

# 基于几何相似法的弹丸类目标 初速度测量方法

谭广通, 程国民, 李长春

(中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

**摘要:** 几何相似法隶属于单目视觉测量方法, 单目视觉测量方法具有结构简单、计算速度快、稳定性好等优点, 越来越多的应用于计算机视觉测量领域; 依据几何相似法测量原理, 提出一种基于几何相似法的单目视觉光学测速方法, 主要用于弹丸类高速目标的初速度测量, 相比于雷达、激光等测速方法具有可视化优势, 目标飞行过程中状态细节可见, 相比于其它单目视觉测量方法更加快捷、稳定, 并且布站简单; 经过试验测试, 结果表明利用该方法进行速度测量, 能够有效的给出弹丸类高速目标的初速度, 测速误差在 1% 以内, 验证了采用单相机进行弹丸类高速目标出筒初速度测量方法的可行性。

**关键词:** 高速相机; 几何相似法; 单目视觉; 畸变; 相机标定

## Initial Velocity Measurement Method of Projectile Targets Based on Geometric Similarity Method

TAN Guangtong, CHENG Guomin, LI Changchun

(91245 troops, Huludao 125000, China)

**Abstract:** Geometric similarity method is subordinate to monocular vision measurement method, Monocular vision measurement method has the advantages of simple structure, fast calculation speed, good stability and so on, it is more and more used in the field of computer vision measurement. According to the measurement principle of geometric similarity method, a monocular vision optical velocity measurement method based on geometric similarity method is proposed, it is mainly used for the initial velocity measurement of high-speed projectile targets, compared to radar, laser and other speed measurement methods have visual advantages. The target's state details are visible during flight, and it is faster and more stable than other monocular vision measurement methods, and the layout is simple. By the experimental verification, the results show that, the target initial velocity can be given effectively when this method is used to measure the speed, the speed measurement error is within 1%. The feasibility of measuring the initial velocity of projectile high-speed target is verified by using single-camera.

**Keywords:** high speed camera; geometric similarity method; monocular vision; distortion; camera calibration

### 0 引言

计算机视觉测量方法是近 20 年逐步发展并应用于测量领域的, 计算机视觉<sup>[1-2]</sup>测量主要分为多目视觉、双目视觉<sup>[3]</sup>及单目视觉<sup>[4]</sup>。其中双目和多目测量需要利用两个或者多个视觉传感器来完成测量任务。这两种测量方法对相机的位置布置、视场大小、传感器尺寸、相机相对姿态等要求较高, 同时存在视场范围小、测量距离短等缺点, 并且在实际应用中系统结构复杂, 数据处理量大。因此, 在很多测量领域被结构简单、速度快、稳定性好的单目视觉测量系统所代替。

单目视觉测量是指仅利用一台视觉传感器采集图像, 对物体的几何尺寸及物体在空间的位置、姿态等进行测量。单目视觉测量方法具有系统结构简单、标定步骤少、视场范围广等优点。

几何相似法<sup>[5]</sup>属于单目视觉测量方法中的一种, 基于几何相似法的单相机测量方法是在几何相似法的基础上进行了改进, 无需按照几何相似法要求相机镜头光轴垂直于测量平面, 布站方法更加简单。通过基于几何相似法的单相机测量方法能够对弹丸类快速目标初速度进行测量, 经过后期的图像处理和计算, 给出有效的测量结果。

目前, 弹丸类目标速度测量方法一般分为两种, 一种是利用多普勒测速仪, 一种是利用截取装置获得飞行距离和时间, 从而计算得出速度。第一种方法对系统要求高, 导致造价昂贵; 第二种方法系统相对要求简单, 适用性较高。但二者均只能计算测量出速度, 不能得到目标的飞行状态图像。随着高速相机拍摄能力的发展, 计算机视觉测量领域也突飞猛进, 提出一种单相机弹丸类高速目标的初速度的测量方法, 不仅可以得到弹丸类高速目标的出筒时刻速度, 还能够采集到目标飞行图像。

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2022-01-04。

作者简介: 谭广通(1981-), 男, 辽宁普兰店人, 工程师, 主要从事靶场光学测量技术方向的研究。

引用格式: 谭广通, 程国民, 李长春. 基于几何相似法的弹丸类目标初速度测量方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 132-137.

