定和解算视觉靶标的位姿精度高,能够满足工业机器人和移动机器人的位姿求解需求。

关键词:视觉靶标;激光跟踪仪;靶标标定

中图分类号:TH123 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0206-03

A Method of Visual Marker Calibration and Pose Calculation

HUANG Zhichao¹, LI Shuanggao¹, LI Gen², QI Kai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Suzhou Research Institute of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Suzhou 215163, China)

Abstract: Visual marker, being a fixed marker in a certain encoding format, lacks calibration of visual marker, the calibration method and calibration error evaluation method are studied for the pose with high accuracy. Based on the above methods, further research on the algorithm for solving external parameters of visual marker is carried out. The recursive least square method is applied to optimize the error function of the calibration. The experimental results show that the method can effectively meet the requirements of accurate positioning for the industrial robots and mobile robots.

Keywords: visual marker; laser tracker; target calibration

0 引言

随着数字测量技术的发展,视觉测量系统有精度高、应用范围广、设备性价比高等优点,在制造业中广泛应用^[1-2]。视觉靶标能够高精度解算与相机的位姿关系,从而在工业机器人、移动机器人等场景中,可以作为一种高精度位姿参照,提高机器人的定位精度。

视觉靶标主要有 QR 码、AR 码、April Tag 等多种不同形式。QR 码所载信息量过大导致定位标识符区域减少,限制了 QR 码在导航定位中的应用。AR 码设计应用于相机标定,优化了编码方案和读取方法^[3]。April Tag 在此基础上进一步优化,提供比 AR 码更准确的定位结果^[4]。上述编码有效提高机器人位姿校准精度,但在工业应用中,上述靶标需要预先进行标定。

本文设计视觉靶标工装,结合高精度测距设备激光跟踪仪来标定视觉靶标,使用布尔沙参数法,分析标定误差量。对于常用的 PNP 位姿解算方法,本文通过递推最小二乘方法进一步优化,使得相机接近并解算视觉靶标位姿时,精度更高。

1 视觉靶标标定

本文方法具体步骤为:1) 标定工装在激光跟踪仪

坐标系下位姿;2) 更换视觉靶标,以标定相机位姿;采用相机识别视觉靶球坐标,能够校准相机到激光跟踪仪坐标系的转换关系;3) 相机读取视觉靶标定位标识,解算视觉靶标坐标系在相机坐标系下的位姿关系;4) 视觉靶标存储世界位姿;5) 布尔沙参数法评价靶标标定偏差。

1.1 激光跟踪仪标定视觉靶标位姿

在视觉靶标工装上放置反射靶球,获取其在激光跟踪仪坐标系下位姿。更换视觉靶球,相机读取视觉靶球从而标定了相机在激光跟踪仪坐标系下位姿。此时识别视觉靶标定位,即可完成视觉靶标在空间中的定位(图 1)。

1.2 靶标标定误差评价

视觉靶标主要由激光跟踪仪确定标定(图 2)。靶球由激光跟踪仪测量时,存在测量误差,因而靶球的实测位置与理论位置可能不配准^[5]。该配准误差会传到后续相机读取视觉靶标的位姿计算中。为此,引入布尔沙其参数,评价靶标定位误差。其包含 3 个平移误差量、3 个旋转误差量以及 1 个比例因子的误差关系传递模型^[6]。

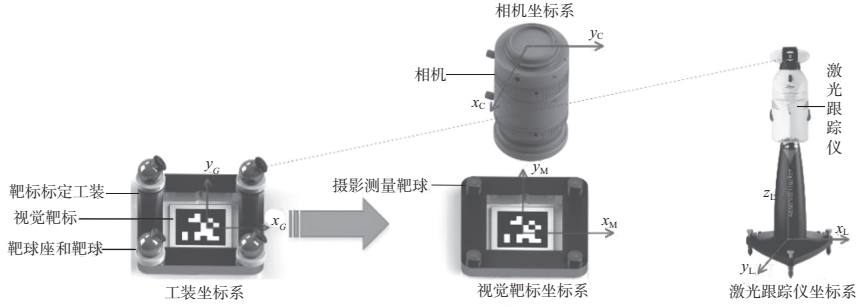


图1 视觉靶标标定方法图

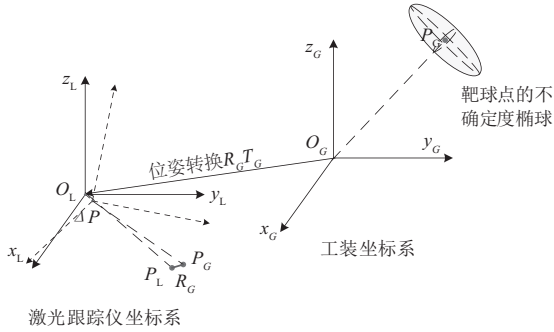


图2 T-MAC 激光跟踪系统图

引入布尔沙参数后,对每个靶球的测量模型可以构建为^[7]

