

附有约束条件的最小二乘影像匹配及其应用研究

Research on Multiphoto Collinear Condition Constrained Least Squares Matching and its Application

刘 荣^{1,2} 张祖勋¹ 张剑清¹

(武汉大学遥感信息工程学院 武汉430079)¹ (东华理工学院测量系 江西抚州344000)²

Abstract Image matching acts main role on digital image processing and computer vision. Least Squares Matching (LSM) is one of methods of image matching. The paper introduces some approaches of image matching and their advantages. The principle and method of calibration of digital camera are explored. Matching procedure and principle of multiphoto collinear condition constrained least squares matching are emphasized. Feasibility is proved by traffic accident. Compare with traditional method, multiphoto collinear condition constrained least squares matching has advantages in precision, automation, 3D visualization as well as efficiency and work situation.

Keywords Camera calibration, Image matching, Gross error detection, 3D visualization

数字摄影测量、计算机视觉的中心问题是在不同的影像中自动地提取相应的特征点即影像匹配。因此,影像匹配是当今数字图像处理、计算机视觉、机器视觉的热门课题。影像匹配的方法主要有:最小二乘影像匹配(LSM)(Ackermann, 1986),基于特征影像匹配(FBM),多点匹配(MM),松弛法影像匹配,附有几何约束的多影像匹配(B. Baltasvius, 1991)等。每种影像匹配法都有各自的特点。附有约束条件的最小二乘影像匹配是结合了共线条件与最小二乘影像匹配的一种匹配形式。它在地面、近景摄影测量中,有着广泛应用前景。尤其在交通事故的处理与分析、城市建筑物的变形观测、城市的三维重建(Cybercity)、工业生产自动化、监测等方面应用潜力巨大。

所以它在3D工业测量、跟踪、机器人系统的标定和其他方面的应用都是至关重要的。另外一个原因是从3D空间信息推理2D影像坐标。所以相机的检测是进行以后数字图像处理的前期必要工作。

1.1 相机标定方法

为了满足摄影测量和机器视觉以及其他方面的需要,需要进行相机检测。相机的检测方法也有多种,主要有:

(1) 基于共线条件的解法

$$\begin{aligned} x-x_0 &= f \frac{a_1(X-X_1)+b_1(Y-Y_1)+c_1(Z-Z_1)}{a_3(X-X_1)+b_3(Y-Y_1)+c_3(Z-Z_1)} \\ y-y_0 &= f \frac{a_2(X-X_1)+b_2(Y-Y_1)+c_2(Z-Z_1)}{a_3(X-X_1)+b_3(Y-Y_1)+c_3(Z-Z_1)} \end{aligned} \quad (1)$$

利用一定的控制点,可以解算出 $(x_0, y_0, f, X_1, Y_1, Z_1, \varphi, \omega, \kappa)$ 参数。具体解算见文[2]。

(2) 直接线性变换法(DLT)

直接线性变换法,若理想像平面 (x', y') 与实际像平面 (x, y) 之间的变换表达仿射换:

$$\begin{cases} x' = a_1 + a_2x + a_3y \\ y' = \beta_1 + \beta_2x + \beta_3y \end{cases} \quad (2)$$

将(2)代入(1)整理得:

$$\begin{cases} x - \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} = 0 \\ y - \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

通过解求11个L参数来换算内外方位元素。具体解算见文[2]。其他相机检测方法,可以参考相关的文献。表1为Rollei可量测数字相机基于共线条件检测外方位元素的结果:

1 相机的检测

数字相机目前被广泛应用于近景摄影测量、机器视觉等领域。主要原因是由于数字相机获取的数字影像具有高分辨率、使用方便、快速影像传输与下载、图像的预处理等方面的优势。由于应用的目的不同,数字影像的分辨率也有不同的要求。因此,对数字相机质量要求也不同。目前市场上的数字相机主要有两种:可量测相机(高精度)与非量测相机。

