

# 基于单个平行四边形单幅图像的物体定位<sup>1)</sup>

孙凤梅<sup>1,2</sup> 王卫宁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(北方工业大学理学院 北京 100041)

<sup>2</sup>(首都师范大学物理系 北京 100037)

(E-mail: fmsun@163.com)

**摘 要** 主要讨论基于单个平行四边形单幅图像的物体定位方法. 主要结论有: 如果平行四边形的两组边长均未知的話, 则从该平行四边形的单幅图像, 仅可以确定物体坐标系与摄像机坐标系之间的旋转矩阵和平移向量的方向, 平移向量的大小无法确定. 当知道平行四边形任一组边长时, 旋转矩阵和平移向量均可以唯一确定. 另外, 诸如相邻边长之比, 相邻边之间的夹角等信息, 由于它们不是射影不变量, 所以它们对基于单幅图像的物体定位来说, 提供不了任何有用的额外信息.

**关键词** 物体定位, 平行四边形, PnP 问题

**中图分类号** TP391

## Pose Determination from a Single Image of a Single Parallelogram

SUN Feng-Mei<sup>1,2</sup> WANG Wei-Ning<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Faculty of Science, North China University of Technology, Beijing 100041)

<sup>2</sup>(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037)

(E-mail: fmsun@163.com)

**Abstract** Pose determination by a single image of a single space parallelogram is investigated in this work. The main results are: If only a single image of a single parallelogram is known, the rotation matrix and direction of the translation vector from the camera system to the object system can be determined. If the length of one of the parallelogram's sides is also known, the translation vector can also be determined. In addition, we show that the entities such as the length-ratio of two adjacent sides and the including angle of two adjacent sides of the parallelogram, since they are not projective invariants, cannot provide any additional useful constraints on the pose parameters.

**Key words** Pose determination, parallelogram, the PnP problem

## 1 引言

从图像确定空间物体的位置是众多基于视觉的应用领域的一个关键步骤和核心问题, 如视觉机器人定位, 增强现实, 基于视觉的质量监控和基于视觉的安全监控等. 很明显, 由于单幅图像不需要确定图像间的对应关系, 不需要对不同摄像机坐标系之间进行标定, 所以基于单幅图像的定位是最经济和最方便的一种物体定位方法. 在基于单幅图像的物体

1) 国家自然科学基金 (60375006), 国家 863 计划基金 (2005AA118020) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60375006) and the National High-Tech Research and Development Plan of P. R. China (2005AA118020)

收稿日期 2005-10-10 收修改稿日期 2005-12-23

Received October 10, 2005; in revised form December 23, 2005

定位方法中, 可能应用最普遍且最广为人知的方法要数所谓的 PnP 问题 (The Perspective-n-Point Problem)<sup>[1]</sup>. PnP 问题是指给定  $n(2 < n < 6)$  组空间点与图像点之间的对应关系, 确定物体坐标系与摄像机坐标系刚体变换关系的一种方法. PnP 问题于 1981 年由 Fisher 和 Bolles 正式提出, 尔后很多人对此进行了深入研究. 关于 PnP 问题的主要结论有: 当  $n = 3$  时, 如果空间的 3 个控制点与摄像机光心位于同一个圆周上时, 则对应的 P3P 问题有无穷多组解<sup>[2]</sup>. 否则, 对应的 P3P 问题最多有四组解且解的上限可达<sup>[1,2]</sup>. 当  $n = 4$  时, 如果空间 4 个控制点共面且该平面不通过摄像机光心, 则对应的共面 P4P 问题有唯一解<sup>[3,4]</sup>. 当空间的 4 个控制点不共面时, 对应的非共面 P4P 问题最多可能有 5 个解且解的上限可达<sup>[5]</sup>. 当  $n = 5$  时, 如果空间的 5 个控制点任意三个不共线, 且任意 4 个不共面, 则对应的 P5P 问题最多有 2 个解<sup>[6]</sup>. 另外, 高小山<sup>[7]</sup> 等利用 Wu 方法对 P3P 问题的解集给出了完整的代数描述. 张彩霞等<sup>[8]</sup> 从几何的观点出发, 证明了当摄像机光心位于由控制点确定的危险圆柱 (Danger cylinder) 上时, 对应的 P3P 问题必然有 3 个解; 当摄像机光心位于过控制点三角形的垂线的三个垂直平面的任一平面时, 对应的 P3P 问题必有 4 个解. 同时, 张彩霞等<sup>[9]</sup> 还研究了基于对应直线的物体定位方法. 本文研究的内容与 PnP 问题有密切的联系. 在 PnP 问题中, 假定空间  $n$  个控制点的坐标及其对应  $n$  个图像点的坐标已知, 目的在于确定物体坐标系与摄像机坐标系之间的位置关系. 本文讨论的问题是: 假定空间一个平行四边形及其对应图像已知, 如何确定物体坐标系与摄像机坐标系之间的位置关系. 本文的主要结果, 似乎没有在其他地方有过类似的报导.

