

一种求解摄像机内参数的非线性方法

王年¹⁾ 韦穗¹⁾ 范益政²⁾ 梁栋¹⁾

¹⁾(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039) ²⁾(安徽大学数学系, 合肥 230039)

摘要 提出了一种求解摄像机内参数的非线性方法。首先对空间单个矩形的图像获得含参数 r 的圆环点的图像, 其中 r 为该矩形的长宽比; 进而由圆环点对摄像机内参数的约束获得一组非线性方程; 通过把非线性方程组求解问题转为含 3 个参数的最优化问题来确定摄像机的内参数。该方法的特点在于, 无需知道矩形的任何信息, 也容易将所获得的非线性方程组转化为最优化问题。实验结果表明, 该方法具有较高的求解精度。

关键词 摄像机标定 圆环点 矩形

中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)04-0505-06

A Nonlinear Approach for Determining Camera Intrinsic Parameters

WANG Nian¹⁾, Wei Sui¹⁾, FAN Yi-zheng²⁾, LIANG Dong¹⁾

¹⁾(Key Laboratory of IC&SP, Anhui University, Hefei 230039)

²⁾(Department of Mathematics, Anhui University, Hefei 230039)

Abstract This paper introduces a nonlinear approach for determining the camera intrinsic parameters. Firstly, by the image of a single rectangle in space, we obtain the images of two circular points which contains a parameter r , where r is the ratio of the length of two adjacent sides of the rectangle; and then establish some nonlinear constraints on the intrinsic parameters and the parameter r via the obtained images of the circular points. By turning the problem of solving the nonlinear equations into an optimization problem, the camera intrinsic parameters are determined. Experimental result shows that the approach has a high accuracy.

Keywords camera calibration, circular point, rectangle

1 引言

摄像机标定是从 2 维图像获取 3 维信息必不可少的步骤。利用空间场景的结构信息, 通过摄像机的运动来实现自标定, 是当前计算机标定的一个研究热点^[1-13]。文献[14]中, 提出了一种较为简单、灵活的标定方法, 即通过利用一个具有精确定位的点阵模板代替传统定标块, 使模板和摄像机作相互运动, 获得 3 个以上不同方位的模板图像, 利用模板数据和图像数据之间的单应矩阵来线性求解摄像机内参数。但该方法需要绘制精确定位的点阵模板。对此, 文献[15]中提出了一种新方法, 用一个由圆

和通过圆心的若干条直线所构成的平面模板来代替精确定位的点阵模板, 然后根据圆环点图像来确定摄像机的内参数。该方法在模板制作过程中也需要对圆心进行精确定位, 但它提出了基于圆环点来标定摄像机的一般方法。最近, 在此基础上, 文献[16]提出了基于空间平面上两个非平行矩形(矩形的边长和位置均是未知的), 通过计算两个圆环点的图像来标定摄像机的方法。该方法原理简单, 不涉及图像匹配问题, 而且具有较高的定标精度和鲁棒性。

受文献[16]的启发, 本文给出了基于矩形的摄像机自定标的另一种方法。它不需要知道场景中矩形的任何信息, 通过摄像机运动所获取的图像对摄像机

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(01042206)

收稿日期: 2004-05-31; 改回日期: 2004-09-06

第一作者简介: 王年(1966 ~), 男, 副教授。1986年毕业于安徽大学电子工程与信息科学系, 1998年在该校获硕士学位, 现为安徽大学在读博士研究生。主要研究领域为计算机视觉、图像处理等。已发表学术论文 10 余篇。E-mail: wn_xlb@ahu.edu.cn

进行自标定。不同于文献[16]中采用交比的方法,本文直接考虑由圆环点对摄像机内参数的约束而获得一组含参数 r 的非线性方程,其中 r 为矩形的长宽比;通过把非线性方程组求解问题转化为含 3 个参数的最优化问题,来确定摄像机的内参数。模拟实验和真实图像实验结果表明,该方法切实可行。

