

# 一种适合摄像机非线性畸变校正的畸变模型

姚娜<sup>1,2</sup> 林招荣<sup>1</sup> 任超锋<sup>2</sup> 阳柯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京空间机电研究所, 北京 100076

<sup>2</sup>武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079

**摘要** 由于制造与装配误差难以完全消除,因此数码摄像机的光学系统存在不同程度的非线性畸变,严重影响利用其影像进行实时拼接的精度。通过比对分析一种经典的数码相机畸变模型与Brown模型的适应性,提出将简化的Brown模型作为数码摄像机的畸变模型。同时,基于单像空间后方交会,按照最小二乘平差方法求解摄像机光学系统的非线性畸变参数。最后,通过三维控制场对三种型号的摄像机进行了检校试验。结果表明,所用的畸变模型明显优于经典畸变模型,使数码摄像机的整体检校精度小于0.5 pixel。而且检校结果稳定可靠,有效地补偿了光学系统的畸变差,有利于恢复图像内部的相对几何关系。

**关键词** 光学设计; 摄像机; 非线性畸变; Brown模型; 中心投影; 控制场检校

中图分类号 P237 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.022204

## A Distortion Model Suitable for Nonlinear Distortion Correction of Digital Video Camera

Yao Na<sup>1,2</sup> Lin Zhaorong<sup>1</sup> Ren Chaofeng<sup>2</sup> Yang Ke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076, China

<sup>2</sup>School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

**Abstract** Due to the difficulties in eliminating manufacturing and assembly errors, different degrees of nonlinear distortions occur in the optical system of digital video cameras, which seriously affects the accuracy of real-time image stitching. Through the comparison of a traditional distortion model of digital camera and the Brown model, we propose to utilize the simplified Brown model as the distortion model of digital video cameras. At the meantime, least squares adjustment is applied to solve the nonlinear distortion parameters based on single-photo space resection. Finally, three types of digital video cameras are calibrated by three-dimensional control field. Experimental results show that the calibration accuracy of a video camera via the proposed distortion model is distinctively higher than the classic distortion model, which is less than 0.5 pixel. Moreover, the calibrated parameters are stable and faithful, which effectively amends the distortion and helps to recover the relative geometric relationship inside an image.

**Key words** optical design; video camera; nonlinear distortion; Brown model; central projection; control field calibration

**OCIS codes** 220.2740; 080.2740; 080.3630; 130.4310; 280.4788

## 1 引言

无人机低空遥感方兴未艾。除了通过航空相机获取现实性极强的航空影像,数码摄像机因其可实时传输视频数据并服务于决策,故而对于某些特殊区域或特殊用途(例如重点灾情区域)的成像独占优势。但客观存在的制造与装配误差导致摄像机的光学系统存在不同程度的非线性畸变。为了提高图像检测、模式匹配等定量分析的准确性,必须对该畸变予以校正<sup>[1-2]</sup>。此外,为了弥补视频分辨率低、视野范围小的缺陷,视频

收稿日期: 2013-08-25; 收到修改稿日期: 2013-10-21; 网络出版日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(41071286,41171346)

作者简介: 姚娜(1984—),女,博士研究生,主要从事航空遥感与摄影测量方面的研究。E-mail: nayao@foxmail.com

导师简介: 林招荣(1980—),男,高级工程师,主要从事航空光学遥感方面的研究。E-mail: lizr508@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

图像序列(视频帧)通常需要自动拼接为一幅能够更为全面地描述场景内容的全景图像<sup>[3]</sup>。这也需要首先精确标定摄像机的内方位元素及镜头的非线性畸变。

非线性畸变校正涉及畸变模型与校正方法两个问题。文献[1]系统阐述了多种具有代表性的非线性畸变校正方法,并将其按原理分为基于对象的方法和基于模式的方法两大类。但少有文献对摄像机非线性畸变模型及其适应性进行研究。通常,摄像机的畸变模型多采用摄影测量或计算机视觉领域成熟的相机畸变模型。例如,文献[4]将一种经典的相机畸变模型<sup>[5-6]</sup>作为摄像机的畸变模型,并指出它是一种经验上普适性最好的模型;文献[1]采用另一种形式类似的畸变模型,兼顾径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变。但两者均未对模型的适应性作定量分析。

若将针对相机检校的畸变模型直接运用于数码摄像机检校,则畸变改正的精度不高,且存在明显的系统误差。因此,本文以一种经典畸变模型为参考,提出将简化的Brown模型作为数码摄像机的畸变模型,并利用高精度的室外三维(3D)检校场进行试验验证,以期证明摄像机检校的必要性及本文方法的可靠性。

