

# 一种利用图像序列进行摄像机标定的方法

张大朴 李玉山 刘洋

(西安电子科技大学电路 CAD 研究所 376 信箱, 西安 710071)

**摘要** 结合消隐点的有关知识, 利用图像序列中运动的人体及其阴影的垂直关系, 给出了一种实用性比较强的摄像机标定方法. 该方法采用线性的方法计算出了可变焦摄像机 5 参数的内参数矩阵及旋转矩阵, 并在一定的条件下计算出平移矩阵, 最终将摄像机完全标定. 计算内参数及旋转矩阵时不必考虑图像之间对应点之间的关系, 从而大大减少了图像检测期间算法的复杂度, 提高了标定的速度. 此外, 模拟和实际图像实验也表明该自标定方法具有较高的鲁棒性和准确性, 适用于在线摄像机标定系统.

**关键词** 标定; 消隐点; 平行; 图像序列

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## 0 引言

摄像机标定主要有两种方式: 传统的标定方法和自标定方法. 当前具有代表性的自标定算法有: 利用本质矩阵或基本矩阵的标定方法<sup>[1]</sup>; 利用绝对二次曲线或二次曲面标定方法<sup>[2]</sup>; 利用主动系统控制摄像机做特定运动的自标定方法<sup>[3]</sup>; 利用消隐点或消隐线的标定方法<sup>[4~8]</sup>等. 此外, 还有考虑相机非线性畸变情况下的标定方法<sup>[9]</sup>.

文献[4~8]探讨了利用消隐点的不同性质进行标定的方法, 但都是使用的 4 参数模型, 甚至 3 参数模型, 而且都事先假定摄像机的内参数保持恒定. 这类模型对于专用的标定相机有一定的适用性, 但是对于一般的数码相机, 这种模型并不能正确的模拟出相机的各个参数. 本文在不加入任何其他限制的条件下, 利用平行、正交等几何关系, 并结合消隐点的有关知识, 实现了 5 参数摄像机的自标定. 本文采用线性的方法, 具有标定速度快, 可以在线标定等优点.

## 1 算法原理

### 1.1 基本知识

针孔摄像机线性成像模型见式(1)

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & s & u_0 & 0 \\ 0 & a * f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & s & u_0 & 0 \\ 0 & a * f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = KM \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

摄像机内参数采用 5 参数模型, 外参数由旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $t$  组成. 设三个旋转角分别为  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$ , 其中  $\alpha$  为光轴的旋转角度;  $\beta$  为摄像机的光轴和世界坐标系的  $Z$  坐标之间的夹角;  $\gamma$  为摄像机的光轴在世界坐标系的  $XY$  平面上的投影与  $X$  轴的夹角. 则  $R$  可以用三个角度表示为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \cos \beta & -\sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma & -\sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta \cos \gamma & -\sin \beta \sin \gamma & -\cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

依据射影几何的知识, 空间一组平行线所成的像将在图像平面上相交于同一点, 这一点被称为消隐点, 设图 2 为某一矩形  $ABCD$  所成的像, 则可以分别得到两对平行线相交所形成的两个消隐点  $V_1$  和  $V_2$ .

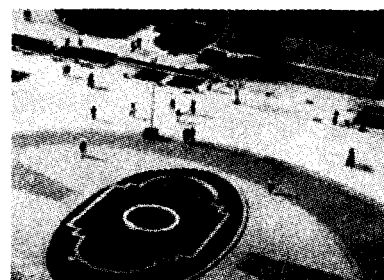


图 1 实际景物中的平行线  
Fig. 1 The parallel line in image

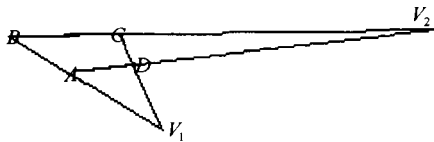


图 2 矩形 ABCD 所成的像  
Fig. 2 The image of the rectangle

性质 1: 摄像机光心与消隐点的连线与形成该消隐点的空间平行线平行<sup>[10]</sup>.

