

# 主动视觉系统中的摄像机姿态校准

万 享 徐光祐

(清华大学计算机系 北京 100084)

## 摘 要

提出了在镜头畸变径向约束下,用平面上四个点及其成像关系来建立摄像机姿态的几何方法,并运用随机样本一致性技术和多视点下摄像机内参数一致性约束提高计算的稳定性和精度,指出了只利用摄像机正、反投影关系检验其姿态正确性是不充分的,提出将视点间运动变换关系作为评价相应摄像机姿态精度的重要标准。

**关键词:** 计算机视觉,摄像机校准,随机样本一致性。

## 1 问题的提出

摄像机的校准是三维视觉系统的重要基础,对于静止的摄像机而言,确定了外部坐标系中的点与其在图像平面上的像之间的映射关系——透视变换矩阵(perspective transformation matrix),就能满足大多数情况下的需要。但对于可移动摄像机,则需分别校准其内参数(如图像中心点位置、有效焦距和镜头畸变系数等)和外参数(摄像机在参考系中的位置和方位角),才能满足各种三维视觉任务的需要。我们要进行的摄像机校准工作是面向眼-手结构(Eye-on-Hand)的主动视觉系统,它将完成传感器放置(sensor placement)和任意摄像机姿态下物体的定位等任务。这就对校准摄像机在参考系中的姿态和有关参数的稳定性和精度提出了较高的要求。

由于摄像机校准过程中所采用的样本点与其成像之间的 $2D-3D$ 对应关系只表示了摄像机有关内、外参数间的一种复合关系,因而在有数据噪声的情况下,校准所得到的摄像机内、外参数之间可能呈现某种补偿关系,即摄像机的内、外参数都偏离了实际值,而利用 $2D-3D$ 约束进行正投影检验和反投影检验却不能揭示这一事实。因为实际输入样本的噪声是不可避免的,因此在摄像机校准的模型建立和计算过程中,必须纳入处理噪声的相应措施。同时由于噪声的分布往往是不定的和未知的,因而假定它呈某种分布是不恰当的。在此假设的基础上使用某些最优准则求出的“最优”摄像机姿态参数值并不具有多少实际意义。本文采用了随机样本一致性技术(Random Sample Consensus, RANSAC)<sup>[1]</sup>有效地抑制了输入数据中的噪声,获得该样本点集上的一致性解。使用RANSAC技术的前提是找到解的最小条件。为此我们提出利用平面上4个点及其成像

间关系,结合镜头畸变的径向约束(Radial Alignment Constraints, RAC)<sup>[2]</sup>,推导了一个新的几何模型来计算摄像机的有关参数值.为了消除因摄像机内、外参数补偿导致的有关系数的不定性,我们通过多视点下(摄像机作刚体运动)摄像机内参数的一致性(Intrinsic Parameters Consistency, INPAC)作为约束,有效地获取摄像机姿态的实际值.同时提出将两视点间摄像机所作运动作为检验相应摄像机姿态值正确性的重要标准,避免了只用正、反投影关系检验摄像机姿态值存在的不足.

## 2 径向约束下的摄像机几何模型

R. Y. Tsai 在文献[2]中认为几何方法存在的问题是: 1)不能考虑镜头畸变, 2)有效焦距要假定已知, 3)图像比例因子的不定性问题. 现在看来,至少前两条评论是不恰当的. 事实上, M. Abidi 和 T. Chandra<sup>[3]</sup>就曾提出根据几何关系直接计算恢复摄像机有效焦距以及样本点在摄像机坐标系下坐标值的算法. 但他们的算法需要先用其它方法校准镜头畸变. 我们通过将镜头畸变的径向约束与几何方法相结合,利用一平面上4个点与其在图像平面上成像之间的映射关系,同时求解镜头畸变因子和摄像机的有效焦距,进而计算出这些点在摄像机坐标系下的位置,最终获得摄像机在外部参考系中的姿态.

### 2.1 确定样本点在摄像机坐标系中的坐标值

所采用的摄像机模型在不考虑镜头畸变时,实际上是一针孔模型.如图1所示,摄像机的坐标系这样规定,光轴为  $OZ_c$  方向,  $OX_c$  与  $OY_c$  分别与图像平面上的水平方向  $I_x$  和垂直方向  $I_y$  平行. 共面的4个点  $P_1, P_2, P_3$  和  $P_4$  在图像平面上的像为  $P'_1, P'_2, P'_3$  和  $P'_4$ .  $P'_i$  在图像平面上的坐标为  $P'_i(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), 经采样后为  $P'_i(I_i, J_i)$ .  $P_i$  点在外部参考坐标系中的坐标为  $P_i(X_i^w, Y_i^w, Z_i^w)$ . 现在我们计算点  $P_i$  在摄像机坐标系中的坐标  $P_i(X_i^c, Y_i^c, Z_i^c)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ).

