

机械臂双目视觉系统内外参高精度标定

岳丽清, 贾馨, 苗洋, 刘辉, 武文晋, 隋清

(北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094)

摘要: 在空间站机械臂中, 双目视觉系统作为其重要组成部分, 能够引导机械臂自主完成对目标的定位和捕获。内外参标定技术是双目相机高精度获取合作目标位置、方向等运动信息进而进行三维重建的首要前提和重要保障。文中提出了一种基于光束法平差算法的双目视觉系统内外参标定技术, 采用三维靶标场作为标定目标, 并将高精度测角设备经纬仪作为精测基准, 通过坐标转换解算分步得到相机的内、外参数。实验表明, 该方法标定的相机内参重投影误差小于 0.5 个像元, 外参测试误差为 ± 0.19 mm, 有较高的测试精度和鲁棒性, 为机械臂实施视觉闭环自主捕获合作目标提供可靠依据。

关键词: 双目视觉系统; 内外参; 光束法平差; 空间关系

中图分类号: V443.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200525

High precision calibration for internal and external parameter of manipulator binocular vision system

Yue Liqing, Jia Xin, Miao Yang, Liu Hui, Wu Wenjin, Sui Qing

(Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: As an import part of the space manipulator, the binocular vision system can guide the manipulator to localize and acquire the samples. The calibration of internal and external parameters is the primary premise and important guarantee for binocular camera to obtain the motion information such as the position and the direction of the cooperative target with high precision. A method for the calibration of internal and external parameters of the binocular camera based on bundle adjustment algorithm was proposed. A three-dimensional target was used as the calibration target, and the high-precision angle measuring equipment theodolite was used as the precision measurement reference. And then the internal and external parameter of manipulator binocular vision system could be calculated. The experimental results show that the camera internal parameter reprojection error is less than 0.5 pixel, and the accuracy of the external parameter test is ± 0.19 mm, which is able to satisfy the test needs and the test precision. This method offers a meaningful principle of integration and adjustment of manipulator binocular vision system.

Key words: binocular vision system; internal and external parameters; bundle adjustment; spatial relationship

收稿日期: 2020-12-29; 修订日期: 2021-05-07

基金项目: 国家重大科技专项工程

作者简介: 岳丽清, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事光学传感器装调与测试等方面的研究。

0 引言

随着空间站的建立、探月工程的成功,我国对太空的探索取得了一个又一个的重大突破,在不断探索太空奥秘的同时,也面临着失重、高真空、太空辐射等环境带来的挑战。未来,仅依靠航天员进行太空探索将受到很多限制,因此,空间机械臂在航天工程中越来越受到重视,世界各国也正考虑用空间机械臂协助甚至取代宇航员进行太空作业,如协助卫星入轨、回收故障卫星、维修故障航天器、对大型航天器进行装配、完成空间站对接等。机械臂在进行太空作业时,需要借助视觉系统获取对目标进行准确定位并完成抓捕,其中双目视觉系统包含左目和右目两台相机,双目视觉测量方式不但可以有效地提高测量精度,支持对非合作目标的三维测量,同时还兼具单目视觉测量备份的功能,即使在两台相机中的一台无法 ze 正常工作的情况下,依然可以正常运行^[1-3]。

在机械臂双目视觉系统中,相机的内参(相机的基本参数)和外参(相机之间的相对位置参数)的精确性往往决定了机械臂获取合作目标的精度^[4-5]。传统的内外参标定技术通常采用黑白棋盘格作为标定目标,其中黑色方格与白色方格尺寸需要相同,所有方格尺寸一致,由于国内在光刻工艺上与国外先进水平仍存在一定差距,因此棋盘格在加工过程中往往会产生较大的误差无法消除;其次,由于棋盘格为二维,其相对于三维物体会缺少一部分信息,因此为了得到高准确度的相机参数,相机在标定过程中需要多次改变棋盘格的方位,确保标定板在图像中能够覆盖整个视野并且覆盖较大的深度,测试过程繁琐。