2 基于矩形的摄像机内参数非线性求解方法

2.1 圆环点对摄像机内参数的约束

设 π 为空间中的一张有限远平面,在 π 上建立欧氏坐标 $O-xy$,过点 O 且与平面 π 正交的直线为 z 轴。由此在空间建立了欧氏坐标 $O-xyz$ 。空间中点的齐次坐标为 $(x, y, z, w)^T$ 。于是, π 的方程为 $z=0$ 。平面 π 与无穷远平面的交线,即无穷远直线的方程为

$$\begin{cases} z = 0 \\ w = 0 \end{cases} \quad (1)$$

设 C 为平面 π 上的任意一个圆,其齐次方程为

$$\begin{cases} (x-x_0w)^2 + (y-y_0w)^2 = r^2w^2 \\ z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, C 的圆心坐标为 $(x_0, y_0, 0, 1)^T$ 。无穷远直线与圆的交点即为圆环点。根据式(1)和式(2),可解出圆环点的坐标为

$$(1, i, 0, 0)^T, (1, -i, 0, 0)^T$$

其中, $i = \sqrt{-1}$ 。由此可见,圆环点是一对共轭点,与圆的位置和半径大小无关。

注意到空间点 x 与像平面上的对应点 m 的映射关系 $m = Px$,其中 P 为摄像机矩阵。特别地,取 $x = (x, y, 0, \omega)^T$ 为 π 上一点,则必有

$$m = (p_1, p_2, p_3, p_4) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \\ w \end{pmatrix} = (p_1, p_2, p_4) \begin{pmatrix} x \\ y \\ w \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, $p_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为 P 的列向量。现在用 3 维齐次向量 $x_\pi = (x, y, w)^T$ 表示 π 上的点。根据式(3),有

$$m = Hx_\pi$$

由此发现,在透视影像下,空间平面与像平面之间是平面之间的射影变换(或单应)。此时,称 H 为这两个平面之间的单应矩阵。

无穷远平面(即 $w=0$)上满足方程

$$(x, y, z)I(x, y, z)^T = 0$$

的二次曲线 I 称为绝对二次曲线。其上的点是无穷远平面上的虚点。可以发现, π 上的圆环点 $(1, \pm i, 0)^T$ 在绝对二次曲线 I 上。

设摄像机内参数矩阵为 K ,摄像机关于世界坐标系的运动为 (R, t) ,则摄像机矩阵 $P = K(R, t)$ 。此时,绝对二次曲线 I 的图像为二次曲线 $C = (KK^T)^{-1}$ 。它仅与摄像机的内参数有关。而 π 上的圆环点 $(1, \pm i, 0)^T$ 的像 $H(1, \pm i, 0)^T$ 在二次曲线 C 上,故

$$(1, i, 0)H^TCH(1, i, 0)^T = 0 \quad (4)$$

$$(1, -i, 0)H^TCH(1, -i, 0)^T = 0$$

上述两个方程提供下面两个关于摄像机内参数的约束

$$\text{Re}[(1, i, 0)H^TCH(1, i, 0)^T] = 0 \quad (5)$$

$$\text{Im}[(1, i, 0)H^TCH(1, i, 0)^T] = 0$$

如果已知空间一张平面上圆环点在 3 幅图像中的像点(或者一般位置上 3 张平面的圆环点的像),就可以得到关于 C 的 6 个约束方程,从而可求解 C ,利用 Cholesky 分解可得到 K 。

2.2 由圆环点对摄像机内参数的约束来确定摄像机的内参数

设 π 是场景中的一有限远平面。 P 是 π 上的一矩形,其 4 个角点分别为 x_1, x_2, x_3, x_4 。在 π 上可建立欧氏坐标系,使得矩形 P 角点的齐次坐标分别为

$$x_1 = (0, 0, 1)^T$$

$$x_2 = (1, 0, 1)^T$$

$$x_3 = (1, r, 1)^T$$

$$x_4 = (0, r, 1)^T$$

其中, $r > 0$ 为矩形 P 的长宽比。设 m_1, m_2, m_3, m_4 分别为矩形 P 的角点 x_1, x_2, x_3, x_4 在图像中的对应点。根据像平面与空间平面之间的单应关系,存在 3 阶非奇异矩阵 H ,使得

$$Hx_i = \lambda_i m_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

$$Hx_4 = m_4$$

由于 x_1, x_2, x_3 不共线,故矩阵 (x_1, x_2, x_3) 非奇异。根据式(6),容易得到

$$H = (m_1, m_2, m_3) \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} (x_1, x_2, x_3)^{-1}$$

以及

$$(m_1, m_2, m_3) \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} (x_1, x_2, x_3)^{-1} x_4 = m_4 \quad (7)$$

其中, $\text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$ 是以 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为主对角元的

对角矩阵。由于点 x_i 与 $m_i (i=1,2,3)$ 是单应关系,故 m_1, m_2, m_3 不共线,从而矩阵 (m_1, m_2, m_3) 非奇异。所以由式(7)可得

$$\begin{aligned} & \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} (x_1, x_2, x_3)^{-1} x_4 \\ & = (m_1, m_2, m_3)^{-1} m_4 \end{aligned} \quad (8)$$

