

基于等高地面控制点的航空摄像机参数估计

余家祥^{1,2}, 萧德云¹, 秦东兴³

(1. 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2. 海军大连舰艇学院
舰载武器系, 辽宁 大连 116018; 3. 海军装备部, 北京 100076)

摘要:为满足炮射廉价航空 CCD 摄像机的对地定位需求, 提出一种基于四个已知等高地面控制点的航空摄像机参数估计方法。该方法根据单张航空像片估计伞载空中摄像机焦距及摄像机在世界坐标系中的位置和姿态角等外参数, 利用直接线性变换算法求取已知等高地面控制点与对应像点之间的单应矩阵, 建立了单应矩阵与共线条件方程之间的关联关系, 最后根据关联关系推导出计算航空摄像机焦距、纵横比、位置和姿态角等内外参数的数学模型。为考查该方法的有效性, 分别运用室内模拟控制点和野外真实控制点进行了实验。实验结果表明: 在给定四个等高地面控制点的三维坐标及对应像点的二维坐标的情况下, 该方法计算焦距、纵横比、位置和姿态角等摄像机参数的相对误差约为 2%, 参数估计结果基本满足炮射摄像机对地成像定位需求。

关键词:等高地面控制点; 航空摄像机; 单应矩阵; 共线条件方程

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A

Estimation of aerial camera parameters based on ground control points with equal elevation

YU Jia-xiang^{1,2}, XIAO De-yun¹, QIN Dong-xing³

1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Department of Shipboard Weaponry, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;
3. Navy Materiel Department, PLA Navy, Beijing 100076, China)

Abstract: To make a low cost aerial CCD camera locate a ground target accurately, a new estimating technique using four known ground control points with equal elevation for estimating camera parameter is presented, in which the focal length and external parameters of an aerial camera carried by a parachute, including position and pose angles relative to the world reference frame, can be estimated according to a single aerial image. In this paper, we use direct linear transformation algorithm to compute the homographic matrix between the known ground control points with equal elevation and the corresponding points on the image plane, then establish the relationships between the homographic matrix and the collinearity equations, and finally give the mathematic models for computing the intrinsic and extrinsic parameters of the aerial camera. Two experiments are carried out to examine the effectiveness of the proposed algorithm with indoor simulation control points and outdoor real control points,

respectively. The experiment results show that the presented technique can get the camera parameters with relative error of 2% by given the 3-dimension coordinates of four known ground control points and the 2-dimension coordinates of the corresponding image points. The estimated parameters can meet the need of geo-location.

Key words: ground control point with equal elevation; aerial camera; homography matrix; collinearity equation

1 引言

炮射空中悬浮视频摄像机是获取实时战场信息的重要装备,与无人机机载摄像机类似,其主要功能是进行战场监视和目标与弹丸炸点实时定位^[1]。然而,目前此类摄像机的对地定位潜力往往得不到有效利用,主要原因是:(1)受炮弹弹体结构及成本限制,无法随炮射视频摄像机配备位置与姿态自动测量及摄站定位设备,因而无法利用空中三角测量法^[2]实现对地定位;(2)不能集成高精度激光测距仪且不具备光电跟踪功能,因此无法实现空基单站对地定位^[3];(3)由于摄像机内外参数未知,图像几何形无法纠正,使得融合非实时遥感图像和实时视频图像的匹配定位技术^[4,5]无法使用。综上所述,要解决炮射摄像机的对地定位问题,首先必须对摄像机的焦距、空间位置和姿态等参数进行估计。

关于摄像机参数估计方法的研究起始于航空摄影测量领域^[6],近期研究成果主要集中于计算机视觉领域^[7,8]。如果将二者有机联系起来,将会对航空摄影领域的摄像机参数估计技术起重要的促进作用,张永军等^[9]和 Seedahmed 等^[10]分别对这一问题进行了初步研究。文献^[9]给出摄像机焦距、姿态和位置的计算方法,并证明单张像片无法利用平面控制点计算摄像机主点;文献^[10]假设摄像机内参数已知,然后给出一种利用平面射影变换矩阵求解摄像机外参数的简洁矩阵表示形式,以上两种方法与 Kobayashi 和 Mori 的方法^[11]极为相似。本文根据视场内一组等高控制点(4个点)建立了炮射视频摄像机焦距、姿态和位置的线性估计模型。

