

摄像机畸变标定的模型参考逼近方法

徐 嵩 孙秀霞 刘树光 刘 希 杨朋松

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要 提出了一种畸变中心未知的非量测摄像机畸变标定新方法,该方法无须求解摄像机内外线性参数即可标定摄像机二阶多项式径向畸变校正模型。该方法分两步实现:将直线畸变成像的曲线的两个端点用直线段连接以形成闭合曲线,得到其面积值及端点与畸变参数及中心的近似关系,以此完成近似标定;依据该闭合曲线端点和当前畸变标定值,由畸变模型生成参考值对近似关系进行修正,准确逼近实际的畸变参数与中心。另外,设计了一种畸变校正指标函数,利用局部非线性优化方法进一步抑制了噪声对标定结果的影响。仿真和实际图像实验均表明该方法收敛快速,标定精度高。

关键词 机器视觉;摄像机标定;非量测方法;畸变校正;非线性优化

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0715001

Model Reference Approaching Method of Camera Distortion Calibration

Xu Song Sun Xiuxia Liu Shuguang Liu Xi Yang Pengsong

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University,
Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract A new method of non-metric camera distortion calibration is proposed, independent of the known imaging center, which is fit for the second order polynomial distortion calibration model. This method is made up of the following two steps. First, the curves distorted from straight lines are closed by adding straight-line segments, and areas of those curves are computed. Second, the relationship between these areas with ends and the distortion parameters with center are elicited, thus the approximate values of parameters are resolved. The above relationship is iteratively modified by the reference values according to the distortion model, based on the endpoints of these curves and the current calibration. Therefore, the distortion parameters and center are iteratively approaching the real values. Moreover, a target function of distortion calibration is designed, with local nonlinear optimization method, so as to reduce the image noise's effect on calibration. Both simulations and real image tests show that this method can implement exact calibration with fast convergence.

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

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.6910

1 引 言

对摄像机模型中各参数的求解过程称为摄像机标定,这是建立图像像素位置与场景点位置间映射关系的前提,是视觉测量的基础和关键。对于低成本摄像机(尤其对变焦镜头)而言,基于针孔模型的标定将造成严重的量测偏差,因此须引入畸变校正模型并进行精确的参数标定。

典型的标定算法,如 Tsai^[1]的两步法、Zhang^[2]的平面法等,由于畸变参数与内外线性参数一起估计,适用于较小畸变摄像机的标定;而当畸变较大时将显著影响标定精度和效率。利用射影几何的交比不变特性设计标定算法^[3-5]可有效解决参数耦合问题,但仍须已知空间点的精确位置。

非量测的摄像机畸变标定方法即使在未知空间

收稿日期: 2013-01-17; 收到修改稿日期: 2013-03-21

基金项目: 航空科学基金(20121396008)

作者简介: 徐 嵩(1985—),男,博士研究生,主要从事无人机视觉导航方面的研究。E-mail: xusong_pla@163.com

导师简介: 孙秀霞(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事小型无人机导航与控制方法的理论与应用等方面的研究。

E-mail: kjgcdx08@126.com

点坐标时也能有效解决参数求解耦合问题。由于空间直线普遍存在并且具有对畸变的度量能力^[6-7],因此被该方法广泛采用。周富强等^[8-9]设计了直接利用直线在畸变下的弯曲特性进行标定的方法。上述解耦的标定方法^[3-9]均假设畸变中心已知,张靖等^[10]则由畸变直线引出面积平方指标并通过遗传算法寻优以得到畸变参数及中心,但算法实现繁琐,计算量极大。陈天飞等^[11]针对单参数除式模型设计了一种用圆弧拟合畸变直线成像点获取畸变参数及中心的方法,但其依赖于对圆弧的非线性高精度拟合,且局限于单参数除式模型。

本文依据直线段畸变成像近似呈圆弧的特性,建立了圆弧及弦所围面积与畸变参数及中心的近似关系以实现初步标定。然后,由二阶径向畸变模型依据成像线段端点位置及当前参数标定值,获取包围面积与畸变标定值之间关系的参考比例修正量,据此设计修正近似关系的模型参考逼近算法,实现了对真实值的逼近并有效提升了收敛速度。在考虑成像噪声时,提出了一种描述直线弯曲程度的指标函数,并据此进行局部非线性优化,进一步抑制了噪声对畸变标定结果的影响。

2 畸变分离的摄像机模型

对非量测畸变标定算法,必须选用畸变参数与线性参数相分离的摄像机模型。

2.1 线性针孔模型

如图1所示,摄像机针孔模型可由三个坐标系表示:两个三维坐标系,分别为世界坐标系($O_w x_w y_w z_w$)和摄像机坐标系($O_c x_c y_c z_c$);一个二维坐标系,即图像坐标系($O_i uv$)。对于理想针孔透视投影,空间中一点 $\mathbf{p}_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 分别对应于 $O_c x_c y_c z_c$ 和 $O_i uv$ 中的 $\mathbf{p}_c = (x_c, y_c, f, 1)^T$ 和 $\mathbf{p}_u = (x_u, y_u, 1)^T$ 。则摄像机线性成像模型为

$$s\mathbf{p}_u = \mathbf{A}[\mathbf{I} \ 0]\mathbf{p}_c = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]\mathbf{p}_w, \quad (1)$$

式中 \mathbf{A} 和 $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$ 分别为摄像机的线性内外参数, s

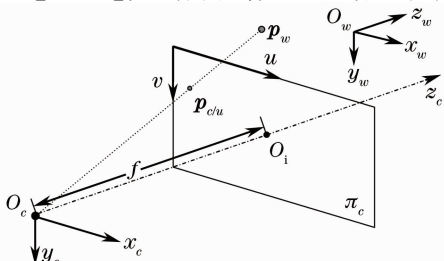


图1 摄像机小孔几何模型

Fig. 1 Geometry model of the camera's pin-hole

为适应齐次坐标的比例因子。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 f_x 和 f_y 分别为 u 和 v 方向上的等效焦距,成像中心 O_i 的图像坐标为 $[u_0, v_0]$ 。由于一般情况下感光元件为矩形,故设 $\gamma = 0$ 。

2.2 畸变校正与仿真模型

由于摄像机存在光学畸变,理想针孔模型不能准确描述实际映射关系,因而需要引入畸变校正模型。通常只需考虑一阶或二阶径向畸变即可满足系统测量精度要求^[1,3-4,12-13],引入过多参数反而会引引起解的不稳定性^[5]。Brown^[14]和 Fitzgibbon^[12]分别提出了摄像机畸变的多项式和除式校正模型。

设 \mathbf{p}_w 实际成像点为 $\tilde{\mathbf{p}}_d = (x_d, y_d)^T$ (非齐次坐标均加 \sim 标记),并记:

$$\begin{cases} x'_d = x_d - u_0; & x'_u = x_u - u_0 \\ y'_d = y_d - v_0; & y'_u = y_u - v_0 \\ r'_d = x'_d + y'_d & (r'_d \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

1) 多项式畸变校正模型:

$$\begin{cases} x'_u - u_0 = x'_d \left(1 + \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_d^2\right) \\ y'_u - v_0 = y'_d \left(1 + \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_d^2\right) \end{cases} \quad (4)$$

2) 除式畸变校正模型:

$$\begin{cases} x'_u - u_0 = x'_d / \left(1 - \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_d^2\right) \\ y'_u - v_0 = y'_d / \left(1 - \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_d^2\right) \end{cases} \quad (5)$$

(4)式、(5)式中, n_d 为畸变校正模型的阶数, k_i 表示第 i 阶径向畸变参数。

为对算法实现仿真,须构建相应的畸变仿真模型,实现从 $\tilde{\mathbf{p}}_u = (x_u, y_u)^T$ 到 $\tilde{\mathbf{p}}_d = (x_d, y_d)^T$ 的变换。这里在文献[15]的基础上分别对两种畸变校正模型建立各自的畸变仿真模型。

设无畸变时的图像点为 $\tilde{\mathbf{p}}_u$,则可分别通过(6)式和(7)式迭代得到相应的畸变成像点:

$$\begin{cases} x_{di} - u_0 = (x_u - u_0) / \left(1 + \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_{d(i-1)}^2\right) \\ y_{di} - v_0 = (y_u - v_0) / \left(1 + \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_{d(i-1)}^2\right) \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_{di} - u_0 = (x_u - u_0) \left(1 - \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_{d(i-1)}^2\right) \\ y_{di} - v_0 = (y_u - v_0) \left(1 - \sum_{i=1}^{n_d} k_i r_{d(i-1)}^2\right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $r_{di} = (x_{di} - u_0)^2 + (y_{di} - v_0)^2$, $x_{d0} = x_d$, $y_{d0} = y_d$, 本文取 (x_{d15}, y_{d15}) 。

