

基于无穷单应的大视场摄像机标定方法

苑 云 朱肇昆 张小虎 尚 洋 于起峰

(国防科学技术大学航天与材料工程学院图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要 在大视场摄像机标定中,常常会出现由于场景过于单一而很难达到自标定所需要的场景约束和运动约束条件、立体标定所需要的强立体条件或者平面靶板标定所需要的绝对共面条件,如指向高空区域的摄像机标定任务就很难满足上述要求,因而大视场摄像机标定需要较为弹性的标定算法。提出一种基于无穷单应的大视场摄像机标定方法,该方法最少只需要 4 个非共线控制点和摄像机粗略的位置即可求解无穷单应,并且提出一种坐标变换方法以保证线性求解和优化无穷单应时的稳定性。从无穷单应中分解得到摄像机参数初始值,通过 Levenberg-Marquardt(LM)优化算法最终实现摄像机的标定。在优化过程中,通过假设图像中心为主点和采用一阶径向畸变模型,相对增加了优化过程中的剩余自由度,能够实现 4 个像点为观测值的参数优化。相比于强立体或共面的条件,此方法所需条件很容易满足。仿真和实际实验验证了此方法的正确性和高精度,以及重复测量实验的灵活易实施。

关键词 测量;摄像机标定;无穷单应;大视场;摄像测量

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0715002

Calibration Method for Large Field of View Camera Based on Infinite Homography

Yuan Yun Zhu Zhaokun Zhang Xiaohu Shang Yang Yu Qifeng

(Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract During the calibration for a large field of view camera, it usually appears such a situation that the scene is too simplex to satisfy the condition of scene and motion constraints for self-calibration method, the strong three-dimensional condition for three-dimensional calibration and the condition of absolute coplane for flat target plate calibration. It is difficult to fulfill the mentioned conditions while calibrating a camera pointing to the upper-air area. So it calls for a more flexible algorithm when a large field of view camera is calibrated. A calibration method for large field of view camera based on infinite homography is pointed out which just needs approximate position of the camera and at least four noncollinear control points to solve the infinite homography. A coordinate transformation method is also proposed to ensure the stability during the linear solution and optimization process of the infinite homography. The initial camera parameters for Levenberg-Marquardt (LM) optimization algorithm are obtained by decomposing the infinite homography. During the optimization process, the hypothesis that image center is the principal point and the adoption of the first-order radial distortion model will lead to the augment of the redundant freedom, so that the parameters optimization can be realized by using just four image points. The condition needed by the proposed method is facile to satisfy compared with strong three-dimension or absolute coplane. The simulation and actual experiments not only prove the correctness and high precision of this method, but also testify that repeated measurement experiments can be easily and flexibly implemented by this method.

Key words measurement; camera calibration; infinite homography; large field of view; videometrics

OCIS codes 150.0155; 150.6910; 120.6650

收稿日期: 2012-01-13; 收到修改稿日期: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11072263)资助课题。

作者简介: 苑 云(1986—),男,博士研究生,主要从事大型结构形变测量、大尺度运动目标参数测量和计算机视觉等方面的研究。E-mail: yuanyun_0101@163.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事空间图像测量和视觉导航等方面的研究。E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

1 引 言

摄像机标定一直是计算机视觉界研究的问题之一,可分为传统的标定方法^[1]、基于主动视觉的方法^[2~4]和自标定方法^[5,6],有时也将主动视觉的方法归为自标定方法。后两者利用多视图之间或者摄像机做已知类型运动时产生的几何约束,在场景结构信息未知的情形下实现摄像机的标定。由于多视图几何的千变万化,近二十年来各种自标定方法大量涌现^[6]。对于大视场摄像机的标定^[7,8],尤其是指向高空区域的摄像机的标定,由于场景提供的信息很少并且很难在大视场范围内用同一摄像机在多个位置采集多幅图像,难以建立场景约束和运动约束,因此自标定方法难以适用。

传统的标定方法因具有稳定和高精度的特点,在机器视觉和摄像测量中仍是标定方法中必不可少的组成部分。传统的标定方法需要已知场景的结构,比如空间点或其他几何结构的表达,利用空间已知结构与图像解算成像过程中的投影矩阵。根据标定物的空间维数,可分为立体^[9]、平面^[10]和一维标定物^[11]三种。三维标定物因其制作要求苛刻,一般只用于室内的高精度标定。平面标定物要求控制点共面,且一般需要采集多幅图像以使平面标定物充满整个视场。一维标定物可标定出摄像机的内参数,但是确定空间的坐标系至少需要非共线的3个点,在绝对定向时仍需要高于一维的标定物。

在有些大视场摄像机的测量任务中,待测量区域很大并且待测物体又相对较小,场景能提供的信息很少,很难满足上述标定方法所要求的条件。常常会出现这样的情形:根据场景实地状况设置了尽可能多的控制点,但是又很难严格的将其作为立体标定物或平面标定物来使用。因此需要比较灵活的标定方法,即采用尽量少且没有特殊要求的控制点高精度方便的标定出摄像机。两步法标定^[9]至少需要6个立体控制点,在利用更少的控制点标定中,在基于4个非共线控制点的位姿估计问题(PNP)已基本解决^[12~14]基础上,Abidi等^[15]研究了利用4个共面控制点标定摄像机的方法,Triggs等^[16]给出了利用一般配置4个控制点的标定方法。最近,Bujnak等^[17,18]又利用Gröbner基给出了更加有效的解法,将标定转换为关于控制点沿光

