

# 靶场静爆实验测速高速相机标定方法

刘泽庆<sup>1</sup> 张玉荣<sup>1</sup> 赵建新<sup>1</sup> 杜博军<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 机械工程学院火炮工程系, 河北 石家庄 050003

<sup>2</sup> 国防科技大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 设计了适用于靶场静爆实验现场的标定设备,研究了基于遗传模拟退火的高速相机标定方法,采用设计的标定设备开展了双目高速相机内外参数标定实验。根据实验采集的圆形人工标志位置参数,分别采用基于遗传模拟退火的标定方法和 Tsai 两步标定法对双目高速相机参数进行标定,并利用标定结果分别还原视野内位置已知点的空间坐标。将还原的空间坐标与实际测量坐标进行对比,可以发现基于遗传模拟退火的标定法还原的空间坐标最大偏差为 0.0082 m,优于 Tsai 两步法得到的最大偏差(0.0181 m),提出的方法提高了高速相机的标定精度,对提高破片速度测量精度具有重要意义。

**关键词** 机器视觉; 视觉测量; 相机标定; 遗传模拟退火; 高速相机; 标定设备

**中图分类号** TJ06 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.111501

## High Speed Camera Calibration for Velocity Measurement in Range Static Explosion Experiment

Liu Zeqing<sup>1</sup> Zhang Yurong<sup>1</sup> Zhao Jianxin<sup>1</sup> Du Bojun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

<sup>2</sup> College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A calibration equipment for the range static explosion experiment site is designed, a calibration method for high speed camera based on genetic simulated annealing is studied, and an experiment which calibrates the internal and external parameters of the binocular high speed camera by the designed calibration equipment is carried out. According to the circular manually-labelled position parameters collected in experiment, the parameters of the binocular high-speed camera are calibrated by the genetic simulated annealing based method and the Tsai two step calibration method respectively. The parameters calibrated by the two methods are used to restore the spatial coordinates of known points in sight. By comparing the restored results with the measurement coordinates, it is found that the maximum deviation of the spatial coordinates restored by the proposed method is 0.0082 m, which is better than the maximum deviation of the Tsai two-step calibration method (0.0181 m). With the proposed method, the calibration accuracy of the high speed camera is improved, and the method is of great significance for the improvement of the fragment velocity measurement accuracy.

**Key words** machine vision; visual measurement; camera calibration; genetic simulated annealing; high speed camera; calibration equipment

**OCIS codes** 150.0155; 150.1488; 150.6910; 150.1135

## 1 引言

随着摄影测量和机器视觉技术的不断发展,采用摄影技术测量运动参数的方法不断成熟。高速相机不

**收稿日期:** 2016-06-29; **收到修改稿日期:** 2016-07-10; **网络出版日期:** 2016-10-25

**作者简介:** 刘泽庆(1991—),男,硕士研究生,主要从事弹道学理论与技术方面的研究。E-mail: liuzeqing320123@sina.com

**导师简介:** 张玉荣(1976—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事兵器发射理论与技术方面的研究。

E-mail: zhangoe@163.com

仅可以记录高速运动过程,而且可以进行视觉测量。研究者们已经对靶场实验中的视觉测量进行了研究<sup>[1-3]</sup>。静爆实验是对弹丸威力进行评估的重要实验,也是弹药研制和定性过程中不可缺少的步骤。为了提高靶场静爆实验效率和破片运动参数的测量精度,采用双目高速相机进行视觉测量,并对破片的运动参数进行解算。高速相机的内外参数是破片参数解算的重要参量,内外参数的标定精度直接影响目标位置测量的精度。目前有多种常用的相机标定方法。Tsai<sup>[4]</sup>提出的两步标定法考虑了相机的径向畸变,满足大多数相机标定的要求;Weng等<sup>[5]</sup>提出的迭代法不仅考虑了镜头的径向畸变,同时也考虑了离心畸变和薄棱畸变,该算法可以提高广角镜头的标定精度;张正友<sup>[6]</sup>提出的标定法较为灵活且简单易行,但主要应用于对相机内参数的标定;郭秋燕等<sup>[7]</sup>提出了遗传算法优化标定法,遗传算法的标定精度受到相关因子的影响比较大,解算的标定参数不稳定,同时易出现早熟现象,全局优化能力相对较差;田震等<sup>[8]</sup>提出了神经网络标定法,可省去解算繁杂参数方程的过程,但是神经网络所解得的参数结果稳定性较差,标定误差处于一个动态范围内,从而影响测量精度。