根据这一性质可知, 对于图 2 的矩形来说, 光心  $O$  与消隐点  $V_1$  的连线  $OV_1$  必定与矩形的  $AB$  和  $CD$  两条边平行, 同理  $OV_2$  也与  $AD$  和  $BC$  边分别平行. 因为矩形的  $AB$  和  $BC$  互相垂直, 所以  $OV_1$ 、 $OV_2$  也应该垂直.

1.2 内参数的求解

以摄像机的光心为原点, 与成像平面垂直为  $Z$  轴建立摄像机坐标系. 设消隐点  $V_1$  的坐标为  $V_1(V_{x1}, V_{y1}, f)$  由式(1)可得

$$\begin{cases} V_{x1} = (u_1 - u_0) - s * (v_1 - v_0) / (a * f) \\ V_{y1} = (v_1 - v_0) / a \end{cases} \quad (3)$$

式中  $(u_1, v_1)$  为消隐点在图像坐标系中的坐标. 同理, 可以得到用图像坐标系表示的消隐点  $V_2$  的等式. 如果形成消隐点的直线在世界坐标系中是互相垂直的, 则利用性质 1 可以建立如下约束条件

$$OV_1 \cdot OV_2 = V_{x1} * V_{x2} + V_{y1} * V_{y2} + f * f = 0 \quad (4)$$

假设对其它图像可得到另一与(4)类似的等式, 可得方程

$$V_{x1}^i * V_{x2}^j + V_{y1}^i * V_{y2}^j = V_{x1}^j * V_{x2}^i + V_{y1}^j * V_{y2}^i \quad (5)$$

式中  $i, j$  代表不同的图像帧, 将式(3)与(5)联立有

$$\begin{aligned} & (u_1^i * u_2^j - u_1^j * u_2^i) - (u_1^i + u_2^j - u_1^j - u_2^i) n + \\ & (v_1^i + v_2^j - v_1^j - v_2^i) l + (v_1^i * v_2^j - v_1^j * v_2^i) m - \\ & (u_1^i * v_2^j + v_1^i * u_2^j - u_1^j * v_2^i - v_1^j * u_2^i) * k = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} k = s(a * f), n = u_0 - k * v_0 \\ m = 1/a^2, l = k - m * v_0 \\ i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

如果将  $k, m, n, l$  分别看作未知量, 则至少需要 4 个如式(6)的方程才能唯一确定该未知量. 这样, 如果有 5 帧已知的图像, 就可以线性解出上述  $k, l, m, n$  四个未知数. 由于内参数采用 5 参数模型, 对于上述方程组, 可以唯一确定  $v_0, v_0, a$  以及  $s/f$  的值. 将上述求出的值带入式(3)可直接求出  $(V_{x1}, V_{y1})$  与  $(V_{x2}, V_{y2})$ , 利用  $OV_1$  与  $OV_2$  的垂直关系可得

$$\begin{aligned} f &= \sqrt{-V_{x1} * V_{x2} - V_{y1} * V_{y2}} \\ s &= k * a * f \end{aligned} \quad (8)$$

1.3 旋转矩阵的求解

对于运动视觉来说, 如果希望计算出物体的运

动速度、位移等物理量, 仅仅知道摄像机的内参数是不够的, 摄像机与物体的相对位置也是一个非常重要的量.

以矩形相互垂直的两条边为  $X$  和  $Y$  轴, 以其交点为原点, 并根据右手定则, 以与  $X, Y$  轴垂直的直线为  $Z$  轴建立世界坐标系. 由 1.1 中性质可知, 世界坐标系的坐标轴应该分别与  $OV_1, OV_2$  以及  $OV_1 * OV_2$  平行, 所以求出这三个向量即可完全表示旋转矩阵的值. 由式可得

$$R = K^{-1} \times \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} u_3 = (v_2 - v_1) / (v_2 * u_1 - v_1 * u_2) \\ v_3 = (u_2 - u_1) / (u_2 * v_1 - u_1 * v_2) \end{cases} \quad (10)$$

由于旋转矩阵为单位阵, 将式(9)归一化即可求出旋转矩阵.