## 2 一些预备知识

### 2.1 点的齐次坐标表示

为了讨论方便, 我们需要引入点的齐次坐标表示. 在本文中, 一个二维点  $\boldsymbol{x} = (x, y)^T$  的齐次坐标总表示为  $\tilde{\boldsymbol{x}} = (x, y, 1)^T$ .

### 2.2 摄像机已标定

与 PnP 问题相同, 在本文中, 我们总假定摄像机的内参数已标定. 不失一般性, 我们总假定摄像机的内参数矩阵为单位矩阵, 即  $K = I$ .

### 2.3 物体坐标系和投影关系

不失一般性, 为了方便起见, 我们总使用如图 1 所示的物体坐标系:

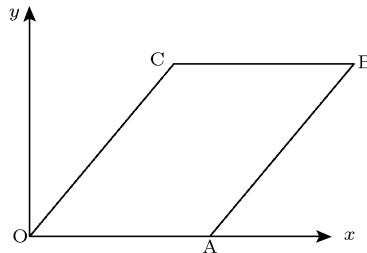


图 1 使用的空间坐标系

Fig. 1 The used object frame

也就是说, 将平行四边形所在的平面定义为物体坐标系的  $(o - xy)$  平面, 原点定义在平行四边形的一个顶点上,  $ox$  轴与平行四边形的一边重合. 在这样的坐标系下, 空间点到图像点之间的投影可表示为<sup>[10]</sup>:

$$\lambda_i \tilde{\boldsymbol{m}}_i = (\boldsymbol{r}_1 \quad \boldsymbol{r}_2 \quad \boldsymbol{t}) \tilde{\boldsymbol{x}}_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

其中  $\tilde{x}_i$  为平行四边形 4 个顶点的齐次坐标;  $\tilde{m}_i$  为平行四边形 4 个顶点对应的图像点的齐次坐标;  $\lambda_i$  为未知标量.  $r_1, r_2$  为待求的旋转矩阵的前两个列向量,  $t$  为待求的平移向量. 当  $r_1, r_2$  得到后,  $r_3$  可通过  $r_3 = r_1 \times r_2$  求得, 即可以唯一得到旋转矩阵, 所以, 所谓的定位问题, 就是如何求  $r_1, r_2, t$  的问题. 矩阵  $(r_1 \ r_2 \ t)$  在文献中一般称为空间平面到图像平面的投影矩阵 (homography). 所以, 所谓的定位问题, 本质上就是如何确定投影矩阵的问题.

## 2.4 度量信息与平移向量

当空间点或线没有给出度量信息时 (如点在欧几里得空间的坐标, 线的长度等), 则定位时至多可以确定平移向量的方向, 不可能确定平移向量的大小. 事实上, 这个结论也很直观. 由于没有给出度量信息, 所以给定二个相似的物体, 大物体放在离摄像机远的地方与小物体放在离摄像机近一点的地方可以得到同样的图像, 所以仅仅从图像是无法确定物体的绝对大小的, 即无法确定平移向量的大小.

## 3 主要结果

我们将通过直接计算和射影变换二种不同的方法, 给出本文的主要结论.

### 3.1 直接计算方法

**结论 1.** 当空间平行四边形的任一边长已知时, 则式 (1) 中的旋转矩阵和平移向量可以通过平行四边形的单幅图像唯一确定.

下面用构造法来证明该结论.