在三维立体视觉中,摄影机的检测(标定)就是要确定相机的内部几何参数即内方位元素。对于可量测相机而言,其内方位元素是已知的,而非量测相机,其内方位元素需要进行测定。在双目或多目立体视觉中,确定了相机的几何参数(方位元素)后,就能从2D影像中推出物体的3D坐标。也就是说,我们能够通过空间交会,能确定物体、目标、特征的空间位置。

表1 Rollei 可量测数码相机基于共线条件检测外方元素

内方位元素	$x_s=0.210000$	$y_s=0.140000$	$f=10.570000$			
外方位元素	$X_s(\text{mm})$	$Y_s(\text{mm})$	$Z_s(\text{mm})$	Phi 弧度	omega 弧度	kapa 弧度
	-18.921448	112.639341	-48.175447	-0.007864	-0.012529	-0.008005
中误差	$M-X_s(\text{mm})$	$M-Y_s(\text{mm})$	$M-Z_s(\text{mm})$	$M\text{-Phi 弧度}$	$M\text{-Omega 弧度}$	$M\text{-Kapa 弧度}$
	4.562999	4.640810	0.918557	0.002019	0.002060	0.000361

2 附有约束条件的最小二乘影像匹配的原理

2.1 最小二乘影像匹配的原理

最小二乘影像匹配 (Least Squares Image Matching) 是德国 Ackermann 教授提出的, 它是一种基于“灰度差的平方和最小”。即:

$$\sum v v = \min \quad (4)$$

v 为灰度差, 当只考虑偶然误差时:

$$v = g_1(x, y) - g_2(x, y) \quad (5)$$

若引入系统变形的参数, 按 $\sum v v = \min$ 的原则, 求解变形参数, 就构成了最小二乘影像匹配。

2.2 带有共线条件约束的最小二乘影像匹配的原理

在地面摄影测量与近景摄影测量工作中, 多片影像匹配尤为重要, 因为它们通常需要多于两个影像才能完整地描述一个空间物体。怎样同时利用多个像对确定物点的空间坐标, 这就是带有共线条件约束的多片影像匹配。

设对同一物体摄取了 $n+1$ 个影像: $g_0(x, y), g_1(x, y), g_2(x, y), \dots, g_n(x, y)$, 以 $g_0(x, y)$ 为“目标影像”, 而其余的 n 个影像作为“搜索影像”。如图1所示:

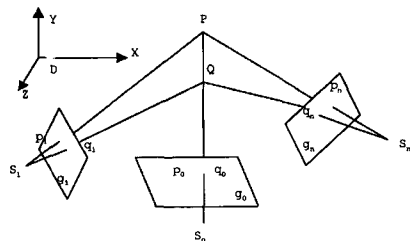


图1 多片影像匹配

现以 $q_0, q_1, \dots, q_n$ 为中心, 分别建立目标影像窗口与搜索影像窗口。对目标窗口与任何一个搜索窗口内每个像元素, 可按最小二乘影像算法, 建立误差方程式:

$$v_i(x, y) = g_i(a_{0i} + a_{1i}x + a_{2i}y, b_{0i} + b_{1i}x + b_{2i}y) - g_0(x, y) \quad (6)$$

线性化:

$$v_i(x, y) = C_i X_i - l_i(x, y) \quad \text{权: } p_i (i=1, 2, \dots, n)$$

$$n) \quad (7)$$

其中:

$$C_i = [g'_x \quad x g'_x \quad y g'_x \quad g'_y \quad x g'_y \quad y g'_y] \quad (8)$$

$$X_i^T = [da_{0i} \quad da_{1i} \quad da_{2i} \quad db_{0i} \quad db_{1i} \quad db_{2i}] \quad (9)$$

