

广角成像系统光学畸变的数字校正方法*

刘 航 郁道银 杜 吉 毛 义

(天津大学精仪学院, 教育部光电信息技术科学联合开放实验室, 天津 300072)

摘 要 光学系统的畸变除了利用像差理论来实现校正外, 还可以利用数字图像处理技术来进行校正。这为某些受其他条件的限制, 很难用像差校正方法来实现其畸变校正的光学系统, 如内窥镜光学系统和机器视觉光学系统等, 提供了另一种畸变校正的方法。在讨论利用数字图像处理技术进行畸变校正的理论后, 接着详细介绍了点阵样板校正方法, 并给出校正实例。最后, 为了评价校正的精度, 文中分析了校正的主要误差来源, 并通过比较校正前后视场各位置的畸变量来考察校正的效果。

关键词 畸变校正, 几何畸变, 灰度校正, 内窥镜, 广角物镜。

1 引 言

目前, 利用数字图像技术进行畸变校正主要应用于两个领域: 一是医用内窥镜图像的校正, 目的是测量图像上病变区域的大小; 另一应用是机器视觉领域, 是为了提高它的视觉定位精度, 正确完成动作。

Smith^[1]为了准确测量医用内窥镜图像上溃疡的面积, 提出了一种校正原理。利用一个点阵图案的校正样板, 根据样板上黑点的中心在畸变图像上的位置, 拟合出畸变图像与理想图像间的函数关系, 完成图像像素的几何位置校正, 最后用测量不同视场处圆斑的面积, 来判断校正的效果。

Hideaki^[2]采用栅格状的校正样板, 对内窥镜的畸变图像进行校正, 他根据样板上栅格的经纬线在畸变图像上的弯曲程度来估计像面上对称中心的位置, 通过考察栅格节点位置的变化, 确定畸变图像与理想图像间的关系, 并据此实现图像的畸变校正。

Nomura^[3]则利用平行栅的图像, 来寻找畸变图像与理想图像间的关系, 以校正一个机器视觉系统的畸变。Shih 通过建立透镜的数学模型, 并引入畸变影响系数来综合考察畸变对整个系统响应的影响^[4], 并在另一篇论文中定量分析了这种影响的程度^[5], 以及在何种情况下, 这种影响是必须被考虑的。

本文通过讨论了畸变图像的几何校正和灰度校正原理, 并在标准点阵校正样板畸变图像的基础上, 利用图像处理技术, 实现了一台医用内窥镜的畸变校正算法。最后, 文中对校正的精度进行了分析, 并通过计算校正前后视场各位置的畸变量, 来考察校正的效果, 从而以系统达到的光学指标来评价校正算法。

* 本课题由天津市自然科学基金资助(项目号: 953701111)。

收稿日期: 1997-04-05

2 校正理论

从数字图像处理的观点来考察畸变校正, 实际上是一个图像恢复的过程, 是对一幅退化了的图像进行恢复。几何畸变失真主要是表现在图像中像素点发生位移, 从而使图像中物体扭曲变形。造成这类图像退化的原因是多方面的, 而成像系统的非线性, 例如光学系统畸变像差是其中一个主要的因素。

几何畸变校正可分为两步, 第一步是对理想图像所在的坐标空间进行几何变换, 这样做的目的是使理想图像上的像素与实际图像上的像素点对应起来; 第二步是根据实际图像上对应点邻近像素的灰度值, 估计该点的灰度值, 从而得到与之相对应的理想图像上像素的灰度值, 称为灰度校正。

2.1 几何变换

设 $f(u, v)$ 为理想图像, $f(x, y)$ 为存在畸变的实际图像, 两者的坐标之间存在着一个非线性变换 T_a , 即

$$(x, y) = T_a[(u, v)] \quad (1)$$

式中 T_a 为一个二维的几何变换。一般来讲, 光学系统是以光轴为对称的, 其光轴即为系统的径向对称中心, 系统的特性函数只与距该对称中心的距离有关。将这种性质应用于图像的几何变换, 就可以将二维的变换问题简化为一维问题来处理。

