

# 基于 Matlab 的相机内参和畸变参数优化方法

李超 张世超

(厦门大学 航空航天学院 福建 厦门 361000)

**摘要** 为了提高相机标定结果的准确度,文中就相机内参和畸变参数的优化方法进行了研究。在建立准确的相机成像及标定模型基础上,根据模型参数估计的具体推导步骤,利用最大似然估计法对得到的参数进行结果优化,然后通过修改镜头畸变模型重新计算参数得到最终结果。实验证明,应用文中提出的流程求解相机内参和畸变参数,简单快速、准确度高且实用性强。

**关键词** 相机标定;内参;畸变参数;优化

中图分类号 TP391.41;TB811 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2017)04-087-05

## Study on the Optimization of Internal Control and Camera Distortion Parameters Method Based on Matlab

LI Chao ZHANG Shichao

(School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361000, China)

**Abstract** Study on the optimization method of camera internal and distortion parameters is conducted in order to improve the accuracy of the results for camera calibration. On the basis of camera imaging and calibration model, we optimize the parameters by the method of maximum likelihood following the specific steps, and get the final result by recalculating parameters through the lens distortion model. Experiment results show that application of the proposed process to solve the camera internal and distortion parameters, simple and fast, with high accuracy and strong practicability.

**Keywords** camera calibration; internal control; distortion parameters; optimization

相机标定一直是计算机视觉和图像测量的重要组成部分。标定技术包括两大块内容:摄像机几何成像模型和标定方法<sup>[1-2]</sup>。几何模型决定了某点在三维空间里的位置与其在二维图像中对应像素点的相互关系,因而相机标定的第一步也是关键的一步就是对相机几何建模,建立一个能反应相机获取图像的几何模型<sup>[3-4]</sup>。建立好一个合适的几何模型后,再通过几何模型建立相应的方程组和约束条件进行参数求解,反过来便可通过建立的几何模型对图像信息进行三维重建,这就是相机的标定<sup>[5]</sup>。

常使用的成像模型为针孔模型,其原理是将物体的投影简化为小孔成像,该方法简单易懂、使用方便。摄像机标定方法主要分为 3 大类:传统标定法、自标定方法和主动视觉标定法<sup>[6-7]</sup>。3 类方法各有优缺点,传统方法依赖标定板,精度高,适用于各种摄相机成像

模型,但计算较复杂,且标定板价格昂贵;自标定方法无需标定板,只需匹配图像点之间的对应关系,一般是基于绝对二次曲线或曲面来求解,因此鲁棒性不高,精度较低;基于主动视觉的标定法要求摄像机可以按照特定要求运动,通常可以线性求解,鲁棒性较强<sup>[8-10]</sup>。张正友标定法<sup>[11]</sup>是介于传统标定方法和自标定方法之间的一种方法,其求解相机参数的初值时采用相机成像的线性模型,然后给出考虑了非线性模型中的非线性畸变因素的目标函数,通过非线性最优化的方法可求得相机参数的最优解。这种标定方法具有较好的鲁棒性、实用性和较高的精度。

本文在已有的张正友标定法的基础上,利用 Matlab 中的 Camera Calibration Toolbox 工具箱对相机进行标定操作,给出具体的操作步骤,并对所得到的内参及畸变参数进行优化,使其尽可能的符合相机的线性模型,提高后续三维重建工作的准确度。

总体而言,此方法简单实用且快速,可获得理想的准确度和效果。

收稿日期:2016-05-03

作者简介:李超(1990-),男,硕士研究生。研究方向:计算机视觉。张世超(1991-),男,硕士研究生。研究方向:图像处理。

## 1 标定原理及过程

### 1.1 相机成像模型及畸变模型

相机的几何成像模型是用来联系相机成像平面的像素点坐标与三维坐标系的点坐标的数学关系,通常采用的是针孔模型。相机成像过程可用 4 个坐标系来描述:图像坐标系、成像平面坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系。图像坐标系是以像素为单位的,原点为图像左上角,坐标值表示像素在数组中的列数和行数;成像平面坐标系是以毫米为单位的,原点定义在相机光轴和图像平面的交点处,称之为光心;相机坐标系原点定义为相机光心, \$X\_c, Y\_c\$ 轴方向与成像平面坐标系一致, \$Z\_c\$ 为相机的光轴,与成像平面垂直;世界坐标系可选定为环境中任意一个参考坐标系<sup>[12]</sup>。张正友标定法中将世界坐标系建立在平面模板上,即 \$Z\_w = 0\$。理想相机标定模型如图 1 所示。

