

论摄影测量与工程测量的结合 ——摄影全站仪+数码摄影机

张祖勋

(武汉大学 遥感信息工程学院,湖北 武汉 430079)

摘 要:主要讨论了摄影测量与工程测量集成的具体实现——摄影全站仪,系统阐述了摄影全站仪的几种工作方式、偏置量的检校、摄影全站仪的共线方程等,并提出控制片的概念,大大扩充了数字摄影测量的理论。摄影全站仪充分利用了摄影测量与工程测量的优势,无需在测量现场布设控制点标志,从而实现真正的无接触摄影测量。

关键词:摄影测量;工程测量;摄影全站仪;集成;控制片

Integration of Photogrammetry and Engineering Surveying —Photo Total Station and Digital Camera

ZHANG Zu-xun

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Photo Total Station (PTS) is the typical realization of integration of Photogrammetry and Engineering Surveying. Three working manners, calibration of off-set, collinearity equations of PTS are discussed. The conception of control image is put forward, which enriches the theory of digital Photogrammetry. PTS fully utilizes the advantages of photogrammetry and engineering surveying. It can do non-contact photogrammetry without any ground control points.

Key word: photogrammetry; engineering surveying; photo total station; integration; control image

0 引 言

3S 集成现在已经成为一个专用名词,但是随着各种传感器的不断发展,不同硬软件、数据的集成必将不断的扩大。因此,对 3S 集成应该理解为“三人为众”,3S 集成是“多系统集成”之意。本文主要通过数码相机与全站仪集成——摄影全站仪阐述摄影测量与工程测量集成。

通过 20 世纪 80~90 年代对数字摄影测量的研究、开发与应用,现在已经完全进入了数字摄影测量时代,数字摄影测量工作站在中国的摄影测量生产中获得了普遍的推广。但是,至今数字摄影测量的发展基本上局限于航空与航天摄影测量,对工程测量中广泛应用的近景摄影测量涉及很少。虽然,摄影测量与近景摄影测量的基本理论是一样的,但是近景、地面摄影测量与航空、航天摄影测量有很大差异^[1],例如:摄影深度与高差,在近景摄影测量中,其测量的相对深度远远大于航空摄影测量的相对航高差;坡度的影响,航空摄影测量的平坦地区,在近景摄影测量中成为 90°的坡度;摄影的条件,在近景摄影测量中,无论是遮挡还是摄影场地的限制,问题要严重的多。因此,近景摄影测量所面向的实际情况远比航空与航天摄影测量复杂,后者十分规范,比较容易建立一套符合摄影测量生产的软件系统,但是欲开发一套通用的数字近景摄影

测量系统几乎是不可能的,这可能就是当今的数字摄影测量发展很少涉及近景摄影测量的原因之一。

另一方面,国际上对传统光学地面测量的量测相机(如曾被广泛应用的 UMK、P31 等)早已停止生产,这本身就说明了近景摄影测量发展的处境。目前,摄影已经广泛应用数码技术,不少测量工作者都想利用一般的数码相机、利用一般的数字摄影测量工作站(DPW)软件,实现地面摄影测量。但是,首先遇到的问题是相机检校,即获得相机内方位元素,使一般的专业数码相机成为“量测相机”。相机检校问题是一个摄影测量中的基本问题^[2],同时也是计算机视觉的热点^[3]。利用建筑物平行线信息,不需要事先测定任何控制点,同样能进行相机检校^[4]。其次,一般 DPW 难以满足近景摄影测量的各种复杂情况与要求,如何发展能够满足近景摄影测量的各种需求的数字摄影测量系统是一个迫切需要解决的问题。

在 GPS 广泛应用于工程测量领域中的今天,欲从根本上在工程测量领域中发挥数字摄影测量的优越性,研制、开发新的“传感器”与相应的软件是问题的关键。本文就数码相机与工程测量中广泛应用的全站仪有效地集成构成“摄影全站仪”,对摄影测量与工程测量的结合进行论述。摄影全站仪的发展必将能有效地促进数码相机在工程测量领域的应用,它也必将促进

