

# 一种光学镜头摄像机图象几何畸变的修正方法

廖士中 高培焕 苏 艺 王大鹏

(辽宁师范大学计算机科学系软件教研室, 计算机应用研究所, 大连 116029)

**摘 要** 由于光学镜头会产生几何畸变, 并且摄像机成像平面与景物平面间存在着倾角和转角, 因而光学镜头摄像机获取的图象存在着非线性的几何畸变, 在对图象进行检测和定量分析之前, 应消除这些畸变. 为此, 应用多项式变形技术和双线性插值方法, 研究了一种摄像机拍摄图象几何畸变的修正方法, 并讨论了控制点的选取方法. 实验结果表明, 应用三次多项式变形技术, 选取少量控制点即可得到理想的校正结果. 该方法简便实用, 可用于固定条件下摄像机操作平台和生产线工业检测不失真图象的获取任务. 实际应用表明, 该方法是可靠有效的.

**关键词** 多项式变形 双线性插值 几何校正

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)07-0593-04

## A Geometric Rectification Method for Lens Camera

LIAO Shi-zhong, GAO Pei-huan, SU Yi, WANG Da-peng

(Department of Computer Science, Institute of Computer Applications Liaoning Normal University, Dalian 116029)

**Abstract** Images with severe geometrical distortions, which are induced by camera lens and position, must be corrected before extracting quantitative measurements. In this paper, we present a geometric calibration method for lens camera by applying polynomial warping and bilinear interpolation, and discusses the selection pattern of control points. First, we implement a general polynomial warping algorithm and a bilinear interpolation algorithm in Visual C++ 5.0, then we demonstrate that, for common optical lens, images with geometric distortions can be rectified with cubic polynomial warping method using only a few control points. This method is simple and practical, and can be used in camera-fixed situations, such as operating table and on-line industry inspection, to acquire lossless images. Practical application in lottery printing quality inspection shows that the method is reliable and valid.

**Keywords** Polynomial warping, Bilinear interpolation, Geometric rectification

## 0 引 言

在用光学镜头摄像机采集图象时, 由于受景物对象与摄像机三维空间相对位置关系、镜头畸变和摄像机质量等因素的影响, 其采集的图象存在着几何畸变. 在进行基于图象分析的运动检测、模式匹配等定量分析时, 就需要对有几何畸变的图象进行校正或对摄像机进行几何标定, 以产生精确的不失真的图象. 这包括空间坐标变换和象素点灰度插值两部分工作. 其中, 空间坐标变换是关键性的一步. 参考文献[1]介绍了空间坐标变换的二元二次多项式法, 文献[2, 3]

则进一步介绍了更高次的多项式变形技术和曲面的高斯拟合, 以及椭圆拟合方法; 关于象素点灰度插值方法, 文献[1, 3]介绍了双线性插值方法. 然而, 对于具体问题, 还需要探讨各种方法的适用性, 以便确定更简单有效的方法.

本文应用多项式变形技术和双线性插值方法, 开发了一种简便实用的光学镜头摄像机拍摄图象几何畸变的修正方法, 并对其进行了实验研究, 同时讨论了控制点和多项式次数的选取问题. 研究表明, 在一般情况下, 对使用广角监控镜头的摄像机, 只需应用三次多项式变形技术和双线性插值法, 选取十几个控制点, 就可消除镜头产生的桶形畸变和由于摄像机与

景物平面的倾斜产生的扭曲, 并得到理想的校正图象. 该方法已实际应用于彩票喷印检测系统中, 效果良好.

### 1 空间坐标变换

摄像机图象的几何畸变显然是非线性的. 可用坐标间的多项式变换来表示该非线性变换.

令点  $(x, y)$  是校正前图象任一点, 则采用多项式变形技术时, 点  $(x, y)$  与校正后图象的对应点  $(u, v)$  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,  $a_{ij}, b_{ij}$  为多项式的系数,  $n$  为多项式的次数.