## 1 单目视觉及几何相似法概述

### 1.1 单目视觉测量方法

为了重建运动目标的运动轨迹,获得目标的三维空间位置信息,单目视觉测量<sup>[6-7]</sup>系统使用一台摄像机采集目标图像,在获得的图像序列中,利用景物中的一些自然或者人造的特征,应用预先设计好的算法解算并输出运动目标的相关信息。单目视觉测量是计算机视觉研究的一个重要内容,涉及计算机图像处理、模式识别、人工智能及自动控制等诸多学科。单目视觉测量结构简单、标定步骤少等优点,同时还避免了立体视觉中的视场小、立体匹配难的不足,因而近年来这方面的研究比较活跃。利用单目视觉来对运动目标进行测量的方法有很多,主要可以概括为几何相似法、几何光学法、特征靶标测量法、激光测距仪辅助测量法等。其中几何相似法相比于其它测量方法具有测量场景布置简单、计算快捷、已知条件需求少等优点,在单目视觉测量领域得到广泛应用。

### 1.2 相机标定

单目视觉测量系统所拍摄图像中的每个像素点与实际三维环境中的物体对应位置是与相机成像系统存在某种几何关系,这种几何关系主要与相机的探测器尺寸、分辨率、镜头焦距、光轴位置、镜头畸变等参数相关,这些参数称为相机参数,参数的准确性决定了几何计算模型的计算结果精确度。相机参数一般来源于实验计算,这个过程称为相机标定。

相机标定分为内部参数标定和外部参数标定<sup>[8-10]</sup>,相机标定一般是对相机镜头的标定。内部参数简称内参,外部参数简称外参。内参主要包括镜头的像素焦距、主点位置、镜头径向畸变、镜头切向畸变等,外参主要为相机在空间坐标系中的位置转换关系,包含了角度转换矩阵和位置转换矩阵。目标物体的测量须通过相机内参和外参建立几何计算模型。因此,在单目视觉测量系统中,必须对相机系统进行标定,得到相机标定参数。

相机参数标定算法可分为线性标定算法<sup>[11-12]</sup>和非线性标定算法<sup>[13]</sup>。由于线性标定只考虑线性成像模型(针孔模型),不考虑像差,通过线性变换直接求解。线性模型不能精确地描述相机的成像几何关系,因而精度较差,在测量领域一般不予采用。非线性标定利用线性变换方法并且考虑成像系统的畸变因素得到相机参数的精确值。由于测量弹丸出筒初速度对图像判读要求较高,因此需对相机镜头进行非线性标定。

镜头畸变<sup>[14-15]</sup>是指光学镜头在成像过程中造成所固有的成像失真情况总称,使得整个光学系统在整个视场范围内成像与实物之间的关系不能严格满足小孔成像原理。镜头畸变主要包括径向畸变和切向畸变<sup>[16]</sup>,径向畸变表现为桶形畸变和枕型畸变<sup>[17]</sup>,切向畸变表现为角度方向上的变化。在机器视觉检测中,尤其是高精度机器视觉检测中,镜头畸变则是影响精度的一个主要因素。因此,在现行使用的视觉检测系统中,加入了对相机镜头的畸变校正,大

大降低了镜头畸变对图像的影响,从而提高测量精度。镜头畸变校正主要通过非线性标定计算畸变参数,畸变校正方法主要有 Tsai<sup>[18-19]</sup>的基于径向畸变的 RAC<sup>[20]</sup>两步标定算法,Zhang<sup>[21]</sup>提出的基于 2D 标定板<sup>[22]</sup>的相机镜头标定。通过对镜头的标定,能够给出相机内参矩阵和畸变参数矩阵,相机内参包含像素焦距、主点坐标、坐标轴倾斜参数和其他系统误差参数,畸变参数矩阵包含镜头径向畸变系数和切向畸变系数。

