

# 基于合作目标姿态测量的新型摄像机校准方法

王 艳 袁 峰

哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 针对在姿态测量中摄像机成像的复杂畸变问题,提出了一种新型的摄像机校准方法。该方法不需要高精度的标定参照物,只需要利用标定靶标间的相互约束关系建立摄像机内参数与靶标特征的约束方程,从而线性求解摄像机内参数。通过非线性优化方法优化摄像机内参数,完成摄像机的标定。仿真和实验结果表明,所提出的算法对图像噪声不敏感。测量精度和可靠性都得到有效的改善,精度可达 0.03 pixel,说明该算法在合作目标的姿态测量中具有方法易于实现、测量精度高、可靠的优点。

**关键词** 机器视觉; 摄像机标定; 正交隐消点; 合作目标

**中图分类号** TP391.4      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1115002

## Novel Camera Calibration Method Based on Cooperative Target Pose Measurement

Wang Yan Yuan Feng

*School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China*

**Abstract** In order to solve the distortion problem of camera imaging process in pose measurement, a novel camera calibration method is proposed. The method does not need high precision calibration reference, and only utilizes the mutual constraint relationship among the calibration targets to establish the constraint equation between camera intrinsic parameters and target characteristics, subsequently camera intrinsic parameters are solved linearly. Optimization of camera intrinsic parameters is made by nonlinear optimization method, thus, the camera calibration is accomplished. Simulation and experimental results show that the proposed algorithm is not sensitive to image noise. The measurement accuracy and reliability are effectively improved, and the precision can reach 0.03 pixel, which indicates that the algorithm has advantages of easy implementation, high measurement precision and reliable in the attitude measurement of the cooperative object.

**Key words** machine vision; camera calibration; orthogonal vanishing point; cooperative target

**OCIS codes** 150.0155; 150.1488; 150.6910

## 1 引 言

在空间目标姿态测量过程中,摄像机标定是最基本、最重要的工作之一,也是摄像测量和光测研究领域的热点之一<sup>[1]</sup>。基于合作目标的姿态测量是一种高精度的测量技术,合作目标的姿态测量特点是已知目标航天器的特征点安装位置信息,而在合作目标姿态测量中经常使用 CCD 作为非量测摄像机,其内部和外部参数并不稳定,在应用过程中存在着严重的非线性畸变,这种情况下,传统的小孔成像模型已经无法准确建立几何成像关系<sup>[2]</sup>。因此,研究一种新的成像模型及畸变补偿方法完成摄像机的标定过程,成为了空间目标姿态测量的重点<sup>[3]</sup>。

**收稿日期:** 2016-05-24; **收到修改稿日期:** 2016-07-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(61473100,51075095)

**作者简介:** 王 艳(1987—),女,博士研究生,主要从事光电检测、姿态测量、机器视觉方面的研究。

E-mail: yanzi2354715@126.com

**导师简介:** 袁 峰(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术方面的研究。

E-mail: yuanf@hit.edu.cn

传统的标定方法是通过测量外形结构已知的参照物,如控制线或控制点,并基于场景信息,利用数学变换公式及优化进行摄像机标定<sup>[4-5]</sup>。然而,该方法对于场景信息和摄像机运动等要求较高,摄像机的实际标定受到了极大的限制。1987年,Tsai等<sup>[6]</sup>提出经典两步法标定,该方法首先线性求解焦距和摄像机外参数,再进行求解像差系数,精度高并且易于实现。但是,该方法仅考虑镜头轴对称像差,模型略粗糙。1992年,Hartley等<sup>[7-9]</sup>提出了摄像机自标定的方法,通过引入用来描述多次成像之间约束关系的 Kruppa 方程,直接求解内参数。该方法通过非控制线和非控制点等未知结构的参照物,利用多次成像之间的相互约束关系进行摄像机标定,与场景信息和摄像机运动无关。由于需要求解 Kruppa 方程,其标定结果对噪声比较敏感。很多学者提出了分层逐步标定的思想<sup>[10-11]</sup>,首先对图像做投影重建,之后进行仿射和欧氏标定。分层逐步标定的方法以 Hartley 的 QR 分解法、Triggs 的绝对二次曲面法、Pollefeys 的模约束法等为代表。近年来,很多学者在摄像机模型、算法等方面不断提出改进和创新<sup>[12-13]</sup>,已经有很多灵活的摄像机新标定方法。吴福朝等<sup>[14]</sup>利用隐消点计算圆环点,结合交比不变特性,最终建立圆环点的约束方程。霍炬等<sup>[15-16]</sup>研究了基于正交隐消特性的摄像机自标定方法,建立基于摄像机原点与正交隐消点的约束方程。洪洋等<sup>[17-18]</sup>利用不同图像平面中隐消点间的无穷单应几何关系,提出一种摄像机内参数的自标定方法,但是却不涉及畸变参数的计算。