1.4 平移向量的求解

从理论上来说, 单目相机无法求出物体的平移及其大小, 因为近处的小物体和远处的大物体所成的像有可能是相同的. 只有在知道实际物体的某些物理量时, 才有可能完全得出平移向量.

设已知平行线的某段长度已知为  $L$ , 以其某一端点为世界坐标系的原点, 则另一端点的坐标为  $A(L, 0, 0)$ , 分别代入式(1)有

$$\begin{cases} \lambda_1 [u_0, v_0, 1]^T = K [R \ t] * [L, 0, 0, 1]^T \\ \lambda_2 [u_A, v_A, 1]^T = K [R \ t] * [0, 0, 0, 1]^T \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)即可求出平移向量  $t$ .

2 算法步骤

根据经验可知, 一般情况下运动的人体与地面成近似的垂直关系, 所以在同一帧图像中, 人体与地平面应该为近似垂直的关系, 而当摄像机离人较远时, 可以将人近似的看作一条线段(图 3). 在平行光源的照射下, 他们所成的阴影也同样是平行的. 同时, 人体的高度也是近似的已知量. 所以在一帧图像中如果可以找出多个运动的人体及其所成的阴影的话, 就可以根据上述理论, 利用平行线及它们之间的垂直关系建立约束, 以某一人体与其阴影的交点为世界坐标系的原点, 对摄像机进行标定.

- 1) 对图像序列进行运动检测, 检测出运动的人体<sup>[11, 12]</sup>;
- 2) 细化, 将人体及其对应的阴影分别细化为直线段;
- 3) 利用 Hough 变换检测出人体及其阴影对应的直线;
- 4) 分别求出直线(段)簇对应的消隐点在图像坐标系中的坐标;
- 5) 利用本文介绍的方法求

