

结合四角共线约束的大视场双目相机标定方法

杨 帆 刘 巍 张 洋 高 鹏 贾 振 元

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 对航空大型零部件的视觉测量时,采用传统的相机标定方法需要依靠高精度的标准参照物,大型的参照物加工难度大、精度难以保证,不能满足大视场相机标定要求。针对这些问题,提出了结合四角共线标志约束进行现场标定的方法;在空间测量视场范围内靠近主点的区域布置标定控制点,利用线性变换求解标定初值,在拍摄视场四角放置共线标志约束尺,利用交比不变性质以及直线拟合完成畸变系数求解,进行控制点的数量优化以及参数的整体优化得到现场标定最优解。相关标定实验结果表明在 $2.5\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ 的视场范围内现场重建误差小于 0.07% ,可以满足现场标定的高精度要求,对于航空大型零部件的视觉测量具有较好的稳健性与适用性。

关键词 机器视觉; 视觉测量; 相机标定; 大视场; 畸变校正

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0715001

Binocular Camera Calibration Method Combined with the Four Collinear Constraints

Yang Fan Liu Wei Zhang Yang Gao Peng Jia Zhenyuan

College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract For the vision measurement of aero large parts and components, traditional camera calibration methods relies on the high precision of standard targets which are difficult to be produced. The precision of these methods can not meet the need of large field of view for traditional camera calibration. Aiming at these problems, a site-calibration method based on collinear constraints of mark points located at the four corners is put forward. Some calibration control points are arranged close to the principal point within space measurement field of view, and the calibration initial results can be solved using the linear transformation. The collinear constraint rulers are placed in the field of four corners, the distortion coefficients can be calibrated using cross-ratio invariability and linear fitting. The number of control points and the whole parameters of calibration can be optimized, and the optimal site-calibration result can be obtained. The relative calibration experimental results show that in the field of view of $2.5\text{ m}\times 1.8\text{ m}$, the reconstruction error of site is less than 0.07% , which meets the demand that the high precision of site-calibration, and has good robustness and adaptability for the vision measurement of aero large parts.

Key words machine vision; vision measurement; camera calibration; large field of view; distortion correction

OCIS codes 150.0155; 150.6910; 100.2000

1 引 言

随着国家航空工业的逐步发展,大型飞机的生产制造能力也不断提升,飞机制造过程中对其所使用的大型零部件的制造成型以及装配检测提出了很高的要求。视觉测量方法以其非接触、实时性好和可实现在机测量等优势,近年来在几何量测量以及机械制造领域发挥着越来越重要的作用^[1]。视觉测量中相机的高精度现场标定是保证测量精度的重要前提^[2-5],然而针对航空大型零部件的视觉测量,被测物尺寸可以达到

收稿日期: 2016-03-01; **收到修改稿日期:** 2016-03-25

基金项目: 国家 973 计划(2014CB046504)、国家自然科学基金(51227004,51375075)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51321004)、辽宁省自然科学基金(2014028010)

作者简介: 杨 帆(1991—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉测量方面的研究。E-mail: yangfandut@mail.dlut.edu.cn

导师简介: 刘 巍(1979—),男,博士,教授,主要从事精密测量、精密控制、微执行器、微机器人等方面的研究。

E-mail: lw2007@dlut.edu.cn(通信联系人)

2~8 m,甚至更大,现场标定的拍摄视场很大,被测物形貌以及测量现场环境复杂,依靠传统的标定方法其全局精度以及现场标定的适用性和稳健性难以保证,所以研究适合航空大型零部件测量现场的高精度相机标定方法具有重要意义。

相机标定是通过空间目标点的三维坐标信息以及对应的图像二维坐标信息求解相机内外参数的过程。张氏标定方法是目前应用最为广泛的相机标定方法^[6-8],它是一种基于二维标定物的相机标定方式^[9],操作简便、精度高、稳健性较好,然而其标定精度取决于标定板的加工精度,在航空大型零部件测量过程中,用于大视场标定的大型标定板的高精度加工极其困难,且实际使用时容易出现遮挡情况,难以获得理想的相机标定结果。

针对大视场相机标定问题,已经有众多学者开展了相关研究并取得了一定研究成果。巴西里约热内卢天主教大学 Loaiza 等^[10]提出了一种利用一维标尺多方位拍摄完成大视场相机标定的方法,在一定程度上扩大了相机标定的视场范围且操作较二维、三维标定物更为方便,然而目前其拍摄视场仍不足以完成航空大型零部件实际测量中的相机标定。德国耶拿大学 Brückner 等^[11]提出了一种利用机械臂定位的内外参数分离标定的多相机标定方法,通过机械臂定位保证标定精度,摆脱了相机标定对标定参照物的依赖,然而在实际大型零部件测量现场机械臂的运动范围有限,且定位精度对标定结果有很大影响。西班牙瓦伦西亚大学 Rovira-Más 等^[12]在张氏标定的基础上设计了一种均匀分布的标定物,并加入双目相机的基线距离进行优化,从而完成对追踪系统传感器的标定,标定视场相对较大,但是标定物的设计摆放比较麻烦,难以实现测量现场的在机快速标定。国内北京航空航天大学的孙军华等^[3]、西安交通大学的 Xiao 等^[13]、南京航空航天大学的孙楠等^[2,14]、国防科学技术大学的苑云等^[15-16]、西北工业大学的卢津等^[17]在大视场相机标定方面做了大量研究并取得了很好的结果。这些研究成果在一定程度上解决了大型靶标加工困难的问题,但由于其自身的算法以及标定辅助设备的限制,暂时还不能满足航空大型零件现场在机快速测量的需求。