3 畸变标定的模型参考逼近方法

由畸变直线段近似呈圆弧的特性,得到了畸变直线段及弦所围面积和成像直线到畸变中心距离的近似关系以完成初始标定。在此基础上,提出了依据畸变模型求取参考修正量来校正该近似关系的方法,并据此迭代逼近真实的畸变参数及中心。

3.1 直线畸变成像的圆近似拟合方法

直线经畸变成像后近似呈圆弧状,特别地,当采用(5)式模型并令 $n_d = 1$ 时,则恰为圆弧。无畸变成像直线 $l_u = (a, b, c)^T (ax_u + by_u + c = 0)$ 。由(5)式得

$$\begin{cases} x_d^2 + y_d^2 - \frac{by_d'}{c'k_1} - \frac{ax_d'}{c'k_1} - \frac{1}{k_1} = 0, \\ c' = au_0 + bv_0 + c \end{cases}, \quad (8)$$

式中 (x_d', y_d') 的轨迹和经平移后 (x_d, y_d) 的轨迹均为圆弧。

为方便对圆弧进行分析,因(4)、(5)式均满足中心对称,不失一般性,在直线 l_u 中可设: $u_0 = 0$; $v_0 = 0$; $a = 0$; $b = 1$; $c = -d$ 。则(8)式简化为

$$x_d^2 + \left(y_d + \frac{1}{2dk_1}\right)^2 = \frac{1}{4d^2k_1^2} + \frac{1}{k_1}. \quad (9)$$

由此得直观结论:当图像中心 (u_0, v_0) 到无畸变成像直线 l_u 的距离为 d 时,实际成像直(弧)线段

$\mathcal{T}_d(x_d', y_d'$ 轨迹) 的半径为 $R_d = \frac{\sqrt{1 + 4d^2k_1}}{|2dk_1|}$ 。

对二阶多项式畸变校正模型[对应(4)式并令 $n_d = 2$],由变换

$$1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 = \frac{1}{1 - k_1 r_d^2} + \left(k_2 r_d^4 - \frac{k_1^2 r_d^4}{1 - k_1 r_d^2}\right) \quad (10)$$

可知,该模型对应的直线成像近似呈圆弧状。

3.2 利用面积的模型逼近方法

3.2.1 初始近似计算

圆弧对应面积的定义与计算如图2所示,在(近似)圆弧 $\hat{c}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 上取两点 p_{di1}, p_{di2} , 记弦长 B_i, \hat{c}_i 半径 R_i, B_i 和 \hat{c}_i 的闭合区域面积为 S_i ,

且设 $\bar{B}_i = \frac{B_i}{2}$, 则有

$$S_i = \pi R_i^2 \arcsin\left(\frac{\bar{B}_i}{R_i}\right) - \bar{B}_i \sqrt{R_i^2 - \bar{B}_i^2} = \frac{K(\hat{p}_{di1,2}, \hat{c}_i) \bar{B}_i^3}{R_i}, \quad (11)$$

式中当 \hat{c}_i 的弧度较小时, $K(\hat{p}_{di1,2}, \hat{c}_i) \approx 2/3$, 因而,通过面积 S_i 和弦长 $B_i(\bar{B}_i)$ 可近似得到 R_i 。由此构建图像中心的初始近似算法。

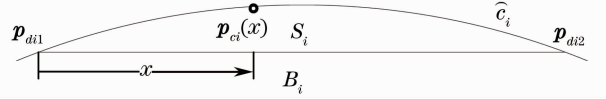


图2 畸变直线成像及其面积

Fig. 2 Distortion image of a line and its area

首先,引入有符号面积 \tilde{S}_i 和距离 d_i 的概念。在畸变直线段上取连接 p_{di1}, p_{di2} 的弦

$$l_{di} = (\bar{a}_{di}, \bar{b}_{di}, \bar{c}_{di})^T = p_{di1} \times p_{di2}, \text{ i. e.} \begin{cases} \bar{a}_{di}x + \bar{b}_{di}y + \bar{c}_{di} = 0 \\ \bar{a}_{di}^2 + \bar{b}_{di}^2 = 1 \end{cases}. \quad (12)$$

则图像中心 $\hat{p}_\omega = (u_0, v_0)^T$ 到 l_{di} 的有符号距离 d_i 为

$$d_i = \bar{a}_{di}x + \bar{b}_{di}y + \bar{c}_{di}, \quad (13)$$

如图2所示,设 \hat{c}_i 上一点 $p_{ci}(x)$ 到 l_{di} 的有符号距离为 $d_{ci}[p_{ci}(x)]$, 则

$$\tilde{S}_i = \text{sgn}(d_{ci}) S_i = \int_{p_{di1}}^{p_{di2}} d_{ci}[p_{ci}(x)] dx, \quad (14)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0, \\ 1 & x > 0 \end{cases}, \quad (14)$$

其中 sgn 表示符号函数。根据(9)式,记畸变直线段近似半径

$$\tilde{R}_i = \frac{\sqrt{1 + 4d_i^2k_1}}{2d_i k_1} \approx \frac{1}{2d_i k_1}, \quad (15)$$

并由(9)、(11)两式可得:

$$d_i \approx -\tilde{S}_i / [2k_1 \bar{B}_i^3 K(\hat{p}_{di1,2}, \hat{c}_i)] \approx -0.75 \tilde{S}_i / (k_1 \bar{B}_i^3). \quad (16)$$

即可近似得到比例关系: $d_i \propto \tilde{S}_i / \bar{B}_i^3$ 。据此,根据两条线 $l_{di}, l_{dj} (i \neq j)$ 可以确定 (u_0, v_0) 所在的直线 l_{ij} :

$$\frac{\bar{a}_i x + \bar{b}_i y + \bar{c}_i}{\tilde{S}_i / \bar{B}_i^3} = \frac{\bar{a}_j x + \bar{b}_j y + \bar{c}_j}{\tilde{S}_j / \bar{B}_j^3}. \quad (17)$$

由两条这样的直线 $l_{i_1 j_1}, l_{i_2 j_2}$ 相交即可近似求得 $\hat{p}_\omega = (\hat{u}_0, \hat{v}_0, 1)^T$ 。

记 \hat{p}_ω 到 l_{di} 距离为 \hat{d}_i , 并由(11)式得:

$$\hat{R}_i \approx \bar{B}_i^3 / (1.5 \tilde{S}_i), \quad (18)$$

则根据(15)式解得

$$\begin{cases} \hat{k}_{li} = [q_b - \text{sgn}(\hat{d}_i \hat{R}_i)] \sqrt{q_b^2 - 4q_a q_c} / (2q_a) \\ q_a = 4\hat{d}_i^2; \quad q_b = 4\hat{d}_i^2 / \hat{R}_i^2; \quad q_c = -1 / \hat{R}_i^2 \end{cases} \quad (19)$$

依据(19)式并对 N 条直线以面积加权得 k_1 初始值:

$$\hat{k}_1 = \left(\sum_{i=1}^N |\tilde{S}_i| \hat{k}_{li} \right) / \left(\sum_{i=1}^N |\tilde{S}_i| \right). \quad (20)$$

下文若无特殊说明,面积(\tilde{S}_i)、半径(\tilde{R}_i)和点到直线的距离(d_i)均指有符号量。

3.2.2 模型参考逼近过程

为求得准确的标定结果,必须在3.2.1节初始标定的基础上设计相应的逼近律,以逼近准确解。为便于算法描述,下面1)~10)描述算法步骤。

设 $\mathbf{p}_{\omega(0)} = \mathbf{p}_{\omega}$, $k_{1(0)} = \hat{k}_1$, $k_{2(0)} = 0$ 。则进行第 m 步逼近时,首先设计畸变中心逼近律。

1) 对第 i 条畸变直线上的 \mathbf{p}_{di1} , \mathbf{p}_{di2} 由校正模型并依据 $k_{1(m-1)}$, $k_{2(m-1)}$, $\mathbf{p}_{\omega(m-1)}$ 得直线无畸变成像:

$$\begin{aligned} \mathbf{l}_{\bar{u}i(m)} &= \mathbf{p}_{\bar{u}i1(m)} \times \mathbf{p}_{\bar{u}i2(m)}, \text{ i. e. } \bar{a}_{\bar{u}i(m)} x + \\ &\bar{b}_{\bar{u}i(m)} y + \bar{c}_{\bar{u}i(m)} = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

