

摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法

张 靖 朱大勇 张志勇

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610051)

摘要 为了减少噪声对摄像机镜头畸变的校正结果带来的影响,提出了一种校正摄像机镜头畸变的非量测方法。先找出由直线畸变而成的曲线,再用直线段连接每条曲线的两个端点形成一些闭合曲线,把它们的面积平方和定义为畸变测度,并用遗传算法搜索畸变测度的最小值,以此得到畸变参量。计算表明,该畸变测度具有较好的抗噪声能力,而遗传算法能避免收敛于局部极小值,减少了矫正图像的均方根误差。实验表明,对多幅图像分别和联合校正,相应矫正图像之间的均方根误差较小。计算和实验都表明该校正方法具有良好的稳健性。

关键词 机器视觉; 摄像机标定; 非量测校正; 遗传算法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1552

Nonmetric Calibration of Camera Lens Distortion

Zhang Jing Zhu Dayong Zhang Zhiyong

(School of Optoelectronic Information, University Method of Electronics Science and Technology,
Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract To reduce the negative influence of noise on the correction of camera lens distortion, a nonmetric calibration method for camera lens distortion is proposed. In this method, all curves distorted from straight lines are found out and closed by connecting their endpoints with straight-line segment, and the sum of squares of area of those closed curves is computed as distortion measurement whose minimum is determined with the aid of genetic optimistic algorithm, and thus the distortion parameters are gotten. Computation indicates that this distortion measurement offers preferable ability of anti-noise, and that genetic algorithm is able to avoid convergence to local minima. So root-mean-square (RMS) errors of rectification images are decreased. Experiment shows that RMS errors between the rectified images obtained by calibrating with each image and those obtained by calibrating with all images are small. Both computation and experiment demonstrate that this calibrating method is robust.

Key words machine vision; camera calibration; nonmetric calibration; genetic algorithm

1 引 言

在摄影测量、计算机视觉、机器人视觉、自动化集成等系统中,摄像机镜头多采用针孔模型,对于那些需要高精度、低成本或广角镜头的系统,针孔模型是不够的,应考虑摄像机镜头的畸变模型,否则会导致较大的校准误差。畸变参量经常与摄像机模型的其他参量一起估计^[1~5],在已知校正物结构的情况下,通过提取出的一组三维到二维的对应关系来完成的。由于这些方法的内部参量(包括畸变参量)和外部参量之间存在某种耦合,导致摄影机内部参量校正结果的误差较大。而且,由于需要获得三维场景点的准确

坐标,也限制了它们的应用范围。另一类校正方法不依赖于已知场景点或已知结构的校正物,而是根据一些几何特征,如:场景中的直线对应于无畸变图像中的直线^[6~11],三个相互正交的平行线集和最小化投影点分散约束^[12],来获得畸变参量。

利用直线的射影变换特点校正镜头畸变参量,需要定义畸变测度,并利用 Levenberg-Marquardt (LM)方法对其优化。目前,畸变测度有的需要直线拟合^[10,11],有的计算较为复杂^[6,8,9],且优化过程中可能收敛于局部极小值。本文提出了用面积平方和表示的畸变测度,计算量小且具有抗噪声能力,为

收稿日期: 2007-12-29; 收到修改稿日期: 2008-03-03

作者简介: 张 靖(1973-),男,博士研究生,主要从事光电导航、信号处理等方面的研究。E-mail: zanghjgn@sina.com

导师简介: 朱大勇(1938-),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术、光学工程、光电导航和光电子对抗等方面的研究。

