

引文格式: 孔军, 李强, 王陆明, 等. 面向装配对接的双视觉测量试验系统优化标定方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 14-20.

KONG Jun, LI Qiang, WANG Luming, et al. Optimal calibration method of dual-vision measurement experimental system for assembly docking[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 14-20.

面向装配对接的双视觉测量试验系统优化 标定方法*

孔 军¹, 李 强¹, 王陆明², 刘昊瞳², 王宝俊², 崔海华²

(1. 北京交通大学, 北京 100044;

2. 南京航空航天大学, 南京 211106)

[摘要] 针对航空航天、轨道交通零部件装配对接测量与定位过程, 为解决测量视场范围大、多种测量设备组合使用步骤烦琐等问题, 对面向装配对接的双视觉测量系统标定方法进行了研究。通过构建双视觉测量系统模型, 分析系统间各相机参数的关系, 在单个双目系统中引入闭环约束, 结合 LM 算法对单个双目系统中的相机参数进行优化, 另外采用改进的 EPnP 算法对双视觉系统进行标定, 并结合自行设计的双面一维靶标完成了双视觉系统的全局标定和坐标转换。模拟对接试验的结果表明, 该优化标定算法在精度上优于传统算法, 并在使用过程中简化测量步骤, 提高测量效率。

关键词: 装配对接; 双视觉测量系统; LM 算法; 标定方法; EPnP 算法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.014



孔 军

正高级工程师, 博士研究生, 研究方向为机车车辆设计和先进制造。

在航空航天及轨道交通零部件装配对接领域中, 由于零部件刚性弱、易变形等特性, 对定位和装调精度提出了较高要求。视觉方式作为常见的测量检测、定位引导和精度验证的手段, 因不需要放置靶球和接收器, 并且操作简便, 被广泛应用^[1]。但因为零部件对接过程中整体测量范围大, 采用单一测量方式或单台设备仪器难以满足测量要求, 因此由多种(台)仪器组成的集成测量机制逐渐发展为研究重点。多测量仪器组合极具优势, 可以兼顾测量精度和效率, 有效解决被测物整体尺寸大的问题, 同时具有配置灵活、柔性和适应性好的特点, 还可以消除转站误差, 提升整体测量精度^[2]。

在双目视觉测量技术发展趋于成熟的基础上, 基于多个相机组合的测量技术逐渐成为研究热点。石岩青等^[3]对目前相机标定所采用的方法进行了详细的论述。Wang 等^[4]针对单摄像机视野有限的问题, 提出了基于多组双目视觉的汽车纵梁装配孔测量方法。别梓钜等^[5]在传统平差优化方法中引入比例尺, 从而提高相机三维重建的精度。刘岩等^[6]提出一种基于视觉测量的目标定位技术, 从而提高了相机的标定精度。Liu 等^[7]提出使用阵列视觉测量技术进行大型飞机零件的装配的方法。王乾等^[8]提出了一种多双目立体视觉测量系统并借助三坐标测量机研究了其综合标定方法。天津大学的

* 基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2006100)。

吴贤权等^[9]为了解定向天线位姿精密测量中存在的问题,研究了一种多目视觉的位姿测量方法。对于多目测量系统,国内外学者虽然已有一定的研究基础,但在多目系统的高精度高效率标定方面缺乏系统研究,目前学者大多采用第三方设备对多目系统进行标定,无法同时兼顾精度和效率。

针对航空航天及轨道交通车辆零部件装配对接过程中的实际环境与条件,本文基于视觉技术提出了一种双视觉测量系统,以满足装配对接过程中测量空间范围大的要求。基于单个双目系统搭建双视觉系统模型,对单个双目系统引入闭环约束从而实现相机内外参数的优化,提高双视觉测量系统的整体标定精度。研究基于多点透视原理的双视觉系统全局标定方法,确保标定的高精度和高效率。最后通过实际试验,验证本文所研究的双视觉系统在指导实际装配对接过程的可行性。

1 双视觉系统模型构建

在单个双目视觉模型的基础上,本文构建面向轨道交通车辆零部件装配对接的双视觉系统模型。双视觉系统由两套独立的双目视觉系统组合而成,两套双目系统对向放置,用以扩大测量视场,双视觉系统模型如图1所示。双视觉系统模型的构建是为了将两套独立的双目视觉系统组合成一个整体,求解不同系统相机间的位姿转换关系。该模型用来描述两套视觉系统组合后的空间位姿关系,在模型构建时首先利用Zhang氏标定法^[10]得到单个双目系统的初始内外参数,然后对单个双目系统引入闭环约束从而实现单个双目系统中相机内外参数的优化。最后将两套双目系统的内外参数相结合,得到双视觉系统中4个相机间的位姿关系,完成双视觉系统的整体构建。