按最小二乘法, 若要使拟合误差平方和  $\epsilon$  为最小, 也就是使

$$\epsilon = \sum_{l=1}^L \left| x_l - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u_l^i v_l^j \right|^2$$

最小, 则需求

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial a_{st}} = 2 \sum_{l=1}^L \left| \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u_l^i v_l^j - x_l \right| u_l^s v_l^t = 0$$

由此得到

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^L \left| \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u_l^i v_l^j \right| u_l^s v_l^t &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} \left| \sum_{l=1}^L u_l^{i+s} v_l^{j+t} \right| \\ &= \sum_{l=1}^L x_l u_l^s v_l^t \end{aligned} \quad (2)$$

同理可得

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^L \left| \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u_l^i v_l^j \right| u_l^s v_l^t &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} \left| \sum_{l=1}^L u_l^{i+s} v_l^{j+t} \right| \\ &= \sum_{l=1}^L y_l u_l^s v_l^t \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $L$  为控制点对的个数;  $s = 0, 1, 2, \dots, n, t = 0, 1, \dots, n-s, s+t \leq n$ .

令  $M = (n+1)(n+2)/2$ , 式(2)和式(3)为两组由  $M$  个方程组成的线性方程组, 每个方程组包含  $M$  个未知数. 则通过分别解上述二式, 即可求出  $a_{ij}, b_{ij}$ , 将其代入式(1)就可实现两个坐标系之间的变换.

采用矩阵表示时, 式(2)和式(3)可表示为

$$T\mathbf{a} = \mathbf{X} \quad (4)$$

和

$$T\mathbf{b} = \mathbf{Y} \quad (5)$$

其中,  $T$  是  $M$  阶方阵,  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}$  是  $M$  维向量.

### 2 灰度插值方法

象素点灰度插值是采用双线性内插法. 该方法是利用 4 个邻点的灰度在二个方向上作线性内插, 其产生的图象没有灰度不连续的缺点.

双线性内插法如图 1 所示. 其中,

$$\begin{aligned} f(i+u, j+v) &= (1-u)(1-v)f(i, j) + \\ & (1-u)v f(i, j+1) + \\ & u(1-v)f(i+1, j) + \\ & uv f(i+1, j+1) \end{aligned} \quad (6)$$

这样, 在找出校正图象象素点与原图象象素点对应关系后, 就可通过在原图象中插值, 而得到校正后象素点的灰度值.

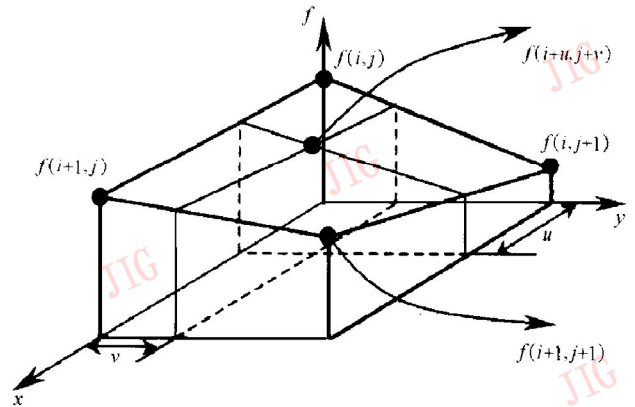


图 1 双线性插值方法

### 3 方法的实现

我们在 Visual C++ 5.0 中采用面向对象的方法, 实现了通用的任意次数多项式空间坐标变换方法和任意矩形区域的图象点灰度值双线性插值方法的处理.

实现的关键是按照式(2)和式(3)计算出式(4)和式(5)中的矩阵  $T$  和向量  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ .

令  $n$  为多项式的次数,  $M = (n+1)(n+2)/2, T = [t_{ij}], k = (2n+3-i)/2 + j$ . 再设置数组  $P[M][2]$ , 使得  $P[k][0]$  为式(1)中第  $k$  项  $u$  的幂,  $P[k][1]$  为第  $k$  项  $v$  的幂.  $P$  可如下设置:

```
for (int k=0; int i=0; i<=n; i++)
    for (int j=0; j<=n-i; j++) {
        P[k][0] = i; P[k+1][1] = j; }
```

$$\text{令 } t_{ij} = \sum_{l=1}^L u_l^i v_l^j$$

则有

$$P_u = P[i][0] + P[j][1] \quad (7)$$

$$\text{且 } P_v = P[i][1] + P[j][1]$$

这样,就可计算出任意  $n$  次多项式空间坐标变换的矩阵  $T$ . 且向量  $X$  和  $Y$  也可类似地算出. 解线性方程组(4)和(5), 解出系数向量  $a$  和  $b$ . 代入式(1)即实现了空间坐标间的转换.

