

一种实用广角成像系统几何畸变数字实时校正方法

邓 雷, 龚惠兴

(上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 图像的几何畸变广泛存在于应用广角镜头的成像系统, 畸变的存在尤其不利于基于图像分析的定量分析领域。针对一个基于图像分析的红外角位置测量系统, 提出一种实用广角成像系统几何畸变数字实时校正方法, 阐述其畸变参数的标定方法, 图像的空间变换和灰度插值方法, 基于实时性要求, 给出畸变校正的算法步骤, 实验表明, 此广角成像系统几何畸变数字实时校正方法有效提高了角位置测量系统的测量精度, 并具有一定的实时性能。

关键词: 畸变校正; 图像处理; 广角成像系统;

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2006)10-0571-05

A Real Time Digital Distortion Correction Method of Wide-Angle Imaging System

DENG Lei, GONG Hui-xing

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Geometry distortion occurred widely in wide-angle optical imaging system. It is especial disadvantageous to the quantitative analysis based on image analysis technique. In this paper, a real time digital distortion correction method of wide-angle imaging system is presented, and the methods of distortion parameter scale, the spatial transform of image and gray scale value are clarified. In order to meet the real time performance, algorithmic steps are detailed. The results show that the real time digital distortion correction method of wide-angle imaging system has improved the measurement precision of angular position measurement system, and its run time in a DSP compute platform meet the requirements of general real time system.

Key words: distortion correction; image processing; wide-angle imaging system

引言

图像的几何畸变广泛存在于应用广角镜头的成像系统, 畸变的存在尤其不利于基于图像分析的定量分析领域。例如, 在基于图像分析和计算视觉的位置测量系统中, 图像畸变直接影响位置测量精度, 因此, 在此类系统中, 必须尽可能减少广角镜头成像引入的测量误差。

广角成像系统几何畸变数字实时校正算法需要解决两个主要问题, 一是光学系统几何畸变参数标定, 二是根据标定的畸变参数实时完成图像畸变校正。畸变参数标定是在摄像机空间坐标和像面坐标之间建立对应关系, 通常采用畸变模型法或者直接映射法实现畸变参数的标定。畸变模型法就是建立光学系

统的畸变模型, 例如, 根据光学系统径向与切向的畸变特性, 可以建立径向畸变模型, 切向畸变模型; 或者, 根据几何畸变的特性, 建立线性畸变模型和非线性畸变模型等等。通过畸变模型的建立, 并经过实验标定模型参数, 就能利用少量的模型参数描述光学系统的畸变特性, 从而在图像处理中根据这些模型参数实现畸变校正。直接映射法就是直接经过实验标定像面坐标和空间坐标的对应关系, 建立位置映射表, 对图像进行空间位置变换就实现畸变校正。

本文提出的实用广角成像系统几何畸变数字实时校正方法设定用于一个红外角位置测量系统, 该红外角位置测量系统具有实时性要求。几何畸变参数采用直接映射方式建立摄像机空间坐标与像面坐标的关联。校正算法运行于 DSP 平台。经过实验, 本文提出畸变校正方法能够明显提高测角精度, 并具有一定的实时性能。

收稿日期: 2006-04-17

作者简介: 邓雷 (1976—), 云南宜良人, 博士, 研究方向包括光电遥感、图像处理及智能仿生。

1 几何畸变参数标定

对于一个角位置测量系统，我们希望具有一个理想的角度线性光学系统。即像高 h 和视场角 θ 成线性关系，这种成像方式的数学关系如下：

$$h=f\theta \tag{1}$$

式中： f 为光学系统焦距。通常广角折射式光学系统设计采用这样的 $F-\theta$ 镜头原理，然而，实际光学系统并不严格满足此关系，这里，畸变校正的目标就是通过有畸变的数字图像进行处理，使得畸变校正后的图像满足公式(1)所描述的 $F-\theta$ 关系。

在角位置测量系统应用中，如图 1 所示，摄像机的坐标系的三根轴是 x,y,z ，设摄像机的成像面与 $y-x$ 平面重合，光学系统光轴和 y 轴重合，设 P 点为目标点，此时，目标相对摄像机具有方位角 θ 、 φ 。点 P 经过理想的 $F-\theta$ 光学系统成像后成为像面上的像点 Q ，在像面上坐标为 (x,y) 。

