

# 基于共面条件的摄像机非线性畸变自校正

张征宇<sup>1</sup> 黄诗捷<sup>2</sup> 罗 川<sup>2</sup> 孙 岩<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国空气动力研究与发展中心空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000)  
<sup>2</sup> 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要** 由于制造和装配误差难以完全消除, 导致摄像机的光学系统存在不同程度的非线性光学畸变现象。为此, 利用不同视角采集图像上同名像点共面的基本原理, 推导包含非线性畸变模型的共面条件方程, 并采用最小二乘解的广义逆法求解非线性畸变参数, 确保摄像机的自校正精度; 因无需加工和维护成本很高的精密标定板, 也不用制作高精度摄像机运动平台, 仅通过自由拍摄方式就能够从多视角获得含 6 个以上编码点的图像, 即可获得摄像系统的非线性畸变参数。因此, 较传统的摄像机畸变校正方法而言, 自校正过程简单快捷, 成本低, 多个实例证明技术的正确性与实用性。

**关键词** 机器视觉; 摄像机标定; 畸变系数; 共面条件方程

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0115002

## Nonlinear Distortion Correction of Camera Based on Coplanar Condition Equations

Zhang Zhengyu<sup>1</sup> Huang Shijie<sup>2</sup> Luo Chuan<sup>2</sup> Sun Yan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)  
<sup>2</sup> Information Engineering College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

**Abstract** According to the homologous points on different coplanar visual-angle images coplanar, the coplanar condition equations with nonlinear distortion coefficients are deduced, and the generalized inverse method of least square solution for nonlinear distortion parameters is put forward to ensure camera self-calibrating accuracy, because the fabricating and assembling errors of the camera optical system cannot be removed which results to nonlinear distortion between real image and ideal image to some extent. This calibrating method generates the nonlinear distortion coefficients from different visual-angle images with more than six code points, therefore it is simple and rapid because it doesn't need high-precision calibration objects or camera moving platform, so the calibrating cost is low, compared with the traditional camera calibration. The examples have demonstrated this method is correct; therefore it is useful and effective.

**Key words** machine vision; camera calibration; distortion coefficients; coplanar condition equations

**OCIS codes** 150.1135; 150.1488; 150.3040; 150.4620; 150.6910; 100.4999

## 1 引 言

由于电荷耦合器件 (CCD) 存在制造误差、镜片存在曲面制造误差、各镜片间存在轴向安装误差以及多个透镜存在对中误差等, 破坏了摄影中心、待检测点及其像点间的共线关系, 产生非线性的光学畸

变, 必然降低图像检测的精度<sup>[1~13]</sup>。目前的相机畸变校正均建立在径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变的基础之上<sup>[1~12]</sup>, 主要技术分为三类:

1) 用一个结构已知、精度很高的三维 (3D) 或二维 (2D) 标定物, 建立摄影中心、待检测点及其像点

收稿日期: 2011-06-02; 收到修改稿日期: 2011-08-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51075385) 和国家 973 计划 (2009CB723802) 资助课题。

作者简介: 张征宇 (1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学测量及其在风洞试验中的应用等方面的研究。

E-mail: zzyxjd@163.com

的约束关系,获得图像的内方位元素。典型代表有直接线性变换(DLT)方法、Tsai 的两步标定法、Weng 等提出的迭代法、利用透视变换矩阵的方法、Martins 等提出的双平面标定法及张正友提出的平面模板标定方法<sup>[1~6]</sup>。这种方法容易引入非线性畸变系数,从而更准确地描述相机的光学成像关系,得到较高的校正精度;但当标定板幅面大于等于 600 mm×800 mm 后,其制造与(恒温恒湿)存储维护费用剧增至十几万到几十万元人民币<sup>[1~6]</sup>。

2) 自标定法无需标定物,仅靠多幅图像对应点间的关系直接进行标定,故灵活性高,应用范围广泛,但都需要解非线性方程组,对初值的选择十分敏感,稳健性不高<sup>[10~13]</sup>。基于消隐点的标定法都是将其作为过渡值,求圆环点的投影坐标,再利用圆环点坐标求解基本矩阵,仍需求解 Kruppa 方程,对噪声和初值敏感<sup>[9,10]</sup>。