## 2 摄像机的中心投影构像模型

测量领域广泛使用的摄像机模型是透视投影成像模型,其最大优点是其成像是线性的<sup>[7]</sup>。共线条件是描述透视投影线性关系的数学基础。但对于低成本摄像机(尤其是变焦镜头)而言,基于透视投影成像(针孔模型)的标定将造成严重的量测偏差,须引入畸变校正模型并进行精确的参数标定<sup>[8]</sup>。因此,考虑到畸变差改正的共线条件方程可表示为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $f$  为内方位元素;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为关于外方位角元素  $\phi$ 、 $\omega$ 、 $\kappa$  的方向余弦;  $X_s$ 、 $Y_s$ 、 $Z_s$  为外方位线元素;  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  为该像点坐标的改正值,即为补偿光学畸变所引起的像点偏移误差。该改正值与光学畸变模型相关,随像点在图像上的位置而改变。(1)式描述了地面点坐标  $(X, Y, Z)$ , 像点坐标  $(x, y)$  及投影中心  $(X_s, Y_s, Z_s)$  之间的严密数学关系,可用于求解内方位元素,以恢复每个摄影时刻光束的正确形状<sup>[5]</sup>。

## 3 摄像机镜头的非线性畸变模型和校正方法

光学畸变差  $(\Delta x, \Delta y)$  导致像点偏离其理想位置的点位误差,且随着像点在像平面位置上的不同,其值大小不同。它是影响成像几何质量最重要的因素之一。光学畸变差总体分为径向畸变差与切向畸变差两类<sup>[5]</sup>。径向畸变差是指实际构像点沿径向偏离其理想位置的畸变,而切向畸变差是指构像点垂直于径向相对其理想位置发生的偏移。

### 3.1 经典畸变模型

光学畸变模型的选择会直接影响畸变差的估计精度。一种经典的刻画光学系统非线性畸变且适应性较好的模型为<sup>[4-6]</sup>

$$\begin{cases} \Delta x = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy + \alpha x + \beta y \\ \Delta y = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy \end{cases} \quad (2)$$

式中,像平面坐标为  $x = x' - x_0$ ,  $y = y' - y_0$  ( $x'$ 、 $y'$  为像点的量测坐标);  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为径向畸变参数;  $p_1$ 、 $p_2$  为切向畸变系数;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为 CCD 阵列的非正方形比例因子和非正交性的畸变系数;  $r$  为实际构像点的辐射距离,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。本文将(2)式所示的模型称为经典畸变模型。该模型广泛应用于数码相机的畸变校正,其校正精度通常可以达到 0.3 pixel 以内<sup>[10-12]</sup>。

一种直观的摄像机检校的思路是将(2)式所示的成熟的数码相机畸变模型直接应用于所抽取的摄像机的关键帧图像。然而,随着 CCD 尺寸的增大,其制造成本呈几何速度增长,且噪声点增多,摄像机的数据存储压力也相应增大。因此,数码摄像机的 CCD 尺寸不可能制造得很大,且与之搭配的光学镜头一般为变焦

镜头,客观上导致了摄像机光学系统结构复杂,误差来源较多,成像后的图像变形更加复杂。这使得直接将(2)式作为摄像机关键帧图像的畸变模型是不合适的。这一点也将在下文予以论证。因此,本文欲寻找一种涵盖更多畸变参数且适应性良好的数码相机畸变模型,并将其应用于摄像机的检校。

### 3.2 Brown模型

Brown模型<sup>[13]</sup>是一种著名的航空相机畸变差校正模型。它最初是为大幅面的模拟胶片相机设计的,考虑了相机成像时可能存在的各种形式的畸变,其具体的函数形式为

$$\begin{cases} \Delta x = a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + \frac{x}{r}(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + \\ \quad x(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(y^2 + 3x^2) + 2p_2xy + \delta x_0 + \left(\frac{x}{c}\right)\delta_f \\ \Delta y = b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + \frac{y}{r}(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + \\ \quad y(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(x^2 + 3y^2) + \delta y_0 + \left(\frac{y}{c}\right)\delta_f \end{cases}, \quad (3)$$

式中,像平面坐标为  $x = x' - x_0$ ,  $y = y' - y_0$  ( $x'$ 、 $y'$  为像点的量测坐标);  $a_1 \sim a_7$ 、 $b_1 \sim b_7$  为底片变形系数;  $c_1 \sim c_7$  为底面弯曲系数;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为径向畸变参数;  $p_1$ 、 $p_2$  为切向畸变系数;  $\delta x_0$ 、 $\delta y_0$ 、 $\delta_f$  为相机内方位元素的改正值。