## 2 基于几何相似法的单目相机测速方法

根据几何相似法测量要求,在测量拍摄图像时需要将相机镜头光轴(相机拍摄方向)垂直于测量平面,再根据视场中的标志物体实际大小、标志物体图像成像尺寸、测量目标成像尺寸进行计算测量,得到测量目标实际尺寸或其他测量数据。几何相似法因为需将相机拍摄方向垂直于测量平面从而在实际应用中限制了相机布站,对于某些无法将相机拍摄方向垂直于测量平面的场景,几何相似法将无法使用。为了更加方便测量,减少测量方法场景限制,在几何相似法的基础上进行了一定的改进,改进之后无需保证相机拍摄方向垂直测量平面,极大降低了相机布置难度,提高了测量方法场景适应能力。

改进后的测量方法无需将相机拍摄方向垂直于测量平面,只需将相机放置于测量平面一侧,相机视场覆盖标志物和测量目标,标定好位置关系参数和相机及镜头参数供后续判读计算使用。位置关系参数包括相机拍摄方向与测量平面之间的夹角、标志物的实际物理尺寸、相机拍摄仰角,相机及镜头参数包括相机分辨率、像元尺寸、焦距、主点坐标、镜头畸变系数等。

以测量某型火炮弹丸出筒初速度为例,对基于几何相似法的单目相机测速方法进行布站,将相机布置于火炮侧方,相机视场覆盖火炮发射管和发射方向弹丸飞行部分轨迹,测速弹丸飞行速度只需设定标志物为火炮发射管。布站方案需要的已知条件包括:相机拍摄方向与弹丸飞行方向(即射向)水平投影方向夹角 $\alpha$ ,相机仰角 $E$ ,炮管长度 $L$ 。相机布置方案如图 1 所示。

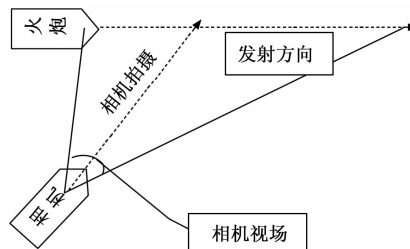


图 1 相机布置方案

具体测量方法如下。

1) 首先计算弹丸飞行轨迹在经过相机光心水平面上的投影距离公式:

试验前通过全站仪标定位置关系,得到相机拍摄仰角 $E$ ,火炮发射仰角 $e$ ,使用量具测量标记炮管长度为 $L$ 。相



$$M_0B_0 = \frac{|MB|}{\cos e} = L \cdot \frac{(x_2 - x_3)(f - x_1 \cdot \cos E \cdot \cot \alpha)}{(x_1 - x_2) \cdot (f - x_3 \cdot \cos E \cdot \cot \alpha)} \quad (3)$$

由公式 (3) 可知, 根据标记的炮管长度  $L$ 、弹丸射向与拍摄方向在水平面  $S$  平面内投影夹角  $\alpha$ 、相机焦距  $f$ 、相机拍摄仰角  $E$ 、炮管根部成像横坐标  $x_1$ 、炮口成像横坐标  $x_2$  以及弹丸成像横坐标  $x_3$ , 可以计算出所拍摄任意一帧火炮弹丸与炮口间的距离。

由此可通过判读炮管出口处某一帧图像弹丸  $B_0$  与任意其他帧图像弹丸  $B_1$  点位置, 分别计算弹丸与炮口间的距离  $M_0B_0$  及  $M_0B_1$ 。