针对目前航空大型零部件视觉测量标定中视场大、精度较低、环境复杂的实际问题,本文提出了一种结合四角共线标志约束的大视场相机现场标定方法。介绍了相机成像以及畸变模型,结合提出方法阐述标定原理以及求解过程,进行了相关标定实验,证明该方法能够满足航空大型零部件视觉测量的现场标定要求,具有一定的可靠性与稳健性。

2 相机成像模型

2.1 线性相机成像模型

线性相机成像模型是根据针孔成像原理理想化得到的,涉及到四个坐标系^[18],分别是表示成像目标空间三维坐标的世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 、相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 以及对应图像二维坐标的图像坐标系 $O_1 x y$ 和以像素为单位的平面坐标系 $O_0 u v$,其对应关系如图 1 所示。

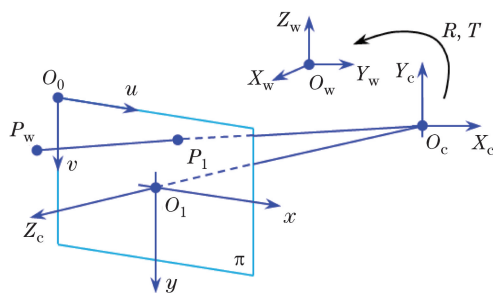


图 1 透视投影模型

Fig. 1 Perspective projection model

图中主点 O_1 是相机镜片中心光轴和成像平面 π 的交点,在像素坐标系下的坐标为 (u_0, v_0) ,空间中位于视场范围内任意一点 P_w 的齐次世界坐标为 $[X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$,投影到成像平面 π 上,对应点 P_1 的平面坐标为 $[x \ y \ 1]^T$,相应的像素坐标为 $[u \ v \ 1]^T$,根据直接线性变换原理将像点和物点的成像几何关系在齐次坐标下写成透视投影矩阵的形式为^[18]

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{W} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \times \mathbf{W} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 α_x 、 α_y 分别代表 x 和 y 方向的等效焦距, u_0 、 v_0 代表主点的像素坐标, 矩阵 \mathbf{K} 称为相机标定的内参数矩阵, 矩阵 \mathbf{W} 为相机标定的外参数矩阵, s 是未知的尺度因子。空间点和图像点的对应关系可以由透视投影矩阵 $\mathbf{M}_{3 \times 4}$ 描述, 只需 6 个以上非共面点便可以线性求解矩阵 $\mathbf{M}_{3 \times 4}$ 。

2.2 相机畸变模型

镜头存在加工误差和光学系统装配误差, 使得实际所成的像与理想线性模型成像之间存在不同程度的偏差, 称为相机畸变。相机畸变的主要类型有: 径向畸变、离心畸变以及薄棱镜畸变^[18-19]。在航空大型零部件的视觉测量中, 视场范围极大, 薄棱镜畸变以及离心畸变主要由镜组装配误差引起, 相对于径向畸变小得多, 这两种畸变对结果影响不大, 工程应用中, 忽略径向模型的高阶项可以满足实际需要, 常取一阶量近似为径向畸变量的估计^[4, 20], 式表示为

$$\begin{cases} \delta_x^r(x, y) = xk_1r^2 \\ \delta_y^r(x, y) = yk_2r^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $r = x^2 + y^2$, k_1 、 k_2 分别代表 x 和 y 方向的畸变系数, $\delta_x^r(x, y)$ 、 $\delta_y^r(x, y)$ 分别为 x 和 y 方向的畸变量。

3 大视场相机标定方法

在航空大型零件视觉测量现场, 传统标定方法所依赖的大型标定物加工十分困难且精度难以保证, 考虑到现阶段空间三维坐标测量设备的成熟性, 在测量空间柔性地布置一系列非共面标定控制点, 也能完成标定工作, 但是大视场需要布置大量散点, 大大降低标定效率。在此基础上提出了结合四角共线标志约束的大视场相机现场标定方法: 将畸变系数与标定参数分离求解, 利用少量靠近主点的空间坐标控制点通过线性方式获得标定结果的初值, 利用直线约束单独求解畸变参数, 进行标定控制点数优化以重投影误差最小建立目标函数, 并进行参数整体优化, 求解标定参数最优解。