针对传统相机内外参标定技术存在的精度低、操作繁琐等问题,文中提出了一种机械臂双目视觉系统内外参高精度标定方法,采用三维靶标场作为标定目标,三维靶标场分前、中、后共三层,每层布设 14 根矩形管,采用 6 mm 反光型摄影测量标志,在每层矩形管的同一方向上均匀布设,并将高精度测角设备经纬仪作为精测基准,通过坐标转换解算分步得到相机的内外参数,该方法对靶标场的制作工艺要求低,且拍摄过程不需要挪动靶标场位置,只需要被测相机在不同角度对靶标场拍照,操作简单,不受靶标场加工工艺的影响,有较高的引出精度。标定结果均满足机械臂双目视觉相机获取合作目标三维位姿的测量精度

要求。

1 空间机械臂双目视觉系统

双目视觉系统由左目、右目两台相机组成,其往往安装在机械臂的顶端,如图 1 所示。

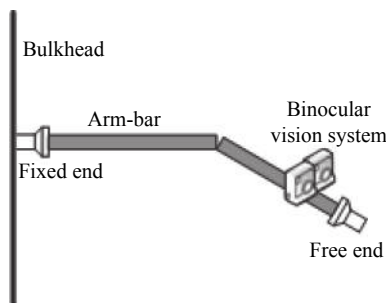


图 1 双目视觉系统示意图

Fig.1 Binocular vision system

在双目视觉系统的结构上方安装有一个 20 mm×20 mm×20 mm 的立方镜,该立方镜即为系统的安装坐标系。其 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 定义如下:以立方镜体中心 O_1 为坐标系原点,立方镜相邻的两个面的法线方向分别为 X_1 轴、 Y_1 轴, Z_1 轴由右手定则确定。右目相机坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 定义如下:相机的光心 O_2 为坐标系的原点,坐标系的 X_2 轴与相机光轴方向平行, Y_2 轴、 Z_2 轴分别平行于相机成像面的水平轴、垂直轴。左目相机坐标系的定义与右目相同。图 2 为各坐标系定义图。

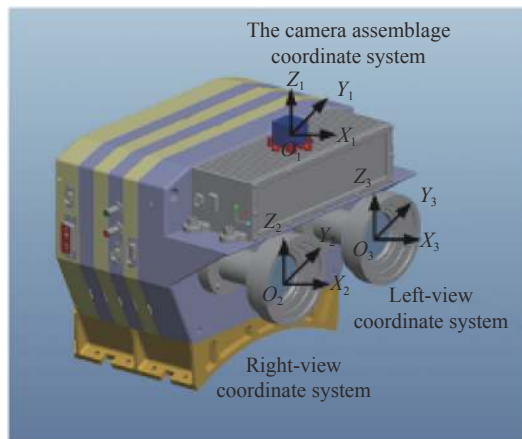


图 2 坐标系定义

Fig.2 Definition of the coordinate system

2 双目视觉系统内外参标定技术

双目视觉系统内外参标定技术主要解算的参数及精度要求如表 1 所示。

表 1 双目视觉系统内外参标定要求

Tab.1 Calibration requirements of internal and external parameters of binocular vision system

Parameter		Specification
Observation distance/m		0.3-1.3
Internal parameter	Major point/pixel	≤±1
	Major distance/pixel	≤±1
External parameter	Position/mm	≤±0.5
	Attitude/(°)	≤±0.1

2.1 双目视觉系统畸变模型

在光束法平差法中使用的是经典的针孔模型,如图 3 所示, $O-UV$ 为相机像平面坐标系, O_1O 为相机光轴,光轴与图像平面的交点 $O(u,v)$ 为相机主点,光心 O_1 到主点的距离为相机主距 f 。光线从物体所在空间出射,相机在不同方位拍摄多幅图像,利用各图像间匹配标志点的对应关系和内参不变特性,构建相机模型变换约束方程,整体解算像点坐标及主点、主距、畸变。