轴方向分量和等效焦距的多项式问题,分别针对共面与异面给出了不同的算法,由于没有给出标定的精度,且非线性方程的求解过程比较复杂、存在多解,需要识别出正确的解,所以此法也存在一定缺陷。

本文提出了一种基于无穷单应的大视场摄像机标定方法,该方法最少只需要4个非共线控制点(尤其针对近似共面控制点,不需要区分共面点还是异面点)和摄像机粗略的位置即可线性求解无穷单应,并且采用提出的坐标变换方法可以保证无穷单应线性求解和优化过程中的稳定性。以从无穷单应中分解得到摄像机参数初始值,通过Levenberg-Marquardt(LM)优化算法最终实现摄像机的标定。

2 理论基础

2.1 摄像机投影模型

摄像机的中心投影模型可表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{x} = [x \ y \ 1]^T$ 为像点的齐次坐标, \mathbf{X} 为物点在世界坐标系 W 中的齐次坐标,非无穷远点为 $[X \ Y \ Z \ 1]^T$,无穷远点为 $[X \ Y \ Z \ 0]^T$, \mathbf{P} 为投影矩阵并且可分解为

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \ | \ \mathbf{T}], \quad (2)$$

式中 \mathbf{K} 为内参数矩阵, \mathbf{R} 和 $\mathbf{T} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 分别为旋转矩阵和平移向量(即世界坐标系原点在摄像机系中三维坐标),合称外参数矩阵。

内参数矩阵表示为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ & f_y & c_y \\ & & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 f_x 和 f_y 为行和列方向等效焦距, (c_x, c_y) 表示主点(单位为pixel), s 为扭曲因子。现在多数摄像机的 s 理想值为零,因此内参数矩阵常简化为4参数形式。在此基础上,当行列方向等效焦距相等时简化为3参数形式,当主点假设为图像中心时^[19](此种假设几乎不损失测量精度)为2参数或1参数形式。

交会测量中使用投影矩阵,而不单独使用各参数。因此采用假设图像中心为主点的简化模型,内参数矩阵中只有等效焦距为未知数。用3个欧拉角表示的外参数旋转矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (4)$$

因为角向量 $\mathbf{A}' = [\alpha + \pi \quad -\beta + \pi \quad \gamma + \pi]^T$ 与 $\mathbf{A} = [\alpha \quad \beta \quad \gamma]^T$ 对应相同的旋转矩阵,因此将角度范围限定为 $\beta \in [-\pi/2 \quad \pi/2], \alpha, \gamma \in [-\pi/2 \quad 3\pi/2)$ 。这时一般的旋转矩阵都能与一个角向量值唯一对应。

摄像机的畸变模型^[1]根据摄像机镜头的类型采用不同的形式,长焦小视场角的镜头可不考虑其畸变,而短焦镜头只采用一阶径向畸变。

2.2 无穷单应

在射影几何^[6]中,空间共面点与其像点之间由单应一一对应,当空间平面为无穷远平面 π_∞ 时,对应的单应称为无穷单应 \mathbf{H}_∞ 。

如图 1 所示, π_∞ 上的点在空间中表示为 $\mathbf{X}_\infty = [X_\infty \quad Y_\infty \quad Z_\infty \quad 0]^T$, 在平面上表示为 $\mathbf{x}_\infty = [X_\infty \quad Y_\infty \quad Z_\infty]^T$, 空间直线与 π_∞ 的交点即是直线的方向。 \mathbf{x}_∞ 与其对应的像点之间的成像关系为

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}_\infty \mathbf{x}_\infty. \quad (5)$$

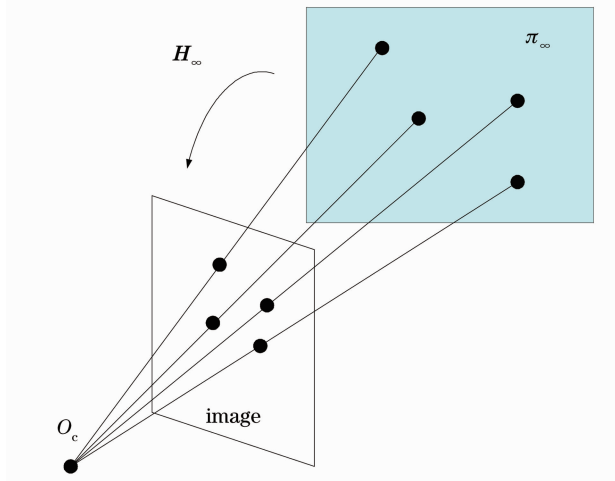


图 1 无穷单应示意图

Fig. 1 Sketch for infinite homography

将 \mathbf{X}_∞ 代入(1)式中,得

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}_\infty = [\mathbf{P}_1 \quad \mathbf{P}_2 \quad \mathbf{P}_3] \mathbf{x}_\infty, \quad (6)$$

式中 \mathbf{P}_i 表示 \mathbf{P} 的第 i 列。

对比(5)式和(6)式可知

$$\mathbf{H}_\infty = [\mathbf{P}_1 \quad \mathbf{P}_2 \quad \mathbf{P}_3] = \mathbf{K}\mathbf{R}, \quad (7)$$

