

文章编号 1004-924X(2007)08-1269-06

应用 Hough 变换的炮射航空摄像机外参数估计方法

余家祥^{1,2}, 萧德云¹, 姜鲁东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. 海军驻西安地区舰炮军事代表室, 陕西 西安 710016)

摘要:提出了一种基于 Hough 变换的航空摄像机外参数估计新方法。该方法使用共线条件方程描述摄像机成像关系, 用图像与物方特征点之间的组合对外参数空间离散点进行投票, 将得票最多的离散参数点确定为参数估计值。为解决共线条件方程的非线性以及外参数之间的相关性, 采用迭代方式进行参数估计。与基于最小二乘原理的传统外参数估计方法不同, 该方法不需要事先对图像与物方空间特征点进行配对, 解决了传统最小二乘法的特征匹配难题, 避免了最小二乘法对错误匹配的鲁棒性较差的缺点。分别使用仿真和真实航拍图像对算法的有效性进行了检验, 结果表明: 摄像机坐标估计误差小于 15 m, 姿态角误差小于 1°。参数估计结果能够满足舰炮作战中对侦察摄像机外参数估计精度的要求。

关键词:航空摄像机; 外参数; 共线条件方程; Hough 变换

中图分类号: V427.3; TP391.4 **文献标识码:** A

Exterior parameter estimation for aerial camera based on Hough transform

YU Jia-xiang^{1,2}, XIAO De-yun¹, JIANG Lu-dong³

(1. *Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
2. *Department of Shipboard Weaponry, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;*
3. *Shipborne Gun Military Agency of Navy, Xi'an 710016, China*)

Abstract: A new approach for exterior camera parameters estimation based on Hough transform is presented. By using the collinear equations to model the camera and combining the feature points on the image plane and in the object space to set votes for a certain point in the discrete parameter space, the point with the maximum number of hit is defined the right parameter. An iterative estimation procedure is adopted to process the nonlinearity in the collinearity equations and the correlation of the exterior parameters. Unlike the conventional methods, the new technique can estimate the exterior parameters without making a correspondence between the feature points on the image plane and in the object space. Two experiments are carried out to examine the validity of the proposed algorithm. Experimental results show that the errors of the camera coordinates and the pose angles are less than 15 m and 1° respectively. The estimated parameter results can meet the requirements of the combat using

收稿日期: 2007-01-19; 修订日期: 2007-03-22.

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (No. 40108060104)

ship borne guns.

Key words: aerial camera; exterior parameter; collinearity equations; Hough transform

1 引言

与机载航空侦察摄像机相比较,炮射低成本航空侦察摄像机的对地成像定位潜能往往难以发挥,主要原因在于:(1)弹体空间极其狭小,无法装备视频摄像机外参数在线测量设备^[1],导致基于多帧图像的对地定位方法^[2-3]无法使用;(2)不能集成高精度激光测距仪^[4],也没有光电跟踪伺服系统^[5],无法实现空基单站对地定位;(3)摄像机外参数未知,无法纠正图像几何形变,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^[6]无法使用。因此,要发挥炮射摄像机的对地定位潜能,必须首先解决摄像机位置和姿态角等外参数的估计问题。

估计摄像机外参数是航空摄影测量和计算机视觉领域的一个基本问题,传统估计方法可以归为三类:单像空间后方交会法^[7]、光束法严密解法^[8]、直接线性变换解法^[9-10]。这些方法的共同特点是需要事先建立图像特征与相应物方空间特征之间配对关系,配对关系的正确与否关系到参数估计的正确性。目前,非结构化自然环境背景条件下的图像特征和相应物方空间特征之间的自动配对问题尚未得到有效解决^[11],从而限制了上述摄像机外参数估计方法的自动化程度。

本文以 Hough 变换为工具,给出一种不需要事先建立图像特征和相应物方空间特征之间的配对关系的摄像机外参数估计方法。简要介绍了 Hough 变换估计参数的基本原理,给出了基于 Hough 变换的摄像机外参数估计算法,并应用仿真实验和真实航空图像验证了算法的有效性。

2 Hough 变换

Hough 变换^[12-15]是一种以投票方式确定模型参数的算法。这一节将以圆方程参数的估计问题为例说明运用 Hough 变换估计模型参数的一般过程。

二维平面上的圆曲线可以解析地描述为:

$$(x-u)^2 + (y-v)^2 - r^2 = 0, \quad (1)$$

其中, (u, v, r) 是待求圆参数向量,它是圆参数空间的一个点,目标是根据数据集 $S = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, l\}$ 求解圆参数。

