

线阵全景相机检校模型研究

徐 芳¹ 梅文胜¹ 张 利¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:线阵全景相机通过线阵旋转来获取水平角可达 360°场景的影像,将其应用于近景摄影测量可减少摄站数,避免影像拼接问题。分析了线阵全景相机检校的几何成像模型,推导了平差函数模型,并分别用模拟和实际全景控制场数据验证了该平差函数模型,结果表明该模型参数选择合理,正确描述了线阵全景相机的内部结构关系,是线阵全景相机的一种实用检校模型。

关键词:线阵全景相机;检校模型;偏心距;线阵倾斜
中图法分类号:P231.5 **文献标志码:**A

全景相机可以提供 360°的全景影像,近年来在生成全景景观中应用很广。全景相机主要分为两种:一种由多个框幅式相机拼接而成,从而覆盖水平 360°场景;另一种为线阵扫描相机,主要由线阵 CCD、相机光学部分和旋转轴组成,随着旋转轴的旋转,线阵传感器可以捕获水平角最大为 360°的连续场景,代表性产品主要有 SpereCam、EYESCAN 和 Fodis 等。

线阵全景相机与卫星线阵传感器、机载线阵传感器以及车载线阵传感器不同,它增加了旋转轴部分,产生了由旋转引起的模型变化和像点畸变。研究者们对全景相机的参数模型、不同参考对象对相机检校的精度影响、单像检校和双像检校、获取场景的 3D 模型等问题进行了研究^[1-7]。然而,在上述关于全景相机检校和应用的研究中,都没有阐述相应的平差函数模型,因此,本文主要探讨线阵全景相机检校的平差函数模型,并进行实验验证。

1 线阵旋转传感器成像模型

1.1 理想传感器模型

理想传感器模型建立了物方空间与像方空间的映射关系。线阵全景相机(以下简称全景相机)的线阵 CCD 采用旋转扫描成像方式,获取连续影像条带。在成像时刻,扫描行方向为严格的中心

投影,地面点、像点和投影中心满足三点共线关系(即满足共线条件方程式)。

设全景相机坐标系统为右手坐标系,如图 1 所示,包括像扫描坐标系(i, j),以旋转方向为 x 方向,逆时针为正,扫描行方向为 y 方向的线阵像空间坐标系(x, y, z),旋转坐标系(U, V, W)和物方空间坐标系(X_t, Y_t, Z_t)。像空间坐标系原点与旋转坐标系原点重合于 o ,其在物方空间坐标系中的坐标为(X_c, Y_c, Z_c)。像空间坐标系中 y 轴始终与 W 轴重合,在某一时刻 x 轴与 U 轴重合、 z 轴与 V 轴重合。

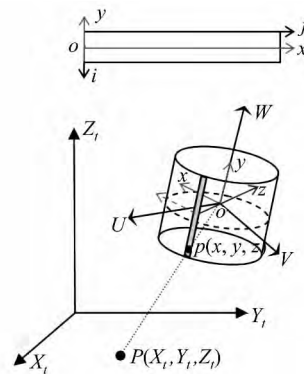


图 1 全景相机的坐标系

Fig. 1 Panoramic Camera Coordinate Systems

物方空间坐标系(X_t, Y_t, Z_t)到旋转坐标系(U, V, W)间的旋转矩阵为 R ,两坐标系之间存在如下关系:

收稿日期:2013-03-20

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41071292)。

第一作者:徐芳,博士,副教授,研究方向为近景摄影测量和遥感影像解译。E-mail: fxu@sgg.whu.edu.cn

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} X_t - X_c \\ Y_t - Y_c \\ Z_t - Z_c \end{pmatrix}, \mathbf{R} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

旋转坐标系(U, V, W)与像空间坐标系(x, y, z)之间的关系见式(2):