不失一般性, 假定图 1 中边长  $|OA| = L$  已知, 夹角  $\angle COA = \theta$ , 边长  $|OC| = S$ .  $\theta, S$  均未知, 则平行四边形  $OABC$  4 个顶点的齐次坐标可表示为

$$\tilde{x}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \tilde{x}_2 = \begin{pmatrix} L \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \tilde{x}_3 = \begin{pmatrix} S \cos \theta \\ S \sin \theta \\ 1 \end{pmatrix}, \tilde{x}_4 = \begin{pmatrix} L + S \cos \theta \\ S \sin \theta \\ 1 \end{pmatrix}$$

假定该 4 个顶点对应的图像点的齐次坐标为  $\tilde{m}_1, \tilde{m}_2, \tilde{m}_3, \tilde{m}_4$ , 则根据式 (1) 的投影关系, 有

$$\lambda_1 \tilde{m}_1 = t \quad (2)$$

$$\lambda_2 \tilde{m}_2 = L r_1 + t \quad (3)$$

$$\lambda_3 \tilde{m}_3 = S \cos \theta r_1 + S \sin \theta r_2 + t \quad (4)$$

$$\lambda_4 \tilde{m}_4 = L r_1 + S \cos \theta r_1 + S \sin \theta r_2 + t \quad (5)$$

上式中,  $\lambda_i, i = 1, 2, 3, 4, S, \theta$  为未知量,  $\tilde{m}_i, i = 1, 2, 3, 4, L$  为已知量,  $(r_1 \ r_2 \ t)$  为待求量. 从上式可以得到下面的关系式

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = (-\tilde{m}_1 \ \tilde{m}_2 \ \tilde{m}_3)^{-1} \tilde{m}_4 \lambda_4 = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \lambda_4$$

其中  $\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = (-\tilde{m}_1 \ \tilde{m}_2 \ \tilde{m}_3)^{-1} \tilde{m}_4$  可计算得到, 故可视为已知量. 将上述结果代入式 (2), 有

$$r_1 = \frac{c_2 \tilde{m}_2 - c_1 \tilde{m}_1}{L} \lambda_4$$

由于  $\mathbf{r}_1$  为旋转矩阵的列向量, 则  $\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_1 = 1$ , 所以  $\lambda_4$  可以通过下式求得, 从而得到向量  $\mathbf{r}_1$ .

$$\lambda_4^* = \frac{L}{|c_2 \tilde{\mathbf{m}}_2 - c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1|}$$

则平移向量  $\mathbf{t}$  可以通过下式求得

$$\mathbf{t} = c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1 \lambda_4^*$$

用  $\mathbf{r}_1^T$  左乘式 (4), 由于  $\mathbf{r}_1, \mathbf{t}$  已经得到以及  $\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_2 = 0$ , 所以

$$\mathbf{r}_1^T (c_3 \tilde{\mathbf{m}}_3 \lambda_4^* - \mathbf{t}) = S \cos \theta$$

另外, 从式 (4) 可知,

$$S \sin \theta \mathbf{r}_2 = \lambda_4^* c_3 \tilde{\mathbf{m}}_3 - S \cos \theta \mathbf{r}_1 - \mathbf{t}$$

所以

$$\mathbf{r}_2 = \frac{\lambda_4^* c_3 \tilde{\mathbf{m}}_3 - S \cos \theta \mathbf{r}_1 - \mathbf{t}}{|\lambda_4^* c_3 \tilde{\mathbf{m}}_3 - S \cos \theta \mathbf{r}_1 - \mathbf{t}|}$$

可以将上面的计算过程总结为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} &= (-\tilde{\mathbf{m}}_1 \quad \tilde{\mathbf{m}}_2 \quad \tilde{\mathbf{m}}_3)^{-1} \tilde{\mathbf{m}}_4, \quad \lambda_4^* = \frac{L}{|c_2 \tilde{\mathbf{m}}_2 - c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1|} \\ \mathbf{t} &= c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1 \lambda_4^*, \quad \mathbf{r}_1 = \frac{c_2 \tilde{\mathbf{m}}_2 - c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1}{L} \lambda_4^* \\ S \cos \theta &= \mathbf{r}_1^T (c_3 \tilde{\mathbf{m}}_3 \lambda_4^* - \mathbf{t}), \quad \mathbf{r}_2 = \frac{\lambda_4^* c_3 \tilde{\mathbf{m}}_3 - S \cos \theta \mathbf{r}_1 - \mathbf{t}}{|\lambda_4^* c_3 \tilde{\mathbf{m}}_3 - S \cos \theta \mathbf{r}_1 - \mathbf{t}|} \end{aligned}$$