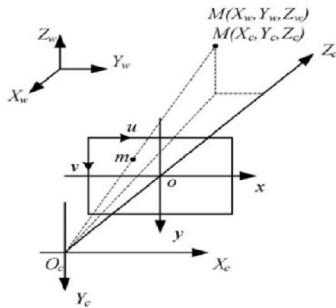


图 1 理想相机标定模型

\$O-uw\$ 为图像坐标系, \$O\_1-XY\$ 为成像平面坐标系, \$O\_c-X\_cY\_cZ\_c\$ 为相机坐标系, \$O\_w-X\_wY\_wZ\_w\$ 为世界坐标系,记 \$O\_1\$ 在图像坐标系中坐标为 \$(u\_0, v\_0)\$。三维空间中一点 \$M\$ 经成像后落在图像平面 \$m\_u\$ 处,设其在图像坐标系下坐标为 \$(u, v)\$,在成像平面坐标为 \$(x, y)\$,相机焦距为 \$f\$,则有: \$u = x/dx + u\_0, v = y/dy + v\_0, f/z\_c = x/x\_c = y/y\_c\$,用矩阵及齐次坐标表示为

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

\$dx\$ 和 \$dy\$ 为像素在 \$X, Y\$ 轴上的物理尺寸。\$(x\_c, y\_c, z\_c)\$ 为 \$M\$ 在相机坐标系下的坐标, \$(x\_w, y\_w, z\_w)\$ 为 \$M\$ 在世界坐标系下的坐标,其关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 \$R\$ 为摄像机坐标轴在世界坐标系中的方向矢量,是 \$3 \times 3\$ 正交单位矩阵。\$t\$ 为从世界坐标系的原点到光心的平移矢量,是 3 维列向量。综合式(1)、式(2)和式(3),可得到图像坐标系和世界坐标系之间的描述关系

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/dx & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f/dy & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

实际的摄像机镜头由于加工、制造误差会存在某些程度的畸变,导致在成像过程中产生一定的偏移误差。文中通过径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变等非线性参数描述成像过程中产生的畸变。由于引入过多的非线性参数不但不能提高标定精度,反而造成算法不稳定<sup>[13]</sup>。因此在标定过程中只考虑径向畸变和离心畸变。假设 \$m\_u(x\_u, y\_u)\$ 为理想情况下投影点在成像平面坐标系下的物理坐标, \$m\_d(x\_d, y\_d)\$ 为加入畸变情况下投影点在成像平面坐标系下的物理坐标。则有

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 \$r^2 = x^2 + y^2, k\_1, k\_2\$ 为摄像机的径向畸变系数; \$p\_1, p\_2\$ 为摄像机的离心畸变系数<sup>[14]</sup>。

可以将相机标定的过程简单理解为:在世界坐标系给出足够数量的高精度坐标点与其在像素坐标系中对应点的像素坐标后,求解相机内部参数矩阵 \$A\$ 和外部参数矩阵 \$R, t\$ 的最佳估计值。