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \mathbf{R}_w(\theta) \cdot \lambda \cdot \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $(0, y, -f)$ 为像点在线阵像空间坐标系中的坐标; f 为相机主距; \mathbf{R}_w 为像空间坐标系(x, y, z)至旋转坐标系(U, V, W)绕 W 轴的旋转矩阵; \mathbf{T} 为从线阵到旋转坐标系的变换矩阵; l 为尺度因子; $y = (N/2 - i) \cdot p_y$; $q = j \cdot p_x$; p_y 为线阵的像素尺寸; p_x 为旋转方向的像素尺寸; N 为线阵上像素的个数, (i, j) 为像素坐标。

旋转坐标系(U, V, W)是过渡坐标系,因此将式(1)、式(2)合并,实现从像空间坐标系(x, y, z)到物方空间坐标系(X_t, Y_t, Z_t)的转换:

$$\mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} X_t - X_c \\ Y_t - Y_c \\ Z_t - Z_c \end{pmatrix} = \mathbf{R}_w(\theta) \cdot \lambda \cdot \begin{pmatrix} f \\ 0 \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)即为全景相机的理想传感器模型。

1.2 系统误差及模型参数

全景相机的线阵 CCD 平行于旋转轴,然而由于安置误差不可避免,如图 2 所示,实际的传感器模型受一定的系统误差影响,这些系统误差体现在以下几个方面。

1) 全景相机的投影中心 S 与旋转轴不重合,投影中心到旋转中心 O (即旋转坐标系原点) 存在偏心距 E_U, E_V, E_W , 当 S 在旋转中心的平面 (UOV 面) 上时 $E_W = 0$, 如图 2(a) 所示。

2) 线阵与旋转轴不平行, 线阵倾斜如图 2(b) 所示, 线阵相对旋转轴的倾斜如图 2(c) 所示。

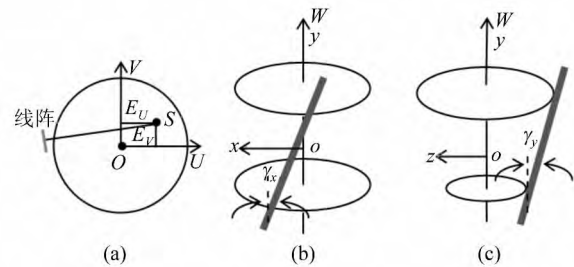


图 2 偏心距 E_U, E_V 和线阵 γ_x, γ_y
Fig. 2 Eccentricities E_U, E_V , Inclination and Tilt of the Linear Array γ_x, γ_y

3) 线阵 CCD 的光学畸变差主要为径向畸变差。

理想传感器模型加入偏心距、线阵与旋转轴不平行和镜头畸变等系统误差后,全景相机模型见式(4),可将其应用于全景相机的检校。

$$\mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} X_t - X_c \\ Y_t - Y_c \\ Z_t - Z_c \end{pmatrix} = \mathbf{R}_w(\theta) \cdot \left[\lambda \cdot \mathbf{R}_V(\gamma_y) \cdot \mathbf{R}_U(\gamma_x) \cdot \begin{pmatrix} f \\ 0 \\ y - y_0 - \Delta y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_U \\ E_V \\ E_W \end{pmatrix} \right],$$

$$\mathbf{R}_w(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, $\Delta y = \bar{y}^3 \cdot (k_1 + k_2 \bar{y}^2)$; $\bar{y} = y - y_0$ 。取 UV 平面过投影中心时, $E_W = 0$ 。 θ 和 g_x, g_y 是小角, 所以将旋转矩阵 $\mathbf{R}_w(\theta), \mathbf{R}_V(g_y), \mathbf{R}_U(g_x)$ 用欧拉角展开; 物方空间坐标系 (X_t, Y_t, Z_t) 到旋转坐标系 (U, V, W) 间的夹角较大, 本文借鉴文献[8]的方法, 直接解求旋转矩阵 \mathbf{R} 的 9 个方向余弦来代替两个坐标系间的 3 个角度。这是一种基于方向余弦的解法, 已经推广到了连续像对的相对定向、模型连接、前方交会、绝对定向等的计算中[8-11]。该方法对旋转角度的初值要求较低, 尤其适用于大角度的旋转。