2 标定条件

假设视场内有四个已知等高控制点,分别用

M_1, M_2, M_3 和 M_4 表示,它们分布情况如图 1 所示。其中, $O-XYZ$ 为地面摄影测量坐标系(也称为世界坐标系), $S-xyz$ 为像空间坐标系。在 $O-XYZ$ 坐标系中, M_1, M_2, M_3 和 M_4 的三维坐标分别为 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3)$ 和 (X_4, Y_4, Z_4) , 与它们对应的像点 m_1, m_2, m_3 和 m_4 在像空间坐标系中的坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ 和 (x_4, y_4, z_4) 。

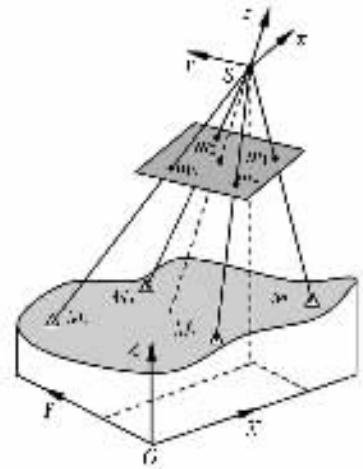


图 1 地面控制点及坐标系

Fig. 1 Ground control points and coordinates

在以下讨论中,我们有时用 M 泛指地面控制点,其坐标为 (X, Y, Z) ;用 m 泛指 M 对应的图像点,并用 (x, y, z) 指代 m 在像空间坐标系中的坐标。

3 共线条件方程与单应矩阵

假设控制点的三维坐标 (X, Y, Z) 与对应像点在像平面上的二维坐标 (x, y) 满足如下共线条件方程:

$$x = -\beta f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \quad (1)$$

$$y = -f \frac{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)}, \quad (2)$$

其中, f 为有效焦距, β 为纵横比, (X_S, Y_S, Z_S) 为投影中心 S 在地面摄影测量坐标系中的坐标, $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)^T$, $\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3)^T$ 和 $\mathbf{c} = (c_1, c_2, c_3)^T$ 为像空间坐标系相对地面摄影测量坐标系的旋转向量。

本文的研究目标是求取内参数 β, f 和旋转向量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 及 \mathbf{c} , 进而求取摄像机姿态角和投影中心坐标 (X_S, Y_S, Z_S) 。

式(1)和式(2)可用齐次坐标和矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{K} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & -(a_1 X_S + b_1 Y_S + c_1(Z_S - Z)) \\ a_2 & b_2 & -(a_2 X_S + b_2 Y_S + c_2(Z_S - Z)) \\ a_3 & b_3 & -(a_3 X_S + b_3 Y_S + c_3(Z_S - Z)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, λ 为比例因子; \mathbf{K} 为摄像机内参数矩阵, 它可以被表示为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \beta f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由于标定条件限定控制点等高共面, 因此这些点到相应图像点的单应可以用齐次坐标和矩阵形式统一表示如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, \mathbf{H} 为 3×3 平面单应矩阵。

矩阵 \mathbf{H} 的各个元素可以通过式(6)求取, 即

$$\mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{h}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (6)$$

矩阵 \mathbf{B} 可以由 k 个控制点的坐标构成, 即

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{L}_1 & 0 & \mathbf{L}_2 & \cdots & 0 & \mathbf{L}_k \\ -\mathbf{L}_1 & 0 & -\mathbf{L}_2 & 0 & \cdots & -\mathbf{L}_k & 0 \\ y_1 \mathbf{L}_1 & -x_1 \mathbf{L}_1 & y_2 \mathbf{L}_2 & -x_2 \mathbf{L}_2 & \cdots & y_k \mathbf{L}_k & -x_k \mathbf{L}_k \end{bmatrix}^T, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{L}_k = [X_k \quad Y_k \quad 1]^T$ 。在本文中, 统一取最小配置, 即 $k=4$ 。

4 求取内参数 β 和 f

比较式(3)与(5)可得:

$$\lambda \mathbf{K} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & -(a_1 X_S + b_1 Y_S + c_1(Z_S - Z)) \\ a_2 & b_2 & -(a_2 X_S + b_2 Y_S + c_2(Z_S - Z)) \\ a_3 & b_3 & -(a_3 X_S + b_3 Y_S + c_3(Z_S - Z)) \end{bmatrix} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3], \quad (8)$$