E-mail: dyzhu@uestc.edu.cn

了避免收敛于局部极小值,用遗传算法对其优化。

非量测校正。

2 校正方法

2.1 畸变模型

摄像机镜头畸变通常包含偏心畸变、径向畸变和切向畸变。偏心畸变是指光学中心(光轴与像平面的交点)偏离像平面中心。径向畸变是由光学中心沿径向方向的畸变,分为桶形畸变和枕形畸变,前者把图像拉向光学中心,绝大多数广角摄像机的径向畸变属于这一类,后者把图像推离光学中心。切向畸变是由光学中心沿切向方向的畸变,主要源于镜头光轴与图像传感阵列面不完全垂直。摄像机镜头畸变的数学模型表示如下^[6]:

$$\begin{cases} \bar{x} = \tilde{x} + \Delta x(K_1 r^2 + K_2 r^4) + \\ \quad [P_1(r^2 + 2\Delta x^2) + 2P_2 \Delta x \Delta y], \\ \bar{y} = \tilde{y} + \Delta y(K_1 r^2 + K_2 r^4) + \\ \quad [P_2(r^2 + 2\Delta y^2) + 2P_1 \Delta x \Delta y], \end{cases} \quad (1)$$

其中, (\bar{x}, \bar{y}) 为无畸变时场景特征点的透视投影坐标, (\tilde{x}, \tilde{y}) 为镜头畸变存在时特征点的像点坐标, K_1 和 K_2 为径向畸变系数, P_1 和 P_2 为切向畸变系数, (x_c, y_c) 为光学中心(也称畸变中心)的坐标。 $\Delta x, \Delta y$ 和 r 为像点到畸变中心的水平距离、垂直距离和直线距离:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \tilde{x} - x_c, & \Delta y &= \tilde{y} - y_c, \\ r &= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}. \end{aligned}$$

2.2 畸变测度

如果摄像机镜头无畸变,根据针孔模型和射影几何的知识,视场中的任何特征直线 l 在像平面所成的像 L' (如图 1 所示)仍然是直线。事实上,由于镜头畸变的影响,特征直线的成像(如图 1 所示),除非通过畸变中心 O ,否则总是曲线 L 。设场景中有 M 条特征直线,在摄像机传感器阵列面上的成像是曲线 L_1, L_2, \dots, L_M , 设 L_j 由 N_j 个点构成,第 j 个 ($j=1, 2, \dots, N_j$) 点坐标为 $(\tilde{x}_j^i, \tilde{y}_j^i)$ 。在畸变模型下用参量 K_1, K_2, P_1, P_2, x_c 和 y_c 校正后,坐标 $(\tilde{x}_j^i, \tilde{y}_j^i)$ 变为 $(\bar{x}_j^i, \bar{y}_j^i)$, 曲线 L_j 变成曲线 L_j'' 。畸变参量越接近真实值,曲线 L_j'' 越趋近于直线,反之亦然。因此,曲线 L_j'' 趋近于直线的程度,反映了畸变参量接近真实值的程度。只要采用适当的方法描述这种趋近程度(也可称为畸变测度),就可以用非线性最优化方法确定畸变参量。这种方法因为对场景要求不高,不需要像文献[13, 14]那样制作精确校正板,仅需要一些随处可见的直线特征,因此被称为

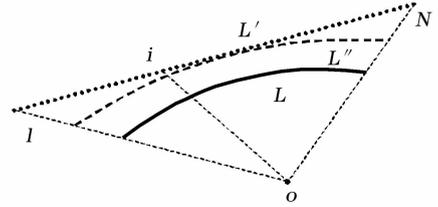


图 1 射影直线和畸变曲线

Fig. 1 Projective straight line and distorted curve

畸变测度一种常用的提法是,利用直线拟合 L_j'' , 计算 L_j'' 上每一点(或采样点)到拟合直线的距离平方和^[6, 8, 9]:

$$\xi_1(K_1, K_2, P_1, P_2, x_c, y_c) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} (\cos \theta_i \bar{x}_j^i + \sin \theta_i \bar{y}_j^i - \rho_i)^2, \quad (2)$$