通过计算

$$(\lambda_1, -\lambda_2, \lambda_3)^T = (m_1, m_2, m_3)^{-1} m_4 \quad (9)$$

对方程(5)进一步化简,可得

$$\begin{aligned} & (1, 0, 0) H^T C H (1, 0, 0)^T - \\ & \frac{1}{r^2} (0, r, 0) H^T C H (0, r, 0)^T = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$(1, 0, 0) H^T C H (0, r, 0)^T = 0 \quad (11)$$

由于

$$\begin{aligned} H(1, 0, 0)^T & = H[(1, 0, 1) - (0, 0, 1)]^T \\ & = \lambda_2 m_2 - \lambda_1 m_1 \\ H(0, r, 0)^T & = H[(1, r, 1) - (1, 0, 1)]^T \\ & = \lambda_3 m_3 - \lambda_2 m_2 \end{aligned}$$

故式(10)、式(11)可化简为如下形式 $(k = \frac{1}{r^2})$:

$$(\lambda_2 m_2 - \lambda_1 m_1)^T C (\lambda_2 m_2 - \lambda_1 m_1) - k(\lambda_3 m_3 - \lambda_2 m_2)^T C (\lambda_3 m_3 - \lambda_2 m_2) = 0 \quad (12)$$

$$(\lambda_2 m_2 - \lambda_1 m_1)^T C (\lambda_3 m_3 - \lambda_2 m_2) = 0 \quad (13)$$

摄像机在3个不同方位对 π 获得3幅图像,得到3组类似于式(5)的方程

$$\begin{cases} \text{Re}[(1, i, 0) H^{(1)T} C H^{(1)} (1, i, 0)^T] = 0 \\ \text{Im}[(1, i, 0) H^{(1)T} C H^{(1)} (1, i, 0)^T] = 0 \\ \text{Re}[(1, i, 0) H^{(2)T} C H^{(2)} (1, i, 0)^T] = 0 \\ \text{Im}[(1, i, 0) H^{(2)T} C H^{(2)} (1, i, 0)^T] = 0 \\ \text{Re}[(1, i, 0) H^{(3)T} C H^{(3)} (1, i, 0)^T] = 0 \\ \text{Im}[(1, i, 0) H^{(3)T} C H^{(3)} (1, i, 0)^T] = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中, $H^{(1)}, H^{(2)}, H^{(3)}$ 分别为摄像机对 π 所获得3幅图像之间的单应矩阵。记

$$\begin{aligned} p^{(i)} & = \lambda_2^{(i)} m_2^{(i)} - \lambda_1^{(i)} m_1^{(i)} \\ q^{(i)} & = \lambda_3^{(i)} m_3^{(i)} - \lambda_2^{(i)} m_2^{(i)}, i=1, 2, 3 \end{aligned}$$

类似于前面的讨论,可获得如下6个方程

$$(p^{(1)})^T C p^{(1)} - k(q^{(1)})^T C q^{(1)} = 0 \quad (15)$$

$$(p^{(2)})^T C p^{(2)} - k(q^{(2)})^T C q^{(2)} = 0 \quad (16)$$

$$(p^{(3)})^T C p^{(3)} - k(q^{(3)})^T C q^{(3)} = 0 \quad (17)$$

$$(p^{(1)})^T C q^{(1)} = 0 \quad (18)$$

$$(p^{(2)})^T C q^{(2)} = 0 \quad (19)$$

$$(p^{(3)})^T C q^{(3)} = 0 \quad (20)$$

设摄像机内参数矩阵为

$$K = \begin{pmatrix} f_u & s & u \\ 0 & f_v & v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

由于绝对二次曲线 $C = (K K^T)^{-1}$, 在相差一个非零常数因子意义下, 可设

$$C = \begin{pmatrix} a & b/2 & c/2 \\ b/2 & d & e/2 \\ c/2 & e/2 & f \end{pmatrix}$$

注意到式(15)~(17)反映了矩形相邻边的度量性质, 而式(18)~(20)反映了矩形相邻边的正交性质。若摄像机在任意两幅图像的拍摄过程中都做了旋转, 则这3个方程提供了 C 的3个独立的约束。此时, 方程组(式(18)~(20))的系数矩阵 A 的秩为3。不妨可做如下假设: 方程组(式(18)~(20))的矩阵方程为

$$(A_1 | A_2) \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = 0 \quad (21)$$