3) 基于主动视觉的标定方法,是通过一个可以精确控制其运动的主动视觉平台来对摄像机进行标定<sup>[10~12]</sup>。其代表性的方法是马颂德提出的基于两组二正交运动的线性方法,杨长江等提出的改进的方案,即分别基于 4 组平面正交以及 5 组平面正交运动,利用图像中的极点信息来线性标定内方位元素参数。文献[13]在共面条件方程中引入线性的径向畸变系数,但未考虑偏心畸变和薄棱镜畸变,并需转台获取待参数初值。这类算法简单,可以获得线性解,但都需要可精确控制的摄像机运动平台<sup>[9,10]</sup>。

为此,本文建立含非线性畸变模型的同名像对共面方程,无需传统昂贵的高精度标定板(或运动平台),实现低成本、高精度的摄像系统校正。

## 2 基于共面条件的非线性畸变校正

### 2.1 摄像机非线性光学畸变模型

径向畸变会造成图像点沿着径向产生移动,离中心点越远变形量越大。正的径向变形量会引起点向远离像中心的方向移动;负的径向变形量会引起点向靠近像中心的方向移动。忽略高阶的部分其数学模型为<sup>[1,2]</sup>

$$\begin{cases} \delta x_r = x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ \delta y_r = y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{cases}, \quad (1)$$

摄像机的光学系统一般是由多个光学镜片组成,因存在装配误差,这些光学镜片的光轴不会完全共线,从而产生了偏心畸变,忽略高阶的部分其数学模型为<sup>[1,2]</sup>

$$\begin{cases} \delta x_d = p_1 x(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy \\ \delta y_d = 2p_1 xy + p_2 x(x^2 + 3y^2) \end{cases}, \quad (2)$$

薄棱镜畸变是由光学镜头制造误差和 CCD 感光元件阵列制造误差引起的图像变形,这种变形也由径向变形分量和切向变形分量共同构成,忽略高阶的部分其数学模型为<sup>[1,2]</sup>

$$\begin{cases} \delta x_p = s_1(x^2 + y^2) \\ \delta y_p = s_2(x^2 + y^2) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $(x, y)$  为成像点的图像坐标。

### 2.2 引入非线性光学畸变模型的共面方程

对于给定两张图片  $I_A$  和  $I_B$ , 其同名像对的集合为  $P$ ,  $\forall p_i \in P, p_i = (p_i^A, p_i^B)$ ,  $S_A u_1 v_1 w_1$  与  $S_B u_2 v_2 w_2$  分别为  $p_i^A$  和  $p_i^B$  对应的像空间辅助坐标系,  $S_1$  与  $S_2$  分别为  $S_1 u_1 v_1 w_1$  与  $S_2 u_2 v_2 w_2$  的原点,对应的坐标分别为  $(u_1, v_1, w_1)$  和  $(u_2, v_2, w_2)$ ,  $S_2$  在  $S_1 u_1 v_1 w_1$  中的坐标为  $(b_x, b_y, b_z)$ ; 则  $p_i^A$  和  $p_i^B$  的共面方程式可表示为

$$F(p_i) = \begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^A + \Delta x - x_0 \\ y_1^A + \Delta y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_2 \times \begin{bmatrix} x_2^B + \Delta x - x_0 \\ y_2^B + \Delta y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\Delta x = \delta x_r + \delta x_d + \delta x, \quad (6)$$

$$\Delta y = \delta y_r + \delta y_d + \delta y_p, \quad (7)$$

式中  $f$  为焦距,  $(x_1^A, y_1^A)$  和  $(x_2^B, y_2^B)$  分别为  $p_i^A$  和  $p_i^B$  对应的像平面坐标,  $\mathbf{R}_2$  为  $S_2 u_2 v_2 w_2$  相对  $S_1 u_1 v_1 w_1$  的三个角元素  $(\varphi, \omega, \kappa)$  组成的旋转矩阵。因  $b_x$  只涉及模型比例尺,故只要  $P$  中同名像对总数超过 13, 联解(4)式即可得到 5 个相对定向元素  $(b_y, b_z, \varphi, \omega, \kappa)$ 、6 个畸变参数  $(k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2)$  和像主点坐标  $(x_0, y_0)$ 。