数字摄影测量自身的理论和实践的发展。

1 摄影全站仪及无接触测绘

数码相机与全站仪集成主要可分为两种方案,如图 1 所示,一是数码相机与全站仪直接连接;二是将数码相机的成像芯片 CCD 与全站仪集成。

Laval 方案,如图 1(a)所示。早在 1999 年加拿大

Laval 大学的测量系就提出将数码相机与全站仪集成^[9],其连接方式是将数码相机跨接安置在全站仪的望远镜上方,它只能与望远镜在水平面内同步转动,数码相机主光轴永远水平(当全站仪被安置水平),并开发了相应的测图软件 CAP (Computer Assisted Photogrammetry)系统,如图 2 所示。



图 1 数码相机与全站仪集成的几种方案

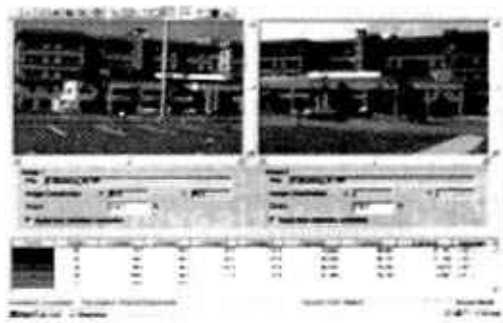


图 2 Laval 大学的 CAP 系统

朗视公司—武汉大学方案,如图 1(b)所示。2002 年武汉朗视公司与武汉大学遥感信息工程学院共同研制了一个摄影全站仪,它将德国 Rollei 数码量测相机(100 万像素:1 280×1 024)与全站仪的望远镜直接连接,数码量测相机可以与望远镜同步作水平角 α 、垂直角 β 运动。

另一类摄影全站仪,如图 1(c)所示。它是由拓普康生产的影像全站仪 GPT-7000i [GPT-7000i inf.e.pdf],它直接将两个成像芯片 CMOS 影像传感器集成在全站仪内,一台直接构成宽角 CCD 相机,另一个 CMOS 芯片安装在望远镜的系统中,后者与望远镜的物镜同轴。在照准目标点的同时,还可以对目标点(与其周围的物体)进行摄影。

测量,所需的视场角较大。纵然能安置,如拓普康 GPT-7000i 的望远镜同轴 CCD 影像,但由于其像幅小、视场角小,也不用于直接测图。这就产生了摄影全站仪的工作模式问题,还需要另一台大幅面摄影机;

2) 摄影机与望远镜的光学系统不同轴,如摄影全站仪望远镜上方的摄影机,见图 1(b)、GTP-7000i 的宽角 CCD 相机,见图 1(c),这就产生了摄影全站仪上摄影机的偏置量(off-set)的问题。

2.2 摄影机的偏置量(off-set)与检校

摄影全站仪作业应有三个坐标系:地面坐标系、全站仪坐标系与摄影机坐标系,按摄影测量的习惯,三个坐标系均为右手坐标系,如图 3 所示。由图 1(b),包括图 1(a)可知,摄影机坐标系 $S-xyz$ 与全站仪坐标系 $T-XYZ$ (为方便起见,它应与摄影机坐标系一致,设望远镜光轴为 Z 轴)不重叠,它们之间的差异称为摄影全站仪摄影机的偏置量——off-set: $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$,如图 4 所示。当摄影机安装在全站仪上,off-set 应该是个常数,它可以在线检校,即在外业作业过程中进行。

检校利用检校条(如图 5 所示)进行,十字的中心是反光纸片,用全站仪可以测定每个十字中心的坐标。对检校条摄影多张影像后,对影像提取十字中心,用自检校光束法平差,即可得到摄影机的偏置量——off-set: $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$ 。