要准确测量出弹丸飞行的速度值, 必须提供高精度的时间信息, 可选用能外接时码钟信号的高速摄像机, 目前国产与进口高速摄像机均具备外接时码钟功能, 可以给每帧图像提供高精度的时间信息。弹丸  $B_0$  与  $B_1$  点之间的时间间隔  $t$  可以通过判读图像时间信息计算得出 (图像成像时间来源于相机外接时码钟),  $B_0B_1 = M_0B_1 - M_0B_0$ , 则根据速度公式  $v = \frac{s}{t} = \frac{M_0B_1 - M_0B_0}{t}$ , 得出弹丸飞行速度。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验图像数据采集

为了进一步验证方法的可行性, 利用高速相机结合某型火炮试验进行了试验验证。根据测量方法要求进行布站, 单台高速摄像机布置于火炮发射右侧方, 相机与火炮位置关系见图 5。

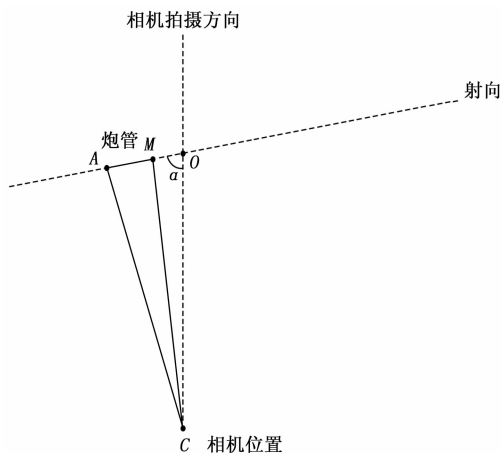


图 5 火炮测量布站方案

如图 5 所示, 相机位于  $C$  点, 拍摄方向与射向在水平面投影夹角为  $\alpha$ 。

使用全站仪进行标定,  $\alpha = 65^\circ$ , 相机拍摄仰角  $E = 1.6^\circ$ 。

相机参数:

分辨率:  $1024 \times 1024$ ;

灰度等级: 8 bit;

工作频率: 500 fps;

焦距: 29 mm;

像元尺寸:  $12 \mu\text{m}$ 。

为了便于后续判读计算, 在火炮发射管上做标记, 将火炮发射管作为参考标志物。布站时, 需将炮管放置在相机拍摄视场内。将相机放置在离弹丸飞行方向右侧方约 40 米处, 采用固定拍摄方法。

#### 3.2 相机标定

在得到拍摄图像后, 需对相机镜头内参数进行标定, 内参数主要包括镜头的像素焦距、主点坐标、镜头畸变系数等, 已知相机像元尺寸可反算出相机镜头焦距值。相机镜头在小焦距宽视场情况下畸变较大, 若不进行畸变校正, 则在测量应用上会带来较大测量误差, 因此需对采集的图像进行畸变校正之后再行判读, 降低判读误差。

采用 2D 棋盘格标定板对相机镜头进行标定, 2D 棋盘格标定方法简单快捷并且技术成熟, 在相机镜头标定中应用广泛。

在 Matlab2014 以上版本, 使用棋盘格进行相机标定<sup>[23]</sup>已经集成为内部工具箱, 可以直接使用, 且方法简单。这里以 Matlab2019 版本为例, 进行相机标定, 标定方法如下。

1) 选用专用相机黑白棋盘格标定板, 规格为  $22 \times 14$ , 50 mm。黑白棋盘格标定板如图 6 所示。

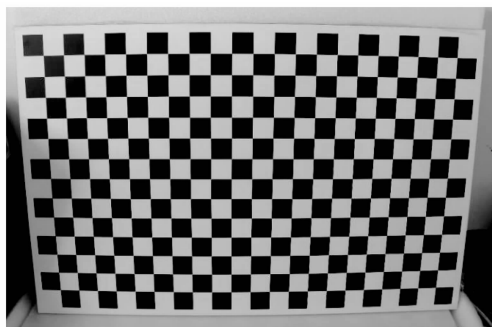


图 6 黑白棋盘格标定板

2) 用相机从不同角度对标定板进行图像采集, 采集数量一般多于 9 张, 图像数量越多标定精度越高。

3) 如图 7 所示, 程序完成标定后, 在右侧窗口显示单张图像的重投影误差, 并显示相对于靶板在空间中的位置。如图 8 所示, 在 Matlab 中可查看保存的相机标定参数。包括相机像素焦距、主点坐标、镜头畸变系数、外参数旋转和平移矩阵等。