说明 \mathbf{H}_∞ 为投影矩阵的前三列,只与摄像机的内参数和旋转矩阵有关,而与平移向量无关。

3 基于无穷单应的大视场摄像机标定

3.1 求解无穷单应

对于非无穷远平面上的点 $\mathbf{X} = [X \quad Y \quad Z \quad 1]^T$, 由(1)式和(2)式得

$$\mathbf{x} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \mid \mathbf{T}]\mathbf{X} = \mathbf{K}\mathbf{R}[\mathbf{I} \mid \mathbf{R}^T\mathbf{T}]\mathbf{X} = \mathbf{K}\mathbf{R}[\tilde{\mathbf{X}} - (-\mathbf{R}^T\mathbf{T})], \quad (8)$$

式中 $\tilde{\mathbf{X}} = [X \quad Y \quad Z]^T$ 为空间点的非齐次坐标, $\mathbf{O}_c = -\mathbf{R}^T\mathbf{T}$ 为摄像机光心在世界坐标系 W 中的位置。记

$$\tilde{\mathbf{X}}' = \tilde{\mathbf{X}} - (-\mathbf{R}^T\mathbf{T}) = \tilde{\mathbf{X}} - \mathbf{O}_c. \quad (9)$$

为将世界坐标系平移到以光心为原点的辅助坐标系 W' 中的非齐次坐标,如图 2 所示。

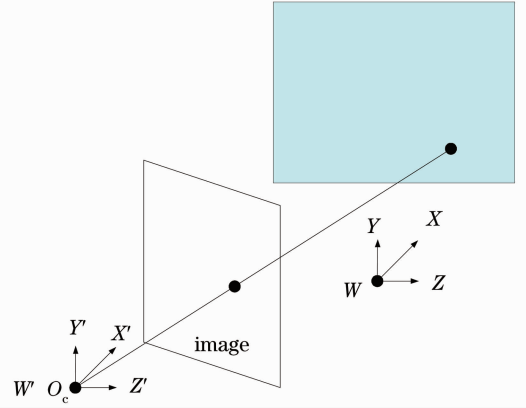


图 2 世界辅助坐标系

Fig. 2 Auxiliary world frame of axes

结合(7)式、(8)式、(9)式得

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}_\infty \tilde{\mathbf{X}}'. \quad (10)$$

$\tilde{\mathbf{X}}'$ 可看作世界坐标系中光心到物点连线的方向向量,也可看作此连线与 π_∞ 的交点。

在控制点及其像点坐标已知的条件下,当光心位置已知时,(10)式中只有 \mathbf{H}_∞ 元素未知。通过对(10)式进行直接线性变换(DLT),最少只需 4 个非共线点即可线性求解 \mathbf{H}_∞ ^[6]。线性求解完成 \mathbf{H}_∞ 后,需要优化 \mathbf{H}_∞ ,采用可同时优化像点和 \mathbf{H}_∞ 的超参数化的黄金标准算法,并使用 LM 分块机制^[6]。

在优化单应的黄金标准算法中,待优化的参数为两幅图所有对应的像点的非齐次坐标 $\mathbf{x} = [x \quad y]^T$ 、 $\mathbf{x}' = [x' \quad y']^T$ 以及单应的 9 个参数。一般的图像处理中,像点在两幅图上都可见,并非无穷远点,像点的行列方向坐标值都不会很大。而此处优化单应时,一幅图是真实的待标定图像上提取的像点,另一幅图是由辅助世界坐标系中的空间点虚拟成的“图像”,其“像点”的坐标齐次形式为 $\tilde{\mathbf{X}}' = [X' \quad Y' \quad Z']^T$ 。按照优化单应的黄金标准算法要求,像点必须表示成非齐次形式 $[X'/Z' \quad Y'/Z' \quad 1]^T$,而如果坐标分量 Z' 的绝对值较小,非齐次化时就会带来较大的数值误差,甚至当 $Z' = 0$ 时无法进行“像点”的非齐次化。显然,图 2 中像点的选取与世界坐标系 W 的定义有关。

因此在优化 \mathbf{H}_∞ 之前,必须进行坐标变换,以使得 Z' 绝对值较大或最大。其方法为取任意一个旋

转变换,将 Z' 轴变换到光心指向所有物点形心的方向。例如,记所有物点形心在辅助坐标系 W' 中的非齐次坐标为 $\mathbf{x}_s = [x'_s \ y'_s \ z'_s]^T$, 令 $\mathbf{a} = [0 \ 0 \ 1]^T$, $\mathbf{b} = \mathbf{x}_s / \|\mathbf{x}_s\|$, 则旋转矩阵可取为

$$\mathbf{R}_{w'} = \mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta), \quad (11)$$

式中 $\mathbf{n} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$, θ 为 \mathbf{a} 与 \mathbf{b} 之间的夹角, $\mathbf{R}(\mathbf{n}, \theta)$ 为由旋转轴和旋转角表示的旋转矩阵。