**结论 2.** 对基于单幅平行四边形图像的物体定位问题而言, 已知平行四边形的一些信息, 如邻边的边长比,  $|OC| : |OA| = r$ , 邻边的夹角  $\angle COA = \theta$  等, 不可能对定位问题提供新的约束. 此时, 旋转矩阵可以唯一确定, 但仅仅能确定平移向量的方向, 平移向量的大小无法确定.

结论 2 同样可以用构造法来证明. 事实上, 根据第 2.4 小节的说明, 由于邻边的比, 邻边的夹角等均不是度量信息, 所以, 此时最多可以求出平移向量的方向和旋转矩阵. 下面给出如何求平移向量的方向和旋转矩阵的方法.

从结论 1 的证明知, 此时同样有下式成立

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = (-\tilde{\mathbf{m}}_1 \quad \tilde{\mathbf{m}}_2 \quad \tilde{\mathbf{m}}_3)^{-1} \tilde{\mathbf{m}}_4$$

从式 (2) 知,  $\mathbf{t} = \lambda_1 \tilde{\mathbf{m}}_1 = \lambda_4 c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1$ , 由于  $\mathbf{t}$  的大小无法确定, 所以不失一般性, 不妨假定  $\lambda_4^* = 1$ . 此时, 未知边长  $L = |OA|$  可以通过下式计算

$$L = \lambda_4^* |c_2 \tilde{\mathbf{m}}_2 - c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1|$$

利用设定的  $\lambda_4$  和上面计算得到的向量  $\mathbf{t}$  和边长  $L$ , 后面计算旋转矩阵的方法与结论 1 中的公式完全相同, 这里就不再重复了.

从上面的构造过程可知,在确定旋转矩阵和平移向量的方向时,我们并没有用到邻边的比,邻边的夹角这些信息,所以,这些信息对确定物体的姿态并没有提供任何额外的有用信息.

### 3.2 基于射影变换的方法

从上面的结论 2 可知,由于平行四边形邻边的比、邻边的夹角不是射影不变量,故对确定物体的姿态不能提供有用的约束.这从另一方面也说明,仅仅知道平行四边形的一幅图像就足以确定旋转矩阵和平移向量的方向.下面我们将从射影几何的观点来说明,为什么从一幅平行四边形的图像就可以确定这些量<sup>2)</sup>.主要原因是:从平行四边形的二组平行对边的图像,可以确定对应的二个消影点 (Vanishing points),二个不同的消影点又可以确定消影线  $l$  (Vanishing line, 亦即无穷远直线的投影).由于摄像机已标定,所以摄像机的内参数矩阵  $K$  已知.根据射影几何理论,无穷远平面上绝对二次曲线 (The absolute conic) 的投影  $C = K^{-T}K^{-1}$  (文献中称为绝对二次曲线的像: The image of the absolute conic) 亦可以确定.这样,  $C$  与  $l$  的二个虚交点就是无穷远平面二个圆环点的像 (The image of the circular points).从圆环点的像我们可以很方便地求出  $r_1, r_2$ .将平行四边形的任一顶点作为物体坐标系的原点,又可以求出平移向量的方向.

从上面的讨论可知,利用平行四边形定位,本质上是确定平行四边形所在平面的圆环点的像.下面给出具体的计算方法.

首先,从射影几何理论可知,假定  $m_I$  为一个圆环点的像,则另一个圆环点的像为  $m_I$  的共轭点  $\bar{m}_I$ ,且  $m_I$  与旋转矩阵的前二个列向量  $(r_1, r_2)$  有如下关系

$$\lambda_I m_I = r_1 + i r_2 \quad (6)$$

这是因为平行四边形所在平面的二个圆环点为:  $(1 \pm i \ 0)^T$ ,将  $(1 \ i \ 0)^T$  代入式 (1) 就可以得到式 (6).从式 (6) 知,物体的定位问题,变成了求圆环点像  $m_I$  的问题.