2) 直接根据 $\mathbf{l}_{\bar{u}i(m)}$, $k_{1(m-1)}$, $k_{2(m-1)}$, $\mathbf{p}_{\omega(m-1)}$ 和畸变校正模型,由数值方法得到参考包围面积 $\tilde{S}_{i(m)}$ 。

3) 计算 $\mathbf{p}_{\omega(m-1)}$ 到 $\mathbf{l}_{\bar{u}i(m)}$ 的距离 $d_{\bar{u}i(m)}$,从而得到 d_i 和 $\tilde{S}_i / \bar{B}_i^3$ 的参考比例: $K_{\bar{u}i(m)} = \tilde{S}_{i(m)} / [\bar{B}_i^3 d_{\bar{u}i(m)}]$ 。

4) 依据 $\tilde{S}_i / \bar{B}_i^3$ 、 $K_{\bar{u}i(m)}$ 和 $\mathbf{l}_{\bar{u}i(m)}$,重新得到确定穿过 (u_0, v_0) 的直线 $\mathbf{l}_{\bar{u}ij(m)}$:

$$\frac{\bar{a}_{\bar{u}i(m)} x + \bar{b}_{\bar{u}i(m)} y + \bar{c}_{\bar{u}i(m)}}{\tilde{S}_i / [\bar{B}_i^3 K_{\bar{u}i(m)}]} = \frac{\bar{a}_{\bar{u}ij(m)} x + \bar{b}_{\bar{u}ij(m)} y + \bar{c}_{\bar{u}ij(m)}}{\tilde{S}_j / [\bar{B}_j^3 K_{\bar{u}ij(m)}]}. \quad (22)$$

5) 由 $\mathbf{l}_{\bar{u}i_1 j_1(m)}$, $\mathbf{l}_{\bar{u}i_2 j_2(m)}$, ... 可解得新中心 $\mathbf{p}_{\omega(m)}$ 。事实上,这里 $K_{\bar{u}i(m)}$ 对逼近起关键作用。

然后设计一阶畸变参数逼近律。由(16)式知 $k_1 \propto \tilde{S}_i / d_i$, 可得比例逼近律。

6) 计算 $\mathbf{p}_{\omega(m)}$ 到 $\mathbf{l}_{\bar{u}i(m)}$ 的当前距离 $\bar{d}_{\bar{u}i(m)}$ 。

7) 更新一阶畸变参数:

$$k_{1(m)} = \left[\sum_{i=1}^N \text{sgn}(\bar{d}_{\bar{u}i(m)}) d_{\bar{u}i(m)} / \sum_{i=1}^N \bar{d}_{\bar{u}i(m)} \right] k_{1(m-1)}, \quad (23)$$

式中 N 表示所用直线数, \hat{c}_i 对 $k_{1(m-1)}$ 的校正作用以各自 $|\bar{d}_{\bar{u}i(m)}|$ 为权重。若再引入面积 \tilde{S}_i 作为权重,得:

$$k_{1(m)} = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{S}_i d_{\bar{u}i(m)} \text{sgn}[\tilde{S}_{i(m)} \bar{d}_{\bar{u}i(m)}]}{\sum_{i=1}^N |\tilde{S}_{i(m)} \bar{d}_{\bar{u}i(m)}|} k_{1(m-1)}. \quad (24)$$

逼近一阶畸变参数的同时,设计二阶畸变参数逼近律。

若摄像机仅有一阶畸变,则通过无穷次迭代逼近后,(22)式对所有的($i \neq j$)均成立,即:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\bar{d}_{\bar{u}i(m)}}{\{\tilde{S}_i / [\bar{B}_i^3 K_{\bar{u}i(m)}]\}} = C, \quad (25)$$

式中,对同一摄像机(内参数不变)而言 C 为常数。

然而,当摄像机存在二阶畸变时,(24)式不再成立,须根据二阶畸变进行调整。设当前二阶畸变参数增量 $\Delta k_{2(m)}$, 即 $k_{2(m)} = k_{2(m-1)} + \Delta k_{2(m)}$, 则

$$\begin{aligned} 1 + k_{1(m)} r_i^2 + [k_{2(m-1)} + \Delta k_{2(m-1)}] r_i^4 = \\ 1 + k_{1(m-1)} [1 + \Delta \bar{k}_{2(m-1)} r_i^2] r_i^2 + k_{2(m-1)} r_i^4. \end{aligned} \quad (26)$$

略去式中的 $k_{2(m-1)} r_i^4$, 以 $\bar{d}_{\bar{u}i(m)}$ 近似代替 r_i , 并修正(25)式:

$$D_{S_i(m)} \cdot [1 + \Delta \bar{k}_{2(m-1)} \bar{d}_{\bar{u}i(m)}^2] = C, \quad (27)$$

其中记 $D_{S_i(m)} = \bar{d}_{\bar{u}i(m)} / \{\tilde{S}_i / [\bar{B}_i^3 K_{\bar{u}i(m)}]\}$ 。

事实上,只需在若干次逼近迭代后[设 $T_{k(m)}$ 次]进行二阶畸变调整即可,每次都调整将产生震荡发散问题。据此可得二阶畸变参数逼近律。

当 $\text{mod}[m, T_{k(m)}] \neq 0$ 时,返回1), 否则执行8)。

子循环初始值为 $\Delta \bar{k}_{2(m,0)} = 0$, 进行第 t 步迭代时:

8) 由 $D_{S_i(m)} \cdot [1 + \Delta \bar{k}_{2(m,t)} \bar{d}_{\bar{u}i(m)}^2] = D_{S_j(m)} \cdot [1 + \Delta \bar{k}_{2(m,t)} \bar{d}_{\bar{u}j(m)}^2]$, 联立解得 $\Delta \bar{k}_{2(m,t)}$ 。

9) 再由

$$\frac{\bar{a}_i x + \bar{b}_i y + \bar{c}_i}{\tilde{S}_i / \bar{B}_i^3 [1 + \Delta \bar{k}_{2(m,t)} \bar{d}_{\bar{u}i(m)}^2]} = \frac{\bar{a}_j x + \bar{b}_j y + \bar{c}_j}{\tilde{S}_j / \bar{B}_j^3 [1 + \Delta \bar{k}_{2(m,t)} \bar{d}_{\bar{u}j(m)}^2]}, \quad (28)$$

同4)~6)重新解得 $\mathbf{p}_{\omega(m)}$ 和 $\bar{d}_{\bar{u}i(m)}$, 并由(27)式得到新的 $D_{S_i(m)}$;

若 $t < T_2$, $t = t + 1$ 返回8), 否则 $\Delta \bar{k}_{2(m)} = \Delta \bar{k}_{2(m,T)}$ 。

10) 更新二阶畸变参数:

$$k_{2(m)} = k_{2(m-1)} + \Delta \bar{k}_{2(T_2)} k_{1(m-1)}, \quad (29)$$

当 $m \geq M$ 时完成逼近, 否则返回1)。

算法的停止条件($m \geq M$)也可改为

$$\|\mathbf{p}_{\omega(m)} - \mathbf{p}_{\omega(m-1)}\| < \varepsilon_a \|\mathbf{p}_{\omega(m)}\|. \quad (30)$$

逼近算法流程可由图3表示。逼近过程的主要思想是: 通过畸变模型获取参考值 $K_{\bar{u}i(m-1)}$, 以获取更准确的畸变中心 $\mathbf{p}_{\omega(m)}$, 再由实际测得的面积 S_i 及其参考值 $\tilde{S}_{i(m)}$ 校正畸变参数 $k_{1,2(m)}$, 进而再由新获取的 $\mathbf{p}_{\omega(m)}$ 和 $k_{1,2(m)}$ 得到更准确的参考值 $K_{\bar{u}i(m+1)}$, 不断迭代以逼近准确值。如图3所示, 本算法去除二阶畸变

