

偏振探测系统的摄像机标定与图像畸变校正研究

何均均 胡良梅 范之国 高 永 张阳阳
(合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

摘 要: 偏振探测在许多相关领域的应用日益广泛, 探测系统的标定及校准是精确提取被探目标的前提。本文针对偏振探测系统, 分析了基于 2D 平面标靶的摄像机标定算法, 建立了摄像机线性模型和非线性畸变模型, 通过线性及非线性结合的算法, 得到了精确的摄像机内外部参数。利用镜头的畸变模型, 提出了一种采用牛顿迭代算法来求解高阶非线性方程组对图像畸变校正的方法, 建立了各像素点畸变量与到畸变中心距离的关系, 最后对畸变校正前后的图像进行了测试实验, 测试结果表明: 测试点实际畸变大小符合理论畸变关系, 很好地验证了镜头的径向畸变特性; 经畸变校正后的偏振图像能有效提高被探目标提取的准确率, 偏振图像的畸变校正对复杂背景下目标提取准确率的影响最明显。

关键词: 偏振探测; 摄像机模型; 标定; 畸变校正

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)11-1780-06

Research on camera calibration and correction of image distortion for polarization detection system

HE Jun-jun HU Liang-mei FAN Zhi-guo GAO Yong ZHANG Yang-yang

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Polarization detection is becoming increasingly widespread in many related fields, the calibration and correction of the polarization detection system is a premise to extract exploration targets accurately. In this paper, the principle of camera calibration algorithm based on 2D planar is introduced, and the linear model as well as nonlinear distortion model of the camera is set up. Then we get accurate internal and external camera parameters by linear and nonlinear algorithm. We obtain the projection coordinates before distortion by solving binary higher-order nonlinear equations based on the lens distortion model. To achieve effective correction of distorted images, we set up the relationship between amount of distortion of each pixel and distance to the distortion center. In addition, we carry on a test to the distortion image before and after correction, the result shows that the actual amount of distortion is consistent with theory of distortion model; the polarization image after correction can effectively raise the accuracy of object extraction, and the correction of polarization image has the most positive impact for the accuracy of object extraction in complex background.

Key words: polarization detection; camera model; calibration; distortion correction

1 引言

随着大气偏振特性研究的不断深入, 其在许多相关领域的应用也日益广泛。目前偏振探测已成为大气偏振应用的重要分支, 而在实际探测中, 稳定可靠的探测系统是准确提取被探目标的保证。现有的偏振探测系统(系统总体结构如图 1 所示)一般采用偏振成像的方式^[1], 为了获取目标的偏振特性, 需要对摄像机采集的图像进行偏振解析。而摄像机工作前需进行参数的标定, 以提高其准确度。另外, 由于摄像机的镜头并不是理想情况下的透镜成像, 存在各种非线性畸变, 因此采集的偏振图像会产生一定的变形, 从而导致提取的

目标偏振信息出现偏差。因而, 在进行摄像机标定时须对理想线性模型进行修正, 在原模型关系中引入反映非线性畸变影响的修正参数, 通过畸变模型与畸变参数实现对畸变图像的有效校正, 获得无畸变图像, 最终实现被探目标的准确提取。

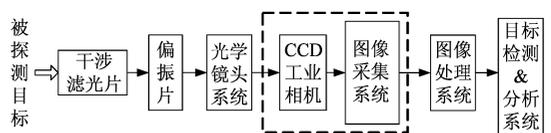


图 1 偏振探测系统总体结构图

(虚线框部分包含摄像机标定和图像校正)

Fig. 1 The overall structure of polarization detection system

(Dashed section contains the camera calibration and image correction)

2 摄像机模型

结合该偏振探测系统的实际特点,并考虑到实用性与易操作性,采用传统摄像机标定方法中的一种较为经典的算法——张正友平面标定法^[2]。该算法介于传统摄像机标定法与自标定法之间,既解决了传统方法操作繁琐、对设备要求高等不足,又比自标定方法算法精度高。