将式(4)化成以像点坐标为观测值的方程式可得:

$$\begin{pmatrix} f \\ 0 \\ y - y_0 - \Delta y \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{pmatrix} \cos\gamma_y & 0 & -\sin\gamma_y \\ \sin\gamma_x \sin\gamma_y & \cos\gamma_x & \sin\gamma_x \cos\gamma_y \\ \cos\gamma_x \sin\gamma_y & -\sin\gamma_x & \cos\gamma_x \cos\gamma_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta)(X_t - X_c) + (a_2 \cos\theta + b_2 \sin\theta)(Y_t - Y_c) + (a_3 \cos\theta + b_3 \sin\theta)(Z_t - Z_c) - E_U \\ (-a_1 \sin\theta + b_1 \cos\theta)(X_t - X_c) + (-a_2 \sin\theta + b_2 \cos\theta)(Y_t - Y_c) + (-a_3 \sin\theta + b_3 \cos\theta)(Z_t - Z_c) - E_V \\ c_1(X_t - X_c) + c_2(Y_t - Y_c) + c_3(Z_t - Z_c) \end{pmatrix} \quad (5)$$

将式(5)化为误差方程式得:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L} \quad (6)$$

$$\text{式中, } \mathbf{V} = [v_x \quad v_y]^T; \mathbf{L} = [l_x \quad l_y]^T = [x - (x) \quad y - (y)]^T;$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & a_{1a} & a_{1b} & a_{1c} & a_{1d} & a_{1e} & a_{1f} & a_{1g} & a_{1h} & a_{1i} & a_{1j} & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} & a_{2a} & a_{2b} & a_{2c} & a_{2d} & a_{2e} & a_{2f} & a_{2g} & a_{2h} & a_{2i} & a_{2j} & a_{2k} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{X} = [dX_s \quad dY_s \quad dZ_s \quad da_1 \quad da_2 \quad da_3 \quad db_1 \quad db_2 \quad db_3 \quad dc_1 \quad dc_2 \quad dc_3 \quad df \quad dy_0 \quad dE_U \quad dE_V \quad \gamma_x \quad \gamma_y \quad k_1 \quad k_2]^T.$$

引入下列符号:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\mathbf{X}} &= [\sin\gamma_x \sin\gamma_y (a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta) + \cos\gamma_x (-a_1 \sin\theta + b_1 \cos\theta) + c_1 \sin\gamma_x \cos\gamma_y](X_t - X_c) + \\ & [\sin\gamma_x \sin\gamma_y (a_2 \cos\theta + b_2 \sin\theta) + \cos\gamma_x (-a_2 \sin\theta + b_2 \cos\theta) + c_2 \sin\gamma_x \cos\gamma_y](Y_t - Y_c) + \\ & [\sin\gamma_x \sin\gamma_y (a_3 \cos\theta + b_3 \sin\theta) + \cos\gamma_x (-a_3 \sin\theta + b_3 \cos\theta) + c_3 \sin\gamma_x \cos\gamma_y](Z_t - Z_c) - \\ & \sin\gamma_x \sin\gamma_y E_U - \cos\gamma_x E_V \\ \bar{\mathbf{Y}} &= [\cos\gamma_x \sin\gamma_y (a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta) - \sin\gamma_x (-a_1 \sin\theta + b_1 \cos\theta) + c_1 \cos\gamma_x \cos\gamma_y](X_t - X_c) + \\ & [\cos\gamma_x \sin\gamma_y (a_2 \cos\theta + b_2 \sin\theta) - \sin\gamma_x (-a_2 \sin\theta + b_2 \cos\theta) + c_2 \cos\gamma_x \cos\gamma_y](Y_t - Y_c) + \\ & [\cos\gamma_x \sin\gamma_y (a_3 \cos\theta + b_3 \sin\theta) - \sin\gamma_x (-a_3 \sin\theta + b_3 \cos\theta) + c_3 \cos\gamma_x \cos\gamma_y](Z_t - Z_c) - \\ & \cos\gamma_x \sin\gamma_y E_U + \sin\gamma_x E_V \\ \bar{\mathbf{Z}} &= [\cos\gamma_y (a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta) - c_1 \sin\gamma_y](X_t - X_c) + [\cos\gamma_y (a_2 \cos\theta + b_2 \sin\theta) - c_2 \sin\gamma_y](Y_t - Y_c) + \\ & [\cos\gamma_y (a_3 \cos\theta + b_3 \sin\theta) - c_3 \sin\gamma_y](Z_t - Z_c) - \cos\gamma_y E_U \end{aligned} \right.$$