为了满足静爆实验中高速相机标定的要求,从标定设备尺寸设计、标志点种类选择和标定板材料选择等方面考虑,设计了静爆实验中适用的标定设备;在标定方法中考虑了镜头的径向畸变,研究了基于遗传模拟退火的高速相机内外参数的标定方法,将标定结果与Tsai两步法的标定结果作对比;采用两种方法标定的结果对已知目标点进行空间坐标还原,并将坐标还原结果与实际测量的坐标作对比。

## 2 标定设备设计

近距离标定时常采用国际象棋棋盘格作为标定板。由于棋盘格尺寸较小,进行较远距离标定时无法覆盖视野中的多个位置,不利于对镜头的畸变进行校正;棋盘格的标定点在同一标定设备上时标定板面积相对较大,容易受到破片损坏,导致标定无法进行。因此,设计了多个只有单个人工标志点的标定设备。标定设备主要由标定杆和标定板组成。标定杆为标定板提供支撑,满足标定板在视场内的布置要求;标定板为标定设备的主体部分,上面设计有人工标志点。

### 2.1 标定杆

标定杆的高度直接影响设定的标志点在图像中的位置,因此须对标定杆的高度进行设计。根据文献[9],标志点应尽量均匀分布在被摄区域,而且须加强对边缘区域标志点的布设,因此须设计多种不同高度的标定杆。

在计算标定杆的高度时,仅考虑纵向平面内成像。假设纵向平面的小孔成像模型如图1所示,点 $O_0$ 为小孔,根据小孔成像原理可得

$$h/H = f/L, \quad (1)$$

式中 $H$ 为标定杆的高度, $h$ 为投影长度, $f$ 为相机焦距, $L$ 为相机到标定杆的物距,则标定杆的高度为

$$H = hL/f. \quad (2)$$

根据标定杆在图像纵向所占的像素数 $n$ 和像素纵向尺寸 $d_y$ ,计算投影长度 $h$ 为

$$h = nd_y. \quad (3)$$

考虑标定杆高度的同时,还须考虑标定杆的稳定性,以保证在靶场实验过程中标定杆不会发生晃动。

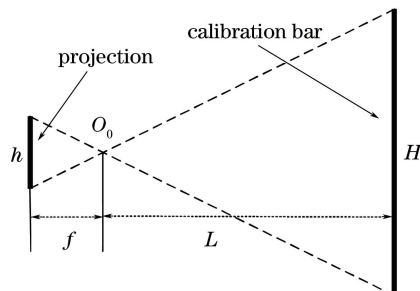


图1 小孔成像模型

Fig. 1 Model of pinhole imaging

## 2.2 标定板

进行靶场室外实验时,环境背景复杂。因此设计标定板时须考虑人工标志点的类型及尺寸,同时采取相应的措施增强标志点与环境的对比度,以便于提取人工标志点。

### 2.2.1 人工标志点的选取

常用的人工标志点包括方形对顶角标志、十字形标志、圆形标志等<sup>[10]</sup>,如图 2 所示。方形对顶角标志的提取对图像的拍摄质量要求较高,可精确定位对角点;十字形标志多用于外形规则的待测物;圆形人工标志识别提取相对简单,定位算法成熟,采用最小二乘拟合法提取圆心可获得较高的定位精度和稳定性,在零件检测和工程测量中应用较多。因此这里选用圆形标志作为人工标志点。

