

高准确度光电成像测量系统图像畸变校正算法

牛建军^{1,2} 刘上乾¹ 姚荣辉² 郑毅¹ 冀芳¹

(1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

摘 要 在以 CCD 为核心器件的光电成像测量系统对物体进行线度测量中, 成像光学系统的固有特性使得数字图像存在畸变, 根据像差理论建立了三次多项式的畸变校正模型, 分析比较了不同的灰度重建方法的优缺点, 进行了双线性插值的灰度重建. 对一种校正图像进行了噪音点滤除, 进行了仿真实验. 校正后的图像可用于高准确度的成像测量.

关键词 畸变模型; 畸变校正; 三次多项式拟合; 双线性插值

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A

0 引言

在光电数字图像测量系统中, 引起误差的原因主要有两个: 一是获得的数字图像是物体的理想光学像与整个系统点扩展函数的卷积, 通常它使像宽增大 5、6 个像素, 只有求得像的真正边缘, 才能消除该误差; 二是光学系统的畸变, 一般光学镜头的典型畸变量为 2‰~2%, 并且会随着使用条件的变化而改变, 例如光圈 F 值减小则畸变量增大.

像点到光轴的理想距离与物点到光轴的距离成线性关系, 畸变是距离偏离了理想值, 初级畸变与物点到光轴距离成三次方关系^[1], 此时轴外直线成像为曲线, 畸变距离比理想距离或大或小, 相应的畸变有桶形和枕形两种. 可见畸变量 C 是数字图像像素坐标的函数, 即 $C=C(x, y)$, 因而各点的放大率 M 也是数字图像像素坐标的函数, 即 $M=M(x, y)$. 所以在进行线度测量时, 必须根据 $C(x, y)$ 或 $M(x, y)$ 对测量值进行修正, 才能获得高准确度的测量结果.

图像几何畸变的校正方法有许多作者进行了研究^[2], 一般可分为两大类: 系统校正法和基于参考点的校正法. 系统校正法是利用引起几何畸变的若干特征参量信息及其分布规律进行系统校正, 显然这要获得相应特征参量及其分布的精确测量值, 而往往很难获得这些精确测量值; 基于参考点的校正法需要在畸变前后的图像中找到对应的控制点对, 根据最小均方误差等准则, 找到各点对两组坐标之间的变换关系, 然后用这种映射关系对畸变图像进行变换校正. 本文主要讨论在高准确度光电测量系统中光学系统畸变的校正. 根据像差理论建立了三次多项式的畸变校正模型, 分析比较了不同的灰度重建方法的优缺点, 进行了双线性插值的灰度重建. 对

一种校正图像进行了噪音点滤除, 进行了仿真实验. 校正后的图像可用于高准确度的成像测量.

1 图像畸变模型

设畸变前图像为 $g(u, v)$, 畸变后图像为 $f(x, y)$. 如果用 (u, v) 与 (x, y) 分别表示畸变前后图像中同一个控制点的坐标, 由于畸变, 两组坐标不再相等, 它们之间的对应关系通常可以解析地表示为

$$\begin{cases} x=h_1(u, v) \\ y=h_2(u, v) \end{cases} \quad (1)$$

一般情况下, 变换关系 $h_1(u, v)$ 和 $h_2(u, v)$ 都可以用多项式来逼近, 这样 (u, v) 与 (x, y) 的变换关系可以显式表示为

$$\begin{cases} x=\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u^i v^j \\ y=\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u^i v^j \end{cases} \quad (2)$$

式中 n 为多项式的次数, a_{ij} 和 b_{ij} 为待定的畸变系数, 可利用已知的控制点对的坐标来求解.