2.1 摄像机线性模型

为了描述摄像机线性模型的成像过程,定义了如图 2 所示的 4 个坐标系:摄像机坐标系、图像坐标系、成像平面坐标系和世界坐标系^[3]。

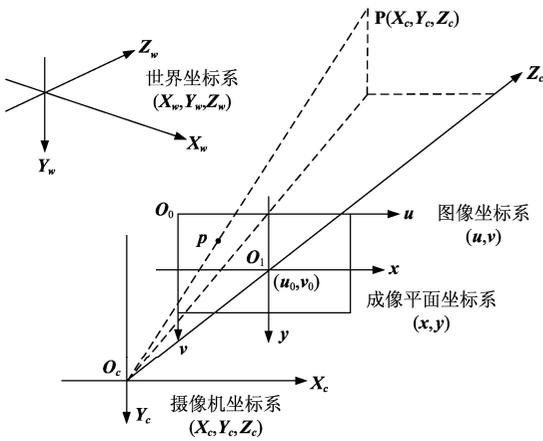


图 2 与相机成像相关的四种坐标系

Fig. 2 Schematic diagram of the coordinate systems

根据上述坐标系间的对应关系,可以建立其相应的关系式。设空间任意一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在图像坐标系下的投影点为 $p(u, v)$,则存在如下关系式^[4]:

$$Z_c \begin{Bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \{R \ t\} \begin{Bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{Bmatrix} = A \{r_1 \ r_2 \ r_3 \ t\} \begin{Bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中, A 为摄像机的内参数矩阵, $\alpha_x = f/dx, \alpha_y = f/dy$ 分别表示 x 和 y 方向焦距, γ 为 u 轴和 v 轴的不垂直因子, (u_0, v_0) 为主点坐标;摄像机的外参数矩阵表示摄像机坐标系与世界坐标系之间的空间关系,可以用 3×3 的旋转矩阵 R 和 3×1 的平移向量 t 来描述。

2.2 摄像机透镜畸变模型

摄像机的镜头畸变主要包括径向畸变和切向畸变,除此之外,一些文献中也描述了镜头的离心畸变、薄棱镜畸变^[5]等。由于镜头的畸变是非线性的,需要用非线性模型进行畸变参数的估计。而径向畸变是图

像产生误差的主要因素,在此我们只考虑径向畸变。径向畸变模型可近似描述为^[6]:

$$\begin{cases} \delta_x = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ \delta_y = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases} \quad (2)$$

其中, δ_x 和 δ_y 是畸变值,它与投影点在图像中的像素位置有关。 x, y 是图像点在成像平面坐标系下根据线性投影模型得到的归一化投影值, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。 k_1, k_2, k_3 等为径向畸变系数,一般情况取 1~2 项系数即足以描述透镜的径向畸变。

3 标定参数的求解

3.1 内/外部参数计算

偏振探测系统选用的摄像机是大恒工业数字 CCD 相机 SV-1400FC,该相机的分辨率为 1392×1040 ,晶片尺寸为 $4.65 \mu\text{m} (H) \times 4.65 \mu\text{m} (V)$,搭配 Kowa 系列的 LM6NCM 短焦镜头,镜头的焦距为 6mm。标定采用平面式模板,自制了一 6×8 的黑白平面方格靶标,方格尺寸为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 。

在获知靶标平面的世界坐标和特征点(黑白棋格交点)图像坐标(特征点提取)后,代入公式(1),利用逆矩阵求解即可得到隐参数矩阵(内部参数矩阵与外部参数矩阵的乘积)。

为简化计算,假设平面靶标位于世界坐标系的 $X_w Y_w$ 平面上($Z_w = 0$)。则空间任意点 P 的齐次坐标可表示为 $P(X_w, Y_w, 0, 1)$,令旋转矩阵 R 的第 i 列为 r_i , (1)式可改写为:

$$s \begin{Bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{Bmatrix} = A \{r_1 \ r_2 \ t\} \begin{Bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{Bmatrix} = H \begin{Bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

利用直接线性变换模型求得投影矩阵 H ,结合(3)式将 H 记为:

$$H = \{h_1 \ h_2 \ h_3\} = \lambda A \{r_1 \ r_2 \ t\} \quad (4)$$

λ 为一常数因子,由(3)式和 R 的正交性($r_1^T r_2 = 0, r_1^T r_1 = r_2^T r_2$),可得到关于内部参数的基本约束方程:

$$\begin{cases} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (5)$$

设矩阵 $B = A^{-T} A^{-1}$,易知 B 是对称矩阵,因此可以表示为六维向量:

$$b = \{B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}\}^T \quad (6)$$

向量 b 的求解可以采用矩阵的最小特征值向量或

奇异值分解(SVD)法。 \mathbf{b} 求解完之后,可以不难求得内部参数矩阵 \mathbf{A} 。得到内部参数矩阵 \mathbf{A} 后,每幅图像的外部参数亦可以求出,由(4)式不难得到($\lambda=1/\|A^{-1}h_1\|=1/\|A^{-1}h_2\|$):

$$\begin{cases} r_1 = \lambda A^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda A^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ t = \lambda A^{-1} h_3 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 镜头畸变系数计算

