文章编号:1002-2082(2010)01-0055-05

一种成像测量图像径向几何畸变的校正方法

王会峰[1,2]
(1. 长安大学 电子与控制工程学院 陕西 西安 710064;
2. 西安电子科技大学 技术物理学院 陕西 西安 710071)

摘 要:通过对具有径向畸变的摄像机模型的分析,设计了一套求解图像径向几何畸变中心和畸变多项式系数的方案。首先,依据校正样板曲线的弯曲程度应用一元线性回归法和逐次逼近法求取光学图像的几何畸变中心,然后应用递推最小二乘法求解径向几何畸变的多项式系数,最后根据所得到的畸变中心和畸变多项式系数对图像进行校正得到满足要求的图像。仿真试验证明:该方法可以通过一次采集单幅图像对成像系统进行高精度标定,能够对成像测量系统的径向几何畸变进行一定精度的校正。实践证明:该方法通过图像处理的方法提高成像测量系统的精度,降低了系统的设计成本,可以作为成像测量系统中单独标定摄像机畸变参数的一种简单有效的方法。

关键词:成像测量;非线性模型;畸变中心;畸变多项式系数;曲率
中图分类号:TN209;TP391.4 **文献标志码**:A

Radial geometrical distortion correction in image measurement system

WANG Hui-feng[1,2]
(1. School of Electronic & Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Institute of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Lens distortion in high precision imaging measurement system has to be strictly controlled, though the design and manufacture of this kind of lens are challenging. Thanks to the maturity of digital technical, image processing offers a new solution to correct the nonlinear distortion of lens. A set of simple and effective methods for detecting radial distortion center and calculating polynomial coefficients was proposed based on the analysis of a nonlinear camera model. Unitary linear regression analysis and gradually approach method were used to obtain the distortion center and recursive least squares estimation was used to get the polynomial coefficients, and images were corrected based on these data for fulfilling requirements. Test and simulation show the radial geometrical distortion can be accurately corrected in imaging measurement system by sampling one frame of image. It is simple and cost effective, could be used to calibrate camera distortion.

Key words: imaging measurement; nonlinear camera model; distortion center; polynomial coefficient; curvature

收稿日期:2009-08-03; **修回日期**:2009-10-09
作者简介:王会峰(1976—),男,博士,讲师,研究方向:光电测控、光电成像和光电图像处理以及机器视觉应用等方面的研究。E-mail:conquest8888@126.com

引言

成像测量广泛应用在现代工业、国防等方面[1]。用成像法进行精密测量的前提是成像系统所成的像必须准确,但在短焦距与广角镜头的光学系统中普遍存在着畸变,畸变会随视场增大而迅速增大,虽然畸变并不影响图像清晰度,但光学系统畸变却直接影响成像的几何位置精度。由于畸变的存在,物空间的一条直线在像方就变成了一条曲线,造成了像的失真。在视场比较小的光学系统中畸变不显著,但在大视场、特别是对于测量精度要求比较高的光学系统中就必须采取措施来消除畸变带来的影响[2]。

为了消除畸变带来的测量误差,通常采用两种方法:一种是利用光学方法来校正畸变;另一种是利用数字图像处理技术对畸变进行校正。然而利用光学方法来校正畸变会产生一个复杂的光学系统,这不但使设计难度加大,而且给制造工艺也带来一定的难度,并且在一些场合,比如对于体积受限的内窥镜探头来说即是不可行的。利用图像处理技术,对光学系统进行畸变补偿,可有效地改善图像的畸变失真,提高测量系统的精度,使得到的结果满足正确测量的要求[3]。

国内外对畸变校正提出了多种方法[4-9]:Smith[4]等利用正交切比雪夫多项式计算模型参数。Hideak-i[5]等采用了同样的畸变模型,但通过图像上像素点的力矩矩阵最小特征根及最速下降法计算模型参数。Asari[5]等提出了基于最小二乘法的畸变的校正方法,运用了与Hideaki 相同的畸变模型和映射多项式。近年来,国内北京理工大学、天津大学、长春光机所等单位分别对该课题进行了广泛的研究,提出了不同的畸变标定和校正方法并且开发了多种实现系统。但是,这些系统都各有自己的使用条件和优缺点。

