

# 激光瞄靶训练系统中鱼眼图像的校正<sup>①</sup>

施诚诚, 曾培峰

(东华大学 计算机科学与技术学院, 上海 201620)

**摘要:** 讨论了激光瞄靶训练系统中鱼眼图像的校正问题. 根据胸环靶图像各环宽度相等的特性, 使用最小二乘法拟合图像上各点到镜头光心的距离和无畸变距离之间的映射关系, 实现了靶心与光心重合情况下鱼眼图像的校正和成绩判定方法. 在靶心与光心非重合情况下, 通过连接靶心与光心所在的直线, 求出该直线与各环交点到光心的距离和无畸变距离, 拟合新的映射关系. 实验结果表明, 校正后判定射击成绩精度达到 0.1 环.

**关键词:** 激光打靶; 鱼眼图像; 校正

## Correction of Fisheye Image in Laser Target Shooting Training System

SHI Cheng-Cheng, ZENG Pei-Feng

(College of Computer Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** A fisheye image correction method for laser target shooting training system is discussed in the paper. Because each ring in target image has the same width, the mapping relationship of the undistorted distance and the distance between optical center of lens and each point in the image is approximated by least square method. Fisheye image correction and scoring method are implemented when center of blank is located at optical center. In case of none overlapping, center of blank and optical center are connected with a straight line. The distance between optical center and intersection points of the straight line and each ring are measured, and the mapping relationship is approximated. Experimental results show that the proposed method provides satisfactory accuracy for shooting scores.

**Key words:** laser target shooting; fisheye image; correction

随着我国军队信息化的程度越来越高, 计算机技术用于军事训练日益普遍, 无弹射击和自动报靶逐渐在军队射击训练中得到使用. 目前常用的自动报靶技术有光电传感方式、电极埋入方式和图像识别方式<sup>[1]</sup>, 前两种主要应用于实弹射击中, 需对靶体安装光电传感设备或电极, 具有响应速度快, 但是成本高的特点. 图像识别方式, 无需对靶体做任何改造, 主要通过摄像头对靶面进行图像采集, 然后利用图像识别和处理技术找出弹点并判定成绩, 具有精度高、成本低等优点. 传统的图像识别方式<sup>[2]</sup>, 通常是在离开靶面一定距离的地方安装一台摄像装置, 因此场地较为固定, 无法用于野外训练.

鱼眼镜头是一种焦距短, 视场大的广角镜头, 视场

角可达甚至, 广泛应用于摄影、医疗、检测和监控等领域. 由于其拍摄的图像具有极大的非线性畸变, 若要转换成人眼习惯的正常图像, 必须对失真图像进行校正. 现在主要的鱼眼图像校正算法分为 2D 和 3D 两类.

2D 鱼眼图像校正是指在二维空间对鱼眼图像进行校正, 不涉及空间点信息, 对失真图像上的点进行坐标变换, 使其投影到校正图像上, 包括经度坐标校正<sup>[3]</sup>、极半径映射<sup>[4-7]</sup>、射影不变性<sup>[8]</sup>和多项式坐标变换<sup>[9-11]</sup>等.

3D 鱼眼图像校正, 是把鱼眼图像上每个二维平面点  $(x, y)$  映射到三维空间  $(x, y, z)$ , 再投影到二维平面点,  $(x', y')$  包括鱼眼镜头标定法<sup>[12]</sup>和投影转换<sup>[13-15]</sup>法.

本文提出的激光瞄靶训练系统, 是将摄像头安装在胸环靶箱内, 并利用鱼眼镜头的超大视场图像, 使靶

① 收稿时间: 2013-12-05; 收到修改稿时间: 2013-12-30

箱的厚度压缩到仅有 15cm, 方便士兵携带外出训练, 最后通过图像识别的方法进行自动报靶. 由于将摄像头光心对准靶心安装(即光心与靶心重合), 且各环半径已知, 本文采用了鱼眼图像的 2D 校正, 通过最小二乘法拟合<sup>[16]</sup>畸变图像半径与实际半径的对应关系曲线, 根据该曲线方程推算图像上任何点的环值. 此外, 本文还讨论了摄像头光心与靶心不重合的情况下, 鱼眼图像的校正算法及其成绩判定方法.