式中 θ_i 和 ρ_i 为 $(\bar{x}_j^i, \bar{y}_j^i)$ ($j=1, 2, \dots, N_j$) 的拟合直线的直线参量。

在最小化(2)式的过程中,因为畸变中心和切向畸变系数存在相互关联,需要用一般的最优化方法(如 LM 方法)结合粗-细搜索方法进行优化,因此需要多次计算(2)式,而(2)式要拟合多条直线,需要花费很多时间。

为了提高计算效率,本文提出一种新的描述方式。把 L_j'' 的两个端点的用直线段连接起来形成一条围线,围线面积越小, L_j'' 越趋近于直线,因此畸变测度函数可以表示为

$$\xi_2(K_1, K_2, P_1, P_2, x_c, y_c) = \sum_{i=1}^M \left[\sum_{j=1}^{N_j} (\bar{x}_j^i \bar{y}_{j+1}^i - \bar{x}_{j+1}^i \bar{y}_j^i) \right]^2, \quad (3)$$

式中 $\bar{x}_{N_j+1}^i = \bar{x}_1^i, \bar{y}_{N_j+1}^i = \bar{y}_1^i$, 内层求和表示以 L_j'' 的每个点为顶点的 N_j 边形的面积。需要指出的是, L_j'' 的形状可能是凸线、凹线或 S 线。对于凸线和凹线, (3) 式中的面积计算方法得到的结果可能为正, 亦可能为负, 其绝对值就是围线面积。但对于 S 线, 因为围线所围区域被分为几部分, 分别位于端点连线的两侧, 用(3)式计算时, 因为连线两侧的面积异号, 相加时相互抵消, 所得结果比实际面积小, 特别是连线两侧面积相等时其值为零。考虑到参与校正的曲线不止一条, 在全局最优的情况下, S 线不会出现, 所以仍然采用相同的方法计算。

当然, S 线可能出现导致(3)式多出一些额外的极小值点, 为避免其不良影响, 采用梯形面积求和的方法来计算面积

$$\xi_3(K_1, K_2, P_1, P_2, x_c, y_c) = \sum_{i=1}^M A_i^2 = \sum_{i=1}^M \left[\sum_{j=2}^{N_j} \left(\frac{d_i^{j-1} + d_i^j}{2} \right) d_i^{j-1,j} \right]^2, \quad (4)$$

式中 d_i^j 为第 i 条曲线上的第 j 点与端点连线的距离, $d_i^{j-1,j}$ 为第 i 曲线上的第 $j-1$ 和 j 点在端点连线上的投影距离。

2.3 最优化方法

以(3)或(4)式为目标函数,采用最优化方法,可校正出畸变参数。一般采用 LM 方法进行优化,但考虑到噪声会导致若干局部极小值的产生,本文采用遗传算法进行优化。虽然局部最优不如 LM 方法,但其优化结果的精度完全能满足畸变校正的需要,更重要的是它具有很强的稳健性。遗传算法的关键步骤或要素作如下处理^[15]:

1) 编码:选择的是二进制编码。染色体由 6 个基因构成,分别对应于 6 个畸变参数: K_1, K_2, P_1, P_2, x_c 和 y_c , 其取值范围分别为 $[-10^{-5}, 10^5]$, $[-10^{-9}, 10^9]$, $[-10^{-4}, 10^4]$, $[-10^{-4}, 10^4]$, $[0, w]$ 和 $[0, h]$ (w 和 h 分别为图像的宽和高), 每个参数的二进制编码长度为 32 位。

2) 初始化:利用 Sobol 序列^[16]——蒙特卡罗方法中采用的多维准随机序列在 $[0, 1]^6$ 空间中产生 80 个均匀分布的特征点,把它们映射到 $[-10^{-5}, 10^5] \times [-10^{-9}, 10^9] \times [-10^{-4}, 10^4] \times [-10^{-4}, 10^4] \times [0, w] \times [0, h]$ 空间中形成 80 个“均匀分布”的点,将其二进制编码,组成 80 个初始群体。