部分(即,设 $T_{k(m)} > M$)即可完成一阶畸变逼近。不同于文献[11],这里的畸变模型不再局限于除式模

型(通过修改算法中的 2),则一阶多项式模型或文献[9]中模型均适用)。

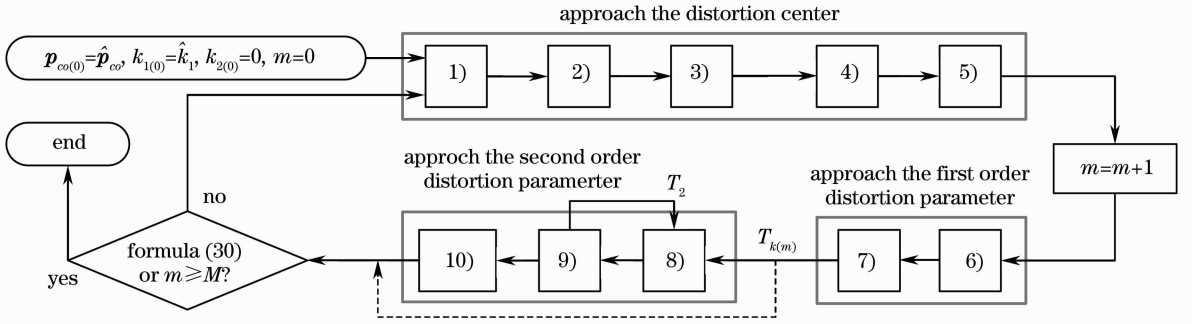


图3 畸变参数与中心的逼近流程

Fig. 3 Approaching flow of distortion parameters and center

3.3 优化估计算法

3.3.1 畸变直线段端点估计

畸变直线段端点 p_{di1} , p_{di2} 的噪声严重影响面积 \tilde{S}_i 的求解。因而,必须对 p_{di1} , p_{di2} 进行优化估计才能降低图像噪声对标定结果的影响。

直线段经二阶畸变后的成像曲线难以直接进行拟合,这里对部分曲线[本文中取接近端点处的等效

比例 $\eta_{e(m)} = 0.5$]进行圆弧拟合以估计端点。

一般地,成像噪声关于弧线 \hat{c}_{ii} 呈正交对称分布,则线性最小二乘拟合仅得到有偏估计值。因而须采用非线性优化方法。设 \hat{c}_i 上共有 $N_{\hat{c}_i}$ 个特征点,其中取 $n_{\hat{c}_i} = \eta_e N_{\hat{c}_i}$ 个特征点 \hat{y}_j , \hat{x}_j , 构建含有限记忆衰减因子的指标函数:

$$\begin{cases} f(R_i, x_{ci}, y_{ci}) = \sum_{j=1}^{n_{\hat{c}_i}} \tau_j [\sqrt{(\hat{x}_j - x_{ci})^2 + (\hat{y}_j - y_{ci})^2} - R_i]^2, \\ \tau_j = \exp[(j-1)\xi], \quad \xi = \ln(K_{\text{end}}) \end{cases} \quad (31)$$

式中,本文取 $K_{\text{end}} = 0.1$,并规定 (\hat{y}_1, \hat{x}_1) 在接近待优化端点一侧。通过非线性优化算法如 Nelder-Mead 非线性单纯型法^[16] (NMS)对(31)式寻优获取 R_i , x_{ci} , y_{ci} , 圆弧间相交即得端点估计值。增大 η_e 虽能减小估计方差但将同时增大估计偏差。

二阶畸变参数受噪声影响明显,由单一的四条成像线段难以实现有效估计。这里由多组矩形成像特征点设计优化估计方法。在(22)、(28)式求解和一阶畸变校正式中均采用多组数据,并基于最小二乘法完成冗余方程组的优化求解,从而减少噪声对畸变参数标定的影响。

3.3.2 畸变参数与中心的局部非线性优化

因 3.3.1 节中的局部圆弧拟合亦为有偏估计,且未完全利用整个成像直线段的特征点,增大了估计偏差。由于对经二阶径向畸变后的直线段难以直接进行无偏拟合,因此,这里提出一种针对畸变参数

及中心的指标函数用以完成局部非线性优化。

利用畸变校正参数 u_0, v_0, k_1, k_2 将直线段成像 \hat{c}_i 上的特征点 $p_{d\hat{c}_j}(\hat{x}_{dij}, \hat{y}_{dij}, 1)$ 修正为 $p_{u\hat{c}_j}(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, 1)$ 。由于准确的畸变校正参数将使 $p_{u\hat{c}_j}$ 呈直线分布,通过构建 $p_{u\hat{c}_j}$ 的弯曲测度可以构造相应指标函数。

1) 基于正交距离的直线拟合。

设第 i 条直线方程为 $l_i = (a_{li}, b_{li}, c_{li})^T$, 即 $a_{li}x + b_{li}y + c_{li} = 0$, 则 $p_{u\hat{c}_j}$ 到 l_i 的正交距离为

$$d_{ij} = |a_{li} \hat{x}_{ij} + b_{li} \hat{y}_{ij} + c_{li}| / \sqrt{a_{li}^2 + b_{li}^2}. \quad (32)$$

以正交距离平方和最小准则

$$\min_{a_{li}, b_{li}, c_{li}} \sum_j^{N_{\hat{c}_i}} d_{ij}^2 \quad (33)$$

进行拟合。在文献[17]的基础上,设计了一种避免发生奇异问题的拟合方法。

记

$$\begin{cases} A_i = \sum_{j=1}^N \hat{x}_{ij} \hat{y}_{ij} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{ij} \sum_{i=1}^N \hat{y}_{ij} \\ B_i = \sum_{i=1}^N \hat{x}_{ij}^2 - \sum_{i=1}^N \hat{y}_{ij}^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \hat{x}_{ij} \right)^2 + \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \hat{y}_{ij} \right)^2, \end{cases}$$

则

$$\begin{cases} a_{li} = 2A_i / (\sqrt{B_i^2 + 4A_i^2} + B_i), & b_{li} = 1 & B_i > 0 \\ a_{li} = b_{li} = 1 & & A_i = B_i = 0 \\ a_{li} = 1, & b_{li} = 2A_i / (\sqrt{B_i^2 + 4A_i^2} - B_i) & B_i \leq 0 \\ c_{li} = -\frac{1}{N} (b_{li} \sum_{i=1}^N \hat{y}_{ij} + a_{li} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{ij}) \end{cases}, \quad (34)$$

归一化得

$$\bar{l}_i = (\bar{a}_{li}, \bar{b}_{li}, \bar{c}_{li})^T =: \begin{cases} \bar{a}_{li}x + \bar{b}_{li}y + \bar{c}_{li} = 0 \\ \bar{a}_{li}^2 + \bar{b}_{li}^2 = 1 \end{cases}. \quad (35)$$

2) 构造弯曲测度和指标函数。

在存在噪声时,为描述畸变校正后直线段成像的弯曲程度,提出特征点关于 \bar{l}_i 分段求和的指标。

设分段数为 N_{is} ;分段点序号 $s_k (k=0, 1, \dots, N_{is})$,且满足, $s_{i0}=1, s_{iN_{is}}=N_{\hat{c}_i}, s_{i0} < s_{i1} < \dots < s_{iN_{is}}$, 则

$$F_i(u_0, v_0, k_1, k_2) = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{is}} \left[\sum_{j=s_{i(k-1)}}^{s_{ik}} (\bar{a}_{li} \hat{x}_{ij} + \bar{b}_{li} \hat{y}_{ij} + \bar{c}_{li}) \right]^{2\lambda}}. \quad (36)$$

$p_{u\hat{c}_j}$ 由 $p_{d\hat{c}_j}$ 畸变校正得到,且 a_{li}, b_{li}, c_{li} 由 $p_{u\hat{c}_j}$ 经(34),(35)两式求得,故对(36)式的 u_0, v_0, k_1, k_2 寻优,本文将直线段成像四等分(即 $N_{is}=4, \{s_k\}$ 为等差数列),并取 $\lambda=2$ 。对 N 条直线段进行寻优:

$$\min_{u_0, v_0, k_1, k_2} \left\{ \sum_{i=1}^N F_i(u_0, v_0, k_1, k_2) \right\}, \quad (37)$$

式中,利用 NMS 即可完成畸变参数与中心的局部优化。

由 3.3.1 节分析可知,文献[10]中提出的面积值平方指标受直线段端点成像噪声的影响明显。指标函数(37)式避免了该问题,并且利用分段求解残差的方法描述直线段畸变成像所形成的弯曲。该方法推广了以每一采样点到拟合直线距离平方和作为指标(当 $N_{is}=N, \lambda=1$ 时)的方法^[6,14],本文方法能更好地抑制噪声影响,有效避免当 $N_{is}=N, \lambda=1$ 且特征点较密集时的局部收敛误差大的问题。3.2 节中的快速逼近方法为局部优化提供了一个接近真值的初始解,显著减少了优化指标(37)式的计算量。