### 1 鱼眼成像模型

对于视场角不超过的鱼眼镜头, 通常可以用半球面模型<sup>[17]</sup>来模拟, 如图 1 所示, 设半球面方程为:

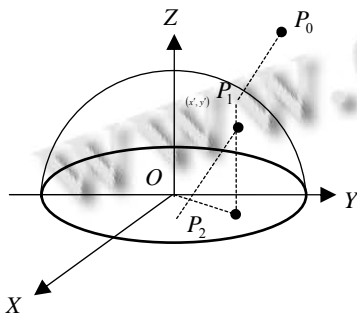


图 1 半球面成像模型

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 (z \geq 0, r \geq 0) \tag{1}$$

点 O 为相机光心, 拍摄方向为其光轴 OZ 正向, 平面为成像平面 OXY. P<sub>0</sub> 为空间场景中任意一点, 连接 OP<sub>0</sub> 交半球面于 P<sub>1</sub>, 过 P<sub>1</sub> 作光轴 OZ 的平行线交平面 OXY 于 P<sub>2</sub>, 则 P<sub>2</sub> 为 P<sub>0</sub> 在成像平面 OXY 所成的像, 对鱼眼图像而言, 所拍摄景物图像为一个圆形区域. 通常, 光心 O 周围的点畸变很小, 距离光心越远, 畸变越严重. 图 2 为根据模型得到的鱼眼图像.

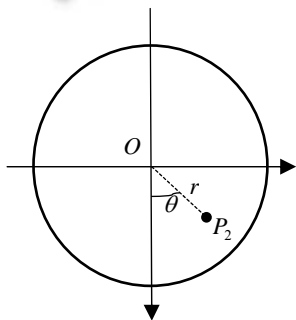


图 2 鱼眼图像示意图

## 2 鱼眼图像的校正

### 2.1 校正模型

如图 3 所示, 在实际的胸环靶上, 各环之间的距离是相等的, 而由于径向畸变的原因, 距离光心越远环与环之间间隔越小. 离是相等的, 而由于径向畸变的原因, 距离光心越远环与环之间间隔越小.

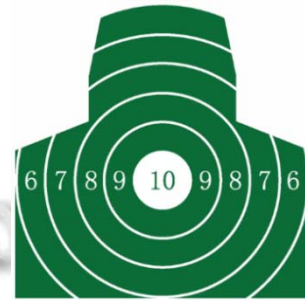


图 3 胸环靶示意图

在光心与靶心重合的情况下, 从鱼眼图像上可以得到任意一点 P 到光心 O 的距离 r, 该距离 r 与其真实距离 d 之间存在一个非线性映射关系, 用公式可表示为:

$$d = F(r) \tag{2}$$

F 即为鱼眼变形校正模型, 可以通过多项式逼近.

### 2.2 校正算法

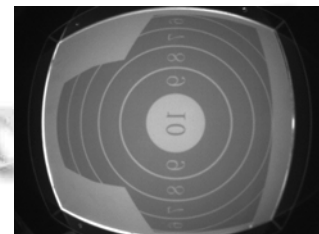


图 4 鱼眼镜头拍摄的胸环靶图

校正算法分为三步:

1)对图 4 进行 Canny 边缘检测, 并去除图中数字和噪声, 得到各环轮廓, 效果如图 5 所示.

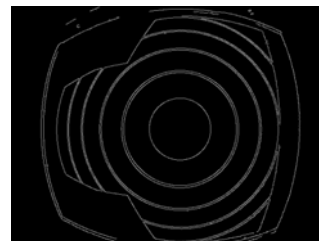


图 5 各环轮廓图

2)在图 5 的基础上,以光心为起点向任意方向作射线(本文取水平方向),求得光心与各环边界(除 10 环外,各环都有 2 条边界,取靠外侧的边界)的距离,由于存在人型区域,6 环与 7 环是不完整的圆环,因此只选用到 8 环、9 环和 10 环边界的距离.得到的距离数据如表 1 所示.根据环线间的真实距离为 54,建立映射关系,数据如表 2 所示.