记优化后得到的无穷单应应为 \mathbf{H}'_∞ , 需要进行坐标系反变换得到实际的 \mathbf{H}_∞ ,

$$\mathbf{H}_\infty = \mathbf{H}'_\infty \mathbf{R}_{w'}. \quad (12)$$

3.2 计算摄像机参数初值

对 \mathbf{H}_∞ 使用瑞利高分解算法可得到 \mathbf{K} 和 \mathbf{R} 。由 \mathbf{R} 的正交矩阵性质和 \mathbf{K} 的表达形式, 从(7)式可得

$$\det \mathbf{H}_\infty > 0, \quad \|\mathbf{H}_\infty^{3T}\| = 1, \quad (13)$$

式中 \mathbf{H}_∞^{3T} 表示 \mathbf{H}_∞ 的第三行。因此在分解之前先按(13)式对 \mathbf{H}_∞ 规范化。

假设图像中心为主点, \mathbf{K} 中只有等效焦距为未知数, 采用如下的分解方法, 令

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_c \mathbf{K}_f, \quad (14)$$

$$\text{式中 } \mathbf{K}_c = \begin{bmatrix} 1 & c_x \\ & 1 & c_y \\ & & 1 \end{bmatrix} \text{ 及 } \mathbf{K}_f = \begin{bmatrix} f_x & & \\ & f_y & \\ & & 1 \end{bmatrix}.$$

将(14)式代入(7)式, 并根据 \mathbf{R} 的正交性得

$$\mathbf{H}_\infty \mathbf{H}_\infty^T = \mathbf{K}_c \mathbf{K}_f \mathbf{R} (\mathbf{K}_c \mathbf{K}_f \mathbf{R})^T = \mathbf{K}_c \mathbf{K}_f \mathbf{K}_f^T \mathbf{K}_c^T,$$

整理后得

$$\mathbf{K}_f \mathbf{K}_f^T = \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{H}_\infty \mathbf{H}_\infty^T \mathbf{K}_c^{-T}. \quad (15)$$

记 $\mathbf{G} = \mathbf{K}_f \mathbf{K}_f^T$, 考虑齐次因子, 则

$$f_x = \sqrt{G_{11}/G_{33}}, \quad f_y = \sqrt{G_{22}/G_{33}}. \quad (16)$$

由(7)式和(14)式得

$$\mathbf{R} = \mathbf{K}_f^{-1} \mathbf{K}_c^{-1} \mathbf{H}_\infty. \quad (17)$$

假设 \mathbf{R} 的奇异值分解为 $\mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T$, 与其逼近的正交阵为^[10]

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{U} \mathbf{V}^T, \quad (18)$$

分解 $\hat{\mathbf{R}}$ 得到 3 个旋转角的初值。

平移向量初始值为

$$\mathbf{T} = -\mathbf{R} \mathbf{O}_c. \quad (19)$$

3.3 优化摄像机参数

摄像机的光心是抽象的物理概念, 不是实体。假设光心已知, 求解得到摄像机参数的初始值, 初始值并不精确, 需要优化摄像机参数。采用 LM 优化方法, 待优化参数为摄像机的等效焦距、一阶径向畸变系数、外参数姿态角和平移向量。由于控制点数并不可能设置的很多, 因此通过假设图像中心为主

点和采用一阶径向畸变模型而省略若干待优化参数, 这样一方面将相对增加优化过程中的剩余自由度, 另一方面避免了优化过程中更多参数之间的耦合, 并且能够实现 4 个像点为观测值的参数优化, 否则待优化参数大于条件方程个数。

优化的观测方程形式由投影模型关系(1)式可得

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x X_c / Z_c + c_x + f_x d_x (d_x^2 + d_y^2) k \\ f_y Y_c / Z_c + c_y + f_y d_y (d_x^2 + d_y^2) k \end{bmatrix}, \quad (20)$$

式中 $\mathbf{X}_c = \mathbf{R} \tilde{\mathbf{X}} + \mathbf{T}$, $\mathbf{X}_c = [X_c \ Y_c \ Z_c]^T$ 为物点在摄像机系中坐标, k 为一阶径向畸变系数, $d_x = (x - c_x) / f_x$ 和 $d_y = (y - c_y) / f_y$ 为归一化像点坐标。

优化过程中的迭代形式为

$$\mathbf{J} \delta = \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (21)$$

即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \mathbf{J}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{J}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ k \\ \mathbf{A} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_n \end{bmatrix},$$

式中 n 为优化的总点数, $\boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i$ 为第 i 个像点的残差矢量, \mathbf{x}_i 为像点测量值, $\hat{\mathbf{x}}_i$ 为由(20)式计算得到的像点坐标。 δ 为当前选择参数的改正数, 其中 $\mathbf{F} = [f_x \ f_y]^T$ 表示等效焦距组成的矢量, $\mathbf{A} = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 表示如(4)式中摄像机的外参数旋转角矢量, $\mathbf{T} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 表示如(2)式中摄像机的平移向量。 \mathbf{J}_i 为第 i 个点的导数阵

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{x}_i}{d\mathbf{F}} & \frac{d\mathbf{x}_i}{dk} & \frac{d\mathbf{x}_i}{d\mathbf{A}} & \frac{d\mathbf{x}_i}{d\mathbf{T}} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

某像点对等效焦距 \mathbf{F} 的偏导数阵为

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} X_c / Z_c - 2kd_x^3 & -2kd_x d_y^2 f_x / f_y \\ -2kd_x^2 d_y f_y / f_x & Y_c / Z_c - 2kd_y^3 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

