

doi: 10.7690/bgzdh.2020.02.003

一种基于光束平差法的相机标定方法

邓琳蔚¹, 王治², 张梦梦¹, 王静¹, 李大威¹, 任杰轩², 金鹏²

(1. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094; 2. 北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 为解决多目视觉测量系统中, 相机标定精度要求高、标定视场范围广等问题, 提出一种基于光束平差法的相机标定方法。利用立体视觉原理重构各个编码点的空间坐标, 通过相机成像模型将编码点投影到图像中, 并利用 Levenberg-Marquardt 方法最小化编码点的投影点与图像中对应像点之间的投影误差, 获得最优的相机参数。实验结果表明: 该方法的标定最大误差为 0.052 9 像素, 相机标定精度高、应用场景灵活, 满足工业应用需求。

关键词: 多目视觉系统; 相机标定; 标定参照物; 光束平差法

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

A Camera Calibration Method Based on Beam Adjustment Method

Deng Linwei¹, Wang Zhi², Zhang Mengmeng¹, Wang Jing¹, Li Dawei¹, Ren Jiexuan², Jin Peng²

(1. Beijing Spacecrafts Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the problems of high precision and wide field of view in multi-view vision measurement system, a camera calibration method based on beam adjustment method is proposed. The spatial coordinates of each coding point are reconstructed based on the stereo vision principle, and the coding points were projected into the image through the camera imaging model. Then, Levenberg-marquardt method is used to minimize the projection error between the coding points and the corresponding image points in the image, so as to obtain the optimal camera parameters. The experimental results show that the maximum calibration error of the method is 0.052 9 pixels. Besides, the camera calibration accuracy is high, and the application scene is flexible, meeting the needs of industrial applications.

Keywords: multi-vision system; camera calibration; calibration reference; beam adjustment method

0 引言

近年来, 随着成像技术的快速发展, 数码工业相机广泛应用于视觉测量技术, 完成目标物体的 3 维重建及定位等功能^[1]。为了从 2 维图像上恢复物体的 3 维信息, 需要对相机进行标定, 同时相机的标定精度直接影响测量系统的准确度, 对实现物体的高精度测量具有重要的意义。

相机标定是为了求取相机成像模型中的未知参数, 包括表示相机内部结构的内部参数和相机空间位姿的外部参数。针对如何以更高的精度标定相机, 近年来国内外许多学者对此进行了研究^[2-5]。目前, 常用的相机标定方法大致可以分为传统标定方法、主动视觉法和自标定法。传统相机标定方法主要应用于工作场景固定、相机参数没有较大变化的场景中, 需要高精度的已知结构信息的标定参照物, 通过提取标定参照物上的特征点, 计算相机的参数。Klassen 等^[6]将相机的成像过程简化为线性透视变换, 标定速度快, 但是忽略了镜头畸变, 影响标定精度; 王东红等^[7]利用最小二乘法求解线性方程组,

实现相机参数的标定, 不需要已知相机参数的初值, 适用于对精度要求不高的情况; Zhang 等^[8]提出了一种利用标定板的相机标定方法, 从不同角度对放置在相机视场中的标定板进行拍摄, 并提取图像上特征点的图像坐标, 利用线性方程和最大似然估计标定相机。该方法考虑了多种畸变, 且标定精度高、操作简单, 在 3 维重建^[9]和机器视觉测量^[10]等领域有着广泛应用。

主动视觉法通过精密移动平台精确控制相机做特定运动, 记录标定参照物或者相机的相对位置信息, 从而求解相机的参数^[11]。该方法具有较强的鲁棒性, 需要精密的控制平台, 标定设备成本较高。自标定方法通过寻找不同图像间的同名点, 利用内参数的内在约束标定相机。该方法首先由 Faugeras 等^[12]和 Maybank 等^[13]提出, 包括 Kruppa^[14]方程法、分层逐步标定法^[15]等, 应用场景比较灵活, 但是算法鲁棒性较差。

多目视觉测量系统主要应用于物体的 3 维重建, 对系统进行标定是实现物体精确测量的根本保

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2019-12-06

作者简介: 邓琳蔚(1989—), 女, 黑龙江人, 学士, 工程师, 从事工业装备数字化系统集成技术及管理研究。E-mail: lwdeng010@sina.com。