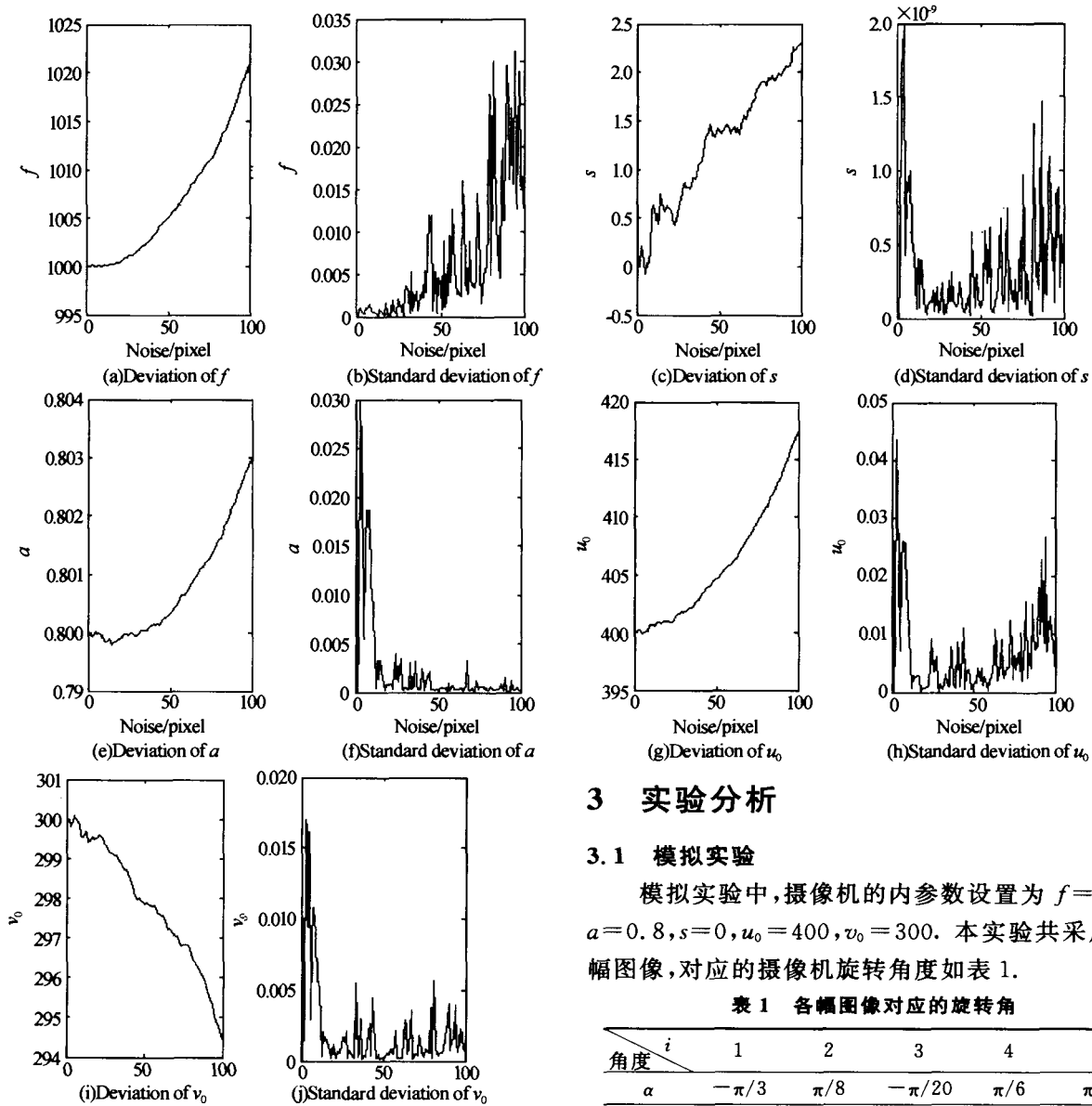


图3 内参数的误差和均方差随噪声变化的曲线  
Fig. 3 The absolute errors and standard deviations of the 5 intrinsic parameters under different noise level

出摄像机的内外参数;6)利用多次计算的平均值,求出实际摄像机参数.

### 3 实验分析

#### 3.1 模拟实验

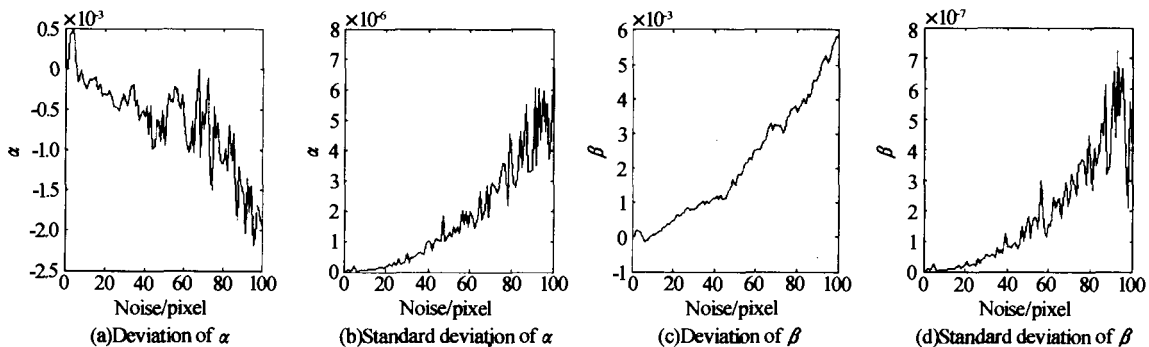
模拟实验中,摄像机的内参数设置为  $f=1000$ ,  $a=0.8$ ,  $s=0$ ,  $u_0=400$ ,  $v_0=300$ . 本实验共采用了5幅图像,对应的摄像机旋转角度如表1.

表1 各幅图像对应的旋转角

角度 $i$	1	2	3	4	5
$\alpha$	$-\pi/3$	$\pi/8$	$-\pi/20$	$\pi/6$	$\pi/7$
$\beta$	$\pi/7$	$\pi/8$	$\pi/6$	$\pi/8$	$\pi/5$
$\gamma$	$-\pi/6$	$\pi/8$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/8$

对应的平移向量分别为  $T_i = [20, 50, 100 * i]^T$ , 其中  $i$  表示第  $i$  幅图像.