3) 适应度函数:以(4)式的相反数为适应度函

数,(4)式的计算量比(2)式小得多,有利于提高遗传算法的效率,这也是以面积平方和为畸变测度的一个优点。

4) 选择算子:采用比例选择方法,即各个个体被选中的概率与其适应度成正比。此外,还采用精英策略,即当前群体适应值最大的染色体不参与交叉和变异,而是用来替换本代群体中经交叉、变异等遗传操作后产生的适应度最低的染色体。

5) 交叉算子:采用均匀交叉算子,即两个配对个体的每一个基因座上的基因都以相同的交叉概率进行交换,从而形成两个新的个体。

6) 变异算子:采用均匀变异,每个基因座上的基因,独立地以 0.005 的概率发生突变。

7) 遗传代数:2000 代。

3 仿 真

假定摄像机镜头的畸变参数为: $K_1 = 2 \times 10^{-5}$, $K_2 = 0$, $P_1 = -3 \times 10^{-7}$, $P_2 = 0$, $x_c = 150$, $y_c = 125$ 。随机生成包含 N 条直线(其方向和位置随机生成)的仿真图像[如图 2(a)所示]作为场景特征直线的透视投影,对于每条直线上的每一点,利用求解(1)式的方法确定其畸变像点,生成了无噪声的畸变图像,如图 2(b)所示,为了模仿实际情况,每个像点的沿一个随机方向作正态随机扰动,扰动距离的标准差为 σ (单位为像素),由此得到带噪声的仿真成像,如图 2(c)所示。

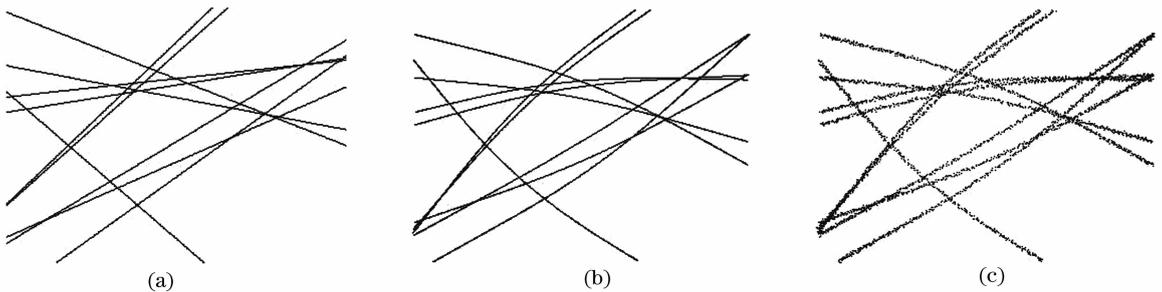


图 2 仿真畸变曲线的生成。(a) 透视投影, (b) 无噪声畸变, (c) 噪声畸变

Fig. 2 Generation of distorted curve for simulation. (a) Perspective projection, (b) distorted noiseless curve, (c) distorted noise curve

利用 LM 方法和遗传算法对畸变测度进行参数优化,校正出畸变参数。比较畸变参数的校正值和真实值,并不能对校正效果给出一个直观感觉。另外,由于(1)式是非线性模型,不同组畸变参数可能得出实质相似的无畸变图像。因此,以直线上点的真实位置和校正位置的均方根(RMS)误差作为

校正效果的度量^[7,10]。也就是,从图 2(c)得到畸变参数,以此校正图 2(b)的曲线,计算校正曲线中的点与图 2(a)中对应直线的点的距离均方根,来判断校正的准确性。

图 3 给出的是不同优化方法对不同目标函数得到的均方根误差与噪声水平的关系图, σ 从 0.0 到

3.0 以步长 0.5 pixel 递增,每个 σ 对应的均方根是 20 幅随机畸变图像的校正均方根的平均值。图 3(a)~图 3(c)的目标函数分别为 ξ_1, ξ_2 和 ξ_3 ,采用的优化方

