

# 基于虚拟控制点的像机姿态测量算法

陈鹏<sup>1</sup> 胡广大<sup>1</sup> 刘晓军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京科技大学自动化学院, 北京 100083)  
(<sup>2</sup>北京控制工程研究所, 北京 100080)

**摘要** 像机姿态测量,包括确定像机的旋转矩阵与平移向量,在机器视觉领域中有着非常广泛的应用。针对控制点异面分布的情况,提出了一种基于虚拟控制点的像机姿态测量算法。算法的主要思想是利用少量虚拟控制点实现像机姿态的短时间迅速求解,然后通过目前非常成熟的正交迭代算法,对求解结果进行精细调节,从而在整体上提高测量算法的精确度与稳定性。实验结果表明,算法在性能上优于目前比较流行的几种像机姿态迭代求解算法,而且具有较强的抗噪声干扰和抗控制点误匹配的能力,可以应用在实际的测量环境当中,是一种有效的像机姿态测量算法。

**关键词** 测量;姿态测量;迭代算法;透视 n 点投影

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1108003

## Camera Pose Estimation Based on Virtual Control Points

Chen Peng<sup>1</sup> Hu Guangda<sup>1</sup> Liu Xiaojun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing,  
Beijing 100083, China)  
(<sup>2</sup>Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China)

**Abstract** Camera pose estimation, including the estimation of rotation matrix and translation vector, has extensive applications in machine vision area. In this paper, an iterative algorithm based on virtual control points is proposed. The basic idea is to acquire the camera pose estimation in a short time by using fewer virtual control points, and to realize a detailed adjustment by using the famous orthogonal iterative algorithm, so that the accuracy and the stability of the whole algorithm can be improved. Experimental results show that the performance of the proposed algorithm is better than most popular iterative algorithms for camera pose estimation, and it has a strong ability of resisting both noise disturbing and error registration of control points. Furthermore, it can be applied in real measurement environment. Therefore, the proposed algorithm is an effective algorithm for camera pose estimation.

**Key words** measurement; pose estimation; iteration algorithm; perspective-n-point

**OCIS codes** 120.0280; 110.3925; 100.4995; 150.1135

## 1 引言

基于已标定像机的姿态测量算法目标在于求解像机相对于世界坐标系的旋转与平移,是一类在机器人手眼定标、计算机三维视觉与虚拟现实技术中经常需要用到的算法<sup>[1,2]</sup>。像机姿态求解的依据往往是一组控制点在世界坐标系中的坐标与其在图像平面中坐标的对应关系,因此在许多文献中将求解

像机姿态的问题称为透视 n 点成像(PnP)问题<sup>[3]</sup>。

目前,已经有大量文献提出了许多解决像机姿态测量问题的算法。一般,可以将这些算法分为三类:解析算法、迭代算法和全局优化算法。其中,解析算法通常通过求解一组线性方程组获得各个控制点到像机光心的距离,然后通过求解绝对定向问题完成像机姿态的测量<sup>[4~8]</sup>。从计算复杂度上看,解

收稿日期: 2012-05-29; 收到修改稿日期: 2012-07-06

作者简介: 陈鹏(1983—),男,博士研究生,主要从事机器视觉和图像处理等方面的研究。E-mail: holmes83@163.com

导师简介: 胡广大(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事飞行器导航控制与微分方程数值方法等方面的研究。

E-mail: ghu@ies.ustb.edu.cn

析算法的计算复杂度一般在  $O(n^2)$ <sup>[6]</sup> 与  $O(n^8)$ <sup>[7]</sup> 之间。在文献[9]中提出了一种解析算法——EPnP算法,其计算复杂度仅仅为  $O(n)$ ,同时计算精度优于大多数其他解析算法。然而,当图像中存在噪声干扰时,与其他解析算法一样,EPnP算法的精度会大大降低。迭代算法通过最小化某一误差函数来求解像机的旋转与平移,例如文献[10~12]根据像机模型的逆投影误差来构造目标函数,通过 Gauss-Newton 或者 Levenberg-Marquardt 算法求解像机的旋转与平移。目前受到广泛认可的一种迭代算法是OI算法,不同于其他迭代算法,OI算法利用了姿态估计问题的特定结构,通过在每一次迭代过程中求解最优正交解,来最小化物体空间误差函数<sup>[13]</sup>。在初始化较好的情况下,OI算法的测量精度高而且收敛速度快。但是,当初始化较差时,OI算法的测量精度降低甚至会得出非常错误的结果<sup>[9]</sup>。全局优化算法是近年来提出的、较新的求解方法。例如,在文献[14]中,将像机姿态测量问题转化为了一个 Sum of Squares(SOS)问题,从而得到像机姿态的全局最优解;在文献[15]中则通过凸松弛半正定规划算法求解像机姿态;在文献[16]中,通过求解线性矩阵不等式组得到像机姿态的全局最优解。全局优化算法的优点是求解精度高,同时适用于控制点共面与异面的情况,但缺点是求解速度较慢。

