

# 一种基于现场定标的光电图像畸变校正算法

刘金根

(西安电子科技大学技术物理学院 503 室, 西安 710071)

**摘要** 针对 CCD 摄像机所采集的图像存在畸变问题, 提出了一种基于现场定标法的多项式变形技术和三元卷积算法, 对其进行校正. 灰阶 Sobel 算子通过引入衰减因子对图像进行边缘检测得到不失真的灰阶边缘图, 然后将灰阶边缘图进行三次样条插值处理, 使标准定标图案边缘的定位达到亚像素级, 提高了图像边缘检测的精度. 利用建立的校正畸变的函数关系式, 实现空间几何坐标变换, 既保证特殊环境下的图像测量具有足够高的精度, 又使光电图像几何畸变校正达到很好的效果.

**关键词** 现场定标法; 多项式变形技术; 三元卷积算法; 校正图像畸变

**中图分类号** TP751.2      **文献标识码** A

## 0 引言

在用 CCD 摄像机采集图像时, 由于受景物对象与 CCD 摄像机三维空间相对位置关系、光学镜头畸变以及 CCD 摄像机质量等因素的影响, 其采集的图像中象素之间的空间关系会发生变化, 即图像产生了几何失真或几何畸变<sup>[1]</sup>, 畸变的存在不利于图像的辨认、分析和判断, 在进行基于图像分析的运动检测、模式匹配以及对图像特征值高精度测量等定量分析时, 就需要对畸变图像进行校正, 通过几何变换来校正失真图像中的各个象素位置以重新得到象素间原来的空间关系, 以产生精确的不失真图像. 成像系统的几何畸变分为两类: 线性几何畸变和非线性几何畸变, 其中线性几何畸变的校正已经得到了比较好的解决, 但非线性几何畸变的校正则是一个难度甚大的课题. 为了解决这一问题, 国内外很多学者进行了多方面的研究, 虽然目前对不同畸变已研制出不同的算法, 其中最常见的是仿射变换模型; 另一类是近年来受到关注的非线性畸变模型, 如动态弹性模型、Snakes、可变形模板等, 但这些算法都有一定的适用范围和条件.

我们在从事光电窥膛系统对图像的采集<sup>[2]</sup>、处理和测量研究的项目中, 提出了利用基于现场定标法的多项式变形技术和三元卷积插值方法, 对 CCD 采集的光电图像几何畸变进行校正达到很好的效果.

## 1 基于现场定标法的 CCD 图像畸变校正算法

### 1.1 现场定标法

在图像采集和测量中, 用一标准图案置于被测景

物旁边, 采集一幅含该标准定标图案的图像并计算该标准定标图案的图像像元数, 如图 1 所示. 由于标准图案的实际面积为已知, 故可算出在该位置处的定标系数(即每个像元的长度当量和面积当量). 利用标准定标块的长度和宽度是一个不变量作为比较判据对图像进行畸变校正. 在畸变校正的过程中, 必须通过边缘检测法确定标准定标块的边缘, 然后才能判定标准定标块在所采集的图像中发生的畸变程度. 其中边缘位置的精确定位对高精度测量图像具有很大的影响.

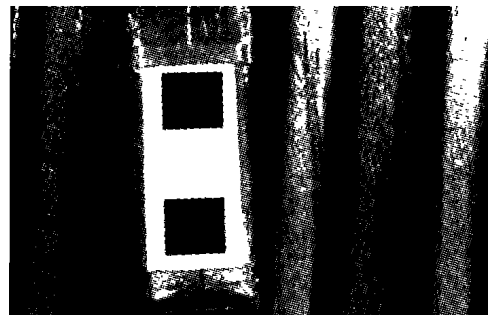


图 1 含标准定标图案的图像

Fig. 1 Image containing the standard pattern

### 1.2 空间坐标变换

CCD 摄像机采集的图像几何畸变是非线性的, 可用坐标间的多项式变换来表示该非线性变换. 设原图像为  $g(u, v)$ , 受到几何形变的影响变成  $f(x, y)$ , 这里  $(x, y)$  表示失真图像的坐标, 它已不是原坐标  $(u, v)$ , 则原图像的空间坐标  $(u, v)$  和被校正图像对应点的空间坐标  $(x, y)$  之间的关系式为

$$\begin{cases} x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u^i v^j \\ y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u^i v^j \end{cases} \quad (1)$$

式中  $n$  为多项式的次数;  $a_{ij}, b_{ij}$  为待定系数, 可采用已知的控制点对, 用曲面拟合方法, 按最小二乘方准则求出.