法都是 LM 方法,而图 3(d)的目标函数是 ξ_3 ,采用的优化方法是遗传算法。

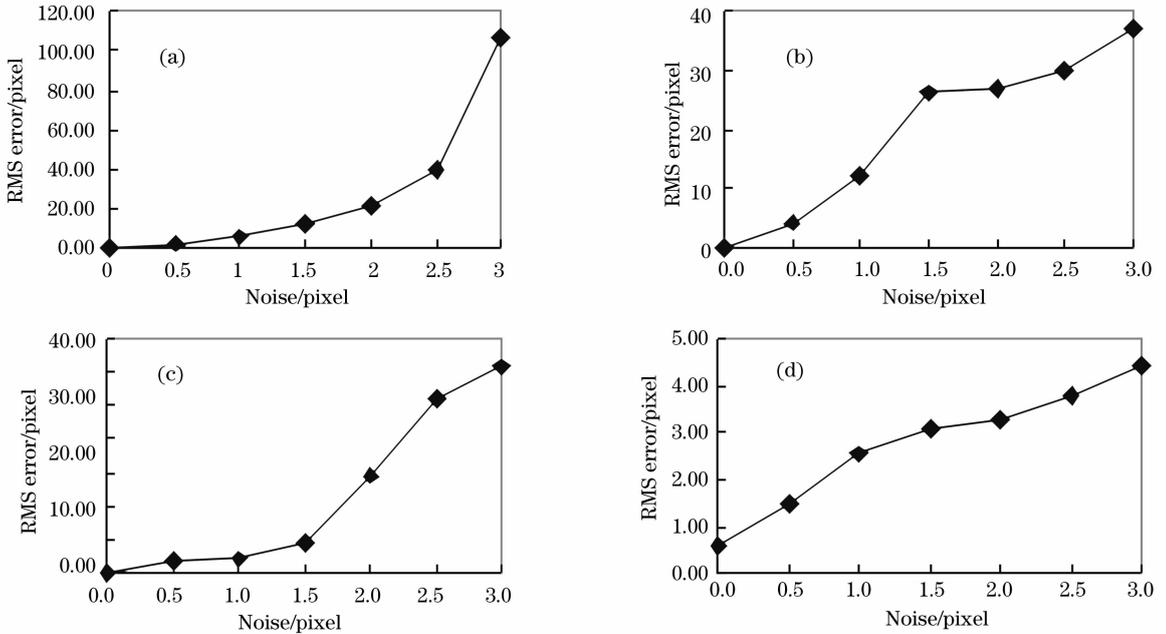


图 3 校正曲线的 RMS 误差与不同噪声水平的关系。(a),(b),(c)目标函数分别为 ξ_1, ξ_2, ξ_3 , LM 方法; (d) 目标函数 ξ_3 , 遗传算法

Fig. 3 RMS error of corrected curve versus different noise levels. (a), (b), (c) Objective function ξ_1, ξ_2, ξ_3 , LM method, (d) objective function ξ_3 , genetic algorithm

从图 3(a)可见,随着噪声的增加,均方根误差迅速增加,主要的原因是采用距离平方和为目标函数,这种目标函数随着噪声的增加,局部极小值迅速增加,最优化算法收敛到局部极小值的概率增加,因而误差越来越大。而图 3(b)表明,噪声较小时,均方根误差比图 3(a)的大,算法稳定性有所恶化,反之,噪声较大时,均方根误差比图 3(a)的小,算法稳定性有所提高。一方面,优化过程中可能出现 S 形曲线,而(5)式所计算的面积是有出入的,这就导致更多的极值,造成更大的偏离,另一方面,不同点的噪声对面积的影响可能相互抵消,因此多边形面积对噪声的敏感度小于距离平方和对噪声的敏感度。在噪声较小时,第一种影响较第二种影响大;而在噪声较大时,前一种较后一种影响小。在图 3(c)中,由于改变了围线面积的计算方法,对于 S 线也能正确计算出面积,因此,无论在低噪区还是在高噪区,稳定性都得到提高。在图 3(d)中,由于对 ξ_3 采用了遗传优化算法,减小了收敛到局部极小值的可能性,得到了更准确的结果。但它的局部收敛性不强,在噪声接近于零的区域,校正结果有 0.6 pixel 的误差,在

