

文章编号 1004-924X(2009)10-2480-06

# 阵地地貌反求测量中的相机标定

王 巍<sup>1,2</sup>, 唐一平<sup>1</sup>, 张宇红<sup>3</sup>, 徐晓东<sup>2</sup>, 时冰川<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 西安 710051;

3. 西安工业大学 艺术与传媒学院, 陕西 西安 710032)

**摘要:**针对阵地地貌测量重构中的相机参数标定问题, 基于相机的内参数模型提出了一种多相机并联阵地地貌测量标定方法。该方法基于主动视觉原理, 利用测量支架在线性独立位置安装4部相机, 并采用并联装置驱动相机同时拍摄, 从而实现与三次独立线性平移效果相同的拍摄。根据该标定方法设计了阵地地貌测量标定实验, 实验结果表明两个方向尺度因子比值的相对误差 $<3.87\%$ , 主点坐标绝对误差在4个像素的范围内线性, 畸变因子的变化范围在3倍以内, 该方法方便、快捷, 适合于阵地地貌测量的标定。

**关键词:**阵地地貌; 地貌测量; 相机标定

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## Camera calibration for position topography measurement

WANG Wei<sup>1, 2</sup>, TANG Yi-ping<sup>1</sup>, ZHANG Yu-hong<sup>3</sup>, XU Xiao-dong<sup>2</sup>, SHI Bing-chuan<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*

2. *Missile Institute of Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;*

3. *School of Art and Media, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China*)

**Abstract:** To effectively realize the camera calibration on a position topography measurement, a multi-camera parallel calibration method is proposed based on a camera intrinsic parameter model. According to an active vision theory, four cameras are installed at four linear independence positions on a measuring support, and a parallel device is applied to drive these cameras for shooting at the same time, so as to accomplish the shooting effect of three linear independence translations. The calibration experiments of position topography measurement are designed based on this calibration method, the experiments show that the relative error of the scale factor ratio in two directions is less than  $3.87\%$ , the absolute error of central point a coordinate is less than 4 pixels, and the variation range of distortion factor is in 3 times. This method is suitable for position topography measurement for its convenient and fast calibration.

**Key words:** position topography; topography measurement; camera calibration

收稿日期: 2008-10-20; 修订日期: 2008-12-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50505051)

## 1 引 言

阵地地貌测量重构在军事目标伪装方案设计 & 伪装效果评价等方面具有重要的应用意义。基于立体视觉的测量方法是地貌测量重构中常用的一种方法,该测量方法需要通过一定的标定方法对图像采集器件的参数进行解算,其标定精度对地貌测量重构质量有重要影响。国内外众多学者对标定技术进行了大量的研究并取得了丰富的研究成果<sup>[1-3]</sup>。相机标定技术可分为 3 类:基于标定物的标定,基于主动视觉的标定和自标定。基于标定物的标定需要制作高精度的标定参照物,通过建立标定物的三维坐标与成像后的二维坐标间的对应关系来进行相机标定,这类标定方法标定精度很高,但不适用于在线标定和无法使用标定物的场合,如 Tsai<sup>[4]</sup> 提出的基于径向约束的两步法。基于主动视觉的标定方法需要利用能精确控制运动的主动视觉平台来进行标定,如马颂德<sup>[5]</sup> 提出的两组三正交平移运动标定方法,胡占义提出的基于外极点的两组正交运动标定方法,于洪川<sup>[6]</sup> 等人提出的三次线性独立平移运动标定方法。这些方法能够将标定问题转化为线性方程组的求解,标定精度较高,但需要一个主动视觉平台,限制了其应用场合。自标定方法最初由 Faugers<sup>[7]</sup> 等提出,从射影几何角度出发证明了每两幅图像之间存在着两个形如 Kruppa 方程的二次约束,通过直接求解 Kruppa 方程组可以得到内参数。但直接求解非线性方程组比较困难,并且在利用非线性优化算法计算参数时,对初始值比较敏感,往往得不到结果,标定算法鲁棒性不好,雷成等<sup>[8]</sup> 分析了该算法不鲁棒的原因。以 Hartley<sup>[9]</sup> 的 QR 分解法、Triggs<sup>[10]</sup> 的绝对二次曲面法、Pollefeys<sup>[11]</sup> 的模约束法为代表的分层逐步标定方法,都涉及非线性方程组的求解,这类方法标定精度较低,实际应用中较少使用。除以上标定方法之外,张正友<sup>[12]</sup> 提出的基于平面模板的标定方法介于传统标定方法与自标定方法之间,其标定物制作简单,并且通过非线性优化算法,标定结果达到了相当高的精度,是目前实验中使用最为广泛的一种标定方法。