2.3 摄影全站仪的共线方程

在此,假设望远镜指向“北”时,为全站仪坐标系的初始位置,如图 6 所示,因此全站仪坐标与地面坐标有如下关系:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} \quad (1)$$

而摄影测量坐标 $(x, y, -f)$ 与全站仪坐标 (X, Y, Z) 有

2 摄影全站仪的基本理论与试验

2.1 摄影全站仪的基本概念

航空摄影测量的 POS 系统可以测定摄影机在摄影瞬间的位置坐标与姿态角,欲不进行空中三角测量,直接测图^[9]。摄影全站仪的出发点是利用全站仪的位置坐标与方位角,无需控制点(control-point-free),测定相机在摄影时的位置坐标与姿态角,直接利用影像进行摄影测量测图,做到真正的测绘。因此,最理想的摄影全站仪是将 CCD 芯片安置与全站仪望远镜系统同轴,但是实际上有很多问题。

1) 望远镜与摄影测量一般所需的摄影机的物镜系统不同,前者是为了望远,视场角很小,后者是为了

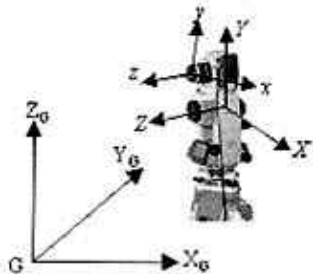


图 3 摄影全站仪的三个坐标系

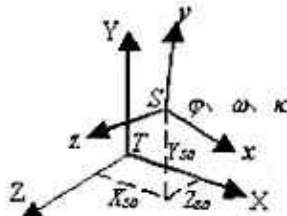


图 4 偏置量—off-set

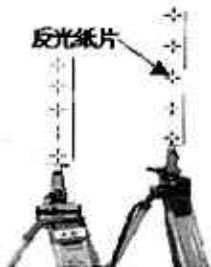


图 5 检校条

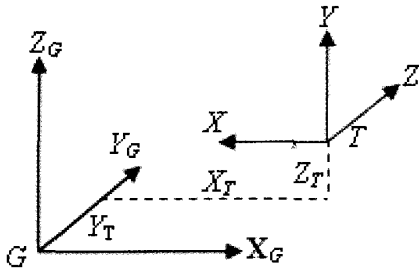


图 6 地面与全站仪坐标系

如下关系：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{S_0} \\ Y_{S_0} \\ Z_{S_0} \end{bmatrix} + \lambda R_{\varphi_0, \omega_0, \kappa_0} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， α, β 分别为全站仪的水平角、垂直角； $X_{S_0}, Y_{S_0}, Z_{S_0}$ 为 off-set 的三个平移分量； $R_{\varphi_0, \omega_0, \kappa_0}$ 为由 off-set 的三个转角所产生的正交矩阵。

合并式(1)和(2)即得摄影全站仪的共线方程：

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{-l_1 X' + m_1 Y' + n_1 Z'}{-l_3 X' + m_3 Y' + n_3 Z'} \\ y &= -f \frac{-l_2 X' + m_2 Y' + n_2 Z'}{-l_3 X' + m_3 Y' + n_3 Z'} \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ 为由 α, β 生成的正

交矩阵的九个系数； $l_1, l_2, l_3, m_1, m_2, m_3, n_1, n_2, n_3$ 为由 α, β 与 off-set 三个旋角联合生成的正交矩阵的九个系数；

$$\begin{aligned} X' &= (X_G - X_T) + (A_1 X_{S_0} + A_2 Y_{S_0} + A_3 Z_{S_0}) \\ Y' &= (Z_G - Z_T) + (B_1 X_{S_0} + B_2 Y_{S_0} + B_3 Z_{S_0}) \\ Z' &= (Y_G - Y_T) + (C_1 X_{S_0} + C_2 Y_{S_0} + C_3 Z_{S_0}) \end{aligned} \quad (4)$$