事实上,直接采用 NMS 无法对(37)式全局寻优,也无法可靠替代 3.2.2 节的逼近过程(见第 4 节)。可仿照文献[10]引入遗传算法或其他全局寻优方法,实现畸变标定;但算法实现复杂,运算时间很长,本文不对其多加叙述。

另外,可等间隔选取直线段成像特征点(设间隔数为 n_{int}),即 $s_{iN_{is}} = N_{\hat{c}_i} / (n_{int} + 1)$,在显著缩短优化时间的同时对标定精度的影响很小。然而当 $n_{int} > 1$ 时,直接由非线性优化替代 3.2.2 更容易发生无效收敛。

4 仿真与实际图像实验

4.1 仿真实验与分析

4.1.1 无噪声情况下的算法验证

在无噪声情况下,对二阶多项式校正模型进行仿真,以验证算法的逼近效果和对模型偏差的适应性。这里仅涉及 3.1 节和 3.2 节中的算法。

设摄像机滚转、偏航和俯仰角为 φ, ϕ, α 。仿真采用 2.1 节的线性模型和 2.2 节的畸变模型。成像 CCD 规格为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。特征直线取自空间平面 $z_w=0$ 上一个矩形的边,矩形顶点坐标为 $A(-4, 3, 0); B(-4, -3, 0); C(4, -3, 0); D(4, 3, 0)$ 。设相应成像线段(弧)为 $l_{ab}, l_{bc}, l_{cd}, l_{ad}$,在每条成像线段上取 400 个特征点($N_{\hat{c}_i}=400$)。

这里在(17)式和 3.2.2 节的 4)、5)算法中,设定分别由 l_{ab}, l_{cd} 和 l_{bc}, l_{ad} 所获得的两条通过 (u_0, v_0) 的直线求解图像中心。

为验证逼近效果,仿真例子的成像尽可能偏离图像中心,并验证 k_1 取正负值的情况,即 $k_1 = \pm 1 \times 10^{-6}, k_2 = 2 \times 10^{-12}, u_0 = 320, v_0 = 240, \mathbf{T} = [1.2, 0.7, 12]^T, \varphi = -20^\circ, \alpha = 8^\circ, \phi = 12^\circ$ 。二阶畸变修正

$$\text{中设 } T_2 = 8, T_{k(m)} = \begin{cases} 5 & m \leq 15 \\ 3 & m > 15 \end{cases}$$

仿真表明,进行 60 次迭代即可充分逼近真实值(结果如下),逼近过程如表 1 所示。

$k_1 > 0$:

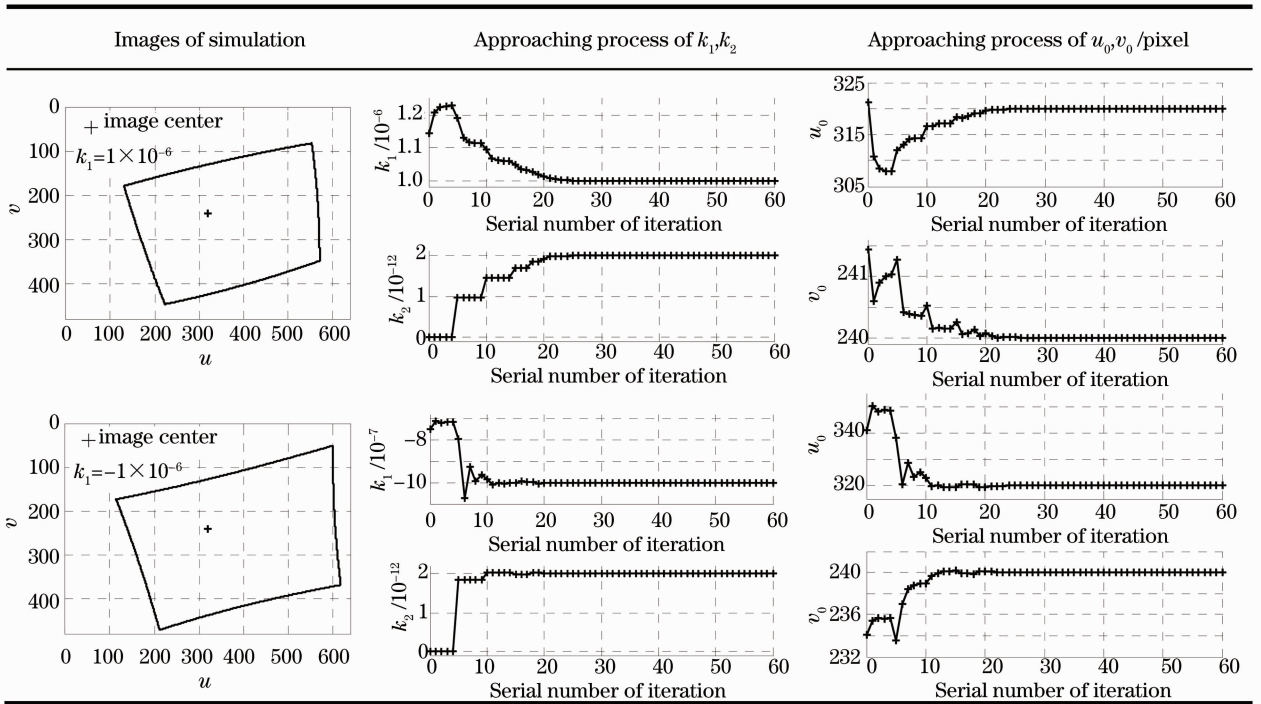
$$\begin{cases} k_{1(60)} = 1.000000674 \times 10^{-6} \\ k_{2(60)} = 2.000001043 \times 10^{-12} \\ u_{0(60)} = 319.99996538 \\ v_{0(60)} = 240.00000169 \end{cases}$$

$k_1 < 0$:

$$\begin{cases} k_{1(60)} = -1.00000016 \times 10^{-6} \\ k_{2(60)} = 2.00000104 \times 10^{-12} \\ u_{0(60)} = 319.99996111 \\ v_{0(60)} = 240.00000861 \end{cases}$$

表 1 二阶多项式畸变校正模型无噪声仿真结果

Table 1 Simulation results of second order polynomial distortion calibration without any noise



仿真表明本文算法收敛速度快。一般地,迭代 30 次后即可使各参数相对偏差在 0.01% 以内。

实际摄像机并不能完全符合预设的畸变模型,但二阶畸变模型具有较好的适应能力。这里用该模

型对具有不同模型结构的一阶除式模型[(5)式]进行畸变标定,仿真条件同上(去除 $k_2 = 2 \times 10^{-12}$)。60 次迭代后的结果如下。

$k_1 > 0$:

$$\begin{cases} k_{1(60)} = 9.889485458 \times 10^{-7} \\ k_{2(60)} = 1.197782778 \times 10^{-12} \\ u_{0(60)} = 320.07860860 \\ v_{0(60)} = 240.06528284 \end{cases}$$

$k_1 < 0$:

$$\begin{cases} k_{1(60)} = -9.85427903 \times 10^{-7} \\ k_{2(60)} = 7.882597582 \times 10^{-13} \\ u_{0(60)} = 320.27799096 \\ v_{0(60)} = 240.06777576 \end{cases}$$

可见通过二阶畸变进行逼近可以较准确地获取畸变中心,由此可知,该方法适应性较强,通过一阶和二阶参数较准确地拟合了除式畸变。然而一阶多项式模型对此的适应性明显偏弱,不考虑 3.2.2 节中 8)~

10)时的标定结果为

$$\begin{aligned}
 &k_1 > 0: && k_1 < 0: \\
 &\begin{cases} k_{1(60)} = 1.128886790 \times 10^{-6} \\ u_{0(60)} = 311.57633091 \\ v_{0(60)} = 240.70959252 \end{cases} && \begin{cases} k_{1(60)} = -8.71806276 \times 10^{-7} \\ u_{0(60)} = 330.28008382 \\ v_{0(60)} = 238.72524310 \end{cases}
 \end{aligned}$$