本文分析了阵地地貌反求测量过程中相机标定的特点,基于相机的内参数模型,结合现有的标

定技术,提出了基于主动视觉的多相机并联阵地地貌反求测量相机标定方法。并通过相机标定实验对标定结果进行了分析,验证了该方法能够适应阵地地貌测量重构对标定的便捷性以及精度等方面的要求。

## 2 阵地地貌测量中标定方法分析

### 2.1 标定原理

不同的成像仪器有着不同的成像几何模型。对于一般的 CCD 相机或者数码相机,成像几何模型可以用针孔模型来描述。在该模型中任何一个三维点在相机成像平面上的投影位置为相机光心与该点的连线与成像平面的交点,这种关系也称

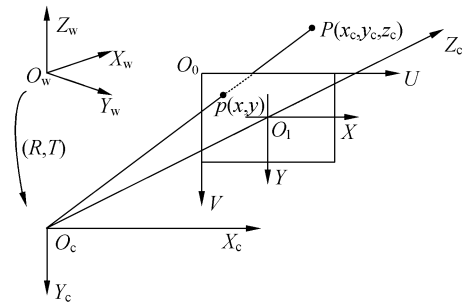


图 1 相机投影模型

Fig. 1 Camera projection model

为透视投影或中心投影,如图 1 所示。存在 4 个坐标系,分别是世界坐标系  $O_w - X_w Y_w Z_w$ , 相机坐标系  $O_c - X_c Y_c Z_c$ , 图像物理坐标系  $O_1 - XY$  和图像像素坐标系  $O_0 - UV$ , 这 4 个坐标系用来描述空间点与成像点之间的坐标转换关系。对于空间点  $P$ , 其世界坐标系坐标和图像像素坐标系坐标之间的关系为:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} u = x/du + u_0 \\ v = y/dv + v_0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{R}, \mathbf{t}$  分别为旋转矩阵和平移向量;  $(x_w, y_w, z_w)$  为点  $P$  在世界坐标系中的坐标;  $du$  和  $dv$  分别表示成像器件在  $U$  和  $V$  方向上单位像素的物理距离;  $u_0, v_0$  分别为图像物理坐标系原点在图像像素坐标系中的像素坐标值;  $f_u = f/du, f_v = f/dv$

$dv, f$  为成像器件的焦距;  $(x_c, y_c, z_c)$  为点  $P$  在相机坐标系中的坐标。

在理想情况下, CCD 像素为正方形, 并且图像像素坐标系的两个轴  $U, V$  相互垂直, 但由于制造误差等原因, 上述的假设并不成立, 实际成像过程中将产生成像畸变。此外, 成像过程中还存在径向畸变、离心畸变、薄棱镜畸变等非线性畸变, 如果将非线性畸变因素纳入相机内参数模型, 相机标定在理论上将变得复杂, 计算量变大, 并且标定结果的精度不高, 因此, 通常只考虑线性畸变因素。在这种情况下, 式(1)变为:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{KAX}_w = \mathbf{MX}_w. \quad (3)$$

式中,  $s$  为线性畸变因子, 理想情况下为 0;  $\mathbf{K}$  为相机内参数矩阵, 由  $f_u, f_v, u_0, v_0, s$  决定;  $\mathbf{A}$  为相机外参数矩阵, 由旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{t}$  决定;  $\mathbf{M} = \mathbf{KA}$  为投影矩阵,  $M$  表示投影几何关系。