首先, 以系统对称中心为原点定义一个极坐标系, 用来取代原来的笛卡儿坐标系, 它们的坐标变换关系可以由下式确定:

$$x - x_c = r \cos \theta, \quad y - y_c = r \sin \theta, \quad (2)$$

其中, (x_c, y_c) 是对称中心在直角坐标系中的坐标。极坐标中, 由于某个像素点处的畸变只与该点与对称中心的距离, 即径向坐标有关, 而与该点的角坐标无关, 则理想图像与畸变图像间的坐标变换关系可以变成如下的形式:

$$r' = T_r[r] \quad (3)$$

r 是理想图像上像素点的极坐标, r' 是畸变图像上点的坐标。上述变换可用多项式来近似:

$$r' = \sum_{i=0}^n a_i r^i \quad (4)$$

根据数值计算的理论, 可以计算出未知系数 a_i 。为确定多项式的未知系数, 需要选取一系列的对应点, 构成相应的对应关系 $r_1 \rightarrow r'_1, r_2 \rightarrow r'_2, \dots, r_L \rightarrow r'_L$, 有了这些对应关系, 再根据拟合多项式的参数求解方法, 就可以得到理想图像与畸变图像间的几何变换关系式。

2.2 灰度校正

若变换后的坐标不是刚好落在实际图像的像素点上, 就需要通过一种方法来计算出这一点的灰度级, 这就是灰度校正。为了提高校正精度, 较好地保持图像边缘细节, 采用三次卷积法实现灰度校正。这种方法要求在变换后的坐标附近能找到 16 个邻点, 设它们排列成的灰度矩阵为:

$$B = \begin{bmatrix} f([x] - 1, [y] - 1) & f([x] - 1, [y]) & f([x] - 1, [y] + 1) & f([x] - 1, [y] + 2) \\ f([x], [y] - 1) & f([x], [y]) & f([x], [y] + 1) & f([x], [y] + 2) \\ f([x] + 1, [y] - 1) & f([x] + 1, [y]) & f([x] + 1, [y] + 1) & f([x] + 1, [y] + 2) \\ f([x] + 2, [y] - 1) & f([x] + 2, [y]) & f([x] + 2, [y] + 1) & f([x] + 2, [y] + 2) \end{bmatrix}$$

则坐标点处的灰度级近似为:

$$f(x, y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{c} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= [S(1 + \Delta y), S(\Delta y), S(1 - \Delta y), S(2 - \Delta y)] \\ \mathbf{b} &= [S(1 + \Delta x), S(\Delta x), S(1 - \Delta x), S(2 - \Delta x)]^T \\ &(\Delta x = x - [x], \Delta y = y - [y]) \end{aligned}$$

式中, $S(\omega)$ 函数为:

$$S(\omega) = \begin{cases} 1 - 2|\omega|^2 + |\omega|^3, & |\omega| < 1 \\ 4 - 8|\omega| + 5|\omega|^2 - |\omega|^3, & 1 \leq |\omega| < 2 \\ 0, & |\omega| \geq 2 \end{cases}$$

3 校正过程

基于图像处理的畸变校正过程大体是这样的。首先将理想图像的像素点坐标 (u, v) , 变换到极坐标系下 (r, ϕ) , 再由(4)式求得实际畸变图像上的对应点的极坐标 (r', ϕ) , 根据(2)式进行坐标反变换, 求得对应点的笛卡儿坐标 (x, y) 。此时, 得到的坐标值往往不是整数, 也就不能正好落到畸变图像的像素点上。为此, 必须利用灰度校正技术, 计算出 (x, y) 点的灰度, 用此灰度来填充理想图像上的点 (u, v) 。当对理想图像上的每一点都用上述过程进行处理后, 就重建了无畸变的理想图像, 完成了畸变校正的过程。

为了实现上述的校正过程, 需要确定畸变图像的对称中心和(4)式中的多项式系数, 这可以利用待校正系统对标准的校正样板成像, 比较校正样板和它的带有畸变的像来实现。

3.1 点阵样板

点阵样板的图案如图 1 所示, 圆点按六角形排列, 每一点与其六个邻点的距离都是相同的, 同时圆点在三个方向 $(0^\circ, 60^\circ, 120^\circ)$ 上排列成直线, 并且在每条直线上的点, 其间距是相同的。

3.2 确定对称中心

通过校正样板的图像可方便地确定像面的对称中心。众所周知, 对于畸变的光学系统, 物空间中的直线在像空间中一般不再是直线, 而只有通过对称中心的直线是例外。根据这种性质, 在点阵样板的图像上, 只有通过对称中心的直线点列仍旧排列为直线, 而其余偏离对称中心的直线将有不同程度的弯曲, 如图 2 所示。由于点阵在三个方向上成直线排列, 因而在样板图像上就可以找到三条最接近于直线排列的点列, 用三条直线拟合相应的点列, 这三条直线交点, 就可近似认为是像面对称中心的位置。