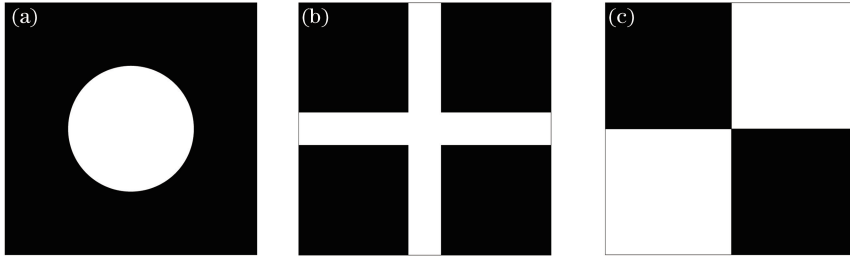


图 2 (a)圆形标志;(b)十字形标志;(c)方形对顶角标志

Fig. 2 (a) Circular mark; (b) cross mark; (c) square opposite angle mark

### 2.2.2 标定板尺寸

标定板的主要功能为承载圆形人工标志,设计标定板的尺寸时,首先应考虑圆形人工标志的直径。根据文献<sup>[11]</sup>,圆形人工标志的直径  $\phi$  与成像直径  $d$  之间的关系为

$$\phi = 5dY / (3f), \quad (4)$$

式中  $Y$  为摄影距离,  $f$  为摄影焦距。计算得到圆形人工标志的直径为 12 cm。

在标定板上设置背景,可增强背景与圆形人工标志点的对比度。标定板尺寸不宜过大,避免标定板在静爆实验中受到破片的损坏,因此标定板的长度取圆形人工标志直径的 1.5~3 倍。

### 2.2.3 标定板的涂覆

由于靶场实验现场环境背景复杂、拍摄距离远等因素,拍摄图像上的人工标志点存在边缘模糊、提取困难等问题,随着拍摄距离增大,这些问题更加严重,因此须采取一定的措施以增强人工标志点与背景的对比度。根据光学原理,选用高反射率的材料增强人工标志点的反光量;同时选用吸光率较高的材料,减少标定板上非人工标志点区域的反光率。

常用的反光率较高的材料主要包括回光反射材料和高漫反射材料。回光反射材料由玻璃珠等材料作为反射层,反射光按入射光的原入射光路反射回去<sup>[12]</sup>;高漫反射材料采用氧化镁、硫酸钡等超细粉制成的涂层<sup>[13]</sup>,可以从多个角度提供反射光亮度。靶场静爆实验时提供定向光源来提高人工标志点亮度的难度较大,因此选择高漫反射材料作为人工标志点的涂覆材料。采用哑光黑色喷漆对背景色区域进行喷涂,这种涂层反光率较低,可降低光线的反射,与人工标志点形成较大的对比。

## 3 基于遗传模拟退火的相机参数标定

### 3.1 遗传模拟退火算法

遗传算法作为一种模拟生物遗传进化过程的算法,通过遗传、交叉、变异等步骤实现全局优化搜索。遗传算法一个重要的缺陷为早熟,即随着优良个体的急剧增加,种群丧失多样性,使得搜索过程陷入局部搜索,无法得到全局最优解;模拟退火算法以随机搜索的方式从概率意义上进行全局寻优,但计算速度问题使得优化时间和优化效果之间相互矛盾,因而很难保证计算结果为全局最优。

结合上述遗传算法的两个特点,提出了遗传模拟退火算法。遗传模拟退火算法在种群交叉和变异之后,对种群进行模拟退火操作。采用 Metropolis 接受准则产生下一代种群,在选择种群中最优个体的同时,也在一定概率下接受不太好的个体进入下一代,保证了种群的多样性,从而有利于实现全局最优化<sup>[14]</sup>。

模拟退火算法流程<sup>[15]</sup>:1) 初始化,设置种群大小、初始温度、进化代数等;2) 初始化种群;3) 计算种群中每个个体的适应度;4) 对种群进行交叉、变异操作;5) 对种群中的个体进行模拟退火,并计算每个个体的适应度;6) 选择个体产生下一代新的种群;7) 终止条件判断,如果大于预先设定的种群代数或连续若干代最优个体未发生变化,则终止计算;否则跳转至步骤3);8) 输出计算结果。

与遗传算法相比,遗传模拟退火算法具有更大的选择范围,且选择采用接受概率而非随机选择,具有模拟退火的特征。退温操作具有模拟退火适应函数的特征,温度高时加速性不明显,但温度低时加速性很明显<sup>[16]</sup>。其他计算步骤同遗传算法。

