

# 一种改进的基于直线特征的非量测畸变校正方法

刘炼雄<sup>1</sup>, 胡昌华<sup>1</sup>, 何 川<sup>2</sup>, 周志杰<sup>1</sup>, 赵玉山<sup>1</sup>

<sup>1</sup>火箭军工程大学控制工程系, 陕西 西安 710025;

<sup>2</sup>火箭军工程大学核工程系, 陕西 西安 710025

**摘要** 在大型结构件的损伤监测过程中, 摄像机镜头畸变往往引起成像畸变, 如果直接利用畸变图像进行标定、测量, 将引起较大误差, 降低损伤监测精度。为了有效地校正成像畸变, 提出一种改进的基于直线特征的非量测畸变校正方法。分析实际测量中成像畸变的像差模型; 直接利用场景中存在的直线特征, 得到带权重因子的直线射影不变约束关系和三点近似共线约束关系, 并建立两组畸变校正约束方程求解畸变系数; 通过实验验证提出方法的可行性和有效性。校正结果表明, 相比不带权重的直线特征标定方法, 提出方法优化结果的均方根误差精度提高了 0.21 pixel。

**关键词** 机器视觉; 摄像机标定; 非量测方法; 畸变校正

**中图分类号** TP391.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0915001

## An Improved Non-Metric Distortion Calibration Method Based on Straight Line Characteristics

Liu Lianxiong<sup>1</sup>, Hu Changhua<sup>1</sup>, He Chuan<sup>2</sup>, Zhou Zhijie<sup>1</sup>, Zhao Yushan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Control Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

<sup>2</sup>Department of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China

**Abstract** The camera lens distortion often causes image distortion during damage monitoring process of large structures, great errors will be resulted and damage detection accuracy will be reduced if the distorted image is directly used for calibration and measurement. We propose an improved non-metric distortion calibration method based on straight line characteristics to correct the distortion effectively. Firstly, we analyze the aberration model of the distorted image in actual measurement. Then, we obtain the constraint relationships with weighting factors based on the principle of linear projective invariance and three-point approximate collinearity according to the straight line features in the scene, and establish two sets of distortion correction constraint equations to solve the distortion parameters. Finally, the feasibility and validity of the proposed method is demonstrated experimentally. Root mean square error of the proposed method is improved by 0.21 pixel compared with the calibration method based on the linear feature without weighting factors.

**Key words** machine vision; camera calibration; non-metric method; distortion calibration

**OCIS codes** 150.0155; 150.1488; 150.6910

## 1 引 言

近几十年内,随着大型结构件的不断出现,结构件损伤监测研究获得了丰厚的成果。其中,摄像测量技术因其非接触、高精度、实时性好等特点<sup>[1]</sup>成为研究的热点。该技术主要依靠摄像机从平面二维图像中提取对应物体的三维空间的特征,进而通过图像间的对应关系完成相关参数的标定,最后得出相关的损伤监测指标。摄像机标定作为摄像测量技术的前提,是运用像机进行各类安全监测实验的精度保证。传统标定方法

**收稿日期:** 2017-04-10; **收到修改稿日期:** 2017-05-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(61573365,61025014)

**作者简介:** 刘炼雄(1993—),男,硕士研究生,主要从事无损检测及计算机视觉方面的研究。E-mail: liu\_lxly@163.com

**导师简介:** 胡昌华(1966—),男,博士,教授,主要从事故障诊断与容错控制、寿命预测、导航制导等方面的研究。

E-mail: hch\_reu@sina.com(通信联系人)

依据理想针孔成像模型,将各项镜头畸变系数和像机内外参数一起纳入参数模型,并利用高精度的标定板完成各项参数的标定,所得参数结果精度高,但对标定板的制作精度和人员的专业程度要求较高。在实际成像过程中,由于像机镜头设计和工艺水平等复杂因素的影响,实际成像模型并不能严格满足针孔成像模型<sup>[1]</sup>,在不考虑成像模型有效性的前提下,将会导致成像图像发生畸变。