在实际使用过程中,Brown模型的参数需要根据不同的传感器进行取舍。对比可知,(2)式的经典畸变模型实质上是Brown模型的简化形式,只能描述部分畸变形式。因此,本文将利用Brown模型去逼近量化摄像机的畸变模型,并依据摄像机的成像特点进行取舍。由于数码相机无需考虑底片弯曲系数,因此  $c_1 \sim c_7$  可省略;且内方位元素分量  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $f$  可依据(1)式进行检校标定,则  $\delta x_0$ 、 $\delta y_0$ 、 $\delta_f$  也可省略。出于制造成本上的考虑,与数码单反相机相比,民用数码相机其镜头畸变更大,其影像边缘的畸变规律更为复杂,简单的径向畸变与切向畸变已不能完全描述其畸变规律。此时,可将影像周边残余的畸变以底片变形的形式进行补偿。由于切向畸变  $p_1$ 、 $p_2$  与  $a_3$ 、 $a_4$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  具有相同的变形形式,故为了避免畸变参数之间的相关性, $a_3$ 、 $a_4$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  均不再考虑。综合上述分析,适合数码摄像机的畸变模型可简化为

$$\begin{cases} \Delta x = a_1x + a_2y + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + x(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(y^2 + 3x^2) + 2p_2xy \\ \Delta y = b_1x + b_2y + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + y(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(x^2 + 3y^2) \end{cases}. \quad (4)$$

(4)式即为本文所采用的数码相机畸变模型。与(2)式相比,该式有15个未知数,同时考虑了高阶项和交叉项切向畸变的模型,因此可以顾及更加复杂的光学畸变。

### 3.3 光学畸变校正

传感器检校方法可分为光学实验室检校、实验场检校、作业检校、自检校及恒星检校法等,其中实验场检校精度最高<sup>[6]</sup>。因此,利用实验场检校数码摄像机的内方位元素及光学畸变参数。

实验场检校采用单像空间后方交会,从单幅影像所覆盖的实验场范围内若干控制点的已知坐标和相应点的像坐标量测值出发,根据(1)式及(4)式反算出传感器的内、外方位元素和光学畸变参数<sup>[9]</sup>。由于共线方程中观测值与未知数之间是非线性关系,为便于计算,需将(1)式按泰勒公式展开,并保留至一次项,得到线性化的误差方程的矩阵形式:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_e + \mathbf{B} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}_c - \mathbf{L}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{v} = [v_x, v_y]^T$  为像点坐标改正值;  $\mathbf{x}_e = [dX_s, dY_s, dZ_s, d\varphi, d\omega, d\kappa]^T$  为摄影时刻(例如数码相机帧)传感器外方位角元素的改正值;  $\mathbf{x}_i = [df, dx_0, dy_0]^T$  为传感器的内方位元素改正值;矩阵  $\mathbf{L}$  为常数项;矩阵  $\mathbf{A}$  为外方位元素系数阵;矩阵  $\mathbf{B}$  为内方位元素系数阵;矩阵  $\mathbf{C}$  为畸变差系数阵,  $\mathbf{x}_c$  为与之对应的畸变差系数改正值。

对(4)式的畸变畸变系数  $[a_1, \dots, a_7, b_1, \dots, b_7, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2]^T$  求一阶导数,可得到数码相机畸变模型  $\mathbf{C}$  其具体形式如下:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} b_{1-1} & b_{1-2} & \cdots & b_{1-15} \\ b_{2-1} & b_{2-2} & \cdots & b_{2-15} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

(6)式中各系数的推导结果为

$$\begin{aligned} b_{1-1} &= -x, & b_{1-2} &= -y, & b_{1-3} &= -y^2, & b_{1-4} &= -y^2, & b_{1-5} &= -x^2, \\ b_{1-6} &= 0, & b_{1-7} &= 0, & b_{1-8} &= 0, & b_{1-9} &= 0, & b_{1-10} &= 0, \\ b_{1-11} &= -xr^2, & b_{1-12} &= -xr^4, & b_{1-13} &= -xr^6, & b_{1-14} &= -(y^2 + 3x^2), & b_{1-15} &= -2xy, \\ b_{2-1} &= 0, & b_{2-2} &= 0, & b_{2-3} &= 0, & b_{2-4} &= 0, & b_{2-5} &= 0, \\ b_{2-6} &= -x, & b_{2-7} &= -y, & b_{2-8} &= -y^2, & b_{2-9} &= -x^2y, & b_{2-10} &= -xy^2, \\ b_{2-11} &= -yr^2, & b_{2-12} &= -yr^4, & b_{2-13} &= -yr^6, & b_{2-14} &= -2xy, & b_{2-15} &= -(x^2 + 3y^2). \end{aligned}$$