证。笔者基于已有的相机标定方法，研究它们各自的优势、不足和适用条件，并结合多目视觉测量系统的实际应用特点，提出一种基于光束平差法的相机标定方法。实验结果表明，该方法能满足实际应用需求。

1 相机标定的基本原理

利用待标定相机拍摄的 2 维图像中的已知信息，求取相机成像模型中的所有未知参数，包括表示相机内部结构的内部参数和相机空间位姿的外部参数，建立 3 维空间点与其在 2 维图像中像素点之间的映射关系。相机标定需要用到的标定参照物如图 1 所示，(a)为编码点，用来确定相机间的相对位置关系；(b)为外部设备，用来确定世界坐标系；(c)为标准杆，用来确定缩放比例系数。

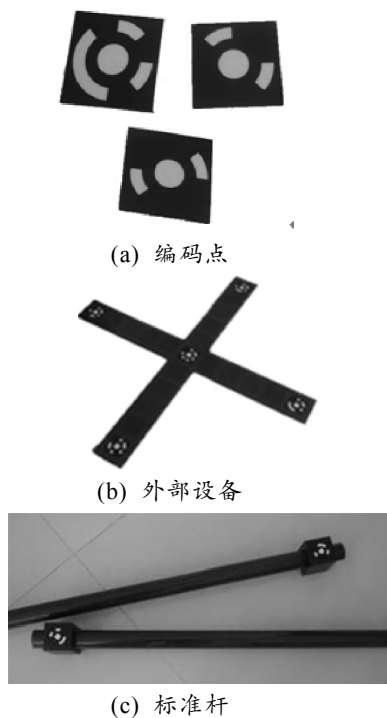


图 1 标定参照物

如图 2 所示，将这些标定参照物均匀摆放在相机的视场范围内，利用这些标定参照物及其图像坐标来标定相机，需要标定的参数包括相机的内、外参数和编码点的世界坐标。首先，确定相机的内、外参数的初值，并结合双目视觉原理计算编码点世界坐标的初值；然后，利用相机成像模型将编码点投影到各个相机图像中，并通过 Levenberg-Marquardt 算法，优化相机的内、外参数和编码点的空间坐标，使得编码点在相机中的投影与对应像点间的距离和达到最小，即满足式(1)，从而得到相机

参数和编码点世界坐标的准确值。

$$\sum_{j=1}^{n_c} \sum_{i=1}^{n_Q} \|q_{ij} - q_{ij}^i\|^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

式中： n_Q 为编码点的数量； n_c 为相机数量。

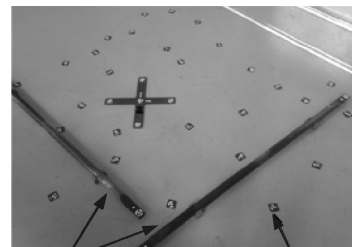


图 2 标定参照物布局

2 相机标定的实现流程

如图 3 所示，相机标定过程可分为相机参数初值的获取以及参数的优化 2 部分。具体可分为 4 个步骤：相机内参初值、外参初值、编码点坐标初值的获取和对这些参数的优化。

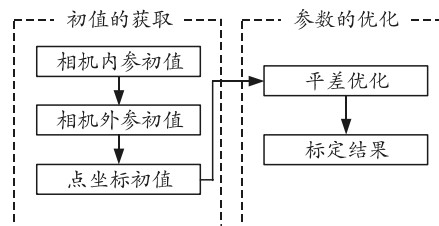


图 3 相机标定流程

2.1 相机内参初值获取

相机出厂时参数的初值称为标称值。相机在制造过程中存在误差，导致标称值与真实值间存在差异，但是这种差异很小；因此，标称值可以作为内参数的初始值。笔者所使用相机的内参数初值如表 1 所示，相机镜头的焦距 f 为 8 mm，图像的尺寸为 1 392×1 040、主点的像素坐标 (u_0, v_0) 的初值为 (696, 520)，畸变系数 κ 初值为 0。

