

文章编号 1004-924X(2016)04-0922-08

## 基于纯平移两视图几何的镜头畸变参数标定

刘 阳, 刘 巍\*, 徐鹏涛, 王灵丽, 贾振元  
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**针对摄像机镜头畸变对系统测量精度的影响,提出了基于纯平移两视图几何的镜头畸变参数标定方法。首先,分析了机器视觉测量中影响测量精度的主要畸变类型,建立了镜头非线性畸变模型。然后,利用射影几何及纯平移两视图几何的固有特性,构建了四组约束方程用于求解畸变参数。最后,针对大视场测量时标定板无法有效充满视场的问题,提出了利用四维电控平台对视场分区域拍摄多组纯平移运动图像的畸变参数标定流程,利用较小的靶标实现了大视场的镜头畸变参数标定。在实验室验证了本文提出的畸变校正方法的可行性。结果显示:提出的方法标定精度较高,标定后图像特征点连线的直线度误差减小了 89%,标定精度及可靠性均满足机器视觉测量的要求。

**关键词:**机器视觉;视觉测量;镜头畸变;图像校正;标定

**中图分类号:**TP391.41;TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162404.0922

## Calibration of lens distortion parameters based on two view geometry of translation motion

LIU Yang, LIU Wei\*, XU Peng-tao, WANG Ling-li, JIA Zhen-yuan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: Lw2007@dlut.edu.cn

**Abstract:** In consideration of the effect of lens distortion on the measuring accuracy of a camera, a lens distortion calibration method based on two view geometry of a translation motion was presented in this paper. The main types of lens distortion affecting the measurement accuracy were analyzed, and a nonlinear distortion model was established. Then, four group equations were established for solving distortion parameters by using the inherent characteristics of projective and two view geometries. Finally, to solve the problem that the small pattern can not effectively be full of the field of view (FOV) in a large range measurement, a calibration processing of distortion parameters by acquiring multi-groups' translation motion images in sub-regional FOV was put forward, by which the calibration of the distortion parameters was implemented in a large FOV by the small pattern. The feasibility of the calibration method was verified by a library, and the results show that the calibration precision of proposed method is higher and the straightness error has reduced by 89%. The calibration accuracy and reliability of this method meet the requirements of visual measurement.

**Key words:** machine vision; visual measurement; lens distortion; image correction; calibration

收稿日期:2015-12-02;修订日期:2016-01-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51227004);国家自然科学基金面上项目(No. 51375075);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB046504);国家自然科学基金创新团体资助项目(No. 51321004)

## 1 引言

视觉检测技术因具有非接触、在线检测的优势而在工业测量领域得到广泛应用。在视觉检测系统中,摄像机参数用以还原被测物体的三维信息,其标定精度对测量结果的精度具有显著影响。传统的摄像机模型是基于小孔成像原理的线性摄像机模型。然而,由于加工和装配误差的影响,摄像机成像光路会发生细微偏移,使得摄像机模型并不满足传统的线性模型,最终引起图像畸变(光学畸变误差)<sup>[1-4]</sup>。若不考虑图像畸变,仅利用线性摄像机模型求取摄像机参数,则其参数的标定结果会存在较大误差,导致视觉测量系统的精度急剧下降。因此,对摄像机进行准确的畸变校正正是实现高精度视觉检测必不可少的环节<sup>[5]</sup>。