本文提出了基于合作目标姿态测量的新型摄像机校准方法。姿态测量中的合作目标结构、标识点和标识点间的位置均已知,通过拍摄同一合作目标在不同位置的图像,建立基于正交隐消点的摄像机内参数的线性标定模型。基于隐消点的几何约束关系构造目标函数,最后通过非线性优化目标函数,完成摄像机的内参数的标定。

## 2 模型分析

### 2.1 摄像机模型

机器视觉中应用最广泛的是针孔摄像机模型,如图 1 所示。对于世界坐标系中一物点  $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$  在相机坐标系下的坐标为  $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 。摄像机模型定义为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_4 & r_5 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  分别为从世界坐标系到摄像机坐标系下的旋转矩阵和平移向量。 $r_0 \sim r_7$  是关于旋转角  $(\alpha, \beta, \gamma)$  的三角函数。 $\mathbf{R}$  可变换成如下表示形式:

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

根据透射投影理论,三维空间的物点  $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$  在二维像平面的成像的无畸变物理坐标  $p(x, y)$ , 满足

$$x = \frac{f_x X_c}{Z_c}, \quad y = \frac{f_y Y_c}{Z_c}. \quad (3)$$

定义图像的像元坐标为  $(u, v)$ , 摄像机坐标系和图像像元坐标系的关系可表示为

$$u = \frac{f_x X_c}{Z_c} + c_x, \quad v = \frac{f_y Y_c}{Z_c} + c_y, \quad (4)$$

式中  $(f_x, f_y)$  是等效焦距,是摄像机焦距与像元的横纵向尺寸之比,  $(c_x, c_y)$  是摄像机的主点。不失一般性,认定模型平面与世界坐标系的  $x$ - $y$  平面一致,因此,模型平面方程  $Z_w = 0$ , 相机模型可以简化为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [r_1 \quad r_2 \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

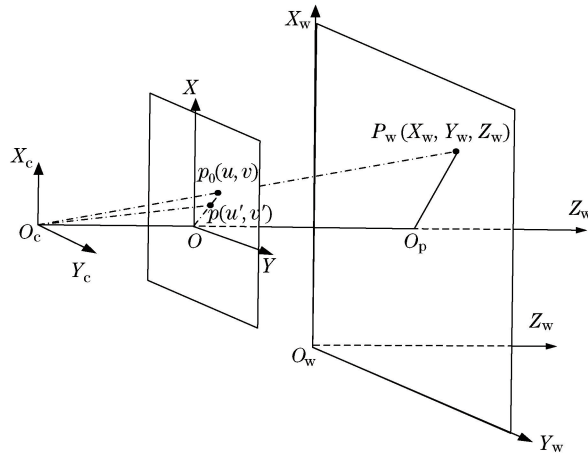


图 1 针孔成像模型

Fig. 1 Pinhole imaging model

式中  $s$  是尺度因子,  $\mathbf{K}$  是相机内部参数矩阵, 其表示为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ k_1 & k_2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $(u, v)$  是未考虑畸变的理想像元坐标。事实上, 镜头在制作工艺及设计等方面会存在畸变, 主要包括切向畸变和径向畸变。一般径向畸变主要用来描述镜头畸变。(4)式可转化为

$$\begin{cases} u' = \frac{f_x X_c}{Z_c} + c_x + \delta_x \\ v' = \frac{f_y Y_c}{Z_c} + c_y + \delta_y \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\begin{cases} \delta_x = u' - u = x_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) \\ \delta_y = v' - v = y_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) \end{cases}$ ,  $k_1$  和  $k_2$  是畸变系数,  $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ ,  $(x_d, y_d)$  是像点在水平和竖直方向偏离主点的距离和相应的等效焦距的比值。

## 2.2 正交隐消点的几何特性

直线上无穷远点的像称为该直线的隐消点。隐消点只与直线方向有关, 与其位置无关, 因此平行直线与无穷远平面交于同一无穷远点。假设  $\mathbf{D} = (\mathbf{d}^T, 0)^T$  是直线  $L$  的无穷远点, 则  $\mathbf{d}$  是该直线的方向, 摄像机的矩阵为  $\mathbf{P} = (\mathbf{H}_\infty, \mathbf{p}_1)$ ,  $\mathbf{H}_\infty$  是无穷远单应矩阵。可得, 直线  $L$  的隐消点  $\mathbf{v} = \mathbf{H}_\infty \mathbf{d}$ 。

由文献[19]可知, 如果已知两条直线  $L_1$  和  $L_2$  的夹角  $\theta$  及它们隐消点  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$ , 由欧氏几何可知两条直线间的夹角计算公式为