3.1 共线标定约束尺的设计与布置

线性求解是不考虑畸变的标定方法, 实际测量现场标定的畸变因素是不可忽略的, 由于相机的径向畸变由光心向四周逐渐变大, 越靠近图像边缘畸变越明显, 一般的成像芯片均为矩形, 所以拍摄图像中畸变最严重的位置是在矩形的四角。为了提高求解畸变系数的精度, 保证畸变求解的可靠性, 设计了一种共线标志约束尺, 利用四组共线标志点的交比不变性质进行畸变系数的求解。

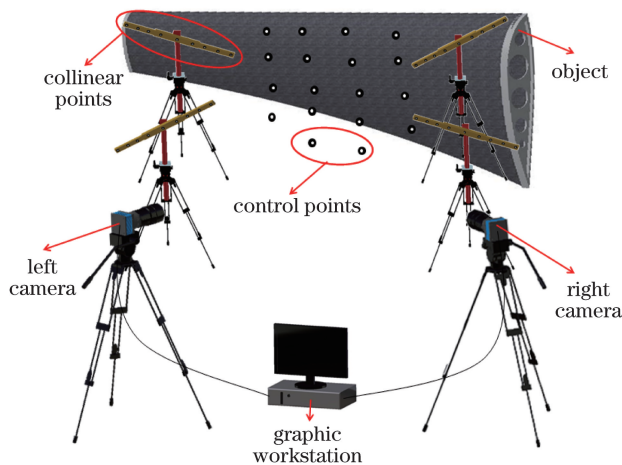


图 2 大视场双目相机现场标定示意图

Fig. 2 Binocular camera calibration for large field of view

如图 2 所示在进行相机标定时根据测量视场范围将四把共线标志约束尺分别放置在视场的四角, 在同

一次拍摄后,分别利用四角的共线点求解畸变系数,以四组畸变结果的平均值作为最终的畸变参数进行整体优化。

3.2 布置空间标定控制点

为了尽可能提高标定初始参数的精度并且提高优化速度,采用靠近主点位置的标定控制点可以获得更好的标定结果,根据视场适应的原则提出了大视场标定控制点的数量估计参考公式

$$N = f_{\text{ceil}}\left(\frac{\alpha f^2 \omega h}{4L^2}\right), \quad (3)$$

式中 N 是需要布置的标定控制点的初选数量,根据计算要求 N 的数值要大于等于 6, f 是相机测量的焦距, L 是相机距离被测零件的距离, ω 是相机图像传感器芯片的水平尺寸, h 是相机图像传感器芯片的竖直尺寸, α 为根据需要设置的单位面积测量点系数,取数值 10, f_{ceil} 函数表示取比括号内计算值大的最小整数,这样根据现场的实际情况就可以初步确定需要的标定控制点数量从而合理布置。通过第三方的高精度空间三维坐标测量设备测量标定控制点的世界坐标,采用灰度重心法提取圆形控制点的像素坐标,并进行相关参数求解运算。

3.3 线性求解相机内外参数初值

线性求解相机内外参数的初值,就是求解(1)式中内外参数矩阵,求解过程如下:

$$\text{设 } \mathbf{M}_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}, \text{ 令 } s = z_i \text{ 则根据坐标转换关系可得到}$$

$$\begin{cases} z_i u_i = m_{11} X_{wi} + m_{12} Y_{wi} + m_{13} Z_{wi} + m_{14} \\ z_i v_i = m_{21} X_{wi} + m_{22} Y_{wi} + m_{23} Z_{wi} + m_{24}, \\ z_i = m_{31} X_{wi} + m_{32} Y_{wi} + m_{33} Z_{wi} + m_{34} \end{cases} \quad (4)$$

式中 (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) 为空间点的世界坐标, (u_i, v_i) 为对应图像点的像素坐标, (x_i, y_i, z_i) 为该点在摄像机坐标系中的坐标。联立消去 z_i , 得

$$\begin{cases} u_i m_{34} = m_{11} X_{wi} + m_{12} Y_{wi} + m_{13} Z_{wi} + m_{14} - m_{31} X_{wi} u_i - m_{32} Y_{wi} u_i - m_{33} Z_{wi} u_i, \\ v_i m_{34} = m_{21} X_{wi} + m_{22} Y_{wi} + m_{23} Z_{wi} + m_{24} - m_{31} X_{wi} v_i - m_{32} Y_{wi} v_i - m_{33} Z_{wi} v_i, \end{cases} \quad (5)$$

(5)式用矩阵形式可表示为

$$\mathbf{A} \mathbf{m} = \mathbf{U}, \quad (6)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_{wn} & -u_n Y_{wn} & -u_n Z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_n X_{wn} & -v_n Y_{wn} & -v_n Z_{wn} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{m} = [m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{31}, m_{32}, m_{33}]^T,$$

$$\mathbf{U} = [u_1 m_{34}, v_1 m_{34}, u_2 m_{34}, v_2 m_{34}, \dots, u_{n-1} m_{34}, v_{n-1} m_{34}, u_n m_{34}, v_n m_{34}]^T.$$