摄像机畸变校正根据摄像机的畸变校正模型,利用求取的畸变参数消除图像畸变,从而得到理想图像的过程。目前,国内外关于畸变校正的方法有许多。基于偏差目标函数的畸变校正方法是利用特征点的空间坐标与图像坐标之间的关联关系,建立包含摄像机参数的优化目标函数,以求解摄像机的畸变参数<sup>[6]</sup>。该畸变校正方法将包含畸变参数在内的所有摄像机参数同时进行优化迭代求解,能够实现参数的整体优化。然而该方法对优化参数初值的要求较高,优化过程不易收敛。Taufiqur 等人<sup>[7]</sup>提出了一种分步标定畸变的方法,该方法首先利用传统的线性摄像机模型计算出摄像机内外参数;其次,以所获得的内外参数为初值,通过引入畸变系数对所有参数进行全局优化。此类方法由于获得了较好的初值,优化过程不易发散,因此可以获得高精度的摄像机参数。但是这种方法获得参数时需要多步计算,因此求解过程计算量较大。除了同时优化所有参数求取畸变参数外,一些学者也对摄像机畸变参数的单独求取方法进行了研究<sup>[8-9]</sup>。张广军等人<sup>[10]</sup>提出一种利用交比不变性标定畸变系数的方法,该方法仅考虑摄像机镜头的一阶径向畸变,利用空间中4个共线点的图像坐标及其交比,方法简单。Carlos 等<sup>[11-12]</sup>在求取畸变参数时,不仅考虑了交比不变的性质,同时利用图像中特征点的共线约束构造约束方程。此类利用摄影原理进行畸变校正的方法,将畸变参数从标定参数中解耦出来,单

独求解,避免了所有参数同时求解时参数间强耦合所引起的算法发散问题。但是,单独求取畸变系数的方法有时因不能提供足够的约束,以至于得到误差较大的结果。此外,针对摄像机侧扫成像造成的图像几何畸变问题,王书民等<sup>[13]</sup>,以及周前飞等<sup>[14]</sup>分别提出了不同的几何校正模型。康玉思等<sup>[15]</sup>,以及任秉文等<sup>[16]</sup>从光学系统设计的角度改善了镜头的畸变。

针对单独求取畸变系数的方法导致的约束较少,结果不稳定的问题,本文提出了一种考虑多重约束的大视场视觉测量系统中摄像机畸变参数的求取方法。本方法根据摄像机畸变模型,探讨了图像特征点的固有特性与纯平移运动中图像特征点的几何关系,构造出基于靶标图像特征点的4组畸变约束方程,利用四维电控平台实现了大视场中图像的畸变校正,并最终通过实验验证了本文畸变校正方法的性能,分析了不同畸变参数组合对畸变校正结果的影响。

## 2 镜头畸变模型

理想摄像机成像模型均是在假设满足中心透视投影成像关系的前提下建立的,即光心  $O_c$ 、像点  $p$  和物点  $P$  点共线,如图1所示。而实际上,由于镜头光学畸变的存在,使得仅仅利用上述的线性模型不能准确地描述出摄像机真实的成像几何关系,考虑镜头畸变的模型称为非线性模型,镜头畸变使光线发生细微偏移而产生像差,致使物点  $P$  的像点位置由线性模型描述的位置  $p$  偏移至  $p'$ 。 $p$  与  $p'$  分别称为物点  $P$  的理想成像点与实际成像点,图像像素坐标分别为  $(u, v)$  和  $(u', v')$ ,它们之间存在如下关系:

$$\begin{cases} u = u' + \delta_u \\ v = v' + \delta_v \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\delta_u$ 、 $\delta_v$  为非线性畸变值,即像点实际位置与理想位置的偏差值。

对于光学镜头而言,畸变误差主要分为径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变<sup>[17-18]</sup>,上述3种畸变均会引起像点的径向偏差,而后两种畸变还会引起切向偏差。径向畸变一般是由镜头的形状缺陷引起的,如径向曲率的变化,该畸变使像点沿径向偏移,其分为枕形畸变和桶形畸变两种,如图2所示。而离心畸变和薄棱镜畸变一般是镜头加工制