在图1中,相机之间的关系为

$$W_3 = R_{32}W_2 + T_{32} \quad (1)$$

$$W_1 = R_{10}W_0 + T_{10} \quad (2)$$

式中, W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_3 分别表示4个相机坐标系。

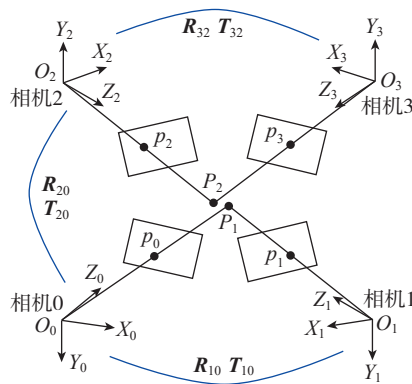
本文中不同系统间的位姿关系,即 R_{20} 和 T_{20} 并不是直接获取的,而是借助双面一维靶标进行标定得到的。两个双目视觉系统是对向放置的,无法直接获得同一标定物的图像,因此需要通过双面标定物间接获取,如图2所示,在双视觉系统模型所有的坐标系中,靶标1和靶标2组成双面标定物,二者的关系经过事先设计和标定,只存在平移关系 T_m 而不存在旋转关系。两个靶标坐标系 W_{m1} 和 W_{m2} 存在如下关系:

$$W_{m2} = W_{m1} + T_m \quad (3)$$

通过标定方法可以获得每个系统和其对应的靶标之间的关系,即

$$\begin{cases} W_0 = R_1W_{m1} + T_1 \\ W_2 = R_2W_{m2} + T_2 \end{cases} \quad (4)$$

双视觉系统以相机0所在的相机坐标系 W_0 为基准坐标系(式(1)~式(4)),其他相机坐标系均可转至



注: P_1 、 P_2 分别为第1、第2个双目系统测量的空间点; p_0 、 p_1 为第1个双目系统中的左相机、右相机的图像平面的投影; p_2 、 p_3 为在第2个双目系统中的左相机、右相机的图像平面的投影; R 、 T 表示相机坐标系与相对相机坐标系的旋转矩阵和平移向量。

图1 双视觉系统模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of dual-vision system model

基准坐标系下,即

$$\begin{cases} W_1 = R_{10}W_0 + T_{10} \\ W_2 = R_2R_1^{-1}W_0 - R_2R_1^{-1}T_1 + R_2T_m + T_2 \\ W_3 = R_{32}R_2R_1^{-1}W_0 + R_{32}(-R_2R_1^{-1}T_1 + R_2T_m + T) + T_{32} \end{cases} \quad (5)$$

在后续使用双视觉系统进行测量时,每套独立的双目视觉系统可分别获得各自测量视场内的坐标点数据,利用式(5)中的位姿关系,可将不同坐标系下的数据转换到基准坐标系下,进而完成双视觉系统的全局坐标转换。

2 闭环约束优化相机标定参数

在对双视觉系统标定之前需要先对单个双目视觉系统进行标定,首先通过Zhang氏标定法获取双目的内外参数,然后对获取的内外参数进行优化,从而提高相机的标定精度。在Zhang氏标定法模型中,将最小化标定板圆心在相机成像的投影点与实际成像点之间的重投影误差和作为目标优化函数,该目标仅仅优化了单目相机的标定,而视觉系统中所用的为双目相机,因此需要将双目中的约束条件加入。单个双目视觉系统闭环约束模型如图3所示。

设圆阵列标定板上一点 Q , 其对

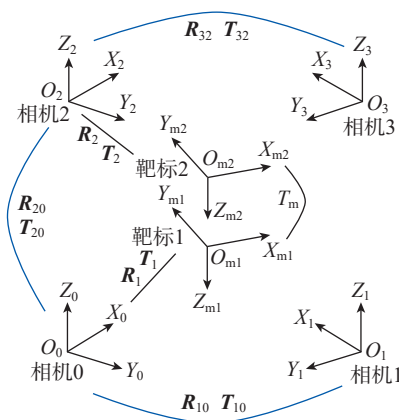


图2 双视觉系统模型中坐标系及转换关系
Fig.2 Coordinate system and transformation relationship in dual-vision system model