4) 标定结果解释:

图 8 中 PrincipalPoints 为主点坐标, 即光轴与相机探测器交点位置坐标。RadialDistortion 为径向畸变系数, 包括  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 。TangentialDistortion 为切向畸变系数, 包括  $p_1$ 、 $p_2$ 。

可以根据径向畸变系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  和切向畸变系数  $p_1$ 、 $p_2$  对图像进行畸变矫正。Matlab 提供了去畸变语句 undistortImage, 可对原始图像进行畸变校正, 得到精确图像, 靶板的畸变校正图像对比如图 9。

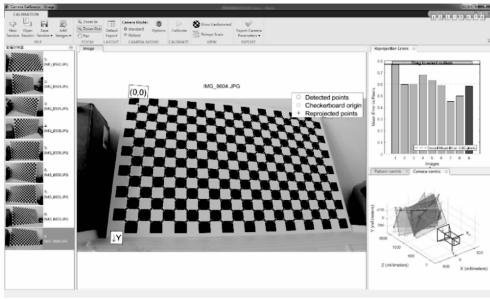


图 7 Matlab 标定程序

FocalLength	1.1365e+04, 1.1356e+04
ImageSize	3456, 5184
IntrinsicMatrix	1.1365e+04, 0, 0; -11.4244, 1.1356e+04, 0; 2.5238e+03, 1.6030e+03, 1
Intrinsics	1×1 cameraIntrinsics
MeanReprojectionError	0.6973...
NumPatterns	9
NumRadialDistortionCoef...	3
PrincipalPoint	2.5238e+03, 1.6030e+03
RadialDistortion	0.2513, 0.6831, 5.3304
ReprojectedPoints	273×2×9 double
ReprojectionErrors	273×2×9 double
RotationMatrices	3×3×9 double
RotationVectors	9×3 double
Skew	-11.4244...
TangentialDistortion	-0.0078, -0.0034

图 8 相机标定结果

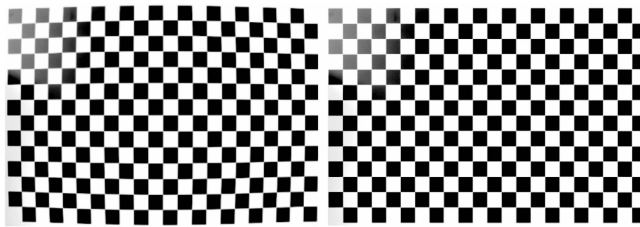


图 9 畸变校正前后对比图像  
(左为校正前图像, 右为校正后图像)

通过 Matlab 计算可以得到镜头的内参数, 供后续判读计算。根据所标定的畸变参数对试验图像进行畸变校正, 再进行判读。

选取部分火炮发射管作为参考标志物, 标记长度经测量为  $L=3\ 935\text{ mm}$ , 根据图像判读的点位像素值、发射管长度  $L$ 、相机镜头焦距  $f$ 、像元尺寸、拍摄方向与发射方向夹角  $\alpha$ 、两帧图像之间时间间隔  $t$ , 利用基于几何相似法的弹丸类目标测量方法, 可以算出炮弹飞行速度  $v$ 。

### 3.3 数据处理结果

将判读的像素坐标、标志物长度以及相机的关键参数、角度关系等数据代入公式 (3) 中进行计算, 高速相机拍摄帧频为 500 Hz, 为方便计算, 分别计算第一帧和第十一帧弹丸位置, 算出初速度。试验共发射 5 枚弹丸, 最后测量数据处理结果见表 1。