基于非量测畸变校正的方法是建立在畸变模型的基础上,利用空间特征的不变性,避免了畸变系数与像机参数耦合求解带来的不稳定性及标定算法的发散<sup>[2-3]</sup>。Herraez等<sup>[4]</sup>根据理想情况下直线射影不变性质,利用4条相互垂直的直线建立坐标系,并通过坐标轴上点的畸变特征完成了畸变校正工作。但该研究在建立畸变模型后,未考虑不同区域畸变程度不同,且未有效地利用整幅图像的直线特征约束,求解畸变系数的稳定性较差。翟优等<sup>[5]</sup>通过控制像机绕光轴进行旋转,从而利用旋转前后图像间对应点的关系完成对图像中心和纵横比的标定。该方法有效地避免了畸变系数与其他像机参数的耦合求解,但绕光轴进行的像机旋转运动的实现难度大,易造成精度误差。张敏等<sup>[6]</sup>依据直线不变特征构造了带权重值的弯曲测度函数,对畸变系数进行优化求解,相比不考虑权重的直线畸变校正方法,获得的结果精度较高。周子卿等<sup>[7]</sup>依据直线上任意两特征点构成共线向量外积为零的属性构造了畸变测度函数,完成了对畸变参数的标定。在实验设计中,通过是否优化畸变中心的对比方法,得出将畸变中心设定为图像中心进行非线性优化将会更优的结论。其在构造优化目标函数时,虽然考虑了将畸变中心与其他参数同时加入非线性优化模型进行求解的情况,但是未考虑先单独求解畸变中心,再优化求解其他参数的情况,因而不能从其他方面否定求解畸变中心可能获得更好效果的情况。刘阳等<sup>[8]</sup>利用射影几何及纯平移两视图几何关系,构造4组约束方程对畸变参数进行求解。虽然所得优化结果精度较高,但需要控制像机进行纯平移运动,对设备条件要求较高,且所构造目标函数较为复杂,特征提取初始值误差较大时易出现解的不稳定性。

在考虑畸变中心和径向畸变的影响下,本文基于一种直线射影不变性质的非量测畸变校正方法,在对所提取曲线进行直线拟合的过程中,提出了一种带权重因子的目标偏差函数,建立了整图像的畸变约束关系。同时,在忽略切向畸变影响的情况下,提出一种三点近似共线的畸变约束关系。最终综合考虑两种约束关系,建立优化目标函数,运用Levenberg-Marquarde优化算法<sup>[9]</sup>完成对畸变参数的求解,在一定程度上提高了校正精度。

## 2 问题描述

实际成像过程中,在像机镜头设计和工艺水平等复杂因素的影响下,像机成像结果并不能满足理想针孔成像模型,且存在较大的镜头畸变,因而在进行高精度测量时,忽略镜头畸变因素的影响往往会造成测量结果的精度误差。目前在将径向畸变作为主要影响的标定方法中<sup>[10-12]</sup>,物理坐标系下的实际成像点 $p(x, y)$ 与理想成像点 $\tilde{p}(\tilde{x}, \tilde{y})$ 之间的像差 $(\delta_x, \delta_y)$ 可用以下模型进行描述:

$$\begin{cases} \delta_x = \tilde{x} - x = x(k_1 r_0^2 + k_2 r_0^4 + k_3 r_0^6 + \dots) \\ \delta_y = \tilde{y} - y = y(k_1 r_0^2 + k_2 r_0^4 + k_3 r_0^6 + \dots) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $r_0^2 = (x - C_x)^2 + (y - C_y)^2$ ,  $k_1, k_2, k_3, \dots$ 为径向畸变系数,  $(C_x, C_y)$ 为理想图像中心。

然而实际求解时, Weng等<sup>[13-14]</sup>指出,过多阶次的畸变系数求解会导致计算量过大,且精度的提高不明显。故通常情况下,对于采用径向畸变作为主要畸变影响的模型,可以只考虑二阶径向畸变系数 $k_1, k_2$ 带来的误差,其畸变模型可由(1)式简化为

$$\begin{cases} \tilde{x} = x + xk_1 r_0^2 + xk_2 r_0^4 \\ \tilde{y} = y + yk_1 r_0^2 + yk_2 r_0^4 \end{cases} \quad (2)$$

通过文献调研发现,非量测畸变校正方法参照(2)式中的畸变模型进行畸变系数求解时,往往将图像中心近似替代畸变中心进行求解或者加入切向畸变进行精度补偿<sup>[2-3, 5-7]</sup>。但基于以上方法求解时,前者将引起求解精度的下降,后者将增加优化求解的难度。此外,基于直线特征的非量测方法通常可利用拟合直线完成畸变约束条件的构造,未考虑图像各区域畸变分布规律的影响。

综合以上分析,本文主要解决的问题为:

- 1) 考虑畸变中心对求解精度影响的前提下,利用求解的畸变中心对切向畸变进行补偿,进而在径向畸变模型下建立相关约束,完成对畸变系数的求解;
- 2) 利用直线特征进行畸变校正时,考虑图像中靠近(远离)畸变中心区域的像点畸变程度变小(变大)的规律,进一步提高畸变系数的求解精度。