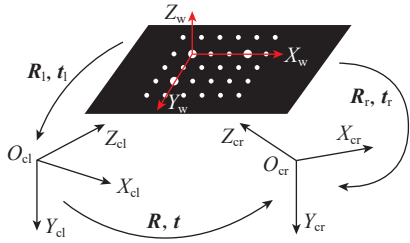


图3 单个双目视觉系统闭环约束模型
Fig.3 Closed-loop constraint model of single binocular vision system

应的闭环重投影点为 Q' , 将最小化标定板圆心与其闭环重投影点误差和作为第3个目标优化函数, 使用 LM (Levenberg-Marquardt) 算法迭代求解优化后的相机内参、外参与畸变参数。左、右相机及其双目之间的目标函数为

$$\begin{cases} F(A, k_1, k_2, k_3, l_1, l_2) = \min \sum_{i=1}^{n'} \sum_{j=1}^m \|\tilde{q}_l^{i,j} - q_l^{i,j}\|^2 \\ F(A, k_1, k_2, k_3, l_1, l_2) = \min \sum_{i=1}^{n'} \sum_{j=1}^m \|\tilde{q}_r^{i,j} - q_r^{i,j}\|^2 \\ F(A, k_1, k_2, k_3, l_1, l_2, \mathbf{R}, \mathbf{t}) = \min \sum_{i=1}^{n'} \sum_{j=1}^m \|\mathcal{Q}^{i,j} - \mathcal{Q}'^{i,j}\|^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, A 为相机内参; k_1, k_2, k_3 为径向畸变参数; l_1, l_2 为切向畸变参数; \tilde{q}_l, q_l 分别为空间中标定板圆心在左相机成像的投影点与实际成像点; \tilde{q}_r, q_r 分别为空间中标定板圆心在右相机成像的投影点与实际成像点; n' 为拍摄图片的数量; m 为选取的空间标定板圆心个数。

经过上述两个步骤可标定出单个双目系统高精度的相机内参、外参和畸变参数。

3 双视觉系统标定原理

对于多目视觉测量系统, 目前还没有完善的方法标定出不同相机间的坐标转换关系。本文引入 PnP (Perspective n Points, n 点透视) 问题的研究思路, 采用一种较为高效的 EPnP (Efficient PnP) 算法对双视觉

系统进行标定。

PnP 问题是求解 3D-2D 点对运动匹配的过程, 其目的是通过计算二维和三维之间的投影关系获取物体在空间中的位姿, 途径是利用 N 个空间点与图像平面中对应的 N 个图像点^[11]。将其应用到双视觉系统的标定中, 可以获取每个相机与对应标定物间的位姿关系, 再解算出各个相机间的位姿转换关系。EPnP 算法集高效、高精度、无须迭代求解、速度快、抗干扰能力强等诸多优点于一身, 是所有求解 PnP 问题及相机位姿估计算法中较为高效的方法^[12], 其核心思想是通过一组虚拟的控制点加权表示世界中的三维特征点坐标。控制点的数量一般取 4 个, 且要求所取的 4 个控制点不在同一平面上。由于将三维点表示为 4 个控制点的组合, 优化也只针对 4 个控制点, 所以 EPnP 算法求解速度很快。在求解时该算法最多考虑了 4 个奇异向量, 因此精度也很高。

3.1 三维空间点线性表示

本文中, 三维空间点在世界和相机两个坐标系下的坐标分别以 w 和 c 来表示, P_i^w ($i=1, 2, \dots, n$) 为世界坐标系下的空间点; P_i^c ($i=1, 2, \dots, n$) 为相机坐标系下的空间点; c_j^w ($j=1, 2, 3, 4$) 表示 4 个控制点在世界坐标系下的坐标; c_j^c ($j=1, 2, 3, 4$) 表示 4 个控制点在相机坐标系下的坐标。这里的 4 种坐标类型 P_i^w, P_i^c, c_j^w 和 c_j^c 均为非齐次坐标。

以 4 个控制点来加权表示空间点在世界坐标系下的坐标, 即

$$P_i^w = \sum_{j=1}^4 \alpha_j c_j^w, \sum_{j=1}^4 \alpha_j = 1 \quad (7)$$

式中, α_j 为齐次重心坐标 (Homogeneous barycentric coordinates, HB)^[13]。控制点不在同一平面的前提下时, α_j ($j=1, 2, 3, 4$) 是唯一确定的。同样, 在相机坐标系中也存在这样的加权关系:

$$P_i^c = \sum_{j=1}^4 \alpha_j c_j^c \quad (8)$$

假设相机的外参为 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$, 那么虚拟控制点 c_j^w 和 c_j^c 之间存在如下关系:

$$c_j^c = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \begin{bmatrix} c_j^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