受到文献[9]的启发,针对异面控制点的像机姿态测量问题,本文提出了一种基于虚拟控制点的测量算法。算法分为三个阶段:首先在弱透视投影模型假设下,求解虚拟控制点在图像坐标系中的坐标,建立起它们与世界坐标系中坐标的对应关系,解算初始的像机旋转与平移;然后利用初始得到的旋转与平移,通过迭代运算更新虚拟控制点在像机坐标系中的坐标,并通过求解绝对定向问题来调节像机的旋转与平移;最后将通过虚拟控制点计算出的旋转与平移作为初始值,对所有控制点采用OI算法,得到最终的测量结果。

## 2 测量模型

### 2.1 透视投影模型

对像机旋转与平移的测量是基于透视投影模型的,如图1所示。空间中一点  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$  其 在世界坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$  中的坐标为  $[X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}]^T$ 。而在以像机光心为原点的像机坐标系  $O_c-XYZ$  中,将该点记为  $q_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T (i = 1, 2, \dots, n)$ 。 $q_i$  点投影到图像平面上,在以主点为原心

的图像坐标系  $O_f-xy$  中形成点  $m_i = [x_i, y_i]^T$ 。同时  $q_i$  点在以图像左上角为原点的像素坐标系  $O_p-uv$  中形成点  $u_i = [u_i, v_i]^T$ 。于是,  $u_i$  与  $m_i$  间满足

$$u_i = x_i/d_x - u_0, \quad v_i = y_i/d_y - v_0, \quad (1)$$

式中  $[u_0, v_0]^T$  为像机主点在像素坐标系中的坐标,  $d_x$  和  $d_y$  表示单位像素的宽度与高度。 $m_i$  与  $q_i$  的关系,可以表达为

$$x_i = fX_i/Z_i, \quad y_i = fY_i/Z_i, \quad (2)$$

式中  $f$  为像机的焦距。 $q_i$  与  $p_i$  间的关系则可以表达为

$$q_i = R p_i + T, \quad R \in SO, \quad T \in \mathbb{R}^3, \quad (3)$$

式中,矩阵  $R$  为一个  $3 \times 3$  的正交矩阵,表示像机的旋转,  $T$  为一个  $3 \times 1$  的列向量,表示像机的平移,像机姿态测量算法的目的就是要求解  $R$  和  $T$ 。(1)~(3)式可以统一表达为

$$\omega_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $\omega_i$  为一比例因子。

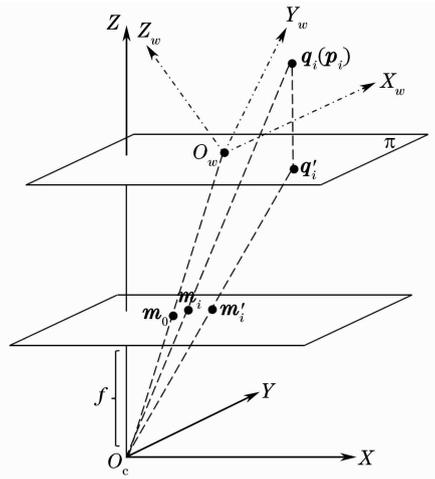


图1 透视投影模型及弱透视投影模型  
Fig.1 Perspective projection and weak perspective projection

### 2.2 弱视投影模型与旋转矩阵 R 的关系

弱透视投影模型中假设所有控制点在像机坐标系  $O_c-XYZ$  中具有完全相同的  $Z$  坐标。在图1中,首先将点  $q_i$  垂直投影到一个包含世界坐标系原点,并与图像平面平行的平面  $\pi$  上,得到点  $q'_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。可知,  $q'_i$  在像机坐标系中的坐标为  $[X_i, Y_i, Z_0]^T$ ,  $Z_0$  为  $O_w$  在像机坐标系中  $Z$  轴的坐标。如果  $O_w$  在图像平面上的投影为  $m_0 = [x_0, y_0]^T$ ,  $q'_i$  的图像坐标为

$m'_i = [x'_i, y'_i]^T$ , 则根据文献[17]可以得到弱透视投影模型下点  $m'_i$  与旋转矩阵  $\mathbf{R}$  间的关系

$$\begin{aligned} O_w \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{I} &= x'_i - x_0, \\ O_w \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{J} &= y'_i - y_0, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{I} = f\mathbf{r}_1/Z_0$ ,  $\mathbf{J} = f\mathbf{r}_2/Z_0$ ,  $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3]^T$ ,  $\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2$ .