由式(8)得:

$$\mathbf{a} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]^T = \lambda^{-1} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1, \quad (9)$$

$$\mathbf{b} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]^T = \lambda^{-1} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2. \quad (10)$$

由于 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 是旋转矩阵的列向量, 因而有:

$$\mathbf{a}^T \mathbf{a} = \lambda^{-2} \mathbf{h}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_1 = 1, \quad (11)$$

$$\mathbf{b}^T \mathbf{b} = \lambda^{-2} \mathbf{h}_2^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 = 1, \quad (12)$$

$$\mathbf{a}^T \mathbf{b} = \lambda^{-2} \mathbf{h}_1^T \mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0. \quad (13)$$

从式(11)、(12)和(13)中约去 λ^{-2} , 得到计算 f_x 和 f_y 的数学模型为:

$$\mathbf{h}_1^T \begin{bmatrix} (\beta f)^{-2} & & \\ & f^{-2} & \\ & & 1 \end{bmatrix} \mathbf{h}_2 = 0, \quad (14)$$

$$(\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_2)^T \begin{bmatrix} (\beta f)^{-2} & & \\ & f^{-2} & \\ & & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_2) = 0, \quad (15)$$

利用式(14)和(15)的计算结果重构内参数矩阵 \mathbf{K} , 然后对式(9)或(10)两边取 2-范数, 可算得比例因子 λ 。这里对式(10)取范数得^[12]

$$\lambda = 1 / \|\mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}_2\|, \quad (16)$$

将 \mathbf{K} 和 λ 代入式(9)和(10), 可以分别得到正交旋转矩阵的列向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} , 列向量 \mathbf{c} 可由根据旋转矩阵的正交性通过式(17)计算得到, 即

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}, \quad (17)$$

至此, 可以得到像空间坐标系与地面摄影测量坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

5 摄像机位置与姿态计算模型

由式(8)得:

$$\lambda \mathbf{K} \begin{bmatrix} -(a_1 X_S + b_1 Y_S + c_1 (Z_S - Z)) \\ -(a_2 X_S + b_2 Y_S + c_2 (Z_S - Z)) \\ -(a_3 X_S + b_3 Y_S + c_3 (Z_S - Z)) \end{bmatrix} = \mathbf{h}_3, \quad (19)$$

整理后,得到计算摄影中心 S 的坐标 (X_S, Y_S, Z_S) 的公式如下:

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z \end{bmatrix} - (\lambda \mathbf{K} \mathbf{R})^{-1} \mathbf{h}_3, \quad (20)$$

由于本文研究的是基于单张像片的摄像机内外参数的求解算法,因而在此沿用摄影测量学的惯例,采用以 Z 轴为主轴的 $A-\alpha-\kappa_v$ 转角系统^[13],其中 A 、 α 和 κ_v 为像空间坐标相对于摄影测量坐标系的旋转角。这样,像空间坐标系和地面摄影测量坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 的各元素可以相应地表示如下:

$$a_1 = \cos A \cos \kappa_v + \sin A \cos \alpha \sin \kappa_v, \quad (21)$$

$$a_2 = -\cos A \sin \kappa_v + \sin A \cos \alpha \cos \kappa_v, \quad (22)$$

$$a_3 = -\sin A \sin \alpha, \quad (23)$$

$$b_1 = -\sin A \cos \kappa_v + \cos A \cos \alpha \sin \kappa_v, \quad (24)$$

$$b_2 = \sin A \sin \kappa_v + \cos A \cos \alpha \cos \kappa_v, \quad (25)$$

$$b_3 = -\cos A \sin \alpha, \quad (26)$$

$$c_1 = \sin \alpha \sin \kappa_v, \quad (27)$$

$$c_2 = \sin \alpha \cos \kappa_v, \quad (28)$$

$$c_3 = \cos \alpha. \quad (29)$$

根据式(18)、(26)、(27)和(29),可以求出摄像机的三个姿态角如下:

$$\alpha = \arccos c_1, \quad (30)$$

$$A = \arccos(-b_3 / \sin \alpha), \quad (31)$$

$$\kappa_v = \arcsin(c_1 / \sin \alpha). \quad (32)$$

6 验证实验

这一节将运用室内实验和真实野外航摄图片验证上述摄像机参估计方法的有效性。

6.1 室内实验

使用计算机绘制一幅由多条纵横直线相交而成的网格图,由激光打印机输出到一张 A3 纸上,然后张贴在光洁平整的墙壁上。摄像机与网格平面的相对位置关系如图 2 所示。其中,摄影测量