考虑到 EPnP 算法将空间点坐标表示为控制点坐标的加权和, 将式 (9) 代入式 (8), 可得:

$$P_i^c = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \begin{bmatrix} P_i^w \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_j c_j^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

进一步有:

$$P_i^c = [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_j c_j^w \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_j \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^4 \alpha_j [\mathbf{R} \ \mathbf{T}] \begin{bmatrix} c_j^w \\ 1 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^4 \alpha_j c_j^c \quad (11)$$

结合式 (5), 可得 4 个控制点的约束方程组:

$$\begin{bmatrix} P_i^w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \alpha_{i1} \\ \alpha_{i2} \\ \alpha_{i3} \\ \alpha_{i4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^w & c_2^w & c_3^w & c_4^w \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{i1} \\ \alpha_{i2} \\ \alpha_{i3} \\ \alpha_{i4} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, \mathbf{C} 为控制点坐标所组成的齐次矩阵。

式 (12) 共有 4 个方程, 同时有 4 个未知数, 因此该方程组能够求得精确解。另外, 式 (12) 中 $[P_i^w \ 1]^T$ 和 $[c_j^w \ 1]^T$ 都是齐次坐标, 其本质就是三维空间点的齐次坐标是控制点齐次坐标的线性组合。从上述分析中也可以得知 HB 坐标的计算方法为

$$\begin{bmatrix} \alpha_{i1} \\ \alpha_{i2} \\ \alpha_{i3} \\ \alpha_{i4} \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} P_i^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 控制点选择

为了整体算法的稳定性, 采用如

下的策略进行控制点的选取。

三维空间点集为 $\{P_i^w\}$ 其中, $i=1, 2, \dots, n$, 选择所有三维空间点的重心为第 1 个控制点, 则有

$$c_1^w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^w \quad (14)$$

进而得到矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} P_1^{wT} - c_1^{wT} \\ \dots \\ P_n^{wT} - c_1^{wT} \end{bmatrix} \quad (15)$$

记 $B^T B$ 的 3 个特征值为 $\lambda_j (j=1, 2, 3)$, 对应的特征向量为 η_j , 其余 3 个控制点的计算公式为

$$c_j^w = c_1^w + \eta_{j-1} \sqrt{\frac{\lambda_{j-1}}{n}} \quad (16)$$

式中, $j=2, 3, 4$ 。

上述操作步骤可找到空间所有点的重心以及 3 个主方向。

图 4 是 EPnP 算法控制点的选取实例, 其中蓝色的点是三维坐标点; 红色的是 4 个控制点。

3.3 求解控制点在相机坐标系下的坐标

设 M 是相机的内参矩阵, 可以通过双目系统标定精确获得。 $p_i(u_i, v_i)$ 是空间点 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 在相机成像平面上的投影点, 则根据相机投影模型和式 (8) 有如下关系:

$$s_i \begin{bmatrix} p_i \\ 1 \end{bmatrix} = M P_i^c = M \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} c_j^c \quad (17)$$

式中, s_i 为比例因子。

将 $c_j^c = (x_j^c, y_j^c, z_j^c)^T$ 代入上式, 并且将内参矩阵写成焦距 f_u, f_v 和光心 (u_c, v_c) 的形式, 则上式可改写为

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_c \\ 0 & f_v & v_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \begin{bmatrix} x_j^c \\ y_j^c \\ z_j^c \end{bmatrix} \quad (18)$$

上述矩阵方程消除最后一行可以得到两个方程:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} f_u x_j^c + \alpha_{ij} (u_c - u_i) z_j^c = 0 \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} f_v y_j^c + \alpha_{ij} (v_c - v_i) z_j^c = 0 \end{cases} \quad (19)$$

一个空间特征点可以得到两个约束方程, 将 N 个空间中的测量点的约束方程联合, 可以得到一个线性方程组, 即

$$H X = 0 \quad (20)$$

式中, H 为 N 个空间中测量点的系数矩阵。 $x = (c_1^{cT}, c_2^{cT}, c_3^{cT}, c_4^{cT})^T$, 即控制点在相机坐标系下的坐标。