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Z_G & Y_G \\ Z_G & 0 & -X_G \\ -Y_G & X_G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} + k_b \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: P_1 为理论靶球位姿; P_G 为实测靶球位姿; $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为平移量,即 ΔT ; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为旋转量,即 ΔR ; k_b 为比例因子。

构造最小二乘方程,即可求解七参数的最大或然解。

记所有靶球的实测数据均值为 \bar{P}_G , 靶球数为 N_G , 则所有靶球的配准误差可求解 R_G 。

$$R_G^2 = \frac{1}{N_G} \sum_{G=1}^{N_G} |k_b R_G (\bar{P}_G + \Delta P) + T_G - P_1|^2 \quad (2)$$

2 相机外参解算方法

2.1 外参粗略求解

在世界坐标系中,选取视觉靶标上一组特征空间点,靶标位姿为 P_{ri} , 其在相机焦距归一化成像平面的成像点可经相机内参矩阵求解:

$$P_{i,ci} = K^{-1} P_i \quad (3)$$

该点的世界坐标带入相机参数模型,解算空间点在相机坐标系下的坐标 P_{ci} :

$$\begin{cases} x_{ci} = {}^c n_{rx} x_{ci} + {}^c o_{rx} y_{ri} + {}^c p_{rx} \\ y_{ci} = {}^c n_{ry} x_{ri} + {}^c o_{ry} y_{ri} + {}^c p_{ry} \\ z_{ci} = {}^c n_{rz} x_{ri} + {}^c o_{rz} y_{ri} + {}^c p_{rz} \end{cases} \quad (4)$$

将相机坐标系下的坐标映射到归一化成像平面,整理得

$$\begin{cases} x_{ri}^c n_{rx} + y_{ri}^c o_{rx} - x_{1ci} x_{ri}^c n_{rz} - x_{1ci} y_{ri}^c o_{rz} + {}^c p_{rx} - x_{1ci}^c p_{rz} = 0 \\ x_{ri}^c n_{ry} + y_{ri}^c o_{ry} - y_{1ci} x_{ri}^c n_{rz} - y_{1ci} y_{ri}^c o_{rz} + {}^c p_{ry} - y_{1ci}^c p_{rz} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于 n 个已知空间点,则可以得到 n 组共 $2n$ 个方程。用矩阵表示方程关系,关系式中共有 9 个未知数。简化式(5)运算,得

$$A_1 H_1 + A_2 H_2 = 0 \quad (6)$$

式中: $H_1 = [{}^c n_{rx} \quad {}^c n_{ry} \quad {}^c n_{rz}]^T$; $H_2 = [{}^c o_{rx} \quad {}^c o_{ry} \quad {}^c o_{rz} \quad {}^c p_{rx} \quad {}^c p_{ry} \quad {}^c p_{rz}]^T$ 。 H_1 为单位向量,因而有模长限定。当特征点数量多于 4 时,函数为超定方程,因而构造优化函数求解。优化目标为式(7),可求偏导得解。

$$F = \|A_1 H_1 + A_2 H_2\|^2 + \lambda(1 - \|H_1\|^2) \quad (7)$$

2.2 递推最小二乘优化

对上述构造的误差函数,可通过构造递推最小二乘算法进一步优化。

$$\begin{cases} K_{N+1} = P_N \varphi_{N+1} (\rho^2 I + \varphi_{N+1}^T P_N \varphi_{N+1})^{-1} \\ \Theta^{N+1} = \Theta_N + K_{N+1} (Y_{N+1} - \varphi_{N+1}^T \Theta_N) \\ P_{N+1} = (P_N - K_{N+1} \varphi_{N+1}^T P_N) / \rho^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: K 为加强系数,用于放大递推过程中的姿态误差,从而最大限度调整姿态误差; φ_i, Y_i, Θ 为方向向量与平移向量按式(7)组合; ρ 为遗忘因子,防止陷入局部极值。