像点对一阶径向畸变系数 k 的偏导数阵为

$$\frac{d\mathbf{x}}{dk} = \begin{bmatrix} f_x d_x (d_x^2 + d_y^2) \\ f_y d_y (d_x^2 + d_y^2) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

像对外参数旋转角向量 \mathbf{A} 的偏导数阵为

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\mathbf{A}} = \frac{d\mathbf{x}}{dX_c} \frac{dX_c}{d\mathbf{R}} \frac{d\mathbf{R}}{d\mathbf{A}}, \quad (25)$$

式中

$$\frac{d\mathbf{x}}{dX_c} = \frac{1}{Z_c^2} \begin{bmatrix} f_x Z_c & \mathbf{0} & -f_x X_c \\ \mathbf{0} & f_y Z_c & -f_y Y_c \end{bmatrix},$$

$$\frac{dX_c}{d\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}^T & \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \tilde{\mathbf{X}}^T & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T & \tilde{\mathbf{X}}^T \end{bmatrix},$$

$$\frac{d\mathbf{R}}{d\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos \gamma \sin \beta & -\sin \gamma \cos \beta \\ \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha & \cos \gamma \cos \beta \sin \alpha & -\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha - \cos \gamma \cos \alpha \\ -\cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \cos \beta \cos \alpha & -\sin \gamma \sin \beta \cos \alpha + \cos \gamma \sin \alpha \\ 0 & -\sin \gamma \sin \beta & \cos \gamma \cos \beta \\ \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha & \sin \gamma \cos \beta \sin \alpha & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha \\ -\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha - \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \cos \beta \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ 0 & -\cos \beta & 0 \\ \cos \beta \cos \alpha & -\sin \beta \sin \alpha & 0 \\ -\cos \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & 0 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

像点对平移向量 \mathbf{T} 的偏导数阵为

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\mathbf{T}} = \frac{d\mathbf{x}}{d\mathbf{X}_c} \frac{d\mathbf{X}_c}{d\mathbf{T}}, \quad (27)$$

式中 $d\mathbf{x}/d\mathbf{X}_c$ 同(25)式中, $d\mathbf{X}_c/d\mathbf{T} = \mathbf{I}_{3 \times 3}$ 。

当已知行列方向等效焦距相等时,取两者平均值作为等效焦距。在优化过程中等效焦距只作为一个参数来优化,将(23)式前两列合并成一列。

4 算 法

输入:控制点坐标 $\tilde{\mathbf{X}}$ 及其对应像点坐标 \mathbf{x} ,摄像机光心粗略位置 \mathbf{O}_c ,图像中心点坐标。

1) 计算 \mathbf{H}_∞ :利用(9)式得到控制点在辅助坐标系中坐标 $\tilde{\mathbf{X}}'$;对(10)式 DLT 变换求解 \mathbf{H}_∞ 初始值;利用(11)式变换控制点在辅助坐标系中坐标;黄金标准算法优化 \mathbf{H}_∞ ;最后采用(12)式进行坐标系反变换;

2) 计算摄像机参数初值:利用(16)式得到等效焦距初值,若行列方向等效焦距相等,取平均值;利用(18)式得到摄像机旋转角初值;利用(19)式得到平移向量初值;

3) 优化摄像机参数:令畸变参数初值为 0,其他参数初值同上,采用 LM 加速牛顿迭代方法优化各参数。残差方程式如(21)式所示。

5 实 验

5.1 仿真实验

仿真实验同时检验摄像机的标定与双目交会结果受各参数噪声的影响。标定使用的 4 个空间点的坐标分别为 $(-15 \text{ m}, 2 \text{ m}, 0)$ 、 $(-15 \text{ m}, 19 \text{ m}, 2 \text{ m})$ 、 $(15 \text{ m}, 2 \text{ m}, 0)$ 、 $(15 \text{ m}, 19 \text{ m}, 0)$ 。这 4 个点近似共面,既不能将其作为共面结构,也不能将其作为立体结构。图像尺寸为 $2000 \text{ pixel} \times 2000 \text{ pixel}$,摄像机的等效焦距为 $(2000 \text{ pixel}, 2000 \text{ pixel})$,主点坐标为 $(1000 \text{ pixel}, 1000 \text{ pixel})$ 。

左摄像机的参数如(2)式中摄像机的平移向量为 $(-50 \text{ m}, 5 \text{ m}, -50 \text{ m})$,如(4)式中摄像机的外参数旋转角矢量为 $(0^\circ, -45^\circ, 5^\circ)$;右摄像机平移向量为 $(50 \text{ m}, 5 \text{ m}, -50 \text{ m})$,旋转角矢量为 $(0^\circ, 45^\circ, 5^\circ)$ 。标定时已知行列方向等效焦距相等,像点在标定图像中心区域。验证交会测量误差的 2 个空间点坐标为 $(0, 2 \text{ m}, 0)$ 、 $(0, 15 \text{ m}, 0)$,由此生成相应的真实像点坐标并添加一定的噪声。