多项式变形技术的算法:

输入: 多项式次数  $n$ ; 控制点对个数  $L$ ; 控制点数组  $X, Y, U, V$ .

输出: 多项式系数向量  $a$  和  $b$ .

具体处理过程:

(1) 计算矩阵  $T$

计算出  $T$  的阶数  $M$ ;

置  $P$  的初值;

按公式(7)计算出  $T$  的每个元素;

(2) 计算向量  $X$  和  $Y$

利用  $P$  和数组  $X, Y, U, V$  计算出  $X$  和  $Y$ ;

(3) 解线性方程组

用高斯约当法求解线性方程组(2)和(3);

(4) 返回结果

返回多项式的系数向量  $a$  和  $b$ .

实际上,我们不仅实现了从  $u, v$  到  $x, y$  的变换,而且实现了从  $x, y$  到  $u, v$  的变换.

关于象素点双线性插值方法的实现需要说明两点: 一是为了便于灵活应用和实现开窗处理,可选取任意矩形区域进行双向变换;二是变换过程中,若在原图象中找不到插值象素点,则设目标象素点为最亮点.

## 4 实验与结果分析

实验环境如下:

① 加拿大 Matrox 公司的 MeteorII / MC 图象采集板;

② 日本 TOA C-CC31 摄像机;

③ 日本精工 SSE0612 光学镜头,  $F = 1.2$ ,  $f = 6\text{mm}$ ;

④  $16 \times 16$  正方形网格测试图, 见图 2(a);

⑤ 存在镜头畸变、偏转和倾斜的摄像机获取图象(见图 2(b) 和图 3).

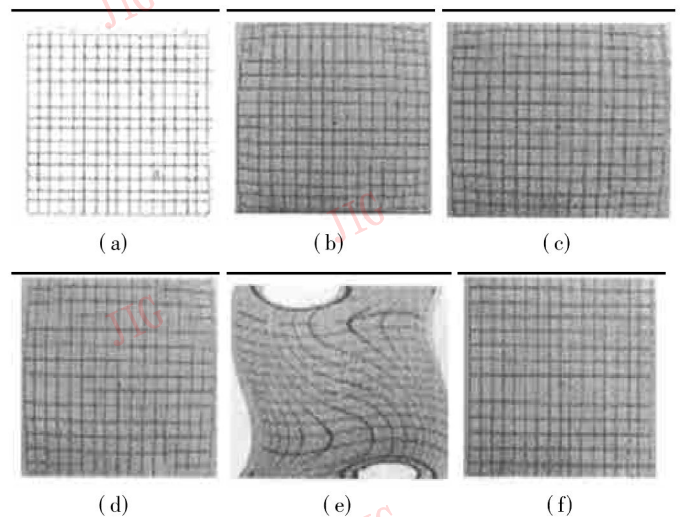


图2 垂直条件下的图象及校正结果

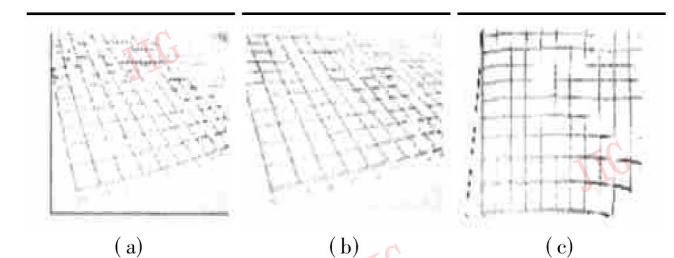


图3 倾斜条件下的图象及校正结果

实验数据共包括 33 对控制点. 这些控制点对可分为 5 类:

(1) 图象的中心点;

(2) 测试图图象的 4 个顶点及 4 条边的中点;

(3) 在中心点周围的 4 个网格交点;

(4) 中间面积为整幅图象  $1/4$  的矩形的顶点和边的中点;

(5) 测试图图象顶点周围的  $4 \times 3$  个邻点.