透镜的径向畸变是图像产生误差的主要因素,在此只考虑径向畸变,畸变后坐标为:

$$\begin{cases} x_d = x + \delta_x = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y_d = y + \delta_y = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad (8)$$

令 (u_d, v_d) 、 (u, v) 分别为图像坐标系下,空间点对应的测量值和理论值。则两者关系为:

$$\begin{cases} (u-u_0)r^2 & (u-u_0)r^4 \\ (v-v_0)r^2 & (v-v_0)r^4 \end{cases} \begin{cases} k_1 \\ k_2 \end{cases} = \begin{cases} u_d - u \\ v_d - v \end{cases} \quad (9)$$

假设有 n 幅图像,每幅图像存在 m 个特征点,则可建立 $2mn$ 个关系式: $Dk=d$,再利用最小二乘算法(LSM)求得畸变系数 $k=\{k_1 \quad k_2\}^T=(D^T D)^{-1} D^T d$ 。

由于镜头的非线性畸变,因此根据摄像机线性模型进行标定摄像机内外参数存在一定的误差。将线性标定结果作为参数初值进行非线性参数的估计,从上述所述,摄像机的内部参数均已求得,将其代入目标函数求最小值:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)\|^2 \quad (10)$$

其中, $\hat{m}(A, k_1, k_2, R_i, t_i, M_j)$ 是标定模板的第 j 点在第 i 幅图像上,利用估计参数得到的投影点, M_j 为标定模板第 j 点的在世界坐标系下的坐标值, m 为每个图像特征点个数, n 为图像的个数。利用LM(Levenberg-Marquardt)迭代法优化所得的摄像机标定参数^[7],最终得到较为精确的摄像机参数值。

对上述标定算法在集成有OpenCV的VC++6.0环境下编程实现,最终得到摄像机的内部参数和外部参数。实际标定实验中,我们对3个相同型号(SV-1400FC)的相机均进行了标定,方便对实验结果进行分析与比较,标定结果如表1所示(外部参数未列出):

表1 摄像机内部参数

Tab.1 Internal parameters of the cameras

	α_x/pixel	α_y/pixel	u_0/pixel	v_0/pixel	k_1/mm^{-2}	k_2/mm^{-4}
摄像机1	1302.83	1295.03	662.018	497.18	-0.159079	-0.110968
摄像机2	1328.93	1319.33	751.402	558.07	-0.201051	0.77232
摄像机3	1374.04	1387.77	697.641	427.857	-0.0676172	0.402616

从表2的标定结果可以看出,3个摄像机的 α_x/α_y 比值均趋于1,与给定参数相符($4.65\mu\text{m} \times 4.65\mu\text{m}$),即CCD晶片为正方形; θ 是根据不垂直因子 γ 得到的图像坐标轴夹角,标定得到的3个相机的 θ 值均趋于 90° ,说明图像坐标轴几乎垂直,与理想情况相符;通过标定得到的参数计算镜头的焦距,3个摄像机的标定焦距分别为 $f_1=6.058\text{mm}$ 、 $f_2=6.179\text{mm}$ 、 $f_3=6.389\text{mm}$,而给定的焦距 $f=6\text{mm}$,3个相机分别相差 0.058mm 、 0.179mm 、 0.389mm ,这是由摄像机和镜头间螺纹连接等引起的误差;标定所得到的3个摄像机主点坐标分别为 $(662.018, 497.18)$ 、 $(751.402, 558.07)$ 、 $(697.641, 427.857)$,摄像机主光轴与图像平面交点并不在平面的中心 $(696, 520)$ 处,离中心的偏差分别为 $(33.982, 22.82)$ 、 $(55.402, 38.07)$ 、 $(1.6410, 92.14)$,这是由靶标平面非严格平整及实验中的随机误差及噪声等因素所引起的;3个相机标定得到的径向畸变参数 k_1 和 k_2 也较小(其中 k_1 为负值,表示摄像机镜头为桶形畸变),在部分情况下,镜头畸变可忽略不计。上述分析表明,虽然采用相同型号的摄像机和镜头,但实际内部参数却不一定完全一致。