### 3 改进的非量测畸变校正方法

获取包含畸变的成像图像后,场景中存在的直线特征由于受镜头畸变的影响,投影到图像后将弯曲成曲线。在进行畸变校正前,为减少透视畸变带来的误差,首先考虑将图像实际成像中心 $(\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)$ (即畸变中心,如无特别说明,文中表述为畸变中心)作为径向畸变模型求解的中心进行解算<sup>[15]</sup>;其次,运用边缘处理方法对图像中的有效直线进行提取,并利用直线射影不变性质和三点近似共线性建立两组约束方程;最后,通过对两组约束方程的优化求解,得到径向畸变系数 $k_1$ 和 $k_2$ 。

#### 3.1 基于直线射影不变性质的畸变约束

理想情况下,空间中位于标定板上的直线在二维图像上仍保持直线的特征。但由于图像畸变的存在(以桶形畸变为例),图像上直线往往畸变成图1所示的曲线。对于径向畸变而言,图像中各区域的畸变程度通常与像点离图像中心的距离有关(离图像中心越远,各区域畸变程度越大)<sup>[6,14]</sup>。为更好地获取径向畸变模型下的图像畸变系数,利用透视理论中的交叉比不变性质<sup>[16-17]</sup>解出图像的畸变中心 $(\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)$ ,以消除透视畸变对成像畸变的影响。

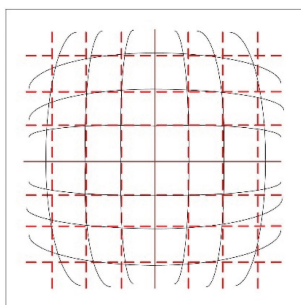


图1 发生桶形畸变的图像

Fig. 1 Image with barrel distortion

在利用拟合直线进行曲线弯曲度校正的过程中,通常使用带畸变系数的理想像点与拟合直线间的距离偏差构造目标函数。但在实际优化过程中,为使得整体优化偏差最小,有时优化求解的拟合直线会偏离理想直线,因而导致最终优化结果相比理想结果的拟合效果较差。如图2所示,假设畸变曲线 $l_i$ 对应不同的拟合直线 $l_{i1}$ 、 $l_{i2}$ (其对应的畸变系数分别为 $k_{i1-1}$ 、 $k_{i1-2}$ 和 $k_{i2-1}$ 、 $k_{i2-2}$ ),其中拟合直线 $l_{i1}$ 上理想像点 $\tilde{p}_{li}(x_{ln}, y_{ln})$ 的整体距离偏差较小,拟合直线 $l_{i2}$ 上的距离偏差相对较大。由图2可知,拟合直线 $l_{i1}$ 虽然相对拟合直线 $l_{i2}$ 的距离偏差较小,但是与理想直线 $\tilde{l}_i$ 之间的拟合效果较差,若直接使用拟合直线 $l_{i1}$ 进行后续的参数求解,将会造成较大的结果误差。因而,只考虑距离偏差而进行拟合的直线并不能完全保证与理想直线的拟合效果相近,且在后续的参数求解过程中可能造成较大的误差。

为更好地使畸变曲线拟合成为其对应的理想直线,采用(2)式中的畸变校正模型,并在文献[18]的基础上,充分利用像点靠近畸变中心时畸变度小的条件,在使用距离偏差进行理想直线拟合的同时,通过设置曲线 $l_i$ 上点的权重值 $t_{li,n}$ (远离畸变中心的像点因畸变大而赋予较小的权重,靠近畸变中心的像点因畸变小而赋予较大的权重)来构建理想像点与理想直线间的目标偏差函数 $s_{li}$ 。

假设理想直线 $\tilde{l}_i$ 方程为 $y = a_i x + b_i$ ,其对应的法线式方程<sup>[5,16]</sup>可设为 $x \cos \alpha_i + y \sin \alpha_i - d_i = 0$ ,则曲线 $l_i$ 上所得 $N_{li}$ 个畸变像点所对应的理想点距离理想直线 $\tilde{l}_i$ 的偏差可表示为

$$s_{li} = \sum_{n=1}^{N_{li}} t'_{li,n} (x_{li,n} \cos \alpha_i + y_{li,n} \sin \alpha_i - d_i)^2, \quad (3)$$