### 1.2 内参估计

对于标定板上一点 \$M\$,在世界坐标系中的齐次坐标为 \$M = [X\_w, Y\_w, Z\_w, 1]^T\$。在摄像机几何模型中, \$M\$ 点在图像坐标系中的对应成像点 \$M\_1\$,齐次坐标为 \$m\$。\$M\$ 点到 \$M\_1\$ 点的映射关系用齐次坐标可表示为

$$s \tilde{m} = A [R \quad T] \tilde{M} \quad (6)$$

式(6)中, \$s\$ 为不等于零的尺度因子; \$R\$ 为旋转矩阵; \$T\$ 为平移向量; \$A\$ 为摄像机内部参数,设 \$A\$ 点到 \$A\_1\$ 点的变换矩阵为 \$H\$,则

$$s \tilde{m} = H \tilde{M} \quad (7)$$

设 \$H = [h\_1, h\_2, h\_3]\$,假设旋转矩阵 \$R\$ 的第 \$i\$ 列表示为 \$\gamma\_i\$,则可得到

$$[h_1, h_2, h_3] = \lambda A [\gamma_1, \gamma_2, T] \tilde{M} \quad (8)$$

其中 \$\lambda\$ 为常数因子,由于 \$R\$ 的正交性, \$\gamma\_1^T \gamma\_2 = 0, \gamma\_2^T \gamma\_2 = \gamma\_1^T \gamma\_1\$,得到内参约束方程

$$\begin{cases} h_1 A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (9)$$

为了求解摄像机标定矩阵,令

$$B = A^{-T}A^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & \frac{\gamma}{f_x f_y} & \frac{\gamma v_0 - u_0 f_y}{f_x^2 f_y} \\ -\frac{\gamma}{f_x f_y} & \frac{\gamma^2}{f_x^2 f_y} + \frac{1}{f_y^2} & \frac{\gamma(\gamma v_0 - u_0 f_y)}{f_x^2 f_y^2} - \frac{v_0}{f_y^2} \\ \frac{\gamma v_0 - u_0 f_y}{f_x^2 f_y} & \frac{\gamma(\gamma v_0 - u_0 f_y)}{f_x^2 f_y^2} - \frac{v_0}{f_y^2} & \frac{(\gamma v_0 - u_0 f_y)^2}{f_x^2 f_y^2} + \frac{v_0^2}{f_y^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$B$  是一个对称矩阵,可用一个六维向量表示,设  $H$  中第  $i$  列向量表示为  $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$  则有

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T D \quad (11)$$

则式(9)两个基本约束方程写为

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} B = 0 \quad (12)$$

获取  $n$  幅标定图像,则会产生  $n$  个如上式的方程,则将这些方程叠加,得到

$$Vb = 0 \quad (13)$$

式(13)中,  $V$  是一个  $2n \times 6$  矩阵,若  $n \geq 3$ ,则可以在尺度因子未知情况下确定唯一的  $b$ ,求得  $b$  后,则可得到摄像机内参数分别为

$$\begin{cases} f_x = \sqrt{\frac{\lambda}{B_{11}}} \\ f_y = \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2}} \\ u_0 = \frac{\gamma v_0}{f_y} - \frac{B_{13} f_x^2}{\lambda} \\ v_0 = \frac{B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} \end{cases} \quad (14)$$

### 1.3 畸变参数估计及优化

求解出内参后,先考虑径向畸变,利用最小二乘法求解出径向畸变参数,再通过最大似然估计,优化得到所有参数值。因为先只考虑径向畸变,式(5)变形为

$$\begin{aligned} x_d &= x_u + x_u [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ y_d &= y_u + y_u [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)转换为图像坐标系的描述为

$$\begin{aligned} u_d &= u_u + (u_u - u_0) [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ v_d &= v_u + (v_u - v_0) [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{aligned} \quad (16)$$

经过变换为

$$\begin{bmatrix} (u_u - u_0)(x^2 + y^2)(u_u - u_0)(x^2 + y^2)^2 \\ (v_u - v_0)(x^2 + y^2)(v_u - v_0)(x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - u_u \\ v_d - v_u \end{bmatrix}$$