误差方程式系数较多且复杂,为节省篇幅,仅列出了部分误差方程式系数:

$$a_{11} = \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{f}{(Z)^2} \{ -[\sin\gamma_x \sin\gamma_y (a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta) + \cos\gamma_x (-a_1 \sin\theta + b_1 \cos\theta) + c_1 \sin\gamma_x \cos\gamma_y] \bar{\mathbf{Z}} + [\cos\gamma_y (a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta) - c_1 \sin\gamma_y] \bar{\mathbf{X}} \}$$

$$a_{14} = \frac{\partial x}{\partial a_1} = \frac{f}{(Z)^2} [(\sin\gamma_x \sin\gamma_y \cos\theta - \cos\gamma_x \sin\theta)(X_t - X_c) \bar{\mathbf{Z}} - \cos\gamma_y \cos\theta (X_t - X_c) \bar{\mathbf{X}}]$$

$$a_{1f} = \frac{\partial x}{\partial e_U} = \frac{f}{(Z)^2} (-\sin\gamma_x \sin\gamma_y \bar{\mathbf{Z}} + \cos\gamma_y \bar{\mathbf{X}})$$

$$a_{1h} = \frac{\partial x}{\partial \gamma_x} = \frac{f}{(Z)^2} \{ [\cos\gamma_x \sin\gamma_y (a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta) - \sin\gamma_x (-a_1 \sin\theta + b_1 \cos\theta) + c_1 \cos\gamma_x \cos\gamma_y](X_t - X_c) + [\cos\gamma_x \sin\gamma_y (a_2 \cos\theta + b_2 \sin\theta) - \sin\gamma_x (-a_2 \sin\theta + b_2 \cos\theta) + c_2 \cos\gamma_x \cos\gamma_y](Y_t - Y_c) + [\cos\gamma_x \sin\gamma_y (a_3 \cos\theta + b_3 \sin\theta) - \sin\gamma_x (-a_3 \sin\theta + b_3 \cos\theta) + c_3 \cos\gamma_x \cos\gamma_y](Z_t - Z_c) - \cos\gamma_x \sin\gamma_y E_U + \sin\gamma_x E_V \} \bar{\mathbf{Z}}$$

由于 \mathbf{R} 中只有三个独立分量,因此需要利用 \mathbf{R} 的正交矩阵性质,建立由 9 个方向余弦组成的 6 个正交条件作为限制条件。由正交条件得到的线性化条件方程式见式(7),变量的具体形式参见文献[10]:

$$\mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{W} = 0 \tag{7}$$

按照附有限制条件的间接平差法,采用 Givens 正交变换^[12]解算式(6)和式(7),就可解求出包括 9 个方向余弦值的 20 个未知数的 \mathbf{X} ,从而获取影像的内外方位元素、偏心距、线阵与旋转轴不平行的角度及光学镜头畸变参数等。

2 实验分析

本文用 Leica 公司 MAPTEK I-SITE 8800 的数字线阵全景相机,在全景三维控制场^[13]内采

集影像,利用控制点对线阵全景相机进行检校,然后利用全景相机的检校结果进行前方交会,相机检校模型和参数可通过空间前方交会的点位精度加以验证。

利用上述平差模型的检校结果见表 2。像点坐标残差(单位:pixel)放大 200 倍后的分布图见图 3。从图 3 中可以看出,该残差的分布没有系统性,说明消除了系统误差的影响。利用全景相机的检校结果再进行前方交会,检查点前方交会误差曲线图见图 4,检查点在 X 、 Y 、 Z 方向的中误差分别为 $M_X = 2.223\ 4\ \text{mm}$, $M_Y = 1.332\ 7\ \text{mm}$, $M_Z = 0.761\ 8\ \text{mm}$ 。由于两张全景影像上有部分点的交会角较差,即交会角太小或太大,从而影响了前方交会的精度,如图 3 中间部位的一列点的残差较大,其主要原因是这些点的交会角太小造成的,同样原因也造成了图 4 中个别点的检查精