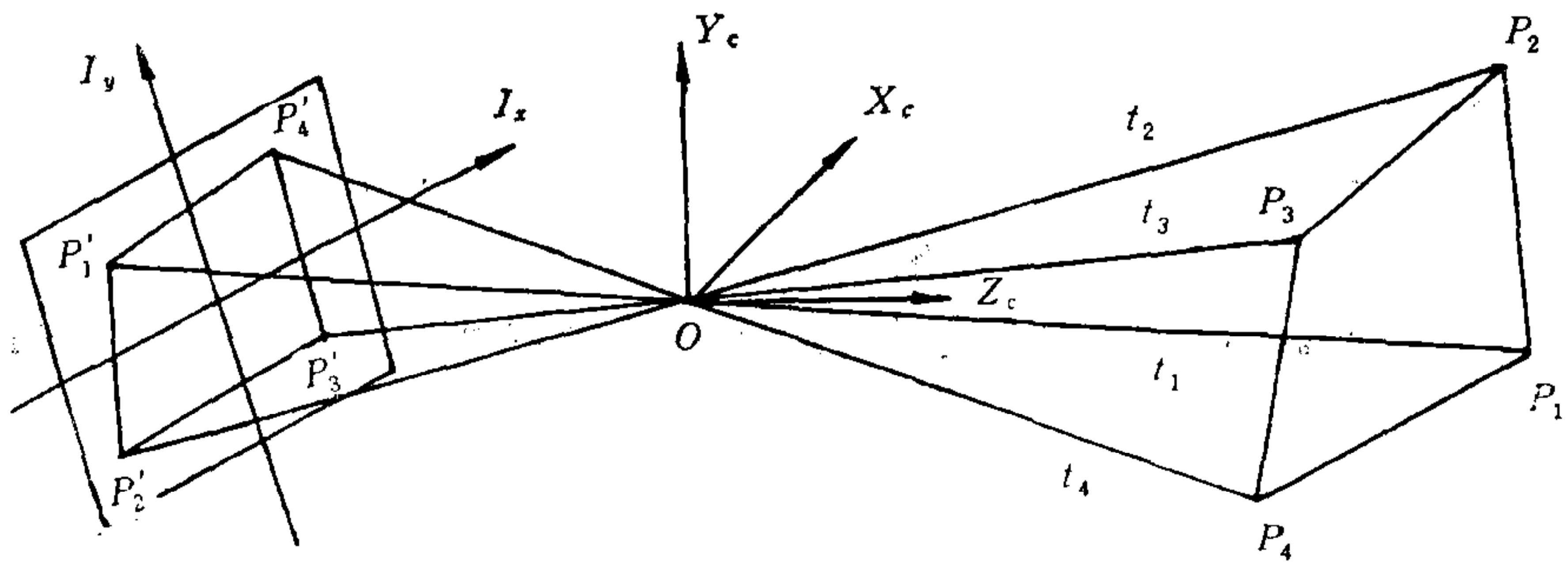


图1 摄像机几何模型

因  $P'_i(I_i, J_i)$  是  $P'_i(x_i, y_i)$  经采样得到,因而不考虑镜头畸变时有

$$\begin{aligned} x_i &= (I_i - I_c) \cdot r_x, \\ y_i &= (J_i - J_c) \cdot r_y, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $(I_c, J_c)$  为光心在图像平面上的成像位置.  $r_x$  和  $r_y$  分别为 X 方向和 Y 方向的比例因子,在 CCD 摄像机中为固定常量,可由摄像机和图像系统的有关参数直接算出<sup>[2]</sup>.



$(I_c, J_c)$  可用精密光学方法测定, 通常是在计算机图像平面的中心附近. 由于摄像机姿态对  $(I_c, J_c)$  并不很敏感<sup>[2]</sup>, 我们将其作为已知大致范围和所希望精度的参数来校准. 重复实验表明我们所用摄像机光心在  $[256 \pm \Delta, 262 \pm \Delta]$  上 ( $\Delta = 0.5 \text{ pixel}$ ).