基于图像处理的畸变校正基本都要实现两大步骤:首先,估测成像的光学中心(畸变中心);其次,进行畸变系数的求解,并且利用得到的结果进行畸变校正(当然也有直接利用神经网络进行畸变校正的)。如何估测系统的光学中心和畸变多项式系数的方法却是不同的,本文叙述的方法具有简单方便、精度合理和适合工程应用等特点。

1　具有径向畸变的摄像机模型

成像测量广泛应用的摄像机透视投影成像模型,在物理上相当于薄透镜成像,其最大优点为成像性能是线性的。如图1 所示,设 $OXYZ$ 是大地坐标系,$oxyz$ 是摄像机坐标系。$P(X,Y,Z)$ 是点 P 在大地坐标系中的坐标,$C(x,y,z)$ 是点 P 在摄像机坐标系中的坐标。摄像机坐标系的原点在光学中心,z 轴和光轴重合。$ox'y'z'$ 是图像平面坐标系,它的原点是光轴与图像平面的交点,x' 轴、y' 轴分别与 x 轴 y 轴平行。径向畸变是以光学中心为中心沿径向发生的,故可将沿 X 和 Y 方向上的二维畸变化解为沿半径方向上的一维畸变模型来求解。根据 Hideaki 使用的数学模型[5],有

$$\rho' = \sqrt{(x' - u_c')^2 + (y' - v_c')^2}$$

$$\theta' = \arctan\left(\frac{y' - v_c'}{x' - u_c'}\right)$$

$$\rho = \sqrt{(x - u_c)^2 + (y - v_c)^2}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y - v_c}{x - u_c}\right)$$

式中:(u_c',v_c') 和 (u_c,v_c) 分别是校正前后的图像中心;(x',y') 和 (x,y) 是校正前后图像上的像素点的坐标值;ρ 和 ρ' 是像素到校正前后图像光学中心的距离(半径方向);θ 和 θ' 是校正前后像素点和图像中心连线的夹角值。因此从畸变图像到校正图像的映射是

$$\rho = \sum^{N} a_n \rho'^n \tag{1}$$

经过校正后新像素点的坐标可以表示为

$$x = u_c + \rho\cos\theta',\ y = v_c + \rho\sin\theta' \tag{2}$$

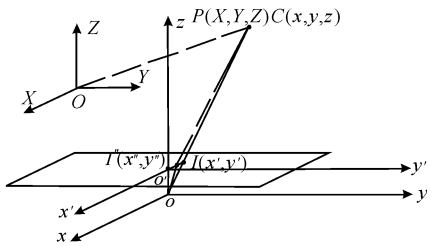

图 1　透视透影摄像机成像模型

Fig. 1　Canmera image model with perspective projection

2　模型畸变中心的求解

光学畸变中心为光轴与 CCD 成像平面的交点坐标。从图 2 可知,模板测试点中心的连线理想状态下应该是直线,但是经过光学畸变后变成弯曲线,其曲率先减小后增大,而只有通过光学中心的直线不弯曲。其他直线的弯曲程度与距光学中心的距离有关。

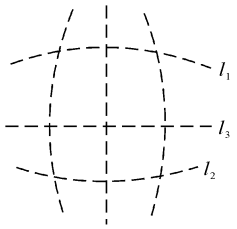

图 2　畸变中心模型

Fig. 2　Model of distortion center

基于上述思想可设计求解畸变中心的方法如下:

1) 假设在测试点中找到 m 行 n 列的畸变阵列坐标,设行列标记为$[i,j]$,计算第 0 行到第 m 行的弯曲程度计算方法如下。首先利用一元线性回归分析对各个行拟合出一直线 $y_i = a_i x + b_i$,然后利用公式 $\delta_i = \sum_j (y_{ij} - a_i x_{ij} - b_j)^2$,弯曲程度记为 δ_i。