### 3 基于虚拟控制点的姿态测量算法

#### 3.1 由弱透视投影模型求解初始旋转与平移

假设有  $n$  个异面控制点, 世界坐标系中的坐标已知, 图像坐标系中的坐标也已知。在世界坐标系中设定 4 个虚拟控制点  $\mathbf{c}_j, j = 1, 2, 3, 4$ , 它们的坐标依次为  $[0, 0, 0]^T, [1, 0, 0]^T, [0, 1, 0]^T, [0, 0, 1]^T$ 。世界坐标系中真实控制点与虚拟控制点间满足

$$\mathbf{p}_i = \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \mathbf{c}_j, \quad \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} = 1. \quad (6)$$

在像机坐标系中, 用  $\mathbf{c}_j^c = (X_j^c, Y_j^c, Z_j^c)^T$  表示虚拟控制点, 可知  $\mathbf{q}_i$  与  $\mathbf{c}_j^c$  间同样满足上面的关系式。于是, 将(6)式写成

$$[\mathbf{q}_1 \quad \mathbf{q}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{q}_n] = [\mathbf{c}_1^c \quad \mathbf{c}_2^c \quad \mathbf{c}_3^c \quad \mathbf{c}_4^c] \mathbf{A}, \quad (7)$$

$$\text{式中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} & \cdots & \alpha_{n1} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{n2} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{n3} \\ \alpha_{14} & \alpha_{24} & \cdots & \alpha_{n4} \end{bmatrix}.$$

令矩阵  $\mathbf{B} = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$ , 则(7)式可以转化为

$$[\mathbf{c}_1^c \quad \mathbf{c}_2^c \quad \mathbf{c}_3^c \quad \mathbf{c}_4^c] = [\mathbf{q}_1 \quad \mathbf{q}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{q}_n] \mathbf{B}, \quad (8)$$

$$\text{式中 } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{21} & \beta_{31} & \beta_{41} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \beta_{32} & \beta_{42} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{1n} & \beta_{2n} & \beta_{3n} & \beta_{4n} \end{bmatrix}, \text{ 也即对于 } \mathbf{c}_i^c, i = 1,$$

2, 3, 4, 有

$$\mathbf{c}_i^c = \sum_{k=1}^n \beta_{ik} \mathbf{q}_k, \quad \sum_{k=1}^n \beta_{ik} = 1, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (9)$$

根据(2)式可知, 虚拟控制点在图像坐标系下的坐标为  $\mathbf{m}_i^c = [x_i^c, y_i^c]^T$ , 满足

$$\begin{aligned} x_i^c &= f \frac{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} X_k}{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} Z_k} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} x_k Z_k}{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} Z_k}, \\ y_i^c &= f \frac{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} Y_k}{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} Z_k} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} y_k Z_k}{\sum_{k=1}^n \beta_{ik} Z_k}. \end{aligned} \quad (10)$$

在弱透视投影模型的假设下, 认为  $Z_k = Z_i^c, \forall k =$

$1, \dots, n$ 。因此, 将  $\mathbf{m}_i^c$  的坐标表达成

$$x_i^c = \sum_{k=1}^n \beta_{ik} x_k, \quad y_i^c = \sum_{k=1}^n \beta_{ik} y_k, \quad (11)$$

即虚拟控制点在图像平面上的投影, 可以用实际控制点投影的线性组合来表示。又因为  $Z_i^c = Z_i^c \sum_{k=1}^n \beta_{ik} = Z_i^c$ , 这说明按照(11)式求出的  $\mathbf{m}_i^c$  与  $\mathbf{c}_i^c$  的弱透视投影  $\mathbf{m}_i^c$  相重合。再考虑到,  $\mathbf{c}_1$  位于世界坐标系的原点  $O_w$ , 所以, 由(5)式可以得到

$$\begin{aligned} O_w \mathbf{c}_i \cdot \mathbf{I} &= \sum_{k=1}^n \beta_{ik} x_k - \sum_{k=1}^n \beta_{1k} x_k, \quad \forall i = 1, 2, 3, 4, \\ O_w \mathbf{c}_i \cdot \mathbf{J} &= \sum_{k=1}^n \beta_{ik} y_k - \sum_{k=1}^n \beta_{1k} y_k, \quad \forall i = 1, 2, 3, 4. \end{aligned} \quad (12)$$

这样通过 4 个虚拟控制点就可以得到一个由 8 个等式构成的方程组, 求解该方程组便可以得到向量  $\mathbf{I}, \mathbf{J}$ 。而像机在弱透视投影模型下的初始旋转  $\mathbf{R}_0$  与平移  $\mathbf{T}_0$  则可以通过  $\mathbf{I}, \mathbf{J}$  以及  $\mathbf{m}_1^c$  来得到, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_0 &= \left[ \frac{\mathbf{I}}{\|\mathbf{I}\|}, \frac{\mathbf{J}}{\|\mathbf{J}\|}, \frac{\mathbf{I}}{\|\mathbf{I}\|} \times \frac{\mathbf{J}}{\|\mathbf{J}\|} \right]^T, \\ \mathbf{T}_0 &= \frac{1}{s} \cdot [x_1^c, y_1^c, f]^T, \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $s = \frac{\|\mathbf{I}\| + \|\mathbf{J}\|}{2}$ 。