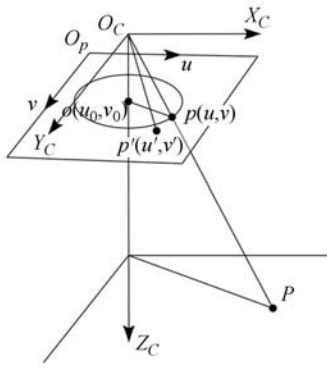


图 1 光学畸变误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical distortion

造和装配误差导致的像点在径向和切向上的偏移。鉴于视觉测量系统所用镜头均具有较好的制造及装配精度,因此只需考虑镜头一阶径向畸变与二阶离心畸变就够了,故摄像机的非线性畸变模型可表示为<sup>[12, 19-20]</sup>:

$$\begin{cases} u = u' + k_1 \tilde{u}_d r_d^2 + 2 p_1 \tilde{u}_d \tilde{v}_d + p_2 (r_d^2 + 2 \tilde{u}_d^2) \\ v = v' + k_1 \tilde{v}_d r_d^2 + p_1 (r_d^2 + 2 \tilde{v}_d^2) + 2 p_2 \tilde{u}_d \tilde{v}_d \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\tilde{u}_d = u' - u_0$ ,  $\tilde{v}_d = v' - v_0$ ,  $r_d = \sqrt{\tilde{u}_d^2 + \tilde{v}_d^2}$ ,  $(u_0, v_0)$  为摄像机的主点坐标;  $k_1$  为径向畸变参数;  $p_1, p_2$  为离心畸变参数。

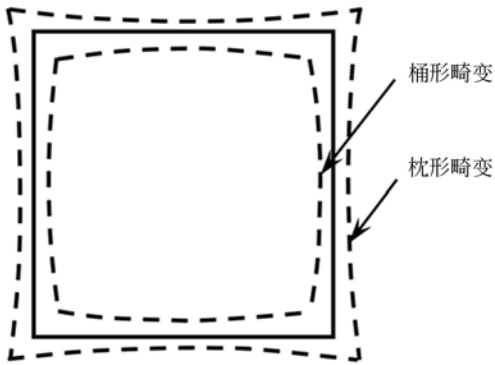


图 2 径向畸变的类型图

Fig. 2 Type graph of radial distortion

### 3 畸变参数标定方法

本文利用射影几何及纯平移两视图几何中的固有特性,提出了基于纯平移两视图几何的畸变参数求取方法。在射影几何学中直线具有射影不变性,即空间中任意直线投影在图像上依然为直

线;而且图像中的所有平行线在无穷远处均相交于消隐点<sup>[21,22]</sup>。在纯平移两视图几何中,根据对极几何的约束关系,同一物点在不同像面上的像点必然在其另一像面对应像点所在的极线上;纯平移运动前、后拍摄的两张图像间的基本矩阵  $F$  为反对称矩阵。而对于畸变图像而言,图像中相关特征信息并不符合上述理想条件下的固有特性,因此可以构建 4 个求解畸变参数的约束方程,利用 Levenberg-Marquardt 优化算法进行畸变系数估计,求得的一组最优解即为镜头的畸变参数。

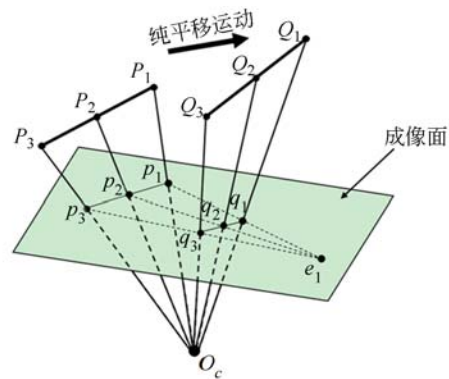


图 3 摄像机的纯平移运动

Fig. 3 Pure translation motion of camera

#### 3.1 基于直线射影不变性的畸变约束

在不考虑畸变的影响下,根据直线的射影变换不变性有,空间中的直线投影在图像上依然为直线。如图 3 所示,即直线  $L$  上的点  $P_1, P_2, P_3$  在像面上的投影点  $p_1, p_2, p_3$  也必然在直线  $l$  上。因此,特征点  $p_i(u_i, v_i)$  满足下式:

$$a_l u_i + b_l v_i + c_l = 0, \quad (3)$$

其中  $a_l, b_l, c_l$  为直线  $l$  的系数。

对于畸变图像而言,根据同一直线上点  $p_i(u_i, v_i)$  的共线约束条件,提取直线上的特征点,对特征点的坐标进行一元线性回归,计算残差平方和  $S_l$ ,使残差平方和最小。

$$S_l = \sum_{i=1}^n (v_i - \tilde{v}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (v_i - \tilde{a} - \tilde{b}u_i)^2, \quad (4)$$