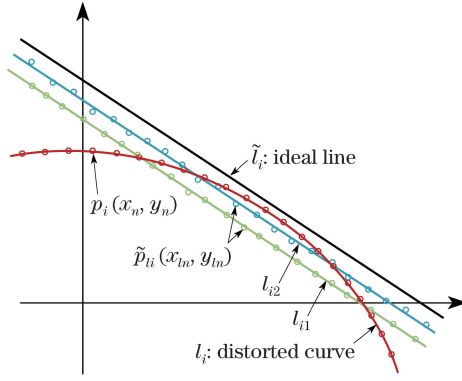


图 2 只考虑距离偏差的直线拟合示意图

Fig. 2 Line-fitting diagram only considering the deviation in range

式中权重值  $t_{i,n}$  为对曲线  $l_i$  上各像点所赋权重值  $t_{i,n} = \sqrt{\omega^2 + h^2} / d_{l_{i,n}}$  进行归一化后的结果 ( $\omega, h$  分别为图像的宽度和高度,  $d_{l_{i,n}}$  为曲线  $l_i$  上第  $n$  个畸变点到畸变中心的距离);  $\alpha_i, d_i$  为包含畸变系数  $k_1, k_2$  的函数表示。

由(3)式即可得到整图像的畸变误差约束函数  $S_1$ , 即

$$S_1 = \sum_{i=1}^M s_{l_i}, \quad (4)$$

式中  $M$  为参考文献[19]中离群值剔除方法所提取到的整图像内的曲线数量。

### 3.2 基于径向畸变的三点近似共线畸变约束

在考虑径向畸变和切向畸变的摄像机畸变模型中(图 3), 由于切向畸变相比径向畸变几乎可以忽略(即  $dt \ll dr$ ), 则图像坐标系下畸变像点、理想像点与畸变中心的夹角近似相等(即  $\theta \approx \tilde{\theta}$ ), 故畸变像点  $p(x_{ij}, y_{ij})$ 、理想像点  $\tilde{p}(\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij})$  与畸变中心  $e(\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)$  之间近似满足共线关系。因此在图像坐标系下可得

$$\frac{y_{ij} - \tilde{v}_0}{x_{ij} - \tilde{u}_0} = \frac{(1 + k_1 r_0^2 + k_2 r_0^4)y_{ij} - \tilde{v}_0}{(1 + k_1 r_0^2 + k_2 r_0^4)x_{ij} - \tilde{u}_0}. \quad (5)$$

由(5)式提供的约束关系即可建立整图像中所提取像点的共线约束函数, 但考虑到设计算法时存在相近数相减可能造成的病态问题, 先将(5)式变形为

$$(k_1 r_0^2 + k_2 r_0^4)(y_{ij} \tilde{u}_0 - x_{ij} \tilde{v}_0) = 0; \quad (6)$$

再由(6)式建立整图像中所提取像点的共线约束函数  $S_2$ , 即

$$S_2 = \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} (k_1 r_0^2 + k_2 r_0^4)^2 (y_{ij} \tilde{u}_0 - x_{ij} \tilde{v}_0)^2. \quad (7)$$

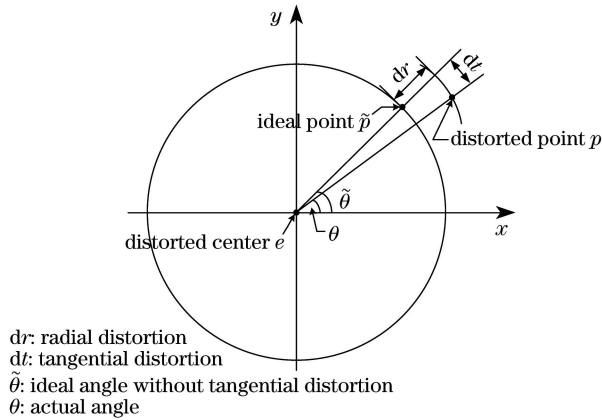


图 3 图像坐标系下的摄像机畸变模型

Fig. 3 Camera distortion model under image coordinate system



由 3.1 节、3.2 节中建立的两组约束方程,建立最终所用的优化目标函数  $S[S = \min(S_1 + S_2)]$ ,并通过 LM 优化算法进行畸变系数  $k_1, k_2$  的求解。提出的算法具有较好的噪声抑制能力,对整个图像中存在的畸变能够按照实际成像效果进行分析,并依据畸变程度大小合理分配校正权重值,且通过多个约束条件较好地完成了对整个图像的校正。

### 3.3 畸变校正流程

本文方法是一种改进的基于直线射影不变性质的畸变校正方法。首先,单独对畸变中心进行精确求解;然后通过 3.1 节、3.2 节的两种约束关系,建立两组约束方程;最后,由两组约束方程建立求解的优化目标函数,完成畸变系数的高精度求解。具体的求解流程如下:

1) 获取畸变图像,利用交叉比不变性质求解畸变中心  $(\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)$ ;

2) 利用 Sobel 算子提取图像边缘信息,剔除边缘长度小于 50 pixel 的曲线,然后进行直线的离群值剔除,得到  $M$  条投影曲线  $l_i$ ,并在曲线上提取  $N_{l_i}$  个畸变特征点;

3) 依据权重因子  $t'_{l_i, n}$  对拟合直线  $x \cos \alpha_i + y \sin \alpha_i - d_i = 0$  进行距离偏差  $s_{l_i}$  的求解,并得到整图像的畸变误差约束函数  $S_1 = \sum_{i=1}^M s_{l_i}$ ;

4) 根据 3.2 节中提出的三点共线约束,由提取的畸变特征点得到共线约束函数  $S_2 = \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} (k_1 r_0^2 + k_2 r_0^4)^2 \cdot (y_{ij} \tilde{u}_0 - x_{ij} \tilde{v}_0)^2$ ;

5) 由步骤 3) 和 4) 中的约束函数  $S_1, S_2$  建立最终的优化目标函数  $S = S_1 + S_2$ ,并在  $S$  趋向于最小值的过程中,不断更新  $k_{1,t}, k_{2,t}$ ;

6) 利用步骤 5) 的迭代结果  $k_{1,t}, k_{2,t}$  对畸变图像进行校正。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 标准图像的数值仿真

考虑在工程实际中利用像机进行损伤监测时通常使用人工标志点完成对被监测对象的参数提取,同时为更直观地验证上述畸变系数标定方法的有效性和可靠性,在 Matlab R2010b 和 OpenCV 2.4.10 环境下分别对标准棋盘格仿真图像和真实棋盘格标定板进行实验。如图 4(a) 所示,首先使用标准棋盘格图像进行仿真实验,所用标准仿真图像原始大小为 250 pixel  $\times$  250 pixel,实验所考虑的图像畸变中心为 (125, 125),径向畸变系数  $k_1 = 2, k_2 = 2 \times 10^{-3}$ 。进行畸变处理后的图像如图 4(b) 所示,进行畸变处理后生成的图像真实大小为 587 pixel  $\times$  587 pixel,黑色部分为分配图像空间后系统默认填充。图 4(c) 为边缘提取图像。

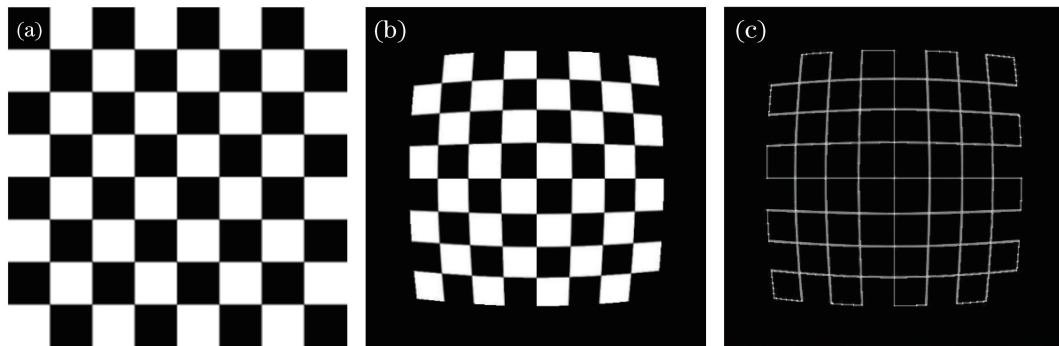


图 4 (a) 仿真标准图像; (b) 仿真畸变图像; (c) 边缘提取图像

Fig. 4 (a) Standard image for simulation; (b) distorted image for simulation; (c) image by edge-detection

为模拟整个畸变校正过程中误差对方法有效性的影响,对图像中的各像点坐标加入噪声均值为 0、方差  $\sigma = 0 \sim 1.2$  pixel 的高斯白噪声,并在不同噪声水平下分别进行 50 次随机实验。仿真结果采用均方根误差 (RMSE) 衡量标定结果受噪声值的影响,表示为

$$f_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(x'_{ij} - x_{ij})^2 + (y'_{ij} - y_{ij})^2]}, \quad (8)$$

式中  $m$ 、 $n$  分别为横、纵方向所提取特征点个数,  $(x_{ij}, y_{ij})$ 、 $(x'_{ij}, y'_{ij})$  分别为仿真所用真实坐标、校正后所得理想坐标。