若要使拟合误差平方和  $\varepsilon$  最小,即使

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

则需求

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

可得

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

同理可得

$$\sum_{k=1}^L (\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u_k^i v_k^j) u_k^i v_k^j = \sum_{k=1}^L y_k u_k^i v_k^j \quad (3)$$

式中  $L$  为控制点对个数;  $s = 0, 1, 2, \dots, n, t = 0, 1, 2, \dots, n - s, s + t \leq n$ . 式(2)和(3)是两组由  $M$  个方程组成的线性方程组,每个方程含  $M$  个未知数,其中  $M = (n + 1)(n + 2)/2$ . 通过分别解上述二式,可求出  $a_{ij}, b_{ij}$ ,将其代入式(1)可实现两个坐标之间的变换.

校正精度与所用校正多项式次数有关,多项式次数越高,位置拟合误差越小. 但  $n$  增加,所需控制点对的数目急剧增加,导致计算时间急剧增加. 对一般的非线性失真,通常采用二元三次多项式,方法比较简单有效,且精度较高,此时式(1)可写为

$$\begin{cases} x = a_{00} + a_{01}v + a_{02}v^2 + a_{03}v^3 + a_{10}u + \\ a_{11}uv + a_{12}uv^2 + a_{20}u^2 + a_{21}u^2v + a_{30}u^3 \\ y = b_{00} + b_{01}v + b_{02}v^2 + b_{03}v^3 + b_{10}u + \\ b_{11}uv + b_{12}uv^2 + b_{20}u^2 + b_{21}u^2v + b_{30}u^3 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,要实现空间坐标变换,关键要确定式(4)中的系数  $a_{ij}, b_{ij}$ ,从而通过反变换将几何畸变的图像恢复成原图像. 本文利用现场定标方法,用一标准图案置于被测景物旁边,采集一幅含该标准定标图案的图像,通过边缘检测法确定标准定标块的边缘,从中找出一些控制点对代入式(2)和式(3),计算出系数  $a_{ij}, b_{ij}$ ,然后才能判定标准定标块在所采集的图像中发生的畸变程度.

控制点对的选择方法和标准可利用标准定标图案中两个矩形的一些特殊点,如矩形中的四个顶点、矩形的中心和四条边上的中点等,作为控制点对. 在本例中利用二元三次多项式,  $n = 3$ ,则  $M = 10$ ,此时式(2)和式(3)是两组由 10 个方程组成的线性方程组,每个方程包含 10 个未知数,因此控制点的个数需 10 个,即在图像中需选择 10 个控制点,可选择图像中标准定标图案中两个矩形的四个顶点和每个矩形的中心作为控制点对.

### 1.3 边缘检测和细化算法

精确定位标准定标图案的边缘有利于提高图像测量的精度,其中边缘检测和细化算法的选取至关重要. 本文利用的边缘检测算法,可以使目标边缘的位

置达到亚像素级,其实现方法如下:

1)对于数字图像  $\{f(i,j)\}$ ,利用 Sobel 边缘检测算子检测图像的水平边缘分量  $S_x$  和  $S_y$ . 水平和垂直边缘检测模板分别为

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \text{ 和 } M_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

2)水平和垂直边缘检测后的分量合成为

$$S(i,j) = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (5)$$

形成边缘检测后的图像  $\{S(i,j)\}$ . 在实际使用时,如果用选定的阈值进行两值化,这样使得边缘图中幅值较小的边缘丢失了,为克服这个缺陷,对  $S(i,j)$  引入衰减因子 decline,即

$$S(i,j) = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} / \text{decline} \quad (6)$$

从而保留了图中较小边缘的数值,不需进行二值化处理,得到不失真的灰阶边缘图.

3)对灰阶边缘图进行内插运算. 选用三次多项式  $w(\omega)$  来逼近理论上的最佳插值函数  $\text{sinc}(\omega)$ ,对灰阶边缘图进行三次样条插值计算,函数  $w(\omega)$  的数学表达式为

$$w(\omega) = \begin{cases} 1 - 2|\omega|^2 + |\omega|^3 & |\omega| < 1 \\ 4 - 8|\omega| + 5|\omega|^2 - |\omega|^3 & 1 \leq |\omega| \leq 2 \\ 0 & |\omega| > 2 \end{cases} \quad (7)$$

4)对插值后灰阶图像利用自适应阈值法,选取最优阈值进行图像分割.