取多组  $(u_v \ v_u)$ 、 $(u_d \ v_d)$  可得到

$$\begin{bmatrix} (u_u^1 - u_0)((x^1)^2 + (y^1)^2)(u_u^1 - u_0)((x^1)^2 + (y^1)^2)^2 \\ (v_u^1 - v_0)((x^1)^2 + (y^1)^2)(v_u^1 - v_0)((x^1)^2 + (y^1)^2)^2 \\ \vdots \\ (u_u^n - u_0)((x^n)^2 + (y^n)^2)(u_u^n - u_0)((x^n)^2 + (y^n)^2)^2 \\ (v_u^n - v_0)((x^n)^2 + (y^n)^2)(v_u^n - v_0)((x^n)^2 + (y^n)^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_d^1 - \hat{u}_u^1 \\ \hat{v}_d^1 - \hat{v}_u^1 \\ \vdots \\ \hat{u}_d^n - \hat{u}_u^n \\ \hat{v}_d^n - \hat{v}_u^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$$

可简化为  $Dk = d$ ,然后可通过线性最小二乘法求解出径向畸变参数

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d \quad (17)$$

所有参数均利用最大似然估计进行优化,转动标定板,从不同位置拍摄棋盘标定板,拍摄  $n$  幅,每幅标定板图像均拥有  $m$  个标定,并假设每个标定点的坐标都有独立同分布的噪声,因为初始参数已求解,所以将每幅图像的点根据已求解的参数重投影回三维空间,最小化与真实值的差异,其实就是建立非线性最小化模型,公式如下

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| m_{ij} - m(A \ k_1 \ k_2 \ R_i \ t_i \ M_j) \| \quad (18)$$

式中  $m_{ij}$  为第  $j$  个点在第  $i$  幅图像中的像点;  $R_i \ t_i$  为第  $i$  幅图像的旋转矩阵和平移向量;  $M_j$  为第  $j$  个点的空间坐标,在视觉领域通常使用 Levenberg - Marquardt 算法来求解上式<sup>[15]</sup>。

所有参数经过最大似然估计后,得到优化解,为进一步减小畸变参数,将 Camera Calibration Toolbox 中的二值化变量 est\_dist 设为 [0 0 0 0 0],即剔除 Matlab 中的畸变模型,重新进行内参和畸变参数的计算并用最大似然估计再次优化。最后,得到的内参和畸变数据都较为准确和理想。

## 2 实验结果与分析

为了验证本文剔除的方法流程的有效性和准确性,选用 Point Grey 工业相机 GRAS - 20S4M/C 进行标定实验,该相机最大分辨率为  $1\ 624 \times 1\ 224$ ,体积小,便于安装,使用 IEEE - 1394 接口;IEEE - 1394 接口标准具有连接简单,低成本,无需相机文件,支持大范围帧率和图像尺寸等优点。

### 2.1 相机标定参数

实验所用标定模板为黑白相间的棋盘格,共  $9 \times 7$  个方格,每个方格尺寸为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。标定过程主要基于 Matlab 编程平台。主操作界面如图 2 所示。



图 2 标定操作界面

点击 Image names 读入用来标定的 6 幅图片,如图 3 所示。

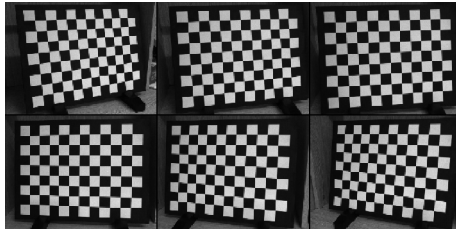


图 3 标定图片

下一步是提取 7 幅图片中的所有角点,利用 Extract grid corners 实现,提取角点后如图 4 所示。

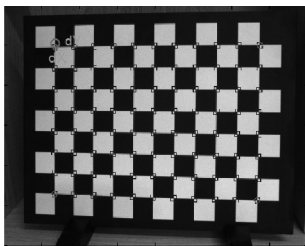


图 4 角点提取

完成上述操作后,点击 Calibration 按钮,进行一个封闭的参数计算过程和参数优化,可得参数初始值和优化后的值,初始值如表 1 所示,初步优化后可得到畸变参数  $[k_1; k_2; p_1; p_2; k_3]$ ,值如表 2 所示。