### 2.3 含非线性光学畸变模型的共面方程求解

采用非线性方程组最小二乘解的广义逆法求解(4)式,设向量  $\mathbf{X} = (b_y, b_z, \varphi, \omega, \kappa, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2, x_0, y_0)$ ,  $P$  中同名像对总数为  $m$ , 其雅可比(Jacobi)矩阵为

$$f(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(p_0)}{\partial b_y} & \frac{\partial F(p_0)}{\partial b_z} & \dots \\ \frac{\partial F(p_1)}{\partial b_y} & \frac{\partial F(p_1)}{\partial b_z} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F(p_m)}{\partial b_y} & \frac{\partial F(p_m)}{\partial b_z} & \dots \end{bmatrix} \cdot \quad (8)$$

则(4)式最小二乘解的迭代公式为

$$\begin{cases} \mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} - \alpha_k \mathbf{Z}^{(k)} \\ \mathbf{A}^{(k)} \mathbf{Z}^{(k)} = [F(p_0)^{(k)}, F(p_1)^{(k)}, \dots, F(p_{m-1})^{(k)}]^T \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\mathbf{A}^{(k)}$  为  $k$  次迭代值  $\mathbf{X}^{(k)}$  的雅可比矩阵,  $\alpha_k$  为使

$$\sum_{i=0}^{m-1} [F(p_i)^{(k)}]^2 \quad (10)$$

达到极小值的点, 本文使用有理极值法计算  $\alpha_k$ 。

### 3 摄像机非线性畸变自校正实验

摄像机非线性畸变自校正流程如下:

1) 以自由拍摄方式从不同视角采集包含编码点照片, 采用基于 Canny 算子提取法得到编码点轮廓, 利用最小二乘拟合法实现编码点中心圆的亚像素定位;

2) 将包含 6 个以上同名点的照片组成求解“包

含非线性畸变模型的共面条件方程”的数组;

3) 利用成熟的模拟相对定向法<sup>[14]</sup>取得每一像对的相对定向元素  $(b_y, b_z, \varphi, \omega, \kappa)$ ;

4) 将 3) 步解得结果和初值可设为 0 的  $(k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2, x_0, y_0)$  一起代入(4)式, 即可实现非线性畸变参数求解。

#### 3.1 实验设备及方案

采用 Microsoft Visual Studio 2005 开发了相机标定软件, 标定系统采用的具体硬件如下:

DALSA 的相机(分辨率为 4 Mpixel, 成像幅面为 17.4 mm×12.8 mm)、图像采集电脑、35 mm 定焦镜头和标尺。在中国空气动力研究与发展中心的 2.4 m 跨声速风洞试验段, 以自由拍摄方式从不同视角采集了 36 幅图像, 从中选取 32 幅成像清晰、亮度与对比度好的图像, 图 1(a), (b) 分别为本文开发的标定软件处理第 1 幅与第 6 幅图像的界面, 图中绿色数字为编码点编号, 红色数字为选中的标尺上编码点编号。分别从选取的 32 幅图像中分别选定 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 28 和 32 幅计算出的 6 个镜头畸变参数如表 1 所示, 随采集照片数量的变化趋势如图 2 所示。

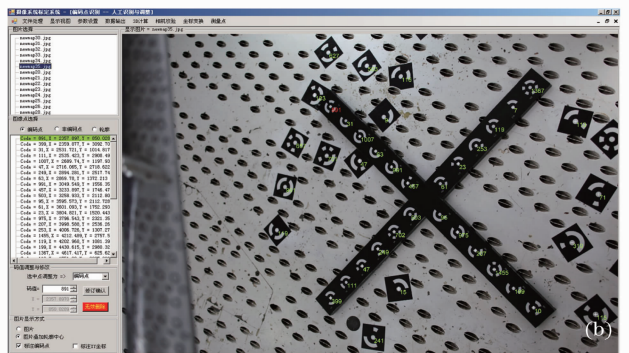
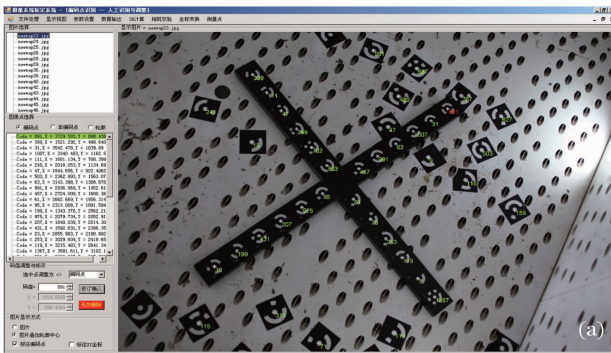