表 1 内参数初值

f/mm	u_0/pixel	v_0/pixel	κ
8	696	520	0

2.2 相机外参初值获取

由于需要对多个相机同时进行标定，因此，将相机的外参分为相对外参和绝对外参：相对外参指不同相机坐标系间的转换关系，绝对外参指相机坐标系与世界坐标系的转换关系。它们都是利用编码点获得，下面对编码点的设计和外参的计算过程做详细介绍。

1) 编码点的设计。

如图 4 所示,文中采用的编码点为环形编码点,由编码带和定位圆组成。编码带用来确定每个编码点唯一的编码值,定位圆代表编码点的位置。编码点采用二进制的编码方式,由 15 位的编码带表示,每个编码位占 24°,根据每个编码位属于黑色区域还是白色区域,确定该编码位的值为 1 或 0。各个编码位上的编码值沿顺时针方向组成一段 15 位的二进制数。将该二进制数循环排列,把最小值对应的十进制数作为该编码点的编码值。图 4 中编码点的编码位对应的最小二进制数为 000101111001011,对应的十进制数为 3019。

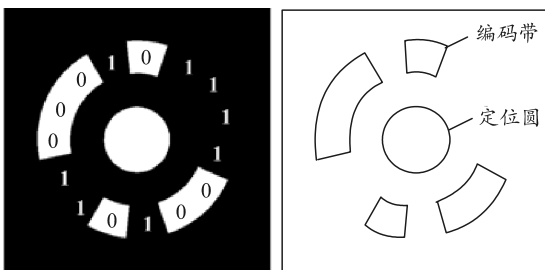


图 4 环形编码点

2) 相对外参初值计算。

相对外参是不同相机坐标系之间的转换关系,可以通过 2 个相机所拍摄的图像中相同的编码点计算得到。在相机视场中,将具有相同编码值的点称为同名点,通过极线约束的方法,可以计算基本矩阵,从而得到 2 个相机之间的转换矩阵。如图 5 所示, Q 为空间中的一个编码点, q 和 q' 是点 Q 在 2 幅图像上的像点; 相机 1 和相机 2 坐标系之间的转换矩阵为 ${}^{CCS_1}H_{CCS_2}$, 由平移向量 T 和旋转矩阵 R 构成, 并将 $[T]_x R$ 定义为本质矩阵, 记为 Essen, 因此, 根据外极线约束原理可得:

$$q'^T (Essen) q = 0. \quad (2)$$

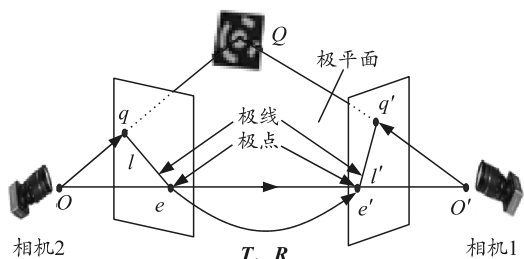


图 5 外极线约束原理

设同名点 q 和 q' 的图像坐标分别为 $(u_q, v_q)^T$ 、 $(u'_q, v'_q)^T$, 则式(2)可写为式(3)的形式, 然后利用同名点的图像坐标可计算本质矩阵 Essen, 并利用外

极线约束分解本质矩阵 Essen, 得到相对外参中的平移向量 T 和旋转矩阵 R 。

$$\begin{pmatrix} u'_q \\ v'_q \\ 1 \end{pmatrix}^T (Essen) \begin{pmatrix} u_q \\ v_q \\ 1 \end{pmatrix} = 0. \quad (3)$$

另外, 在标定时, 由于编码点随意摆放在相机的视场中, 每个编码点与相机的投影中心构成一条射线, 当一个编码点沿着射线移动时, 它在图像中的像不变(如图 6 所示)。当视场只有编码点时, 无法通过它们在图像中所成的像, 确定各个编码点到相机的距离以及编码点之间的相对位置关系。笔者使用标准杆来提供额外约束, 即计算比例因子 scale, 可以通过式(4)计算得到。

$$scale = \frac{n_b L_s}{\sum_{i=1}^{n_b} L_m}. \quad (4)$$

式中: L_m 表示标准杆两端编码点之间距离, 可通过双目视觉原理计算得到; L_s 表示两端编码点的实际距离; n_b 表示标准杆的数量, 文中 $n_b=2$ 。