#### 3.2 通过迭代算法进一步求解旋转与平移

由(4)式可以得到

$$\begin{aligned} \omega_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \begin{bmatrix} X_j^c \\ Y_j^c \\ Z_j^c \end{bmatrix}, \\ \forall i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (14)$$

对  $i = 1, \dots, n$ , 将(14)式展开, 消去  $\omega_i$ , 就得

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^4 \frac{\alpha_{ij} f X_j^c}{d_x} + \alpha_{ij} (u_0 - u_i) Z_j^c = 0, \\ \sum_{j=1}^4 \frac{\alpha_{ij} f Y_j^c}{d_y} + \alpha_{ij} (v_0 - v_i) Z_j^c = 0, \end{cases} \quad (15)$$

(15)式可以表示为矩阵形式

$$\mathbf{M} \mathbf{x} = 0, \quad (16)$$

式中  $\mathbf{x} = [\mathbf{c}_1^{cT}, \mathbf{c}_2^{cT}, \mathbf{c}_3^{cT}, \mathbf{c}_4^{cT}]^T$ , 可见向量  $\mathbf{x}$  位于矩阵  $\mathbf{M}$  的零空间内, 可以表达成  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$  的零特征值所对应的特征向量的线性组合。根据文献[9]中的论述, 矩阵  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$  的零特征值的数量在 1 到 4 之间变动。因此, 假定  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4$  为矩阵  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$  的四个最小特征值对应的特征向量, 那么向量  $\mathbf{x}$  便可以表示为

$$\mathbf{x} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4] \mathbf{b}, \quad (17)$$

式中  $\mathbf{b} = [\gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \gamma_3 \quad \gamma_4]^T$ 。根据(17)式可以计算

出最小二乘意义下的  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ , 而用  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  重新组合  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4$ , 则又能得到一组新的虚拟控制点在像机坐标系下的坐标, 根据文献[18,19]中叙述的绝对定向算法, 通过与虚拟控制点世界坐标的对应, 就可以得到调整后的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ , 于是, 就够成了一个迭代求解过程:

- 1) 令  $\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_k = \mathbf{T}_0, k=0, e_1=0, e_2=0$ , 设置  $\epsilon_1$  以及  $\epsilon_2$ , 求解出  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4$ ;
- 2) 计算  $\mathbf{c}_i^c = \mathbf{R}_k \mathbf{c}_i + \mathbf{T}_k, i=1, 2, 3, 4$ , 构成向量  $\mathbf{x}$ ;
- 3) 根据(16)式计算  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  的最小二乘解,  $\mathbf{b} = (\mathbf{v}^T \mathbf{v})^{-1} \mathbf{v}^T \mathbf{x}, \mathbf{v} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4]$ ;
- 4) 更新  $\mathbf{c}_i^c, i=1, 2, 3, 4$  的坐标, 并根据  $\mathbf{c}_i^c$  与  $\mathbf{c}_i$  的对应, 求解绝对定向问题, 得到  $\mathbf{R}_{k+1}$  与  $\mathbf{T}_{k+1}$ ;
- 5) 计算  $e_1 = \sum_i \|\mathbf{R}_{k+1} \mathbf{c}_i + \mathbf{T}_{k+1} - \mathbf{c}_i^c\|^2$ , 如果  $e_1 < \epsilon_1$ , 或者  $|e_1 - e_2| < \epsilon_1$ , 则令迭代终止, 否则令

$e_2 = e_1$  并转到 6);

- 6) 如果  $k > \epsilon_2$ , 则令迭代终止, 否则令  $k = k + 1$ , 并转到 2)。

### 3.3 由 OI 算法进行精细调节

经实验证明, 在上述迭代过程中, 可以将  $\epsilon_1$  取较大值, 从而使迭代过程能够迅速向  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  的真实值逼近, 摆脱由弱透视投影模型假设引入的误差。图 2 是在  $\epsilon_1 = 10^{-3}$  时将控制点数量由 5 增加到 20 的情况下的误差曲线和耗时曲线, 具体参数设置参见第 4 节。

为了进一步提高测量精度, 采用了文献[9]中的策略, 即将经过迭代以后的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ , 作为 OI 算法的初值, 通过全部实际控制点的世界坐标系坐标与图像坐标系坐标的对应, 求解出  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  的最终测量结果。

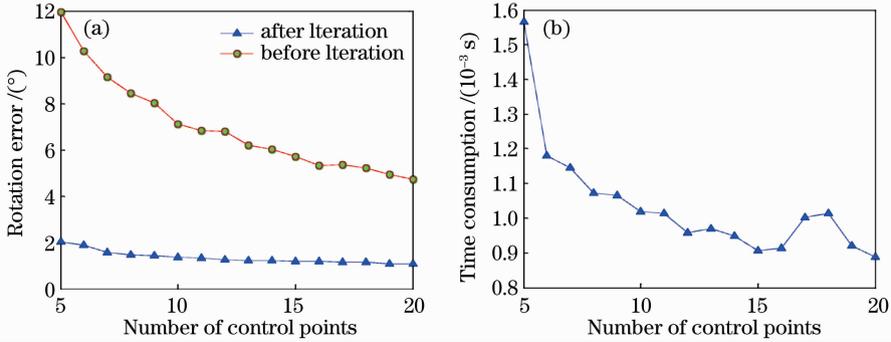


图 2 使用迭代算法后的(a)中值旋转误差曲线和(b)耗时曲线

Fig. 2 (a) Median rotation error and (b) time consumption of the iterative algorithm