将 m_{34} 置为 1, \mathbf{m} 矩阵与元素 $m_{34} = 1$ 构成所求矩阵 \mathbf{M}' 。 \mathbf{M}' 矩阵与实际的 \mathbf{M} 矩阵两者的关系为 $\mathbf{M} = m_{34} \mathbf{M}'$; 此时未知量个数 $n = 11$, 因此, 当坐标已知的点数 $N \geq 6$ 时即可以求解(6)式。采用最小二乘法可得 $\mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{U}$ 。

由 \mathbf{M} 矩阵可以分解出摄像机内外参数矩阵 \mathbf{K} 和 \mathbf{W} , 由 $\mathbf{M} = \mathbf{K} \mathbf{W}$ 可得^[18]

$$m_{34} \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T & m_{14} \\ \mathbf{m}_2^T & m_{24} \\ \mathbf{m}_3^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^T & t_x \\ \mathbf{r}_2^T & t_y \\ \mathbf{r}_3^T & t_z \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

比较等式两边,可得 $m_{34}m_3 = r_3$, 由于旋转矩阵 r 是正交矩阵, 则有性质: 列向量组是单位正交向量组, 即

$$r^T r_j = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (8)$$

因此, $|r_3| = 1$, 得到 $m_{34} |m_3| = 1$, 求出 $m_{34} = \frac{1}{|m_3|}$, 至此, M 矩阵 12 个元素全部求出。

由此根据(7)式的左右对应关系就可以求解出相机标定的内参数矩阵 K 以及外参数矩阵 W , 并以此作为整体优化的初始值。

3.4 利用线性投影关系求解畸变系数

基于所提出的四组共线标定尺的畸变求解方法, 如图 2 所示, 选取每套标定尺上的四个共线点, 记为 A, B, C, D , 其世界坐标分别为 $(x_a, y_a, z_a), (x_b, y_b, z_b), (x_c, y_c, z_c), (x_d, y_d, z_d)$, 对应的图像点的坐标分别为 $(x_{ia}, y_{ia}), (x_{ib}, y_{ib}), (x_{ic}, y_{ic}), (x_{id}, y_{id})$ 。根据共线点的交比不变性可以得到^[21]

$$\frac{(x_a - x_c)(x_b - x_d)}{(x_b - x_c)(x_a - x_d)} = \frac{(y_a - y_c)(y_b - y_d)}{(y_b - y_c)(y_a - y_d)} = \frac{(z_a - z_c)(z_b - z_d)}{(z_b - z_c)(z_a - z_d)} = C, \quad (9)$$

$$\frac{(x_{ia} - x_{ic})(x_{ib} - x_{id})}{(x_{ib} - x_{ic})(x_{ia} - x_{id})} = \frac{(y_{ia} - y_{ic})(y_{ib} - y_{id})}{(y_{ib} - y_{ic})(y_{ia} - y_{id})} = C, \quad (10)$$

式中 C 代表共线点的交比。由于存在畸变, 图像点的实际坐标为 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 而非理想点位置 (x_i, y_i) , 只考虑一阶径向畸变则有^[18]

$$\begin{cases} x_i = \bar{x}(1 + k_1 r^2) \\ y_i = \bar{y}(1 + k_2 r^2) \end{cases}$$

由此可以得到理想点坐标和实际点坐标的关系^[20]为

$$\frac{[\bar{x}_{ia}(1 + k_1 r_a^2) - \bar{x}_{ic}(1 + k_1 r_c^2)][\bar{x}_{ib}(1 + k_1 r_b^2) - \bar{x}_{id}(1 + k_1 r_d^2)]}{[\bar{x}_{ib}(1 + k_1 r_b^2) - \bar{x}_{ic}(1 + k_1 r_c^2)][\bar{x}_{ia}(1 + k_1 r_a^2) - \bar{x}_{id}(1 + k_1 r_d^2)]} = \frac{(x_a - x_c)(x_b - x_d)}{(x_b - x_c)(x_a - x_d)}, \quad (11)$$

$$\frac{[\bar{y}_{ia}(1 + k_2 r_a^2) - \bar{y}_{ic}(1 + k_2 r_c^2)][\bar{y}_{ib}(1 + k_2 r_b^2) - \bar{y}_{id}(1 + k_2 r_d^2)]}{[\bar{y}_{ib}(1 + k_2 r_b^2) - \bar{y}_{ic}(1 + k_2 r_c^2)][\bar{y}_{ia}(1 + k_2 r_a^2) - \bar{y}_{id}(1 + k_2 r_d^2)]} = \frac{(y_a - y_c)(y_b - y_d)}{(y_b - y_c)(y_a - y_d)}, \quad (12)$$

式中 $r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$ 。

求解(11)、(12)式, 即可求出畸变系数 k_1, k_2 , 这里的 k_1, k_2 分别代表水平和竖直方向上的一阶径向畸变系数, 最终任意方向上的径向一阶畸变系数 $k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ 。