根据公式(1)，此处，像高 h 即为矢径 r ，视场角 θ 为图 1 中方向角 θ ，可以导出点 P 的方向角 θ 、 φ 与像面投影点 Q 对应像面坐标 x 、 y 的理想关系：

$$\begin{cases} x=r\cos\psi=f\theta\cos\varphi \\ y=r\sin\psi=f\theta\sin\varphi \end{cases} \tag{2}$$

为了使角位置测量系统能具有像素级测角精度，

采用直接映射法直接经过实验标定像面坐标和空间坐标的对应关系，建立位置映射表。光学畸变标定系统如图 2 所示。

光学系统与探测器组件经光学校准安装在一个高精度二维转台上，采用平行光管模拟无穷远处的点目标，红外光经过光学系统会聚后在面阵探测器上成像。探测器输出的图像数据利用图像采集卡采集后送到计算机。计算机同时可以控制二维转台的角位置。转台控制精度取决于角位置测量系统要求的测量精度。

设面阵探测器像元数为 $M\times N$ ，以面阵列中心为坐标原点，建立像面坐标。面阵上一个像元的像面坐标可以表示为 x_{ij}, y_{ij} ($i=1,\cdots,N; j=1,\cdots,M$)。平行光管发出的平行光会聚在一个像元上，在计算机控制下，设定转台方向角 θ 、 φ 以调整平行光的入射角，当像元 (x_{ij}, y_{ij}) 的能量最大时，记录此时的转台方向角 $(\theta_{ij}, \varphi_{ij})$ ，对每一个像元进行测量，即可得到实际位置映射表：

$$f:(x_{ij}, y_{ij})\rightarrow (\theta_{ij}, \varphi_{ij}) \tag{3}$$

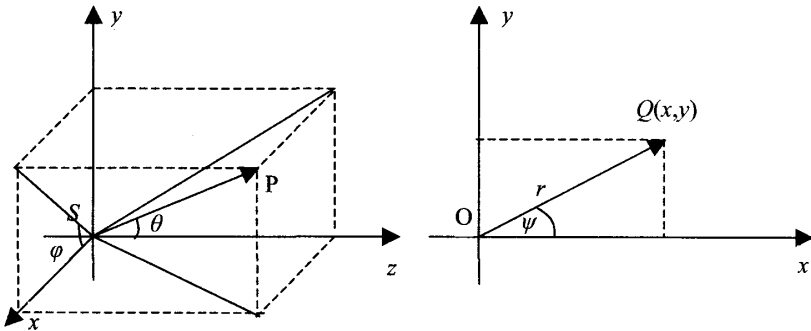


图 1 广角折射式光学系统成像方式 Fig.1 Wide-angle refractive optical system imaging principle

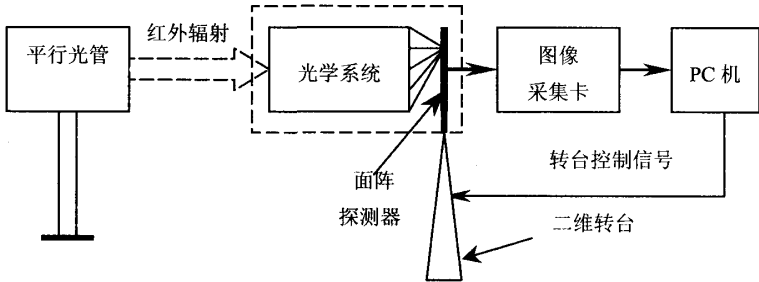


图 2 光学畸变标定系统 Fig.2 Optical distortion calibration system

2 空间变换

空间变换就是对存在畸变的图像进行像素重新排列以恢复空间关系。由于几何畸变参数标定采用了直接位置映射方法，在对存在畸变的图像进行校正时的空间变换算法就显得直截了当。

设我们希望几何畸变校正后光学系统与图像之间的位置关系具有公式(1)所描述理想 $F-\theta$ 关系。那么图像上任一像元 (x_{ij}, y_{ij}) 在理想 $F-\theta$ 关系中对对应位置方位角 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ ，根据公式(2)，对应关系可以表示为：

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{ij} = \sqrt{\left(\frac{x_{ij}}{f}\right)^2 + \left(\frac{y_{ij}}{f}\right)^2} \\ \hat{\phi}_{ij} = \tan^{-1} \frac{y_{ij}}{x_{ij}} \end{cases} \quad (4)$$