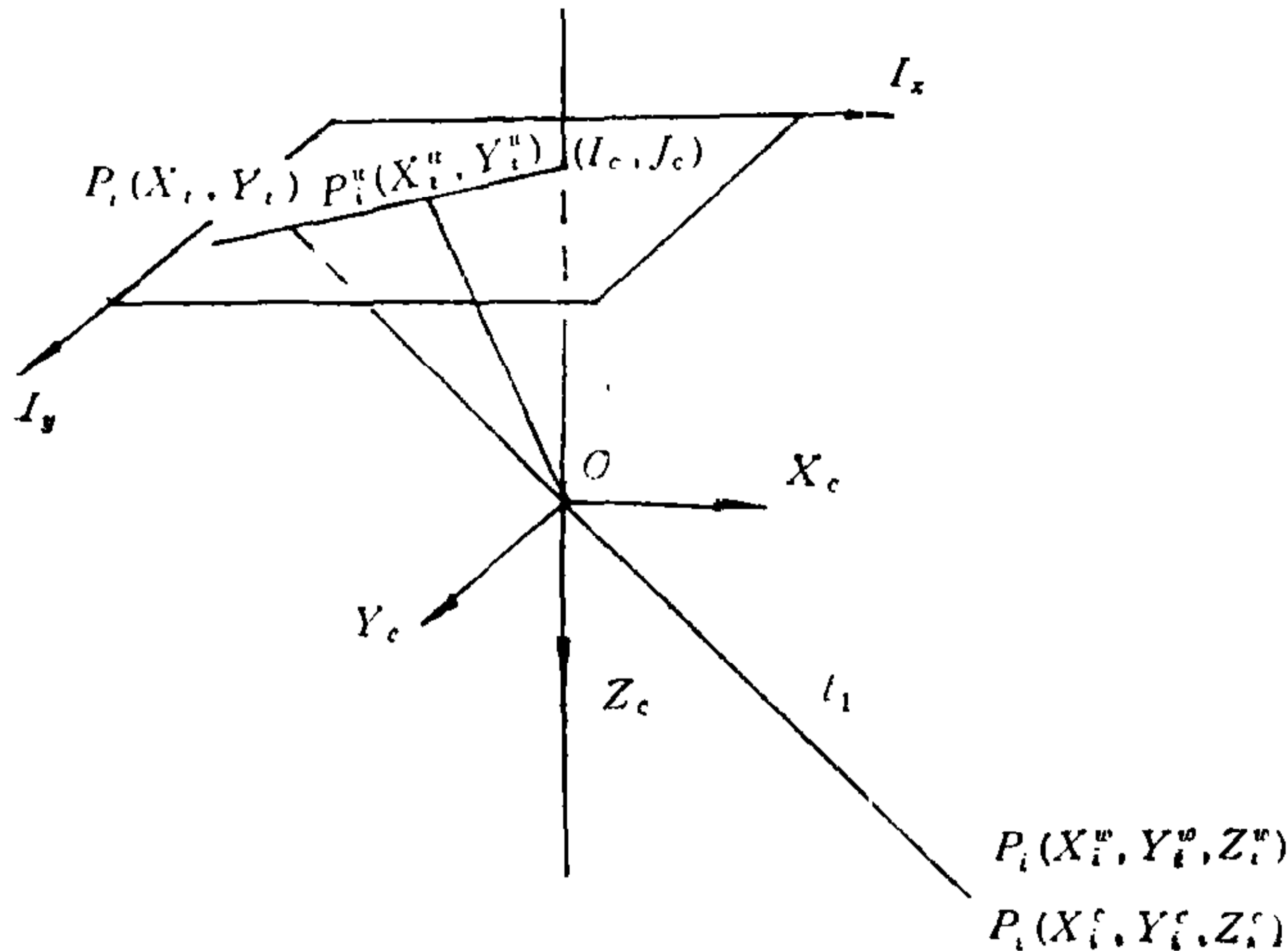


图2. 径向约束 (RAC) 下的镜头畸变

对镜头畸变, 考虑径向约束, 由实际的成像坐标值  $P_i(x_i, y_i)$  计算理想的未经畸变的  $P_i''(x_i'', y_i'')$ , 有 (见图 2)

$$\begin{aligned} x_i'' &= x_i + kx_i r_i^2, \\ y_i'' &= y_i + ky_i r_i^2, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2$ ,  $k$  是畸变系数.

$\vec{OP}_i$  的方向与  $\vec{OP}_i''$  相反, 即为  $-(x_i'', y_i'', -f) = (-x_i'', -y_i'', f)$ . 将其化为单位向量:  $(-x_i''/F_i, -y_i''/F_i, f/F_i)$ , 而

$$F_i = \sqrt{(x_i'')^2 + (y_i'')^2 + f^2} \quad (i = 1, 2, 3, 4).$$

于是点  $P_i$  在摄像机坐标系中的坐标值为:

$$(X_i^c, Y_i^c, Z_i^c) = \left( -\frac{r_i'' t_i}{F_i}, -\frac{y_i'' t_i}{F_i}, f \frac{t_i}{F_i} \right), \quad (3)$$

式中  $t_i$  为摄像机坐标原点到  $P_i$  点的长度. 下面我们讨论如何计算镜头畸变系数  $k$  和比值  $\frac{t_i}{F_i}$ .