考虑到畸变求解的可靠性, 同时为了提高畸变求解的精度, 放置四套共线约束标定尺在畸变情况最严重的视场四角, 每次标定时都会得到位于四角的四组畸变系数 k_a, k_b, k_c, k_d , 取其平均值作为最终结果, 即为

$$k = (\sqrt{k_{a1}^2 + k_{a2}^2} + \sqrt{k_{b1}^2 + k_{b2}^2} + \sqrt{k_{c1}^2 + k_{c2}^2} + \sqrt{k_{d1}^2 + k_{d2}^2})/4, \quad (13)$$

式中 $k_{a1}, k_{b1}, k_{c1}, k_{d1}$ 分别为四组共线约束尺根据(11)式求解的水平方向一阶径向畸变系数, $k_{a2}, k_{b2}, k_{c2}, k_{d2}$ 分别为四组共线约束尺根据(12)式求解的竖直方向一阶径向畸变系数。这样就得到了标定现场的畸变系数初值。

3.5 参数优化

3.5.1 标定控制点优化

由于标定控制点直接关系到优化求解的复杂程度, 过多的点将增大计算量, 使标定效率降低; 过少的点得到的标定精度较低, 不能满足测量要求, 为了尽可能提高标定初始参数的精度同时保证测量效率, 需要对标定控制点进行优化。

在确定初始标定点数量的基础上依次增加点数, 记录求解时间 T 与重投影误差 E , 设置目标函数为

$$H = \|m_{ij} - \hat{m}(N)\|^2 \cdot T_N, \quad (14)$$

式中 m_{ij} 为实际的图像坐标, $\hat{m}(N)$ 为 N 个空间控制点求解出重投影图像坐标, T_N 为 N 个空间控制点具体的求解时间, 观察重投影误差变化趋势, 使 H 尽可能减小, 并对均匀散点, 靠近主点区域以及远离主点区域

分别进行求解对比,选择合适的点数,将结果作为整体优化的初始值。

3.5.2 标定参数整体优化

求解出的相机标定内外参数以及畸变系数只是相互分离的标定粗略结果,为了达到最理想的标定结果,根据重投影误差最小原则,也即根据标定结果进行空间点二维投影计算,对计算结果与实际测量数值进行比较,并使其差值最小的原则,建立非线性全局优化目标函数

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \|m_{ij} - \hat{m}(K, W, M_j, k)\|^2, \quad (15)$$

式中 m_{ij} 为实际的图像坐标, \hat{m} 为利用内外参数求解出的计算图像坐标, M_j 为图像点匹配的空间三维点的世界坐标。 K 为内参数矩阵, W 为外参数矩阵, k 为一阶径向畸变系数。利用 LM 优化求解,使目标函数达到最小值的参数组合即为所需的最优解。

4 标定实验

4.1 实验室标定实验

4.1.1 实验设备以及圆点提取

在实验室进行了标定方法验证实验并且与张氏标定方法的结果进行了对比。如图 3 所示,拍摄视场为 $2.5 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$,张氏标定采用的棋盘格标定板规格为 $700 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,角点间距为 100 mm 。所采用的拍摄相机为两台韩国 Vieworks 公司 VA-29MC-M/C5 工业相机,其有效分辨率可以达到 $4076 \text{ pixel} \times 3092 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$,选用标称焦距为 35 mm ,可以满足测量以及标定的精度要求。

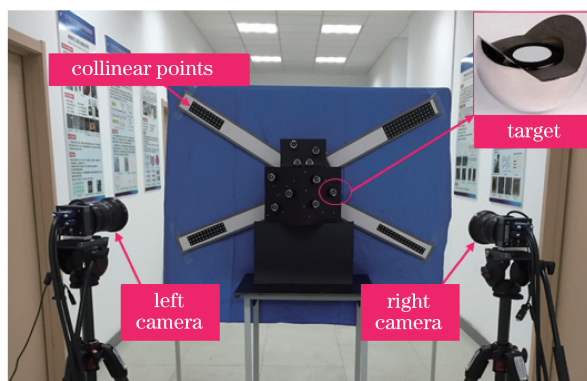


图 3 标定实验系统示意图

Fig. 3 Diagram of calibration experiment system

实验中使用的空间标定控制点以及用于直线约束的测量点均为直径 6 mm 的圆形标志点,其空间坐标已经精确标定,相对位置关系在相机标定过程中保持不变。根据灰度重心法提取图像中圆形标志点的平面像素坐标,提取圆心的像素误差小于 1 pixel ,可以满足测量精度要求。

4.1.2 标定初值求解

测量空间中布置了如图 3 所示的标定控制点,通过高精度工业测量设备进行标志点的空间三维坐标测量得到一系列的点的空间坐标,将相机标定的世界坐标系统统一到测量系统的测量坐标系,这样得到的坐标数据就可以直接应用到标定参数求解中,左右相机同时拍摄布置的空间标志点,利用灰度重心法对获得的图片进行处理,得到对应点的平面二维像素坐标。

实验中将特征点的三维坐标和二维坐标比对后筛去无效数据,选择靠近主点的十个靶球特征点进行线性标定初值的求解,得出标定结果如表 1 所示。

4.1.3 畸变求解以及全局优化

在计算出相机参数初值的基础上,利用视场四角的共线约束点计算出四组畸变系数并求均值,为了保证畸变求解的可靠性,选用位于四角的不同共线约束点进行了三组实验,求解结果如表 2 所示,利用第二组畸变系数结合初始标定参数作为提出方法的原始结果,整体优化后,标定计算结果如表 3 所示。