其中  $\tilde{v}_i = \tilde{a} + \tilde{b}u_i$ ,  $(v_i - \tilde{v}_i)$  为  $u_i$  处的残差。

#### 3.2 基于平行线交于消隐点的畸变约束

根据射影几何原理知,空间中平行直线所对应的投影线段交于消隐点。在纯平移运动中,运动前、后拍摄的两张图像上对应像点的连线即为

一组平行线,这些平行线均交于一点(消隐点)。如图 3 所示,对于任意特征线在空间中由  $P$  位置做纯平移运动到  $Q$  位置,则特征线上每一组特征点对的连线  $P_iQ_i$  均为同一组平行线。因此,纯平移运动前、后拍摄的两幅图像上对应点的连线交于极点,也是平移方向  $\overrightarrow{PQ}$  的消隐点。但是,由于图像畸变的存在,对应像点连线并非完全交于一点。根据这个性质,构造畸变参数的约束方程。由于畸变图像中任意一对平行线相交出的消隐点并不完全重合,因此,利用任意两组平行线形成的  $h$  个交点,通过计算所有交点之间的距离平方和  $S_2$ ,使距离平方和最小。

$$S_2 = \sum_{i=1}^{C_h^2} [(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2], \quad (5)$$

其中  $C_h^2$  为从  $h$  交点中选取两个点的组合数目,  $(x_A, y_A), (x_B, y_B)$  为所选取的两个交点的像素坐标。

### 3.3 基于极线约束的畸变约束

根据对极几何的约束关系,每幅图像上特征点应在其对应的极线上。利用极线约束建立畸变约束方程,求取归一化匹配点  $p_I(u_I, v_I, 1), p_{II}(u_{II}, v_{II}, 1)$  到对应极线  $l_I, l_{II}$  的距离平方和为  $S_3$ ,使距离平方和最小。

$$S_3 = \sum_{i=1}^n (d^2(p_I, l_I) + d^2(p_{II}, l_{II})) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(p_I^T F^T p_{II})^2}{(F^T p_{II})_1^2 + (F^T p_{II})_2^2} + \frac{(p_{II}^T F p_I)^2}{(F p_I)_1^2 + (F p_I)_2^2} \right], \quad (6)$$

其中,  $d^2(p, l)$  表示点  $p$  到直线  $l$  的距离的平方和,  $(F^T p)_i$  为向量  $F^T p$  的第  $i$  项。

### 3.4 基于基本矩阵反对称性的畸变约束

在纯平移运动中,基本矩阵具有反对称性。则基本矩阵 3 参数化表述为:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & f_{12} & f_{13} \\ -f_{12} & 0 & f_{23} \\ -f_{13} & -f_{23} & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据基本矩阵  $F$  的反对称性,  $f_{11} = f_{22} = f_{33} = 0, f_{12} + f_{21} = f_{13} + f_{31} = f_{23} + f_{32} = 0$ ,建立约束  $S_4$ ,使  $S_4$  最小。

$$S_4 = f_{11}^2 + f_{22}^2 + f_{33}^2 + (f_{12} + f_{21})^2 + (f_{13} + f_{31})^2 + (f_{23} + f_{32})^2, \quad (8)$$

4 组约束方程,即公式(3)、(5)、(10)和(14)是根据摄像机的成像原理和纯平移图像的几何性

质构建的。综合畸变参数标定的 4 组约束,我们建立最终的优化目标函数  $S$ ,通过 Levenberg-Marquardt(LM)优化算法进行畸变参数的求取。

$$\min S = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4). \quad (9)$$

## 4 畸变参数标定流程

对于镜头畸变参数标定而言,靶标特征点应尽量充满整个视场,以保证畸变参数的准确求取。然而,当测量视场较大时,常规的高精度标定板无法有效充满视场,而大尺寸标定板制造成本又太高,且精度难以保证。因此,本文提出了测量视场分区域的畸变参数标定方法。该方法是将一个大测量视场分为多个小测量视场;进而在不同视场内进行多次纯平移运动,再利用建立的多重约束方程实现畸变参数的标定。