设  $A_1, A_2, A_3$  和  $A_4$  分别表示  $\Delta P_1 P_2 P_3, \Delta P_1 P_2 P_4, \Delta P_1 P_3 P_4$  和  $\Delta P_2 P_3 P_4$  的面积 (见图 1),  $B_1, B_2, B_3$  和  $B_4$  分别表示  $\Delta P_1' P_2' P_3', \Delta P_1' P_2' P_4', \Delta P_1' P_3' P_4'$  和  $\Delta P_2' P_3' P_4'$  未经畸变时的面积,  $s_{ij} = \|P_i P_j\|$  为外部参考坐标系中点  $P_i$  到点  $P_j$  间的距离 ( $i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4, i \neq j$ ). 显然  $A_i$  和  $s_{ij}$  都是可直接由样本点在参考系中的坐标值计算的. 对  $B_i$ , 考虑式(2), 有

$$B_i = \frac{1}{2} (a_i k^2 + b_i k + c_i)$$

式中  $k$  为镜头畸变系数,  $a_i, b_i, c_i$  可由组成三角形  $B_i$  的三个顶点  $P_l, P_m, P_n$  在图像平面上的坐标来计算:

$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j^2 r_n^2 & r_j^2 r_m^2 & r_m^2 r_n^2 \\ r_j^2 + r_n^2 & r_j^2 + r_m^2 & r_m^2 + r_n^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j y_n - x_n y_j \\ x_m y_j - x_j y_m \\ x_n y_m - x_m y_n \end{bmatrix}.$$

注意图 1 中锥体  $OP_1' P_2' P_3'$  与锥体  $OP_1 P_2 P_3$  体积之比

$$\frac{\frac{1}{3} B_1 f}{\frac{1}{3} A_1 h} = \frac{F_1 F_2 F_3}{t_1 t_2 t_3}, \quad \text{得} \quad h = t_1 t_2 t_3 \frac{f}{F_1 F_2 F_3} \frac{B_1}{A_1},$$

式中  $h$  为点  $O$  到点  $P_1, P_2, P_3, P_4$  所在平面的距离, 类似可得

$$h = t_1 t_2 t_4 \frac{f}{F_1 F_2 F_4} \frac{B_2}{A_2}, \quad h = t_1 t_3 t_4 \frac{f}{F_1 F_3 F_4} \frac{B_3}{A_3}, \quad h = t_2 t_3 t_4 \frac{f}{F_2 F_3 F_4} \frac{B_4}{A_4}.$$

由此我们可以得到  $t_1, t_2, t_3$  和  $t_4$  间的关系:

$$t_i = c_{ij} \frac{F_j}{F_i} t_j, \quad (i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4, i \neq j) \quad (4)$$

式中

$$c_{12} = \frac{B_4 A_3}{A_4 B_3}, \quad c_{13} = \frac{B_4 A_2}{A_4 B_2}, \quad c_{14} = \frac{B_4 A_1}{A_4 B_1}$$

等等.

考虑两相邻边  $s_{ij}$  和  $s_{im}$  的距离平方即  $\|P_i P_j\|^2$  和  $\|P_i P_m\|^2$ , 我们有

$$\begin{aligned} \|P_i P_j\|^2 &= (X_i^c - X_j^c)^2 + (Y_i^c - Y_j^c)^2 + (Z_i^c - Z_j^c)^2 \\ &= t_i^2 [(x_i^u - c_{ij} x_j^u)^2 + (y_i^u - c_{ij} y_j^u)^2 + f^2 (1 - c_{ij})^2] / F_i^2, \end{aligned}$$

同理

$$\|P_i P_m\|^2 = t_i^2 [(x_i^u - c_{im} x_m^u)^2 + (y_i^u - c_{im} y_m^u)^2 + f^2 (1 - c_{im})^2] / F_i^2,$$

于是

$$\frac{\|P_i P_j\|^2}{\|P_i P_m\|^2} = \frac{(x_i^u - c_{ij} x_j^u)^2 + (y_i^u - c_{ij} y_j^u)^2 + f^2 (1 - c_{ij})^2}{(x_i^u - c_{im} x_m^u)^2 + (y_i^u - c_{im} y_m^u)^2 + f^2 (1 - c_{im})^2}.$$