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{d}_1^T \mathbf{d}_2}{\sqrt{\mathbf{d}_1^T \mathbf{d}_1} \cdot \sqrt{\mathbf{d}_2^T \mathbf{d}_2}} = \frac{\mathbf{A}^T (\mathbf{H}_\infty^{-T} \mathbf{H}_\infty^{-1}) \mathbf{B}}{\sqrt{\mathbf{A}^T (\mathbf{H}_\infty^{-T} \mathbf{H}_\infty^{-1}) \mathbf{A}} \cdot \sqrt{\mathbf{B}^T (\mathbf{H}_\infty^{-T} \mathbf{H}_\infty^{-1}) \mathbf{B}}} = \frac{\mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega} \mathbf{B}}{\sqrt{\mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega} \mathbf{A}} \cdot \sqrt{\mathbf{B}^T \boldsymbol{\omega} \mathbf{B}}}, \quad (8)$$

式中  $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1}$  是绝对二次曲线的图像 (IAC), 是一个对称矩阵。(8)式构成了摄像机内参数的约束条件, 进而可用于摄像机内参数的标定。

## 3 标定算法

### 3.1 基于正交隐消点的线性标定模型

根据上述原理, 相互正交的空间直线的隐消点称为一对正交隐消点, 如图 2 所示, 其满足  $\mathbf{A}^T \boldsymbol{\omega} \mathbf{B} = 0$ 。若在成像过程中能够获得 5 组以上的正交隐消点, 就能得到 5 个以上关于 IAC 的线性约束方程。IAC 中含有 5 个独立的参数, 通过联立方程进行 Cholesky 分解, 从而得到摄像机的内参数矩阵, 完成摄像机的标定。

基于(6)式, 不考虑摄像机存在畸变的因素, 得到

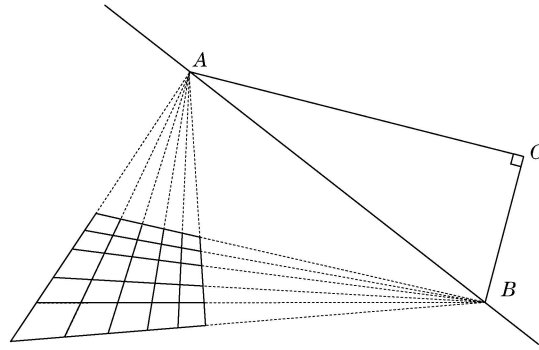


图 2 正交平行线投影几何模型

Fig. 2 Geometric model of orthogonal parallel line projection

$$\mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/f_x & -s/(f_x f_y) & -(c_x f_y - s c_y)/(f_x f_y) \\ 0 & 1/f_y & -c_y/f_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

假设  $A_i(u_{iA}, v_{iA}, 1)$  和  $B_i(u_{iB}, v_{iB}, 1)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 是摄像机拍摄的第  $i$  幅图像中的两个隐消点。联立 5 幅不同图像, 可得由 5 个方程组成的方程组, 是一个关于  $f_x, f_y, s, c_x, c_y$  的方程组。根据正交隐消点的性质, 在摄像机像平面上有  $OA_i \perp OB_i$ , 因此, 每一幅图像中有

$$\mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\omega} \mathbf{B}_i = 0, \quad (10)$$

式中  $\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{12} & \omega_{22} & \omega_{23} \\ \omega_{13} & \omega_{23} & \omega_{33} \end{bmatrix}$ , 6 个未知量 ( $\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}, \omega_{22}, \omega_{23}, \omega_{33}$ ), 是关于摄像机内参数的向量, 其中  $\omega_{12} =$

0, 故  $\boldsymbol{\omega}$  共有 5 个自由度, 将(10)式写成线性方程形式

$$u_{iA} u_{iB} \omega_{11} + (u_{iA} + u_{iB}) \omega_{13} + v_{iA} v_{iB} \omega_{22} + (v_{iA} + v_{iB}) \omega_{23} + \omega_{33} = 0. \quad (11)$$

获得  $n(n \geq 5)$  个不同方位的模板成像, 联立得到方程组

$$\begin{cases} u_{1A} u_{1B} \omega_{11} + (u_{1A} + u_{1B}) \omega_{13} + v_{1A} v_{1B} \omega_{22} + (v_{1A} + v_{1B}) \omega_{23} + \omega_{33} = 0 \\ u_{2A} u_{2B} \omega_{11} + (u_{2A} + u_{2B}) \omega_{13} + v_{2A} v_{2B} \omega_{22} + (v_{2A} + v_{2B}) \omega_{23} + \omega_{33} = 0 \\ \vdots \\ u_{nA} u_{nB} \omega_{11} + (u_{nA} + u_{nB}) \omega_{13} + v_{nA} v_{nB} \omega_{22} + (v_{nA} + v_{nB}) \omega_{23} + \omega_{33} = 0 \end{cases}. \quad (12)$$