表2 标定参数分析

Tab.2 Analysis of calibration parameters

	α_x/α_y	$\theta/(^\circ)$	焦距 f/mm	离中心偏差/ pixel
摄像机1	1.0060	89.979	6.058	(33.982, 22.82)
摄像机2	1.0072	89.864	6.179	(55.402, 38.07)
摄像机3	0.9901	89.906	6.389	(1.6410, 92.14)

4 图像的畸变校正

4.1 畸变校正原理

在实际应用中,镜头畸变是不可避免的。如上所述,通过摄像机标定可定量地求得相应的畸变系数,为了得到理想无畸变的图像以提高偏振探测系统的准确度,需要对畸变图像进行校正。由于透镜的径向畸变是图像产生误差的主要因素(切向畸变和离心畸变等一般可以忽略)^[8],因此可以通过标定获得的径向畸变系数对畸变图像进行校正。

完成了摄像机标定工作后, 可得到摄像机的各个内部参数, 根据公式(8)的方程组, 利用畸变后的坐标值 x_d 和 y_d 求得畸变之前的投影坐标值 x 和 y , 并以 x 、 y 的值替代 x_d 、 y_d 的值, 即可对图像的畸变校正了。

求取 x 和 y 在本质上是求解二元高阶非线性方程组, 可以利用牛顿法迭代法求解该方程组。对高阶方程组采用迭代的思想, 将 x_d 和 y_d 作为初始估计值(x_0 , y_0)点, 再令 $x_n = x_d, y_n = y_d$, 通过多次的迭代逼近即可求得此非线性高阶方程组解 x_{n+1} 和 y_{n+1} 。为了衡量迭代算法逼近程度, 通过将逼近值与初始估计作差 $x_{n+1} - x_n$ 、 $y_{n+1} - y_n$ 判断, 当差值认为足够小时, 即可认为该逼近算法完成。最终逼近得到的 x_{n+1} 和 y_{n+1} 即为图像畸变校正后的投影值。

4.2 图像畸变校正实现

为了更加直观地观察镜头的畸变情况, 我们可以建立各像素点畸变量与到畸变中心距离的关系, 进而更好的完成图像的畸变校正。将(8)式变形得:

$$\begin{cases} \tilde{x}_d - \tilde{x} = \tilde{x} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \tilde{y}_d - \tilde{y} = \tilde{y} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad (11)$$

其中 \tilde{x}_d 、 \tilde{x} 均为归一化坐标, 将 $r^2 = \tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 = \frac{x^2 + y^2}{f^2}$, 代入式(11)并整理得:

$$\begin{cases} x_d - x = x \left(\frac{k_1}{f^2} r^2 + \frac{k_2}{f^4} r^4 \right) \\ y_d - y = y \left(\frac{k_1}{f^2} r^2 + \frac{k_2}{f^4} r^4 \right) \end{cases} \quad (12)$$

其中, (x_d, y_d) 、 (x, y) 分别是成像平面坐标系下, 空间点对应的测量值和理论值, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 表示成像点距离中心点的距离。

令: $m_1 = \frac{k_1}{f^2}$, $m_2 = \frac{k_2}{f^4}$, $\Delta x = x_d - x$, $\Delta y = y_d - y$, CCD 晶片边长为 a ($a = 4.65 \mu\text{m}$), 整理式(12)有:

$$\left(\frac{\Delta x}{a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{a} \right)^2 = \frac{r^2}{a^2} (m_1 r^2 + m_2 r^4)^2 \quad (13)$$

令: $\delta_x = \frac{\Delta x}{a}$, $\delta_y = \frac{\Delta y}{a}$, $\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}$, 且易知 $m_1 r^2 + m_2 r^4 < 0$, 由式(13)有:

$$\delta = -\frac{m_1}{a} r^3 - \frac{m_2}{a} r^5 \quad (14)$$

此即为各像素点畸变量与到畸变中心距离的关系, 将 m_1 、 m_2 和 a 的值代入式(14), 不难得到如图 3 所示的畸变关系图 (CCD 成像尺寸为 $6.4\text{mm} \times 4.8\text{mm}$)。