考虑  $s_{12}$  和  $s_{13}$  这两条邻边, 并利用径向约束, 将(2)、(3)、(4)代入上式, 得

$$f^2 = \frac{\sum_{i=1}^7 p_i k_i^{7-i}}{\sum_{i=1}^5 q_i k_i^{5-i}}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^2 + t_{21}^2 & u_{11}^2 + u_{21}^2 \\ 2(t_{11}t_{12} + t_{21}t_{22}) & 2(u_{11}u_{12} + u_{21}u_{22}) \\ t_{12}^2 + 2t_{11}t_{13} + 2t_{21}t_{23} & u_{12}^2 + 2u_{11}u_{13} + 2u_{21}u_{23} \\ 2(t_{11}t_{14} + t_{12}t_{13} + t_{21}t_{24} + t_{22}t_{23}) & 2(u_{11}u_{14} + u_{12}u_{13} + u_{21}u_{23} + u_{22}u_{24}) \\ t_{13}^2 + t_{23}^2 + 2t_{12}t_{14} + 2t_{22}t_{24} & u_{13}^2 + u_{23}^2 + 2u_{12}u_{14} + 2u_{22}u_{24} \\ 2(t_{13} + t_{14} + t_{23}t_{24}) & 2(u_{13}u_{14} + u_{23}u_{24}) \\ t_{14}^2 + t_{24}^2 & u_{14}^2 + u_{24}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{13}^2 A_2^2 \\ -s_{12}^2 A_3^2 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{32}^2 & u_{32}^2 \\ 2t_{32}t_{33} & 2u_{32}u_{33} \\ t_{33}^2 + 2t_{32}t_{34} & u_{33}^2 + 2u_{32}u_{34} \\ 2t_{33} + t_{34} & 2u_{33} + u_{34} \\ t_{34}^2 & u_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{12}^2 & A_3^2 \\ -s_{13}^2 & A_2^2 \end{bmatrix},$$

而

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 r_1^2 & x_1 & x_2 & x_2 r_2^2 \\ y_1 r_1^2 & y_1 & y_2 & y_2 r_2^2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 a_4 & A_3 b_4 & A_3 c_4 & 0 \\ 0 & A_3 a_4 & A_3 b_4 & A_3 c_4 \\ 0 & -A_4 a_3 & -A_4 b_3 & -A_4 c_3 \\ -A_4 a_3 & -A_4 b_3 & -A_4 c_3 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 r_1^2 & x_1 & x_3 & x_3 r_3^2 \\ y_1 r_1^2 & y_1 & y_3 & y_3 r_3^2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 a_4 & A_2 b_4 & A_2 c_4 & 0 \\ 0 & A_2 a_4 & A_2 b_4 & A_2 c_4 \\ 0 & -A_4 a_2 & -A_4 b_2 & -A_4 c_2 \\ -A_4 a_2 & -A_4 b_2 & -A_4 c_2 & 0 \end{bmatrix}.$$

同样利用  $s_{32}$  和  $s_{34}$  两相邻边可得  $f^2$  的另一表达式, 由此可得关于  $k$  的一元方程:

$$\sum_{i=1}^{10} t_i k^{10-i} = 0 \quad (6)$$

由于  $k \in (-1, 1)$ , 因而上述方程易解. 求出  $k$  后, 由(5)式可解  $f$ , 最后由(3)式计算出  $(X_i^c, Y_i^c, Z_i^c) (i = 1, 2, 3, 4)$ .

## 2.2 由摄像机坐标系和外部参考系中 3 D 点间的对应关系确定摄像机姿态

根据两个坐标系中 3 D 点间的对应关系求解它们之间的变换关系, 即求一个旋转变换  $R$  和平移变换  $T$ , 使

$$p_i^c = R p_i^w + T, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

即使

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^4 \|p_i^c - (R p_i^w + T)\|^2 \text{ 极小.}$$

令

$$q_i^c = p_i^c - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i^c, \quad q_i^w = p_i^w - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i^w,$$

则有

$$\begin{aligned} \Sigma^2 &= \sum_{i=1}^4 (q_i^c - R q_i^w)' (q_i^c - R q_i^w) \\ &= \sum_{i=1}^4 ((q_i^c)' q_i^c + (q_i^w)' q_i^w - 2(q_i^c)' R q_i^w). \end{aligned}$$

欲使  $\Sigma^2$  极小也即使  $\sum_{i=1}^4 (q_i^c)' R q_i^w$  极大, 令  $H = \sum_{i=1}^4 q_i^w (q_i^c)'$ , 对  $H$  作 SVD (Singular

Value Decomposition) 分解:



$$H = UAV'$$

式中  $U, V$  为  $3 \times 3$  正交矩阵,  $\Lambda$  为  $3 \times 3$  对角阵. 可以证明  $R = VU'$  即为所求[4]. 求出  $R$  后, 可直接计算出  $T$ :

$$T = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (p_i^c - R p_i^w).$$

由  $p_i^c = R p_i^w + T$  亦可求得

$$p_i^w = R_1 p_i^c + T_1. \quad (R_1 = R^{-1}, T_1 = -R'T)$$

则  $T_1$  和  $R_1$  分别表示了摄像机在参考系中的位置和方向.