$$l_i(x, y) = g_0(x, y) - g_i(x, y) \quad (10)$$

假如目标窗口的大小为 $m \times m$, 则总共有 $n \times m \times m$ 个误差方程式, 有 $6 \times n$ 个未知数。上述多片的最小二乘影像匹配, 影像的几何变形参数没有任何的几何条件约束, 但影像上的像点 $p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$ 均为同一物点的影像, 因此物点 P 、像点 p_i 与摄影中心 S_i 应满足共线条件方程式:

$$\begin{aligned} x_i &= -f_i \frac{r_{11i}(X-X_n) + r_{21i}(Y-Y_n) + r_{31i}(Z-Z_n)}{r_{13i}(X-X_n) + r_{23i}(Y-Y_n) + r_{33i}(Z-Z_n)} \\ y_i &= -f_i \frac{r_{12i}(X-X_n) + r_{22i}(Y-Y_n) + r_{32i}(Z-Z_n)}{r_{13i}(X-X_n) + r_{23i}(Y-Y_n) + r_{33i}(Z-Z_n)} \end{aligned} \quad (11)$$

当影像的内外方位元素已知时, 则影像的像点坐标是物点坐标的函数:

$$\begin{aligned} x_i &= \varphi_i(X, Y, Z) \\ y_i &= \eta_i(X, Y, Z) \end{aligned} \quad (12)$$

将上述共线方程对物点坐标 (X, Y, Z) 线性化:

$$\begin{cases} \delta x_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial X} dX + \frac{\partial \varphi_i}{\partial Y} dY + \frac{\partial \varphi_i}{\partial Z} dZ + \varphi_i(X_0, Y_0, Z_0) - x_i \\ \delta y_i = \frac{\partial \eta_i}{\partial X} dX + \frac{\partial \eta_i}{\partial Y} dY + \frac{\partial \eta_i}{\partial Z} dZ + \eta_i(X_0, Y_0, Z_0) - y_i \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\delta x_i, \delta y_i$ 即为相应影像 $g_i(x, y)$ 上搜索窗口几何变形中的位移量 da_{0i} 与 db_{0i} , 因此, 以共线条件方程为基础的误差方程式:

$$\begin{aligned} v_{xi} &= -da_{0i} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial X} dX + \frac{\partial \varphi_i}{\partial Y} dY + \frac{\partial \varphi_i}{\partial Z} dZ - l_{xi} \\ v_{yi} &= -db_{0i} + \frac{\partial \eta_i}{\partial X} dX + \frac{\partial \eta_i}{\partial Y} dY + \frac{\partial \eta_i}{\partial Z} dZ - l_{yi} \end{aligned} \quad \text{权: } p_{xi} \quad (14)$$

将最小二乘影像匹配与共线条件方程两类误差方程式联合组成法方程, 从而在解算 n 个影像 $g_1(x, y), g_2(x, y), \dots, g_n(x, y)$ 与 $g_0(x, y)$ 的最小二乘匹配的同时, 要求满足共线条件方程, 且解出物点的空间坐标 (X, Y, Z) 。