## 4 实验结果及分析

### 4.1 数据仿真实验

通过计算机仿真来测试所提算法的性能, 设置图像尺寸为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ , 等效焦距  $f_x = f_y = 800$ , 主点  $[u_0, v_0]^T = [320, 240]^T$ 。所有控制点, 按照均匀分布, 产生于  $[-2, 2] \times [-2, 2] \times [4, 8]$  的立方体区域内, 沿 X、Y、Z 坐标轴的三个欧拉角也按照均匀分布产生于  $0^\circ \sim 45^\circ$  之间。算法求得的  $\mathbf{R}_{\text{est}}$  和  $\mathbf{T}_{\text{est}}$  与真实的  $\mathbf{R}_{\text{true}}$  和  $\mathbf{T}_{\text{true}}$  之间的误差可表示为

$$E_{\text{pos}} = \|\mathbf{p}_{\text{est}} - \mathbf{p}_{\text{true}}\| = \|\mathbf{R}_{\text{est}}^T \mathbf{T}_{\text{est}} - \mathbf{R}_{\text{true}}^T \mathbf{T}_{\text{true}}\|, \\ E_{\text{rot}} = 2\arccos q_0, \quad (18)$$

式中  $q_0 = 0.5\sqrt{1 + \mathbf{E}_{11} + \mathbf{E}_{22} + \mathbf{E}_{33}}$ ,  $\mathbf{E} = \mathbf{R}_{\text{est}} \mathbf{R}_{\text{true}}^T$ 。用来进行实验的算法包括 DLT+GN 算法<sup>[20]</sup>、POSIT 算法<sup>[17]</sup>、OI 算法<sup>[13]</sup>、EPnP+OI 算法<sup>[9]</sup>以及本文提出的算法, 标记为 CPEVC+OI 算法。

图 3 是控制点个数为 6, 图像噪声的均值为 0, 标准差由 0.5 pixel 逐渐增大到 15 pixel 时进行仿真的结果。针对图像噪声的每一级标准差, 将各个算法均运行 1000 次, 然后取旋转误差和位置误差的均值与中值。由图 3 可知, 各个算法按照误差中值的排序恰好反映了算法提出的先后顺序, 这也从一个侧面反映了仿真结果的合理性。注意到, 只有 EPnP+OI 算法在精度上与 CPEVC+OI 算法相类似, 这反映了 CPEVC+OI 算法的有效性。从均值曲线与中值曲线的差异上看, OI 算法的差异最大, 这说明在配置条件不理想时, OI 算法会给出极为错误的测量结果, 这在文献[21]中也有所提及。

图 4 所示为设置图像噪声标准差为 2 pixel 的情况下, 将控制点的数量由 5 逐渐增加至 20 时, 对每一级控制点数量进行了 1000 次实验以后得到的结果。由图 4 可知, 仅有 EPnP+OI 算法与 CPEVC+OI 算法的性能相似。