### 3 RANSAC 技术与 INPAC 约束

建立摄像机三维姿态的难处在于输入样本的噪声是未知的. RANSAC 技术与 INPAC 约束正是解决这一难点的有效方法, 其中 RANSAC 提供了一种通用的抑制数据噪声以获取一致性样本集的处理框架, 而 INPAC 则根据摄像机作刚体运动时内参数保持不变这一事实直接形成对内参数的约束.

#### 3.1 用 RANSAC 方法形成一致性样本集

在第 2 节中我们所讨论的算法只需知道 4 个共面点在参考坐标系及图像平面上的位置. 然而, 如果我们只用 4 个点来进行校准, 其结果将大大地依赖于这几个样本点在参考系中和在图像平面上的位置精度. 由于数据噪声是难以避免的, 这可能使计算出的摄像机三维姿态有难以接受的误差. 我们按 RANSAC 思想设计了如下的处理过程来解决这种情况:

- 1) 将高度不同的两平面上的样本点作为输入集合  $s_0$ , 并使  $s_2 = s_0$ .
- 2) 从  $s_0$  中任选 4 个点  $p_1, p_2, p_3, p_4$ , 使  $s_1 = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ .
- 3) 检查  $s_1$  中 4 个点是否共面, 若不是转步骤 2); 若是, 检查该 4 个点中是否有 3 点共线, 若是转步骤 2), 否则转步骤 4).
- 4) 利用该 4 点及前述算法恢复摄像机的内、外参数.
- 5) 对任一点  $p_i \in s_2$  且  $p_i \notin s_1$ , 检验该点对上面所建立参数的吻合程度. 这可利用正、反投影关系来进行. 利用正投影关系检验是根据外部坐标中  $p_i(X_i, Y_i, Z_i)$  和上面得到的摄像机参数计算其成像  $p_i'(x_i', y_i')$ , 并与其在图像平面上的实际位置  $p_i(x_i, y_i)$  作比较:

$$\delta_1 = \|p_i'(x_i' - y_i') - p_i(x_i, y_i)\|.$$

利用反投影关系检验是根据图像平面上的  $p_i(x_i, y_i)$  和上面得到的摄像机参数, 以及该点所在平面的方程计算出它在外部参考坐标系中的位置  $p_i'(X_i', Y_i', Z_i')$ , 并与它在外部参考坐标系中的实际位置相比较:

$$\delta_2 = \|p_i'(X_i', Y_i', Z_i') - p_i(X_i, Y_i, Z_i)\|.$$

- 6)  $s_2 = s_2 - p_i$ , 如果  $(\delta_1 < \zeta_1)$  且  $(\delta_2 < \zeta_2)$ , 则  $s_1 = s_1 \cup \{p_i\}$ , 式中  $\zeta_1$  和  $\zeta_2$  分

别为图像平面上和外部参考坐标系中可接受的误差阈值(在我们的实验中  $\zeta_1 = 0.5\text{pixel}$ ,  $\zeta_2 = 0.5\text{mm}$ )。如  $s_2 = \phi$ , 则转步骤 7), 否则转步骤 5)。

7) 如果  $s_1$  中点数超过一定阈值(比如总样本点数的  $\frac{3}{4}$ ), 则构成一致性样本点集。计算这些点在摄像机坐标系下的 3D 坐标值, 并利用 3D 点对应关系建立摄像机姿态。否则转步骤 2)。如果样本点集中所有 4 点组均已试过, 并未构成一致性样本点集, 则说明该组样本点已被噪声严重“污染”, 需另行采样。

### 3.2 用 INPAC 约束获取摄像机实际姿态

上述过程为我们提供了 2D-3D 映射关系下一致性的样本集, 但这并不能保证我们由此就可以计算出摄像机的实际姿态值, 因为映射关系约束并不能消除摄像机内参数和外参数间的补偿关系。

每一摄像机姿态均可用一 10 元组来表示:  $\phi = \{c_x, c_y, f, k, X, Y, Z, O, A, T\}$ 。式中前 4 项为内参数(光心在图像平面上的位置、有效焦距和镜头畸变系数), 其余为外参数。如果  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别表示摄像机作刚体运动前后时的姿态, 即  $\phi_1 = \{c_{x_1}, c_{y_1}, f_1, k_1, X_1, Y_1, Z_1, O_1, A_1, T_1\}$ ,  $\phi_2 = \{c_{x_2}, c_{y_2}, f_2, k_2, X_2, Y_2, Z_2, O_2, A_2, T_2\}$ , 则应有  $\phi_1 \cap \phi_2 = \{c_x, c_y, f, k\} = \{c_{x_1}, c_{y_1}, f_1, k_1\} = \{c_{x_2}, c_{y_2}, f_2, k_2\}$ 。此即 INPAC 的基本含义。在实际计算中, 摄像机处于两个位置下的内参数不会严格一致, 因而我们使用 INPAC 时不是将其看作表示摄像机参数的两个集合的交, 而是由 4 个内参数构成的空间中的某种分布间的交。