由于 off-set 是在测量的过程中用检校条在线检校， α, β 是全站仪的观测值， X_T, Y_T, Z_T 是测站坐标，因此，在全站仪导线测量、摄影全站仪摄影的外业工作完成后，共线方程的系数为已知，从而利用摄影测量的前方交会，即可由影像的同名点坐标求得对应地面点的坐标 X_G, Y_G, Z_G 。

2.4 摄影全站仪的试验与精度

对摄影全站仪进行了一系列的试验，具体试验及其精度可参考有关文献^[7]。

3 摄影全站仪的作业方式与控制片

3.1 摄影全站仪的三种作业方式

1) 作业方式一，所有测绘用的影像都是由摄影全站仪上的摄影机摄取，如图 7(a)所示，由于所有影像的外方位元素全部已知，因此可以直接用于测图。由于像幅小、设站多，故外业工作量大；

2) 作业方式二，由摄影全站仪施测的导线点减少，即摄影全站仪上的摄影机摄取的影像（称为控制片）减少，而控制片的影像间不一定有重叠部分，因此在导线点之间需要增加人工摄取影像，如图 7(b)所示；

3) 作业方式三与作业方式二相似，但是作业员可以用另外一台大幅面的数码相机摄影，如图 7(c)所示。

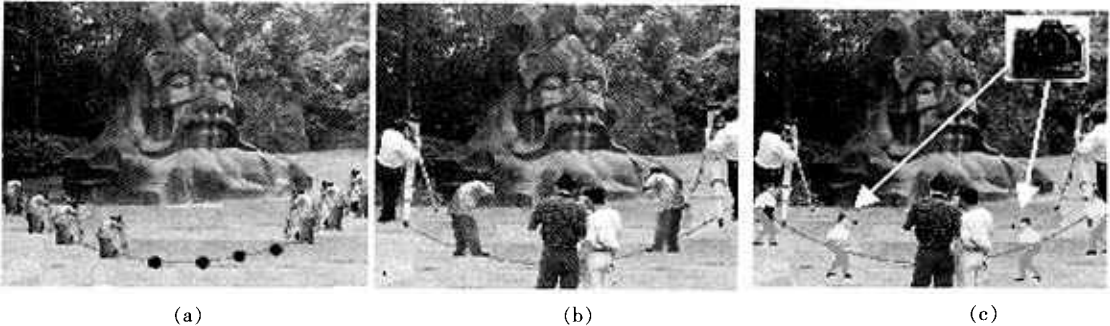


图 7 摄影全站仪的三种工作方式

目前,市场上商用的大幅面的数码相机主要用于一般专业摄影,它的像幅宽度与高度之比一般多为3:2,如Kodak Pro 14型相机,它是由4 500×3 000像素(13.89百万像素)组成,像幅的物理长度为36×24 mm²,它可以配置35,28,24,乃至14 mm的特宽角焦距物镜。当然,它是非量测相机,需要事先对相机进行检校。

3.2 控制片

在上述三种作业方式中,只有应用第一种作业方式时,无需空中三角测量,利用摄影全站仪上的摄影机摄取的影像,直接进行摄影测量DEM生产、测图等。但是,其余两种作业方式,只有少数为在摄影全站仪上摄取的影像(称为控制片),其余为人工手持摄影机摄取的影像,它们的外方位元素都是未知的。如何由控制片的已知外方位元素求得手持摄影机摄取影像的外方位元素?实际上,这还是一个空中三角测量的过程。

如图8所示, S_1, S_2, S_3 为控制片;1,2,3,4,5为未知外方位元素的测图片,将 $S_1, S_2, S_3, 1, 2, 3, 4, 5$ 一起