已知  $n$  个控制点的像点坐标  $(x, y)$  及相应的地面坐标  $(X, Y, Z)$ , 并且这些控制点为等精度观测值, 则依据最小二乘平差原理可计算出未知数改正值:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_e \quad \mathbf{x}_i \quad \mathbf{x}_c]^T = \left[ \sum_{i=1}^n ([A \quad B \quad C]_i^T \cdot [A \quad B \quad C]_i) \right]^{-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n ([A \quad B \quad C]_i^T \cdot L) \right]. \quad (7)$$

(7)式即为(1)式的未知数解算方程。由于共线方程在线性化过程中, 各系数取自泰勒级数展开式的一次项, 且未知数的初值一般比较粗略, 因此计算需要迭代进行。外方位元素及内方位元素的初值可以根据直接线性变换(DLT)确定<sup>[4]</sup>。迭代计算时, 光学畸变差初值可设为0。当未知数改正值小于某特定阈值时, 迭代结束。本文选择当  $f$  的改正值  $df$  小于 0.01 pixel 时, 迭代结束。相应的光学畸变系数为初值与迭代改正值之和。

## 4 试验及结果分析

### 4.1 试验场地及设备

所用的室外三维检校场[图 1(a)]均匀布设了 747 个控制点, 且所有控制点不处于同一平面。控制点参考坐标系为三维笛卡儿右手坐标系, 其测量理论误差为  $\pm 10^{-6}$ 。控制点标志设计为圆形黑色薄片, 中央贴有反光片, 如图 1(b)所示, 其实际成像效果如图 1(c)所示。

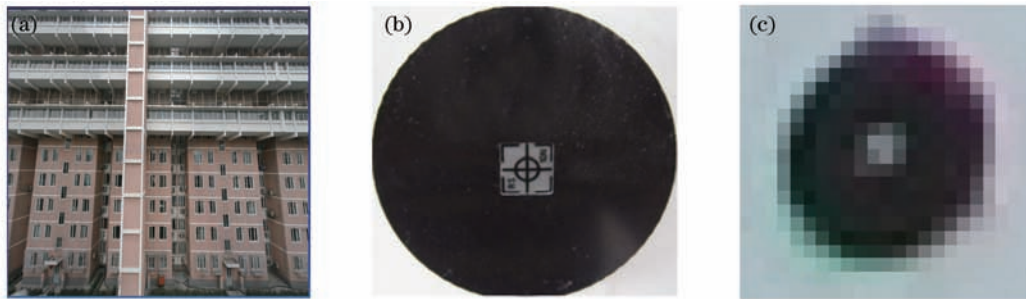


图 1 (a)三维控制场; (b)控制点标志; (c)控制点成像效果

Fig.1 (a) 3D control field; (b) sign of control point; (c) image of control point

为了验证本文检校模型的普适性, 对三款不同厂家、不同型号的摄像机进行了畸变差检校。三款摄像机分别为: 型号为 HVR-Z7C 的索尼摄像机, 其有效像幅为 1440 pixel  $\times$  1080 pixel (简称摄像机 I), 像素大小为 17.6  $\mu\text{m}$ , 镜头为卡尔蔡司变焦镜头, 焦距变化范围为 32.0~384 mm; 型号为 AG-HMC43MC 的松下摄像机, 其有效像幅为 1920 pixel  $\times$  1080 pixel (简称摄像机 II), 像素大小为 19.2  $\mu\text{m}$ , 镜头焦距变化范围为 14.8~



图 2 三种摄像机。(a)索尼摄像机; (b)松下摄像机; (c)国产摄像机

Fig.2 Three types of video cameras. (a)Sony video camera; (b)Panasonic video camera; (c) a domestic video camera

490 mm;型号为AS-11的国产华越力合摄像机,其有效像幅为1280 pixel×720 pixel(简称摄像机III),像素大小为10.2 μm,搭配等效焦距为35 mm的定焦镜头。三种摄像机分别如图2所示。

#### 4.2 试验步骤及分析

本文试验分为两部分:首先验证摄像机检校的必要性;其次对比经典模型与本文模型的检校结果精度,验证本文模型的有效性。

针对三款摄像机,为了避免引入人为误差,在利用不同畸变模型时,采用的像点坐标保持相同。此外,随着调焦的不同(即主距 $f$ 不同),物镜系统的畸变是变化的,因此无论采用何种非线性畸变模型,摄像机在检校前均应在定焦档位进行摄影,以保证模型的适应性<sup>[6]</sup>。本文对三种型号的摄像机统一定焦在35 mm档位。