表 1 线性标定初值结果

Table 1 Initial result with linear calibration

	Intrinsic matrix	Rotation matrix	Translation matrix
Left camera	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 6132.5 & 0 & 2064.7 \\ 0 & 6134.9 & 1569.4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9893 & 0.1434 & -0.0283 \\ 0.1225 & -0.9165 & -0.3808 \\ -0.0806 & 0.3732 & -0.9242 \end{bmatrix}$	$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -453.4808 \\ -985.3947 \\ 141.5900 \end{bmatrix}$
Right camera	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 6164.8 & 0 & 2092.0 \\ 0 & 6163.9 & 1571.4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9016 & 0.2479 & -0.3545 \\ 0.0970 & -0.9147 & -0.3924 \\ -0.4215 & 0.3194 & -0.8487 \end{bmatrix}$	$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -1380.2754 \\ -948.5521 \\ 514.2059 \end{bmatrix}$

表 2 四角直线约束求解的畸变系数

Table 2 Distortion coefficients using four collinear constraints

	First time	Second time	Third time
Distortion	$k_1 = -0.0011$	$k_1 = -0.0010$	$k_1 = -0.0016$
Coefficients	$k_2 = -0.0018$	$k_2 = -0.0017$	$k_2 = -0.0018$

表 3 全局优化的相机标定结果

Table 3 Calibration result with global optimization

	Intrinsic matrix	Rotation matrix	Translation matrix
Left camera	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 6230.4 & 0 & 2098.7 \\ 0 & 6221.5 & 1545.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9896 & 0.1418 & -0.0230 \\ 0.1232 & -0.9158 & -0.3823 \\ -0.0752 & 0.3755 & -0.9237 \end{bmatrix}$	$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -453.6634 \\ -980.8135 \\ 179.6210 \end{bmatrix}$
Right camera	$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 6234.2 & 0 & 2115.3 \\ 0 & 6228.4 & 1526.3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9027 & 0.2468 & -0.3523 \\ 0.0951 & -0.9136 & -0.3952 \\ -0.4194 & 0.3233 & -0.8482 \end{bmatrix}$	$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -1384.4833 \\ -937.6413 \\ 541.9116 \end{bmatrix}$

为了验证实验精度评估标定误差,并与传统张氏标定方法的精度进行对比,利用棋盘格标定板对同一组双目相机进行了张氏标定,在实验室分别利用张氏标定结果和本文方法的标定结果对一维标准尺进行了多次长度重建,如图 4 所示,采用的是的殷钢标准尺,标尺长度为 1100.0251 mm。选取其中三组重建,结果如表 4 所示。

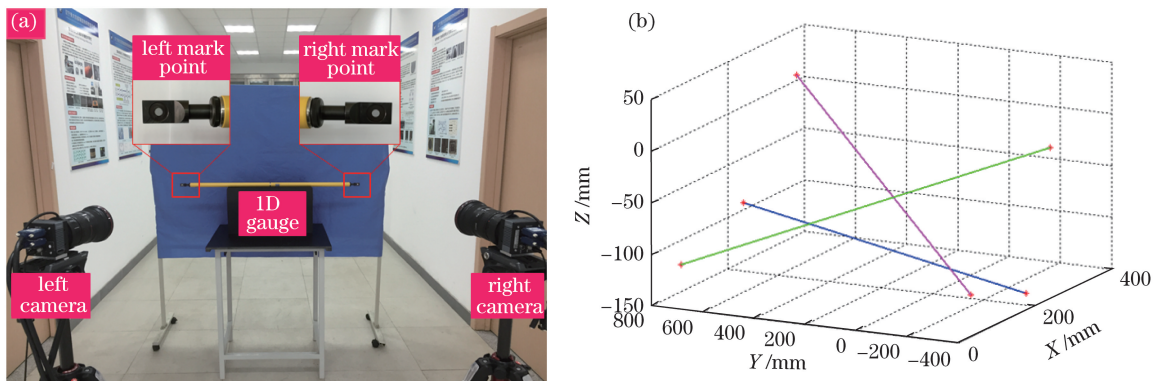


图 4 重建一维标准尺。(a)实验室标准尺重建;(b)多组重建结果图

Fig. 4 Reconstruction of the 1D gauge. (a) Reconstruction of gauge in laboratory; (b) reconstruction result of multigroup

通过表 4 的误差结果可以看出结合四角共线约束求解相机畸变的方法,最终全局优化之后的标定结果标尺重建误差可以达到 0.07%,可以满足大视场的测量要求,也验证了本文方法的可行性。通过选取多组不同的共线点进行了重复性实验,结果较为一致,也符合标定方法稳健性的要求。通过本文方法和张氏标定方法误差对比结果可以看出,所提出的大视场相机标定方法的精度在 2.5 m×1.8 m 视场范围内重建精度要优于张氏标定的精度,更加充分地证明本文方法的可靠性。