首先,将测量视场均匀分为 9 个标定区域,并对每个区域分别编号为 1-9,如图 4 所示。鉴于径向畸变主要是由镜头中心沿着半径方向产生的偏差,因此分别获取视场中一组横向(4-5-6 三个区域)和一组斜向(1-5-9 三个区域)的特征图像即可以得到从镜头中心到不同半径下的完整的径向畸变图像偏差;而切向畸变是沿着与半径相切方向产生的偏差,所以视场中通过在 1-4 两个区域和 6-9 两个区域分别获得的两组特征图像可以有效地表征切向畸变图像偏差。因此,在等分的 9 个图像区域中,仅需要在图中 1、4、5、6、9 五个区域中各拍摄一组纯平移运动图片,即可实现畸变参数的准确标定。该方法与 9 个区域全部拍摄进行畸变参数标定相比,不仅简化了实验流程,而且数据量也减少了 45%,显著缩短了畸变参数的标定时间。采用本方法采集的不同区域的图像及特征点提取结果如图 5 所示。

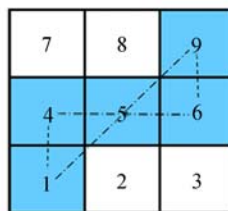
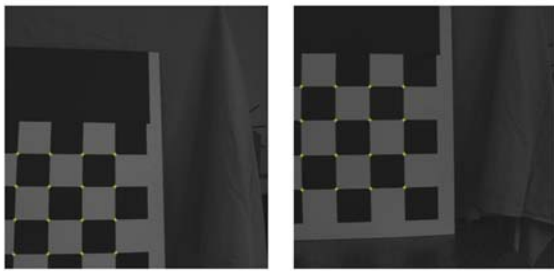
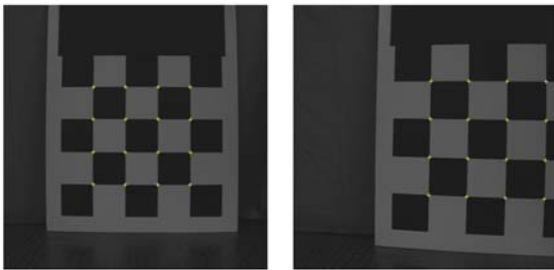


图 4 相机视场分区

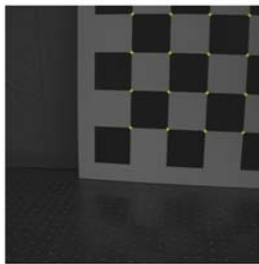
Fig. 4 Partitions of camera's field



(a) 区域 1 图像 (b) 区域 4 图像  
(a) Image of area 1 (b) Image of area 4



(c) 区域 5 图像 (d) 区域 6 图像  
(c) Image of area 5 (d) Image of area 6



(e) 区域 9 图像  
(e) Image of area 9

图 5 不同区域拍摄的图像及特征提取结果

Fig. 5 Images captured in different partitions and extraction results

## 5 实验与分析

### 5.1 实验系统

本文搭建的实验系统如图 6 所示。其中摄像机为美国普林斯顿仪器公司的 Mega Plus II ES4020 黑白 CCD 摄像机,分辨率为  $2\ 048\ \text{pixel} \times 2\ 048\ \text{pixel}$ ;镜头型号分别为 TAMRON 18-250 mm F/3.5-6.3 变焦镜头以及 SAMYANG 8 mm F/3.5 鱼眼镜头;摄像机安装在高精度的四维电控位移台(卓立汉光 Zolix)上,以驱动摄像机运动;采用高精度标定板作为畸变参数标定靶标。