推最小二乘法的初值由下式赋值:

$$P_N = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1}, \Phi_N = \begin{bmatrix} \varphi_1^T \\ \vdots \\ \varphi_N^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

而 Θ 的初值由误差函数优化解得

$$\Theta = [H_1 \quad H_{2\text{row}(1,3)} \quad H_1 \times H_{2\text{row}(1,3)} \quad {}^c p_r = H_{2\text{row}(4,6)}] \quad (10)$$

当递推收敛时, Θ 的值可以精确获得,计收敛时 Θ 变为 Θ^∞ 。因为视觉靶标平面中特征点多数,且必定不位于同一平面,因而方程一定有解。

$${}^c M_r = \Theta^\infty =$$

$$\begin{bmatrix} \Theta_{\text{col}(1,3)} & \Theta_{\text{col}(4,6)} & \Theta_{\text{col}(1,3)} \times \Theta_{\text{col}(4,6)}^T & \Theta_{\text{col}(7,9)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 试验验证与数据分析

3.1 试验设置

本试验在标定好视觉靶标后,相机拍摄 30 组视觉靶标数据和视觉靶球数据,比较激光跟踪仪的标定位姿与相

机外参解算之间的偏差。

本试验验证系统由激光跟踪仪(型号:Leica901,精度: $(\pm 15+6)\mu\text{m}/\text{m}, 0.01^\circ$)、视觉相机(型号:MER2-503-36U3M/CL,精度:100 lp/mm)和视觉靶标(型号:April Tag,尺寸:50×50 mm)组成(图3)。



图3 摄影测量试验现场

3.2 位姿解算试验数据

测量30组视觉靶标在标定系统的标定与相机位姿解算的偏差。视觉靶标位姿不变动,多次摆放标定工装和位姿解算。将多次标定的平均值确定为位姿的真实值,测量值为视觉靶标位姿解算算法求解的偏差,数据如表1所示,处理的拟合数据如图4所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

表1 视觉靶标位姿解算偏差量 单位:mm

偏差类型	均值	标准差
标定偏差	0.000 0	0.010 7
解算偏差	0.013 6	0.038 4

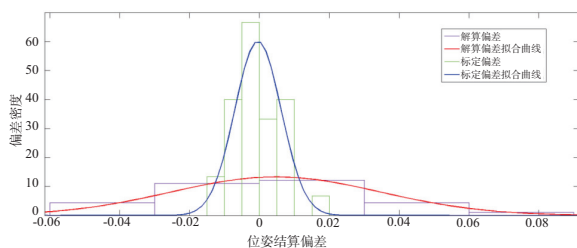


图4 视觉靶标位姿偏差分布

标定偏差以多次标定的均值为真值,比较其数据偏离的程度,标准差为0.010 7 mm,表明了标定程序的有效性。以标定均值为依据,分析位姿解算数据的偏离程度,解算结果显示偏差均值为0.013 6 mm,位姿解算的标准差为0.038 4 mm。数据表明,位姿校准精度较高,能够满足通用的工业机器人和移动机器人位姿解算的需求。

4 结语

针对视觉靶标缺乏标定的问题,提出一种基于激光跟踪仪和工装的视觉靶标标定方法。该方法通过激光跟踪标定工装坐标,而后视觉靶标扫描视觉靶球,进而标定靶标位姿。该系统之后还可以优化视觉靶标外参解算,进一步提高位姿解算精度。试验结果表明:利用本文方法定位视觉靶标和解算视觉靶标位姿,位姿解算精度高,有效满足了工业机器人和移动机器人的位姿求解需求。

参考文献:

- [1] 王梅,牛润军. 数字化测量技术在飞机外形检测方面的应用研究[J]. 航空制造技术,2013,56(20):109-112.
- [2] JING X S,ZHANG C Y,SUN Z L,et al. The technologies of close-range photogrammetry and application in manufacture [C]//Advances in Computer Science Research," Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation. Shenzhen, China. Paris, France: Atlantis Press, 2015.
- [3] FIALA M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques [C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, CA, USA: IEEE, 2005: 590-596.
- [4] OLSON E. AprilTag: a robust and flexible visual fiducial system [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011: 3400-3407.
- [5] 葛成鹏. 大尺寸测量场不确定度分析与优化[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [6] 李琦. 飞机大型结构件自动测量技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [7] 朱小美,张官进,朱楠. 基于MATLAB的布尔莎模型七参数解算实现[J]. 北京测绘,2015(5):61-65.

收稿日期:2021-12-31