采用最小二乘进行非线性方程组的求解得到  $\boldsymbol{\omega}$ 。再通过对其进行 Cholesky 分解, 求得摄像机内参数矩阵  $\mathbf{K}$ 。

### 3.2 镜头非线性畸变的校正模型

根据(7)式, 镜头的畸变模型可表示为

$$\begin{bmatrix} x_d r_d^2 & x_d r_d^4 \\ y_d r_d^2 & y_d r_d^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u' - u \\ v' - v \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中  $r_d$  可以直接由像平面得到, ( $u', v'$ ) 由 CCD 像平面直接读取的实际坐标值, ( $u, v$ ) 是由线性摄像机模型计算得到的无畸变理想坐标值。令  $\boldsymbol{\Gamma} = [k_1, k_2]^T$ , 系数矩阵为  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{d} = [u' - u, v' - v]^T$ 。(13)式可以表示为

$$\boldsymbol{\Gamma} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{d}. \quad (14)$$

可利用最小二乘法求解畸变系数  $k_1$  和  $k_2$ 。至此, 完成了摄像机内参数的全部标定。

### 3.3 摄像机特性的非线性优化

基于前面讨论的正交隐消点的知识, 对于任意畸变模型, 均应满足  $OA_i \perp OB_i$ , 针对这一特性, 建立基于最大似然准则方法的摄像机内参数的非线性优化函数, 应用 Levenberg-Marquardt 算法最小化目标函数, 实现对摄像机参数的优化。模型的目标函数为

$$F(f_x, f_y, c_x, c_y, s, k_1, k_2) = \sum_{i=1}^n \left\| \frac{\mathbf{OA}_i \cdot \mathbf{OB}_i}{\sqrt{\mathbf{OA}_i^2} \sqrt{\mathbf{OB}_i^2}} \right\|, \quad (15)$$

根据(15)式,建立最小化目标函数的最优化问题为

$$F(f_x^*, f_y^*, c_x^*, c_y^*, s^*, k_1^*, k_2^*) = \min F. \quad (16)$$

基于以上描述,算法步骤如下:

- 1) 由摄像机获得  $n(n \geq 5)$  幅图像。线性模型下,  $k_1$  和  $k_2$  的初值为 0, 由 3.1 节标定得到的  $f_x, f_y, s, c_x, c_y$  作为摄像机初值;
- 2) 根据摄像机获得的隐消点的实际坐标值, 建立目标函数  $F$ ;
- 3) 算法的精度评价。应用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法进行迭代, 进行寻优评价, 迭代 7 次即可达到最优, 计算量不会太大。

## 4 仿真和实验

### 4.1 仿真验证

仿真摄像机的焦距  $f_x = 1300, f_y = 1000$ , 主点  $(c_x, c_y)$  为  $(402, 340), s = 1$ 。摄像机的畸变系数为  $k_1 = 1 \times 10^{-4}$  和  $k_2 = 2.2 \times 10^{-6}$ 。模板选用用张正友标定中的 5 幅图像进行仿真实验, 如图 3 所示。为了验证本文算法的有效性及其精度, 在每个投影点均加入均值为 0, 方差为 0.2 到 5 的高斯噪声, 每个点独立测试 150 次。结果取相应噪声水平下的平均值, 得到在不同噪声水平下摄像机的校准结果。如表 1 所示。同时, 也得出在不同的噪声水平下摄像机 7 个参数的残差, 如图 4 所示。