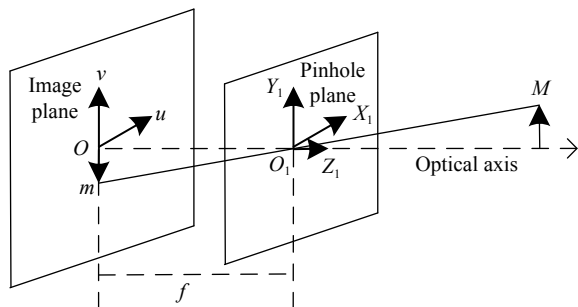


图 3 内参测试原理

Fig.3 Principle of internal reference test

$M(X,Y,Z)$ 为物方一点, M 在像平面的坐标为 $m(u,v,1)$, 两者之间的映射关系为^[6]:

$$s\tilde{m} = H\tilde{M}, H = \lambda A [r_1 \quad r_2 \quad t] \quad (1)$$

式中: s 为尺度因子; λ 为比例系数; $[r_1, r_2, t]$ 为相机外参; A 为相机内参矩阵, 定义为:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (u_0, v_0) 为相机主点; α, β 分别为相机水平和垂直方向的主距; γ 为图像坐标轴的偏斜因子。

文中采用使像点的重投影误差最小的优化方法来计算得到映射矩阵 H ^[7], 此时, 优化目标函数为:

$$\min \sum_i \|m_i - \hat{m}_i\|^2 \quad (3)$$

式中: \hat{m}_i 为通过公式 (1) 计算得到的重投影图像坐标; m_i 为实际计算得到的图像坐标。

令 $B = A^{-T}A^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$, 将公式 (2) 代入, 得到:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} - \frac{\gamma}{\alpha^2\beta} \frac{\gamma v_0 - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} \frac{\gamma^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} - \frac{\gamma(\gamma v_0 - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{\gamma v_0 - u_0\beta}{\alpha^2\beta} - \frac{\gamma(\gamma v_0 - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \frac{(\gamma v_0 - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

用六维矢量 b 来表示对称矩阵 B , 即 $b=[B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{31} \ B_{32} \ B_{33}]$, 因此, 至少需要六个方程才能求解 b 。移动相机至不同位置对三维靶标场拍照, 可以得到 $n(n \geq 3)$ 幅图像, 对应得到 $2n$ 个方程, 利用重投影误差最小优化可求解相机的内参矩阵 A , 进而得到相机内参, 即:

$$\begin{cases} \lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]/B_{11} \\ \gamma = -B_{12}f_x^2 f_y / \lambda \\ u_0 = \gamma v_0 / f_y - B_{13}f_x^2 / \lambda \\ v_0 = (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\ \alpha = \sqrt{\lambda / B_{11}} \\ \beta = \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 内参标定

内参标定时, 双目视觉系统同时对三维靶标场目标进行拍照, 再分别对左目相机和右目相机的图像进行处理进而得到两个相机的内参, 以右目相机为例, 其内参测试过程如下:

- (1) 相机拍摄多幅三维靶标场图像, 求解靶标与相机图像间的映射矩阵;
- (2) 解算靶标与相机坐标系矩阵;
- (3) 构建相机内参约束方程;
- (4) 利用特征值分解, 求解内参矩阵;

- (5) 解算焦距、主点坐标等参数, 计算出内参最优解。
- 相机内参的测试精度用重投影误差来表示, 该部分主要是模型算法引入的误差, 通常情况下认为基于光束法平差算法的内参测试重投影误差小于 0.5 个像元。表 2 为该套系统的测试结果。

表 2 双目视觉系统内参标定结果

Tab.2 Calibration results of internal parameter of binocular vision system

Camera	Principal point/pixel	Principal distance/mm	Distortion coefficient	Reprojection error/pixel
Left-view	[960.93, 540.28]	$f_x: 1429.38$ $f_y: 1429.61$	$k_1: -0.0575$ $k_2: 0.1395$ $k_3: 0.0002$ $p_1: -0.0002$ $p_2: 0$	0.209
Right-view	[957.20, 540.52]	$f_x: 1424.01$ $f_y: 1424.34$	$k_1: -0.0547$ $k_2: 0.1343$ $k_3: 0.0006$ $p_1: -0.0004$ $p_2: 0$	0.207

3 双目视觉系统外参标定

外参即相机坐标系在系统安装坐标系中的位置和姿态, 包括三个坐标参数 (X_S 、 Y_S 、 Z_S) 和三个角度参数 (R_x 、 R_y 、 R_z)。测试时需要分别求出左目、右目相机坐标系与视觉系统安装坐标系的位置关系, 其标定过程如下:

- (1) 利用六自由度测站三维网平差法完成对相机安装坐标系的建立;
- (2) 利用经纬仪交会坐标测量方法得到三维靶标场与相机安装坐标系之间的位置关系;
- (3) 双目相机对三维靶标场成像, 利用空间后方交会算法分别得到三维靶标场与左目、右目相机坐标系之间的位置关系;
- (4) 基于坐标转换原理, 便可得到左目、右目相机坐标系与相机安装坐标系之间的位置关系。

3.1 建立双目视觉系统安装坐标系

双目视觉系统上安装的立方镜其表面中心刻有十字丝标志点, 六个面十字丝的中心相交于立方镜的体心 O_1 。文中采用徕卡 T6100 经纬仪建站的方式建立立方镜坐标系^[8-10], 测试示意图如图 4 所示。

测试步骤如下:

- (1) 选取经纬仪 1 作为基准, 经纬仪 2 和经纬仪 3 分别与经纬仪 1 互瞄建立角度关系;
- (2) 三台经纬仪依次瞄准基准尺, 建立位置关系;

- (3) 经纬仪 1 和经纬仪 3 瞄准相机立方镜 Y 向的十字丝, 利用前方交会原理得到相机安装坐标系原点的空间位置;

- (4) 经纬仪 1 和经纬仪 2 分别自准直相机立方镜的 -Y 向和 +X 向, 得到相机安装坐标系的空间方向;

- (5) 根据以上测试数据利用六自由度测站三维网平差法解算出相机的安装坐标系。

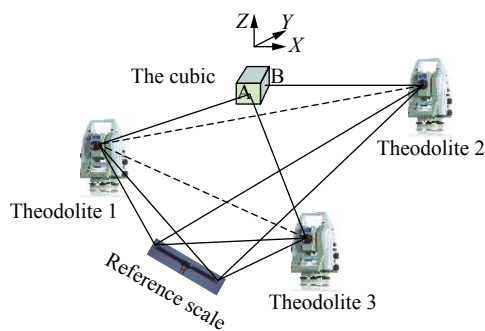


图 4 双目视觉系统安装坐标系测量示意图

Fig.4 Test of camera coordinate system of binocular vision system

3.2 建立三维靶标场与系统安装坐标系的关系

在三维靶标场上选取合适的四个点, 任意选取图 5 中的两台经纬仪组成空间交会测量系统, 通过经纬仪互瞄、测量基准尺和定向解算能够实现测量系统的定向, 然后利用角度前方交会的原理, 可得到靶标场上任意一个点在系统安装坐标系即立方镜下的三维坐标值, 测量结果见表 3。

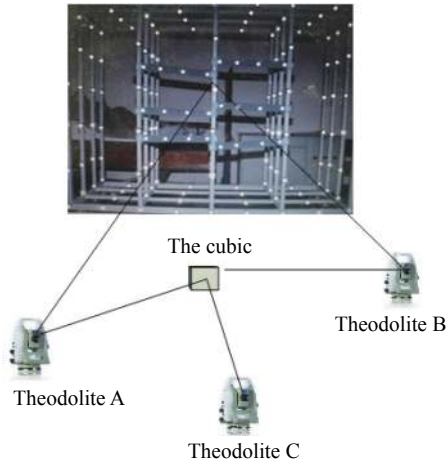


图 5 建立三维靶场与相机安装坐标系的测试原理图

Fig.5 Establish the relationship of the 3D target coordinate system and the camera assemblage coordinate system

表 3 测量点在立方镜坐标系下的坐标值

Tab.3 Coordination of points in the cubic assemblage coordinate system

Coordination/mm	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
X	331.699	414.358	415.285	332.469
Y	202.393	-132.469	-136.654	198.190
Z	161.731	166.235	-163.688	-168.168