本文使用的数据集 S 由图 1 所示的 5 个数据点构成,其中数据点 1、2、3、5 位于圆上,点 4 为外点。为确定圆方程的参数,首先将三维圆参数空间量化为如图 2 所示的三维累加器阵列,每个累加器在阵列中的三维坐标对应于圆参数空间的一个点,累加器数目由圆参数的可能取值范围和量化精度确定。图 2 中, r 的取值范围为 $(0, 30]$, u, v 的取值范围均为 $(0, 60]$, r, u, v 的量化间隔均为 5。

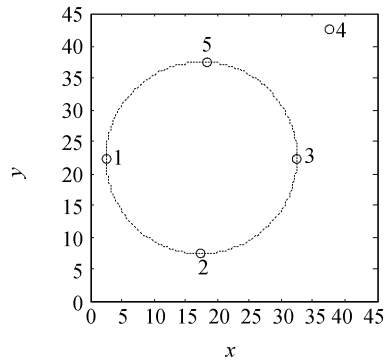


图 1 图像边缘点分布情况

Fig. 1 Distribution of edge points on image plane

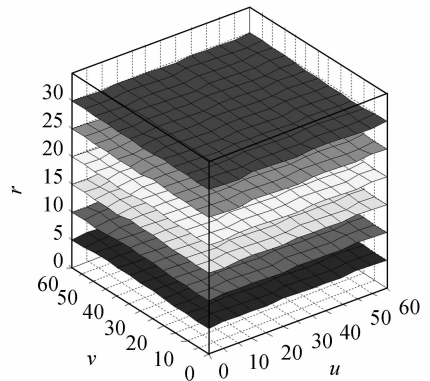


图 2 累加器阵列示意图

Fig. 2 Sketch map of accumulator array

用 Hough 变换估计圆参数的算法为:

κ 的顺序进行求解。考虑到共线条件方程的非线性以及外参数之间相关性,求解过程以迭代方式进行。

估计摄像机外参数具体算法如下:

(1) 设式(2)中 Z_c 、 ω 、 φ 和 κ 的近似值已知。

(2) 确定 X_c 、 Y_c 的取值范围分别为 $[X_{cL}, X_{cH}]$ 、 $[Y_{cL}, Y_{cH}]$, 即 $X_c \in [X_{cL}, X_{cH}]$ 、 $Y_c \in [Y_{cL}, Y_{cH}]$, 并分别以间隔 ΔX_c 、 ΔY_c 离散 $[X_{cL}, X_{cH}]$ 与 $[Y_{cL}, Y_{cH}]$ 。

(3) 从数据集合 S 中取一个元素并将其代入式(2), 解得 X_c 与 Y_c , 然后对与该值对应的累加器“投票”, 即让累加器加 1。

(4) 更换数据元素, 重复第(3)步, 如此遍历所有元素。

(5) 定位峰值累加器单元, 并将该单元格在累积矩阵上的坐标换算成 X_c 与 Y_c 的近似值。

(6) 根据 ω 、 φ 、 κ 、 X_c 与 Y_c 的近似值, 采用类同于第(2)~(5)步的方法更新 Z_c 的近似值。

(7) 根据 κ 、 X_c 、 Y_c 和 Z_c 的近似值, 采用类同于第(2)~(5)步的方法解更新 ω 与 φ 的近似值。

(8) 根据 X_c 、 Y_c 、 Z_c 、 ω 与 φ 近似值, 采用类同于第(2)~(5)步的方法解更新 κ 的近似值。

(9) 依据更新后的近似值, 缩小参数取值范围, 同时细化离散间隔, 重复第(2)~(7)步, 直至参数估计结果满足精度要求。

对于炮射伞载航空侦察摄像机, 弹丸开仓抛撒摄像机时刻的弹道高度直接由火炮火控系统给出, 根据该弹道高度和试验获得的摄像机降落规律, 可以确定出 Z_c 的初值; 由于伞载摄像机的成像主轴近似垂直于地表, 因此偏角 φ 和倾角 ω 可以取接近于零的初值; 旋角 κ 取伞载电磁定向装置的测量值为初值。

使用上述 Hough 变换算法估计参数时, 不是事先建立图像与物方特征点之间的对应关系, 而是利用数据集合 S 的所有数据元素对参数空间中的离散点进行投票, 峰值离散点代表参数的估计值, 这是使用 Hough 变换估计外参数另一个重要理由。

由于数据元素蕴含着图像与物方特征点之间的配对关系, 因此可以通过跟踪对峰值累加器有

贡献的数据元素来确定像方和物方特征点的对应关系, 从而为解决特征点匹配难题找到一种有效的方法。

4 验证实验

运用仿真实验和真实野外航摄图片验证基于 Hough 变换的外参数估计方法的有效性。

4.1 仿真实验

仿真条件为: 摄像机焦距 f 为 60 mm; 外参数 $(X_c, Y_c, Z_c, \omega, \varphi, \kappa)$ 的真值为 $(250 \text{ m}, 250 \text{ m}, 350 \text{ m}, 1^\circ, 1^\circ, 1^\circ)$; 像方与物方特征点数目分别为 176 和 150; 像方与物方特征点定位误差的均值分别为 0.01 mm 和 1 m; 图像特征点的分布情况如图 4 所示。