另外,从图 2 可知,假定在图像平面中四边形  $oabc$  为空间平行四边形  $OABC$  的投影,则根据射影几何理论,平行四边形  $OABC$  二组平行对边对应的消影点  $V_1, V_2$  可通过下式计算:

$V_1$ : 直线  $oa$  与直线  $bc$  的交点;

$V_2$ : 直线  $oc$  与直线  $ab$  的交点;

由于消影线  $l$  为过  $V_1, V_2$  的直线,所以  $l$  也可以很方便地确定.

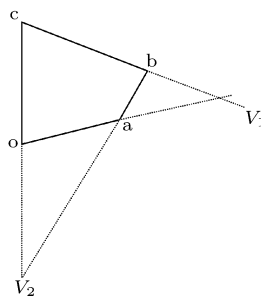


图 2 消影点的确定

Fig. 2 The vanishing points determination

2) 在本节中,假定读者对射影几何有初步的了解,如对无穷远直线、无穷远平面、消影点、消影线、圆环点、绝对二次曲线等基本概念有一定的了解.

由于圆环点的像是绝对二次曲线的像 (一个虚椭圆)  $C$  与消影线  $l$  的交点, 所以, 圆环点的像可以从下面的方程组解出:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^T C \mathbf{x} = 0 \\ l^T \mathbf{x} = 0 \end{cases}$$

如 2.2 节所述, 由于在本文中假定摄像机已标定且  $C = I$ , 所以上面的方程组变为:

$$\begin{cases} x_1^2 + x_2^2 + 1 = 0 \\ l_1 x_1 + l_2 x_2 + 1 = 0 \end{cases}$$

通过解上面的方程组就可以得到圆环点的像, 从而确定  $(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ . 在解上面的方程组时, 需要解一个一元二次方程. 事实上, 圆环点的像可以更方便地线性求解.

由于消影点  $V_1$  与  $\mathbf{r}_1$  有下述关系

$$\lambda V_1 = (\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad t) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{r}_1$$

所以

$$\mathbf{r}_1 = \frac{V_1}{|V_1|}$$

由于  $\mathbf{r}_2^T \mathbf{r}_1 = 0$  且  $\mathbf{r}_2$  位于消影线  $l$  上, 即  $\mathbf{r}_2^T l = 0$ , 所以,  $\mathbf{r}_2$  为  $\mathbf{r}_1$  与  $l$  的向量叉积, 即

$$\mathbf{r}_2 = \pm \frac{l \times \mathbf{r}_1}{|l \times \mathbf{r}_1|}$$

此时, 上式中关于  $\mathbf{r}_2$  的正、负号无法确定.  $\mathbf{r}_2$  的正、负号可以通过  $O, A, B, C$  点的投影来决定. 由于点  $O, A, B, C$  均在摄像机的前方, 所以, 式 (2)~(5) 中的  $\lambda_i, i = 1, 2, 3, 4$  均为正数, 据此可以确定  $\mathbf{r}_2$  的正确符号.

关于平移向量的方向, 正如 3.1 节所示, 可以表示为:  $t = \lambda_1 \tilde{\mathbf{m}}_1 = \lambda_4 c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1 = c_1 \tilde{\mathbf{m}}_1$ .

从上面的讨论可知, 仅仅从平行四边形的射影性质, 就可以确定旋转矩阵和平移向量的方向. 这也再一次说明, 诸如平行四边形邻边的比、邻边的夹角这些量, 由于它们不是射影不变量, 所以对定位起不到进一步约束作用.