2) 寻找弯曲程度变化最小的 2 条弯曲直线记为 1 行 2 行,其中第 i 行的弯曲程度为 δ_1,第 $i+1$ 行的弯曲程度为 δ_2。

3) 根据理论分析,通过成像光学畸变中心的曲线弯曲程度最小,则可以认为该直线通过光学中心。

4) 利用下列公式在这两条直线之间求取第 3 条直线上各个点的坐标

$$x_{3j} = x_{1j} + (x_{2j} - x_{1j}) \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2}$$

$$y_{3j} = y_{1j} + (y_{2j} - y_{1j}) \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2}$$

计算第 3 条弯曲直线的弯曲程度 δ_3,如果 $\delta_1 > \delta_3$,则用第 3 条曲线取代第 1 条曲线,并且令 $\delta_1 = \delta_3$。反之取代第 2 条直线,并且令 $\delta_2 = \delta_3$。

5) 重复步骤 4),直到所求得的弯曲度小于给定的极限值 $\delta_k \leqslant \varepsilon$。此时该直线已经非常接近于通过成像系统的光学畸变中心的直线。

6) 对于 j 列和 $j+1$ 列重复上述的方法,同理可以得到另一条直线。

7) 求取行和列方向迭代直线的交点。设求得的两条直线的方程分别为

$$\begin{cases} a_H x + b_H y + c_H = 0 \\ a_V x + b_V y + c_V = 0 \end{cases}$$

则,畸变中心坐标为

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_H & b_H \\ a_V & b_V \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -c_H \\ -c_v \end{bmatrix}$$

3　畸变校正多项式系数的求解

成像样板在成像前各个测试点中心上处于同一条直线上,多项式系数的求解通过拉直这些像空间的直线来估计校正多项式系数。假设 P_{ij} 是畸变图像 i 行 j 列测试目标点的中心,其坐标为(x_{ij}, y_{ij}),假设共有 L 列这样的点,每 1 列有 k_j 个测试目标点。每 1 组 S_j 是第 j 列中案板测试目标点组成的集合,

$S_j = \{P_{1j}, P_{2j}, \cdots, P_{kj}\}$,其中 $j = 1, 2, \cdots, L$。

为了拟合出最优的多项式系数,定义多项式如下

$$G_J(x) = b_{0j} + b_{1j} x \tag{3}$$

应用最小二乘估计系数 $b_{\alpha j}$,定义函数

$$R_j = \sum_{i=1}^{K_j} (y_{ij} - G_j(x_{ij}))^2 \tag{4}$$

因此 $b_{\alpha j}$ 可通过下式求得

$$\frac{\partial R_j}{\partial b_{\alpha j}} = 0 \quad \alpha = 0, 1, \cdots, M。$$

这样可以得到 $M+1$ 组相似的等式,将其写成矩阵形式,有

$$\boldsymbol{Hb} = \boldsymbol{z} \tag{5}$$

其中:

$$\boldsymbol{H} = [h_{ls}]_{(M+1)\times(M+1)}$$

$$h_{ls} = \sum_{i=1}^{K_j} x_{ij}^{l+s} \quad l, s = 0, 1, \cdots, M$$

$$\boldsymbol{z} = [z_0, z_1, \cdots, z_M]^{\mathrm{T}},\ z_s = \sum_{i=1}^{k_j} y_{ij} x_{ij}^s,$$

$$\boldsymbol{b} = [b_{0j}, b_{1j}, \cdots, b_{Mj}]^{\mathrm{T}}。$$

b_{0j} 和 b_{1j} 可以参照下式求取

$$\begin{bmatrix} b_{0j} \\ b_{1j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_j & \sum_i x_{ij} \\ \sum_i x_{ij} & \sum_i x_{ij}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_i y_{ij} \\ \sum_i x_{ij} y_{ij} \end{bmatrix} \tag{6}$$

可以由同一列中参与拟合的 k_j 个点定义一个规一化幅值的正交的误差函数 e_j:

$$e_j = \frac{1}{k_j} \sum_{i=1}^{k_j} \left| \frac{b_{1j} x_{ij} - y_{ij} + b_{0j}}{\sqrt{1 + b_{1j}^2}} \right| \tag{7}$$