### 3.2 考虑径向畸变的相机成像模型

相机成像模型如图3所示,点 $P$ 在世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 中的坐标为 $(x_w, y_w, z_w)$ ,在相机坐标系 $O_x y z$ 中的坐标为 $(x, y, z)$ ,在相机像平面的理想像点为 $p(X_b, Y_b)$ ;由于镜头的畸变,实际像点为 $p'(X_d, Y_d)$ ,像素坐标为 $(u, \nu)$ 。

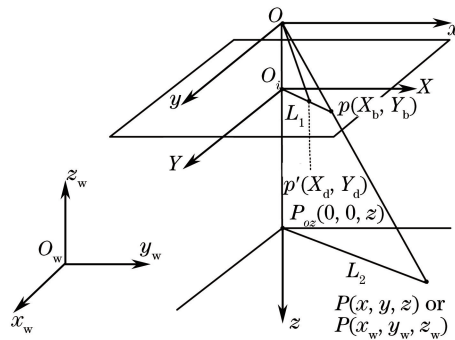


图3 含径向畸变的成像模型

Fig. 3 Imaging model with radial distortion

点 $P$ 在世界坐标 $(x_w, y_w, z_w)$ 与相机坐标 $(x, y, z)$ 之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{R}$ 为 $3 \times 3$ 正交旋转矩阵,  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{t}$ 为三维平移向量,  $\mathbf{t} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$ 。 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$ 为与相机姿态相

关的外参数。

理想像点 $p(X_b, Y_b)$ 与相机坐标 $(x, y, z)$ 之间的转换关系为

$$z \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $f$ 为相机的焦距。

考虑镜头的径向畸变<sup>[4]</sup>,理想像点 $p(X_b, Y_b)$ 与实际像点 $p'(X_d, Y_d)$ 之间的关系可表示为

$$\begin{cases} X_b = X_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ Y_b = Y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $k_1, k_2$ 为径向畸变系数,  $r^2 = X_d^2 + Y_d^2$ 。

$p'$ 像素坐标 $(u, \nu)$ 与实际像点 $p'(X_d, Y_d)$ 之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x^{-1} & 0 & u_0 \\ 0 & d_y^{-1} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中  $d_x$ 、 $d_y$  为相机像素尺寸,  $(u_0, v_0)$  为相机主点的像素坐标,  $f, k_1, d_x, d_y, u_0, v_0$  为与相机属性相关的内参数。

### 3.3 基于遗传模拟退火的相机参数标定

图 3 中直线  $L_1$  与直线  $L_2$  平行, 根据径向畸变假设可得

$$\frac{x}{y} = \frac{X_d}{Y_d} = \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}. \quad (9)$$

整理(9)式可得

$$[x_w Y_d \quad y_w Y_d \quad z_w Y_d \quad Y_d \quad -x_w X_d \quad -y_w X_d \quad -z_w X_d] \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x & r_4 & r_5 & r_6 \\ T_y & T_y & T_y & T_y & T_y & T_y & T_y \end{bmatrix}^T = X_d. \quad (10)$$

当已知多个点的像素坐标  $(u, v)$  及三维坐标  $(x_w, y_w, z_w)$  时, 可以根据(8)、(10)式及  $\mathbf{R}$  的性质求得  $\mathbf{R}$ 、 $T_x$ 、 $T_y$ 。上述过程是在径向畸变假设的基础上进行求解, 镜头径向畸变的大小对求解的  $\mathbf{R}$ 、 $T_x$ 、 $T_y$  没有影响。

根据(5)~(7)式可得

$$X_b = X_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) = \frac{f(r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x)}{(r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z)}. \quad (11)$$

从(11)式可以看出, 镜头的径向畸变主要影响  $f$ 、 $T_z$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  的求解。直接求解(11)式比较困难, 因此这里采用遗传模拟退火算法进行优化求解。根据(11)式建立优化函数, 即

$$g(f, T_z, k_1, k_2) = X_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) - \frac{f(r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x)}{(r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z)}. \quad (12)$$

在不考虑畸变的情况下求解  $f$ 、 $T_z$  的初值,  $k_1$ 、 $k_2$  的初值取 0, 并根据  $f$ 、 $T_z$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  的初值确定变量的取值范围, 求解步骤如图 4 所示。