5)经过分割后的图像再作细化处理<sup>[3]</sup>. 如图 2 所示,细化的算法为:若某点的  $S_x > S_y$ ,并且该点的  $S$  较其上下两邻点的  $S$  大;或该点的  $S_x < S_y$ ,并且此点的  $S$  较其左右两邻点的  $S$  大,则视该点为边缘点. 即:  $S_x > S_y$  并且  $S > S_{up}$  和  $S > S_{down}$  或  $S_x < S_y$  并且  $S > S_{left}$  和  $S > S_{right}$  则视该点为边缘点.

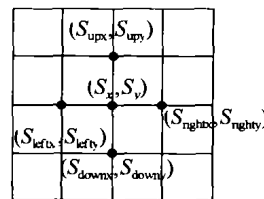


图 2 边缘细化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of edge thinning

### 1.4 利用三元卷积算法得到校正后图像各个象素点的灰度值

利用原图像中邻域象素灰度分布的相关性,确定展开图像各个象素点的灰度值. 本文选用三次多项式  $w(\omega)$  来逼近理论上的最佳插值函数  $\text{sinc}(\omega)$ ,函数  $w(\omega)$  的数学表达式为式(7).

根据插值点周围 16 个邻点(如图 3 所示)的灰度值,利用三元卷积算法<sup>[4]</sup>计算出展开图像中各个象素

点的灰度值.

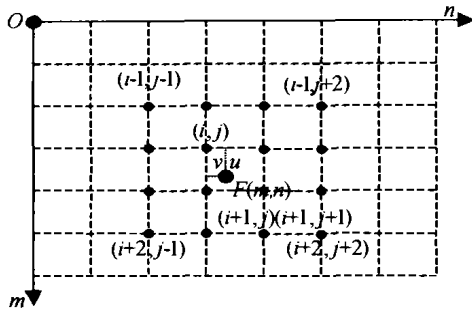


图3 插值算法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of interpolation algorithm

首先根据每列四个点的灰度值分别插值计算出

$$f(m, j-1) = W(1+v)f(i-1, j-1) + W(v)f(i, j-1) + W(1-v)f(i+1, j-1) + W(2-v)f(i+2, j-1) \quad (8)$$

$$f(m, j) = W(1+v)f(i-1, j) + W(v)f(i, j) + W(1-v)f(i+1, j) + W(2-v)f(i+2, j) \quad (9)$$

$$f(m, j+1) = W(1+v)f(i-1, j+1) + W(v)f(i, j+1) + W(1-v)f(i+1, j+1) + W(2-v)f(i+2, j+1) \quad (10)$$

$$f(m, j+2) = W(1+v)f(i-1, j+2) + W(v)f(i, j+2) + W(1-v)f(i+1, j+2) + W(2-v)f(i+2, j+2) \quad (11)$$

然后根据  $f(m, j-1)$ ,  $f(m, j)$ ,  $f(m, j+1)$ ,  $f(m, j+2)$  四个值插值计算

$$f(m, n) = W(1+u)f(m, j-1) + W(u)f(m, j) + W(1-u)f(m, j+1) + W(2-u)f(m, j+2) \quad (12)$$

## 2 现场定标法的 CCD 图像畸变校正算法实现方法

要实现 CCD 摄像机采集的畸变图像进行校正, 关键的步骤是:

- 1) 对采集的含有标准定标图案的图像, 括定出标准定标图案的部分, 如图1中两个黑色的矩形方块.
- 2) 用边缘检测, 细化的方法精确定位标准定标图案边缘位置. 图4中的两个矩形就是图1经边缘检测和细化后的标准定标块, 从中找出一些控制点对代入(2)式和(3)式, 计算出系数  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ , 然后将系数  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  代入式(4)式判定标准定标块在所采集的图像中发生的畸变程度.
- 3) 由第二步所得到的原图像为  $g(u, v)$  和受到几何畸变图像  $f(x, y)$  之间建立的函数关系式, 将失真图像的坐标系  $(x, y)$  变换到原图像坐标系  $(u, v)$ , 从而实现失真图像按原图像的几何位置校正, 使  $f(x, y)$  中的每一象素点都可在  $g(u, v)$  中找到对应象素点.
- 4) 图像经几何位置校正后, 在校正空间中各象素点的灰度值应等于被校正图像对应点的灰度值, 但校正后的图像往往会出现某些象素点挤压在一起, 另一些则分散开了, 使校正后的

象素点不落在坐标点上, 可利用三元卷积算法得到这些象素点的灰度值.