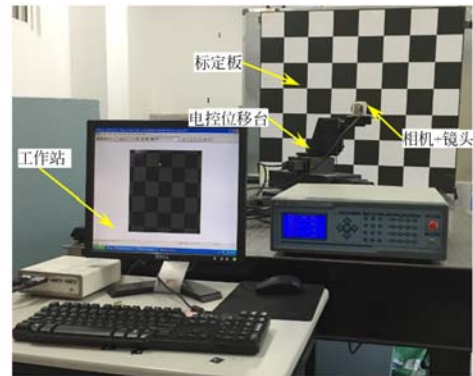


图 6 实验系统

Fig. 6 Experimental system

### 5.2 畸变参数标定

采用上述标定方法在实验室对两组镜头分别进行畸变参数标定实验。在实验室采用小尺寸标定板对镜头畸变参数进行标定,用大尺寸标定板作为校验板用于评价畸变参数的标定效果。实验过程中相关实验参数如表 1 所示。根据镜头视场的大小,利用四维电控平台控制摄像机运动,分别在 5 个区域拍摄纯平移运动图像。提取黑白棋盘格靶标角点的亚像素坐标作为特征信息,利用本文提出的畸变参数求解方法,构造 4 组约束方程,通过优化算法计算摄像机的畸变参数。变焦镜头畸变参数的标定结果为:  $k_1 = 2.59E-08$ ,  $p_1 = 4.28E-07$ ,  $p_2 = 1.52E-07$ ;鱼眼镜头畸变参数的标定结果为:  $k_1 = 1.54E-07$ ,  $p_1 = -1.17E-06$ ,  $p_2 = -9.74E-06$ 。使用上述畸变标定结果对畸变图像进行校正,畸变校正结果分别如图 7、图 8 所示(彩图见期刊电子版)。图中黄色十字为校正前图像角点提取结果,而红色交叉点为引入畸变参数对图像校正以后的角点位置。从图中结果可知,校正前图像角点的提取结果呈典型桶形畸变形式,而校正后的角点分布均匀,与靶标原始特征相似。

表 1 实验参数表

Tab. 1 Table of experimental parameters

名称	变焦镜头参数	鱼眼镜头参数
镜头焦距/mm	18	8
光圈	3.5	8
镜头到靶标距离/m	1.0	0.8
视场大小/	$0.85 \times 0.85$	$1.20 \times 1.20$

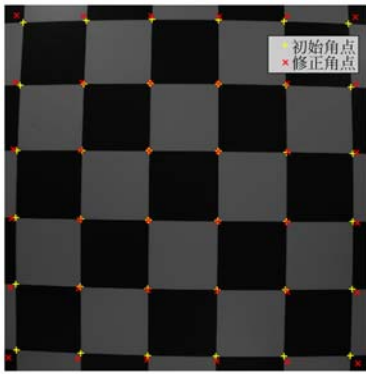


图 7 变焦镜头畸变校正结果

Fig. 7 Results of distortion correction for zoom lens

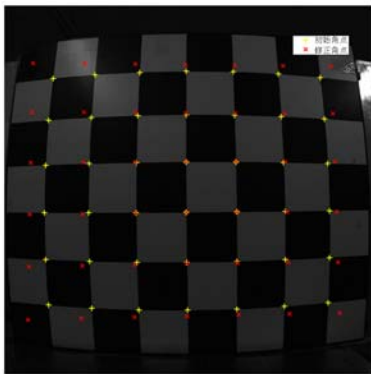


图 8 鱼镜头畸变校正结果

Fig. 8 Results of distortion correction of fish-eye lens

表 2 不同方法畸变标定结果

Tab. 2 Results of distortion correction by different methods

镜头	方法	$k_1$	$p_1$	$p_2$	直线度误差/pixel
变焦镜头	本文方法	2.59E-08	4.28E-07	1.52E-07	0.74
	共线	2.13E-08	-3.60E-06	-1.05E-06	2.17
	交比不变	2.13E-08	-1.91E-06	1.30E-06	1.88
	共线 & 交比不变	2.62E-08	-1.71E-06	-1.09E-07	0.97
	未标定	0	0	0	6.93
鱼镜头	本文方法	1.54E-07	-1.17E-06	-9.74E-06	1.16
	共线	1.36E-07	2.93E-06	-6.47E-06	2.11
	交比不变	1.43E-07	-1.00E-07	-1.29E-05	1.44
	共线 & 交比不变	1.43E-07	-1.00E-07	-1.29E-05	1.65
	未标定	0	0	0	10.82