由于实际畸变的存在，像元 (x_{ij}, y_{ij}) 对应的理想位置方位角 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 和实际位置方位角 (θ_{ij}, ϕ_{ij}) 存在差异。为校正这一差异，在实际位置映射表里查找与位置方位角 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 对应的像元位置 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ ，用畸变图像在像元位置 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 处的灰度值替换畸变图像在像元位置 (x_{ij}, y_{ij}) 处的灰度值，即完成了空间变换。

以上空间变换过程可以从物理角度理解。对于一幅存在畸变的图像，其像元 (x_{ij}, y_{ij}) 位置处的灰度值反映了方位角为 (θ_{ij}, ϕ_{ij}) 的场景亮度。如果图像不存在畸变，则应该反映方位角为 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 的场景亮度。而方位角为 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 的场景点在图像存在畸变的情形下成像于像元位置为 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 处，并且点 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 处的灰度值反映了 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 的场景点处的场景亮度，因此，把像元 (x_{ij}, y_{ij}) 位置处的灰度值替换为点 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 处的灰度值。这样，像元 (x_{ij}, y_{ij}) 位置处的灰度值将反映方位角为 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 的场景亮度。实现了畸变校正。

3 灰度插值

在空间变换中，像元 (x_{ij}, y_{ij}) 位置处的灰度值在没有图像畸变时应该反映方位角为 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 的场景亮度，而在位置映射表中，由于像元位置的离散性，不一定能正好找到一组 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 和 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 相对应，通常情况下，可以在位置映射表中找到几组 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ ，方位角 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 处的目标应成像在这几组 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 围成的区域中，就需要通过一定的手段求出这一点的灰度值，用其周围一些点灰度值来计算该点的灰度值。这个过程就是灰度插值。

确定中间像元灰度值的灰度插值方法有许多种。最简单的是最近邻插值，也叫零阶插值。最近邻插值就是将离 (x, y) 点最近的像素灰度值作为 (x, y) 点的灰度值赋给原始图像 (u, v) 处像素。这种方法的缺点是有时候不够准确。样条插值是精确度比较高的插值方法，但它的缺点是计算量较大。

双线性内插法是一种较好的折衷方法。如图3所示，它利用 (x, y) 点的4个最近邻像元灰度值在两个方向上作线性插值，其产生的图像没有灰度不连续的缺点。双线性内插法往往优于最近邻插值法，而且在程序复杂性和运算时间上，仅由少量增加。

当变换后的坐标为 $f(i, j)$ 时，它周围可能有四个邻点，可以通过以下方法求出该点灰度值。设 $u = i - [i]$ ， $v = j - [j]$ ，则：

$$\begin{aligned} f(i+u, j+v) = & (1-u)(1-v)f(i, j) + (1-u)vf(i, j+1) \\ & + u(1-v)f(i+1, j) + uvf(i+1, j+1) \end{aligned} \quad (5)$$

这样，在找出校正图像像素点与原图像像素点对应关系以后，就可以通过在原图中插值，而得到校正后像素点的灰度值。

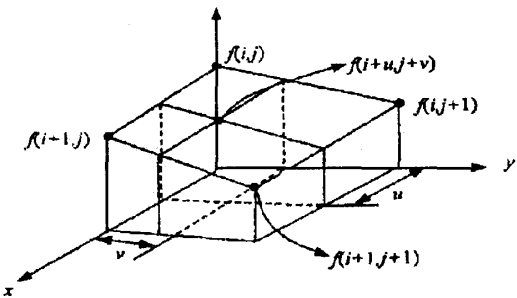


图3 双线性内插法示意图
Fig.3 Bilinear interpolation principle

4 算法实现

在实际应用中，我们设定广角成像系统几何畸变数字校正算法运行于一个 DSP 平台上，通过软件实现畸变校正。这就对算法的实时性提出了要求。为了提高算法实时运行时间，畸变校正算法实现分为两部分，参数计算和实时校正。

参数计算预先算出一个查找表，如果系统具有足够空间的非易失性存储器，可以把查找表作为常数表格保存，以供实时校正时查询。当系统的非易失性存储器空间不足，而有较大数据存储器时，可以只保存位置映射表，在程序初始化阶段进行参数计算，生成查找表以供实时查询，这样的参数计算只需一次可以完成，不会增加畸变校正的实时运算量。查找表的数据结构如图4所示。