其中, A_1, A_2 分别为 3×3 方阵, A_1 为满秩。由式(21)进一步化简, 可得

$$\begin{aligned} A_1 \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} + A_2 \begin{pmatrix} d \\ e \\ f \end{pmatrix} & = 0 \\ \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} & = -A_1^{-1} A_2 \begin{pmatrix} d \\ e \\ f \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

另外, 由式(15)可得

$$k = \frac{(p^{(1)})^T C p^{(1)}}{(q^{(1)})^T C q^{(1)}} \quad (23)$$

把式(23)代入式(16)、式(17)

$$\begin{cases} (p^{(2)})^T C p^{(2)} \cdot (q^{(1)})^T C q^{(1)} - \\ (p^{(1)})^T C p^{(1)} \cdot (q^{(2)})^T C q^{(2)} = 0 \\ (p^{(3)})^T C p^{(3)} \cdot (q^{(1)})^T C q^{(1)} - \\ (p^{(1)})^T C p^{(1)} \cdot (q^{(3)})^T C q^{(3)} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

把式(22)代入式(24), 获得关于 d, e, f 的如下方程:

$$\begin{aligned} (d, e, f) B_1 (d, e, f)^T & = 0 \\ (d, e, f) B_2 (d, e, f)^T & = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

其中, B_1, B_2 为对称矩阵。式(25)说明 (d, e, f) 是2D射影平面上两个二次曲线的一个交点。

方程组(25)的求解问题可以转化为如下的含 3 个参数的最优化问题:

$$\begin{aligned} \min & \{ [(d, e, f) \mathbf{B}_1 (d, e, f)^T]^2 + \\ & [(d, e, f) \mathbf{B}_2 (d, e, f)^T]^2 \} \quad (26) \\ \text{s. t.} & \quad d^2 + e^2 + f^2 = 1 \end{aligned}$$

求解最优化问题式(26), 必须提供一个合理的初值。下面假设摄像机的畸变因子 $s = 0$, 并且 $f_u = f_v$ (即像素为正方形)。根据关系式 $\mathbf{C} = (\mathbf{K}\mathbf{K}^T)^{-1}$, 可得 $b = 0, a = d$ 。因此, 在此条件下, 包括方程组(式(18)~(20)), 获得关于 \mathbf{C} 的 5 个独立的约束。从而, 获得 \mathbf{C} 的唯一解 $(a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, f_0)$, 并保证 $d_0^2 + e_0^2 + f_0^2 = 1$ 。取 $(d, e, f) = (d_0, e_0, f_0)$ 作为最优化问题式(26)的一个初值。利用迭代法给出式(26)的近似解。再利用式(22), 获得 \mathbf{C} 的近似解 \mathbf{C}_0 。对矩阵 \mathbf{C}_0 进行 Cholesky 分解即可确定摄像机的全部 5 个内参数。

根据以上讨论, 有以下算法:

算法 从一个矩形的 3 幅图像确定摄像机的内参数。

(1) 检测矩形 P 的 4 个角点 x_1, x_2, x_3, x_4 的像 $m_1^{(i)}, m_2^{(i)}, m_3^{(i)}, m_4^{(i)}, i = 1, 2, 3$;

(2) 根据式(9), 确定 $\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}, \lambda_3^{(i)}, i = 1, 2, 3$;

(3) 建立方程组(式(15)~(20)), 提取方程(式(18)~(20))的系数矩阵 \mathbf{A} ;

(4) 检测 \mathbf{A} 的一个 3×3 的满秩的子矩阵 \mathbf{A}_1 , 建立类似于式(22)的表达式;

(5) 根据式(23)~(25), 确定最优化问题式(26);

(6) 利用 Newton 迭代法给出式(26)的近似解, 并利用式(22)获得 \mathbf{C} 的近似解;

(7) 对矩阵 \mathbf{C} 进行 Cholesky 分解, 确定摄像机的内参数矩阵 \mathbf{K} 。

在最优化问题式(26)中, 附加了一个约束 $d^2 + e^2 + f^2 = 1$ 。这主要是为了保证极小值点的唯一性。因为根据方程组式(25), 若 (d, e, f) 是式(26)的非零极小值点, 则 (d, e, f) 的任一个非零倍数也是极小值点。