表 1 光心到各环的距离数据

| 环号 | 到该环距离 |
|----|-------|
| 10 | 61    |
| 9  | 118   |
| 8  | 164   |

表 2 距离映射关系

| 畸变距离 | 真实距离 |
|------|------|
| 0    | 0    |
| 61   | 54   |
| 118  | 108  |
| 164  | 162  |

3)采用最小二乘法拟合校正模型  $d = F(r)$ . 最小二乘法可以方便地处理未知的数据,通过找到这组数据的最佳函数匹配,使得所求数据与实际数据之间误差的平方之和最小.

由给定  $n$  个数据点  $(x_i, y_i)$ , 其中  $i=1,2,3,\dots,n$ . 求拟合曲线  $y = \varphi(x)$ , 使得拟合曲线与实际曲线  $y = f(x)$  各点偏差的平方和最小. 设拟合后的函数为:

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

其中  $a_i(i=1,2,3,\dots,n)$  是各项系数,  $n$  是函数最高项次数. 拟合曲线与实际曲线各点偏差  $\delta$  的平方和为:

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_nx_i^n)]^2 \quad (4)$$

对上式进行数学处理得到:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

求解上式,解出  $a_i(i=1,2,3,\dots,n)$ , 即可得到拟合曲线的数学表达式.

根据表中的数据,使用最小二乘法拟合得到三次曲线,如图 6 所示,方程为:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} a &= 1.2313720 \times 10^{-5}, \\ b &= -1.5015310 \times 10^{-3}, \\ c &= 9.0286616 \times 10^{-1}, \\ d &= -3.7 \times 10^{-14}. \end{aligned}$$

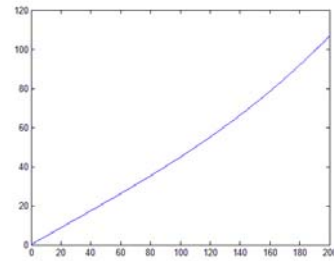


图 6 拟合曲线图

### 2.3 射击成绩判定

鱼眼图像上任意一点  $p$  的直角坐标记为  $(x, y)$ , 光心与靶心  $O$  的直角坐标记为  $(x_0, y_0)$ ,  $p$  到光心的距离为

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (7)$$

将  $r$  代入上文求得的曲线方程,得到该点到光心的真实距离  $d$ . 成绩  $s$  与真实距离  $d$  之间的关系,可表示为

$$s = 11 - \frac{d}{w} \quad (8)$$

其中  $w$  表示各环宽度,为常数,  $w = 54$ .

当  $d = 0$ , 即击中靶心时,成绩为 11 环,10 环边界为成绩为 10 环,以此类推,成绩保留一位小数.

### 3 光心与靶心非重合情况下的校正

为了进一步压缩胸环靶箱的体积,可以通过在箱内安装镜子的方法,将摄像头置于底部,拍摄镜中图像,理论上可以将厚度再减少一半.但是,此方法使靶心和光心之间造成了偏移,无法简单地使用上述方法求得映射关系.图 7 为光心与靶心非重合时的一种情况.

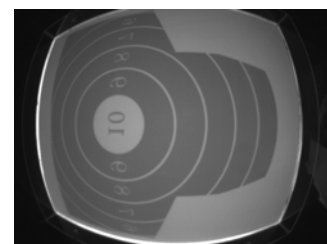


图 7 光心与靶心非重合鱼眼图

### 3.1 非重合情况下的校正

本文光心与靶心非重合情况下的校正算法步骤如下:

1)对图 7 进行 Canny 边缘检测, 并去除图中数字和噪声, 得到各环轮廓, 效果如图 8 所示.

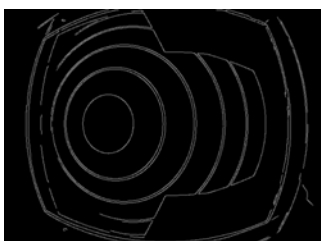


图 8 各环轮廓图

2)对 10 环中的所有像素点求其到 9 环的欧几里得距离, 获得距离最大点  $M(x_m, y_m)$ .

3)求光心  $O(x_o, y_o)$  与点  $M$  连成的直线方程.

$$y = kx + b \quad (9)$$

其中  $k$  为斜率,  $b$  为截距.