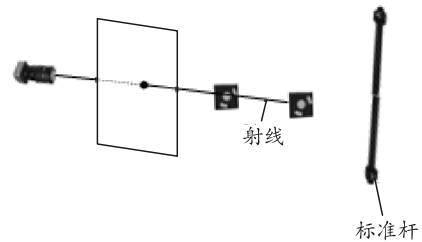


图 6 缩放比例原理

通过上述方法确定比例因子 scale 之后, 利用式(5)确定平移向量 T , rol_j 表示本质矩阵的第 j 行, $j=1,2,3$ 。

$$Trans = scale \begin{pmatrix} rol_1 \cdot rol_2 / rol_2 \cdot rol_3 \\ rol_1 \cdot rol_2 / rol_1 \cdot rol_3 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

3) 绝对外参初值计算。

如图 7 所示, 通过外部设备计算绝对外参初值, 即相机坐标系与世界坐标系的转换关系 ${}^{WCS}H_{CCS}$ 。外部设备上的编码点 Q_1 和 Q_2 相对位置已知, 在图像上对应的像点坐标为 q_1 和 q_2 ; e_1 和 e_2 是从相机投影中心 O 指向像点的单位向量。在相机坐标系下, 设像点 q_i 的图像坐标为 (c_i, r_i) , 则 Q_i 在相机坐标系下的坐标可用式(6)来描述, 其中 S_i 为比例因子, 上述 $i=1,2$ 。

$$Q_i = s_i v_i, \quad (i=1,2). \quad (6)$$

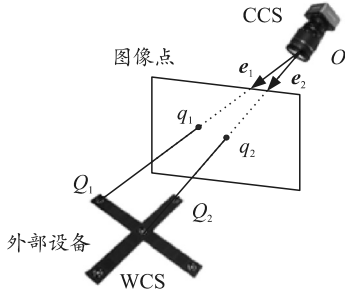


图 7 绝对外参原理

由于外部设备上的编码点 Q_1 和 Q_2 的相对位置关系已知，它们之间的距离 d 如下式所示：

$$d^2 = \|Q_1 - Q_2\|^2 = \|s_1 e_1 - s_2 e_2\|^2 = s_1^2 - 2s_1 s_2 \cos \theta_{12} + s_2^2 \quad (7)$$

式中 θ_{12} 为向量 e_1 和 e_2 的夹角。

通过式(4)求解比例因子，获得编码点在相机坐标系中的坐标，又由于编码点在世界坐标系中的坐标已知，可利用 N 点透视 (perspective-n-point, PNP) 方法^[15]确定世界坐标系与相机坐标系之间的转换矩阵，即获得相机的绝对外参。

4) 编码点坐标初值计算。

利用双目视觉原理，计算所有编码点空间坐标的初值。如图 8 所示， q_1 和 q_2 是 2 个摄像机从 2 个不同视点角度同时获取的 2 幅数字图像中的同名点，由相机 1 的投影中心 O_{c1} 和像点 q_1 可以确定射线 L_1 ；由相机 2 的投影中心 O_{c2} 和像点 q_2 可以确定射线 L_2 ， L_1 与 L_2 在空间中相交，即可计算编码点 Q 的空间坐标。

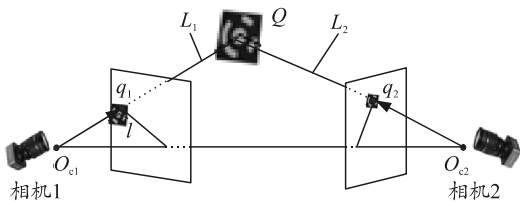


图 8 双目视觉原理

2.3 相机参数的优化

通过上述方法获取相机内、外参数以及编码点世界坐标的初值后，通过平差优化的方法得到它们的准确值。

1) 无畸变情况下的共线方程。

如图 9 所示，在不考虑畸变因素的前提下，图像中的像点 q 是世界坐标系中编码点 Q 的投影点，投影中心 o_c 、 Q 和 q 处在同一直线上。设像点 q 在图像坐标系中的坐标为 (u_q, v_q) ，那么，它在相机坐标系下的坐标 $(x_q, y_q, f) = (u_q, v_q, f)$ ， f 为相机的主距； Q