首先检验像点噪声对标定和交会结果的影响。像点噪声均方根误差(RMS)变化范围 $0 \sim 2 \text{ pixel}$,间隔 0.1。对每种噪声水平取 100 次独立实验,并且在每次独立实验中,给物点加上 RMS 为 0.02 m 的高斯噪声,给光心位置加上 RMS 为 1 m 的高斯噪声。统计每种噪声水平下 100 次实验计算得到的各参数的 RMS,它们随像点噪声的变化曲线如图 3 所示。图 3 中只显示了左摄像机的标定结果,其中符号 f 表示等效焦距, $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ 表示如(4)式中摄像机的外参数旋转角矢量, $[t_x \ t_y \ t_z]^T$ 表示如(2)式中摄像机的平移向量。 $[X \ Y \ Z]^T$ 表示双摄像机交会测量得到的物点三维坐标。从图 3 可看出,曲线都呈上升趋势,说明标定和交会误差随着像点噪声的增大而增大。

然后检验物点噪声对标定和交会结果的影响。物点噪声 RMS 变化范围 $0 \sim 0.02 \text{ m}$,间隔 0.001。对每种噪声水平取 100 次独立实验,并且在每次独立实验中,给像点加上 RMS 为 0.2 pixel 高斯噪声,给光心位置加上 RMS 为 1 m 的高斯噪声。统计每种噪声水平下 100 次实验计算得到的各参数的 RMS,它们随物点噪声的变化曲线如图 4 所示,各参数意义同图 3 中。从图 4 可看出,标定结果参数曲线都呈上升趋势,说明标定误差随着物点噪声的增大而增大。交会结果参数曲线基本保持不变,交会时的像点噪声在同一水平(0.2 pixel),说明在标

定误差增大但不是特别大的时候, 交会误差受标定

误差的影响效果一样。

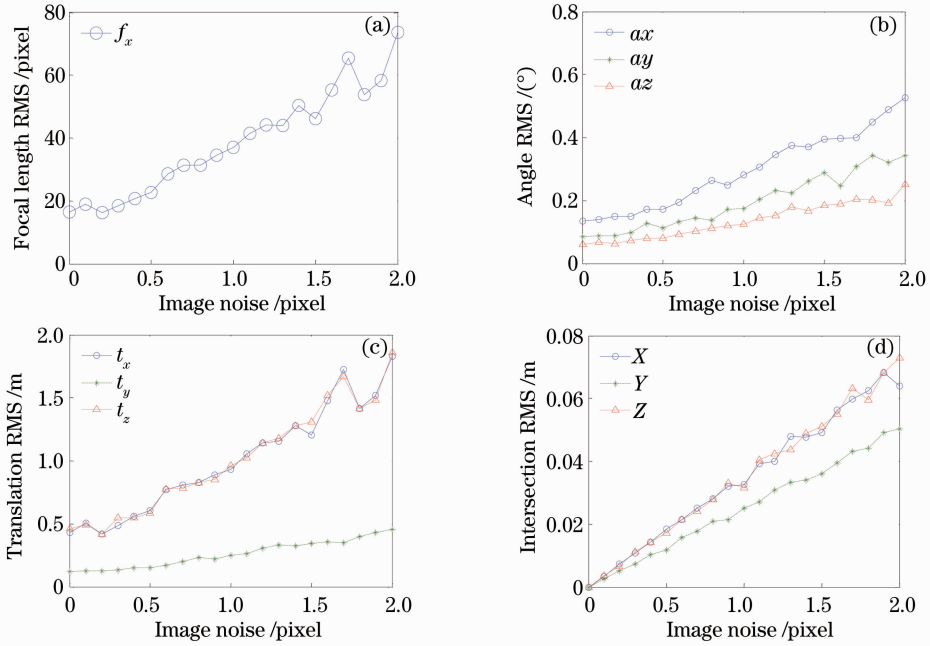


图 3 各个参数的 RMS 随像点噪声的变化曲线

Fig. 3 RMS variation of the various parameters with the noise level of image points

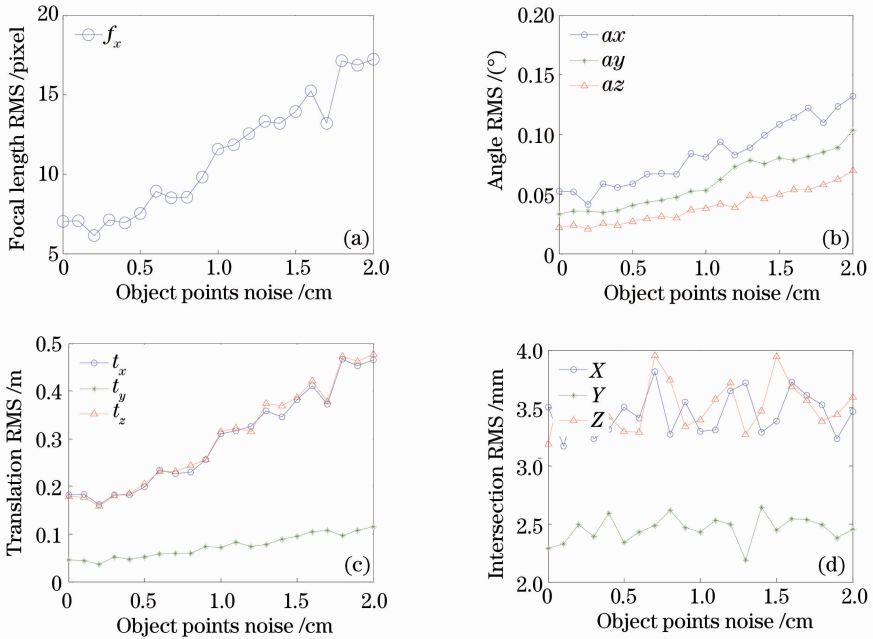


图 4 各个参数的 RMS 随物点噪声的变化曲线

Fig. 4 RMS variation of the various parameters with the noise level of object points