表 4 标定误差对比

Table 4 Comparison of calibration error

	Zhang's method			Proposed method		
	1	2	3	1	2	3
Reconstruction result /mm	1098.4185	1100.9072	1098.8036	1099.1809	1100.4417	1100.5068
Absolute error /mm	1.6066	0.8821	1.2215	0.8442	0.4166	0.4817
Relative error /%	0.146	0.081	0.111	0.077	0.038	0.044

4.2 测量现场标定实验

在上海商用飞机制造有限公司的飞机装配现场进行了标定实验,如图 5 所示,测量对象为碳纤维复合材料的飞机机身壁板,外形尺寸约为 3 m×2 m,采用了与实验室相同的双目相机与棋盘格标定板,标称焦距为 24 mm,同样在被测物前布置了一系列标定控制点靶球以及四角的共线约束点,靶球的空间坐标通过激光跟踪仪获取,标定视场约为 2.5 m×1.8 m。

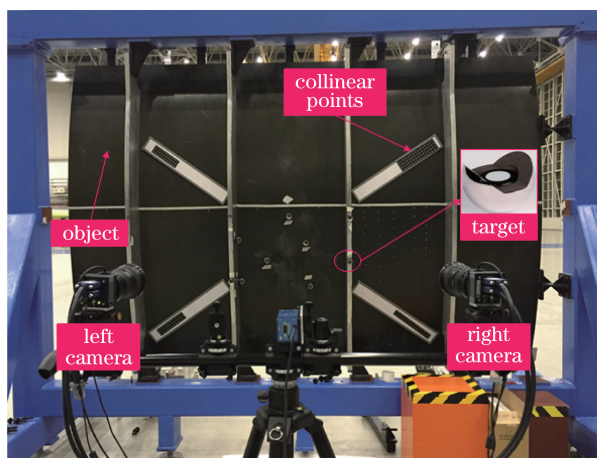


图 5 现场实验系统图

Fig. 5 Figure of field experiments system

为了验证现场标定的精度,利用激光跟踪仪测量了空间各个控制点的精确三维坐标,这样就可以得到各个控制点之间的相对距离,如图 6 所示,选取视场中的 9 个控制点进行编号,分别利用张氏标定以及本文方法的标定结果重建这几个空间控制点的空间位置,以各个点到 1 号点的相对距离分别记为 $L_1 \sim L_8$ 与激光跟踪仪测量距离进行对比,作为验证标定精度的一种方式,最终计算结果如表 5 所示。

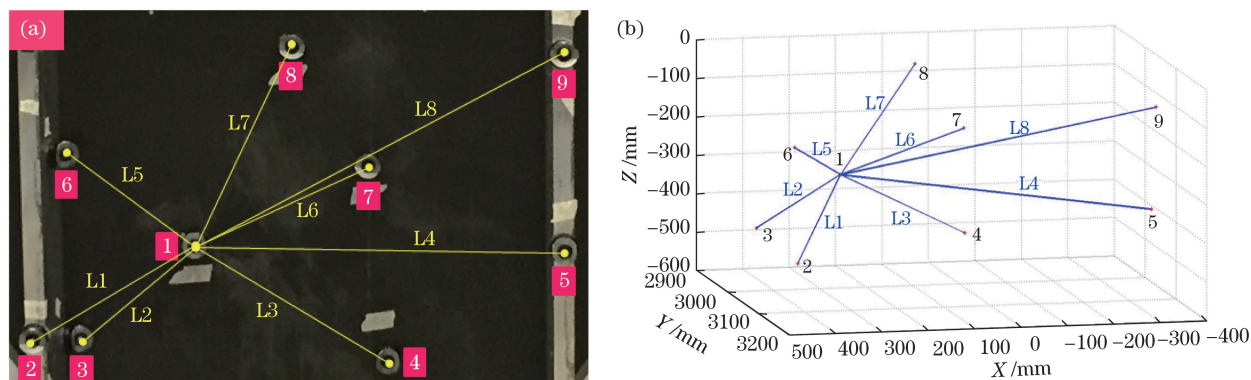


图 6 控制点距离示意图。(a)控制点实际空间位置;(b)重建的控制点空间相对位置

Fig. 6 Schematics of lengths between control points. (a) Actual space position between control points; (b) space relative position between the reconstructed control points

通过表 5 的数据可以看出,本文方法现场重建误差基本可以控制在 0.07% 以下,现场重建的精度要比张氏标定的方法高出一个数量级,在摆脱传统大型二维高精度标定物的前提下仅需拍摄一组图片就可以完成双目相机的标定参数求解,标定效率高、精度高、稳健性好,尤其对大型航空视觉测量等大视场领域的特殊标