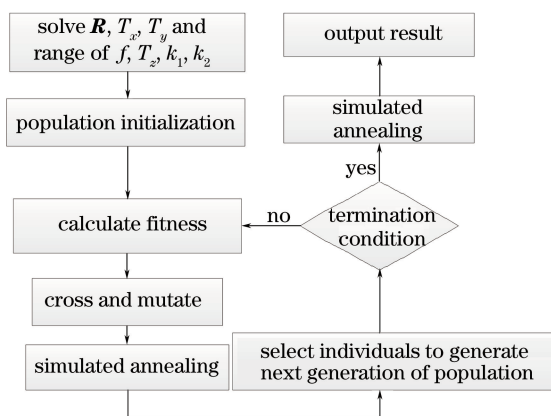


图 4 基于遗传模拟退火的标定流程图

Fig. 4 Calibration flow chart based on genetic simulated annealing

## 4 标定实验

### 4.1 实验设置

采用设计的标定设备, 对 IDT-Y7S1 高速相机进行标定实验, 像素尺寸为  $7.24 \mu\text{m}$ , 采用标称焦距为  $25 \text{ mm}$  的定焦镜头。布置标定现场时须兼顾双高速相机的视野和标定设备在视野内的分布情况, 圆形人工标志应尽量均匀分布在视野内, 便于对镜头畸变进行校正。标定现场布置如图 5 所示, 1~9 号位置设立 9 个标定设备, 相机 1、相机 2 位置分别放置一台高速相机进行标定图像的采集。



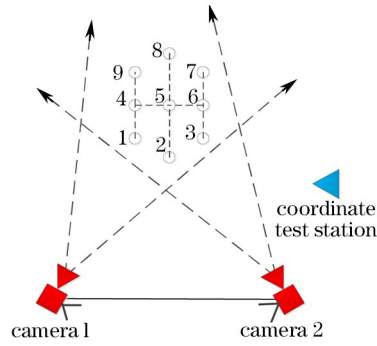


图 5 标定现场设置

Fig. 5 Calibration site layout

## 4.2 坐标测量

进行标定实验时,需要测量人工标志的三维空间坐标。远距离测量时应采用全球定位系统进行高精度定位;距离较近时可采用全站仪进行测量,全站仪通过对角度和距离的测量,计算得到目标点的三维空间坐标,精度可以达到毫米级,能够满足标定实验的精度需求。全站仪放置在图 5 中坐标测试站的位置。使用全站仪进行坐标测量时,以全站仪所在位置作为坐标原点,以选定的基准方向作为  $x_w$  轴,以天顶方向作为  $z_w$  轴,根据右手坐标系确定  $y_w$  轴。测量前须对全站仪进行对中整平并选定基准方向,然后依次测量各个圆形人工标志圆心所在位置的空间坐标。

## 4.3 圆形人工标志的图像定位

完成对标定图像的采集后,通过标定图像获取人工标志点在相机图像上的图像坐标。采用基于感兴趣区域<sup>[17]</sup>的交互式提取方法选定圆形人工标志所在的感兴趣区域,降低了搜索范围,提高了圆形人工标志的提取效率和提取精度。对圆形人工标志所在的感兴趣区域进行二值化、干扰区域剔除以及边缘提取,得到圆形人工标志的边缘点坐标。由于拍摄角度的问题,圆形人工标志成像后为椭圆形,因此可以设人工标志的成像方程为

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + q = 0, \quad (13)$$

式中  $a, b, c, d, e, q$  为对应椭圆方程的参数。

采用最小二乘拟合法<sup>[18]</sup>,按照(13)式对提取的圆形人工标志的边界进行拟合,椭圆的中心坐标  $(x_c, y_c)$  可表示为

$$x_c = \frac{be - 2cd}{4ac - b^2}, y_c = \frac{bd - 2ae}{4ac - b^2}. \quad (14)$$