标定实验采用一个矩形作为标定模板. 在矩形相



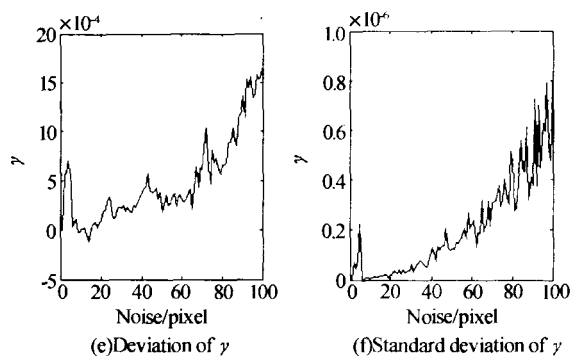


图 4 角度的绝对误差和均方差随噪声变化的曲线

Fig. 4 The absolute errors and standard deviations of the 3 rotating parameters under different noise level

互正交的每条边上均匀选取 100 个点, 图像噪声加在相应的投影点上, 并用最小二乘法拟合出矩形每条边所对应的直线的方程. 噪声大小为 0~5 pixel, 间距为 0.05 pixel. 图 3(a), (c), (e), (g), (i) 分别给出了模拟实验所求出的 5 个摄像机内参数的误差随噪声变化的情况, 图 3(b), (d), (f), (h), (j) 为内参数在不同噪声水平下的方差变化曲线. 图 4(a), (c), (e) 为旋转矩阵参数的误差随噪声变化的情况; (b), (d), (f) 为其方差变化曲线. 每一噪声水平下的结果均是 100 次独立实验的均值. 从图中可以看出, 本方法具有较高的准确性和较好的鲁棒性.

### 3.3 实际图像

利用采集的图像序列对本文介绍的方法进行了检验. 实验采用佳能 MVX-3i 摄像机拍摄, 拍摄到

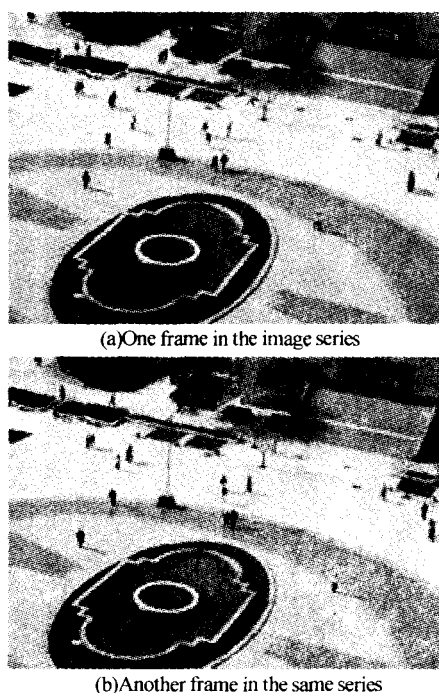


图 5 包含有运动人体及其阴影的图像帧

Fig. 5 The frames including human body and the corresponding shadows

像的分辨率为  $640 \times 480$  像素. 在保持相机固定的情况下以一定的时间间隔拍摄了一系列图像, 其中某一图像序列中的二帧图像如图 5. 分别采用了 3 个图像序列对摄像机进行标定 (以某一运动人体所在直线为 X 轴, 阴影所在直线为 Y 轴), 其结果列在表 2 中.

表 2 采用本方法对摄像机进行标定的结果

(a) 内参数				
$f$	$a$	$s$	$u_0$	$v_0$
610.95	1.01	0	319.46	238.52
610.13	0.98	0.09	318.29	240.34
611.23	0.97	0	322.33	242.07
(b) 旋转矩阵(图 5(b))				
$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$		
44.38	143.23	62.75		

从表 2 可以看出, 对于不同的图像序列, 利用本方法算出的摄像机内参数具有相近的值, 这说明本文的方法具有较好的精度和稳定性.

## 4 结论

本文提出并改进了利用消隐点来完全标定摄像机内外参数的方法, 可以通过完全线性的方法计算出摄像机内参数矩阵 (5 参数模型) 及其外参数矩阵.