## 6 结 论

本文提出了一种基于纯平移两视图几何的镜头畸变参数标定方法,该方法利用直线的射影不变性和纯平移运动图像的几何特性构建了 4 组约

束方程,用于畸变参数求解,从而使镜头畸变参数的标定更为合理。本方法巧妙地利用了四维电控平台控制摄像机,使其在不同姿态下拍摄处于视场中不同位置的靶标图像,最终使靶标等效覆盖了整个视场,利用较小的靶标实现了大视场的畸变参数标定。畸变校正的实验结果表明,变焦镜头的校正效果,在同等实验条件下,分别采用目前最常用的共线法、交比不变性以及共线与交比不变相结合的畸变标定方法对镜头畸变参数进行了标定。在理想情况下,畸变校正后的图像上同一行(列)靶标特征点的角点提取结果应在同一条直线上。因此本文先对校正后图像上对应的特征点进行直线拟合,再利用拟合直线线性回归结果的均方根误差评价畸变校正情况。本文提出方法与常规方法的畸变标定结果及误差比较如表 2 所示。由实验结果可知,当视场较大且标定板无法有效充满整个测量视场时,上述 4 种畸变标定方法均可以减小镜头畸变对图像成像质量的影响。同时与其他 3 种方法相比,本文方法的标定精度更高,与校正前图像特征点相比,校正后的直线度误差减小了 89%,证明本文提出的方法可以更好地适用于大视场测量。

束方程,用于畸变参数求解,从而使镜头畸变参数的标定更为合理。本方法巧妙地利用了四维电控平台控制摄像机,使其在不同姿态下拍摄处于视场中不同位置的靶标图像,最终使靶标等效覆盖了整个视场,利用较小的靶标实现了大视场的畸变参数标定。畸变校正的实验结果表明,变焦镜