如果控制点数目与方程组中未知数的数目相同, 则可以直接求解方程组; 而在一般的图像畸变校正处理中, 为了获得较高的校正准确度, 总是控制点数目多于方程组中未知数的数目, 这样的方程组实际上可能是矛盾的, 但可以求其误差平方和最小准则下的最优近似解. 具体做法如下:

对 L 个控制点, 用多项式拟合后的误差平方和最小, 即

$$Q=\sum_{k=1}^L (x_k - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u_k^i v_k^j)^2 = \min \quad (3)$$

此时必有

$$\frac{\partial Q}{\partial a_{ij}} = -2 \sum_{k=1}^L (x_k - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u_k^i v_k^j) \times u_k^i v_k^j = 0 \quad (4)$$

由式(4)可得

$$\sum_{k=1}^L (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u_k^i v_k^j) \times u_k^i v_k^j = \sum_{k=1}^L x_k \times u_k^i v_k^j \quad (5)$$

用同样的方法对 y 坐标进行拟合,可得

$$\sum_{k=1}^L (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u_k^i v_k^j) \times u_k^s v_k^t = \sum_{k=1}^L y_k \times u_k^s v_k^t \quad (6)$$

式中 L 为控制点对的数目, $s=0, 1, 2, \dots, n; t=0, 1, 2, \dots, n-s; s+t \leq n$. 式(5)和(6)是两个线性方程组,各由 M 个方程组成,每个方程组含 M 个未知数,这里 $M=(n+1)(n+2)/2$.

校正准确度与所用校正多项式次数有关,多项式次数越高,拟合误差越小.但是随着 n 增加,系数数目增加,导致计算量急剧增加.对一般的非线性失真,通常采用三次多项式进行拟合^[3],方法比较简单有效,且准确度较高,此时式(2)可写为

$$\begin{cases} x = a_{00} + a_{01}v + a_{02}v^2 + a_{03}v^3 + a_{10}u + a_{11}uv + \\ a_{12}uv^2 + a_{20}u^2 + a_{21}u^2v + a_{30}u^3 \\ y = b_{00} + b_{01}v + b_{02}v^2 + b_{03}v^3 + b_{10}u + b_{11}uv + \\ b_{12}uv^2 + b_{20}u^2 + b_{21}u^2v + b_{30}u^3 \end{cases} \quad (7)$$

2 图像畸变校正

2.1 校正系数求解

由式(2)可知,畸变图像进行校正实际上就是对图像空间坐标按确定的关系进行变换,其关键是要确定式(7)中的系数 a_{ij} 、 b_{ij} ,从而通过数学变换将畸变的图像恢复成原图像.

在利用控制点对形成的方程组求解系数中,实践证明,对于方程组形成的迭代矩阵 A ,由于其谱半径值有可能大于 1,即有可能出现

$$\rho(A) \geq 1 \quad (8)$$

根据数学理论,此时该方程组的迭代解法是不收敛的^[4],而由方程组的建立过程可知,该最小二乘的近似解是必然存在的,故而可用高斯列主元消去法进行求解.

2.2 灰度重建

校正后图像灰度值最简单的取法认为是认为对图像中的同一个点灰度值不变,即

$$g(u, v) = f(x, y) \quad (9)$$

基准图像中的 (u, v) 是整数,而计算得到的 (x, y) 却不一定为整数.为此常用灰度插值算法,常用的有

最近邻法、双线性插值法和三次卷积法等,不同插值算法的计算量和准确度差别很大.最近邻法取 4 个邻点中距离最近的邻点的灰度作为该点灰度;双线性插值法利用 4 个邻点的灰度在两个方向上作线性插值;三次卷积法利用三次多项式来逼近理论上的最佳插值函数 $\sin \omega/\omega$,需要用 16 个邻点来计算.最近邻法计算简单,但校正后图像具有明显的不连续性;三次卷积法虽然准确度高,但参与运算的点数多,计算量较大;而双线性插值法具有准确度较高、计算简单、能克服灰度不连续等优点^[5].