对于本方法, 一种引起误差的原因是将原图像中不平行的直线当作平行直线来处理, 或者将不是垂直关系的直线当作垂直来处理, 这时误差的大小与直线之间的关系以及摄像机与物体之间的相对位置都有关系. 尽量增大  $\beta$  角以及选择同一方向运动的人体都有利于减小误差. 同时在每帧图像中找出尽量多的平行线也对提高消隐点精度有很大作用.

经过试验对比, 本文所采用的方法与文献 [2, 8] 等采用的方法相比精度相差不大, 但是本文的方法更适用于图像序列的标定, 在摄像机焦距变化的情况下, 可以对摄像机进行在线标定, 具有更好的实用性.

### 参考文献

- 1 Longuet-Higgins H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 1981, **293**(10): 133~135
- 2 杨长江, 孙凤梅, 胡占义. 基于二次曲线的纯旋转摄像机自标定. *自动化学报*, 2001, **27**(3): 310~317  
Yang C J, Sun F M, Hu Z Y. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(3): 310~317
- 3 Ma S D. A Self-calibration technique for active vision system. *IEEE Trans Robotics and Automation*, 1996, **12**(1): 114~120
- 4 Caprile B, Torre V. Using vanishing points for camera calibration. *Int'l. J Computer Vision*, 1990, **4**(2): 127~140

- 5 Cipolla R, Drummond T W, Robertson D. Camera Calibration from Vanishing Points in Images of Architectural Scenes. *Proc. British Machine Vision Conf.*, T. Pridmore and D. Elliman, eds., Nottingham, UK. 1999. 382~391
- 6 Wong K Y K, Mendonca P R S, Cipolla R. Camera calibration from surfaces of revolution. *PAMI*, 2003, **25**(2):147~161
- 7 Kogelka J, Zhang W. Efficient Computation of Vanishing Points. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '02, Washington DC. 2002. 223~228
- 8 吴福朝, 王光辉, 胡占义. 由矩形确定摄像机内参数与位置的线性方法. *软件学报*, 2003, **14**(3):703~712  
Wu F C, Wang G H, Hu Z Y. *Journal of Software*, 2003, **14**(3):703~712
- 9 刘金根. 一种基于现场定标的光电图像畸变校正算法. *光子学报*, 2004, **33**(6):732~735  
Liu J G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):732~735
- 10 Guo Q W, Zhen Y H, Ma S D. Camera Calibration by Vanishing Point And Cross Ratio. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-89.*, International Conference on, Glasgow UK. 1989. 1630~1633
- 11 王萍, 苏秀琴, 刘雅轩. 基于区域全并的动态阈值分割算法. *光子学报*, 2004, **33**(3):378~381  
Wang P, Su X Q, Liu Y X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3):378~381
- 12 付小宁, 殷世民, 刘上乾. 一种改进的自适应模糊阈值分割方法. *光子学报*, 2003, **32**(5):605~607  
Fu X N, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5):605~607
- 13 方德植, 陈奕培. 射影几何. 北京: 高等教育出版社, 1983. 13~51  
Fang D Z, Chen Y P. *Projective Geometry*. Beijing: Higher Education Press, 1983. 13~51
- 14 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998. 36~71  
Ma S D, Zhang Z Y. *Computer Vision-Theory and Arithmetic*. Beijing: Science Press, 1998. 36~71

## Camera Calibration Based on Image Series

Zhang Dapu, Li Yushan, Liu Yang

*The Institute of Electronic CAD, Xidian Univ, Xi'an 710071*

Received date: 2004-07-01

**Abstract** A practicable method of determining the camera's intrinsic parameters (with 5 parameters) as well as its extrinsic parameters is proposed. All the camera parameters are determined based on the walking humans and their shadows and the method is linearly. Meanwhile the relationship of the corresponding points have not to be considered, so the speed of calibration could be increased greatly. Extensive simulations and experimental results with real images show that this proposed method is both accurate and robust. This method can be used in on-line system.

**Keywords** Calibration; Vanishing point; Parallelism; Image series



**Zhang Dapu** was born in 1977 in Henan Province. He received the M. S. degree from Xidian University in 2002. And now he is working towards the Ph. D. degree at the Institute of Electronic CAD of Xidian University. His research work is in the field of computer vision and image processing.