图 5 所示为噪声方差  $\sigma=1$  pixel 时 50 次随机实验所得畸变系数的校正结果。图 6 所示为不同噪声条件下运用基于共线点的畸变校正方法(方法一)<sup>[15]</sup>、不加权重的基于直线特征不变方法(方法二)<sup>[20]</sup>、本文方法进行 50 次随机实验所得仿真结果的 RMSE 比较。

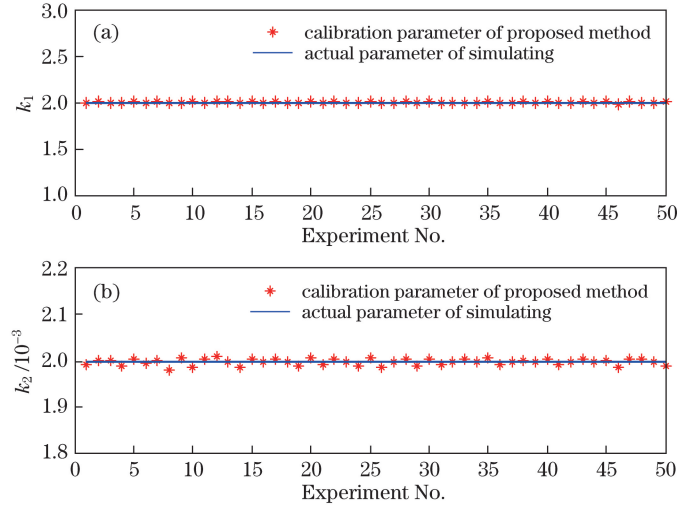


图 5 噪声方差  $\sigma=1$  pixel 时 50 次随机实验得到的畸变系数。(a)  $k_1$ ; (b)  $k_2$

Fig. 5 Distortion coefficients obtained by random experiments for 50 times when noise variance  $\sigma=1$  pixel. (a)  $k_1$ ; (b)  $k_2$

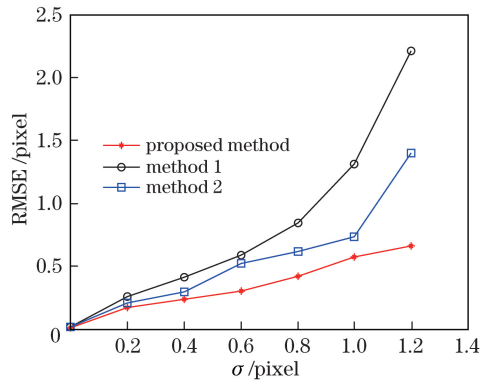


图 6 RMSE 与噪声水平的关系

Fig. 6 Relationship between RMSE and noise level

由图 5 可知,噪声方差  $\sigma=1$  pixel 时进行的 50 次实验中,本文方法所得的畸变校正值  $k_1$ 、 $k_2$  与实际设置的畸变真值间误差较小,且相对误差均值  $\bar{\delta}_{k_1} < 0.09\%$ 、 $\bar{\delta}_{k_2} < 0.21\%$ ,说明了方法求解时的稳定性较好。对仿真图像加入不同噪声水平进行对比实验后发现(图 6),在加入噪声  $\sigma \leq 0.8$  pixel 的情况下,3 种方法所得结果精度相对较好;但在加入噪声  $\sigma > 0.8$  pixel 的情况下,方法一的精度急剧下降,方法二的精度虽然比方法一高,且误差仍稳定在 1.5 pixel 的范围内,但其精度下降幅度比本文方法大。通过以上仿真可知,本文方法无论在稳定性方面还是在精度方面都优于方法一和方法二,证明了该方法的可行性。