4)求直线  $OM$  与各环的交点, 如图 9 中的  $A, B, C, D$  点, 并求得  $OA, OB, OC, OD$  的长度.

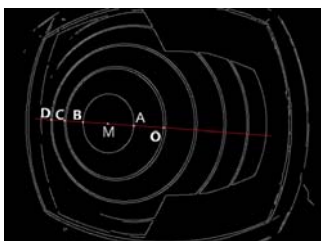


图 9 直线  $OM$  与各环交点

5)通过上文得到的曲线方程  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ , 求得  $OA$  近似的真实长度, 由于  $AB, BC, CD$  的真实长度已知, 因而可以得到一组新的对应关系, 如表 3 所示.

表 3 距离映射关系

| 线段   | 畸变长度 | 真实长度 |
|------|------|------|
| $OO$ | 0    | 0    |
| $OA$ | 60   | 51   |
| $OB$ | 163  | 159  |
| $OC$ | 200  | 213  |
| $OD$ | 228  | 267  |

6)根据上一步得到的已知对应关系, 用最小二乘法拟合得到四次曲线方程, 如图 10 所示, 方程为:

$$y = ex^4 + fx^3 + gx^2 + hx + i \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} e &= 7.5377576 \times 10^{-8}, \\ f &= -2.3124186752 \times 10^{-5}, \\ g &= 3.310255373192 \times 10^{-3}, \\ h &= 7.25174455004234 \times 10^{-3}, \\ i &= -7.9 \times 10^{-14} \end{aligned}$$

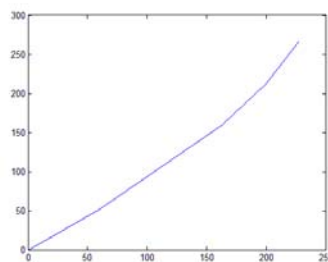


图 10 非重合情况下拟合曲线图

### 3.2 非重合情况下成绩判定

对于鱼眼图像上任意一点  $p$ , 以光心  $O(x_o, y_o)$  为极坐标系的原点建立极坐标系,  $p$  的极坐标记为  $(r, \theta)$ . 其中,  $r$  通过公式(7)求得, 另

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y - y_o}{x - x_o} \quad (11)$$

将  $r$  代入  $y = ex^4 + fx^3 + gx^2 + hx + i$ , 得到该点到光心的真实距离  $r'$ , 则点  $p$  校正后的极坐标  $p'$  为  $(r', \theta)$ .

易得校正后靶心  $q$  的极坐标为  $(\rho, \varphi)$ , 在图 9 所示的例子中,  $\rho = 105$ , 极角为直线  $OM$  斜率  $k$  的反正切函数, 表示为:

$$\varphi = \tan^{-1} k \quad (12)$$

点  $p'$  与靶心  $q$  在以光心  $O$  为极点的极坐标系下的关系如图 10 所示.

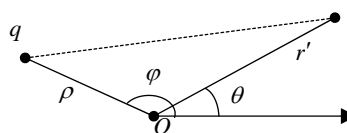


图 11 极坐标下各点关系示意图

由余弦定理可得, 点  $p'$  到靶心  $q$  的距离可表示为:

$$p'q = \sqrt{\rho^2 + r'^2 - 2\rho r' \cos(\varphi - \theta)} \quad (13)$$

将  $p'q$  代入公式(8), 即可求得射击成绩.

## 4 实验结果分析

本文使用光心与靶心重合和非重合两种情况下的鱼眼图像进行了实验,校正前后的效果如图所示.由图 12 可以直观地看到,校正后图像的胸环靶区域已拉直,恢复到原始图像的水平.

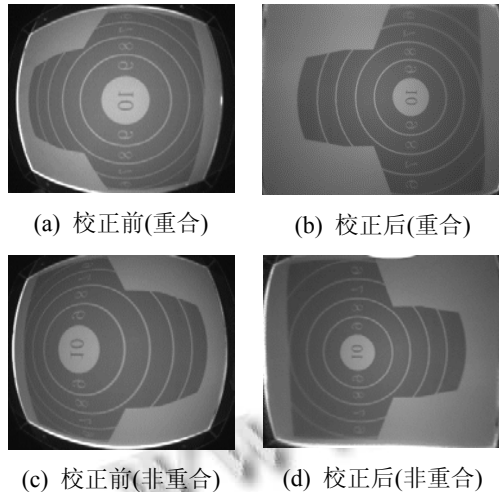


图 12 校正前后对比图

为了对校正效果进行测试,在各环的边界分别随机抽取 30 个像素点,对校正后得到的成绩进行统计分析,两种情况下的统计结果如表 4 和表 5 所示.