另外, 下面的方法也可以很方便地确定旋转矩阵  $R$ . 根据射影几何理论知, 给定一组以  $\mathbf{r}$  为单位法向量的空间平行线, 如果  $V$  为对应的消影点, 则  $\mathbf{r}$  与  $V$  有如下关系

$$\mathbf{r} = \frac{V}{|V|}$$

由上述理论, 旋转矩阵  $R$  可以表示为

$$R = \begin{pmatrix} \frac{V_1}{|V_1|} & \frac{V_1 \times (V_1 \times V_2)}{|V_1 \times (V_1 \times V_2)|} & \frac{V_1 \times V_2}{|V_1 \times V_2|} \end{pmatrix}$$

## 4 讨论和结论

本文以射影几何和直接计算二种不同的方法, 对基于空间平行四边形单幅图像的物体定位问题进行了研究并给出了具体的计算方法. 本文证明了当仅知道单个平行四边形的单

幅图像时, 仅能确定物体坐标系相对摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量的方向; 当进一步知道平行四边形的一条边长时, 平移向量的大小同时可以确定. 本文同时表明, 平行四边形邻边的边长比、邻边的夹角等信息, 由于不是射影变换下的不变量, 不能对物体定位形成新的约束.

另外, 本文没有给出任何具体实验, 这主要是基于以下考虑:

1) 关于结果的正确性: 本文结果的正确性, 从具体数学证明中可以说明, 没有必要进行模拟验证;

2) 关于算法的数值鲁棒性问题: 从数值鲁棒性的观点看, 本文方法与共面 P4P 问题完全相同. 文献中关于共面 P4P 问题的结论在这里也成立, 因此没有必要再重复文献中的类似实验. 如共面 P4P 问题中的结论: 当平行四边形 4 个顶点的图像相互之间离的越远, 算法越鲁棒; 否则, 越不鲁棒等, 在这里也成立.

3) 关于射影几何方法与直接计算方法的比较问题: 由于基于射影几何的方法需要计算消影点, 而消影点的计算对噪声很敏感, 所以, 一般来说, 尽管基于射影几何的方法有理论上的完美性, 但直接计算方法却有计算上的鲁棒性. 关于这一点, 文献中已有很多具体例子, 这里就没有必要通过实验重复验证了.

最后, 需要说明的是, 对基于单幅图像的物体定位而言, 本文证明了平行四边形邻边的边长比、邻边的夹角等信息不能提供新的约束, 但这并不意味着对基于多幅图像的定位, 特别是定位问题与摄像机标定问题同时求解时, 这些信息也不能提供有用约束. 事实上, 如祝海江等<sup>[11]</sup>指出, 对基于二幅图像的定位而言, 平行四边形邻边的边长比确实对摄像机的内参数可以提供新的约束.

## References

- 1 Fishler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 1981, **24**(6): 381~395
- 2 Su C, Xu Y Q, Li H, Liu S Q, Li D G. Necessary and sufficient condition of positive root number of perspective-three-point problem. *Chinese Journal of Computer*, 1998, **21**(12): 1084~1095
- 3 Penna M A. Determining camera parameters from the perspective projection of a quadrilateral. *Pattern Recognition*, 1991, **24**(6): 533~541
- 4 Hu Z Y, Lei C, Wu F C. A note on the planar P4P problem. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(6): 770~776
- 5 Hu Z Y, Wu F C. A note on the number of solutions of the non-coplanar P4P problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(4): 550~555
- 6 Wu F C, Hu Z Y. A study on the P5P problem. *Chinese Journal of Software*, 2001, **12**(5): 768~775
- 7 Gao X S, Hou X R, Tang J L, Cheng H F. Complete solution classification for the perspective-three-point problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(8): 930~943
- 8 Zhang C X, Hu Z Y. A general sufficient condition of four positive solutions of the P3P problem. *Journal of Computer Science and Technology*, 2005, **20**(6): 836~842
- 9 Zhang C X. Study on the Perspective-N-Point/Line Problem. [Ph.D. Dissertation], Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2006
- 10 Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientation. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece: IEEE Press, 1999. 666~673
- 11 Zhu H J, Wu F C, Hu Z Y. Camera calibration from two parallel segments. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(6): 853~864

**孙凤梅** 北方工业大学, 副教授, 主要研究方向为光电信息处理和计算机视觉.

(SUN Feng-Mei Associate professor of the North China University of Technology. Her research interests include photo-electric information processing and 3D computer vision.)

**王卫宁** 首都师范大学, 副教授, 主要研究方向为光电信息处理.

(WANG Wei-Ning Associate professor of the Capital Normal University. Her research interest includes photo-electric information processing.)