整个测试样板的总误差为:$E = \sum_{J=1}^{L} e_j$。

通常条件下,如果不存在光学畸变,则误差总量 E 为 0,因为所有的点都在直线上。然而由于镜头成像畸变的存在,其值随着畸变量的减小而减小。当 E 为 0 时的系数 a_n 就为畸变多项式数学模型中的系数。可以使用递推的方法得到这些系数。在递推过程中每次更新多项式系数来使得样板测试点的误差达到最小值。在递推方法中必须保证多项式从一个初始点到全局收敛点。基于这种思想应用下列方法递推:

$$a_{n+1}(\Delta+1)=a_n(\Delta)+\alpha n^{\beta}E(\Delta)\frac{1}{\left(\frac{\partial E(\Delta)}{\partial a_n}\right)} \tag{8}$$

式中:$n=1,\cdots,\alpha$是收敛参数;β是张量因子;$\frac{\partial E}{\partial a_n}$是误差梯度,选择适当的$\alpha$保证$E(\Delta+t)<E(\Delta)$。如果$\alpha$太大可能会导致振荡,反之如果过小,则收敛时间变长。误差梯度求取如下

$$\frac{\partial E}{\partial a_n}=\sum_{j=1}^{j}\left(\frac{1}{k}\left|\frac{(1+b_{1j}^2)\left(\frac{\partial b_{0j}}{\partial a_n}+b_{1j}\frac{\partial x_{ij}}{\partial a_n}+x_{ij}\frac{\partial b_{1j}}{\partial a_n}\right)}{\sqrt{(1+b_{1j}^2)^3}}-\frac{(b_{0j}+b_{1j}x_{ij}-y_{ij})\left(b_{1j}\frac{\partial b_{1j}}{\partial a_n}\right)}{\sqrt{(1+b_{1j}^2)^3}}\right|\right) \tag{9}$$

$\frac{\partial b_{0j}}{\partial a_n}$和$\frac{\partial b_{1j}}{\partial a_n}$可以根据(6)式结果求得。

在(9)式中,$\rho_{ij}(\Delta)=\sum_{n=1}^{N}a_n(\Delta)\rho_{ij}^{\prime n}$,$\frac{\partial x_{ij}}{\partial a_n}=\rho_{ij}^{\prime n}\cos\theta_{ij}^{\prime n}$,$\frac{\partial y_{ij}}{\partial a_n}=\rho_{ij}^{\prime n}\sin\theta_{ij}^{\prime n}$。

根据(8)式不断迭代就可以求得畸变多项式的系数,然后就可以根据这些系数完成对图像的畸变校正[3]。

4　仿真试验算例

在实验中,阵列样板栅格测试点间距为2 cm,像机选用SM-715微型像机,焦距为3.5 mm相对孔径为1.2,图像采集卡为大恒CG410,图像大小为768×576 pixel。测试样板和像机分别置于光具座平台上,并调节样板平面和像机的光轴垂直.拍摄得到的阵列圆畸变样板图像如图3所示。

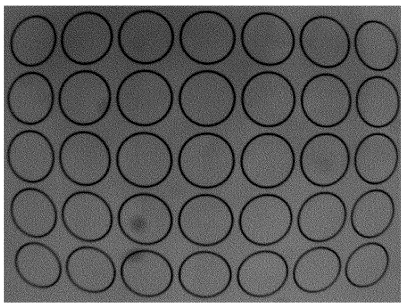

图3　含畸变样板图像

Fig. 3　Template image before corrected

用圆心拟合法提取阵列圆的圆心作为控制点,如图4所示,对图3所示的畸变图像分别确定其畸变中心和畸变多项式系数,结果如表1所示。表2为计算中圆心连线各列直线弯曲度误差。

表1　畸变系数

Table 1　Distortion coefficient

畸变中心(像素)	u_c/371.82	v_c/227.49
多项式系数	z_0/−0.264 9	z_1/0.999 6
	z_2/8.860 1×10^{-6}	z_3/−5.214 4×10^{-7}