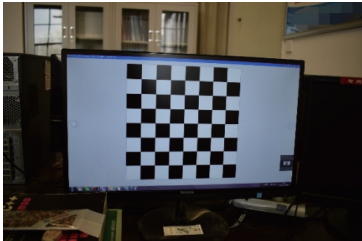
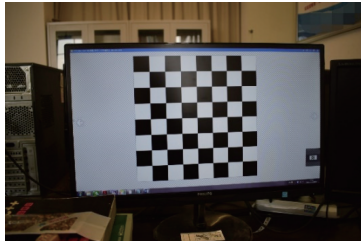
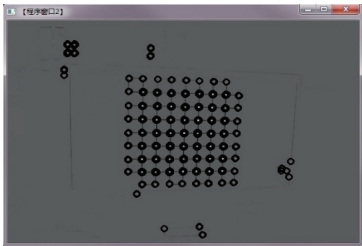
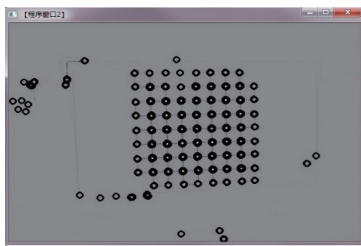
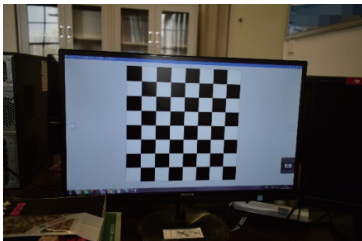
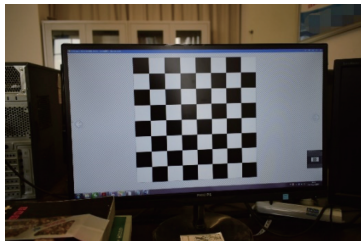
#### 4.2 基于棋盘标定板的实物实验

实验中摄像机型号为 Nikon-D3300(分辨率为  $6000 \text{ pixel} \times 4000 \text{ pixel}$ ),镜头为 Nikkor: AF-P.DX.18~55 mm.  $f/3.5 \sim 5.6$  G。利用液晶显示器上生成的棋盘格进行实物实验,所用棋盘格标定板实际显示尺寸为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。采集图像后提取图像中的特征曲线和有关特征点,并运用提出的畸变校正优化方法完成

最终的畸变校正。表 1 所示为实验中选取的两组图像及对应的实验数据。

表 1 实际图像及数据

Table 1 Image and data of actual experiments

|                                | Experiment 1  | Experiment 2  |
|--------------------------------|---|---|
| Obtained image                 |    |    |
| Gray image by corner detection |    |    |
| Optimized image                |   |   |
| Distortion coefficient         | $k_1 = 3.7512 \times 10^{-7}$<br>$k_2 = 5.6537 \times 10^{-12}$<br>$\tilde{u}_0 = 3002.17 \text{ pixel}$<br>$\tilde{v}_0 = 2003.43 \text{ pixel}$ | $k_1 = 3.8247 \times 10^{-7}$<br>$k_2 = 5.7482 \times 10^{-12}$<br>$\tilde{u}_0 = 3004.26 \text{ pixel}$<br>$\tilde{v}_0 = 2002.04 \text{ pixel}$ |

为验证提出方法的有效性,在同等实验条件下,分别运用 4.1 节中方法一、方法二对获取的图像进行畸变校正实验。理想情况下,由 3.1 节可知,曲线上的像点经过校正后将拟合在同一直线上。因此先利用校正后图像中对应像点进行直线拟合,再求取像点与拟合直线间的距离偏差 $s'_i$ 和整图像中距离偏差的平均值 $\bar{s}'_i$ ,最后利用距离偏差平均值 $\bar{s}'_i$ 对精度进行比较,具体实验结果如表 2 所示。

表 2 实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

| Method          | $\bar{s}'_i / \text{pixel}$ | RMSE / pixel |
|-----------------|-----------------------------|--------------|
| Proposed method | 0.46                        | 0.47         |
| Method 1        | 1.37                        | 1.53         |
| Method 2        | 0.55                        | 0.68         |

由表 2 可知,本文方法、方法二的精度比方法一的精度高,但相差不超过 0.09 pixel,这是由于使用像点与拟合直线之间的距离偏差作为评价指标时,本文方法与方法二使用的约束条件类似,方法间仅相差权重因子 $t_{i,n}$ 的优化(3.1 节),因而畸变曲线得到优化后都较好地拟合成为直线。基于以上分析,再采用 RMSE 进行方法间的精度衡量(表 2)。由表 2 可以看出,方法二的 RMSE 比本文方法高 0.21 pixel,相比之下,本文方法得到结果的精度得到了进一步提高。

## 5 结 论

在只考虑径向畸变的模型中,根据直线射影不变性质和三点近似共线关系,提出了一种改进的非量测畸变校正方法。为避免标定参数求解时的耦合影响,先运用交叉比不变方法求解畸变中心,再运用直线射影不变性质和提出的三点近似共线关系构建优化约束函数,最后完成对径向畸变系数的求解。仿真、实际实验结果均较好地证明了本文方法抑制噪声的有效性和稳定性,且相比不带权重的直线特征标定方法 RMSE 精度提高了 0.21 pixel。