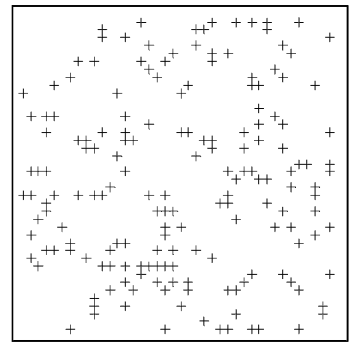


图 4 图像特征点的分布情况

Fig. 4 Distribution of image feature points

仿真计算时, 参数 $(X_c, Y_c, Z_c, \omega, \varphi, \kappa)$ 初值取为 $(400 \text{ m}, 450 \text{ m}, 400 \text{ m}, 4^\circ, 3^\circ, -4^\circ)$, (X_c, Y_c, Z_c) 的离散间隔取 10 m, $(\omega, \varphi, \kappa)$ 的离散间隔取 0.1° 。摄像机外参数 X_c 、 Y_c 、 Z_c 、 ω 、 φ 和 κ 计算结果如图 5 所示。图 5 表明, 3.2 节给出的摄像机外参数估计算法具有较好的收敛性。

4.2 航拍图像实验

为了进一步验证上述参数估计方法的有效性, 取图 6 所示的可见光遥感图像进行实验。

使用 Canny 边缘检测算法^[16]检测图像特征, 并对检测结果进行形态学处理, 得到图 7 所示的边缘特征, 地面特征点坐标从地理信息系统 (GIS) 中提取。