头标定后图像中特征点连线的直线度误差为 0.74 pixel,鱼眼镜头标定后图像中特征点连线的

直线度误差为 1.15 pixel,与标定前相比,镜头畸变误差减小了 89%,能够满足视觉测量需求。

#### 参考文献:

- [1] RICOLFE-VIALA C, SANCHEZ-SALMERON A. Lens distortion models evaluation[J]. *Applied Optics*, 2010,49(30):5914-5928.
- [2] 史泽林,康娇,孙锐. 基于 BP 神经网络的大视场成像畸变校正方法[J]. *光学精密工程*, 2005,13(3):348-353.  
SHI Z L, KANG J, SUN R. BP NN-based method for lens distortion correction of large-field imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3):348-353. (in Chinese)
- [3] 艾莉莉,袁峰,丁振良. 照相物镜径向畸变模型的再商讨[J]. *光学学报*, 2008,28(10):1930-1933.  
AI L L, YUAN F, DING ZH L. Further study on radial distortion model for photographic objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,28(10):1930-1933. (in Chinese)
- [4] 赵振庆,叶东,吴斌,等. 消隐点共线约束逐点畸变校正算法[J]. *光学精密工程*, 2015,23(4):1196-1204.  
ZHAO ZH Q, YE D, WU B, *et al.*. Point wise distortion correction algorithm with vanishing point collinear constraint [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(4):1196-1204. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 杨必武,郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. *中国图象图形学报*, 2005,10(3):269-274.  
YANG B W, GUO X S. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005,10(3):269-274. (in Chinese)
- [7] RAHMAN T, KROUGLICOF N. An efficient camera calibration technique offering robustness and accuracy over a wide range of lens distortion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012,21(2):626-637.
- [8] 徐嵩,孙秀霞,刘树光,等. 一种基于正交直线构造的摄像机畸变标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2013,34(9):2118-2123.  
XU S, SUN X X, LIU SH G, *et al.*. Camera distortion calibration method based on orthogonal lines [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013,34(9):2118-2123. (in Chinese)
- [9] 唐巍,叶东,袁锋,等. 视觉测量系统中一种独立的畸变校正算法[J]. *光电子·激光*, 2013,24(2):308-315.  
TANG W, YE D, YUAN F, *et al.*. Independent distortion correction algorithm in vision measurement system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013,24(2):308-315. (in Chinese)
- [10] 贺俊吉,张广军,杨宪铭. 基于交比不变性的镜头畸变参数标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2004,25(5):597-599.  
HE J J, ZHANG G J, YANG X M. Approach for calibration of lens distortion based on cross ratio invariability[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004,25(5):597-599. (in Chinese)
- [11] RICOLFE-VIALA C, SANCHEZ-SALMERÓN A. Robust metric calibration of non-linear camera lens distortion[J]. *Pattern Recognition*, 2010,43(4):1688-1699.
- [12] RICOLFE-VIALA C, SANCHEZ-SALMERÓN A. Correcting non-linear lens distortion in cameras without using a model[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010,42(4):628-639.
- [13] 王书民,张爱武,胡少兴,等. 线推扫式高光谱相机侧扫成像几何校正[J]. *红外与激光工程*, 2014,43(2):579-585.  
WANG SH M, ZHANG A W, HU SH X, *et al.*. Geometric correction of linear push-broom hyper spectral camera side-scan imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2):579-585. (in Chinese)
- [14] 周前飞,刘晶红,居波,等. 面阵 CCD 航空相机斜视图像的几何校正[J]. *液晶与显示*, 2015,30(3):505-513.  
ZHOU Q F, LIU J H, JU B, *et al.*. Geometric correction of oblique images for array CCD aerial cameras[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015,30(3):505-513. (in Chinese)
- [15] 康玉思,田志辉,刘伟奇,等. 激光显示广角球幕投

- 影镜头设计[J]. 液晶与显示, 2014, 29(3): 333-338.
- KANG Y S, TIAN ZH H, LIU W Q, *et al.*. Wide-angle dome-screen projection lens design of laser display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(3): 333-338. (in Chinese)
- [16] 任秉文, 金光, 张元, 等. 畸变对 TDI 成像相机的像移影响研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3951-3957.
- REN B W, JIN G, ZHANG Y, *et al.*. Influence of image motion on TDI imaging camera by distortion effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3951-3957. (in Chinese)
- [17] RICOLFE-VIALA C, SÁNCHEZ-SALMERÓN A. Using the camera pin-hole model restrictions to calibrate the lens distortion model [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(6): 996-1005.
- [18] 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.
- [19] WANG Z, KIEU H, NGUYEN H, *et al.*. Digital image correlation in experimental mechanics and image registration in computer vision: Similarities, differences and complements [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 18-27.
- [20] 赵鹏. 机器视觉研究与发展[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHAO P. *The Research and Development of Machine Vision* [M]. Beijing: Mammalia Science Press, 2012. (in Chinese)
- [21] LIU W, DU J, WANG B, *et al.*. *Field Calibration Method of Camera for Measuring the Dimensions of Large Forging*[M]. Springer Berlin Heidelberg: Intelligent Robotics and Applications, 2010: 285-295.
- [22] 杨长江, 汪威, 胡占义. 一种基于主动视觉的摄像机内参数自定标方法[J]. 计算机学报, 1998, 21(5): 428-435.
- YANG CH J, WANG W, HU ZH Y. An active vision based camera intrinsic parameters self-calibration technique[J]. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21(5): 428-435. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘阳(1988—),男,内蒙古乌兰察布人,博士研究生,2010年于大连理工大学获得学士学位,2012年于东北大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及图像处理方面的研究。E-mail: ly-sme@mail.dlut.edu.cn



刘巍(1979—),男,内蒙古赤峰人,副教授,博士生导师,2001年于华北电力大学获得学士学位,2007年于大连理工大学获得博士学位,主要研究方向为制造过程精密测量与控制 and 机器视觉。E-mail: Lw2007@dlut.edu.cn