图8 利用控制片 S_1, S_2, S_3 进行空中三角测量

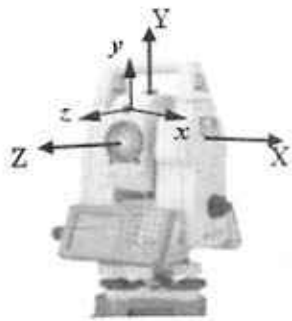
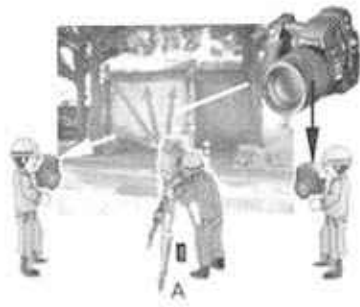


图9 GPT-7000i的 off-set



(a)



(b)

图10 GPT-7000i的两种工作模式

5 摄影全站仪广泛的应用前景

将数码相机与全站仪结合,能充分发挥工程测量与摄影测量的优势,它利用全站仪无棱镜测距,实现无接触测量,同时考虑到数字摄影测量能实现精确匹配,实现控制点识别的自动化。它必将极大地推动数字近景摄影测量的发展,为测绘开辟新的应用领域。

如传统的施工过程中的土方测量(如图11所示),它需要在施工现场布设标志点(图11中),它不仅仅影响施工,而且有一定的危险,但是使用摄影全站仪,测

进行空中三角测量(相对定向、模型连接、空中三角测量与平差)即能后得1,2,3,4,5的外方位元素。

4 拓普康的GPT-7000i影像全站仪

GPT-7000i由两个CMOS传感器组成的摄影传感器组成:30万像素,宽角CCD相机的焦距 $f=8$ mm;与望远镜同轴的CCD相机 $f=248.46$ mm

全站仪测量:无棱镜时的测距范围为1.5~250 m,精度为 ± 5 mm;有棱镜时的测距范围为3 000 m,精度为 $\pm(2$ mm+2 ppm);

其中,宽角CCD相机位于望远镜顶部,同摄影全站仪一样具有 off-set(偏置值)检校问题,如图9所示。

它具有两种作业模式:(1)宽角CCD相机进行粗略量测模式,如图10(a)所示,由于GPT-7000i上的相机只有30万像素,分辨率很低,因此它只能用于粗略测量;(2)精确测量模式,如图10(b)所示,它同样需要另外的一台高分辨率、大像幅的数码相机。

精确测量模式的实质是:无反射棱镜的全站仪测定控制点的 X, Y, Z ;用CCD相机记录下控制点的点位(影像);用大面阵、高分辨率的影像进行摄影测量。在进行摄影测量处理时,必须将CCD相机记录下控制点点位的影像与高分辨率的影像进行精确配准,这时才能利用控制点求得大幅面像片的方位元素,从而进行测图等。

量与施工就能做到“互不干扰”,边施工,边测量。

同样,摄影全站仪在矿石、塌陷测量、考古测量、房产测量与三维建模等方面也得到广泛的应用。

6 结束语

摄影全站仪是摄影测量与工程测量的结合,它充分利用两者最新发展的优势,无需在测量现场布设控制点标志,实现真正的无接触摄影测量,为测绘开辟新的应用领域。同时它还将促进摄影测量理论的发展,如利用全站仪与检校条进行检校 off-set,由传统控制点空中三角测量拓展到控制片等。 (下转第14页)

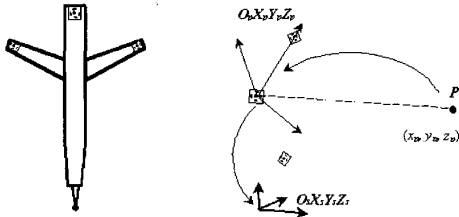


图5 光学测头

设测头坐标系为 $O_p X_p Y_p Z_p$ ，出测头上的编码标记点确定，测球在测头空间内的坐标通过适当的标定方法预先得到。测量时，测球接触被测点，通过测量光学测头上的光学编码标记，可以得到测量测头坐标系 $O_p X_p Y_p Z_p$ 和测量系统坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 之间的关系，因测球 P 在测头坐标系中的位置 (x_p, y_p, z_p) 已知，由此可以得到测球 P 在系统坐标系中的坐标。