### 3.3 利用运动变换关系检验相应视点的摄像机姿态

建立在 2D-3D 映射关系基础上的正投影关系和反投影关系, 只能检验描述摄像机姿态参数间的某种复合关系。通过 INPAC 约束, 我们保证了内参数的一致性。对外参数, 则可通过两视点间运动变换关系检验相应参数的正确性。

设摄像机运动前后两视点的 3D 姿态分别为  $c_1$  和  $c_2$  (它们都是  $4 \times 4$  矩阵, 由旋转和平移两部分构成), 而它们间的运动变换矩阵为  $M$ , 则应有  $c_2^{-1}c_1 = M$ 。当  $c_1$  和  $c_2$  受输入数据噪声影响后, 这种关系会受到破坏。我们用

$$\Delta = \|E - c_2^{-1}c_1M^{-1}\|$$

来评价  $c_1$  和  $c_2$  的正确性, 式中  $E$  为  $4 \times 4$  单位阵。

## 4 实验结果

目前我们已分别将 CCD 摄像机装在微控制平台 (Micro-Controller) 和 PUMA560 机械手上进行了实验。微控制平台可提供两个方向上的平移运动, 其精度分别为  $0.001\text{mm}$  和  $0.01\text{mm}$ 。PUMA560 提供六个自由度的运动, 但精度相对要差些 (位置重复精度  $0.1\text{mm}$ )。下面的实验结果是将摄像机装在微控制平台上进行实验后得出的。

表 1 是分别对视点 1 和视点 2 用 RANSAC 技术后的结果, 每个解由一共面 4 点组产生, 它们都通过正、反投影检验, 其误差是所计算得到的参数对样本点集中各点误差的平均。表 2 是使用 INPAC 约束后各视点的姿态值及运动关系检验结果。



表 1

	No	有效焦距	光心		位置			方向			误差	
		$f$ (mm)	$C_x$ $C_y$ (pixel)	$X$	$Y$ (mm)	$Z$	$\theta$	$A$ (degree)	$T$	$dI$	$dJ$ (pixel)	
视点 1	1	16.526	256.1	261.5	78.42	212.03	180.61	-89.42	2.77	-140.07	0.378	0.239
	2	16.527	256.1	261.7	78.44	212.05	180.62	-89.42	2.77	-140.07	0.376	0.234
	3	16.522	256.3	261.5	78.42	212.00	180.57	-89.42	2.77	-140.08	0.378	0.239
	4	16.523	256.3	261.7	78.45	212.02	180.58	-89.42	2.77	-140.08	0.376	0.234
	5	16.524	256.3	261.9	78.48	212.04	180.59	-89.41	2.77	-140.08	0.374	0.230
	6	16.526	256.3	262.1	78.50	212.06	180.60	-89.41	2.77	-140.08	0.372	0.227
	7	16.527	256.3	262.3	78.53	212.09	180.61	-89.41	2.77	-140.07	0.370	0.223
视点 2	1	16.493	255.5	261.5	123.95	237.33	180.90	-89.38	2.62	-140.15	0.426	0.279
	2	16.492	255.5	261.7	123.98	237.32	180.90	-89.38	2.62	-140.15	0.427	0.294
	3	16.489	255.7	261.5	123.95	237.29	180.86	-89.39	2.62	-140.16	0.427	0.280
	4	16.488	255.7	261.7	123.98	237.28	180.85	-89.38	2.62	-140.16	0.426	0.293
	5	16.485	255.9	261.5	123.96	237.25	180.81	-89.39	2.62	-140.17	0.426	0.281
	6	16.484	255.9	261.7	123.99	237.24	180.81	-89.38	2.62	-140.18	0.427	0.295
	7	16.480	256.1	261.5	123.96	237.22	180.77	-89.39	2.62	-140.19	0.425	0.283

表 2

视点	$f$ (mm)	$C_x$ $C_y$ (pixel)	$X$	$Y$ (mm)	$Z$	$\theta$	$A$ (degree)	$T$	$dI$	$dJ$ (pixel)	
1	16.505	256.0	261.6	78.42	212.03	180.61	-89.42	2.77	-140.07	0.378	0.239
2	16.505	256.0	261.6	123.99	237.24	180.81	-89.38	2.62	-140.18	0.427	0.295
运动变换 关系检测	姿态改变		45.57	25.21	0.21	0.04	-0.15	-0.11			
	实际运动		45.0	25.0	0.00	0.00	0.00	0.00			
	偏差		0.57	0.21	0.21	0.04	-0.15	-0.11			

## 参 考 文 献

- [1] Fischler MA and Bolles RC. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography. *Communication of the ACM*, 1981, 24(6).
- [2] Tsai RY. A Versatile Camera Calibration Technique for 3D High Accuracy Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lens. *IEEE. on Robotics and Automation*, 1987, 3(4).
- [3] Abidi MA and Chandra T. Pose Estimation for Camera Calibration and Landmark Tracking. in Proc. of IEEE Intern. Conf. on R&A, 1990.
- [4] Arun KS, Huang TH and Blostein SD. Least-Square Fitting of Two 3-D Point Set. *IEEE Trans.* 1987, Pami-9(5).