图 1 相机标定软件的图像处理界面。(a)第 1 幅图像;(b)第 6 幅图像

Fig. 1 Interface of calibration software for image recognition. (a) the first image; (b) the sixth image

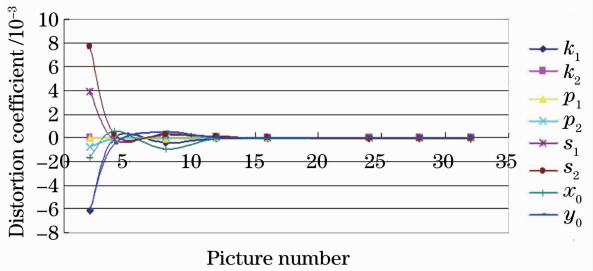


图 2 非线性光学畸变系数变化趋势图

Fig. 2 Tendency of nonlinear optical distortion coefficients with picture numbers

#### 3.2 数据分析

与传统标定板的非线性畸变校正不同, 由于本次实验采用自由拍摄方式采图(有随意性), 并且编码点的密度不大(与传统标定板相比), 难以用 2~3 张照片实现准确的畸变参数; 从表 1 中数据和图 2 可知: 当选定 2 幅图像解出的畸变参数较大, 原因在于参与计算畸变参数的编码点总数量为 48, 并且在 CCD 上成像位置分布尚不均匀, 导致解得的畸变参数未真实反映相机的畸变现象, 使用该畸变参数将使某些位置的像素点的改正量极小, 而其他位置的

改变量较大,引起畸变参数失真现象;当选定图像数量从 4 增加到 12,参与计算畸变参数的编码点总数量从 96 增至 288 个,由于采集的照片视角不同,标尺上编码点与洞体上编码点的成像坐标一般不同,其成像位置在 CCD 上各个方位都开始有分布,因此计算出的镜头畸变参数值迅速减小,开始收敛;当选

定图像数量从 16 增加到 32,参与计算畸变参数的编码点总数量从 384 增至 768 个,其成像位置在 CCD 各个方位基本都有分布。因此,计算出畸变参数值已经收敛,变化极小,即,此时再增加参与计算畸变参数的编码点数量,对于提高畸变参数解算精度效果不明显。

表 1 DALSA 相机畸变系数变化趋势

Table1 Tendency of nonlinear distortion coefficients of DALSA camera with pictures

Number	$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$s_1$	$s_2$	$x_0$	$y_0$
2	$-6.15 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-5}$	$3.48 \times 10^{-5}$	$-7.29 \times 10^{-4}$	$3.89 \times 10^{-3}$	$7.69 \times 10^{-3}$	$-1.65 \times 10^{-3}$	$-6.03 \times 10^{-3}$
4	$5.17 \times 10^{-5}$	$9.87 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-5}$	$-6.62 \times 10^{-5}$	$-1.24 \times 10^{-4}$	$3.24 \times 10^{-4}$	$5.63 \times 10^{-4}$	$-4.60 \times 10^{-4}$
8	$-4.33 \times 10^{-4}$	$1.72 \times 10^{-5}$	$-1.61 \times 10^{-5}$	$1.07 \times 10^{-5}$	$2.55 \times 10^{-4}$	$2.97 \times 10^{-4}$	$-9.63 \times 10^{-4}$	$4.92 \times 10^{-4}$
12	$-9.60 \times 10^{-5}$	$4.53 \times 10^{-6}$	$-9.34 \times 10^{-6}$	$-3.70 \times 10^{-6}$	$1.62 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-4}$	$-2.30 \times 10^{-5}$	$2.46 \times 10^{-5}$
16	$-7.66 \times 10^{-5}$	$4.20 \times 10^{-6}$	$-6.39 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-5}$	$1.77 \times 10^{-5}$	$-1.16 \times 10^{-5}$	$-5.54 \times 10^{-5}$	$1.98 \times 10^{-5}$
24	$-7.74 \times 10^{-5}$	$3.51 \times 10^{-6}$	$-4.01 \times 10^{-6}$	$6.14 \times 10^{-6}$	$-5.80 \times 10^{-7}$	$-2.52 \times 10^{-5}$	$-3.49 \times 10^{-6}$	$-1.60 \times 10^{-6}$
28	$-6.84 \times 10^{-5}$	$3.16 \times 10^{-6}$	$-3.74 \times 10^{-6}$	$5.49 \times 10^{-6}$	$-2.46 \times 10^{-6}$	$-2.07 \times 10^{-5}$	$-2.99 \times 10^{-6}$	$-6.19 \times 10^{-6}$
32	$-6.61 \times 10^{-5}$	$3.12 \times 10^{-6}$	$-3.87 \times 10^{-6}$	$5.36 \times 10^{-6}$	$-5.32 \times 10^{-6}$	$-2.24 \times 10^{-5}$	$-3.04 \times 10^{-6}$	$5.93 \times 10^{-6}$