首先,验证摄像机检校的必要性。假设成像模型为理想的中心投影,即摄像机没有畸变差,此时(5)式中的畸变系数项 $C \cdot x_c = 0$ 。依据(7)式解算内、外方位元素并将其代入(1)式,即可得到每个控制点的检校像点坐标,将该坐标结果与原始量测的像点坐标相减即为相应控制点的畸变残差,该值表示控制点的实际位置与未引入畸变项的模型所解算位置之间的偏差(下文称为绝对畸变差)。为了直观地反映摄像机的畸变特性,将三种摄像机的有效像幅均划分为40×20个格网,并计算每个格网中心点的畸变残差,生成摄像机镜头的畸变渲染图,如图3所示,其中图3(a)~(c)分别为摄像机I~III的像面畸变渲染图,从上至下依次为:横向残差渲染、纵向残差渲染和总体残差渲染。

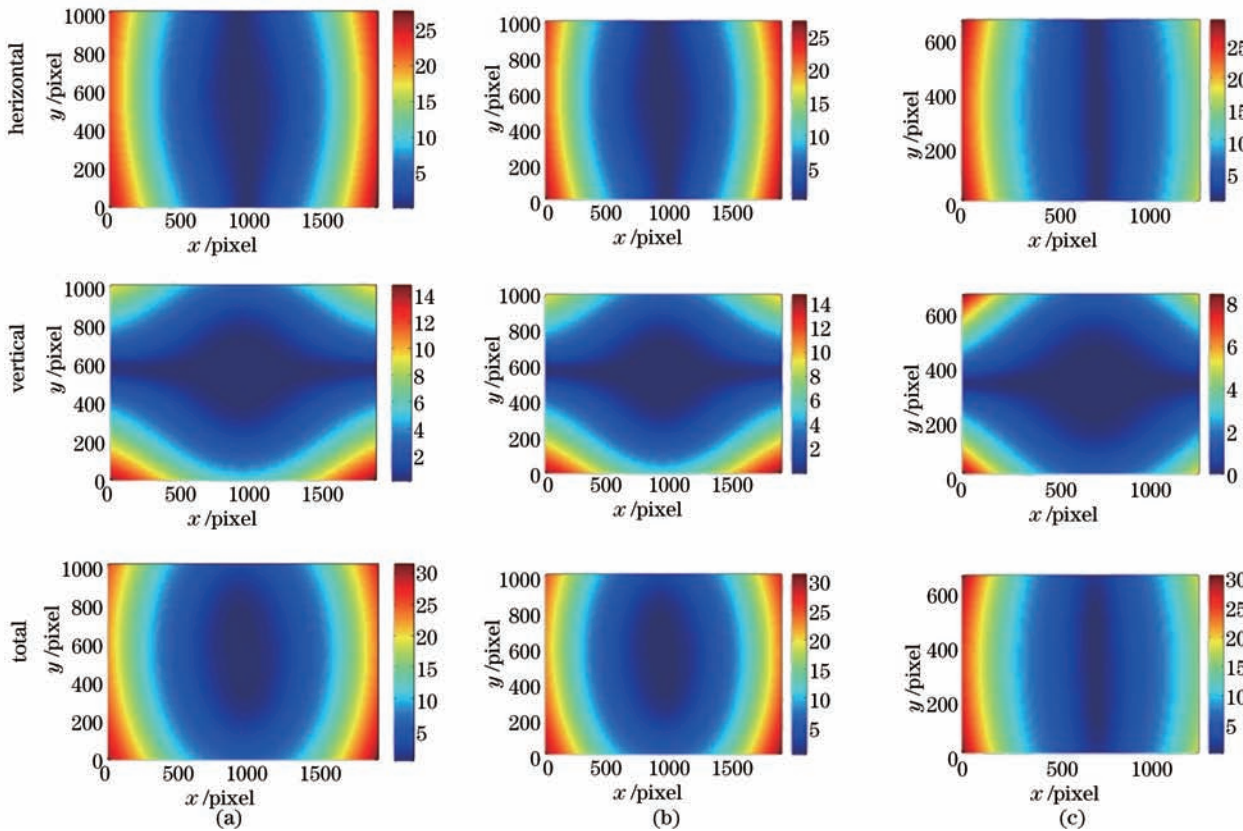


图3 三种摄像机的像面畸变渲染图。(a)摄像机I;(b)摄像机II;(c)摄像机III

Fig.3 Residual error renderings of image planes pertaining to the three types of video cameras. (a) Video camera I; (b) video camera II; (c) video camera III