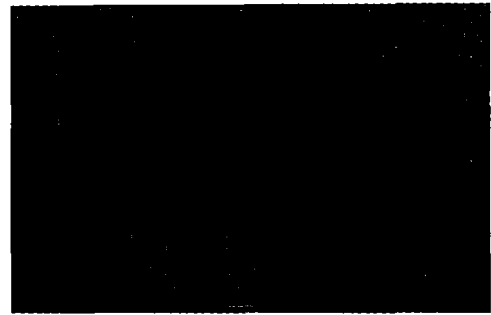


图4 边缘检测和细化后的图像

Fig. 4 Detected and thinned image on edge

## 3 实验结果与结论

本文利用基于现场定标法的多项式变形技术和三元卷积插值方法, 对 CCD 光电图像几何畸变进行校正, 达到了很好的效果. 该方法尤其适用于对图像特征值(如目标的面积、长度和宽度等)的高精度测量. 本文提出的图像校正算法具有如下特点:

1) 引入一个衰减因子的灰阶 Sobel 边缘检测算子和对灰阶边缘图进行三次样条内插结合处理, 使标准定标图案边缘的定位达到亚象素级, 提高了图像边缘检测的精度, 有利于图像的高精度测量.

2) 利用基于现场定标法的多项式变形技术, 建立了校正畸变的函数关系式, 实现空间坐标变换, 将几何畸变的图像恢复成原图像, 既保证特殊环境下的图像测量具有足够高的精度, 又使 CCD 光电图像几何畸变校正达到很好的效果.

3) 利用本文的三元卷积算法可校正图像的灰度失真, 其校正精度与所选象素点的数目及其分布有关, 但通过理论分析和实验验证得到, 利用周围 16 个邻点灰度值的相关性进行内插精度高、效果好, 使图像的灰度分布得到了恢复, 图像细节和轮廓更清晰.

### 参考文献

- 1 廖士中, 高培焕, 苏艺, 等. 一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法. 中国图象图形学报, 2000, 5(A): 593 ~ 596  
Liao S Z, Gao P H, Su Y, et al. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(A): 593 ~ 596
- 2 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述. 自动化学报, 2000, 26(1): 43 ~ 55  
Qiu M L, Ma S D, Li Y. Acta Automation Sinica, 2000, 26(1): 43 ~ 55
- 3 刘金根, 吴志鹏, 刘上乾, 等. 一种基于特征区域分割的图像拼接算法. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(6): 768 ~ 771  
Liu J G, Wu Z P, Liu S Q, et al. Journal of Xidian University, 2002, 29(6): 768 ~ 771

4 刘金根, 刘上乾. 一种新的图象展开算法. 光子学报, 2002, 31(2): 213 ~ 216

Liu J G, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 200231(2): 213 ~ 216

## A Rectification Algorithm for Photoelectric Image with Distortion Based on Method of Onsite Ascertained Standard

Liu Jingen

Lab. 503, School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, China 710071

Received date: 2002-12-11

**Abstract** A rectification algorithm for the distortional image which are captured with CCD camera is proposed, which introduces the multinomial transformation technique based on the method of onsite ascertained standard and ternary convolution into image rectification. The edges of an image is detected by gray Sobel operator with a attenuation factor. A gray edge image is obtained and is not distortional. Then the gray edge image can be processed using cubic spline interpolation. The location precision of the standard pattern is improved to sub-pixel. It improves the precision of edge detection. Using the established formulas of the function relation for rectification distortion, the spatial geometric coordinate transformation is achieved. It not only ensures the measured image in the special circumstance to be the high precision, but also makes the geometric distortion rectification of photoelectric image achieve good results.

**Keywords** Method of onsite ascertained standard; Multinomial transformation technique; Ternary convolution algorithm; Rectification image distortion



**Liu Jingen** An associate professor, was born in 1966 in Jiangxi Province. He received the M. S. degree from Xidian University in 1997, and is working towards the Ph. D. degree at Xidian University. His research work is in the field of photoelectric imaging and image processing.