其他噪声条件下,校正效果都得到了明显提高。

4 实 验

实验校正一个 CCD 摄像机的镜头畸变,该镜头由 Computar 公司生产,其焦距为 3.6 mm。摄像机对一棋盘格摄像,输出视频送到视频图像处理系统,采集到 705 pixel×572 pixel 的图像。为了便于验证校正方法的稳健性,采集了 4 幅图像如图 4(a1)~图 4(a4)所示,这些图像是通过改变棋盘格平面的方向采集而得的。先用梯度算子作用于每幅图像,再用适当的阈值作二值化处理,去除毛刺和其他干扰点,得到用于校正的曲线集,如图 4(b1)~图 4(b4)所示,每个曲线集包含 20 条曲线,水平方向和垂直方向各 10 条。对每个曲线集,选用 ξ_3 为目标函数,用遗传算法对其优化,由此得到 4 组畸变参量,依次列于表 1 第 2~5 行。分别利用这些畸变参量矫正图 4(a1)~图 4(a4),得到的矫正图像如图 4(c1)~图 4(c4)所示。

从表 1 可见,由每个图像校正出来的主要畸变参量[畸变中心 (x_c, y_c) 和径向畸变系数 K_1]比较接

近,而矫正图像表明,这些畸变参量都能很好地矫直 图像中的畸变直线。

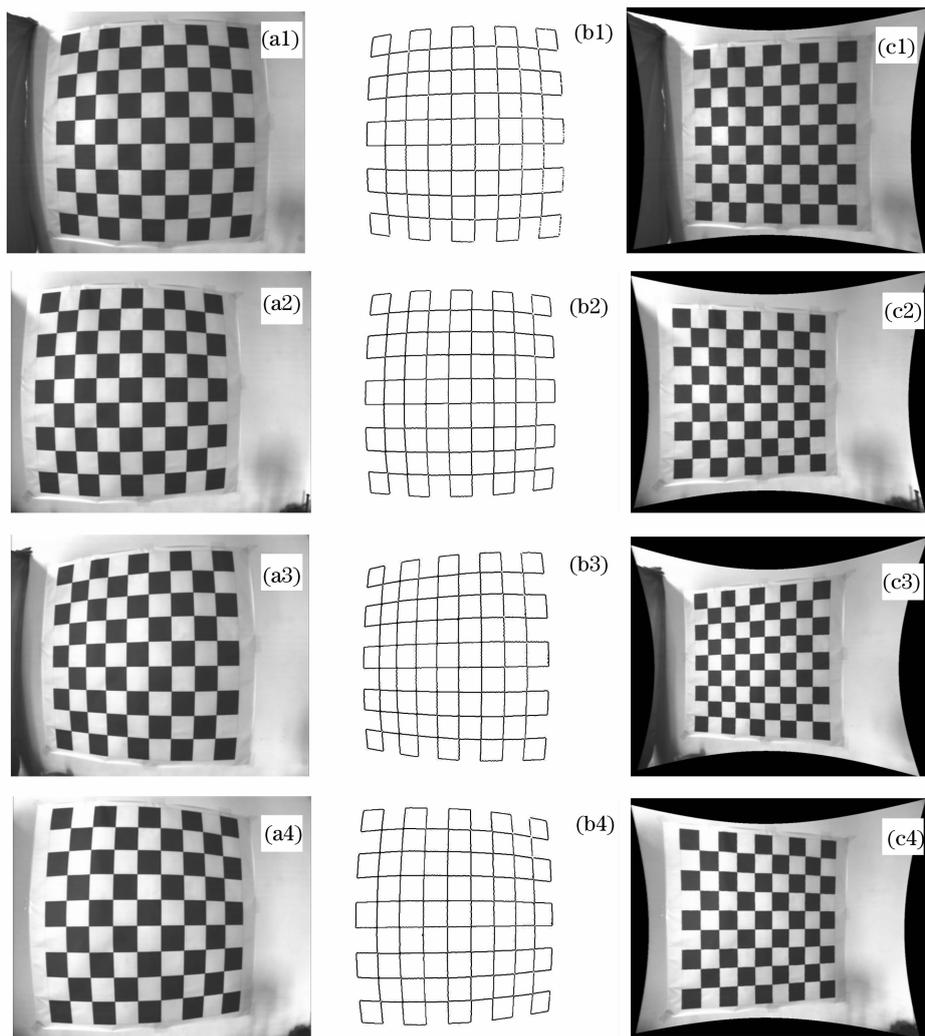


图 4 校正涉及的图像。(a1)~(a4) 原图, (b1)~(b4) 特征曲线, (c1)~(c4) 矫正图像
 Fig. 4 Images involved in the calibration. (a1)~(a4) Original images, (b1)~(b4) extracted lines, (c1)~(c4) corrected images

表 1 图 4 校正得到的畸变参量

Table 1 Distortion parameters obtained by calibrating with images of Fig. 4