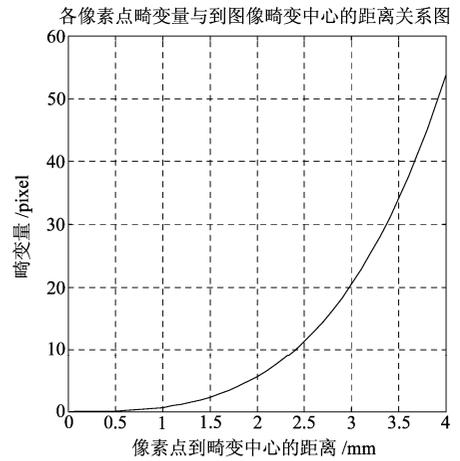


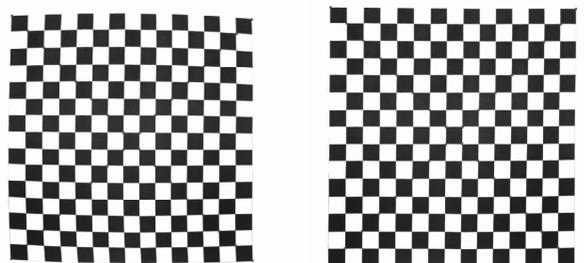
图 3 各像素点畸变量与到畸变中心距离的关系
Fig. 3 Relationship between amount of distortion of each pixel and distance to the distortion center

利用上述的畸变模型和处理方法, 在集成 OpenCV 的 VC++ 6.0 环境下编写图像畸变校正软件^[9], 应用程序实现的基本流程可以描述为: 程序初始化→读取获得的带有畸变的图像数据→获得摄像机的标定参数(校正的核心)→利用 OpenCV 库函数 vUndistort2 实现图像校正→存储并显示畸变校正后的图像→释放内存并结束校正。



图 4 畸变校正软件界面
Fig. 4 Software interface of distortion correction

利用编写的图像畸变校正软件, 对所拍摄的图像进行畸变校正, 图 5 是对拍摄的黑白棋格标定模板畸变校正前后的图像, 从校正前后图像可以看到明显的视觉效果。



(a) 校正前图像 (b) 校正后图像
图 5 畸变图像的校正
Fig. 5 Image distortion correction

为了更好地观察畸变校正前后图像的变化及校正效果,针对图5所拍摄的 15×15 黑白棋格模板图像主/次对角线上的32个像素点位置在校正前后进行了比对测试实验。图6(a)为畸变校正前后被测试点像素位置变化,校正前后像素位置分别用蓝色和红色表示,(b)为畸变校正前后被测试点总畸变值三维效果图。

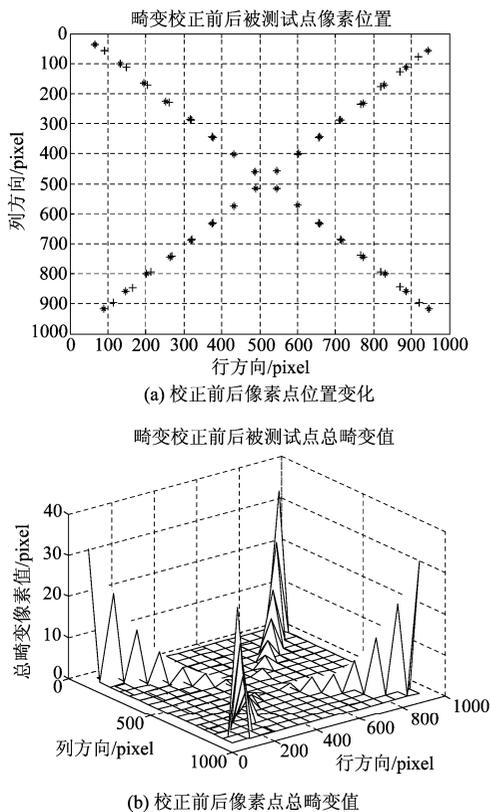


图6 畸变校正前后测试效果

Fig. 6 Test results before and after distortion correction

表3 偏振图像畸变校正前后目标提取的准确率比较

Tab. 3 Comparing the accuracy of object extraction before and after distortion correction of polarization image