3.3 建立三维靶标场与双目相机的关系

文中采用基于四个非共线控制点的单张相片空间后方交会算法来建立三维靶标场与双目相机的关系,如图 6 所示。 $O-XYZ$ 为物空间坐标系, $S-xyz$ 为像空间坐标系, $A(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $B(X_2, Y_2, Z_2)$ 、 $C(X_3, Y_3, Z_3)$ 为三个控制点, $A'(x_1, y_1)$ 、 $B'(x_2, y_2)$ 、 $C'(x_3, y_3)$ 分别为对应的像点。

在 ΔASB 、 ΔBSC 、 ΔASC 中,由余弦定理可得:

$$\left. \begin{aligned} d_{AB}^2 &= d_{AS}^2 + d_{BS}^2 - 2d_{AS}d_{BS} \cos \alpha \\ d_{BC}^2 &= d_{BS}^2 + d_{CS}^2 - 2d_{BS}d_{CS} \cos \beta \\ d_{AC}^2 &= d_{AS}^2 + d_{CS}^2 - 2d_{AS}d_{CS} \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} X_{1s} &= \frac{d_{AS}x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + f^2}} \\ Y_{1s} &= \frac{d_{AS}y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + f^2}} \\ Z_{1s} &= \frac{-d_{AS}f}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + f^2}} \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} X_{2s} &= \frac{d_{BS}x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + f^2}} \\ Y_{2s} &= \frac{d_{BS}y_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + f^2}} \\ Z_{2s} &= \frac{-d_{BS}f}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + f^2}} \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} X_{3s} &= \frac{d_{CS}x_3}{\sqrt{x_3^2 + y_3^2 + f^2}} \\ Y_{3s} &= \frac{d_{CS}y_3}{\sqrt{x_3^2 + y_3^2 + f^2}} \\ Z_{3s} &= \frac{-d_{CS}f}{\sqrt{x_3^2 + y_3^2 + f^2}} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

基于四个控制点的定向方法对控制点分布的要求是选取的四个点不共线,这四个控制点即为 3.2 章节选取的四个控制点。测试时,双目相机对三维靶标

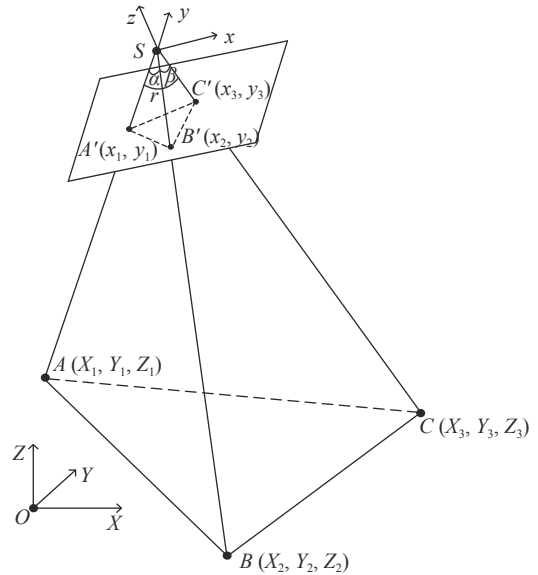


图 6 坐标系转换示意图

Fig.6 Translate of coordinate system

式中: α 、 β 、 γ 可在 $\Delta A'SB'$ 、 $\Delta B'SC'$ 、 $\Delta A'SC'$ 中由余弦定理获得。设 $d_{AS}:d_{BS}:d_{CS}=1:n:m$,代入公式(6),可得:

$$\left. \begin{aligned} d_{AB}^2 &= d_{AS}^2 + (nd_{AS})^2 - 2d_{AS}^2n \cos \alpha \\ d_{BC}^2 &= (nd_{AS})^2 + (md_{AS})^2 - 2d_{AS}^2nm \cos \beta \\ d_{AC}^2 &= d_{AS}^2 + (md_{AS})^2 - 2d_{AS}^2m \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

消去 d_{AS} 、 m 得到 n 的一元四次方程:

$$w_1n^4 + w_2n^3 + w_3n^2 + w_4n + w_5 = 0 \quad (8)$$

式中: $w_1 \sim w_5$ 为系数,求解该式可得至多四个 n 值。再加入一个控制点 D ,利用 A 、 B 、 D 三点求得另一组 n 值,选取两组中相同的一个即为实际距离比值。将其代入公式(7)可求得距离值 d_{AS} 、 d_{BS} 、 d_{CS} 。