图 4 畸变校正查找表结构图

Fig.4 Look Up Table for distortion correction

| | | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 像元 | 插值域 | 插值域 | 系数 | 系数 | 系数 | 系数 |
| (0,0) | x_{00} | y_{00} | a_{00} | b_{00} | c_{00} | d_{00} |
| 像元 | 插值域 | 插值域 | 系数 | 系数 | 系数 | 系数 |
| (0,1) | x_{01} | y_{01} | a_{01} | b_{01} | c_{01} | d_{01} |
| ⋮ | | | | | | |
| ⋮ | | | | | | |
| 像元 | 插值域 | 插值域 | 系数 | 系数 | 系数 | 系数 |
| (i,j) | x_{ij} | y_{ij} | a_{ij} | b_{ij} | c_{ij} | d_{ij} |
| ⋮ | | | | | | |
| ⋮ | | | | | | |
| 像元 | 插值域 | 插值域 | 系数 | 系数 | 系数 | 系数 |
| (m,n) | x_{mn} | y_{mn} | a_{mn} | b_{mn} | c_{mn} | d_{mn} |

查找表中的一项对应一个像元位置。插值域 x_{ij} 和插值域 y_{ij} 为插值域的左上角像元位置,即待插值点坐标位于点 (x_{ij}, y_{ij}) 、 $(x_{ij}, y_{ij}+1)$ 、 $(x_{ij}+1, y_{ij})$ 和 $(x_{ij}+1, y_{ij}+1)$ 围成的矩形区域内,系数 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} 为双线性内插公式(5)系数。

实时校正部分对每一幅输入图像只需按像元索引查表,根据表内数据计算灰度值,再替换当前灰度值就可以完成对图像的畸变校正。设像元 (x, y) 处的灰度值为 $H(x, y)$,畸变图像上某像元位置为 (i, j) ,根据上述空间变换方式,该像元 (i, j) 的灰度值应替换为 $H(i, j)$,根据查找表数据,代入公式(6)可以求出 $H(i, j)$ 。

$$H(i,j)=a_{ij}H(x_{ij},y_{ij})+b_{ij}H(x_{ij},y_{ij}+1)+c_{ij}H(x_{ij}+1,y_{ij})+d_{ij}H(x_{ij}+1,y_{ij}+1)$$

(6)

参数计算算法描述如下:

- 1) 读入位置映射表;

2) 对一个像元位置 (i, j) , 计算像平面坐标 (x_{ij}, y_{ij}) 及其对应的理想场景方位角 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$;

3) 查找位置映射表,根据 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 找出4个相邻插值点的左上角点位置 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$;

4) 根据 $(\hat{\theta}_{ij}, \hat{\phi}_{ij})$ 计算插值系数 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} ;

5) 记录左上角点位置 $(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij})$ 和插值系数 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} , 生成查找表项;

6) 重复2)至5)直至所有像元的查找表项记录完成。

实时畸变校正算法描述如下:

- 1) 读入一幅存在畸变的待校正图像;

2) 对一个像元位置 (i, j) , 读出对应的查找表项;

3) 根据公式(6), 计算像元位置 (i, j) 应具有的灰度值 $H(i, j)$;

4) 重复2)至3)直至所有像元的灰度替换完成。

5 实验和结论

理想的 f - θ 关系即像高 h 和视场角 θ 成线性关系, 如公式(1)所描述。光学畸变导致了实际成像关系和理想关系具有偏差。图5显示了畸变后、校正后与理想值的对比情况。其中畸变曲线是一条经过 $(0, 0)$ 和 $(120, 67.5)$ 的弯曲的曲线, 而理想曲线则应该是通过 $(0, 0)$ 和 $(120, 67.5)$ 的直线。二者的偏差则显示了畸变的存在, 从中可以看出, 畸变产生的影响比较明显, 畸变校正是非常必要的。而校正曲线则是校正之后的角度与半径的对应关系。可以看出, 校正之后的曲线与理想曲线非常接近, 在一定程度上几乎可以认为是重合。