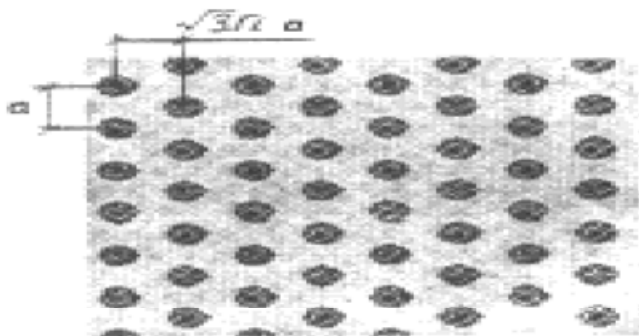


Fig. 1 Correction templet

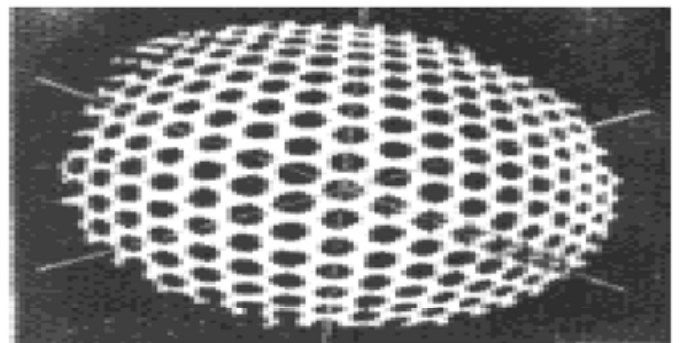


Fig. 2 Determination of the optical center

3.3 寻找对应像素点

为了确定畸变图像和无畸变图像间变换函数的系数, 需要一组坐标对应关系 $r_0 \rightarrow r'_0, r_1 \rightarrow r'_1, \dots, r_n \rightarrow r'_n$, 也就是要在理想样板图像上选定一些像素点, 并且找到它们在实际样板图像上对应的位置。在理想图像上选定的像素点集合, 称为样点集合。在实际图像上相对应的像素的集合, 称为对应点集合。利用点阵样板的结构参数和它的实际图像, 可以确定这两个集合中各像素点的坐标。

4 校正实例

校正实验是在微机上进行的, 利用图像采集卡完成图像的数字化, 并与软件配合, 实现图像的采集、存贮及各种处理。被校正光学系统是一台医用光纤内窥镜, 由于探头尺寸的限制以及较宽的观察视角的要求, 医用内窥镜设计允许存在较大的畸变。试验中, 为了便于观察校正效果, 另制作了一个栅格图案, 并对其图像进行校正。试验结果如图 3(b) 所示。同时, 也采集了一幅实物图像进行校正, 是一篇文章的图像。校正前, 字母有明显的变形, 校正后的图像减小了这种变形, 较好的反映了字母的原貌, 如图 3(d) 所示。