由于 x 在 H 的右零空间中, 所以有

$$x = \sum_{i=1}^N \beta_i \xi_i \quad (21)$$

式中, ξ_i 为 H 的右奇异向量; β_i 为右奇

异向量的线性组合系数。其中 ξ_i 对应的右奇异值为 0, 所以此时 ξ_i 就是矩阵 $H^T H$ 特征值为 0 所对应的特征向量。而计算 $H^T H$ 的复杂度为 $O(n)$, 因此算法的整体复杂度为 $O(n)$ 。

接下来将求解式 (21) 中的系数 β_i , 文献 [13] 中提出求解系数 β_i 的情况与空间中测量点对的数量、控制点的选取、相机焦距和噪声有关, 本文不予赘述。利用文献 [13] 中的方法解算 β_i 后, 控制点在相机坐标系下的坐标 c_j 即可计算, 最后求解 $[R|T]$ 。

3.4 求解双视觉系统外部参数

经由控制点 c_j 恢复得到空间点在相机坐标系下的坐标 P_i^c , 就可以知道所有的 3D-3D 匹配, 从而进行求解。

首先计算质心坐标:

$$\begin{cases} P_c^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^c \\ P_c^w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^w \end{cases} \quad (22)$$

再去除质心:

$$\begin{cases} P_c^c = \begin{bmatrix} (P_1^c)^T - (P_c^c)^T \\ \dots \\ (P_n^c)^T - (P_c^c)^T \end{bmatrix} \\ P_c^w = \begin{bmatrix} (P_1^w)^T - (P_c^w)^T \\ \dots \\ (P_n^w)^T - (P_c^w)^T \end{bmatrix} \end{cases} \quad (23)$$

令矩阵 $W = (P_c^c)^T P_c^w$, 对其进行 SVD 分解得到矩阵 U 和 V , 即

$$[U \Sigma V] = \text{SVD}(W) \quad (24)$$

从而旋转矩阵可以表示为 $R = UV^T$ 。需要注意的是, 如果 $|R| < 0$, 可令 R 的第二行取相反数, 即 $R(2, :) = -R(2, :)$ 。

得到旋转矩阵后, 再计算平移向量:

$$T = P_c^c - R P_c^w \quad (25)$$

其中 β 有 4 种情况的解, 因此 $[R|T]$ 也需要计算 4 次, 其中重投影误差最小的就是算法最优解。

至此, 利用 EPnP 算法已经可以估计出单个相机的位姿。本文在利

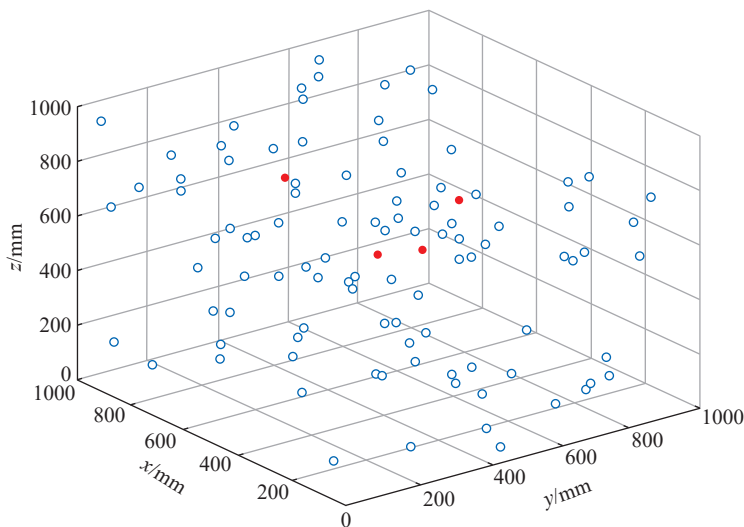


图 4 控制点选取实例
Fig.4 Example of control point selection

用 EPnP 算法估计单个相机位姿时将世界坐标系固定在靶标上,从而获得的位姿即为相机和靶标之间的关系。但本文的双视觉系统之间无共同视场,无法获取同一个标定物的图像,无法直接通过标定方法获取不同相机间的关系。因此本文设计了具有两个相对面的一维靶标,一维靶标两个面之间的关系固定,并结合双视觉系统的模型关系式(式(5))解算出不同系统相机间的位姿关系,进而对本文相对布置的双视觉系统进行快速有效标定。