Curves Set	$K_1/10^{-6}$	$K_2/10^{-12}$	$P_1/10^{-5}$	$P_2/10^{-4}$	x_c/pixel	y_c/pixel
b_1	1.647	0	3.126	1.000	352.7	312.8
b_2	1.269	1.953	3.750	1.000	352.5	321.9
b_3	1.579	0.2441	6.250	1.000	369.7	322.7
b_4	1.428	0.9765	5.000	1.000	360.4	322.8
b	1.587	0	3.906	1.000	358.0	321.2

因为不知道校正参量的真实值,把所有的曲线集合并成一个曲线集(b),按相同方法对这个并集进行校正,校正结果如表 1 最后一行所示。按照统计学的观点,该联合校正结果更应接近于真实值。对于原图像的任意像素点 (i, j) ($i=1, 2, \dots, 705,$

$j=1, 2, \dots, 572$), 用联合校正值将其矫正到 (x'_{ij}, y'_{ij}) , 用表 1 中第 2~第 5 行的任意一组畸变参量来矫正到 (x''_{ij}, y''_{ij}) , 计算所有对应矫正点距离的均方根, 即

$$D_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{705} \sum_{j=1}^{572} [(x'_{ij} - x''_{ij})^2 + (y'_{ij} - y''_{ij})^2]}{705 \times 572}}, \quad (5)$$

以此作为衡量校正方法的稳定性。第 1、2、3 和 4 组畸变参量与联合校正的畸变参量的矫正图像距离均方根值分别为 2.914 pixel、2.992 pixel、1.443 pixel 和 2.194 pixel, 都小于 3 个像素。可见, 不同图像的曲线集校正出来的结果本质上是相近的。