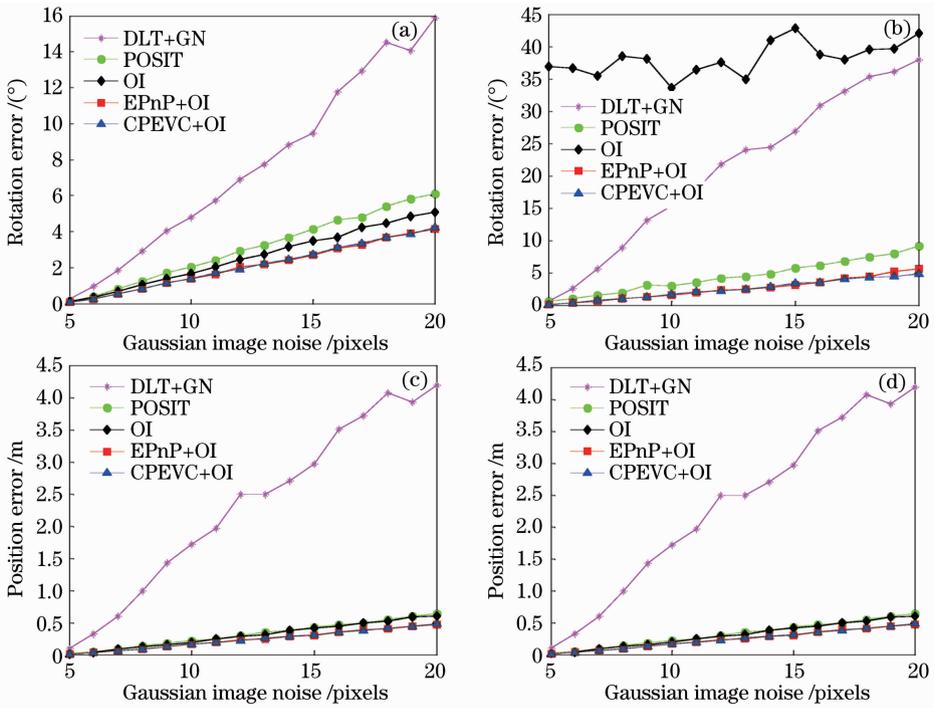


图 3 图像噪声变化时的误差曲线。(a)中值旋转误差曲线;(b)均值旋转误差曲线;(c)中值位置误差曲线;(d)均值位置误差曲线

Fig. 3 Error curves under different noise level. (a) Median rotation error; (b) mean rotation error; (c) median position error; (d) mean position error

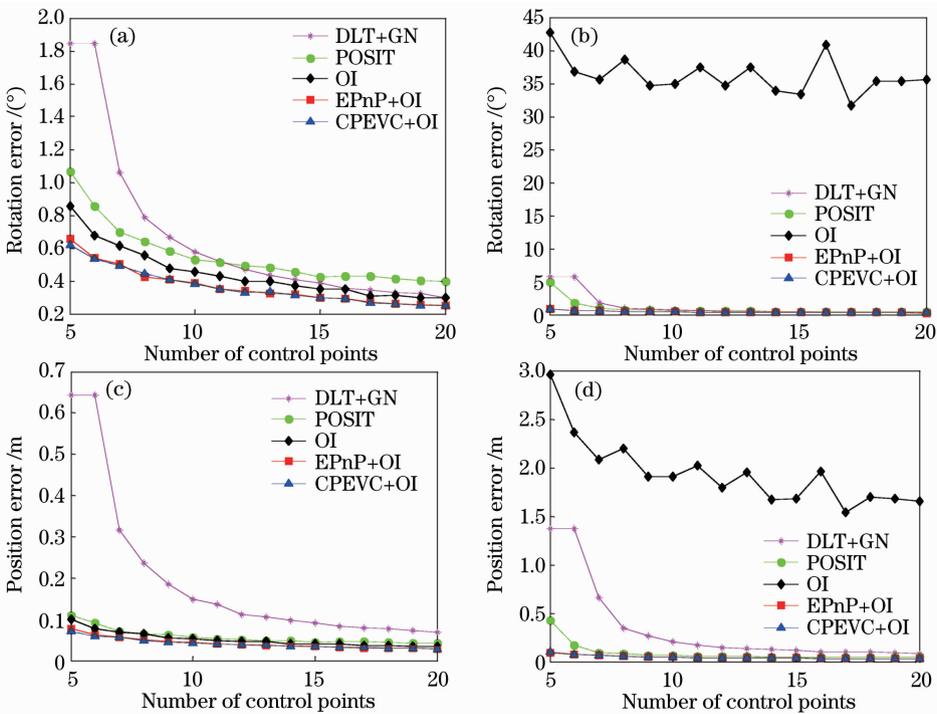


图 4 控制点数量变化时的误差曲线。(a)中值旋转误差曲线;(b)均值旋转误差曲线;(c)中值位置误差曲线;(d)均值位置误差曲线

Fig. 4 Error curves under different number of control points. (a) Median rotation error; (b) mean rotation error; (c) median position error; (d) mean position error

图 5 所示的实验条件与图 4 相同,但是将 25% 的控制点设定为了异常控制点,即这些控制点的图像坐标在图像平面上随机选取,以仿真实际中出现控制点误匹配的情况。由图 5 可知,CPEVC+OI 算法优于其他几种迭代算法,这说明 CPEVC+OI 算法在图像特征点提取或者匹配出现异常时仍然能够给出比较准确的测量结果。

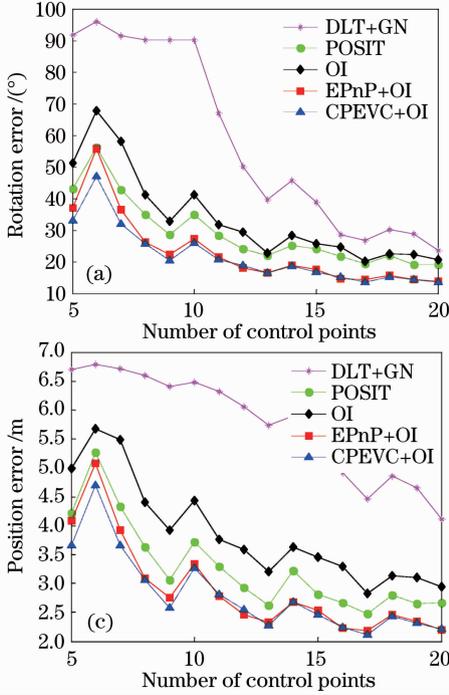


图 6 为控制点数量由 5 逐渐增加至 20,图像噪声均值为 0,标准差为 2 pixel 时,各个算法的耗时曲线。可见,CPEVC+OI 算法在耗时上与 POSIT 算法、EPnP+OI 算法相当,但在测量的精确程度上,CPEVC+OI 算法则优于这两种算法,因此,CPEVC+OI 算法在几种用来测试的迭代算法中,性能更为优异。