4 双视觉系统标定试验与结果分析

本文所研究的双视觉系统标定算法已使用 C++ 编程语言完成实现。为验证所研究的算法的可行性和有效性,对双视觉系统进行了标定试验。

标定试验环境和条件如下:双视觉系统共 4 个相机采用德国映美精 CMOS 工业相机,型号为 DMK 33GX264,相机分辨率为 1920 pixel × 1080 pixel,镜头焦距为 8 mm,双视觉系统的测量距离约为 1.5 m。本文采用的单个双目标定的平面靶标如图 5 所示,其长度为 1 m,宽度为 0.8 m。双视觉系统标定采用的双目一维靶标如图 6 所示,其每面设置有 6 个环形编码标志点。采用编码点的原因是方便与环境中的噪声进行区分,易于识别和匹配。

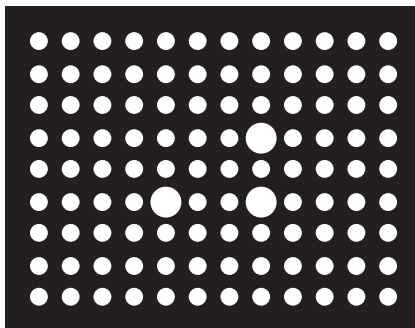


图 5 平面靶标
Fig.5 Plane target

首先验证本文标定算法的性能。通过采用不同方法对单个双目系统进行位姿估计,比较分析本文算法和传统位姿估计算法直接线性变换(Direct linear transform, DLT)、P3P 在位姿估计精度和速度上的差异,从而验证本文算法的可靠性。

本文算法对单个双目系统进行位姿估计然后通过相机优化模型引入闭环约束从而对相机的内外参数进行优化。单个双目系统内外参数优化前后的结果如表 1 所示。可知,通过在单个双目系统的标定过程中引入闭环约束条件然后结合 LM 算法进行优化,大大提高了相机的标定的精度。

比较不同算法位姿估计的精度和速度。由于在实际试验过程中,相机是随意放置的,无法获取相机位姿

参数的真实值,因此使用特征点的二维重投影误差间接反映各种算法的性能,即使用各种算法计算相机的位姿参数后,以位姿估计参数为输入计算特征点的二维平面坐标,从而反映位姿参数求解的精度。特征点的重投影坐标分为左相机和右相机,且对所有的重投影坐标求解均方根误差,不同算法的具体结果如表 2 所示。可知,在位姿估计的精度上,本文算法和传统位姿估计算法相比有着很大优势,能有效提高相机位姿估计的精度;而在运算时间上,虽然本文算法略有不足,但由于本文特征点数量较少,3 种算法的运算时间均在毫秒级,因此当特征点数量较少时,本文算法在运算速度上的劣势可以忽略不计。

在得到双视觉系统的位姿参数

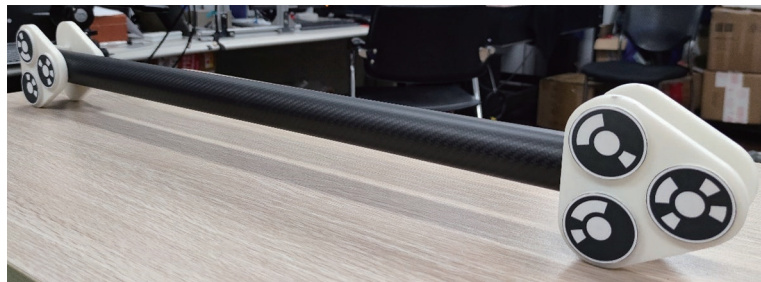


图 6 双面一维靶标
Fig.6 Double sided one-dimensional target

表 1 相机重投影误差优化前后对比

Table 1 Comparison of camera reprojection error before and after optimization

| 优化 | 左相机/pixel | 右相机/pixel |
|-----|-----------|-----------|
| 优化前 | 0.109 | 0.095 |
| 优化后 | 0.071 | 0.067 |

表 2 不同算法位姿估计性能比较

Table 2 Comparison of pose estimation performance of different algorithms

| 性能参数 | 本文算法 | DLT | P3P |
|----------------|-------|-------|-------|
| 左相机均方根误差/pixel | 0.067 | 0.228 | 0.169 |
| 右相机均方根误差/pixel | 0.071 | 0.205 | 0.138 |
| 运算时间/s | 0.027 | 0.014 | 0.019 |

后,对一维靶标上的特征点进行三维重建,计算一维靶标两个面间对应点的距离,并与一维靶标两个面间对应点距离真值 75 mm 比较,以此验证双视觉系统的测量精度。对一维靶标两个面的特征点共测量重建 10 次,重建效果和误差结果分别如图 7 和表 3 所示。可知,测量并重建一维靶标两个面间对应特征点的距离误差最大为 0.135 mm,最小为 0.077 mm,平均值为 0.110 mm,均方根误差为 0.111 mm。因此,结合单视觉系统和双视觉系统的标定精度,在本文的视场范围下,视觉测量系统的测量误差约为 0.1 mm,在大视场测量情况下具备较高的标定精度。