圆形人工标志提取效果如图 6 所示。

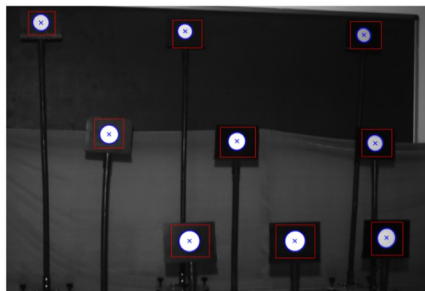


图 6 圆形人工标志的提取

Fig. 6 Extraction of circular artificial marks

## 4.4 高速相机内外参数的标定结果

根据标定测得的圆形人工标志点的参数,采用基于遗传模拟退火的高速相机标定方法对高速相机内外参数进行标定。作为对比,在相同参数条件下,采用 Tsai 两步法对高速相机的内外参数进行标定, Tsai 两步法采用单纯形法进行参数优化<sup>[19]</sup>。两个高速相机的内外参数标定结果如表 1 所示。

从标定结果可以发现,两种方法求解的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  基本一致,主要差别在于焦距和畸变系数。基于遗传模拟退火方法解算的焦距与定焦镜头的焦距更加接近,同时求解得到的畸变系数比 Tsai 两步法标定的畸变系数大,这是因为基于遗传模拟退火的标定法搜索范围更大,全局优化效果更好。

表 1 高速相机的内外参数标定结果

Table 1 Calibration results of internal and external parameters of high speed cameras

Parameter	High speed camera 1			High speed camera 2		
	Calibration method based on		Tsai two-step	Calibration method based on		Tsai two-step
	genetic simulated annealing		calibration method	genetic simulated annealing		calibration method
$\mathbf{R}$	$\begin{bmatrix} 0.921 & -0.385 & -0.055 \\ -0.007 & -0.011 & 1.000 \\ -0.386 & -0.921 & -0.013 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.922 & -0.383 & -0.055 \\ -0.007 & -0.010 & 1.000 \\ -0.386 & -0.921 & -0.014 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.607 & -0.792 & -0.059 \\ -0.002 & -0.022 & 1.000 \\ -0.793 & -0.607 & -0.015 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.606 & -0.793 & -0.056 \\ -0.002 & -0.021 & 1.000 \\ -0.795 & -0.607 & -0.016 \end{bmatrix}$		
$\mathbf{T} / \text{m}$	$[0.402 \ -0.426 \ -1.776]^\text{T}$	$[0.402 \ -0.426 \ -1.439]^\text{T}$	$[2.981 \ -0.397 \ -2.831]^\text{T}$	$[2.981 \ -0.397 \ -2.828]^\text{T}$		
$F / \text{mm}$	25.3	24.0	25.4	25.5		
$k_1$	0.03070	-0.00260	0.02550	0.00220		
$k_2$	0.03600	0.00005	0.02650	-0.00006		

#### 4.5 三维坐标还原

为了验证相机标定的精度,采用双目高速相机测得的图像坐标,对已知空间位置的参考点进行三维坐标还原,并将还原结果与实际测量坐标进行对比。

对两个相机的内外参数进行标定后,根据点  $P$  在两个相机上的像素坐标,还原点  $P$  的空间坐标,步骤: 1) 畸变纠正,根据像点的像素坐标  $(u, v)$  及(7)、(8)式,得到理想像点  $p$  的坐标  $(X_b, Y_b)$ ; 2) 最小二乘空间坐标还原。

由(5)、(6)式可得

$$z \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^\text{T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

将(15)式展开并消去  $z$  可得

$$\begin{cases} X_b r_7 x_w + X_b r_8 y_w + X_b r_9 z_w + X_b T_z = f r_1 x_w + f r_2 y_w + f r_3 z_w + f T_x \\ Y_b r_7 x_w + Y_b r_8 y_w + Y_b r_9 z_w + Y_b T_z = f r_4 x_w + f r_5 y_w + f r_6 z_w + f T_y \end{cases}. \quad (16)$$

将(16)式转化为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} X_b r_7 - f r_1 & Y_b r_7 - f r_4 \\ X_b r_8 - f r_2 & Y_b r_8 - f r_5 \\ X_b r_9 - f r_3 & Y_b r_9 - f r_6 \end{bmatrix}^\text{T} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f T_x - X_b T_z \\ f T_y - Y_b T_z \end{bmatrix}. \quad (17)$$