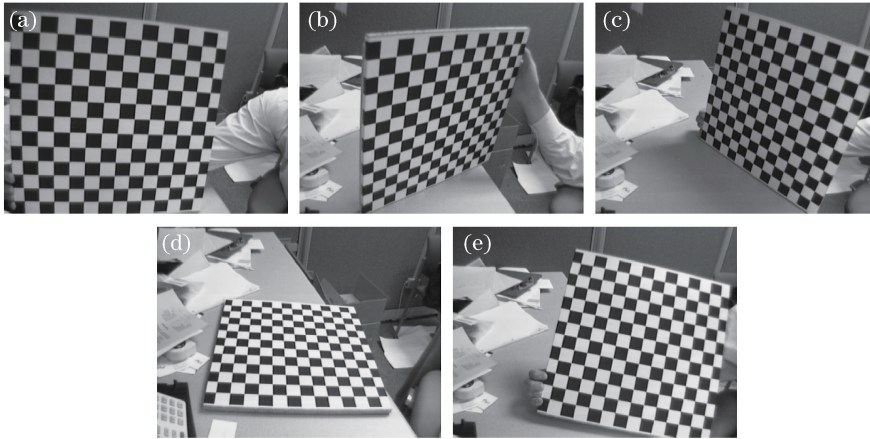


图 3 不同位置的仿真实验模板

Fig. 3 Simulation experimental templates of different positions

表 1 不同噪声水平下的摄像机校准结果

Table 1 Calibration results of camera at different noise levels

Variance	$f_x$	$f_y$	$s$	$c_x$	$c_y$	$k_1/10^{-4}$	$k_2/10^{-6}$
0.2	1300.105	1000.183	1.001	402.078	340.037	1.074	2.213
0.6	1300.306	1000.152	1.003	402.059	340.038	1.077	2.216
1.0	1303.214	1000.371	1.007	402.082	340.048	1.075	2.217
1.4	1305.313	1001.990	1.027	402.104	340.051	1.082	2.209
1.8	1298.756	1004.720	1.063	402.115	340.053	1.094	2.219
2.2	1307.604	1005.233	1.108	402.126	340.065	1.098	2.326
2.6	1307.998	1005.161	1.149	402.134	340.068	1.103	2.373
3.0	1311.821	1007.248	1.225	402.143	340.069	1.107	2.339
3.4	1316.183	1014.528	1.402	402.164	340.074	1.104	2.406
3.8	1314.967	1018.384	1.430	402.188	340.077	1.126	2.475
4.2	1317.243	1019.723	1.514	402.194	340.081	1.120	2.482
4.6	1318.198	1023.676	1.638	402.211	340.087	1.130	2.568
5.0	1319.967	1024.647	1.747	402.218	340.091	1.132	2.755

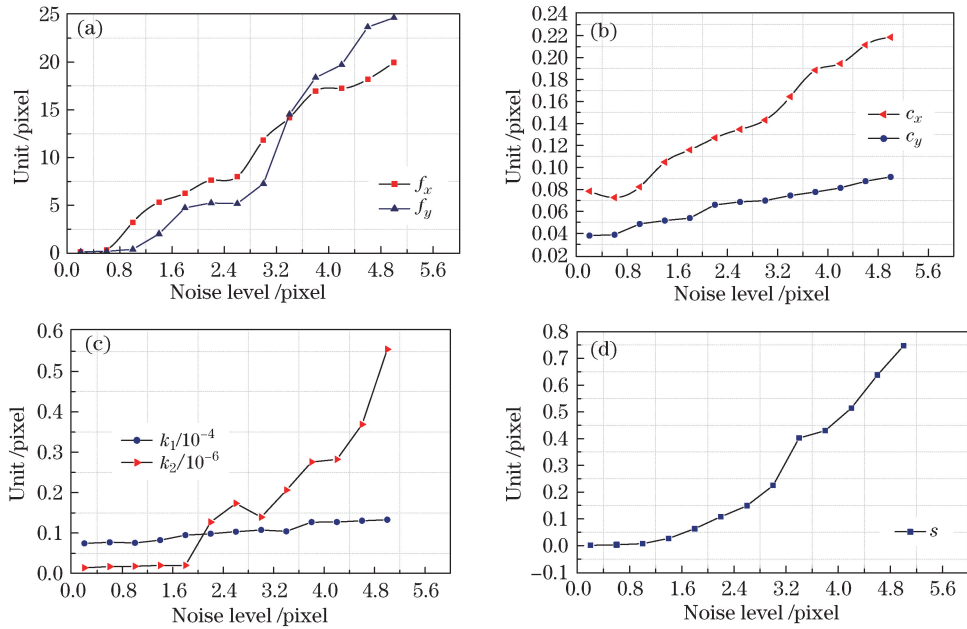


图 4 不同噪声水平下摄像机内部参数的校准结果。(a) 等效焦距  $f_x, f_y$ ; (b) 摄像机主点  $c_x, c_y$ ; (c) 畸变系数  $k_1, k_2$ ; (d) 尺度因子  $s$

Fig. 4 Calibration results of camera intrinsic parameters at different noise levels. (a) Equivalent focal length  $f_x, f_y$ ; (b) principle point of camera  $c_x, c_y$ ; (c) distortion coefficients  $k_1, k_2$ ; (d) scale factor  $s$

仿真结果显示,虽然噪声水平从 0.2 pixel 递增到 5.0 pixel,摄像机内部参数的残差仍然不是很明显。这说明,本文算法对图像噪声不敏感,摄像机参数的标定精度在较大噪声水平下仍能保持很高的精度。为了验证算法的精度,随机产生 1000 个实验点并添加径向畸变,分别计算重投影点  $x$  方向和  $y$  方向的标准差  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ ,表达式为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{p'_i} - x_{p_i})^2}{(N-1)}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{p'_i} - y_{p_i})^2}{(N-1)}}, \quad (17)$$