坐标系的 XY 平面取网格所在的墙面,坐标原点 O 取在地面与墙壁交线上。

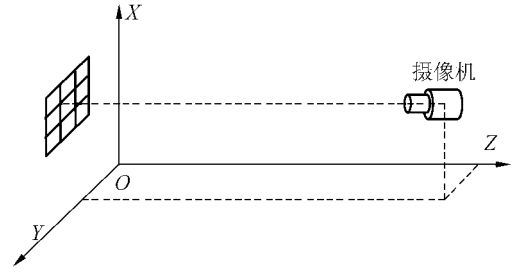


图 2 摄像机与网格平面的相对位置

Fig. 2 Relative position between the camera and the grid plane

使用 Nikon D100 数码相机(探测阵面尺寸为 $15.6 \text{ mm} \times 23.7 \text{ mm}$)成像,所拍摄的单张像片如图 3 所示。

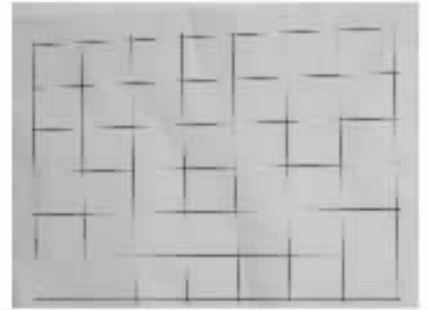


图 3 用于有效性验证的室内网格图像

Fig. 3 Indoor grid image for validity examination

在图像平面上利用 Harris 算子^[14,15]提取图 3 中所有 42 个网格点,选择非共线、疏散分布的四个网格点;求取这四个网格点的在像平面上的二维坐标,同时量取它们在摄影测量坐标系中的三维坐标;根据坐标值计算得到摄像机参数值(包括焦距、纵横比、位置和姿态角等)为: $\beta = 1.107$, $f = 16.326 \text{ mm}$, $A = 1.472^\circ$, $\alpha = 25.473^\circ$, $\kappa_v = 0.489^\circ$, $X_S = 793.4 \text{ mm}$, $Y_S = 941.6 \text{ mm}$, $Z_S = 2014.5 \text{ mm}$ 。

上述参数的有效性可以通过绝对误差检测。绝对误差定义为测试点的真实图像坐标与再投影后相应的图像坐标之差的模平均值,单位为像素,即

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2}, \quad (33)$$

其中, (x_i, y_i) 为测试点的图上真实坐标; (x_i', y_i') 是将摄像机参数估计值代入式(1)和(2)计算得到图像坐标(即再投影); N 为测试点的个数。这里取 $N=42-4=38$ 个测试点进行计算, 计算结果为 $E=0.583$ 。由于 Harris 算子的特征检测精度为像素级^[13], 因此有理由认为误差 E 主要来自 Harris 算子, 而参数计算模型具有较高的准确性。

6.2 实拍航片试验

图 4 为一真实航拍图像, 图中白色环线为成像前人工设置在试验区内的等高点连线, 成像时刻的摄像机焦距、位置、姿态角等参数可以分别由焦距测量装置、载体导航系统、姿态测量系统给出(以下称它们为实测值)。



图 4 带等高控制点标记的实拍航空像片

Fig. 4 Real aerial image marked with control points of equal elevation

为验证本文参数估计方法的有效性, 在白线上取四个特征明显、坐标精确已知的等高控制点(如图 4 中的白色三角形所示), 利用本文给出的参数估计模型计算摄像机焦距、位置、姿态角等参

数(以下称之为估计值), 然后利用如下相对误差模型衡量估计值与实测值之间的差异, 即

$$\text{相对误差}(r_t) = \frac{|\text{估计值} - \text{实测值}|}{|\text{实测值}|}, \quad (34)$$