在世界坐标系下的坐标为 (X_Q, Y_Q, Z_Q) ；投影中心 o_c 在世界坐标系下的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ，同时也是世界坐标系和相机坐标系间的平移向量，可表示为 $\text{Trans}=(t_x, t_y, t_z)$ ；世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵为 R ，则有

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ f \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \lambda R \begin{pmatrix} X_Q - X_0 \\ Y_Q - Y_0 \\ Z_Q - Z_0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

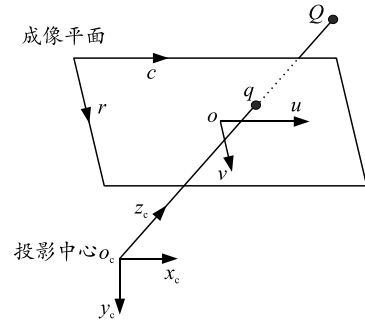


图 9 相机光心、物点和编码点共线关系

2) 考虑畸变情况下的共线方程。

在实际成像过程中，镜头存在畸变，设沿 x 方向和 y 方向的畸变分别为 Δx 和 Δy ，主点坐标为 (x_0, y_0) ，那么完整的成像模型如下式：

$$\left. \begin{aligned} x_q &= f \frac{\bar{X}}{\bar{Z}} + \Delta x + x_0 \\ y_q &= f \frac{\bar{Y}}{\bar{Z}} + \Delta y + y_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 Δx 和 Δy 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \frac{2x_q}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa(x_q^2 + y_q^2)}} - x_q \\ \Delta y &= \frac{2y_q}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa(x_q^2 + y_q^2)}} - y_q \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3) 迭代优化。

对图像处理，设提取的编码点图像坐标为 (x, y) ，通过式(9)投影到图像中得到像点的图像坐标为 (x_q, y_q) ，由于存在误差，两点不可能完全重合，设两点之间的距离为 L ，如式(11)。通过平差优化，最小化 (x, y) 和 (x_q, y_q) 之间的距离为 L ，最终得到精确的相机参数：

$$\left. \begin{aligned} L_{x_0} &= x - x_q \\ L_{y_0} &= y - y_q \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

首先，对式(9)进行泰勒级数展开，并用一次项进行线性化，可得方程如下：

$$\left. \begin{aligned}
 x &\approx (x_q)_0 + \left(\frac{\partial x_q}{\partial f}\right)\Delta f + \left(\frac{\partial x_q}{\partial \kappa}\right)\Delta \kappa + \left(\frac{\partial x_q}{\partial x_0}\right)\Delta x_0 + \\
 &\left(\frac{\partial x_q}{\partial y_0}\right)\Delta y_0 + \left(\frac{\partial x_q}{\partial \alpha}\right)\Delta \alpha + \left(\frac{\partial x_q}{\partial \beta}\right)\Delta \beta + \left(\frac{\partial x_q}{\partial \gamma}\right)\Delta \gamma + \\
 &\left(\frac{\partial x_q}{\partial t_x}\right)\Delta t_x + \left(\frac{\partial x_q}{\partial t_y}\right)\Delta t_y + \left(\frac{\partial x_q}{\partial t_z}\right)\Delta t_z + \\
 &\left(\frac{\partial x_q}{\partial X_Q}\right)\Delta X_Q + \left(\frac{\partial x_q}{\partial Y_Q}\right)\Delta Y_Q + \left(\frac{\partial x_q}{\partial Z_Q}\right)\Delta Z_Q \\
 y &\approx (y_q)_0 + \left(\frac{\partial y_q}{\partial f}\right)\Delta f + \left(\frac{\partial y_q}{\partial \kappa}\right)\Delta \kappa + \left(\frac{\partial y_q}{\partial x_0}\right)\Delta x_0 + \\
 &\left(\frac{\partial y_q}{\partial y_0}\right)\Delta y_0 + \left(\frac{\partial y_q}{\partial \alpha}\right)\Delta \alpha + \left(\frac{\partial y_q}{\partial \beta}\right)\Delta \beta + \\
 &\left(\frac{\partial y_q}{\partial \gamma}\right)\Delta \gamma + \left(\frac{\partial y_q}{\partial t_x}\right)\Delta t_x + \left(\frac{\partial y_q}{\partial t_y}\right)\Delta t_y + \left(\frac{\partial y_q}{\partial t_z}\right)\Delta t_z + \\
 &\left(\frac{\partial y_q}{\partial X_Q}\right)\Delta X_Q + \left(\frac{\partial y_q}{\partial Y_Q}\right)\Delta Y_Q + \left(\frac{\partial y_q}{\partial Z_Q}\right)\Delta Z_Q
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： (f, κ, x_0, y_0) 为相机内参； $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ 为外参；编码点的世界坐标为 (X_Q, Y_Q, Z_Q) ； $\Delta f, \Delta \kappa, \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma, \Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z, \Delta X_Q, \Delta Y_Q, \Delta Z_Q$ 为各个参数的改正量，分别为内参数改正量 $\Delta I = [\Delta f; \Delta \kappa; \Delta x_0; \Delta y_0]$ ，外参数改正量 $\Delta E = [\Delta \alpha; \Delta \beta; \Delta \gamma; \Delta t_x; \Delta t_y; \Delta t_z]$ ，编码点世界坐标改正量 $\Delta D = [\Delta X_Q; \Delta Y_Q; \Delta Z_Q]$ 。因此，式(12)可表示为