在 Matlab 界面中输入  $\text{est\_dist} = [0; 0; 0; 0; 0]$ ,回车后输入  $\text{clear fc cc kc}$ ,重新点击 Calibration 按钮,进行优化,最后得到的优化参数如表 3 所示。

由表中数据可看出,初步优化后得到的畸变参数较大,内参也不是理想值,经过本文中提出的一个新流程后,对初次标定的结果通过修正的畸变参数模型优化后再次标定,可得到更为理想的内参数据和畸变参数,可用来精确地进行三维重建工作。

表 1 标定参数初始值

参数	X 方向	Y 方向
Focal Length( fc)	1 896. 787 86	1 873. 892 93
Principal point( cc)	784. 834 54	602. 824 53

表 2 初步优化

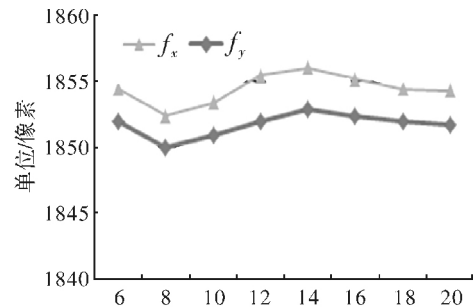
参数	X 方向	Y 方向
Focal Length( fc)	1 854. 366 26	1 855. 893 72
Principal point( cc)	790. 834 58	601. 586 45
Distortion( kc)	-0. 103 29 0. 226 90 0. 000 29 0. 000 19 0. 000 00	

表 3 最终优化

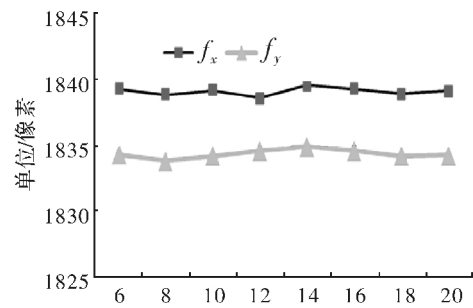
参数	X 方向	Y 方向
Focal Length( fc)	1 836. 202 16	1 832. 892 93
Principal point( cc)	789. 844 59	598. 521 72
Distortion( kc)	0. 000 00 0. 000 00 0. 000 00 0. 000 00 0. 000 00	

### 2.2 多组实验结果分析

为了验证本文方法的准确性,本文对上述标定方法进行多组实验,在相同的实验环境下从不同角度采集 20 幅不同的图片。从此 20 幅图像的特征提取点中依据不同组数分别按照传统标定方法与本文提出的优化方法进行相机的内部参数标定,得到有效焦距,主点坐标随图像数量变化的趋势,如图 5 所示。



(a)



(b)

图 5 焦距变化曲线

从上述两幅图中的对比可看出,经过初步优化和最终优化后的标定内参随标定用图像数量增加均趋于稳定,且两者标定结果相近。但通过本文方法优化的内参结果相对更加稳定,振幅相对较小。

为了验证本文方法的鲁棒性,在上述实验中的 20 幅图像中选取 10 幅加入期望为 0、均方差不同的高斯噪声,依次按照传统标定方法与本文提出的优化方法进行相机的内外部参数标定,以重投影误差值作为衡量算法鲁棒性的标准,噪声均方差水平与重投影误差值的关系如图 6 所示。重投影误差和噪声均方差之间呈明显正相关关系,在不加入噪声或者加入的噪声很小时,两种优化方法的平均投影误差均可达 0.5 个像素以下;当噪声均方差  $> 1$  时,两种方法平均投影误差均明显增大并成近似线性关系。噪声均方差  $< 0.5$  时,两种方法的重投影误差值极为接近,不过随着添加噪声的均方差增大,本文提出的最终优化方法重投影