采用光学测头技术，以点测量为基础，原则上可以实现通用的坐标测量，但这种测量方法对于某些，如平面、棱边直线、空间平面交点的测量应用效率较低。这些情况下，可以充分利用光学非接触自动测量的优点，设计专用测头，适应特定的被测对象，实现高效测量。

4 结 语

数字近景摄影视觉测量是建立在数字成像、图像处理与识别以及精密测量原理基础上的新型工业现场三维精密测量技术，目前该技术在一般工业测量范围内，已能实现工业经纬仪系统和激光干涉跟踪测量系统类似的测量精度，而测量自动化水平大大提高，呈现良好的应用前景。尤其是近几年，数字成像器件和以计

(上接第4页)

算机为基础的图像处理系统性能迅速提高，成本下降，使数字近景摄影视觉测量更具有发展潜力。

参考文献

- [1] Fraser, C.S., Innovation in Automation for Vision Metrology System[J]. Photogramm. Record, 1997.15(90):901-911.
- [2] Shortis, M. and Fraser, C.S., Current trends in close range optical 3D measurement for industrial and engineering applications[J]. Survey Review, 1991.31(242):188-200.
- [3] Beger, H., Digital Photogrammetry in Industrial Application [J]. IAPRS, 1995.30:373-378.
- [4] Ganci, G. and Shortisk, M.R., A comparison of the utility and efficiency of digital photogrammetry and industrial theodolite systems[M]. Austria: Proc. ISPRS Commission V, Working Group V/3 Vienna, 1996.
- [5] Tsai, R.Y., A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987.3(4):323-341.
- [6] Fraser, C.S., Digital camera self-calibration [J]. ISPRSJ. Photogramm. and Remote Sensing, 1997.52:149-159.
- [7] Trinder, J.C., Precision of digital target location [J]. Photogramm. and Remote Sensing, 1989.55(6):883-886.
- [8] Trinder, J., Jansa, J. and Huang, Y., An assessment of the precision and accuracy of methods of digital target location [J]. ISPRSJ. Photogramm. And Remote Sensing, 1995.50(2):12-20.

作者简介：郝继贵(1970-)，男，副教授，研究方向为激光及光电测试、视觉检测。



图11 传统的施工土方测量

参考文献

- [1] Mikhail E.M, Bethel J.S. McGlone J. C., Modern Photogrammetry[M], USA: JOHN WILEY & SONS. INC. 2001.
- [2] 冯文灏. 近景摄影测量-物体外形与运动的摄影法测定 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [3] 丘茂林, 马颂德, 李 毅. 计算机视觉中摄像机定标综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26, (1): 43.
- [4] 谢文寒, 张祖勋, 张剑清. 一种基于天点的相机标定方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, (11), 138.
- [5] Gravel C.; C. Larouche; and P.A. Gagnon, Integration of total station and digital camera [J]. Surveying with Images, Geomatics Info Magazine, 1999, 13(9): 6-7.

- [6] C. Heipke, K. Jacobsen, H. Wegmann, 2001, The OEEPE-Test on Integrated Sensor Orientation - Analysis of Results [A], German OEEPE -Workshop 17.9. -18.9.2001 Hannover, Germany Integrated Sensor Orientation
- [7] Z. Zhang, S. Zheng, Z. Zhang, Digital Terrestrial Photogrammetry with Photo Total Station [A]. Turkey: ISPRS, Istanbul 2004.

作者简介：张祖勋(1937-)，男，中国工程院院士，博士生导师，主要从事数字摄影测量、计算机视觉、遥感图像处理等教学和科研工作。