本文方法得到的结果精度虽有所提高,但在只考虑径向畸变的求解模型中,为避免参数求解时存在的耦合影响,先对畸变中心进行了优化求解,再对径向畸变系数进行求解,相比之下本文方法的优化步骤较多,求解效率及实时性有所降低。在今后的研究中,可研究在对多参数进行优化求解的同时如何通过约束避免求解的耦合影响,在保证精度的同时如何对算法进行改进,进一步提高优化求解的效率和稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009: 53-55.  
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: 53-55.
- [2] Yang Biwu, Guo Xiaosong. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(3): 269-273.  
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): 269-273.
- [3] Huang Yingqing, Wen Jun, Xie Zhihong. Research on non-metric calibration algorithm of camera lens distortion[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(20): 59-62.  
黄应清, 文 军, 谢志宏. 摄像机畸变的非量测校正方法研究[J]. 现代电子技术, 2015, 38(20): 59-62.
- [4] Herráez J, Denia J L, Navarro P, *et al.* Determining image distortion and PBS (point of best symmetry) in digital image using straight line matrices[J]. Measurement, 2016, 91: 641-650.
- [5] Zhai You, Zeng Luan, Xiong Wei. A simple calibration method for image center and aspect ratio [J]. Optical Technique, 2015, 41(5): 390-394.  
翟 优, 曾 峦, 熊 伟. 图像中心和纵横比的简易标定方法[J]. 光学技术, 2015, 41(5): 390-394.
- [6] Zhang Min, Jin Longxu, Li Guoning, *et al.* Camera distortion calibration method based on straight line characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0615001.  
张 敏, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于直线特征的摄像机镜头畸变标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0615001.
- [7] Zhou Ziqing, Zhao Peng, Li Bo, *et al.* Nonmetric lens distortion calibration based on collinear vectors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015001.  
周子卿, 赵 鹏, 李 勃, 等. 基于共线向量的非量测镜头畸变校正[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015001.
- [8] Liu Yang, Liu Wei, Xu Pengtao, *et al.* Calibration of lens distortion parameters based on two view geometry of translation motion[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 922-928.  
刘 阳, 刘 巍, 徐鹏涛, 等. 基于纯平移两视图几何的镜头畸变参数标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 922-928.
- [9] Madsen K, Nielsen H B, Tingleff O. Methods for non-linear least squares problems[M]//Informatics and mathematical modelling. Lyngby: Technical University of Denmark Press, 2004: 17-45.
- [10] Malis E, Cipolla R. Multi-view constraints between collineations: Application to self-calibration from unknown planar structures[C]. 6<sup>th</sup> European Conference on Computer Vision, 2000, 1843: 610-624.
- [11] Sun Q, Wang X Y, Xu J P, *et al.* Camera self-calibration with lens distortion[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(10): 4506-4513.
- [12] Brown D C. Close-range camera calibration[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1971, 37(8): 855-866.
- [13] Jiang Dazhi, Yu Qian, Wang Bingyang, *et al.* Research and overview of imaging nonlinear distortion in computer vision[J]. Computer Engineering, 2001, 27(12): 108-110.  
姜大志, 郁 倩, 王冰洋, 等. 计算机视觉成像的非线性畸变研究与综述[J]. 计算机工程, 2001, 27(12): 108-110.
- [14] Weng J Y, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-970.
- [15] Qu Xuejun, Zhang Lu. Camera calibration technique for computer vision detection[J]. Computer Engineering and



Design, 2010, 31(19): 4321-4323.

曲学军, 张 璐. 基于空间平行直线束的 CCD 摄像机内外参数标定[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(19): 4321-4323.

- [16] Zhang Jing, Zhu Dayong, Jia Xiaodong. Camera lens distortion calibration with co-line points[J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 221-224.

张 靖, 朱大勇, 贾晓东. 用共线点列标定摄像机镜头畸变[J]. 激光技术, 2006, 30(2): 221-224.

- [17] 郝继贵, 罗 明, 陶国志, 等. 摄像机镜头径向畸变中心的计算模型及求解[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(1): 84-86, 90.

- [18] Wang Guiping, Wang Huifeng, Liu Panzhi, *et al.* A distortion field-calibrating method based on feature parallel lines of image[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 0111001.

汪贵平, 王会峰, 刘盼芝, 等. 特征平行直线的成像畸变现场校正[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0111001.

- [19] Zhu H J, Wang X, Zhou J L, *et al.* Approximate model of fisheye camera based on the optical refraction[J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 73(3): 1445-1457.

- [20] Zheng Yi, Liu Shangqian. Line-based nonlinear distortion correction of a calibration image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(6): 1129-1133.

郑 毅, 刘上乾. 利用直线特征的定标图像非线性畸变校正[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 1129-1133.