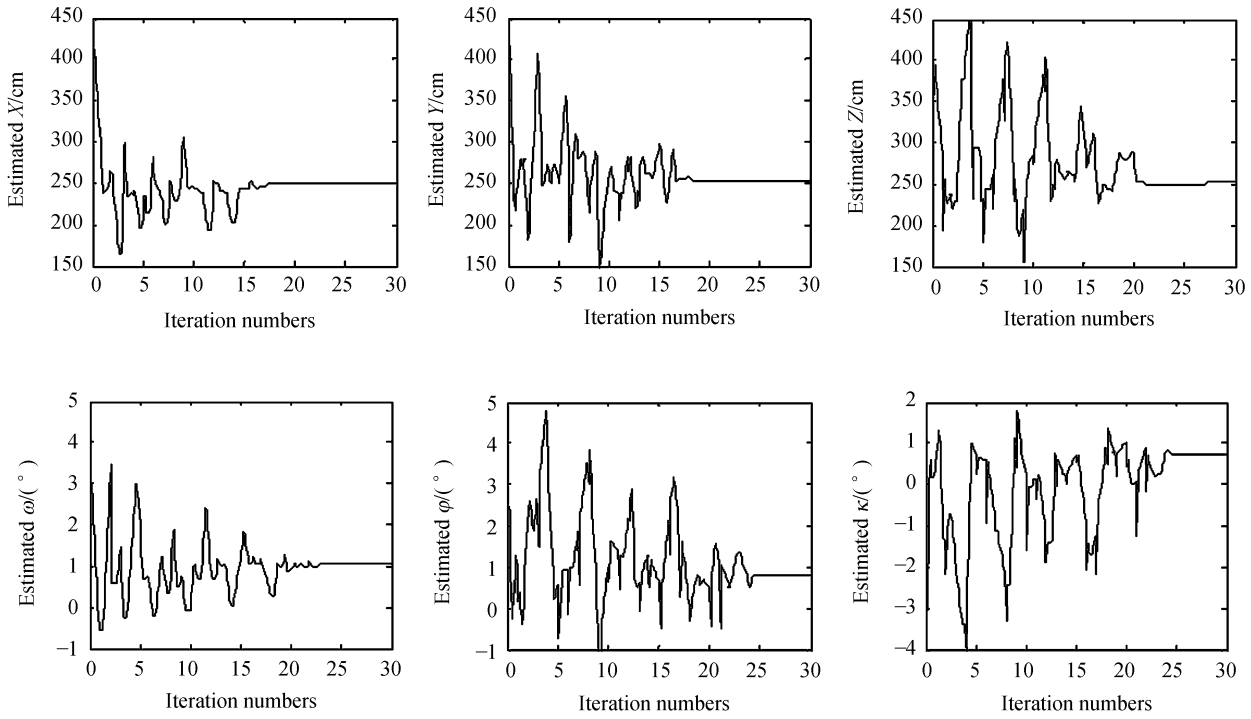


图 5 基于 Hough 变换的外参数估计结果

Fig. 5 Estimated results of exterior parameters using Hough transform



图 6 航拍图像

Fig. 6 Aerial image

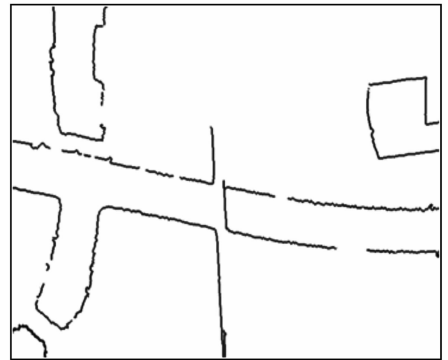


图 7 图像边缘特征

Fig. 7 Image edge features

表 1 同时列出了摄像机外参数的估计值和实测值。其中,摄站坐标实测值由机载 GPS 测量并转换到当地地面坐标系,摄像机外参数实测值由机载高精度惯性导航系统提供。

表 1 参数估计值与实测值比较

Tab. 1 Comparison of measured and estimated values

	$X_c(m)$	$Y_c(m)$	$Z_c(m)$	$\omega(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$
实测值	836.0	-621.1	1 857.6	2.38	-1.53	10.39
估计值	845.324	-607.937	1 870.452	1.921	-0.897 4	9.941 8
差值	-8.676	13.163	-12.852	0.459	-0.632 6	0.448 2

表 1 表明,用 Hough 变换估计得到的摄像机外参数接近于摄像机外参数的实测值,证实了本文算法的有效性。

5 结 论

本文给出一种用 Hough 变换估计航空摄像机外参数的方法。针对共线条件方程的非线性和外参数之间的相关特性,给出估计摄像机外参数的迭代算法。应用 2D 像方特征点和 3D 物方特

征点之间的对应关系对参数空间离散点进行投票,将得票最多的参数点设定为估计值。由于不需要事先建立特征点之间的严格对应关系,因此该方法避免了传统估计方法对错误匹配鲁棒性较差的缺点。

仿真实验表明,本文给出的参数估计方法具

有较好的收敛性,所有参数的迭代次数均 <25 次。真实航拍图像实验表明,参数估计结果接近于参数实际测量值,其中摄站坐标估计误差 $<15\text{ m}$,角度估计误差 $<1^\circ$,能够满足舰炮作战对侦察摄像机外参数估计精度的要求。

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: The PLA Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [2] SCHENK T. From point-based to feature-based aerial triangulation [J]. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2004, 58(5/6): 315-329.
- [3] BUYUKSALIH G, ZHANG L. Practical experiences with automatic aerial triangulation using different software packages [J]. *Photogrammetric Record*, 2003, 18(102): 131-155.
- [4] 尤红建,张世强. 组合 CCD 图像和稀疏激光测距数据的建筑物三维信息提取[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 297-302.
YOU H J, ZHANG SH Q. Reconstructing 3D buildings based on airborne CCD image and laser scanning rangefinder data [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 297-302. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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.
- [7] HABIB A, LIN H T, MORGAN M. Autonomous space resection using point- and line-based representation of free-form control linear features [J]. *Photogrammetric Record*, 2003, 18(103): 244-258.
- [8] TOUTIN T. Block bundle adjustment of Landsat 7 ETM+ images over mountainous areas [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2003, 69(12): 1341-1349.
- [9] 余家祥,萧德云,秦东兴. 基于等高地面控制点的航空摄像机参数估计 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 48-53.
YU J X, XIAO D Y, QING D X. Estimation of aerial camera parameters based on ground control points with equal elevation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):48-53. (in Chinese)
- [10] SEEDAHMED G H. Direct retrieval of exterior orientation parameters using a 2D projective transformation [J]. *The Photogrammetric Record*, 2006, 21(115): 211-231.
- [11] HARTLEY H, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2000.
- [12] HOUGH P V C. Method and means for recognizing complex patterns[P].*United States*: 3069654,1962-12-18.
- [13] ILLINGWORTH J, KITTLER J. A survey of the Hough transform [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 44(1): 87-116.
- [14] LEAVERS V F. Which Hough transform [J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1993, 58(2): 250-264.
- [15] GIAN L F, CARLO S R, GIANNI V. Circular arc extraction by direct clustering in a 3D Hough parameter space [J]. *Signal Processing*, 1995, 41(2): 203-224.
- [16] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1986, 8(6): 679-698.

作者简介:余家祥(1974—),男,安徽霍邱人,副教授,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

萧德云(1945—),男,福建仙游人,清华大学教授,博士生导师,研究方向为辨识建模、故障诊断、混合动态系统、多传感器融合、智能交通等。E-mail: xiaody@mail. tsinghua. edu. cn