其中, 下标 t 代表被估计的参数。

相对误差的计算结果为: $r_\beta = 2.17\%$, $r_f = 1.97\%$, $r_A = 1.25\%$, $r_\alpha = 1.45\%$, $r_{\kappa_v} = 1.21\%$, $r_{X_S} = 1.01\%$, $r_{Y_S} = 0.94\%$, $r_{Z_S} = 1.84\%$ 。误差情况接近于测量仪器本身的性能, 说明计算模型合理可行。

7 结 论

摄像机参数估计是计算机视觉研究中的一个热点问题, 有许多成熟有效的算法。本文将计算机视觉领域的研究成果应用于摄影测量领域, 给出一种基于单张图像并利用四个已知等高地面控制点坐标的摄像机内外参数求取方法。与单像空间后方交会中的共线条件方程解法和三角锥体法相比, 该方法求解摄像机外参数时不需要事先知道焦距等内参数, 而将焦距等内参数作为求解对象之一, 因此它特别适合焦距等内参数易于发生变化的炮射空中摄像机。此外, 该方法也不像传统的直接线性变换法那样需要六个控制点, 而是仅需要四个控制点, 因此更适用于地面控制点比较稀疏或小视场精确定位场合。室内实验和真实航拍像片试验表明, 本文给出的摄像机内外参数求取方法具有较高的精度, 像点再投影误差仅为 0.6 pixel, 摄像机参数相对误差小于 2%。参数估计结果基本满足炮射摄像机对地成像定位需求。下一步的研究将围绕非等高地面控制点展开, 以提高模型适应复杂控制点分布情况的能力。

参考文献:

- [1] 钱立志. 特种弹技术[M]. 北京: 解放军出版社, 2003.
QIAN L ZH. *Techniques for Special Projectiles*[M]. Beijing: PLA Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [2] SCHENK T. From point-based to feature-based aerial triangulation [J]. *ISPRS J. Photogramm. Remot. Sens.*, 2004, 58(5-6): 315-329.
- [3] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(2): 105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opt-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)
- [4] ABD-ELRAHMAN A, PEARLSTINE L, DEWITT B A, et al.. Detection of positional errors in systems utilizing small-format digital aerial imagery and navigation sensors using area-based matching techniques [J]. *Photogramm.*

- Eng. Remot. Sens.*, 2001, 67(7): 825-831.
- [5] OGAWA Y, IWAMURA K, KAKUMOTO S. Extracting object information from aerial images: a map-based approach [J]. *IEICE Trans. Inf. Syst.*, 2000, E83-D(7): 1450-1457.
- [6] HABIB A, MORGAN M. Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras [J]. *Photogramm. Eng. Remot. Sens.*, 2005, 71(6): 733-741.
- [7] HARTLEY H, ZISSERMAN A. *Multiple view Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [8] YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 883-890.
- [9] 张永军,张祖勋,张剑清. 利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2002, 27(6): 566-571.
ZHANG Y J, ZHANG Z X, ZHANG J Q. Camera calibration using 2D-DLT and bundle adjustment with planar scenes[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(6): 566-571. (in Chinese)
- [10] SEEDAHMED G H. Direct retrieval of exterior orientation parameters using a 2D projective transformation [J]. *Photogramm. Rec.*, 2006, 115(21): 211-231.
- [11] KOBAYASHI K, MORI C. Relations between the coefficients in the projective transformation equations and the orientation elements of a photograph [J]. *Photogramm. Eng. Remot. Sens.*, 1997, 63(9): 1121-1127.
- [12] 王佩军,徐亚明. *摄影测量学*[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
WANG P J, XU Y M. *Principles of Photogrammetry* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. (in Chinese)
- [13] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intel.*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] HARRIS C, STEPHENS M S. A combined corner and edge detector[C]. *Proceedings of 4th Alvey Vision Conference, Manchester, England*, 1988: 147-151.
- [15] 胡小平,廖海洋. 数字摄影测量中特征点的提取方法研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 236-239.
HU X P, LIAO H Y. Methodology study of feature point extraction in digital photogrammetry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 236-239. (in Chinese)

作者简介:余家祥(1974—),男,安徽霍邱人,现在清华大学攻读博士学位,主要从事图像处理、无人机系统及作战使用、特种弹及作战使用等方面的研究。E-mail: yujx03@mails.tsinghua.edu.cn

(本栏目编辑 严寒)