分别使用下标  $l, r$  表示两个相机参数,同一点  $P$  的坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} X_{bl} r_{7l} - f_l r_{1l} & X_{bl} r_{8l} - f_l r_{2l} & X_{bl} r_{9l} - f_l r_{3l} \\ Y_{bl} r_{7l} - f_l r_{4l} & Y_{bl} r_{8l} - f_l r_{5l} & Y_{bl} r_{9l} - f_l r_{6l} \\ X_{br} r_{7r} - f_r r_{1r} & X_{br} r_{8r} - f_r r_{2r} & X_{br} r_{9r} - f_r r_{3r} \\ Y_{br} r_{7r} - f_r r_{4r} & Y_{br} r_{8r} - f_r r_{5r} & Y_{br} r_{9r} - f_r r_{6r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_l T_{x1} - X_{bl} T_{z1} \\ f_l T_{y1} - Y_{bl} T_{z1} \\ f_r T_{xr} - X_{br} T_{zr} \\ f_r T_{yr} - Y_{br} T_{zr} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

$$\text{令 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_{bl} r_{7l} - f_l r_{1l} & X_{bl} r_{8l} - f_l r_{2l} & X_{bl} r_{9l} - f_l r_{3l} \\ Y_{bl} r_{7l} - f_l r_{4l} & Y_{bl} r_{8l} - f_l r_{5l} & Y_{bl} r_{9l} - f_l r_{6l} \\ X_{br} r_{7r} - f_r r_{1r} & X_{br} r_{8r} - f_r r_{2r} & X_{br} r_{9r} - f_r r_{3r} \\ Y_{br} r_{7r} - f_r r_{4r} & Y_{br} r_{8r} - f_r r_{5r} & Y_{br} r_{9r} - f_r r_{6r} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} f_l T_{x1} - X_{bl} T_{z1} \\ f_l T_{y1} - Y_{bl} T_{z1} \\ f_r T_{xr} - X_{br} T_{zr} \\ f_r T_{yr} - Y_{br} T_{zr} \end{bmatrix}, \text{根据(18)式,并由}$$

最小二乘法求得点  $P$  的世界坐标  $(x_w, y_w, z_w)$  为

$$[x_w \ y_w \ z_w]^\text{T} = (\mathbf{A}^\text{T} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\text{T} \mathbf{B}. \quad (19)$$

采用标定的高速相机参数及从两个高速相机拍摄图像上得到的图像坐标,对已知空间点的三维坐标进行还原,还原结果及偏差  $\Delta s$  如表2所示。

表2 两种方法的空间坐标还原结果及偏差

Table 2 Spatial coordinate restoration results and deviations by two methods

m

Known point	Spatial coordinate restoration results and deviation of calibration method based on genetic simulated annealing				Tsai two-step method			
	$x_w$	$y_w$	$z_w$	$\Delta s$	$x_w$	$y_w$	$z_w$	$\Delta s$
1	0.6219	3.4816	-0.0435	0.0022	0.6279	3.4846	-0.0413	0.0050
2	0.2069	3.9371	-0.0491	0.0033	0.2177	3.9455	-0.0483	0.0131
3	0.5610	4.9670	0.5318	0.0082	0.5590	4.9652	0.5317	0.0101
4	1.9410	3.6502	0.5766	0.0049	1.9550	3.6492	0.5761	0.0181
5	2.1004	4.9605	1.4084	0.0025	2.1044	4.9632	1.4115	0.0069

从空间坐标还原结果可以看出,采用基于遗传模拟退火的标定方法标定的参数对已知点空间坐标还原结果的最大偏差为 0.0082 m,最小偏差为 0.0022 m;采用 Tsai 两步标定法的坐标还原结果的最大偏差为 0.0181 m,最小偏差为 0.0050 m。因此,采用基于遗传模拟退火标定方法标定的参数对空间坐标点的还原精度高于 Tsai 两步法。