定环境,具有很强的适用性。

表 5 相对距离重建结果

Table 5 Reconstruction results of relative lengths

Length	Standard length /mm	Zhang's method		Proposed method	
		Reconstruction result /mm	Relative error	Reconstruction result /mm	Relative error
L_1	309.5383	308.6931	0.27%	309.4543	0.027%
L_2	222.0703	221.7563	0.14%	222.0716	0.055%
L_3	335.3235	334.7307	0.17%	335.3485	0.075%
L_4	571.3995	571.1070	0.05%	571.4117	0.021%
L_5	251.9708	251.6729	0.12%	251.8995	0.028%
L_6	283.4930	283.1602	0.12%	283.5439	0.018%
L_7	328.2364	327.7024	0.16%	328.2313	0.016%
L_8	639.2993	638.9897	0.05%	639.1996	0.016%

5 结 论

提出了一种结合四角共线标志约束的大视场相机标定方法,解决了航空大型零部件视觉测量的现场标定问题。通过在测量空间靠近主点位置布置标定控制点,仅需一组照片便可以求解相机参数初值,在保证标定效率的前提下提升了光轴方向的标定精度;结合四角直线约束进行畸变校正,对所有参数进行整体优化,保证了大视场的全局测量精度,有效地扩大了现场标定的视场范围。由于标定控制点布置的灵活性以及整体优化的可靠性,经实验验证,该方法在 $2.5\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 的视场范围内实验室以及现场重建误差均小于 0.07% ,能够满足航空大型零部件视觉测量的现场标定以及测量精度要求,对于大视场相机现场标定具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- Hong Yang, Sun Xiuxia, Cai Ming, *et al.* An intrinsic parameters self-calibration technology based on infinite homography between orthogonal vanishing points[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1208001.
洪 洋, 孙秀霞, 蔡 鸣, 等. 基于正交消隐点无穷单应的摄像机内参数自标定方法[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1208001.
- Sun Nan, Zhang Yanli, Ye Nan, *et al.* Calibration of binocular stereo measurement system based on calibration cross[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412001.
孙 楠, 张丽艳, 叶 南, 等. 基于十字靶标的双目立体测量系统标定[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412001.
- Sun Junhua, Wu Ziyang, Liu Qianzhe, *et al.* Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 633-640.
孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
- Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Camera calibration method based on non-metric distortion correction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 228-232.
周富强, 蔡斐华. 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 228-232.
- Bu Penghui, Zhao Hong, Gu Feifei, *et al.* A fully automatic camera calibration method based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015004.
卜鹏辉, 赵 宏, 谷飞飞, 等. 一种基于平面靶标的全自动标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015004.
- Xue Q, Wang Z, Huang J, *et al.* Improving the measuring accuracy of structured light measurement system[J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 112204.
- Liu Z, Li X, Li F, *et al.* Fast and flexible movable vision measurement for the surface of a large-sized object[J]. Sensors, 2015, 15(3): 4643-4657.
- Liu Jianwei, Liang Jin, Liang Xinhe, *et al.* Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 126-134.
刘建伟, 梁 晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 126-134.

- 9 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 10 Loaiza M E, Raposo A B, Gattass M. Multi-camera calibration based on an invariant pattern[J]. Computers & Graphics, 2011, 35(2): 198-207.
- 11 Brückner M, Bajramovic F, Denzler J. Intrinsic and extrinsic active self-calibration of multi-camera systems[J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(2): 389-403.
- 12 Rovira-Más F, Wang Q, Zhang Q. Design parameters for adjusting the visual field of binocular stereo cameras[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(1): 59-70.
- 13 Xiao Z Z, Jin L, Yu D H, *et al.* A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view[J]. Measurement, 2010, 43(6): 747-754.
- 14 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.* Camera calibration technology of wide-area vision measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0915001.
杨博文, 张丽艳, 叶 南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001.
- 15 Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu, *et al.* Calibration method for large field of view camera based on infinite homograph[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0715002.
苑 云, 朱肇昆, 张小虎, 等. 基于无穷单应的大视场摄像机标定方法[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0715002.
- 16 Tian Zhen, Zhang Qi, Xiong Jiulong, *et al.* Large-scale camera with neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0415001.
田 震, 张 玘, 熊九龙, 等. 基于神经网络的大范围空间标定技术[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0415001.
- 17 Lu Jin, Sun Huibin, Chang Zhiyong, *et al.* A novel method for camera calibration with orthogonal vanishing points[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0208001.
卢 津, 孙惠斌, 常智勇, 等. 新型正交消隐点的摄像机标定方法[J]. 中国激光. 2014, 41(2): 0208001.
- 18 Zhu Jigui, Yu Zhijing. The principle of vision measurement[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- 19 Zhou Qianfei, Liu Jinghong. Rapid nonlinear distortion correction of aerial optical zoom lens system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0411001.
周前飞, 刘晶红. 航空变焦镜头非线性畸变快速校正方法[J]. 光学学报. 2015, 35(4): 0411001.
- 20 Zhang Min, Jin Longxu, Li Guoning, *et al.* Camera distortion calibration method based on straight line characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0615001.
张 敏, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于直线特征的摄像机镜头畸变标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0615001.
- 21 Zhang G J, He J J, Yang X M. Calibrating camera radial distortion with cross-ratio invariability[J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35(6): 457-461.