在像空间坐标系 $S-xyz$ 中,像点 A' 、 B' 、 C' 坐标分别为: $A'(x_1, y_1, -f)$ 、 $B'(x_2, y_2, -f)$ 、 $C'(x_3, y_3, -f)$ 。由比值 $d_{A's}/d_{AS}$ 、 $d_{B's}/d_{BS}$ 、 $d_{C's}/d_{CS}$ 可得 A 、 B 、 C 在像空间坐标系中坐标 $(X_{is}, Y_{is}, Z_{is})(i=1, 2, 3)$ 分别为:

场进行拍照,分别求解得到三维靶标场上四个点在左目、右目相机坐标系中的坐标数值,结果见表 4、表 5。

表 4 左目相机坐标系下测量点的坐标值

Tab.4 Coordination of points in the left-view camera coordinate system

Coordination/mm	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
X	331.281	413.800	415.000	332.427
Y	152.116	-182.880	-186.300	148.130
Z	241.985	246.255	-83.678	-88.186

表 5 右目相机坐标系下测量点的坐标值

Tab.5 Coordination of points in the right-view camera coordinate system

Coordination/mm	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
X	331.286	413.805	415.101	332.423
Y	252.853	-82.055	-86.186	248.703
Z	241.731	246.258	-83.675	-88.178

3.4 解算双目视觉系统外参

设在系统安装坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 下公共点三维坐标参数为 (X, Y, Z) , 右目相机坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 下的公共点三维坐标参数为 (X', Y', Z') , 如图 7 所示。

假设相机安装坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 先平移 $(X_0, Y_0,$

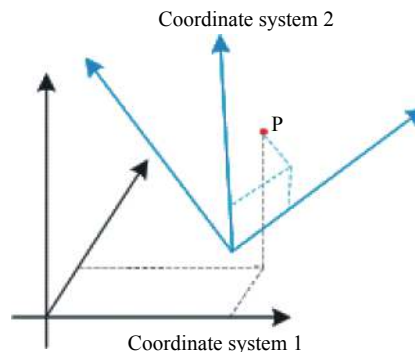


图 7 基于三个控制点的空间后方交会原理

Fig.7 Principle of spatial rear intersection based on three control points

$Z_0)$, 再旋转 $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$, 最后缩放 k 倍后, 即可转换到右目相机坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 下, 则相机坐标系下的点在相机安装坐标系下的计算公式如 (10) 所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + T \quad (10)$$

式中: T 为平移矢量 R 为旋转矩阵。当定向点个数大于等于 3 时, 利用最小二乘法迭代计算, 可求出相机安装坐标系和相机坐标系的转换参数^[11-15]。

将表 3~表 5 的数据按上述公式进行解算, 即可得到双目视觉系统的外参, 结果如表 6 所示。

表 6 双目视觉系统的外参

Tab.6 External parameters of the binocular vision system

Camera	Rotation angle			Translation vector		
	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ΔX	ΔY	ΔZ
Left view	0.058	359.936	359.976	-0.341	-49.941	79.621
Right view	0.010	359.936	359.977	-0.313	50.616	79.584

3.5 外参测试误差

外参测试需要将相机坐标系引入到系统安装坐标系下, 包括空间向量与坐标系角度的转换。其中系统的各个环节误差组成如下, 其精度均为 3σ 精度:

3.5.1 双经纬仪交会坐标测量误差 m_1

该项误差主要包括:

(1) 经纬仪建站误差: 根据大量的测试经验, 该项误差在 5 m 测量范围内可以小于 ± 0.05 mm;

(2) 经纬仪交会测量误差: 测试时在软件中将交会误差设置在 ± 0.05 mm 以下, 超过该范围的点重新测量直到满足要求为止。

因此 $m_1 = \pm \sqrt{0.05^2 + 0.05^2} = \pm 0.07$ mm。

3.5.2 系统安装坐标系建立误差 m_2

系统安装坐标系即立方镜坐标系位置误差主要包括立方镜边长测量误差、十字丝刻划位置精度、十字丝点坐标测试误差、立方镜不垂直误差四项误差。

(1) 在目前的制造工艺下, 立方镜边长测量误差可以控制在 1 μ m 以内, 立方镜不垂直误差可控制在 1" 以内, 因此这两项可以忽略;