在图3中,颜色由蓝至红反映了残差数值等级的增大。对比图3(a)~(c)不难看出,三种摄像机的镜头均存在明显的非线性畸变差,且畸变规律相似,即中间变形小,四周变形大,呈现以图像中心为原点向四周发散的特点。同时,在整个像幅内,横向畸变为主要畸变类型,且影像四角的畸变呈明显扩大趋势,最大可达30 pixel。因此,为了准确恢复像幅内像元间的相对几何关系,数码摄像机的几何检校过程极为必要。

其次,分别以经典畸变模型和本文畸变模型为例,对上述三种摄像机进行检校,检校所得的残差分布如图4所示。其中图4(a)~(c)分别反映了摄像机I~III的残差分布情况,上下两行分别代表经典畸变模型与本

文畸变模型的检校结果。箭头表示当前控制点残差方向,而箭头长度则代表当前控制点处残差的大小。

由图4的首行残差图可知,经典畸变模型可以有效补偿影像中心的大部分镜头畸变,残差大小已显著小于图3中无畸变校正的残差值;但在影像四周还存在明显的系统误差,其大小与方向表现为向着水平轴和垂直轴靠拢,且在边缘处畸变最大。而由下行残差图可知,采用本文畸变模型改正后的残差已经没有明显的变化规律,说明本文模型已经消除了摄像机光学系统的系统误差,而残余的随机误差是在确定像点位置时引入的,在求取光学畸变系数时已通过整体最小二乘平差予以相互抵消,不会影响最终的检校精度。

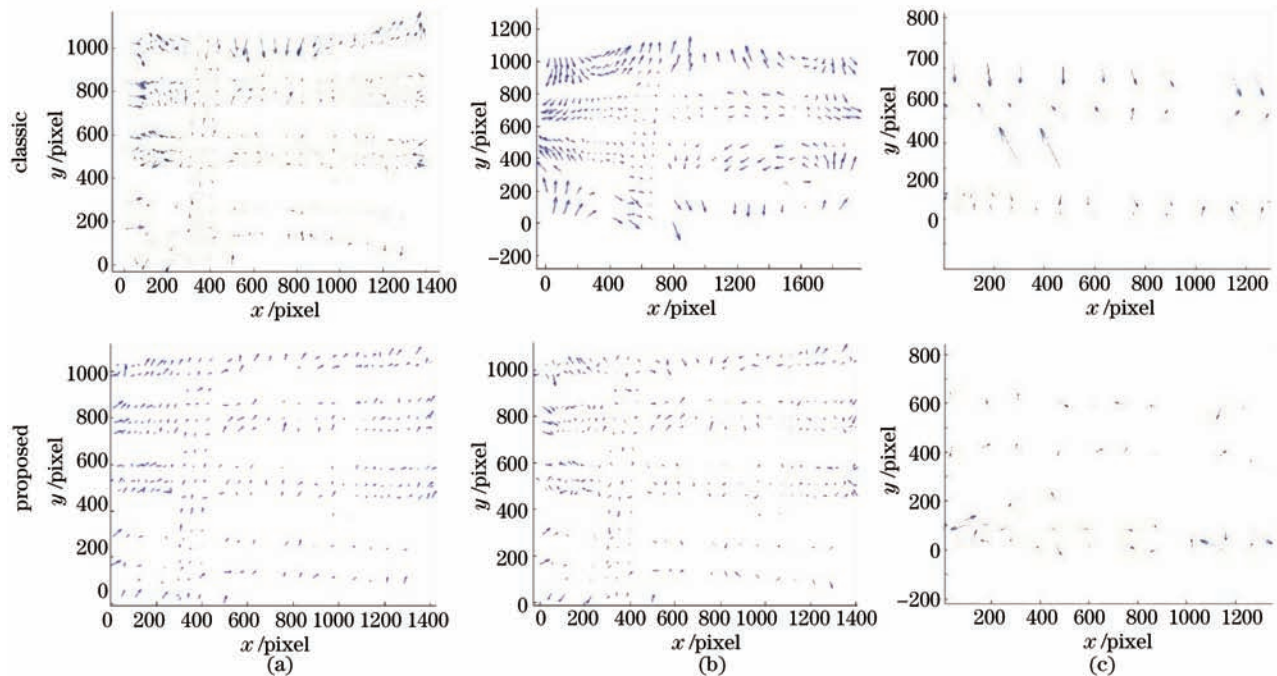


图4 经典模型与本文模型检校结果对比。(a) 摄像机 I; (b) 摄像机 II; (c) 摄像机 III

Fig.4 Comparison of residual error distributions based on the classical model and the proposed model. (a) Video camera I; (b) video camera II; (c) video camera III