在算法过程第 4 步中, \mathbf{A}_1 未必对应于 \mathbf{C} 中的参数 a, b, c , 从而 \mathbf{A}_2 未必对应于 d, e, f 。若 \mathbf{A}_2 对应于 a, d, f 中的某一元, 由于 \mathbf{C} 正定, a, d, f 都不为 0, 因此式(26)中约束有意义。若 \mathbf{A}_2 所对应的 \mathbf{C} 中参数不含 a, d, f 中的任一元(即为 b, c, e), 但 b, c, e 一

定不全为 0; 否则, 根据式(22), \mathbf{C} 为零矩阵。故此式(26)中约束仍有意义。一般情况下, 像平面的坐标原点与摄像机的主点不重合, 因此 u, v 不全为 0。根据关系式 $\mathbf{C} = (\mathbf{K}\mathbf{K}^T)^{-1}$, 可得 b, c, e 不全为 0。从这点也可发现式(26)中约束有意义。

3 模拟与真实图像实验

3.1 噪声影响

为了检验算法的有效性, 像素坐标加入随机噪声(噪声单位: 像素)。模拟图像大小为 1024×1024 个像素, 内参数为 $f_u = 1\ 200, f_v = 900, s = 0.20, u_0 = 1, v_0 = 2$ 。在不同噪声水平下均进行 100 次实验, 然后分别取均值。实验结果如表 1 所示。图 1 是内参数值的实验值与理论值的绝对误差随噪声变化的曲线。可以看出, 在有噪声的情况下, 本算法也可以得到较好的结果。同时, 随着噪声的增大, 所得内参数绝对误差的值也是线性增大的。

表 1 各种不同噪声水平下实验结果的均值

Tab. 1 The average of experimental results based on vary noise

噪声水平	f_u	f_v	s	u_0	v_0
0.0	1 200.000 0	900.000 0	0.200 0	1.000 0	2.000 0
0.2	1 197.240 7	897.817 8	0.122 6	1.439 2	1.624 3
0.4	1 203.251 8	902.329 1	0.309 9	0.529 6	2.251 1
0.6	1 187.801 4	891.120 3	-0.181 1	3.034 8	0.588 9
0.8	1 184.243 5	888.420 0	-0.152 1	3.522 5	0.955 0
1.0	1 191.250 9	893.087 3	0.632 4	0.658 6	1.061 4
1.2	1 168.332 1	876.389 6	0.061 1	3.706 5	-1.561 1
1.4	1 191.703 6	892.870 9	1.254 4	-2.377 5	0.636 5
1.6	1 181.714 8	885.785 8	0.851 7	2.413 4	1.444 9
1.8	1 188.450 3	890.446 2	1.487 5	0.831 6	2.410 1
2.0	1 153.853 6	865.187 3	0.668 1	5.628 7	-0.982 4

其中内参数的理论值为 $f_u = 1\ 200, f_v = 900, s = 0.20, u_0 = 1, v_0 = 2$

3.2 真实图像实验

在真实图像实验中, 摄像机从不同方位对包含矩形的平面拍摄 3 幅图像(包括摄像机在初始位置的一幅), 如图 2 所示。

按文中方法计算, 内参数矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} 1\ 138.793\ 4 & 3.791\ 9 & 314.192\ 4 \\ 0 & 1\ 134.385\ 4 & 327.760\ 6 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

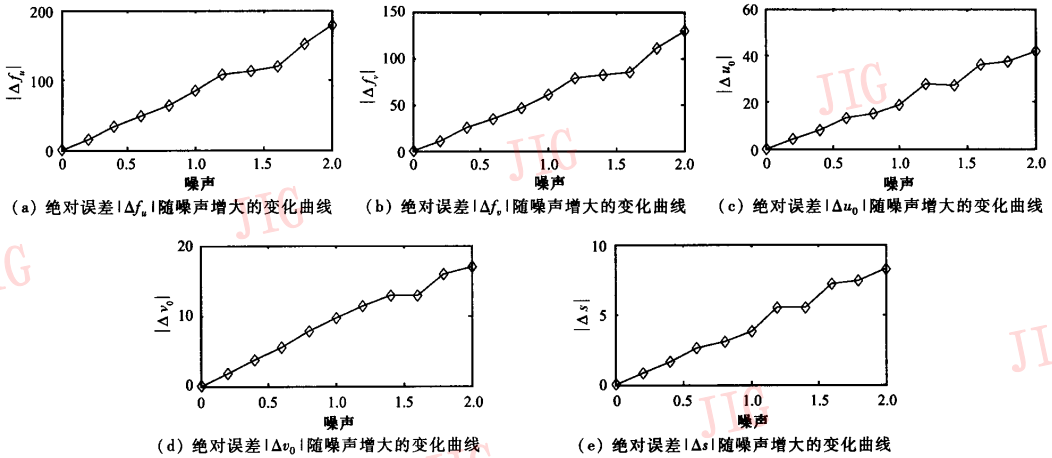


图 1 摄像机内参数的实验结果与理论值比较所得绝对误差随噪声变化的曲线

Fig. 1 Curves of absolute errors with noise increasing by comparing the experimental results and theoretical results