## 2.2 阵地地貌测量相机标定特点

实际的阵地地貌反求测量中, 相机标定具有以下的特点。

### 2.2.1 标定过程便捷

考虑到阵地地貌的复杂性及可能出现的各种限制条件, 要求标定过程能够不受环境的约束, 且快速简便可满足阵地武器装备快速伪装的需求。

### 2.2.2 标定精度适中

阵地地貌测量只需要得到表征阵地环境的轮廓走势以及区域整体分布情况, 因此对地貌测量的精度要求较低, 标定结果能够使最终反求测量结果的精度满足要求即可。

### 2.2.3 测量对象为大场景阵地

阵地地貌与一般的工业零件相比, 尺寸是工业零件的几十倍甚至几百倍, 因而不便通过预先设置标准参照物的方法进行标定。

### 2.2.4 场景复杂多变, 不适合事先进行标定

地貌场景复杂且不同测量对象的特征变化很大, 在对某个测量对象进行立体视觉测量之前, 很难准确把握这个测量对象的景深, 在获取立体像对之前难以进行相机标定。

自标定技术无任何额外的约束条件, 只需获取多幅图像即可进行标定计算, 但其标定结果精

度不高, 稳定性差。基于主动视觉的标定方法算法简单, 标定精度也较高, 符合地貌反求测量中相机标定的要求, 缺点是相机必须基于一精确控制的运动视觉平台。实际的阵地地貌图像获取都在高空中进行, 不容易获得多次拍摄的相对位置关系。本文采用在遥控式高空摄影测量装置上安装多部图像采集器件, 调节其安装的相对位置, 使各相机姿态只相差一平移向量, 而不存在旋转关系, 并使各相机不在同一平面内, 但要同时拍摄, 利用得到的地貌图像来进行相机标定。

## 3 多相机并联阵地地貌测量标定

多相机并联阵地地貌测量标定方法与基于三次线性独立平移运动的标定方法相类似, 标定过程中需在不同摄像位置获取测量目标的 4 幅图像。基于三次线性独立平移运动的标定方法在初始位置拍摄一次, 随后会相对初始位置分别做 3 次平移后再拍摄 3 幅图像, 并且要求这 3 个平移向量线性独立(即线性无关)。多相机并联阵地地貌测量标定时, 为实现在 4 个线性无关的位置拍摄, 在测量支架上选择 4 个合适位置加装相机固定架, 安装同一规格型号的图像采集器件, 并加装并联触发拍摄装置, 以保证 4 部图像采集器件在同一时刻拍摄, 避免由于测量支架晃动而引起相机位置改变。

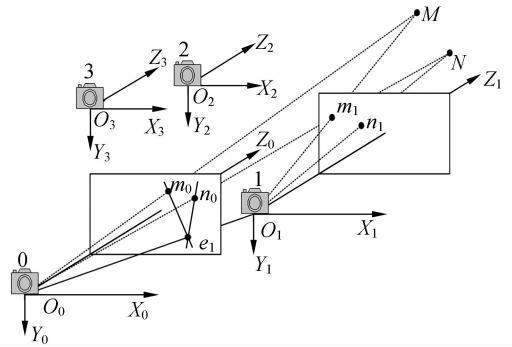


图 2 多相机并联阵地地貌测量标定原理

Fig. 2 Calibration theory of parallel multi-camera position topography measurement

多相机并联阵地地貌测量标定原理如图 2 所示, 假设 1 号相机与 0 号相机之间的平移向量为  $\mathbf{t}_1$ , 平移后的相机光心与初始位置处的相机光心连线与初始的成像平面交于点  $e_1$ 。并假设世

界坐标系与初始拍摄时的相机坐标系重合,则  $e_1$  可以看作是光心  $O_1$  在成像平面  $I_0$  上的投影,此时  $O_1$  的世界坐标即为向量  $t_1$ ,此时根据公式 3 有:

$$e_1 = K \begin{bmatrix} x_{t_1}/z_{t_1} \\ y_{t_1}/z_{t_1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{e_1} \\ y_{e_1} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中  $e_1$  为点  $e_1$  在成像平面  $I_0$  上的像素坐标系中的齐次坐标,  $K$  为内参数矩阵,  $x_{t_1}, y_{t_1}, z_{t_1}$  为向量  $t_1$  的坐标分量,通过相机固定架之间的位置关系得到。根据对极几何关系可知所有第二幅图像中的点在第一幅图像中的极线将相交于极点,如果已知匹配点对信息,则可以计算基础矩阵,并通过基础矩阵计算点的极线,任意两极线的交点即为极点。但在平移条件下,存在更特殊的情况。设  $m_0, m_1$  为一对匹配点,则在成像平面  $I_0$  中与  $m_1$  坐标值相同的点记为  $m_1'$ ,而  $m_1'$  与  $m_0$  的连线也过极点,记  $m_0, m_1$  的坐标分别为  $(u_0, v_0), (u_1, v_1)$ ,由此得到:

$$\begin{bmatrix} v_0 - v_1 & u_1 - u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{e_1} \\ y_{e_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 v_0 - u_0 v_1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

通过任意两匹配点对也可以求出极点坐标。在得到极点坐标后将其带入公式(4)有:

$$\begin{bmatrix} x_{t_1}/z_{t_1} & 0 & 1 & 0 & y_{t_1}/z_{t_1} \\ 0 & y_{t_1}/z_{t_1} & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ u_0 \\ v_0 \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{e_1} \\ y_{e_1} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