最后检验光心位置噪声对标定和交会结果的影响。光心位置噪声 RMS 变化范围 0.2~4.0 m, 间隔 0.2。对每种噪声水平取 100 次独立实验, 并且在每次独立实验中, 给像点加上 RMS 为 0.2 pixel

高斯噪声, 给物点加上 RMS 为 0.02 m 的高斯噪声。统计每种噪声水平下这 100 次实验计算得到的各参数的 RMS, 它们随物点噪声的变化曲线如图 5 所示, 各参数意义同图 3 中。从图 5 看出, 当光心位

置噪声逐渐增大时,各参数的 RMS 几乎不变,说明标定和交会结果对光心位置噪声很不敏感,标定和交会误差主要来源于像点和物点噪声。换句话说,当物

点和像点固定不变时,只给光心位置添加噪声,摄像机标定优化时几乎都能收敛到相同的结果,摄像机标定的结果具有很强的一致性。

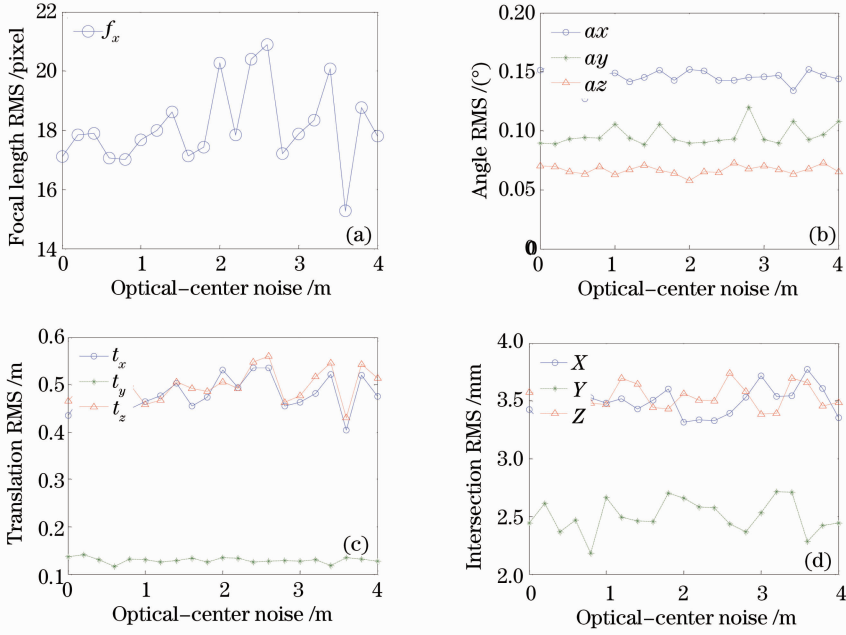


图 5 各个参数的 RMS 随光心位置噪声的变化曲线

Fig. 5 RMS variation of the various parameters with the noise level of optical center

5.2 实拍实验

在外场做了实拍实验,由于不知道摄像机参数的真实值,在此通过单摄像机标定得到的重投影误差来检验标定效果,同时利用双摄像机交会测量的方式,对比测量值与真实值的误差,从而验证交会测量的精度。

实际外场整个待测量区域为 $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 70\text{ m}$,采用多摄像机视场拼接的方式进行测量,每个摄像机的视场范围约为 $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 25\text{ m}$ 。实验场共有 4 组分别由 4 根并不平行的小柱子组成的塔架,

由于条件限制,只能在每个塔架的靠近实验场中心的柱子上粘贴标志。合作标志为黑白标志块,大约间隔 5 m 。在大约 90 m 的顶部粘贴 3 个标志以验证测量精度。合作标志坐标以及摄像机初始位置利用全站仪在两个位置测量及同名点坐标转换得到。

每个摄像机图像中恰好有两个粘贴标志的柱子,并且能够看到顶部的 3 个标志。图 6 为实际采集的其中左右两台摄像机的图像,柱子上标定用的 5 个点及顶部待测量的 3 个点已经被提取并显示在图 6 中。

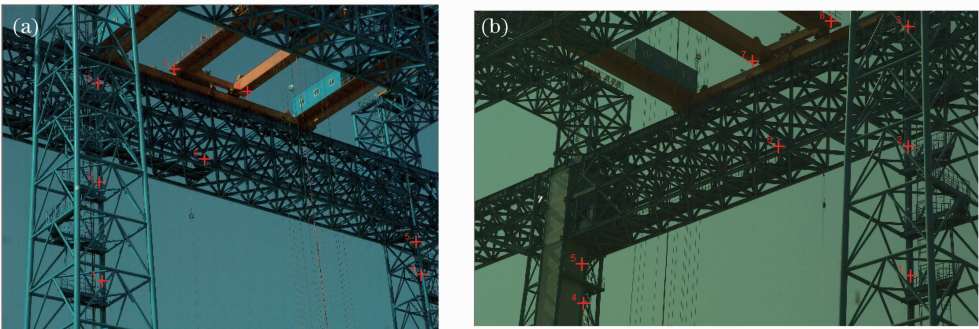


图 6 实际标定用图像。(a)左摄像机; (b)右摄像机

Fig. 6 Images for calibration. (a) Image by left camera; (b) image by right camera