$$[I \quad E \quad D] \begin{bmatrix} \Delta I \\ \Delta E \\ \Delta D \end{bmatrix} = [L] \quad (13)$$

式中， I 、 E 、 D 分别表示内参数、外参数、编码点世界坐标系的偏导数矩阵，即式(12)展开的多项式

系数。

然后，通过迭代优化，得到相机参数的精确解。对于多目标优化问题，可利用 Levenberg-Marquardt 方法，使结果收敛到全局最优解，从而完成相机内外参标定。

3 相机标定的实验验证

为验证笔者所提方法的相机标定精度，搭建如图 10 所示的平台进行实验。首先，将外部设备、编码点和标准杆等标定参照物放置在光源上；然后，利用笔者所提算法对多目视觉测量系统中的相机进行标定，计算出最优的相机参数；最后，利用残差对相机标定精度进行衡量，验证系统标定精度。



图 10 标定参照物

实验中，选择 AVT 公司生产的 GuppyF-146B 型黑白工业摄像机，像素为 $1\,392 \times 1\,040$ ，像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m}$ ，采用 SONY 逐行扫描 CCD 芯片，IEEE1394(火线)数字视频信号接口，摄影物镜选择 Computer M0814-Mp/m1214-MP，焦距为 8 mm 。

利用笔者提出的基于光束平差法对多目视觉测量系统的相机进行标定，获得相机的内、外参。内参数包括：主距 f 、畸变系数 κ 、主点坐标 (u_0, v_0) ；外参数包括：相机坐标系相对于世界坐标系的转换矩阵，旋转角度 α 、 β 、 γ 和平移量 T_x 、 T_y 、 T_z 。相机参数的标定结果如表 2 所示。

表 2 相机参数标定结果

序号	相机内参数				相机外参数					
	f/mm	κ	u_0/pixel	v_0/pixel	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\gamma/(\text{°})$	T_x/mm	T_y/mm	T_z/mm
1	8.52	-913.24	737.19	513.95	331.13	350.44	248.85	126.22	-170.63	1 922.60
2	8.50	-794.29	679.79	508.49	331.71	6.39	318.19	197.96	105.42	1 704.07
3	8.47	-716.11	692.91	523.12	332.35	353.72	254.08	-244.58	111.45	1 680.02
4	8.46	-852.05	695.32	489.36	331.43	5.77	325.44	-240.02	-233.19	1 954.48
5	8.45	-797.71	699.52	521.34	332.51	355.99	72.06	-106.27	98.54	1 706.03
6	8.49	-814.72	703.18	511.34	328.83	9.89	144.99	-149.28	-94.26	1 934.01
7	8.55	-908.29	688.05	478.59	327.70	350.16	67.88	199.26	-67.22	1 974.51
8	8.40	-787.42	681.51	514.31	331.40	7.06	140.03	225.66	156.04	1 673.24
9	8.91	-746.32	827.99	604.18	319.81	52.66	231.61	64.81	40.83	1 805.39
10	8.91	-570.45	843.29	625.16	336.35	333.81	283.13	-10.60	61.18	1 567.25
11	8.97	-565.89	816.04	598.56	334.24	13.70	296.11	97.30	12.55	1 571.12
12	8.92	-743.13	805.34	603.24	321.29	3.07	341.95	14.33	-42.86	1 834.46
13	8.68	-539.20	838.62	598.12	320.86	355.85	50.79	22.62	-37.42	1 853.49
14	8.90	-591.23	823.94	611.25	33.30	344.28	96.37	-99.34	-8.76	1 558.05
15	8.94	-580.26	834.56	624.19	336.52	6.26	111.42	-14.05	20.04	1 550.09
16	8.94	-636.18	827.13	611.82	320.24	3.21	164.06	35.36	11.24	1 824.06