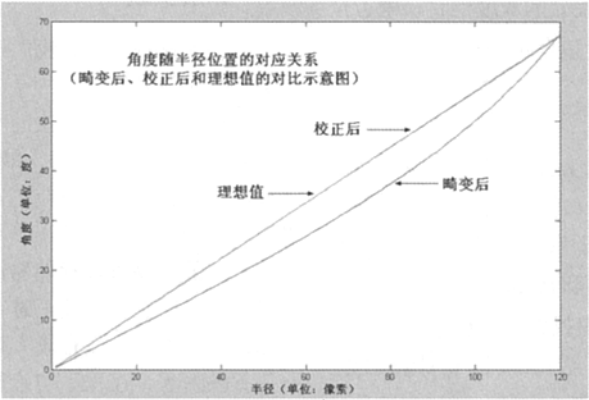


图 5 视场角随像高的变化曲线 (畸变后、校正后和理想值的对比)

Fig.5 Field angle vs. image height curve (distorted, corrected, and ideal)

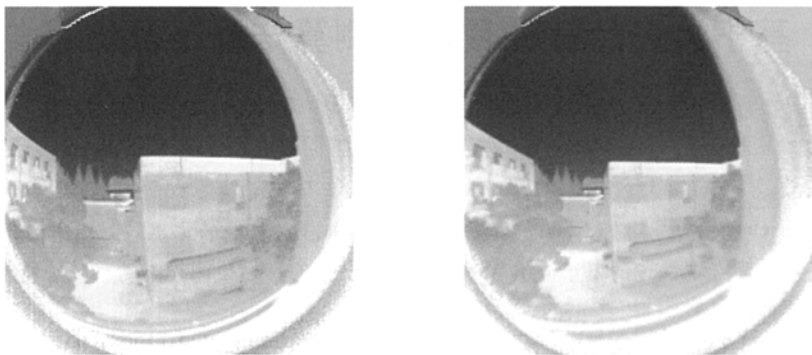


图 6 实际广角红外图像畸变校正结果（左图为畸变图、右图为校正图）

Fig.6 Distortion correction of a real wide angle infrared optical system (distorted picture on left, corrected picture on right)

表 1 校正前后角位置测量精度在不同视场范围内的分布对比情况

Table 1 Angle measure precision in different range of field angle

| 视场范围 | 0 | 1/4 | 2/4 | 3/4 | 1 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 角位置测量精度（校正前）/° | 0.0072 | 0.0391 | 0.1063 | 0.1266 | 0.3026 |
| 角位置测量精度（校正后）/° | 0.0030 | 0.0039 | 0.0057 | 0.0103 | 0.0120 |

图 6 是对户外实景的广角红外图像的校正效果图。可以看到，校正前的畸变图像产生很明显的桶形畸变失真，表现为整个图像都有外扩的趋势。尤其是在视场边缘附近，建筑物轮廓会由于畸变和实际目标产生很大的偏差，会产生扭曲、比例失调的视觉效果。而经过了畸变校正畸变失真得到了明显的校正。

在一个以 TMS320C6711 数字信号处理为核心，工作频率 150 MHz 的平台上，上述畸变校正算法运行时间小于 0.05 s。可以满足一定的实时性要求。

在基于图像分析和计算视觉的角位置测量系统中，表 1 给出了角位置测量系统的绝对精度再图像畸变校正算法的引入前后的测量数据。

由表 1 中数据可以看出，由于图像畸变校正算法的引入，角位置测量精度得到了明显改善，尤其在大视场角时，图像畸变是角位置测量的主要误差来源。本文提出的实用广角成像系统几何畸变数字实时校

正方法能够补偿大部分角位置测量误差，从而提高了角位置测量系统的测量精度。

参考文献：

[1] 张全发, 何金田. 提高广角成像系统几何畸变数字校正精度的方法[J]. 光学技术. 2001, (3): 52~56.
[2] 行麦玲, 刘贱平, 林家明, 等. 大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正[J]. 光学技术. 2003, (3): 120~122.
[3] 王欣刚, 宋建中, 顾海军, . 红外观察仪图像畸变的校正[J]. 光学精密工程. 2001, (1): 40~43.
[4] 刘航, 郁道银, 杜吉, 等. 广角成像系统光学畸变的数字校正方法[J]. 光学学报. 1998, (8): 149~153.

《红外技术》过刊信息

我编辑部尚存少量 2001 年到 2005 年的《红外技术》合订本，有意购买者请速与我编辑部联系。

联系人：张红
联系电话：0871-5105248