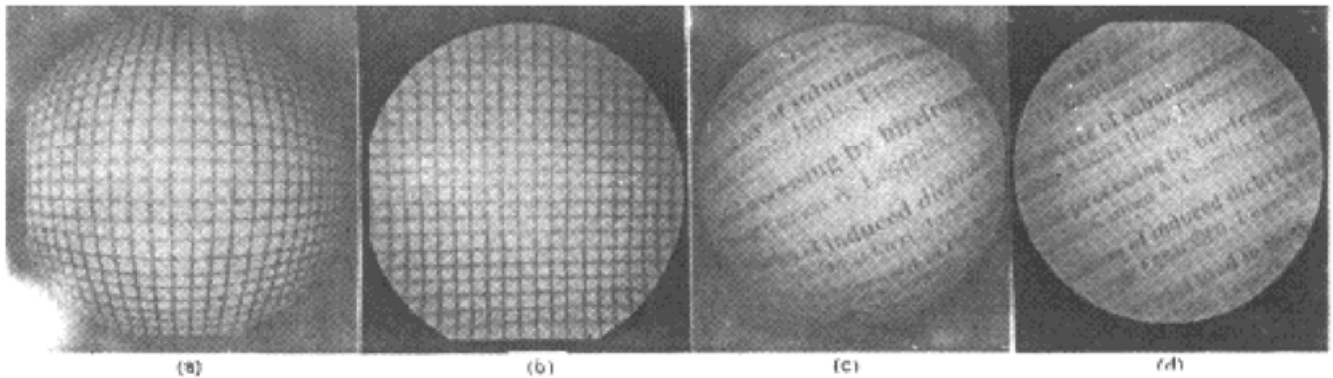


Fig. 3 Correction results. (a), (c) Before correction; (b), (d) After correction

5 讨 论

对畸变图像的校正计算, 不可能完全准确的恢复原来的图像。这是因为影响畸变校正精度的因素是多方面的。其中对校正算法精度影响较大的几种误差有: 对称中心估算误差、截取误差、插值误差和灰度校正误差等。为了评价校正效果, 定量化分析校正达到的精度是非常必要的。作者对校正前后视场各位置的畸变量作了比较, 如表(1)所示。表中数据是以图 2 中所选圆点中心坐标由下式计算得到的:

Table 1. Comparison of distortion before and after correction

view field(r') distortion($\delta Y'$)	1/7Y'	2/7Y'	3/7Y'	4/7Y'	5/7Y'	6/7Y'	Y'
before correction/%	0.1	3.0	6.8	11.0	17.0	22.3	27.9
after correction/%	0.1	0.6	0.6	2.2	2.3	2.0	3.6

$$\delta Y' = (1 - r'/r) \times 100\% \tag{6}$$

其中, r' 是畸变图像上圆点中心的极坐标, r 是相应的理想值, 可由样板参数计算得出。

小 结 用数字图像处理技术来实现光学系统的畸变校正,是畸变像差校正的一种新的尝试。它非常适用于那些很难用光学像差校正方法来实现其畸变校正的光学系统。通过对它们所成的畸变图像进行校正处理,不但能够减小图像的目视失真,还能够使图像达到测量的要求,做为定量分析的基础。本文利用标准点阵样板实现了广角光学系统畸变的数字校正。整个校正过程不需要其它的光学测量仪器,也不需要知道光学系统的结构参数,只是根据系统畸变特征进行校正,因而校正过程简单、方便,易于实现。目前,校正算法是在微机上用软件实现的,若将其固化为硬件加入到仪器中,则可以实现实时校正畸变,从而使该校正方法成为一种比较实用的技术,这也是本文作者进一步研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Warren. E. Smith, Nimish Vakil, Seth. A. Maislin, Correction of distonion in endoscope images. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 1992, **MI-11**(1) : 117~ 122
- [2] Hideaki Haneishi, Yutaka Yagihashi, Yoichi Miyake, A new method for distortion correction of electronic endoscope images. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 1995, **MI-14**(3) : 548~ 555
- [3] Yoshihiko Nomura, Michihiro Sagara, Hiroshi Naruse *et al.*, Simple calibration algorithm for high-distortion-lens camera. *IEEE Trans. Pattern Anal. & Matine Intell.*, 1992, **PAMI-14**(11) : 1095~ 1099
- [4] Sheng-Wen Shin, Yi-ping Hung, Wei-Song Lin, When should we consider lens distortion in camera calibration. *Pattern Recognition*, 1995, **28**(3) : 447~ 461
- [5] Sheng-Wen Shin, Yi-Ping Hung, Wei-Song Lin, Accurate Linear technique for camera calibration considering lens distonion by solving an eigenvalue problem. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(1) : 138~ 149

Distortion Correction of the Wide-Angle Optical System with Digital Technology

Liu Hang Yu Doayin Mao Yi Du Ji

(College of Precise Instrument and Photoelectronic Engineering, Tianjin University, 300072)

(Received 5 April 1997)

Abstract In addition to using the aberration correction theory, optical distortion can be corrected with the digital image processing technology. This is suitable to some optical system such as the optical system for endoscope and machine vision, which distortion is difficult to be corrected through normal optical method because of some kind of limitation. Firstly, We discussed the correcting theory by the digital image processing technology. Then, the correcting method was introduced. To assess the accuracy, we analyzed the source of the correction error. And the correction evaluation were proposed to measure the error.

Key words distortion correction, geometrical distonion, gray correction, endoscope, wide-angle objective lens.