## CAMERA POSE CALIBRATION FOR ACTIVE VISION SYSTEM

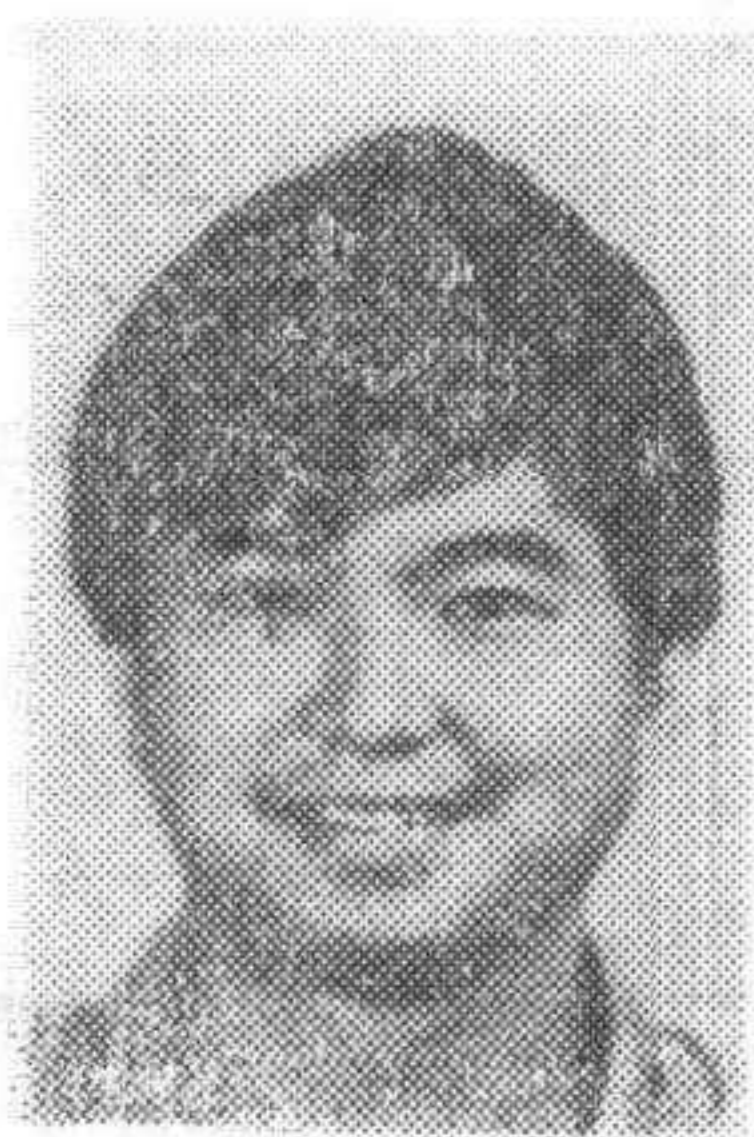
WAN XIANG XU GUANGYOU

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University 100084)

### ABSTRACT

This paper presents a new geometrical method which use 4 coplanar points and their correspondences on image plane to compute the camera pose considering the lens distortion of radial alignment constraints. It also use random sample consensus technique and intrinsic parameters consistency constraints to improve the stability and accuracy of the results. The imperfectness of camera pose assessment by projection test and back-projection test is exposed. We suggest that the motion transformation between different view points should be used as important clue to verify the corresponding camera pose data.

**Key words:** computer vision, camera calibration, random sample consensus.



**万 享** 生于1965年10月,分别于1989年和1993年在清华大学计算机系获得硕士及博士学位。目前是北京科利华电脑有限公司第二事业部经理。感兴趣的领域有计算机视觉、模式识别和多媒体技术及应用。



**徐光祐** 1963年毕业于清华大学自动化系。1982—1984年作为访问学者在美国普渡大学从事人工智能和模式识别方面的工作。曾于1986年获国家科技进步二等奖,1990年获国家高技术委员会颁发的二等奖。与傅京生教授等合著“人工智能及其应用”并发表了大量论文。目前是清华大学计算机系教授,感兴趣的领域有计算机视觉、多媒体技术和颜色视觉。