因而,本文方法考虑二阶畸变后,标定效果优于针对一阶畸变模型的标定(见文献[7,9,11])。

4.1.2 噪声影响下的仿真验证

在考虑成像噪声时,依据 4.1.1 中的模型参数含义,设置如表 2 中的畸变中心和参数值,并在位姿 1 到位姿 2 之间插值 18 个位姿(共计 20 个)。

位姿 1: $\mathbf{T} = [0.8, 0.4, 11.6]^T; \varphi = -23^\circ, \alpha = 11^\circ, \beta = 8^\circ$ 。

位姿 2: $\mathbf{T} = [1.6, 1.2, 13.4]^T; \varphi = -17^\circ, \alpha = 5^\circ, \beta = 16^\circ$ 。

仿真成像情况如图 4 所示。

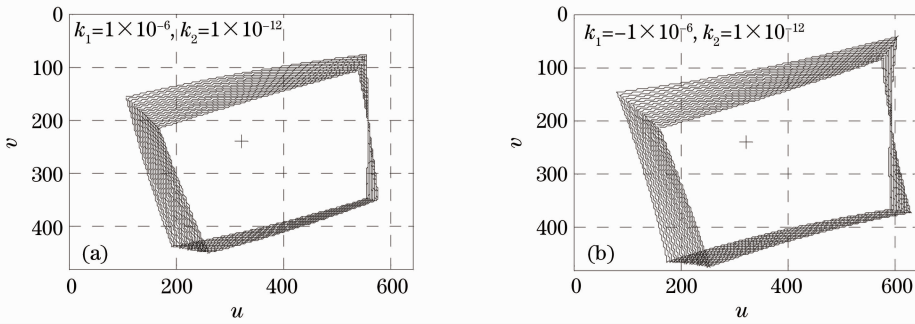


图 4 连续多次成像数据的仿真位置
Fig. 4 Simulated positions of a series of images

在直线段成像的正交方向加入限幅 ± 1 pixel 的均匀分布噪声,同时分 5 个噪声级别,在每个级别上进行 100 次重复实验。

仿真结果中采用均方偏差[见(38)式定义,其中 $v_{\text{test } i}$ 为第 i 次实验值, v_{real} 为真实值, N_T 为测试次数, \bar{v}_M 为均方偏差]表示标定值受噪声的影响。

$$\bar{v}_M = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N_T} (v_{\text{test } i} - v_{\text{real}})^2 \right] / N_T}, \quad (38)$$

取 $\eta_{e(m)} = 0.3, M = 40, T_2 = 8, T_{k(m)} = \begin{cases} 5 & m \leq 15 \\ 2 & m > 15 \end{cases}$ 。

进行 3.3.2 节中局部优化($n_{\text{int}} = 0$)前后的结果如表 2 所示。各参数标定结果的均方偏差均与噪声水平呈线性增长关系,经局部优化后标定效果明显改善,对 k_1, k_2 的优化效果尤为突出(以噪声水平 ± 1 pixel, $k_1 = 1 \times 10^{-6}, k_2 = 1 \times 10^{-12}$ 为例,仿真结果见图 5)。

如图 4 所示,集中选取偏离真实图像中心的成像样本,旨在验证本文算法在解决估计有偏问题时的效果。事实上,较为均匀的样本分布将进一步减

少偏差。

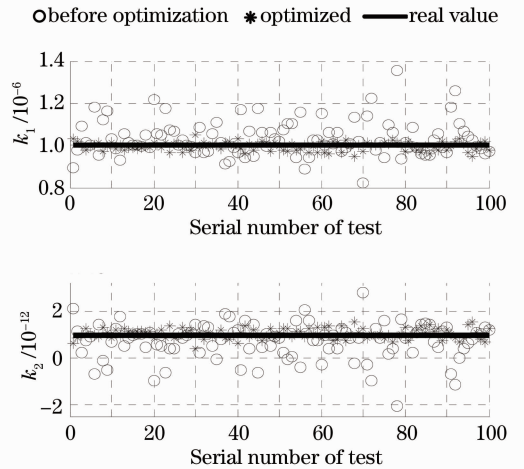


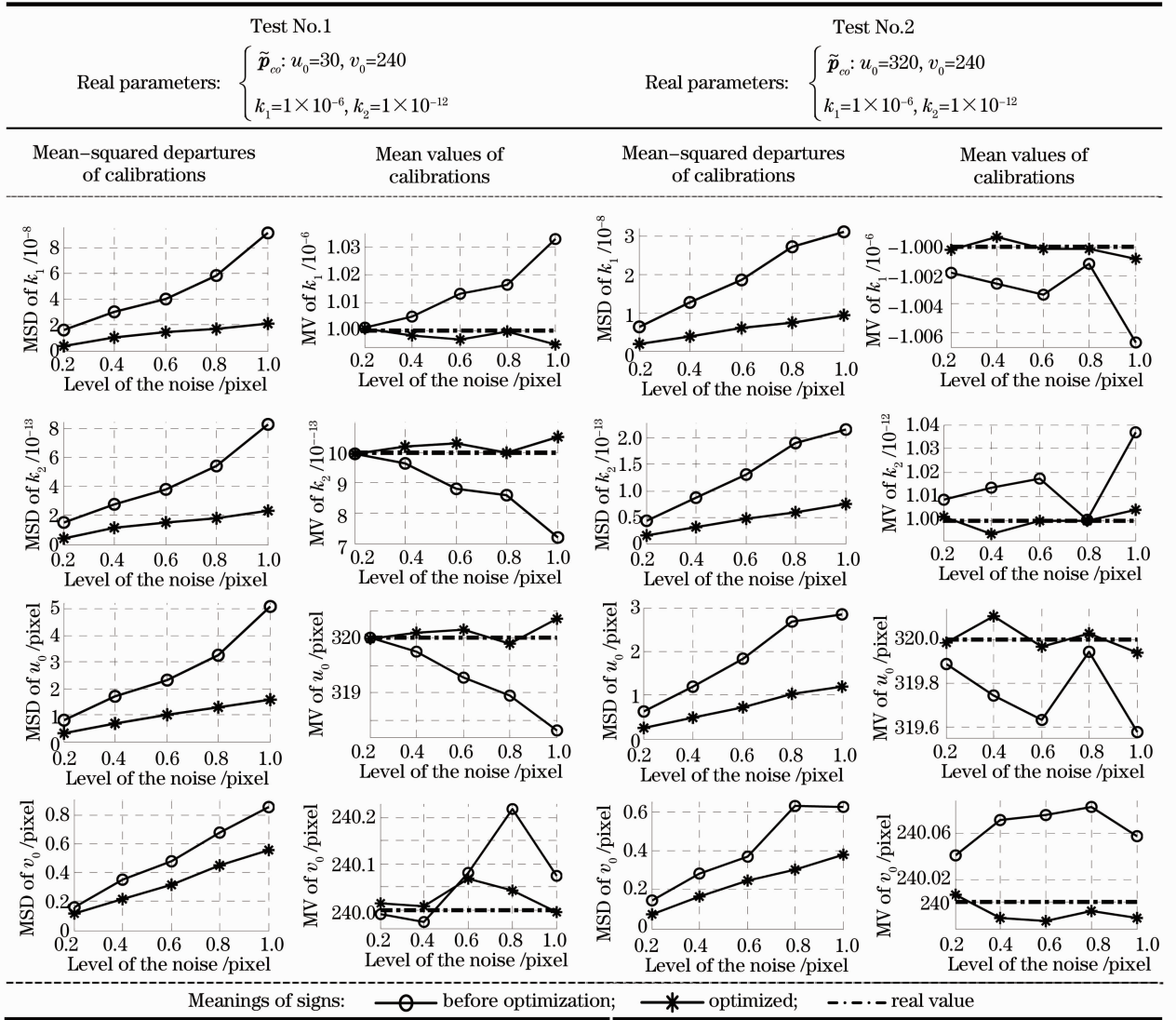
图 5 噪声水平为 ± 1 pixel 时的畸变参数标定
Fig. 5 Calibration of distortion parameters under noise level of ± 1 pixel

4.1.3 算法的有效性和稳健性验证

为测试 3.3.2 节中的局部非线性优化的有效性,这里以畸变参数及中心的真实值作为优化初值进行对比验证。

表 2 二阶多项式畸变校正模型在不同噪声水平下的仿真结果

Table 2 Simulation results of second order polynomial distortion calibration under different noise levels