相机的标定精度通过残差来衡量，标定精度越高，残差越小。利用立体视觉技术重建标记点的 3 维坐标，将重建结果投影至各相机图像中，由于标定结果存在误差，标记点的投影点和各图像上对应的像点不会完全重合，它们之间的距离和称为残差，文中用 R_E 表示。

张正友法^[8]作为经典的标定方法，具有操作简单、精度高等优点，被广泛应用在 3 维重建和机器视觉测量等领域。通过与张正友法对比，验证笔者所提方法的相机标定精度。张正友法和文中的光束平差法的残差计算结果如表 3 所示。从表中可以看出，光束平差法相对于张正友法具有更高的标定精度。

表 3 重投影点的残差 pixel

方法	均值	标准差	最大值
张正友	0.186 0	0.089 00	0.286 0
光束平差	0.033 6	0.000 73	0.052 9

4 结束语

笔者提出一种基于光束平差法的相机标定方法。该方法首先确定相机的内、外参数的初值，利用立体视觉原理计算相机视场内各个编码点世界坐标的初值；然后利用相机成像模型将编码点投影到各个相机图像中，并利用 Levenberg-Marquardt 算法最小化编码点的投影点与图像中对应像点之间的距离和，即投影误差最小化，获得最优的相机参数。该方法具有快速的迭代收敛速度，鲁棒性较好。实验结果表明：该方法的标定最大误差为 0.052 9 像素，相机标定精度高、应用场景灵活。目前已成功实现了对多目视觉测量系统相机的标定，并完成复杂管路的 3 维重建，满足了工程中多目视觉测量的需求。

参考文献：

[1] JIN P, LIU J H, LIU S L, et al. A new multi-vision-based reconstruction algorithm for tube inspection[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(4): 1-15.
 [2] SALVI J, ARMANGUÉ X, BATLLE J. A comparative

review of camera calibrating methods with accuracy evaluation[J]. Pattern recognition, 2002, 35(7): 1617-1635.

- [3] QIU M L, MA S D, LI Y. Overview of camera calibration for computer vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 43-55.
 [4] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M, HAUCK M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.
 [5] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
 [6] LUH J Y, KLASSEN J A. A three dimensional vision by off-shelf system with multi-cameras[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(1): 35-45.
 [7] 王东红, 罗均, 胡崑峰, 等. 摄像机标定中的直接线性变换法[J]. 机械与电子, 2006, 22(9): 9-11.
 [8] ZHANG Z Y. Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientation[C]. In Proc. 7th International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece, September, 1999: 666-673.
 [9] 于勇, 张晖, 林茂松. 基于双目立体视觉三维重建系统的研究与设计[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 127-130.
 [10] 单宝华, 霍晓洋, 刘洋. 张正友标定法在 DIC 位移测量中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(2): 8-21.
 [11] 胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, 23(11): 1149-1156.
 [12] FAUGERAS O, LUONG Q T, MAYBANK S. Camera self-calibration: Theory and experiments[C]. In: Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision, Italy, 1992: 321-334.
 [13] MAYBANK S, FAUGERAS O. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
 [14] HABED A, BOUFAMA B. Camera self-calibration from bivariate polynomials derived from Kruppa's equations [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(8): 2484-2492.
 [15] HARTLEY R. Euclidean reconstruction and invariants from multiple images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(10): 1036-1041.