设点 (u, v) 落在 (x, y) 、 $(x+1, y)$ 、 $(x, y+1)$ 和 $(x+1, y+1)$ 之间,则复原点 (u, v) 上的灰度值为

$$g(u, v) = (1-\alpha)(1-\beta)f(x, y) + \alpha(1-\beta) \cdot f(x+1, y) + (1-\alpha)\beta f(x, y+1) + \alpha\beta f(x+1, y+1) \quad (10)$$

式中 $\alpha = u - x, \beta = v - y$.

2.3 平滑处理

在实际的校正处理中,可以有两种方法,一种是按照式(7)的逆变换得到畸变图像向校正图像的变换系数,遍历空的校正后图像的像素坐标 (u, v) ,得到在畸变图像中的像素坐标 (x, y) ,再按照式(10)进行插值运算得到 (u, v) 处的灰度值.这种方法对校正图像中的每一个像素点都进行了灰度赋值,一般无需再进行平滑处理.

对畸变图像进行校正处理时,也可以直接由式(7)的系数遍历畸变图像上的每一个像素点 (x, y) ,计算出相应的 (u, v) 并进行灰度赋值,此时对校正图像未必遍历图像上每个像素点,即有的像素点未能获得变换后正确的灰度值,由于图像坐标的这种空间变换关系,校正图像会出现噪音点.为此,必须对校正后的图像进行平滑处理.针对这种点状噪音的特点,设计平滑处理的思路为:如果一个黑点被白点包围,则为噪音点;反之亦然.显然,常用的图像中值滤波即可实现这种功能.

设所用模板为 3×3 ,如图 1,对某一个像素点 $g(u, v)$,获得其 8 个邻近点,将这 9 个点的灰度值由

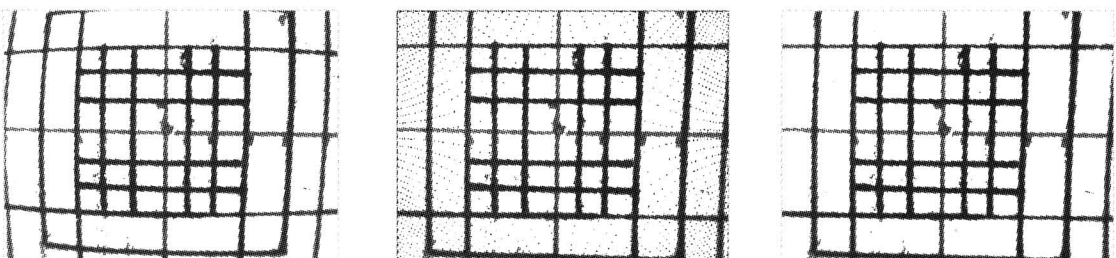


图 1 中值滤波的 3×3 模板

Fig. 1 Sketch graph of median filter template of 3×3

大到小(或由小到大)排序,得到

$$\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8, g_9\} \quad (11)$$

中间位置的灰度值即为该像素点的灰度值.