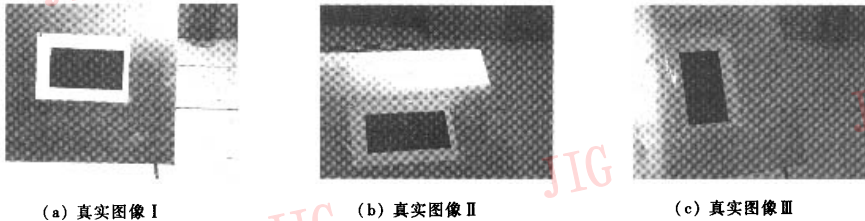


图 2 用于真实图像实验中的 3 幅图像

Fig. 2 Three real images

4 结 论

本文给出了基于矩形的摄像机自标定的一种方法。它只需要场景中存在一个边长和位置均是未知的矩形,通过摄像机运动所获取的图像,直接考虑由圆环点对摄像机内参数的约束而获得的一组含参数的非线性方程,其中 r 为矩形的长宽比;通过把非线性方程组求解问题转为含 3 个参数的最优化问题,从而确定摄像机的内参数。模拟实验和真实图像实验表明,本文所提出的标定方法原理简单,并具有较高的定标精度。

参考文献 (References)

- 1 Hartley R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras[A]. In: Second European Conference on Computer Vision [C]. Sandini G ed., Berlin; Springer-Verlag, 1992;579 ~ 587.
- 2 Maybank S J, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123 ~ 151.
- 3 Hartley R. Self-calibration of stationary cameras[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22(1): 5 ~ 23.
- 4 Dron L. Dynamic camera self-calibration of from controlled motion sequences[A]. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], New York: IEEE Computer Society Press, 1993;501 ~ 506.
- 5 Du F, Brady M. Self-calibration of the intrinsic parameters of cameras for active vision systems[A]. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], New York: IEEE Computer Society Press, 1993;477 ~ 482.
- 6 Pollefeys M, Koch R, Gool L V. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters[A]. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision [C], Bombay: Narosa Publishing House, 1998: 90 ~ 95.
- 7 Sturm P. Critical motion sequences for monocular self-calibration and uncalibrated Euclidean reconstruction [A]. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Puerto Rico: IEEE CS Press, 1997;1100 ~ 1105.
- 8 Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

- 9 Li H, Wu F C, Hu Z Y. A novel linear camera self-calibration technique[J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(11): 1121 ~ 1129. [李华, 吴福朝, 胡占义. 一种新的线性摄像机自标定方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1121 ~ 1129.]
- 10 Lei C, Wu F C, Hu Z Y. Kruppa equation and camera self-calibration[J]. Chinese Journal of Automation, 2001, 27(5): 621 ~ 630. [雷成, 吴福朝, 胡占义. Kruppa 方程与摄像机自标定[J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 621 ~ 630.]
- 11 Wu F C, Li H, Hu Z Y. A study on active vision based camera self-calibration[J]. Chinese Journal of Automation, 2001, 27(6): 736 ~ 746. [吴福朝, 李华, 胡占义. 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.]
- 12 Yang C J, Wang W, Hu Z Y. An active vision based self-calibration technique[J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(5): 428 ~ 435. [杨长江, 汪威, 胡占义. 一种基于主动视觉的摄像机内参数自标定技术[J]. 计算机学报, 1998, 21(5): 428 ~ 435.]
- 13 Ma S D. A self-calibration technique for active vision systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114 ~ 120.
- 14 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330 ~ 1334.
- 15 Meng X Q, Li H, Hu Z Y. A new easy camera calibration technique based on circular points[A]. In: Proceedings of the British Machine Vision Conference[C], Mirmehdi M, Thomas B, eds, Bristol: ILES Central Press, 2000: 496 ~ 501.
- 16 Wu F C, Wang G H, Hu Z Y. A linear approach for determining intrinsic parameters and pose of cameras from rectangles[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 703 ~ 712. [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[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 703 ~ 712.]