(2) 立方镜十字丝刻划位置精度, 根据目前的制造工艺, 该部分误差可以控制在 ± 0.05 mm;

(3) 十字丝点坐标测量误差为±0.05 mm。

因此该部分误差为:

$$m_2 = \pm \sqrt{0.05^2 + 0.05^2} = \pm 0.07 \text{ mm}。$$

3.5.3 坐标系的转换误差 m_3

该项误差主要包括经纬仪交会坐标测量误差和坐标系转换算法带来的误差。

(1) 根据误差 m_1 可知, 经纬仪交会坐标测量误差为±0.05 mm;

(2) 坐标系转换是利用一组公共点, 通过其在不同坐标系下的坐标值进行最小二乘平差转换。根据计算, 其转换误差为±0.06 mm。

在外参测试中, 一共用到两次坐标系转换。

因此, 该部分误差为:

$$m_3 = \pm(2 \times \sqrt{0.05^2 + 0.06^2}) = \pm 0.16 \text{ mm}。$$

综上所述系统总的测试误差为 $\delta = \pm \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} = \pm 0.19 \text{ mm}。$

4 结 论

机械臂双目测量系统通过对目标特征图案的提取, 能够实时对估算出测量目标的三维位置姿态等信息, 相机内外参数的标定将直接影响其测量精度。文中基于光束法平差算法计算双目视觉系统的内参, 并通过与经纬仪建站相结合的方法分别得到左目、右目相机的外参, 实验表明, 内参测试精度优于 0.5 个像元, 外参测试精度优于±0.19 mm, 测试精度高且操作简单, 为机械臂实施视觉闭环自主捕获合作目标提供了可靠依据。

参考文献:

- [1] Li Daming, Rao Wei, Hu Chengwei, et al. Key technology review of the research on the space station manipulator [J]. *Manned Space Flight*, 2014, 20(3): 238-242. (in Chinese)
- [2] Sun Mingjie, Zhang Jiamin. Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction [J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 732. (in Chinese)
- [3] Li Peng, Zhang Yangyang. Stereo vision localization for mobile robot based on auxiliary target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S117006. (in Chinese)
- [4] Chen Lei, Gao Sheng, Yuan Baofeng, et al. Multi-camera based space manipulator vision system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014(3): 35-42. (in Chinese)
- [5] Tan Qimeng, Hu Chengwei, Gao Sheng. Research on calibration of intrinsic parameters for space manipulator camera based on 2D planar pattern [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(6): 74-80. (in Chinese)
- [6] Zhang Guangjun. Vision Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [7] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] Wang Zhongyu, Li Yaru, Hao Renjie, et al. Monocular vision pose measurement algorithm based on points feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0517002. (in Chinese)
- [9] Zhou Jing, Zhang Xiaobao, Bai Yunlong. Mutation mechanism particle swarm optimization for camera internal parameter calibration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1745-1753. (in Chinese)
- [10] Li Yunlei, Zhang Xi, Tu Dawei. Probe-based multi-view field 3D vision measurement system based on three-dimensional orientation target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 34-44. (in Chinese)
- [11] Ma Guoqing, Liu Li, Yu Zhenglin, et al. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2019, 12(2): 214-228. (in Chinese)
- [12] Zhu Xiang, Shao Shuangyun, Song Zhijun. A detection method based on line-structured light sensor for geometrical morphology of track slab [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2018, 11(5): 841-850. (in Chinese)
- [13] Bao Jiankuan, Li Yongli, Li Xiuhai. Geodetic coordinate transformation model and its application [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2013, 22(3): 56-60. (in Chinese)
- [14] Guo Yingqi, Tang Bin, Zhang Qiujiang, et al. Research on coordinate transformation method of high accuracy based on space rectangular coordinates system [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(3): 125-128. (in Chinese)
- [15] Pan Guoron, Zhou Yueyin. Comparison between two ways of calculation of coordinate transfer [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(3): 58-62. (in Chinese)