设以 3.2 节算法得到的 $u_{0(40)}, v_{0(40)}, k_{1(40)}, k_{2(40)}$ 为初始值, 经 (37) 式指标优化得到 $u_{0t}^*, v_{0t}^*, k_{1t}^*, k_{2t}^*$; 以畸变中心和参数的真实值 u_0, v_0, k_1, k_2 为初始值 经 (37) 式优化得到 $u_{0r}^*, v_{0r}^*, k_{1r}^*, k_{2r}^*$ 。定义相对偏差范数:

$$D_{rr} = \left\| \frac{u_{0t}^* - u_{0r}^*}{|u_0|}, \frac{v_{0t}^* - v_{0r}^*}{|v_0|}, \frac{k_{1t}^* - k_{1r}^*}{|k_1|}, \frac{k_{2t}^* - k_{2r}^*}{|k_2|} \right\|_2 \quad (39)$$

在噪声水平为 ± 1 pixel 时进行 100 次重复实

验, 偏差如图 6 所示, 优化时在 NMS 算法中设 (37) 式指标值和待优化变量的终止容许值为: $V_{\text{TotFun}} = 1 \times 10^{-6}, V_{\text{TotX}} = 1 \times 10^{-3}$ 。如图 6 所示, 以不同初值得到所得优化结果的相对偏差均不超过 1×10^{-4} , 验证了 3.3.2 节局部优化的有效性。

为了验证在不同的畸变参数情况下, 标定结果受噪声的影响, 这里设定干扰为限幅 ± 0.5 pixel 的均匀分布噪声, 对畸变参数变化范围

$$\begin{cases} k_1 = [-1.2 \times 10^{-6}, -0.6 \times 10^{-6}] \cup [0.6 \times 10^{-6}, -0.6 \times 10^{-6}] \\ k_2 = [-1.2 \times 10^{-12}, -0.6 \times 10^{-12}] \cup [0.6 \times 10^{-12}, -0.6 \times 10^{-12}] \end{cases},$$

分别间隔 3×10^{-7} 和 3×10^{-13} , 仿真 6 种情况, 每种情况重复 100 次实验, 并以相对偏差 [(40) 式] 进行评价,

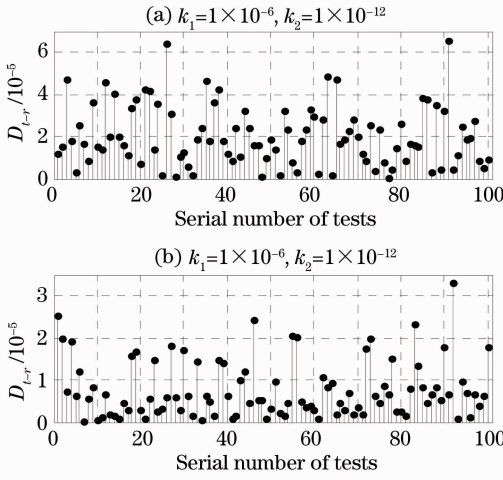


图 6 由不同初值优化后的畸变参数及中心相对偏差
Fig. 6 Relative deviation of distortion parameters and center of the optimization results under different initial values

$$\bar{v}_R = \frac{1}{|v_{\text{real}}|} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N_T} (v_{\text{test } i} - v_{\text{real}})^2 \right] N_T}. \quad (40)$$

如图 7 所示,该仿真表明,在同样的噪声水平下,随着畸变参数绝对值变小,畸变参数标定值的相对均方偏差变大,经 3.3.2 节优化后偏差均明显减小。同时也说明即使在 $k_1 = \pm 6 \times 10^{-7}$, $k_2 = \pm 6 \times 10^{-13}$ 这样较小的畸变下依旧能通过局部优化获取有效标定。

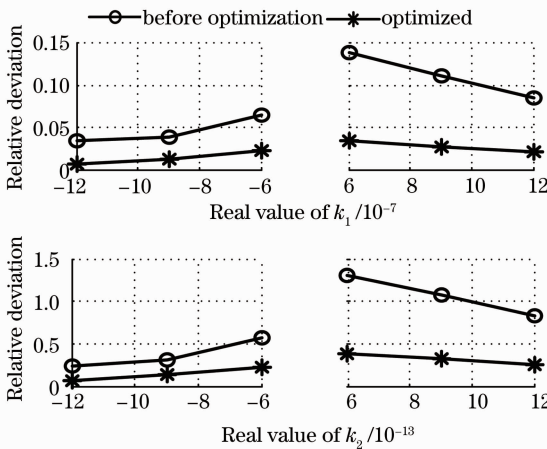


图 7 不同畸变参数时的相对标定偏差
Fig. 7 Relative deviation of calibration for different distortion parameters

4.1.4 算法的实时性与稳健性对比验证

现有非量测标定算法假设(或近似猜测)了畸变中心,通过 NMS 等优化方法对设计的指标函数寻优以完成畸变标定。本文算法无需已知畸变中心,因而实时性对比验证仅针对模型参考逼近(3.2.2

节)和局部非线性优化(3.3.2 节)这两个过程进行。均以 3.2.1 节的结果作为参考逼近或直接非线性寻优初值。仿真表明采用 Levenberg-Marquardt 算法直接寻优无法获得有效值,因而优化过程均采用 NMS。由于文献[6,7]中的优化指标会导致较大的估计偏差,因而均采用 3.3.2 节中的优化指标[(36)式]。

设参考逼近结果及直接优化结果与本文经非线性优化后的结果的相对偏差分别为 D_{a-n} 、 D_{d-n} ,

$$\begin{cases} D_{a-n} = \left\| \frac{u_{0a}^* - u_{0n}^*}{|u_0|}, \frac{v_{0a}^* - v_{0n}^*}{|v_0|}, \frac{k_{1a}^* - k_{1n}^*}{|k_1|}, \frac{k_{2a}^* - k_{2n}^*}{|k_2|} \right\|_2 \\ D_{d-n} = \left\| \frac{u_{0d}^* - u_{0n}^*}{|u_0|}, \frac{v_{0d}^* - v_{0n}^*}{|v_0|}, \frac{k_{1d}^* - k_{1n}^*}{|k_1|}, \frac{k_{2d}^* - k_{2n}^*}{|k_2|} \right\|_2 \end{cases}. \quad (41)$$

在噪声水平为 ± 0.8 pixel, $n_{\text{int}} = 0$ 时,进行 20 次重复仿真,对比仿真时间和迭代次数,结果如图 8 所示。3.2.1 节的近似标定在非量测条件下为 NMS 优化提供的初始解不一定可靠(当 $n_{\text{int}} = 5$ 时,无效标定值显著偏离真实值,即 $D_{d-n} > D_{a-n}$, $D_{d-n} > 1$),而 3.2.2 节的逼近过程显著提高了运算效率,也缩短了进一步优化时间,提高了优化求解的可靠性,也就是提高了求解精度。

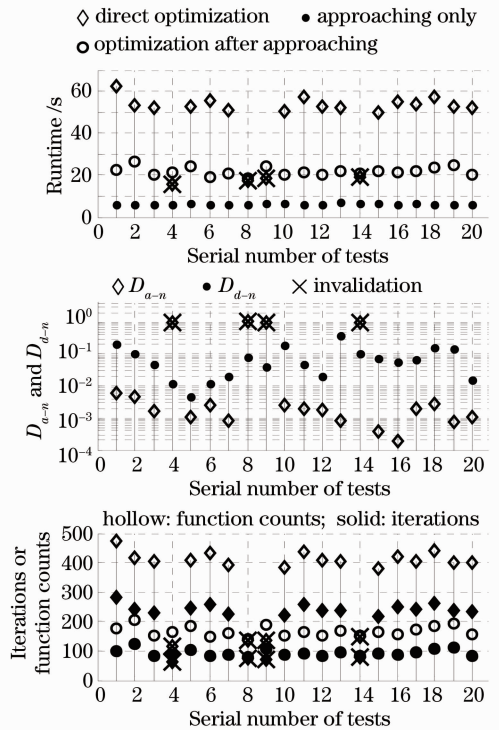


图 8 实时性对比实验

Fig. 8 Tests for runtime comparison

4.2 实际图像实验

采用微视公司的 MVC-II-3M-S00 相机(分辨率

为 2048 pixel \times 1536 pixel) 和 Computar 公司的 T2Z3514CS-2 镜头(焦距为 3.5~8.0 mm),对液晶屏上靶标进行实验(锁定焦距、光圈和对焦)。畸变标定所用的特征直线的提取采用文献[18]的方法

实验中,由于镜头的设计成像面积为 1/3 inch (1 inch=2.54 cm),而相机的 CCD 面积为 1/2 inch,因而产生弧形黑色暗角,但不影响标定试验。