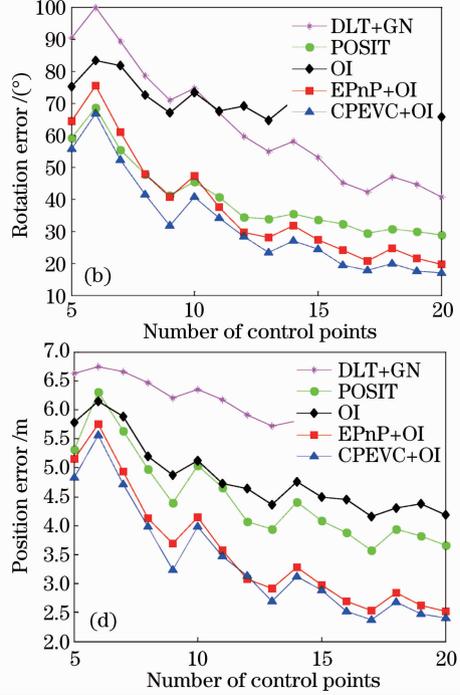


图 5 控制点存在异常时的误差曲线。(a) 中值旋转误差曲线;(b) 均值旋转误差曲线;(c) 中值位置误差曲线;(d) 均值位置误差曲线

Fig. 5 Error curves under outliers of control points. (a) Median rotation error; (b) mean rotation error; (c) median position error; (d) mean position error

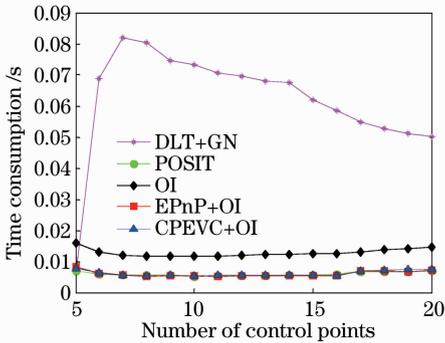


图 6 耗时曲线对比

Fig. 6 Time consumption comparison

### 4.2 真实实验

采用真实相机及测试工件对算法的有效性进行验证,实验使用的相机是由 Point Grey 公司生产的 Chameleon 相机,单位像素尺寸为  $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ ,图像分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ 。镜

头使用的是 Computar 公司生产的 M0814-MP 型镜头,焦距  $f=8 \text{ mm}$ 。对相机采用文献[22]所述的标定方法标定以后得到主点的位置为  $[725.923, 548.734]^T$ 。设控制点在世界坐标系中的分布如图 7(a)所示,单位为 mm。为了检验算法得出的旋转矩阵与平移向量是否准确,在世界坐标系中设置了一个虚拟立方体,它的端点分布也显示在图 7(a)中。实验时,得出旋转矩阵与平移向量以后,根据透视投影模型将虚拟立方体的各个顶点投影到图像平面上,并连接起来,从而在图像中形成了该虚拟立方体的投影。通过比较该投影与周围真实物体的匹配程度,便可以对算法得出结果的准确度做出评价。另外,由于特征点提取不是本文所涉及的内容,因此,图像中对控制点的提取是手工完成的。