	校正前	校正后
简单背景	92%	95%
一般背景	90%	93%
复杂背景	78%	89%

由图6可以看出,测试点实际畸变量符合如图3所示的理论畸变量关系,实际与理论之间的畸变量差控制在3%以内,很好地验证了镜头的径向畸变特性:在畸变中心周围几乎无畸变(畸变中心处畸变为零);越偏离畸变中心,畸变程度越大;径向畸变关于畸变中心对称。除此之外,通过外场一系列偏振探测实验可

以得出:经畸变校正后的偏振图像能有效提高被探目标提取的准确率,简单背景、一般背景和复杂背景下目标提取的准确率分别提高至95%、93%和89%,偏振图像的畸变校正对复杂背景下目标提取准确率的影响最明显。

5 结论

本文在偏振探测系统的基础上进行了摄像机标定和图像畸变校正研究。摄像机标定采用传统标定方法中一种较为经典的算法,该算法建立在摄像机线性模型基础上,并在标定过程中根据实际成像特点,建立了镜头的畸变模型。通过线性及非线性结合算法,可以得到较为准确的标定参数,之后结合 Levenberg-Marquardt 迭代法优化所得的标定参数,得到更为精确的参数值。针对镜头的畸变模型,通过求解二元高阶非线性方程组求取畸变前的投影坐标,建立了各像素点畸变量与到畸变中心距离的关系,并在集成 OpenCV 的 VC++ 6.0 环境下编写畸变校正软件实现畸变图像的有效校正,最后对畸变校正前后的图像进行了测试,测试结果表明:测试点实际畸变量符合理论畸变量关系,很好地验证了镜头的径向畸变特性。除此之外,通过外场一系列偏振探测实验可以得出:经畸变校正后的偏振图像能有效提高被探目标提取的准确率,偏振图像的畸变校正对复杂背景下目标提取准确率的影响最明显。

参考文献

- [1] 吴良海. 大气散射光线的偏振特性研究[D]. 硕士学位论文. 合肥: 合肥工业大学计算机与信息学院. 2010.
WU Lianghai. Polarization of Scattering Light in the Atmosphere[D]. Master thesis. Hefei. Hefei University of Technology School of Computer and Information. 2010. (in Chinese)
- [2] Zhengyou Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research, December 1998.
- [3] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHANG Guangjun. Machine Vision[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [4] 章毓晋. 计算机视觉教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.

ZHANG Yujin. Computer Vision [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011. (in Chinese)

- [5] Zijian Zhao, Yuncai Liu, Zhengyou Zhang. Camera Calibration With Three Noncollinear Points Under Special Motions [J]. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, 2008, 17(12): 2393-2402.
- [6] Zhang Zhengdong, Yasuyuki Matsushita, Ma Yi. Camera Calibration with Lens Distortion from Low-rank Textures [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011: 2321-2328.
- [7] M. I. A. Lourakis. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar [R]. Heraklion, Crete, GREECE, Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology-Hellas, 2005.
- [8] 田原嫒, 黄合成, 谭庆昌, 张海波, 石志标. 摄像机镜头畸变的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(26): 49-52.
- Yuanyuan TIAN, Hecheng HUANG, Qingchang TAN, Haibo ZHANG, Zhibiao SHI. Research on the camera lens distortion [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(26): 49-52. (in Chinese)
- [9] 田克微, 张爱武, 王少敏. 一种基于 OpenCV 的摄像机标定方法 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 14-16.
- Kewei TIAN, Aiwu ZHANG, Shaomin WANG. A camera calibration method based on OpenCV [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science), 2008, 29(2): 14-16. (in Chinese)

作者简介



何均均(1987-),男,江苏南通人,现为合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生,研究方向为智能信息处理、大气偏振信息探测。



胡良梅(1974-),女,安徽合肥人,现任合肥工业大学计算机与信息学院副教授,硕士生导师,研究方向为信息融合、图像处理、智能信息处理。



范之国(1979-),男,安徽六安人,现任合肥工业大学计算机与信息学院讲师,研究方向为智能信息处理、仿生导航、大气偏振信息探测。



高永(1984-),男,江苏扬州人,现为合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生,研究方向为智能信息处理、大气偏振信息探测。



张阳阳(1988-),男,安徽合肥人,现为合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生,研究方向为智能信息处理、大气偏振信息探测。