式中  $p'_i$  是第  $i$  个点的实际图像坐标,  $p_i$  是理想坐标,结果如图 5 所示。

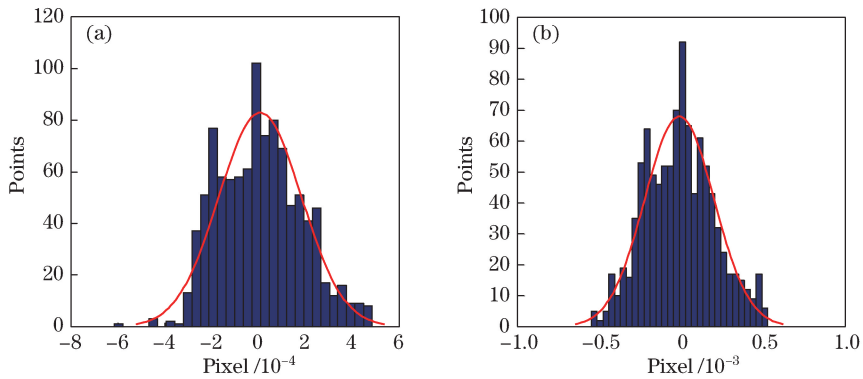


图 5 重投影误差分布。(a)  $x$  方向; (b)  $y$  方向

Fig. 5 Distribution of reprojection error. (a)  $x$  direction; (b)  $y$  direction

每一个点的标准差计算结果如图 5 所示,图 5(a)是关于  $x$  方向的重投影误差分布,标准差为 0.00031,图 5(b)是关于  $y$  方向的重投影误差分布,标准差为 0.00037。图 5 说明利用本文提出的径向畸变的摄像机模型进行重投影误差非常小,算法精度可靠。

#### 4.2 实际测量实验

摄像机选用大恒公司型号 MER-500-7UM-L 的 CCD,镜头焦距为 16 mm,分辨率为 2592 pixel ×

1944 pixel, 像元尺寸为  $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ 。采用横纵间隔分别为 42 mm 和 38 mm 的 LED 灯阵作为合作目标。固定 CCD 在光学平台上, 使用北京卓立汉光仪器有限公司生产的 SC300 转台(KSA211-200-S5N)输出的值作为标准量, 精度为  $0.005^\circ$ , 将 LED 阵列固定在三轴转台上, 精确旋转和平移校准平面。由 CCD 拍摄合作目标在不同方位下的图像。如图 6 所示, 拍摄 5 个不同位置的图像, 并选取由 4 个顶点标组成的矩形区域内 30 个点作为测试点, 进行本文算法的验证实验。摄像机标定结果如表 2 所示。表 3 给出了基于灯阵模板的的姿态测量结果(单位为  $^\circ$ ), 并用 Tsai 两步法和本文方法分别进行姿态角(俯仰角  $\alpha$ , 偏航角  $\beta$ , 横滚角  $\gamma$ )的恢复。

表 2 实际标定的摄像机内外参数

Table 2 Intrinsic and external parameters of actual calibration

	Intrinsic parameter	Extrinsic parameter	
Proposed method	$f_x = 1300.1194, f_y = 1000.3707$	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9574 & 0.0612 & 0.1450 \\ -0.1206 & 0.8061 & 0.6270 \\ -0.1325 & -0.5311 & 0.7924 \end{bmatrix}$	
	$c_x = 402.1207, c_y = 340.0550$		
	$k_1 = 0.9729 \times 10^{-4}, k_2 = 2.9887 \times 10^{-6}$		$\mathbf{T} = [-525.4223 \quad -97.4724 \quad 586.5086]^T$
	$s = 1.0039$		