### 4 误差分析

该测量方法在测量弹丸类目标时, 因为目标会受空气阻力以及重力加速度的影响, 目标不是匀速直线运动, 并且在后期的图像数据处理过程中会引入一些人为操作的误差。综合各种情况, 主要的误差来源有空气阻力、重力加速度、像距、判读、镜头标定、角度标定以及时间精度带来的误差。

在试验任务中, 采用的相机拍摄频率为 500 fps, 测量 10 帧间隔图像, 弹丸飞行时间为 20 ms, 根据空气阻力公式 ( $F$  为空气阻力;  $C$  为空气阻力系数;  $\rho$  为空气密度;  $S$  为物体迎风面积;  $v$  为物体与空气相对速度), 计算得出空气阻力造成的误差影响在 1 m/s 左右, 对精度影响为 0.01%。

重力加速度在水平方向上对速度没有影响, 重力加速度一般取  $g=9.8\text{ m/s}^2$ , 根据加速度公式可得, 在垂直方向上 20 ms 将会产生 0.2 m/s 的速度差, 对弹丸初速度影响可以忽略。

公式中的焦距  $f$  实为像距, 与相机焦距  $f$  值存在一定的误差。相机焦距经过相机标定得到为 29 mm, 物距为相机与目标之间的距离大于 40 m, 根据透镜成像公式 ( $f$  为相机焦距,  $u$  为物距,  $v$  为像距), 可以计算得出像距小于

表 1 测量结果

序号	标志点 A (像素坐标)	标志点 M (像素坐标)	第一帧弹丸点位	第十一帧弹丸点位	测量速度/(m/s)	理论值/(m/s)	误差/%
1	X:212.562 Y:533.938	X:344.562 Y:527.812	X:487.375 Y:520.250	X:972.000 Y:495.000	780.2	776.7	0.45
2	X:212.562 Y:534.562	X:345.188 Y:527.5	X:520.875 Y:519.125	X:1001.25 Y:491.625	779.1	774.8	0.56
3	X:212.75 Y:533.375	X:344.375 Y:527.375	X:511.5 Y:518.5	X:991.125 Y:492.875	775.8	770.3	0.72
4	X:213.000 Y:533.812	X:344.438 Y:528.062	X:478.625 Y:521.375	X:962.000 Y:496.875	772.4	769.3	0.4
5	X:237.312 Y:460.062	X:368.562 Y:453.688	X:516.750 Y:446.125	X:997.000 Y:421.062	772.1	772.5	-0.05

29.021 mm, 给计算结果带来的误差小于 0.07%, 该误差可以后期根据目标测量位置进行修正, 像距带来的误差在修正后可以基本消除。

判读图像内容包括标志物和弹丸, 判读图像所使用软件可以达到亚像素判读, 判读误差一般取 0.5 像素。对于标志物炮管, 0.5 像素带来的速度测量误差为 0.4%。对于弹丸的位置判读, 飞行方向上 0.5 像素带来的速度测量误差为 0.2%。

镜头标定误差主要为镜头焦距标定, 误差一般在 0.1 mm 以内, 带来的速度测量误差为 0.05%。

角度标定主要为弹丸射向和拍摄方向之见的夹角, 标定误差小于 0.1°, 结果误差小于 0.06%。

时间精度取决于相机同步精度和相机外接时码钟授时精度, 目前高速相机时间同步精度及时码钟授时精度均优于 1  $\mu$ s, 时间精度带来的误差小于 0.001%, 可以忽略不计。

综合上述误差来源, 对测量误差影响较大的主要为判读误差, 其中标志物判读误差大于弹丸判读误差。因此, 为了提高测量精度应在试验之前, 提前对标志物进行标记处理, 提高标志物成像质量, 另外可以选择更高分辨率的相机, 减小判读误差。