造成图4所示现象的主要原因在于经典畸变模型以校正径向畸变为主,而径向畸变以像点的辐射距为半径。然而,相较经典畸变模型通常适用的单反相机的高档定焦镜头而言,数码摄像机镜头的畸变过大,有限的径向畸变系数无法准确描述影像(特别是影像四周)的畸变规律。以摄像机I为例,给出两种畸变模型的畸变拟合结果,如图5所示,图中横轴为当前控制点的辐射距,纵轴为畸变差。

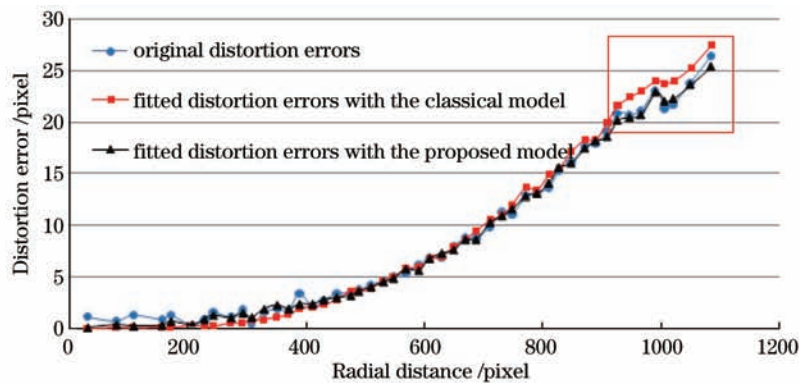


图5 经典模型与本文模型的畸变拟合结果

Fig.5 Fitted residual errors with the classical and proposed models

由图5可知,相较图3所反映的绝对畸变差,在辐射距较小的区域,两种畸变模型均能获得较高的拟合精度。但当辐射距达到影像边缘(大于1000 pixel)时,其实际的影像畸变已非平滑递增,此时利用经典畸变模型中的高次径向畸变已无法拟合实际的畸变规律,而本文使用的畸变模型则将影像四周的残余畸变以底片变形的形式,利用附加参数加以补偿,进而获得了较高的畸变拟合精度。这一点可以从图5中红色框内的

经典模型与本文模型的畸变拟合精度中得到反映。

表1总结了图3,4所对应试验条件下三种摄像机非线性畸变的检校精度。比较该表可得以下主要结论:1)在不进行畸变校正时,这三种摄像机的最大畸变分别占其有效像幅的1.64%、1.43%、1.17%。对于单个视频帧而言,这种影响尚可容忍。但对影像拼接而言,影像边缘处超过1 pixel的误差都会导致明显的拼接缝,进而影响全景图的整体精度与表现效果。因此,对于摄像机视频帧的拼接而言,摄像机镜头的畸变校正是一个必要步骤。2)采用经典畸变模型的检校精度已得到显著提升,但由于系统误差的存在,摄像机的畸变差校正的总体精度劣于1 pixel。可见,直接将适用于相机的经典畸变模型作为摄像机的畸变模型是不可靠的,无法得到高质量的检校结果。3)本文的畸变模型的整体检校精度不超过0.5 pixel,对于三种摄像机而言,总体理论精度相较经典畸变模型分别提高了84.3%、89.2%、86.9%。

表1 不同畸变模型的摄像机检校结果 (单位: pixel)

Table 1 Calibration results of video cameras with different distortion models (unit: pixel)

Residual error model	Video camera No.	Largest error in $x$ direction	Largest error in $y$ direction	Mean square error in $x$ directions	Mean square error in $y$ direction	Total mean square error
Without applying any model	I	23.629	11.241	7.684	3.338	5.924
	II	60.245	19.596	19.379	7.780	14.766
	III	41.015	24.084	14.878	8.987	12.290
Classical residual error model	I	4.982	-6.003	1.399	1.781	1.602
	II	6.689	-9.640	1.768	2.611	2.230
	III	4.632	7.264	1.515	1.948	1.745
Proposed residual error model	I	-0.443	0.484	0.210	0.286	0.251
	II	-0.472	-0.480	0.198	0.253	0.227
	III	-0.47	0.493	0.198	0.254	0.228