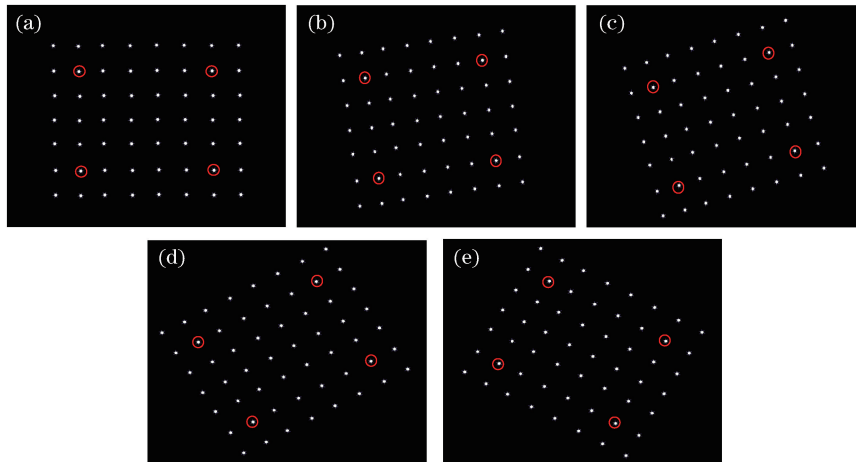


图 6 实际拍摄的合作目标图像

Fig. 6 Images of actual cooperative target

表 3 基于合作目标的姿态测量结果

Table 3 Attitude measurement results based on cooperative object

	True value			Tsai method			Proposed method		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Position 1	12	0	5	12.071	-0.010	4.962	12.033	0.009	4.971
Position 2	-7	-1	9	-7.013	-1.009	-8.946	-7.004	-1.009	-8.966
Position 3	4	-8	1	3.994	-7.925	0.995	3.998	-8.035	1.003
Position 4	0	10	0	-0.009	10.024	0.007	0.006	10.008	-0.005
Position 5	14	-5	0	13.914	-4.878	-0.005	13.962	-4.954	-0.005

为了更好地验证本文算法的有效性, 对于实际标定模板选取的 30 个标定点点作为测试点进行重投影质心定位, 选取在第一位置的标定板( $Z_w = 0$ )的图像, 30 个测试点的质心定位误差如图 7 所示。

实验结果表明, 利用本文方法对未知坐标 30 点进行标定, 标定质心的定位误差在 0.03 pixel 以内。依然选取在第一位置的合作目标, 对所拍摄图像的 56 个点顺序标号(由左至右), 由标定过参数的摄像机, 对合作目标上 56 个 LED 灯阵列进行姿态重构。计算姿态角( $\alpha, \beta, \gamma$ )与三轴转台实际值的误差, 并与 Tsai 经典两步法进行比较, 结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 通过计算姿态角的重构值和真实值的误差, 可知合作目标的姿态角最大误差在  $0.11^\circ$  以内。相比于偏航角和俯仰角, 两种方法计算的滚动角的误差都相对比较小, 主要是特征点的坐标提取误差导致的