通过搭建如图 8 所示的试验场景来验证本文算法在双视觉系统实际使用中的有效性。在搭建的试验场景中包括双视觉测量系统、调姿机构、待对接舱段以及固定支架。双视觉测量系统中的双目系统 1 和双

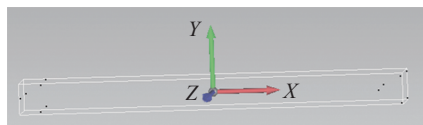


图 7 双面一维靶标重建效果

Fig.7 Reconstruction effect of double-sided one-dimensional target

表 3 双面一维靶标重建误差

Table 3 Reconstruction error of double-sided one-dimensional target

| 序号 | 距离/mm | 误差/mm |
|----|--------|--------|
| 1 | 74.903 | -0.097 |
| 2 | 74.876 | -0.124 |
| 3 | 75.117 | 0.117 |
| 4 | 74.865 | -0.135 |
| 5 | 75.086 | 0.086 |
| 6 | 75.105 | 0.105 |
| 7 | 75.077 | 0.077 |
| 8 | 75.120 | 0.120 |
| 9 | 74.898 | -0.102 |
| 10 | 75.133 | 0.133 |

目系统 2 分别布置在距离待对接舱段 1.5 m 处;待对接舱段分为移动舱段和固定舱段,其中,移动舱段的外径为 480 mm,壁厚为 5 mm,长度为 300 mm;固定舱段的外径为 460 mm,壁厚为 5 mm,长度为 300 mm,在舱段表面有一圈特征孔并且在特定位置有一周向定位孔。在试验前将移动舱段固定在调姿机构末端,固定舱段放置在固定支架上,两舱段的端面最大间距未超过调姿机构运动的有效行程。

利用双视觉系统分别测量舱段零部件的两侧,通过本文的标定算法可以将两个双目重建出的标志点三维坐标统一到一个坐标系下。然后通过标志点三维坐标拟合出舱段零部件的轴线,利用舱段零部件轴线进行舱段装配对接,两舱段零部件之间的初始状态下的中轴线的夹角为 10.051° ,通过测量调整后中轴线夹角为 0.096° ,通过对搭建的零部件对接场景,充分验证了本文算法在实际使用中的有效性。

5 结论

(1) 本文为解决大视场测量问题,搭建了一套双视觉测量试验系统,并且在单个双目系统中引入闭环约束,利用 LM 算法对相机参数进行优化,左相机重投影误差从 0.109 pixel 降到 0.071 pixel,右相机

重投影误差从 0.095 pixel 降到 0.067 pixel,提高了单个双目系统的标定精度,进而提高了双视觉系统整体的标定精度。

(2) 本文利用 EPnP 算法对搭建的视觉测量系统进行标定,然后对标定的双视觉系统的测量精度进行验证,试验结果显示本文算法的测量精度约为 0.1 mm。在最后的实际应用验证下,初始状态下两个缩比试验筒段零部件中轴线的夹角为 10.051° ,通过测量调整后中轴线夹角为 0.096° ,验证了本文方法在模拟试验条件下的有效性。

参考文献

[1] 刘渊,费允锋,宋银灏,等.航天器舱段自动对接研究进展及关键技术分析[J].兵器装备工程学报,2018,39(6):8-13.

LIU Yuan, FEI Yunfeng, SONG Yin hao, et al. Research on key problems of automatic docking technology for spacecraft[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(6): 8-13.

[2] 于浩,杜福洲.基于组合测量的大尺度产品柔性检测技术[J].计算机集成制造系统,2019,25(5):1037-1046.

YU Hao, DU Fuzhou. Flexible inspection technology for large-scale product based on combined measurement[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(5): 1037-1046.

[3] 石岩青,常彩霞,刘小红,等.面阵相机内外参数标定方法及进展[J].激光与光电子学进展,2021,58(24):9-29.