表 4 校正效果统计数据表(重合)

| 环号<br>指标 | 10      | 9       | 8       | 7       | 6       |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 均值       | 10.0    | 9.0     | 8.0     | 7.0     | 6.0     |
| 方差       | 0.00012 | 0.00045 | 0.00097 | 0.00214 | 0.00303 |

表 5 校正效果统计数据表(非重合)

| 环号<br>指标 | 10      | 9       | 8       | 7       | 6       |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 均值       | 10.0    | 9.0     | 8.0     | 7.0     | 6.0     |
| 方差       | 0.00014 | 0.00083 | 0.00159 | 0.00238 | 0.00427 |

根据表 4 和表 5 中的数据可以看到,各环 30 次射击成绩的均值与真实成绩相符,且方差极小,表明通过本文算法对图像校正后,能够精确地判断射击成绩.

## 5 结语

本文提出了一种使用鱼镜头的新型的激光瞄靶训练系统,并实现了在光心与靶心重合和非重合情况下,鱼眼图像的校正算法.

算法使用 2D 鱼眼图像校正的思想,对畸变图像上的点到光心的距离和其真实距离进行非线性映射.

与传统的鱼眼图像校正算法相比,本文针对胸环靶这种特定应用提出的算法,复杂度明显降低,获得了很好的校正效果,且通过简单计算即可精确地得到射击成绩.

## 参考文献

- 张军,颜树华,徐琰.自动报靶系统的研究进展.激光与红外,2006,36(12):1152-1154.
- 张晓锴,林嘉宇.一种基于图像处理技术的自动报靶系统设计.微处理机,2010,31(3):101-104.
- Mundhenk TN, Rivett MJ. Techniques for fisheye lens calibration using a minimal number of measurements. Proc. of the SPIE. 2000, 4197:181-190.
- Glaeser G, Groller E. Fast generation of curved perspectives for ultra-wide-angle lenses in VR applications. The Visual Computer, 1999, 15(7): 365-376.
- Beauchemin SS, Bajcsy R. Modeling and removing radial and tangential distortions in spherical lenses. Multi-Image Analysis. 2001. 1-21.
- Shah S, Aggarwal JK. A simple calibration procedure for fish-eye(high distortion)lens camera. Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1994, 4. 3422-3427.
- Basu A, Licardie S. Alternative models for fish-eye lenses. Pattern Recognition Letters, 1995, 16(4): 433-441.
- 邱志强,陆宏伟,于起峰.用射影不变性纠正鱼镜头畸变.应用光学,2003,24(5):36-38.
- Nomura Y, Sagara M, Naruse H. Simple calibration algorithm for high-distortion-lens camera. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1929, 14(11): 1095-1099.
- 廖士中,高培焕,苏艺,等.一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法.中国图象图形学报,2000,5(7):593-596.
- 周海林,王立琦.光学图像几何畸变的快速校正算法.中国图象图形学报,2003,8(10).
- Shah S, Aggarwal JK. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation. Pattern Recognition, 1996, 29(11): 1775-1788.
- Kannala J, Brandt S. A generic camera calibration method for fish-eye lenses. Proc. of the 17th International Conference on Pattern Recognition. 2004, 1. 10-13.
- Gennery DB. Generalized camera calibration including fish-eye lenses. International Journal of Computer Vision, 2006, 68(3): 239-266.
- Bakstein H. Calibration of a fish eye lens with field of view larger than. Proceedings of the CVWW, 2002(4): 276-285.
- Gander W, Golub GH, Strebel R. Least-squares fitting of circles and ellipses. BIT Numerical Mathematics, 1994, 34(4): 558-578.
- 英向华,胡占义.一种基于球面透视投影约束的鱼镜头校正方法.计算机学报,2003,26(12):1702-1708.