## 5 结 论

针对静爆实验中高速相机标定问题,设计了静爆实验中适用的标定设备;研究了基于遗传模拟退火的高速相机标定方法,该算法的全局优化效果较好,标定的高速相机参数对空间坐标还原的最大偏差为 0.0082 m,优于 Tsai 两步标定法(0.0181 m),提高了高速相机的标定精度;从工程实践的要求出发,采用标定结果对已知空间点的三维坐标进行了还原,将还原的坐标与测量所得的坐标进行对比并计算偏差,将所得的结果作为评价标定方法标定效果的标准,为相机标定方法的评价提供了参考。该标定方法在测速实验中的测速精度须进一步进行实验验证。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Zhongping, Wu Qiao, Han Zhao, *et al.* Moving velocity of underwater object by high-speed photography[J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2007, 15(1): 21-23.  
吴中平, 吴 乔, 韩 召, 等. 利用高速摄影测量水下物体的运动速度[J]. *水雷战与舰船防护*, 2007, 15(1): 21-23.
- 2 Liu Huaning, Zheng Yu, Li Wenbin, *et al.* Velocity measurement method of projectiles based on high-speed photography technology[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, 33(11): 71-74.  
刘华宁, 郑 宇, 李文彬, 等. 基于高速摄影技术的速度测量方法[J]. *兵工自动化*, 2014, 33(11): 71-74.
- 3 Liu Zeqing, Zhang Yurong, Zhao Jianxin, *et al.* High-speed photography velocity measurement in range based on digital photogrammetry[J]. *Journal of Ballistics*, 2015, 27(4): 47-51.  
刘泽庆, 张玉荣, 赵建新, 等. 基于数字摄影测量的靶场高速摄影测速方法[J]. *弹道学报*, 2015, 27(4): 47-51.
- 4 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- 5 Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965-980.
- 6 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 7 Guo Qiuyan, Liu Pengfei, An Ping, *et al.* Self-calibration for cameras based on genetic algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(11): 1712-1715.  
郭秋艳, 刘鹏飞, 安 平, 等. 基于遗传算法的摄像机自标定方法[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(11): 1712-1715.
- 8 Tian Zhen, Zhang Qi, Xiong Jiulong, *et al.* Large-scale camera calibration 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.
- 9 Gong Tao. A scheme for distribution of control points in close range photogrammetry[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1997, 32(3): 330-335.  
龚 涛. 近景摄影测量控制点布设方案的研究[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(3): 330-335.
- 10 Zheng Hui. Summary of artificial landmarks and its method's application in close-range photogrammetry[J]. Geospatial Information, 2009, 7(6): 30-33.  
郑 慧. 近景摄影测量中人工标志点及其定位方法综述[J]. 地理空间信息, 2009, 7(6): 30-33.
- 11 Feng Wenhao. Non topographic photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1985: 58-60.  
冯文瀚. 非地形摄影测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1985: 58-60.
- 12 Minnesota Mining and Manufacturing Company. Adhesive composition as well as retroreflective material and preparation method thereof: CN104119824 A[P]. 2014-10-29.  
3M 创新有限公司. 胶粘剂组合物、回归反射反光材料及其制备方法: CN104119824 A[P]. 2014-10-29.
- 13 Shi Jiading, Zhang Liming, Cao Xingjia, *et al.* Design and research of diffuser panel used for on-board calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0828001.  
施家定, 张黎明, 曹兴家, 等. 星上定标漫反射板设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0828001.
- 14 Kang Lishan. Non numerical parallel algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2003: 102-104.  
康立山. 非数值并行算法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 102-104.
- 15 Liu Zhigang, Wang Jianhua, Geng Yingsan, *et al.* A modified genetic simulated annealing algorithm and its application [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 1009-1101.  
刘志刚, 王建华, 耿英三, 等. 一种改进的遗传模拟退火算法及其应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 1009-1101.
- 16 Xing Wenxun, Xie Jinxing. Modern optimization calculation method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 141-142.  
邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 141-142.
- 17 Cai Huaiyu, Feng Zhaodong, Huang Zhanhua. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308006.  
蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308006.
- 18 Zhao Lianjun, Liu Enhai, Zhang Wenming, *et al.* Feature extraction of target based on global information[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0415001.  
赵连军, 刘恩海, 张文明, 等. 利用全局信息提取靶标特征的方法[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0415001.
- 19 Lagarias J C, Reeds J A, Wright M H, *et al.* Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions[J]. SIAM Journal of Optimization, 1998, 9(1): 112-147.