因此,当参与计算畸变参数的编码点总数量达到 672 个,即当参加标定的编码点在相机 CCD 各个方位都有成像,本文方法可以得到摄像机正确的非线性畸变模型。若采用传统高密度已知点的标定板,即增加拍摄照片中同名点密度,本文方法也能通过少量照片得到准确的摄像机非线性畸变参数。

采用表 1 中 Number 为 28 时的畸变参数,校正 2.4 m 跨声速风洞中的 DALSA 相机,测得试验段底部的编码标记点的 3D 坐标如表 2 所示,表中采用的相对误差计算式为

$$\epsilon = \frac{\Delta l_{\max}}{R}, \quad (11)$$

式中  $\epsilon$  为相对误差,  $\Delta l_{\max}$  为像点残差(像点真实值与计算值之差)的最大值,  $R$  为相机成像幅面的对角线长度。与未作校正的结果(如表 3 所示)比较,解算的试验段底部的编码标记点的像点残差均有所下降,其中 47 号点像点残差从  $1.350 \times 10^{-3}$  降至  $1.5575 \times 10^{-4}$ 。

采用本文方法分别对单反数码相机尼康 D80 (24 mm 定焦镜头)和佳能 5DMarkII(45 mm 定焦镜头)进行标定,解得其非线性光学畸变系数如表 4 所示。

表 2 经校正的相机解算数据

Table 2 3D Data with camera correction

Code number	X /mm	Y /mm	Z/mm	Relative tolerance
119	334.955	294.416	-2106.822	$1.7793 \times 10^{-4}$
701	398.965	-6.767	-2065.617	$1.2465 \times 10^{-5}$
183	580.219	-126.968	-2097.507	$9.9871 \times 10^{-5}$
627	652.668	-263.456	-2092.742	$1.7553 \times 10^{-4}$
241	-135.04	310.354	-1982.158	$1.6432 \times 10^{-4}$
503	523.163	-315.236	-2047.691	$2.8133 \times 10^{-4}$
15	-76.320	139.429	-1962.116	$1.6037 \times 10^{-4}$
116	415.866	-361.518	-2009.473	$1.7998 \times 10^{-4}$
319	-310.154	-326.272	-1822.477	$2.4179 \times 10^{-4}$
115	-499.115	-217.583	-1788.223	$5.7389 \times 10^{-4}$
9	357.924	-227.953	-2014.479	$1.4627 \times 10^{-4}$
47	308.043	-69.977	-2027.032	$1.5575 \times 10^{-4}$
991	423.085	168.850	-2106.965	$2.4613 \times 10^{-4}$
687	509.174	35.931	-2106.553	$1.3131 \times 10^{-4}$