上述方程组中有 5 个未知数,2 个方程。对于 2 号相机和 3 号相机采集到的图像,采取相同的方法可以得到另外 2 个方程组,故总计 6 个方程,5 个未知数,因 3 个平移向量线性无关,利用最小二乘法即可求解相机内参数。

### 4 实 验

利用该方法对阵地地貌模型进行了测量实验,采用 Olympus E-330 数码相机,其 CCD 感光尺寸为 17.3 mm×13.0 mm,有效像素为 7.5×10<sup>6</sup>,镜头可调焦距为 14~45 mm。在拍摄时所有

的图像大小均设定为 640×480,利用铝型材料设计并加工了测量支架、相机固定架,并对相机进行了调整和安装。图 3 是拍摄的 4 组图像,每组图像中的第一幅图像拍摄位置为 0 号相机位置,即是该组图像的参考基准,即该次拍摄时的相机坐标系为世界坐标系,另外 3 幅图像分别是 1 号、2 号、3 号相机拍摄的图像。



图 3 3 组阵地地貌测量图像

Fig. 3 Three groups of position topography measurement images

第一组实验中,1、2、3 号相机相对于 0 号相机的在相机坐标系中的坐标为  $(-50, 50, 50), (50, -50, 50), (-50, -50, 50)$ ;第二组实验中,1、2、3 号相机相对于 0 号相机的在相机坐标系中的坐标为  $(-60, 80, 70), (60, -80, 70), (-60, -80, 70)$ ;第三组实验中,1、2、3 号相机相对于 0 号相机的在相机坐标系中的坐标为  $(-20, 30, 40), (20, -30, 40), (-20, -30, 40)$ 。

表 1 3 组标定的实验结果

Tab. 1 Results of three calibration experiments

	实验 1	实验 2	实验 3
$f_u$	1 129.191	1 126.577	1 136.058
$f_v$	1 131.394	1 126.699	1 136.099
$u_0$	318.324 1	319.112 9	317.963 1
$v_0$	240.822 4	238.472 5	236.550 0
$s$	2.301 2	2.511 0	1.043 1

设拍摄时的焦距为  $f, f_u, f_v$  的理论值计算公式如下:

$$\begin{cases} f_u = f \times 640 / 17.3 \approx f \times 36.994 220 \\ f_v = f \times 480 / 13.0 \approx f \times 36.923 070 \end{cases}. \quad (7)$$

$f_u/f_v$  的理论值应为 1,实验结果如表 2 所示,可

见比值的相对误差  $< 3.87\%$ 。

表 2 3 组标定实验的  $f_u/f_v$  值

Tab. 2  $f_u/f_v$  values of three calibration experiments

	实验 1	实验 2	实验 3
$f_u/f_v$	0.998 053	0.999 891	0.999 964
相对误差	3.87%	2.03%	1.96%

成像平面的中心坐标值应该为图像宽与高的一半,在这 3 组实验中,由于图像大小一样,即有  $u_0=320$ ,  $v_0=240$ 。3 次标定得到的  $u_0, v_0$  计算值与理想值的绝对误差在 4 个像素范围内,对应的物理距离偏差小于  $(4 \times 17.3)/640 \text{ mm} = 0.1081 \text{ mm}$ 。

考虑实际的 CCD 器件成像部分的制造误差,在成像平面上,设  $U$  轴与  $V$  轴的夹角为  $\theta$ ,并且单位像素并非正方形,设单位像素宽度  $du$ ,高度  $dv$ ,像素坐标系  $U$  轴与物理坐标系  $X$  轴平行,成像平面上的某点在像素坐标系和物理坐标系中的坐标关系为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f/du & -f \cdot \cot \theta/dv & u_0 \\ 0 & f/(\sin \theta \cdot dv) & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

此时内参数矩阵中的  $s = f \cdot \cot \theta/dv$ ,即影响  $s$  的因素包括  $\theta, dv, f$ ,由于  $\theta$  理论值为  $90^\circ$ ,故  $s$  的理论值为 0。但实验时使用的相机其值并非  $90^\circ$ ,因此,  $s$  的误差一部分来自实际相机的制造误差(决定了  $\theta, dv$ ),一部分来自焦距的计算误差。由于

$dv$  值远小于 1,由  $s$  的计算公式可以看出,  $s$  对  $f \cdot \cot \theta$  的值极为敏感,稍小的变换将会引起  $s$  的剧烈变换。而实验中相应的  $s$  的变化范围(最大值除以最小值)在 3 倍以内,因此,可以认为,  $f \cdot \cot \theta$  变化非常小,标定过程稳定。