3 在交通事故处理中的应用

在当今的信息社会, 最显著的标志就是信息的爆炸与技术的日新月异, 并由此导致了信息存储和处理的重大变革。如何有效地利用新技术来快速、准

确地处理交通事故,是全世界交通警察部门共同关注的问题。

传统的交通事故处理方法(国内外)主要过程见图2。

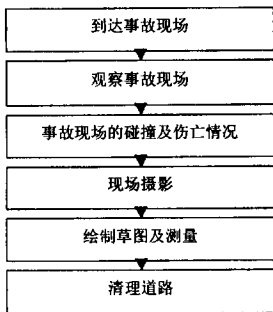


图2 传统交通事故处理过程

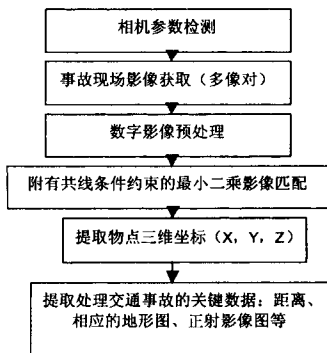


图3 附有共线条件约束的最小二乘影像匹配提取交通事故证据

这种方法一直占据着主导地位,但是由于道路的发展以及交通工具的多样化,这种方法有它一定的局限性,特别是在高速公路上的交通事故显得突出。因此,国外一些发达国家在交通事故的处理与分析方面采取一定的改进措施。如德国早在1995年就引入摄影测量与计算机技术(Walter and Braun, 1999)进行交通事故的调查,欧、美等发达国家也正在引入了摄影测量技术及计算机技术来进行交通事故处理。这种方法的出现,使得交通事故处理的信息及速度比以前都大有提高。与传统方法相比,基于附有约束条件最小二乘影像匹配的数字摄影测量技术的交通事故分析有着明显的优势:

(1)事故现场数据采集手段的多样化。传统方法数据的获取一定要到达事故现场很近的地方,如果

是高速公路出现交通事故,在现场量测会引起交通的堵塞,特别是比较繁忙的高速公路;

(2)事故现场处理时间短;

(3)交通事故处理数据通过计算机处理,得到的各项数据会更加准确可靠;

(4)可以精确地测绘事故现场的地形图等文件;

(5)能处理复杂的交通事故。

因此,基于附有约束条件最小二乘影像匹配的数字摄影测量技术进行交通事故分析是当今国内外进行研究的发展方向。我国在这方面的研究才刚刚起步,有些科研机构也进行了相关的研究,但都处于实验阶段。基于附有约束条件最小二乘影像匹配的数字摄影测量技术进行交通事故分析研究方案的提出,具有较好的技术基础、现实意义和广阔的应用前景。附有约束条件最小二乘影像匹配的数字摄影测量技术提取交通事故证据主要过程如图3所示。从理论基础来看,目前数字摄影测量技术比较成熟,尤其在测绘地形图、制作数字正射影像以及建立空间三维模型方面有明显的优势;其次,利用数码相机获取的数字影像,在数字影像匹配的算法、速度等方面也已有一定的基础。再引入附有约束条件最小二乘影像匹配技术,使得匹配更加精确可靠。

结论 带有共线条件约束的最小二乘影像匹配在地面与近景摄影测量是一种高效率、高精度的影像匹配方法。它在交通事故分析处理中的应用是传统方法无法比拟的。

(1)数字影像的形式多种多样,且速度快。数码相机可以安置在汽车上,甚至可以安置在直升机上(Y. Huang, 2001)。

(2)自动化程度高,劳动强度低。外业摄影后,主要数据处理是由计算机来完成的。

(3)精度高。交通事故处理分析许多相关数据要求的精度并不是特别高。象距离误差可达20厘米。而带有共线条件约束的最小二乘影像匹配获取的距离误差远远小于20厘米。

(4)用性好,而且投资少。除了用于处理交通事故外,还可以用于与其相关的领域,如建筑物的变形观测等。

因此,带有共线条件约束的最小二乘影像匹配技术在国民经济建设中有着广泛的应用前景。

参考文献

- 冯文康. 非地形摄影测量. 北京: 测绘出版社, 1985
- 李德仁, 郑肇基. 解析摄影测量基础. 北京: 测绘出版社, 1992
- 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- 王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社, 1983
- Harvey A. Photogrammetric Plans of Scale. Motorway Accident Scene. In: 5th Intl. RolleiMetric Police Workshop, 1999
- Baltsavias P. Multiphoto Geometrically Constrained Matching: [PhD, Dissertation]. Zurich, 1991
- Huang Y. Visualisation First, Modeling Second—A New Strategy for Photogrammetry. Proceedings of SOIE, 2001, 4309: 73~80
- Shortos M R, Ganci G. Calibration Stability of Digital Still Cameras for Industrial Inspection. International Conference on Measurement Science, Technology, Practice, Melbourne, Australia. 1997. 245~250