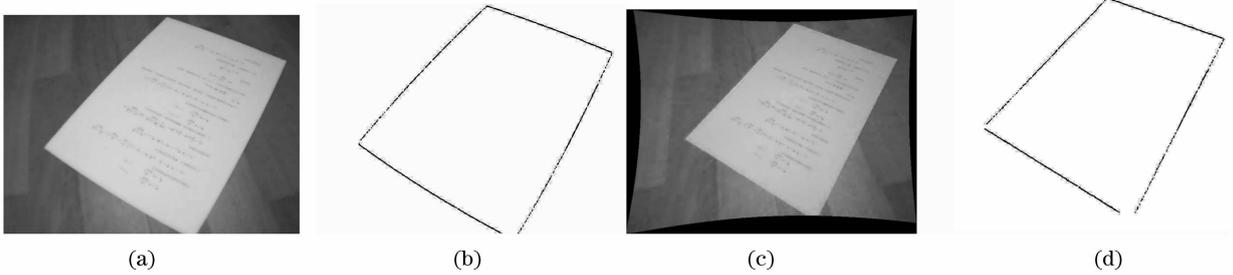


图 5 用另一场景校正摄像头。(a) 原图, (b) 提取曲线, (c) 原图矫正, (c) 曲线(b)被矫正

Fig. 5 Pick-up head calibration with another scenery. (a) Original image, (b) extracted curves, (c) corrected images of (a), (d) corrected curves of (b)

5 结 论

基于直线的射影变换特点, 提出一种校正镜头畸变的非量测方法, 采用面积平方和描述的畸变测度, 与已有测度相比, 计算量小且具有抗噪声能力。为尽可能避免收敛于局部极小值, 用遗传算法进行优化。仿真表明, 利用 LM 方法优化, 本文的畸变测度比距离平方和具有更好的抗噪声能力, 而用遗传算法优化, 校正方法的稳健性得到进一步加强。实验表明, 多幅图像分别校正与同时校正, 降低了矫正图像的均方根误差。

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. Robot. Autom.*, 1987, **RA-3**(4): 323~344
- 2 J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach.*, 1992, **14**(10): 965~980
- 3 De Xu, You Fu Li, Min Tan. Method for calibrating cameras with large lens distortion [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(4): 043602-1~043602-8
- 4 Yu Zhou, Bradley J. Nelson. Calibration of a parametric model of an optical microscope [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(12): 1989~1995
- 5 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two sensor measurement system based on line structure light[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264
吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264
- 6 D. C. Brown. Close-range camera calibration[J]. *Photogramm.*

为了说明校正方法的非量测性, 用另一场景(地面上的一页 A4 纸)对一摄像头畸变进行了校正, 校正图像的大小为 640 pixel×480 pixel[如 5(a)所示], 校正结果为: $K_1 = 8.02 \times 10^{-7}$, $K_2 = 9.77 \times 10^{-13}$, $P_1 = 9.37 \times 10^{-5}$, $P_2 = -4.45 \times 10^{-5}$, $x_c = 460.01$, $y_c = 240.03$, 提取的曲线如图 5(b)所示, 矫正图像如图 5(c)所示, 图 5(d)给出了对曲线的矫正, 可以看出镜头畸变得到了很好的矫正。

- Engng.*, 1971, **37**(8): 855~866
- 7 S. B. Kang. Semiautomatic methods for recovering radial distortion parameters from a single image[J]. *Cambridge Res. Lab., Tech. Rep.*, 1997, **CRL 97/3**: 1~21
- 8 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
- 9 B. Prescott, G. F. McLean. Line-based correction of radial lens distortion[J]. *Graph. Models Image Process*, 1997, **59**(1): 39~47
- 10 R. Swaminathan, S. K. Nayar. Non-metric calibration of wide-angle lenses and polycameras[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2000, **22**(10): 1172~1178
- 11 Mouden Ahmed, Aly Farag. Nonmetric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation[J]. *IEEE Trans. on Image Proc.*, 2005, **14**(8): 1215~1230
- 12 S. Becker, V. Bove. Semiautomatic 3D model extraction from uncalibrated 2D camera views[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2410**: 447~461
- 13 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single camera based on difference coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 699~701
李为民, 俞巧云, 刘超. 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 699~701
- 14 Yu Jun, Lin Jiameing, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1140~1142
余俊, 林家明, 杨建宇等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1140~1144
- 15 Zhou Ming, Sun Shudong. *Genetic Algorithms: Theory and Applications* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 32~54
周明, 孙数栋. *遗传算法原理及应用*[J]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 32~54
- 16 W. H. Press, S. A. Teukolsky *et al.*. *Numerical Recipes In C* [M]. England: Cambridge University Press, 1988. 309~313