## 5 结 论

阵地地貌测量重构中需要对图像采集器件的内参数进行标定,由于阵地地貌测量对象多为大场景对象,测量环境复杂,会对标定过程中标定物的设置、相机景深等问题产生诸多限制,但阵地地貌测量对测量精度要求并不是很高。本文分析了相机的成像几何模型,并给出了相机的内参数模型。通过分析地貌反求测量过程中相机标定的特点及要求,结合现有各种标定方法的特点,提出了基于主动视觉的多相机并联阵地地貌测量标定方法。设计了在线性独立位置安装 4 部相机的测量支架,对阵地地貌模型进行了 3 组标定实验,并对标定结果中各参数的实验值与理论值进行了对比分析。实验结果表明  $f_u/f_v$  的相对误差  $< 3.87\%$ ,  $u_0, v_0$  计算值与理想值的绝对误差在 4 个像素范围以内,对应的物理距离偏差  $< 0.1081 \text{ mm}$ ,  $s$  的变化范围在 3 倍以内。本文的标定方法标定结果准确,标定过程快捷、方便,有利于阵地地貌测量标定过程快速、准确地进行。

## 参考文献:

- [1] 于宁峰. 数字摄影测量系统中非量测 CCD 相机标定算法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 190-193.  
YU N F. Non-metric CCD camera calibration algorithm in digital photogrammetry system[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26(2): 190-193. (in Chinese)
- [2] 张吴明, 钟约先. 基于改进差分进化算法的相机标定研究[J]. 光学技术, 2004, 30(6): 720-723.  
ZHANG W M, ZHONG Y X. Camera calibration based on improved differential evolution algorithm [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(36): 720-723. (in Chinese)

- [3] 谢文寒, 张祖勋, 张剑清. 一种新的基于灭点的相机标定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(11): 1384-1387.  
XIE W H, ZHANG Z X, ZHANG J Q. New method of camera calibration with vanishing points[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(11): 1384-1387. (in Chinese)
- [4] TSAI R Y, LENZ R K. A technique for solve the kinematic equation 3D robotics hand/eye calibration [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 345-357.
- [5] MA S D. A self-calibration technique for active vision system[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(1): 114-120.
- [6] 于洪川, 吴福朝, 袁波. 基于主动视觉的像机自标定

方法[J]. 机器人, 1999, 21(1):1-7.

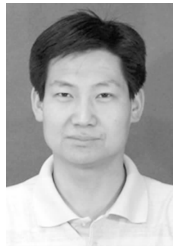
YU H CH, WU F ZH, YUAN B. Camera self-calibration technique based on active vision[J]. *Robot*, 1999, 21(1):1-7. (in Chinese)

- [7] MAYBANK S J, FAUGERAS O. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. *International Journal of Computer Vision* 1997, 8(2):123-151.
- [8] 雷成, 吴福朝, 胡占义. Kruppa 方程与摄像机自标定[J]. 自动化学报, 2001, 27(5):621-630.  
LEI CH, WU F ZH, HU ZH Y. KRUPPA equations and camera self-calibration[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(5):621-630. (in Chinese)
- [9] HARTLEY R. Euclidean reconstruction and invariants from multiple images[C]. *In Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, IEEE Computer Society Press, 1996: 339-

343.

- [10] TRIGGS B. Auto-calibration and the absolute quadric[C]. *In Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico, USA*, 1997:609-614.
- [11] POLLEFEYS M, GOOL L V, OOSTERLINCK A. The modulus constraint: a new constraint for self-calibration[C]. *In Proceedings of International Conference of Pattern Recognition, Vienna*, 1996:349-353.
- [12] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. *In Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece*, 1999: 666-673.

#### 作者简介:



王 崑(1974—),男,陕西西安人,副教授,博士研究生,研究方向为逆向工程、优化设计、计算机辅助设计以及制造业信息化。E-mail: lhww11@tom.com

张宇红(1968—),女,陕西西安人,副教授,研究方向为快速成型及色彩设计。E-mail: zyh818520@sohu.com

徐晓东(1971—),男,陕西咸阳人,硕士,讲师,研究方向为逆向工程。E-mail: xxdsxxy@sina.com

时冰川(1982—),男,湖北武汉人,硕士,研究方向为逆向工程。E-mail: latlontude@yao.com.cn

#### 导师简介:

唐一平(1946—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事快速成型制造及快速模具方面的研究。E-mail: yptang@mail.xjtu.edu.cn