表2　圆心连线的弯曲度误差

Table 2　Curvature error for circle center connection

列	1	2	3	4	5	6	7
δ_i	0.251	0.23	0.176	0.089	0.26	0.14	0.77

从这些数据可知,其z_3值已经很小,可以忽略不计。应用上面的畸变系数对图3进行校正,采用向后映射法得到畸变校正后的阵列圆样板图像如图5所示。可见经过畸变校正后图中的栅格线变得平直了,图像的畸变量明显减小了,这对提高图像测量系统的测量精度有重大的意义。

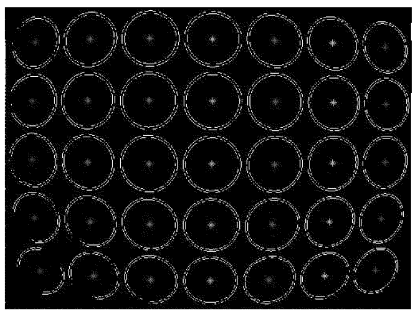

图4　控制点提取

Fig. 4　Control points extracted

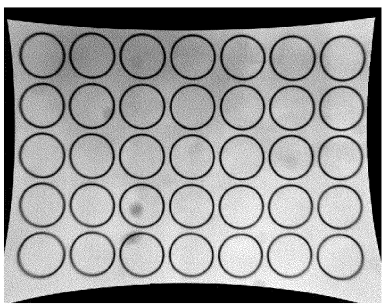

图5　校正后的样板图像

Fig. 5　Template image after corrected

5　结论

针对特殊环境下激光基准高精度成像视觉光电测量系统中的镜头径向畸变对测量精度的影响,设计了一套适用可靠的径向畸变校正方法,该方法

操作简单方便、校正精度高且效果好,可以作为成像测量系统摄像机径向畸变标定测量的一种简单有效的方法。但是该方法只考虑到了轴外点成像的径向几何畸变,而没有考虑灰度畸变的情形,对灰度和几何畸变同时进行校正是需要进一步探讨的问题。

参考文献:

[1] 刘金国.大视场光电测量系统的精密几何标定和畸变校正的研究[J].光学精密工程,1994,2(4):119-120.
LIU Jin-guo. Study of high accurate geometric calibration of precision photoelectronic measuring [J]. Optics and Precision Engineering, 1994, 2(4): 119-120. (in Chinese with an English abstract)

[2] 崔洪州,孔渊,周起勃,等.基于畸变率的图像几何校正[J].应用光学,2006,27(3):183-185.
CUI Hong-zhou, KONG Yuan, ZHOU Qi-bo, et al. Image geo-metric correction based on distortion ratio [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 183-185. (in Chinese with an English abstract)

[3] 江洁,张广军,周富强,等.大视场广角物镜畸变的实时数字校正[J]. 仪器仪表学报,2004,25(2):174-177.
JIANG Jie, ZHANG Guang-jun, ZHOU Fu-qiang, et al. Distortion correction of the wide-angle objective lens with real-time digital technology[J]. Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(2): 174-177. (in Chinese with an English abstract)

[4] SMITH WE, VAKIL N, MAISLIN S A. Correction of distortion in endoscopic images[J]. IEEE Trans. Med. Imag, 1992, 11(3): 117-122.

[5] HIDEAK H, YAGIHASH N Y, MIYAKE Y. A new mothed for distortion correction of electronic endoscope image [J]. IEEE Trans. Med. Imag, 1995, 14(9): 548-555.

[6] VIJAYAN K, ASARI, SANJIV K, RADHAKRISHNAN D. A new approach for nonlinear distortion correction in endoscopic images based on least squares estimation [J]. IEEE Trans on Medical Imaging, 1999, 18(4): 345-354.

[7] JAMES P H, CHAO Z, GEOFFREY M, et al. Videoendoscopic distortion correction and its application to virtual guidance of endoscopy [J]. IEEE Trans on Medical Imaging, 2001, 20(7): 605-617.

[8] TAIAN H, STRIKANTHAN T, VIJANYAN K, et al. Study on the effect of object to cmera distance on polynomial expansion coefficients in barrel distortion correction [J]. IEEE Southwest symposium on image analysis and interpretation, 2002, 7695: 1537-1639.

[9] DABID A, BUTER, PATRICIA K, et al. A distortion correction scheme for industrial machine-vision application[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(4): 546-551.