由图 7 可知,无论工件仅仅发生旋转,还是同时发生旋转与平移,虚拟立方体的投影均能比较正确

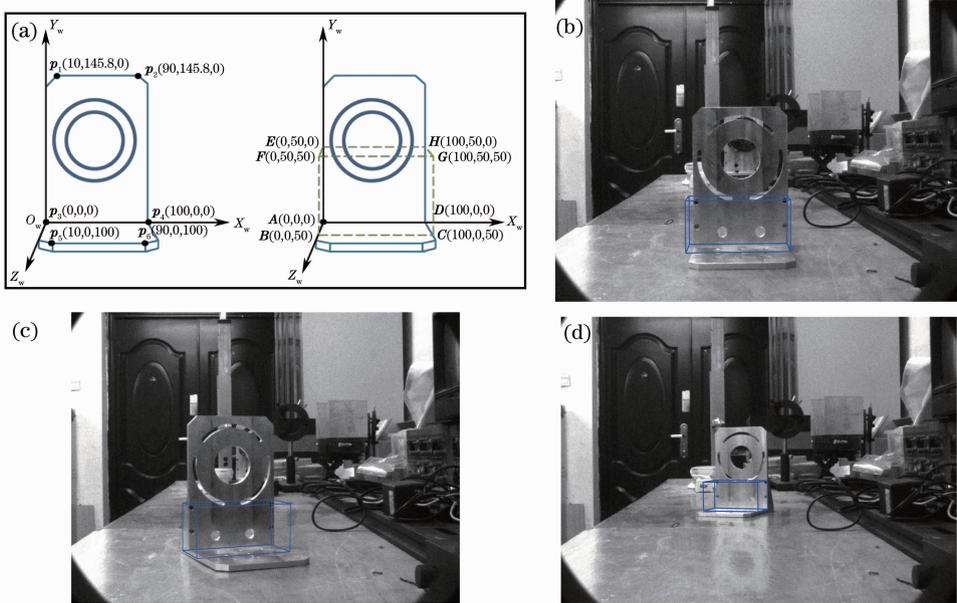


图7 真实实验的结果。(a)世界坐标系中控制点的坐标及虚拟立方体的设置;(b)~(d)为通过真实实验得到的结果

Fig. 7 Real experimental results. (a) World coordinates of control points and settings of the virtual box;

(b)~(d) are real experimental results

地反映出工件位置与角度的变化,由此可以证明,CPEVC+OI算法能够应用在实际环境当中,比较正确地求解出工件的相对旋转与平移。

## 5 结 论

提出了一种基于虚拟控制点的像机姿态求解算法,其核心思想是通过少量虚拟控制点的迭代求解,在短时间内使求得的像机旋转与平移迅速逼近真实值,从而为最后利用目前较为成熟的OI算法进行精细调节提供良好的初始化条件,在整体上提升算法的精确度与稳定性。通过计算机仿真实验,可知,本文中提出的算法在精确度和稳定性上均优于目前比较流行的几种迭代算法,而且在抗噪声干扰及抗控制点误匹配方面呈现出了优异的性能。真实实验的结果则进一步说明本算法能够比较准确地求解出像机的旋转与平移,可以应用在实际的测量环境当中。因此,所提的像机姿态测量算法是一种有效的求解像机姿态的算法。

## 参 考 文 献

- Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position pose measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312001  
晁志超, 伏思华, 姜广文等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312001
- He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao *et al.*. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1023001  
贺鹏举, 梁斌, 张涛等. 大视场星敏传感器标定技术研究[J].

光学学报, 2011, **31**(10): 1023001

- M. A. Fishler, R. C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, **24**(6): 381~395
- Z. Zhong, J. Yi, D. Zhao *et al.*. Effective pose estimation from point pairs [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**: 651~660
- M. L. Liu, K. H. Wong. Pose estimation using four corresponding points [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1999, **20**: 69~74
- L. Quan, Z. Lan. Linear N-point camera pose determination [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(7): 774~780
- A. Ansar, K. Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **24**(5): 578~589
- Xue Junpeng, Su Xianyu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0115001  
薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0115001
- V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, P. Fua. EPnP: an accurate O(n) solution to the PnP problem [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, **81**: 155~166
- Zhu Renzhang, Lin Yan, Zhang Lei. New algorithm of solving for ranges during final approach of spacecraft rendezvous [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **32**(7): 764~768  
朱仁章, 林彦, 张磊. 航天器交会计算机视觉系统测距求解新算法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, **32**(7): 764~768
- Zhu Renzhang, Lin Yan. Relative attitude estimation and control schemes for the final approach phase of spacecraft rendezvous [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, **33**(5): 544~548  
朱仁章, 林彦. 航天器交会最终逼近段相对姿态估计与控制 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, **33**(5): 544~548
- Dai Dongkai, Wang Xingshu, Hu Chunsheng *et al.*. Camera

- calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0312005  
 戴东凯, 王省书, 胡春生 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0312005
- 13 C. Lu, G. Hager, E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(6): 610~622
- 14 G. Schweighofer, A. Pinz. Globally optimal  $O(n)$  solution to the PnP problem for general camera models[C]. Proceedings of the 19th British Machine Vision Conference, 2008
- 15 H. Hmam, J. Kim. Optimal non-iterative pose estimation via convex relaxation[J]. *Image and Vision Computing*, 2010, **28**: 1515~1523
- 16 F. Kahl, D. Henrion. Globally optimal estimates for geometric reconstruction problems[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, **74**: 3~15
- 17 D. DeMenthon, L. Davis. Model-based object pose in 25 lines of code[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, **15**: 123~141
- 18 S. Umeyama. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(4): 376~380
- 19 Li Long, Deng Zongquan, Li Bing *et al.*. Fast and close-form optimal estimation of absolute orientation problem[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0115003  
 李 龙, 邓宗全, 李 兵 等. 绝对方位问题封闭形式最优估计的快速算法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0115003
- 20 R. Hartley, A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 87~127
- 21 G. Schweighofer, A. Pinz. Robust pose estimation from a planar target[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(12): 2024~2030
- 22 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334

栏目编辑:李文喆