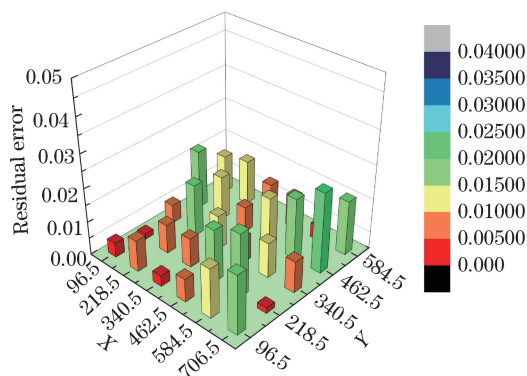


图 7 质心定位误差

Fig. 7 Error of centroid location

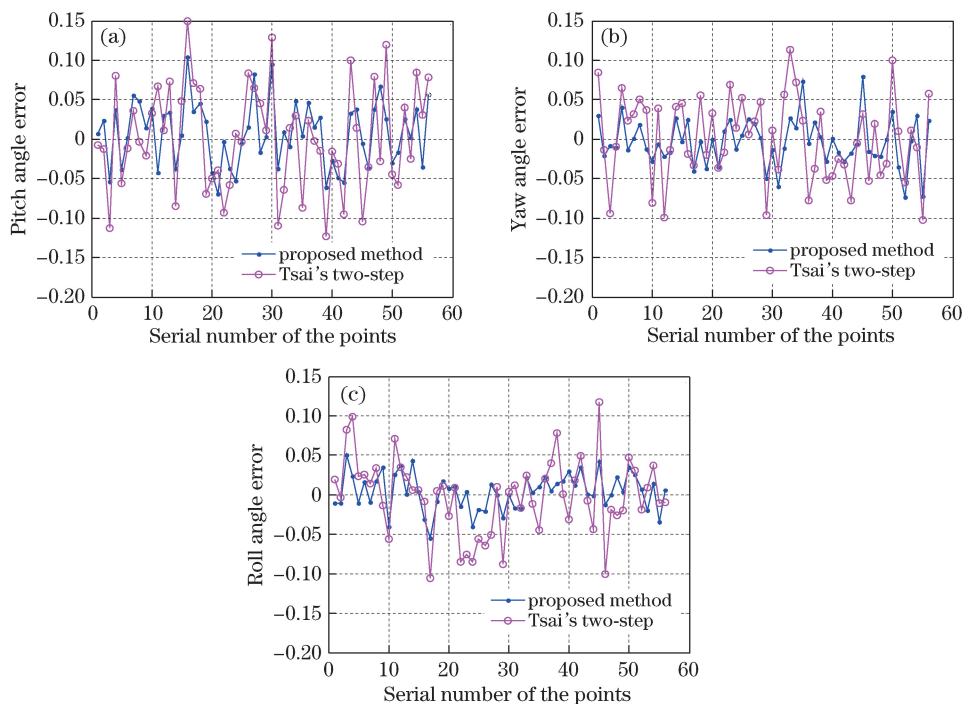


图 8 姿态角误差。(a) 俯仰角；(b) 偏航角；(c) 横滚角

Fig. 8 Error of attitude angle. (a) Pitch angle; (b) yaw angle; (c) roll angle

结果。由于本文方法需要对建立的目标函数进行算法的非线性寻优,迭代次数为 7~14 次,较文献[12]的 5 次迭代解算,时间效率略低,但本文算法的重构精度较高,符合于大空间合作目标的姿态测量对精度的要求,摄像机距离目标约 4.2 m,实际三个姿态角的重构最大标准差为  $0.036^\circ$ ,与传统的 Tsai 等方法相比,标定精度大大提高。

## 5 结 论

提出了一种新型摄像机标定方法。该方法不需要复杂的标定模板,仅通过构建单幅图像的正交隐消点的几何约束关系,建立多幅图像间的函数映射,再通过非线性优化算法对镜头畸变参数进行校正。该模型比较有效地避免了图形在成像过程中的退化现象,也保证了标定的精度。仿真和实验结果表明,标定误差随图像噪声水平变化不大,优化后,本文方法具有较高的标定精度,质心定位可达到 0.03 pixel 水平,并且标定后摄像机参数对于噪声不敏感,说明本文方法具备相当的精度和可靠性。实际测量中,三个姿态角的重构最大标准差为  $0.036^\circ$ ,在测量精度上较传统的方法有了进一步的提高。该摄像机标定方法对航天器交会对接、姿态测量有很好的应用价值。



## 参 考 文 献

- 1 Li J, Zhang D. Camera calibration with a near-parallel imaging system based on geometric moments [J]. Optical Engineering, 2011, 50(2): 023601.
- 2 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009, 22-51.  
于起峰, 尚 洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 22-51.
- 3 Li Jing, Yuan Feng, Ding Zhenliang. Linear CCD camera calibration of exterior attitude measurement system based on BP neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(5): 1138-1141.  
李 晶, 袁 峰, 丁振良. 基于 BP 神经网络的外姿态测量系统线阵 CCD 标定[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1138-1141.
- 4 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.
- 5 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 6 Tsai R Y. Versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- 7 Hartley R I. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras[C]. Proceedings of the Second Conference on Computer Vision, 1992, 588: 579-587.
- 8 Faugeras O, Quan L, Sturm P. Self-calibration of a 1D projective camera and its application to the self-calibration of a 2D projective camera[C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 22(10): 36-52.
- 9 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.
- 10 Shang Yang. Researches on vision-based pose measurement for space target [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.  
尚 洋. 基于视觉的空间目标位置姿态测量方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- 11 Heikkila J, Silven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997: 1106-1112.
- 12 Pan H, Huang J Y, Qin S Y. High accurate estimation of relative pose of cooperative space targets based on measurement of monocular vision imaging[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(13): 3127-3133.
- 13 Luo H G, Zhu L M, Ding H. Camera calibration with coplanar calibration board near parallel to the imaging plane[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2006, 132(2): 480-486.
- 14 Wu Fuchao, Wang Guanghui, Hu Zhanyi. A linear approach for determining intrinsic parameters and camera 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.
- 15 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 465-472.  
霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 465-472.
- 16 Lu Jin, Sun Huibin, Chang Zhiyong. A novel method for camera calibration with orthogonalvanishing points[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0208001.  
卢 津, 孙惠斌, 常智勇. 新型正交消隐点的摄像机标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0208001.
- 17 Hong Yang, Sun Xiuxia, Cai Ming, *et al.* An intrinsic parameters self-calibration technique based on infinite homography between orthogonal vanishing points[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1208001.  
洪 洋, 孙秀霞, 蔡 鸣, 等. 基于正交消隐点无穷单应的摄像机内参数自标定方法[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1208001.
- 18 Cai Ming, Sun Xiuxia, Liu Shuguang, *et al.* An accurate and real-time focal-length self-calibration method based on infinite homography between vanish points[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 30(5): 0515003.  
蔡 鸣, 孙秀霞, 刘树光, 等. 基于消隐点无穷单应的摄像机焦距精确自标定方法[J]. 光学学报, 2014, 30(5): 0515003.
- 19 Wu Fuchao. Mathematical methods in computer vision[M]. Beijing: Science Press, 2008.  
吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.