SHI Yanqing, CHANG Caixia, LIU Xiaohong, et al. Calibration methods and progress

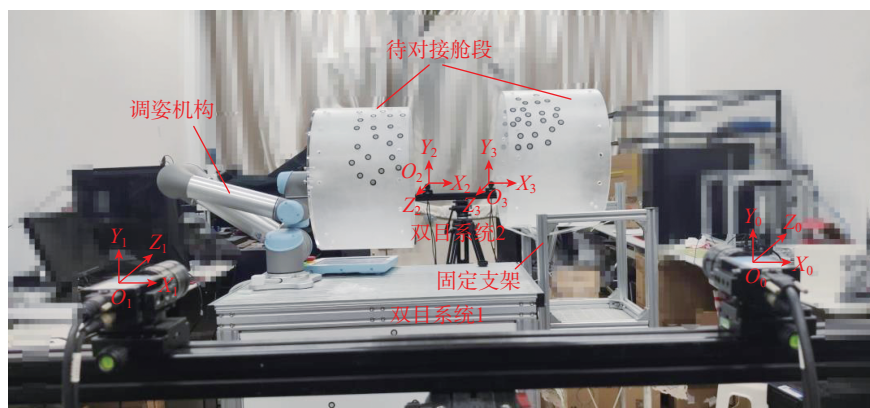


图 8 现场装配示意图

Fig.8 Schematic diagram of field assembly

for internal and external parameters of area-array camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 9–29.

[4] WANG L D, WANG H, SUN Z P, et al. Auto rack girders assembly holes measurement based on multi-camera vision[C]//International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety. Singapore: Springer, 2019: 299–307.

[5] 别梓钊, 张瑞, 李维诗. 多目视觉测量系统的光束法平差改进[J]. *计测技术*, 2021, 41(4): 23–27.

BIE Zifan, ZHANG Rui, LI Weishi. Improvement of bundle adjustment in multiocular vision measurement systems[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41(4): 23–27.

[6] 刘岩, 雷柏平, 范斌, 等. 基于视觉测量的目标定位技术及结构参数优化[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 300–308.

LIU Yan, LEI Boping, FAN Bin, et al. Target positioning technology and its structural parameter optimization based on vision measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2):

300–308.

[7] LIU Q, YAN Y R, CAO L L. Computer visual measurement technology and algorithm simulation for the assembly of large aircraft parts[J]. *Manufacturing Technology*, 2016, 16(3): 538–543.

[8] 王乾, 陈晓波, 吴卓琦, 等. 内置零件装配质量的多目视觉测量标定技术[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2015, 41(4): 421–427.

WANG Qian, CHEN Xiaobo, WU Zhuoqi, et al. Calibration of multi-binocular vision measurement of the internal part assembly quality[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2015, 41(4): 421–427.

[9] 吴贤权, 尹仕斌, 任永杰, 等. 多目视觉定向天线位姿测量[J]. *自动化与仪器仪表*, 2019(5): 1–6.

WU Xianquan, YIN Shibin, REN Yongjie, et al. Pose measurement of directional antenna based on multi-vision[J]. *Automation & Instrumentation*, 2019(5): 1–6.

[10] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on*

Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330–1334.

[11] 邓琳蔚, 王治, 张梦梦, 等. 一种基于光束平差法的相机标定方法[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(2): 8–13.

DENG Linwei, WANG Zhi, ZHANG Mengmeng, et al. A camera calibration method based on beam adjustment method[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(2): 8–13.

[12] ZHANG H J, ZHI X, LAO D B, et al. Monocular vision measurement system based on EPnP algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 517005.

[13] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155–166.

通讯作者: 李强, 教授, 主要从事轨道车辆结构的疲劳、断裂、可靠性等研究。

Optimal Calibration Method of Dual-Vision Measurement Experimental System for Assembly Docking

KONG Jun¹, LI Qiang¹, WANG Luming², LIU Haotong², WANG Baojun², CUI Haihua²

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Aiming at the measurement and positioning process of assembly and docking of aerospace and rail transit vehicle parts, in order to solve the problems of large measurement field range and complicated use of multiple measurement equipment combination, the calibration method of dual-vision measurement system facing assembly and docking was studied. By constructing the model of the dual-vision measurement system, analyzing the relationship between the camera parameters between the systems, introducing closed-loop constraints and LM algorithm to optimize the camera parameters in the single binocular system, and using the improved EPnP algorithm to calibrate the dual-vision system, and combining the self-designed double-sided one-dimensional target to complete the global calibration and coordinate conversion of the dual-vision system. The simulation docking experiment results show that the optimized calibration algorithm is superior to the traditional algorithm in accuracy, and simplifies the measurement steps and improves the measurement efficiency in the process of use.

Keywords: Assembly docking; Dual-vision measurement system; LM algorithm; Calibration method; EPnP algorithm

(责编 七七)