4.2.1 依据全部特征点的标定

取 $n_{\text{int}}=0$,算法的停止条件依据(30)式并取 $\epsilon_a=1 \times 10^{-6}$ 。标定结果如表 3 所示,该结果表明在多个图像采集姿态下所得结果接近,符合摄像机内参数被锁定的条件。经 3.3.2 节优化前后的标定结

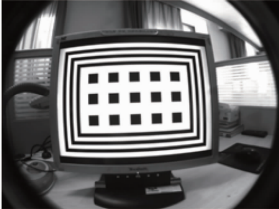


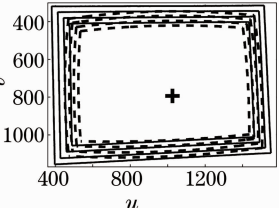
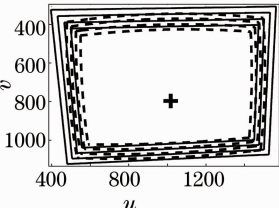
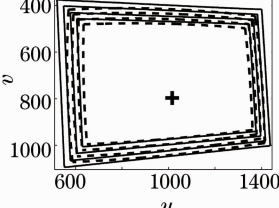
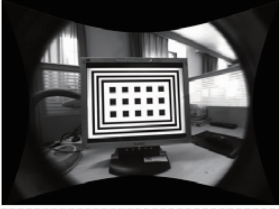
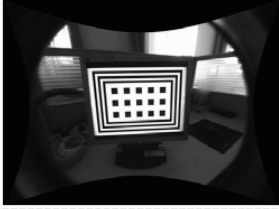

果接近,说明本文提出的模型参考逼近算法在实际图像实验中也为局部非线性优化提供了很好的初值,提高了算法效率和可靠性,这是对传统方法的主要改进(本文算法的计算时间以“迭代逼近时间+局部非线性优化时间”的形式表示)。

因准确的畸变参数未知而无法完成类似 4.1.3 节的验证,这里采用各组优化后标定结果交叉做初值的方法,计算表明各组再次优化后结果均不改变,从而说明 3.3.2 节的优化方法的稳健性。

另外,依据标定后的畸变校正模型校正原始采集图像,可以发现图像畸变得到了有效校正。

表 3 实际图像实验(采集图像和标定结果)

Table 3 Tests of real image (obtained images and calibration results)

Number	1		2		3		
Obtained images							
Feature lines and checked ones (pixel)							
Images after distortion check							
Calibration results		Before optimization	Optimized	Before optimization	Optimized	Before optimization	Optimized
	v_0	793.5966	793.1581	797.8949	796.0039	801.4992	796.6824
	u_0	1021.6807	1018.4681	1019.0049	1017.1553	1022.8885	1015.9754
	k_1	3.0229×10^{-7}	2.9395×10^{-7}	3.1609×10^{-7}	2.9840×10^{-7}	3.3147×10^{-7}	2.9398×10^{-7}
	k_2	8.7574×10^{-14}	9.6524×10^{-14}	6.3046×10^{-14}	8.8927×10^{-14}	4.4399×10^{-14}	9.3404×10^{-14}
Runtime		New method	Traditional	New method	Traditional	New method	Traditional
		1.57+11.46 s	27.270 s	1.47+11.07 s	Invalid	1.01+14.17 s	29.508 s

Coordinates of the pictures, with feature lines and checked ones, denote O_{quv} (described in section 2.2)

4.2.2 等间隔选取特征点的标定

为了验证 $n_{\text{int}} > 0$ 时非线性局部优化效率的提

升和对标定结果的影响,取 $n_{\text{int}}=5$ (即每 6 个特征点中选取 1 个)完成标定。由于 n_{int} 仅影响 3.3.2 节中

的非线性优化过程,故表 3 中优化前的结果不变,而仅在表 4 中记录优化后结果。

对比表 3 和表 4 的实验数据,等间隔选取特征点后,在显著缩短优化时间的同时对标定结果的影响

响很小。然而若采用 NMS 直接优化则对三幅图像的标定均无效(即 $D_{d-n} > D_{a-n}$, $D_{d-n} > 1$)。从而进一步验证了本文算法在非量测条件下提升标定可靠性、精度及效率的作用。

表 4 等间隔特征点优化标定

Table 4 Optimized calibration by evenly spaced feature points

Number		1	2	3
Calibration result	v_0	792.6698	795.663	796.640
	u_0	1018.3044	1017.565	1016.593
	k_1	2.9399×10^{-7}	2.9798×10^{-7}	2.9507×10^{-7}
	k_2	9.6442×10^{-14}	8.9396×10^{-14}	8.9320×10^{-14}
Runtime	New method	1.32+1.55 s	1.21+1.71 s	0.99+3.51 s
	Traditional	invalid	invalid	invalid

5 结 论

根据直线段畸变成像近似呈圆弧的特性,提出了一种避免畸变参数和内外线性参数耦合的非量测摄像机畸变标定方法。在成像面上由附加直线与畸变成像直线段构成闭合曲线,在计算其面积的基础上,解算畸变参数与中心的初始位置;进而针对闭合曲线的面积值及端点位置与畸变参数及中心的近似关系,依据畸变模型进行迭代修正以逼近各标定参数的真实值。同时提出了一种描述直线弯曲程度的指标,并依此设计了对畸变标定进行局部非线性优化的方法。实验表明,模型参考逼近方法在显著加快收敛速度的同时,由其结果作为非线性优化初值,保证了优化值的可靠性、精度和效率。本文算法能快速实现高精度畸变标定,对模型不确定性具备一定的适应能力;通过局部非线性优化能进一步抑制噪声对标定结果的影响;在受噪声影响时,该算法对于不同畸变参数的摄像机畸变标定也具有较好的稳健性。

参 考 文 献

- 1 R Y Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE J Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- 2 Z Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]. International Conference on Computer Vision (ICCV'99), 1999, 9: 666-673.
- 3 Zhang Guangjun, He Junji, Yang Xianming. Calibrating camera radial distortion with cross-ratio invariability [J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35(5): 457-461.
- 4 He Junji, Zhang Guangjun, Yang Xianming. Approach for calibration of lens distortion based on cross ratio invariability [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2004, 25(5): 597-599. 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.
- 5 Xue Junpeng, Su Xianyu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0115001. 薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定

- [J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0115001.
- 6 F Devernay, O Faugeras. Straight lines have to be straight: automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments [J]. Mach Vis Appl, 2001, 13(1): 14-24.
- 7 Moumen Ahmed, Aly Farag. Nonmetric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation [J]. IEEE Trans Image Process, 2005, 14(8): 1215-1230.
- 8 Zhou Fuqiang, Hu Kun, Zhang Guangjun. Correction distortion of camera lens with collinear points [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 174-177. 周富强, 胡 坤, 张广军. 基于共线特征点的摄像机镜头畸变校正[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 174-177.
- 9 Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Camera calibration method based on non-metric distortion correction [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 228-232. 周富强, 蔡斐华. 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 228-232.
- 10 Zhang Jing, Zhu Dayong, Zhang Zhiyong. Non-metric calibration of camera lens distortion [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1552-1557. 张 靖, 朱大勇, 张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1552-1557.
- 11 Chen Tianfei, Ma Zi, Li Peng, et al.. A camera calibration method based on non-metric distortion correction [J]. Control and Decision, 2012, 27(2): 243-247. 陈天飞, 马 孜, 李 鹏, 等. 一种基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J]. 控制与决策, 2012, 27(2): 243-247.
- 12 A W Fitzgibbon. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion [C]. CVPR, 2001. 125-132.
- 13 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang, et al.. Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2): 140-147.
- 14 D C Brown. Close-range camera calibration [J]. Photogrammetric Engineering, 1971, 37(8): 855-866.
- 15 H Janne. Geometric camera calibration using circular control points [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1066-1077.
- 16 J C Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, et al.. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions [J]. SIAM J Optimization, 1998, 9(1): 112-147.
- 17 Gao Shang. Linear fitted method based on the vertical distance [J]. College Mathematics, 2011, 27(2): 149-152. 高 尚. 基于垂直距离的直线拟合[J]. 大学数学, 2011, 27(2): 149-152.
- 18 Sheng Zunbing, Cui Xianyu, Gao Guoan. A universal algorithm for subpixel edge detection [J]. J. Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(6): 911-915. 盛遵冰, 崔贤玉, 高国安. 通用亚像素边缘检测算法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 911-915.