这些控制点对可充分控制, 并约束多项式变形结果. 具体实验数据及选取方法见表 1.

实验结果可概括如下:

(1) 当采用二次多项式变形技术, 在选取了 9 个至 33 个控制点对数据进行校正时, 其结果均校正不了获取的畸变图象(图 2(b)), 其中 9 个控制点对的校正结果见图 2(c), 33 个控制点对的校正结果见图 2(d).

(2) 当采用三次多项式变形技术, 若选取 9 个控制点对时, 尚校正不了获取的畸变图象(图 2(b)), 且有严重的失控现象, 见图 2(e); 但选取 11 个控制点对后, 即得到可接受的校正结果; 而且选取 13 个控制点对和 33 个控制点对的校正结果基本没有区别, 见图 2(f).

(3) 对倾斜情况下获取的畸变图象, 二次多项式变形技术校正不了; 而三次多项式变形技术不仅

表1 控制点数据

编号	校正前坐标		校正后坐标		注释
	$x$	$y$	$u$	$v$	
1	398	284	398	284	中心点
2	398	5	398	-10	4个顶点及四边中点
3	398	567	398	578	
4	76	285	62	285	
5	712	283	734	283	
6	94	21	62	-10	
7	691	20	734	-10	
8	85	557	62	578	
9	700	551	734	578	
10	356	284	356	284	
11	398	326	398	326	
12	440	284	440	284	
13	398	242	398	242	
14	397	160	397	158	中间矩形边的中点
15	398	409	397	410	
16	230	284	230	284	
17	562	284	566	284	
18	124	52	104	32	
19	661	52	692	32	
20	118	522	104	536	
21	669	518	692	536	
22	232	162	230	158	中间矩形的顶点
23	558	160	566	158	
24	232	408	230	410	
25	561	407	566	410	
26	126	17	104	-10	
27	89	55	62	32	
28	659	18	692	-10	
29	695	55	734	32	
30	704	514	734	536	
31	667	554	692	578	
32	121	560	104	578	
33	81	520	62	536	

可校正光学镜头的几何畸变,还可消除透视效果(见图3),其中,图3(a)是摄像机获取的图象,图3(b)是消除镜头固有畸变后得到的图象,图3(c)是进一步消除透视效果后得到的图象。

从实验结果可以看出,二次多项式变形技术比较稳定,但校正不了畸变比较复杂的图象;而三次多项式变形技术比较灵活,易于通过选取不同的控制点对加以控制,因此无论对光学镜头所固有畸变,还是对透视和倾斜所产生的畸变都有较好的校正效果。

## 5 结束语

文献[1]中指出,镜头的几何校正可采用二次多项式法,文献[3]中,采用五次多项式变形技术来校

正鱼眼镜头。本文的研究表明,对广角镜头,即使景物图象平面与摄像机成像平面存在着夹角,通过选取合适的控制点对数据,使用三次多项式变形技术,也可校正出理想的图象,从而可对图象作定量分析。我们所研究的光学镜头摄像机图象几何畸变修正方法,已在彩票喷印检测系统中得到实际应用,可校正出理想的检测图象,从而简化了定量分析过程,取得了较好的效果。

## 参考文献

- 1 荆仁杰,叶秀清,徐胜荣等.计算机图象处理.杭州:浙江大学出版社,1990,193~198.
- 2 Shah S, Aggarwa J K. A simple calibration procedure for fish-eye (high-distortion) lens camera. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994, 3422~3427.
- 3 Castleman K R. Digital Image Processing(数字图象处理).北京:清华大学出版社,1998,501~507.



廖士中 1964年生,博士,教授。现任辽宁师范大学计算机应用研究所所长。主要研究领域包括空间推理、定性推理、视频内容检索和人工智能应用基础等。发表论文20余篇。



高培焕 1965年生,工程师。主要研究领域为图象处理和计算机应用。发表论文8篇。



苏艺 1964年生,实验师。主要研究领域为图象处理和计算机网络。发表论文5篇。



王大鹏 1968年生,讲师。主要研究领域为人工智能应用和计算机网络。发表论文5篇。