误差值变化趋势相对于初步优化方法较小,鲁棒性更好。

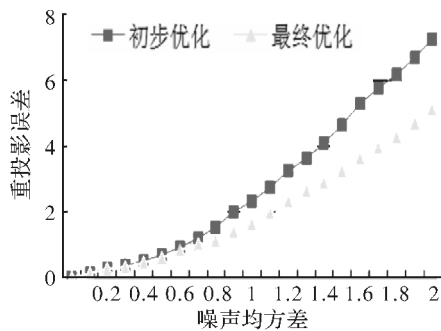


图6 噪声均方差与重投影误差关系曲线

### 3 结束语

本文基于 Matlab 的 Camera Calibration Toolbox 工具箱提出了一个标定流程,对内参和畸变参数进行了有效的优化,并在 Point Grey 工业相机 GRAS-20S4M/C 的平台上进行了标定实验,实验结果标定,运用该工具箱对相机进行标定,整个计算过程简单,且标定与校正的实现速度快,经过最终优化后的准确度较高且鲁棒性好,结果较为理想。

#### 参考文献

- [1] 高文斌,王洪光,姜勇.一种基于指数积的串联机器人标定方法[J].机器人,2013,35(2):156-161.
- [2] 李光乐,黄文有,刘青松等.面向水下双目视觉的改进张氏标定方法及实验[J].光学学报,2014,34(12):211-216.
- [3] 邱茂林,马颂德,李毅.计算机视觉中摄像机标定综述

- [4] 夏仁波,刘伟军,赵吉宾等.基于圆形标志点的全自动相机标定方法[J].仪器仪表学报,2009,30(2):368-373.
- [5] 薛俊鹏,苏显渝.基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J].光学学报,2012,32(1):145-151.
- [6] 王子辰,戴明,汪永阳等.一种基于虚拟立体靶标的线阵相机标定方法[J].光电子·激光,2013(5):867-873.
- [7] De Ma S. A self-calibration technique for active vision systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114-120.
- [8] 孟晓桥,胡占义.摄像机自标定方法的研究与进展[J].自动化学报,2003,29(1):110-124.
- [9] Song Hongjun, Chen Yangzhou, Gao Yuanyuan. Velocity calculation by automatic camera calibration based on homogeneous fog weather condition[J]. International Journal of Automation and Computing, 2013, 10(2): 143-156.
- [10] 任延俊,郭霏,姜淑华等.基于径向约束的 CCD 相机标定参数的整体优化[J].长春理工大学学报:自然科学版,2009,32(2):213-216.
- [11] 刘艳,李腾飞.对张正友相机标定法的改进研究[J].光学技术,2014(6):565-570.
- [12] 胡国元,何平安,王宝龙等.视觉测量中的相机标定问题[J].光学与光电技术,2004(3):9-12.
- [13] 田原嫫,黄合成.基于 CCD 摄像机成像的径向畸变研究[J].世界科技研究与发展,2008,30(2):168-170.
- [14] 李莉.OpenCV 耦合改进张正友算法的相机标定算法[J].轻工机械,2015,33(4):60-63.
- [15] 胡志刚,花向红. Levenberg-Marquardt 算法及其在测量模型参数估计中的应用[J].测绘工程,2008,17(4):31-34.

(上接第 86 页)

- [10] Chen Jianwen, John Villasenor, Yun He, et al. Parallel fast inter mode decision for H.264/AVC encoding[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(8): 1443-1449.
- [11] Tian G. An efficient fast mode decision algorithm for H.264/AVC intra prediction[J]. Congress on Image and Signal Processing, 2008, 1(5): 597-605.
- [12] Sundaramoorthy K. Slipstream processors: improving both performance and fault tolerance [C]. Shanghai: ASPLOS-IX, 2000.
- [13] Moon J M, Kim J H. A new low-complexity integer distortion

- estimation method for H.264/AVC encoder[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(2): 207-212.
- [14] Po L M, Guo K. Transform-domain fast sum of the squared difference computation for H.264/AVC rate-distortion optimization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(6): 765-773.
- [15] JVT. H.264/AVC reference software JM19.0 available online [EB/OL]. (2015-02-01) [2016-02-14] <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/download>.