度较差。

表 1 全景相机检校结果

Tab. 1 Panoramic Camera Calibration Results

参数	值	参数	值
X_c	13 258.202 1	a_1	-0.326 6
Y_c	6 914.175 5	a_2	0.945 1
Z_c	10 258.562 4	a_3	-0.000 9
f	2 295.510 2	b_1	-0.945 1
y_0	28.159 8	b_2	-0.326 6
E_U	-2.813 2	b_3	0.001 6
E_V	-1.308 2	c_1	0.001 2
g_x	$-5.540 7 \times 10^{-4}$	c_2	0.001 4
g_y	$6.062 7 \times 10^{-4}$	c_3	1.000 0
k_1	$-6.539 1 \times 10^{-8}$		
k_2	$-5.067 2 \times 10^{-15}$		

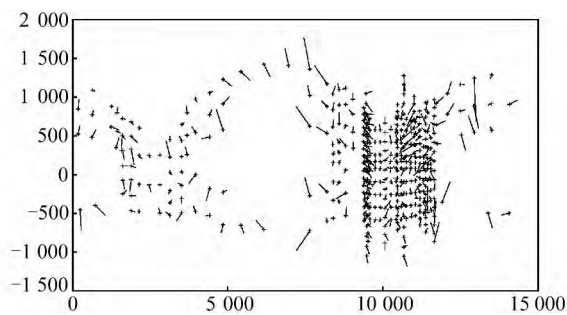


图 3 像点坐标残差分布图(残差放大 200 倍)

Fig. 3 Pixel Coordinates Residual Distributed (200 Times)

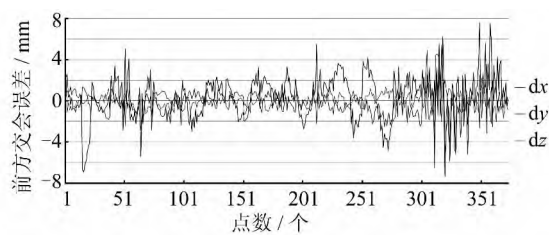


图 4 前方交会误差曲线图

Fig. 4 Error Curve of Intersection

从上述结果可以看出相机检校结果是可靠的,可验证平差函数模型的正确性,该模型参数选择合理,正确描述了线阵全景相机的内部结构关系,是线阵全景相机的一种实用检校模型。

3 结 语

全景相机是将线阵旋转来获取全景影像的,线阵的投影中心与旋转轴不重合,线阵也会与旋转轴不平行,成像过程中每条线阵影像的外方位元素随旋转轴的转动而不同。同时,由于镜头的光学畸变产生了像点位移,这些特点使线阵全景相机不能直接套用常规框幅式相机的成像模型与

平差模型。

本文以线阵全景相机成像模型为基础,在加入偏心距、线阵与旋转轴不平行和镜头畸变等系统误差后,推导了全景相机的平差模型。然后分别用模拟数据和实际数据对模型进行了验证,证明线阵全景相机的成像模型与平差模型正确,实际数据检查的中误差较小。但是,由于每张影像覆盖了 360° 场景,使得在不同摄站拍摄的影像上存在部分点交会角太小或太大的问题,导致这些点的精度较低,进一步研究将采用增加摄站数量、合理布设摄站位置等措施来提高物方点坐标的解算精度。