综合图3~5以及表1可知,本文所提的畸变模型是适当的,对摄像机非线性畸变校正具有普适效果,且检校结果稳定可靠。

为了进一步地验证该畸变模型的实际检校精度,在每张影像上选择了均匀分布的9个检查点,用于检查其实际残差。将检校结果代入(1)式计算检查点的像点坐标,并与其实际像点坐标相减,计算其残差,结果如图6所示。

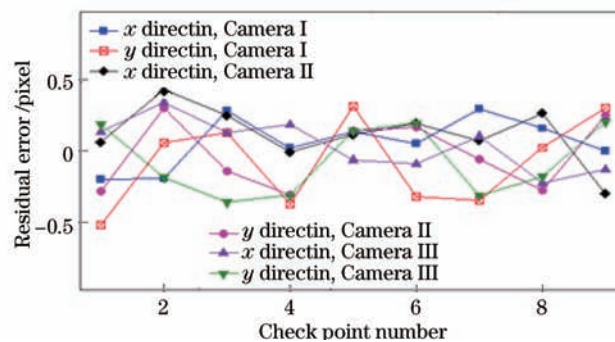


图6 检查点残差

Fig.6 Residuals of the check points

从图6可以看出,三种摄像机的检查点残差与检校结果相符,基本均未超过0.5 pixel。这表明所提出的畸变模型是适当的,且检校结果稳定可靠。

## 5 结 论

相较经典的相机畸变模型,本文所选的Brown模型更适于刻画摄像机镜头的非线性畸变。其原因在于所选模型顾及了高阶项和交叉项的切向畸变。此外,由试验可知,经典模型的总体畸变差检校精度劣于1 pixel,不利于视频帧的高精度全景图拼接等应用,因此并不一定适用于摄像机镜头的非线性畸变改正。鉴于镜头非

线性畸变模型对于变焦过程的非适应性,摄像机变焦过程中的非线性畸变有待后续研究。

### 参考文献

- 1 Yang Biwu, Guo Xiaosong. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens [J]. *J Image and Graphics*, 2012, 10(3): 269-274.  
杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. *中国图像图形学报*, 2012, 10(3): 269-274.
- 2 Zhang Zhengyu, Huang Shijie, Luo Chuan, *et al.*. Nonlinear distortion correction of camera based on coplanar condition equations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0115002.  
张征宇, 黄诗捷, 罗川, 等. 基于共面条件的摄像机非线性畸变自校正[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0115002.
- 3 Lin Wu, Hong Jingxin, Zhang Hao, *et al.*. Fast and effective method for video mosaic [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(24): 173-175.  
林武, 洪景新, 张昊, 等. 快速有效的视频图像序列拼接方法[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(24): 173-175.
- 4 Snow W L, Childers B A, Shortis M R. The calibration of video cameras for quantitative measurements [C]. 39th International Instrumentation Symposium, Albuquerque, 1993. 103-130.
- 5 Feng Wenhao. On calibration of close-range cameras [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2000, (10): 1-3.  
冯文灏. 关于近景摄影机检校的几个问题[J]. *测绘通报*, 2000, (10): 1-3.
- 6 Fraser C S. Digital camera self-calibration [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 52(4): 149-159.
- 7 Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibrating method based on moving characteristic target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512007.  
王会峰, 王炳健. 移动特征靶标的摄像机径向畸变标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512007.
- 8 Xu Song, Sun Xiuxia, Liu Shuguang, *et al.*. Model reference approaching method of camera distortion Calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0715001.  
徐嵩, 孙秀霞, 刘树光, 等. 摄像机畸变标定的模型参考逼近方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0715001.
- 9 Wang Zhizhuo. Principles of Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1984. 250-251.  
王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1984. 250-251.
- 10 Yao Na. Research on Key Technologies of Low Altitude UAV Borne Multi-Head and Wide-Angle Composite Cameras and Their Performance Evaluation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.  
姚娜. 低空无人机载组合宽角相机关键技术及性能分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- 11 Lin Zongjian. UAV borne low-altitude photogrammetry system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(1): 5-9.  
林宗坚. UAV低空航测技术研究[J]. *测绘科学*, 2011, 36(1): 5-9.
- 12 Lin Zongjian, Su Guozhong, Zhi Xiaodong. UAV borne double-camera low altitude photogrammetry system [J]. *Geospatial Information*, 2010, 8(4): 1-3.  
林宗坚, 苏国中, 支晓栋. 无人双拼相机低空航测系统[J]. *地理空间信息*, 2010, 8(4): 1-3.
- 13 Brown D C. Close-range camera calibration [J]. *Photogrammetric Engineering*, 1971, 37(8): 855-866.
- 14 Feng Wenhao. Close Range Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.  
冯文灏. 近景摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.