## 5 结束语

高速弹丸类目标的可视化测量与高速相机密切相关, 随着高速相机性能的发展, 高速可视化测量领域也同步快速发展, 着眼弹丸类快速目标的可视化测量, 在几何相似法的基础上研究一种单目相机弹丸类目标初速度测量方法, 并根据该测量方法进行实际测量试验, 得到测量图像数据。采用 Matlab 镜头参数标定程序计算得出镜头的内参数, 并对高速相机采集的图像进行畸变校正, 输出满足判读要求的图像, 应用基于几何相似法的单目相机测量原理计算得到测量结果, 测量结果误差在 1% 以内, 同时对试验的结果进行了误差分析, 验证了采用单相机进行弹丸类出筒初速度测量方法可行性。

该方法简化了几何相似法测量原理中相机布置的限制要求, 使得单目视觉测量更加灵活方便, 增强了单相机测量能力, 丰富了单目视觉测量领域的内容。随着超高拍摄帧频、高像素分辨率相机的发展, 单目视觉测量精度将会越来越高, 单目视觉测量应用也会越来越广泛。

## 参考文献:

[1] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[2] MA S D. A Self-Calibration Technique for Active Vision System [J]. IEEE Transactions on Robot and Automation, 1996, 12 (1): 114-120.

[3] 唐志豪. 基于双目立体视觉的测量技术研究 [D]. 南京: 江苏大学, 2006.

[4] 原野. 基于单目视觉的三维姿态测量方法与系统实现 [D].

哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[5] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[6] 张世杰, 曹喜滨, 张凡, 等. 基于特征点的空间目标三维位姿单目视觉确定算法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40: 591-604.

[7] 王鹏, 孙长库, 张子森. 单目视觉位姿测量的线性求解 [J]. 仪器仪表学报, 32 (5), 2011, 5.

[8] 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展 [J]. 自动化学报, 2003, 29 (1): 110-123.

[9] 杨长江, 汪威, 胡占义. 一种基于主动视觉的摄像机内参数自标定方法 [J]. 计算机学报, 1998, 21 (5): 428-435.

[10] 李鹏, 王军宁. 摄像机标定方法综述 [J]. 山西电子技术, 2007 (4): 77-79.

[11] 高立志, 方勇, 林志航, 等. 高精度立体视觉测量中一种通用的摄像机标定技术 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17 (5): 808-811.

[12] 张艳珍, 欧宗瑛. 一种新的摄像机线性标定方法 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6 (8): 727-731.

[13] 黄湛. 高精度图像尺寸检测镜头畸变校正方法与实现 [D]. 广州: 广东工业大学, 2013.

[14] 朱云芳. 摄像机径向畸变校正和内参估计的单图标定方法 [J]. 光电工程, 2012, 9 (7): 125-131.

[15] 李勤. 任意方向下的摄像机镜头畸变标定 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 9: 2022-2027.

[16] WU X, WANG X, ZHANG J, et al. Design of Microcamera for Field Curvature and Distortion Correction in Monocentric Multiscale Foveated Imaging System [J]. Optics Communications, 2017, 389: 189-196.

[17] ZHOU Q, LIU J. Rapid Nonlinear Distortion Correction of Aerial Optical Zoom Lens System [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (4): 0411001.

[18] TSAI R Y. A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Metrology Using off-the-Shelf Tv-cameras and Lens [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3 (4): 323-344.

[19] TSAI R Y. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986: 364-373.

[20] HARTLEY R I, HAYMAN E, DE AGAPITO L, et al. Camera Calibration and the Search for Infinity [C] // Computer Vision, 1999, The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on. IEEE, 1999, 1: 510-517.

[21] ZHANG Z Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.

[22] 杨幸芳, 黄玉美, 高峰, 等. 用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (5): 1109-1113.

[23] 张曝, 黄亮, 徐洋, 等. 基于 MATLAB 中 CALIBRATION TOOLBOX 的相机标定应用研究 [J]. 微型机与应用, 2011, 30 (14): 31-33.