参 考 文 献

- [1] Parian J A, Gruen A. A Refined Sensor Model for Panoramic Cameras[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, 34(2): 19-22
- [2] Huang F, Wei S K, Klette R. Comparative Studies of Line-based Panoramic Camera Calibration[C]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Berlin, Germany, 2005
- [3] Wei S K, Huang F, Klette R. The Design of a Stereo Panorama Camera for Scenes of Dynamic Range[C]. *ICPR'2002*, Quebec, Canada, 2002
- [4] Li R, Yan L, Di K, et al. A New Ground-based Stereo Panoramic Scanning System[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37:5
- [5] Schneider D, Maas H G. Development and Application of an Extended Geometric Model for High Resolution Panoramic Cameras [C]. *Geo-Imagery Bridging Continents 20th ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, 2004
- [6] Schneider D, Maas H G. Combined Bundle Adjustment of Panoramic and Central Perspective Images [C]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Berlin, Germany, 2005
- [7] Schneider D, Maas H G. A Geometric Model for Linear-array-based Terrestrial Panoramic Cameras [J]. *The Photogrammetric Record*, 2006, 21 (115): 198-210
- [8] Chen Yi. New Computation Method of Collinearity Equation Suiting Digital Photogrammetry[J]. *Journal of Tongji University*, 2004, 32 (5): 660-663 (陈义. 数字摄影测量共线方程的一种新解法[J].

- 同济大学学报, 2004, 32(5): 660-663)
- [9] Chen Yi, Lu Jue, Zheng Bo. Research on Close-range Photogrammetry with Big Rotation Angle[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 4(11): 458-463, 468(陈义, 陆钰, 郑波. 近景摄影测量中大角度问题的探讨[J]. 测绘学报, 2008, 4(11): 458-463, 468)
- [10] Chen Yi, Shen Yunzhong, Liu Dajie. A Simplified Model of Three Dimensional-datum Transformation Adapted to Big Rotation Angle[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(12): 1 101-1 105(陈义, 沈云中, 刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准转换的一种简便模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(12): 1 101-1 105)
- [11] Lu Jue, Chen Yi, Zheng Bo. Research on Depend-ent Relative Orientation in Multi-baseline Close-range Photogrammetry[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(3): 442-447 (陆钰, 陈义, 郑波. 多基线近景摄影测量连续像对相对定向[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 442-447)
- [12] Li Deren, Zheng Zhaobao. Analytical Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992(李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1992)
- [13] Mei Wensheng, Xu Fang, Chen Xiao. Design and Establish of Panoramic Indoor 3D Control Field[J]. *Journal of Geomatics*, 2011, 36(6): 39-42, 45(梅文胜, 徐芳, 陈潇. 室内全景三维控制场设计与建立[J]. 测绘信息与工程, 2011, 36(6): 39-42, 45)

The Calibration Model of Linear Array Panoramic Cameras

XU Fang¹ MEI Wensheng¹ ZHANG Li¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Linear array panoramic cameras have enabled the acquisition of 360° panoramic scenes with linear CCD turning. It has used fewer camera stations and avoided image mosaicing in close-range photogrammetry. We developed a sensor and adjustment model function for linear array panoramic cameras. We demonstrate the models for simulated data and indoor panoramic 3D control field data. These experiments show that the parameters of model are logical and that these parameters accurately describe the relationship of the internal structure in the linear array panoramic camera. The model is a practical calibration model for linear array panoramic cameras.

Key words: linear array panoramic camera; calibration model; eccentricity; inclination and tilt of the linear array

First author: XU Fang, PhD, associated professor, specialized in the close-range photogrammetry and remote sensing image interpretation. E-mail: fxu@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41071292.

(上接第 416 页)

method by using the arithmetic of C5.0 decision tree. The new method was putted in practiced in remote sensing images with high resolution of GuangBa farm DongFang city, HaiNan Province. The results showed that the producer's accuracy, user's accuracy and total accuracy of rubber woods is are 81.00%, 82.65%, and 83.50% respectively, and the kappa coefficient is 0.78. The results that comparing with other classification methods indicated the method is valid for rubber woods identification.

Key words: remote sensing images with high resolution; rubber woods; information extraction; classification by decision tree

First Author: YANG Hongwei, associated professor, PhD candidate. He is interested in remote sensing imagery processing and application. E-mail: 40143704@qq.com

Foundation item: The Natural Science Fund of Hainan Province, No. 807019; The Youth Fund of Hainan University 2010, No. gnjj1024.