$$g(u, v) = g_5 \quad (12)$$

3 实验仿真

在实际的光电测量系统中获得了如图 2(a)所

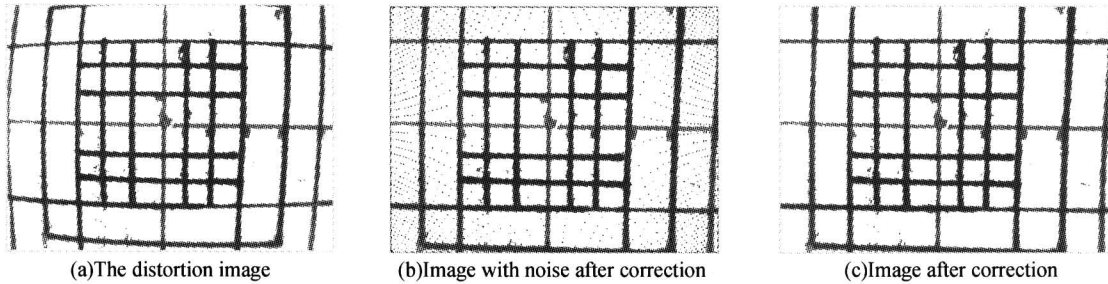


图 2 图像校正处理仿真
Fig. 2 Simulation of image correction

一般的数字图像畸变校正常用多项式拟合的方法对像素坐标直接进行变换;另外根据畸变成像系统特性的旋转对称性,也可以仅对径向距离进行校正^[6],此时校正的对象是像素点与光轴在像平面的投影点之间的距离.校正运算完毕后,该距离要再次投影为坐标,显然这种校正方法对系统安装时的同轴度要求更高.经过实验对比,对于图 2(a)的畸变图像,用基于径向畸变的校正算法获得的位置误差可达 1 个像素左右,而用基于像素坐标的多项式拟合校正算法获得的位置准确度可达 0.3 像素以下,更适合于高准确度的线度测量.

4 结论

在以 CCD 为核心的光电成像测量系统中,由于成像光学系统的固有特性使得数字图像存在畸变,根据几何像差理论建立了三次多项式的畸变校正模型和校正模型,进行了双线性插值的灰度重建和噪声点滤除,并进行了仿真实验,对比针对径向距离和像素坐标两类不同的多项式拟合校正算法,后一种方法的结果更适合高准确度的成像测量.

参考文献

1 王之江,伍树东著. 成像光学. 北京: 科学出版社, 1991.

示的畸变图像,物方原来的直线成像后变成了曲线,显然要得到实际物体正确的线度信息,必须对此畸变进行修正. 根据图像中控制点的对应关系,得到校正后的图像为图 2(c);如果校正时先遍历畸变图像,则得到含有较多点状噪音的图像(图 2(b)),进行中值滤波后如图 2(c).

105~111

Wang Z J, Wu S D. Imaging Optics. Beijing: Science Press, 1991. 105~111

2 Nomura Y, Sagara M, Naruse H. Simple calibration algorithm for high-distortion-lens camera. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell*, 1992, **14**: 1095~1099

3 刘金根. 一种基于现场定标的光电图像畸变校正算法. 光子学报, 2004, **33**(6): 732~735
Liu J G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 732~735

4 聂铁军编著. 数值分析方法. 西安: 西北工业大学出版社, 1990. 182~185

Nie T J. Numerical value calculation methods. Xi'an: Northwest Polytechnical University Publishing Company, 1990. 182~185

5 马丽华, 梁志毅, 郑宏志. 一种显示器投影成像系统的彩色图像几何畸变校正方法. 光子学报, 2001, **30**(5): 624~627

Ma L H, Liang Z Y, Zheng H Z. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5): 624~627

6 王虎, 苗兴华, 惠彬. 短焦距大视场光学系统的畸变校正. 光子学报, 2001, **30**(11): 1409~1412

Wang H, Miao X H, Hui B. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1409~1412

Algorithm for Image correction in High Precision Imaging Measurement System

Niu Jianjun^{1,2}, Liu Shangqian¹, Yao Ronghui², Zheng Yi¹, Ji Fang¹

¹ College of Technological Physics, Xidian University, Xi'an 710071

² College of Science, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2005-06-07

Abstract The digital image has distortion because the inherent characteristic of imaging optical system in measuring body's scale through high precision measurement system based on the CCD camera was used as a core component. The distortion model of 3th polynomial was found based on primary aberration theory. The scale rebuild was progressed after analyzing and validating the excellence and defect of different interpolation method. The image's noise contrapose one of correction methods filter off. The correction image is approve of fitting high precision imaging measurement through experimentation.

Keywords Distortion model; Distortion correction; 3th polynomial fitting; Bilinearity interpolation



Niu Jianjun was born in 1969. he received his bachelor degree in physics in 1991. He has worked at Xidian University since 1998. Now he is working towards the Ph. D. degree in photoelectricity engineering at Xidian University. His current work focuses on the photoelectricity imaging and image processing.