表3 未径校正的相机解算数据

Table 3 3D Data without camera correction

Code number	X /mm	Y /mm	Z /mm	Relative tolerance
119	334.847	294.381	-2106.478	$2.861 \times 10^{-4}$
701	398.807	-6.764	-2065.001	$9.089 \times 10^{-4}$
183	580.333	-126.988	-2098.422	$1.514 \times 10^{-4}$
627	653.274	-263.711	-2095.579	$7.734 \times 10^{-4}$
241	-135.059	310.343	-1981.954	$6.590 \times 10^{-4}$
503	523.352	-315.383	-2049.077	$3.896 \times 10^{-4}$
15	-76.290	139.377	-1961.184	$1.191 \times 10^{-3}$
116	415.908	-361.605	-2010.241	$1.812 \times 10^{-4}$
319	-310.482	-326.505	-1824.220	$5.407 \times 10^{-4}$
115	-501.047	-218.279	-1795.144	$7.625 \times 10^{-4}$
9	357.812	-227.903	-2014.138	$1.037 \times 10^{-3}$
47	307.890	-69.948	-2026.176	$1.350 \times 10^{-3}$
991	422.963	168.832	-2106.630	$3.223 \times 10^{-4}$
687	509.098	35.942	-2106.564	$1.746 \times 10^{-4}$

表4 D80与5DMarkII的非线性光学畸变系数

Table 4 Nonlinear optical distortion coefficients D80 and 5DMarkII camera

$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$s_1$	$s_2$	
D80	$-2.149E \times 10^{-5}$	$8.875 \times 10^{-7}$	$-4.074 \times 10^{-6}$	$-1.046 \times 10^{-6}$	$4.314 \times 10^{-5}$	$7.649 \times 10^{-6}$
5DMarkII	$-4.864 \times 10^{-7}$	$7.183 \times 10^{-9}$	$-8.164 \times 10^{-8}$	$-3.090 \times 10^{-7}$	$1.351 \times 10^{-5}$	$6.611 \times 10^{-6}$

## 4 结 论

直接在同名像对的共面条件方程中引入非线性畸变模型的思想,推导含非线性畸变系数的共面条件方程,建立其求解方法,以节省高精度的标定板(或运动平台)高昂的制造费用与恒温恒湿的存储维护费用,极大降低相机标定的成本。3个(包括2.4 m跨声速风洞现场)相机标定实验表明本文方法能够实现摄像机非线性畸变自校正,具有实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Biwu, Guo Xiaosong. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens [J]. *J. Image and Graphics*, 2005, **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]. *中国图象图形学报*, 2005, **10**(3): 269~274
- 2 Xu Liyan. Multi-View Connection Camera Calibration Algorithm [D]. Jinan: Shangdong University, 2008  
徐立艳. 摄像机标定多视点校正算法[D]. 济南: 山东大学, 2008

- 3 Ahmed Moumen, Farag Aly. Nonmetric calibration of camera lens distortion; differential methods and robust estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(8): 1215~1230
- 4 Hu Yajiang. A simple method for calculating radial distortion parameter of camera [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2009, **32**(5): 182~184  
胡亚江. 求解普通相机径向畸变系数的一种简便方法[J]. *测绘与空间地理信息*, 2009, **32**(5): 182~184
- 5 Z. Y. Zhang. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(7): 892~899
- 6 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration pattern analysis and machine intelligence [J]. *IEEE Transactions*, 2002, **22**(11): 1330~1334
- 7 Wu Chaofu. New active vision based camera self-calibration technique[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(6): 736~746  
吴福朝. 基于主动视觉系统的摄像机自标定方法研究[J]. *自动化学报*, 2001, **27**(6): 736~746
- 8 Yu Hong, Chen Hui. New camera calibration algorithm based on two perpendicular intersect lines [J]. *Computer Applications*, 2006, **26**(1): 163~164  
于泓, 陈辉. 基于交叉垂直线的摄像机标定新算法 [J]. *计算机应用*, 2006, **26**(1): 163~164
- 9 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique

- based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
- 霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
- 10 A. Habed, B. Boufama. Camera self-calibration from bivariate polynomials derived from Kruppa's equations [J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(8): 2484~2492
- 11 Y. Li, Y. S. Hung, L. Sukhan. A stratified self-calibration method for circular motion in spite of varying intrinsic parameters [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, **26**(6): 731~739
- 12 G. Yang, F. Zheng, X. H. Xu. An analytic solution of a linear camera self-calibration[D]. Dalian: Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006. 9930~9934
- 13 Gao Qin. The Accuracy Analysis of CCD Camera Calibration Based on Coplane [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology
- 高 琴. 基于共面条件的 CCD 相机检校精度分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2008
- 14 Wang Peijun, Xu Yaming. Photogrammetric Measurement[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005
- 王佩军, 徐亚明. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005

栏目编辑: 李文喆