全站仪给出的摄像机光心初始位置分别为 $(3\text{ m}, -100\text{ m}, -100\text{ m})$ 和 $(3\text{ m}, 100\text{ m}, -100\text{ m})$,两台摄像机参数的标定结果如表 1 所示。

两摄像机对顶部 3 个标志点进行交会测量,将全站仪测量得到的值作为真实值。表 2 给出了交会测量值与真实值的对比,其中 X 、 Y 、 Z 分别表示物

点的三维坐标分量值。测量误差最大不超过4 mm。

表 1 摄像机标定结果
Table 1 Results of camera calibration

	Left camera	Right camera
Equivalent focal length f /pixel	7398.3400	4146.2400
First-order radial distortion factor k	0.6603	0.4480
Euler angle vector of rotation matrix of the camera's exterior parameters $\mathbf{A}=[\alpha \quad \beta \quad \gamma]^T/(\circ)$	39.9251 -27.4656 265.6070	-44.7426 -27.1460 -87.4769
Translation vector of the camera's exterior parameters $\mathbf{T}=[t_x \quad t_y \quad t_z]^T/\text{m}$	12.8228 65.3697 124.4938	-5.4303 64.3022 124.4963
Position of the camera's optical center $\mathbf{O}_c=[O_{cx} \quad O_{cy} \quad O_{cz}]^T/\text{m}$	1.2844 -96.4410 -103.1204	0.5739 100.5339 -97.7559
RMS of reprojection errors /pixel	0.1200	0.1400

表 2 测量误差
Table 2 Measuring error

Point index	True values /m			Measured values /m		
	X	Y	Z	X	Y	Z
6	80.7361	-1.7506	13.0675	80.73710	-1.75433	13.06738
7	92.5776	-5.8544	12.9063	92.57363	-5.85106	12.90266
8	92.5907	5.8313	12.3142	92.59445	5.83003	12.31207

6 结 论

仿真和实际实验验证了基于无穷单应的大视场摄像机标定方法的正确性和高精度。相比于强立体或共面的条件,该方法只需要已知至少 4 个非共线控制点和摄像机光心的粗略位置,这个条件比较容易满足。采用提出的坐标变换方法能够保证无穷单应线性求解和优化过程中的稳定性。相对于文献[17]方法,该方法线性求解摄像机参数初始值,过程清晰简单,也可用于小视场摄像机的标定中。通过假设图像中心为主点和采用一阶径向畸变模型,相对增加了优化过程中的剩余自由度,能够实现 4 个像点为观测值的参数优化。在下次测量实验时,只需要将摄像机摆放在原始位置附近,并且对摄像机安装姿态没有要求,灵活并且容易实施。因此该方法非常适用于大视场摄像机的标定,是实际工程中非常有效的一种方法。

参 考 文 献

1 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009. 53~60
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. 53~60

2 Hu Zhanyi, Wu Fuchao. Review on some active vision based camera calibration techniques [J]. *Chinese J. Computer*, 2002, **25**(11): 1149~1156
胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. *计算机学报*, 2002, **25**(11): 1149~1156
3 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314
姜广文, 晁志超, 伏思华 等. 基于可控旋转的摄像机高精度标定技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308~1314
4 Zhu Jia, Li Xingfei, Xu Yingxin. Camera calibration technique based on active vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1297~1303
朱 嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1297~1303
5 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
6 R. Hartley, A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd Edition [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
7 Zhang Qiong, Wang Zhiliang, Chi Jiannan *et al.*. Calibration for gaze tracking system based on stereo cameras and plane mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0415002
张 琼, 王志良, 迟健男 等. 基于平面镜面向双摄像机视线追踪系统的标定方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0415002
8 Tian Zhen, Zhang Qi, Xiong Jiulong *et al.*. Large scale camera calibration with neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0415001

- 田 震, 张 玘, 熊九龙 等. 基于神经网络的大范围空间标定技术[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0415001
- 9 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- 10 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 11 Zhengyou Zhang. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(7): 892~899
- 12 A. Ansar, K. Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(5): 578~589
- 13 Schweighofer, G. A. Pinz. Robust pose estimation from a planar target[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(12): 2024~2030
- 14 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**(2): 155~166
- 15 M. Abidi, T. Chandra. A new efficient and direct solution for pose estimation using quadrangular targets: algorithm and evaluation [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, **17**(5): 534~538
- 16 B. Triggs. Camera pose and calibration from 4 or 5 known 3d points[C]. In Proceedings of the Seventh IEEE International conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece, IEEE Computer Society Press, 1999, 278~284
- 17 M. Bujnak, Z. Kukelova, T. Pajdla. A general solution to the P4P problem for camera with unknown focal length[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008
- 18 M. Bujnak, Z. Kukelova, T. Pajdla. New efficient solution to the absolute pose problem for camera with unknown focal length and radial distortion[C]. ACCV 2010
- 19 Shang Yang. Researches on Vision-Based Pose Measurements for Space Targets[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

栏目编辑: 李文喆